全国共同利用研究成果報告

第 13 号

平成21年度

九州大学応用力学研究所

発 刊 の 辞

応用力学研究所が 1997 年に全国共同利用研究所となって 13 年が経過しました。この間，毎年 60～80 件の共同研究が行われ，多くの成果が得られました。この報告書に示しますように，2009 年度も，特定研究 3 件を含む貴重な研究が数多く行われました。これらの成果の一部は，2010 年 6 月 4 日に開催される「RIAM フォーラム 2009」でも報告されます。また，この報告書は，応用力学研究所のホームページ（http://www.riam.kyushu-u.ac.jp）にも掲載されます。さらに，この報告書には掲載されていませんが，この他にも，同じ研究分野の研究者が応用力学研究所に集まり，掘り下げた討論を行う研究集会が 2009 年度は 15 件行われ，それぞれについて研究集会報告書としてまとめられています。

九州大学は 2004 年に国立大学法人として文部科学省から独立しました。応用力学研究所は，法人化後も引き続き，「力学に関する学理及びその応用の研究」を目的とする全国共同利用研究所として九州大学に附置され，重要な役割を与えられています。附置研究所は，大学を特徴づけ個性化する存在でもあります。

さらに、応用力学研究所は，2010 年度 4 月からは文部科学省により応用力学共同研究拠点の認定を受けて、力学とその応用に関する先端的課題に関し，国際的に高い水準の研究成果を挙げるとともに，21 世紀の人類にとって極めて重要な課題となっている，地球環境問題とエネルギー問題の解決に向けた研究に，理学と工学の両面から取り組むことになっています。

同時に，全国共同利用研究を基にして，全国および世界の研究者と連携し，力学とその応用の分野における世界的研究拠点となることを目指します。

これからも応用力学研究所が一層発展し，日本のみならず世界の学術研究の重要な拠点であり続けることができますように，全国の研究者の方々からのより一層のご支援・ご指導・ご鞭撻をよろしくお願いいたします。

2010 年 3 月
九州大学応用力学研究所
所長　柳　哲雄

目　次

平成21年度共同研究一覧 ……i

平成21年度研究集会一覧 ……vii

力学分野共同研究成果報告 ……1

大気海洋分野共同研究成果報告 ……135

核融合プラズマ分野共同研究成果報告 ……247

平成２１年度共同研究一覧

力学分野

番　号	研　究　課　題		代 表 者 名	所内世話人 協 力 者 数	頁
特定研究					
	医療用インプラントと生体組織の力学的相互作用に関する研究		統括責任者 東藤　貢		1
21特1-1	サブテーマ	生体吸収性材料の力学的特性に及ぼすひずみ速度及び加水分解の影響の解明	首都大学東京 小林　訓史	東藤　貢 4名	6
21特1-2		人工関節とバイオメカニクス・バイオマテリアル	佐賀大学 佛淵　孝夫	東藤　貢 6名	8
21特1-3		顎骨と歯科インプラントの力学的相互作用に関する研究	九州大学 松下　恭之	東藤　貢 3名	13
21特1-4		機械的負荷培養下の細胞による細胞外マトリックス組織形成に関する研究	九州大学 澤江　義則	森田　康之 4名	15
21特1-5		医療機器および医療材料等の計算力学および細胞培養システムを用いた有効性・安全性評価	国立医薬品食品衛生研究所 石川　格	東藤　貢 2名	16
21特1-6		医療用インプラントの接触解析に関する研究	上智大学 長嶋　利夫	東藤　貢 3名	18
21特1-7		力学刺激に対する細胞の応答機構の解明：生細胞内における歪みの時空間変化の測定	北海道大学 水谷　武臣	森田　康之 3名	20
21特1-8		生体吸収性材料の動的変形挙動の解明	名古屋工業大学 西田　政弘	東藤　貢 3名	22
21特1-9		カラードとカラーレス人工股関節の構造が大腿骨及び骨盤に及ぼす影響の分析	全南大学 全　仁　秀	東藤　貢 4名	24
21特1-10		バイオトライボロジ　シンポジウム	北里大学 馬渕　清資	東藤　貢 7名	26
21特1-11		生体硬組織の力学と機能	新潟大学 坂本　信	森田　康之 7名	33
21特1-12		下顎骨角部・顎関節突起部骨折と下顎第三大臼歯の状態との力学的相互作用に関する研究	九州大学 佐々木　匡理	東藤　貢 3名	37
21特1-13		人工骨による骨組織再生の生体力学的検討	大阪大学 名井　陽	東藤　貢 3名	39
21特1-14		咬合時における歯科インプラント周辺骨の変形解析	福岡県工業技術センター 内野　正和	森田　康之 3名	41
21特1-15		膝関節面接触の変化が衝撃荷重伝達に与える影響に関する研究	近畿大学 村瀬　晃平	東藤　貢 3名	43
一般研究					
21ME-1	音響放出による疑似音質/レジン界面の非破壊解析		韓陽大学 崔　洛三	新川　和夫 2名	46

21ME-2	船首形状変更による波浪中抵抗増加低減法に関する研究	広島大学 岩下　英嗣	胡　長　洪 2名	48
21ME-3	浅喫水船の波浪中抵抗増加に関する研究	大阪大学 柏木　正	胡　長　洪 4名	55
21ME-4	波力発電装置の一次変換性能に関する実験的研究	佐賀大学 永田　修一	胡　長洪 3名	58
21ME-5	トワイマン・グリーン干渉計を用いたレーザー誘起音響波の測定	豊橋技術科学大学 鈴木　新一	森田　康之 3名	60
21ME-6	非線形流体構造連成問題に対する効率的数値解析法の開発	九州大学 陳　　献	胡　長　洪 1名	62
21ME-7	散逸系における有限振幅波動の変調不安定性	高知工業高等専門学校 成行　泰裕	及川　正行 3名	64
21ME-8	光重合型コンポジットレジンの収縮挙動解析	兵庫県立大学 海津　浩一	新川　和夫 3名	66
21ME-9	カルコパイライト型化合物半導体太陽電池の作製	宮崎大学 吉野　賢二	柿本　浩一 6名	68
21ME-10	電磁波遮蔽材料の創製と性能評価	信州大学 倪　慶清	汪　文学 1名	72
21ME-11	MPS法によるタンク内流体挙動解析と数値積分による船体横揺れ予測の連成解法に関する研究	大阪大学 橋本　博公	末吉　誠 2名	74
21ME-12	波と浮体の非線形相互作用の解析に適した複合型数値計算法の開発に関する研究	防衛大学校 木原　一	末吉　誠 1名	76
21ME-13	潮流発電のための3翼ダリウス形水車の高性能化	九州大学 経塚　雄策	胡　長洪 2名	78
21ME-14	地形上を伝播する非線形内部波の挙動の数値解析的研究	鹿児島大学 柿沼　太郎	辻　英一 3名	80

大気海洋分野

番　号	研　究　課　題		代 表 者 名	所内世話人 協 力 者 数	頁
特定研究					
	自律型水中ロボットの開発に関する研究		統括責任者 中村　昌彦	中村　昌彦	
21特2-1	サブテーマ	主翼独立制御型水中グライダーの自律制御に関する研究	大阪府立大学 有馬　正和	5名	135
21特2-2		水中ビークルの投入・回収方に関する研究	長崎大学 吉村　浩	5名	137
21特2-3		グライダー型海中ビークルの自律化に関する研究	九州大学 山口　悟	3名	139
21特2-4		水中ロボット開発手法を応用した絶滅海棲爬虫類の復元	北海道大学 西　弘嗣	2名	141

21特2-5		可変ベクトルプロペラを用いたハイブリッド型海中ロボットの運動制御に関する研究	佐世保工業高等専門学校 長嶋　豊	3名	143
21特2-6		次世代海中ビークルに働く流体力に関する研究	海洋研究開発機構 百留　忠洋	7名	145
21特2-7		水中マニピュレータを有する自律型水中ロボットの開発	九州工業大学 石井　和男	5名	146
一般研究					
21A0-1	対馬海峡を通過する栄養塩輸送量の経年変動に関する研究		名古屋大学 森本　昭彦	柳　哲雄 7名	149
21A0-2	海産ベントス浮遊幼生の輸送過程に関する数値シミュレーション		長崎大学 玉置　昭夫	柳　哲雄 3名	151
21A0-3	グリーン関数による窒素循環モデルの最適化		京都大学 小林　志保	広瀬　直毅 2名	153
21A0-4	風洞内自航試験による地面効果翼機の飛行安定性に関する研究		広島大学 岩下　英嗣	大屋　裕二 2名	155
21A0-5	直線翼垂直軸型風力タービンの過回転制御に関する研究		広島大学 岩下　英嗣	大屋　裕二 2名	163
21A0-6	北太平洋亜寒帯循環の変動とその機構		水産総合研究センター 伊藤　進一	吉川　裕 2名	171
21A0-7	定期旅客船を利用した能登半島輪島沖での対馬暖流モニタリング		石川県水産総合センター 大慶　則之	千手　智晴 2名	173
21A0-8	対馬海峡東水道における海洋循環変動		水産大学校 滝川 哲太郎	千手　智晴 2名	175
21A0-9	数値生態系モデルを用いた赤潮発生メカニズムの研究		神戸大学 林　美鶴	柳　哲雄 1名	177
21A0-10	対馬島陰の低気圧性渦周辺における栄養塩・プランクトン分布		水産大学校 鬼塚　剛	柳　哲雄 5名	179
21A0-11	日向灘における海況変動機構の解明		宮崎県水産試験場 渡慶次　力	柳　哲雄 1名	181
21A0-12	衛生データを利用した黄砂の発生・輸送過程の解析		国立環境研究所 原　由香里	鵜野 伊津志 5名	183
21A0-13	東アジア域のNOx排出と日本域への窒素栄養塩負荷に関する研究		大阪府立大学 坂東　博	鵜野 伊津志 6名	185
21A0-14	モデルと観測を統合した東アジア規模のオゾン・エアロゾル汚染に関する研究		海洋研究開発機構 山地　一代	鵜野 伊津志 6名	187
21A0-15	若狭湾の海洋モニタリングにむけた基礎研究		福井県立大学 兼田　淳史	千手　智晴 3名	189
21A0-16	東アジア域における大気エアロゾルの気候影響に関する研究		富山大学 青木　一真	竹村　俊彦 3名	191
21A0-17	日本海におけるスルメイカ漁場の予測技術の開発		石川県水産総合センター 四方　崇文	広瀬　直毅 2名	194
21A0-18	海洋大循環の力学、とくに中深層循環に及ぼす海岸・海底地形の影響に関する研究		北海道大学 水田　元太	増田　章 13名	196

21A0-19	化学的トレーサーを用いた東シナ海の水塊構造解析	富山大学 張　勁	松野　健 3名	198
21A0-20	定期旅客船による山口県沖合海域の表層水温観測	山口県水産研究センター 渡辺　俊輝	千手　智晴 1名	200
21A0-21	フェリーニューカメリアを利用した対馬海峡のクロロフィル変動に関する研究	名古屋大学 石坂　丞二	広瀬　直毅 5名	202
21A0-22	高レイノルズ数乱流境界層における壁面ぜん断応力の計測とその評価	名古屋大学 辻　義之	大屋　裕二 6名	204
21A0-23	“8”字型運動を行う長大弾性管模型の渦励振	大阪大学 千賀　英敬	中村　昌彦 3名	206
21A0-24	洋上風力発電装置が発生する転倒モーメントとそれによる浮体運動への影響	九州大学 経塚　雄策	大屋　裕二 3名	208
21A0-25	複雑形状の移動物体流れ解析の検証	理化学研究所 小野　謙二	大屋　裕二 2名	210
21A0-26	回転するサッカーボール・ラグビーボールに加わる空気力の測定のための風洞実験	福岡工業大学 溝田　武人	大屋　裕二 3名	212
21A0-27	風レンズ風車に適した風車翼の設計法の開発	九州大学 古川　雅人	大屋　裕二 2名	216

核融合プラズマ分野

番　号	研　究　課　題		代表者名	所内世話人 協力者数	頁
特定研究					
	マルチスケールのプラズマ・壁相互作用に関する研究		統括責任者 坂本　瑞樹	坂本　瑞樹	
21特3-1	サブテーマ	タングステン被覆壁材料中の水素同位体挙動	大阪大学 上田　良夫	4名	247
21特3-2		プラズマ対向壁面上に形成される不純物再堆積層の剥離に関するナノスケール解析	核融合科学研究所 時谷　政行	3名	249
21特3-3		プラズマ照射による炭素タイル表面の損耗・再堆積と水素同位体蓄積	徳島大学 大宅　薫	4名	251
21特3-4		プラズマ・壁相互作用における巨視的中性粒子輸送に関する研究	筑波大学 中嶋　洋輔	7名	253
21特3-5		プラズマ・壁相互作用による材料損傷プロセスのマルチスケールモデリング	京都大学 森下　和功	24名	255
21特3-6		マルチスケールでのプラズマ・壁相互作用の理解	京都大学 森下　和功	39名	257
21特3-7		D-He混合プラズマ照射したプラズマ対向材料の微視的損傷とその重水素吸蔵特性への影響	島根大学 宮本　光貴	6名	260
21特3-8		ダスト発生および移動現象に関する研究	核融合科学研究所 芦川　直子	4名	262

21特3-9		大域的な不純物輸送過程のモデリング	日本原子力研究開発機構 星野　一生	9名	264
21特3-10		ヘリウムプラズマ照射によるタングステン繊維状ナノ構造形成に関する研究	名古屋大学 大野　哲靖	7名	266
一般研究					
21FP-1		タングステン中の水素同位体挙動に及ぼすヘリウム同時照射影響	大阪大学 上田　良夫	渡辺　英雄 4名	268
21FP-2		ニューラルネットワークのQUESTプラズマ計測への応用	電気通信大学 竹田　辰興	中村　一男 1名	270
21FP-3		核燃焼プラズマ周辺における沿磁力線輸送の運動論シミュレーション研究	日本原子力研究開発機構 滝塚　知典	矢木　雅敏 5名	272
21FP-4		金属の損傷組織に及ぼすヘリウムと水素の影響	京都大学 徐　　虬	渡辺　英雄 3名	275
21FP-5		核融合炉材料の高温変形下の内部組織発達過程	核融合科学研究所 室賀　健夫	渡辺　英雄 3名	277
21FP-6		透過型電子顕微鏡を用いたLHDダイバータタイル表面層の微細構造解析	核融合科学研究所 時谷　政行	渡辺　英雄 3名	279
21FP-7		NDB法によるタングステンと銅との接合界面特性に及ぼすイオン照射効果の研究	茨城大学 車田　　亮	渡辺　英雄 2名	281
21FP-8		第一原理計算によるタングステン中のガス元素吸蔵および拡散の研究	日本原子力研究開発機構 山口　正剛	大澤　一人 2名	283
21FP-9		プラズマ輸送理論	核融合科学研究所 伊藤　公孝	矢木　雅敏 17名	285
21FP-10		核燃焼プラズマ統合コードにおける輸送と加熱・電流駆動のシミュレーション	京都大学 福山　淳	矢木　雅敏 10名	287
21FP-11		磁場閉じ込めプラズマ中の多スケール・多プロセス現象の理論・シミュレーション研究	日本原子力研究開発機構 石井　康友	矢木　雅敏 11名	289
21FP-12		核融合プラズマにおける連結階層マルチスケールシミュレーション研究	京都大学 岸本　泰明	矢木　雅敏 14名	291
21FP-13		物理的に無矛盾な渦電流計算機能を備えたプラズマ断面位置形状再構築システム（CCS）のSTプラズマ位置形状制御への適用検討	日本原子力研究開発機構 栗原　研一	中村　一男 6名	293
21FP-14		巨視的運動論的MHD現象解析用のトロイダル版ジャイロ運動論的粒子コードの開発	山口大学 内藤　裕志	矢木　雅敏 3名	297
21FP-15		銅合金に対する照射効果	東北大学 畠山　賢彦	渡辺　英雄 1名	298
21FP-16		圧力容器鋼の磁気特性に与えるイオン照射効果	岩手大学 鎌田　康寛	渡辺　英雄 3名	300
21FP-17		ジャイロトロンのミリ波散乱を用いた電子バーンシュタイン波動の直接計測	核融合科学研究所 久保　伸	出射　浩 3名	302
21FP-18		炭素・水素同位体、ヘリウム同時照射環境での金属-炭素複合堆積層表面における水素同位体滞留評価	静岡大学 奥野　健二	渡辺　英雄 8名	304
21FP-19		核融合材料中の水素拡散・捕獲挙動に関する研究	九州大学 田辺　哲朗	徳永　和俊 6名	306

21FP-20	酸化物・窒化物結晶における照射欠陥形成およびその安定性	九州大学 安田　和弘	渡辺　英雄 6名	308
21FP-21	ヘリコン波プラズマのイオンの力学的エネルギーと熱力学的エネルギーの評価	横浜国立大学 津島　晴	坂本　瑞樹 3名	310
21FP-22	中性粒子ビームを用いた球状トカマクプラズマの制御方式の検討	産業技術総合研究所 榊田　創	坂本　瑞樹 5名	312
21FP-23	QUEST に於ける RF による電流立ち上げ、加熱及び電流駆動の研究	日本原子力研究開発機構 上原　和也	花田　和明 2名	314
21FP-24	炭素および金属共堆積場におけるダスト形成過程に関する研究	金沢大学 上杉　喜彦	中村　一男 5名	318
21FP-25	ヘリウム照射したプラズマ診断用金属ミラー材の光学特性劣化挙動	島根大学 小野　興太郎	渡辺　英雄 5名	320
21FP-26	多相交流ポテンシャル場による対向壁プラズマの能動制御の試み	富山県立大学 松本　和憲	中村　一男 1名	322
21FP-27	球状トカマクにおけるペレット入射による不純物挙動の研究	大阪大学 岡田　成文	長谷川　真 4名	326
21FP-28	衝撃波プラズマからのノズル流による緩和時間差レーザーの特性研究	東京理科大学 小越　澄雄	長谷川　真 4名	328
21FP-29	結晶構造が複雑な個体材料における照射効果	琉球大学 岩切　宏友	渡辺　英雄 8名	330
21FP-30	QUESTにおけるプラズマ電流立ち上げ法の実験	東海大学 御手洗 修	中村　一男 1名	332
21FP-31	ステンレス鋼の照射誘起応力腐食割れ(IASCC)感受性に及ぼす応力付加重照射の影響に関する研究　その2	電力中央研究所 新井　拓	渡辺　英雄 2名	334
21FP-32	個体表面状態のシース熱流束に及ぼす影響の研究	大阪府立大学 松浦　寛人	坂本　瑞樹 4名	336
21FP-33	QUEST装置におけるリチウム原子偏光分光を用いたプラズマ電流計測	東京大学 四竈　泰一	図子　秀樹 2名	338
21FP-34	プラズマ対向材料の損耗・損傷評価	核融合科学研究所 芦川　直子	渡辺　英雄 7名	340

平成２１年度研究集会一覧

力学分野

番号	研究課題	代表者名	所内世話人 講演・参加者数	開催場所	開催日 (平成)	頁
21ME-S1	第2回 炭素系ナノ構造に関する基礎研究	九州大学 田中 悟	寒川 義裕 8件、22名	伊都キャンパス	22年 1月 29日	82
21ME-S2	地形のダイナミクスとパターン及び境界領域	北海道大学 柳田 達雄	岡村 誠 9件、17名	応用力学研究所	21年11月 25-26日	88
21ME-S3	強非線形流体・構造連成解析	大阪大学 柏木 正	胡 長洪 13件、25名	応用力学研究所	21年12月 11-12日	91
21ME-S4	乱流現象及び非平衡系の多様性と普遍性	筑波大学 吉田 恭	岡村 誠 23件、36名	応用力学研究所	21年11月 12-14日	97
21ME-S5	ナノ複合材料等次世代複合材料の創製及び評価	九州大学 宇田 暢秀	汪 文学 23件、50名	応用力学研究所	22年 1月 7-8日	102
21ME-S6	地球流体における波動と対流現象の力学	東京大学 新野 宏	和方 吉信 11件、34名	応用力学研究所	21年12月 21-22日	114
21ME-S7	非線形波動研究の現状と将来-次の10年への展望	宇都宮大学 矢嶋 徹	辻 英一 42件、86名	筑紫ホール	21年11月 19-21日	117
21ME-S8	応力・変位場計測法および解析法の基礎と応用に関する研究集会	福岡県工業技術センター 内野 正和	新川 和夫 14件、21名	西新プラザ	22年 1月 13-14日	125
21ME-S9	力学適応能、自己組織化能を有するバイオマテリアル-生体インターフェイスの創製	東北大学 佐々木啓一	高雄 善裕 9件、26名	東北大学	22年 3月 14日	130

大気海洋分野

番号	研究課題	代表者名	所内世話人 講演・参加者数	開催場所	開催日 (平成)	頁
21AO-S1	沿岸海域の物質循環と環境保全	広島大学 橋本 俊也	柳 哲雄 20件、40名	応用力学研究所	21年12月 1-2日	218
21AO-S2	海洋レーダを用いた海況監視システムの開発と応用	琉球大学 藤井 智史	吉川 裕 12件、36名	応用力学研究所	21年12月 16-17日	222
21AO-S3	日本海及び日本周辺海の海況モニタリングと波浪計測に関する研究集会	水産大学校 滝川 哲太郎	増田 章 10件、34名	応用力学研究所	21年12月 17-18日	228
21AO-S4	日本における里海概念の共有と深化	沖縄県八重山支庁 鹿熊 信一郎	柳 哲雄 13件、35名	応用力学研究所	21年10月 9日	231

核融合プラズマ分野

番号	研究課題	代表者名	所内世話人 講演・参加者数	開催場所	開催日 (平成)	頁
21FP-S1	核燃焼プラズマ統合コード研究会	京都大学 福山 淳	矢木 雅敏 25件、28名	応用力学研究所	21年12月 17-18日	342
21FP-S2	材料照射効果の基礎課程の解明	京都大学 義家 敏正	渡辺 英雄 19件、39名	応用力学研究所	21年 7月 9-10日	346

平成２１年度

力　学　分　野
共同研究成果報告

共同研究報告　特定研究

医療用インプラントと生体組織の力学的相互作用に関する研究

所内責任者　東藤　貢

標記特定研究は，一昨年度（平成 19 年度）から公募を開始したものであり，応用力学研究所としては初めての「生体医用工学」に関連した特定研究のテーマである．本年度は下記の１５のテーマについて共同研究・研究集会を実施し，以下に示すような成果をあげている．今年度が最終年度となるが，平成 19 年度から 3 年間に渡って実施してきた本特定研究と様々な学会での研究成果の発表を通して，応用力学研究所が我が国における医用工学の研究拠点の一つであることを十分示すことができたことを確信している．

21 特 1－1:生体吸収性材料の力学的特性に及ぼすひずみ速度及び加水分解の影響の解明

研究代表者：小林訓史（首都大学東京理工学研究科）

従来用いられてきている骨折固定材は，その多くが金属製であり，周囲組織の炎症や骨の弱化を防ぐために，治癒後速やかに体内から取り除く必要がある．そこで，患者の負担を低減するために，再手術を必要としない生体吸収性を有するポリ乳酸(PLA)を用いた骨折固定材が，現在臨床応用され，研究が行われている．

本研究では，PLA に熱処理や鍛造などを施し，機械的特性を調査し，PLA の更なる高強度化，高次構造の機械的特性に与える影響の解明を目的とする調査により鍛造法の有用性を証明し，PLA で実用的な機械的特性を持ったスクリューの製作を目標としている．

21 特 1－2:人工関節とバイオメカニクス・バイオマテリアル

研究代表者：佛淵孝夫（佐賀大学医学部）

本研究集会は，高齢化社会を迎えた我が国において医学的に特に重要なテーマの一つである「関節疾患」に対して，重度の患者に対する治療方法として用いられる「人工関節置換術」を研究課題としている．これまで，この分野で活躍されている医学系と工学系の両方から第一線の研究者をお招きし，現在では，学会等でも広く認知される研究集会へと発展している．本年度は，医学と工学の両分野から最先端の研究者による１４件の講演があった．参加者は講演者を含め大学，病院，企業より約４０名ほどの参加者があり，各講演とも活発な議論を展開して頂いた．

21 特 1－3:顎骨と歯科インプラントの力学的相互作用に関する研究

研究代表者：松下恭之（九州大学歯学研究院）

超高齢社会が到来した我が国において，歯や顎骨の衰えによる咬合機能の低下は非常に深刻な問題である．近年，歯が完全なあるいは部分的な欠損がある場合には，インプラント治療が施されるようになってきている．下顎骨に比べると上顎骨に対するインプラント治療はさまざまな問題を抱えており，特に上顎洞の存在や脆弱な骨構造がインプラント埋入をより困難にさせている．一般に，臨床現場において，埋入するインプラントの最適な本数については臨床医の経験に基づいて決定される．したがって，生体力学と計算力学の手法に基づいてインプラント治療をサポートするような方法が確立されれば，インプラント治療の理論づけが可能となるであろう．

そこで本研究では，上顎無歯顎患者の CT データをもとに 3 次元モデルを構築し，その患者についてインプラント本数と挿入位置を考慮し力学的評価を行うことを目的とした．具体的には，インプラント本数と荷重条件を変えて力学的安全性の評価を行った．

21 特 1－4:機械的負荷培養下の細胞による細胞外マトリックス組織形成に関する研究

研究代表者：澤江義則（九州大学工学研究院）

関節軟骨は関節面において骨表面を覆い，その荷重支持能や潤滑性等により可動関節の運動機能を支えている．その力学的機能は，軟骨細胞周囲に存在する細胞外基質(ECM) に強く依存している．再生軟骨組織の構築に際しては，組織中のコラーゲン線維網が，重要な役割を担っている．特にコラーゲン合成にはビタミンC (VC) が必要となる．現在までに代表的な VC であるアスコルビン酸 (AsA) の培地への添加濃度を増加させることにより，培養組織の弾性率が有意に上昇したが，高濃度において細胞毒性が発生した．そこで本研究では，細胞毒性の無い安定化 VC について，再生軟骨組織の機械的特性に与える影響を調べると共に，AsA と結果を比較した．本研究では，安定化 VC にリン酸化アスコルビン酸 (A2P) を用いた．

21 特 1－5:医療機器および医療材料等の計算力学および細胞培養システムを用いた有効性・安全性評価

研究代表者：石川　格（国立医薬品食品衛生研究所）

口腔外科では，癌により下顎骨の一部を切除した場合など，骨の欠損によって下顎骨の連結が保てなくなった際に，金属製のプレートを用いて骨の固定が行われている．この手術の際，湾曲した下顎骨に形状を合わせるため，プレートは医師の手により曲げられてから使用されている．一方，この手術に伴う後期合併症としてプレートの破損が生じることが報告されている．この破損では，手術の際の曲げ変形によって骨固定プレートが損傷を受けていることも要因の一つである可能性がある．そこで，本研究は，この変形操作による骨固定プレートへの影響を調べることを目的に，弾塑性有限要素解析によって骨固定プレートの塑性状態の解析を行った．解析に用いた骨固定プレートの形状モデルは，設計図やCADデータを開発元から得ることが困難であるため，実際の製品の形状を光学式３次元デジタイザで測定することで構築した．

21 特 1-6:医療用インプラントの接触解析に関する研究

研究代表者：長嶋利夫（上智大学理工学部）

医療分野においては、人工膝関節，髄内釘，歯科インプラントなどに代表される機械部品が人体内部に埋設され用いられるようになってきている．これらの部品の信頼性を確保するためには，部品内に発生する応力、ひずみ、変形分布を精度良く評価することが必要となる．これらの機械部品は生体骨の中に埋め込まれるため、部品と生体骨との接触を考慮する必要がある．構造解析において接触問題は境界非線形問題として分類され、たとえ材料が線形であったとしても接触面および接触圧を決定するためには一般に多くの繰り返し計算が必要となり、解を求めることが困難とされてきた．一方、最近の計算機の高精度化、数値シミュレーション技術の進歩により、大規模有限要素モデルを用いた接触解析が可能になりつつある．そこで本研究では、インプラントと生体骨との接触を考慮した有限要素解析モデルを作成し、汎用有限要素プログラムを用いた応力解析を実施し、解析手法や解析条件が結果に与える影響などを検討しながら、妥当な解析モデルの構築方法を確立することを目的とする．本研究の結果は、バイオメカニクスの観点から、医療における有効な知見を得ることに資することができる．

21 特 1-7:力学刺激に対する細胞の応答機構の解明:生細胞内における歪みの時空間変化の測定

研究代表者：水谷武臣（北海道大学先端生命科学研究院）

細胞内部の局所的な部分に生じる変化の協調機構を解明するためには、どこがどのように協調するのかを定量的に可視化する必要がある．そこで本研究では以下のことを目的とした．①細胞内に生じる変位分布解析の方法を確立し、②生きた細胞に刺激

を加えたときに細胞内で局所的に起こる変形を時空間的に観察する．細胞レベルの変形に最も関係が深いと考えられるactin 骨格の変位分布をデジタル画像相関法の適用により解析することを試みた．

21 特 1-8:生体吸収性高分子材料の動的変形挙動の解明

研究代表者：西田政弘（名古屋工業大学工工学部）

ポリ(L- 乳酸)（PLLA）の物性値は汎用樹脂に匹敵するものの，脆性的破壊挙動を示すため，最近では，延性を付与するためにPLLAにポリ（・・-カプロラクトン）(PCL)，ポリブチレンサクシネート(PBS)，ポリ(ブチレンサクシネート-co-ラクテート)(PBSL)などをブレンドした材料が検討・研究されている．しかし，PLLA ポリマーブレンドの動的力学挙動については，不明な部分が多い．本研究では，PLLA/PBSL ポリマーブレンドの応力—ひずみ線図を，万能試験機およびホプキンソン棒法を用いて測定し，基礎的な動的力学特性について明らかにすること，また，PLLA/PBSL ポリマーブレンドの耐衝撃特性について確認することを目的とした．

21 特 1-9:カラードとカラーレス人工股関節の構造が大腿骨及び骨盤に及ぼす影響の分析

研究代表者：全　仁秀（全南大学工学部）

Cementless hip joint prosthesis after THR (total hip replacement) is often subsided into the cancellous bone of femur under compressive loading arisen from body weight and gait. This phenomenon may occur additional damage to patients after THR. To prevent this problem, a femoral stem with collar is invented and used as an alternative to the stem without collar. Because of the collar shape, it is easy to expect that the stem with the collar does not easily subside into the femur. However, the actual biomechanical effect of the small collar on THR is hard to estimate from the intuition based on the empirical background.

21 特 1-10:バイオトライボロジ シンポジウム

研究代表者：馬渕清資（北里大学医療衛生学部）

生体関節は，摺動面の表層が関節軟骨で被覆されており，さらに関節液で潤滑されているため，優れた低摩擦性を示し70～80年程度の長期耐久性を有することが知られている．しかし，変形性関節症や関節リウマチが進行すると軟骨がすり減り，骨同士が直接接触することで鋭い痛みを伴うようになるため，病状が悪化した場合には歩行も困難となる．このような場合には，人工関節置換術を施すことで痛みは消え，軽度の運動も可能となるが，10～15年程度の耐久性しかなく，超高齢社会が到来した我が国において人工関節の耐久性の向上が必要となってきている．人工関節の耐久限界は，摺動面で発生する摩耗粉に起因して生じる骨との緩みの発生が主因であるため，摺動面を形成する，超高分子量ポリエチレン(UHMWPE)とセラミックスまたは金属，セラミックスとセラミックス，あるいは金属と金属が動的に接触する際の摩耗発生のメカニズム解明や耐久性に優れる材料の開発等に関する研究が進められている．近年，注目を集めている再生医療という観点からは，軟骨をin vitroで再生し，患部に移植する研究も進められ臨床応用も始まっている．このような状況の下，本研究集会は「関節の再建と再生のためのバイオトライボロジ」をメインテーマとし，関節や骨・軟骨に関する研究分野でご活躍の研究者にお集まり頂き，最新の研究成果を発表して頂き情報交換を行うことを目的として開催された．

21 特 1-11:生体硬組織の力学と機能

研究代表者：坂本　信（新潟大学医学部）

バイオメカニクスとは，生物・医歯学の諸分野と機械工学系の諸分野を統合することによって生まれた学際的研究分野と定義できる．つまり，生体や生体材料に作用する力を考究する学問と言える．そのバイオメカニクスの大きな特徴は，研究を臨床応用することを目的の一つとする点である．力学的知識が求められる整形外科学や歯科

学で，主に医師のみの発想だけで見事な手術や治療が行われているが，バイオメカニクスによる医歯学の基礎研究はもちろんのこと，基礎研究を何らかの形で臨床応用することを見据えながら研究を発展させることが，極めて重要なことだと考えている．したがって本研究集会は，バイオメカニクスを主なキーワードとし，医学と工学の両分野で活躍する研究者に，最新の研究内容について発表し議論してもらうことを目的とした．

21 特 1-12:下顎骨角部・顎関節突起部骨折と下顎第三大臼歯の状態との力学的相互作用に関する研究

研究代表者：佐々木匡理（九州大学附属病院）

下顎骨角部および顎関節突起部の骨折は顎口腔領域の外傷においては高頻度に認められる．これまで、これらの下顎骨骨折と下顎第三大臼歯の関連について様々な研究が行われており、下顎第三大臼歯の有無、埋伏方向と骨折頻度において臨床上有意な関連がみられることが報告されている．これらの問題には明らかに下顎第三大臼歯周囲における力学的環境が重要な影響を及ぼしており、これらの問題を解決するためには、同歯およびその周囲の骨組織の力学状態を明らかにすることが必要不可欠である．下顎骨に埋伏している下顎第三大臼歯は複雑な 3 次元構造と様々な埋伏方向を成しており、実験的にその応力状態を明らかにすることは現段階では不可能である．そこで本研究では、ヒト下顎骨の CT 画像をもとに下顎骨の 3 次元モデルを構築し、それとは別に構築を行った下顎第三大臼歯モデルを組み合わせることで、詳細な 3 次元下顎第三大臼歯・下顎骨モデルの構築を目指す．さらに、そのモデルに対して実際の筋肉との結合を表した境界条件を導入することで、実環境下に近い力学環境を実現し、静的および動的負荷下での応力解析を行い、下顎第三大臼歯、周囲の骨組織、ならびに界面での応力状態を明らかにすることを目的とした．

21 特 1-13:人工骨による骨組織再生の生体力学的検討

研究代表者：名井　陽（大阪大学医学系研究科）

腫瘍の切除や嚢胞等により骨に生じた大規模な欠損部は，そのままでは骨組織の自然な治癒は期待できないため，自家骨，他家骨，あるいは人工骨を利用した骨組織の再生が行われる．この中では自家骨が生体の拒否反応もなく最も理想的であるが，量的に限られているとともに，正常な骨を取り出して使用するため，健常な部位を傷つけるという問題がある．一方，人工骨は大量生産が可能であるが，骨組織の再生能に劣ることが問題である．最近では，生体親和性に優れる生体活性セラミックスを多孔質化することで，骨組織再生能を付与した人工骨が開発され臨床応用も進んでいる．また，より優れた骨組織の再生を目指し，in vitro でスキャホールドに幹細胞を播種し分化させ骨組織を再生後生体に移植する研究も進んでいる．本研究では，多孔質ハイドロキシアパタイト系人工骨をウサギ大腿骨に埋入し，骨再生状態の経時変化を調べた結果に対し，コンピュータ・シミュレーションの技術を用いて力学的な見地から解析し，得られた結果と実験結果と比較検討することで人工骨と骨組織の複合系の力学特性変化のメカニズムを明らかにすることを目的とした．

21 特 1-14:咬合時のおける歯科インプラント周辺骨の変形解析

研究代表者：内野正和（福岡県工業技術センター）

本研究では，皮質骨および海綿骨，すなわち骨の二層構造を模擬したSAWBONES 社製の骨モデルを使用した．この骨モデルに歯科インプラントのフィクスチャーを植立し，擬似咬合荷重を付与した．そして，デジタル画像相関法により変位・ひずみ分布を解析した．本報告では，フィクスチャーと骨が接着した歯科インプラントの一般的な固定形態であるオッセオインテグレーションを模擬したオッセオインテグレーテッドインプラント試験片，および近年，治療期間の短期化を目指し普及している即時負荷イ

ンプラント治療法を模擬した即時負荷インプラント試験片を作製し，両者におけるフィクスチャーと骨界面周辺の変位・ひずみ分布状態を比較検討した．

21 特 1-15：膝関節面接触の変化が衝撃荷重伝達に与える影響に関する研究

研究代表者：村瀬晃平（近畿大学工学部）

下肢関節は，日常生活における歩行や跳躍の影響を受け，他の関節に比べ動的・衝撃的な荷重負荷を与えられている．このため内外反あるいは屈曲など，関節面の条件変化により，静的な軽荷重でも体重の数倍，動的荷重下ではさらに大きな荷重変動が起こると予想される．膝関節は関節面に半月板や前後十字靭帯，膝蓋骨が介在するなど，他の各部関節に比べて複雑な構成をしており，歩行や跳躍時などのダイナミックな荷重支持を解明するためには，材料特性の異なる骨体と靭帯組織を組み合わせるとともに，下肢全体を再現した有限要素モデルを構築し，力学シミュレーションを行なう必要がある．本研究では，静的荷重と衝撃荷重による支持機構の違いや各姿勢における骨体内部の力学環境の変化，および衝撃負荷後の膝関節の挙動を調査した．また，材料定数などのパラメータがおよぼす影響についても検討した．

現在の医学の発展において理工学の果たす役割は重要であり，理工学無くしては医学の発展もあり得なかったといっても過言ではない．したがって，大学においても医学と理工学の連携は重要視されてきたが，医学と理工学の専門家の研究に対する意識の差等が問題となり，連携がなかなか進んでいないのが現状であった．ようやく最近になり，我が国トップレベルの大学において「生体工学」や「医用工学」を専門とする大学院が設立され，他大学もそれに追随してこの分野の研究が活発に推進されるようになってきている．そのような状況の中，本特定研究は，生体および医用工学における応用力学の役割を考えるためにスタートしたものであるが，実際，細胞，生体組織，そして人体そのものが「力学」的な環境下にあることを考えると，生体関連の研究には応用力学が活躍する場が数多く有ると言える．本特定研究を足がかりとして応用力学研究所における新しい研究領域「応用生体力学」が今後も育っていくことを期待してやまない．最後に，本研究提案を応用力学研究所の特定研究として設定し，積極的に推進していただく体制を整備して頂きましたことに対して深謝いたします．

生体吸収性材料の力学的特性に及ぼすひずみ速度及び加水分解の影響の解明

首都大学東京　大学院理工学研究科　小林訓史

1.緒言

従来用いられてきている骨折固定材は，その多くが金属製であり，周囲組織の炎症や骨の弱化を防ぐために，治癒後速やかに体内から取り除く必要がある．そこで，患者の負担を低減するために，再手術を必要としない生体吸収性を有するポリ乳酸(PLA)を用いた骨折固定材が，現在臨床応用され，研究が行われている．[1)]

過去の研究で，Shikinami らは，未焼成・未焼結 HA(u-HA)/PLLA 複合材料に鍛造を施し，u-HA を 50wt%含有した試験片において，非常に高い機械的性質を有する HA/PLLA 複合材料を開発した．Shikinami らは，それらの高強度は鍛造による複雑な分子配向の効果に起因するものであると報告している．[2)]

本研究では，PLA に熱処理や鍛造などを施し，機械的特性を調査し，PLA の更なる高強度化，高次構造の機械的特性に与える影響の解明を目的とする調査により鍛造法の有用性を証明し，PLA で実用的な機械的特性を持ったスクリューの製作を目標としている．

2. 実験方法

2-1 試験片作製

浙江海正生物材料股分有限公司（HISUN）製，REVODE 101 を射出成形機を用いて 100mm×10mm×4mm の形状に成形した．

2-2 鍛造によるスクリューの作製

鍛造によりスクリューを作製した．まず，試験温度（70℃及び 100℃）に熱した丸棒用金型に試験温度下に 10 分間放置した試験片をセットし，室温下で 300kN で 10 分間加圧した．それにより作製した丸棒をスクリュー用金型を使用して同様の手順で作製した．また，比較のため，先述した試験温度にて丸棒を作製した後に，スクリュー用金型による鍛造を施さず，丸棒を直接ダイス加工することにより切削により作製されたスクリューも準備し，そして結晶化度の比較のため，スクリュー作成時の試験温度暴露時間に対応した熱処理を施した試験片も準備した．他にも強度比較のため，鋳造により作成したスクリューも作成した．このスクリューには鍛造は施されていない．

2-3 引き抜き試験

作製したスクリューを㈱島津製作所製，AGS-1000A と専用の治具を使用して引き抜き試験を行った．評価部は片端 5mm で，もう片方の端部にはつかみ部での応力集中を防ぐためタブを貼り付けた．負荷速度は 0.5mm/min で行った．引き抜き強度は以下の式を用いて算出した．

$$S_P = \frac{F}{\pi dl}$$

ここで，F は最大荷重，d は試験片谷径，l は評価部長さである．

2-4 せん断試験

作成したスクリューを㈱島津製作所製，AGS-1000A と専用の治具を使用してせん断強度測定を行った．負荷速度は 0.5mm/min で行った．引き抜き強度は以下の式を用いて算出した．

$$S_s = \frac{F}{2A}$$

ここで，F は最大荷重，A は試験片の有効断面積である．

3. 実験結果及び考察

3-1 スクリューの成形

70℃及び 100℃の両試験温度にて非常に良好なスクリューが成形された．しかし，治具の構造上バリが生成してしまい，スクリューとして扱うためにはダイス加工が必要である．

3-2 スクリューの引き抜き強度

Fig. 1 に各種スクリューの引き抜き強度を示す．70℃と 100℃では概して 70℃のものの方が引き抜き強度が高いと言う結果が得られた．加工スクリューと鍛造スクリューに関しては，70℃では鍛造スクリューが，100℃では加工スクリューの方が高いと言う結果となった．しかし，100℃のものでも最大強度値は鍛造スクリューの方が高い結果を示しており，両試験温度での鍛造の有用性が示された．

また，一部試験片がスクリューが引き抜かれる前に引張破断した．これは引き抜き強度のばらつきが大きく，スクリューの引張強度以上の引き抜き強度を持つスクリューも存在した，または，応力がねじ山に集中せずに破断したなどの原因が考えられる．

3-3 スクリューのせん断強度

Fig. 2 に各種スクリューのせん断強度を示す．試験温度間の比較では，引き抜き強度と同じく，概して 70℃の方が強度が高いと言う結果が得られた．加工スクリューと鍛造スクリューに関しては両試験温度共に鍛造スクリューの方が高いと言う結果となった．また，鋳造により作成したスクリューは鍛造スクリュー，加工スクリューよりもはるかに低い強度を示し，鍛造の有用性が示された．

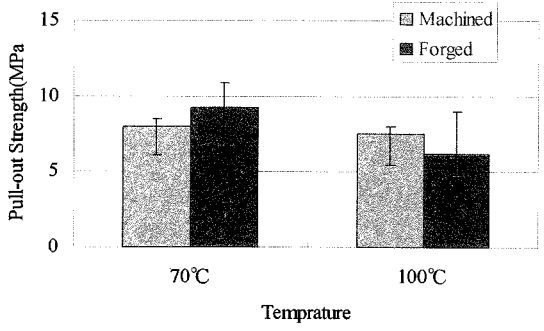


Fig. 1 Pull-out strength of screws.

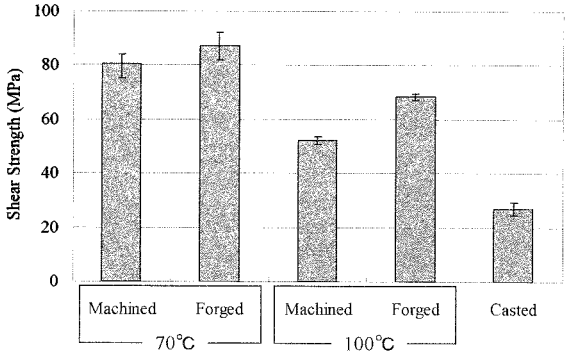


Fig. 2 Shear strength of screws.

4. 結言

スクリュー引き抜き試験では，70℃の方が 100℃よりも強度が高く，70℃では鍛造スクリュー，100℃では加工スクリューの強度が高くなった．スクリュー引き抜き試験では，一部の試験片が引張破壊した．そのため一部の試験片では引き抜き強度が非常に高くなっているものと思われる．スクリューせん断試験では 70℃の方が，100℃よりも強度が高く，両試験温度で鍛造スクリューの方が強度が高くなった．また，鋳造により作成したスクリューは非常に強度が低い．

5. 参考文献

1) 坂本和紀 リン酸三カルシウム/ポリ L 乳酸複合材料の力学的特性及び *in vitro* 分解特性評価 成形加工'06 P65-66

2) Y.Shikinami, M.Okuno "Bioresorbable devices made of forged composites of hydroxyapatite (HA) particles and poly-L-lactide (PLLA): Part I. Basic characteristics" Biomaterials 20(1999)859-877

3) T. Pohjonen, P. Helevirta et. al. "Strength retention of self-reinforced poly-L-lactide screws. A comparison of comparison moulded and machine cut screws." Journal of material science: materials in medicine 8(1997) 311-320

6. 関連する学会発表・論文

1) 内藤克仁，小林訓史，" 射出成形したポリ乳酸/ポリブチレンサクシネートブレンドの力学的特性評価"，成形加工 09，2009 年 6 月，pp.55-56

2) 山本達郎，小林訓史，" 鍛造を施したポリ乳酸の力学的特性"，成形加工 09，2009 年 6 月，pp.59-60

3) 小林訓史，山地周作，" リン酸三カルシウム/ポリ乳酸複合材料の力学的挙動の損傷力学解析"，日本実験力学会講演論文集 2009 年度年次大会， 2009 年 8 月，pp. 149-150

4) 小林訓史，山地周作，" リン酸三カルシウム/ポリ乳酸複合材料の力学的特性に及ぼすひずみ速度の影響"，第 14 回破壊力学シンポジウム講演論文集，2009 年 10 月，pp. 98-99

5) 小林訓史，" ポリ乳酸スクリューの成形とその特性評価"，成形加工シンポジア 09，2009 年 11 月，pp.201-202

6) 小林訓史，東藤貢，" **ポリ乳酸系ポリマーブレンドの力学的特性評価**"，第 242 回 材料試験技術シンポジウム，2010 年 1 月

人工関節のバイオメカニクスとバイオマテリアル

研究代表者
佐賀大学医学部　佛淵孝夫

1. 序　言

約 40 年前，英国の Charnley が低摩耗の人工股関節を開発して以来，人工関節医療は発展を遂げてきた．疾病や外傷などにより股関節や膝関節の機能が失われ，歩行や移動に困難を来たした人々に対して，我が国では年間 10 万件以上の人工股関節置換術が行われている．人工関節の意義は破壊されその機能を失った関節を人工物で再建させることにある．求められる機能とは無痛性，支持性，可動性と耐久性であろう．さらに安全で正確な手術が求められることは言うまでもない．

佐賀大学医学部付属病院の人工関節置換術の実施実績は 2005 年には７５０件を数え，大学病院としては突出しており，この分野では我が国の中心的センターとなっている．この実績に支えられ，佐賀大学医学部・理工学部と九州大学応用力学研究所を中心に，より高性能で和式の生活に対応した人工関節と周辺機器とそれらの評価法を開発すべく，2003 年より「プロジェクト：人工関節」を立ち上げ，すでに 2 件の実用化と 4 件の特許申請を行ってきた．2005 年 1 月より佐賀大学医学部内に JMM（日本メディカルマテリアル）の支援により，全国初の寄附講座「人工関節学」が設置され，人工関節研究のさらなる推進と研究成果の実用化，企業化が期待されている．

現在，我々が取り組んでいる最初のテーマは「和式生活に対応した人工関節の開発」である．このテーマを実現するためには医学，工学，看護学，社会福祉学，心理学，教育学などの学際的な叡智を結集し，さらには産学官一体となった取り組みが不可欠であると考えている．

今回，昨年に引き続き本研究集会を開催できたことは感銘深いことである．研究集会開催にご協力いただいたプロジェクト関係の諸先生方，ならびに遠方よりご参加いただいた各先生方に心より深謝申し上げます．

2. プログラム

開催日時：９月２６日（土）10：00～17：00
会　場：九州大学西新プラザ（福岡市早良区西新 2-16-23，TEL 092-831-8104）

10:00－10:10　開会の辞　佛淵孝夫（佐賀大学医学部整形外科）

セッション1　バイオメカニクス1　司会：廣川俊二（九大工）

10:10－10:25「THA 患者モビリティデータベースの構築」
堀川悦夫（佐賀大医），森園亮，福嶋利浩，床島絵美，田中里紀，園畑素樹
馬渡正明，佛淵孝夫

10:25－10:40「股関節周りの筋力を考慮した人工股関節の脱臼に関する研究」
林　喜章（佐賀大理工），木口量夫

10:40－10:55「Bisurface人工膝関節における深屈曲時の応力変動に及ぼす内旋の影響」
東藤　貢（九大応研）

10:55－11:05　休憩（10 分）

セッション2　バイオマテリアル1　司会：野田岩男（JMM）

11:05－11:20「Suitable Evaluation Method for in Vitro Antibacterial Activity of Biomaterials: 2nd Report」
Y. Ando (Med. School, Saga Univ.), H. Miyamoto, I. Noda(JMM)
T. Shimazaki (Med. School, Kyushu Univ.), Y. Yonekura, M. Miyazaki
M. Mawatari, T. Hotokebuchi

11:20－11:35 「チタン酸ナトリウムナノファイバー薄膜の抗菌性評価」
井上侑子(佐賀大理工), 矢田光徳, 鳥飼紀雄, 渡孝則, 野田岩男(JMM)
佛淵孝夫(佐賀大医)

11:35－11:40 休憩(5 分)

特別講演1 司会:東藤 貢(九大応力研)

11:40－12:20 「人体動作の計測とシミュレーション」
村瀬 晃平(近畿大工学部)

12:20－13:20 昼食休憩(60 分)

特別講演2(日本複合材料学会西部支部特別講演) 司会:東藤 貢(九大応力研)

13:20－14:00 「最近の整形外科用材料と機能向上」
松下富春(中部大生命健康科学部)

14:00－14:40 「医療機器評価関連の現状」
堤 定美 (日本大歯学部, 京都大名誉教授)

14:40－14:50 休憩(10 分)

セッション3 バイオマテリアル2 司会:馬渡正明(佐賀大医)

14:50－15:05 「Next Generation Antibacterial HA Coating －Antibacterial Activity of Ag Ions in Serum－」
I. Noda (JMM), Y. Ando (Med. School, Saga Unv., JMM), H. Miyamoto, T. Shimazaki
Y. Yonekura, M. Miyazaki, M. Mawatari, T. Hotokebuchi

15:05－15:20 「In Vivo Ability of Novel Thermal Sprayed Antibacterial Coating to Sterize Methicilin-Resistant *Staphylococcus Aureus*」
T. Shimazaki(Med. School, Saga Univ.), M. Mawatari, H. Miyamoto
Y. Ando, I. Noda(JMM), Y. Yonekura(Med. School, Saga Univ.), S. Kawano
M. Miyazaki, M. Sonohata, T. Hotokebuchi

15:20－15:35 「Antibacterial Activity of Heated and Hydrtrated Dolomite Powder」
Y. Yonekura(Med. School, Saga Univ.), H. Miyamoto, Y. Ando
T. Shimazaki, I. Noda(JMM), S. Kawano(Med. School, Saga Univ.)
M. Sonohata, M. Mawatari, T. Hotokebuchi

15:35－15:45 休憩(10 分)

セッション4 バイオメカニクス2 司会:木口量夫(佐賀大理工)

15:45－16:15 「高・深屈曲対応型人工膝関節の運動形態と接触応力の評価」
廣川俊二(九大工), 長谷川満彰, 河野谷仁

16:15－16:30 「人工膝関節置換状態の有限要素法解析」
萩原世也(佐賀大理工)

16:30－16:45 「完全屈曲型人工膝関節の膝受動動作シミュレータを用いた力学評価」
高野恭寿 (佐賀理工, JMM), 上野 勝 (JMM), 木口量夫 (佐賀大理工)
井手衆哉 (佐賀大医), 馬渡 正明, 佛淵 孝夫

16:45－16:55 **閉会の辞** 東藤 貢(九州大学応用力学研究所)

3. 講演の概要

(1) 「THA 患者モビリティデータベースの構築」堀川悦夫

人工股関節形成術 (THA) の対象となった患者の術前・術後の歩行の変化を適切に評価することは, THA の評価のみならず, 患者の QOL (生活の質) の評価においても有効な指標となる. 本講演者は, これまで佐賀大学整形外科における THA 患者の歩行計測を行ってきているが, 昨年から歩行動作などを含む総合的移動能力を解析するため, THA 患者モビリティデータベ

ースの構築を行っている．本講演では本データベースについて紹介がなされた．

(2)「股関節周りの筋力を考慮した人工股関節の脱臼に関する研究」　林 喜章

人工股関節置換術（Total hip arthroplasty, THA）は，変形性股関節症や関節リウマチなどによる痛みや運動機能障害を改善するための最も効果的な治療法の一つであるが，インプラントの摩耗や破損，緩み，脱臼などの解決すべき問題が残されている．これらの問題と日常生活動作との力学的関係を明らかにすることは，THA患者の術前計画や術後の生活指導，人工股関節の設計・開発を行う上で重要である．このため，人工股関節の性能を評価する股関節シミュレータの開発が行われている．しかし，これまでシミュレータでは股関節周りの筋力の影響は考慮されていなかったので，股関節周りの筋力を考慮したうえで人工股関節の脱臼について考察する．

(3)「Bisurface人工膝関節における深屈曲時の応力変動に及ぼす内旋の影響」　東藤　貢

JMM の KU モデルに代表される Bisurface タイプ人工膝関節は，ball-socket 構造を有することを最大の特徴とし，高屈曲位では ball-socket 構造が主要な摺動部となることで屈曲性を向上させている．最近では，Bisurface 構造を発展させ，特に深屈曲状態での動作性を向上させた CFK モデルが提案され，実用化を目指して研究が進んでいる．また，CFK では ball-socket 構造に加えて，KU にはない post-cam 構造を有することを特徴としている．

本研究では，代表的 Bisurface モデルである KU と CFK について，非線形ばねモデルを用いた簡易解析モデルを用いて，スクワット状態を模擬した深屈曲動作状態での応力解析を行い，特に屈曲に内旋をともなう場合の応力状態の変化を調べることを目的とした．

(4)「Suitable Evaluation Method for in Vitro Antibacterial Activity of Biomaterials: 2nd Report」
Y. Ando

Bacterial infections related to orthopaedic implants is one of the serious types of complications. Recently, there has been a greater interest in antibacterial biomaterials. However, antibacterial evaluations of each material are inconsistant, so intercomparison of the antibacterial performance is difficult. At the ISTA 2008, we proposed to apply the Japanease Standard test (JIS Z 2801) with some modifications using Fetal Bovine Serum (FBS) as a culture medium and cultured at 37°C, as an evaluation method for in vitro antibacterial activity of biomaterials. In this study, we evaluated the antibacterial activities of bone cements containing antibacterial components by this modified JIS Z2801 test.

(5)「チタン酸ナトリウムナノファイバー薄膜の抗菌性評価」　井上侑子

人工関節等を用いた整形外科手術における感染は大きな問題である．演者らは，水熱反応と銀イオン交換処理により金属チタンの表面に種々のナノ構造（不定形やナノチューブなど）を有する銀－チタン酸銀ナノ複合体薄膜を形成する技術を開発し，本研究集会にて薄膜の高い抗菌性能を報告してきた．今回は，銀を含まないチタン酸ナトリウムナノファイバー薄膜の高い抗菌性について報告がなされた．

(6)「人体動作の計測とシミュレーション」　村瀬 晃平

現在開発中の屋外型モーションキャプチャシステムを用いて，機械化工場内でおこなわれる重量物の持ち上げ作業とバーチャルヒューマンモデルを組み合わせ，生体内部で発生する力学環境についてシミュレーションを行った結果について報告がなされた．あわせて生体シミュレーション時における軟組織への特性入力支援として，触覚デバイスと有限要素解析を組み合わせたシステムについても紹介がなされた．

(7)「最近の整形外科用材料と機能向上」　松下富春

高齢者人口の増加と共に，運動機能低下を補うために各種人工材料を用いた体内埋め込み

機器（人工関節や人工骨など）が重要な役割を果たしており，体内埋め込み機器の需要が世界的に拡大し，それらの高機能化が図られてきた．先進的な長期耐用型体内埋め込み機器においては，① 生体に優しい金属材料に，② 体内埋め込み機器の適応部位に応じた機能を保有させ，③安全性の保証，高性能化，高機能化等を達成することが重要な技術課題である。一度埋植された機器が周囲の組織に悪影響を与えることなく，長期耐用の機能と効果を備えていれば，再手術の必要もなく，低侵襲の治療が実現し，患者にとっては苦痛が少なく，しかも少ない治療費で安心した生活を取り戻すことが可能になる．

(8)「医療機器評価関連の現状」　堤　定美

インプラントなど医療機器材料に関わる規格，基準を定めている国際的な標準化団体の中で最も代表的なものは，国際標準化機構(ISO)と米国材料試験協会(ASTM)であろう．筆者はISO/TC150（外科用インプラント専門委員会）の国内検討委員会の委員長として当委員会の活動を報告することが責務であり，同時に標準化への理解と支援を要請する目的で本稿を纏める．

(9)「Next Generation Antibacterial HA Coating －Antibacterial Activity of Ag Ions in Serum－」
I. Noda

Bacterial infection related to orthopaedic implants is a significant complication today. One of the ways to reduce the incidence of implant-associated infections is assumed to give antibacterial activity to surface of implant itself. We developed a novel thermal spraying technology for silver containing Hydroxyapatite (Ag-HA) coating with antibacterial activity and evaluated physical and chemical properties, release property of Ag ions and so on.[1] In this study, we evaluated the concentration of Ag ions that show antibacterial activity in fetal bovine serum (FBS) and antibacterial property of the Ag-HA coating under the biological conditions.

(10)「In Vivo Ability of Novel Thermal Sprayed Antibacterial Coating to Sterize Methicilin-Resistant *Staphylococcus Aureus*」　T. Shimazaki

One of the serious postoperative complications associated with joint replacement is bacterial infection. To resolve such a problem, in the previous works, we developed a novel thermal spraying technology combined silver (Ag) having antibacterial action with hydroxyapatite (HA) displaying good biocompatibility and osteoconductivity. The properties in vitro of this coating (Ag-HA) have been already reported. In this study, we evaluated the antibacterial activity, comparing with HA coating, to clarify the in vivo ability of Ag-HA coating to sterilize methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA) using a subcutaneous rat model.

(11)「Antibacterial Activity of Heated and Hydrtrated Dolomite Powder」 Y. Yonekura

Bacterial infection related to orthopaedic implants is one of the serious types of complications. If the infection is occurred, it is difficult to treat. Finally, it may be necessary to remove the implants and insert the bone cement containing some antibiotics. There has been a greater interest in antibacterial biomaterials to prevent implant-related infections. We focused on the antibacterial activity of heated and hydrated dolomite (HHD), which is inorganic matter. Dolomite is a kind of the limestone, which is double salt, consists of calcium carbonate ($CaCO_3$) and magnesium carbonate ($MgCO_3$). Dolomite itself does not have antibacterial activity, although, the main components of dolomite, $CaCO_3$ and $MgCO_3$, are converted to calcium oxide and magnesium oxide by heating and hydrating, it shows antibacterial activity. If the biomaterial containing HDD shows antibacterial activity, it can be one of the tools to prevent and treat implant-related infections. The purpose of the present study is to determine the effective concentration to show the antibacterial activity of HDD, and to evaluate the antibacterial activity of the bone cement containing HDD.

(12)「高・深屈曲対応型人工膝関節の運動形態と接触応力の評価」　廣川俊二

ひざまづきからの立ち上がり動作解析，光弾性法による脛骨インサートの応力解析，膝関節シミュレータによる人工関節の動態計測に関する報告がなされた．

(13)「人工膝関節置換状態の有限要素法解析」　萩原世也

人工関節に置換する人工関節置換術(TKA)が変形性膝関節症等の治療法として一般化してきている．日本人の生活様式においては，正座等を行うために人工膝関節も大きな屈曲角が必要となる．そのため，従来使用されている人工膝関節よりさらに膝の屈曲角を大きく取ることが出来る完全屈曲型人工膝関節の開発が進められている．現在提案されている完全屈曲型人工膝関節の頸骨コンポーネントは従来のものと形状が大きく異なるため，実際の使用の状況での人工膝関節や脛骨の強度等を慎重に解析する必要が生じる．本研究では，このような理由により人工膝関節の頸骨側に重点を置き解析を行った．それにより，完全屈曲型人工膝関節の屈曲時における強度，生体骨に及ぼす影響，それによって発生する問題点などを検討する事を目的とした．

(14)「完全屈曲型人工膝関節の膝受動動作シミュレータを用いた力学評価」　高野恭寿

本研究の目的は，正座などの深屈曲動作において，大腿四頭筋力が人工膝関節の関節反力および回旋角度に及ぼす影響を調べることである．その評価のために，臨床医が行う他動運動を模擬する180°まで屈曲可能な膝関節シミュレータを開発した1)．サンプルは特別に設計された180°まで屈曲可能な完全屈曲型人工膝関節を用い，これを骨モデルに取り付け，3 種類の異なる大腿四頭筋力を負荷した．今回，屈曲にともなう大腿骨脛骨(FT)関節反力の変化について報告がなされた．

4. あとがき

本研究集会は，2005 年に応用力学研究所共同研究集会としては初めての医学と工学の両分野にまたがる学際的研究集会としてスタートし，当初は，主に力学的解析を中心した研究集会であった．一昨年度よりタイトルに「バイオマテリアル」を加え，抗菌材料を中心とした人工関節に関連するバイオマテリアルに関する研究発表をお願いした．高齢化社会を迎えた我が国において特に重要なテーマの一つである「人工関節」を課題とし，医学と工学の両分野から最先端の研究者による１４件の講演があった．参加者も講演者を含め大学，病院，企業より約４０名ほどの参加者があり，各講演とも活発な議論を展開して頂いた．本研究集会が，この分野の発展に貴重な役割を果たしたことを信じて止まない．

顎骨と歯科インプラントの力学的相互作用に関する研究

九州大学大学院歯学研究院　松下　恭之

1．緒　言

超高齢社会が到来した我が国において，歯や顎骨の衰えによる咬合機能の低下は非常に深刻な問題である．内閣が発表した高齢白書において，2015 年には日本人の 4 人に 1 人は 65 歳以上の人になるとされており今後ますます多くなることが予想される．咬合機能の低下は脳機能の低下とも関係があるとの研究報告もあり，歯科治療による咬合機能の回復は重要な社会的課題のひとつである．近年，歯が完全なあるいは部分的な欠損がある場合には，インプラント治療が施されるようになってきている．下顎骨に比べると上顎骨に対するインプラント治療はさまざまな問題を抱えており，特に上顎洞の存在や脆弱な骨構造がインプラント埋入をより困難にさせている．一般に，臨床現場において，埋入するインプラントの最適な本数については臨床医の経験に基づいて決定される．したがって，生体力学と計算力学の手法に基づいてインプラント治療をサポートするような方法が確立されれば，インプラント治療の理論づけが可能となるであろう．

そこで本研究では，上顎無歯顎患者の CT データをもとに 3 次元モデルを構築し，その患者についてインプラント本数と挿入位置を考慮し力学的評価を行うことを目的とした．具体的には，インプラント本数と荷重条件を変えて力学的安全性の評価を行った．

2．モデル構築と解析方法

生体構造解析ソフトウェア Mechanical Finder を用いて上顎無歯顎モデルを作成した．まず，ヒト上顎無歯顎 CT データ（被験者 84 歳男性）から上顎部分を抽出し，2 次元的に抽出したものを 3 次元化することで上顎無歯顎モデルを作成した（Fig.1 参照）．また骨の不均質性を再現させるために，CT 値から骨密度を推定し，Keyak の理論を用いて骨密度をヤング率に換算し，各要素に割り当てた．次に，作成した上顎無歯顎モデルに挿入するインプラントモデルを作成した．インプラントの直径は 3.75mm とし，長さは顎骨の構造に応じて変化させた．本研究で作成した顎骨モデルに対してインプラント本数が力学状態に及ぼす影響を調べるために，インプラント 3 本・4 本・6 本のモデルを作成した．

境界条件として，上顎の上部を完全固定（x-y-z 固定）し，補綴下部全体に表面に対して垂直方向に分布荷重 200N を作用させた（Case 1）（Fig.2 参照）．また，補綴装置の前方部表面のみに水平方向に 50N の分布荷重を作用させた条件についても解析を行った（Case 2）．

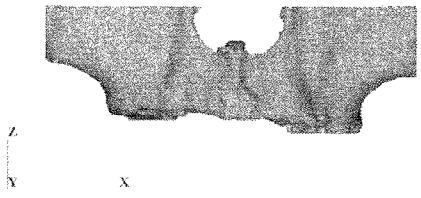
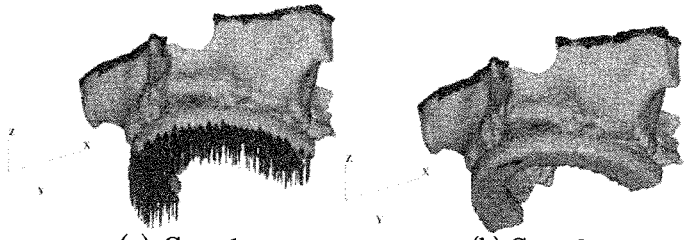


Fig.1 Maxilla model.



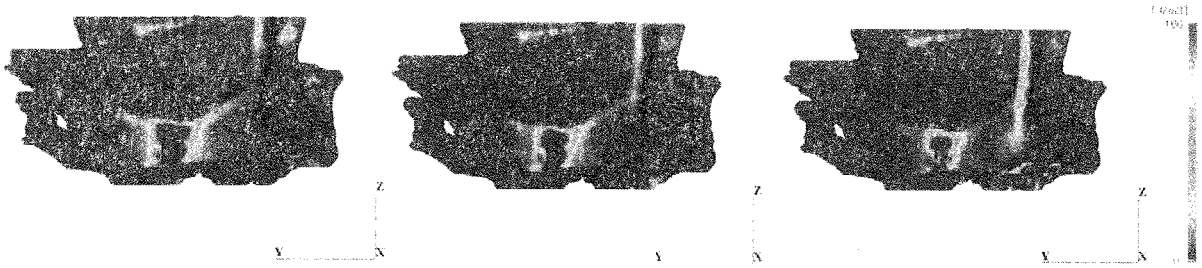
(a) Case 1　　(b) Case 2

Fig.2 Boundary Conditions.

3．結果と考察

垂直方向の分布荷重下において，右側臼歯部インプラント周辺でのひずみエネルギー分布状態を Fig.3 に示す．インプラント近傍において局所的に高いエネルギー集中が発生していることがわかる．このようなエネルギー集中箇所において，骨の損傷や吸収が発生し，さらにはインプラントのゆるみに繋がることが予測される．図(a)，(b)，(c)を比較すると，インプラント本数が増加することで，ひずみエネルギー密度集中領域が減少し緩和されることが理解できる．

2 種類の荷重条件での，右側臼歯部インプラント周辺骨での最大ひずみエネルギー密度値を比較したものを Fig.4 に示す．補綴装置表面全面の垂直方向に分布荷重を加えた場合，インプラント 4 本を基準とすると，インプラント 6 本では 40%減少し，インプラント 3 本では 30%増加する．一方，補綴装置表面前方の水平方向に荷重を加えた場合，インプラント 6 本では 70%の低下を示し，インプラント 3 本では 330%の増加を示している．このように，荷重のタイプによってひずみエネルギー密度の増減が異なり，このことは単純な咬合や歯ぎしりなど実際の口腔で考えられる荷重条件すべてについて解析することの必要性を示唆している．と，インプラント 6 本では 40%減少し，インプラント 3 本では 30%増加する．一方，補綴装置表面前方の水平方向に荷重を加えた場合，インプラント 6 本では 70%の低下を示し，インプラント 3 本では 330%の増加を示している．このように，荷重のタイプによってひずみエネルギー密度の増減が異なり，このことは単



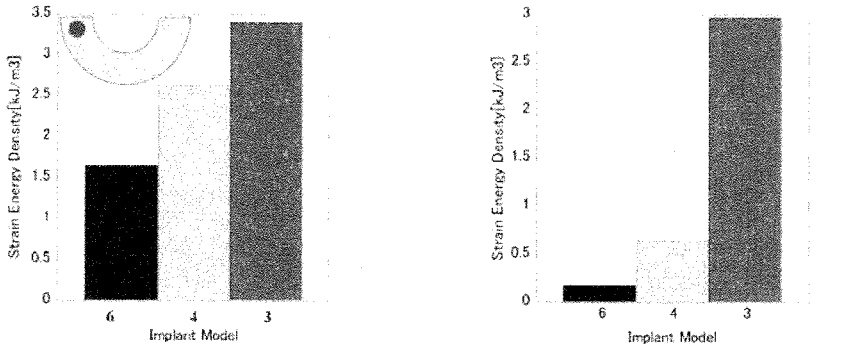
(a) 3-implants (b) 4-implants (c) 6-implants

Fig.3 Distribution of strain energy density around right molar implant.

純な咬合や歯ぎしりなど実際の口腔で考えられる荷重条件すべてについて解析することの必要性を示唆している.

4. 結 言

本研究では，上顎無歯顎患者の CT データから骨の不均質性を再現した 3 次元モデルを作成し，そのモデルにインプラント・補綴装置モデルを装着し，上顎インプラントモデルを構築した．さらに，このモデルに対するインプラント治療の力学的安全性を検討するため，埋入インプラント本数を 3，4，6 本と変化させて数値解析を試みた．その結果，インプラント本数を増加することで効果的にひずみエネルギー密度が減少し安全性が向上することがわかった．また，補綴装置前方表面に水平方向に荷重が作用する場合は，補綴装置全面に垂直方向に荷重が作用する場合に比べて，インプラント本数の影響がより顕著に出ることがわかった．本モデルの場合，特に右側臼歯部インプラント周辺において，インプラント本数が 3 本になると急激にひずみエネルギー密度値が増大した．このことは，異なる荷重条件での解析の必要性を示唆している．



(a) distributed vertical load (b) partially-distributed horizontal load

Fig.4 Maximum strain energy density in the vicinity of right molar implant.

成果報告

① 荒平高章，東藤貢，松下恭之，古谷野潔，無歯上顎骨のインプラント治療に対する生体力学的検討，第 22 回バイオエンジニアリング講演会，岡山理科大学，2010 年 1 月 9-10 日

② T Arahira, M Todo, Y Matsushita, K Koyano , Assessment of Mechanical Stability and Safety for Fully Edentulous Maxilla with Dental Implants, Asian Pacific Conference for Materials and Mechanics 2009 (APCMM2009), PACIFICO Yokohama, Yokohama, JAPAN, November 13-16, 2009

③ 荒平高章，東藤 貢，松下恭之，古谷野潔，インプラント治療を施した無歯上顎の力学的安全性評価，第２２回計算力学講演会，金沢，2009 年 10 月 10-12 日

研究組織

氏名	所属	職名	役割・担当分野
松下恭之	歯学研究院	准教授	研究代表者，臨床的考察
古谷野潔	歯学研究院	教授	臨床的考察
荒平高章	総合理工学府	修士２年	数値シミュレーション
東藤　貢	応用力学研究所	准教授	所内世話人，生体力学的考察

機械的負荷培養下の細胞による細胞外マトリックス組織形成に関する研究

九州大学大学院工学研究院　澤江　義則

1. 緒言

関節軟骨は関節面において骨表面を覆い，その荷重支持能や潤滑性等により可動関節の運動機能を支えている．その力学的機能は，軟骨細胞周囲に存在する細胞外基質（ECM）に強く依存している．再生軟骨組織の構築に際しては，組織中のコラーゲン線維網が，重要な役割を担っている．特にコラーゲン合成にはビタミン C (VC) が必要となる．現在までに代表的な VC であるアスコルビン酸（AsA）の培地への添加濃度を増加させることにより，培養組織の弾性率が有意に上昇したが [1]，高濃度において細胞毒性が発生した．そこで本研究では，細胞毒性の無い安定化 VC [2]について，再生軟骨組織の機械的特性に与える影響を調べると共に，AsA と結果を比較した．本研究では，安定化 VC にリン酸化アスコルビン酸（A2P）を用いた．

2. 実験方法

牛中指骨の軟骨組織から軟骨細胞を酵素処理によって単離し，アガロース 1 w/v%ゲル (Sigma Type VII Agarose) に播種し，再生軟骨組織モデルとして用いた．初期細胞密度は 10^7 cell/mL とした．試験片形状は，直径 4 mm，高さ 2.5 mm の円柱形とし，37 ℃, 5% CO_2 にて培養した．培地には DMEM を用い，20 v/v% FBS と 2 mM L-Glutamine, 100 units/mL Penicillin, 50 mg/mL Streptomycin, 20 mM HEPES を添加した．VC 濃度は最終濃度にて，0.64, 2.2, 3.2, 6.4 pmol/10^9cell とした．また，AsA 無添加群を対象群とした．

培養後の再生軟骨の力学的評価を行った．圧縮速度 0.5mm/min にて，10%の圧縮ひずみを円柱形試験片の軸方向に与えた．得られた応力-ひずみ曲線において，5-10%ひずみにて最小二乗法により直線近似し，その傾きを接線弾性率(Tangent modulus)とした．

VC 濃度が再生軟骨組織モデルに与える影響を観察した．培養後の円柱試験片をメスで，中央付近を厚さ約 1mm にスライスし，BSA 処理した後，抗体染色法を用いて，I 型コラーゲンと II 型コラーゲン，コンドロイチン硫酸の三重染色をおこなった．2 次抗体を標識した後，共焦点レーザー顕微鏡（CLSM）にて蛍光観察した．

3. 結果

VC 濃度に対する再生軟骨組織モデルの弾性率の変化を図 1 に示す．培養後 15 日および 22 日後において，高 AsA 濃度のグループでは，対象群と比べて有意な増加が確認されたが，安定化 VC の A2P を投与した場合では，一部に有意な差が確認出来たものの，十分な差は現れなかった．また，ECM の形態を蛍光観察したところ，A2P 投与した場合では II 型コラーゲンの十分な広がりが確認出来なかった（データ未掲載）．A2P は AsA にリン酸が付与されており，細胞膜上の脱リン酸化酵素により，A2P から AsA に変化することで効果を発揮する [2]．そのため，酵素の反応が十分に行われていなかったので，コラーゲン合成が促進されず，弾性率上昇があまり見られなかったものと思われる．

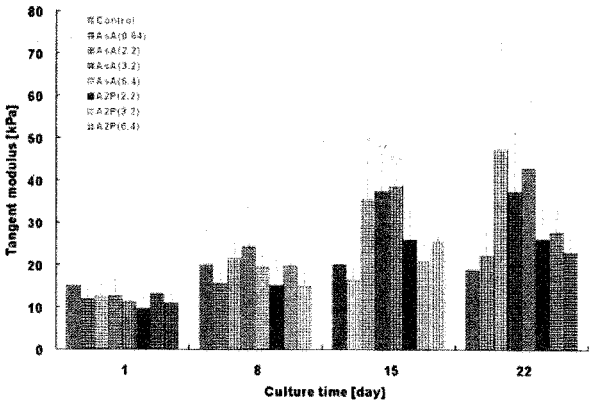


Fig 1: Comparison of tangent modulus. Error bar means sample standard deviation (n=7–23): *= ES>1, P<0.01, β >0.8; **= ES>2, P<0.01, β >0.8 vs. control group in each culture days (ES: effect size; β : power of test).

医療機器および医療材料等の計算力学および細胞培養システムを用いた有効性・安全性評価

国立医薬品食品衛生研究所 療品部　石川 格

● 目的

口腔外科では，癌により下顎骨の一部を切除した場合など，骨の欠損によって下顎骨の連結が保てなくなった際に，金属製のプレートを用いて骨の固定が行われている．この手術の際，湾曲した下顎骨に形状を合わせるため，プレートは医師の手により曲げられてから使用されている．一方，この手術に伴う後期合併症としてプレートの破損が生じることが報告されている．この破損では，手術の際の曲げ変形によって骨固定プレートが損傷を受けていることも要因の一つである可能性がある．そこで，本研究は，この変形操作による骨固定プレートへの影響を調べることを目的に，弾塑性有限要素解析によって骨固定プレートの塑性状態の解析を行った．解析に用いた骨固定プレートの形状モデルは，設計図やCADデータを開発元から得ることが困難であるため，実際の製品の形状を光学式3次元デジタイザで測定することで構築した．

● 方法

➢ 形状モデルの作成

Stryker社のTi-6Al-4V製の下顎骨用骨固定プレート(56-28087)をサンプルとして形状測定を行った．測定によって得られた骨固定材表面形状のポリゴンデータからソリッドモデルの作成を行った．形状測定には，光学式3次元デジタイザVIVID 9i（コニカミノルタセンシング（株））を用いた．VIVID 9iと連動する回転テーブルを併用して骨固定プレート各部の座標データを取得した．得られた複数の表面形状ポリゴンデータをRapidForm XOR2（INUS Technology, Inc.）を用いて位置合わせ・連結し，骨固定プレート全体の表面形状ポリゴンデータを作成した．さらに，RapidForm上で，部分ごとに表面に沿った自由曲面を生成し，それらの曲面を貼り合わせることで全体の形状曲面を構築した．

➢ 有限要素解析

形状測定データを元に作成したソリッドモデルを，Parasolid形式のデータを経由してFEMプリポストプロセッサFemap Ver. 10.0（Siemens AG社）にインポートし，材料定数の設定，四面体二次要素への分割，境界条件の設定を行った．材料の弾塑性挙動は，等方硬化の2直線モデル，すなわち弾性変形時と塑性変形時の応力ひずみ線図がそれぞれ直線で表されるものとした．材料定数は，Ti-6Al-4Vの材料特性を元に，弾性係数113 GPa，ポアソン比0.31，降伏応力900 MPa，接線係数11.3 GPaとした．作成した有限要素モデルの解析をANSYS 11.0を用いて行った．

骨固定プレートに加えられる変形は手術ごとに異なるため，モデルケースとして図1に示す境界条件で骨固定プレートを曲げる弾塑性解析を行った．図1に示すように，まずStep 1として，断面aの上下端での並進移動を拘束した状態で，断面1の上面節点にz軸方向への強制変位10 mmを設定し解析を行った．その解が得られた後，強制変位を設定した節点における反力値を0に置き換えた境界条件で解析をリスタートさせることで荷重を除荷した．同様にして，Step 2およびStep 3の解析を順に行った．解析には，節点数230295，要素数148799のメッシュを用いた．

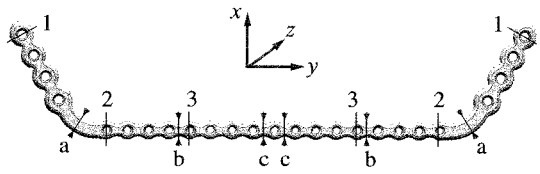
● 結果と考察

弾塑性解析の結果，図2に示すように，下顎形状に近い変形が得られた．図3は，y軸方向の各部における最大相当塑性ひずみをプロットしたものである．横軸の数字とアルファベットは境界条件を与え

た箇所を示している．拘束部および拘束部近傍の孔周辺に大きな相当塑性ひずみが生じる結果となった．塑性変形に伴って微視的な損傷が内部に蓄積されることにより疲労強度が低下するはずであるので，このような変形操作によりプレートの耐久性も低下するものと考えられる．また，図3では，強制変位を加えた箇所にも応力集中によって塑性ひずみが生じている．実際に手術時に使用される工具においても，このような集中的な荷重が作用する場合には表面に生じた塑性箇所が疲労破壊の基点となることが考えられる．図4は，図3と同様に，y軸方向の各位置における残留応力を相当応力で示している．比較的広い範囲に600 MPaを超える残留応力が見られた．このような残留応力が存在した場合，負荷応力の方向によってはTi-6Al-4Vの疲労限度が大きく低下することから，残留応力によるプレートの耐久性低下が予想される．

- 成果報告（学会発表）

石川 格，東藤 貢，松岡 厚子，土屋 利江．下顎骨固定用プレートに加えられる変形の弾塑性有限要素解析．第22回計算力学講演会予稿集，2009.



Step-1
a: fixed, 1: z direction displacement 10 mm
Step-2
b: fixed, 2: z direction displacement 15 mm
Step-3
c: fixed, 3: z direction displacement 15 mm

図1：境界条件

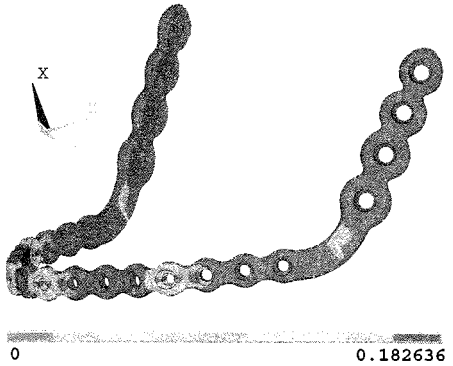


図2：変形図（コンターは相当塑性ひずみ分布）

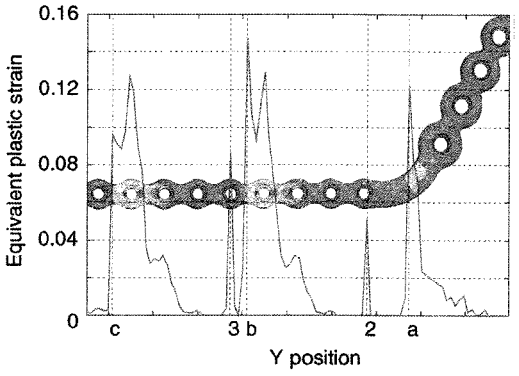


図3：相当塑性ひずみ分布

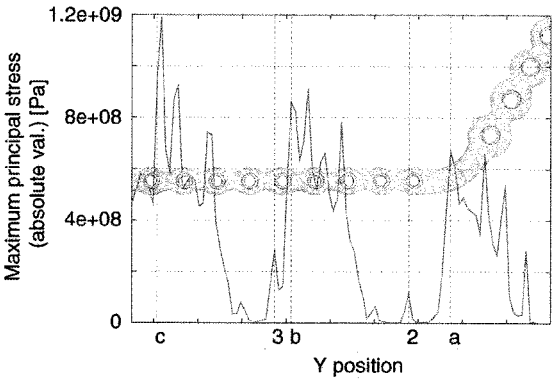


図4：最大主応力絶対値の分布

- 研究組織

氏　名	所　属	職　名	役割・担当分野
石川 格	国立医薬品食品衛生研究所・療品部	研究員	解析の実施
土屋 利江	大阪大学・未来医療センター	特任研究員	評価，考察
東藤 貢	九州大学・応用力学研究所	准教授	評価，考察

医療用インプラントの接触解析に関する研究

上智大学理工学部　長嶋利夫

目的

医療分野においては、人工膝関節，髄内釘，歯科インプラントなどに代表される機械部品が人体内部に埋設され用いられるようになってきている．これらの部品の信頼性を確保するためには，部品内に発生する応力、ひずみ、変形分布を精度良く評価することが必要となる．これらの機械部品は生体骨の中に埋め込まれるため、部品と生体骨との接触を考慮する必要がある．構造解析において接触問題は境界非線形問題として分類され、たとえ材料が線形であったとしても接触面および接触圧を決定するためには一般に多くの繰り返し計算が必要となり、解を求めることが困難とされてきた．一方、最近の計算機の高精度化、数値シミュレーション技術の進歩により、大規模有限要素モデルを用いた接触解析が可能になりつつある．そこで本研究では、インプラントと生体骨との接触を考慮した有限要素解析モデルを作成し、汎用有限要素プログラムを用いた応力解析を実施し、解析手法や解析条件が結果に与える影響などを検討しながら、妥当な解析モデルの構築方法を確立することを目的とする．本研究の結果は、バイオメカニクスの観点から、医療における有効な知見を得ることに資することができる．

研究方法

（1）三次元 CAD を利用したインプラントモデルの作成
（2）有限要素メッシュ分割
（3）適切な境界条件（荷重条件、拘束条件）の設定
（4）静的応力解析（物性値、接触条件の検討）
（5）解析結果の整理
（6）力学的検討

解析概要

歯科用インプラントを用いたオーバーデンチャーに着目し、インプラントへの荷重伝達を検討するために作成した上顎模型にインプラントを埋入したモデル(**図 1**）の荷重試験（**図 2**)を応力解析の対象とする．モデル作成においては、上顎骨模型，歯肉模型，義歯の形状を，非接触三次元デジタイザ(コニカミノルタ社，VIVID910)で測定し，三次元形状編集ソフトウェア（INUS 社，RapidForm2004）で CAD データに変換した．その他の構成部品は 3DCAD システム(PTC 社，Pro/Engineer)を用いて作成した．

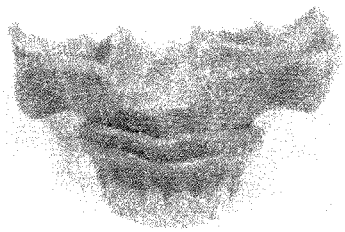


図 1　上顎オーバーデンチャー模型

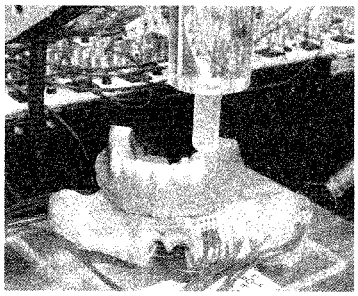


図 2　上顎オーバーデンチャー模型の荷重試験

上顎オーバーデンチャー模型の CAD モデルを**図 3** に示す．この CAD モデルから**図 4** に示すような有限要素モデルを生成し、汎用 FEM コード ABAQUS を用いて応力解析を実施した．

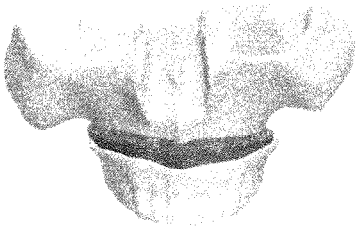


図 3　CAD モデル

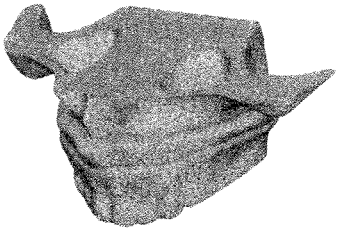


図 4　FEM モデル

図 5 に示す位置に 10 N の圧縮荷重を負荷した場合の、上顎骨模型の骨部表面(発泡ウレタン)およびインプラントのひずみを評価し、FEA による解析結果との比較を実施した. 荷重点 2(Load_case2)に荷重を負荷した場合の骨部表面のひずみを比較した一例を**図 6** に示す.

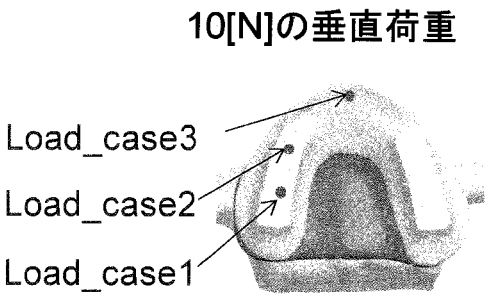


図 5　荷重負荷点と荷重ケース

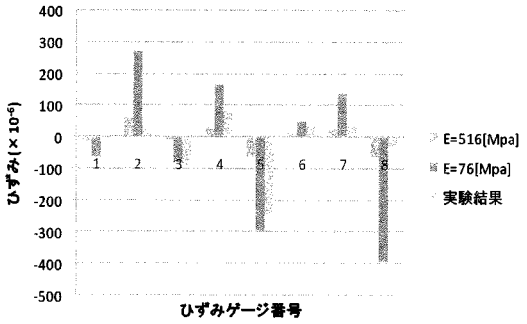


図 6　試験結果と解析結果の一例

考察

荷重試験で実測されたインプラントおよび上顎部を模擬した骨部のひずみと、事前解析結果から得られるひずみの一致は良くなかった. そこで、上顎骨模型の骨部(発泡ウレタン)の物性値の実測や部品間の接触条件の修正を実施し解析モデルの修正を行ったところ実測結果に近づいた結果が得られるようになった. このような模型モデルの解析結果として得られる各インプラントに加わる荷重を用いることにより、インプラントに加わる詳細な応力が評価可能となる.

成果報告

- 2009 年 12 月 28 日(月)午後:九州大学歯学部において研究会を開催
- 本稿で示した研究成果については 2010 年度に関連学会において講演発表予定.

研究組織

氏　名	所　属	職名 (院生は学年)	役割・担当分野
長嶋　利夫	上智大学・理工学部	教授	代表者、解析手法検討
平野　喜一	上智大学・理工学研究科	博士前期課程 2 年	モデル作成 解析、実験の実施
田中　美穂	上智大学・理工学部	機械工学科 4 年	解析、実験の実施
松下　恭之	歯学研究院	准教授	実験の実施、歯科学的考察
東藤　貢	応力研	准教授	評価、考察

以上

力学刺激に対する細胞の応答機構の解明：生細胞内における歪みの時空間変化の測定

北海道大学大学院先端生命科学研究院　　水谷　武臣

・　目的

本事業の目的は、力学刺激に対して細胞がどのように応答するのかを細胞内タンパク質の変位から明らかにすることである。今回は、細胞内のある領域とまた別の領域とが時間的に協調して、力学刺激に応答することを発見したので、それについて報告する。

器官等の巨視的な形態形成において局所的に起こる変化の時間的及び空間的な協調は重要である。例えば胚発生時に、ある領域の細胞のアポトーシスがいっせいに起こることで手や足の指は形作られる。このような形態形成の協調機構は非常に複雑なものと考えられる。一細胞レベルの応答にも協調的な現象は存在する。例えば、細胞は運動する際には先端部が伸張し後部が収縮するといった具合に、細胞内の異なる変化を時空間的に連動させることで、特定方向への運動を可能にしている。このように細胞内の局所的な変化を時空間的に協調させることで、細胞は一細胞レベルの現象をつくる。しかし、このような比較的に単純な一細胞レベルにおいても、内部の局所的変化がどのように協調するのか。さらにその協調機構についても不明な点が多い。

細胞内部の局所的な部分に生じる変化の協調機構を解明するためには、どこがどのように協調するのかを定量的に可視化する必要がある。そこで本研究では以下のことを目的とした。①細胞内に生じる変位分布解析の方法を確立し、②生きた細胞に刺激を加えたときに細胞内で局所的に起こる変形を時空間的に観察する。細胞レベルの変形に最も関係が深いと考えられる actin 骨格の変位分布をデジタル画像相関法の適用により解析することを試みた。

・　実験手法

ヒト線維肉腫細胞(HT1080)に蛍光タンパク融合 actin 発現プラスミドを導入したものを実験試料とした。この細胞に刺激を加え、actin ネットワークの経時観察を行なった。本研究ではマニピュレーターを用いて細胞内のある一点を引っ張り細胞を局所的に変形させることと、ミオシンのリン酸化阻害剤である Y27632 を投与し細胞内の張力を低下させることを刺激とした。actin の変位解析にはデジタル画像相関法を用いた。デジタル画像相関法とは、画像処理による全視野変形解析方法である。特徴として非常に簡便かつ高い空間分解能を持つ点があげられる(分解能は 0.05 画素)。変形前の画像中における任意の位置を中心とする微小領域を基準として、変形後の画像から輝度値分布の最も相関が取れる微小領域を数値解析で探索する。このようにして、変形前後において、変位分布マップを作製した。

・　実験結果と考察

デジタル画像相関法を用いた解析で、最も重要なことは細胞の変化の前後の画像において相関がとれるということである。2 枚の画像を重ね合わせることで変位量・方向を求めるというデジタル画像相関法の性質上、変化が大きすぎると同一点の探索が不可能となり、解析不能になる。この場合の変化とは蛍光強度の褪色、細胞形状・骨格の変化などである。従って、生きた細胞の蛍光画像取得に関しては、変化が大きくなりすぎないよう、蛍光の褪色や刺激の大きさ、継時観察の間隔を最適化した。本研究では蛍光強度の調節、細胞に加える変形の大きさ、観察間隔に十分留意し、actin 骨格の変位分布解析を試みた。結果、生きた細胞内で局所的に起こっている actin 骨格の変位分布の時空間的なイメージングに成功した。イメージングの結果、細胞に刺激を加えると、細胞内に局所的な構造の変化が観察された。

マイクロマニピュレーターで細胞内部の一点を局所的に引っ張った。マニピュレーターで局所刺激を加える前の actin 骨格は細胞内でランダムに変位していた。しかし、局所刺激後は、数十 μm 程度の「ドメイン」が生じ、ドメインごとに同一方向へ動いていた。このような細胞内での局所的な応答は Y27632 を投与し、細胞内の張力を低下させたときにも観察された。投与前の actin 変位はランダムであったが、薬剤投与後は時間が経つにつれ、細胞はドメインごとに同一方向へ変位した。薬剤投与による刺激では一瞬のうちに細胞内のミオシン分子の活性が抑制されると考えられるが、この結果では細胞内で大きく変位している領域とあまり変位していない領域が観察された。このことは、細胞内は場所ごとに薬剤に対する感受性が異なることを示唆している。

本研究により以下のことが示された。1) デジタル画像相関法が生きた細胞内構造物の変位分布の解析に有用である。2) 細胞は外部から刺激が加わると、細胞内部に局所的な応答を生じる。細胞はこのような局所領域に生じる変化を協調的に制御することで、一細胞レベルの現象を作り出していると考えられる。

～研究成果報告～

成果論文：

Takeomi Mizutani, et al.,『Cytoskeletal Displacement of Actin Filament and Actin Binding Proteins under Local Deformation Processed by Digital Image Correlation Method in a Myoblast』, Journal of Biomechanical Science and Engineering, (2009 Vol.4 No. 3, pp415-422).

成果発表：

・水谷　武臣、『周期外力に依存した細胞の生理的応答』

第四回細胞運動研究会　(2009 9 月　広島　広島大学) ＜口頭発表＞

・Takeomi Mizutani, et al.,『Propagation of mechanical strain under external stretch in mammalian cells』

4th ISEM (2009 11 月　新潟　朱鷺メッセ) ＜口頭発表＞

・水谷　武臣、『印加する外力の周波数に依存した細胞の生理的応答』

第４７回日本生物物理学会年会　(2009 10 月　徳島　アクティ徳島) ＜ポスター発表＞

～研究組織～

水谷　武臣	北大・先端生命	助教	サブテーマ代表者	mizutani@sci.hokudai.ac.jp
東藤　貢	九大・応用力学	准教授	所内世話人	todo@riam.kyushu-u.ac.jp
森田　康之	九大・応用力学	助教	研究分担者・解析担当	morita@riam.kyushu-u.ac.jp
土肥　謙一	北大・理学	修士　２年	研究分担者	dkenichi@mail.sci.hokudai.ac.jp

生体吸収性材料の動的変形挙動の解明

名古屋工業大学　機械工学科　西田 政弘

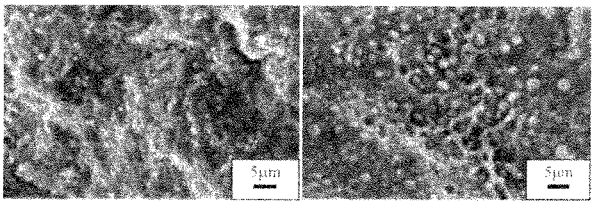
1. 目的

ポリ(L- 乳酸) (PLLA) の物性値は汎用樹脂に匹敵するものの，脆性的破壊挙動を示すため，最近では，延性を付与するためにPLLAにポリ(ε-カプロラクトン) (PCL)，ポリブチレンサクシネート(PBS)，ポリ(ブチレンサクシネート-co-ラクテート)(PBSL) などをブレンドした材料が検討・研究されている．しかし，PLLAポリマーブレンドの動的力学挙動については，不明な部分が多い．本研究では，PLLA/PBSLポリマーブレンドの応力—ひずみ線図を，万能試験機およびホプキンソン棒法を用いて測定し，基礎的な動的力学特性について明らかにすること，また，PLLA/PBSL ポリマーブレンドの耐衝撃特性について確認することを目的とした．

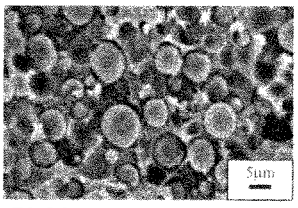
2. 実験方法

2.1 試験片

原料はPLLAペレット（島津製作所 Lacty#5000）とPBSLペレット（GS Pla® AZ-Type, lactate unit ca. 3%）である．今回の実験では，PLLAとPBSLの重量比を90 : 10, 80 : 20, 70 : 30とした．ブレンド材は，ペレットを混練機に入れ，190℃，50 rpm，20 minの条件で溶融混合した後，その混合物をホットプレスにより，190℃，30 MPa，30 minで加熱圧縮成形し，厚さ5mmの板材を作製した．板材より機械加工で，静的圧縮試験用にはϕ6×9 mmおよびϕ5×5 mmの円柱状試験片を，衝撃試験用にはϕ10×3.3 mmの円盤状試験片を作製した．Fig. 1に，試験前の試験片の凍結破断面を示す．数μmの球状に分散しているのがPBSLであり，2相構造を示していることがわかる．Fig. 2に示差走査熱量測定の結果を，Table 1にPLLAとPBSLの融点を示す．測定結果にはPLLAとPBSLの融解ピークがほぼ独立に存在し，PLLAとPBSLが相分離していることが凍結破断面および示差走査熱量測定で確認できた．



(a) 90:10　　(b) 80:20



(c) 70:30

Fig. 1 Cryo-fractured surface

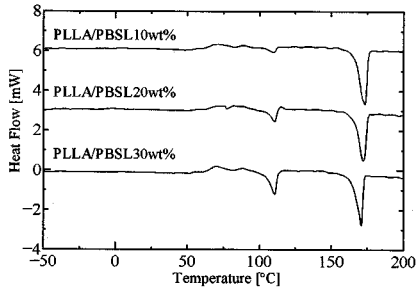


Fig. 2 DSC thermograms of PLLA/PBSL blends

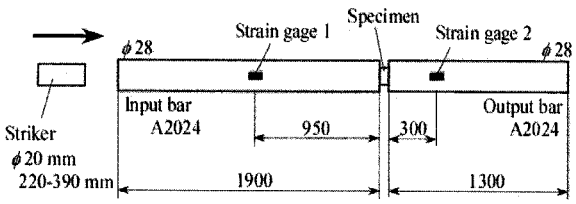


Fig. 3 Experimental set up for split Hopkinson bar method

Table 1 Thermal properties of PLLA and PBSL

	T_m [℃]	T_g [℃]
PLLA	176.2	64.0
PBSL	113.6	−33.0

Table 2 Material constants of aluminum alloy (A2024)

Density ρ [kg/m^3]	Velocity of bar wave c_3 [m/s]	Young's modulus E [GPa]
2.77×10^3	5150	73.6

2.2 衝撃圧縮試験

静的圧縮試験は，万能試験機を用いて行ったのに対し，動的応力－ひずみ線図は，Fig. 3 に示すホプキンソン棒を用い測定した．入出力棒には 直径 28 mm，長さ 1.9 m，1.3 m のアルミニウム合金（A2024）棒を用いた．物性値を Table 2 に示す．入力棒には試験片側の端から 950 mm，出力棒には試験片側の端面から 300 mm の位置に，半導体ひずみゲージを貼付した．試験片内の平均応力，平均ひずみは，

$$\sigma_{av}(t)=\frac{AE}{A_S}\varepsilon_T(t) \tag{1}$$

$$\varepsilon_{av}(t)=\frac{2c_3}{L}\int_0^t\left[\varepsilon_I(t)-\varepsilon_T(t)\right]dt \tag{2}$$

と表される．ここで，E は入出力棒の縦弾性係数，c_3 は入出力棒の棒波速度，L は試験片の厚さ，A は入出力棒の断面積，A_S は試験片の断面積，ε_I は入射ひずみ，ε_T は出力棒に透過する透過ひずみである．

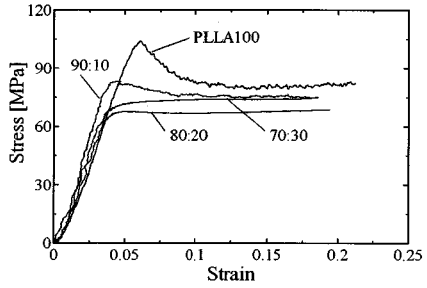


Fig. 4 Effect of PBSL content on stress-strain curves at strain rate of 1.0×10^{-3} s^{-1}

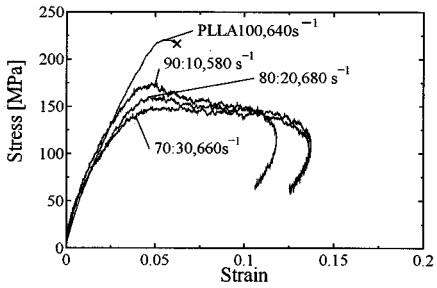


Fig. 5 Effect of PBSL content on stress-strain curves at strain rate of 580-680 s^{-1}

3. 試験結果

静的圧縮試験の結果を Fig. 4 に，動的応力－ひずみ線図を Fig. 5 に示す．ブレンド比 90:10 の静的圧縮試験においては，ひずみの増加とともに応力が増加した後，応力の増加の割合は次第に低下していき，極大値を示した．その後，応力は一定の値を示した．しかし，静的圧縮試験の 80：20，70：30 では，極大値を示さなかった．塑性域では，80：20 はほぼ一定の応力を示し，70：30 では応力が常に少しずつ増加している．ホプキンソン棒法の結果では，どのブレンド比においても極大値を示したが，極大値を示した後の応力の減少は，90:10 の場合が最も大きかった．Fig. 5 のひずみ 0.07～0.10 では，流動応力はブレンド比に関係なくほぼ同じで，約 150 MPa であった．PLLA のみでは，ひずみ 0.06 程度で衝撃圧縮中に脆性破壊したのに対し，PLLA/PBSL ブレンド材は延性変形をしたことがわかる．

4. 成果報告：　国際会議で口頭発表を 1 件，国内会議で口頭発表を 2 件：

① 山口真誉，西田政弘，東藤貢，高山哲生，ホプキンソン棒法を用いた PLLA/PCL ポリマーブレンドの衝撃圧縮特性の評価，成形加工シンポジア'09，（2009 年 11 月 6－7 日：長崎大学），pp. 187-188.

② 久野誠也，山口真誉，西田政弘，東藤貢，高山哲生，ホプキンソン棒法を用いた PLLA/PBSL ポリマーブレンドの衝撃圧縮特性の評価，日本複合材料合同会議（2010 年 3 月 11 日：京都）発表予定.

③ M. Nishida, M. Yamaguchi, M. Todo, T. Takayama, H.-Å. Häggblad and P. Jonsén, Evaluation of dynamic compressive properties of PLA polymer blends using split Hopkinson pressure bar, Proc of 9th Int conf on mechanical & physical behaviour of materials under dynamic loading (Brussels, 2009 Sep 10), pp. 909-915.

5. 研究組織

氏 名	所 属	職名	役割・担当分野
西田 政弘	名古屋工業大学	准教授	代表者，実験手法の検討
山口 真誉	名古屋工業大学	大学院 1 年生	材料の製作，実験の実施
久野 誠也	名古屋工業大学	学部 4 年生	実験の実施
東藤 貢	応用力学研究所	准教授	評価，考察

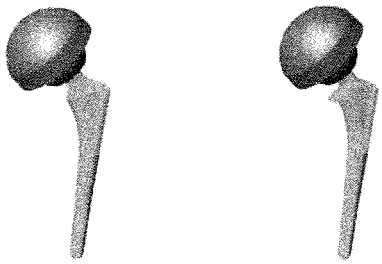
BIOMECHANICAL EFFECT OF THE COLLAR OF THE FEMORAL STEM ON TOTAL HIP ARTHROPLASTY

[1]Insu Jeon, [1]Ji-Yong Bae, [1]Jin-Hong Park, [2]Taek-Rim Yoon, [3]Mitsugu Todo, [4]Masaaki Mawatari, [4]Takao Hotokebuchi
[1]School of Mechanical Systems Engineering, Chonnam National University; email: i_jeon@chonnam.ac.kr,
[2] The Center for Joint Disease, Hwasun Hospital, Chonnam National University,
[3]Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University,
[4]Department of Orthopaedic Surgery, Saga University

INTRODUCTION

Cementless hip joint prosthesis after THR (total hip replacement) is often subsided into the cancellous bone of femur under compressive loading arisen from body weight and gait. This phenomenon may occur additional damage to patients after THR.

To prevent this problem, a femoral stem with collar is invented and used as an alternative to the stem without collar (see Fig. 1) [1-3]. Because of the collar shape, it is easy to expect that the stem with the collar does not easily subside into the femur. However, the actual biomechanical effect of the small collar on THR is hard to estimate from the intuition based on the empirical background.



(a) (b)

Fig. 1 Geometric models of the hip joint prosthesis (a) without and (b) with collar

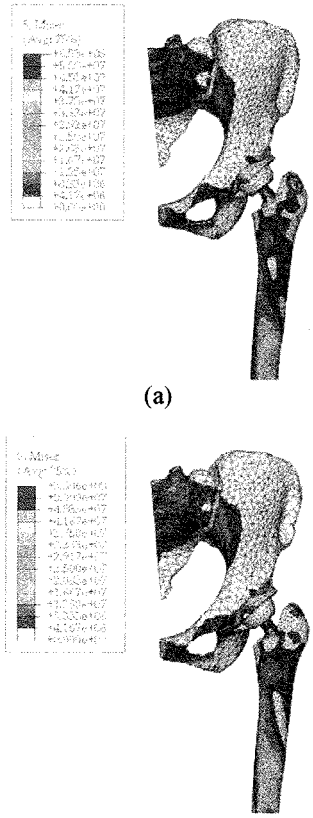
METHODS

To understand the biomechanical collar effect, two regular types of cementless implant without and with collar were selected and modelled using finite element meshes. For the FE (Finite Element) modelling of biological materials such as, sacrum, coxal bone and femur, X-ray CT images of a fifty four years old woman patient were used.

After practicing the virtual THR, which was done by Boolean operation between geometric models of femoral stems and cancellous bones, the FE models of both prosthesis as well as biological materials were constructed and finite element analysis for the whole structure around the implanted hip joint under compression was carried out (See Fig. 2).

RESULTS AND DISCUSSION

From the comparison of the numerically obtained deformation behaviors between two analysis cases using collarless or collared stem, and stress fields of the femurs at which both prostheses are implanted, it is found that the collarless stem shows a possibility to subside into cancellous bone and the collar obviously prevents the subsidence of the stem but causes ***the moment load*** to the femur, which seriously increases the looseing at the interface between the stem and the cancellous bone. Furthermore, it may produce ***the varus deformation of the prosthesis***, which may lead ***the femur fracture.***



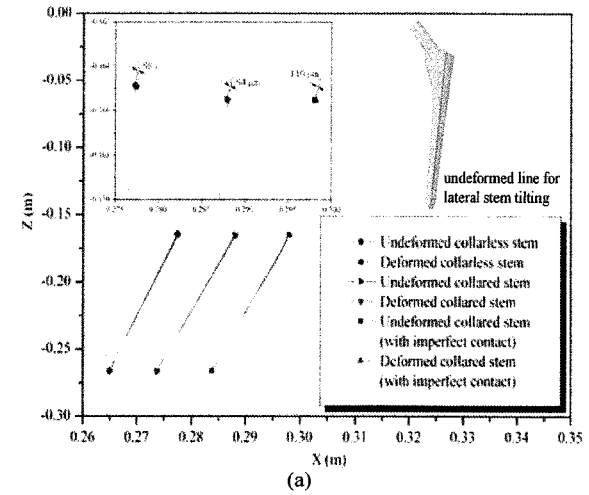
(a)

(b)

Fig.2 Mises stress field around the implanted hip joint prosthesis using (a) collarless and (b) collared stem

The geometric tilting of the stem, which can be regarded as a significant cause of stem micromotion and loosening, is investigated. Figures 3(a) and 3(c) present the lateral and anterior tilting of the stem, respectively. Two important facts are discerned from these figures. One is that the tilting of a collared stem is smaller than that of a collarless stem. This contrasts with the results of Fagan and Lee[1], who report the greater tilting of a collared stem due to the role of the collar as a pivot. The reason for the smaller tilting of a collared stem in this present study is that the perfect contact between the collar and the calcar constraints the stem from tilting. To investigate in detail the phenomenon of lateral tilting for collared stems, another model of a collared stem with imperfect calcar contact is constructed and used for computation (see Fig. 3(b)); the corresponding results are plotted in Fig. 3(a). From the results, it is found that a collared stem with imperfect calcar contact causes the most

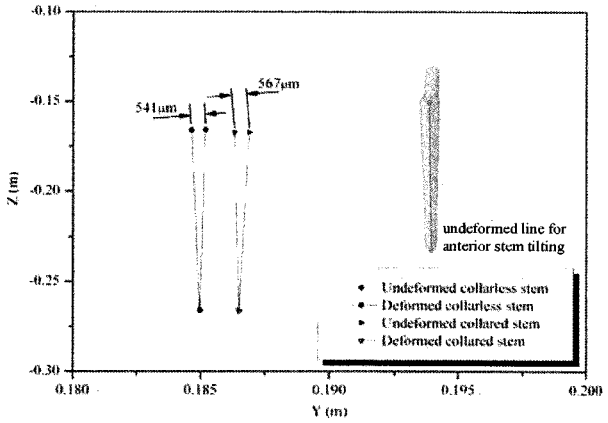
severe tilting of the stem compared with other stems. In this case, the collar contacts gradually with the resected surface under the applied loading; thereby the stem tilting is increased. Here, the collar can be seen as playing the role of a pivot.



(a)



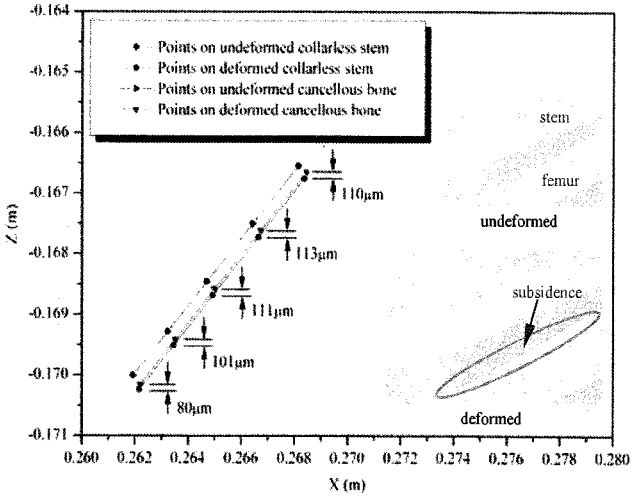
(b)



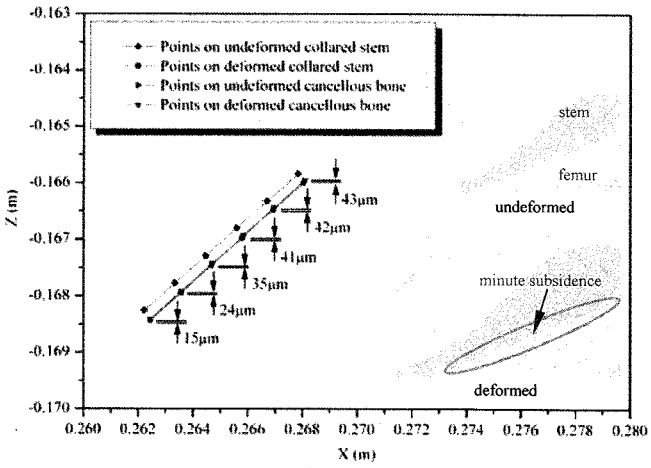
(c)

Fig. 2 (a) The lateral stem tilting, (b) another model of a collared stem with imperfect calcar contact, and (c) anterior stem tilting.

Another observation is that the anterior tilting of the stem is also considerably large in comparison with the lateral tilting of the stem. This is due to the position of the applied load, which gives rise to a moment that causes femoral deformation in the anterior direction. Since the collared stem in this research does not have projections in the anterior and posterior directions, the tilting of the collared stem is almost similar to that of a collarless stem. The subsidence of the stem into the femur and the proximal lateral gap between the stem and the cancellous bone are observed. Figures 3(a) and 3(b) present the subsidence of collarless and collared stems, respectively. Considerable subsidence is observed for the case of a collarless stem while a collared stem causes only a little subsidence.



(a)



(b)

Fig. 3 The subsidence of (a) collarless and (b) collared stems.

CONCLUSIONS

From the results of this research, it is known that:

a) Implanted stem without collar has a possibility to subside into the cancellous bone.

b) The collar should prevent the subsidence of the implanted stem into the cancellous bone.

c) The collar produces loosening between the stem and the cancellous bone.

d) The collar may produce the varus deformation of the prosthesis.

REFERENCES

1. Fagan M.J., Lee A.J.C., *J. Biomed. Eng.* **8**: 295-304, 1986
2. Whiteside L.A., et al., *Clin. Orthop. Rel. Res.* **231**: 120-153, 1988.
3. Meding J.B., et al., *J. Arthroplast.* **12**: 273-280, 1997

21 特 1－10

バイオトライボロジ　シンポジウム

北里大学医療衛生学部　馬渕　清資

1．序　言

生体関節は，摺動面の表層が関節軟骨で被覆されており，さらに関節液で潤滑されているため，優れた低摩擦性を示し70～80年程度の長期耐久性を有することが知られている．しかし，変形性関節症や関節リウマチが進行すると軟骨がすり減り，骨同士が直接接触することで鋭い痛みを伴うようになるため，病状が悪化した場合には歩行も困難となる．このような場合には，人工関節置換術を施すことで痛みは消え，軽度の運動も可能となるが，10～15年程度の耐久性しかなく，超高齢社会が到来した我が国において人工関節の耐久性の向上が必要となってきている．人工関節の耐久限界は，摺動面で発生する摩耗粉に起因して生じる骨との緩みの発生が主因であるため，摺動面を形成する，超高分子量ポリエチレン(UHMWPE)とセラミックスまたは金属，セラミックスとセラミックス，あるいは金属と金属が動的に接触する際の摩耗発生のメカニズム解明や耐久性に優れる材料の開発等に関する研究が進められている．近年，注目を集めている再生医療という観点からは，軟骨をin vitroで再生し，患部に移植する研究も進められ臨床応用も始まっている．

このような状況の下，本研究集会は「関節の再建と再生のためのバイオトライボロジ」をメインテーマとし，関節や骨・軟骨に関する研究分野でご活躍の研究者にお集まり頂き，最新の研究成果を発表して頂き情報交換を行うことを目的として開催された．

2．プログラム

○　開会の辞　　9：30 － 9：35　　東藤　貢

○　追悼　笹田　直　先生　　9：35 － 9：40　　馬渕　清資

○　生体物性1　　9：40 － 10：16　　司会　酒井　利奈

1．マイクロダメージに起因した骨リモデリング開始における骨細胞の役割
藏田耕作(九大院)，堀川直斗(九大工)，高松洋(九大院)

2．骨折部不安定性に起因して生じる骨折治癒遷延動物モデルの確立
成瀬康治，占部　憲，内田健太郎(北里大医)，馬渕清資(北里大医衛)，糸満盛憲(北里大医)

3．ラット膝蓋骨脱臼モデルにおける脛骨形態の時系列変化とカルシトニン投与による作用
成瀬康治，占部　憲，内田健太郎，小林千恵，糸満盛憲(北里大医)

○　生体物性2　　10：20 － 10：56　　司会　占部　憲

4．卵巣摘出骨粗鬆症動物モデルに対するアレンドロネート投与が与える影響についての検討
嶋田千安紀(北里大医衛)，占部　憲，成瀬康治，須藤光敏，内田健太郎(北里大医)
馬渕清資(北里大医衛)，糸満盛憲(北里大医)

5．高週齢ラットを用いた卵巣摘出骨粗鬆症モデルおよび歩行運動抑制骨粗鬆症モデルに対するアレンドロネート投与効果の検討
須藤光敏，占部　憲，成瀬康治，内田健太郎，須藤香織，糸満盛憲(北里大医)

6．副甲状腺ホルモン・コラーゲン結合ドメイン融合蛋白を用いた骨粗鬆症治療に関する基礎的研究
内田健太郎，占部　憲，成瀬康治，松下　治(北里大医)，Sakon J (University of Arkansas)
Gensure RC (Ochsner Clinic Foundation)，糸満盛憲(北里大医)

○　組　織　　11：00 － 11：36　　司会　馬渕　清資

7．冷凍保存、加温がラット膝蓋腱の力学的特性、組織学的構造に与える影響の検討
朴　晃正，占部　憲，成瀬康治，内野正隆，小沼賢治，糸満盛憲(北里大医)

8．同種骨・靭帯組織中に含まれる生存細胞除去法の検討
須藤香織，占部　憲，成瀬康治，朴　晃正，内田健太郎，須藤光敏，上野正喜
山本豪明，糸満盛憲(北里大医)

9. 加圧による組織内溶存酸素変化の測定
山崎祐司(埼大工), 森田真史(埼大院理工), 三木将仁(埼大総研機構), 諸星康雄(北里大医)

○ 軟　骨 1　　11：40 － 12：16　　司会　澤江　義則

10. 円筒圧子を用いた関節軟骨の固液二相性潤滑の解析
坂井伸朗, 細田奈津子, 萩原裕一郎, 上野誠, 澤江義則, 村上輝夫(九大)
11. MPC グラフト表面を用いた軟骨水和潤滑の評価
田村暢也, 山本浩司, 山田桂輔, 寺村 剛(京大院), 岩崎泰彦(関大), 石原一彦(東大院)
富田直秀(京大院)
12. 関節軟骨超音波評価法における探査子の傾きに伴う評価値誤差の低減
山田桂輔, 小田浩平(京大工), 山本 健(関大シス理工), 富田直秀(京大工)

○ 特別講演　　13：20 － 14：10　　司会　東藤　貢

ソフト界面の精密分子鎖凝集構造設計に基づくマクロ・ナノトライボロジー特性の精密制御
九州大学　教授　　高原　淳

○ 軟　骨 2　　14：15 － 14：51　　司会　藏田　耕作

13. スキャフォールドフリー組織再生材料(TEC)を用いた修復軟骨の力学特性
南斉亮佑, 尾形 衛(工学院大), 中村憲正(阪大医), 藤江裕道(工学院大)
14. 摩擦によるせん断ひずみ負荷が培養軟骨細胞による組織形成に及ぼす影響
澤江義則, 小俣誠二, 村上広行, 村上輝夫(九大)
15. フィブロインを被覆したマイクロパターン表面における軟骨細胞の凝集と
基質産生効率の評価
可知直芳, 大高晋之, 沈 承愚(京大院), 桑名芳彦, 玉田 靖(農生資研), 富田直秀(京大院)

○ インプラント一般　　14：55 － 15：31　　司会　村上　輝夫

16. PS 型人工膝関節のUHMWPEインサート摺動面の応力変動解析
大野充孝(九大院), 東藤 貢(九大応力研), 日垣秀彦(九産大), 三浦裕正(九大医)
長嶺隆二(杉岡記念病院)
17. THA の安全可動域に及ぼすCup 設置角、Stem offset
佐藤太志, 中島康晴, 藤井政徳, 松下昌史, 岩本幸英(九大医)
18. マウス大腿骨専用骨折作成・プレーティングシステム：Mouse Fix™ を用いた
骨折治癒過程の検討
上野正喜, 占部 憲, 成瀬康治, 峰原宏昌, 山本豪明(北里大医), Steck R, Gregory L (QUT)
Wullschleger ME, Schuetz MA (QUT, The Princess Alexandra Hospital), 糸満盛憲(北里大医)

○ 人工関節 生体関節　　15：35 － 16：23　　司会　藤江　裕道

19. 人工股関節ステムのプレスフイット固定における術中骨折の発生条件
髙橋亮子, 酒井利奈(北里大医衛), 高平尚伸(北里大医), 馬渕清資(北里大医衛)
20. 人工股関節ステム転子間プレート固定の有用性評価
尾畑幸代, 酒井利奈(北里大院医療系), 吉岡亮(北里大医衛), 糸満盛憲(北里大医)
馬渕清資(北里大医衛)
21. 全人工股関節置換術後の stem 周囲の BMD 変化と骨粗鬆症治療薬使用歴との
関連についての検討
山本豪明, 占部 憲, 内山勝文, 成瀬康治, 内田健太郎, 須藤光敏, 須藤香織
上野正喜, 糸満盛憲(北里大医)
22. 屈曲による膝関節衝撃伝達への影響
村瀬晃平(近大工)

○ 掉尾の言葉　　16：25 － 16：30　　バイオトライボロジ研究会長　糸満　盛憲

講演概要

1.「マイクロダメージに起因した骨リモデリング開始における骨細胞の役割」藏田耕作（九大院）

本報では，マイクロダメージに対する骨細胞の応答を調べるためのin vivo，in vitro実験系について紹介し，骨細胞死と骨リモデリング開始との関係について考察する．両者の関連は臨床的にも指摘されており，例えば長期臥床による廃用性骨粗鬆症では，骨の不動が骨細胞の低酸素・低栄養状態を招いて細胞死を引き起こし，これが骨吸収の亢進に繋がるという報告がある．さらにグルココルチコイド投与の副作用として生じる骨粗鬆症に関しては，グルココルチコイドによる骨細胞のアポトーシスが骨吸収の亢進をもたらしている可能性が示唆されている．このような骨細胞死に関連した骨リモデリングの開始メカニズムを明らかにすることは，これらの疾患の予防や治療に大きく貢献するだけでなく，骨の再建や再生を進める上でも有益であると思われる．

2.「骨折部不安定性に起因して生じる骨折治癒遷延動物モデルの確立」成瀬康治(北里大医)

骨折部不安定性により骨折治癒が遷延することが知られているが，小動物げっ歯類の閉鎖性骨折モデルでは作成し難いことが知られている．また，骨折部不安定性を定量評価することも困難である。従って骨折部不安定性に起因して生じる骨折治癒遷延における細胞現象やメカニズムについてはいまだ不明な点も多い．本研究では，骨折部不安定性に起因して生じる骨折治癒遷延の研究に用いることができる動物モデルの確立を目指した．

3.「ラット膝蓋骨脱臼モデルにおける脛骨形態の時系列変化とカルシトニン投与による作用」
成瀬康治(北里大医)

変形性膝関節症を自然発症するSTR/OrtCrljマウスは，大腿脛骨関節と膝蓋大腿関節の変形性変化を呈するが，膝蓋大腿関節軟骨組織に最も早期に組織学的変化を生じる（Connective Tissue Research, 50:55–63, 2009）．また，時系列的変化として脛骨内捻角度が増加することが膝蓋脱臼の一因として考えられている．そこで，膝蓋骨脱臼と骨組織の形態学的変化の直接的因果関係を詳細に検討するためにラット膝蓋骨脱臼モデルを作成した．また，骨組織の形態学的変化に対するカルシトニン製剤（骨吸収抑制型骨粗鬆症治療薬）投与による作用について検討した．

4.「卵巣摘出骨粗鬆症動物モデルに対するアレンドロネート投与が与える影響についての検討」
嶋田千安紀(北里大医衛)

原発性骨粗鬆症は閉経後の絶対的エストロゲン欠乏により骨量の減少や骨の脆弱化を生じる疾患である。骨の脆弱化により生じる骨折は，日常生活の質や活動性を著しく低下させる．アレンドロネート（以下 Alen）をはじめとするビスホスフォネート製剤（以下 BP 製剤）は強力な破骨細胞による骨吸収抑制作用を有することから、本邦における骨粗鬆症薬剤療法の主流になっている．薬物治療を開始する時期や病期は患者ごとに異なる．特に，骨量や骨密度が著しく減少した患者に対する治療効果については不明な点が多い．本研究では，骨粗鬆症が進行した卵巣摘出骨粗鬆症動物モデルに対する Alen の影響を検討した．

5.「高週齢ラットを用いた卵巣摘出骨粗鬆症モデルおよび歩行運動抑制骨粗鬆症モデルに対するアレンドロネート投与効果の検討」須藤光敏(北里大医)

急速な高齢化社会を反映し，骨粗鬆症治療対象症例は閉経後早期の原発性骨粗鬆症から歩行運動抑制を背景に持つ高齢者骨粗鬆症へと推移する傾向が認められる．しかし臨床研究と基礎研究双方においても，これら複雑な病態を呈する骨粗鬆症への治療方針の検討は未だ十分ではない．そこで高週齢ラットを用いて歩行運動抑制モデルを作成し，現在エビデンスレベルの最も高い骨粗鬆症治療薬の１つであるアレンドロネートの投与効果について卵巣摘出モデルと比較検討した．

6.「副甲状腺ホルモン・コラーゲン結合ドメイン融合蛋白を用いた骨粗鬆症治療に関する基礎的研究」内田健太郎（北里大医）

副甲状腺ホルモン(PTH)は唯一の骨形成促進型骨粗鬆症治療薬として欧米で使用されており，骨吸収抑制型骨粗鬆症治療薬であるビスホスフォネート製剤に比べ有意に骨密度を増加させることが明らかとなっている．しかし，週１回の経口ビスホスフォネート製剤が普及する中，PTH は１日１回の皮下注射を必要とする．そのため，優れた効果を持つにも関わらず骨粗鬆症治療薬に PTH を選択する患者は少ない．従って，PTH による骨粗鬆症治療の発展には，少ない皮下投与

頻度でPTHが効果的に作用するドラッグデリバリーシステムが必須である．我々は，コラーゲンへの結合能を有する副甲状腺ホルモン・コラーゲン結合ドメイン融合タンパク（PTH-CBD）を用いることで少ない投与頻度で骨量増加効果が得られるかを検討した．

7.「冷凍保存、加温がラット膝蓋腱の力学的特性、組織学的構造に与える影響の検討」
朴 晃正(北里大医)

同種腱移植における処理が腱に与える影響についてはいくつか報告されてきているが，未だ不明な点も多い．とりわけ加温や凍結での膠原線維構造、形態の変化と力学的特性変化の関連性についての報告は少ない．本研究では冷凍保存，加温がラット膝蓋腱に与える力学的特性，組織学的構造の変化を検討することを目的とした．

8.「同種骨・靭帯組織中に含まれる生存細胞除去法の検討」須藤香織(北里大医)

整形外科領域では、古くから骨欠損部を同種骨によって修復する同種骨移植術が行われてきた．近年では，膝関節の前十字靭帯損傷などに対して同種骨・靭帯組織を用いた運動器機能再建術も行われている．我々の施設（北里大学病院）では開院当初から骨バンクが設置され，同種骨・靭帯組織の処理保存法について検討が重ねられてきた．γ線照射を行うことができない本邦では，通常抗原性を低下させ疾患伝播を回避させるために同種骨には冷凍・加温処理が行われている．一方，加温処理によって同種腱・靭帯組織は力学的強度が低下するため，抗菌薬浸漬処理と冷凍が行われている．これまで冷凍保存によって同種骨組織に含まれる細胞は死滅すると考えられてきたことと，臨床的拒絶反応が極めて少ないことから，冷凍同種骨・靭帯組織の抗原性は問題視されてこなかった．しかし，我々は冷凍保存処理だけでは，骨組織に多くの生存細胞が存在することを明らかにした．よって，移植による不都合が生じる可能性が示唆された．このことから，即時臨床応用が可能な生存細胞の除去方法の確立が望まれた．今回，冷凍・解凍の繰り返しが力学的強度に影響しない簡便な生存細胞除去法となりうるかを検討した．

9.「加圧による組織内溶存酸素変化の測定」山崎祐司(埼大工)

皮膚に圧力を加え続けることで，血管が押しつぶされ血行障害が生じ，それによって組織が壊死する褥瘡という病態がある．しかし現在，発生原因はわかっていても，詳しい褥瘡発生条件は解明されていない．今回はそれを解明する一環として組織の酸素供給の基準である酸素分圧が加圧時にどのように変化するのかを測定した．また，血管の圧密と関係があると思われる加圧部分の沈み込み量と経時変化を測定した．

10.「円筒圧子を用いた関節軟骨の固液二相性潤滑の解析」坂井伸朗(九大)

生体関節軟骨機能の解明は，関節疾患機序の解明，再生組織工学の指標，潤滑システムの開発等に有用であると考えられる．軟骨組織はコラーゲンネットワークにプロテオグリカンが埋包され多くの水分を捕獲するとともに，異方性・不均一性を持つ．著者らはこの形態が高機能な関節機能を実現するための要素と考え，研究を行っている． 本講演では円筒圧子を用いた関節軟骨の圧縮挙動を実験により観察するとともに，その特性を取入た計算モデルにより円筒圧子の往復しゅう動時の挙動を解析した結果を報告する．

11.「MPCグラフト表面を用いた軟骨水和潤滑の評価」田村暢也(京大院)

関節軟骨の潤滑においては，プロテオグリカンなどの軟骨表面高分子鎖が形成する水和層による表面ゲル水和潤滑が重要であると考えられている．水和潤滑においては摩擦する両面が水和層を保持することで軟骨特有の優れた潤滑特性を維持していると考えられる．我々は表面に水和層を保持する機能を持つMPCポリマー（2-Methacryloyloxyethyl phosphorylcholine polymer）をブラシ状にグラフトさせた材料を摩擦評価対面とした摩擦試験の水和潤滑機能評価における有用性を報告してきた．本研究では軟骨表面水和層の有無が荷重負荷時間と摩擦特性との関係に与える影響について検討した．

12. 「関節軟骨超音波評価法における探査子の傾きに伴う評価値誤差の低減」山田桂輔(京大工)
近年超音波を利用した関節軟骨評価法が開発されている．超音波を使用することで，低侵襲での軟骨評価が可能である．しかし，超音波探査子が軟骨表面に対して垂直でない場合，反射波の振幅が減少し，評価値に誤差が生じるという問題がある．これに対し，我々はPeak-to-Peak値という新たな指標を用いて反射波の波形変化を定量化することで，探査子の傾き角度の推定，および反射波振幅の補正を行える可能性を報告している．本研究では，表面性状の異なる試料においてもPeak-to-Peak値を用いた角度推定法が誤差の低減に有効であるか検討を行った．

特別講演　「ソフト界面の精密分子鎖凝集構造設計に基づくマクロ・ナノトライボロジー特性の精密制御」高原　淳（九大）
高分子材料が様々な機能を発現するとき，それら材料の表面・界面（ソフト界面）の構造や物性は重要な役割を果たしている．そのため，高分子固体界面を精密に設計し，その特性を制御することで材料科学や技術を革新的に進展させることが期待されている．ここでは高分子ナノ薄膜を用いたソフト界面の精密分子鎖凝集構造設計およびトライボロジー特性制御について最近の演者らの研究例を紹介する．

13. 「スキャフォールドフリー組織再生材料(TEC)を用いた修復軟骨の力学特性」
南斉亮佑(工学院大)
関節軟骨は損傷や変性が生じると，自然治癒は困難であるため，外科的措置により損傷した軟骨を修復させる必要がある．工学院大学バイオメカニクス研究室では患者から採取した細胞を生体外で培養し，細胞と，細胞自身が作り出す細胞外マトリックスから成る組織再生材料（TEC）を作製し，これを用いて損傷部を修復させる研究を進めている．これまでに，実験動物に未成熟ブタを用いた研究は行われてきたが，成熟ブタを用いた修復軟骨の力学特性の評価は行われていない．本研究では実験動物に成熟ブタを用い，TECによって修復した軟骨の力学特性を調べることを目的とした．

14. 「摩擦によるせん断ひずみ負荷が培養軟骨細胞による組織形成に及ぼす影響」
澤江義則(九大)
歩行時の下肢関節では，摺動面を覆う関節軟骨に，周期的な圧縮力とともに摩擦による接線力が作用している．このうち，圧縮力により組織内部に生じる圧縮ひずみや静水圧については，軟骨細胞による細胞外マトリックス（ECM）産生を促進することが知られており，培養細胞による再生軟骨組織の形成に際しても，その効果を積極的に利用することが試みられている．一方，摩擦による接線力により組織にもたらされるせん断ひずみについては，細胞の代謝に及ぼす影響について未だ充分な知見が得られていない．本研究では，アガロースゲルをスキャホールドとした再生軟骨モデルを用い，培養中に加えられる摩擦による周期的なせん断ひずみ負荷が，組織形成に及ぼす影響を実験的に評価した．

15. 「フィブロインを被覆したマイクロパターン表面における軟骨細胞の凝集と基質産生効率の評価」可知直芳(京大院)
家蚕の繭から作製したフィブロインスポンジに軟骨細胞を播種し培養すると，フィブロイン表面において硝子軟骨様組織が形成され，得られた組織は良好な摩擦特性を有する．一方，培養初期において軟骨細胞はフィブロインスポンジ内で凝集体を形成することが報告されている．本研究ではフィブロインスポンジ内での軟骨細胞凝集が後の組織形成に及ぼす影響に着目し，細胞濃度による凝集挙動および基質産生効率の変化を評価した．顕微鏡観察および定量評価を容易に行うために，実験にはフィブロインスポンジを模擬したマイクロパターン平面を用いた．

16. 「PS型人工膝関節のUHMWPEインサート摺動面の応力変動解析」大野充孝(九大院)
現在，高度な膝関節障害を持つ患者に対する有効な治療法として、人工膝関節全置換術(TKA)が多く行われている．このTKAの問題として，UHMWPE製脛骨インサートの経年性摩耗や破損などがあり，インサートの耐久性向上が求められている．インサートの耐久性を検討するには，生体膝内部におけるインサートの力学状態を明らかにすることが重要であり，そのための有効な実験

的手法として，膝シミュレータによる研究が行われている．しかし，詳細な応力状態については実験からは得られないため，有限要素法を用いた数値解析との併用が望ましいと考えられる．そこで我々の研究グループは，膝シミュレータを数値モデル化したバーチャル・シミュレータの開発を試みている．初期モデルでは，筋肉として大腿四頭筋のみを考慮したモデルを構築したが，本研究では屈曲動作をより実際の動作に近づけるために新たにハムストリングを考慮したモデルを作成し，動作状態の確認を行った．

17. 「THA の安全可動域に及ぼすCup 設置角、Stem offset」佐藤太志(九大医)

骨盤傾斜の変化はCup とStem の相対的な位置を変化させる．年齢とともに進行する骨盤後傾例ではCup は過前開きになり，前方への脱臼が危惧される．今回，骨盤傾斜がTHA の可動域(ROM)に及ぼす影響を定量的に計測し，至適設置角とStem offsetの影響について検討した．

18. 「マウス大腿骨専用骨折作成・プレーティングシステム：Mouse Fix™ を用いた骨折治癒過程の検討」上野正喜(北里大医)

従来用いられてきたマウス大腿骨閉鎖性骨折モデル作成には，鋼線や注射針など用いた髄内固定が採用されてきた．従来法には，多くの利点もあるが回旋動揺性などが残存する．このため骨折治癒過程における細胞事象観察には使用されてきたが，固定性や固定材料特性が骨折治癒過程へ及ぼす影響は正確に検討できない．これらの欠点を克服するため AO Development Institute は，近年マウス大腿骨専用骨折作成・プレーティングシステム：Mouse Fix™を開発した．このシステムを用いた際の形態学的，組織学的時系列変化について検討した．また，剛性の異なる２種類のプレートを用いて，骨折部の力学的環境の違いが骨折治癒過程に及ぼす影響を検討した．

19. 「人工股関節ステムのプレスフイット固定における術中骨折の発生条件」高橋亮子(北里大医衛)

現在，人工股関節ステムのセメント非使用固定においては，プレスフイット固定が一般的である．その場合，強い力でしっかりと打ち込むことが，十分な固定力を得るのに必要と考えられている．しかし，その弊害として，ある程度の頻度で術中骨折が発生することが避けられないのが実情である．外見やＸ線像では認識されない微小骨折の発生頻度はさらに高いと推定され，それが術後の大腿部痛の発生要因となっているのではと疑われる．そこで本研究においてはプレスフイットタイプのセメントレス人工股関節ステムを対象とし，打ち込み作業の際に大腿骨内部に発生する応力を，応力測定実験と有限要素解析により求めた．2 つのアプローチによって得られた応力値を骨組織の強度と比較して，術中骨折の発生条件について考察した．

20. 「人工股関節ステム転子間プレート固定の有用性評価」尾畑幸代(北里大院医療系)

人工股関節を長期使用した時に生じる緩み，摩耗，骨溶解などの問題点を解決するために，フィン，プレート，カラーなどを用いた機械的な固定法を有するステムが開発されている．カラーを有する人工股関節ステムは，近位における力の伝達という利点があるが，カラー直下の骨に，適切な接触状態を実現することが難しいという問題が生じる．一方，1972 年に前澤伯彦によって考案された転子間プレートを用いた場合は，先にプレートのみを設置するためステムの挿入が容易である．また，プレートを用いる場合，高い圧力のかかる場所は，金属と金属の接触部分になる．そして，圧力が分散するので，骨組織には高い圧力がかからないという利点がある．本研究では，プレートの有用性を明らかにするために，プレートがある場合とない場合のステムで，圧力測定と有限要素解析を行い，ステム上の圧力分布を指標とした比較を行った．

21. 「全人工股関節置換術後の stem 周囲の BMD 変化と骨粗鬆症治療薬使用歴との関連についての検討」山本豪明(北里大医)

Stress Shielding はセメントレスタイプの stem を用いた全人工股関節置換術(以下，THR)後に大腿骨ステムが関節から受けるストレスをバイパスして末梢骨に伝えることでステム周囲の骨へのストレスが減少して発生する，廃用性骨萎縮である．骨密度の悪化は有効な stem との固定力を減少させて緩みの原因となる可能性が指摘されている．このことから Stress Shielding の予防は臨床上重要な問題として注目されている．

22. 「屈曲による膝関節衝撃伝達への影響」村瀬晃平(近大工)

日常生活では，歩行や運動によって常に動的な外力が生体に負荷されている．通常，跳躍やスポーツ時の軽度の衝突では身構える，あるいは筋力を伸張・収縮させることにより緩和して受け止めていると考えられるが，階段の踏み外し等の予期しない負荷の場合には，そのような事前反応がなく衝撃的な負荷が加わると予想される．とくに膝関節は関節面に半月板や前後十字靱帯，膝蓋骨が介在するなど複雑な構成をしており，高速変形下での材料強度や応力分布状態は静的荷重時とは大きく異なることが予想される．これまでにも膝関節領域の衝撃伝達については近来数多くの研究が行なわれているが，大腿骨近位部や脛骨遠位部までを再現したコンピュータモデルによる報告は未だ少ない．膝関節のダイナミックな荷重支持を解明するためには，骨体と靱帯組織など力学特性の異なる生体材料を組み合わせた，大規模な下肢モデルによる数値シミュレーションが必要であろう．本研究では靱帯などの軟組織を組み込んだ下肢の三次元有限要素モデルを作成し，姿勢における骨体内部の力学環境の変化，および衝撃負荷後の膝関節の挙動を調査した．

4．あとがき

本研究集会は応用力学研究所とバイオトライボロジ研究会の共催として開催された．バイオトライボロジ研究会は，バイオトライボロジに関する理論および技術の研究調査を目的として，医学，工学の両分野にまたがる研究者集団として1980年5月に組織され，年１回バイオトライボロジシンポジウムを実施しており，本研究集会は第30回バイオトライボロジシンポジウムとして開催されたものである．今回は，超高齢社会を迎えた我が国において特に重要なテーマの一つである「関節の再建と再生」を課題とし，医学と工学の両分野から最先端の研究者による２３件の講演があった．参加者も講演者を含め大学，病院，企業より約４０名ほどの参加者があり，各講演とも活発な議論を展開して頂いた．本研究集会が，この分野の発展に貴重な役割を果たしたことを信じて止まない．

生体硬組織の力学と機能

新潟大学医学部　　坂本　信

1. まえがき

バイオメカニクスとは，生物・医歯学の諸分野と機械工学系の諸分野を統合することによって生まれた学際的研究分野と定義できる．つまり，生体や生体材料に作用する力を考究する学問と言える．そのバイオメカニクスの大きな特徴は，研究を臨床応用することを目的の一つとする点である．力学的知識が求められる整形外科学や歯科学で，主に医師のみの発想だけで見事な手術や治療が行われているが，バイオメカニクスによる医歯学の基礎研究はもちろんのこと，基礎研究を何らかの形で臨床応用することを見据えながら研究を発展させることが，極めて重要なことだと考えている．したがって本研究集会は，バイオメカニクスを主なキーワードとし，医学と工学の両分野で活躍する研究者に，最新の研究内容について発表し議論してもらうことを目的とした．

なお本研究集会は，日本実験力学会バイオメカニクス分科会「The 9th Conference on Biomechanics in Fukuoka」を主催とし，九州大学応用力学研究所共同利用研究集会「生体硬組織の力学と機能」および日本複合材料学会西部支部との共催という形態をとった．

2. プログラム

開催日：2009 年 10 月 31 日（土），11 月 1 日（日）
会　場：九州大学西新プラザ（福岡県福岡市早良区西新 2-16-23）

10 月 31 日（土）

13:30 - 13:40	開会の挨拶：坂本　信（新潟大学）
セッション 1	座長：山本　衛（近畿大学）
13:40 - 14:00	「ヒト脛距関節における接触面積の MRI を用いた生体内測定」 坂本信（新潟大学），野田口洋成，田邊裕治，笹川圭右，小林公一
14:00 - 14:20	「超音波による骨評価とファントム」 野方文雄（岐阜大学），藤井秀夫（石川製作所），土生恵彦，影近謙治（金沢医科大学）
14:20 - 14:40	「歯根破折の原因追究　－歯根根尖部の形態と応力の関係－」 遠藤英昭（東北大学），佐々木具文，伊藤秀美
14:40 - 15:00	「膝関節の生体内運動力学特性評価法の開発」 小林公一（新潟大学），小田川健一，豊田貴嗣，坂本信，田邊裕治
15:00 - 15:20	休　憩
セッション 2	座長：東藤　貢（九州大学）
15:20 - 16:20	特別講演「生体力学からみる上下無歯学へのインプラント補綴設計」 松下恭之（九州大学）
16:20 - 16:30	休　憩
セッション 3	座長：笹川　圭右（新潟大学）
16:30 - 16:50	「圧縮負荷下の皮質骨で発生する微小損傷の観察」 山本衛（近畿大学），松本祐樹，中山裕隆
16:50 - 17:10	「深屈曲を目指した Bi-surface 型人工膝関節の力学的安全性の評価」 東藤貢（九州大学）
17:10 - 17:30	「骨モデルを用いたインプラント周辺骨の変位・ひずみ場計測」

森田康之（名古屋大学），銭立和（九州大学），東藤貢，松下恭之，内野正和（福岡県工業技術センター），新川和夫（九州大学），古谷野潔

18:00 - 20:00　懇親会（福岡鷹勝　西新店　福岡市西区 1-8-1-1F）

11月1日（日）

セッション4　座長：小林　公一（新潟大学）

09:00 - 09:20　「Impaction Bone Grafting による寛骨臼欠損再建部の力学特性評価」
山澤知之（新潟大学），飯田哲（千葉県松戸市立病院），大橋弘嗣（大阪府済生会中津病院），岸田俊二（千葉大学），田邊裕治（新潟大学）

09:20 - 09:40　「頸動脈強度と無侵襲評価システム」
野方文雄（岐阜大学），横田康成，河村洋子，W. R. Walsh（University of New South Wales）

09:40 - 10:00　「圧縮刺激による骨芽細胞と歯根膜細胞の遺伝子発現解析」
千葉美麗（東北大学），林治秀

10:00 - 10:20　休　憩

セッション5　座長：森田　康之（名古屋大学）

10:20 - 10:40　「生体情報（呼吸・心電図）センシングシステムの開発」
坂本英俊（熊本大学），大渕慶史，鳥越一平，宮河秀和，村山伸樹，林田祐樹，伊賀先伴彦

10:40 - 11:00　「CCD カメラを用いた人工股関節ステム設置管理法の精度検証」
窪田陽介（新潟大学），坂本信，小林公一，古賀良生（新潟こばり病院），田邊裕治（新潟大学）

11:00 - 11:20　「MRI モデルによる立位下肢状態のアライメント評価に関する検討」
笹川圭右（新潟大学），小林公一，坂本信，田邊裕治

11:20 - 11:40　「人工股関節のソケット関節面における応力分布の数値解析」
解晨（新潟大学），坂本信，小林公一，湊泉（新潟臨港病院），古賀良生（新潟こばり病院），田邊裕治（新潟大学）

11:40 - 11:45　閉会の挨拶：遠藤　英昭（東北大学）

3. 講演の概要

(1)「ヒト脛距関節における接触面積の MRI を用いた生体内測定」　坂本信（新潟大学）
Prof. Sakamoto et al. adapted a closed-MRI system with a loading device to study the in vivo articular cartilage contact areas and contact distributions of the tibiotalar joint during various ankle flexions under ankleunloaded and ankle-loaded conditions. They also evaluated the effects of body height and the geometry of tibial and talar joint surfaces on the contact areas of the tibiotalar joints.

(2)「超音波による骨評価とファントム」　野方文雄（岐阜大学）
踵骨と等価な海綿骨形状をした２次元骨ファントムを試作し，市販の骨量検査機器(許認可医療機器)を用いて計測した結果について報告があった．

(3)「歯根破折の原因追究　－歯根根尖部の形態と応力の関係－」　遠藤英昭（東北大学）
ヒト抜去歯の形態を模型に反映し，歯根や根尖部の形態に依存して，どのように応力が広がり，どこに集中しているかについて報告があった．特に，各計測部位の比率や湾曲による根尖の位置に注目した結果に関しての講演であった．

(4)「膝関節の生体内運動力学特性評価法の開発」　小林公一（新潟大学）
立位静止時の関節アライメントと床反力および運動時の関節動作と床反力の同時測定システムの開発を行うとともに，健常者と変形性膝関節症（膝 OA）患者に適用した結果について報告があった．

(5) 「生体力学からみる上下無歯学へのインプラント補綴設計」　松下恭之（九州大学）
下顎無歯顎に対する固定性および可撤性インプラント補綴設計の臨床的エビデンスが紹介され，講演者らのチームでの生体力学的検証と現時点での下顎無歯顎に対するインプラント治療に関する講演内容であった．

(6) 「圧縮負荷下の皮質骨で発生する微小損傷の観察」　山本衛（近畿大学）
ウシ大腿骨骨幹部より作製した皮質骨試料の骨軸方向に，非破壊的な圧縮過負荷を作用させ，その後に発生した微小損傷を蛍光顕微鏡によって観察していた．過負荷を単一，繰り返し，持続的の 3 条件で作用させることで，負荷様式の相違が微小損傷の発生に及ぼす影響について検討していた．また，3 種類の蛍光色素を使用した蛍光顕微鏡観察を実施することで，継続的に作用させた過負荷のもとで発生する微小き裂の進展の様子に関する報告があった．

(7) 「深屈曲を目指した Bi-surface 型人工膝関節の力学的安全性の評価」　東藤貢（九州大学）
現在開発中の人工膝関節 CFK モデルの力学的安全性を評価するために，有限要素法を用いてスクワットを模擬した深屈曲状態でも応力解析を行い，特に耐久性が問題となる超高分子量ポリエチレンインサートの応力状態について調べ，安全性や耐久性について検討する報告があった．

(8) 「骨モデルを用いたインプラント周辺骨の変位・ひずみ場計測」　森田康之（名古屋大学）
フィクスチャーと骨が接着した歯科インプラントの一般的な固定形態であるオッセオインテグレーションを模擬したオッセオインテグレーテッドインプラント試験片，および近年，治療期間の短期化を目指し普及している即時負荷インプラント治療法を模擬した即時負荷インプラント試験片を作製し，両者におけるフィクスチャーと骨界面周辺のひずみ分布状態を比較検討した結果について報告があった．

(9) 「Impaction Bone Grafting による寛骨臼欠損再建部の力学特性評価」　山澤知之（新潟大学）
混合比の異なる計 4 群の MCB/HA 混合物を，作製した寛骨臼モデルに埋設し，繰返し圧縮荷重を与える実験を行った．そして，MCB/HA 混合比が寛骨臼欠損再建部の力学特性に及ぼす影響について，Motion analysis microscope を用いてカップ移動量を連続的に撮影し，検討した結果について報告があった．

(10) 「頸動脈強度と無侵襲評価システム」　野方文雄（岐阜大学）
血管の強度とその無侵襲評価システムについて報告があった．特に，血管位置のステフネス，強度，予想破裂血圧の分布として計測する多点強度計測画像解析システムについての講演であった．

(11) 「圧縮刺激による骨芽細胞と歯根膜細胞の遺伝子発現解析」　千葉美麗（東北大学）
歯周組織に持続的圧縮力をかけたときに，直接圧縮され歯周組織のリモデリングに深く関与していると思われる骨芽細胞と歯根膜細胞に着目し，遺伝子発現とそのシグナル伝達機構を解析した結果について報告があった．

(12) 「生体情報（呼吸・心電図）センシングシステムの開発」　坂本英俊（熊本大学）
呼吸・心電図などの生体情報を無侵襲，低侵襲で計測するシステムの開発に関する講演であった．

(13) 「CCD カメラを用いた人工股関節ステム設置管理法の精度検証」　窪田陽介（新潟大学）
3 次元下肢アライメント評価システムにより THA 術前計画された人工股関節のステム設置位置を術中に CCD カメラにより得られる骨頭の 3 方向 RGB 画像を用いて，正確に再現するステム設置管理法におけるイメージマッチングの精度検証に関する報告があった．

(14) 「MRI モデルによる立位下肢状態のアライメント評価に関する検討」　笹川圭右（新潟大学）
膝の MRI モデルを用いた立位下肢アライメントの解析法を提案し，その解析法の精度について検討した結果に関する報告があった．

(15) 「人工股関節のソケット関節面における応力分布の数値解析」　解晨（新潟大学）
剛体-バネモデルに基づく離散要素解析を人工股関節に適用する方法を考案し，日常生活における基本動作時の垂直接触応力と接触面積を数値解析した結果について報告があった．

4. あとがき

本研究集会では，医歯学，バイオメカニクスの各分野において第一線で活躍する研究者にご参集いただいた．そして医学・工学の様々な視点からご講演いただき，活発な議論が交わされた．本研究集会が，この分野の発展に貴重な役割を果たしたことと確信している．最後に，この研究集会にご協力いただいた諸先生方，ならびに遠方よりご参加いただいた各先生方に心より深謝申し上げるとともに，助成していただいた貴研究所に感謝申し上げる．

21 特 1－12

下顎骨角部・顎関節突起部骨折と下顎第三大臼歯の状態との力学的相互作用に関する研究

九州大学病院・顔面口腔外科　　佐々木　匡理

・目的

下顎骨角部および顎関節突起部の骨折は顎口腔領域の外傷においては高頻度に認められる。これまで、これらの下顎骨骨折と下顎第三大臼歯の関連について様々な研究が行われており、下顎第三大臼歯の有無、埋伏方向と骨折頻度において臨床上有意な関連がみられることが報告されている。これらの問題には明らかに下顎第三大臼歯周囲における力学的環境が重要な影響を及ぼしており、これらの問題を解決するためには、同歯およびその周囲の骨組織の力学状態を明らかにすることが必要不可欠である。下顎骨に埋伏している下顎第三大臼歯は複雑な 3 次元構造と様々な埋伏方向を成しており、実験的にその応力状態を明らかにすることは現段階では不可能である。そこで本研究では、ヒト下顎骨の CT 画像をもとに下顎骨の 3 次元モデルを構築し、それとは別に構築を行った下顎第三大臼歯モデルを組み合わせることで、詳細な 3 次元下顎第三大臼歯・下顎骨モデルの構築を目指す。さらに、そのモデルに対して実際の筋肉との結合を表した境界条件を導入することで、実環境下に近い力学環境を実現し、静的および動的負荷下での応力解析を行い、下顎第三大臼歯、周囲の骨組織、ならびに界面での応力状態を明らかにすることを目的とする。

・実験方法

（1）臨床データの検討

（2）下顎骨の CT 画像に基づく 3 次元モデルの作成

（3）下顎第三大臼歯モデルの下顎骨モデルへの埋入

（4）静的・動的応力解析

（5）解析結果に基づく下顎第三大臼歯の埋伏、萌出状態における力学的問題点の検討

・実験結果

（1）2000～2009 年に九州大学病院顔面口腔外科を受診し、下顎骨骨折と診断された 136 症例（男性 105 例、女性 31 例）を対象とした。そのうち下顎角部骨折は 70 例、顎関節突起部骨折 42 例であった。下顎角部骨折と下顎第三大臼歯の関係は、表 1 に示すように 65/70 例で下顎第三大臼歯を通る骨折がみられ、41/65 例が左側であった。顎関節突起部骨折では下顎第三大臼歯がないものは 17/42 例でみられ、下顎角部骨折と併発したものは 3 例のみであった。下顎第三大臼歯の状態（図 1）と Pell と Gregory らの分類（図 2）による下顎角部骨折との関連に

表1　下顎角部および顎関節突起骨折と下顎第三大臼歯の有無

下顎角部骨折	例(70)	顎関節突起の骨折	例(42)
・8┬8なし	4	・8┬8なし	17
・8┐のみ	3	・8┐のみ	3
8┐を通る骨折	3	8┐を通る骨折	1
接点なし	0	接点なし	2
・┌8のみ	4	・┌8のみ	6
┌8を通る骨折	4	┌8を通る骨折	0
接点なし	0	接点なし	6
・8┬8	59	・8┬8	16
8┐を通る骨折	18	8┐を通る骨折	2
┌8を通る骨折	37	┌8を通る骨折	0
8┐8を通る骨折	3	8┐8を通る骨折	0
接点なし	1	接点なし	14

図1　下顎第三大臼歯の状態



正常(直)　　傾斜・逆達心的・頬舌的　　水平埋伏

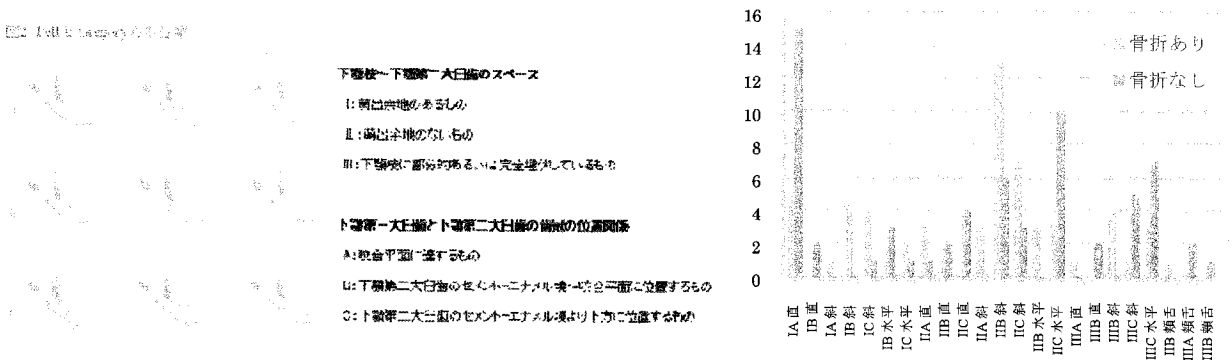


図3　下顎第三大臼歯の状態と下顎角部骨折

おいては下顎第三大臼歯の萌出余地がなく、半埋伏歯で咬合せず、傾斜しているもので有意に骨折が高かった（図 3）。

(2) 実際の臨床における下顎骨の CT 画像を生体構造解析ソフトウェア Mechanical Finder を用いて必要箇所を抽出し、顎骨モデルを作成した（図 4）。続いて、CT 画像からの CT 値を骨密度、ヤング率へ換算した（図 5）。骨密度分布を考慮することによって、皮質骨部と海綿骨部のヤング率分布を再現し、実生体構造に近い数値モデルの構築を行った（図 6）。この顎骨モデルに下顎第三大臼歯を模したモデルを挿入し、下顎第三大臼・下顎骨モデルを作成した。



図4 CT画像からの顎骨モデルの作成

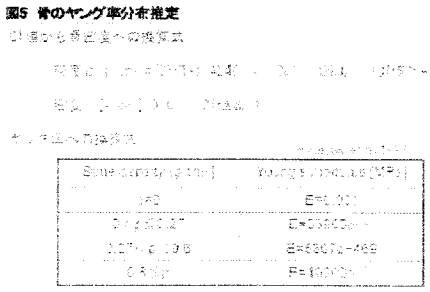




図6 顎骨モデルのヤング率分布

(3) 下顎第三大臼歯・下顎骨モデルにおいて、下顎骨に作用する各咀嚼筋における筋力を設定し、荷重条件を設定して静的・動的応力解析を現在行っている。

・考察

本研究において、下顎第三大臼歯が傾斜（特に近心）、半埋伏の状態である場合に下顎角部骨折の頻度が有意に高く、下顎第三大臼歯がくさびのように作用することで下顎角部の骨折が生じやすいことが示唆された。また、角部が骨折することで顎関節突起にまで外力が及ばず、顎関節突起の骨折が生じにくいことが考えられた。これらの結果から、下顎第三大臼歯周囲における力学的環境が重要な影響を及ぼしており、本研究において同歯およびその周囲の骨組織の力学的状態を明らかにすることで、同歯抜歯の必要性の根拠へとつなげていくことが可能と思われる。

人工骨による骨組織再生の生体力学的検討

大阪大学大学院医学系研究科　名井　陽

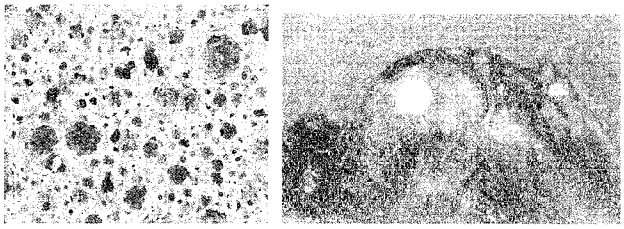
1．諸　言

腫瘍の切除や嚢胞等により骨に生じた大規模な欠損部は，そのままでは骨組織の自然な治癒は期待できないため，自家骨，他家骨，あるいは人工骨を利用した骨組織の再生が行われる．この中では自家骨が生体の拒否反応もなく最も理想的であるが，量的に限られているとともに，正常な骨を取り出して使用するため，健常な部位を傷つけるという問題がある．一方，人工骨は大量生産が可能であるが，骨組織の再生能に劣ることが問題である．最近では，生体親和性に優れる生体活性セラミックスを多孔質化することで，骨組織再生能を付与した人工骨が開発され臨床応用も進んでいる．また，より優れた骨組織の再生を目指し，in vitro でスキャホールドに幹細胞を播種し分化させ骨組織を再生後生体に移植する研究も進んでいる．

本研究では，多孔質ハイドロキシアパタイト系人工骨をウサギ大腿骨に埋入し，骨再生状態の経時変化を調べた結果に対し，コンピュータ・シミュレーションの技術を用いて力学的な見地から解析し，得られた結果と実験結果と比較検討することで人工骨と骨組織の複合系の力学特性変化のメカニズムを明らかにすることを目的とした．

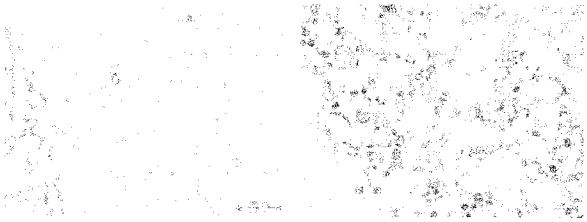
2．動物埋入実験

図 1(a)に実験で用いた人工骨の微視構造を示す．空孔径の平均サイズは 150μm であり，連通構造となっている．図 1(b)は円柱状の人工骨をウサギ大腿骨に埋入した状態を示している．この状態でウサギを最長 48 週間飼育し，μCT による構造観察や力学試験を行い骨組織再生の影響を評価した．図 2 に 1 週間後と 48 週間後の人工骨内の状態を示す．青色で染色された部分が骨組織であり，1 週間後では人工骨内には骨組織は侵入していない．しかし，48 週間後には人工骨内は骨組織で満たされており，骨伝導能が有効に働いたことがわかる．



(a) 微視構造　　(b)動物埋入実験

図 1 人工骨の微視構造と動物埋入実験



(a) 1 週間後　　(b) 48 週間後

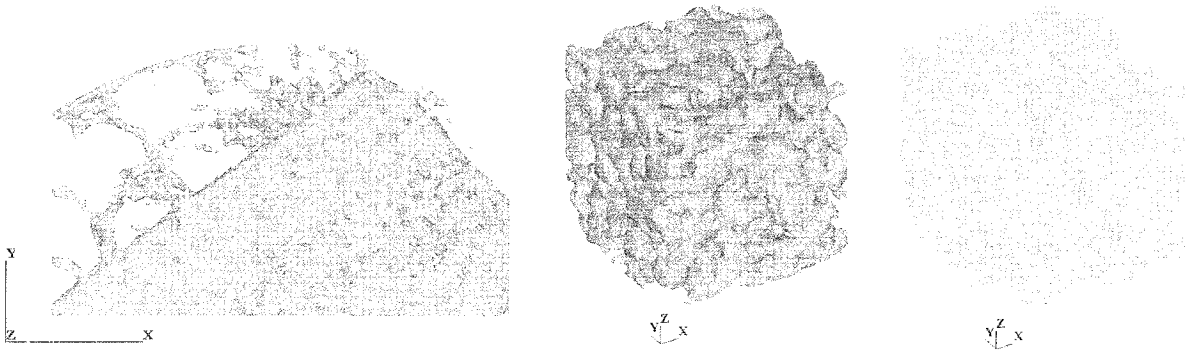
図 2 骨組織侵入の様相

3．コンピュータ・シミュレーション

人工骨をウサギ大腿骨に一定期間埋入した後にμCT で撮影した微視構造の 2 次元画像より 3 次元数値解析モデルを構築し，力学特性の評価を行った．図 3(a)にμCT 画像を基に構築した 3 次元モデルの全体像を示す．図 3(b)は 1 週間後の人工骨の一部分を抽出したものであり，1 辺が 500μm の立方体形状を成している．人工骨の多孔質構造が数値解析モデルにおいても再現されていることがわかる．図 3(c)は有限要素モデルであり，4 面体要素で分割している．この立方体モデルに対し，上面は 2 方向を固定し下面に 1N の分布荷重を作用させて圧縮解析を行った．

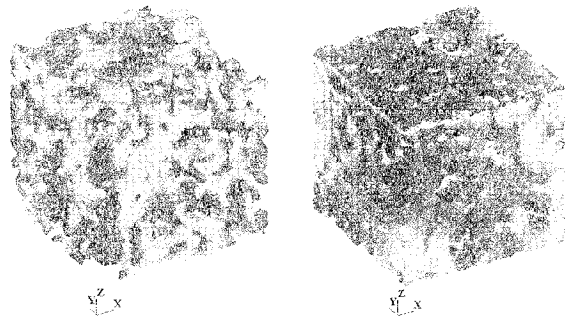
図 4 にひずみエネルギ密度の分布状態を示す．1 週間後のモデルでは骨組織の侵入が無く（図 2(a)参照）多孔質構造が維持されているため，ひずみエネルギ密度の局所的集中が多く観察される．一方，48 週間後のモデルでは骨組織が侵入し空隙が無くなるため，ひずみエネルギ密度の局所的集中箇所は大幅に減少していることがわかる．図 5 は 1 週間後の強度を

基準とし規格化した圧縮強度の実験結果と数値解析結果を比較したグラフである．解析結果をそのまま用いて予測した圧縮強度は実験結果と大きな違いを示しているが，補正を施すことで実験結果と良い一致を示す．この補正はμCT の解像度に起因するものであり，実際の空孔サイズよりも数値解析モデルの空孔は解像度の影響で小さくなるために弾性率は過大評価となる．そこで，1 週間後のモデルから得られた弾性率に対して空孔サイズを考慮した補正を行い圧縮強度の再評価を行った．なお，本解析では，ひずみ基準の破壊のクライテリアを用いて，1 週間後の圧縮強度と他の週の圧縮強度の比は弾性率の比に等しいという仮定を用いて評価を行った．圧縮強度は増加を示した後，減少する傾向を示すが，これは骨組織の再生が活発に行われた後，骨芽細胞と破骨細胞による骨リモデリングが機能し，定常状態に近づいていくことを示唆している．



(a) 全体モデル　　(b) 代表要素モデル　　(c) 有限要素モデル

図 3　μCT 画像より構築した 3 次元数値解析モデル



(a) 1 週間後　　(b) 48 週間後

図 4　ひずみエネルギ密度分布状態

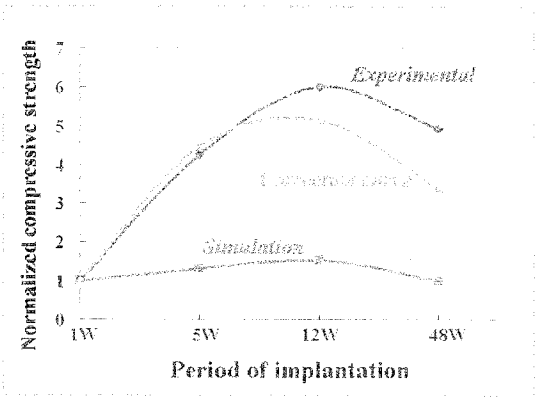


図 5　圧縮強度の実験結果と数値解析結果の比較

成果発表

① 荒平高章，東藤貢，名井陽，人工骨の力学挙動に及ぼす骨組織再生の影響，第３１回日本バイオマテリアル学会大会，京都，平成 21 年 11 月 16－17 日

研究組織

1．　名井　陽，大阪大学大学院医学系研究科，准教授，研究代表者・生物学的考察
2．　杉安謙仁朗，大阪大学附属病院整形外科，医師，生物学的考察
3．　荒平高章，九州大学大学院総合理工学府，修士課程２年，数値シミュレーション
4．　東藤　貢，九州大学応用力学研究所，准教授，所内世話人・生体力学的考察

咬合時における歯科インプラント周辺骨の変形解析

福岡県工業技術センター　　内野　正和

1. まえがき

近年，歯科インプラント治療は「歯牙および歯周組織の欠損から生じる咀嚼，発語機能，審美性の低下を回復し，患者の生活の質（QOL）を著しく向上させる」として，歯科医療の中で重要な地位を占めてきている．しかしながら，不適切な治療による術後の「骨吸収」，「インプラント破折」などの合併症も生じている．

これらの合併症は，力学的要因が大きいと考えられる．そのため，歯科インプラントおよびその周辺骨の変位・ひずみ・応力分布を明らかにすることが重要である．しかし実験の困難性から，有限要素法を用いた数値解析が主流であり，実験的にインプラント周りの骨に作用する変位・ひずみ・応力分布を求める研究は少数である．またその実験的手法に関しても，単一構造の光弾性材料に歯科インプラントを植立し，光弾性法により応力分布を解析することに限られている．しかし実際の骨は，皮質骨および海綿骨の二層構造を有しており，実験を行う際にもそのような骨モデルを使用することが重要である．

そこで本研究では，皮質骨および海綿骨，すなわち骨の二層構造を模擬したSAWBONES社製の骨モデルを使用した．この骨モデルに歯科インプラントのフィクスチャーを植立し，擬似咬合荷重を付与した．そして，デジタル画像相関法により変位・ひずみ分布を解析した．本報告では，フィクスチャーと骨が接着した歯科インプラントの一般的な固定形態であるオッセオインテグレーションを模擬したオッセオインテグレーテッドインプラント試験片，および近年，治療期間の短期化を目指し普及している即時負荷インプラント治療法を模擬した即時負荷インプラント試験片を作製し，両者におけるフィクスチャーと骨界面周辺の変位・ひずみ分布状態を比較検討した．

2. 実験方法

2.1 試験片

歯槽骨の皮質骨および海綿骨の二層構造を模擬した骨モデルには，SAWBONES 社製 Biomechanical Test Material の Laminated Test Block を使用した．材質は，皮質骨がガラス繊維強化エポキシ樹脂，海綿骨がポリウレタンである．この Laminated Test Block の特長は，二層構造のほかに，力学的特性が骨とほぼ等しいことである[1]．使用した Laminated Test Block のサイズは $40\times40\times30$ mm^3，皮質骨厚さはそれぞれの両端で 2 mm とした．また使用したフィクスチャーは，日本メディカルマテリアル（JMM）社製 POI EX FINAFIX テーパータイプ（POI 47-14TP-L）である．本フィクスチャーの最大外径は 4.7 mm，全長 16 mm，骨への埋入長さは 14 mm である．

フィクスチャーは，Laminated Test Block の上面 40×40 mm^2 の中央に植立した．フィクスチャー植立時におけるフィクスチャー窩の形成には，JMM が推奨する POI EX Manual に示されたドリル群を使用した．窩洞形成時に生ずる試験片の個体差を小さくするため，万能フライス盤（日立精機社製 2MF-U）により窩洞形成を行った．ここでオッセオインテグレーテッドインプラント試験片の作製には，インプラント窩に接着剤（住友スリーエム社製 Scotch 強力接着剤 6004N）を充填後，フィクスチャーを植立した．そして即時負荷インプラント試験片の作製には，接着剤を充填せずフィクスチャーを植立した．フィクスチャーの植立は，いずれの試験片においても，タッピングレンチにより手動で行った．フィクスチャーを植立した Laminated Test Block 試験片において，全視野の変位・ひずみ分布計測を行うため，側断面を露出させた．

2.2 実験手順

咬合を模擬した圧縮試験は，次の手順で行った．(i) デジタル画像相関法を用い解析を行うため，試験片の観測領域に黒色および白色のスプレー塗料（大日本塗料製 シリコン変性タイプ超速乾水性スプレー S05032）を噴霧し，ランダムパターンを形成した．(ii) 試験片を小型卓上試験機（島津製作所製 EZ Test）に設置した．(iii) 荷重点はフィクスチャーの上端部とし，最初に荷重を負荷した際の剛体変位を防止するため，予荷重として-4.0 N 付与した．(iv) そして送り速度 0.50 mm/min.で-200 N まで圧縮荷重を加えた．(v) その際のロードセルの荷重およびクロスヘッドの変位を記録するとともに，-10 N ずつ CCD カメラ（Nikon 製 D80）で画像を取得した．画像サイズは 2600×3900 pixels，画素サイズは 4.7 μm/pixel である．(vi) デジタル画像相関法の解析プログラムには，Correlated Solutions 社の Vic-2D を使用した．

3. 実験結果

圧縮試験により得られた荷重－変位曲線の一例を図 1 に示す．横軸はクロスヘッドの変位，縦軸はロードセルの荷重である．オッセオインテグレーテッドインプラント試験片は，変位に対してほぼ線形に荷重が増加した．一方即時負荷イ

ンプラント試験片では，変位-0.15 mm あたりですべりが生じたような挙動を示しているが，それ以降の荷重はほぼ線形的に増加した．したがって同じ荷重では，即時負荷インプラント試験片のほうが，常に大きい値を示した．

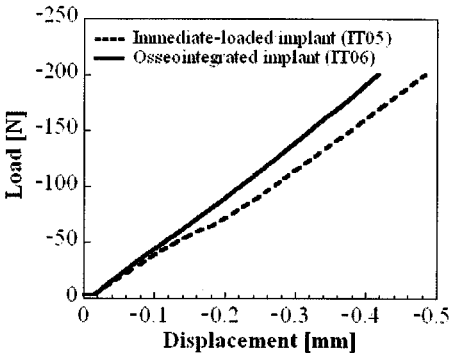


Fig. 1 Load-displacement curve.

デジタル画像相関法により得られた変位分布からひずみ分布を求めた．その結果を図 2, 3 に示す．図 2 は即時負荷インプラント試験片，図 3 はオッセオインテグレーテッドインプラント試験片であり，(a), (b), (c)は，ε_{xx}, ε_{zz}, γ_{xz} を表す．いずれの試験片においても，最大ひずみの集中箇所はほぼ同じで，ε_{xx} および γ_{xz} はフィクスチャーテーパー部の海綿骨領域，ε_{zz} はフィクスチャー先端部の海綿骨領域に生じた．しかしながら分布をみると，即時負荷インプラント試験片では，フィクスチャー直近の骨で咬合荷重を負担しているのに対し，オッセオインテグレーテッドインプラント試験片では，広範囲の骨で咬合荷重を負担していることが示されている．これは，オッセオインテグレーテッドインプラント試験片では，フィクスチャーと骨が接着されているためである．また各ひずみの最大値においても，オッセオインテグレーテッドインプラント試験片では（ε_{xx}, ε_{zz}, γ_{xz}）=（-0.3%, -1.5%, 0.4%）であったのに対し，即時負荷インプラント試験片では（-0.6%, -5.0%, 1.9%）と全て高い値を示した．このように即時負荷インプラントはオッセオインテグレーテッドインプラントに比べて，ひずみの最大値が大きくなる傾向を示しており，骨吸収が生じやすい状況であることを示唆している．

4. まとめ

骨モデルに歯科インプラントのフィクスチャーを植立し，擬似咬合下でのフィクスチャー／骨モデル界面周辺の変位・ひずみ分布挙動を解析した．骨モデルには，実際の骨の構造および力学的特性に近い皮質骨・海綿骨の二層構造を模擬した SAWBONES 社製の Laminated Test Block を使用した．そして，オッセオインテグレーテッドインプラント周辺の骨変形状態と即時負荷インプラント周辺の骨変形状態を比較検討し，以下の結果を得た．

(1) オッセオインテグレーテッドインプラントおよび即時負荷インプラントともに最大ひずみの集中箇所はほぼ同じで，ε_{xx} および γ_{xz} はフィクスチャーテーパー部の海綿骨領域，ε_{zz} はフィクスチャー先端部の海綿骨領域に生じた．

(2) 即時負荷インプラントではフィクスチャー直近の骨で咬合荷重を負担しているのに対し，オッセオインテグレーテッドインプラントでは広範囲の骨で咬合荷重を負担していることを示した．

(3) 各ひずみの最大値は，オッセオインテグレーテッドインプラントでは（ε_{xx}, ε_{zz}, γ_{xz}）=（-0.3%, -1.5%, 0.4%）であったのに対し，即時負荷インプラントでは（-0.6%, -5.0%, 1.9%）と全て高い値を示した．

参考文献

(1) SAWBONES Worldwide Leaders in Orthopaedic and Medical Models, A Division of Pacific Research Laboratories, Inc., (2008), 72-73.

研究体制

氏名	所属	職名	役割・担当分野
内野正和	福岡県工業技術センター	専門研究員	研究代表者・解析
森田康之	名古屋大学大学院工学研究科	講師	実験、解析
新川和夫	応力研	教授	解析
東藤貢	応力研	准教授	世話人・解析

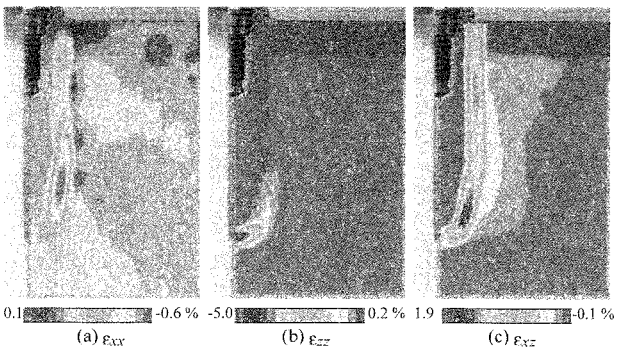


Fig. 2 Strain distributions of an immediate-loaded implant specimen.

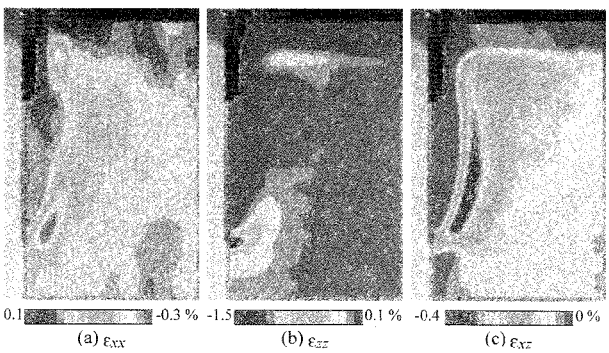


Fig. 3 Strain distributions of an osseointegrated implant specimen.

膝関節面接触の変化が衝撃荷重伝達に与える影響

近畿大学工学部　村瀬晃平

1. 緒　言

下肢関節は，日常生活における歩行や跳躍の影響を受け，他の関節に比べ動的・衝撃的な荷重負荷を与えられている．このため内外反あるいは屈曲など，関節面の条件変化により，静的な軽荷重でも体重の数倍，動的荷重下ではさらに大きな荷重変動が起こると予想される．

膝関節は関節面に半月板や前後十字靭帯，膝蓋骨が介在するなど，他の各部関節に比べて複雑な構成をしており[1]，歩行や跳躍時などのダイナミックな荷重支持を解明するためには，材料特性の異なる骨体と靭帯組織を組み合わせるとともに，下肢全体を再現した有限要素モデル[2,3]を構築し，力学シミュレーションを行なう必要がある．

本研究では，静的荷重と衝撃荷重による支持機構の違いや各姿勢における骨体内部の力学環境の変化，および衝撃負荷後の膝関節の挙動を調査した．また，材料定数などのパラメータがおよぼす影響についても検討した．

2. 方　法

2.1 膝関節のモデリング

有限要素モデル作成では，CTデータより抽出した輪郭形状からサーフェスモデルを作成したのち，あらかじめ六面体要素で分割したプリミティブをサーフェス内で膨張させることでモデル内の六面体要素充填[4]をおこなった．

膝関節には，体重を支えられる安定性，歩行やバランスを支持するための可動性が必要である．このため，大腿骨と脛骨は内側側副靭帯と外側側副靭帯，関節面中央部で大腿骨外側と脛骨を繋ぐ前十字靭帯，および脛骨後方から大腿骨内側を繋ぐ後十字靭帯で，それぞれ接続されている．また膝蓋骨上下端は膝蓋腱と呼ばれる繊維状組織によって，大腿骨や脛骨と接続されている．本研究ではこれらの靭帯をモデル化した．

骨体内部については軟骨，軟骨下骨，皮質骨，海綿骨および半月板を再現した．解析モデルを背後から見た様子を**Fig.1**に示す．

今回は左下肢全体を想定し，**Fig.2**に示すように関節面から大腿骨を**420mm**，脛骨を**380mm**までモデル化した．直立と歩行を再現するため，直立モデルでは関節面を基準に**10°**，歩行モデルでは弱屈曲状態を想定し，関節面を基準に**22°**の屈曲を与えた．モデル全体の節点数は**6291**，要素数は**5190**であった．

本研究では膝関節の力学環境が異なる条件として内反，外反状態を取り上げた．一般に整形外科領域では，前額面から見て大腿骨と脛骨のなす角度が**175°**の場合を正常な状態としている．このため本解析ではこの状態を正常位置とし，大腿骨を内側および外側へそれぞれ**5°**傾けることで，内反，外反状態を再現した．

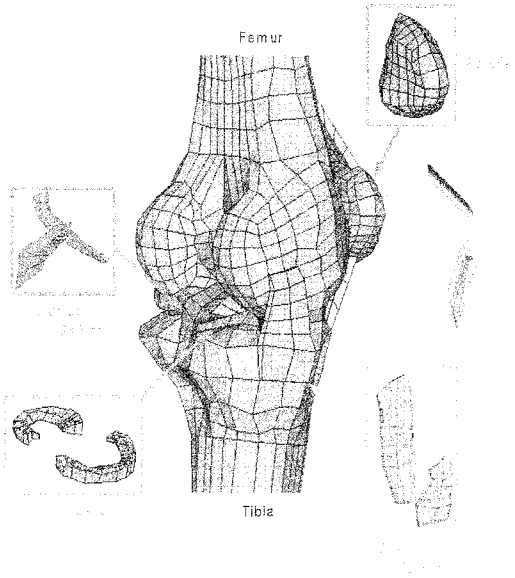


Fig. 1　Finite element mesh of knee joint

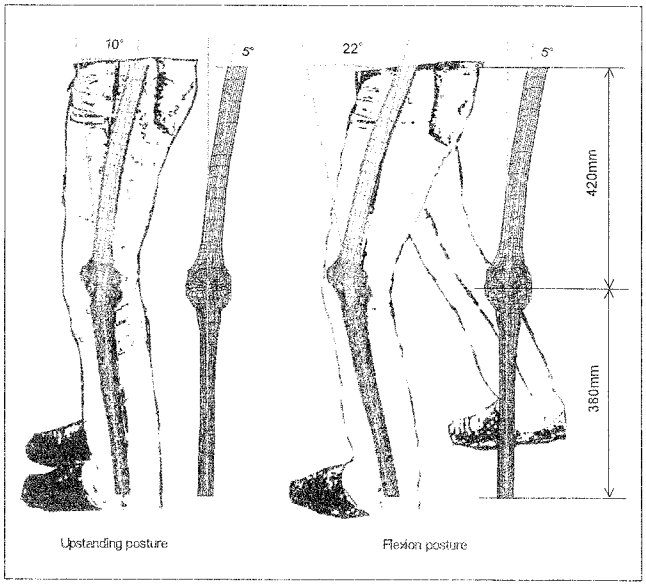


Fig. 2:Upstanding and flextion posture of FE model.

	Young's Modules[MPa]	Poisson's Ratio	Density [g/cm^2]
Articular Cartilage	100	0.49	1.20
Subchondral Bone	5000	0.25	1.71
Cancellous Bone	203	0.45	1.16
Cortical Bone	17700	0.30	1.71
Meniscus	10	0.49	1.20
Bone Marrow	0.1	0.30	1.16
Patella	17700	0.30	1.17
Knee Ligament	350	0.30	1.10
Plate	210000	0.30	1.15
Patella Ligament	350	0.30	1.10

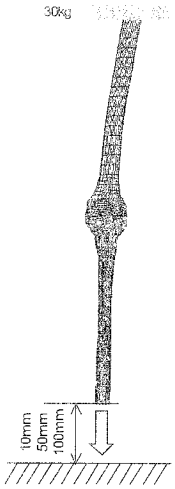


Fig. 3:Material properties and loading conditions.

2.2 解析条件

Fig.3 に使用した材料定数および荷重条件を示す．本解析では膝関節モデルの上端，または下端から荷重を与えるため，比較的単純な引張または圧縮状態になることが予想されるため，各組織は等方性弾性体と定義した．

衝撃荷重については **10mm**，**50mm**，**100mm** の高さから落下した状態の加速度を与え，着地後 **10ms** までを解析した．上半身の体重を模擬した上部プレートは，衝撃時の落下防止のため荷重方向以外の変位を拘束し，脛骨下端には完全拘束とした．また，大腿骨，脛骨，半月板，膝蓋骨には接触設定を定義した[2]．静解析モデルでは上記の設定を施すとともに，体重の半分を想定した **300N** の荷重を大腿骨近位端から与えた．

3. 結 果 と 考 察

Fig.4 に解析モデルに衝撃および静荷重を与えた際の大腿骨の回旋の様子を示す．衝撃解析の結果では，大腿骨の内側，外側端に直線を引き，前後方向の変位と旋回を表している．大腿骨は体の内側に旋回（内旋）しながら前方へ変位し，後退するときには体の外側に旋回（外旋）している．

静解析の結果は，前後および内外側方向の相対的変位をそれぞれ矢印と数値で表している．内外側方向では内側部の変位量が大きく，前後方向では外側部の変位が大きいことから，静荷重では衝撃時にくらべ，外旋が発生しやすいことが示唆された．

Fig.5 に **10mm** から膝関節モデル全体を落下させ着地を再現した場合の直立姿勢，歩行姿勢，内

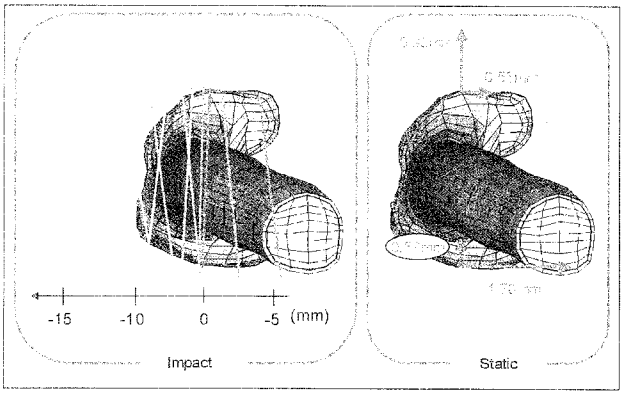
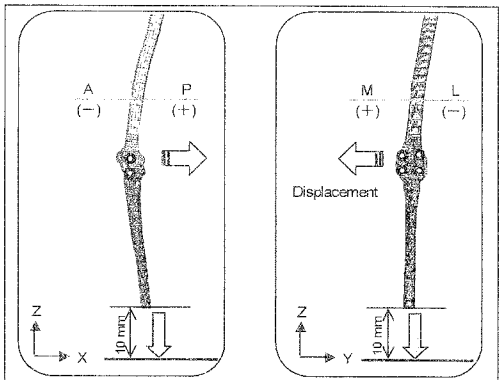


Fig. 4 Displacement for impact and static loading.



Posture		Anterior-posterior X(mm)	Medio-lateral Y(mm)	Peak time(ms)
Standing	Normal	2.6	-1.3	11.0
	Varus	0.2	-1.4	12.0
	Valgus	2.4	-2.0	8.0
Flexion	Normal	1.7	-0.2	9.0

Relative displacement

Fig. 5 Maximum equivalent displacements of postures in impact loading.

反，外反姿勢モデルの最大相対変位量と発生時間を示す．最大変位が発生する時間はどれも **10ms** 前後であり，それほど差は見られなかったが，相対変位量は内反姿勢モデルが最も少なく，続いて歩行姿勢，直立，外反の順であった．大腿骨と脛骨間の相対変位量が大きいほど，靭帯などの軟組織が瞬間的に伸展させられると予想される．これらのことから，歩行姿勢以外の角度で着地を行なうと，小さい段差でのつまづき等でも軟組織に大きな負荷が加わり，思わぬ怪我をする可能性があると考えられる．この傾向は **50mm**，**100mm** の場合も同様であった．

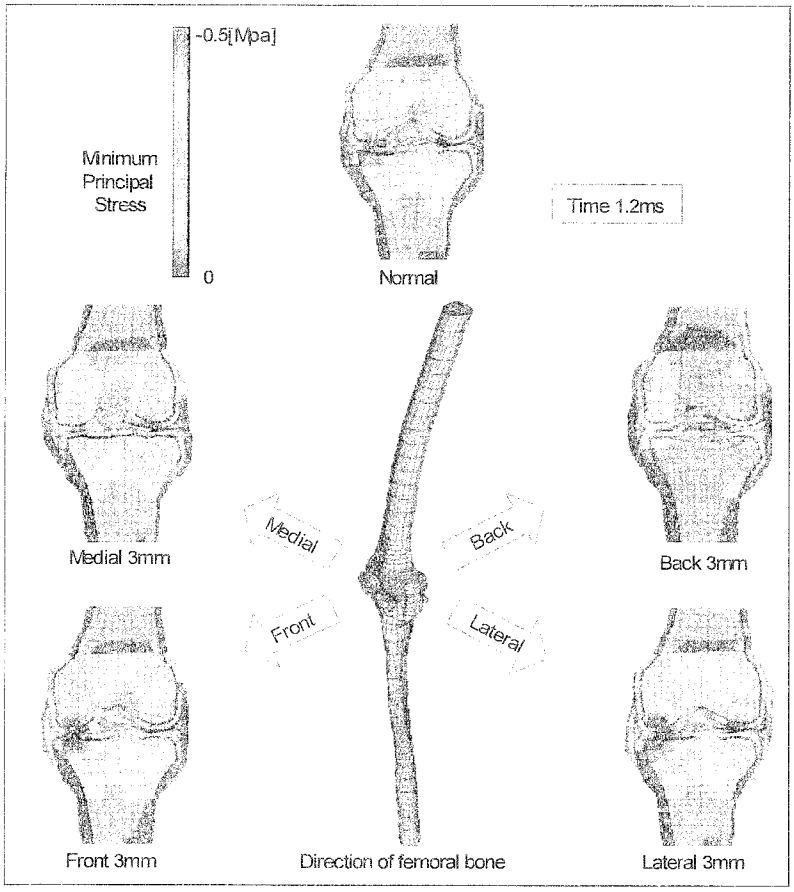


Fig. 6 Compress stress distribution of knee joint for impact load

大腿骨−脛骨の接触位置が数ミリずれたことを想定し，直立姿勢モデルの大腿骨を前後左右に **3mm** オフセットし衝撃荷重を与えたときの応力分布状態を **Fig.6** に示す．応力ピークは着地後 **1.2ms** で発生しており，変位ピークが **10ms** 前後であることとくらべ，はるかに早く衝撃荷重が伝達されていることを示している．接触面を前方および外側に移動させた場合は，大腿骨を移動させなかったものとあまり変化は見られなかった．一方，接触面を後方に移動させた場合では，海綿骨部分の応力値が極端に低くなり，内側に移動させた場合では応力ピーク位置が外側海綿骨へ変化した．この傾向は部分的に材料定数を変更した場合やメッシュ規模を変更した場合も同様であった．これらの結果から，膝関節面接触の変化が衝撃荷重伝達に大きな影響を与えることが予想される．

参考文献

1) John C.Gardiner and Jeffrey A. Weiss: Subject-specific finite element analysis of the human medial collateral ligament during valgus knee loading, Journal of Orthopaedic Research, No.21, pp.1098-1106, 2003.
2) K.Murase, F.Morita, N.Yoshino et. al. :Impact Load Transmission of Human Knee Joint using in vitro Drop-Tower Test and Three-Dimensional Finite Element Simulation., Journal of Biomechanical Science and Engineering, Vol.2, No.4, pp.218-227, 2007.
3) 村瀬, 吉野, 福田, 堤 ：静荷重下における生体膝関節の FEM 浅屈曲シミュレーション, 日本臨床バイオメカニクス学会誌, Vol.29, pp.253-260, 2008.
4) 村瀬, 山田:要素膨張充填による生体の三次元モデリング, 日本臨床バイオメカニクス学会誌, Vol.26, 437-442, 2005.

音響放出による類似歯質/レジン界面の非破壊解析

Nondestructive Analysis of Simulated Tooth/Resin Interface using Acoustic Emission

Ja-Uk Gu[1], Nak-Sam Choi[2*], Kazuo Arakawa[3]

[1] *Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Hanyang University, 17 Haengdang-dong, Seongdong-gu, Seoul 133-791, Korea*

[2] *Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, 1271 Sa3 dong, Sangrok-gu, Ansan-si, Gyeonggi-do 426-791, Korea. * Corresponding author. E-mail address: nschoi@hanyang.ac.kr*

[3] *Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, 6-1 Kasuga-koen, Kasuga-shi 816-8580, Japan*

Objectives. Polymerization contraction of the composite resin causes marginal disintegration with the bonded surrounding substrate and insufficient sealing of open dentinal tubules. The purpose of this study was to detect in real time acoustic emission (AE) signals arising during the polymerization shrinkage of composite resin restorations subjected to light exposure, and to suggest an AE method for nondestructive characterization of the marginal disintegration of the dental restoration.

Methods. Composite restoration based on different substrates and different adhesive bonding states was performed under the light curing. The contraction stress and the disintegration around the margin of the composite restoration are analyzed by measuring the circumferential strain on the outer surface of the ring type substrate. AE signals were monitored in real-time for observing the marginal disintegration process of the restoration in the cavity-type substrate. AE behaviors are compared to SEM analysis results of the marginal disintegration.

Results. All kinds of restoration specimens generated blast-typed AE signals having principally a frequency band of 100-200 kHz during the polymerization shrinkage. Bad bonding states caused

to generate many AE events having comparatively high amplitudes. The distribution of hit events versus curing time was significantly different depending on the ring substrates and the interfacial bonding treatments. The quantity of AE hit events for the human molar dentin specimens was much less than that for the steel ring specimen but more than that for the PMMA ring specimen.

Significance. It was ascertained that AE happened during the polymerization shrinkage of composite resin. Bad bonding states without an adhesive layer, or with an adhesive layer untreated by the light exposure, were represented by the generation of many AE events, especially in the initial curing period of one minute at high contraction rate. A good bonding state suppressed cracking and thus caused the little generation of AE during the curing of dental composite restoration. The number of AE hit events showed a steep increase with increasing the marginal gap size. The increase in the gap size represented the increase in the number of crackings along the margin and thus corresponded to the large number of hit events detected. Therefore, the AE behaviors can be used as a nondestructive evaluation index for the marginal disintegrative fracture of dental restoration.

Research Outcome:

1) Ja-Uk Gu, Nak-Sam Choi, Kazuo Arakawa, Debonding fracture between composite resin and artificial dental ring during the light curing, Proceedings of the Spring Conference of Korean Society for Composite Materials, Daejon, Korea, (May 1, 2009) pp.107-110.
2) A full paper submitted to 'Dental materials' Journal on November 30, 2009.

船首形状変更による波浪中抵抗増加低減に関する研究

広島大学大学院工学研究科
教授 岩下 英嗣

1. 研究目的

波浪中では静水中を航行する場合と比べて船舶に作用する抵抗が増加する．これは船体が，船体運動や入射波の反射波等に基づく非線形波を造波することによるエネルギーの損失に起因したものである．近年、CO2削減等の社会的要請もあり、船舶の推進性能は従来の静水中の性能のみでなく波浪中抵抗増加を含んだ形で評価されるようになってきている．こうした背景を受け，本研究では抵抗増加の小さな船首形状を，供試模型を用いた水槽実験による船体運動の計測と波形の計測を通じて実験的に調べることを目的としている．

2. 研究方法

船首形状を変更した複数の供試模型を用いた曳航試験によって，次の手順により研究を遂行する．

(1) 2.5m 供試模型を用い，深海機器力学実験水槽において，船体運動計測試験を行い，非線形運動および波浪中抵抗増加を計測する．

(2) 運動計測試験と同時に波形計測試験を行い，現在得られ難い波浪中航行時の非定常波形を計測する．

(3) 取得データを解析し，船体運動および波形の非線形性の特性についてまとめるとともに，非定常波の波形解析からも抵抗増加を算出する．

(4) 力の計測により得られた抵抗増加と波形から得られた抵抗増加の二つの視点から，船首形状の相違による抵抗増加の低減量を比較，検討する．

(5) 一連の研究を総括する．

3. 研究組織

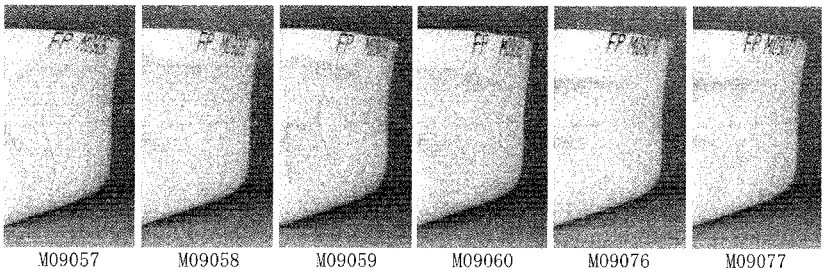
本研究は下記のような組織で行った．

氏　名	所　属	職　名	役割・担当
岩下 英嗣	広島大学大学院工学研究科地球環境工学講座	教授	代表者
勝田 貴志	広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻	博士課程３年	実験補助
松琴 卓也	広島大学工学部第四類生産基盤工学課程	４年	実験補助
池本 俊史	広島大学工学部第四類輸送機器工学課程	４年	実験補助
田辺 晃弥	広島大学工学部第四類輸送機器工学課程	４年	実験補助
谷口 弘樹	広島大学工学部第四類輸送機器工学課程	４年	実験補助
吾郷 祐紀	広島大学工学部第二類情報工学課程	３年	実験補助
胡　長洪	九州大学応用力学研究所	准教授	実験指導

4. 研究結果

4.1 供試模型

本実験で使用した供試模型は分割模型となっており，船首部形状を容易に取り替えることができる．船首形状としては，船体番号 M09057 をオリジナル船型とし，主にチャインライン位置とフレアー形状を変更した 6 種類を準備した．Fig.1 に本実験で使用した各船首形状の写真と船型番号，およびチャインラインとフレアーの特徴を示す．なお，各船首部を装着した船体模型に対して重心位置や環動半径などの実験条件を一致させるため，バラストウエイトの調整を行っている。



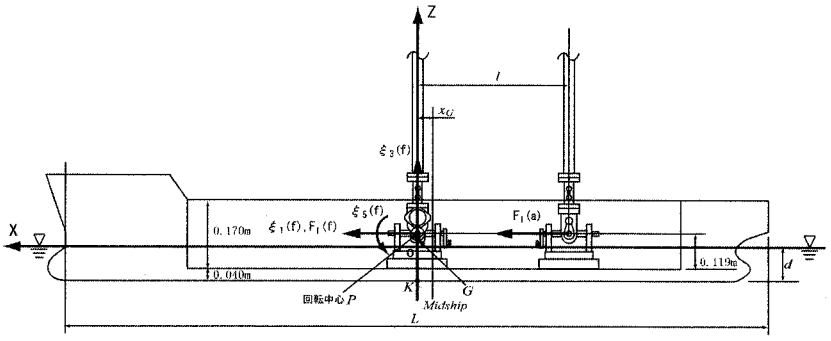
船体番号	チャインライン	フレアー角度
M09057		
M09058	高	浅い
M09059	高	深い
M09060	中	浅い
M09076	低	浅い
M09077	低	水平

Fig. 1　船首形状の異なる供試模型とそれらの特徴

4.2 試験内容

運動計測

運動計測装置を用いて surge, heave, pitch の運動の計測を行い，前後のロッドに取り付けたひずみゲージにより船体に及ぼす抵抗を求める．位相基準は船体重心位置に入射波頂が来た時を $t=0$ としている。運動計測試験は，静水中を航行する定常試験と造波機により起こされた入射波中を航行するときの非定常試験について行っている．実験条件はフルード数 $F_n=0.19045$，非定常試験における入射波は正面向かい波で $\lambda/L=0.3$〜3.0 について行った．運動計測試験で用いる模型船体の模式図を Fig.2 に示す．



主要寸法

L	2.5000	m	l	0.6570	m
B	0.4626	m	$\overline{KG}$	0.1208	m
d	0.1566	m	κ_{G_V}	0.6270	m
∇	0.1439	m^3	κ_{G_V}/L	0.2508	
W	143.90	kgf	I_G	5.7632	$kgf \cdot ms^2$
x_G	0.0815	m	I_P	5.9729	$kgf \cdot ms^2$
			$\overline{GP}$	0.0382	m

Fig. 2　運動計測試験時の模型セットアップ図および模型主要目

波形解析

Fig.3 に波形解析の模式図，また Fig.4 に容量式波高計を示す．水槽壁面に計 6 個の波高計を船の進行方向に縦並びに設置し，Fig.3 中の trigger の位置に船首が差しかかった瞬間を計測開始時刻としている．波形計測は定常試験および非定常試験について行った．計 6 個の波高計は同時に calibration が可能であり，非定常試験における波高計間隔は入射波の λ/L に対応させて、等間隔位相でデータ取得できるように調整している．

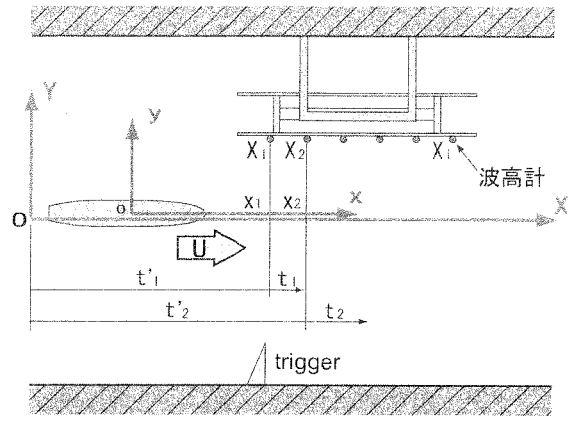


Fig. 3　波形計測装置セットアップ図

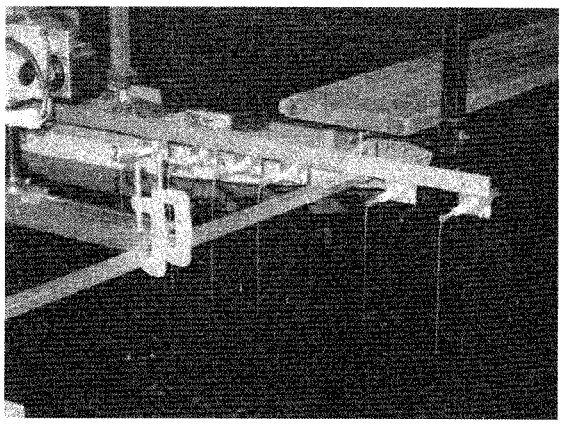


Fig. 4　容量式波高計

4.3 結果・考察

定常問題

水槽試験による定常航走時の各船型における x 方向流体力 (定常抵抗) とオリジナル船である M09057 からの増減率を Table.6.1 に示す．これによると定常抵抗の低減を考慮され設計されているオリジナル船が，予想通り最も低い抵抗値を示した．他の船については、M09058 はチャインラインの存在による性能低下が著しく，逆に M09060 は比較的性能低下が少ないという結果を得た。

Table.1　各船首形状における定常抵抗

形状	抵抗係数	増減率
*M*09057	4.88E-03	-
*M*09058	5.01E-03	+2.7%
*M*09059	4.93E-03	+1.0%
*M*09060	4.91E-03	+0.7%
*M*09076	4.99E-03	+1.7%
*M*09077	4.96E-03	+1.6%

非定常問題

Fig.5 に実験で計測された抵抗増加のグラフを示している．横軸に λ/L，縦軸に抵抗増加量を波振幅，主要船体寸法で無次元化した値を取っている．ここで言う抵抗増加とは、入射波ありの非定常実験で計測された surge 方向の力と入射波なしの定常実験で計測された surge 方向の力との差を意味している．また Fig.5 の右のグラフは海洋で主要な波長域である $0.3 \leqq \lambda/L \leqq 1.0$ の範囲において Fig.5 左のグラフを拡大したものである．

全船型で $\lambda/L = 1.3$ 付近において抵抗増加がピークとなることが分かる．また，船首形状ごとの変化を見ていくと，ピーク付近から長波長域にかけては違いは少なく，逆に短波長域において大きな優劣が見られる．Fig.5 の左図で細かく確認してみると，まずオリジナル船である M09057 は他の船に比べ明らかに抵抗増加が大きく，チャインラインの追加により抵抗増加の減少が発生したと判断できる．また，オリジナル船以外では，M09059，M09060 は比較的抵抗が大きく，M09058 は λ/L の値によってバラつきが見られ，逆に安定して抵抗が少ないと思われるのは M09076，M09077 と読み取れる．これら二つはチャインラインを最も高めに設計している船首形状の二つであるため，このような高めのチャインラインは $0.3 \leqq \lambda/L \leqq 1.0$ の入射波において全体的に抵抗増加を減らす働きがあると分かった．

船体運動

Fig.6 に各船型の波浪に対する船体運動とその位相のグラフを示している．左から surge，heave，pitch となっており，全グラフとも横軸には入射波の波長の無次元量である λ/L，縦軸には運動振幅を入射波振幅で無次元化したもの，波浪に対する船体運動の位相を示している．

heave，pitch 運動においては λ/L が 1.0 を越えた付近に運動の同調点が存在するのに対して surge の運動には同調点は存在しない。これらの運動の結果には，各船型において実験値のバラツキ以上のものは見られない。先のフレアー形状の違いによる抵抗増加低減は、運動の違いに因り低減したものではなく、船首領域からの入射波の反射等の低減効果に依存したものであることが推察される。

全抵抗

船首形状の違いによる性能の優劣は、船体に作用する全抵抗 (定常抵抗+抵抗増加) で判断するべきである．抵抗増加で優位であっても静水中定常抵抗が大きくては全抵抗としては性能は劣るものとなるからである。抵抗増加は入射波の波振幅の 2 乗に比例するため、抵抗増加の優位性は波振幅が大きい程顕著となる。そこで、波程度 $H/\lambda = 1/20$ に対して各船首形状の違いによる全抵抗の比較を行ってみることにする．

Fig.7 は横軸に λ/L，縦軸に $H/\lambda = 1/20$ 時の抵抗増加と定常抵抗の和を無次元化したものを表している。チャインラインが高めに設計されている M09076 や M09077 が良い性能を示すことが分かる。$\lambda/L = 0.6 \sim 0.8$ 付近における全抵抗は 20 % 程度低減されていることが分かる。無論、この低減率は波程度が大きくなるに伴い増大することになる。実海域での推進性能向上においてこれら船首形状の優位性が確認できたことになる。

波形解析

力の計測により示された船首形状の相違による抵抗増加低減の事実を波形の観点から検証することができる。抵抗増加は船体が非定常波を造波することにより発生するものであるから、抵抗増加が低い船型であれば造波した非定常波の振幅も小さくなるなずである。

参考までに、Fig.8 にオリジナル船首形状船型に対して計測・解析して得られた非定常波形を示している。この波を波形解析理論を用いて解析することにより、素成波の振幅や位相を表わす Kochin 関数、およびそれに重みを掛けて積分することにより抵抗増加が算出できる。Fig.9 に Kochin 関数の例を示している。

Fig.10 に実験による検力計の結果および Kochin 関数から算出された抵抗増加を示す．力の計測により得られた抵抗増加と波形から算出した抵抗増加とは良好な一致を示している。抵抗増加が最大値を取る近傍で、波形解析による抵抗増加の方が低めになっているのは、船首からの砕波抵抗等に起因する非線形な影響であると思われる。波形解析による抵抗増加の結果からも、M09076 や M09077 が他の船型に比べて短波長領域で低い抵抗増加を示すことが確認された。

5. まとめ

定常抵抗，波浪中船体運動，抵抗増加をチャインラインやフレア形状を変更した 6 種類の船首形状で計測比較し，優秀な性能を示す船首形状の検討を行った．また同時に波浪中を動揺しながら前進する船体が造波する非定常波形を計測することで波形解析の観点からも確認を行った．本研究より得られた結論を示すと次のようになる．

(1) 船首に強いフレアーを付けることで、特に $\lambda/L < 1.0$ の短波長域において抵抗増加が低減されることが確認された。本実験で特に優秀な性能を示した船首形状は M09076 と M09077 である。

(2) 船首に強いフレアーを付けることで、静水中の定常抵抗は増加する傾向にあるが、その増加量は微量であり、波程度が大きくなるに従い、抵抗増加の低減効果の方が顕著になる。波程度 $H/\lambda = 1/20$ であれば $\lambda/L = 0.6 \sim 0.8$ において約 20 %もの全抵抗低減が達成できることが確認された。

(3) 非定常波の計測を行い、波形解析理論を適用することにより船首形状の相違による抵抗増加の低減効果の確認を行った。その結果、非定常波形解析による結果は力の計測により得られた結果と良好な一致を示し、非定常波形の観点からも上記船型が優秀であると結論付けられた。

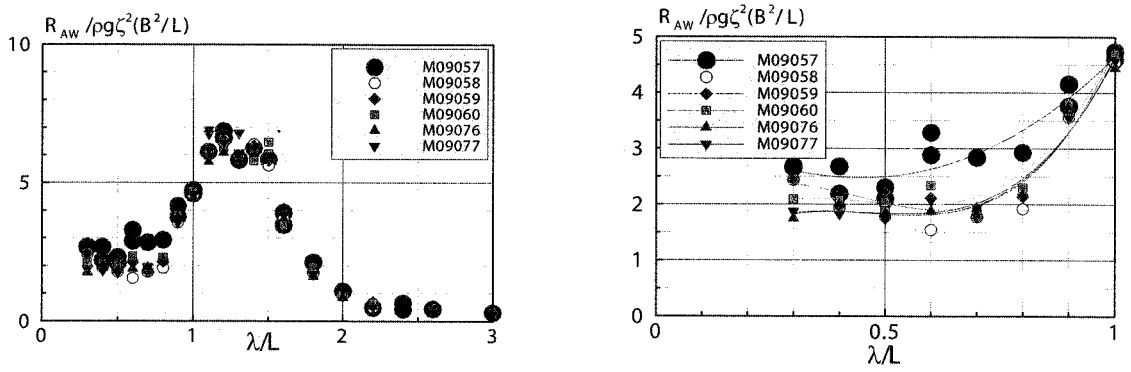


Fig. 5 Added wave resistance for different bow shapes at $F_n = 0.19045$, $\chi = 180$ degs.

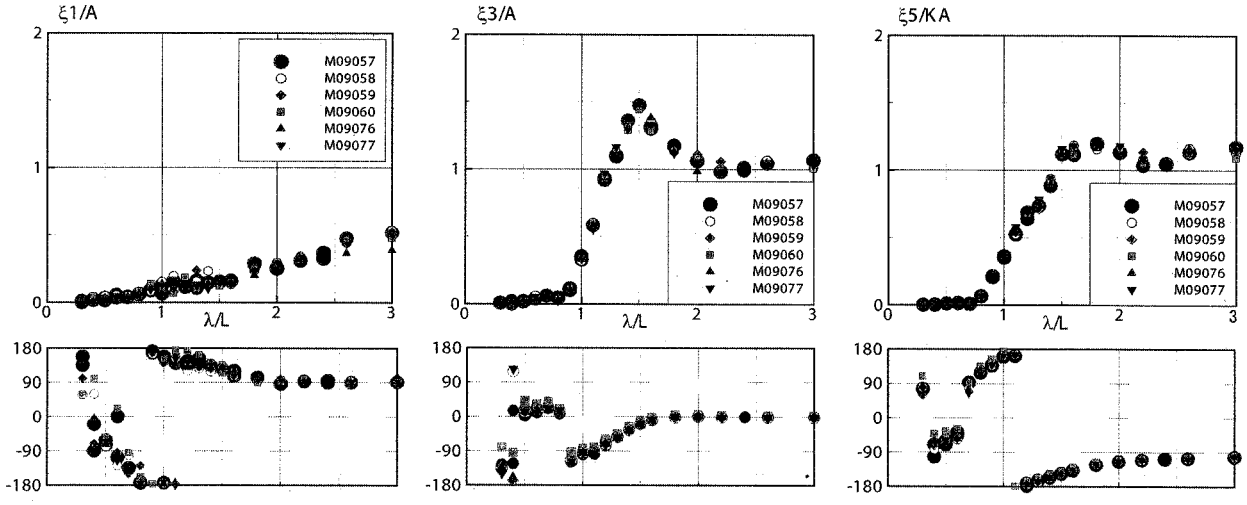


Fig. 6 Ship motions for different bow shapes at $F_n = 0.19045$, $\chi = 180$ degs.

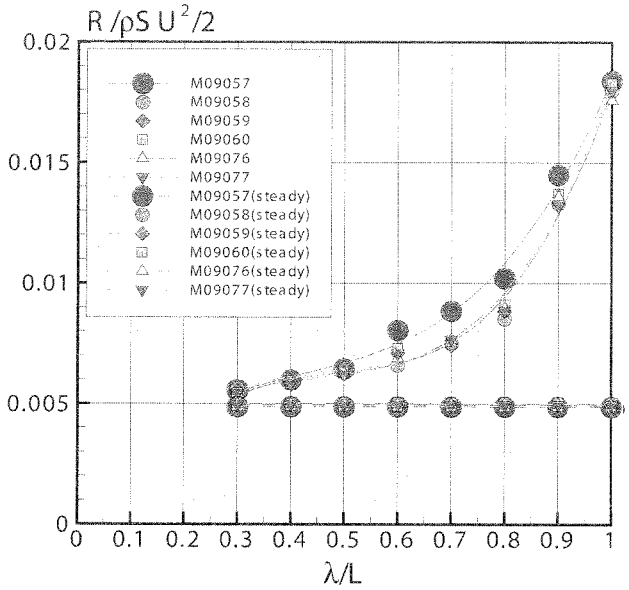


Fig. 7 Total wave resistance for different bow shapes
($F_n = 0.19045$, $\chi = 180$ degs., $H/\lambda = 1/20$)

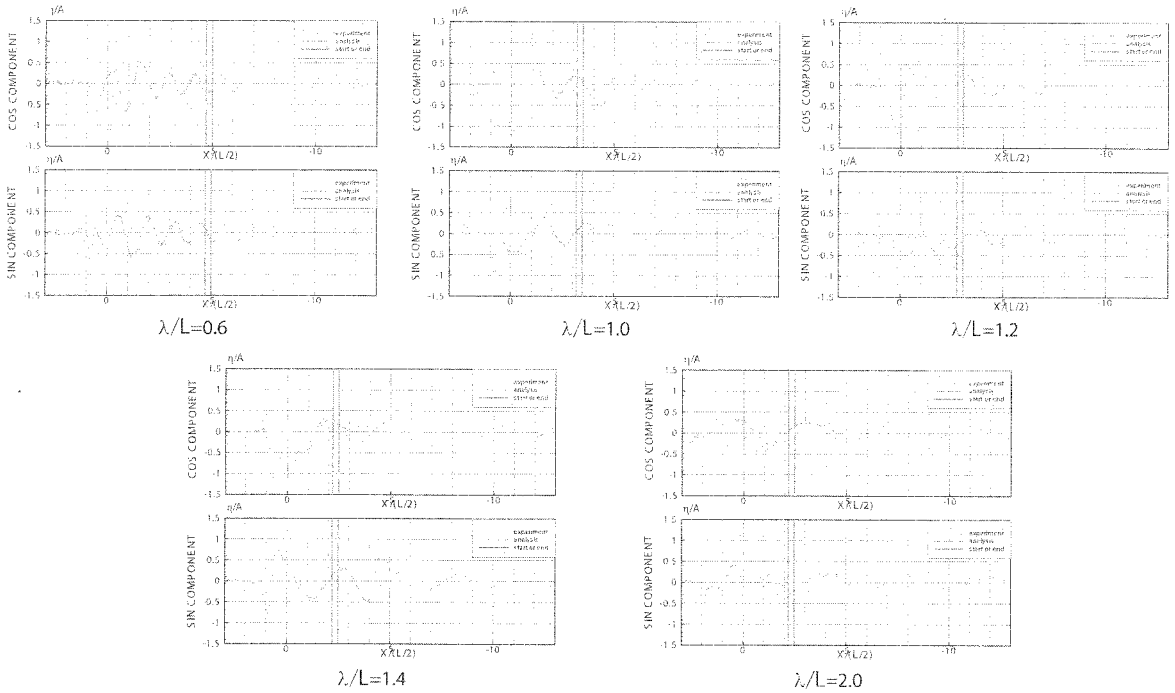


Fig. 8 Unsteady waves for M09057 model at $F_n = 0.19045$, $\chi = 180$ degs.

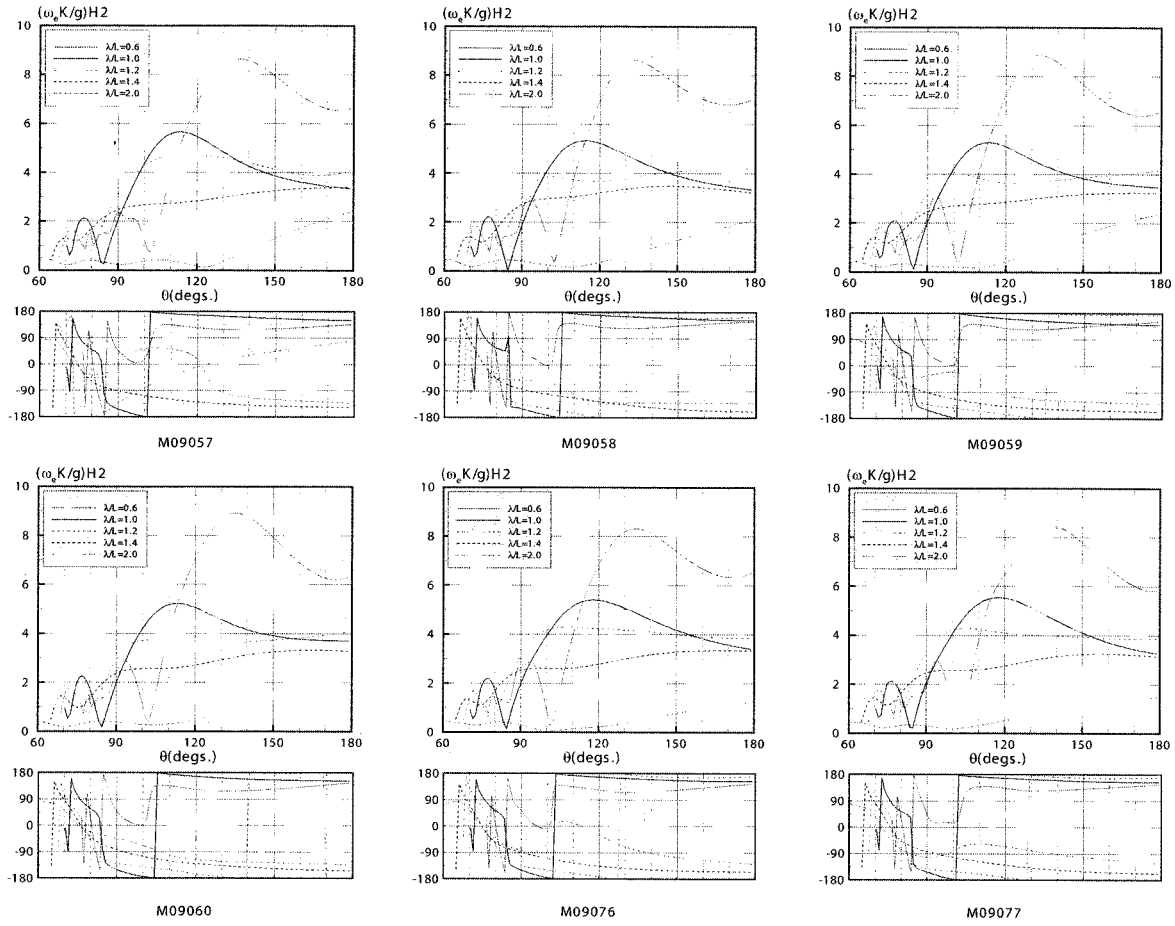


Fig. 9 Kochin functions for different bow shapes at $F_n = 0.19045$, $\chi = 180$ degs.

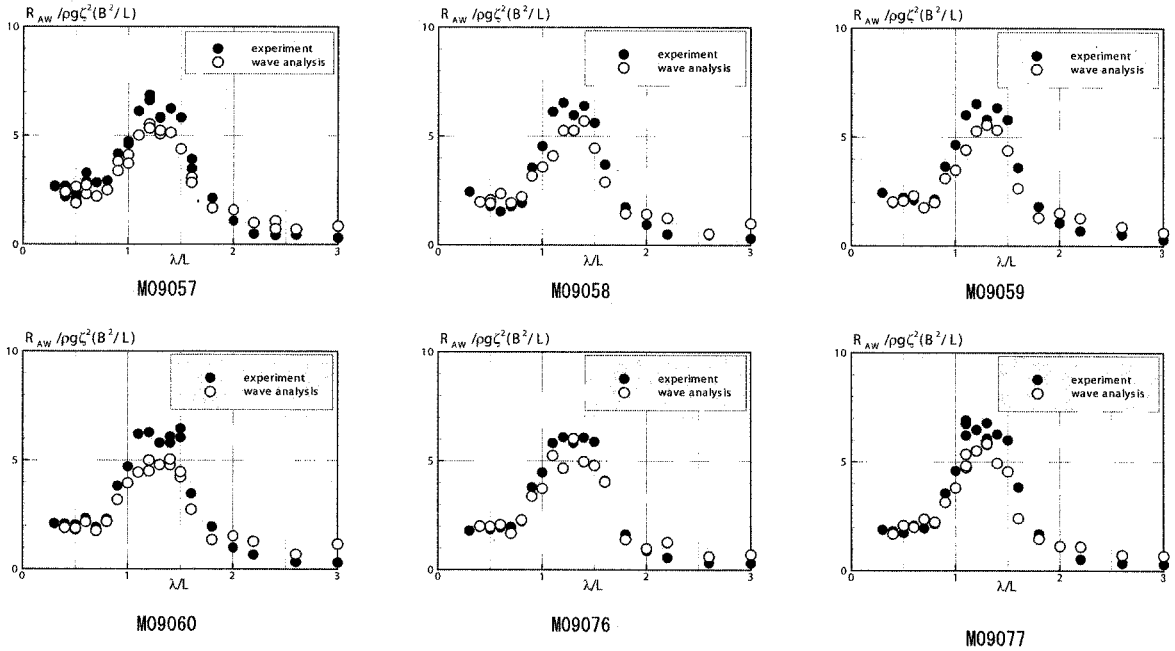


Fig. 10 Comparisons of added wave resistance between measured by load cell and unsteady waves, at $F_n = 0.19045$, $\chi = 180$ degs.

浅喫水船の波浪中抵抗増加に関する研究

柏　木　　正
大阪大学大学院工学研究科 地球総合工学専攻 船舶海洋工学部門
〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1, E-mail: *kashi@naoe.eng.osaka-u.ac.jp*

1. 研究目的

船舶の波浪中抵抗増加の研究は，これまで数多く行われてきたが，最近，実海域での船の推進性能予測・評価の重要性が認識されるに伴い，不規則波中での抵抗増加の推定や，これまで研究例の少なかった軽荷状態（バラスト状態，浅喫水）での抵抗増加の推定に注目が集まっている。特にバラスト状態では，従来の計算法による値は，短波長域で実験値より大分小さいことが指摘されているが，その定量的で物理的な解明は十分に行われているとは言えない。

これについて研究するためには，非定常波形解析理論によって，波振幅関数レベルでの理論値と計測値の比較をすることにより，間接的に砕波や粘性の影響を調べる手法が有効であると考えられる。この非定常波形解析法は応用力学研究所で開発され，計測・解析システムが完備されているため，共同研究によってその計測装置やノウハウを利用させて頂きたいと願っている。

2. 実験と数値計算

Experiments were carried out in head waves, measuring the wave-induced motions (surge, heave, and pitch), the added resistance by a dynamometer, and also ship-generated unsteady waves using six wave probes of capacitance type which are positioned with almost equal intervals over one period of encounter. The spatial distribution of cosine and sine components in the unsteady wave oscillating with circular frequency of encounter ω were obtained by the least-squares method using the data measured with six wave probes along a longitudinal line parallel to the x-axis (at constant y).

The ship model used in the experiments and also numerical computations is a modified Wigley model with wider breadth, expressed mathematically as

$$\left.\begin{aligned} \eta &= (1-\zeta^2)(1-\xi^2)(1+0.6\xi^2+\xi^4)+\zeta^2(1-\zeta^8)(1-\xi^2)^4 \\ \xi &= \frac{2x}{L},\ \eta=\frac{2y}{B},\ \zeta=\frac{z}{d} \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

where the real dimensions are $L = 2.5$ m, $B = 0.5$ m, $d = 0.175$ m (which is called standard draft). The gyrational radius in pitch and the center of gravity were set to $\kappa_{yy}/L = 0.236$ and $\overline{OG}/d = 0.177$ (below the free surface).

The lateral distance of a longitudinal line used for the wave measurement from the centerline of a ship model (i.e. x-axis) was set equal to $y = B/2+0.1\text{m} = 0.35$ m. The Froude number was $Fn = 0.2$ in all measurements.

Numerical computations corresponding to the experiments were performed by means of the enhanced unified theory (EUT) developed by Kashiwagi (1995). This theory can compute the surge-related quantities with 3-D and forward-speed effects taken into account and also the effect of wave diffraction near the bow by retaining the contribution of the x-component of the normal vector in the body boundary condition. In EUT, the radiation and diffraction problems are solved, with 3-D and forward-speed effects incorporated through a homogeneous component in the inner solution, and those effects are reflected through the matching procedure into the source distribution $Q_j(x)$ in the outer solution and then the Kochin function to be computed from (??) and (??). Of course the complex amplitude X_j was determined by solving the equations of ship motion.

3. 結果と考察

Figure 1 shows a comparison of the added resistance, in which open circles show the results measured by a dynamometer and the solid line shows computed results by EUT in terms of the Kochin function and Maruo's formula (??). Closed triangles indicate the results obtained from the wave-pattern analysis (??), using the measured data over the range of $3 > x/(L/2) > -5$ and no correction is made for the downstream wave profile. One example of the measured wave elevation is shown in Fig. 2 which is for $\lambda/L = 1.0$, and the cosine and sine components correspond to the coefficients in the Fourier-series expansion and thus they can be expressed as $\zeta(x,y) = \zeta_C(x,y) - i\zeta_S(x,y)$ in complex notation.

In order to compare this wave profile with computed one and to understand effects of the local wave and lateral distance in the wave measurement and which part of the wave is dominant in the prediction of the added resistance, numerical computations of the wave elevation and added resistance were performed using EUT.

It should be noted that the position of the source distribution in EUT is, as shown by (??) or (??), just on the free surface ($z_s = 0$) and along the x-axis ($y_s = 0$). In this case, as shown in Fig. 3, the shorter-wavelength component becomes conspicuous, which looks much different from the measured one. However, it is confirmed that the added resistance computed from the Fourier transform of this computed wave profile is in virtually perfect agreement with the solid line shown in Fig. 1. (It is noteworthy that the wave measurement has been done only with six wave probes, which may not be enough for resolving shorter waves.)

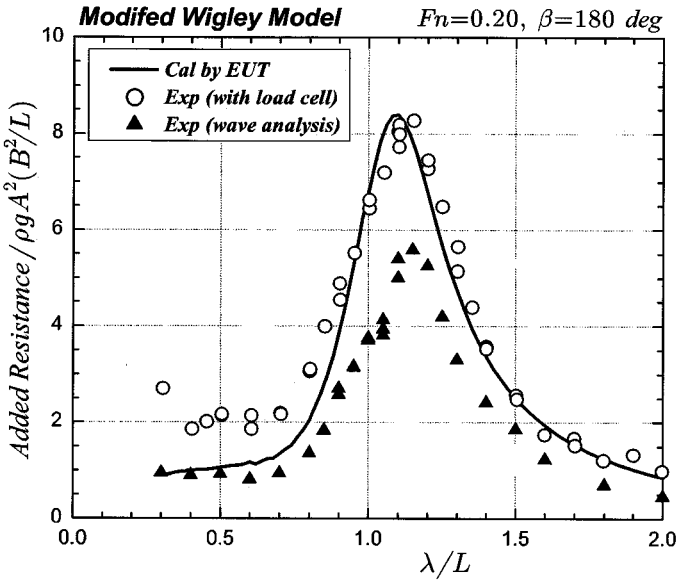


Fig. 1 Comparison of the added resistance on modified Wigley model in head waves at $Fn = 0.2$.

Anyhow, to suppress the amplitude of shorter-wave component, the depth-wise position of the source distribution is slightly shifted with $z_s = 0.004\,d$ (0.4% of draft). This slight shift affects greatly the result of the wave profile, resembling the measured one. However, the resulting added resistance computed from (??) becomes much smaller than the value by the original EUT.

Thus the entire wave profile is 1.75 times magnified and shown as Fig. 4. With this magnification in the amplitude, the added resistance becomes almost the same as that to be computed from Fig. 3.

By comparison between Fig. 2 (measurement) and Fig. 4 (computation), prominent discrepancy can be seen in the range of $1 > x/(L/2) > 0$. In EUT, the far-field disturbance by a ship is represented by the source distribution along the x-axis, whereas in the experiment, the half breadth of ship model is $B/2 = 0.25$ m and thus the so-called displacement effect becomes obvious (the wave pattern tends to be shifted to transversely outward direction).

Through the present numerical study on the analysis of wave profile and resultant added resistance, following facts have been found:

[1] The amplitude (profile) of the wave generated near the bow and propagating ahead is dominant in the added resistance. In the examples shown as Fig. 2 – Fig. 4, the waves at $|\,x/(L/2)\,| < 1$ are especially important and little influence exists from the downstream waves. This implies that the prediction of the added resistance from the measured wave elevation can be successfully made without any correction for the downstream waves (which actually cannot be measured due to reflection from side walls of a towing tank).

[2] The effect of local wave is very small and negligible in the added resistance. In fact, the added resistance was virtually the same irrespective of whether the local wave components in (??) are included in the numerical computation by EUT.

[3] The effect of lateral position in the wave measurement is also very small. In fact, the wave profile was computed also at $y = L/2 = 1.25$ m (the result of which is shown as Fig. 5) and the added resistance computed from this wave profile was virtually the same as that computed from the wave profile at $y = 0.35$ m shown in Fig. 4.

From the consideration above, relations between the added resistance and the unsteady wave analysis were

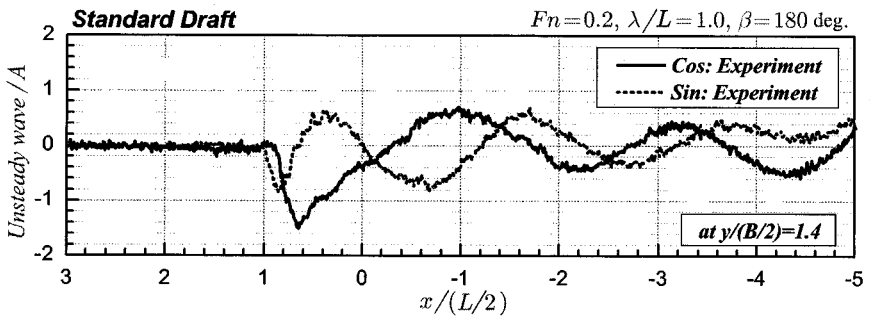


Fig. 2 Unsteady wave generated by modified Wigley model, measured by wave probes positioned at $y/(B/2) = 1.4$, for head wave of $\lambda/L = 1.0$ at $Fn = 0.2$.

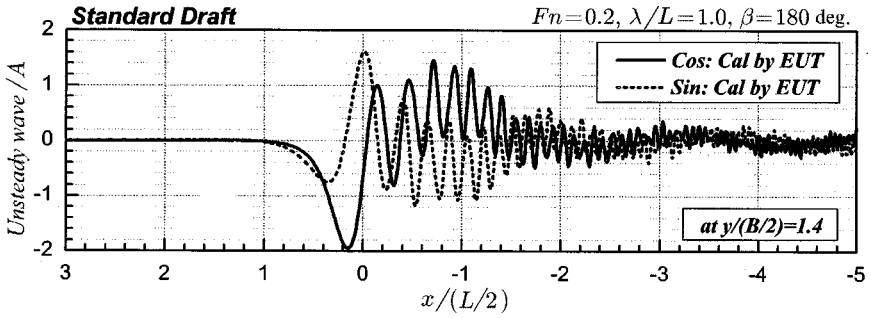


Fig. 3 Unsteady wave generated by modified Wigley model, computed with EUT at $y/(B/2) = 1.4$, for head wave of $\lambda/L = 1.0$ at $Fn = 0.2$. The source distribution is placed at $z_s = 0.0$.

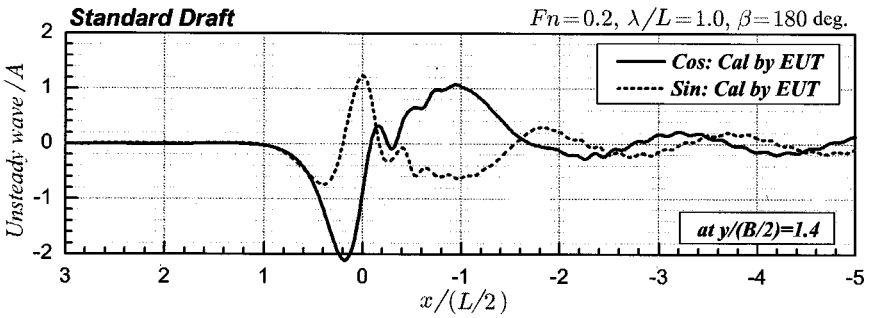


Fig. 4 Unsteady wave generated by modified Wigley model, computed with EUT at $y/(B/2) = 1.4$, for head wave of $\lambda/L = 1.0$ at $Fn = 0.2$. The source distribution is placed at $z_s/d = 0.004$ and the amplitude is 1.75 times magnified.

elucidated. Consequently it can be understood that careful attention must be paid in measuring the waves (including short-wavelength component) generated from the bow part of a ship, because slight error in the wave amplitude may result in large difference in the added resistance.

References

1) Ohkusu, M. 1980: Added Resistance in Waves in the Light of Unsteady Wave Pattern Analysis, *Proc. of 13th Symp. on Naval Hydrodynamics*, Tokyo, pp. 413–425.

2) Kashiwagi, M. 1995: Prediction of Surge and Its Effect on Added Resistance by Means of the Enhanced Unified Theory, *Trans. West-Japan Society of Naval Architects*, No. 89, pp. 77–89.

波力発電装置の一次変換性能に関する実験的研究

佐賀大学海洋エネルギー研究センター　永田　修一

1.　目的

近年、多くの種類の波力発電装置が考案されているが、その中でも益田氏により考案された後曲げダクトブイ(Backward Bent Duct Buoy、以後 BBDB)はその優れた発電特性から、将来性が期待されている浮体型の波力発電装置である。**Fig.1** は BBDB の基本的な構造を示した断面図である。BBDB は浮力体(Buoyancy Tank)、L 字型のダクト(Duct と Air Chamber)及びタービンにより構成されており、チェーン等により定点係留される。波は図中の左側から右側に向かって進行し、主に Surge、Heave、Pitch の各運動が BBDB に発生する。これらの浮体運動により L 字型ダクト内部の海水が動き、これにともなってダクト上部の空気室(Air Chamber)の体積が変動する。さらに、この体積変化により発生する空気流を、空気室の上部に装備したタービンを用いて電気エネルギーに変換する。

本研究は、BBDB の不規則波中応答試験における空気室圧力等を計測し、一次変換効率を求め、規則波中応答試験の結果と比較することを目的とする。

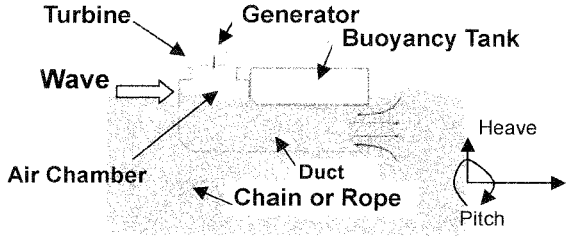


Fig.1 Principle of BBDB

2.　実験装置と実験方法

実験は応力研所蔵の深海機器試験水槽で行った。**1/3** 有義波高が **3cm**、平均周期が **1.3s** の JONSWAP 型スペクトルを持つ不規則波を造波し、模型と造波機の中点、および模型横の２点に波高計を設置して入射波高を、模型空気室の上部に設置した超音波式波高計と圧力計を用いて、空気室内部水面変動と圧力をそれぞれ計測した。本研究で用いた三次元水槽の概略図を **Fig.2**、模型の概略図を **Fig.3** 示す。

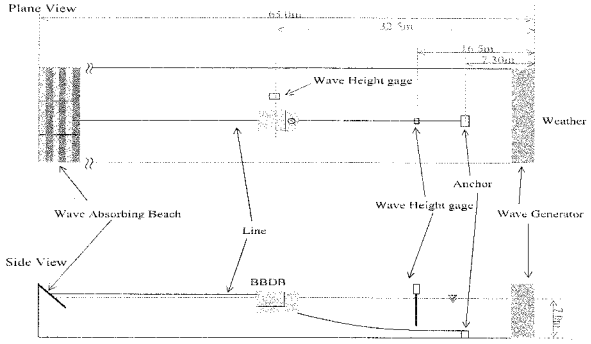


Fig.2 Schematic view of three dimensional tank

3.　実験結果と解析

実海域では、不規則波を様々な波高と周期の規則波が重ね合ったものと考えることが出来る。不規則変動の瞬時値を完全に予測することは困難であるが、その不規則変動

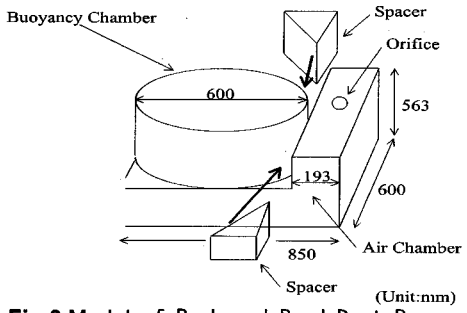


Fig.3 Model of Backward Bend Duct Buoy

の統計的性質に着目すれば、この一見規則性を欠く変動についての種々の情報を得ることができ、予測が可能となる。様々な手法があるが、本研究では、スペクトル解析を用いて解析を行った。

3.1　入射波の選定

Fig. 4 (a)～(c) に模型と造波機の中点に設置した波高計、模型横波高計で計測した波高 $\varsigma_1(m)$、$\varsigma_2(m)$、および空気室圧力 $P(Pa)$ をそれぞれ示す。模型と造波機の中点に設置した波高計と模型横の波高計は **16m** 離れており、入射波の伝播に時間を要する。圧力と入射波の対応を見るためには、模型横の波高計のデータを用いるべきであるが、模型からの反射波が影響している可能性がある。その影響を知るために伝播に要した時間を求め、その時間分ずらした模型横の波高データのパワースペクトルを模型と造波機の中点に設置した波高計の波高データと比較する。

まず、模型と造波機の中点に設置した波高計のデータの平均周期 $T_e = 1.25(s)$ から郡速度 $C_g = 0.975(m/s)$ を求めた。そして伝播に要した時間 **16.41 (s)** を算出し、時差を解消する。これらの値を **Fig. 5 (a) ～(c)** に示す。さらに、この時の ς_1 と ς_2 のパワースペクトル S_{xx1}、S_{xx2} を **Fig. 5** に示す。S_{xx2} が S_{xx1} よりも大きい値を示している。反射波の影響と考えられるが、この程度ならば実験結果に与える影響は比較的少ないと考え、造波機と浮体の中点の波高計の計測値を入射波とした。

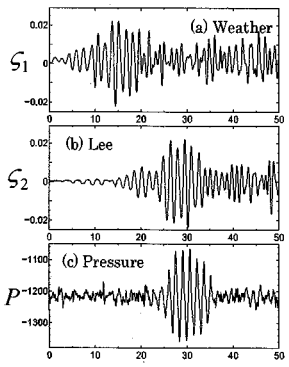


Fig. 4 Original Time series

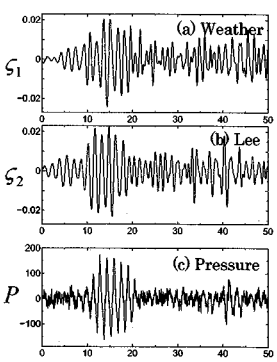


Fig. 5 Modified Time series

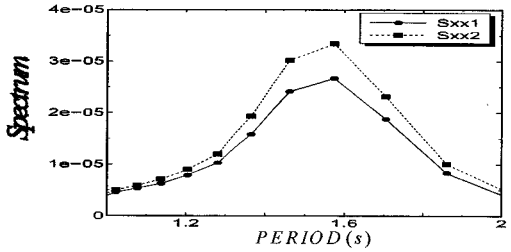


Fig. 5 Spectrum of incident wave

3.2 スペクトル解析と規則波との比較

入射波、圧力、内部水面変動のパワースペクトルはS_{xx}、S_{pp}、S_{hh}とする。また、入出力の関係より、入射波と圧力の応答関数$|H_p|$は次式で表される。

$$|H_p(\omega_k)| = \sqrt{\frac{S_{pp}(\omega_k)}{S_{xx}(\omega_k)\rho^2 g^2}} \quad (1)$$

ここで、ρは水の密度、gは重力加速度である。入射波と圧力のパワースペクトルと、その2つの応答関数と規則波との比較をFig. 6に示す。応答関数の縦軸は比圧力、横軸は周期(s)である。規則波と比較して不規則波はピークがほとんど出ておらず、全体的に一定値を示している。

次に、不規則波に対するBBDBの一次変換効率をもとめる。まず、圧力の複素フーリエ成分$P(\omega_k)$、内部水面変動の複素フーリエ成分$\varsigma(\omega_k)$を用いると、クロススペクトル$S_{ph}(\omega_k)$は、

$$S_{ph}(\omega_k) = \frac{4\pi}{T} P(\omega_k)\overline{\varsigma(\omega_k)} \quad (2)$$

で求められる。ここで、複素フーリエ成分の上付きバーは複素共役を表す。周波数応答関数の位相$\omega_k\tau_k$はクロススペクトルの偏角を用いて、

$$\omega_k\tau_k = \arg\left(S_{ph}(\omega_k)\right) \quad (3)$$

で求められる。また、入射波エネルギーのスペクトル$W_I(\omega_k)$、出力エネルギーのスペクトル$W_{out}(\omega_k)$は

$$W_I(\omega_k) = \rho g B \int_0^\infty S_{xx}(\omega_k) C_g(\omega_k) d\omega_k \quad (4)$$

$$W_{out}(\omega_k) = 0.5 A_w \omega_k \sqrt{|P(\omega_k)|}\sqrt{|\varsigma(\omega_k)|}\sin\omega_k\tau_k \quad (5)$$

で求められる。ここでBはBBDBの幅、Awは空気室断面積である。　一次変換効率の周波数応答関数は

$$|H_E(\omega_k)| = \frac{W_{out}(\omega_k)}{W_I(\omega_k)} \quad (6)$$

で求められる。**Fig.7**に入力と出力のエネルギーのスペクトルと応答関数（一次変換効率）と規則波の一次変換効率を示す。この図において、規則波中および不規則波中でのBBDBの一次変換効率特性は、ほぼ同様の傾向を示している。しかしながら、規則波中での変換効率と比較して不規則波中のものは全体的に低い値を示しており、規則波のピーク時の値と比較して、不規則波中では、65%程度まで低下している。

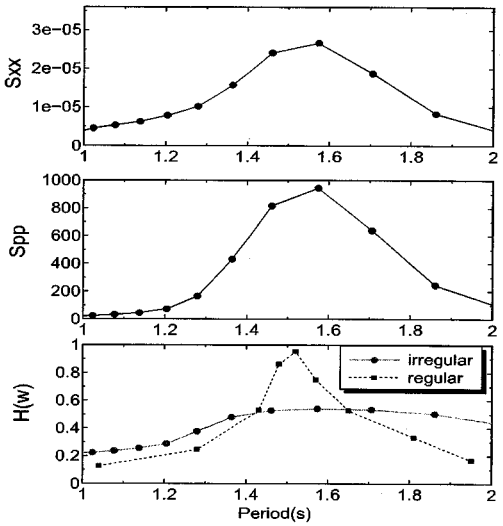


Fig.6 Spectrum of incident wave and pressure

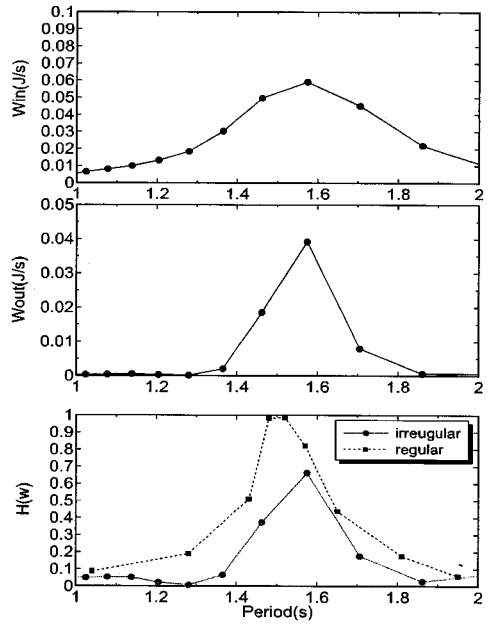


Fig.7 Spectrum of energy

4. 結論

本研究では、深海機器実験水槽を用いてBBDBの不規則波中応答試験を行った。得られたデータからスペクトル解析を行い、規則波中応答試験との比較をし、以下の結論を得た。

- 圧力の結果から、不規則波実験では規則波実験で得られたようなピークは計測されず、規則波実験での平均値程度で一定している。この原因として考えられるのは、空気室などの非線形性の影響と考えられる。
- 一次変換効率の結果から、不規則波実験では、規則波実験で得られた効率よりも35%程減少することがわかった。また、規則波実験で示された一次変換効率特性に追従していることが分かった。これらのことから、実海域で使用する際、その海域での代表的な周期に対応する装置の寸法で設計を行うことで大きな発電量を得ることが出来ると考えられる。

トワイマン・グリーン干渉計を用いたレーザー誘起音響波の測定

豊橋技術科学大学　　鈴木　新一

1. まえがき

歯科インプラントにおいて骨への経時的固定率を評価することは重要である．現在の主な評価法として，埋入トルク値（30～40N·cm）からの評価と，共振周波数から評価する手法が知られているが，それぞれにおいて問題点が指摘されている．埋入トルク値からの評価に関しては，接触式であり，インプラント周囲の骨が圧迫壊死する可能性がある．また，初期安定性の評価しかできず，経時的評価が不可能である．共振周波数からの評価に関しては，非接触式であるが，用いられるISQ値の科学的根拠が分からないなどの問題点が挙げられる．

そこで我々は，レーザー誘起超音波法[1),2)]を用いて，植立後の歯科インプラントの骨への固定率を非接触かつ経時的に評価できるシステムの開発を目指している．レーザー誘起超音波法は，被測定面にレーザー光を照射し，熱吸収によって被測定物内に超音波（弾性波）を発生させる非接触・無侵襲な計測法である．生じる弾性波は，伝ぱする媒体の力学的な性質に影響されるので，弾性率，吸光係数，熱膨張などの物性情報が得られる．この手法は産業応用[3)-5)]のみならず，生体情報計測を基盤とする医用工学に非常に有効である．本手法では，低エネルギーのパルスレーザーを植立後の歯科インプラントに照射し，非接触で歯科インプラント内に超音波を誘起させると，骨との界面における音響インピーダンスの差異により，界面の反射超音波の性質が変化する．この反射超音波信号を光干渉計を用いて非接触かつ無侵襲で検出することにより，歯科インプラントの骨に対する固定率を評価することが可能となる．本研究では，インプラント体と同質のチタン板の弾性波を測定した．また，実際のインプラント体と骨のモデル(ポリウレタン製ファントム)にそれを埋め込んだ場合の共振周波数を測定し，その違いを調べた．

2. 実験方法

図1に今回使用した実験システムを示す．図1の左側が試料に超音波を誘起する励起系を示しており，右側が試料に誘起された超音波により生じた変位を検知する検出系を示している．まず励起系について述べる．Nd:YAG レーザー（波長：1064nm　パルス幅：10ns）から照射されたパルス光はビームスプリッタにより二つに分けられる．ビームスプリッタを反射した光はフォトダイオードで受光され，トリガー信号となる．一方ビームスプリッタを透過した光は，試料を照射する．この照射された光エネルギーは試料表面で吸収され，熱エネルギーとなり，熱膨張が生じる．そして熱膨張により弾性波が発生する．この弾性波はデルタ関数的なパルスエネルギーによって生じるため，様々な周波数を有している．

次に，図1の右側の検出系について述べる．検出系は微小変位を高感度に非接触計測する集光型の2光束干渉計を採用した．光源にはCWのHe-Neレーザー（波長：633nm）を用いた．He-Neレーザーからの光はビームスプリッタにより二つに分けられる．ビームスプリッタを反射した光はミラーで反射し，ビームスプリッタを透過した後，フォトダイオードに入射する．これが参照光となる．一方ビームスプリッタを透過した光は，試料を照射し，反射光の一部がビームスプリッタにより反射され，フォトダイオードに入射する．これが物体光となり，上述の参照光と干渉する．この干渉信号により，励起系で誘起された試料表面の変位を検出することが可能となる．しかしながら本干渉計において，物体光である粗面からの反射光は位相が乱れ，良好な干渉信号を得ることが難しいなどの問題点が挙げられる．そこで対物レンズを用い，粗面上での集光径を小さくすることにより，反射光の位相面の乱れを軽減することができる．

3. 結果と考察

図2にインプラントと同質であるチタン板の結果を示す．図2(a)は，干渉計により検出した弾性波を高速フーリエ変換(FFT)した結果である．また，図2(b)はAEセンサにより測定した結果である．板厚1mmのチタン板の場合，干渉計では2.86MHz，AEセンサでは2.87MHzとほぼ同じ値を示した．

弾性波の周波数は材料の厚さに依存する．音速v，厚さdの場合，弾性波の共振周波数fの理論式は，次式となる[4)]．

$$f = v/(2*d) \qquad (1)$$

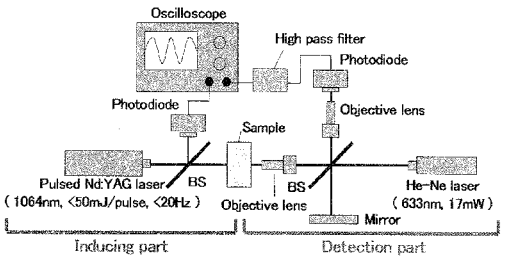


Fig.1　Experimental set-up.

一般的なアルミニウム内の音速は 5990m/s である. 板厚 1mm の場合, 上式より理論値 f は 2.99MHz となり, 実験値は近い値を示した. すなわち, この結果は計測装置がインプラント体へ有効であることを示している.

次に, 図 3 にインプラント体および骨ファントムに埋入したインプラント体の測定結果を示す. インプラント体および埋入インプラントは, 170kHz, 415kHz で同じ共振周波数が得られた. これは, インプラント体そのものがもつ共振周波数であると考えられる. また, 埋入した時と比べインプラント体のみ独自の共振周波数(756kHz, 659kHz)が得られた. この結果は, インプラントを埋入した時に示す共振周波数が違うことを示している. すなわち, 本装置がインプラントの骨への経時的評価の可能性を示している.

4. まとめ

レーザー誘起超音波装置を使用し, 物体内に生じる弾性波の共振周波数を測定した. 試料には, インプラントと同質のチタンを用いた. また, インプラント体と埋入したインプラント体の共振周波数を測定した. チタンでは, 干渉計と AE センサが同じ共振周波数を示し, 本装置がインプラント体へ適応可能であることを示した. そして, インプラント体と埋入したインプラント体の共振周波数に違いが表れた. この結果は本装置が骨への固定率を経時的に評価できる可能性を示した.

参考文献

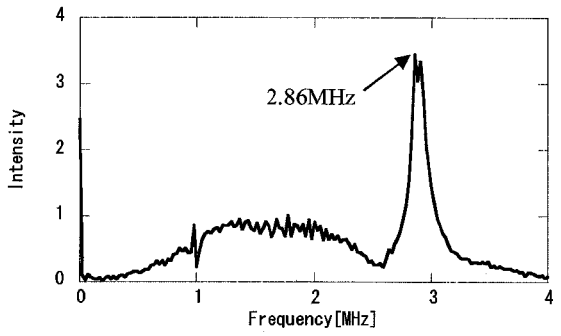
(1) 澤田嗣郎編: 光熱変換分光法とその応用, *学会出版センター*, (1997), 117.

(2) 澤田嗣郎編: 音響分光法とその応用, *学会出版センター*.

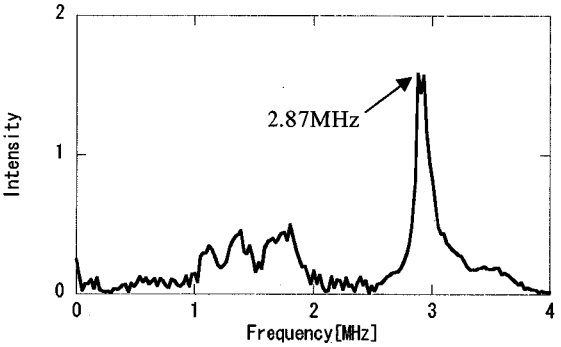
(3) 奥田貴啓, 石丸伊知郎, 筒井宏光: 光音響法による不透明多層膜計測-粗面微小振動計測技術-, *2004 年度精密工学会春季大会学術講演会講演文集*, (2004), 1277.

(4) 奥田貴啓, 石丸伊知郎, 筒井宏光, 藤井義樹, 小林宏明: 光熱変換効果による不当面多層膜厚計測技術(第 1 報), *精密工学会誌*, **71**-12, (2005), 1568.

(5) 奥田貴啓, 石丸伊知郎, 筒井宏光, 藤井義樹, 小林宏明: 光熱変換効果による不当面多層膜厚計測技術(第 2 報), *精密工学会誌*, **73**-1, (2007), 134.

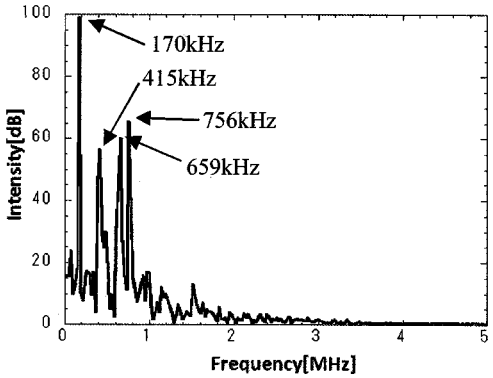


(a) two-beam interferometer

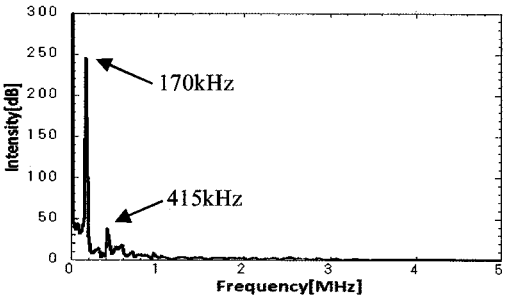


(b) AE sensor

Fig.2 Frequency analysis result of a titanium plate.



(a) implant only



(b) embedded implant

Fig.3 Frequency analysis result of the two-beam interferometer.

非線形流体構造連成問題に対する効率的数値解析法の開発

九州大学デジタルメディシン・イニシアティブ　陳　献

・目的

平成２０年度の共同研究で，大変形薄肉構造に対する流体構造連成問題数値解析手法に関する基礎研究を行い，弱連成アプローチによる数値解析の安定性を検討し，その有効性を確認した．一方，弱連成アプローチの短所として，強い非線形を持つ問題に対して，解析が不安定になる問題点も明らかになっている．これは，流体及び構造の解析をそれぞれ独立に行い，互いに情報を伝達しながら解析を進める弱連成法では，流体と構造が相手の接線剛性に及ぼす影響を考慮していないことに起因していると考えられる．本研究では流体構造連成解析の不安定性の原因を究明し，数値解析の安定性を向上させながら，強連成アプローチにおける大規模計算のデメリットを回避できる，効率的流体構造連成解析手法の開発を目的とする．

・方法

構造解析ではまず固体の運動を記述する微分方程式をは total Lagrange 定式化によって基準配置へ変換し，さらにガラーキン法を用いて下記の運動方程式の弱形式が導かれる．

$$\int_\Omega \delta \boldsymbol{u}\cdot\rho_0\ddot{\boldsymbol{u}}dV+\int_\Omega \delta \boldsymbol{E}\cdot\boldsymbol{S}dV=\int_{\Gamma_t} \delta \boldsymbol{u}\cdot\tilde{\boldsymbol{t}}dS+\int_\Omega \delta \boldsymbol{u}\cdot\rho_0\boldsymbol{g}dV$$

ここで，$\boldsymbol{u}$は変位，$\ddot{\boldsymbol{u}}$は加速度，$\delta\boldsymbol{u}$は変位の変分，ρ_0は変形前の密度，$\boldsymbol{E}$は Green-Lagrange 歪み，$\boldsymbol{S}$は 2nd Piola-Kirchhoff 応力，$\tilde{\boldsymbol{t}}$は境界における公称表面力，$\boldsymbol{g}$は体積力である．大変形による構造非線形性と超弾性体非線形材料モデルを導入し，有限要素法による離散化を行うと，ダンピング効果を無視した運動方程式が得られる．

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{U}}+\boldsymbol{K}\boldsymbol{U}=\boldsymbol{R} \tag{1}$$

ここで，$\boldsymbol{R}$，$\boldsymbol{M}$ 及び $\boldsymbol{K}$はそれぞれ外力ベクトル，質量マトリックス及び剛性マトリックスを表わしている．時間積分にはNewmark 型アルゴリズムを用いている．空間・時間的離散化で得られる非線形連立方程式の解はNewton-Raphson法を用いた反復解析によって求められる．

一方，流体解析ではCIP・直交格子法を用いている．この手法の特徴として，（１）全解析領域に空間固定の直交格子を用いることにより，複雑な流体自由表面や構造の激しい動きによる強い非線形性を，従来の構造形状に合わせた適合格子法と比べてより効率的且つロバストに扱えること，（２）CIP 法により，流体に関する高次風上計算がコンパクトなスキームで実現可能になること，（３）THINC に基づく高精度な自由表面の捕捉アルゴリズム，（４）直交格子法による構造運動のラグランジュ的な計算方法が挙げられる．

・流体構造連成解析不安定性の究明及び安定性の向上

流体構造連成解析は，通常 Lagrange 表記される構造解析と Euler 表記される流体解析を流体・固体界面において連成させることによって行われる．その連成手法として以下のように分類できる：一体型解法（強連成解法），分離型解法（弱連成解法），分離型反復解法（漸進的強連成）．それぞれの手法の安定性は以下に示す．

（１）一体型解法（強連成解法）

これは流体系と構造系の方程式を完全に連立させて解く方法であり，反復計算の過程において，流体系と構造系に相手の影響を互いに取り込まれながら，平衡状態を求めていくため，最も高い安定性を持ち，非線形性の強い問題に適している．しかし，連散る方程式が大規模になるほか，専用のプログラムを開発するこ

とが求められ，また，並列化の実装も困難である．

（２）分離型解法（弱連成解法）

この手法では構造解析と流体解析が独立に行われ，それぞれの解を予測値として相手に交互代入しながら解が進められる．既存の構造解析と流体解析のプログラムを利用できるため，解析コード全体の構造が単純になり，並列化の実装も容易なため多く用いられている．しかし，構造（流体）の予測値を基に求めた流体（構造）の解は真の構造・流体連成系の解ではないため，非線形性問題に対しては図１に示すように，構造または流体解析の解は解析が進むにつれ実際の状態より離れて行き，最終的に不安定となり発散に至る．

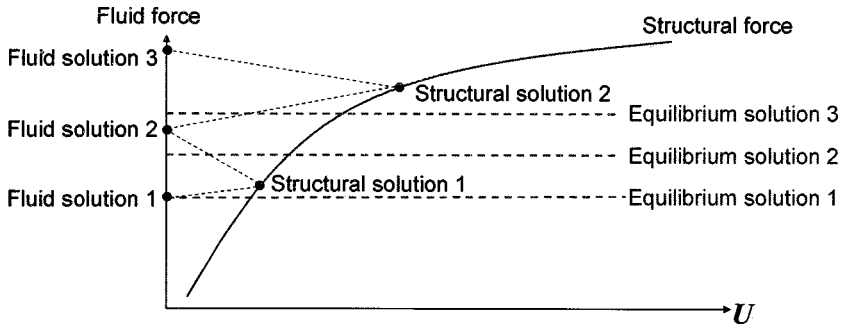


図１　分離型解法（弱連成解法）の不安定性

（３）分離型反復解法（漸進的強連成）

この手法では構造（流体）解析の解を用いて流体（構造）解析の解を補正し，構造・流体系全体の平衡状態を満たすまで反復計算を行うことより，原理的には安定的構造・流体連成解析が可能である．しかし，非線形性の強い問題に対しては，構造（流体）解析の解に基づく流体（構造）解析の解が逆に構造（流体）解析に与える影響による変化の予測ができないため，図２に示すように強い非線形性による急激な変化に対応しきれず，反復計算自体の発散による不安定性が問題となる．

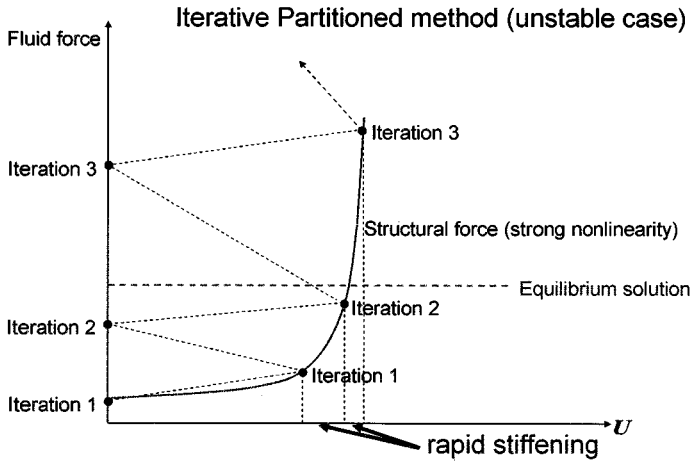


図２　分離型反復解法（漸進的強連成）の不安定性

上述のように，強い非線形問題に対して，分離型解法による安定的流体・構造連成解析を行うためには，解の変化が予測値に及ぼす影響を考慮することが重要であり，今後，流体と構造の接線剛性に互いに及ぼす影響を前増分の結果を用いて予測し，反復計算の結果から修正を行う手法を開発する．

本研究の成果は九州大学応用力学研究所（国際）研究集会「強非線形流体・構造連成解析」で発表した．

散逸系における有限振幅波動の変調不安定性

Modulational instability of finite amplitude waves in dissipative systems

高知高専・電気情報工学科　成行 泰裕

研究目的：

海洋や河川で見られる水の波や宇宙空間で観測されるプラズマ波動は、有限振幅の場合に変調不安定性(Benjamin-Feir 不安定性、側帯波不安定性)を生じ、大振幅の波束を生成することが知られている。これらの波の変調不安定性に関しては、それぞれの物理系の基礎方程式から同種の不安定性を記述する発展方程式(非線形シュレディンガー方程式系)が導出されることが知られている。さらに、これらの物理系が散逸(水の波では粘性や風の影響)を含む系である場合、不安定性が抑制されず、むしろ増進される場合があることが明らかとなっており、近年では宇宙空間中の磁気流体波の発展過程においても、散逸系においてのみ生じる変調不安定性が宇宙空間プラズマの発展に大きな役割を果たしていることが数値計算によって示された。しかし現在までのところ、散逸系における変調不安定性の物理過程は明らかではなく、統一的な理解は進んでいない。本研究では、散逸系における変調不安定性の物理過程の詳細な理解、特にどのような散逸機構が、どのような効果(分散性、非線形性)との組み合わせで変調不安定性を増進するのかを、定式的に理解することを目的としている。

研究方法：

本研究の推進に当たっては、それぞれの研究グループが理論的・数値的に発展させた結果について、定期的に筑紫キャンパスに参集して議論を行うことを基本としている。

研究成果：

本年度は、数値データから重要な物理過程を抽出する手法の開発を行い、その手法を用いてより現実的な系(Vlasov-Poisson 系)を用いた弱い電子ビームにより励起されるラングミュア乱流の数値シミュレーションデータの解析を行った。具体的には、Vlasov 方程式の一次のモーメントとして得られる電子の運動方程式をポンデロモーティブ力が陽に現れる形に変形し、線形項・非線形項それぞれの寄与を数値計算データを用いて定量的に評価した。その結果、電子波のイオン運動論効果による減衰に重要な低調波の励起には、電場のポンデロモーティブ力よりも電子の対流項(非線形項)の方が重要な役割を果たすことが明らかになった。この結果は、弱乱流的な近似やポンデロモーティブ力による非線形性を重視した従来のラングミュア波の不安定性理論が、弱い電子ビームにより励起されたラングミュア乱流の励起の場合ではその妥当性が疑われることを示唆している。

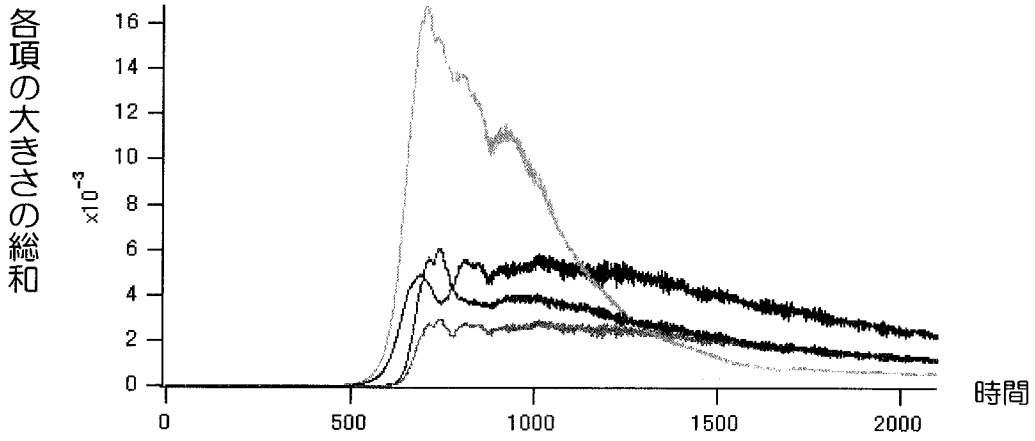


Fig.1:波数空間における各項(圧力項、プラズマ振動項、対流項、ポンデロモーティブ項)の大きさの総和の時間発展。色はそれぞれ(水色)圧力項、(青色)プラズマ振動項、(赤色)対流項、(緑色)ポンデロモーティブ項、である。時間発展初期は線形項(圧力項・プラズマ振動項)で表される線形ビーム不安定性が卓越しているが、不安定性が飽和した後は非線形項がより大きくなっている。ただし、対流項の寄与の方がポンデロモーティブ項の寄与よりも2倍近く大きい。

考察・展望:

今後は本年度の解析結果を受けた変調不安定性の定式化を試みる。また、電子ビーム速度、イオン熱速度などについてのより詳細なパラメータ研究を行う。

公表状況:

[1]成行泰裕, 梅田隆行, 電子ビーム不安定性により励起されたラングミュア乱流の非線形性について, 第126回 SGEPSS 総会, 金沢大学角間キャンパス, 2009年9月
[2] Y. Nariyuki, T. Umeda, On nonlinearity of Langmuir turbulence excited by a weak electron beam-plasma interaction, submitted

研究体制:

研究代表者:成行　泰裕(高知高専・電気情報工学科)
nariyuki@ee.kochi-ct.ac.jp

所内世話人:及川　正行
oikawa@riam.kyushu-u.ac.jp

研究協力者:羽田　亨　(九州大学大学院総合理工)
hada@esst.kyushu-u.ac.jp

研究協力者:辻　英一(九州大学応用力学研究所)
tsuji@riam.kyushu-u.ac.jp

光重合型コンポジットレジンの収縮挙動解析

兵庫県立大学大学院　海津 浩一

1．目的

歯科治療において，修復材料として光重合型コンポジットレジンが広く用いられている．光重合型コンポジットレジンは，取り扱いが容易で成形性にも優れており，自然歯に近い色合いを表現できる特徴がある．しかし，光重合型コンポジットレジンは光を受けて硬化する際に重合収縮を生じるため，エナメルとコンポジットレジンの接着界面に引張応力が発生し，この引張応力がき裂や剥離等の欠陥の原因となる．このような欠陥の発生を防ぐために，コンポジットレジンの重合収縮時の応力状態を明らかにすることが重要な課題となっている．光重合型コンポジットレジンの収縮に関する研究には，新川らの研究[(1), (2)]があり，デジタル画像相関法を用いた解析により，光重合型コンポジットレジンが収縮する際の変位場が明らかにされているが，その応力状態の詳細は明らかになっていない．

本研究では光重合型コンポジットレジンが重合収縮する際の応力状態を明らかにすることを目的として，有限要素法コードMarcを用いてコンポジットレジンの重合収縮過程をコンポジットレジンが冷却されて収縮・硬化するものと見なした熱弾塑性解析で近似的に解き，その応力状態について検討した．

2．解析モデル

2.1 有限要素解析モデル　光重合型コンポジットレジンは，470nm 前後の波長の光を受光することによって重合収縮を開始する高分子材料であるが，現時点で受光による収縮を解析する手法はまだ確立されていない．そこで，本研究では，コンポジットレジンが受光して収縮・硬化する過程をコンポジットレジンが冷却されて収縮・硬化する過程と見なして，近似的に熱弾塑性有限要素解析を行うこととした．図1に有限要素解析モデルを示す．解析には8節点6面体要素を用いた．エナメルの要素数は約 11000 で，コンポジットレジンの要素数は約 8600 である．

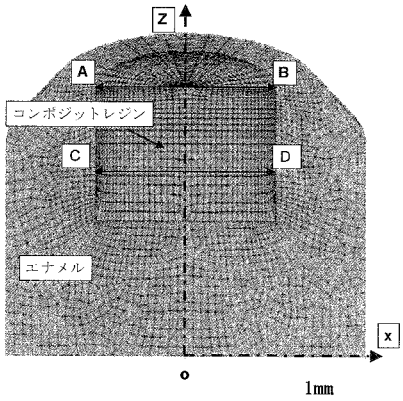


図1　有限要素計算モデル

2.2　有限要素解析の条件

(1) 有限要素計算の方法および計算条件　コンポジットレジンの収縮解析は，熱伝導解析と Update Lagrange による大変形弾塑性有限要素法による応力解析を同時に行うことにより行った．表1に有限要素解析に用いたエナメルとコンポジットレジンの物性値[(3)]を示す．

表1　エナメル及びコンポジットレジンの物性値

	エナメル	レジン
ヤング率 (GPa)	84.1	9.0
降伏強さ (MPa)	364.0	40.0
ポアソン比	0.33	0.24
密度 (kg/mm^3)	2.97×10^{-6}	1.60×10^{-6}
熱膨張率 (1/K)	1.14×10^{-5}	4.00×10^{-5}
熱伝導率 ($W\cdot K^{-1}\cdot mm^{-1}$)	9.36×10^{-4}	1.37×10^{-3}
比熱 ($J\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}$)	1000	1600

(2) 温度の初期条件および境界条件　エナメルとコンポジットレジンの初期温度はともに 573K とし，エナメルの外側表面の境界条件は断熱とした．コンポジットレジンは上面のすべての節点の温度を 273K に冷却することにより非定常熱伝導解析を行った．なお，この温度は解析結果が新川らのコンポジットレジンの収縮量[(1), (2)]と一致するように試行錯誤的に決定した．すなわち，本解析手法は，解析結果の変位分布と実験結果の変位分布を一致させ，そのときの解析から得られる応力状態が実験における応力状態と見なすものである．なお，本研究で用いた計算モデルの場合には，30 秒で温度分布が定常状態になることを確認した．

(3) エナメルとコンポジットレジンの接触条件

コンポジットレジンは，通常，エナメルに接着剤を塗布した後に挿入されている．そのため，接着剤の有無によりコンポジットレジンおよびエナメル内部の応力状態は異なることが予想される．そこで本研究では，コンポジットレジンおよびエナメル内部の応力状態に及ぼす接着剤の影響について検討するために，①接着剤を用いた場合を想定して，コンポジットレジンとエナメルの境界条件を固着 (glue 接触) とした解析，②接着剤の接着力が弱い場合を想定して，コンポジットレジンとエナメルの接触面における全節点の 1/2 が固着 (glue 接触) しているとして，接着力を減少させた解析，③接着剤を用いない場合を想定して，コンポジットレジンとエナメルの接触面に接着力が無い場合の解析を行った．

3．計算結果及び考察

図2 (a) に新川らの実験によって計測されたコンポジットレジン上面の x 方向の変位分布[(1), (2)]と有限要素解析によって得られた x 方向の変位分布の比較を，また図2 (b) はコンポジットレジン中部 (図1に示す計算モデルにおける CD 線上) の x 方向の変位分布を示す．これらの図から，コンポジットレジンの x 方向変位は，エナメルとの接着界面近傍で最大あるいは最小となり，中心部で零

であることがわかる．従って，コンポジットレジンは，受光により中心軸方向に収縮することがわかる．図２(a)よりコンポジットレジンとエナメルが完全固着している場合は，変位と変位分布はともに実験値とほぼ一致し，部分的に固着している場合は，変位は実験値に比べ大きいが，同様な変位分布を示している．接着なしの場合は，変位と変位分布は実験値と全く異なっていることがわかる．また，図２(b)において，完全固着の場合の変位と変位分布はともに実験値と全く異なる．部分的に固着している場合は図２(a)の結果と同様に，実験値と比べて変位は大きいが同様な変位分布を示している．これらのことから，エナメルとコンポジットレジンが部分的に固着している場合において，コンポジットレジンの表面および内部のｘ方向の変位分布が実験値と傾向が合うことが分かる．

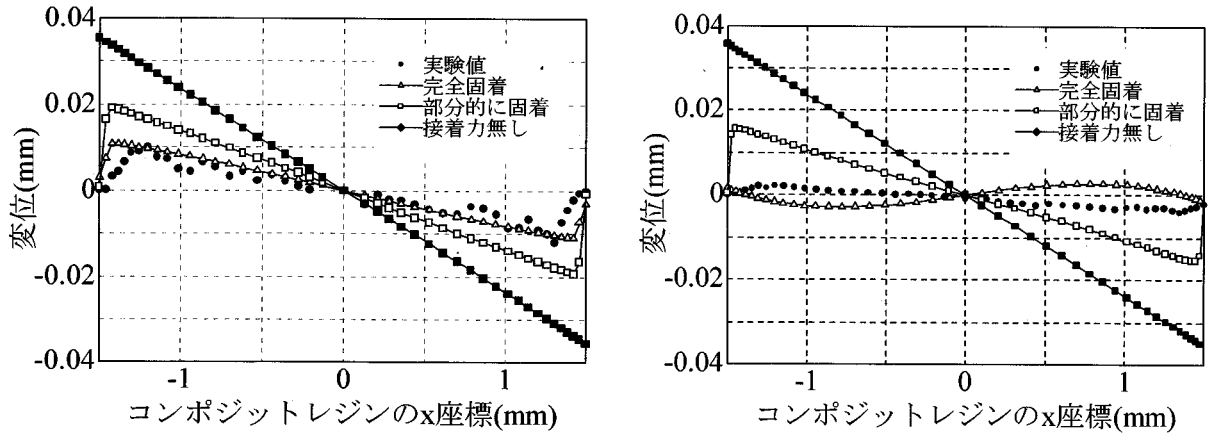
図３，４はエナメルとコンポジットレジンが完全に固着している場合と部分的に固着している場合のコンポジットレジン断面の主応力分布をそれぞれ示している．図３より最大主応力はコンポジットレジン下部の外周部ほど大きい特徴があり，特に下部の角部で高い引張応力が生じることがわかる．図４は図３と同じ傾向を示しているが，主応力値はやや低くなっている．したがって，エナメルとコンポジットレジンは収縮時に下部の外周部で剥離しやすいと推測される．

４．参考文献

(1) 古川太一，新川和夫ら，デジタル画像相関法を用いた光重合型コンポジットレジンの収縮変位場評価，実験力学 Vol.9, 90-95, 2009
(2) 古川太一，新川和夫ら，デジタル画像相関法を用いた歯科用補綴材料の収縮変位場評価，実験力学 Vol.8, 115-120, 2008
(3) 田上順次，千田彰ら，永末書店，保存修復学21，p. 11，2005

５．研究組織

研究代表者：海津浩一　兵庫県立大学大学院工学研究科教授
研究協力者：木之下広幸　宮崎大学工学部助教
河村　隆介　宮崎大学工学部准教授
新川 和夫　九州大学応用力学研究所教授



(a)　図１中のA-B線上のｘ方向変位　　(b)　図１中のC-D線上のｘ方向変位

図２　デジタル画像相関法によって得られたコンポジットレジンのｘ方向変位との比較

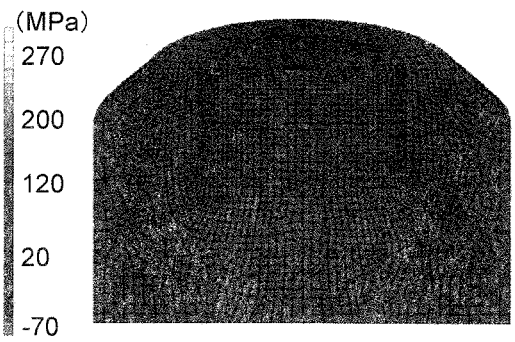


図３　エナメルとコンポジットレジンが完全固着している場合の最大主応力分布

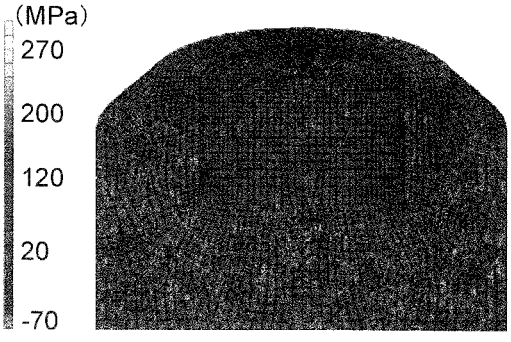


図４　エナメルとコンポジットレジンが部分的に固着している場合の最大主応力分布

カルコパイライト型化合物半導体太陽電池の作製

宮崎大学 工学部 電気電子工学科　吉野賢二

１．はじめに

Ⅰ－Ⅲ－VI_2族カルコパイライト型半導体は直接遷移型のバンド構造を持ち、バンド端より大きい光エネルギーに対して吸収係数が大きいので、太陽電池吸収層として期待されている。中でも$CuInGaSe_2$太陽電池については広く研究されており、変換効率19.5%という報告もある[1]。$CuInS_2$は禁制帯幅1.5eVを持ち、太陽光スペクトルの強い波長領域に対応し、また、光の吸収係数は10^4～10^5 cm^{-1}程度であることから、太陽電池の吸収層として期待できる材料とされている[2]。これまでに、$CuInS_2$バルク結晶の低温成長に成功している。実験は22.5 MPaで成長温度を400～700 ℃まで変化させた。X線回折の結果から400 ℃では異相がみられたが、温度を増加させるにしたがって、その異相は減少し、$CuInS_2$の融点である1050° Cよりもはるかに低温である700° Cで$CuInS_2$バルク結晶を得ることに成功した[3]。

本研究では作製した$CuInS_2$バルク結晶を用いて、蒸着法により薄膜を作製し評価を行った。

２．実験方法

本研究では、ホットプレス法によって粉末二元系材料であるCu_2S (99.9%) と In_2S_3 (99.99%) から作製したCu/In比=1.0の$CuInS_2$バルク粉末を用いて真空蒸着法によって$CuInS_2$薄膜を成した。蒸着源はシングルソースとし抵抗加熱による真空蒸着法を用いてソーダライムガラス基板上に真空度1.3×10^{-3} Paで原料を堆積させた。この時、基板は特に加熱せずに蒸着を行っている。さらに、真空蒸着法により作製した$CuInS_2$薄膜を、1気圧、アニール温度250～400 ℃、アニール時間60分でH_2S雰囲気中でアニールを行った。

評価として、X線回折によって格子定数と粒径を求めた。また電子プローブマイクロ分析（EPMA）により組成を行い、ホール測定によりキャリア濃度、移動度、抵抗率を測定した。

３．結果と考察

H_2Sアニール温度250～400 ℃と変化させた$CuInS_2$薄膜のX線回折スペクトルを図１に示す。参考とし、$CuInS_2$のJCPDSピークも示す。アニール温度が250 ℃を超えると、最も支配的で強いピークが27.8° に現れ、また、その他にも46.6° と55.1° に二つのピークが観測された。それぞれの面方位は27.8° で(112)、46.6° では(204)/(220)、55.1° では(116)/(312)である。全ての試料において、(112)が最も強いピークであった。しかしながら、アニール温度が300° 以下の低温において、CuSの回折ピークが現れた。このCuS相は、大気中にて熱処理を施した際には見られないものである[4]。これは、$CuInS_2$薄膜表面に存在していたCu原子と雰囲気ガスであるH_2S中のS原子が低温にて反応した

と思われる。また、350℃以上ではカルコパイライト型 $CuInS_2$ のみのピークが確認された。よって、$CuInS_2$ 単相が育成されたと考えられる。また、アニール温度上昇と共に、$CuInS_2$ の(112)に配向性も向上している。特に、JCPDS の(112)面に対して、アニール温度 400℃の(112)が配向している。したがって、結晶性の向上と結晶成長が得られた。

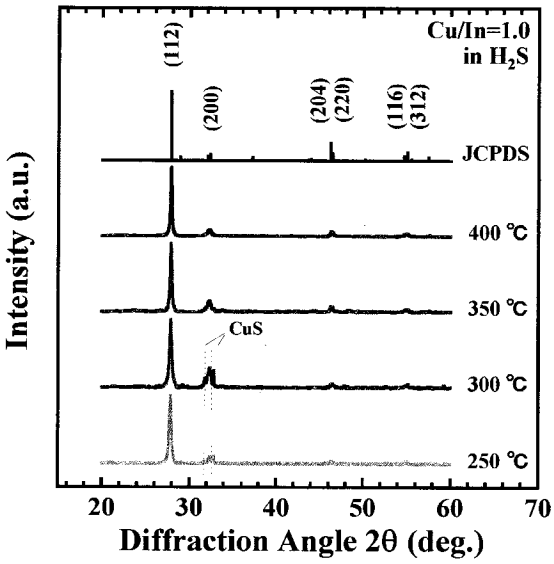


図 1 XRD スペクトル

試料の X 線回折スペクトルより求めた格子定数を図２に示す。JCPDS より求めた各格子定数（a=5.520Å、c=11.160Å）も共に示す。格子定数においても JCPDS の値にほぼ一致しており、アニール温度を変化させても、格子定数の変化はみられない。

X 線回折スペクトルの(112)面から求めた粒径を図３に示す。全体的にアニール温度の増加に伴い粒径サイズは増大する傾向にあり、アニール温度250℃の時の粒径47 nm からアニール温度500 ℃ の粒径70 nm と増加しており、アニール温度が高くなるにしたがって粒径成長も急激に促進している。粒径が増大した理由としては、真空蒸着によって堆積している薄膜表面に存在する Cu-S 系液層を介して成長したためと思われる[5]。この薄膜成長機構では、Cu-S 系液層が固相の Cu_2S と共存し、この固相の Cu_2S と拡散してきた In が反応してカルコパイライト型構造をもつ $CuInS_2$ 結晶を生成されると思われる。

電子プローブマイクロ分析による アニール後の $CuInS_2$ の薄膜内の組成分析の結果を図４に示す。また、点線は Cu、In、S の化学量論的組成を示す。アニール温度250℃では Cu-poor、In-poor、S-rich となり、S (47%) が最も多く存在し、次に Cu (36 %)、最も少ないのが In (17%) であった。アニール温度を高くするにしたがって、薄膜内の Cu/In 比は1.0 に徐々に近づき、また、250℃程度では存在していた S 空孔も H_2S ガス中で熱処理されることによって、400℃程度の熱処理温度でそれぞれの組成比はほぼストイキオメトリーとなった。このことから、S 空孔が H_2S ガス中の S 原子によって置換されたと

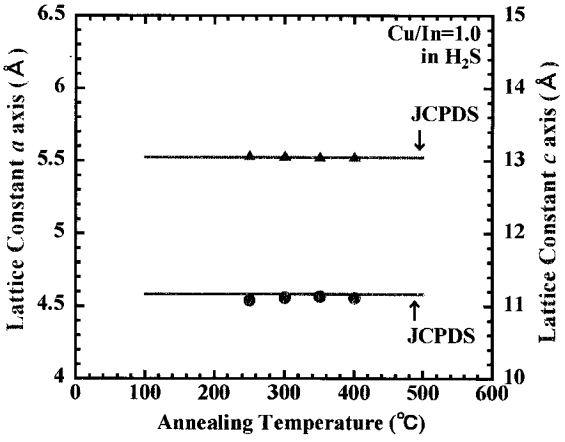


図2 格子定数

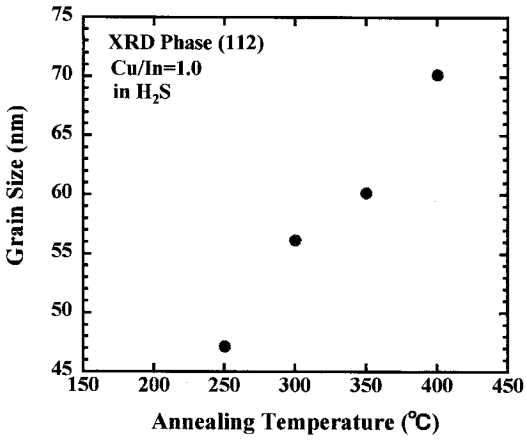


図3 粒径

思われる。また、徐々にCu/In=1.0に近づいた理由としては、二元系粉末材料から真空蒸着法によって$CuInS_2$薄膜を作製した際に、In-S系物質が先にガラス基板に蒸着され、その後Cu-S系物質がその上に蒸着される[6]。EPMAは試料のごく表面しか測定できない。したがって、最後に蒸着されたCu-S系物質のために低温側ではS-rich、Cu-poor、In-poorになったと思われる。

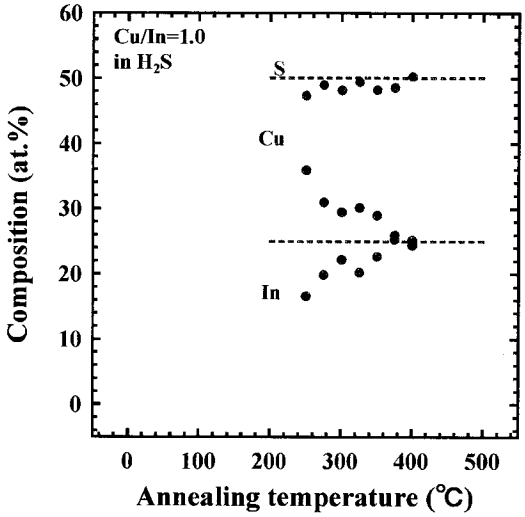


図4　EPMA分析結果

Hall測定の結果を図6に示す。それぞれの抵抗率、移動度、キャリア濃度は各アニール温度でH_2Sガスでの熱処理後、室温にて測定している。全ての薄膜においてP型の伝導型が得られ、これはEPMAの結果でも述べたように、大気中での熱処理では薄膜中のS空孔ができ、H_2Sガス中で熱処理を施した際には薄膜中のドナー性欠陥であるS空孔をH_2Sガス中のS原子が置換したためである。実際に、大気中でアニールした際には、全ての薄膜においてn型が得られたという報告もある[7]。また、アニール温度が350℃まで上昇したときにおいて、キャリア濃度は減少し、抵抗率と移動度は増加している。また、アニール温度400～500℃においては、抵抗率には変化はないが、キャリア濃度は減少し移動度は増加している。

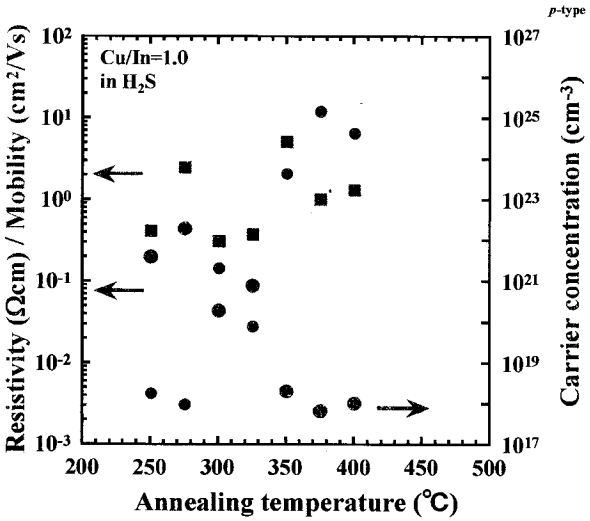


図5　ホール測定結果

また、X 線回折の結果より粒径が増大していることから、粒径の増大により、移動度が増加し、抵抗率が減少したと考えられる。したがって、アニール温度を増加させることによって良質な結晶性を持つ多結晶 $CuInS_2$ 薄膜が得られたと思われる。また、アニール温度375℃の時の移動度は、約1 cm^2/Vs であり、これは硫化法によって作製された薄膜の値とほぼ同じである[8]。

4. まとめ

真空蒸着法によって作製した $CuInS_2$ 薄膜に H_2S アニール処理を行った。X 線回折より、格子定数は JCPDS のデータとほぼ一致し、アニール温度を変えても格子定数に殆ど変化は見られなかった。粒径サイズは温度増加に伴い増大する傾向が見られた。また、アニール温度 350℃以上で $CuInS_2$ 単相が得られた。またアニール温度の増加にしたがって、Cu、In、S がそれぞれ化学量論的組成比に近づいた。また、薄膜中の S 原子が増加していることから、雰囲気ガスである H_2S 中の S 原子が S 空孔を置換したと思われる。ホール測定により、アニール温度 300 ℃ において、キャリア濃度には変化がないが、抵抗率が減少しており、移動度は増加している。以上のことと X 線回折から求めた粒径の増大により移動度が増加し、抵抗率が減少したものと考えられる。また、全ての薄膜において P 型の伝導型が得られ、これは EPMA の結果より、ドナー性欠陥である S 空孔が H_2S ガスの S 原子によって置換されたと思われる。

5. 引用文献

[1] M. A. Contreras, K. Ramanathan, J. AbuShama, F. Hasoon, J. Keane, D. L. Young, B. Egaas and R. Noufi, Prog. Photov. Res. Appl. **13** (2005) 209.

[2] J. Klaer, J. Bruns, R. Henninger, K. Siemer, R. Klenk, K. Ellmer and D. Bräunig, Semicond. Sci. Technol. **13** (1998) 1456.

[3] H. Komaki, K. Yoshino, S. Seto, M. Yoneta, Y. Akaki, T. Ikari, J. Crystal Growth **236** (2002) 253.

[4] Y. Akaki, H. Komaki, K. Yoshino and T. Ikari. J. Vac. Sci. Tech. A **20** (2002) 1486.

[5] 和田 隆博：化合物薄膜太陽電池の最新技術 (シーエムシー出版、2007).

[6] Y. Akaki, H. Komaki, K. Yoshino and T. Ikari, J. Mater. Sci. Mater. Electro. **14** (2003) 291.

[7] Y. Akaki, H. Matsuo, and K. Yoshino. Phys. Stat. Solidi C **3** (2006) 2597

[8] S. P. Grindle. C. W. Smith and S. D. Mittleman Appl. Phys. Lett. **35** (1979) 24.

電磁波遮蔽材料の創製と性能評価

信州大学繊維学部
機能機械学科　　倪 慶清
九州大学応用力学研究所
汪　文学

１．目的

IT技術の発展，情報量の増大に伴い，高速通信がますます重要視されている．高速通信を実現するために，マイクロ波帯からミリ波帯への高い周波数の利用が望まれている．その応用にあたり，衛星通信，自動車衝突防止レーダ，鉄道の事故監視，ミリ波無線LAN等様々な研究開発が行われている．一方，これらの装置からの電磁波は医療装置，工業ロボット，自動ドアなどの誤動作を引き起こし，さらに，人体への影響が懸念されている．これは電磁干渉(EMI，Electromagnetic Interference)と呼ばれ，問題となっている．これからのものづくりには機器が不要な電磁波を放射しないことおよび機器自身が外部からの電磁波の影響を受けにくいこと，つまり電磁両立性を考え設計を行う必要がある．電磁波遮蔽材料は電磁両立性を考える上で重要な要素の1 つとなる．

そこで，広範囲の周波数領域にわたる電磁波の遮蔽や制御は必要不可欠であり，今後も益々重要視される．本研究では，高性能の電磁波遮蔽材料・構造を開発するとともに，電磁波遮蔽性能の評価方法の確立を図る．

２．実験手法

◆試料作製　CFRP 積層板の作製にはグラノックプリプレグ(日本グラファイトファイバ社)を用いた．炭素繊維はピッチ系である．作製方法を次に示した．まず，プリプレグを2 層積層した．試料は，2 層CFRP 積層板で2 枚のプリプレグの繊維方向を同じ方向に積層したCFRP(CFRP00) および直角方向に積層したCFRP(CFRP09)の2 種類を用意した．

◆評価方法　直流導電率σ 試料の導電性の評価のために直流導電率を測定した．試料の導電率は電磁波遮蔽特性において重要なパラメータの1 つである．端子の接触抵抗を排除するために4 端子法を用いた．電極は導電ペースト(酢酸ブチル，Butyl Acetate)を塗布して作製した．電流計および電圧計はADVANTEST 社製のR8240 DIGITAL ELECTROMETER を用いた．直流電源は高砂製作所社製のEX-375L2 を用いた．試験片サイズは40×10×t mm とした．t は積層板の厚みである．

◆電磁波遮蔽効果　試料の電磁波遮蔽特性を評価するために電磁は遮蔽効果(SE，Shielding Effectiveness)を測定した．SE は材料に入射する電磁波および伝送後の電磁波の比率で表される．本測定では，電磁波遮蔽効果の測定はホーンアンテナの前方に誘電レンズを設置した自由空間法を採用した．装置にはベクトルネットワークアナライザおよび透過減衰量測定装置を用いた．装置の概略図をFig.1 に示す．試験片は孔の開いた金属板上に孔を覆うように置いた．金属板の孔のサイズはφ150 mm のものを用いた．試験片サイズは220×220 mm とした．装置のダイナミックレンジは約60 dB である．ホーンアンテナから放射された電磁波は誘電レンズを通過することにより，高利得で等位相に近い平面波として試験片に入射する．装置に用いたホーンアンテナから放射される電磁波は直線偏波であり，電界の振動方向が一定

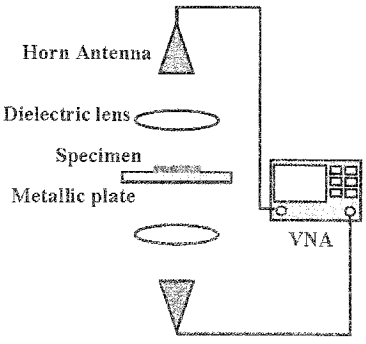


Fig.1 The schematic of an EMI shielding measurement system.

である．これを用いてCFRPの繊維方向の電磁波遮蔽特性の依存性を検証した．電界の振動方向に対してCFRP の上層の繊維方向が等しいときの角度を0 °とした．電界の振動方向に対して0, 45, 90 および135 °のときのCFRPの電磁波遮蔽効果を測定した．測定周波数は8-12 GHz のX バンドとした．

3．結果および考察

3.1. 直流導電率　2層CFRP積層板の直流導電率の測定結果をTable 1 に示す．CFRP00a の導電率は580 S/cm であった．一般的な金属より導電性は低い．CFRP00b の導電率は0.13 S/mであり，CFRP00a より3 桁低い値を示した．これは炭素繊維間には絶縁性のエポキシが存在するため，CFRP の繊維の直径方向の導電率が低下したのはエポキシによる接触抵抗の増加のためであると考えられる．

Table 1. DC conductivity of CFRP

Specimen	DC conductivity (S/cm)
CFRP00a	580
CFRP00b	0.139

3.2. 電磁波遮蔽効果

◆一方向CFRPの電磁波遮蔽特性　放射電磁波の電界の振動方向に対するCFRP00 の繊維方向による影響をFig.2に示す．90 °において電磁波遮蔽効果は最も低い値となった．　0 °において，他の角度の時よりも高い電磁波遮蔽効果を示した．また，ダイナミックレンジ付近であり，実際のSE はさらに高いと予測できる．45 °および135 °におけるSE はほぼ等しく，0 °におけるSE よりも高くなった．SE の変化量は0-45 °の時よりも5-90 °の時の方が大きい．以上のことより，CFRP のSE は電界の振動方向に依存すると言える．炭素繊維の繊維方向に対して電界の振動方向が等しい時，SE は最も高くなる．これは炭素繊維中の自由電子が動き，多くのエネルギを消費するためであると考えられる．一方，炭素繊維の繊維方向に対して電界の振動方向が直角である時，SE は最も低くなる．これは繊維および樹脂の間における接触抵抗により，電子の動きを妨げるためであると考えられる．

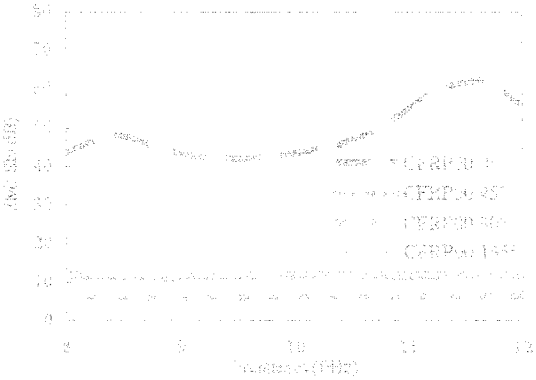


Fig. 2. The shielding effectiveness of unidirectional CFRP

◆直交CFRPの電磁波遮蔽特性　放射電磁波の電界の振動方向に対するCFRP09 の繊維方向による電磁波遮蔽効果の変化は，いずれの測定角度において，50dB近い値を示し，測定角度による影響はほとんど見られない．

4．まとめ

2層CFRP 積層板を作製し，8-12 GHz において電磁波遮蔽特性を評価した．その結果，一方向積層CFRP では，電磁波の電界の振動方向に対して電磁波遮蔽効果の依存性がある．CFRP の繊維方向が電磁波の電界の振動方向と等しい時，最も高い電磁波遮蔽効果を得られた．また，直交積層CFRP は8-12 GHz においてSE≧35 dBを示し，電磁波遮蔽材料として有効性が確認された．

5．研究組織

研究組織　1．信州大学繊維学部機能機械学科　倪 慶清（研究代表者）
2．九州大学応用力学研究所　汪　文学

MPS 法によるタンク内流体挙動解析と数値積分による船体横揺れ予測の連成解法に関する研究

大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻船舶海洋工学部門　橋本博公

研究目的

近年問題となっている LNG 船や FPSO のタンク内スロッシング問題，損傷浸水船の過渡状態を考慮した残存性評価，小型船舶の海水打ち込みや滞留水による転覆現象などを正確に予測するためには，タンク内流体運動と船体運動間の動的な連成影響を精度良く考慮できる解法の構築が必要である．本研究では自由表面の大変形が取り扱い可能であり，複雑形状への適用も容易な粒子法（MPS 法）を用いたタンク内流体の挙動予測と船体運動方程式の求解による船体運動予測のハイブリッド解法の構築を目指した．

動的連成解法の概要

本研究で構築した解法は，タンク内流体の運動を自由表面の大変形，複雑形状への適用や流体の流出入などが取り扱い可能である MPS 法を用いて解き，各タイムステップにて得られたタンク内流体の圧力分布から船体運動への連成力を求める．船体運動は船体運動を記述する時間微分方程式に MPS 法から得られた連成力を考慮して数値積分により解き，求まった運動変位から次のタイムステップにおける壁粒子（境界粒子）の位置，速度を MPS 法の計算に与えるという弱連成計算ループを繰り返すことで，非線形性を考慮したタンク内流体と船体運動の動的連成解を求めるものである．

タンク内流体から船体運動への連成力推定精度の検証

本研究では，第一歩としてタンク装備船の横揺れ問題を検討した．タンク形状は長方形型，U 字型の 2 種類のタンクとし，タンク内流体から船体運動への連成力は，壁粒子の圧力をタンク内壁に沿って積分することで軸力，圧力にモーメントレバーを掛けて積分することでモーメントを求めた．MPS 法による連成力の推定精度を検証するため，強制横揺れ模型試験結果との比較を実施し，振幅，周期，回転中心位置，タンク形状，タンク水量などに関わらず，MPS 法は強制動揺下でのタンク水挙動と連成力を十分な精度で推定可能であることを確認した．長方形タンクについての検証の一例を Fig.1 に示す．

タンク内流体と船体運動の動的連成解法の精度検証

タンク装備模型船を用いて，自由横揺れ試験，規則横波中横揺れ，規則向波中パラメトリック横揺れの計測を実施し，今回構築した動的連成解法のシミュレーション結果との比較を行った．その結果，自由横揺れ試験のような準静的な連成運動からパラメトリック横揺れのように大振幅動揺でタンク水が大変形するような非線形連成運動まで，タンク内流体と船体運動の連成運動を実用的な精度で予測が可能であることを確認した．　船体横揺れ運動とタンク水挙動の比較の一例を Fig.2 に示す．

まとめ

タンク装備模型船を用いた各種実験結果との比較により，今回構築したシミュレーション手法の妥当性を示した．本手法は，船体運動と船内流体の非線形連成問題を取り扱う有力な解法として期待できる．

成果報告

橋本博公，杉本友宏，末吉誠「タンク内流体と船体運動の動的連成解法に関する研究（第一報）」，日本船舶海洋工学会講演論文集，第 9K 号，2009，pp. 125-128　　他 1 編

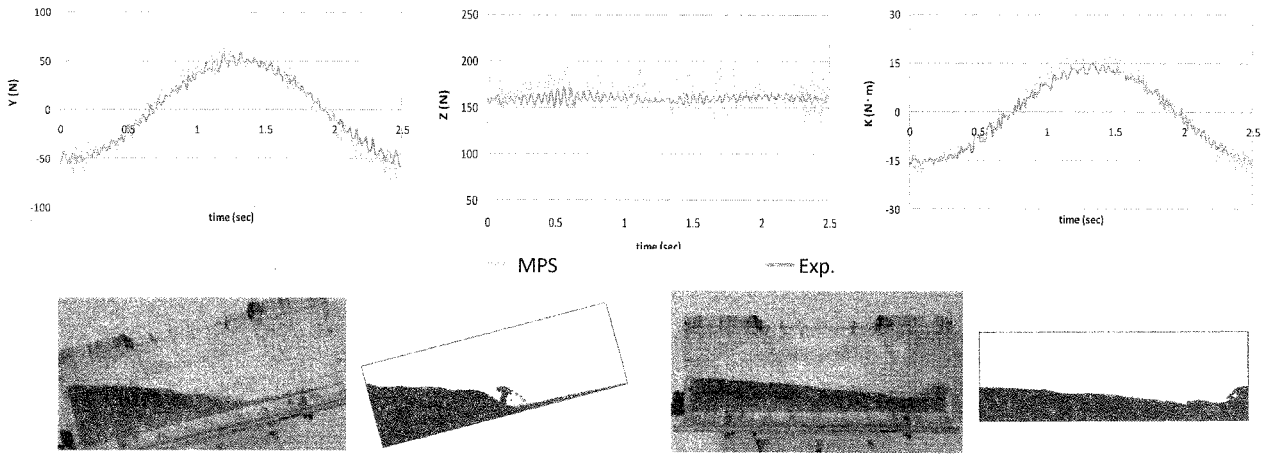


Fig.1　Comparison of coupling force and water behavior between model experiment and MPS method (forced roll motion test with 15degrees amplitude and 2.5sec period)

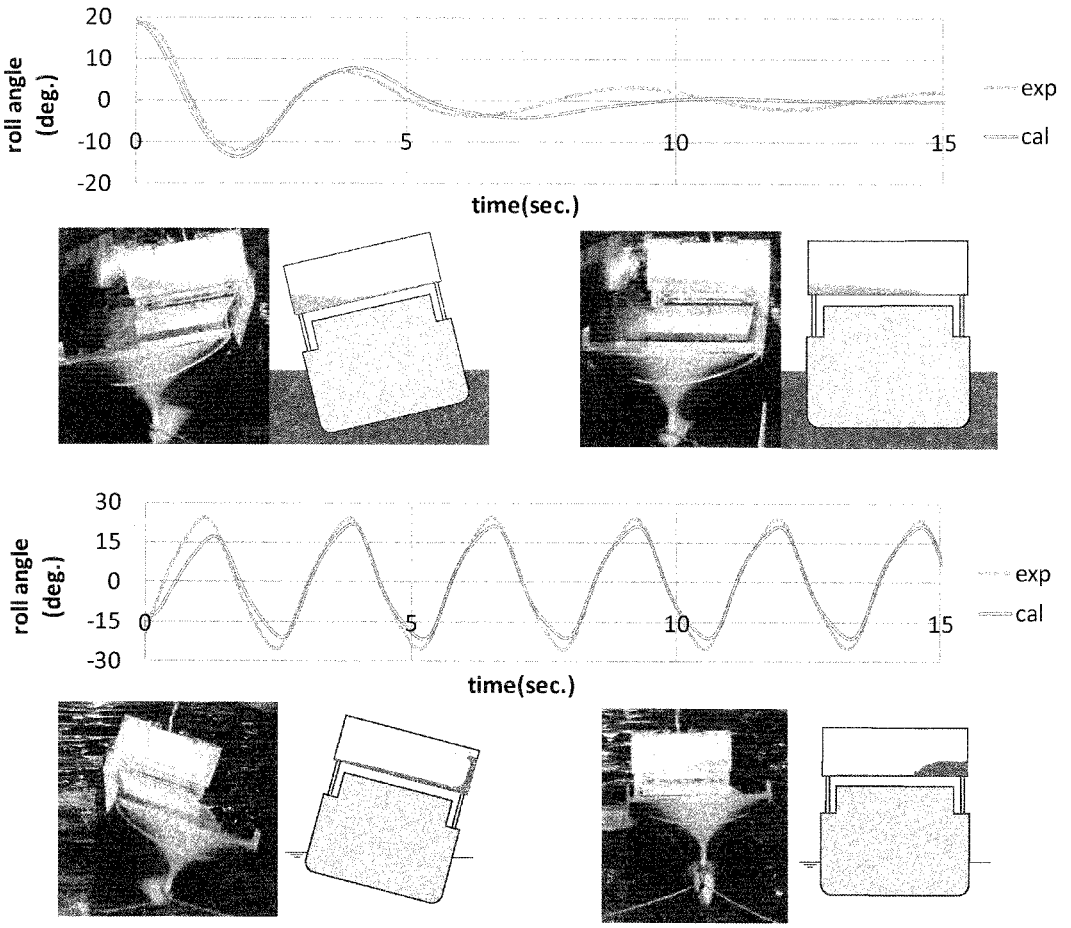


Fig.2　Comparison of ship motion and water behavior between model experiment and proposed method (above: free roll in calm water, below: parametric roll in regular head waves)

21 ME－12

波と浮体の非線形相互作用の解析に適した複合型数値計算法の開発に関する研究

防衛大学校システム工学群機械システム工学科　木原一

研究目的

浮体と波の線形相互作用に関連する問題を広範囲にかつ高精度に解くことのできる計算手法の開発を研究目標として、前年度までの共同利用による研究成果を踏まえ、特に造波問題に関して数値粘性影響が少ない計算スキームの開発と計算手法の構築、３次元問題への拡張とこれにともなう計算技術の高度化を図った.

研究内容

数値粘性影響の少ない計算スキームの開発に関しては主要なアルゴリズムの改善に加え、細部の境界処理なども重要である. まず粒子法では一層分の固定粒子を物体壁面に使用していたため十分な粒子数を用いての壁面でのFree Slip条件を実現できていなかったが、これを可能にするために壁面固定粒子上に法線ベクトル情報を付加して簡単な演算による鏡面境界を実現しFree-Slipとするためのアルゴリズムについて検討を行った. 図１に今回検討された壁面境界に関する取り扱いの概念図などを示す. 検討されたアルゴリズムでは一層の壁面粒子を配置するのは従来と同一であるが、実際には配置を行わない仮想粒子を壁面に対し固定的なものとみなさず、液体側粒子の配置に応じて逐次位置・速度を仮定しながら計算するものである. このアルゴリズムに関しては本研究期間内では計算プログラムとして実装し、十分な検証を行うことはできなかったものの、その実装の試みの中で副次的な産物を得た. それらは付加情報として壁面上の法線ベクトルを利用可能となったことで、薄肉状の境界を用いた計算を粒子法で容易に実現する手法と、粒子の壁面貫通防止処理の高度化による計算安定性の向上である. 薄肉状構造はその形状特性から裏表の両面に圧力などの物理量を保持して状況に応じて適切に使用する必要があるが、その際流体の貫流がない通常の固体壁面であれば裏面側、表面側のそれぞれに存在する流体粒子間では相互作用は完全に遮断される必要がある. 粒子法では打ち切り半径内の粒子に関して相互作用計算を行うため、関係の遮断を適切に行うためには正確な壁面との位置関係の判定が求められる. この際移動粒子を用いた粒子法では離散点間の近接関係が流動に応じて変化するため、格子を用いた手法で一般的な領域分割的な手法では複雑任意形状に対応が事実上困難である. 近接壁面粒子の検索とその点での法線ベクトルを利用した相対距離計算により裏面側粒子と表面側粒子の存在領域を簡単な符合判定だけで処理が可能なことを確認し、実装が行われた. これに関しては共同研究者によりシンポジウムで発表なども行われた[1]. 図２にそのアルゴリズムの概略を示す.

３次元問題への拡張については粒子法側が計算負荷の大半を占めるため、その計算プログラムの改良による高速化が重要な課題であった. 現有の粒子法プログラムは３次元化・並列化がすでになされており大規模計算に一応の対応がなされていたがその計算量の多さから、本格的な３次元造波問題での試計算などの事例は少なく、複合型計算手法に組み込むにはその計算性能や安定性などを十分検証する必要があった. 今年度はその準備段階として応用力学研究所基礎力学部門界面動力学分野に設置されている高速ネットワーク装置を持つPCクラスタにより分散記憶型の並列計算を３次元スロッシング問題について多様な条件で実施し、適切な設定パラメータの確認や細部の改良などが行われた. 今年度はこの結果について評価・検討を行い、本格的な造波を取り扱う複合型計算手法に適用する際の基礎データとした.

１）"Numerical simulation of tank sloshing with thin plate structures by using a particle method," Makoto Sueyoshi, ISOPE2009 Conference Proceedings CD-ROM, 2009.

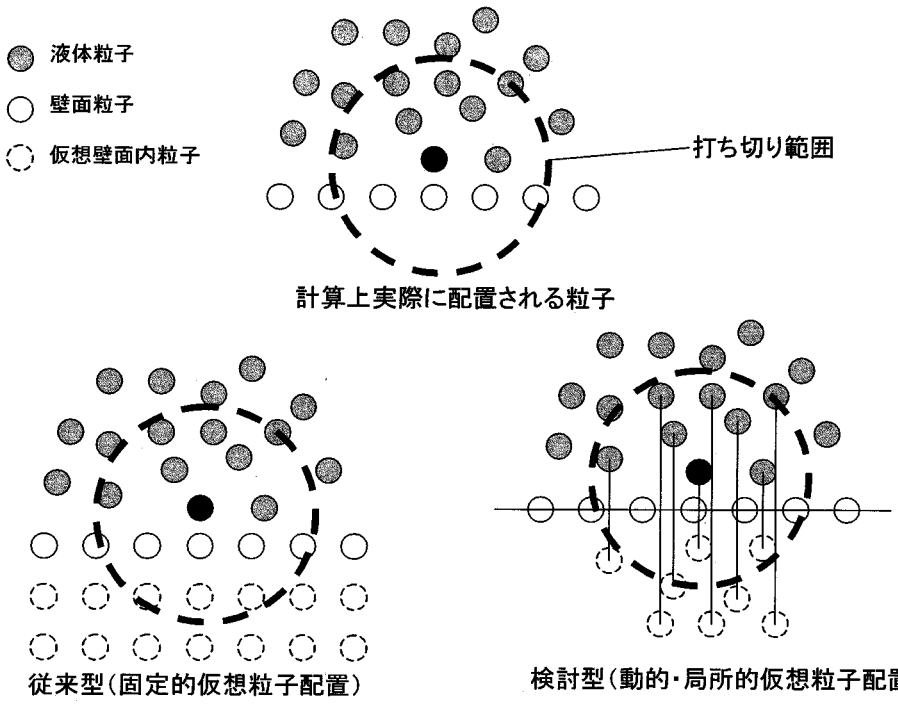


図１：検討された仮想粒子の動的・局所的配置の概念図．（粒子法では点線で囲まれた範囲の粒子を着目点について計算を行う際に使用する．通常 MPS 法などの粒子法では仮想粒子を壁面外側に配置して計算を行っている．今回検討した手法では最近接の壁面粒子から壁面までの距離を計算しその面に対して対称な位置に仮想粒子を配置する．この際対称な位置に配置するのは打ち切り距離内の粒子だけであり、壁面近傍粒子（打ち切り距離内に壁面粒子が存在する粒子）についてのみこの処理を局所的に行う．この際、仮想粒子についても境界条件に応じて面を基準に流速を与えることで FreeSlip 境界などが比較的汎用性を保ったまま実現可能となる．）

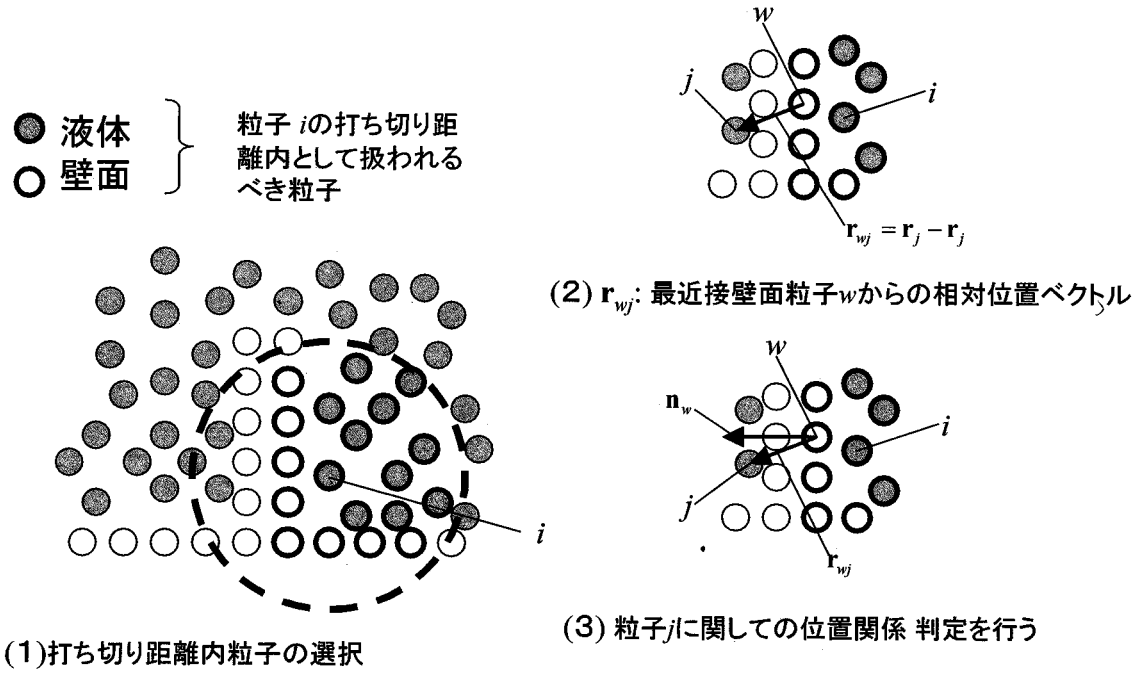


図２：薄肉壁面境界を効率的に取り扱うアルゴリズム

潮流発電のためのダリウス形水車の高性能化

九州大学大学院総合理工学研究院 経塚雄策

1. はじめに

研究代表者らは、現在、長崎県平戸市の生月大橋の橋脚を利用した潮流発電の実証実験を実施中であるが、平成 17 年度から鉛直軸を持つダリウス形水車のトルクおよび発電効率について実験的な研究を行ってきた。鉛直軸のダリウス形水車は流れの方向に無関係であり、構造も単純であるので、潮流発電用の水車に用いられることが多い。しかしながら、ダリウス形水車の動翼は流れの下流側では上流側の他の動翼が発生する渦流中で作動するので非線形影響がおおきくなるため、これまでは主に実験的に研究[1),2)]されてきたが、実験的なアプローチによる高性能ダリウス形水車の開発は時間を含めたコストによって大きな障害になっている。本研究では、昨年度から引き続いて実施中の商用 CFD ソフト（SCRYU/Tetra）を用いた潮流発電装置の開発結果について報告する。

今年度の研究では、回転中のトルク変動を抑えるために 4 翼ダリウス水車とし、さらに増速器を水車の両側において高性能化を図ることとした。増速器の大きさと形状をいくつか変えて CFD 計算を実施した結果、円弧形の増速器がわずかに高性能となった。そこで、回流水槽において実験を行い、円弧形増速器の有無による水車性能の変化を比較した。

2. 数値計算

2. 1 CFD コード

解析に用いた(株)ソフトウェアクレイドル社製の SCRYU/Tetra for Windows V7 は、非構造格子を採用し、かつ自動格子生成が可能な 3 次元熱流体解析ソフトウェアで、解析は 3 次元有限体積法に基づいた非定常解析である。乱流モデルは SST（Shear-Stress Transport） k-ωモデルを使用した。このモデルは、低レイノルズ数型 k-εモデルでは不可欠であった減衰関数を用いなくても壁面近傍の平均流速分布を再現でき、さらに逆圧力勾配での剥離現象を精度よく捉えられる長所がある。

2. 2 計算領域

計算領域を Fig.1 に示す。計算領域は 2 つの部分に分かれており、空間固定領域と翼とともに動く回転領域である。増速器は空間固定領域において考慮される。Fig.2 は、回流水槽での実験に合わせて設定した計算領域の平面図である。奥行き 3.5m とした。内部の回転領域は直径 0.7m、高さ 0.7m の円柱形である。要素移動には ALE 法を使用した。

2. 3 増速器形状

Fig. 3 は、今回計算を行った 5 種類の増速器形状を示したもので、長さと厚さを同一とした。Catenary-1, 2 は双曲線関数($y = b\cosh(ax)$)、円弧形、台形および Concave 形について計算した。

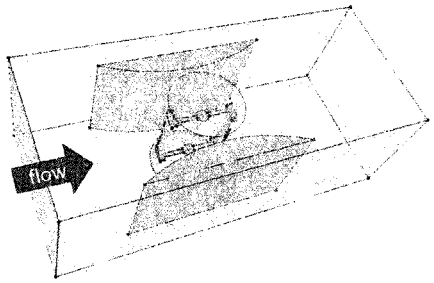


Figure 1 Calculation domain

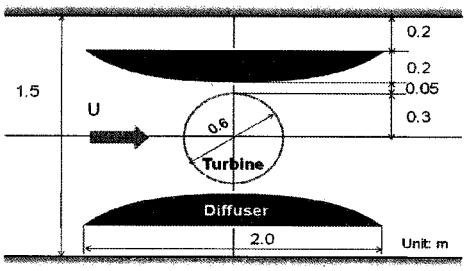
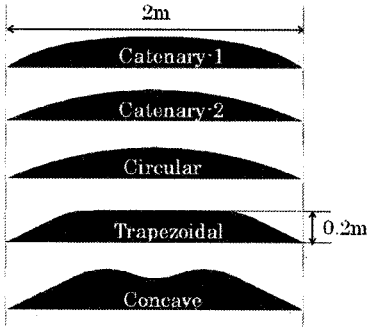


Figure 2 Configuration of turbine and diffuser in CFD (Length of diffuser was changed 1.2m in experiments



2. 4 計算格子数および境界条件

自動格子生成を利用して四面体格子を基本とする非構造格子を用いた。格子要素数は、静止領域は 10 万要素で、回転領域は 400 万要素である。流入境界には流速条件 1.0m/s、流出境界には表面圧力条件 0Pa を与えた。回流水槽に合わせるため、静止領域の上面はフリースリップ境界に、その他の面は固定壁に設定した。

3. 数値計算

3. 1 CFD 計算結果

増速器の有無による水車のトルク係数(C_T)およびパワー係数(C_P)の比較を Table 1 に示す。この場合の計算条件は、動翼の取付け角は 0° で、周速比（$\lambda = R\omega / U$）を $\lambda = 1.5$ とした。Fig.4 は、この結果を棒グラフで比較したものである。増速器のない場合には、C_P は 0.0957 であるのに対し、増速器付きの場合はどの場合もほぼ倍にな

っていることが分かる。増速器形状による差はほとんど無いに等しいが、わずかではあるが、円弧形が最も良い結果となっている。増速器を作る立場からは、できるだけ単純な形状が良いので、この結果は望ましい。

3.2 実験結果

Fig.5 は、回流水槽中の実験装置の写真である。水槽幅は 1.5m であり、その中央部に直径 0.6m、4 翼のダリウス水車、その両側に長さ 1.2m、厚さ 0.2m、スパン 0.6m の円弧形増速器を設置した。動翼は、翼形 NACA0018、翼弦長 117mm、スパン長 0.6m の直線翼である。

実験は、増速器がある場合と無い場合の 2 つの条件で、翼の取付け角を 0～9° まで 2.5° づつ変化させて水車効率 C_P を比較した。Fig.5 がその最終的な結果を示しており、増速器の無い場合には C_P が最も大きくなったのは翼の取付け角が 7.5° の場合で $\lambda = 1.6$ において C_P=0.3 であったが、増速器付きの場合は翼の取付け角が 2.5° の場合で $\lambda = 2.1$ において C_P=0.55 となった。このことから、増速器の有無によって水車近傍の流場が変化し、最高効率となる周速比が異なること、およびそのときの翼取付け角が異なることが分かる。増速器の有無による増速効果の単純な推定値としては、最高効率となった周速比から 2.1/1.6=1.31 程度と思われるが、一方 C_P からの推定値については $(0.55/0.30)^{1/3} = 1.22$ 程度であると思われる。このことから、比較的単純な増速器を付加することによって水車効率を大幅に改善できることが分かった。

なお、CFD 計算では今回実験した増速器の半分の長さでもほぼ同じ効果が得られる結果となっており、今後、どの程度まで小さくしても良いのか、などについても更に検討する必要がある。

4. むすび

CFD ソフトウェアを用いて、鉛直軸ダリウス形水車を高性能化するために増速器を付加することを試みた。その結果、長さが水車直径の 2 倍程度の円弧状の増速器を付加することによって水車効率を約 2 倍程度に高めることができることが分かった。これらの CFD 計算結果から円弧状増速器を製作し、実験によって増速器の有無による水車効率の変化を調べた。その結果、CFD と同様な結果を得ることができた。今後、実用的な観点から増速器の最適形状、最適寸法について検討していきたい。

参 考 文 献

[1] F. Ponta and G. S. Dutt, "An improved vertical-axis water-current turbine incorporating a channelling device", *Renewable Energy*. **20**, 2000, pp.223-241.

[2] T. Setoguchi et al., "Development of two-way diffuser for fluid energy conversion system", *Renewable Energy*. **29**, 2004, pp.1757-1771.

Table 1 Results of performance by CFD for the turbine of α=0 at $\lambda = 1.5$

Kind of Diffuser	C_T	C_P
No	0.0638	0.0957
Arc	0.1250	0.1875
Catenary-1	0.1248	0.1872
Catenary-2	0.1242	0.1863
Trapezoidal	0.1231	0.1847
Concave	0.1190	0.1785

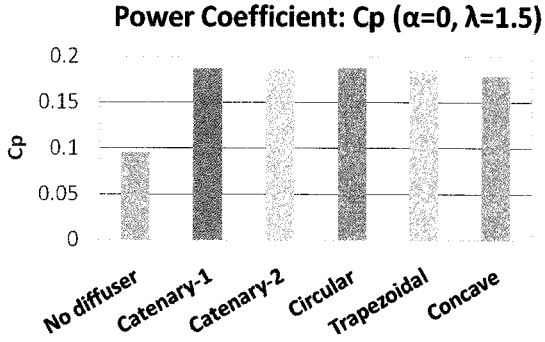


Figure 4 Comparison of power coefficient

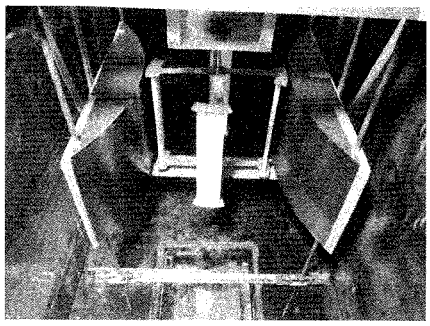


Figure 5 Experimental Setup

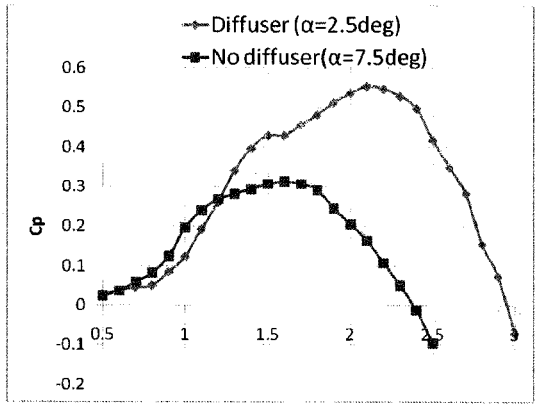


Figure 6 Power coefficient with/without diffuser

研究組織

	経塚雄策
研究協力者	上野正樹、陳　秀智
所内世話人	胡　長洪

地形上を伝播する非線形内部波の挙動の数値解析的研究

研究代表者　鹿児島大学大学院理工学研究科　柿沼太郎

研究の目的

辻・及川らは，2層流体における有限小振幅モデルを用いて孤立波の2次元相互作用の数値解析を行ない，初期の孤立波の振幅の4倍を超えるような新しい波の生成が起こり得ることを示した．しかしながら，非線形性・分散性が共に強い内部波の相互作用の場合に対してそのような結果が得られるか不明であり，更に，底面地形が空間的に変化している場合の内部波の非線形挙動に関しては，未解明な点が多い．そこで，柿沼が導出した変分法に基づく方程式系を適用し，内部波の非線形性・分散性を十分に考慮して，底面地形の影響を受けながら伝播する内部波の1次元的挙動，または，内部波の干渉を含む平面2次元的挙動を数値解析的に研究する．柿沼・中山グループと辻・及川グループが協力してこの問題の解明にあたろうとするのが，本共同研究の目的である．

過去の共同研究において，まず，平成19年度に，計算手法の検討及び1次元波動を対象とした数値モデルの開発を行なった．次に，平成20年度には，平面2次元問題を対象とした数値モデルを開発した．そして，平成21年度において，潜堤上を伝播する内部波の1次元的挙動の数値解析を行ない，更に，孤立波解を初期条件として数値モデルに導入し，平面2次元における内部波の干渉を対象とした数値解析を行なう．

研究の方法

本研究の具体的な方法は，次の通りである．

(1) 潜堤を配置した領域を対象として，内部波の1次元的挙動を数値解析により調べる．その際に，内部波の伝播に伴う界面形と流速及び動圧の変化を追跡し，内部波の非線形性及び分散性に依存する伝播特性を検討する．

(2) 3次オーダの内部孤立波解（及川）を初期値として与える．初期条件は，速度ポテンシャル，界面形，界面における圧力である．数値モデルでは，速度ポテンシャルの鉛直分布を，鉛直座標 z のべき乗の関数で表わす．べき乗の関数の項数が多いほど，数値モデルの精度が向上することから，鉛直座標 z の2次関数までを考慮して検討を行なう．

(3) 内部波の平面2次元的な挙動及び平面2次元における干渉を数値解析により調べる．

これらの各段階において，方程式系や数値解析に関する役割を分担し，計画の遂行にあたる．全メンバが直接会って議論する機会を持つ．

主要な成果

本研究の主要な結論は，次の通りである．

(1) 天端上の下層水深が浅い場合，内部波の峰が潜堤肩を通過するとき，その下方の水平方向流速の鉛直分布が，他の地点と逆の値を示す．
(2) 天端長が十分に長い場合，内部波の峰の分裂が発生し得る．
(3) 天端上の下層水深が浅い場合，内部波の峰下方の水平方向流速が顕著な鉛直分布を有するとき，その峰が分裂を開始し，このとき，峰下方の動圧が鉛直分布を示す．
(4) 下層水深が相対的に浅い天端上では，内部波の伝播に伴い，計算対象時間内において，波の非線形性により峰の波高が次第に増加し，この峰下方の水平方向流速の鉛直分布が次第に大きな湾曲を示すようになった．
(5) 速度ポテンシャルの鉛直分布を鉛直座標 z の 0～2 次関数で表わす場合に，3 次オーダの内部孤立波解を初期条件として与えることが可能となった．
(6) 下層厚さに対する振幅の比が比較的低い場合，孤立波の定常進行波を再現できることが示された．
(7) 下層厚さに対する振幅の比が比較的高い場合，孤立波形が伝播に伴い変化し，大振幅の孤立波の後方に小振幅の内部波が発生した．
(8) 特定の条件下で，台形に近い孤立波形が再現されることがわかった．
(9) 平面 2 次元の現象を対象とした数値モデルにおいて，3 次オーダの内部孤立波解を初期条件として与えることが可能となった．
(10) 比較的簡単なケースを対象として，平面 2 次元において，内部波の干渉による新たな内部波の発生が確認された．

なお，3 次オーダの内部孤立波解（及川）には，大振幅の内部孤立波のみならず，台形に近い界面形の内部波も含まれている可能性がある．今後，これらの内部波に関して，より詳細な解の検討が必要である．また，その結果を平面 2 次元の数値解析に応用し，内部波の干渉による振幅の増大や，新たな内部波の発生等の検討を行ないたい．

研究成果報告

及川正行: 二層流体系における孤立波解, 22p.（未発表）

柿沼太郎・山下　啓・中山恵介: 潜堤上における非線形内部波の伝播特性，非線形波動現象の数理と応用，京都大学数理解析研究所講究録.（印刷中）

研究組織

研究代表者　柿沼太郎（鹿児島大学大学院理工学研究科）
研究協力者　中山恵介（北見工業大学社会環境工学科）
所内世話人　辻　英一（九州大学応用力学研究所）
研究協力者　及川正行（九州大学応用力学研究所）

21 ME－S 1

応用力学研究所共同利用研究集会（21ME-S1）
第２回 炭素系ナノ構造に関する基礎研究　～エピタキシャルグラフェンの形成と物性～

研究代表者：田中　悟（九州大学工学研究院エネルギー量子工学部門）
所内世話人：寒川義裕（九州大学応用力学研究所）

日時：平成２２年１月２９日（金）１３：００－１８：００
場所：九州大学伊都キャンパス・ウエスト２号館９２１室

１．１３：００～１３：３０
九大院工　田中　悟
「SiC 上エピタキシャルグラフェンの成長機構」

SiC 表面熱分解法によるグラフェンの形成は，高品質の大面積 SiC ウエハーを出発材料とするため，将来的なデバイス応用に向いていると考えられる．また，最近では形成されたエピタキシャルグラフェンにおいて，量子ホール効果や比較的高いキャリア移動度が報告されており，高品質であることが示されつつある．しかしながら，結晶が積み重なる正の結晶成長である通常のヘテロエピタキシーとは異なり，Si 原子の脱離・C 原子の再配列という負の結晶成長であるため，成長機構が複雑で既存の結晶成長の概念では説明できない系である．今までに様々な興味ある成長物理現象（超構造を有する(6√3x6√3)R30° 界面構造，カーペット状成長，finger 状成長など）が観察されているが，成長機構に関する報告はあまりない．特に，グラフェン層の空間的な層数のばらつきや構造欠陥（回転ドメイン，積層不整など）を抑制・制御する上では，成長機構の解明は必須といえる．本発表では，特に原子レベルで制御された微傾斜 SiC 表面上のエピタキシャルグラフェン成長機構を議論する．

２．１３：３０-１４：００
福井大院工　橋本　明弘
「エピタキシャル・グラフェンの大面積転写技術」

グラフェンの発見は，HOPG からのスコッチテープによる機械的剥離法による SiO_2 膜上へのグラフェンの転写から始まった．2004 年の発表以来，HOPG からのグラフェン形成とその物性研究以外に，SiC 基板上のエピタキシャルグラフェンの形成とその形成メカニズムや ARPES を用いたバンド構造などの物性研究及びそのデバイスへの応用などの研究，さらには，CVD 法による触媒金属上へのグラフェン形成とその転写に関する研究や化学的手法による大面積グラフェン形成法などの研究が進められてきた．最近，Cu 上に CVD 成長したグラフェンの SiO_2 上への $1cm^2$ もの大面積転写が発表されるなど，大面積グラフェンの異種基板への転写に関する研究にも大きな進展が見られつつある．

我々は，これまで微傾斜 SiC 基板上に形成された良質のエピタキシャルグラフェンをシード層として用いる大面積転写法に関する研究を行ってきた．

本報告では，最近我々が開発した新たな転写プロセスによる，Si-面微傾斜 SiC 基板上 2 層及び 3 層グラフェンシード層から SiO_2/Si 基板上への層数制御されたグラフェンの大面積転写に関する結果について報告する．

３．１４：００～１４：３０

広島大学院理　叶　茂

「Edge states of single layer graphene epitaxially grown on 4H-SiC(0001) studied by STM/STS」

The unusual electronic structures of graphene edges, which have been predicted by theoretical work[1], give rise to the possibility of constructing carbon-based spintronics. However, the experimental investigation on the edge states of single layer graphene grown on the semi-conducting surface is not well understood yet.

In our research, by utilizing the ultra-high vacuum (UHV) scanning tunneling microscopy (STM) and scanning tunneling spectroscopy (STS) at the temperature of 78K, we have investigated the growth mechanism of epitaxial graphene on the semiconductin SiC(0001) surface, and the localized electronic structures at the edges of single layer graphene epitaxially grown on the partially graphitized 4H-SiC(0001) substrate have been extensively investigated. We found that, in contrast with the ideal freestanding graphene model and the previously reported edge states of graphite [2], the edge states of epitaxially grown graphene are significantly modified due to the graphene-substrate interaction, which can be attributed to the symmetry-breaking of the sublattices [3].

[1]. M. Fujita, et al., J. Phys. Soc. Jpn. 65, 1920 (1996).
[2]. Y. Niimi, et al., Phys. Rev. B 73, 085421 (2006).
[3]. S. Y. Zhou, et. al., Nat Mater. 6, 916 (2007).

４．１４：３０～１５：００

NTT 基礎研　影島　博之

「SiC(0001)上グラフェン成長のエナージェティクス」

SiC(0001)上のグラフェン成長の機構を解明する第一歩として，第一原理計算によりテラス上のエナージェティクスを調べた．Si はステップから選択的に脱離すると考えられるので，C はステップから供給されるだろう．そこで，その C が平らなテラス上に降り積もる過程として，グラフェン成長を捕らえた．ステップは重要だが，直接的には考慮しない．計算結果は，2 量体・3 量体よりもグラフェンシート形成の方が，次

のグラフェンシートが成長するなら 0 層目シートの下での方が，生じやすいことを示している．テラス上に余計な Si があったり，Si 空孔が開いていたりしても傾向は変わらないが，後者は余剰 C を吸収する性質を持ち，結果できた構造は小さなグラフェン核とみなすことが可能である．従って，テラス上でも Si 脱離と余剰 C 吸収が適宜起こればグラフェン島が成長する．実際の成長表面の原子構造との関連性が注目される．

休憩　１５：００-１５：３０

５．１５：３０～１６：００
東京大学物性研　中辻　寛
「微傾斜 SiC 上グラフェンの電子状態測定」

九州大学・田中グループで作製された，微傾斜 SiC(0001)基板上の一層および二層グラフェンの原子構造と電子状態について，走査トンネル顕微鏡(STM)と角度分解光電子分光(ARPES)を用いて調べた結果を紹介する．1 層および 2 層グラフェンの K 点付近の ARPES 測定では 1 本および 2 本の p バンドが観測され，均一な厚さのグラフェンが形成されていることが確認された．1 層の場合，Dirac 点の結合エネルギーが 0.4 eV 程度であること，直線分散からのずれによりエネルギーギャップがあるように見えること，STM 像に 6x6 超構造が観察されることは，これまでの SiC 上グラフェンでの報告例と一致した．ARPES 測定における運動量分布幅には異方性がみられ，これは，ステップ密度の異方性を反映していると考えられる．また，SiC との界面における 6x6 超構造ポテンシャルを反映したレプリカバンドも観測された．

６．１６：００～１６：３０
東北大学院理　菅原克明
「SiC 上のグラフェンの高分解能 ARPES」

単層グラフェンで理論的に予言されているディラックコーンの形成を実験的に明らかにする目的で，超高真空中または Ar ガス雰囲気中で作成した SiC 上の単層グラフェンの高分解能角度分解光電子分光(ARPES)を行った結果について報告する．ブリルアンゾーン K 点のフェルミ準位近傍において，p バンドと p*バンドを明確に観測した．p*バンドの一部はフェルミ準位の下に入り込んでおり，SiC 基板またはグラフェン構造に類似したバッファー層からグラフェン層への電荷移動があることを示している．さらに p バンドと p*バンドの間には，試料作成条件に依存した 100-300meV のギャップが開いていることを見いだした．このバンド間ギャップは，原子間力顕微鏡の実験結果から，グラフェンのテラスサイズに密接に関係していることを示している．

７．１６：３０～１７：００
和歌山大　木曾田　賢治
「エピタキシャルグラフェンのラマン分光」

シリコンカーバイド表面を炭化させて形成されるエピタキシャルグラフェンは，高配向熱分解グラファイトの劈開や酸化グラファイトの還元によって得られるグラフェン作製に比べて再現性の点ではるかに優位である．一方，ラマン散乱分光法は，共有結合性軽元素から構成される物質やそのナノ構造体の評価手段として重要な役割を果たしている．実際，グラフェンの評価に関しては，最も簡便な評価測定手段である．我々は，シリコンカーバイド基板に形成されるエピタキシャルグラフェンをその場ラマン散乱分光法実施してその過程を明らかにすることを目的としている．本研究会では我々のグループで行っている深紫外ラマン分光法を用いたエピタキシャルグラフェンの評価とその利点について発表したい．

８．１７：００～１７：３０
物質・材料研究機構　塚越　一仁
「SiC 上グラフェン電気伝導の伝導異方性」

ナノファセット構造を有する off-axis SiC 基板に成長したグラフェンの伝導異方性を電界効果トランジスタ(FET)として評価した．表面ナノファセット構造に対して平行もしくは垂直に FET チャネルを作り，面伝導率のゲート電圧依存性を測定した．ナノファセット構造に対して平行チャネルの方が垂直より全ての素子で面伝導率が高く，移動度も高くなる．電荷中性点における電気伝導率と電界効果移動度より評価した最少キャリア密度は，電界効果移動度変化に対して，垂直チャネルでは最少キャリア密度が大きく変化するが，平行チャネルでは大きく変わらない．この要因は，ナノファセット構造の平坦部と斜面部でイオン化不純物濃度が異なり，最少キャリア密度と移動度が変わることによると推測される．つまり，垂直チャネルではイオン化不純物帯を多数横切ることで，不純物密度の多少を反映しキャリア密度が分散し移動度が小さくなる．また，平行チャネルではイオン化不純物帯を横切らないため，移動度が高くなり得る．
SiC 基板上のグラフェンのナノファセット構造の平坦部と斜面部の伝導の差異に基づく電気伝導に関して実験結果を紹介する．

９．１７：３０～
総合討論

応用力学研究所共同利用研究集会（21ME-S1）

第２回 炭素系ナノ構造に関する基礎研究　～エピタキシャルグラフェンの形成と物性～

研究代表者：田中　悟（九州大学工学研究院エネルギー量子工学部門）
所内世話人：寒川義裕（九州大学応用力学研究所）

日時：平成２２年１月２９日（金）１３：００－１８：００
場所：九州大学伊都キャンパス・ウエスト２号館９２１室

１．１３：００～１３：３０
九大院工　田中　悟
「SiC上エピタキシャルグラフェンの成長機構」

２．１３：３０-１４：００
福井大院工　橋本　明弘
「エピタキシャル・グラフェンの大面積転写技術」

３．１４：００～１４：３０
広島大学院理　叶　茂
「Edge states of single layer graphene epitaxially grown on 4H-SiC(0001) studied by STM/STS」

休憩　１４：３０-１５：００

４．１５：００～１５：３０
NTT基礎研　影島　博之
「SiC(0001)上グラフェン成長のエナージェティクス」

５．１５：３０～１６：００
東京大学物性研　中辻　寛
「微傾斜SiC上グラフェンの電子状態測定」

６．１６：００～１６：３０
東北大学院理　菅原克明
「SiC上のグラフェンの高分解能ARPES」

７．１６：３０～１７：００
和歌山大　木曾田
「エピタキシャルグラフェンのラマン分光」

８．１７：００～１７：３０
物質・材料研究機構　塚越　一仁
「SiC上グラフェン電気伝導の伝導異方性」

９．１７：３０～
総合討論

研究会に関するお尋ねは，エネルギー量子工学部門　田中　まで
（伊都　内線３５３５，stanaka@nucl.kyushu-u.ac.jp）

氏名	所属	大学関係	企業等	学生	
田中悟	九大エネルギー量子工学	1			
寒川義裕	九大応研	1			
井上仁人	九大航空宇宙工学			1	
橋本明弘	福井大学工学部	1			
木曾田賢治	和歌山台教育	1			
中辻寛	東大物性研	1			
菅原克明	東北大WPI	1			
水田典章	九大総理工			1	
水野清義	九大総理工	1			
影島博之	NTT		1		
塚越一仁	NIMS		1		
家近泰	政策研		1		
稲垣祐次	九大エネルギー量子工学	1			
加藤喜峰	九大工	1			
木村昭夫	広大院理	1			
叶　茂	広大院理			1	
木村将成	九大航空宇宙工学			1	
上原直也	九大エネルギー量子工学			1	
森下幸紘	九大エネルギー量子工学			1	
石山裕策	九大エネルギー量子工学			1	
小野田礫	九大総理工			1	
河江達也	九大エネルギー量子工学			1	
	計	10	3	9	22

21 ME－S 2

地形のダイナミクスとパターン及び境界領域

研究代表者・柳田達雄（北海道大学電子科学研究所）

1　研究集会の開催目的

多くの地形変化のダイナミクスは流体運動とそれに伴う物質移動からなっている．物質移動は，流体運動を規定している境界条件を変化させ，その変化が流れにフィードバックする極めて非線形性の強い現象である．地形変化の代表的な例は，河川流路変化・河岸変化・砂丘移動・鍾乳石形成・熱収縮割れ目の形成と多岐にわたり，各分野で異なる対象・異なる方法論で取り扱われてきた．　本研究集会では，これらの現象を流れとそれに伴う物質移動による境界の自発的運動として捉え，異分野での理論，数値計算，実験・観測など異なる方法論の研究者が最新の知識を共有することにより，新たな知見を見いだすことを目的としたい．このような流体と固体およびそれらの相互干渉に起因する研究集会は，応用力学研究所の共同研究集会として開催することが最適と考えられる．

2　プログラム

１１月２５日（水）

14:00–14:45　新屋啓文，西森 拓，粟津暁紀（広大理）
　結合断面モデルによる砂丘の形状とダイナミクス
14:45–15:30　西村浩一（名大環境）
　氷河湖の形成と決壊洪水
15:45–17:00　山田泰広（京大工）
　地質構造形成モデリングによる最近の知見
17:00–18:30　ポスターセッション（資料室 W 603）
下川倫子（摂南大工），太田 正之輔（九大総理工）
　二成分砂山に見られる新しい縞構造
佐伯 亜由美（九大総理工），岡村 誠（九大応力研）
　浸食モデルによる水路網形成とそのパターン
遠藤徳孝（金沢大理工），上野佑基（金沢大理）
　Rhomboid rill の室内実験

１１月２６日（木）

9:30–10:15　伊藤麻実，小林 亮，秋山 和（広島大理）
　河川の流路パターン
10:15–11:30　阪口 秀，西浦泰介（海洋研究開発機構）
　プレートテクトニクスの開始から終焉まで
11:45–12:30　谷口圭輔（同志社大）
　砂が枯渇する系で発達する水成ベッドフォームの特徴
　—平成 21 年 10 月時の木津川の増水後の観察事例—

3　講演内容の概要

結合断面モデルによる砂丘の形状とダイナミクス
新屋啓文，西森 拓，粟津暁紀

バルハン砂丘や横列砂丘の形状の安定性や移動の本質を解析的に捉えるため，西森，勝木らの2次元バルハン衝突方程式を拡張し，風向きの2次元断面を複数抜き出し，隣り合う断面との相互の砂のやり取り(相互作用)を取り入れた2次元断面結合モデルを提案した．このモデルは，3次元バルハン砂丘のダイナミクスを低次元力学系として表現しており，初期屈曲度，相互作用の強さ，風の強さに依存した，形状の安定性について解析的に議論できる．その結果，i) 初期屈曲度に対し，相互作用を強くすることで安定な形状を維持できる領域が増加する．ii) 風を強くすることで屈曲度が鋭くなることが分かった．

氷河湖の形成と決壊洪水
西村浩一

ブータンやネパールなどヒマラヤ山脈の麓の国々では，氷河の縮退にともなって拡大した氷河湖の決壊洪水 (Glacial Lake Outburst Flood: GLOF) が 1960 年代から頻発しており，切迫した環境問題となっている．ブータンだけでも 2000 以上存在すると言われる氷河湖とその決壊事例，さらにはその形成と拡大メカニズムの解明を目的に実施されたこれまでの研究の概要を紹介する．

地質構造形成モデリングによる最近の知見
山田泰広

乾燥砂などの粒状体材料を用いたモデル実験によって，数百メートルから数キロメートルスケールの地質構造形成過程を物理的等価に実験室で再現できる．今回は，逆断層先端部に形成される斜面が急傾斜化することに伴って発生する斜面崩壊をモデル実験で再現した．その結果，斜面崩壊には下部で発生する小規模なものと上部で発生する大規模なものの2種類が存在すること，小崩壊から大崩壊へ進展すること，斜面崩壊が側方に移動することなどが観察された．また，モデル中の1条の断層に注目し，その微細構造と発達過程を解析した結果，まず微細せん断帯集合体で構成される幅広せん断帯が形成された後，ひずみ集中によって断層中軸帯が形成され，さらに断層中軸帯内で微小ブロックが回転運動することなどが観察された．

二成分砂山に見られる新しい縞構造
下川倫子，太田 正之輔

混合した二種類の粉体を一様に混ぜ合わせ，狭い隙間に入れると，規則正しい縞構造を持った砂山を自発的に形成する．今回，従来の二倍の砂山で同様の実験を行ったところ，二つの周期を持つ縞構造が形成された．二重縞構造の形成要因について，詳細な実験結果を元に現象論的モデルを立て，理解した．

浸食モデルによる水路網形成とそのパターン
佐伯 亜由美，岡村 誠

地形形成のモデルは数多くあるが，複雑な水路網が形成される機構は未だ明らかではない．そこで我々は浸食の効果のみを扱ったシンプルな流体モデルを提案し，数値シミュレーションを行った．その結果，流長ー流域のべき乗則の実測とよく合う水路網が再現できた．またフラクタル次元に関しても実際の地形と近い値をとり初期勾配に依存しないことが分かった．

Rhomboid rill の室内実験
遠藤徳孝，上野佑基

砂浜の波打ち際で発生する数 cm 程の菱形の微地形，rhomboid rill の地形学的性質を室内実験で調べた．実験は3種類の粒径の砂を用いて行った．0.1 mm と 0.2 mm の砂では，菱形の沖向き（つまり斜面下方）の角度は斜面傾斜と正の相関があった．特に，斜面傾斜が 10° 以上のときその傾向は明瞭である．しかし，斜

面傾斜が10° 未満の場合と，砂のサイズが0.5 mm の場合では明確でなかった．以上のように菱形の角度は斜面傾斜に依存し，一方，フルード数や表面流速とはあまり強い相関が見られなかった．

河川の流路パターン
伊藤麻実，小林 亮，秋山 和
河川は長い年月をかけて河床を浸し，流路を変え，また大きく変形していく非常にダイナミックな存在である．もちろん，そのタイムスケールの悠久さのために，我々は河川の歴史の一部始終を観察することはできない．そこで，河川のダイナミクスを理解するための方策としては，河川のミニチュアモデルをつくる，河川の数理モデルをつくるなどが考えられる．今回の発表は河川のミニチュアモデルを観察，記録した結果を発表する． 流す水とトレーの中に温度差を作ることで，主流の動きだけをとらえるのではないか，と考え実験ではサーモグラフィーカメラを使用した．サーモグラフィーカメラで長時間微速度撮影した結果，主流が蛇行し成長する様子や，主流の蛇行が川幅を広くする様子など，主流と構造の関係を見ることができた．また，傾斜を変化させることで直線流路，大蛇行やショートカット，蛇行が上流に上がるような様子などをとらえた．主流の動きのみに注目してみると，形を保ったまま下流に下りていく様子，時間と共に定常化する様子を観察できた．

プレートテクトニクスの開始から終焉まで
阪口 秀，西浦泰介
マイケル・ファラデーが振動するスピーカー上に見出した粉体対流は，地球のマントル層のように中心から暖められ表面から冷やされる厚みを有する球殻状重力環境下でも再現できるのか?」という素朴な疑問に答えるために，DEM で大規模長時間数値実験行った．計算モデルは球殻中心に固定球核（熱浴）を配置し，その周りにランダム配置した粒子を核中心に向けて重力充填する．さらに，最外殻層には冷却用粒子を配置し，粒子間および粒子－核間で熱伝導をさせて温度に応じて粒子の運動エネルギーを増減させ，その他は通常の DEM と同様である．この様に至って単純なモデルで粒子間の摩擦係数と反発係数を変化させただけで，レイリー・ベナール対流のようなサッカーボール状対流の他，バレーボール状対流，および土星の様な洗濯機状対流パターンが見つかった．さらに，洗濯機状対流の過渡期ではプレート運動を連想させる非対称沈み込み運動が見つかった．サッカーボールからバレーボール，洗濯機になるにつれて，粒子層はより高密度充填され固体的な状態であり，従来の流体ベースのマントル対流シミュレーションでは再現できなかった固体ならではのプレート沈み込み運動を再現できた．

砂が枯渇する系で発達する水成ベッドフォームの特徴—平成21年10月時の木津川の増水後の観察事例—
谷口圭輔
2009年10月初めに日本列島に上陸した台風18号は，近畿地方の広い範囲に多くの雨を降らせた．京都府南部を流れる木津川では，平常時から最大6 m の水位上昇がみられた．この増水により，京都府京田辺市に位置する，高水敷を利用したグラウンド上に，多くの砂床形が形成された．侵食地形である Obstacle Mark を上流側に持つ場では，移動可能な砂の量を反映して，流向に平行な向きに砂床形の種類が変化した．一方．砂の枯渇する系では，流向に垂直な方向に砂床形の種類が変化した．この変化は，流速の変化を反映するとみられる．

4 開催日程，場所

開催日程　2009年11月25日（水）– 11月26日（木）
開催場所　九州大学応用力学研究所西棟6階多目的研究交流室（W601号室），資料室（W603号室）
講演数　9件
参加者数　17人

（研究集会）

強非線形流体・構造連成解析

研究代表者
大阪大学大学院工学研究科教授
柏　木　　正

１．目 的

強非線形流れに関する研究は，数値流体力学分野での各種の高精度計算手法の開発によって近年急速に発展してきた。しかしこれまでの研究は，複雑な流れの解析に重点が置かれ，どちらかと言うと，研究の興味は新しい計算スキームの開発，計算精度の検証や改良，複雑流体現象そのものの科学・物理的理解などであった。

現在ではそれらの研究成果を受けて，津波による構造物の破壊，荒天波浪中での浮体への波浪衝撃やスラミングによる強非線形流体・構造連成問題など，浮体や構造物の安全性・防災を意識した実際問題への応用が期待されている。それに関連した研究をしているいろいろな分野の研究者が一堂に会し，研究成果の発表，研究情報の交換を行うことが目的である。また，国内だけでなく海外からの参加者も加え，強非線形問題，流体構造連成などをキーワードとする研究の国際的情報発信源としての役割を果たすことも重要な目的となっている。

２．研究集会の開催日時，場所

開催日時：平成２１年１２月１１日（金）１３：００～１７：４０
　　１２月１２日（土）　９：００～１２：１５
開催場所：九州大学応用力学研究所西館６階多目的交流室（Ｗ６０１号室）

３．講演プログラムと概要

講演プログラムは末尾に示しているので，ここでは講演の順番に従ってその概要，並びに全体的な雰囲気，参加者からの感想などについて述べておく。なお，目的にも書いたように，この研究集会は既に国際研究集会として認知されており，今回も講演，討論はすべて英語で行われたことを申し添えておく。

Monolithic Modeling of Viscous Flows around Deformable Structures

Decheng Wan (Shanghai Jiao Tong University, China)

An efficient FEM-fictitious boundary method for the detailed simulation of solid-liquid two phase flows with large number of moving particles is presented. An explicit fictitious boundary method based on a FEM background grid which covers the whole computational domain and can be chosen independently from the particles of arbitrary shape, size and number is used to deal with the interactions between the fluid and the particles. The flow is computed by a special ALE formulation with a multigrid finite element solver. The solid particles are allowed to move freely through the computational mesh which is adaptively aligned by a special mesh deformation method (r-type moving grid method) such that the accuracy for dealing with the interaction between the fluid and the solid particles is highly improved. Since the presented method treats the fluid part, the calculation of forces and the movement of particles in a subsequent manner, it is potentially powerful to efficiently simulate real particulate flows with huge number of particles. A series of simple test cases is first presented, and then as an illustration of the efficiency of the presented method, several examples of numerical simulations of particular flows, including three big disks plunging into 2000 small particles and sedimentation of 10,000 particles in a cavity, are shown.

Analysis of Linear and Nonlinear Ship Springing in Time Domain by Fully Coupled BEM-FEM

Yooil KIM, Kyoung-Hwan KIM, Yonghwan KIM (Seoul National University)

Numerical methodology to solve ship springing problem, which is basically fluid-structure interaction problem, was explored in this study. Solution of this hydroelasticity problem was sought by coupling higher-order B-spline Rankine panel method and finite element method in time domain, each of which is introduced for fluid and structure domains respectively. In the present study, extensive case studies have been done on the numerical schemes, especially focusing on the iteration method, FE analysis of beam-like structure, handling of forward speed problem and so on. Two different iteration schemes, Newton-style one and fixed-point iteration, were tried in this study, and results were compared between the two. For the solution of the FE-based equation of motion, direct integration and modal superposition method were compared with each other from the viewpoint of its efficiency and accuracy. Finally, calculation of second derivative of basis potential, which is difficult to obtain with accuracy within grid-based method like BEM was discussed.

Large-scale Two-Phase Flow Simulation

Naruhiko Tan (Tokyo Institute of Technology)

The purpose of this research is to develop a large-scale two-phase flow simulation code in order to get high spatial resolution (~mm). In this presentation, two-phase flow solver with Level Set method to tackle high spatial resolution large-scale simulation is described. As a numerical example, we have carried out a dam breaking simulation in which the floor is wet at the beginning. The computation is performed in a computer with 512 CPU cores. From the present high-resolution simulation it is shown that three-dimensionality has significant effect on the impact pressure and the energy dissipation after wave breaking.

Numerical Simulation on Tsunami due to Slope Failure by Fluid-Elastoplastic Hybrid Particle Method

Hiroyuki Ikari (Kyoto University)

In this presentation, the hybrid model of elasto-plastic body and fluid based on the particle method, which has been developed as a tool of interface fields between soil mechanics and hydrodynamics, is introduced. This model can be applied to the prediction of a river-bank destruction due to flood for urban disaster prevention. Numerical examples are shown on a collapse of an overhanging cohesive soil cliff. The collapse process, which is caused by the sudden change of the stress state in the ground by the outbreak of the crack, can be tracked. Large deformation problems, that were unable to be simulated by conventional methods like the FEM, can be dealt with by the particle method.

GPU Computing for Large-Scale CFD

Takayuki Aoki (Tokyo Institute of Technology)

Some of CFD applications are successfully accelerated on GPU (Graphics Processing Unit) and several-ten times speed-ups are often reported to compare with a CPU core. In order to execute large-scale CFD computations beyond local VRAM limitation, GPU-to-GPU communications are required over nodes through the PCI-Express bus and the interconnection. These communications cost comparable to GPU computation and the overlapping technique between computation and communication has to be introduced to sustain the linear strong scaling. We demonstrate the results of Lattice Boltzmann method, Tsunami simulation solving shallow water equation, compressible flow computations and show the multiple-GPU scalabilities on Tokyo Tech TSUBAME grid cluster.

Strongly Coupled Fluid-Structure Interaction for Vortex-Induced Vibration

Hyung-Taek Ahn (University of Ulsan, Korea)

This presentation is about the current state of the art in VIV(Vortex-induced vibration) simulation. VIV is being observed in various types of naval and offshore structures. Numerical prediction of VIV is a multidisciplinary subject as the phenomenon should be understood through multidisciplinary perspectives, such as the fluid mechanics, vortex dynamics, ocean turbulence, structural dynamics, etc. A new computational approach based the coupled simulation of computational fluid dynamics (CFD) and computation structural dynamics (CSD) is presented. Experiments to be carried out at the Circulating Water Channel (CWC) at the University of Ulsan, Korea will also be presented.

An Eulerian Scheme with Lagrangian Particle for Evaluation of Seakeeping

Suandar Baso (Hiroshima University)

We have developed an efficient and robust CFD method to compute a strongly nonlinear interaction between wave and ship, such as heave and pitch motions in a severe wave condition, resultant slamming on the surface of a ship and an impact pressure due to green-water phenomena. The proposed method is based on coupling the Eulerian method for fluid phase with the Lagrangian method for solid phase to compute fluid-structure interaction. In this model, two kinds of Lagrangian particles are employed. One is free surface particle located near the free surface to capture a water surface accurately. The other one is SPH particle to compute ship motions in 3D. A fully nonlinear phenomenon with wave breaking is treated on a fixed Eulerian grid with the free surface particles to rebuild density function for capturing an interface between two phases in a filamentary under resolved region. In this study, the proposed model was applied to ship-wave interaction for evaluating of seakeeping of a ship in waves and their results were compared with experimental results and strip theory.

Numerical Computation of Added Resistance on Ships in Waves

Kyung-Hwan Kim, Yonghwan Kim (Soeul National University)

Accurate prediction of added resistance on ships is one of essential element for power prediction, since the magnitude of added resistance can be 10~30 % of calm-water wave resistance. In the present study, the numerical computation of added resistance on ships due to incoming waves is treated. As a method of solution, a higher-order Rankine panel method is applied in time domain. The added resistance is evaluated by integrating the second-order pressure on the body surface. As the numerical result, mean wave drift forces of hemi-sphere and barge are computed at zero speed, and the computational results are compared with experimental data. Furthermore the mean drift forces of LNG FPSO and LNG carrier positioned by side-by-side are also compared with experimental data. Computational quantities of added resistance with various ship speed are validated for a few ship models, including Wigley hulls, Series 60(CB=0.7) and S175 containership by comparing with experimental data. The computational results of mean drift force and added resistance show reasonable correspondences with experimental data. The components of added resistance are observed for each integral term, and the contributions of radiation and diffraction components are also compared.

Control of Heave-Pitch Coupled Motion of Cruise Ships

Jae-Han Kim, Yonghwan Kim (Soeul National University)

The typical device to reduce the roll motion of cruise ships is stabilizing fin. The present study includes the application of the active stabilizing fin. Two or four stabilizing fins are equipped to reduce the roll and/or pitch motions of cruise ships. Each fin is controlled by digital control algorithms which are PID (proportional-integral-derivative) control and LQR (linear quadratic regulator). A single controller can actuate two or four fins at the same time in consideration of some constraints such as a free surface effect and a mechanical saturation of actuator for a realistic simulation. Numerical computation is carried out by using the time-domain ship motion program, called WISH-CRUISE. The resultant motion responses as performance of controllers are compared for different control algorithms. LQR control algorithm shows a good performance for not only motion stabilizing but also easy application. PID control also can provide a good performance for roll or pitch motion stabilizing. However, more effort is generally needed for tuning up a proper set of gains.

Comparative Study on Hydroelastic Response of Vertical Plate due to Wave

Guanghua He (Osaka University)

In the present paper, wave-plate interactions are simulated using the Mixed Eulerian Lagrangian method for the free-surface flow and the FEM for the deflection of the plate. The present work can be considered as a nonlinear numerical extension of the work of Peter and Meylan, which treated the 2-D vertical elastic problem in the framework of nonlinear potential flow rather than the linear potential flow. A hydroelastic vibration of plate due to pulse-type initial elevation of the free surface is systematically investigated. Firstly, a comparison between elastic plate and a wall due to pulse-type initial wave is illustrated. Then, the influence of the plate stiffness and the edge condition at the top of plate on the wave-plate interaction is also studied.

Numerical Simulation of a Floating Fish Cage

Makoto Sueyoshi (RIAM, Kyushu University)

A numerical code was developed to predict the performance of fish culturing system. The numerical implementation is based on a popular lumped mass method and multi solid body computation with 6degrees of freedom. It can compute complicated interaction among fish cages and mooring systems consisted from synthetic cable and rigid buoys under current and wave conditions. Some numerical examples of floating fish cage arrangements were demonstrated and discussed.

Structural Analysis in FSI Problems

Xian Chen (Kyushu University)

In this study we consider a weak coupling approach, in which a CIP (Constraint Interpolation Profile) based method is used for fluid motion and a nonlinear FEM method is used for structure deformation. The fluid and the structure are solved sequentially by implementation of existing codes for fluid solver and structure solver. In this presentation, some features of nonlinear FEM method are discussed. There are three types of nonlinearity in structural analysis: geometry, material and boundary. Large deformation problems are usually treated based on reference configuration and iterative procedure is needed in nonlinear structural analysis. Interaction of fluid and structure is indeed interaction of boundary nonlinearities in fluid and structure. Stability of weak coupling solution of FSI problem relies on the nonlinearity and sensitivity of the partitioned solutions; therefore, improving stability may need handling equation system of the counterpart.

Motion and Structural Loads on a Modern Containership: Experiment vs. Computation

Myung-Jae Song, Kyung-Hwan Kim, Yonghwan Kim (Seoul National University, Korea)

The objective of this study is to validate numerical seakeeping codes based on nonlinear 3-D time-domain Rankine panel method by comparing the numerical results with experimental data for industrial applications. The numerical codes used are based on weakly-nonlinear scheme which include nonlinear Froude-Krylov and restoring forces. Main focus of the study is to validate nonlinear numerical tools for industrial use through the comparison of the nonlinear characteristics of wave-induced loads on a modern 6500 TEU containership. This study attempts to evaluate the vertical bending moments, vertical shear forces, torsion moments, horizontal shear forces and horizontal bending moments at high waves, as well as linear transfer functions.

Numerical simulations for the foregoing responses are performed with two different numerical codes, WISH and WASIM. WASIM, developed by DNV, is one of the accredited seakeeping code in the shipbuilding industry, and WISH, developed by SNU, begins industrial debut. The comparisons show that the linear and nonlinear motions and hull girder loads computed by numerical codes have good agreements between numerical and experimental results except in horizontal modes at extreme waves. It is found that the both numerical codes have acceptable for industrial applications except the horizontal structural responses. To increase the accuracy of the time-domain numerical codes in horizontal modes at extreme waves particularly in oblique sea, careful treatment is recommended to the control of the horizontal displacement of ships.

Numerical Simulation of Container Ship in Large Waves

Changhong Hu (RIAM, Kyushu University)

Some recent developments and applications are presented on RIAM-CMEN (Research Institute for Applied Mechanics, Computational Method for Extremely Nonlinear hydrodynamics), which is a in-house CFD software developed for strongly nonlinear free surface-body interaction problems such as ship motions in large-amplitude waves, resultant slamming on ship's bottom and flare, the green-water impact on deck, and so on. The numerical results of the computation on a latest post-Panamax container ship model moving in large-amplitude regular waves for various wave lengths and wave angles, are presented. The frequency response characteristics of the wave-induced motions and various wave loads, such as the vertical bending moment and the shear force on three cross-sections of the ship, are compared to the experiments and the results obtained by linear-theory based numerical methods.

４．おわりに

多くの分野で関連の深い「強非線形流体・構造連成解析」を取り上げ，種々の研究テーマや解析手法に関して知見を深め，情報交換をするためにこの研究集会を国際研究集会として企画した。今回の講演会でも「流体・構造連成」を共通のキーワードとしていくつかの分野における最新の研究成果を聞くことができ，学際的な研究の発展が強く実感できた。今回も外国からの研究者が参加していたため，すべての講演・議論を英語で行った。韓国・中国・日本からの参加者の交流もこの研究集会の重要な目的になっており，この研究集会がすでに有意義な国際研究集会として認知されていることを確信した。

この研究集会は，特にアジア域の若い研究者（大学院生も含む）にとって大変良い刺激になっていることは事実であり，数値計算が若い人によって行われていることを考えれば，優秀な人材育成のためにも，この研究集会を継続して行うべきだと考えている。

プログラム

期　日：　２００９（平成２１）年１２月１１日（金），１２日（土）
場　所：　九州大学応用力学研究所西館６階Ｗ６０１号室

１２月１１日（金）

13:00～13:10　Opening Address
Masashi Kashiwagi (Osaka University)

13:10～14:00　Keynote Presentation :
Monolithic Modelling of Viscous Flows around Deformable Structures
Decheng Wan (Shanghai Jiao Tong University, China)

14:00～14:30　Large-scale Two-Phase Flow Simulation
Naruhiko Tan (Tokyo Institute of Technology)

14:30～15:00　Numerical Simulation on Tsunami due to Slope Failure by Fluid-Elastoplastic Hybrid Particle Method
Hiroyuki Ikari (Kyoto University)

（休　憩）

15:20～16:00　GPU Computing for Large-Scale CFD
Takayuki Aoki (Tokyo Institute of Technology)

16:00～16:40　Strongly Coupled Fluid-Structure Interaction for Vortex-Induced Vibration
Hyung-Taek Ahn (University of Ulsan, Korea)

16:40～17:10　An Eulerian Scheme with Lagrangian Particle for Evaluation of Seakeeping
Suandar Baso (Hiroshima University)

17:10～17:40　Numerical Computation of Added Resistance on Ships in Waves
Kyung-Hwan Kim, Yonghwan Kim (Soeul National University)

（懇 親 会）

１２月１２日（土）

9:00～ 9:30 Control of Heave-Pitch Coupled Motion of Cruise Ships
Jae-Han Kim, Yonghwan Kim (Soeul National University)

9:30～10:00 Comparative Study on Hydroelastic Response of Vertical Plate due to Wave
Guanghua He (Osaka University)

10:30～10:30 Numerical Simulation of a Floating Fish Cage
Makoto Sueyoshi (RIAM, Kyushu University)

（休　憩）

10:40～11:10 Structural Analysis in FSI Problems
Xian Chen (Kyushu University)

11:10～11:40 Motion and Structural Loads on a Modern Containership: Experiment vs. Computation
Myung-Jae Song, Kyung-Hwan Kim, Yonghwan Kim
(Seoul National University, Korea)

11:40～12:10 Numerical Simulation of Container Ship in Large Waves
Changhong Hu (RIAM, Kyushu University)

12:10～12:15 Closing Address
Changhong Hu (RIAM, Kyushu University)

乱流現象及び非平衡系の多様性と普遍性

研究代表者・吉田 恭（筑波大学数理物質科学研究科）

1 研究集会の開催目的

大気・海洋の流れ，プラズマ，工学的応用分野おける流れ，そして我々の身の回りの多くの流れは乱流である．これら多様な乱流現象の物理的理解および応用的予測・制御のため，各分野で理論的解析・実験・観測・計算科学などの様々な手法で精力的に研究されている．これら様々な分野で異なる手法を展開する研究者が，互いの情報を交換して議論を通して知識・問題意識を共有する場を設けることは，重要であると思われる．また，乱流が非平衡力学系の一典型であることを考えると，より幅広く様々な非平衡系の研究者と乱流研究者が交流を持ち，その多様な視点をそれぞれの分野に導入し，またそれぞれの問題の背後にある普遍性を探ることは，今後の乱流および非平衡系の研究の展開に有意義であると思われる．日本における国際会議やワークショップを見る限り，このような機会は少ないのが現状だと思われる．本研究集会では，異分野での理論，数値計算，実験・観測など異なる方法論の研究者が最新の知識を共有することにより，新たな知見を見いだすことを目的としたい．このような研究集会は，応用力学研究所の共同研究集会として開催することが最適と考えられる．

2 プログラム

１１月１２日（木）

13:30–14:00 津田慎也，後藤 晋（京大工）
歳差運動する球体内に維持される乱流の統計

14:00–14:30 渡邊 威，後藤俊幸（名工大工，JST-CREST）
乱流中の高分子鎖モデルの数値シミュレーション

14:50–15:50 小松信義（金沢大），安部隆士（東大，ISAS/JAXA）
ミクロな時間可逆分子シミュレーションを通して見たマクロ現象の不可逆性

15:50–16:20 高田 滋（京大工）
線形化ボルツマン方程式の対称性とその応用

16:40–17:10 石崎龍二（福岡県立大人社），秦 浩起（鹿大理），庄司 多津男（名大工）
ACトラップにおける帯電微粒子のカオス拡散

17:10–17:40 R. Anugraha, T. Ueki, Y. Hidaka （九大工），M. I. Tribelsky（MIREA, Russia），S. Kai (九大工)
A New Type of Defect in Soft-Mode Turbulence

１１月１３日(金)

9:30–10:30 有光敏彦（筑波大），有光直子（横浜国大），本池 巧（湘北短大）
充分発達した乱流の新しい解釈に向けて—δ^{∞} 不安定軌道の集団 —

10:30–11:00 有光直子（横浜国大），有光敏彦（筑波大）
MPDFT による充分発達した乱流の解析—数値および風洞実験から得られた PDF による—

11:20–11:50 大屋裕二（九大応力研）
風レンズ風車という風力発電システム

13:30–14:30 礒部雅晴（名工大）
非平衡統計物理学と分子シミュレーション—２次元粉体気体の乱流化と統計則—

14:30–15:00 波多野 恭弘（東大地震研）
粉体せん断流における速度揺らぎの空間構造とレオロジー

15:20–15:50 竹内一将，黒田真史（東大理），Hugues Chate（CEA-Saclay），佐野雅己（東大理）
液晶乱流の時空間欠性に見る吸収状態相転移のユニバーサリティ

15:50–16:20 小林 幹，山田道夫（京大数理研）
シェルモデル乱流における時間間欠性のメカニズムについて

16:40–17:10 服部裕司，中野 わかな（東北大流体研），畠山 望（東北大工）
Volume Penalization 法による渦対生成の数値解析研究

17:10–17:40 広瀬直毅（九大応力研）
東アジア縁辺海のデータ同化モデリング

１１月１４日(土)

9:30–10:30 板野智昭（関大），S. C. Generalis (Aston Univ)，藤 定義 (京大)，関 眞佐子，秋永 剛（関大）
低レイノルズ数における平面クエット流の厳密解とその渦構造

10:50–11:20 吉川 裕，増田 章（九大応力研）
海洋表層における乱流惑星境界層流の観測

11:20–11:50　松本洋介，関 華奈子（名大太陽地球環境研）
　地球磁気圏速度シア境界層における無衝突プラズマの乱流輸送
13:30–14:00　森肇，岡村 誠（九大応力研）
　カオス・乱流の２重構造と動的スケーリング則
14:00–14:30　富永広貴（佐賀大医），森肇（九大応力研），石崎龍二（福岡県立大），
森 信之（九州看護福祉大），黒木昌一（福岡女子大）
　Duffing 振動子系の時間相関関数の初期 regime と終期 regime
14:50–15:20　森野佳生（京大情報），大内克哉（神戸芸工大），宮崎修次（京大情報）
　周期外力下の Swift-Hohenberg 系における緩和現象
15:20–15:50　庄司 多津男，西川徳彦，岩井一彦（名大工），秦 浩起（鹿大理工）
　誘電体バリヤ放電における電流フィラメントのパターン形成
15:50–16:20　秦 浩起（鹿大理工），庄司 多津男，石川多一（名大工）
　DC 電極間の微粒子による振動子結晶

3　講演内容の概要

歳差運動する球体内に維持される乱流の統計
津田慎也，後藤 晋

歳差運動を行う球体を歳差球体と呼ぶ．この歳差球体を支配するパラメータは自転軸まわりのレイノルズ数 Re と歳差の強さを表すポアンカレ数 Γ である．本研究では，これまで明らかにされていなかった，Re と Γ がどのようなパラメータのとき，内部流れが最も発達した乱流となるかを実験的に調べた．今回の実験では Re = 5000–80000 の範囲に関して実験を行った．結果は，自転軸まわりの角速度に対し，歳差軸まわりの角速度が 5–10%程度のときに内部流れは最も発達するということが判明した．また，歳差軸まわりの角速度がそれ以下のときは，自転軸まわりの旋回が支配的な流れとなり，それ以上のときは歳差軸に平行な柱状の構造が支配的な流れになり，歳差軸まわりの角速度が自転軸まわりの角速度に対して 20%程度のときには，大域的な周期流が存在するということも判明した．

乱流中の高分子鎖モデルの数値シミュレーション
渡邊 威，後藤俊幸

乱流中の高分子鎖の振る舞いとその統計性質を調べるために，乱流の直接数値計算と高分子モデルのブラウン動力学シミュレーションを組み合わせた数値シミュレーションを行った．ワイセンベルグ数 Wi を変化させた際の高分子鎖の末端間距離 r の大きさの確率密度関数や時間相関関数の振舞から，高分子鎖のコイルーストレッチ（CS）転移点について調べた．結果，r の確率密度関数は Wi = 3 ∼ 4 で 1) $P(r) \sim 1/r$ のスケーリング側を示すこと，2) 時間相関が最大値を示すことが明らかになった．また高分子によるストレステンソルの振る舞いを調べた．高分子ストレステンソルによるエネルギー散逸率は粘性によるエネルギー散逸率よりも間欠的な振舞を示すこと，確率密度関数は小さなスケールではべき的な減衰を示すことがわかった．

ミクロな時間可逆分子シミュレーションを通して見たマクロ現象の不可逆性
小松信義，安部隆士

マクロな系の不可逆性は，時間可逆なミクロな基礎法則から，どのように説明されるのか?例えば，力学系の時間発展を考え，ある時刻に全粒子の速度方向を一斉に反転すれば，力学の可逆性に基づく限り，系は初期状態に戻るはずである（可逆性パラドックス）．しかし，通常の分子動力学法（MD）を用いて可逆性パラドックスを解析すると，丸め誤差のために，力学系は初期状態に復帰しないことが知られている．従って，本研究では，不可逆性のメカニズムをより適切に検討するため，力学の時間可逆性を厳密に再現する分子動力学法（Bit 可逆アルゴリズム：Bit MD）を用いて，時間反転解析を行い，系に付加された微小ノイズが不可逆性に与える影響を解明した．さらに，気体中には存在しないと考えられている膨張衝撃波を検討するため，Bit MD を用いて爆発現象を時間反転した爆縮過程を解析し，膨張衝撃波が消失するメカニズムを明らかにした．また，流体を対象にした不可逆現象に関連する最近の研究トピックスの紹介などを行った．

線形化ボルツマン方程式の対称性とその応用
高田 滋

微小系における気体流は非平衡流であるが，外部が系に与える温度や圧力の平衡状態からの摂動は多くの場合に小さく，線形化 Boltzmann 方程式による取り扱いが許される．この講演では線形化 Boltzmann 方程式に内在する対称性を紹介し，それをもとにして定常な微小系内の種々の気体流の間で成り立つ相反関係の一般論が構築できることを示す．これは線形化 Boltzmann 方程式が，系の希薄の度合いに関わらず，Laplace 方程式における Green の相反性に類似の構造を保持することに由来する．この結果から，エントロピー生成に基づく Onsager の相反関係が一定の条件のもとで任意の希薄度の系に拡張できることを明らかにできる．

AC トラップにおける帯電微粒子のカオス拡散
石崎龍二，秦 浩起，庄司 多津男

帯電微粒子を交流電場によって閉じ込めると，コントロールパラメータを変えることにより，帯電微粒子の運動は，固定点や周期運動やカオス運動を示すことが実験で確認される．

交流電場によって荷電粒子を閉じ込めるための条件は，Mathieu 方程式の固定点や周期運動の安定性により説明される．実際の実験では，空気抵抗などによる散逸が考えられるため，Mathieu 方程式に散逸を考慮しなければならず，周期運動やカオス運動の発生は説明できない．そこで，散逸のある Mathieu 方程式を拡張した数理モデルを導入した．散逸のある Mathieu 方程式を拡張した数理モデルにより，固定点が不安定化すると安定周期運動が，更に，安定周期運動からカオスが生じることを示した．

特に，カオスが発生するパラメータ領域で，1 粒子の回転運動の揺らぎの統計性は，同一方向に回り続ける継続時

間分布により特徴づけられることを示した．また，2粒子の回転運動の揺らぎは，クーロン相互作用が強くなると，2粒子間の角度差の揺らぎが小さくなることを数値的に確認した．

A New Type of Defect in Soft-Mode Turbulence
R. Anugraha, T. Ueki, Y. Hidaka, M. I. Tribelsky, S. Kai

In the soft-mode turbulence (SMT) in electroconvection of homeotropic nematic system, which is a kind of spatiotemporal chaos induced by nonlinear interaction between the Nambu-Goldstone modes and the convective modes, a line structure called blackline has been discovered [1]. We measured the density of the blackline as a function of ac voltage and frequency. It is clarified that the blackline is a structure of the nematic director in the x-y plane and includes a sequence of point defects. The occurrence of this defect is only due to the symmetry in the SMT and independent of the properties of fluctuations. [1] R. Anugraha, Y. Hidaka, T. Ueki, and S. Kai, Phys. Rev. E 80, 041701 (2009).

充分発達した乱流の新しい解釈に向けて — δ^{∞} 不安定軌道の集団 —
有光敏彦，有光直子，本池 巧

Multifractal Probability Density Function Theory (MPDFT) is a statistical mechanical ensemble theory for analyzing those phenomena providing fat-tail PDFs, constructed by the authors (T.A. and N.A.) under the assumption that the singularities due to the scale invariance of the Navier-Stokes equation for high Reynolds number distribute themselves multifractal way in real physical space. The degree of singularity for those quantities which are responsible for intermittent phenomena is specified by the singularity exponent α that is assumed to be equal to the parameter appeared in the scale transformation of the Navier-Stokes equationas an arbitrary parameter taking real values. Note that α is a stochastic variable, and is related definitely to the quantity representing intermittent behavior.

For the case of the A&A model, the distribution of α is given by Tsallis-type probability function with three parameters. The three parameters are fixed by the condition of energy conservation, the definition of μ and the *scaling relation* that relates between the entropy index q, appeared in the definition of Rény entropy or Tsallis entropy, and the zeros of the multifractal spectrum $f(\alpha)$. The multifractal spectrum is uniquely related to the probability function for α. The probability function is responsible for the tail part of PDFs of those quantities revealing intermittent behavior whose singularity exponents can have values $\alpha < 1$.

In order to extract the intermittent character of the fully developed turbulence, it is necessary to have information of hierarchical structure of the system. This is realized by producing a series of PDFs for responsible singular quantities with different length $\ell_n = \ell_0\delta_n$, $\delta_n = \delta^{-n}$ $(n = 0, 1, 2, \cdots)$, $\delta > 1$ that characterize the sizes of regions in which the physical quantities are coarse-grained. The value for δ is chosen freely by observers. Therefore, the choice of δ should not affect the theoretical estimation of the values for the fundamental quantities characterizing the turbulent system under consideration. The framework of MPDFT itself tells us that it is enough to put the scaling relation in the generalized form $(\ln 2)/(1-q)\ln\delta = 1/\alpha_- - 1/\alpha_+$ in order to satisfy above requirement. Here, $\alpha_\pm$ are the zeros of the multifractal spectrum, i.e., $f(\alpha_\pm) = 0$.

The new scaling relation provides us with a new interpretation of the fully developed turbulence, i.e., it is an aggregate of the δ^{∞} unstable orbits which connote the structure of δ-scale Cantor sets providing the intermittency.

MPDFT による充分発達した乱流の解析 — 数値および風洞実験から得られた PDF による —
有光直子，有光敏彦

In order to show how Multifractal Probability Density Function Theory (MPDFT) works in the precise analyses of PDFs, and how it can provide us with new information to understand turbulence, we will present the investigations with the help of the PDFs from DNS with 4096^3 grid points by Kaneda and Ishihara and from experiments in a wind tunnel by Mouri. MPDFT is a statistical mechanical ensemble theory for analyzing those phenomena providing fat-tail PDFs, constructed by the authors under the assumption that the singularities due to the scale invariance of the Navier-Stokes equation for high Reynolds number distribute themselves multifractal way in real physical space.

風レンズ風車という風力発電システム
大屋裕二

風レンズ風車とは，風車の周囲に簡単な構造の集風体を装着して，風車翼にあたる風を強め，風車の発電性能を飛躍的に高める風力発電装置である (5kW 実用機)．風車の発電量は風速の3乗に比例する．したがって何らかの流体力学的工夫で風車翼にあたる風を少しでも増速できれば発電量は飛躍的に増加する．九州大学風レンズ研究グループは，つば付きディフューザという集風構造体を開発した．このつばの存在により，つばの背後に強い渦形成がなされ，出口付近の圧力が周囲圧力よりも大きく低下する．この低圧領域がディフューザ内部により強い流れを引き込み，速い流れが風車翼にあたる．このため，この集風体（風レンズ体とも呼ぶ）を装着した風レンズ風車では，通常の同サイズの風車と比較して約2－5倍の発電出力を達成している（参考文献:ターボ機械 33-7, 2005）．

非平衡統計物理学と分子シミュレーション—2次元粉体気体の乱流化と統計則—
礒部雅晴

近年のアルゴリズムの開発と計算機の発展により，ミクロな分子動力学からマクロな現象論や時空相関（統計則や輸送係数）を探るといった非平衡系の計算統計物理学的研究の重要性が増大している．本講演では，剛体球系分子動力学法の大規模シミュレーションにより，粉体気体系の乱流化現象やロングタイムテール問題に関して，得られた最新の研究成果を紹介した．

粉体せん断流における速度揺らぎの空間構造とレオロジー
波多野 恭弘

地面を形作っている岩石や土砂などは一見堅固に見えるが，あるとき突然流体のように動き始めることがある．地震などに伴う地滑り，火山噴火に伴う山体崩壊などはその代表例であろう．このようなマクロ粒子多体系（粉体）の流動状態と停止状態の明確な違いは熱力学的な液・固転移を思い出させる．最近我々は，これらの現象がある種の相

転移（臨界現象）として物理的に記述できることを発見した．本研究の核心は，「ジャミング転移」として現在急速に研究が進んでいる概念にある．これは一言で表すなら，「マクロ粒子系がある閾値密度より上で剛性を獲得する」転移である．ただしジャミング転移では結晶化は起こらずランダムな構造がそのまま凍結されるため，液・固転移よりもむしろガラス転移と密接に関連していることが推測される．それを裏付けるように，過冷却液体における分子の動的な協同運動（動的不均一性）と同様の現象が，ジャミング転移点近傍の粉体系においても観察されている．さらに重要なことに，それら協同運動の相関距離と特性時間は，ジャミング転移点で発散するように見える．このことはジャミング転移点が臨界点であることを示唆している．実際にこの臨界性を反映して，臨界現象的なスケーリング則が流動する粉体において成立することも見出された．

$$S = |\Phi|^{y_\Phi} \quad \mathcal{S}_\pm\left(\frac{\gamma}{|\Phi|^{y_\Phi/y\ gamma}}\right),$$

ここで S はせん断応力であり，$\Phi = \phi - \phi_J$ は密度 ϕ と臨界密度 ϕ_J の差，γ はせん断率である．このスケーリング則に現れる臨界指数は，相関長の発散を記述する臨界指数に関連付けられる．このことはジャミング転移点（$\Phi = 0$, $\gamma = 0$）が臨界点であることをより強く証拠づけるものである．

液晶乱流の時空間欠性に見る吸収状態相転移のユニバーサリティ

竹内一将，黒田真史，Hugues Chate，佐野雅己

液晶電気対流の乱流間相転移に着目することにより，Directed Percolation (DP) 普遍クラスに属する相転移の初の実験的証拠を発見したので報告する．

DP は吸収状態，すなわち入ったら二度と出られない状態への相転移を議論する際の基本モデルであり，その普遍クラスは伝染病の拡がりから粉体流や触媒反応など多種多様の数値モデルで見られ，理論的にも非常によく確立されている．しかし実験では十分な精度で確認されたことはなく，非平衡相転移の重要な未解決問題として認識されてきた．

我々は，ネマチック液晶の電気対流で見られる 2 種類の乱流状態 (DSM1-DSM2) 間の時空間欠性への相転移に着目し，その静的・動的臨界現象を特徴づける 3 つの実験を行った．その結果，12 個の臨界指数と 5 個の普遍スケーリング関数が全て DP クラスのものと一致することが判明した．

我々はさらに，ツイスト配向により系に Ising 対称性を付加し，理論の予言どおり，ログ減衰 coarsening で特徴づけられる voter クラス臨界現象を確認した．以上により，DP クラス，voter クラスの吸収状態相転移の初の実験的証拠が見つかったと考えている．

シェルモデル乱流における時間間欠性のメカニズムについて

小林 幹，山田道夫

乱流において時間的間欠性は普遍的で重要な性質であるにも関わらず，未だその全貌は明らかになっていない．特に，時間的間欠性のダイナミクスに着目した研究はほとんど行われていない．そこで，本研究では，一様等方乱流のモデルとして有名なＧＯＹシェルモデル乱流が示す時間的間欠性をダイナミクスの観点から特徴づけることが目的である．本研究により，間欠性と乱流アトラクターに埋め込まれた不安定周期軌道の関係を明らかにした．また，間欠性を乱流アトラクターの多様体が作り出す接構造の観点から特徴づけることも行った．

Volume Penalization 法による渦対生成の数値解析研究

服部裕司，中野 わかな，畠山 望

渦輪や渦対の生成過程は，秩序的な渦構造の形成のダイナミクスを理解する上で基本的な問題として重要である．管からピストンの運動により流体を押し出して生成する方法が実験的にも数値的にも研究されているが，数値解析でピストンの運動を実際の現象に忠実に考慮することは易しくはない．われわれは volume penalization 法によりこれを実現し，渦対の生成過程を忠実に数値解析することを試みた．数値解法には，空間差分にスペクトル法（フーリエ・コロケーション）とコンパクト差分の組み合わせを用い，penalization 項を時間的に変化させることでピストンの運動を表現した．その結果，渦対の生成過程，特に渦層の巻きあがりと散逸による渦核の形成を高い精度で捉えることに成功した．

東アジア縁辺海のデータ同化モデリング

広瀬直毅

日本海を中心とした縁辺海のデータ同化・予報モデルを構築した．近似カルマンフィルターにより，かなり現実的な海流や渦変動が再現された．その結果は，エチゼンクラゲの漂流予測などに有用である．グリーン関数を利用した経験的パラメーターの最適化にも成功した．予測精度の向上と共に，海洋物理現象のより深い理解や解明に結びつくと期待される．大気から海洋へ輸送される運動量フラックスの逆推定はその一例である．

低レイノルズ数における平面クエット流の厳密解とその渦構造

板野智昭，S. C. Generalis，藤 定義，関 眞佐子，秋永 剛

平行平板間乱流に見られる秩序構造は，乱流の制御などを視野に入れた工学的観点から，また，非線形性による維持過程は物理的観点からも興味深く研究者たちの関心を集めてきた．それらの最も簡単なプロトタイプとして，互いにある一定の相対速度で動く二枚の平行平板間の流れ，いわゆる平面クエット流が挙げられる．本発表では，渦構造と渦の対称性・階層性をキーワードに，発表者がこれまで行ってきた平行平板間流れの研究成果を交えつつ，平面クエット流において近年見つかったヘアピン型の渦を有する定常解 (Itano & Generalis : PRL v102 p114501(2009)) について報告する．

海洋表層における乱流惑星境界層流の観測

吉川 裕，増田 章

乱流混合と地球自転の影響を受ける風の摩擦による海洋表層の流れを吹送流と呼ぶ．吹送流の流速が従来考えられていた値より小さいこと，またその流向・流速が大きく季節変化していることなど，最新の観測で明かになった知見を紹介した．

地球磁気圏速度シア境界層における無衝突プラズマの乱流輸送

松本洋介，関 華奈子

地球磁気圏境界においては，しばしば人工衛星による渦が観測され，それに伴い無衝突プラズマの混合の様子が報告されている．磁気圏境界は太陽風と常に接した，速度シア境界となっていることから，このような観測はケルビン・ヘルムホルツ（KH）不安定が成長した結果であると考えられている．磁気圏境界での無衝突プラズマの混合を理解するため，KH 不安定のプラズマ粒子シミュレーションを行った．その結果，KH 不安定の順・逆カスケードにより，効率的なプラズマ混合・輸送が可能であることが明らかになった．以上のような磁気圏境界層における渦乱流とプラズマ輸送の問題は，次世代の人工衛星ミッションのサイエンスターゲットとなっており，人工衛星の多点同時観測により，様々なスケールでの渦構造が明らかになることが期待される．

カオス・乱流の 2 重構造と動的スケーリング則
森 肇，岡村 誠

カオス・乱流の状態変数の時間相関関数やパワースペクトルは，決定論的な短い軌道群と，確率論的でランダムな長い軌道群からなり，特色のある 2 重構造をもつ．その 2 重構造を解明し，時間相関は動的スケーリング則に従うことを示した．

Duffing 振動子系の時間相関関数の初期 regime と終期 regime
富永広貴，森肇，石崎龍二，森 信之，黒木昌一

力学系のカオス軌道は決定論的な時間発展をするため短い timescale では予測可能であるが，カオスの軌道不安定性のため長い timescale では stochastic で random になる．このようなカオスの二重性のため時間相関関数において異なった減衰型を持った初期レジームと終期レジームと呼ばれる 2 つの領域として現れることが予測される．散逸系カオスを示す最も簡単な力学系である Duffing 振動子において，典型的なカオス運動を示すパラメータで，これら二つの領域が存在することを明らかにし，それぞれの減衰形に対応する関数形を数値的に見いだした．初期レジームの減衰形は双曲型減衰であり，終期レジームのそれは拡張指数関数型である．また，初期レジームと終期レジームの境界は，カオス揺動力の特性時間から見積もられることを示唆した．

周期外力下の Swift-Hohenberg 系における緩和現象
森野佳生，大内克哉，宮崎修次

レイリーベナール対流の空間二次元モデルである Swift-Hohenberg 方程式

$$\frac{\partial s(x,y,t)}{\partial t} = \left[\epsilon - (\nabla^2+1)\right] s(x,y,t) - [s(x,y,t)]^3$$

はラメラー構造の時空間パターンを形成する．この際にある特徴的な波数が選ばれ，状態変数のフーリエ成分の強度は時間の経過と共にその波数で急峻なピークを持つようになる．波数平面を円筒座標表示し，角度方向について平均して得られる波数の絶対値の関数としてのフーリエ強度については，以下のスケーリング則が成立する．$S(k,t) = t^{\alpha} f\left((k-k_0)t^{\alpha}\right)$．今回我々はこの Swift-Hohenberg 方程式に周期外力 ($h\sin(\Omega t)$) を加えたモデルを対象とした．このモデルはその外力の振幅 (h) と振動数 (Ω) に依存してある時空間パターン (ラメラー構造，ドット構造，空間一様状態) を形成する．この際も無外場の際と同様に状態変数のフーリエ成分の強度を角度方向に平均した量は時間に対してスケーリング則が成立する．我々は無外場の際に知られているスケーリング指数 $\alpha = 0.2$ と周期外場が加えられた際のスケーリング指数の変化について調べた．その結果，ラメラー構造が観測された場合にはスケーリング指数は無外場の際と変わらずドット構造が観測された場合にはスケーリング指数は無外場の際より小さくなることを見出した．

誘電体バリヤ放電における電流フィラメントのパターン形成
庄司 多津男，西川徳彦，岩井一彦，秦 浩起

0.1–1 気圧下におけるガス中の放電としてオゾン発生等に使われる誘電バリア放電 (DBD) がある．この放電は，電極の一部に放電が集中するストリーマ放電によって形成されているものであり，誘電体表面での電子・イオンの拡散，再結合，電荷間の相互作用等の非線形効果により，放電電流は空間的に不均一で，圧力等の領域によっては多数のフィラメント状の構造が出現する．これらフィラメントは放電電圧や圧力などの領域によっては，様々な静的な秩序パターンや動的なパターンを示す．フィラメントの一部の秩序構造は放電の反応拡散系モデルで解釈も出来るが，説明できない構造もありまだ十分な解明にはいたっていない．さらに我々は電極の垂直方向に強磁場 ($< 5T$) を印加した場合に出現したフィラメント構造の動的振る舞いに関して報告する．

DC 電極間の微粒子による振動子結晶
秦 浩起，庄司 多津男，石川多一

下部に＋電極を上部に－電極を配置した DC 電場中に，微粒子を封入すると，微粒子は下部電極で＋に帯電して上昇し，上部電極で－に帯電して下降しというように往復運動する振動子となる．このような微粒子が多数あると，同（逆）方向に動く粒子間に斥（引）力のクーロン相互作用が働く．その集団的振る舞いを理論と実験の両面から研究している．(なお，異符号に帯電した粒子が衝突すると電荷を失い落下し，下部電極に達すると再び帯電し振動を再開する．)

最近，ある条件下で振動子群が周期パターン “振動子結晶” を作ることを理論的に見出し，数値実験より確認した．講演では，その機構やコントロールパラメタである「系の水平方向の面積（つまり振動子密度）」を変えた際に起きる “結晶” と “乱れた状態” 間の転移などについて報告する．

4 開催日程，場所

開催日程　2009 年 11 月 12 日（木）- 11 月 14 日（土）
開催場所　九州大学応用力学研究所西棟 6 階多目的研究交流室（W601 号室）
講演数　23 件
参加者数　36 人

共同利用研究集会(21ME-S5)報告書

ナノ複合材料等次世代複合材料の創製及び評価

研究代表者
九州大学工学研究院
宇田 暢秀

目 的

ナノ複合材料等次世代複合材料の創製及び評価についての研究を一層発展させることが本研究集会の目的である。

ナノ複合材料等次世代複合材料は、これまでの材料では克服できなかった領域をナノ・テクノロジー等新規技術で対処していこうとした材料であり、ナノ・スケールの材料、自然材料、生体に適応した材料をベースにした次世代複合材料である。このため、ナノ複合材料等次世代複合材料の作製技術及び各種特性評価は重要な研究項目であり、様々な領域の研究者間のアイデア交換が重要である。そして，充分な時間の意見交換、多方面からの議論が必要である。

各学会の材料系の集会でも、ナノ複合材料等次世代複合材料に関する講演が多数あるが、それらは発表時間の制限や広範囲な発表のため上記目的にはそぐはない。従って、ナノ複合材料を代表とする次世代複合材料の作製技術及び各種特性評価に関する十分な議論を行える表記研究集会を開催したい。

研究集会の日時・場所

日時： 平成２２年1月７日(木)～８日(金)
場所： 九州大学応用力学研究所西棟　W601号室

プログラム

【1月7日(木)】

招待講演

招待講演　司会　宇田暢秀（九州大学）

14:00-14:40　**炭素繊維複合材料の開発と航空機構造への展開**
吉岡 健一　東レ(株)

14:40-15:20　**層間剥離進展と破壊力学理論の応用に関して**
末益 博志（上智大学）

一般講演

司会　汪　文学(九大応力研)

15:30-15:35　Opening address
宇田暢秀（九州大学）

15:35-16:00　三次元織物CMCの高速衝撃損傷挙動
○黄木景二，矢代茂樹(愛媛大学)

16:00-16:25　Pullout simulation for ideal sliding in multi-walled carbon nanotubes
○李　淵(千葉大[院])、胡　寧(千葉大)、山本　剛(東北大)、橋田俊之(東北大)

16:25-16:50　VGCFによるCFRP複合材積層板の界面機械特性の向上
胡　寧(千葉大)、○李　淵(千葉大[院])、堀　直樹(東北大[院])、
荒井政大(信州大学)

16:50-17:15　エレクトロスピニング法によるナノファイバーを用いた複合材料
○山下義裕(滋賀県立大学)

17:15-17:40　粒子法を用いたCFRP積層板の飛翔体衝突損傷挙動の予測
○矢代茂樹(愛媛大), 黄木景二(愛媛大)

17:40-18:05　航空機複合材料構造の修理法
○中村俊一郎(九大院、第一工業大学), 高雄　善裕,
汪　文学, 松原　監壮(九大応力研)

【1月8日(金)】

司会　矢代茂樹(愛媛大)

09:00-09:25　生分解性樹脂と平織りケナフ織物を用いた熱可塑性複合シートの開発
○上野雄太(日大院), 邉吾一(日本大学), 坂田憲泰(日本大学)

09:25-09:50　多軸負荷下の繊維圧縮損傷条件にもとづくCFRPボルト接合部損傷解析
○灘部岳晃(東大院), 西川雅章(東北大), 中村達也(東大院),
武田展雄(東大新領域)

09:50-10:15　SMAワイヤー強化VaRTM成形Carbon/Epoxy複合材料のモードI層間破壊じん性の評価
○三浦一浩(九大院) 宇田暢秀, 小野幸生、平川裕一, 永安忠(九大工)

10:15-10:40　Evaluation of electrical properties of PE/CNTs nano-composties
○王　経国(日本大学・院), 邉　吾一(日本大学), 坂田　憲泰(日本大学)

司会 倪　慶清(信州大)

10:50-11:15　固液界面におけるからみあい高分子の分子鎖ダイナミクスシミュレーション
○奥田覚, 井上康博, 北條正樹(京大), 増渕雄一, 畝山多加志(京大化研)

11:15-11:40　Numerical simulation of resin transfer molding for CFRP manufacturing
○本多　崇(東北大院)、岡部　朋永(東北大)

11:40-12:05　CFRP積層板におけるレーザ励起超音波の伝播挙動の解明および損傷検知への適用
○伊藤悠策 (東大)　高橋市弥 (三菱電機)　武田展雄 (東大新領域)

12:05-12:30　CNTの表面処理および天然ゴムとの複合材料における粘弾性挙動
○江　紅霞(信州大院), 夏木俊明、倪　慶清(信州大)

12:30-12:55　Effect of Nanoclay Agglomerates Distribution on Mechanical Properties of Nanocomposites
○Azmi Nordin, Baosheng REN, Junji NODA, Koichi GODA (Yamaguchi Univ.)

招待講演（自然エネルギー発電特別セッション）

招待講演　司会　高雄　善裕(九大応力研)

14:00-14:30　Wind energy R&D activity in Korea
○K..S. HAN (POSTECH)
(Wind Energy Program Director, KETEP, Ministry of Knowledge Economy)

14:30-15:00 Graduate program of wind energy at POSTECH
○Hyunchul Park (POSTECH)

15:00-15:30 Development of composite wind turbine blades
○S.H. PARK, T.S. PARK and K.S. HAN (POSTECH)

15:30-16:00 Development of a shrouded wind turbine generating high output power with wind-lens technology
○Y. Ohya, T. Karasudani and M. Hasegawa (Kyushu Univ.)

16:30-17:00 Research and development of tidal current power generation as an ocean renewable energy
○Y. Kyozuka (Kyushu Univ.)

17:00-17:30 High resolution micro-siting of 100KW wind-lens turbine at the new campus of Kyushu University by using the RIAM-COMPACT® CFD model
○T. Uchida and Y. Ohya (Kyushu Univ.)

17:30-17:35 Closing address
汪 文学(九大・応力研)

講演概要

炭素繊維複合材料の開発と航空機構造への展開
吉岡健一（東レ株式会社）

炭素繊維複合材料（ＣＦＲＰ）の開発は，炭素繊維の弾性率や強度といった基本特性の向上から，マトリックス樹脂の靭性の向上へと進み，航空機主構造への展開を可能としてきた．さらに，近年のCO_2排出量削減とそのための省エネルギー化の要請に対応しうる，抜本的なトータルプロセスの変更の試みも行われている．こうした動きの概要とトピックスを紹介する．

層間剥離進展と破壊力学理論の応用に関し
末益博志 （上智大学 理工学部）

複合材料構造は、破壊メカニズムが複雑、特性のばらつきが大きいなどの理由で、設計基準が従来の金属構造に比べて厳しく設定されており、複合材料自身の持つ軽量高強度・高剛性の性能を十分生かすことができない。信頼性や安全性を犠牲にしないで複合材料構造の性能を最大限に生かすためには、損傷の進展メカニズムを明らかにし、また層間剥離などの損傷の累積を考慮した最終破壊強度を推定できる手法の開発が必須である。

複合材料積層構造は、衝撃・疲労などにより比較的容易に損傷が発生するだけでなく、多くの破壊現象が層間剥離，トランスバースクラックといった損傷の累積による強度の劣化後に生じる。複合材料構造物の強度の推定は、「最終破壊が、どのような損傷状態でどのような破壊形態で生じるか」まで、考えないと十分でないと思われる。これらの損傷発生・進展問題の中で、層間剥離は一般に破壊力学的に議論されているが、非均質異方性体界面中のクラック進展を一般応力下で破壊力学的に取り扱うことは、非常に困難な課題を抱えている。どのようにこの問題を解釈し、実際に供するものにできるかが、我々の研究の課題と考える。ここでは、破壊力学的に議論するうえでの困難さに関して議論したい。

Characterization of high-speed impact damage behavior in a three-dimensionally woven SiC/SiC composite

Keiji Ogi and Shigeki Yashiro (Ehime University)

This paper discusses high-speed impact damage in a three-dimensionally woven SiC/SiC composite (3D-CMC). The impact damage was introduced by a steel ball projectile in 3D-CMC plates with and without thermal exposure. The surface and internal damages were observed by optical microscopy and X-ray CT. A crater was observed on the collision surface. The X-ray CT measurement revealed that multiple pyramid-shaped cone cracks were generated beneath the crater when the impact speed was relatively low. At an impact speed exceeding the critical speed, a spall fragment was ejected from the back surface, while no internal damage was observed in the fragment. The spall fracture mode differed between the virgin and the thermally-exposed specimens. This difference is the result of embrittlement of the fiber/matrix interface due to oxidation of the carbon coating layer in the thermally-exposed specimen. In addition, it is found that *z*-yarns improve impact resistance by constraining delamination.

Pullout Simulation for Ideal Sliding in Multi-walled Carbon Nanotubes

Yuan Li, Ning Hu (Chiba University), Go Yamamoto, Toshiyuki Hashida (Tohoku University)

The ideal sliding mechanism between nested walls of multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) was investigated by performing pullout simulations. The pullout force was found to be proportional to the diameter of the "critical wall", i.e., the adjacent outer wall at the sliding interface, but independent on nanotube length and chirality. One set of simple formulas was developed to predict the pullout force at an arbitrary sliding interface for any MWCNT, as validated by some previous experiments. Moreover, the obtained surface energy density is close to that of graphite.

Improvement of Interlaminar Mechanical Properties of CFRP Laminates Using VGCF

Ning HU, Naoki HORI, Yuan LI (Chiba University) and Masahiro ARAI (Shinshu University)

Due to the low interlaminar strength and fracture toughness of CFRP laminates laminated from prepreg sheets, under external transverse loads, delaminations may easily occur in the CFRP laminates, which results in a remarkable strength reduction and the consequent failure of the laminates. In this work, to improve the interlaminar mechanical properties of CFRP laminates, the interlaminar mechanical properties of CFRP laminates with VGCF as reinforcements filled at interfaces, were investigated experimentally and numerically. It was found that, with 20g/m^2 addition of VGCF at the interface, the fracture toughness and tensile strength of Mode-I increase by 100% and 75%, respectively.

エレクトロスピニング法によるナノファイバーを用いた複合材料

山下義裕（滋賀県大・工）、瀧本直英（滋賀県大・工）

今注目されている材料のひとつに有機無機ハイブリッド材料があります。有機材料は柔軟性、加工性、多様性をもっています。無機材料は耐熱性、高弾性率、耐薬品性をもっています。これらをハイブリッド化することで、両者の特性をさらに高める事が期待されている。用途は電子材料、光通信材料、接着剤、コーティング剤です。一方、無機ケイ酸化合物は粉末状のため、取り扱いが難しく、用途も限られ、商品として展開しにくいので、繊維にすれば、容易に曲げたり、切ったりできます。本研究の目的はエレクトロスピニング法を用いて、無機ガラスファイバーを作製します。無機ガラスファイバーは耐熱性、高純度、低熱膨張性、耐衝撃性をもっています。そこで、ゴムとこれらを複合化し、無機ガラスファイバーがゴムのフィラーとして使えるかを検討しました。

粒子法を用いたCFRP積層板の飛翔体衝突損傷挙動の予測

矢代茂樹，黄木景二（愛媛大）

炭素繊維強化プラスチック（CFRP）は，航空機用ターボファンエンジンの軽量化や耐疲労，耐腐食特性を向上すべく，ファンブレードやファンケースへ適用が進められている。ファンブレードの高速衝撃損傷は，多くの場合，鳥が衝突するバードストライクによって生じる。鳥の衝突のほか，異物混入によるブレードの損傷，破損の防止が技術課題である。また，ファンケースにおいては，ファンブレード飛散時に貫通を防止する性能を満足しなければならない。これら異物衝突による損傷（Forerign Objective Damage, FOD）に対する信頼性評価は実用において欠かせない。

これまでにもFODに関する研究は行われてきたが，スペースデブリの衝突に代表される超高速域（飛翔体速度＝数km/s）における貫通孔やデブリクラウドの形状，貫通限界曲線などに関する研究が多い。一方で，航空機エンジンで問題となる音速域（数百m/s）におけるFODメカニズムは解明できていないのが現状である。

そこで，本研究ではCFRPクロスプライ積層板に対する飛翔体衝突試験を行い，損傷形態を詳細に観察した。また，SPH（Smoothed Particle Hydrodynamics）法[1]を用いた損傷進展解析を実施した。損傷観察の結果と解析結果の比較により，飛翔体衝突損傷の進展メカニズムを考察した。

航空機複合材料構造の修理法

中村俊一郎（九大院、第一工業大学）高雄　善裕、汪　文学、松原　監壮（九大応力研）

近年、複合材料、特に強化炭素繊維エポキシ樹脂複合材料(CFRP)は民間旅客機の主要構造にも大幅に使われるようになってきた。[1)] 使用範囲も比較的厚い主翼外板の構造のみならず、比較的薄い胴体外板の構造にも使われるようになってきた。一方、飛行機はエアラインで運航している間にさまざまな損傷を受ける。損傷の原因は多岐にわたるが、特に複合材料構造は修理に時間とコストがかかることから、損傷事故の低減対策及び、如何に損傷部を修理するかが大きな課題となっている。複合材料の修理に関しては、如何に損傷の範囲を特定するのか、如何に初期の構造が有する強度レベルに回復させるのかが課題である。エアラインにとっては飛行機の就航率を如何に上げるかが重要で、その為には地上にあって修理等に要する時間の短縮が課題である。あるエアラインでは修理のために常時一機はドック入りしているとの話もある。空港ランプなどで損傷を受ける可能性のある胴体構造に複合材料を使うことによりその修理のためドック入りの時間が長くなることが考えられ、その対応として、いったん事故が発生した場合は、次の重整備で恒久修理をするとして、それまでは飛行機が運用可能なレベルの簡便で短期間で行える一時修理法の開発が必要となる。

生分解性樹脂と平織りケナフ織物を用いた引抜き成形法による熱可塑性複合シートの開発

上野雄太（日大・院），邉吾一（日本大学），坂田憲泰（日本大学）

GFRPに代表される繊維強化プラスチックは，比強度，比剛性，衝撃吸収性などその優れた性質を利用し，軽量化を始めその利用用途・分野は多岐に渡る．しかし，ガラス繊維や熱硬化性樹脂を基材とした従来の複合材料は廃棄処理やリサイクルが困難である．そこで環境に配慮した環境循環型複合材料，グリーンコンポジットの研究，開発が盛んに行われている．

当研究室ではケナフ繊維を強化材，生分解性樹脂を母材とした引抜き成形法によるグリーンコンポジットの開発[1, 2)] を行ってきた．引抜き成形法の特徴は一定断面形状の材料を連続的に成形することができる点であり，我々の過去の研究において同一形状のグリーンコンポジットを連続的に成

形することが可能であることを報告している.

この引抜き材は熱可塑性樹脂を母材としており，再溶融することによって自由に形状を変形させることができる.すなわち,この引抜き材をCFRPプリプレグ材のように利用することが可能である.ここでは，この引抜き材を中間材料として利用し，加熱圧縮成形法により異なる繊維体積含有率（Vf）の一方向の板材を作製し，曲げ特性を評価した．更に，強化材としてケナフ繊維束だけでなく，ケナフ織物を用いた新たな引抜き成形機構を提案し，熱可塑性複合シートの作製を試みたので報告する.

多軸負荷下の繊維圧縮損傷条件にもとづく CFRPボルト接合部損傷解析

灘部岳晃(東大院)、 西川雅章(東北大) 中村達也(東大院)、 武田展雄(東大)

近年，複合材料の利用拡大にともない，複合材料構造のボルト接合も多く用いられ，ボルト接合部の損傷挙動・強度予測に関する研究が必要とされている．特に大型複合材料構造を実構造に適用する際，その開発段階において各接合部の強度を予測することで実大構造試験での構造全体の損傷挙動を予測すること，また運用段階においてあらかじめ各接合部の損傷挙動を予測し，メンテナンスをさらに効果的に行うこと，さらに材料開発の段階において，接合部強化のための材料開発に関する指針が得られるような知見を得ることが重要と考えられる．このため，ボルト接合部に関し継続的な研究が必要となる.

そこで筆者ら1）も炭素繊維強化複合材料(CFRP) ボルト接合部の損傷挙動に関する研究を実験と数値解析両面から行い，基礎的な損傷進展を把握し損傷挙動予測モデルの構築を行ってきた．これまでの研究の結果，強度は繊維圧縮損傷と深く関係していること，繊維圧縮損傷の損傷条件を適切に選ぶことで強度特性を数値解析により再現できることが明らかとなった．本報告では，この研究結果にもとづき，繊維圧縮損傷の損傷メカニズムにもとづいたボルト接合部の損傷挙動予測モデルを構築すること，そしてこのために必要な，接合部内部の複雑な応力状態のもとでの繊維圧縮損傷発生条件の定式化を行うことを目的とする.

繊維強化複合材料の繊維圧縮損傷に関しこれまで多くの研究が行われてきた．これらの研究に関し，1994年にBudiansky, Fleck 2）により，1996年にSchultheisz, Waas 3）によりレビューが行われ，特にSchultheiszらのレビューは詳細なものとなっている．これまでの研究の結果，繊維圧縮損傷を繊維座屈ととらえ，その座屈強度に繊維不整配向と母材の塑性が大きく影響することが報告され，これをモデル化し繊維圧縮強度を定式化したものとして，Sun, Jun 4）のモデルが提案されている．Sun, Junモデルは一方向材に対するものであり，このモデルを損傷発生条件として多軸負荷下に適用するためには，拡張が必要となる．Sun, Junモデルは繊維圧縮損傷発生のメカニズムが反映され，繊維圧縮損傷が支配的な損傷現象において重要な知見を提供することが期待されるが，その一方，このモデルの多軸負荷下への拡張は，筆者の知る限りこれまで報告されていない．繊維圧縮損傷が支配的な様々な構造要素の損傷挙動予測，強度予測を行うためにも，このモデルを多軸負荷下に拡張することが必要不可欠であると考えられる．以下ではこのモデルを拡張し，多軸負荷下の繊維圧縮損傷条件の定式化を行う.

SMAワイヤー強化VaRTM成形Carbon/Epoxy複合材料のモードI層間破壊じん性の評価

三浦一浩（九大院），宇田暢秀，小野幸生，平川裕一，永安 忠（九大工）

炭素繊維複合材料 (CFRP) は優れた力学特性を有し，その適用率が増加している．一方CFRPは繊維に対して横方向の特性が低く層間剥離が生じやすい，成形コストが高いなどの欠点が存在する．層間強度特性は圧縮強度や衝撃を受けた際に生じる層間剥離の程度に大きな影響を与える．そのため縫合糸を用いるスティッチング[1]や複合材料製のピンを挿入し層間を強化する研究[2]が行われている．またCFRPの成形コストを軽減する方法として

VaRTM（真空含浸工法）が注目されている．VaRTM成形はプリフォームをバギングフィルムで覆い，バッグ内を真空圧にすることで液状の樹脂を注入し，加熱硬化させる成形方法である．高価なプリプレグや大型設備が不要であり低コスト化が図れる．そのため航空機構造への適用に関する研究[3]が行われている．

本研究では形状記憶合金（SMA）ワイヤーを板厚方向（ファブリックに対して垂直）に挿入し層間強化を試みる．SMAはスマートアクチュエータとして注目されており，これを強化材とする複合材料の研究[4]も行われているが，いまだSMAによるCFRPの層間強度に与える影響を評価する研究は行われていない．そのためSMAワイヤーがCFRPの層間破壊じん性に与える効果を明らかにするため試験片をVaRTM成形し，DCB試験より評価する．

Evaluation of Electrical Properties of PE/CNTs Nano-composites

King Kwok Wong, Goichi Ben, Kazuhiro Sakata（Nihon University）

In this paper, two kinds of carbon nanotubes (CNTs) were used as a conductive filler for fabricating conductive polymer composites. CNTs were dispersed into high density polythylene (HDPE) by melt compounding method with a twin screw extruder. The volume resistivity of PE/CNTs nano-composites were measured with the four-point probe array method. Specimens for the measurement of electrical properties were fabricated with the hot press method. PE/VGCF nano-composites show a low volume resistivity when the VGCF content is more than 6 wt%, which indicates a high dispersion of VGCF within PE by the melt compounding method. To confrim the dispersion degree of VGCF within PE matrix, scanning electron microscope (SEM) was also used.

固液界面におけるからみあい高分子の分子鎖ダイナミクスシミュレーション

奥田 覚（京大院），井上 康博（京大工），北條 正樹，増渕 雄一（京大化研），畝山 多加志

高濃度および溶融状態の高分子ダイナミクスを把握することは，高分子材料の機能設計・構造制御にとって重要な課題である．特に固液界面におけるダイナミクスの知見は，ナノスケールの微細加工技術の基礎となる．例えば，界面上のすべりや配向性の解析は，印刷，塗布，MEMSの技術に有用である．さらに，高分子および界面間の親和性に起因して形成される相構造の理解は，自己組織化を利用したボトムアップ型の成形加工技術にとって必須である．

高分子は，長い紐構造をしており，溶融状態ではそれが高密度で分布しているため，互いの運動を束縛する(Fig. 1)．この分子鎖同士の束縛効果を“からみあい”と呼ぶ．からみあいによる分子鎖運動の束縛は，熱揺らぎによって徐々に緩和される．この緩和過程は，分子鎖の形状や長さに強く依存しており，高分子ダイナミクスを理解するためには，からみあいスケールの解析が必要である．

からみあいの効果を受けた分子鎖運動の緩和は数ミリ秒から数百秒に及ぶため，通常の分子動力学シミュレーションで扱える時間域にない．そこで粗視化とよばれる理論的な扱いにより，系の本質的な挙動を損なわないように，計算に必要な自由度を大幅に減少させることで長時間計算を可能とする手法がいくつか提案されている．

本研究では，高分子のダイナミクスを分子レベルで記述する粗視化分子モデルとしてプリミティブチェーンネットワーク(PCN)モデル[1]を用い，シミュレーションによる検討を行う．PCNモデルは，分子鎖間のからみあいによる束縛効果を“からみあい点”で表現し，分子鎖の形態に基づいてダイナミクスを解析できるのが特徴である．このPCNモデルに対して，壁面境界モデルを導入し[2]，平行壁面間の分子鎖ダイナミクスを検討する．

CFRP製造のためのRTMに関する数値シミュレーション

本多崇（東北大・院），岡部朋永（東北大）

炭素繊維強化プラスチック（CFRP）は，高比強度・高比剛性を有しており，軽量化を目的とした航空機構造への適用が盛んに試みられている．従来のCFRPの成形法は，プリプレグ（繊維束に未硬化の樹脂を含浸させたシート）を構造に合わせて一枚ずつ重ね，オートクレーブ内で加熱・加圧する手法であった．しかし，プリプレグへの手間や材料コスト，オートクレーブの設備費用等が問題となっていた．そこで，もともと風車ブレード等で用いられていたRTM（Resin Transfer Molding）という成形法が，航空機の構造材料へ採用され始めた．RTMとは，プリフォーム（材料設計に応じた積層構造を有する繊維束）を成形型に配置し，樹脂を含浸させ，その後，加熱硬化させる手法である．プリプレグ，オートクレーブを必要としないため，従来の成形法に比べ低コストで高効率な成形法として期待される．しかし，RTMでは，繊維束の積層構造やプリフォーム形状の複雑化に伴い，成形時に樹脂の未含浸部（ボイド）が生じることが問題となっている(1)．そのため，成形前に繊維の表面酸化処理（プラズマ酸化処理(2)，電気化学的処理(3)，薬剤処理(4)などにより繊維表面に化学官能基を付加させる手法）を行い，繊維/樹脂間の濡れ性の制御が行われてきた(2),(3)．（以上に述べたRTMに関する現象をスケール別に示した模式図が図1である．）この制御法の問題点は，経験則に基づく部分が多く，ボイド発生・抑制のメカニズムが明らかとなっていないことにある．そこで，本研究では，CFRPを対象として，RTMにおける樹脂流動現象をモデル化した．まず，粒子法に二体間ポテンシャルを導入することで，濡れ現象を表現できる計算手法を提案した．次に，この計算手法を利用し，樹脂が繊維束内を含浸していく数値シミュレーションを行った．繊維/樹脂間の濡れ性が繊維束内における樹脂流動へ及ぼす影響を検討し，RTMにおける樹脂流動特性を評価した．

CFRP積層板におけるレーザ励起超音波の伝播挙動の解明および損傷検知への適用

伊藤悠策（東大院）、高橋市弥（三菱電機）、武田真一、岩堀豊（JAXA）、矢代茂樹（愛媛大理工）、高坪純治（産総研）、岡部洋二（東大生産研）、武田展雄（東大新領域）

炭素繊維をプラスチックに入れて強度を向上させた材料である炭素繊維強化プラスチック(Carbon Fiber Reinforced Plastics, CFRP)は高強度、高比剛性、腐食しにくい等の優れた性質を有しており、スポーツ用品からロケットまで様々な分野で用いられている。特に軽量化が重要視される航空機においてCFRPは二次構造だけでなく次世代民間旅客機の主翼や胴体といった一次構造にも使用されている。航空機におけるCFRP適用率の増加によりCFRPの修理件数も増加し、機体各所には、被修理部分が分布すると考えられる。損傷部は補修によって一旦強度を回復するが、補修部に再び衝撃荷重が加わることで強度上重要な損傷の発生が懸念されている。したがって、CFRPの大量利用を目前にひかえ、航空機の安全性を確保する為にCFRP補修部の損傷評価手法の確立が重要な課題となっている。

現在、航空機の整備においては目視検査や超音波探傷法、渦電流探傷法、X線検査等[1,2]が行われているが、本研究では損傷検知手法として産業総合研究所の高坪らによって開発された映像化超音波探傷法を用いる。本手法はレーザによって供試体に波を励起させ供試体を伝播する超音波を可視化し、可視化画像において波の伝播挙動を観察することで損傷の検知を行う手法である[3]。本手法は、曲面や段差を有する複雑形状物体の損傷検知が可能である、また、一度に広い領域を伝播する超音波の映像を遠隔計測できる等、実際の航空機整備への適用において多くの利点を持っている。しかし、本手法をCFRPに適用した研究は未だほとんど行われていない。本手法をCFRPに適用する際には、レーザによって励起されCFRPを伝播する波の伝播挙動を理解することが重要となる。そこで、本研究ではレーザによって励起されCFRPを伝播する波の伝播挙動の解明および映像化超音波探傷法を用いたCFRP補修材内部の損傷検知手法の確立を目的とする。

Modification of Carbon Nanotubes and its Application to Natural Rubber Composite

Hong-Xia Jiang, Toshiaki Natsuki and Qing-Qing Ni (Shinshu University)

Multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) were modified by Bis(3-triethoxysilylpropyl) tetrasulfide

(TESPT) in two-step method and natural rubber (NR) composites enhanced by modified or unmodified multi-walled carbon nanotubes (m-MWCNTs) were synthesized in solution casting method. A thin layer was fabricated around MWCNTs according to transmission electron microscopy (TEM) observation. The ratio of D band to G band changed after silane modification by Raman analysis. The silicon element and Si-O bond were confirmed combined in m-CNTs by X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) and Fourier transform infrared (FT-IR) analysis. For m-MWCNT/NR composite, D band shifted from 1340 cm^{-1} to 1354 cm^{-1}, proving an efficient interfacial bonding occurred between m- MWCNTs and NR, which agreed with scanning electron microscopy (SEM) observation on the fracture surface. The improved interface resulted in a improved storage modulus at low temperature.

Effect of Nanoclay Agglomerates Distribution on Mechanical Properties of Nanocomposites

Azmi Nordin, Baosheng REN, Junji NODA, Koichi GODA (Yamaguchi University)

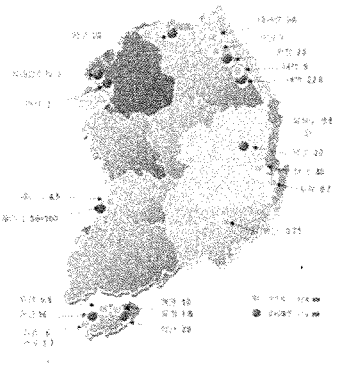
In this study, nanoclay/epoxy resin plate specimens were prepared under different amount, 1 part(s) by weight of the added material per hundred parts by weight of resin (phr), 2phr, 3phr and 5phr, of nanoclay loading. Tensile test was carried out for each nanoclay/epoxy resin plate specimen by using an Instron-type testing machine. From experimental results, we try to investigate the relation between mechanical properties and microstructure of resin plate specimens using an electron probe micro analyzer (EPMA) according to different nanoclay loading amount in the epoxy. From the obtained results, we defined an agglomerates cluster distribution throughout each specimen and related it with the experimental results.

Wind Energy R&D Activity in KOREA

Kyung Seop HAN (Wind Energy R&D Program Director Ministry of Knowledge Economy and POSTECH)

Wind Energy in KOREA

- ✓ **The world's 7th largest oil consumer and the 4th largest energy importer.**
- ✓ **The wind industry is still at an early stage but has a bright potential, both domestically and globally.**
- ✓ **1,835 MW will be installed by 2012.**

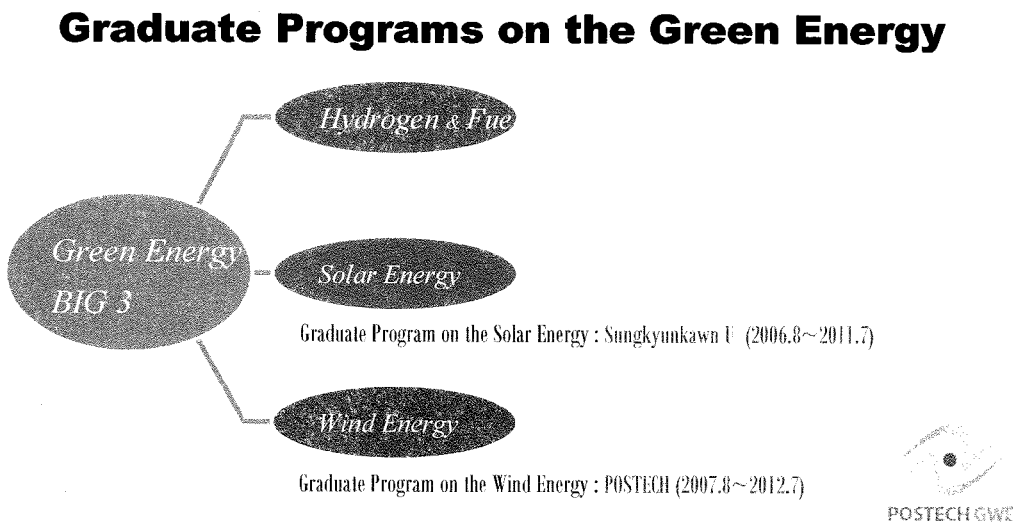


	Cumulative installed capacity (MW) by end of in 2007	Installed capacity (MW) in 2007	Forecast 2008-2012					Installed capacity 2008-between 2012	Cumulative installed capacity (MW) by end of 2012
	2007	2007	2008	2009	2010	2011	2012	Sum	Accu.
Australia	972	176	250	300	350	400	500	1,800	2,772
Japan	1,681	229	300	350	400	500	500	2,050	3,731
New Zealand	321	151	150	150	150	250	300	1,000	1,321
South Korea	235	41	150	250	300	400	500	1,600	1,835
Total OECD-Pacific	3,209	597	850	1,050	1,200	1,550	1,800	6,450	9,659

(BTM Consult ApS – March 2008)

Graduate Program of Wind Energy at POSTECH

Hyunchul Park (POSTECH)



➢ Funded by the Ministry of Knowledge and Education

Development of composite wind turbine blades

Sunho Park, Taesung Park and Kyungseop Han (POSTECH)

GFRP based composite rotor blades were developed for wind turbines. The blade sectional geometry was designed to have a general shell-spar and shear web structure. For verifying the structural safety under all relevant extreme loads specified in the GL guidelines, the structural analysis of the rotor blades was performed using commercial FEM codes. The static load carrying capacity, blade tip deflections and natural frequencies were evaluated to satisfy the strength and stability requirements. The prototype of each rotor blade passed all full-scale proof tests for GL certification. Then, a real-time monitoring system with fiber Bragg grating(FBG) sensors was designed and applied to monitor wind turbine blades in operation. Differences according to the operating conditions (yawing, pitching and start-up / normal operation) were monitored accurately in real time with sensors. Additionally, using commercial FEM codes, a GFRP based composite rotor blade was modeled, and then natural frequencies obtained from the FE modal analysis were compared with the FFT results of measured strain data. This paper provides an overview of the development of wind turbine system including proof tests and monitoring results.

A SHROUDED WIND TURBINE GENERATING HIGH OUTPUT POWER WITH WIND-LENS TECHNOLOGY

Yuji Ohya, Takashi Karasudani (Kyushu University), and Xing Zhang (Tsinghua University)

We have developed a new wind turbine system that consists of a diffuser shroud with a broad-ring brim at the exit periphery and a wind turbine inside it. The shrouded wind turbine with a brimmed diffuser has demonstrated power augmentation for a given turbine diameter and wind speed by a factor of about 2-5 compared with a bare wind turbine. This is because a low-pressure region due to a strong vortex formation behind the broad brim draws more mass flow to the wind turbine inside the diffuser shroud.

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF TIDAL CURRENT POWER GENERATION AS AN OCEAN RENEWABLE ENERGY

Yusaku KYOZUKA (Kyushu University)

Some recent international and domestic projects on tidal current power generation including the SeaGen project by the Marine Current Turbine (MCT) of UK, the Uldolmok pilot power plant of Korea and the activities of the Ocean Energy Association of Japan founded in 2008 are briefly introduced. Our feasibility study on tidal current power generation making use of a pier of the Ikitsuki Bridge in Nagasaki Prefecture is introduced. Measurements of the tidal current by an ADCP (acoustic Doppler current profiler) and the power estimated from the current data are presented. Research and development of the adopted Darrieus-Savonius turbine, its performance in the model experiments and the records of the demonstration experiments in the sea are also presented. Finally, the tasks toward practical use of the tidal current power generation are discussed.

HIGH RESOLUTION MICRO-SITING OF 100KW WIND-LENS TURBINE AT THE NEW CAMPUS OF KYUSHU UNIVERSITY BY USING THE RIAM-COMPACT® CFD MODEL

Takanori UCHIDA, and Yuji OHYA (Kyushu University)

As a countermeasure against global warming, a substantial reduction in CO2 emissions has become an urgent issue. Accordingly, the effective use of wind power energy is attracting attention as a clean and environmentally friendly solution. Given this background, we have developed RIAM-COMPACT® (Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, COMputational Prediction of Airflow over Complex Terrain, a non-stationary, non-linear wind synopsis simulator that is capable of predicting the optimum sites for wind turbine construction to the pin-point level within a target area of a few km or less. In this study, a high resolution micro-siting of 100kW wind-lens turbines was performed under neutral stability in the new campus of Kyushu University.

おわりに

２日間の研究集会において、多くの大学から多数の研究者（出席者５０名を越え）が参加され、上述のすばらしい研究発表を行われた。研究交流会にも多くの研究者が出席され、盛んに交流を行われた。基本的に当初企画した集会が実現された。来年度からもナノ複合材料を中心とした研究集会を続いて行いたいと考えている。

研究組織

宇田　暢秀	九州大学工学研究院	研究代表者
小野　幸生	九州大学工学研究院	研究協力者
高雄　善裕	九州大学応用力学研究所	研究協力者
新川　和夫	九州大学応用力学研究所	研究協力者
黄木　景二	愛媛大学工学研究科	研究協力者
岡部　朋永	東北大学工学研究科	研究協力者
胡　　寧	東北大学工学研究科	研究協力者
倪　慶清	信州大学繊維学部	研究協力者
朱　世傑	福岡工業大学工学部	研究協力者
北條　正樹	京都大学工学研究科	研究協力者

末益　博志	上智大学理工学部	研究協力者
武田　展雄	東京大学工学研究科	研究協力者
汪　文学	九州大学応用力学研究所	所内世話人

参加者名簿

No.	名前	所属機関	職業	備考
1	宇田　暢秀	九州大学	教授	代表者
2	末益　博志	上智大学	教授	
3	吉岡　健一	東レ(株)	主任研究員	
4	黄木　景二	愛媛大学	教授	
5	矢代　茂樹	愛媛大学	助教	
6	本多　崇	東北大学(院)	准教授	
7	岡部　朋永	東北大学	准教授	
8	李　淵	千葉大学(院)	大学院生	
9	山下　義裕	滋賀県立大学	講師	
10	中村　俊一郎	第一工業大	教授	
11	邉　吾一	日本大学	教授	
12	上野　雄太	日本大学(院)	大学院生	
13	王 経国	日本大学(院)	大学院生	
14	灘部　岳晃	東京大学(院)	大学院生	
15	伊藤　悠策	東京大学(院)	大学院生	
16	北條　正樹	京都大学	教授	
17	奥田　覚	京都大学(院)	大学院生	
18	Azmi Nordin	山口大学(院)	大学院生	
19	合田　公一	山口大学	教授	
20	野田　淳二	山口大学	准教授	
21	倪　慶清	信州大学	教授	
22	江　紅霞	信州大学(院)	大学院生	
23	K.S. HAN	POSTEC	教授	
24	H.C. Park	POSTEC	教授	
25	S.H. Park	POSTEC	博士	
26	Y.C. Kim	POSTEC	教授	
27	C.W. Chung	POSTEC	教授	
28	高木　均	徳島大学	教授	
29	佐々木　元	広島大学	教授	
30	岡本　秀穂	九州大学	教授	
31	小野　幸生	九州大学	助教	
32	三浦　一浩	九州大学(院)	大学院生	
33	新川　和夫	九州大学	教授	
34	東藤　貢	九州大学	准教授	
35	大屋　裕二	九州大学	教授	
36	内田　孝紀	九州大学	助教	
37	経塚　雄策	九州大学	教授	
38	高雄　善裕	九州大学	教授	
39	松原　監壮	九州大学	技術職員	
40	任　麗梅	九州大学	学術研究員	
41	陳　兆祥	九州大学(院)	学術研究員	
42	高祖　京介	九州大学(院)	大学院生	
43	薛　佳	九州大学(院)	大学院生	
44	伊藤　康徳	九州大学(院)	大学院生	
45	泉　達郎	九州大学(院)	大学院生	
46	矢野　文彬	九州大学	大学院生	
47	陳　瑩	九州大学	大学院生	
48	宋　昌錫	九州大学	大学院生	
49	趙　峻楓	九州大学	研究生	
50	汪　文学	九州大学	准教授	所内世話人

（研究集会）

地球流体における波動と対流現象の力学

研究代表者
新野 宏（東京大学 海洋研究所）

研究集会の目的

近年の計算機技術の著しい進歩により，地球・惑星大気や海洋の小規模渦から大規模循環まで，計算機の上で再現できるようになった．そして，人工衛星による宇宙からの観測は，地球・惑星全域での広域情報の入手を可能にした．今日では，地球科学は再現と検証の手段を得て，先端科学のひとつに変貌しつつある．そのような状況に於いて，地球流体力学は数値計算の結果や衛星観測の厖大なデータを整理し統一的な理解を得るのに，重要な役割を担う学問である．本研究集会の目的は，複数の分野の地球流体力学に関連した研究者が一堂に会し，相互に最新の情報を交換し，新しい学問の展開を模索するものである．

研究集会の日時・場所

日時：2009年12月21日（月）～12月22日（火）
会場：九州大学筑紫キャンパス　応用力学研究所　西棟６階　W601号室

講演プログラム

１２月２１日（月）

○14:00-14:10　代表者挨拶
新野 宏（東京大学 海洋研究所）

○14:10-14:40　坂本 圭(気象研究所、東大CCSR)辻野 博之(気象研究所)
西川 史朗(気象研究所、東大CCSR)中野 英之(気象研究所)
本井 達夫(気象研究所)
北西太平洋モデルにおける沿岸親潮とその短周期蛇行

冬から春の北海道南東海域では、沿岸親潮と呼ばれる沿岸流によって、オホーツク海起源の低温・低塩・低密度な海水が西へ移流される。高解像度北西太平洋モデルを用いて沿岸親潮の力学を調べたところ、沿岸親潮は陸棚縁上の密度前線に伴うジェット流であることが分かった。また、モデル中の沿岸親潮は頻繁に蛇行し、砕波や渦の切離を通して陸棚から外洋への海水流出に寄与していた。沿岸親潮の短周期変動に関する研究の第一歩として、蛇行の伝播メカニズムについても調べた。

○14:40-15:10　水野 信二郎
海洋と室内実験で観察される大気海洋相互作用の比較

Open oceanにおけるair-sea interactionではwind stressに加え、最近、波と流れの相互作用によるCraik-Leibovich機構―(CL2モデル)―によりLangmuir circulation(LC)が発生し、風波の砕波とＬＣが海面付近のmixingに重要な役割を演じると考えて研究が進められている．
他方、風洞水槽で風を加えた我々の実験では、風波とLCが共存する．更に、風波の場に規則波を加えた実験では、規則波は風波に強く応答し風波を減衰させるが、ＬＣの発達には殆ど影響せず、波によるCL2機構は作用しないと思われる．
この様に、open oceanと水槽実験では波が水面下の流れに果たす役割は全く対照的で正反対である．何故air-water interactionがopen oceanと室内実験では異なるのか、に関して話題提供したい．

○15:30-16:00　山崎 哲・伊藤 久徳（九州大学大学院 理学府）
渦と渦の相互作用による大気ブロッキング持続メカニズム

対流圏中緯度において重要な大気変動の要素の1つである，大気ブロッキングの持続メカニズムについて考察を行った．ブロッキングの持続メカニズムは，傾圧波との相互作用によって大きな持続性を獲得すると考えられている．今回，これまで提唱されたブロッキング持続メカニズムと異なる新たな持続メカニズ

ムを提唱する．このメカニズムは，渦と渦の相互作用の考え方に基づいており，大気ブロッキング以外の持続する渦についても適用できる可能性を秘めている．この新たなメカニズムについて，事例解析と簡易数値モデルの両方から考察を行った結果を示す．

○16:00-16:30　佐藤 尚毅(東京学芸大学/JAMSTEC 地球環境変動領域)
大気海洋結合のある浅水波方程式系において導出された位相速度の遅い東進モード

赤道β平面における浅水波方程式に大気海洋結合を取り入れることによって、MJO に対応する遅い東進成分の存在を説明することを試みた。v=0 を仮定した場合に得られるケルビン波型モードとして、現実の MJO に近い分散関係を持つモードが得られた。このモードは、大気海洋結合がない場合にも得られるケルビン波とは別のものである。つまり、古典的なケルビン波と MJO が共存することが整合的に説明されている。特に東西波数が小さい場合には、不安定解が存在し、現実大気の MJO が不安定モードとして成長している可能性を示唆している。

○16:30-17:00　Chen Ying-Wen・宮原 三郎 (九州大学大学院 理学府)
Analysis of Ultra-fast Kelvin waves in the Kyushu GCM

Equatorial Kelvin waves have been revealed that they are important global wave motions in the equatorial region by theoretical studies(e.g. Matsuno, 1966) and observations (e.g. Hirota, 1967, Salby et al.,1983, Riggin et al., 1997, Garcia et al. 2005). Many observational studies have shown that prominent periods of Kelvin waves shift to shorter period with increasing height. In the mesosphere and lower thermosphere region (the MLT region), it has been discovered that Kelvin waves have the periods between 2-4 days with zonal wavenumber 1 and are called as ultra-fast Kelvin waves. In this study, we use the middle atmosphere general circulation model at Kyushu University (the Kyushu-GCM) to investigate the wave behavior and generation of the 3-day ultra-fast Kelvin waves . We use a composite analysis, a space-time Fourier analysis, and E-P flux analysis. It is found that latitudinal and vertical structures of the wave are consistent with the theoretical solution of the Laplace' s tidal equation. Both the vertical structure and the E-P flux analysis show that the wave is generated below 20 km height and propagate up to about 100 km height nearly conserving wave energy. Divergence of the EP flux shows that 0.3 ms-1day-1 westerly acceleration exists around 110 km height in the low latitude region that is consistent with that obtained by observational results.

１２月２２日 (火)

○9:30-10:00　松島 和宏(東海大学理学研究科) 三村 和男(東海大学理学研究科)
ゆっくりと回転速度を変化させた実験で観察された半球規模回転水槽の流れ

地球流体の主な力学効果である惑星 β 効果と傾圧効果を持つ室内実験モデルの実験結果ついて報告する。底の形状が方物面の形をもつ回転水槽で惑星 β 効果を、差分加熱により傾圧効果を持たせた。回転水槽は半球規模を意識して作成した。実験条件の半径方向温度差を 5 度に固定し、回転速度を 0.4rpm から 1.2pm までと 1rpm から 5rpm まで連続的に変化させた。

○10:00-10:30　三村 和男 (東海大学 教養学部)
無限自由度を持つ現実流体中に生じる小自由度カオスについて

閉ループ内熱対流実験は、「ローレンツ・カオスと類似の小自由度カオス理論が、現実流体中で生じるカオス的振る舞いに対してどのように有効であるか」を追求する上で、強力な実験装置である。
しかしなら、水を使った室内実験では、水の物性ゆえに、かなり細い閉ループを利用せざるを得ない。
その結果、ループ内流れは乱流化しやすい傾向があり、小自由度カオスを実現することは困難である。
数値実験であれば、比較的乱流化しにくい太目の閉ループを想定した数値実験が可能であり、有限要素法では小自由度カオスと見なせるものが発見できた。
しかしながら、計算アルゴリズムに対する依存性が大きく、差分法では発見が困難である。

従って、両アルゴリズムと新しいスペクトル・モデルを比較しながら、矛盾しない解釈を求めて考察して行く。

○10:50-11:20　加藤 亮平（九州大学大学院 理学府）杉山 耕一朗(北海道大学 低温科学研究所)
中島 健介（九州大学大学院 理学研究院）
木星大気大規模渦の数値モデリング

木星大赤斑を想定して行ってきた数値実験の結果を報告する．加藤ら（２００８，地球流体力学研究集会）は,東西平均温度場を維持する強制を長い緩和時間で加えた実験で大規模渦が形成・維持されるのに対して短い緩和時間のもとでは大規模渦が形成されなくなることを報告し,激しい小規模渦の活動を大規模渦の阻害要因と示唆していた．しかし，感度実験を行い解析した結果，彼らの示唆はあやまっており,鉛直シアーが大規模渦を引きちぎることが阻害要因であることがわかった．

○11:20-11:50　高木 征弘（東京大学 理学系研究科）松田 佳久（東京学芸大学 自然科学系）
放射輸送を考慮した金星大気における平均子午面循環の数値シミュレーション

金星大気の研究に適用できる放射モデルを開発した。圧力効果によるラインの広がりに関して、ローレンツ型を初めとして、いくつかの関数型を用いて吸収係数を計算し、それを用いて放射（・対流）平衡温度分布を求めた。観測された鉛直温度分布と一致する計算結果も得られた。
この放射モデルを組み込んだ大気大循環モデルによる数値実験の準備として、灰色大気の近似を用いた放射モデルにより、２次元の大気循環の計算を行った。吸収係数の大きさ（の圧力依存性）により浅い子午面循環と深い子午面循環が得られた。

○13:00-13:30　齊藤 直彬・石岡 圭一(京都大学大学院 理学研究科 地球惑星科学専攻)
回転系における熱対流と平均流の相互作用に関する研究

回転系における sin 型水平シア流中の熱対流について，非線形時間発展，線形安定性解析及びエネルギー解析を行った．回転軸が鉛直方向を向いている場合，波数１の順圧渦構造が順圧不安定によって発達することを示した．また，回転軸が鉛直方向から傾いている場合，固有モードから二次的に生成される鉛直流に働くコリオリ力によって平均流が加速されることを示した．

○13:30-14:00　伊賀 啓太（東京大学 海洋研究所）
一様シアー・渦位勾配を持つ流れの中立波

ゼロでない渦位勾配を持つシアー流中には正則な中立波が存在しないことが知られているが、「流れの一部の渦位を一様にすることによって、シアーに隠された中立波を取り出す」という方法を、最も基本的な設定である「シアーと渦位がともに一様である場合」に適用して、このような中立波の基本的な性質を調べる。渦位勾配とシアーの比に応じて、この手法によって取り出される中立波の波数が求められる。

最後に
各発表は十分な時間を確保し討論を活発に行うことができた．若手研究者の発表や参加も数多くあり，本研究集会が将来を担う若手研究者育成の一助になればと考える．また，本研究集会は，毎年中心となるトピックを選びながら，九州大学・応用力学研究所と東京大学・海洋研究所の間で，原則として交互に１年交代で開催している．

開催の期間　平成２１年１２月２１日（月）～２２日（火）
代表者　組織名　　新野宏　　東京大学・海洋研究所
参加者　３４　名

（研究集会）

非線形波動研究の現状と将来－次の10年への展望

研究代表者　　宇都宮大学工学研究科　**矢嶋 徹**

研究集会の目的

非線形波動はプラズマや流体力学，光ファイバーなどの多彩な系で観測され，その応用の可能性も追求されている興味深いものであり，現在の理工学諸分野の研究において中心的なテーマの１つをなしている．非線形波動研究においては，各種現象のモデル化やその解析手法と，実験や数値シミュレーションにおける具体的な結果の相互作用により，新たな研究テーマや応用分野が開拓されてきた．その結果，いくつかの大きい潮流が生じてきた．

たとえば，1960年代から70年代にかけて逆散乱法をはじめとするソリトン方程式の解法の確立が実験物理学に新しいテーマを与え，そこから得られた知見の解釈が理論の前進をもたらした．また，水面波を記述するものだったKdV方程式がプラズマに応用され，逓減摂動法などの手法により他の物理系でのモデル方程式との関係を元にしてさらに他の現象の解釈に用いられてきた．目を転ずると，直接法による解法は解の構造を明らかにし，明らかになったその数学的構造を元にして新しい離散化の手法が確立した．それはまた超離散化へと発展し，セルオートマトンの解析に重要な役割を果たした．応用上も交通流など工学的な応用問題の開拓へとつながった．その他，非線形方程式の可積分性とパンルベ方程式の関連性，統計力学のモデルとそこから得られる差分化の構造など，非線形波動の各種テーマにおける相関の例は枚挙にいとまがない．

現在，非線形波動の研究は対象・手法共に広い範囲の内容をカバーする状態であるが，その発展した内容の相互関係を見極め，新たなる研究テーマへと発展させる段階に至っている．このような状況を考えると，共通の非線形波動という対象のもと，理論から数値計算，実験にいたるまで，また分野においても物理や数学などの枠にとらわれずに，すべての研究者が一堂に会して議論し，お互いの問題意識を確認して話し合い，これからの研究を展望する場が必要である．そのために本研究集会の企画に至ったものである．

開催予定地の応用力学研究所は，非線形波動研究の創成期以来，一貫して関連分野の研究における国内外の拠点の一つである．過去にも継続して関連した研究集会が行われてきており，活発な議論が繰り広げられ，そこから生まれた新しい研究分野も多い．本年度もまた多数の研究者の参加によって，さまざまな分野のテーマの有機的なつながりを目指したい．

成果の概要

本研究集会は，11月19日から21日までの3日間にわたって開催され，特別講演4件と一般講演38件（口頭発表18件，ポスター発表20件）の合計42件の講演が行われた．特別講演は最近特に注目を集めているテーマに関して，特定の分野に偏ることなく，また「非線形波動」というキーワードに縛られることなく講演をお願いした．それらは，講演順に次の通りである：

- 微分幾何を利用した可積分方程式の解析に関するレビュー
- 2次元におけるソリトンの相互作用についての数値的および理論的解析の動向
- 量子暗号理論研究に関する最近の話題
- 離散確率過程に関する最近の研究動向と研究成果の紹介

これらの内容は，非線形波動に関連する数値計算や数学に関するもののほか，今後の研究の指針となるべき興味深い内容であった．

一般講演については，関連研究分野の先進的な内容に関する報告が主に行われた．提供された話題は数学や物理の純理論的なものから，実験やシミュレーションの話題を始め，工学的な応用を含んだ多彩なものとなり，聴衆の幅広い興味を集めた．内容を大別すると，

- 非線形波動・非線形力学系の実験と理論
- 離散系の理論と理工学上の諸問題への応用
- 可積分系の数理と応用

であった．2日目の午後にはポスターセッションを行い，大学院生などの若手研究者をはじめとして多くの研究者が参加して，幅広い内容のプレゼンテーションが行わた．口頭発表では難しい，シミュレーションや実験の実演を伴った発表が見られ，今後の研究の発展性を秘めた，萌芽的な話題が提供された．一般講演においては，総じて実験から理論までのレベルの高い講演がなされ，それを元に活発な討論が広げられた．

本年度は，文部科学省グローバルCOEプログラム「マス・フォア・インダストリ教育研究拠点」との共催となった．同プログラムおよびその周辺には，本研究集会の研究協力者をはじめ，関連分野の研究者が在籍し

ており，それらの方々の参加によって研究集会がより活発なものとなった．昨年度も同様の試みがなされていたが，特に大きな問題はなく，研究集会の今後のあり方の１つを示唆していると思われる．

本研究集会は，数学や物理の理論的な話題から工学的な応用問題にいたるまで多彩なテーマを扱いつつ，講演が公募されて自由に発表できることが大きな特色である．しかも，その内容は単に羅列的に提供されているのではなく，多くの研究者が講演ごとに各自の視点から積極的に討論を行って議論を深め，また関連する話題についての情報交換も活発に行われた．非線形波動に関連する研究分野における多くのテーマの有機的なつながりは研究集会の当初の目的であるが，それは充分に果たし得たのではないかと思う．本研究集会では大学院生や学部生をはじめとした若手研究者の発表の場としても有意義であった．彼らによる新鮮な視点からの発表や討論が行われたことは，特筆しておかねばならない．非線形波動の研究のような，さまざまなテーマが密接に関係し合う研究分野では，本研究集会のような場の存在が大変重要である．このような場を提供して頂いた応用力学研究所の存在意義を実感させて頂いた．参加者を代表して心から感謝申し上げたい．

講演プログラムと概要

11月19日（木）

13:00 – 13:30 **帯行列の固有値を計算する離散可積分系について**
福田亜希子（東京理科大理），石渡恵美子（東京理科大理），山本有作（神戸大工），岩崎雅史（京都府大生命環境），中村佳正（京大情報）

離散可積分系に分類される離散ハングリーロトカ・ボルテラ系及び離散ハングリー戸田方程式の時間発展は，あるクラスの帯行列の相似変形を与える．この性質を利用して定式化された帯行列の固有値計算アルゴリズムを紹介した．

13:30 – 14:00 **A completeness study on a class of Lax pairs**
Mike Hay（九大数理）

We find every Lax pair that can be written in a certain simple form. The Lax pairs are for two dimensional partial difference equations and consist of linear problems written in 2×2 matrix form, with one term in each matrix entry. Two new systems are found which can be reduced to the lattice modified KdV equation or the lattice sine Gordon equation in special cases.

14:00 – 15:00 **取り扱いの難しい可積分方程式**
井ノ口順一（山形大理）

可積分系の例として知られながら，解の構成や解空間の構造などが詳しくわかっていない方程式がいくつかある．それらの方程式の中には，微分幾何学を用いることで方程式の構造が解明できるものがある．この講演ではそういった「微分幾何を使って取り扱いができるようになる方程式」の例として cosh-Gordon 方程式と澤田・小寺方程式を取り上げ，これらの方程式と対応する微分幾何学について報告する．

15:00 – 15:30 **玉の種類一般、箱の種類一般、箱の容量一般の周期箱玉系の超離散テータ関数解**
岩尾慎介（東大数理）

簡約された離散 KP 方程式の超離散化をすることで，高橋-薩摩箱玉系をはじめとする様々な超離散可積分系が得られる．本講演では，周期的簡約条件を課した離散 KP 方程式の線形化問題を基に，超離散系の，トロピカル曲線を用いた線形化を説明した．特に，一般化された箱玉系の基本周期をもとめるアルゴリズムについての解説を行った．

15:30 – 16:00 **特解を保つ重力３体問題の差分化**
峯崎征隆（徳島文理大）

変数変換によって，一般 3 体問題が拘束力学系と見なせることを示す．さらに，この拘束系にエネルギー保存型差分法を適用する．得られた差分系は以下の 3 つの条件を満足する：(i) Hamiltonian，全線運動量，重心の位置を保つ，(ii) 特異点消去によって，数値計算誤差の増大が少ない，(iii) 高精度に線形安定領域の境界付近での解軌道を再現する．

16:00 – 16:30 **跡公式と定常 KdV 階層の完全積分可能性**
松島正知（同志社大工），大宮眞弓（同志社大生命医科）

2 階線形常微分作用素には一連の跡公式が成立するが、無反射や有限帯の場合には、それらは統一的な表示式となり、それから自然に定常 KdV 階層が導かれ、その完全積分可能性も完全な代数的方法で示すことができる。

11 月 20 日（金）

9:30 – 10:00 **A_4 型アフィンワイル群対称性を持つ q-パンルヴェ方程式**
中園信孝（九大数理），西岡斉治（東大数理）

アフィンワイル群に同型な双有理変換群の平行移動を時間発展と考えることで，離散パンルヴェ方程式が得られることが知られている．本研究では，$A_4^{(1)}$ 型 (拡大) アフィンワイル群に同型な双有理変換群から得られる 4 つの q-差分パンルヴェ方程式の特殊解や連続極限などについて報告する．

10:00 – 10:30 **対数的時間発展による非線形 Schrödinger 階層と Ablowitz-Ladik 階層の拡張**
高崎金久（京大人間環境）

Carlet, Dubrovin, Zhang は通常の 1 次元戸田階層に対数的時間発展を加えて拡張戸田階層を構成した．Milanov はこの拡張戸田階層に対して双線形形式を与えた．本公演では対数的時間発展を 1 次元戸田階層の 2 × 2 行列形式（非線形 Schroedinger-戸田階層）に翻訳し，非線形 Schroedinger 階層の 2+1 次元拡張との類似性に基づいて双線形方程式が導けることを指摘する．さらに Ablowitz-Ladik 階層に対する同様の結果を報告する．

10:30 – 11:00 **連立非分散方程式の有効ポテンシャル**
角畠浩（富山大工），紺野公明（日大理工）

ソリトンの位置をピークの位置として，ソリトンを点粒子と見なした。ソリトン粒子間 effective force をピークの位置の加速度から求め，ソリトン相互作用を定性的に説明した。この結果から，ソリトン相互作用の有効ポテンシャルを求めた。

11:00 – 11:30 **細長い容器内の二層流体のファラデー波の励起と共鳴**
船越満明（京大情報），田村桂太（京大情報）

流体を入れた容器を鉛直方向に加振するときにパラメータ共鳴によって生じる波は通常ファラデー波と呼ばれる。本講演では、容器が細長く流体が自由表面を持つ二層流体である場合を考え、ファラデー波の励起や共鳴を記述するモデル方程式とその解について述べる。

11:30 – 12:00 **一般化 BKP 差分方程式のバックルンド変換**
広田良吾（早大名誉教授）

一般化 BKP 差分方程式は双線形形式で $[z_1 \exp(D_1) + z_2 \exp(D_2) + z_3 \exp(D_3) + z_4 \exp(D_4)]f \cdot f = 0$, ここで、$D_1 + D_2 + D_3 + D_4 = 0$ であり、z_1, z_2, z_3, z_4 は任意の定数である。この方程式のバックルンド変換式、Lax-pair について講演する。

12:00 – 12:30 **衝突によって形を変える超離散ソリトン**
中村伸也（早大基幹理工），広田良吾（早大名誉教授）

超離散 hungry Lotka–Volterra 方程式では，孤立波同士の相互作用の前後で挙動に変化が起こる場合がある．このような現象を表す厳密解として，周期関数を導入してソリトンを拡張した解や，静止解について述べる．ソリトンを拡張した解は，形を変えながら伝播する波を表しており，この解が関わる相互作用ではソリトンの場合ではありえなかった現象が観測される．

12:30 – 13:30 **ソリトンの 2 次元相互作用について**
及川正行（九大応力研）

ソリトンの二次元相互作用というと，Kadomtsev-Petviashvili (KP) 方程式のソリトン共鳴が有名である．われわれはここ数年，KP 方程式のソリトン共鳴と同様な現象が他の系でも起こりうるのかを調べるために，二次元 Benjamin-Ono, modified KP, extended KP, 二次元 intermediate long wave 方程式などを数値的に調べてきた．また，最近 KP 方程式のソリトン解について新たな研究の進展があり，V 字型波形の初期値問題の漸近解とソリトン解との関係が明らかになりつつある．この報告では，ソリトンの二次元相互作用に関するわれわれの最近の研究成果や問題点について述べる．

11 月 21 日（土）

9:30 – 10:00 **セルオートマトンによる鉄道ネットワークシミュレーション**
友枝明保（明大先端数理，東大先端研），小松満仁（東大工），兪逸淵（東大工），高山糧（東大工），姜鋭（Univ. of Science and Technology of China），西成活裕（東大先端研，さきがけ）

公共交通における定時運行は企業・乗客の双方にとって最も重要なポイントである．特に鉄道ネットワークの場合，一旦アクシデントが生じると乗客の流れのパターンが変化しネットワーク全体に擾乱が広がってしまい，車両の定時運行を維持することは困難となる．この場合，ネットワーク上の乗客の流れの変化を見積もることが重要となり，本稿では，確率セルオートマトンモデルに基づく Public Conveyance Model を用いて乗客流を見積もる鉄道シミュレーター ” KUTTY ” を構築したので報告する．それに加えて，本稿では混雑した車両を緩和するための運行制御方法も提案し，その効果についても議論する．

10:00 – 10:30 **高次元写像に於ける不確定点の可積分極限での振舞い**
斎藤暁，畠中智哉（首都大物理），斎藤革子（横浜国大工）

高次元有理写像に於ける不確定点近傍での写像の振る舞いを調べた。極限ではすべての周期の周期点が不確定点に集積することが示された。

10:30 – 11:30 **量子暗号理論から見た量子系の諸性質の定量的な理解**
小芦雅斗（阪大基礎工）

量子系に対して測定を行うと、その量子系の状態は一般に変化する。この量子力学の基本的な性質を、盗聴行為の検出に応用することで暗号通信を行う試みが量子暗号である。様々な状況下において、量子暗号のセキュリティを原理的に証明する試みは、測定と状態変化の不可分な関係という量子力学の基本的な性質について定量的に掘り下げることに相当する。その結果、暗号通信という応用的な目標とは別に、量子系の持つ情報の大きさを操作的に定量化する問題への解答や、量子的な相関の大きさについての定量的な理解など、量子系の諸性質の定量的な理解を促進するという基礎的な副産物が生まれている。

11:30 – 12:00 **排除体積効果を取り入れた待ち行列の厳密解について**
有田親史（九大数理），柳澤大地（東大工）

待ち行列は粒子の流入と流出のある最も簡単なモデルである。人が窓口等に並ぶとき，普通前にスペースが空いてから一歩前進する。最近，完全非対称単純排他過程に新しい境界条件を課すことで，排除体積を取り入れた待ち行列モデルが [Phys. Rev. E 80 (2009), 051119] において考えられた。今回はその離散時間ヴァージョンを考える。

12:00 – 12:30 **人の集団に関する新たな評価方法の考察 2**
大塚一路（東大先端研），西成活裕（東大先端研，さきがけ）

筆者らはこれまでに決定論的な資産価格評価法 (正味現在価値) を応用して人の混雑に関する価値評価理論を構築することに成功している。本研究では、この決定論的な理論をリアルオプションアプローチと呼ばれる手法を用いて確率的な変動を考慮した理論として定式化することを目標とする。また、これらの解の評価、応用可能な混雑の事例、今後の展望についても述べたい。

12:30 – 13:30 **1D ASEP & KPZ**
笹本智弘（千葉大理）

1 次元非対称単純排他過程 (ASEP) と KPZ 方程式・普遍性クラスに関する基本事項について概説し, 最近の関連研究についても言及する. また格子上の KPZ 方程式についても説明する.

13:30 – 14:00 **2 成分 KP 階層に由来する高階パンルヴェ方程式**
鈴木貴雄（神戸大理）

パンルヴェ方程式の高階化の一つである野海・山田系は、KP 階層に周期簡約および相似簡約の 2 つの条件を課すことで導かれることが知られている。本講演では、2 成分 KP 階層について同様の考察を行うことで、新しい高階パンルヴェ方程式を導く。

14:00 – 14:30 **ソリトン理論・可積分系の非可換化と Quasideterminant**
浜中真志（名大多元数理）

ソリトン理論・可積分系の非可換化は, 変数の行列型への拡張, 非可換空間上への拡張といった形で古くから活発に研究がなされてきた. 特に最近, ソリトン解の構成において, Quasideterminant というある種の非可換行列式が本質的役割を果たすことが明らかになり, 非可換ソリトンの研究は新しい局面を迎えている. この記事では, Quasideterminant の基礎を解説したのち, 4 次元空間上の非可換反自己双対ヤン・ミルズ方程式を題材に, それらが解の構成でいかに威力を発揮するかを説明する. (これはグラスゴー大学の C. Gilson 氏, J. Nimmo 氏との共同研究 に基づく.) 低次元ソリトン方程式との関連についても少し触れる.

14:30 – 15:00 **離散 BKP 方程式と Yang-Baxter 写像**
筧三郎（立教大理）, Jonathan J. C. Nimmo（グラスゴー大）, Ralph Willox（東大数理）

これまでの研究で, Yang-Baxter 写像と古典可積分型との関係が, 様々な形で明らかにされている。本研究では, 離散 BKP 方程式から得られる Yang-Baxter 写像, およびその超離散化について議論する。

ポスターセッション概要

（1） **「待ち行列の長さ＝待ち人数」でよいのか？**
柳澤大地（東大工, 学振）, 田中裕貴（東大工）, 姜鋭（Univ. of Science and Technology of China）, 友枝明保（明大先端数理, 東大先端研）, 大塚一路（東大先端研）, 須摩悠史（東大工）, 西成活裕（東大先端研, さきがけ）

待ち行列理論では、待ち行列の長さは待ち人数で表される。しかし、実際の待ち行列では人が列を詰める時間のために、待ち行列の長さは待ち人数に一人当たりにスペースを乗じたものよりも長くなると考えられる。本研究では、待ち行列理論に排除体積効果を導入し、待ち行列の長さが待ち人数と異なることを示すと同時に、実験によりその現象を確認した。

（2） **高次元写像のジュリアセットの可積分極限に於ける振る舞い**
斎藤革子（横浜国大工）, 斎藤暁

高次元非可積分系におけるジュリアセットが可積分極限でどの様に振舞うかを解析的に考察する。系の性質によって、いくつかの異なる振る舞いが得られた。

（3） **相対速度効果を含む新しい交通流追従モデルの提案**
社本大輔（東大工）, 友枝明保（明大先端数理, 東大先端研）, 西遼佑（東大工）, 西成活裕（東大先端研, さきがけ）

ドライバーの運転に影響を与えるものとして新たに相対速度効果を付与したモデルを新たに提案する。実際にサーキットで実験し相対速度効果を確認、またコンピューターシミュレーションによって提案したモデルが渋滞を発生することを示す。

（4） **可解カオス系の超離散化**

梶原健司（九大数理），金子昌信（九大数理），野邊厚（千葉大教育），津田照久（九大数理）

カオス系でありながら一般解が初等函数などで表せる可解カオス系は，可積分系と非可積分系の境界領域に位置する力学系である．最近，著者らは可解カオス系に超離散化の手法を適用し，組織的に区分線形写像とその一般解を与えることに成功した．副産物として，テント写像の背後のトロピカル幾何学的構造を明らかにした．同様に，ある2次元可解カオス系の超離散化にも成功し，この場合は写像にも解にも見られる本質的な「マイナスの問題」を克服して非自明な極限を得た．本講演では以上の結果を報告する．

（5） **粉粒体モデルによる密集シミュレーション**

佐原亨（東大工），西成活裕（東大先端研，さきがけ）

本研究では、自由な動きのできない密集状態における人の動きを粉粒体を用いた実験装置でシミュレーションすることにより、振動周波数、出口径、容器の傾斜の大きさといった条件の違いによる流動係数の変化を考察し、密集状態でスムーズな動きをするための条件や状態の新しい指標を得ることができた。

（6） **生産ラインにおけるロット数変化と、生産・輸送効率の改善方法**

峯村匠（東大工），西成活裕（東大先端研，さきがけ）

生産現場などにおいて，ロット数(どれだけまとめて生産するかの単位)を適切に設定することは生産効率の向上には不可欠である．もちらん経営工学的なアプローチで最適ロット計算の手法は提案されているが，実際の生産現場で必ずしも最適なロットを計算することができていない．そこで本研究では，生産工場をモデル化し，ASEP(一次元非対称単純排他過程)を用いてのシミュレーションと理論解析を行うことで，工学的な立場から生産・輸送効率を上げることのできるロット数を考える．また多種多様な製品を生産する工場をモデル化し，製品の送り順による生産効率の改善方法についても考察を行う．

（7） **雑踏を通り抜ける歩行者のダイナミクス**

田中裕貴（東大工），西成活裕（東大先端研，さきがけ）

東京のように人口密度が非常に高い都市では，雑踏の中で思い通りに進むことができずストレスを感じることが多い．本研究では，雑踏の定義を定めた上で，雑踏における歩行者の挙動をモデル化した．さらに，進行方向と垂直な方向への拡散現象を理論，実験，シミュレーションを用いて検証した結果，各密度における拡散係数が得られた．

（8） **回転楕円体座標を用いた無重力空間中における液滴の振動、安定性の解析**

江口隆大（東大工），西成活裕（東大先端研・さきがけ）

無重力空間中における液滴の振動挙動、安定性については未だ理論的な解析が十分いなされていない。本研究では、回転挙動による非対称形状への遷移及び振動挙動の変化を回転楕円体座標を用いて解析した。

（9） **多体系の非弾性衝突過程に関する理論研究**

林克起（東大工），西成活裕（東大先端研・さきがけ）

多体系の非弾性衝突過程の解析には、主として平均場近似を用いた解析などが用いられてきたが、十分な解析がなされていなかった。また、多体系の温度変化についての解析では、従来は熱伝導方程式、フーリエの法則が用いられてきたが、これらに従うと熱伝播速度が無限大となり非物理的であり、電信方程式に従うはずであるという提案がなされている。本研究では、数値計算により多体系の温度変化を解析し、熱は波動として伝播するが、電信方程式の解とも異なる振る舞いをすることを確認した。特に、エネルギーの大きな粒子と小さな粒子のエネルギー差が大きいとき（100倍程度のとき）にどのように温度が伝播するかを理論的に解析した。また、温度伝播速度の反発係数依存性、密度依存性を調べることに成功した。今後は、より一般的な場合についての解析、多体系についてのミクロな視点からの解析によるマクロな熱伝導の解析が課題である。

（１０） **片方向のみが予測を行う群衆対向流の解析**
須摩悠史（東大工），西成活裕（東大先端研・さきがけ）

従来の群集運動の研究では全員が同じ性質を持っていた．本研究ではこの均一性を取り除き，対向流において片方向のみが対向者の動きを予測する場合を対象に数値計算と実験を行った．数値計算には予測フロアフィールドを含むフロアフィールドモデルを使用した．数値計算と実験の両方の結果から，片方方向のみが予測を行う場合は両方向が予測を行う場合よりに流れが滞りやすくなるが，予測を行わない場合と比べると大幅に改善されることが分かった．

（１１） **交差点の情報による交通流への影響の解明**
野村宗広（東大工），西成活裕（東大先端研・さきがけ）

１つの場所から２つの経路で１つの交差点に繋がる系からなるセルオートマトンモデルにおいて、交差点部の情報を与えられ最適な経路選択を車両が行う場合に各車両の速度と車両群の流量の関係をゲーム理論を用いて明らかにした。

（１２） **高次保存量を持つ２階可積分方程式について**
田中宏典（龍谷大理工），津田照久（九大数理），野邊厚（阪大基礎工），松木平淳太（龍谷大理工）

２階差分方程式の可積分方程式として QRT 系が知られているが、これまでに我々は、この系をもとに高次保存量を持つ差分方程式を生成してきた。今回は、2 階差分方程式の中で QRT 系以外のものとして示されている方程式から得た考察をもとに、新たな可積分な方程式の生成法を報告をする。

（１３） **べき乗法と qd 表による密行列の三重対角化について**
大西洋平（同志社大工），近藤弘一（同志社大理工）

ベルヌーイ法は多項式の根のうち絶対値が最大な根を 1 つ求める古典的な算法であり，多項式のコンパニオン行列に対するある種のべき乗法とみなされる．本論では，一般の行列に対するべき乗法から得られる数列を初期値とする qd 表と行列の固有値，固有多項式の係数，同じ固有値をもつ別の 3 重対角行列との関係を明らかにする．

（１４） **算術調和平均アルゴリズムと Sakaki-Kakei 方程式の一般解とその分類**
近藤弘一（同志社大理工）

Sakaki-Kakei は超幾何関数の関数等式より得られる保存則をもつ非可逆 2 次元離散力学系を 12 種類提出した．本論ではこのうち第 3, 5, 6 番目の方程式の一般解を求めることを目的とする．これらの方程式は，算術調和平均アルゴリズム，ロジスティック写像と関連することを明らかにする．

（１５） **ベクトル，行列連分数の組合せ論的解釈とその周辺**
新宮史也（京大情報），上岡修平（京大情報）

ある重み付きグラフを導入し, その重み付きグラフ上の経路の重みを考えることによって得られる量を用いて, 行列連分数と, べき級数を成分に持つ行列との間の関係を組合せ論的に考察する．また, Block-Hankel 行列式の組合せ論的な表現を与え, 行列連分数やべき級数の行列と Block-Hankel 行列式の関係に対する組合せ論的な考察を行う．

（１６） **Benjamin-Ono ソリトンの非対称な二次元相互作用**
辻英一（九大応力研），及川正行 (九大応力研)

振幅の異なる Benjamin-Ono ソリトンの非対称な弱二次元相互作用を，二次元 Benjamin-Ono 方程式を用いて調べた。その結果，対称な場合と性質の異なる相互作用が現れる事が明らかになった。

（１７） **不規則性を持つ非対称単純排他過程における粒子の運動**
今村卓史（東大先端研）

ホッピングレートが粒子ごとに異なる非対称単純排他過程を考える。具体的には、ある１つの粒子の運動に着目しそれがどのような確率過程に従うかを考察する。この確率過程がランダム行列理論の固有値の確率過程と等しいことを厳密に示す。

（１８） **超平面制約付き非線形方程式に対するニュートン反復を利用した特異値分解法**
矢谷健一（京大情報），近藤弘一（同志社大理工），岩崎雅史（京都府大生命環境）

行列の特異値問題を非線形方程式の求解問題に置き換え，これをニュートン法に似た反復計算で数値的に解くことによって特異値分解を得る方法を紹介する．さらに，この特異値分解法のいくつかの理論的性質を明らかにし，実用的なハイブリッド版を示す．

（１９） **確率変数がある場合の逓減摂動法の適用について**
矢嶋徹（宇都宮大工），宇治野秀晃（群馬高専）

逓減摂動法は，非線形方程式を導出する重要な手段である．ここでは，モデルとなる物理系で確率的に変動する量があるときに逓減摂動法を適用する手法について考察する．あわせて実際に方程式を導出し，未知関数の振る舞いについて考える．

（２０） **確率共鳴を利用した力制御**
劉紅波（横浜国大工），石渡信吾（横浜国大工）

確率共鳴は閾値応答素子と微弱信号、ノイズからなる単純な非線形応答システムである。その出力は 2 値化されているが、確率的には比例制御と同等である。この非線形応答を使って、ノイズを積極的に利用した制御手法を力発生の制御に適用する。

開催の期間　平成 21 年 11 月 19 日 ～ 平成 21 年 11 月 21 日

参加者　86 名

応力・変位場計測法および解析法の基礎と応用に関する研究集会

研究代表者
福岡県工業技術センター機械電子研究所
内野正和

目的

生産現場では安全性、高信頼性、高付加価値を有する製品開発が行われている。しかしながら近年、製品サイクルの縮小による製品開発期間の短縮が進み、その結果として設計や製品評価の時間も削られている状況である。設計の効率化を進めるためにＣＡＥによる製品開発が普及してきた。ＣＡＥではＦＥＭに代表されるコンピュータ解析が用いられるが、解析の基礎データとなる部材の特性条件（ヤング率やポアソン比など）や実際の境界条件（荷重条件、変形条件、接触条件など）が非常に重要である。この諸条件次第で結果は千差万別に変化する。実際、不適切な条件を用いたため製品の強度不足や構造物の耐震性不足など大きな問題が起こっている。このようにこれらの条件を精度良く求めることは安全な設計を行う上で重要である。精度の高い特性条件や境界条件を用いるためには精度の良い応力・変位場計測が必要不可欠である。また、これらの計測技術は実製品評価や構造物などの診断・評価技術としても関心が高くなってきている。そこで本研究集会では応力・変位場の計測技術、解析技術、応用実施例について議論を行い、研究者が最新の知識を共有し、新たな知見を得ることや応用展開を進めることを目的とする。

本研究集会は 2010 年 1 月 13 日(水)、14 日(木)に九州大学西新プラザで開催した。プログラムおよび報告書の概要を以下に示す。

プログラム

１．開会あいさつ（13:30-13:40）
２．レーザー誘起超音波法を用いた完全非接触型歯科インプラント固定率評価装置の開発（13:40-13:55）
　九州大学応用力学研究所　大田雄一郎
３．空孔内における光重合型コンポジットレジンの力学特性評価（13:55-14:10）
　九州大学応用力学研究所　綿貫智
４．インプラントモデルに作用する衝撃計測法について（14:10-14:25）
　九州大学応用力学研究所　寺坂知幸
　休憩（14:25-14:45）
５．サンプリングモアレ法を用いた変形物体の形状・表面ひずみ計測（14:45-15:05）
　和歌山大学システム工学部光メカトロニクス学科　藤垣元治
６．有限要素法と最小二乗法を利用した変位測定データの平滑化とひず みの算出　（15:05-15:25）
　青山学院大学理工学部機械創造工学科　米山聡
７．デジタル画像相関法の測定精度に関する研究－画像輝度並びにひずみの影響－（15:25-15:45）
　金沢工業大学工学部機械工学科　畝田道雄
　休憩（15:45-16:05）
８．スポーツカイトの運動計測とカイトラインの強度評価（16:05-16:20）
　九州大学応用力学研究所　松岡孔明
９．点灯時における自動車用電球の残留応力測定（16:20-16:40）
　豊橋技術科学大学機械システム工学系　鈴木新一、西北昇平
１０．高速高精度３次元画像変位計測の地震工学研究への応用（16:40-17:00）
　東京電機大学情報環境学部　新津靖

1 月 14 日

１．デジタル画像相関法による微細接合部のひずみ分布評価（9:30-9:50）
　京都大学大学院工学研究科　機械理工学専攻　宍戸信之

２．先端画像処理技術による大型構造物の全視野変位分布計測（9:50-10:10　）
東北大学大学院工学研究科ナノメカニクス専攻　李志遠
３．屋外計測現場で適用可能なひずみ計測装置の開発（10:10-10:30）
佐賀大学理工学部都市工学科　伊藤幸広
休憩（10:30-10:50）
４．デジタル画像相関法を用いた鋼コンクリート合成桁の計測（10:50-11:10）
九州工業大学大学院工学研究院建設社会工学研究系　合田寛基
５．デジタル画像相関法を利用した新しい応力集中評価法の検討（11:10-11:30）
福岡県工業技術センター機械電子研究所　内野正和
６．閉会あいさつ（11:30-11:40）

講演概要

1.レーザー誘起超音波法を用いた完全非接触型歯科インプラント固定率評価装置の開発

九州大学応用力学研究所 大田雄一郎，森田康之 ，新川和夫

レーザー誘起超音波装置を使用し，物体内に生じる弾性波の共振周波数を測定した．試料には，インプ ラントと同質のチタンを用いた．また，インプラント体と埋入したインプラント体の共振周波数を測定した．チタンでは，干渉計と AE センサが同じ共振周波数 を示し，本装置がインプラント体へ適応可能であることを示した．そして，インプラント体と埋入したインプラント体の共振周波数に違いが表れた．この結果は 本装置が骨への固定率を経時的に評価できる可能性を示した．

2.空孔内における光重合型コンポジットレジンの力学特性計測

九州大学応用力学研究所 綿貫智，新川和夫，馬田俊雄

歯科臨床において，光重合型コンポジットレジンは充填や形態付与などの操作が容易である ため窩洞修復だけでなく，広く歯科臨床に用いられている．しかし，補綴物や修復物が接着層の破壊により脱落した症例も多い．その要因として，レジンは硬化 する際に重合収縮が生じるため，レジンや歯質および接着界面に応力が発生したり，過酷な口腔環境も手伝い，亀裂や剥離の原因があるためと考えられる．本研究は収縮荷重を窩洞を擬した空孔を用いて測定および力学特性を調査することを目的とした．

3.インプラントモデルに作用する衝撃測定法について

九州大学応用力学研究所 寺坂知幸，新川和夫，馬田俊雄

現在，高齢化が進んでいる日本では，人々が健康を損なわずに生活する事が，これからの社会においての最重要事項となっている．また，多くの高齢者は，歯を始めとする体の各器官を喪失あるいは機能低下を引き起こす場合が多く，これが原因となり，様々な疾病を誘発することがある．現在の歯科医療では，喪失した天 然歯の代わりとなる治療法として，歯科インプラントや入れ歯などの手法が採られているが，どの方法にも長所と短所がある．本研究では，インプラントモデルを作製し，人工歯の材料として用いられているセラミックス，および樹脂を取り付け，衝撃試験を行なった．そして試験結果より，インプラント用人工歯に衝撃力が作用した際の衝撃特性を調べた

4.サンプリングモアレ法を用いた変形物体の形状・ひずみ分布計測

和歌山大学システム工学部　光メカトロニクス学科 藤垣元治，志茂公亮，柾谷明大

三次元物体の形状計測やひずみ分布計測は製品の検査や評価等において重要である．当研究室では，サンプリングモアレ法を用いて，２次元格子シートを貼り付けた物体を撮影し，その撮影画像から三次元形状およびひずみ分布を解析するシステムを開発した．このシステムによって動的に変形する物体の形状とひずみ分布を同時に計測することが可能となる．本研究では物体が変形していく様子を撮影し解析を行い，形状，ひずみ分布の評価を行い，システムの有効性の確認を行った．

5. 有限要素法と最小二乗法を利用した変位測定データの平滑化とひず みの算出

青山学院大学理工学部　機械創造工学科　米山聡

A method for smoothing the measured displacements and computing strains utilizing a finite element method is described. Nodal displacement values in a finite element model are determined by fitting the measured values to shape functions using the method of least-squares. Then, the smoothed displacement distributions are obtained. The elements in the region where the measured values are not obtained or unreliable are determined by solving finite elements equation. The validity is demonstrated by applying the proposed method to displacements of a plate with a hole obtained by electronic speckle pattern interferometry. Results show that the displacements and stains can be determined accurately by the proposed method. Furthermore, the strains near free boundaries and strain concentration region can determined easily. As strains can be evaluated easily and accurately, it is expected that the proposed method can be applied to various problems in solid mechanics.

6. デジタル画像相関法の測定精度に関する研究－画像輝度並びにひずみの影響－

金沢工業大学工学部　機械工学科　畝田道雄

近年，高度経済成長期に建造された構造物の老朽化が進み，それらの維持管理やリスク評価を目的として，ひずみ測定が行われている．ひずみ測定における代表的な測定法として，ひずみゲージによる接触測定法やモアレ法による非接触測定法が挙げられるが，それぞれ広範囲の分布測定には適さないことや，微小ひずみの検出が困難であることなどが問題とされている．そのような状況を背景に，デジタルカメラで撮影した複数の画像を用いて，非接触で広範囲のひずみ分布測定を可能とするデジタル画像相関法（以後，Sub-DIC 法）に関する研究が盛んに行われ，様々な画像照合法を利用した検討も進められている．しかし，構造物の多くは屋外で太陽光により照らされている状態であり，時間の経過などによって光の揺らぎが発生する環境であることから，複数の画像を撮影 する場合には画像間で輝度が変化すると想定される．さらに，構造物にひずみが生じている場合，ひずみが生じる前後で画像に投影される構造物の形状は変化す る．このような輝度の変化やひずみの発生は，測定精度に影響を及ぼすことが知られているものの，具体的な測定精度への影響の大きさや，輝度の変化とひずみが同時に発生した場合の測定精度への影響検討は少ない．そこで本研究では，輝度の変化及びひずみの発生が，Sub-DIC 法によるひずみ分布測定の測定精度に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした．本報告においては，3 種 類の画像照合法ごとに輝度変化のシミュレーションを行い，輝度の変化が測定精度に及ぼす影響についてそれぞれ評価した結果を述べる．また，画像間にひずみ を発生させ，ひずみが画像照合法ごとの測定精度に及ぼす影響を確認し，ひずみと輝度変化が同時に生じた場合についても検討を行い，輝度変化やひずみが発生 した場合に適切な画像照合法について検討した結果を言及する．

7. スポーツカイトの運動計測とカイトラインの強度評価

九州大学応用力学研究所 松岡孔明，新川和夫，馬田俊雄

近年，インフレータブルカイトが開発され，カイトサーフィンやカイトボードと呼ばれる水上スポーツで利用されている．インフレータブルカイトは，パラグライダーに近い形状をしているが，エアーチューブからなるリーディングエッジとフレームをもち，水上でも浮くような構造となっている．操作性能に優れたこのカイトを用いると，高速で水上を滑走すること，急激な力を発生させ大きくジャンプすることが可能となる．本研究では，カイトの操作方法を習得し，カイトの運動中に発生する張力を測定した．さらにカイトラインの強度評価を行った

8. 点灯時における自動車用電球の残留応力測定

豊橋技術科学大学　機械システム工学系　鈴木新一、西北昇平

Photoelasticity of high sensitivity is applied to measure the residual stress of the pincher portion of the light bulls for s¥automobiles. The residual stress is not so high that isochromatic fringes don't appear, hence, there only exists the change of brightness. The residual stress of the pincher portion is obtained by measuring the light intensity with a

light detector of high sensitivity or phase-shifting method. The present study measures the residual stress when the light bulb is being turned on and off. Also, the present study uses what phase-shift photoelasticity method to measure the residual stress. The measurement results say that the methods of the present study are useful to measure the residual stress of light bulls for automobiles.

9. 高速高精度３次元画像変位計測の地震工学研究への応用

東京電機大学情報環境学部　新津靖

In recent years, the importance of the fracturing test using the full-scale model is recognized in order to upgrade an earthquake resistant design. It is, moreover, important to develop a new measuring method which can measure a complex three-dimensional behavior in such fracturing test. This study has been doing research and development of three-dimensional measurement using an image processing technique for a measurement of dynamic displacement in shake table test without any contact. This paper describes the measurement results of shake table test using actual scale models at E-Defense and Tsukuba Research Center.

10. デジタル画像相関法による微細接合部のひずみ分布評価

京都大学大学院工学研究科　機械理工学専攻　宍戸信之

デジタル画像相関法を用いた微細領域の変位・ひずみ分布計測システムの構築及びその精度向上を目的とした観察画像のゆがみ評価手法開発に関する研究を行った．構築した計測システムを用いて微細構造物におけるひずみ計測を実施し，ゴム変成エポキシ樹脂接着継手に適用した例では，機械荷重でのき裂先端ひずみ分布を実測し，樹脂の損傷を考慮した有限要素解析結果と比較することで，その損傷モデルの妥当性を検証した．また，電子デバイスに適用した例では熱負荷で生じる内部構造に応じたひずみ分布や接合部のひずみ集中位置を明らかにし，有限要素解析結果と比較検討することで，解析支援手法として構築したひずみ分布計測システムが有用であることを確認した．原子間力顕微鏡観察に三次元的な画像の変形を考慮したDICMを適用することで，超微細な領域を対象とした３次元表面変位計測システムを構築した．さらに，走査に起因する画像ゆがみを定量的に評価及び補正することで，20nmの変位分解能で計測可能であることを実験的に確認した．

11. 先端画像処理技術による大型構造物の全視野変位分布計測

東北大学大学院 工学研究科　李志遠，坂真澄
中部電力（株）技術開発本部 電力技術研究所　南原健一，小林大輔

大型機器・構造物の健全性を評価するために，その変位やひずみ分布を高精度かつ非接触で広域なエリアを一度に測定できる全視野計測法の開発が望まれている．画像計測による手法では，特に大型構造物の変位分布を測定するフィールド実験では，周辺環境の振動の影響を大きく受ける．本稿では，変形前後の各１枚の格子画像から振動下における構造物の微小変位分布を高精度に計測できる先端画像処理技術（Advanced Image Processing (AIP) technique）を開発する．測定したい構造物の表面に格子シートを貼付け，サンプリングモアレ法を用いてたわみ分布を測定する．さらに非荷重部の自然模様を利用して，デジタル画像相関法を用いてカメラのぶれ成分を補正することで振動の影響を除去する．10メートル長のクレーンを測定した結果，サブミリメートルのたわみを検出することができ，本手法の有効性を示す．

12. 屋外計測現場で適用可能なひずみ計測装置の開発

佐賀大学理工学部　都市工学科　伊藤幸広

建設構造物の施工時や供用の段階において、ひずみゲージにより表面ひずみを計測して各種検査を行うことは効果的な管理手法ではあるが、ひずみゲージは配線が必要なこと、設置や保守が煩雑なこと、1 枚のゲージで微小領域のデータしか得られないことなどの問題があり、一般の現場で実施されることは少ない。最近、物体の表面ひずみを光学的な手法により計測する方法が提案されており、その代表的なものとして、スペックルパターン干渉法やデジタル画像相関法がある。これらの手法は、配線等の問題がなく撮

影範囲内の全方向のひずみが計測できることから、有効な構造物の施工・維持管理手法となり得る。しかしこれらを屋外現場で適用する場合には、画像取得の際にレンズとCCD（CMOS）カメラを用いることから、レンズの諸特性の問題、計測期間中の日照条件の変化、風、振動の影響などから高精度なひずみ計測は難しい。本研究では、レンズの問題が無く照明の調整が不要なラインセンサスキャナを用いて、高精細な画像を取得し、デジタル画像相関法により全視野ひずみ計測を行う装置の開発を行った。実験では、開発したひずみ計測装置の精度の検証を行い、さらに、実橋を用いた実験において本装置によるひずみ計測を行い、屋外現場での適用性について検討を行った。

13. デジタル画像相関法を用いた鋼コンクリート合成桁の計測

九州工業大学大学院工学研究院　建設社会工学研究系　合田寛基，
内野正和，山口浩平，日比野誠，松田浩

本研究は，全視野非接触計測技術を用いた構造物の維持管理方法を提案するための基礎研究である．デジタル画像相関法を用いて鋼コンクリート合成桁の曲げ挙動を測定した．デジタルカメラを用いて1000mm×600mmの範囲を撮影した．変形以外の要因で発生する画像のばらつきを低減するために，複数の画像を重ね合わせた．さらに，測定箇所の周辺における変位を平均化した．得られた知見として，たわみや相対変位といった変位について，接触型計測と同等の精度が得られた．ひずみについては，ゲージの値よりもばらつきが大きいものの定性的な挙動を評価できた．

14. デジタル画像相関法を利用した新しい応力集中評価法の検討

福岡県工業技術センター機械電子研究所　内野正和

応力集中の評価は，機械設計や強度評価、構造物などの維持管理を行う上で非常に重要な要素技術である。例えば，孔や楕円孔，両端を丸めたみぞ，すみに丸みのある四角形孔などを持つ無限幅板，あるいは有限幅板，側面にU型ノッチやVノッチ，双曲ノッチなどをもつ場合の応力集中は，理論解や実験解が数多く報告され，応力集中係数の関係式なども提案されている。これらの実験の多くは光弾性法によるもので，実際の製品や部品などで評価を行う場合は，ひずみゲージによる計測が一般的である。しかしながら応力集中は局所的に発生し，その部位から離れるにつれて応力集中の影響が小さくなる。そのため，応力集中部を精度よく評価するためには，その部位に正確に貼り付けることが求められる。しかしながら，ひずみゲージはある幅（ゲージ長）を持ち，その幅の平均ひずみを得ることになるので，精度良い応力集中の評価は難しいのが現実である。そこで本研究では，非接触で実物の応力集中を精度よく評価する技術の検討を行った。計測法としてデジタル画像相関法を利用した。デジタル画像相関法は簡便に物体の変形分布計測が可能な方法として，近年，幅広い分野で利用されている計測手法である。本手法は変形前後の測定対象物表面をデジタルカメラ等で撮影し，得られたデジタル画像の輝度値分布を利用した解析処理により，画像範囲全体に渡って表面の変位分布（大きさと方向）を得ることができる方法である。デジタル画像相関法を利用した応力集中の評価対象として，円孔による応力集中について検討を行った。最初に，一つの円孔を持つ無限幅板が一軸引張を受けた場合の円孔の縁に発生する応力場の理論解から導き出したデジタル画像相関法による評価原理を示す。次に，本手法の有効性を評価するために金属材料による円孔の応力集中に関する計測実験を行い，FEM 解析による結果との比較を紹介する。

まとめ

応力・変位場計測法および解析法の基礎と応用に関して１４テーマの講演があり、計測技術、解析技術、応用実施例について活発な議論が交わされた。その結果、研究者が最新の知識を共有し、新たな知見を得ると共に他分野の研究者との交流も行われ、非常に有意義な研究集会であったと考える。このような研究集会開催の機会を与えていた九州大学応用力学研究所新川和夫教授をはじめとする九州大学応用力学研究所の関係各位に感謝いたします。

（研究集会）

力学適応能、自己組織化能を有する バイオマテリアル－生体インターフェースの創製

研究代表者
東北大学歯学研究科
佐々木啓一

1．研究集会の目的

平成19年度から平成23年度までの5年間を事業計画期間とした特別教育研究経費・大学間連携研究「生体－バイオマテリアル高機能インターフェイス科学推進事業」が平成19年4月より開始されました。事業実施主体は東北大学大学院歯学研究科、東北大学金属材料研究所、九州大学応用力学研究所の3組織です。その概要は、生体－バイオマテリアル「インターフェイス」における材料、生物学、力学の研究の連携を図り、高機能化インターフェイス創製に関する新たな研究領域を開拓し、喪失した口腔及び生体の精緻な機能の新規創建治療技術開発に資すると謳われています。応用力学研究所では，生体工学グループを組む破壊力学分野および複合連続体力学分野がこの生体力学適応能に関する研究を行います。

本共同利用研究集会は平成 22 年 3 月 14 日に．東北大学歯学研究科実習講義棟 B 棟 1 階 B1 講義室で上記事業に関る基礎的な問題についての研究発表及び討論を行います。報告内容の概要を以下に示します。詳細は、九州大学応用力学研究所平成２１年度の本共同利用研究集会前刷集をご覧下さい。

2．講演概要

（1） Surface modification of pure titanium and in vitro cell responses

Z.X. Chen, Y. Takao, W.X. Wang, T. Matsubara and L.M. Ren
Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

The surface of pure titanium was modified by anodization treatment at different voltages. The surface TiO_2 layer obtained at 100V exhibits a nanostructured surface similar to natural tooth cementum. In contrast, porous oxide layers with few nanometer features were produced at higher voltages. Cell responses study demonstrated greater cell adhesion and proliferation on the nanostructured surface. Subsequent hot water treatment makes further improvement on the biocompatibility of anodized titanium.

（2） デジタル画像相関法を用いた歯科インプラント周辺骨のひずみ分布計測

森田康之(名古屋大学), 東藤貢(九州大学), 松下恭之, 新川和夫, 古谷野潔

皮質骨,海綿骨の二層構造を有した骨モデルに歯科インプラントを埋入した.そして,擬似咬合下におけるインプラント／骨界面の変形分布をデジタル画像相関を用いて計測した.インプラントと骨モデルが接着したオッセオインテグレーテッドインプラント,およびインプラントと骨モデルが非接着な即時荷重インプラントの二種類の試験片を準備し,従来のインプラント植立法と近年治療期間の短期化を目指した即時荷重インプラント法における咬合下でのひずみ分布を比較した.

（3） 骨再生用材料のバイオメカニクス的検討

荒平高章（九州大学大学院総合理工学府), 東藤　貢（九州大学応用力学研究所）
松下恭之（九州大学大学院歯学研究院), 古谷野潔
名井　陽（大阪大学大学院医学系研究科）

近年、先天異常や顎変形症などの下顎不全を訴える患者数が増加している。これに対して、顎矯正手術を用いることが現在の治療法となっている。この手術では、顎骨の平行移動や回転移動が行われるため手術後に上下顎の歯の位置関係、つまり咬合状態が変化する。咬合状態は、歯の位置や下顎の安定性などにも大きな影響を与える。それゆえ、患者自身の顎及び歯列形状に対して、手術後の咬合状態を予測する数値シミュレーションが望まれている。

過去３次元有限要素モデルを使い、咬合状態における下顎歯と上顎歯間の詳細な接触変化を考慮した解析は少ない。本研究の目的は、個々の患者の咬合を解析する手法の確立し、これにより咬合状態が下顎骨に与える影響を求めることである。今回は、簡単のために下顎の第二大臼歯一本について考察したが，結果はそのまま歯列全体に適用できる。

（4） RF マグネトロンスパッタリング法により ACP 膜を成膜した Ti 合金の骨結合強度評価

鈴木祐子[1], 塗溶[2], 後藤孝[2], 高橋正敏[1], 鈴木治[1],
新家光雄[2], 桑名利枝[1], 佐々木啓一[1]
[1]東北大学大学院歯学研究科, [2]東北大学金属材料研究所

RF マグネトロンスパッタリング法を用いてアモルファスリン酸カルシウム（ACP）膜を成膜した cpTi、64Ti、TNTZ、金属ガラス(BMG)の小型試料をラット大腿骨に埋入し、打ち抜き試験により骨結合強度の評価を行った。実験の結果 TNTZ において最も高い値が得られ、今回の手法により小型サイズの Ti 合金を用いて骨結合強度の評価が可能であった。Ti 合金と表面改質法の効果について今後の展開を報告する。

（5） ISFETによるバイオフィルムーマテリアルインターフェイス環境測定

真柳　弦[1,2]、五十嵐公英[2]、鷲尾純平[2]、高橋信博[2]
[1]東北大学大学院歯学研究科インターフェイス研究事業、
[2] 東北大学大学院歯学研究科口腔生化学分野

微小イオン感受性電界効果型トランジスタ（ISFET）pH電極を用い、バイオフィルムーバイオマテリアル・インターフェイスのpH測定装置を作製した。本装置によりインターフェイスpHをリアルタイムにモニターすることが可能となった。フッ素徐放性バイオマテリアルはインターフェイスのpH低下を抑制できることが分かった。本装置は、齲蝕予防歯科修復材料の開発や多様な機能性バイオマテリアルの評価に有用であると考えられる。

（6） Octacalcium phosphate (OCP)インプラントが骨形成を促す最適条件の検討

○本田義知[1]，村上宜央[1,2]，島内英俊[2]，穴田貴久[1]，鈴木治[1]
東北大学大学院歯学研究科　[1]顎口腔機能創建学分野，[2]歯内歯周治療学分野

合成 octacalcium phosphate（OCP）結晶の顆粒は、骨欠損部で破骨細胞と骨芽細胞を賦活化し、骨再生を促す。OCP 顆粒の顆粒径や、表面微細構造の調節は、骨関連細胞が存在する局所環境（空隙・イオン濃度）を大きく変化させるが、骨形成に及ぼす影響は十分に明らかにされていない。本発表では、骨形成を促す OCP インプラントの最適条件について、これまで得られた知見を、OCP 顆粒充填時の局所環境と、骨形成反応との関係から報告する。

（7） チタン上への多層リン酸カルシウムコーティング膜の作製とその評価

成島尚之[1]、上田恭介[1]，後藤孝[2]，栗原淳[3]，川村仁[3]
[1]東北大学大学院　工学研究科　材料システム工学専攻
[2]東北大学　金属材料研究所
[3]東北大学大学院　歯学研究科　顎顔面外科学分野

RF マグネトロンスパッタリング法によりチタン基板側の高結晶性ハイドロキシアパタイト(HAp)層と表面側の低結晶性オキシアパタイト(OAp)層からなる二層コーティング膜を作製した。二層コーティング膜は均一かつ緻密であり、チタン基板との密着力は50 MPa以上であった。二層コーティングを施したスクリュー型ブラストTi-6Al-4Vインプラントの家兎大腿骨からの回転除去トルク値はコーティングなしと比べ有意に高い値を示した。

３．まとめ

高機能バイオマテリアルー生体インターフェイスの創製に関する第４回目の研究集会であり、３研究機関からそれぞれ３件の講演発表があり、異分野間の活発な討論が行われる。参加者の内訳は九大６名（内院生１名），東北大２０名程である。平成２２年度は平成２２年秋に、日本機械学会全国大会のシンポジウムの場で開催する予定である。

平成２１年度

大 気 海 洋 分 野
共同研究成果報告

主翼独立制御型水中グライダーの自律制御に関する研究

大阪府立大学・大学院工学研究科　有馬 正和

□研究目的

研究代表者らは，広範囲の海洋環境モニタリングや海洋探査を目的として，高い運動性能を発揮することのできる「主翼独立制御型水中グライダー」を提案し，その実験機ALEX（Fig.1）を開発している。従来の水中グライダーは，広範囲に亘る長時間の海中調査を目指した長距離航続型のものが多かったが，本研究で提案する水中グライダーは，その機動性を活かして比較的狭い海域でも運用できることを前提としている。主翼独立制御型水中グライダーは，水中での静止や後退，垂直降下，機首揺れ回転，主翼による翼動推進などの高い運動性能を有することがわかったが，自律制御のための運動制御モデルを構築するためには，深海水槽における基礎データの収集が必要不可欠である。研究代表者らの所属する大阪府立大学の海洋システム大型実験水槽棟・船舶試験水槽（長さ×幅×深さ：70m×3m×1.5m）では，水中グライダーの運動性能評価を行うには幅と水深が不十分であり，九州大学・応用力学研究所の深海機器力学実験水槽（長さ×幅×深さ：65m×5m×7m）を使用させていただくことが本研究の進展に最も有効であると判断した。同研究所・海洋大気力学部門・海洋流体工学分野は，海中ビークルの運動制御に関する研究において優れた実績があり，また，九州大学大学院工学研究院・山口悟助教授らが水中グライダーの研究をされており，情報交換によって水中グライダーに係る研究の飛躍的な進展が図れると考えたことも共同利用研究の目的のひとつである。

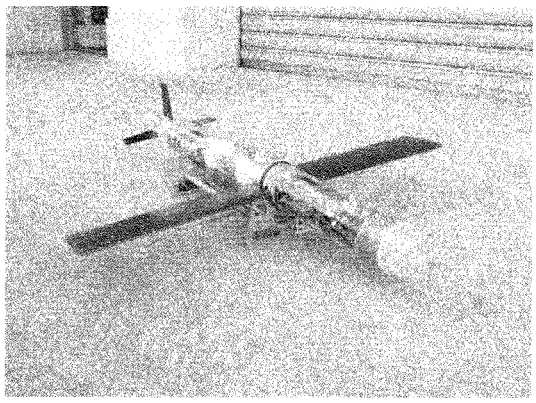


Fig.1　主翼独立制御型水中グライダー実験機「ALEX」

今年度は，実海域で使用するための主翼独立制御型水中グライダーの研究開発を目指して，グライダー型海洋乱流微細構造観測プロファイラーTurboMAP-G および太陽光発電によって推進をするソーラー水中グライダー実験機のグライディング性能の計測を実施した。また，主翼独立制御型水中グライダー実験機 ALEX の制御系設計を試み，運動シミュレーションの結果を昨年度の共同利用研究で得られた潜航試験と比較して，モデルの妥当性，有効性を確認した。

□実験方法

1．水中グライダーを組み立てた後，深海機器力学実験水槽において，乾燥重量および水中重量を計測し，浮力調整を行う。また，水中での機体の姿勢を調整する。
2．水中グライダーを潜航させて，そのときの加速度，深度，前進速度（対水速度）を計測して TurboMAP-G のグライディング性能を評価する。ソーラー水中グライダーは，照度計，深度計，電圧ロガーを搭載して，計測を行う。
3．さらに，水槽側面の観測窓からグライディングの様子をビデオカメラに録画して，機体姿勢角やグライディング角などを観測する。

□実験結果

● 第1回

実施日： 平成21年9月28日（月）～30日（水）
参加者： 有馬正和（大阪府立大学），山崎秀勝，国分祐作，Mark Duobell，Jeremy Bricker（以上，東京海洋大学）
実験内容： 本実験では，重心位置や主翼の取付角などを自在に変えることのできるグライダー型乱流微細構造観測プロファイラーTurboMAP-Gを用いて，グライディング性能の計測を行った。機体前部に搭載した加速度計，深度計，流速計データからグライディング性能（機体姿勢角，迎角，グライディング角）を推定することが可能であり，期待通りのグライディング性能を有することが確かめられた。

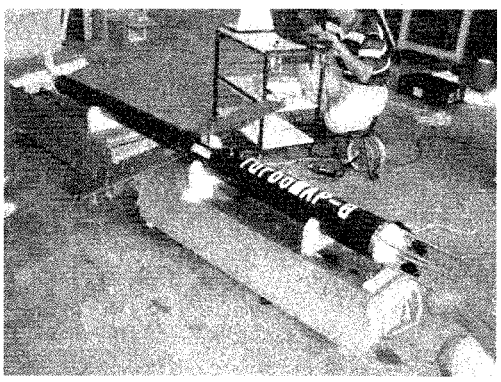


Fig.2 グライダー型乱流微細構造観測プロファイラー「TurboMAP-G」

●第2回

実施日： 平成22年 2 月 17日（水）～19日（金）
参加者： 有馬 正和，山田 智貴（大阪府立大学）
実験内容： 本実験では，太陽光発電を利用して推進する「ソーラー水中グライダー」実験機を用いて，グライディング性能を調査した。① ソーラー水中グライダー実験機の浮力調整を行った後，② 照度計，深度計および電圧ロガーを搭載してグライディング性能の計測，及び ③ 実験環境の計測（照度，深度，水温）のプロファイルを計測した。本実験機は，固定翼型機であるが，滑らかな潜入・浮上を実現するためには，主翼を動かすことのできる「主翼制御型水中グライダー」が有効であることが明らかとなった。

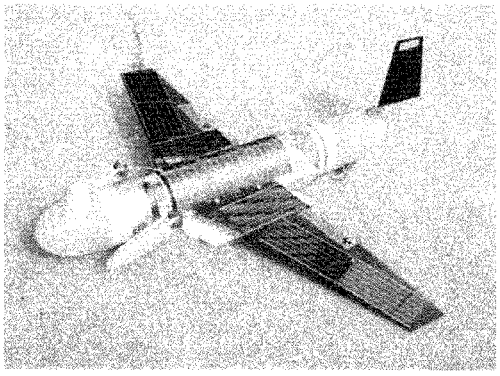


Fig.3 ソーラー水中グライダー実験機

□研究成果報告

- M.Arima, H.Yamazaki: Development of the Glider-type Turbulence Ocean Microstructures Acquisition Profiler, TurboMAP-G, Procs. of the Twentieth (2010) International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE2010), (2010). (投稿中)
- 有馬 正和：ソーラー水中グライダーのフィージビリティスタディ，平成22年日本船舶海洋工学会春季講演会，(2010). (投稿中)

□研究組織（教員のみ）

氏　名	所　属	職名／学年	役割・担当分野
有馬 正和	大阪府立大学・大学院工学研究科	准教授	代表者・総括，システム計画
山崎 秀勝	東京海洋大学・海洋科学部	教授	海洋環境観測ロボットの開発
石井 和男	九州工業大学・生命体工学研究科	准教授	水中ロボットの自律制御
中村 昌彦	九州大学・応用力学研究所	准教授	所内世話人

水中ビークルの投入・回収法に関する研究

長崎大学・水産学部　　吉村　浩

1. 目的

近年、海洋観測・調査用の海中ビークルは、専用の母船を必要とする大型の物から、専用の母船を必要としない小型のものまで数多く作られ、実用的な段階へと入りつつある。しかしながらこれらのビークルの投入・回収作業は困難を極めているのが現状である。特に、技術者の支援を必要とせず、海洋物理の研究者が比較的容易に海洋観測に使用できる、中、小型のビークルは、専用母船、すなわち専用の母船に装備された投入・回収装置を持たないため、作業がいっそう困難なものとなる。そこで本研究では、ビークルを損傷することなく、波浪中で、安全にビークルを投入・回収できる方法を確立することを目的とする。今年度は円盤型水中グライダーを用い、主として、ビークルが浮上しなかった場合の回収方法について検討した。

2. ダイバー支援による水中ビークルの回収

2009年4月、6月、10月、11月、鹿児島湾内(Fig.1)、長崎県高島海域（Fig2）において、長崎大学水産学部附属練習船長崎丸（総トン数 842 トン)、九州大学応用力学研究所で開発中のバーチャルモアリング用海中ビークルを"BOOMERANG"使用してビークルの投入・回収試験、動作確認試験が行われた。

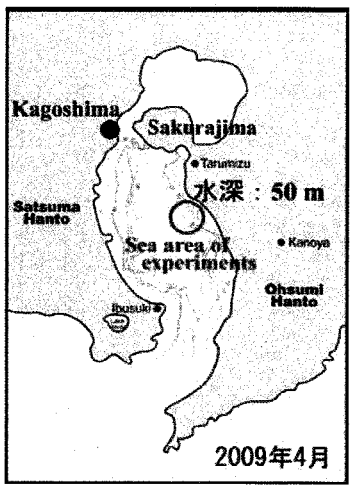


Fig. 1　試験海域（鹿児島）

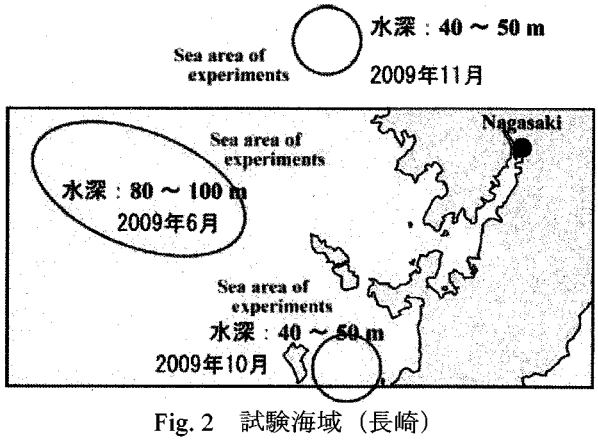


Fig. 2　試験海域（長崎）

2009 年 4 月、6 月、11 月の実験では本研究で提案した方法によりビークルが回収されたが、10 月の実験ではビークルが浮上せず、ダイバーによるビークル捜索、回収が行われた。SSBL を使用したビークル捜索、回収方法は次節の通りである。

2. 1 ビークルの捜索

ビークルの位置はSSBLにより計測されているので、ダイバーがその位置に潜水すれば理論的には発見可能であるが、計測される絶対位置は誤差が大きいため実際には不可能である。

そこで、ダイバーも小型のトランスポンダーを持って潜水し、ビークルとダイバーの位置が一致するように、水中送話器でダイバーの進む方向を指示するのが得策である。絶対位置は誤差を含むが相対位置関係の誤差は小さいと考えられるからである。

通常の装備では 50m水深での潜水作業可能時間は 13 分程度であるので、捜索範囲を縮めるため、実際には以下の方法が取られた。

1）SSBL による計測精度を上げるため船体に取り付けられるSSBL送受波器を操船を考慮し最適位置に移動

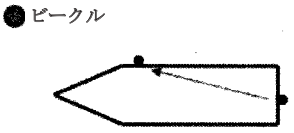


Fig. 3　SSBL 送受波器を最適位置に移動

2）2 つのトランスポンダーの深度が近いほど相対位置精度が高いため、ダイバー用トラポンを海底近くに作業艇より吊り下げ、相対位置を監視しながら作業艇をできるだけビークルに近づける。



Fig. 4　作業艇を使用したビークル位置の絞込み

3）ビークルに搭載されたトランスポンダーの位置とダイバーが持ったトランスポンダーの位置が重なるように、水中送話器でダイバーの進む方向を指示

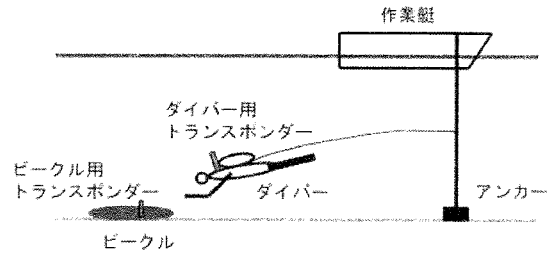


Fig. 5　ダイバーによるビークルの操作

2. 2 ビークルの回収

ビークルの回収作業は次の通りである。

1）ビークル金具にロープを繋ぎ、ダイバー浮上

2）ロープ端を作業艇から母船に移し、ロープを巻き取ることによりビークルを海面に浮上させる

3）ダイバー支援によりビークル吊り上げ準備

4）母船クレーンにてビークル回収

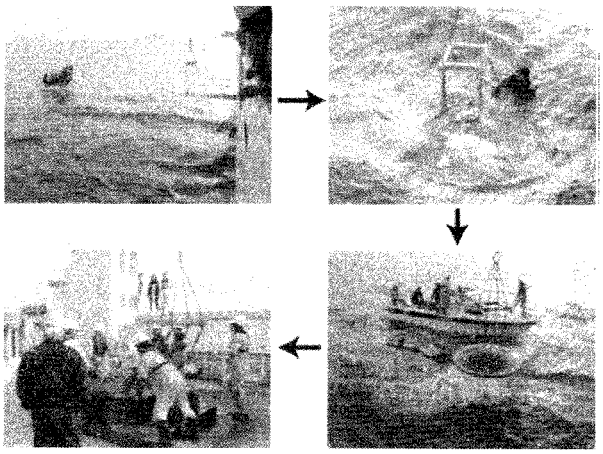


Fig. 6　ビークルの回収

本方法はダイバーの通常装備での潜水可能深度50mを超えると使用できない。水深100m海域でビークルにトラブルが発生した場合は、緊急切り離し装置の作動を待ち、浮上したビークルをビークル投入・回収用ケージにて、回収することになる。

3. 水中ビークルの投入・回収に関する情報収集

操船シミュレーターを開発した海上技術安全研究所を訪問し、シミュレーターがビークルの投入・回収作業のような特殊な操船にも使用できるかどうか意見交換を行った。また、レーダーシミュレーターを開発した日本無線を訪問し、ビークル運用中の他船監視について技術者・研究者と意見交換を行った。

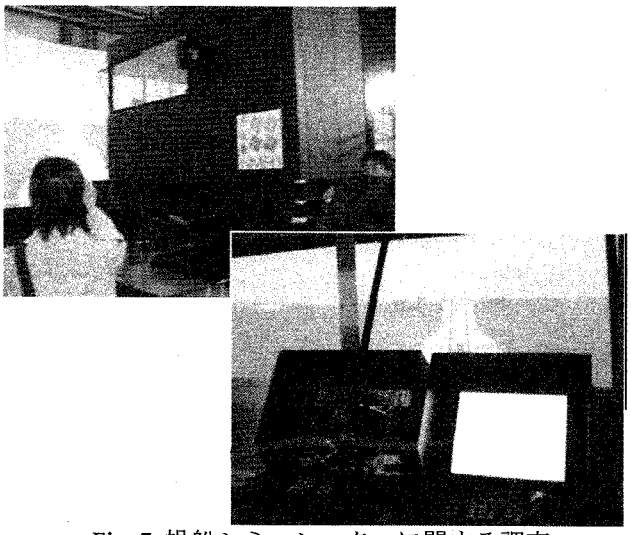


Fig. 7 操船シミュレーターに関する調査

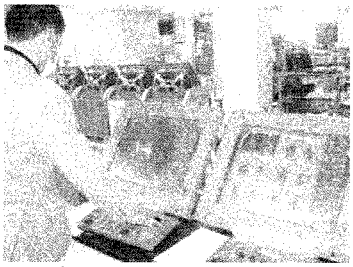


Fig. 8 レーダーシミュレーターに関する調査

4. 研究成果報告

中村 昌彦、小寺山 亘、稲田 勝、吉村 浩、兵頭 孝司、円盤型水中グライダーによる海洋観測、第 11 回「運動と振動の制御」シンポジウム（MoViC2009）講演論文集、2009、pp.238-243

5. 研究組織

・研究代表者：吉村浩（長崎大学水産学部教授）

・研究協力者：森井康宏、山脇信博（長崎大学水産学部准教授）清水健一、木下宰、内田淳（長崎大学水産学部助教）
中村昌彦（九州大学応用力学研究所准教授、所内世話人）

グライダー型海中ビークルの自律化に関する研究

九州大学大学院工学研究院　山口　悟

1. 研究の目的

近年、水産資源にかかわる食料問題として、乱獲による魚の個体数の極端な減少や魚種の絶滅などが懸念されている。このため、漁業は資源略奪型の「とる漁業」から資源管理型の「つくり育てる漁業」へと変遷を遂げつつあり、その実現のためには水産資源を管理するための設備と、これに蝟集する魚の個体数や魚種などを調査するモニタリング装置が必要となる。現在のところ、モニタリング装置としては調査船やROV（Remotely Operated Vehicle）等が用いられているが、広範囲かつ長時間の調査を効率よく実施するためには、これらの手法は不向きであると言える。

以上のような背景に基づき、本研究では水産資源量の新たなモニタリング装置として、グライダー型海中ビークルの開発を実施した。グライダー型海中ビークルは、スラスタを用いず機体の浮力を調節することで潜降・浮上を繰り返し行い、水中をグライディングにより航行するAUV（Autonomous Underwater Vehicle）である。この推進方法は、高いエネルギー効率と静粛性を有するため、長時間連続の水産資源量調査に有効であると考えられる。本年度の研究においては、水産資源量調査用のグライダー型海中ビークルの機体の開発を行い、その運動性能を調査した。また、複数の浮力調節装置を用いて機体の運動を制御し、その安定化を図るとともに、実海域における調査の有効性を、数値シミュレーションにより検討した。

2. 水産資源量調査用グライダー型海中ビークルの概要

水産資源量調査の対象となる海域は潮流や湧昇流などの外乱が存在し、機体の運動に大きな影響を及ぼすことが想定される。また、海藻類や漁網、鋼やコンクリート製の人工魚礁が機体に接触し、運転の障害となることも考えられるため、このような環境下でも安定して航行できる能力を有する機体が必要となる。今回開発した水産資源量調査用グライダー型海中ビークルの写真を図1に、機体の耐圧殻内部に設置された浮力調節装置を図2に、機体の主要目を表1に示す。

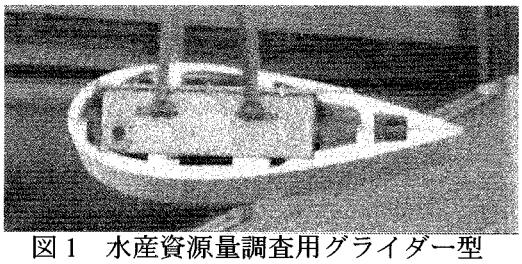


図1　水産資源量調査用グライダー型海中ビークル

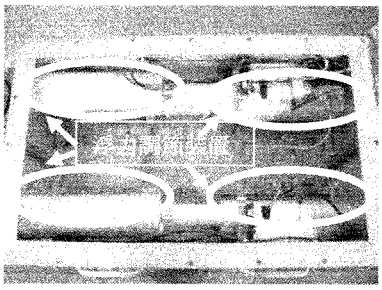


図2　浮力調節装置

表1　機体主要目

Length (m)	1.000
Breadth (m)	0.356
Height (m)	0.300
Weight (kg-f)	62.6

機体の形状は断面がNACA0030の翼型であり、障害物の影響を受け難くするため主翼と尾翼は有していない。このため、本機体の縦方向の運動は動的に不安定となる。ここでは、機体に搭載された4台の浮力調節装置を制御することにより、機体のピッチング運動の安定化を図るものとした。

浮力調節装置は空気室とリニアアクチュエータより構成されており、機体前方、後方に2台ずつ計4台設置されている。空気室内には筒状のジャバラが設置されており、これの端部をリニアアクチュエータの可動部分に固定する。リニアアクチュエータが前後方向に作動することでジャバラが膨張・収縮し、空気室内の浮力を調節することができる。機体は水中重量の変動に伴い潜降・浮上運動を行うと共に、

各浮力調節装置を独立に作動させて機体のピッチ角やロール角の制御が可能となっている。

3. 数値シミュレーション

開発した浮力調節システムによる姿勢制御の有効性と実際の水産資源量調査における機体運動について検討するため、機体運動の数値シミュレーション計算を実施した。計算条件として、機体正面より流速約 0.2m/sec の流れを受ける場合を仮定し、海表面から潜降を開始した後、水深 20m まで潜降し、再度浮上する際の計算を行った。潜降中は機体のピッチ角を-5 度（頭下げ）に、浮上中は+5 度（頭上げ）になるように設定し、浮力調節装置の制御方法としては LQI コントローラを採用した。シミュレーション結果の一例を図 3 と 4 に示す。これらの図はそれぞれ、機体の前進距離の時刻歴とピッチ角の時刻歴を表している。実線は静水中の計算結果を、鎖線は流れの中での計算結果を示している。今回計算で外乱として用いた流れの速度においては、LQI コントローラによるピッチングの安定化により、外乱下でも安定したグライディングが可能であり、ピッチ角を一定に保ったまま航行できることが確認された。また、潜降時の機体の運動特性は、水槽実験によっても確認された。

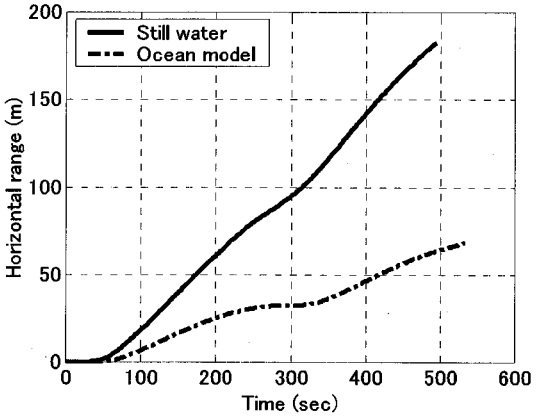


図 3　前進距離の時刻歴

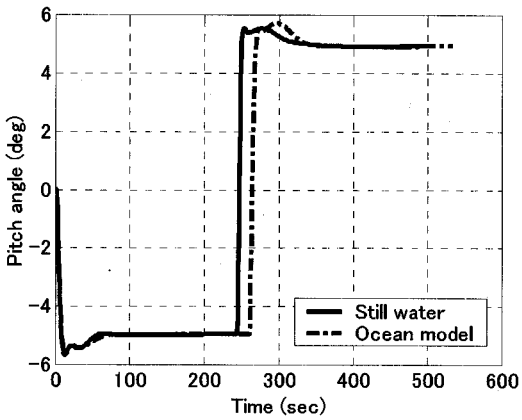


図 4　機体ピッチ角の時刻歴

4. まとめ

水産資源量調査用グライダー型海中ビークルの機体開発を実施し、その運動性能について検討を行った。開発された機体の運動は、水平尾翼を有していないことにより動的に不安定であるため、機体に搭載した 4 台の浮力調節装置の制御に LQI コントローラを適用することによって、機体のピッチングの安定化を図った。その結果、流れの外乱が存在する海域において機体は安定した潜降・浮上運動を行い、ピッチ角の指令値を維持出来ることが数値シミュレーションにより確認された。

5. 研究成果報告

水産資源量調査用グライダー型水中ビークルの機体開発について

日本船舶海洋工学会講演会論文集第 9W 号 pp.37-40（平成 21 年 11 月）

著者　内藤誉、山口悟、須本祐史

水中ロボット開発手法を応用した絶滅海生爬虫類の復元

北海道大学大学院 理学研究院 西 弘嗣

目的

絶滅動物の動き方やその性能は化石として直接的に残るものではなく，化石の形態情報から復元しなくてはならない．通常，この復元は現生動物の形態と運動の関係を元に類推して行われるが，特異な形態をした絶滅動物の場合には現生動物は参考にならないため，類推のための材料を工学的手法により用意しなくてはならない．特に，遊泳性の動物を復元する場合には，流体工学的な手法を駆使する必要がある．本研究は，絶滅した遊泳性の爬虫類である長頸竜類 (plesiosauria) について，その遊泳能力を復元模型の特性として定量することを目的として行った．なお，前年度までの研究では，その等速度運動時に作用する流体力とそれによる静安定性を求めており，本年度の実験では加速度運動時の挙動を扱った．

方法

長頸竜類の復元模型を水槽中で強制的に動揺させ，その際に模型に作用する力とモーメントの測定を行うことで，付加質量力を測定した．座標系を図 1 のように定め，運動を前進，上下揺，縦揺に限る場合，模型に作用する慣性力と付加質量力は以下のように表現できる：

$$F_x = -(A_{11} + mx_G)\dot{q} - (A_{35} - mx_G)q \quad \ldots (1)$$

$$F_z = -(A_{15} + mz_G)\dot{q} - (A_{33} + m)\dot{w} + (A_{11} + m)uq + (A_{35} - mx_G)q^2 \quad \ldots (2)$$

$$M_y = -(A_{53} - mx_G)\dot{w} - (A_{55} - I_{yy})\dot{q} + (A_{35} - mx_G)uq - (A_{11} - A_{33})uw \quad \ldots (3)$$

ただし m, $(x_G, 0, z_G)$, $(x_B, 0, z_B)$ はそれぞれ模型の質量，重心位置，浮心位置である．この式中の係数 A_{ij} を定量した．

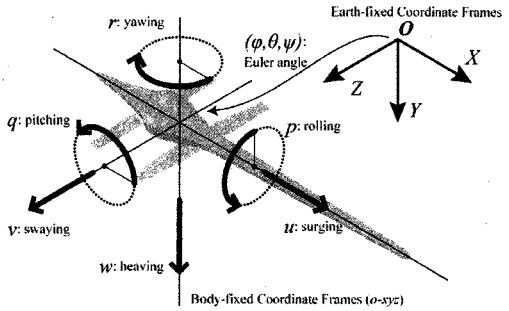


図 1. 座標系.

模型は，長頸竜類 *Hydrotherosaurus alexandrae* の形状に基づき，タンデム翼のグライダーとして製作した．模型の縮尺は 1/4 である．胴体は全長 2.1 m，細長比 9.2 の回転体とし，その後部に翼幅約 0.8 m，翼型 NACA0020 のテーパー翼を 2 対装備する．模型の質量は 16.1 kg，慣性モーメントは 0.310 kg m^2，重心は胴体の軸上，前翼の前縁近傍に位置する．

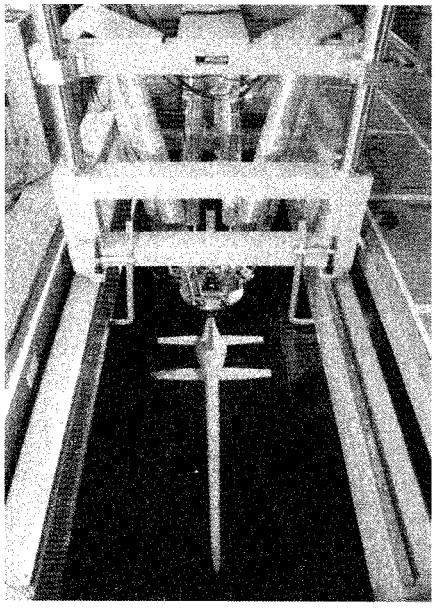


図 2. 模型とパラレルメカニズム.

強制動揺装置には，パラレルメカニズムを用いた．模型とパラレルメカニズムの接続箇所（模型の胴部，重心より後方 0.2 m）に分力計を設置し，流体から模型に作用する力とモーメント（3 軸 6 成分）を測定した．

模型は，胴体直径の 3 倍の深さ（0.6 m）を曳航した．ヒーブ運動の振幅は 4 cm，ピッチ運動では 4° と 7° とした．両運動とも

角速度を 1.0~3.2 rad/s (0.2 rad/s 間隔), 曳航速度を 0, 0.5, 1.0 m/s で条件を揃えた. このとき, Reynolds 数は 1.0×10^6~2.1×10^6, Strouhal 数 (St) は 0.33~2.1 である.

一連の実験では, 深海機器力学実験水槽を利用した.

結果と考察

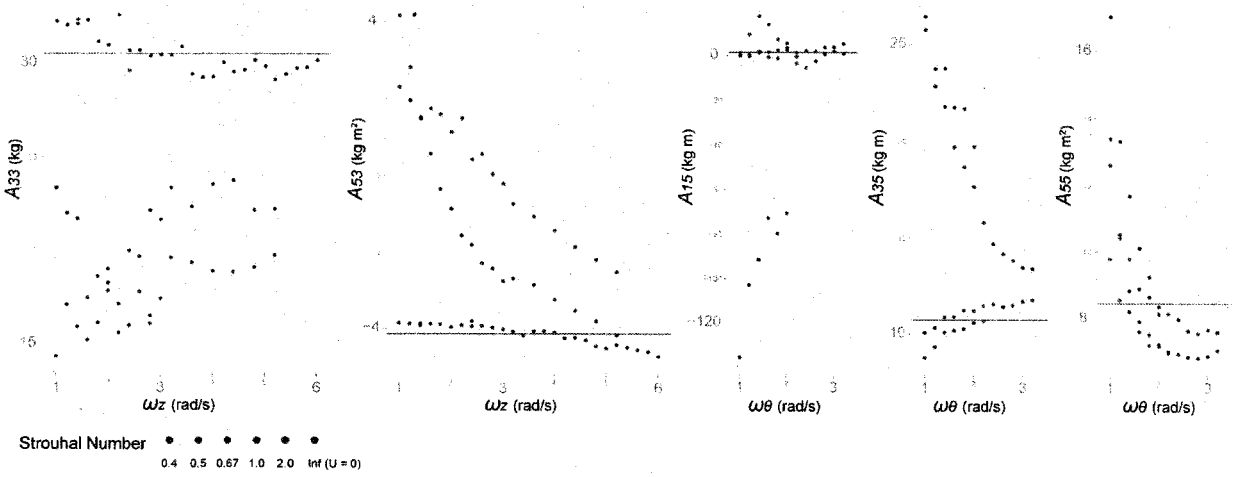


図 3. 付加質量係数

ヒーブ運動に対し生じる z 軸方向の付加質量 A_{33} は, 頭側への速度がない場合にはおよそ 30.5 kg である. 頭側に等速度運動する場合には, この付加質量は小さくなる. y 軸に関する付加慣性乗積 A_{53} は, 頭側への並進速度がない場合には-4.14 kg m で, 速度がある場合, 振動の角周波数が小さいほど大きな値となる. 式 (3) より, 腹側への加速度に対し, 頭を上げるような見掛けの慣性力が作用することがわかる.

ピッチ運動に対する x 軸方向の付加慣性乗積 A_{15} は, 頭側への速度がない場合には平均 1.61 kg m である. 速度がある場合にはその傾向が異なり, 特に 1.0 m/s で曳航した場合の傾向に基づくと, 式 (3) より, 頭を上げるような角加速度に対し, 頭方向の見掛けの慣性力が生じる. A_{35} は, 頭側の速度がない場合には, 縦揺れの角速度が大きいほど大きく, 振幅が大きいほど小さいという傾向であった. 速度がある場合には, 静止状態より大きい値であり, 角速度が大きいほど小さくなるという傾向であった. y 軸回りの付加慣性モーメントA_{55} は, 頭側への速度によらず縦揺れの角速度が大きいほど小さくなる傾向が認められた. 速度がない場合には 7~10 kg m² 程度の値であり, 0.5 m/s ではより小さく, 1.0 m/s では大きな値となった. この値は模型の慣性モーメントより一桁大きく, ピッチ運動に強いダンピングが生じることを示唆する.

今後の計画

これまでに得られた各種の流体力係数に基づき, 水中滑空時の姿勢制御が四肢によりどのように行われていたかを検討する. また, 本実験で扱った動物のみならず, 生物種ごとの体型の違いと遊泳性能 (流体力係数) の対応関係を整理することを中心に実験を進める.

研究組織

西 弘嗣　(研究代表者, 北海道大学大学院 理学研究院)

中村 昌彦　(所内世話人, 九州大学 応用力学研究所)

望月 直　(研究協力者, 北海道大学大学院 理学院)

可変ベクトルプロペラを用いたハイブリッド型海中ロボットの運動制御に関する研究

佐世保工業高等専門学校電気電子工学科　長嶋　豊

1．目的

近年、世界的な気候変動に伴って海洋環境が大幅に悪化し、水産資源の激減が重大な問題となっている。このような状況の原因解明に海中ロボットへの期待が一層高まっており、様々なロボットが開発されている。我々は可変ベクトルプロペラ 1 個のみ搭載した小型、軽量、コンパクトな海中ロボットの研究を推進してきた。表層域における環境調査等には遠隔操縦型 ROV として使用し、浅海域用には自律型 AUV として使用できるハイブリッド型海中ロボットをめざしている。ハイブリッド化により、操縦者の負担軽減や調査効率の改善を図りたいと考えている。今年度は以下の内容について取組んだ。

(1)ハイブリッド型海中ロボット用制御基板を新たに設計製作する。

(2)ROV 操作時のマンーマシンインターフェースの向上を図り、操作性の高いコントローラを開発する。

(3)UROV 時には光ケーブルを使用していたが、頑健性を図るために同軸3チャンネルケーブル方式を開発する。

(4)PLD(Programmable Logic Device)を用いた測距/測位システムを開発し、評価実験を行う。

(5)PID 制御方式の各種パラメータを検討し、昨年度よりも航行性能の改善ができるか検討する。

性能評価実験を本校水槽及び貴学深海機器力学実験水槽で実施し、良好な結果が得られたので報告する。

2．ハイブリッド型海中ロボットシステム構成

ハイブリッド型海中ロボットとして、無線を経由して WROV(Wireless ROV)と UROV (Untethered ROV) 及び AUV に切替え可能である（図１）。

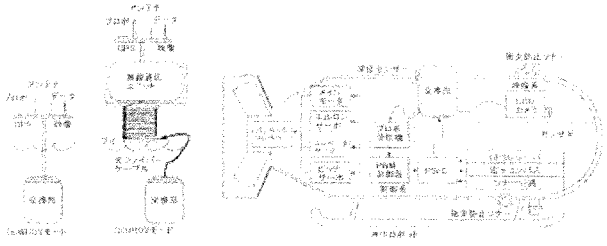


図１　ハイブリッド型海中ロボットシステム構成図

図２に WROV 時の海中ロボットを示す。

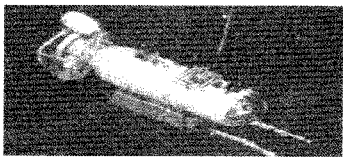


図２　海中ロボット外観写真

本研究では、AUV モードでの操作量を自動的に求める方法として PID 制御を採用した。PID 制御は目標値と測定値の差に比例した操作量を出す比例（P：Proportional）動作に加えて、積分（I：Integral）動作、微分（D：Derivative）動作を組み合わせたフィードバック制御である。マイコンにより離散的なデータを扱う場合には、PID 制御の出力 Mn は（1）式により出力され、ブロック線図は図３のように表される。

$$M_n = Kp\left(E_n + \frac{1}{T_I}\sum_{i=0}^{n} E_i \Delta T + T_D \frac{E_n - E_{n-1}}{\Delta T}\right) \quad (1)$$

ただし、Kp は比例ゲイン、T_I は積分時間、T_D は微分時間、Mn は現在の操作量、ΔT はサンプリング時間、En は現在の偏差、En-1 は一つ前の偏差である。この式を用いて方位の偏差からヨーの操作量、深度の偏差からサージの操作量を求める。

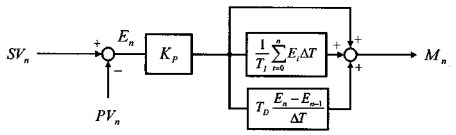


図　３　PID 制御のブロック線図

3．実験結果及び考察

(1)ハイブリッド型海中ロボット用制御基板

ペイロードを増やし、制御部の小型化、高信頼化を図るために新たに基板を設計製作した（図４）。

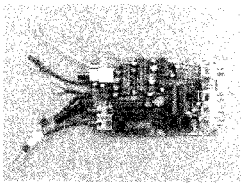


図４　小型化制御基板

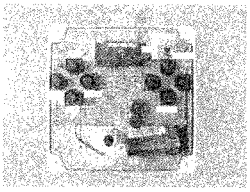


図５　専用コントローラ

(2)ROV 操作用コントローラの開発

ROV モード時の操作性を考慮して専用コントローラを図５の通り新たに設計製作した。3 系統の CCD カメラを切替え、追加用の昇降スラスタの制御も使用できる。

(3)光ケーブルの頑健化

光ケーブルは曲げや折れに弱いために、本年度は同軸ケーブル化により頑健性を向上させた。映像・音声信号変換器を利用してロボット制御、センサデータ、映像の3系統を符号化して伝送できるように工夫した。さらに、映像にはコンパスデータの方位、傾斜角、カメラ位置を字幕化して操縦者の負荷軽減を図った。

(4)PLD を用いた測距/測位システムの開発

ミッション時は支援船と海中ロボット間の距離や方位は重要である。本年度は PLD を用いた小型測位システムを試作し評価実験を行った。図６に超音波を送信してから、受信し、測位するシステム概要図を示す。

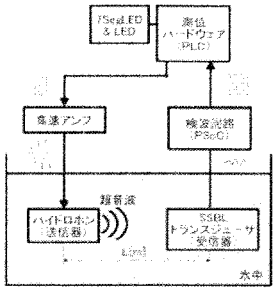


図６　測位システム概要図

本年度試作した測位ハードウェア部の詳細な回路ブロック図は図７に示す。50kHz を用い、送波側ハイドロホンを水平方向に移動させた距離と方位の測定実験を行った結果を図８に示す。測位結果から、最大で距離 8.91cm、角度 5.9 度の誤差を含む結果が得られた。

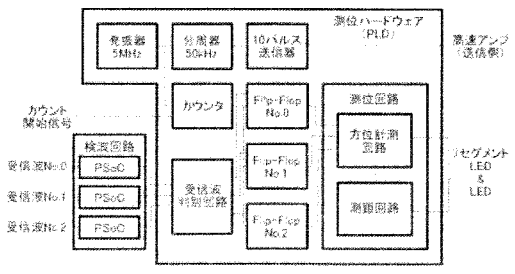


図７　測位ハードウェアブロック図

(5)PID 制御方式のパラメータ改善

パラメータを変化させた方位の自律航行は昨年度とほぼ同様に良好な結果が得られた。

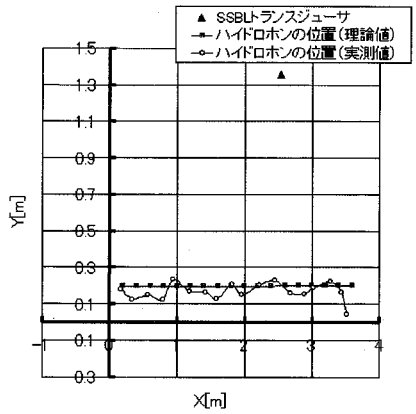


図８　水平移動時の測位結果

深度の自律航行はバリベックプロペラの出力と浮力の関係から改善に至らなかった。来年度はロボット本体を傾斜した場合等を試みる予定である。

４．結論

本年度は特にコンパクトなハイブリッド型海中ロボットのＲＯＶモード時のコントローラや搭載する制御基板の設計製作及びケーブルの頑健性の向上等に取り組んだ。更に、海中ロボット運用時に必要な測位システムにＰＬＤデバイスを適用して小型化、高信頼化を試みた。ＰＩＤ制御用の深度パラメータに関しては十分な改善ができなかったので、次年度検討を行う。

最後に，本研究を推進するにあたり、九州大学応用力学研究所中村昌彦准教授には有益なご助言やご指導を頂きました、実験では稲田勝技術室長にたいへんお世話になりました深く感謝いたします。

５．研究成果報告

長嶋豊、杵島暁、山下勇輝、山下一真：バリベックプロペラを用いたコンパクトなハイブリッド型海中ロボットの開発、機械学会ロボテクス・メカトロニクス講演会（ROBOMEC09)、1P1-B05、2009.5

６．研究組織

・研究代表者：長嶋豊,佐世保高専電気電子工学科教授
・研究協力者：下尾浩正,同校電気電子工学科助手
・同上：木村昌生,佐世保高専電気電子工学科５年
・同上：滝川大介,佐世保高専電気電子工学科５年
・同上：山口拓朗,佐世保高専電気電子工学科５年
・所内世話人：中村昌彦,九州大学応力研准教授

次世代海中ビークルに働く流体力に関する研究

独立行政法人海洋研究開発機構　海洋工学センター
先端技術研究プログラム
百留　忠洋

研究目的：

地球温暖化の原因究明には海洋観測が不可欠であり、広い海域で効率よく大量に精度のよい海洋データを取得する為には水中ビークルが有効な手段である。また、海底資源探査にも水中ビークルの運用が期待されている。これら水中ビークルを限られたエネルギー源で可能なだけ広範囲の調査・観測を行わせるためにはエネルギー効率のよい航走ができる低流体抵抗の機体を設計する必要がある。

そこで機体に働く流体力、アクチュエーターが発生する流体力を試作模型による水槽試験で計測し、機体設計や制御系設計にフィードバックする。

方法：

精密な海底面調査のためには、超音波による計測が主であり探査幅を一定にして計測データに欠落がないようにするためには、ビークルに対し深度制御や高度制御を施し音響計測の品質を良好にする必要がある。このようなビークルの運動制御を行う場合、ビークルをモデル化し、そのモデルを基に制御系を設計することで高度な運動制御が可能となる。制御設計のための基礎となる数式モデルの精度を向上するためには、水槽実験や実海域において動特性試験を実施しビークルに働く流体力を求め、数学モデルと実データとでシステム同定する必要がある。

現在 JAMSTEC では次世代巡航型水中ビークル開発に向けた要素技術の研究開発を行っている。本年度は、右図に示す構想図のような水中ビークルを想定し、機体にかかる流体力について CFD を利用した数値解析を行った。その結果、巡航速力 4 ノットにおいて Cd=0.108 との値を得た。この数値解析結果の妥当性を検証するため模型を作成し流体力試験を行った。

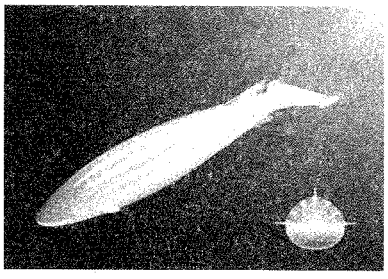


図　次世代巡航型水中ビークル

成果報告：

1. The 18th International Offshore (Ocean) and Polar Engineering Conference
タイトル：Maneuverability Experiment of AUV

水中マニピュレータを有する自律型水中ロボットの開発
Development of an Autonomous Underwater Vehicle with Underwater Manipulators

石井和男　Kazuo ISHII
九州工業大学大学院生命体工学研究科 Kyushu Institute of Technology

1　はじめに

海洋における科学調査や水中構造物の建設・管理，海難事故における人命救出・汚染物質の流出防止，サルベージ作業の補助等，水中機器・水中ロボットに対する期待は非常に大きい．科学的な見地からも，巨大なバイオマスを有しながら未発見の生物種であったアーキア発見にみられるような新たな生物／遺伝子の発見や原始地球環境の解明等，海洋のメカニズムの解明できれば地球物理学・生物学への寄与が非常に大きい．

その環境情報プローブである水中ロボットの開発は，日本では東京大学生産技術海中工学研究センターや JAMSTEC 等の限られた研究機関において精力的に研究開発が進められているが，北米や欧州に比べ少なく圧倒的に研究の裾野が小さい．自律型水中ロボット（AUV）の開発により，科学的な調査活動に加え，複数の AUV を用いた広範囲観測調査網の構築や海中からの不審者侵入の監視等，様々な活躍の場が期待される．東大生研・浦らによって開発された r2D4 は，インド洋沖やグアム沖において海底火山からのプルームの撮影に成功している．Woodshole 海洋研究所の ABE は中央海嶺の地場測定等に成功しており，AUV の有効性を示した．これらは海洋科学に大きく貢献しているが，大水深に潜航できるが規模が大きく手軽に運用できるロボットではない．マニピュレータを AUV 実機に搭載した研究例は Yuh や浦らごく少数であり，マニピュレータの自由度も少ない．シミュレーションによる研究でも，動特性や軌道制御を論じたものが大多数であり，マニピュレータを用いた具体的なミッションは今後の課題となっている．

著者らは，これまで研究者が手軽に使用できる小型軽量の水中ロボットの実現を目指して，水中ロボット AquaBox（Fig.1）[1]及び水中マニピュレータ（Fig.3）[2]を開発してきた．また，水中ロボットへのマニピュレータ搭載や動特性の変化，環境変化に適応可能な制御システムを提案してきた．

本論文では，これらを発展させ，実海域において水中作業が可能な水中マニピュレータの開発及び自律型ロボットへの搭載に関して研究を行った．また，海上保安庁の統計資料にあるように沿岸海域の水難事故が年々増加しており，マリンレジャーに伴う事故者数は昨年約 900 人程度であり過去 10 年間をみても増加傾向である．ここでは水中作業として，図３のコンセプトに示したように海浜域の水難事故を想定し，水中マニピュレータはある程度大きな物体（長さ 1 m 程度）の把持が可能な機構とする．開発したロボット及びマニピュレータについて報告する。

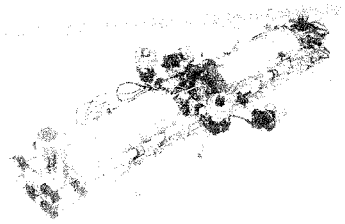


Fig.1 Underwater robot “AquaBox”

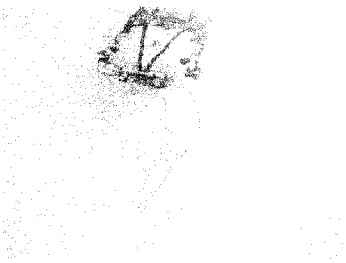


Fig.2 Underwater manipulator

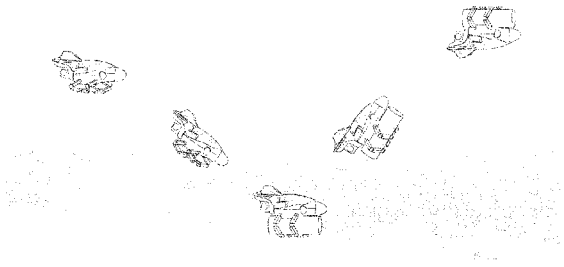


Fig. 3 Mission of underwater robot

2　水中ロボット DaryaBird 及びマニピュレータ

DaryaBird は (i) 2 人による揚収が可能、(ii) 高い保守性や管理性、(iii) カメラ映像による広い視覚範囲の確保、の 3 つのコンセプトに基づき開発した (Fig.4 参照)。DaryaBird の諸元を Table 1 に示す。(i)を満たすため、乾燥重量 30[kg] を目標として設計した。DaryaBird の外形は，アルマイト処理を施したアルミニウム製の耐圧容器と，スラスタ等を配置するためのフレーム構造より構成されている。乾燥重量 31.0[kg]を実現しており，2 人による揚収が可能である。(ii)を満たすため，2 つの耐圧容器は中央のミドルパーツで連結されており，更に外部機器と耐圧容器内部の回路とをつなぐコネクターを全て圧力容器中央部に集約して配置している．また，基板間を接続するケーブルを 2 セットのみで構成しており，耐圧容器開閉時の内部配線の損傷を減らしている．これにより，DaryaBird は高いメンテナンス性を実現した．(iii)を満たすため，パンチルト可能なネットワークカメラを装備している．このカメラは 115 度のチルト，340 度のパンが可能であり，動作させることにより前方 360 度の視野を確保している。

マニピュレータは器用さを追求する指先把持と，把握の頑丈さを追求する包み込み把握に分類することができる．指先把持とは指先のみで対象物に接触する方法である．これに対して包み込み把握とは手のひら全体で対象物に接触する方法で，関節個々にかかる負荷が減ることにより，アクチュエータへの負担が軽減する．

救助用マニピュレータが把持する対象は人であるため，対象を傷つけずに安全に把持しなければならない．したがって把持力を制御できる必要があり，加えて一部分に過剰な把持力がかからないことが必要である．また，水中で作業する機械はアクチュエータ数に比例して水密箇所が増大するため，複雑化する．そのためアクチュエータ数は少ない方が望ましい．把持力を制御するにはアクチュエータのトルク制御を行うなどして把持圧力を適当に調整する方法が考えられる．また，一部分に過剰な把持力をかけないためには対象に与える把持力を分散させる必要があり，ハンド部に弾性体をつけ，材質的な柔らかさに頼る方法が考えられる．対象に対して均等に力を分散させるには対象の形状に合わせて変化し，全体で均等な力によって把持する必要がある．以上の条件を満たすマニピュレータとして TAKO グリッパ[4]が提案されている。TAKO グリッパはモータ・ベルト・プーリからなり，モータに固定されたベルトはプーリに順々に巻かれ，最後にアーム先端に固定されている．根元のモータが回転してベルトを巻き取ると，モータとアーム先端間のベルトの距離が短くなり，アームが動作する．TAKO グリッパは、(i)物体の形状に合わせて把持が可能、(ii)マニピュレータを伸長させた状態で均一な把持力を実現、(iii)2 つのアクチュエータで 9 関節のアームを 3 つ駆動可能、等の特徴を有する。本研究では、TAKO グリッパの機構を参考にして，対象を把持した状態でも均一な把持力を実現できるマニピュレータを開発した．開発したマニピュレータを Fig.5 に示す。

3　結論

本研究では、水難救助を想定し、マニピュレータを有する自律型水中ロボットを開発した。自律型水中ロボット DaryaBird は、国内の水中ロボットコンテストで優勝する等の成果を挙げている。マニピュレータは陸上での動作試験を終えた段階であり、今後、水中ロボットへの搭載を行う予定である。

参考文献

[1]Yu Eriguchi, Kazuo Ishii, et. Al., "System Design and Control System of an Autonomous Underwater Robot "AquaBox"", 10th International AUV Competition Journal Paper, pp. KIT-1 to 9, 2007

[2]石塚誠,石井和男:マニピュレータを搭載した水中ロボットの開発 －動作シミュレーションとモジュール構造設計に基づく水中マニピュレータの開発・設計－ ,日本船舶海洋工学会論文集, Vol.6, pp.35 – 43, 2007

[3]西田周平,石井和男,古川徹生,水中ロボットにおける自己組織的行動獲得システム（第一報：自己組織化マップを用いた運動制御システムの提案）,日本船舶海洋工学会論文集, 第 3 巻, pp.205-213, 2006

[4]広瀬茂雄：生物機械工学,工業調査会,pp192-199,1987

受賞

AUVSI&NRL Autonomous Underwater Vehicle Competition2009 において Best Technical Award を受賞。

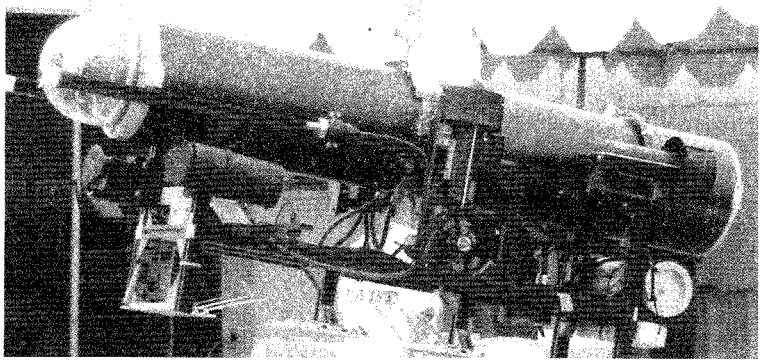


Fig.4 DaryaBird

Table.1 Specification of DaryaBird

Types	Autonomous Underwater Vehicle (AUV)
Dimensions	1044 x 351 x 457 [mm] (L x W x H)
Dry weight	31.0 [kg]
Sensors	Attitude, Compass, Depth, Velocity,
	Camera x2, 2axis gyro, 3axis acceleration
	Hydrophone x4
Equipments	Thruster x5, Laptop PC
	COG movement system
Batteries	Litium-Polymer Battery x1
	29.6 [V], 5350 [mAh]
Maximum depth	50 [m]

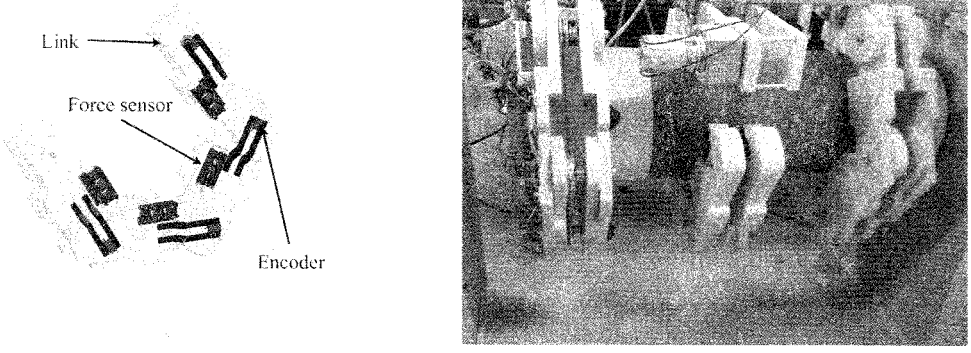


Fig. 5 3D CAD design and developed underwater manipulator

対馬海峡を通過する栄養塩輸送量の経年変動に関する研究

名古屋大学地球水循環研究センター　森本　昭彦

１．研究の目的

対馬海峡を通過し東シナ海から日本海へ輸送される淡水や栄養塩は、日本海の物質循環、特に生物生産に大きな影響を与えていると考えられる。本研究グループは、2005年より対馬海峡を横断する観測線において船舶観測を行い、対馬暖流流量、淡水流量、栄養塩輸送量を測定してきた。その結果、DIN（溶存態無機窒素）輸送量は夏季（7，8月）と秋季（10月）に多く、年間輸送量の2/3を占めることがわかった。経年変動に関しては、2007年夏季の栄養塩輸送量が2005年の1/3程度しかなく極めて大きいことが明らかとなった。

本研究では、船舶による対馬海峡東水道の物質輸送量観測を継続し実測物質輸送量データを蓄積するとともに、これまでの観測データを使い栄養塩輸送量の経年変動の要因を調べる。さらに、観測された水温と栄養塩データから水温 - 栄養塩の関係式を作成し、対馬海峡東西両水道を通過する栄養塩輸送量を見積り、その長期変動特性を明らかにすることを目的とした。

２．参加者

森本　昭彦	（名古屋大学　地球水循環研究センター）
滝川　哲太郎	（水産大学校　海洋生産管理学科）
鬼塚　剛	（水産総合研究センター　中央水産研究所）
渡邉　敦	（東京工業大学　情報理工学研究科）
李　雅利	（東京大学　海洋研究所）
三野　義尚	（名古屋大学　地球水循環研究センター）
千手智晴	（九州大学　応用力学研究所）
柳　哲雄	（九州大学　応用力学研究所）

３．研究成果の概要

３－１．海洋観測結果

2009年度も対馬暖流の流量がモニターされている日韓往復フェリーの航路上に8観測点を設け8，9，10，12月の計4回の海洋観測を実施した。各観測点では、CTDにより水温、塩分、蛍光強度、溶存酸素、光合成有効照度を測定した。また、標準層において採水を行いクロロフィルa、栄養塩、溶存酸素の分析を行った。航行中、船底に搭載されたADCPにより流速鉛直分布を1分間隔で測定した。これらのデータを使い各観測時の対馬海峡東水道の流量、淡水輸送量、栄養塩輸送量を求めた。東水道を通過した長江起源の淡水は例年に比べて少なく、溶存態無機窒素、リンも例年より少なかった。東水道に関しては、今年は黒潮系の水塊の影響を強く受けた水が流入していたと考えられる。

３－２．栄養塩輸送量の経年変化

2005～2008年に行った計23回の対馬海峡横断観測で得られた水温とDIN濃度のデータを使い、水温データからDIN濃度を計算するための線形回帰式を各月毎に作成した。混合層が発達する冬と春に

ついては両者の相関は悪かったが、5～11 月については良い相関が得られた。6, 8, 10 月の回帰式から推定した東水道の DIN 濃度と観測値との比較結果、各月とも相関係数は高く、RMSE は 0.56～1.43 μM であり、これらの月に関しては水温から DIN 濃度を十分推定できることが分かった。なお、西水道についても同様な結果を得た。

この回帰式を福岡県水産研究センター、韓国海洋科学院それぞれが長期間断面観測を行ってきた観測線の水温データに適用し、1970-2000 までの DIN 濃度の断面分布を求めた。また、千手ら(2007)により求められたこの断面での流速データを使い、東西両水道の DIN 輸送量を見積もった。図 1 に 1970～2000 年で平均した 6, 8, 10 月の DIN 輸送量を示す。東西両水道とも 6～10 月にかけて DIN 輸送量は増加していた。また、各月とも西水道の DIN 輸送量は東水道のそれの 3 倍程度であり西水道を通過する DIN が極めて多いことが分かる。

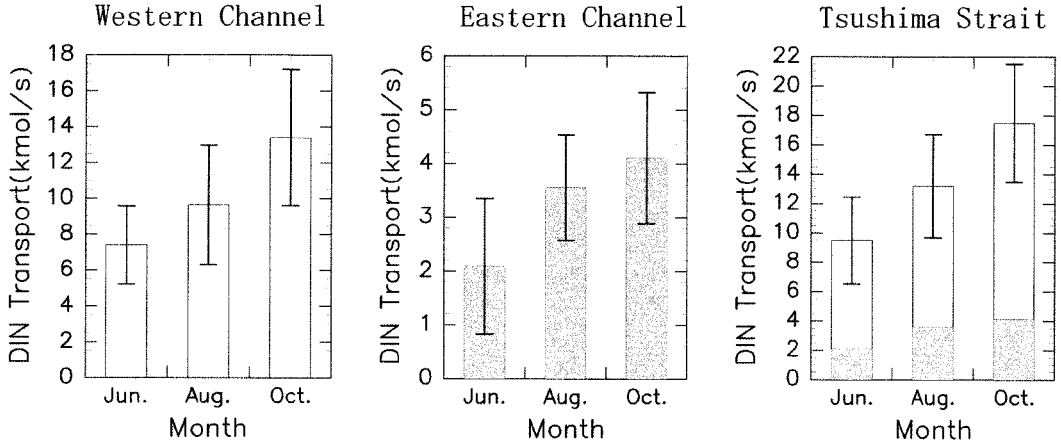


図 1．6, 8, 10 月の西水道（左図）、東水道（中央）、東西両水道（右図）の DIN 輸送量

図 2 に 1971～2000 年の 8 月の東西両水道の DIN 輸送量の経年変化を示す。両水道とも経年変化が大きいことがわかる。水道平均した DIN 濃度、流量、DIN 輸送量を比較した結果、DIN 輸送量の経年変化は DIN 濃度の変化によるものであることがわかった。さらに、DIN 輸送量の多い年と少ない年に分け水温、塩分断面のコンポジット解析を行ったところ、東西両水道とも DIN 輸送量の多い年は少ない年に比べ、下層の水温が低く、上層の塩分が低下する傾向があることがわかった。このことは、下層の低温水の出現と長江起源の淡水の分布との間に何らかの関係があることを示唆している。

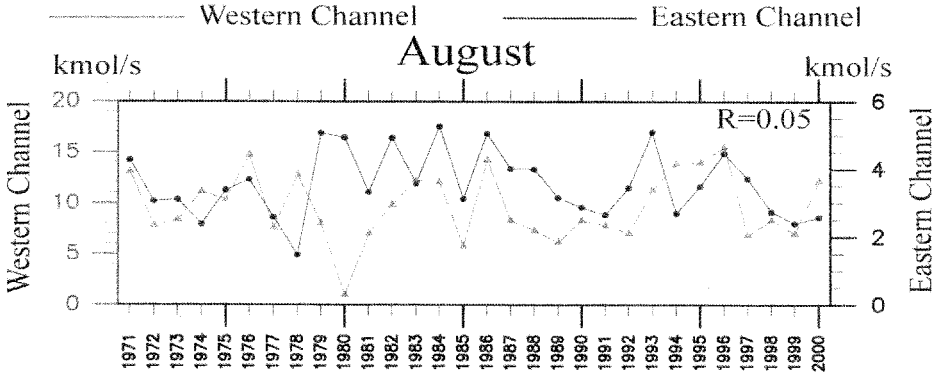


図 2．東西水道を通過する DIN 輸送量の経年変化

海産ベントス浮遊幼生の輸送過程に関する数値シミュレーション

長崎大学水産学部　玉置昭夫

・目的

多くの海産ベントスは生活史初期に浮遊幼生を放出する．エスチャリに棲む十脚甲殻類では，内部陸棚水域に幼生が急速に輸送されてそこで発育し，ポストラーバが成体の生息地に逆輸送されるパタンがよくみられる．これらの水平輸送経路は幼生の鉛直移動と水流の鉛直構造により決定されている．内部陸棚水域における昼夜と潮位の変化に同調した幼生の鉛直移動パタンおよびそれが個体発生に伴ってどのように変化するのかについては，十脚甲殻類に限らずメロプランクトン全体でほとんど分かっていない．西九州・天草下島の北西端にある富岡湾の砂質干潟には地下深い巣穴に棲むハルマンスナモグリが高密度で生息しており，メタ個体群全体の 70 %の個体数を占めていると推定されている．幼生の主成育場所は，富岡湾西方の水深 60—70 m の天草灘である．本共同研究では，(1)過去に採集され保存されていたサンプルに基づき，ゾエア期 5 期とポストラーバ期から成る幼生の鉛直移動パタンを明らかにし，夏期の水柱の成層構造と関連づけること，(2)流速の鉛直構造のもとでの潜在的な輸送速度を見積もり，全齢期を通じて富岡湾に近い内部陸棚水域に幼生が保持されうること，を示すことを目的とした．

・調査方法と解析方法

2006 年 7 月末～8 月初めに，富岡湾干潟から 10 km 離れた水深 68.5 m の海域で長崎大学の練習船「鶴洋丸」を使い，多段開閉式プランクトンネット「モクネス」により，水深 60 m から 2 m までほぼ 10 m ごとに 10 分間の水平曳き採集を 3 時間おきに 36 時間にわたって行った．幼生のステージごとに濃度(個体数/濾水量)を求め，水深で重み付けられた平均生息水深を求めた．また，干潟から 7.5 km 離れた水深 65 m の地点で CTD 観測を行った．さらに，干潟から 5 km 離れた水深 61.3 m の地点で海底上 5 m に音響ドップラー流速計(Express-ADCP, Teledyne RD Instruments)を 2008 年 7 月末から 11 月初めまで設置し，水深 2 m・時間間隔 10 分ごとに流速を記録した．回収されたデータに最小二乗法による調和解析を施し，モクネス採集時の流速の鉛直分布を再現し，幼生の潜在的な輸送速度を見積もった．

・結果

2006 年の夏，天草灘の水柱は主に塩分躍層に起因して水深 22—24 m を境に上部混合層と下部混合層に成層化しており，密度躍層・クロロフィル *a* 極大層・水深 2 m の光量子束密度の 2 %値がこの水深に共通して観測された．25 時間の残差流では，東方成分が水柱全体で東向き，北方成分が水深 25 m を境に上部混合層が北(＝沖)向き，下部混合層が南(＝富岡湾)向きを示していた．昼夜を通して 87 %以上の幼生が水深 20—60 m 層に存在しており，潜在的に 1 日間で 1.3 km 富岡湾に向かって輸送(岸向輸送)されうると見積もられた．日没後の上げ潮時に，全ゾエア期の幼生が共通して急速に上昇し，潜在的に 3 時間で 1.4 km 向岸輸送されうると見積もられた(選択的潮汐輸送の可能性)．引き続く満潮時までには，これらの幼生は下降に転じていた．先行研究によると，富岡湾においても日没後の上げ潮に伴い，全ゾエア期の幼生が急に出現するが，これらは日の出までにはいなくなり，下げ潮により再び沖合に運ばれることが推定されている．天草灘におけるゾエア期幼生の鉛直移動パタンには個体発生に伴う変化も明瞭に認められた．ゾエア 1—2 期幼生は反転日周鉛直移動(正午頃に最浅層，真夜中に最深層に移動)を行っていた．ゾエア 4—5 期幼生は日没後の上げ潮時における上昇後，継続して下降していた．ゾエア 3 期幼生は 1—2 期と 4—5 期の中間的な移動パタンを示した．以上の過程を通して，ゾエア期幼生は天草灘と富岡湾を往復しながら，湾に近い内部陸棚水域に保持されることが示唆された．ポストラーバは通常型の日周鉛直移動を行い，潮位変化にかかわらず夜間中，水柱全体に存在していたのに対し(平均生息水深は 20–25 m)，昼間は海底を含む水深 60 m 以下の層に存在していると推定された．先行研究によると，夜間のみの出現パタンは富岡湾内でも認められ，干潟への回帰につながっていることが示唆されている．

・考察

本研究の結果は，エスチャリから外海へ幼生が輸送されるタイプの十脚甲殻類の生態学的研究に 2 つの重要な示唆を与えるだろう．(1)これまで，内部陸棚水域に幼生が輸送されて発育することの適応的意義はよく分かっていなかった．夏期の温帯域における水柱の成層化は残差流の鉛直構造・クロロフィル *a* の極大層の分布・光の減衰度と密接に関連しており，(a)下部混合層が提供する安定した水温・塩分環境，および紫外線と視覚に頼って摂餌する捕食者からの隔離が幼生にとって有利である，(b)初期ステージの幼生が食物として必要とする植物プランクトンとおそらくそれに付随して分布している微小動物プランクトンなどが反転日周鉛直移動と関係している，(c)岸向きの残差流と上げ潮流をうまく利用して成体の生息場所からあまり離れずに沖合に保持される，ことにより幼生の生残と成体個体群への回帰が保証されているのではないかと考える．(2)最近の海産ベントス・メタ個体群動態の研究では，以前に想定されていたよりも親個体群への自己回帰率が高い可能性が強調されだしている．しかし，幼生の水平輸送過程に影響を及ぼす内部陸棚水域における鉛直移動パタンに関する先行研究のほとんどは通常型の日周鉛直移動のみを仮定しており，今後の検討が必要であろう．ハルマンスナモグリ幼生の輸送シミュレーションの結果はすでに Fujiie et al. (2006)に与えられている．しかし，幼生の鉛直移動パタンに関する前提には 3 つの大きな誤りがあることが今回判明した．すなわち，①ゾエア期幼生の鉛直移動パタンに齢期の進行に伴う変化を取り入れていなかったこと，② 潮汐に同調した昇降を取り入れていなかったこと，③低水温の下部混合層に対応した幼生の発育期間を組み込んでいなかったこと，である．今後の共同研究では，新たに発見された鉛直移動パタンを取り入れた幼生輸送の数値シミュレーションを実行する．また，ゾエア幼生の各齢期の経過日数を 3-4 日間から 4-5 日間に延ばす(後者の経過日数は，2009 年の夏季に室内飼育実験により特定した)．

引用文献： Fujiie, W., T. Yanagi, T. and A. Tamaki (2006) Numerical simulation for larval connection network of the ghost shrimp Nihonotrypaea harmandi population among intertidal sandflats in Tachibana Bay and Ariake Sound, western Kyushu, Japan. La Mer 44(1): 67-84.

・研究成果報告

(1)論文： Tamaki, A., S. Mandal, Y. Agata, I. Aoki, T. Suzuki, H. Kanehara, T. Aoshima, Y. Fukuda, H. Tsukamoto and T. Yanagi (2010) Complex vertical migration of larvae of the ghost shrimp, *Nihonotrypaea harmandi*, in inner shelf waters of western Kyushu, Japan. Estuarine, Coastal and Shelf Science 86(1): 125-136.

(2)学会発表：玉置昭夫・鈴木利一・Sumit Mandal・安形仁宏・塚本秀史・柳 哲雄 (2010) 天草灘におけるハルマンスナモグリ(十脚甲殻類)幼生の複合的鉛直移動．2010 年度日本海洋学会春季大会．東京海洋大学．3 月 29 日．

・研究組織

研究代表者：玉置昭夫，長崎大学水産学部・教授

研究協力者：Sumit Mandal，長崎大学大学院生産科学研究科・博士後期課程 3 年

竹内清治，長崎大学大学院生産科学研究科・博士前期課程 1 年

所内世話人：柳 哲雄

グリーン関数による窒素循環モデルの最適化

京都大学　農学研究科　小林志保

目的

沿岸域における窒素循環の定量化は，沿岸海洋学上の重要な課題である．海域における窒素の循環は，流動や混合といった物理環境だけでなく，植物プランクトンによる消費をはじめとする生物・化学過程の影響を大きく受ける．このため数値モデルを用いて窒素循環を定量的に解析するためには，各種物理パラメータだけでなく生物･化学パラメータを適切に選択する必要がある．広瀬(2009)*1は，Menemenlis et al. (2005)*2の示したグリーン関数を用いた逆推定法を応用して各種物理パラメータを推定し，縁辺海循環モデルの最適化を行なった．本研究では，グリーン関数を用いたパラメータの逆推定法をさらに生態系モデルにも適用し，沿岸海域の窒素循環モデルを最適化する．

方法

沿岸海域における流動－生態系モデルを作成した．モデル領域を Fig.1 に示す．Menemenlis et. al (2005)による手法を適用して，モデルの各種物理パラメータ（鉛直・水平拡散係数・海底摩擦係数等）および生物・化学パラメータ（光束消散係数・酸素消費速度・植物プランクトンの沈降速度等）を最適化する．最適化したパラメータを用いて各態窒素濃度の季節・長期変動の再現計算を行い，計算結果がどの程度向上したか確認し，その要因をパラメータの感度解析によって検討した．

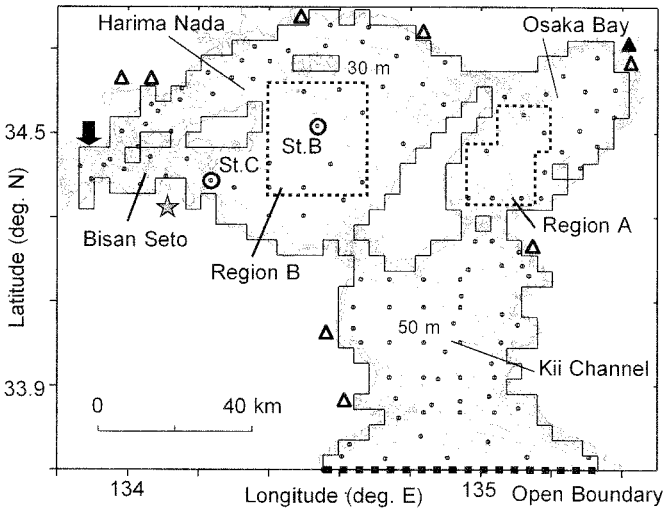


Fig.1　Configuration of the model and bathymetry.

上記の流動-生態系モデルを沿岸から外海までを含めた領域に拡張し，沿岸域の水質に対する外海の海況条件の変動の影響を調べるとともに，外海の影響を考慮した沿岸域の窒素循環のシミュレーションを行なった．

結果

東部瀬戸内海における栄養塩濃度の季節変動をモデルにより再現した．このモデルを用いて，当該海域における窒素の現存量および海域間の輸送量の季節変動を定量化した．外海からの栄養塩流入における密度流の寄与は春季から夏季に大きかった．一方，冬季には，吹送流による外海への栄養塩流出が強く現れた．海域間の栄養塩輸送においても密度流の影響は成層期に大きい．また密度流による栄養塩輸送量は，海峡部混合水が灘部の底層に流入する場合に特に大きく，灘部の上層や中層に流入する場合には，植物プランクトンによる消費の影響を受けるため比較的小さくなる．さらにこのモデルを用いて過去 30 年間における外海からの栄養塩流入量を定量化し，流入量の変動が各海域の栄養塩濃度の変動に及ぼす影響を調べた．その結果，外海の海況変動が紀伊水道および大阪湾西部の栄養塩濃度の変動に大きな影響を及ぼすのに対し，それより内側の播磨灘では影響が小さい(寄与率：～10%)ことが明らかに

なった（Fig.2）.

考察

本研究では，日本沿岸の主要漁場の一つである瀬戸内海を対象海域として，栄養塩濃度の変動に関わる物理過程と生物化学過程の調査結果に基づいた三次元流動・生態系モデルを開発することにより，栄養塩濃度の季節変動および長期変動機構を明らかにした．また黒潮流路変動に伴う東部瀬戸内海における密度流の長期変動が再現され，これにより外海の海況変動に伴う栄養塩輸送量の変動を推定できるようになった．本研究で開発したモデルは，ノリ養殖海域における栄養塩濃度予測，陸棚海域における物質循環の解析，および外海の変動が沿岸海域に及ぼす影響の解析などに適用することができる．

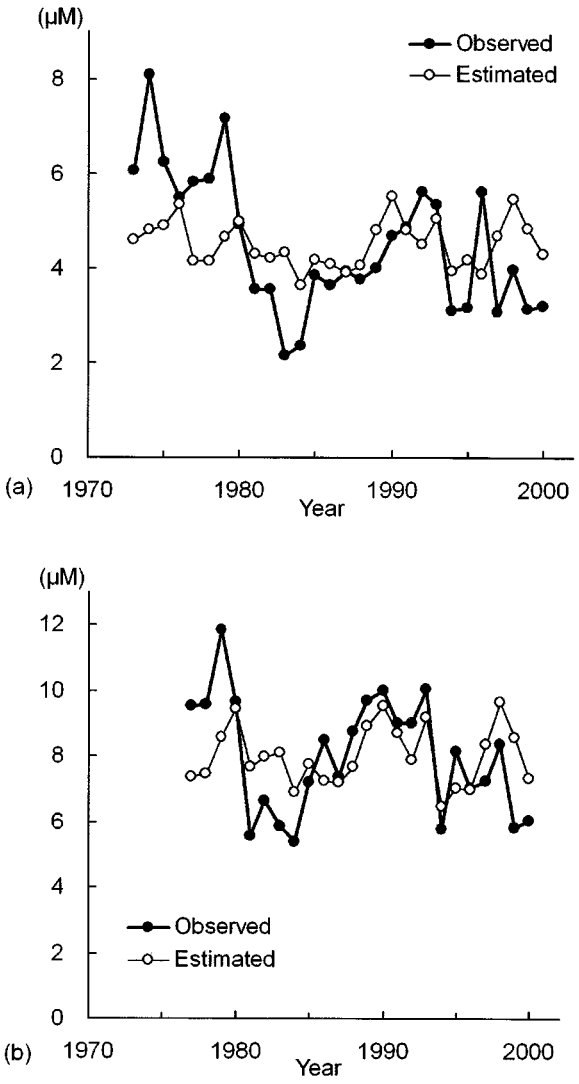


Fig.2
Inter-annual changes of annual mean concentration of dissolved inorganic nitrogen (a) at the surface and (b) at the bottom of Harima Nada (St. B). The closed circles indicate the observed values, while open circles indicate the values estimated by multiple regression analysis method. The location of St. B is shown in Fig. 1.

謝辞

本研究のモデルの検証には，瀬戸内海沿岸の各県水産試験場による浅海定線調査によって得られたデータを使用させていただきました．兵庫県水産技術センター，和歌山県水産試験場，大阪府水産試験場，岡山県水産試験場，香川県水産試験場，大分県水産試験場の関係者の方々にはデータ配布に関してお力添えを賜りました．関係者の方々に，心から感謝いたします．

また，研究の実施に際し，九州大学応用力学研究所准教授広瀬直毅博士に大変お世話になりました．この場をお借りして心からの感謝を申し上げます．

文献

*1 広瀬 直毅 (2009):グリーン関数による縁辺海循環モデルの最適化．2009年度春季海洋学会要旨．

*2 Menemenlis, D., Fukumori, I., Lee, T. (2005): Using Green's functions to calibrate an ocean general circulation model. Monthly Weather Review,133,1224-1240.

風洞内自航試験による地面効果翼機の飛行安定性に関する研究

広島大学大学院工学研究科
教授　岩下　英嗣

1. 研究目的

地面効果翼機 WIG(Wing In Ground effect) とは、翼が地表に近づいた際に揚抗比が大きくなる地面効果を利用した特殊航空機で、将来の高速海上輸送機関の候補として期待されている。2002-2005 年度、広島大学と鳥取大学・東京大学間では、特に波浪中での耐航性能向上を目指し、前翼式 WIG を提案して基礎研究を行ってきた。最終的にはラジコン模型による自航試験を行い、地面効果内での安定飛行を確認している。続いて、より実機に近い機体形状を提案し、新型の前翼式 WIG の自航試験用 RC 模型の設計・製作を行って風洞試験を通して全機空力特性を確認してきている。更に、機体内部にフライトレコーダーを搭載して自航試験を実施し、飛行データの取得を行っている。その結果、自航のためには機体重量の低減、推力の増強が必要であることが判明したため、新たに機体重量を約 15% 低減し、推進器をより強力なものに変更した自航試験用 RC 模型の製作を行うこととなった。

本研究では、新たに設計・製作した RC 模型について、巡航時を模擬した風洞試験を行うことにより全機空力特性の確認を行う。加えて、主翼単独の模型についても製作を行い、風洞試験を実施することで主翼単体での空力特性の検証を行っている。全機模型試験においては、機体に装備された操舵翼や推進器を稼動させた自航状態での計測を行うことで操舵翼・推進器が全機空力特性に及ぼす影響と機体の飛行安定性についても検証を行う。

2. 研究方法

以下に示す手順により研究を遂行する。

(1) 地面効果翼機の風洞試験の問題点の一つである境界層の影響を低減するため、供試模型の下に新たに板を設け、数値計算と実測によって境界層厚さを確認する。

(2) 新たに変更した推進器について性能試験を行い、以前の機体で使用していた推進器の性能と比較する。

(3) 風洞内に主翼単独模型を設置し、巡航時を模擬した風速 $U = 20$ m/s における風洞試験を行い、主翼単体の空力特性を確認する。

(4) 全機模型について、同様に巡航時を模擬したパワー付き風洞試験を行う。推進器及び前翼に装備されるエレベーターを稼動させて計測を行い、それらが全機空力特性に及ぼす影響について把握する。

(5) 一連の研究を総括する。

3. 研究組織

本研究は下記のような組織で行った。

氏　名	所　属	職　名	役割・担当
岩下 英嗣	広島大学大学院工学研究科地球環境工学講座	教授	代表者
勝田 貴志	広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻	博士課程 3 年	実験補助
谷口 弘樹	広島大学大学工学部第四類輸送機器工学課程	4 年	実験補助
松琴 卓也	広島大学大学工学部第四類生産基盤工学課程	4 年	実験補助
田辺 晃弥	広島大学大学工学部第四類輸送機器工学課程	4 年	実験補助
大屋裕二	九州大学応用力学研究所	教授	実験指導

4. 研究結果

4.1 推進器単独性能試験

推進器単独性能試験の実験装置セットアップ図をFig.1に示す。実験は風速制御方式で行う。推進器のファンの回転数を巡航時想定回転数25000rpmで一定に保ち、風洞風速 V を $V = 0 \sim 20$ m/sの間で5m/sごとに変化させ、各風速における電圧、電流、x 方向にかかる力 $F_x(= -T)$ を計測する。ファンの回転数、電圧、電流については、E-meterという計測器を用いて計測している。この装置は、あらかじめ使用するモーターの特性をキャリブレーションしておき、モーターに流れる電圧、電流の関係から回転数を算定して表示する計器である。電圧と電流からシステムに投入したパワー(消費電力)が算出され、一方、推力と風速から推進器が推力として行った仕事率が算出できるから、両者の比を取ることで効率が算出できる。従って、ここで得られる効率は、通常のプロペラ単独性能試験で得られる、推力の仕事率とトルクの仕事率の比で定義される空力的な効率ではなく、実際に推進器に入力したパワーに対して推進器がどれだけ推力として仕事をしたかを示す効率となる。すなわち、この効率にはモーターや配線ケーブルにおける損失が考慮されていることになる。

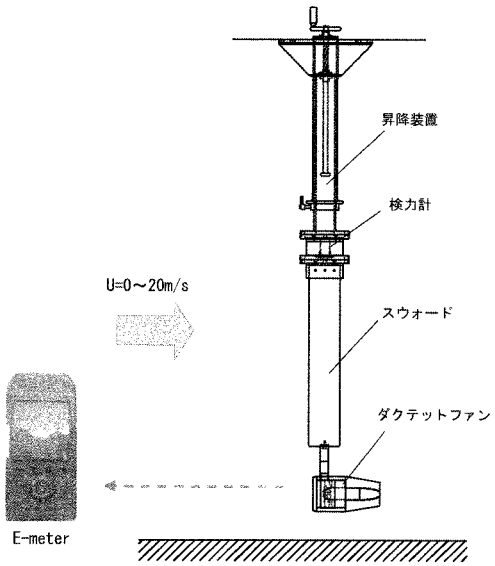


Fig.1: Experimental setup

計測データから以下に示す定義式を用いて前進率 J、スラスト係数 Kt、効率 η を求めた。

$$J = \frac{V}{nD}, \quad K_t = \frac{T}{\rho n^2 D^4}, \quad \eta = \frac{TV}{P}$$

ここで V は風速、n はファンの回転数、D はダクテッドファンの外径、T は得られた推力、ρ は空気の密度、P は消費電力を示す。Fig.2に前進率 J とスラスト係数 Kt、効率 η の関係、および得られたスラスト係数を基に求めた機体の任意機速に対するファンの回転数 n と推力 T の関係を示す。各前進率におけるスラスト係数は、今回の結果の方が過去に使用していたものより約20 %大きくなっていることが確認できる。一方、効率についてはほぼ同じ結果となっている。このことは、新旧の推進器に同じパワーを入力したときに、新らしい方が少ない回転数で同等推力が出せるということを示している。

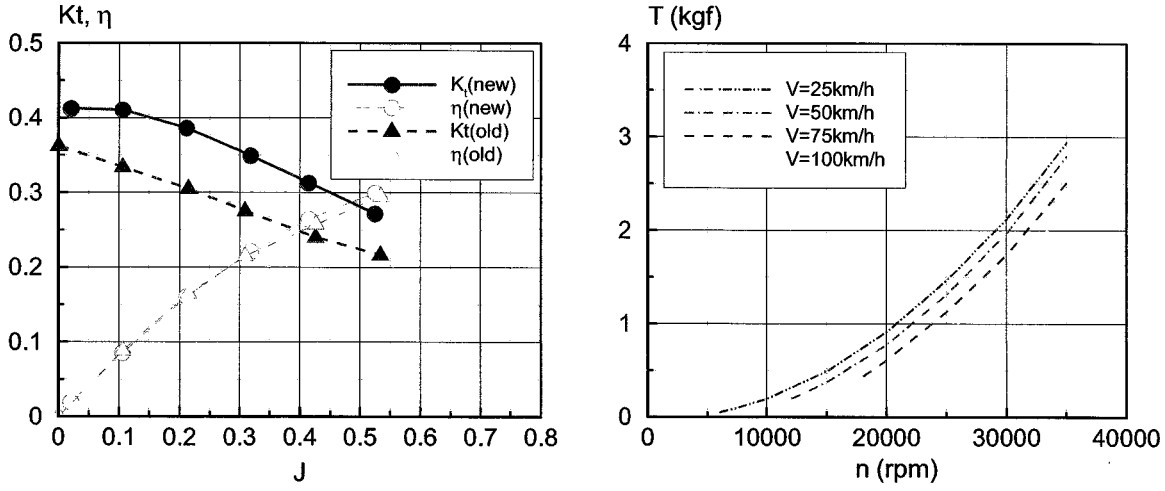


Fig.2: Aerodynamic performances of a new ducted-fan

4.2 境界層対策

WIG の風洞試験は地面近傍の飛行を模擬して行うため、境界層影響ができる限り入らないように低減方策を検討することが非常に重要である。そこで模型の下に新たに板を設け底上げすることで、風洞吹き出し口から発達する境界層を板の前縁から新たに再発達させて、模型付近での境界層影響の低減を図る工夫を行っている。床の高さは長さ、また先端の形状等についてはあらかじめ 2 次元 CFD 計算を行い決定している。そこで、以降の実験に先立ち、この境界層厚み低減対策が妥当であるか否かを確認する計測を行った。

Fig.3 には製作した床を示している。この床上における風速分布を、床板の後縁 (point-1)、床板の中心 (point-2)、模型設置位置 (point-3)、床板の前縁 (point-4) の 4 点で計測し、CFD 計算と比較した。その結果、各場所において計測結果と CFD の結果は良く一致することが確認できた。模型主翼後縁付近の point-2 での境界層暑さは約 20mm となっており、模型寸法に比べて十分に小さく、実験時における境界層の影響は小さいものと推察される。

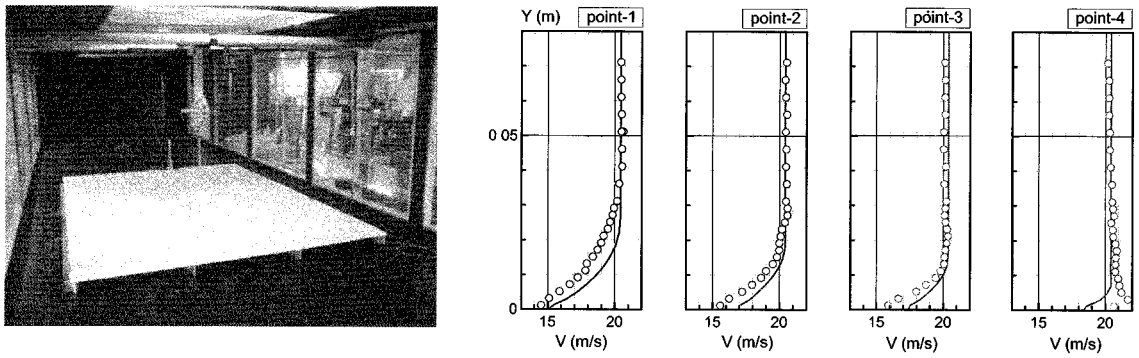


Fig.3: Measurement of boundary layer

4.3 供試模型

本研究で対象とした WIG の主翼単独模型と全機 RC 模型を Fig.4 に示す。模型の前翼にはエレベーターが、主翼にはエルロンが、垂直尾翼にはラダーが装備されており、無線で各操舵翼と推進器を稼動できるようになっている。今回の試験において稼動させる翼はエレベータのみである。また、全機 RC 模型の主翼は取り外しでき、これを主翼単独模型の中央部に取り付けて主翼単独試験を行っている。すなわち、主翼の製作誤差が計測結果に及ぼす影響は両模型で同量ということになる。



Fig.4: Experimantal models

4.4 実験項目

Fig.5 に全機模型の実験装置図を示す。主翼単独模型についても同様の実験装置を使用して実験している。本研究では主翼単独模型および全機 RC 模型の空力特性の把握、推進器とエレベーターによる空力特性への影響について確認をするため、以下のような実験項目について抗力、揚力、モーメントの計測を行った。風速は実際の巡航時を想定した 20m/s としている。

(1) 主翼単独模型

(a) 飛行高度 h/c、主翼迎角 α を変化させての計測。

(2) 全機模型

(a) 飛行高度 h/c、機体迎角 α_B (頭上げ正) を変化させての計測。

(b) 各飛行高度 h/c、機体迎角 α_B についてエレベーター操舵角 δ_f (下方側正) を変化させての計測。

(c) 推進器を稼動させた状態で (a)、(b) と同様の計測。

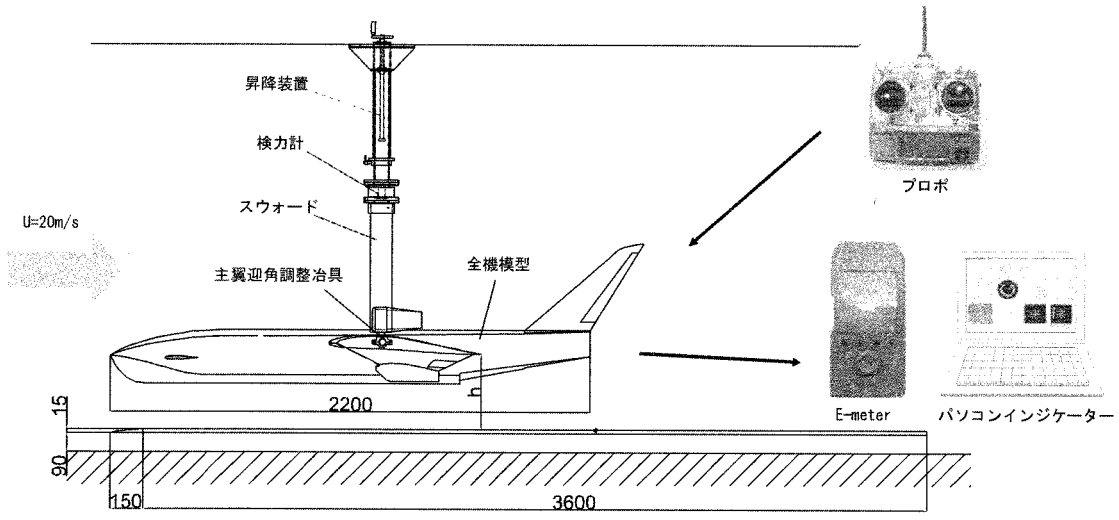


Fig.5: Experimental setup of the whole-airframe model

4.5 主翼単独模型実験結果

主翼単独模型の実験結果を Fig.6 に示す。各主翼迎角を変えた場合の、飛行高度 h/c に対する各空力係数と揚抗比が示されている。図中、曲線はポテンシャル理論に基づく境界要素法の数値計算結果である。全ての迎角に対して、h/c が小さいほど揚力係数の値は大きくなっており地面効果を明確に確認することができる。地面効果により揚力は増え、抗力はわずかに減少する。これにより揚抗比は大幅に増加する。

数値計算の抗力が計測値と比べて小さいのは粘性の影響が考慮されていないことに起因している。揚力、圧力中心に関しては、理論計算と計測値とは設定迎角 $\alpha = 4$ degs. では良好な一致を示していると言えよう。しかしながら、迎角が大きくなると両者には明らかな相違が見られ、今後理論計算における後流面のモデル化等について検討を行う必要がある。

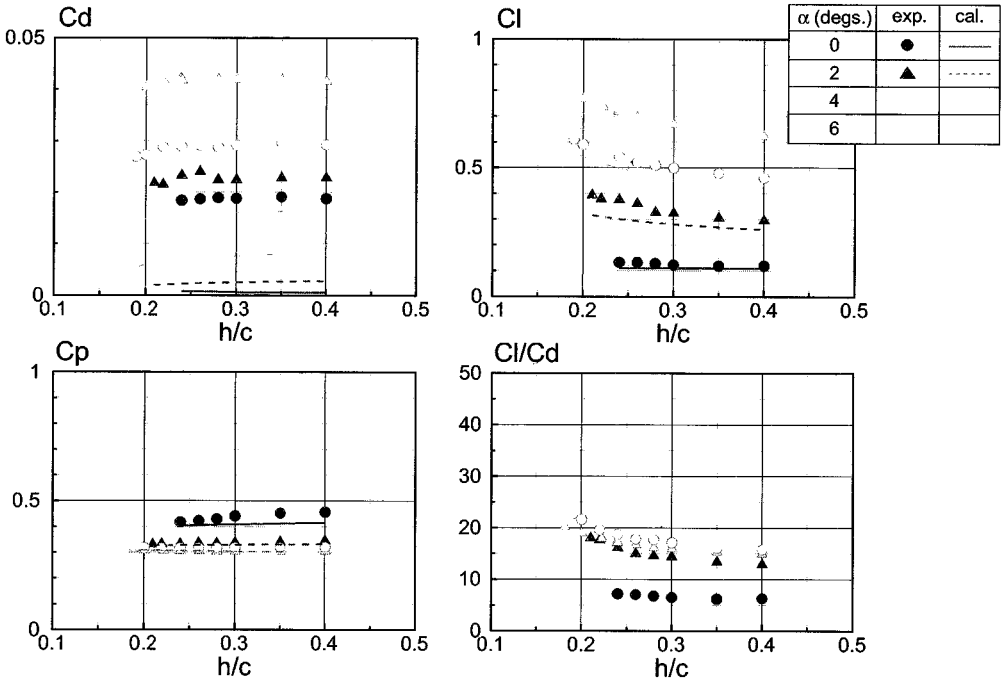


Fig.6: Aerodynamic properties of main-wing model

4.6 全機 RC 模型の地面効果

Fig.7 に全機 RC 模型の飛行高度 h/c が変化したときの各空力係数と揚抗比の結果を示す。機体トリム角 α_B はゼロである。プロットが実験値、曲線が理論計算値を表している。抗力と揚抗比については主翼単独模型と同じく理論数値計算では粘性影響を考慮していないため大きく異なっているが、揚力係数と圧力中心係数についての合致は良好と言える。

計測により得られた全機揚抗比が 7.0 程度と小さい値に留まっている。垂直尾翼として V-tail を採用していることで、機体の抗力が増加していることが原因と思われ、揚抗比向上の観点からは垂直尾翼を 1 枚にするなどの設計変更が必要と思われる。

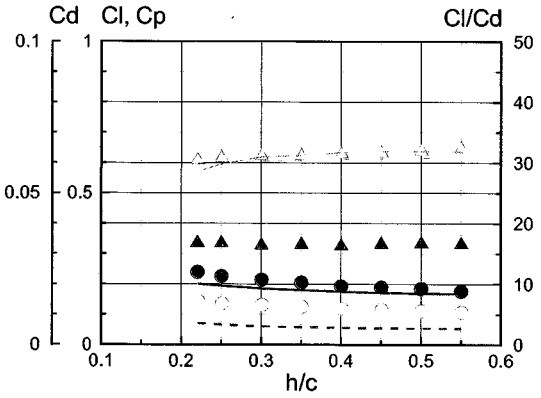


Fig.7: Aerodynamic properties of whole-airframe model

4.6 推進器が全機空力特性に及ぼす影響

全機RC模型においては、推進器を取り外した状態での計測と、推進器を取り付けて稼動させ抗力と釣り合う推力を発生させた状態での計測とを行うことにより、推進器が全機の空力特性に及ぼす影響について調べた。Fig.8にその結果を示している。

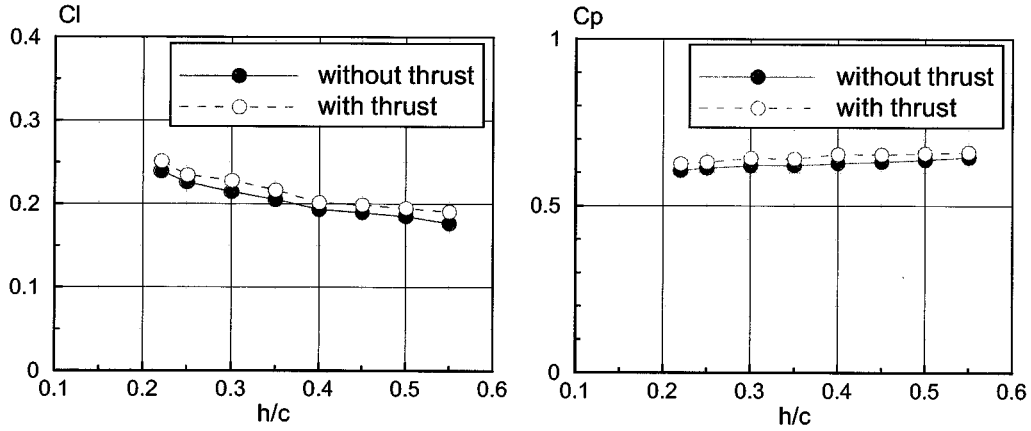


Fig.8: Effect of propulsor on aerodynamic properties of the whole-airframe model

巡航高度として想定している $h/c = 0.3$ に着目し、推進器の影響について考察してみる。計測によって、全機体に作用する x 軸方向の力 (-抗力)、z 軸方向の力 (揚力) および圧力中心が分かっている。揚力体として機体に取り付けられている前翼と主翼の圧力中心位置に揚力が集中的に作用していると仮定すると、全機に対して計測されたそれらの諸量を用いて、各翼にどれだけの揚力が作用したかを算出することができる。前翼に作用した揚力、主翼に作用した揚力を未知として、それらの和が全機に作用した揚力と等しいこと、また書く翼に作用した揚力により発生するモーメントの釣り合いから全機の圧力中心位置が得られることを用いて未知量である前翼に作用した揚力と主翼に作用した揚力を求めることができるわけである。これを推進器なしの場合と推進器ありの場合について行うとFig.9に示す結果を得る。その結果、推進器を搭載し稼動させることで、主翼の揚力は約8 % 増加し、尾翼には下向きに0.039kgfの揚力が発生することが分かった。前者は、主翼上にマウントされた推進器のインレットへの吸気効果によると思われる。後者は、推進器からの高速噴流がV-tailの横を通り過ぎることにより圧力が低下して下向きの揚力を発生しているものである。これによる機首上げモーメントが推進器による機首下げモーメントを低減させているという構造になっている。尾翼の機首上げモーメントによる機首下げモーメント低減効果があってもなお、機体全体としては推進器を稼動させることによる機首下げモーメントが残り、圧力中心点がわずかに後退するのであるが、それにより誘起される機体トリムは前翼のエレベーター操作により復元させることができる。そのエレベーター操作量は後述のエレベーターに関する実験結果を参照することにより求められ、概ね2~3 degs. 程度である。

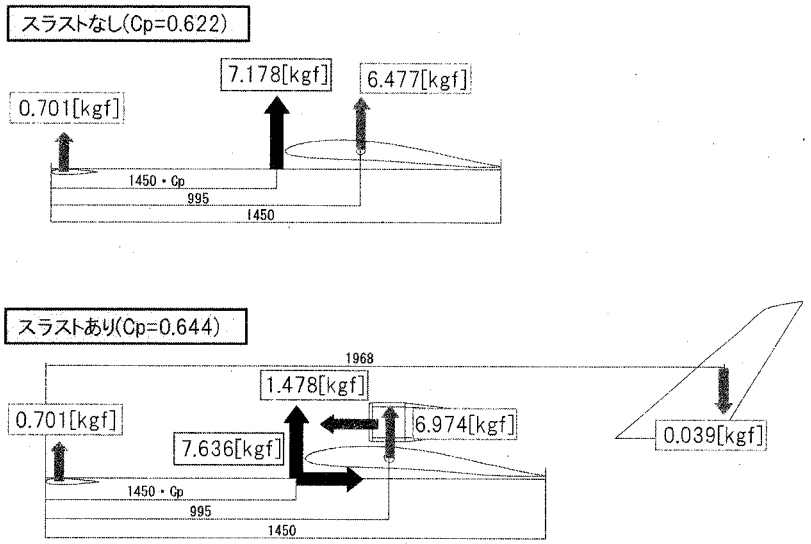


Fig.9: Contribution of each wing to the whole aerodynamics of the model

4.7 エレベーター操舵による影響

エレベーター操舵が全機空力特性に及ぼす影響について計測により検討を行った。機体トリム角 α_B を変えて、各 α_B におけるエレベーター操舵による空力特性の結果を Fig.10 に示している。飛行高度は $\alpha_B = 0.0$ 時に $h/c = 0.3$ と設定し、他の α_B についてはこの状態から模型を Fig.5 に示した模型の取り付け中心点周りに回転させている。また、推進器は稼動させた状態で計測している。Fig.10 に各 α_B においてエレベーター角 δ_f を変化させたときの抗力係数、揚力係数、圧力中心係数の結果を示している。エレベータ角は下へ操舵した場合を正としている。圧力中心はエレベーターを下に操舵すると機首上げモーメントが働き前方に移動し、上に操舵すると機首下げモーメントが働き後方に移動することが分かる。エレベーター操舵による揚力係数の変化は、上下への操舵に対して線形的であり、今回のエレベーターが操舵翼として適切な特性を有することが確認できる。また、エレベーター操舵による地面効果は顕著ではないことも確認できる。

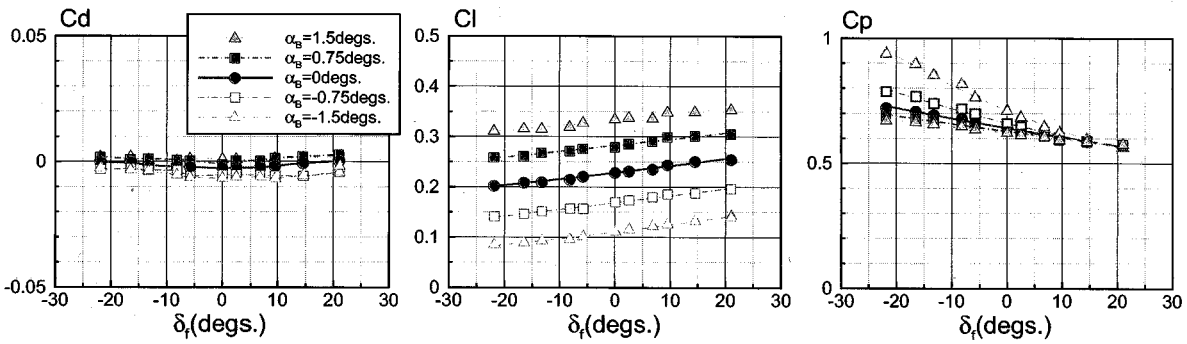


Fig.10: Effect of elevator on aerodynamic properties of the whole-airframe model

5. まとめ

本研究で得られた成果を以下にまとめる。

(1) 昨年度までのRC模型の自航試験の結果を受け、機体を軽量化し、推進器を変更した新たな前翼式WIGの自航試験用RC模型ならびに主翼単独模型を設計・製作した。製作した模型は1.3kgfの軽量化を達成できたことを確認した。

(2) 新しい推進器について単独性能試験を行い、従来のものと比べて同回転数において25 %増の推力を得ることができることが分かった。効率については従来のものと同程度であった。

(3) 主翼単独模型について空力特性の計測とポテンシャル理論に基づく数値計算を実施した。地面近傍で大幅な揚抗比の向上が確認できたとともに、数値計算と計測値との間に相違が見られることが判明した。今後、理論計算における後流面のモデル化等について検討してみる必要がある。

(4) 全機RC模型について空力特性の計測とポテンシャル理論に基づく数値計算を実施した。両者は概ね良好な一致を示したが、(3)と同様に後流面のモデル化等についての検討が必要である。

(5) 全機RC模型について推進器が空力特性に及ぼす影響について調べた。推進器からの噴流の影響を受け、V-tailが下向きの揚力を発生し、推進器により誘起される機首下げモーメントを低減する効果があることが分かった。また、主翼上にマウントされた推進器のインレットへの吸気効果によると思われる主翼揚力の向上が8 %程度見られることが分かった。

(6) エレベータ操舵が全機空力特性に及ぼす影響について調べた。その結果、エレベーター操舵による地面効果はほとんど現れずに、エレベーターが操舵翼として適切な特性を有することが確認なれた。

直線垂直軸型風力タービンの過回転制御に関する研究

広島大学大学院工学研究科
教授　岩下　英嗣

1. 研究目的

近年、地球温暖化をはじめとする地球環境問題への世界的な関心の高まりを背景に大型のプロペラ式水平軸型風力タービンが目覚ましい勢いで普及している。一方、日本のような高山間地の多く風況の劣悪な環境に適した風力タービンとして小型の直線翼垂直軸型風力タービンが研究対象として注目を集めている。直線翼垂直軸型風力タービンは小型風力タービンの一種で、直線翼を鉛直回転軸周りに配した形状をしている。プロペラ式の水平軸型風力タービンと共に、普及に向けた研究開発が展開されている。

これら小型風力タービンは大型機と比べて高回転で稼動するために、安全上過回転を防止するための機構の開発が重要課題となっている。本研究では将来的に、ローターブレードに働く遠心力を利用してローター直径を変化させることで過回転を防止する機構の提案・開発を行うことを最終的な目的としている。

本研究の今年度の目的は、過回転防止機構を持たない通常の直線翼垂直軸型風力タービンの性能を把握する数値解析ツールの開発とその空力性能データベースの構築である。回転数・ローター直径の条件を変えて効率 C_P のデータを得ることで、次年度にはこのデータを元に過回転防止機構を有した小型直線翼垂直軸型風力タービンのローター空力特性の推定を行うことができるようになる。

2. 研究方法

以下に示す手順により研究を遂行する。

(1) CFD を用いた 2 次元の直線翼垂直軸型翼車まわり流場の数値解析プログラムを開発する。

(2) 過去に実施されたヒービング運動する翼に関する曳航試験について、数値解析ツールを用いて同様の計算を実施し、実験結果と比較することで解析プログラムの検証を実施する。

(3) 過去に実施された直線翼垂直軸型ローターの曳航試験について、数値解析ツールを用いて同様の計算を実施し、実験結果と比較することで解析プログラムが直線翼垂直軸型ローターに適用可能かを検証する。

(4) 数値解析ツールを用いて、直線翼垂直軸型ローターの直径が異なる 3 種類のローターについて計算を実施し、直径が直線翼垂直軸型ローターの性能に及ぼす影響について確認する。

(5) 一連の研究を総括する。

3. 研究組織

本研究は下記のような組織で行った。

氏　名	所　属	職　名	役割・担当
岩下 英嗣	広島大学大学院工学研究科地球環境工学講座	教授	代表者
勝田 貴志	広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻	博士課程 3 年	研究補助
田辺 晃弥	広島大学工学部第四類輸送機器工学課程	4 年	実験補助
谷口 弘樹	広島大学工学部第四類輸送機器工学課程	4 年	実験補助
大屋裕二	九州大学応用力学研究所	教授	研究指導

4. 研究結果

4.1 数値解析プログラムの開発

支配方程式は、連続の式 (1) と 2 次元非圧縮 Navie-Stokes 方程式 (2) である。解法は、MAC 系解法の Fractional Step 法を採用した。空間微分項については、移流項は 3 次精度の QUICK 法を、粘性項・圧力項は 2 次精度中心差分法により離散化した。時間微分項については、移流項は 2 次精度 Adams-Bashforth 法により離散化し、粘性項は Crank-Nicholson 法により陰的に解いた。速度と圧力のカップリングは Fractional Step 法に従い、SOR 法により圧力の Poisson 方程式を解いて圧力を求めた。速度・圧力・数値粘性などの変数を格子の中心に配置した Collocation 格子を採用した。

研究では、一様流中を回転移動する翼を解析する方法として格子作成の簡便性・汎用性などを勘案して、重合格子法を採用した。重合格子法は、複数物体が流場中に存在する場合、解析する領域全体をカバーする背景格子（Background Grid）とそれぞれの物体周りに独立に作成した副格子（Sub Grid）を重ね合わせて境界で物理量の受け渡しを行う解析手法である。本計算では、背景格子に不等間隔直交格子を、副格子に C 型の物体適合格子を採用した。副格子については壁面に近づくにつれて格子間隔が密になるように不等間隔を設定し、壁面上の $y+$ が 10〜50 程度になるように格子を作成した。

背景格子における境界条件は、流入境界には一様流れ U_∞ を与え、流出境界には Sommerfeld 放射条件を、壁面境界には no-slip 条件を課した。そこで今回は、LES 解析を実施した。サブグリッドスケールモデルとして、式 (3) の Smagorinsky モデルを適用した。格子解像度の不足を補うため、van Driest 関数 f により補正した。フィルター幅 Δ は格子面積の平方根、Smagorinsky 定数 C_s=1.5、$|\overline{D_{ij}}|$ はひずみ速度の大きさである。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_i}{\partial x_j} = \frac{1}{Re}\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} \tag{2}$$

$$\tau_{ij} = (C_s \Delta f)^2 |\overline{D_{ij}}| \tag{3}$$

4.2 数値解析プログラムの検証

今回開発した LES 解析コードの検証を行った。経塚ら [1] の水中翼のヒービング運動に関する実験を対象とした。翼型は対象翼の NACA0012 を、条件は翼弦長 c、流入速 U_∞ で無次元化した Reynolds 数 (4) を $Re = 1.5 \times 10^5$ とした。背景格子の大きさについて、主流方向は上流側が翼弦長の 3 倍である $3c$、下流側が $7c$ とし、主流と直行する方向は $5c$ とした。格子数は、主流方向に 501、主流と直行する方向に 251 とした。また、翼が振動する円領域は等間隔直交格子とし、それ以外は外側の境界に向かうにつれて格子間隔が大きくなる不等間隔直交格子とした。

翼周りの副格子は、C 型の物体適合格子で作成した。大きさについて、翼のベースライン方向は翼弦長の 1.5 倍である $1.5c$、ベースラインと直行する方向は $0.75c$ とした。格子数は、ベースライン方向に 101、その直行する方向に 101 とした。翼上の格子数は片側 51 点の合計 101 点である。Fig.1 に計算に使用した格子の一部を示す。

翼の無次元振動数 (5) が f=0.2〜0.8 までの条件について解析を実施した。Fig.2 に実験結果との比較を示す。実験結果は没水深度比が 6.35 の結果である。解析結果は実験結果と非常に良い一致を示しており、ヒービング運動と類似性の強い垂直軸型風車の流場の解析にも適用可能ではないかと考え、適用を試みることにした。

$$Re = \frac{U_\infty c}{\nu} \tag{4}$$

$$f = \frac{\omega c}{2U_\infty} \tag{5}$$

ここで、U_∞ は流入速度、c は翼弦長、ω は角振動数、ν は動粘性係数である。

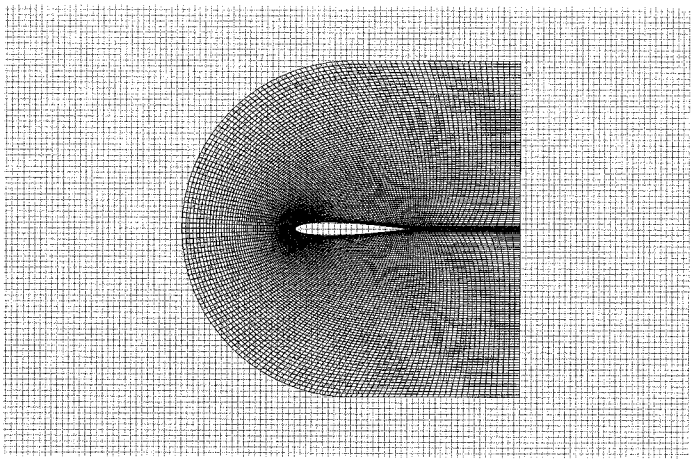


Fig.1: Computational grid around airfoil

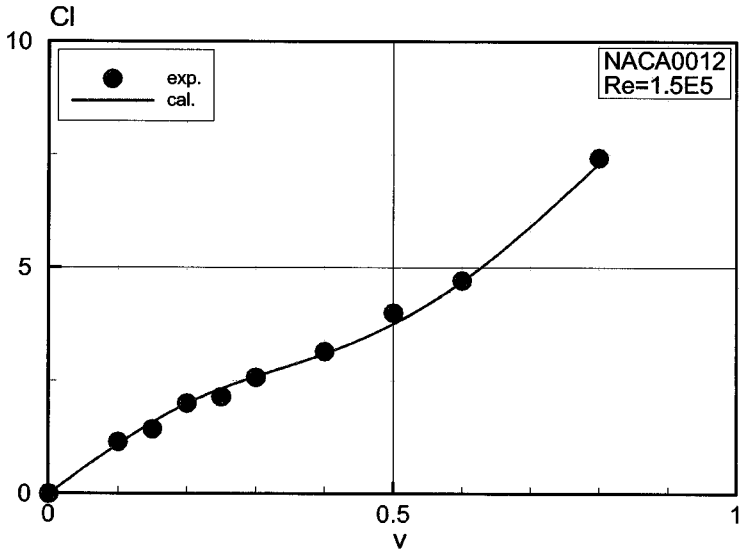


Fig.2: Comparison of unsteady lift coefficient of NACA0012 oscillating in heave direction

4.3 直線翼垂直軸型風車への適用

経塚ら [2] の曳航水槽での実験を参考に、翼型は対象翼の NACA0018 並びにその円弧キャンバーを付加したものを採用した。実験と解析の条件をそろえるため、風車直径を 0.6m、翼枚数 2、流入流速 1.0m/s とした。また、翼弦長は対象翼が 0.1m、円弧翼が 0.08m である。代表 Reynolds 数 $Re = 4.6 \times 10^5$ で周速比 λ=1.0〜3.0 について解析を実施した.

背景格子の大きさについて、主流方向は上流側が風車直径 D の 3 倍である $3D$、下流側が $4D$ とし、主流と直行する方向は $5D$ とした。格子数は、主流方向に 501、主流と直行する方向に 501 とした。また、翼が回転して描く円領域は等間隔直交格子とし、それ以外は外側の境界に向かうにつれて格子間隔が大きくなる不等間隔直交格子とした。

翼周りの副格子は、C 型の物体適合格子で作成した。大きさについて、翼のベースライン方向は翼弦長の 1.5 倍である $1.5c$、ベースラインと直行する方向は $0.75c$ とした。格子数は、ベースライン方向に

101、その直行する方向に 101 とした。翼上の格子数は片側 51 点の合計 101 点である。例として翼型 NACA0018 の場合について、Fig.3, 4 に計算に使用した格子のローター周りと翼周辺の図をそれぞれ示す。周速比 λ、パワー係数 C_P は以下のように定義する。

$$\lambda = \frac{R\omega}{U_\infty} \tag{6}$$

$$C_P = \frac{P}{\rho U_\infty^3 S/2} \tag{7}$$

ここで、ρ は流体密度、U_∞ は流入速度、R はローター半径、S は風車前面の面積、ω は角振動数、P はパワーである。

今回用いた 2 種類の翼型についてパワー係数を対象に実験結果と解析結果を比較する。Fig.5 に対称翼、Fig.6 に円弧翼の結果をそれぞれ示す。パワー係数の最大値について、解析結果は実験結果に対していずれも大きめに算出され、また全体としても定量的な一致は見られなかった。しかし、両方のケースともパワー係数の最大値を与える周速比は良く捉えていて、風車の定性的な特徴を把握することができているのではないかと考える。また、例として翼型が NACA0018、周速比 λ=2.0 のときの 1 枚の翼が 1 回転する間の圧力コンター並びに相対流線を Fig.7 に示す。回転角 θ は翼が風下から風上側へ向かう途中の流れと平行になった瞬間を θ=0.0 とする。更に、Fig.8 にはトルク係数の時刻歴を示す。

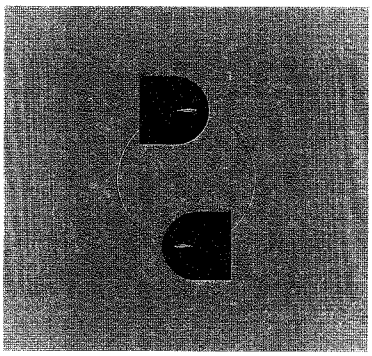


Fig.3: Computational grid for VAWT (rotor)

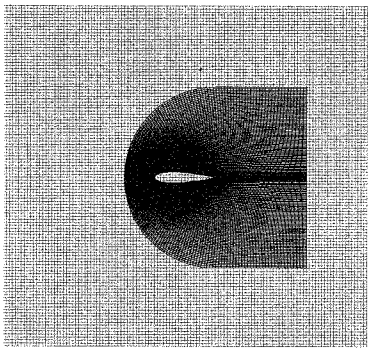


Fig.4: Computational grid for VAWT (airfoil)

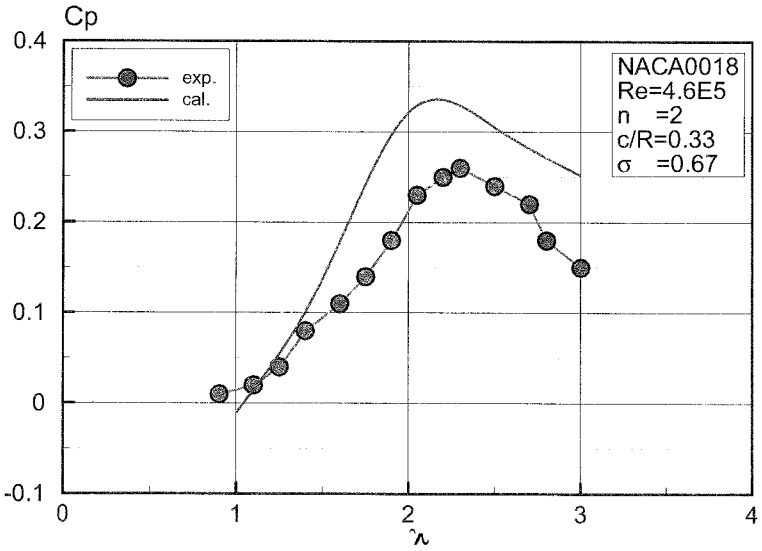


Fig.5: Comparison of power coefficients between LES analysis and experiment (NACA0018)

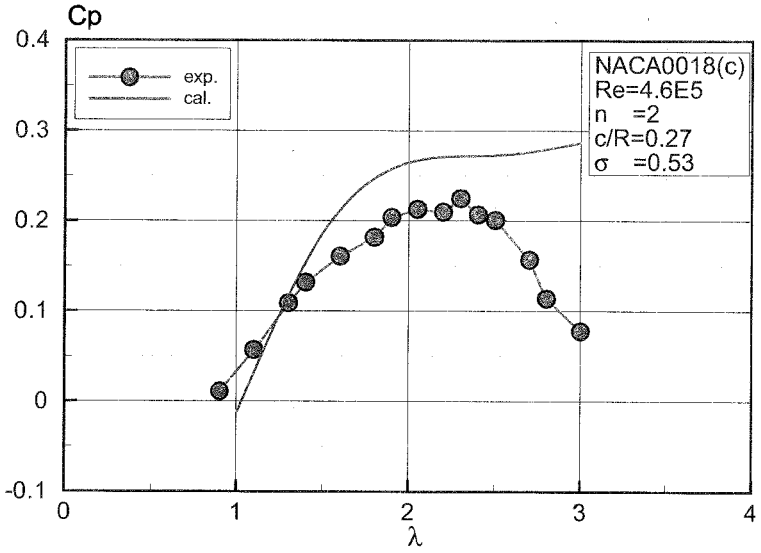


Fig.6: Comparison of power coefficients between LES analysis and experimet (NACA0018 with circular camber)

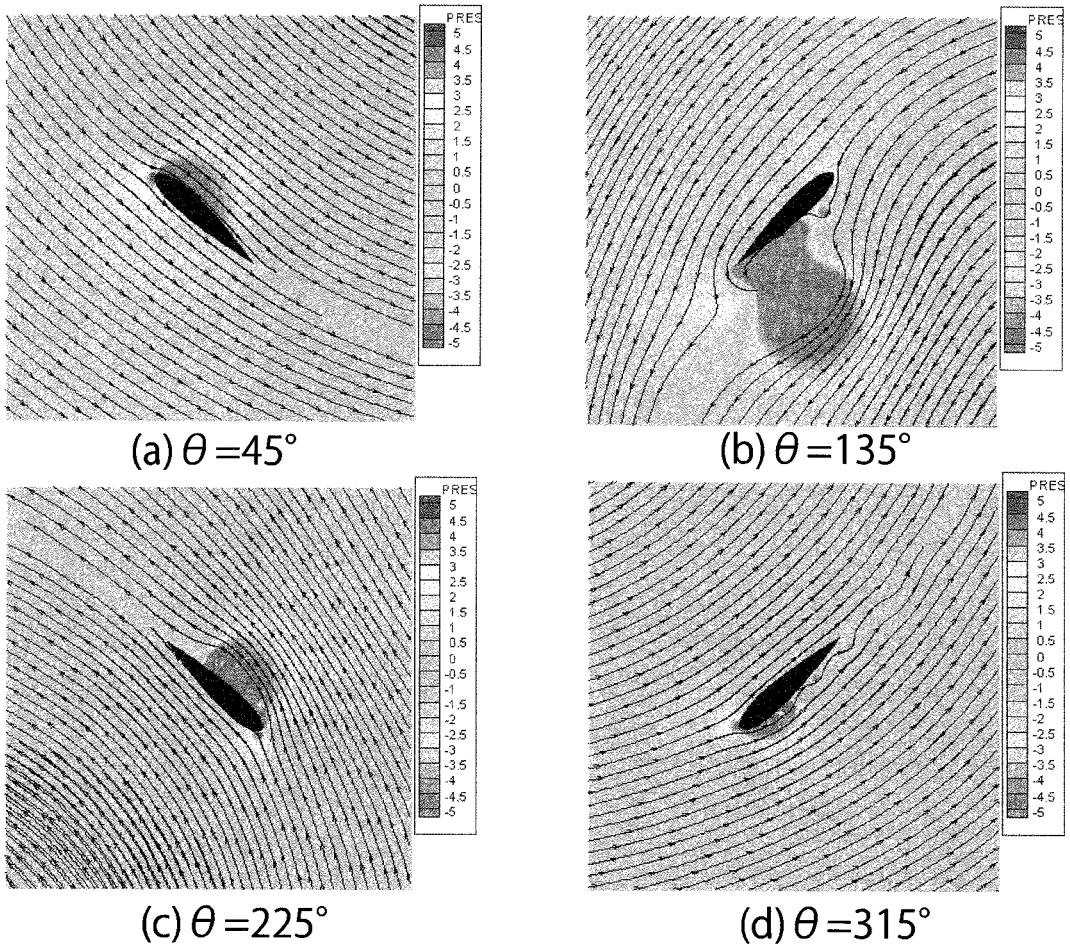


Fig.7: Pressure contour around blade

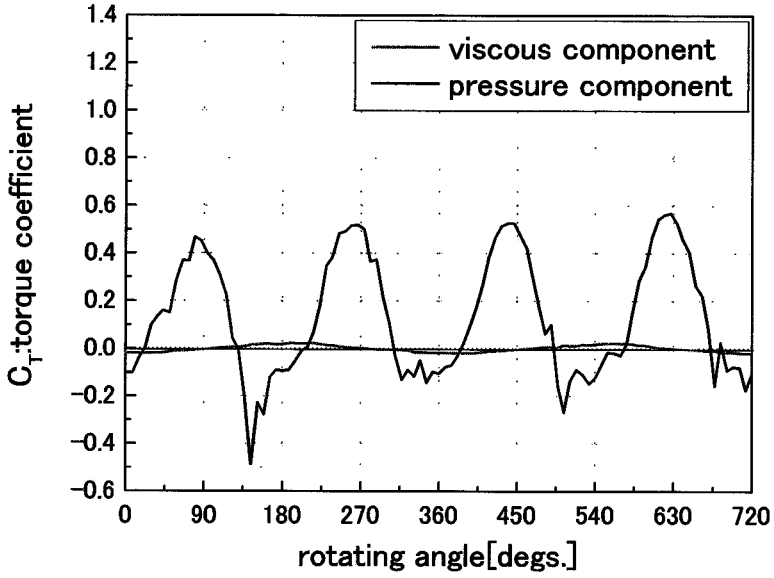


Fig.8: Time history of torque coeffcients

4.4 ローター直径の影響

研究目的の項でも述べたように本研究の最終目的はローター直径を変化させることで過回転を防止する機構の提案・開発を行うことである。本研究で想定している過回転防止の仕組みについて簡単に説明する。例えば、風車ローターの回転が増加するに従い増大する遠心力によって何らかの機械的な機構を介してローターを支持するアームを縮ませてローター直径を小さくする。それに伴い発生するトルクが減少し、回転が抑えられるという効果を期待するものである。そのため、ローター直径をどれくらい小さくさせれば発生するトルクが小さく抑えられるか、つまり C_P を低減させることができるのか、という性能を把握しておく必要がある。

そこで今回はローター直径が異なる 3 種類のケースについて計算を実施した。翼型は前項と同じ NACA0018 のみを対象とし、前項の風車直径の 2 倍を基準としてその 67%、50% の直径について計算を実施した。Fig.9 に今回得られた計算結果の C_P 曲線を示す。

基準直径の場合の C_P の最大値は 0.29 であるのに対して、直径が基準の 67%、50% の場合の C_P の最大値はそれぞれ 0.31、0.33 と大きい値となり、直径が小さいほど C_P の最大値は大きくなる傾向となった。直径が大きくなると周速度が大きくなる、つまり翼基準の Reynolds 数も大きくなり翼性能が向上して C_P の最大値も大きくなると考えられたが逆の結果となった。

一方、C_P の最大値を与える周速比は、計算点が少ないので正確にとらえているとは言えないが、その点を考慮してもほとんど直径の大きさに影響を受けないことが分かる。仮に過回転防止装置が作動し風車の直径が 50% 程度に小さくなったとすると、この場合、周速比が装置の作動前の 50% になったことになり、Fig.9 から C_P はピーク値を大きく下回り、あるいは負の値となりローターの過回転が抑えられることが推測される。

より具体的に風速 U_∞=12.0 m/s、基準直径 R=2.0 m の場合を対象として、回転数とパワーの関係について考えてみることにする。Fig.10 にこの条件下での回転数とパワーの関係を示す。図から分かるとおり、ローター直径が小さいほどパワーは小さいことが分かる。その上、直径の収縮に伴い周速比も低下のでローター直径を小さくすることが過回転防止に非常に効果的であるということが推測される。

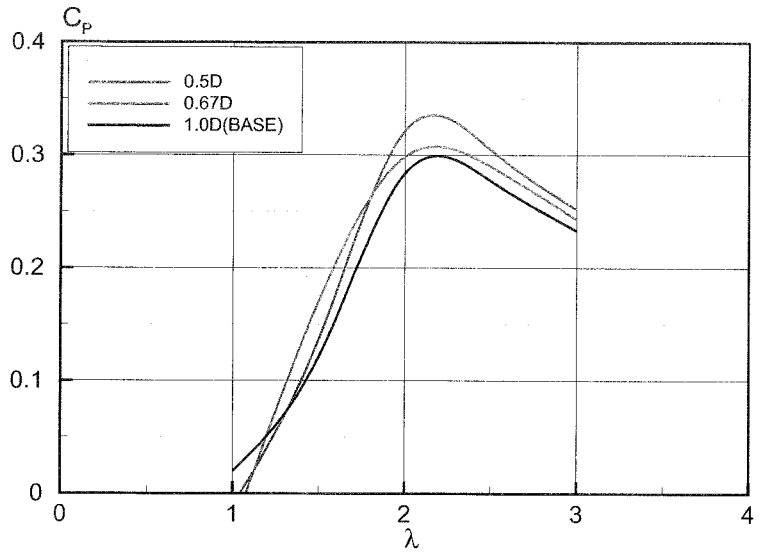


Fig.9: Influence of diameter of rotor in power coefficient

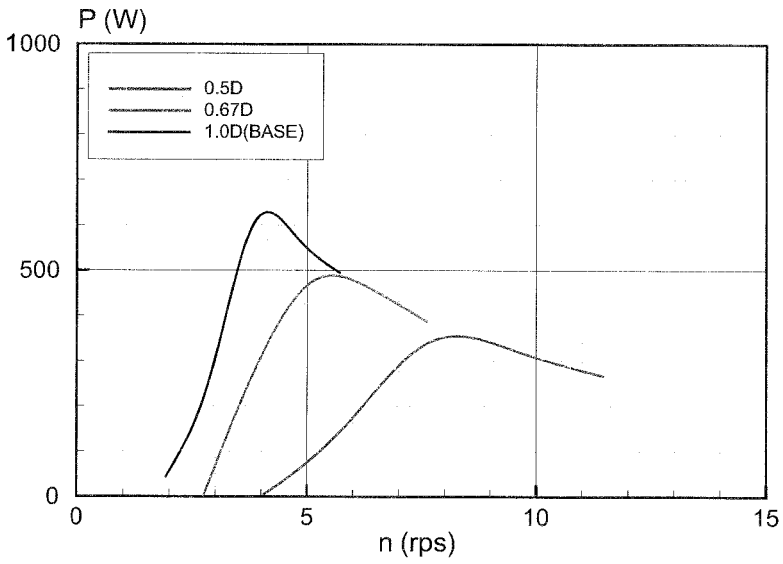


Fig.10: Influence of diameter of rotor in power

5. まとめ

本研究で得られた成果を以下にまとめる。

(1) 本研究では直線翼垂直軸型風力タービンまわりの流場を解析するLESコードを開発した。ヒービング運動する翼を対象にコードの検証を実施し、その有用性を確認した。

(2) 開発したコードを垂直軸型風力タービンに適用し、曳航水槽での実験結果と比較した。パワー係数について解析結果は実験結果に対して大きめに算出され定量的な一致は見られなかったが、最大パワー係数を与える周速比を良くとらえていて、風車の定性的な特徴を把握することができた。

(3) 開発したコードを垂直軸型風力タービンに適用し、ローター直径が風車性能(C_P)に及ぼす影響について確認した。その結果、ローター直径が小さくなると最大パワー係数を与える周速比はほとんど変わらず、またその最大パワー係数は大きくなることが分かった。また、回転数とパワー係数の関係についての考察からローター直径を小さくすることが過回転防止に非常に効果的であることが確認できた。

参考文献

[1] 経塚雄策：自由表面下の2次元振動翼に加わる流体力について, 日本造船学会論文集, 第170号 1991, pp.319-329.

[2] 経塚雄策, 若濱久敬：潮流発電用ダリウス形水車の流力特性について, 日本船舶海洋工学会講演論文集, 第4号 2007, pp.57-58.

北太平洋亜寒帯循環の変動とその機構

独立行政法人水産総合研究センター東北区水産研究所混合域海洋環境部　伊藤進一

研究内容

北太平洋亜寒帯域は，全球気候の長期変動に関連する重要な海域の一つであることが近年の気候学研究によって示唆されている．また，この海域は，豊富な栄養塩により活発な生物生産が行われ，好漁場となることから，水産学的にも注目されており，これまで盛んに研究が行われてきた．気候変動や水産資源の分布を理解するために，これらに寄与すると考えられる水温，塩分，その他の化学物質の分布に係わる，北太平洋亜寒帯域の流れ場を正確に理解する必要がある．

北太平洋亜寒帯域は，年間を通じて成層が比較的弱いため，流れの傾圧成分は比較的弱く，順圧成分の寄与が大きいと考えられる．そのため，海底地形が北太平洋亜寒帯域の流れ場に及ぼす影響は大きいと考えられる．北太平洋亜寒帯域には，天皇海山列という急峻な海底地形が存在するが，その影響について，これまで十分に理解されてこなかった．そこで本研究では，天皇海山列が北太平洋亜寒帯域の流動場に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした．

Kono and Kawasaki (1997) は，天皇海山列が完全な鉛直壁として振る舞うことを，Kuragano and Kamachi (2004) や Ito et al. (2004) は，天皇海山列が部分的な鉛直壁として振る舞うことを示唆している．また，Isoguchi and Kawamura(2006) は，北太平洋亜寒帯域の流れ場に対する天皇海山列の影響はないと主張している．このように，天皇海山列が北太平洋亜寒帯域の流れ場に果たす役割については諸説あり，一致した結論がない．そこで，北太平洋亜寒帯循環に果たしうる天皇海山列の役割を，一連の数値実験を行って調べた．数値実験では，天皇海山列を模した南北に伸びる海嶺を配置し，亜寒帯海洋を模した鉛直 2 層流体模型を用いて，季節変動する風応力により駆動される循環（風成循環）を調べた．特に，風成循環に与える海嶺の地形効果を反映する，海嶺東側境界流量とその東の内部スベルドラップ流量の比である”補償率”の，海嶺標高，海嶺幅，密度成層度への依存性に焦点を当てて調べた．なお，ここに記す研究内容は，本課題の世話人である吉川裕准教授の指導のもと，研究代表者である伊藤進一が研究分担者である和川拓と議論をし，進めたものであり，主な解析は和川拓が行ったものである．

数値実験の結果，海嶺幅が水平粘性境界層幅よりも大きいとき，海嶺東側には境界流が形成されること，またこの場合，海底圧力トルクが補償率の海嶺標高と密度成層度への依存性を決めることがわかった．またその依存性を詳細に調べた結果，海嶺標高が低く，惑星渦位等値線が海嶺を乗り越えられるとき，補償率は海嶺標高にほぼ比例するが，海嶺標高が高く，惑星渦位等値線が海嶺東で閉じるとき，補償率は海嶺標高にあまり依存せず，主に密度成層度と伴に減少することが明らかになった．また，補償率のこれらの依存性を海底圧力トルクの順圧流成分と傾圧流成分の作用を考察することで解釈した．このような簡略化した数値実験の結果より，現実の北太平洋亜寒帯循環へ天皇海山列の影響を及ぼしうることがわかった．

上記の知見を基に，現実の天皇海山列が海洋循環へ及ぼす影響を観測資料を解析することで調べた．まず，係留流速計，XCTD（Expendable Conductivity Temperature Depth profiler；投棄式電気伝導度水温水深計）及び ADCP（Acoustic Doppler Current Profiler；超音波流速計）観測を天皇海山列周辺で行った．これらの観測資料に加え，蓄積された Argo フロートと表層ブイの軌跡資料を併せ，

直接流速観測資料を解析し，天皇海山列東側境界流や海山列周辺の流動構造を調べた．過去の研究のほとんどが夏季の水温・塩分観測資料に基づき，表層の傾圧流を解析してきたのに対し，本解析では海底地形の効果を明確に示すため，冬季を含む長期間の直接流速観測資料に基づいて詳細な流動構造を調べ，その鉛直構造も調べた．また，流速場を年平均成分と季節変動成分に分け，時間変動にも注目した．

係留流速計が捉えた流速の季節変動は，上記の数値実験で示唆された天皇海山列東側の境界流のように，北太平洋亜寒帯域の風応力の季節変動と概ね良く一致していた．また，係留系設置点周辺における水深 15m と水深 1000m の季節変動流速場では，やや不明瞭だが，天皇海山列東側の境界流と整合する流れ場が見られた．これらの結果は，天皇海山列東側境界流の存在を初めて直接的に観測資料より示し，天皇海山列が北太平洋亜寒帯循環に影響を及ぼしうることを示す貴重な結果であった．また，北太平洋亜寒帯循環のような大規模循環へ及ぼす影響の他に，天皇海山列は周辺海域の流動構造に局所的に影響を及ぼすこともわかった．年平均（あるいは長期平均）流速場において，天皇海山列周辺の東向きの流れは急峻な海底地形の影響を受けて偏向していた．これらは，表層や中深層における平均流が海底地形の影響を強く受けることを明瞭に示す．一方，仁徳・推古海山上には，高気圧性の渦状平均流が存在した．流れの構造を調べた結果，この渦状平均流は，仁徳海山上では主に平均流が海山上に形成するテイラーキャップ，推古海山上では主に渦が海山上に形成する高気圧性の平均流であることが考えられた．

研究成果

· 和川拓・伊藤進一・清水勇吾・筧茂穂(2009), 黒潮・親潮混合域における準定在噴流の海洋観測, 2009年度水産海洋学会研究発表大会要旨集, P65.

· Wagawa, T., Y. Yoshikawa and A. Masuda (2010), Bathymetric influences of the Emperor Seamounts upon the subarctic gyre of the North Pacific: Examining boundary current dynamics along the eastern side of the mountain ridge with an idealized numerical model. J. Oceanogr., in press.

参考文献

· Isoguchi, O. and H. Kawamura (2006), Seasonal to interannual variations of the western boundary current of the subarctic North Pacific by a combination of the altimeter and tide gauge sea levels, J. Geophys. Res., 111(C4), 4013, doi:10.1029/2005JC003080.

· Ito, S., K. Uehara, T. Miyao, H. Miyake, I. Yasuda, T. Watanabe and Y. Shimizu (2004), Characteristics of SSH anomaly based on TOPPEX/POSEIDON altimetry and in situ measured velocity and transport of Oyashio on OICE, J. Oceanogr., 60(2), 425–437.

· Kono, T. and Y. Kawasaki (1997), Results of CTD and mooring observations southeast of Hokkaido: 1. Annual velocity and transport variations in the Oyashio, Bull. Hokkaido Natl. Fish. Inst., 61, 65–81.

· Kuragano, T. and M. Kamachi (2004), Balance of volume transports between horizontal circulation and meridional overturn in the North Pacific Subarctic region, J. Oceanogr., 60(2), 439–451.

定期旅客船を利用した能登半島輪島沖での対馬暖流モニタリング

石川県水産総合センター　大慶則之

目的

能登半島東岸では、台風などの気象擾乱の後、沿岸の流れが突然速くなる「急潮現象」により、しばしば定置網漁具が大きな被害を被っている。近年の研究により、「急潮現象」は、南西風に伴うエクマン輸送により陸岸に堆積された沖合暖水の、沿岸捕捉波あるいは沿岸密度流としての伝播と、沖合域での慣性振動が沿岸域に波及して生じる慣性周期帯の流速変動が重なった現象と理解されるようになった。しかし、能登半島東岸での現場観測では、気象擾乱との関連性がみられない強流もかなり高い頻度で観測されている。

能登半島周辺は半島沿岸を北上する対馬暖流の影響下にあるが、富山湾には夏季を中心に対馬暖流沿岸分枝流から分派した流れが表層に流れ込むことが知られている。上述の強流の発生要因として、対馬暖流水の流れ込みが深く関わる可能性が推察される。そこで、本研究では、対馬暖流水の富山湾への流れ込みと、能登半島東岸での強流発生とのかかわりを明らかにするとともに、対馬暖流水の流入をモニタリングする手法を開発することを目的とする。

観測および観測資料

能登半島西岸における岸沖方向の表層水温の変動をモニタリングする目的で、能登半島西岸の輪島と、輪島沖約 50km に位置する舳倉島を結ぶ定期船ニューへぐら(102 トン)で表層水温の連続観測を実施した。ニューへぐらは、輪島－舳倉島間を片道 1.5 時間(航海速力約 18 ノット)で、1 日 1 往復定期運航している。観測は、エンジン冷却水取水管にデジタル水温計(村山電機製作所 DSN-1011)を取り付け、海面下約 1.5m から取水される海水の水温を計測して、GPS の位置情報と併せて、約 4 秒毎にデータロガーに記録する方法で実施した。取得データの内、東経 136.55’ 上の約 43km の航路区間(北緯 37.27’～37.50.4’)のデータを抽出し、これらを線形補間により緯度 0.6’(約 1.1km)毎の水温値に整理したうえで、往路と復路の平均を日平均値とするデータセットを作成した。観測は 2009 年 10 月 10 日から開始した。本報告では、回収・整理を終えた 2009 年 10 月～12 月の観測データにみられた水温変動の特徴を整理するとともに、水温変動と半島東岸沖約 18km の海深 230m 地点に設けた係留系(Stn. 1)で観測された 10m 層の流速変動との関連性を検討した。Stn. 1 での観測はアレック電子製のメモリー式電磁流速計 ACM-8M を用いて 10 分間隔で実施した。

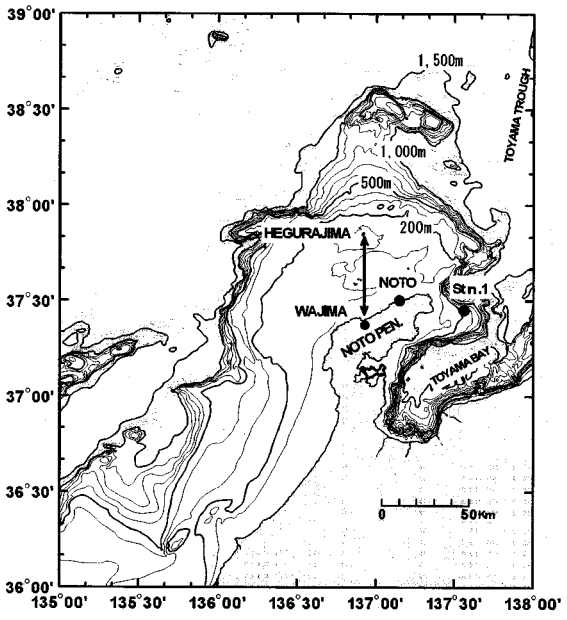


図 1. 調査海域図　矢印はニューへぐらの航路を示す

結果と考察

表層水温の変動

輪島港から舳倉島にかけての表面水温と日偏差の緯度－時間ダイヤグラムを図 2 に示した．期間の表面水温は 10 月 10 日から 12 月末にかけて 21℃台から 14℃台に下降した．この内、11 月上旬と中旬

には、全域で等温線の間隔が狭まり、急速な降温がみられた．降温の勾配は輪島側と比べて舳倉島側で大きかった．日偏差の変動をみると、期間を通じて、正負の偏差域が輪島側と舳倉島側でほぼ交互に出現する様子がみられた．また、10月下旬から11月中旬にかけては、舳倉島側から輪島側に向けて正偏差域が伝播する様子がうかがわれ、これと同様な温度偏差の分布傾向は、11月下旬から12月中旬にかけてもみられた．

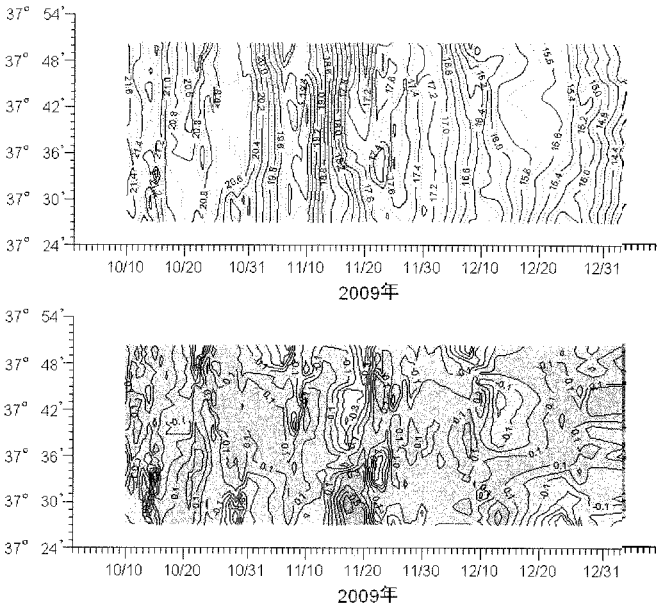


図 2.　輪島－舳倉島間の表面水温(上)と偏差(下)の時系列変動

能登半島東岸の流速変動との関連

輪島－舳倉島間の3地点の表面水温と富山湾口に位置するStn.1で観測された流速の時系列変動を図3に示した．　Stn.1では、10月18～20日(A)、11月15日(B)、12月6日(C)、12月19、21日　(D)　に湾内に向かう70cms^{-1}を超える強流が観測された。表面水温は、A、B、Cの発生後に舳倉島側で降下(a、b、c)、Dの発生後に輪島側で降下(d)し、これらの水温変化により、輪島－舳倉島には強い水温勾配が出現した。

強流発生の前日または当日には、いずれも発達した低気圧が日本海を通過しており、舳倉島では、10月19、20日、11月15、16日、12月5､6日に15～20 ms^{-1}の南から西寄りの強風、12月17～21日には20 ms^{-1}前後の北から西寄りの強風が観測されている。今回観測された強流や水温変動は、これらの気象擾乱の通過に起因するものと考えられ、輪島側と舳倉島側で、表面水温の日偏差が逆位相で変動した原因の一つには、周期的に通過する低気圧の影響が推察される。観測線の南北でみられた、表面水温の応答の相違については、今後さらにデータを蓄積して、発生要因を検討する必要がある。

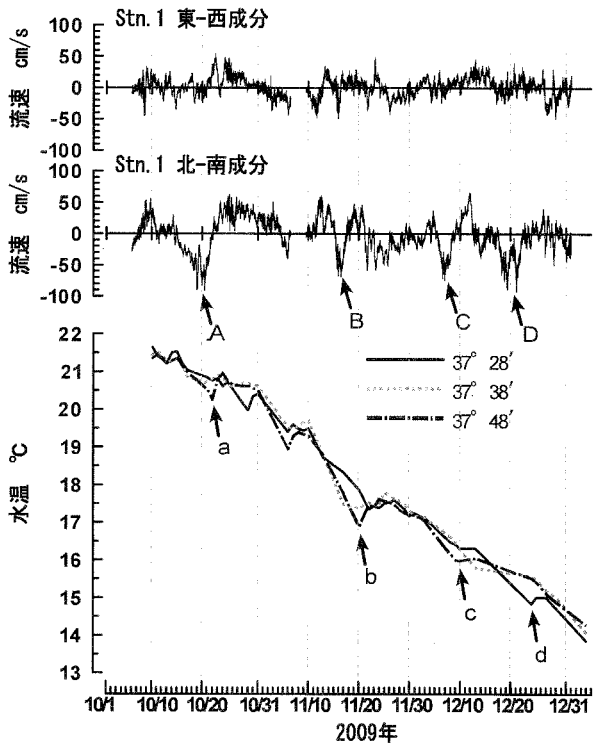


図 3.　輪島－舳倉島間の3点における表面水温(下)とStn.1の流速変動（上・中）の時系列

対馬海峡東水道における海洋環境変動

水産大学校海洋生産管理学科　滝川哲太郎

1　目的

対馬海峡は東シナ海と日本海をつなぐ唯一の水路であり，対馬暖流は，東シナ海から対馬海峡を経て日本海に流入する．昨今の大型クラゲ被害を例に出すまでもなく，近年、上流域の東シナ海での海洋環境の変化が，下流域の日本海の環境や生態系に影響を及ぼすことが懸念されている．また，中国の著しい経済発展に伴う海洋環境の変化や地球温暖化等の気候変動の影響を評価するためには，長期間継続的に海水のモニタリングを行うことが必要である．対馬海峡のうちでも，東水道は地理的に日本本土に近いことから，そこを通過する海水の特性を把握することは，福岡県沿岸のみならず，日本海沿岸各地の海況予測のために重要と考えられる．本研究では，対馬海峡東水道を通過する海水特性と時間変動を把握するために，東水道を横断する3観測点において，水温・塩分の連続測定を実施した．

2　観測

対馬海峡東水道をほぼ東西に横断する3観測点 (蓋井島，沖ノ島，美津島) に水温・塩分計を設置し，1時間間隔で表層の水温と塩分を測定した (図1)．水温・塩分計は，ピストン式ワイパーで電気伝導度センサーを測定毎に自動清掃できるJFEアレック社製のCompact-CTWを使用した．各測点における観測期間は以下の通りである．

蓋井島　2009/05/26 11:00 ～ 2009/11/19 10:00
沖ノ島　2009/07/14 12:00 ～ 2009/12/08 11:00
美津島　2009/06/08 14:00 ～ 2009/12/11 13:00

観測期間は東シナ海から移流されてくる大陸起源の低塩分水を捉えることを念頭に，夏季を中心に実施した．蓋井島と美津島については漁業用定置網に，沖ノ島については海底からブイを立ち上げ，それぞれ4～5 m深に計測機器を設置した．

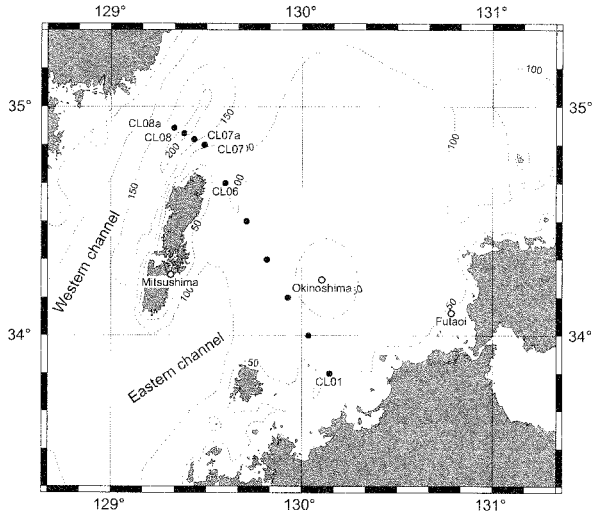


図1: 美津島，沖ノ島，蓋井島 (○) と練習船「天鷹丸」による海洋観測点 (●)．等値線は海底地形を表す (等値線間隔: 50 m)．

3　結果

各測点で得られた水温・塩分の時系列を図2に示す．9月10日前後から，蓋井島の塩分値には，多数のノイズが入っている．これは，ワイパーが欠損し，生物付着の影響が現れたことが考えられる．各点とも春から夏にかけて水温上昇，塩分低下を示した．8月下旬の毎時の水温極大は，8月22日に蓋井島で27.45 ℃，8月25日に沖ノ島で28.08 ℃，8月26日に美津島で26.96 ℃を示した．7月下旬と8月下旬から9月上旬にかけて，美津島で顕著な塩分低下が観測された (毎時の塩分極小値: 7月29日に29.96, 9月2日～9月3日に32.45)．同様な塩分低下は，沖ノ島と蓋井島でも観測され，これらの塩分値は，美津島，沖ノ島，蓋井島の順で低かったが，美津島よりも沖ノ島と蓋井島で数日早く塩分が低下し始めている．

8月13日と9月11日に水産大学校練習船「天鷹丸」によって観測された対馬海峡横断測線 (CL測線, 図1) における水温・塩分の鉛直断面図を図3に示す．8月の西水道における表層水は，東水道に比べ高温・低塩分であっ

た．東水道に着目すると，対馬付近 (CL06) の塩分は博多側と比べ著しく低く，定点での水温・塩分の連続測定結果と同様の傾向を示した．10 月の表層塩分の水平勾配は，8 月と比べ小さかった．

4 研究組織

研究代表者	水産大学校	滝川哲太郎
所内世話人	九州大学応用力学研究所	千手智晴
研究協力者	福岡県水産海洋技術センター	松井繁明

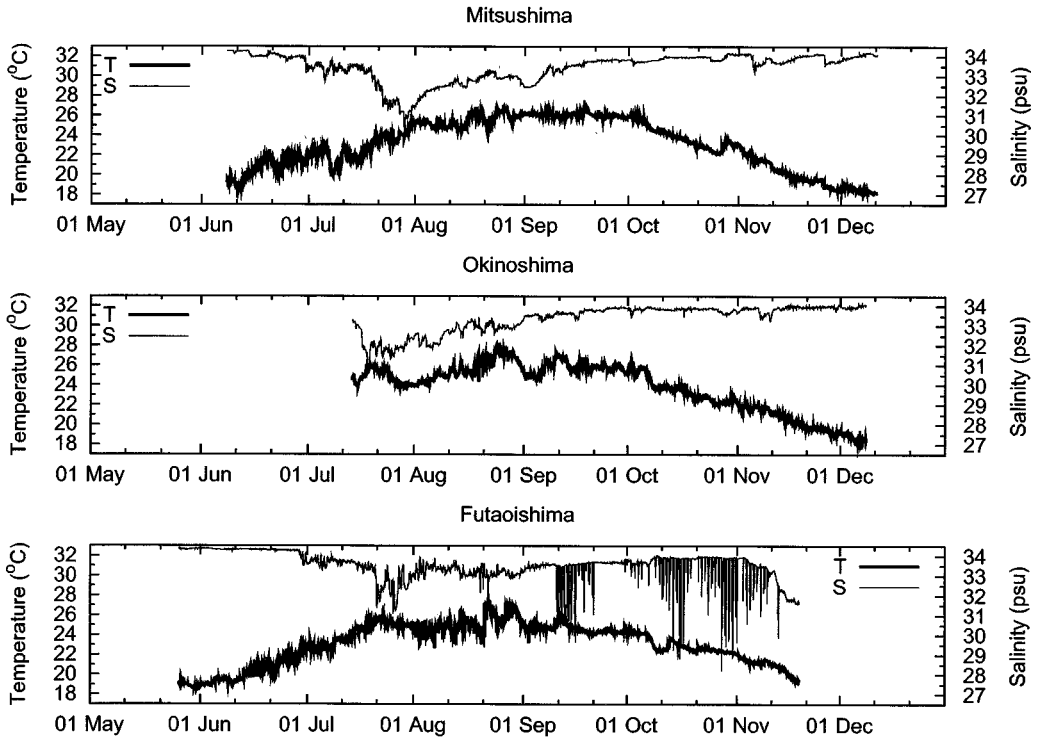


図 2: 美津島 (上段)，沖ノ島 (中段)，蓋井島 (下段) における水温・塩分の時系列 (2009 年)．

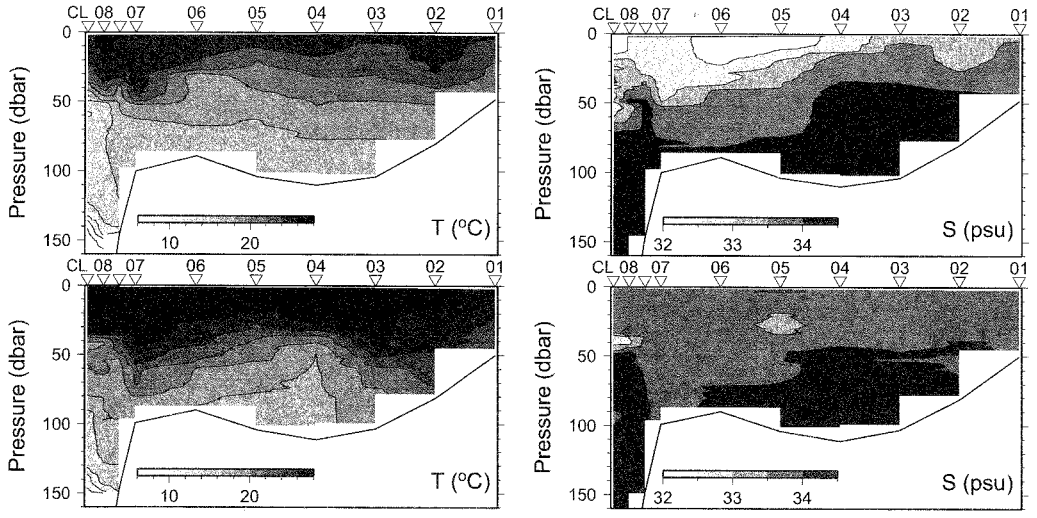


図 3: 2009 年 8 月 13 日 (上段) と 9 月 11 日 (下段) の CL 測線 (図 1) における水温 (左) と塩分 (右) の鉛直断面図．

数値生態系モデルを用いた赤潮発生メカニズムの研究

神戸大学　自然科学系先端融合研究環
内海域環境教育研究センター　林　美鶴

1．目的

赤潮発生メカニズムや卓越する赤潮種・植物プランクトン種は海域によって異なる。しかし出現するプランクトン種とその規模（出現範囲、濃度、個体数・密度など）を定量化するのは容易ではない。これに対して植物プランクトンの物理量測定を簡便に行う方法として、一般的に蛍光光度計が使用されている。これは植物プランクトンに含まれるクロロフィル色素の蛍光特性を利用した方法であり、例えば水温計と同じように自動で連続的な計測が可能である。しかし蛍光光度計の値はクロロフィル濃度に換算する必要がある。現場で採水・濾過した植物プランクトンについて分光光度法などによりクロロフィル濃度を測定し、これにより検量線を求める。一般にプランクトン蛍光は、昼夜別、プランクトン種別に異なるため、精度よくクロロフィル濃度を求めるためには多くのサンプルを条件別に分けて検量線を求めることが推奨されている。このため蛍光光度計の自動測定器という利便性が生かされずにいる。

一方で数値生態系モデルでは、モデルの再現性を検証するために出来るだけ多くの現場観測データが必要である。現在の数値生態系モデルの精度を考えると、蛍光光度からのクロロフィル濃度換算の精度にこだわるより、より時空間的に密なデータが広域で取得されることの方が望ましい。そこで本研究では、数値生態系モデルの検証に用いるクロロフィル濃度を蛍光光度計の自動連続測定により取得するために、水分析を出来るだけ少なくし、その代わりに蛍光物質を用いることで蛍光光度計の連続データをクロロフィル濃度換算する手法を検討した。

2．方法

2007 年 9 月 4 日～9 月 10 日の 7 日間にわたる神戸大学海事科学研究科練習船深江丸の航海で観測されたデータを用いた。航跡を図 1 に示す。蛍光光度及び植物プランクトン濃度の観測は三種類の方法で行った。一つは蛍光光度計付きの CTD(Conductivity Temperature and Depth Profiler)を用いた方法で、機関冷却用のインテイク海水を水槽に連続導入し、そこに CTD を設置して分 1 毎にデータを取得した。二つ目はハンディー式蛍光光度計による計測である。CTD 水槽から海水を採取して、ハンディー式蛍光光度計でこれを計測した。この時、蒸留水(ブランク)及び蛍光物質(サブスタンダード)も計測した。ブランクのクロロフィル濃度は 0 μg/l、サブスタンダードのクロロフィル濃度は事前に検定を行い 24.4 μg/l と解っているので、二点校正によりサンプル海水中のクロロフィル濃度を得ることができる。この測定を 1 時間毎に実施した。三つ目はクロロフィル色素分析である。図 1 に示す地点で採水と現場濾過を行い、冷凍保存したサンプルを用いてアセトン抽出の吸光法によりクロロフィル色素の分析を行った。

以上の 3 種類の測定値を用いて、以下の方法で CTD 付属蛍光光度計の値をクロロフィル濃度に換算した。

方法 1：色素分析によるクロロフィル濃度と、同時刻に計測された CTD 付属蛍光光度計の値で検量線を求め、これを用いて CTD 付属蛍光光度計の連続データをクロロフィル濃度に換算。これが一般的に用いられている方法である。

方法 2：ハンディー式蛍光光度計で計測したクロロフィル濃度と、同時刻に計測された CTD 付属蛍光光度計の値から検量線を求め、これを用いて CTD 付属蛍光光度計の連続データをクロロフィル濃度に換算。ハンディー式蛍光光度計は色素分析に比べ手軽に行えるため、検量線に用いるデータが 1)に比べ非常に多く使える。

3．結果

方法 1 及び方法 2 で求めた検量線を、それぞれ図 2 に示す。検量線の相関係数は方法 2 の方が高かった。クロロフィル濃度に換算した CTD 付属蛍光光度計の連続データと色素分析値を図 3 に示す。分析値と差は、方法 1 が 1.30 μg/l、方法 2 が 1.36 μg/l で大きな差はなかった。これらのことから、従来用いられている方法 1 に比べ方法 2 は遜色なく、より簡易的な方法で蛍光光度計の連続データをクロロフィル濃度に換算できることが示唆された。

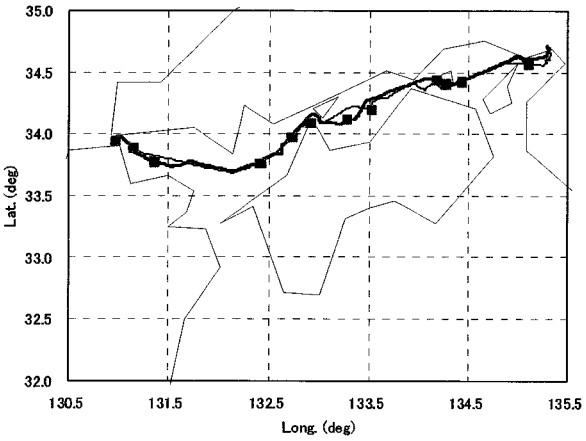


図１　航跡及び採水地点

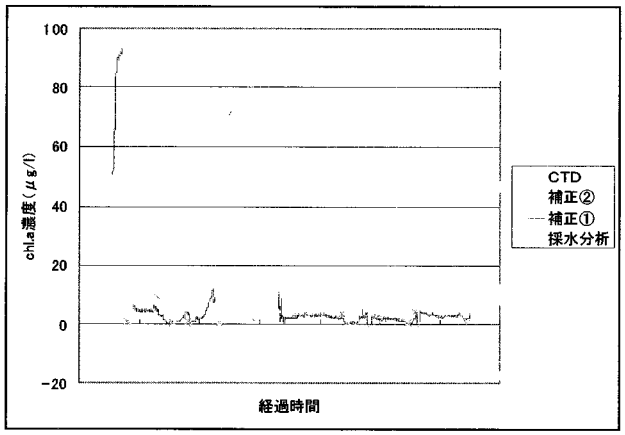


図３　補正後のクロロフィル濃度と採水分析値

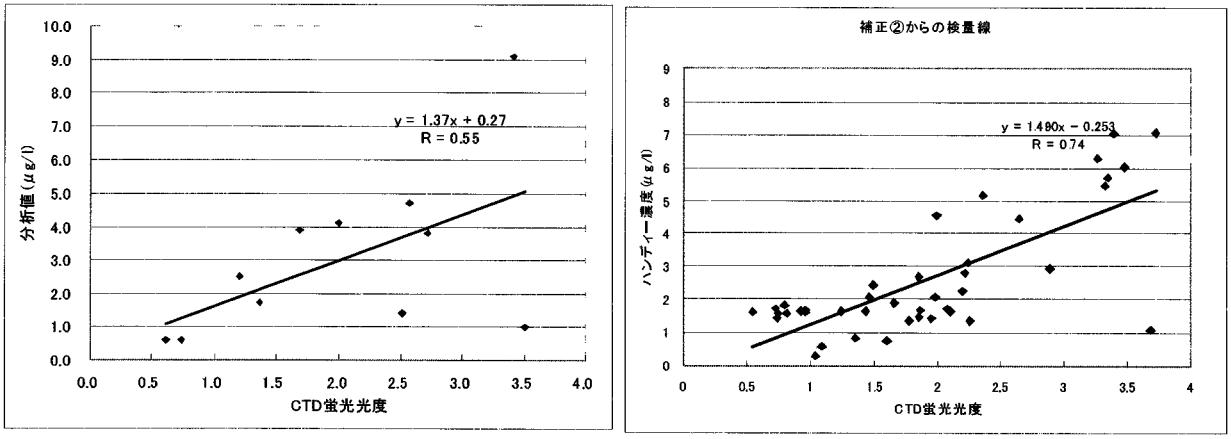


図２　方法１(左)と方法２(右)で求めた検量線

４．研究成果報告

Mitsuru HAYASHI and Tetsuo YANAGI：Water and phosphorus budgets in the Yellow River estuary including the submarine fresh groundwater, From Headwaters the Ocean, Hydrological Changes and Watershed Management, CRC Press, London, p.665-668, 2009.

５．研究組織

代表者：林美鶴
所属：神戸大学自然科学系先端融合研究環内海域環境教育研究センター
役職：准教授
担当：生態系モデル解析

分担者：柳哲雄
所属：九州大学応用力学研究所
役職：教授
担当：モデル評価

対馬島陰の低気圧性渦周辺における栄養塩・プランクトン分布

独立行政法人水産総合研究センター　　鬼塚　剛

1．目的

2006，2007年度に実施した応用力学研究所共同利用研究において，夏から秋にかけて対馬島陰に低気圧性渦が発生することやこの渦がクロロフィル濃度に影響を与えていることが明らかになった。また，人工衛星による夜間可視画像によると，低気圧性渦が観測された期間に渦周辺で集魚灯による輝度の高い領域が分布しており，低次生産のみならず高次生産への影響も示唆された。本研究では，対馬島陰に発生する低気圧性渦周辺において栄養塩・動植物プランクトン・仔稚魚分布に関する現場調査を実施し，低気圧性渦が生物生産過程に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。

2．観測及びデータ

観測は，2007年11月9－11日に独立行政法人水産大学校練習船天鷹丸によって実施された(Fig. 1)。観測項目は，ADCP，CTD観測による流速，水温，塩分，溶存酸素，蛍光強度(クロロフィル *a* に補正)，標準層採水による栄養塩(硝酸態窒素，亜硝酸態窒素，リン酸態リン，珪酸態珪素)，ネットサンプリング(ノルパック，ボンゴ，ニューストン)によるサイズ別動物プランクトン乾燥重量，仔稚魚個体数である。また，現場観測前後の低気圧性渦の時空間変動を把握するために，対馬・壱岐に設置されたHFレーダーによって得られた日平均表層流速ベクトルを使用した。

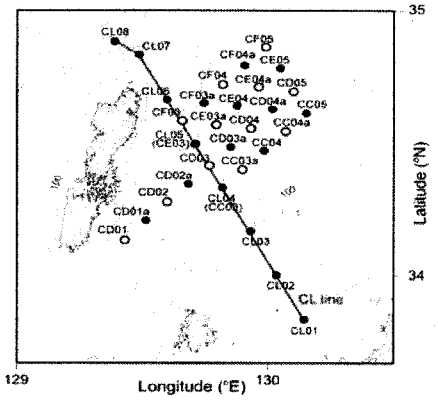


Fig. 1　観測点(白丸：CTD観測のみ，黒丸：標準層採水やネットサンプリングを実施)

3．結果と考察

HFレーダーから得られた表層流速ベクトルやCTD観測で取得された水温・塩分から推算された地衡流ベクトルの結果は，対馬島陰に発生した低気圧性渦の存在を捉えており，観測期間中に観測点CL05からCD04aに北東方向へ中心位置が移動していたことを示唆していた。CL測線断面図によると，低気圧性渦の中心付近とみられるCL05で水温・塩分・栄養塩の躍層深度が浅く，躍層上部でクロロフィル *a* 濃度が高かった(Fig. 2)。また，カタクチイワシ仔魚個体数は対馬島陰にあたるCL05-06で高かった。

水柱積算平均した水温・クロロフィル *a* 濃度に対するメソ動物プランクトン全体のバイオマス，個体数密度，カイアシ類個体数密度，カイアシ類の種数の相関をTable 1に示す。各項目で水温との相関はみられなかったが，クロロフィル *a* 濃度が高いと動物プランクトンバイオマスが高い傾向を示した。一番大きなサイズ画分のバイオマスや個体数密度，カイアシ類個体数で同様の傾向を示したことから，クロロフィル *a* 濃度が高くなると一番大きなサイズ画分のカイアシ類が増加し，結果として動物プランクトン全体のバイオマスや個体数密度が増えると考えられた。以上のようなクロロフィル *a* 濃度と動物プランクトンの相関関係は，植物プランクトンの多い水塊に動物プランクトンが集積していたことを示唆するが，そのメカニズムについてはさらなる検討が必要である。今後は，対馬島陰で多かったカタクチイワシ仔魚等魚類を含めた海洋生態系への影響について明らかにしていきたい。

4．研究組織

鬼塚　剛	独立行政法人水産総合研究センター	研究員	研究代表者：生物化学データ解析
杢　雅利	東京大学海洋研究所	技術職員	研究協力者：仔稚魚分析
小針　統	鹿児島大学水産学部	准教授	研究協力者：動物プランクトン分析
滝川哲太郎	独立行政法人水産大学校	助教	研究協力者：物理データ解析
森本　昭彦	名古屋大学地球水循環研究センター	准教授	研究協力者：栄養塩分析
柳　哲雄	九州大学応用力学研究所	教授	所内世話人

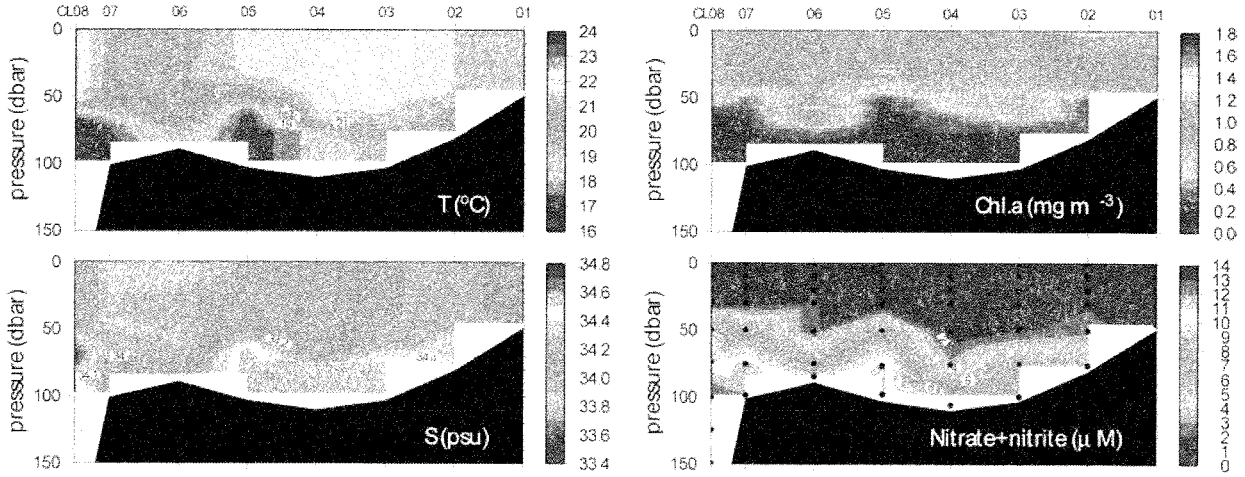


Fig. 2　CL 測線における水温，塩分，クロロフィル *a* 濃度，硝酸塩＋亜硝酸塩濃度の断面図

Table 1　観測点の水温・クロロフィル *a* 濃度(水柱積算平均)に対するメソ動物プランクトン全体のバイオマス，個体数密度，カイアシ類個体数密度，カイアシ類の種数のピアソンの相関係数。アスタリスクは相関係数が $p<0.05$ で有意あったことを示す。

Categories	>2.0	1.0-2.0	0.5-1.0	0.2-0.5	0.1-0.2	TOTAL
Biomass (mgDW/m^3)						
WT	0.068	-0.482	-0.226	-0.246	-0.162	-0.248
SAL	-0.235	0.068	-0.105	0.025	-0.211	-0.076
CHL	0.606 *	0.391	0.434	0.480	0.040	0.520
Abundance (inds/m^3)						
WT	-0.139	-0.089	-0.149	-0.508	0.304	-0.420
SAL	0.098	-0.269	0.125	0.153	-0.260	0.081
CHL	0.727 *	-0.156	0.311	0.108	0.021	0.159
No. of total copepods (ind/m^3)						
WT	-0.254	-0.015	-0.244	-0.565 *	0.320	-0.472
SAL	0.157	-0.455	0.267	0.255	-0.195	0.212
CHL	0.696 *	0.102	0.340	0.177	0.036	0.256
No. of copepod species						
WT	0.422	0.169	-0.573 *	0.439	0.333	
SAL	-0.087	0.122	0.093	0.067	-0.015	
CHL	-0.198	-0.077	0.187	0.215	-0.084	

日向灘における表層水温・塩分の経年変動

宮崎県水産試験場　　渡慶次　力

研究の目的

宮崎県水産試験場では，日向灘の海況変動の把握を目的に，過去から現在に至るまで毎月１回の海洋観測を実施している。日向灘における沿岸定線観測記録を解析した事例として，工藤(1978)による概略的な海洋構造の把握，秋山・柳(1989)による日向灘の水塊分布と季節変動の把握，林田(2010)による水温の長期トレンドの検討などがある。しかしながら，日向灘の海洋構造の経年変動特性については，不明な点が多く残されている。

日向灘の海況変動は沖合を通過する黒潮の影響を強く受けることが知られており，兼田ら(2002)は，黒潮が九州東岸から豊後水道にかけて接岸して流れる時に bottom intrusion が強くなり，九州東岸から豊後水道の水温が低下することを示し，底部エクマン層の岸向きの流れにより発生すると考察した。

そこで，本研究では日向灘の水温・塩分の経年変動特性と黒潮流路変動との関係について調べた。

使用したデータ

解析で使用したデータは，宮崎県水産試験場が原則として毎月１回実施している沿岸定線観測(図 1)のうち，1972 年 4 月から 2009 年 3 月の 38 年間の所定層水深(0,10,20,30,50,75,100,150,200,300m)の水温と塩分値である。水温・塩分値は，長期トレンドを除去後，観測値と月平均値の差を標準偏差値で規格化した平年偏差を 13 か月移動平均した（以下，偏差とよぶ。）。本研究では，EOF 解析により日向灘で卓越する時空間変動成分を抽出して，経年変動の特性を議論した。

また，水温・塩分偏差の経年変動と黒潮変動との関係を調べるため，海上保安庁海洋情報部より提供されている黒潮流軸データを黒潮変動の指標として使用した。

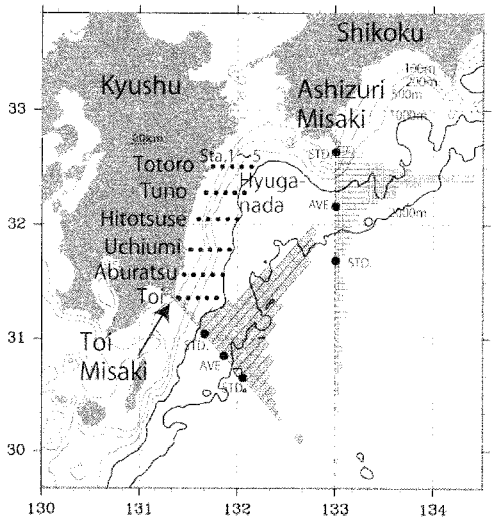


図１．沿岸定線観測地点。北から南へ６観測ライン，各ラインとも沿岸側から真東の沖合域へ Sta.1 から Sta.5 で設定されている。1972 年~2008 年の都井岬南東沖及び足摺岬南沖における黒潮本流の通過頻度（1 区画は緯度 1/20 度毎の区切り）。各岬沖の「AVE.」と「STD.」は，黒潮離岸距離の平均値と標準偏差値をそれぞれ示している。

結果

図 2 に EOF の時係数の経年変動を，図 3 に EOF の固有ベクトルを示す。図 2・3 の(a)(b)(c)は，水温偏差の EOF 第 1 成分，水温偏差の EOF 第 2 成分及び塩分偏差の EOF 第 1 成分をそれぞれ示している。水温偏差の EOF 第 1 成分の時空間変動については，寄与率 47%を占め，固有ベクトルの空間分布は日向灘全域で正の値を示し，時係数の経年変動は都井岬沖の黒潮離岸距離と正の関係があった。また，寄与率 68%を占める塩分偏差の EOF 第 1 成分の時空間変動についても，水温偏差の EOF 第 1 成分と類似した時空間変動をしており，黒潮離岸距離と正の関係がみられた。一方，寄与率 20%を占める水温偏差の EOF 第 2 成分の時空間変動については，概ね日向灘北部(土々呂～一ツ瀬)で負の値，南部(内海～都井)で正の値を示し，時係数の経年変動については都井岬沖の黒潮離岸距離と負の関係があった。ただし，塩分偏差の

EOF 第 2 成分(寄与率 10%)は，水温偏差の EOF 第 2 成分と類似した変動特性が見られなかった(図略)。

図 1 の都井岬沖における黒潮本流の通過頻度から判断すると，水温・塩分偏差の EOF 第 1 成分は，黒潮が平均的な離岸距離から標準偏差以内の離接岸時（全頻度の 75%)の，水温偏差の EOF 第 2 成分については平均から標準偏差以上の離接岸時（全頻度の 25%)の時空間変動特性を示していると考えられる。すなわち，観測海域への黒潮本流の接岸に伴って，日向灘の水温偏差は南部で正，北部で負となり，黒潮が平均的な離岸距離より標準偏差以内に接岸した時の水温・塩分偏差は全域で負となる特徴を示している(離岸時は接岸時と逆の関係となる)。

今後の展開

黒潮接岸時に伴って，日向灘北部にて負の水温偏差が陸棚斜面直上に限らずより広範囲に分布している点や，塩分偏差の低下の原因については，不明な点が多いため，今後も解析を進めて明らかにしていきたい。また，日向灘における流向・流速の時空間変動特性についても研究を進め，黒潮変動に伴う表層の流動場と水塊変動との関係解明を目指したい。

成果報告

渡慶次力・林田秀一(宮崎水試)・清水学・阪地英男(水研セ中央水研)・秋山秀樹(水研セ西水研)・福田博文(宮崎水試)・山田英俊(大分水試)・山本順(高知水試):表層型浮魚礁で観測された海況データの解析(Ⅰ).2009 年度日本海洋学会春季大会.

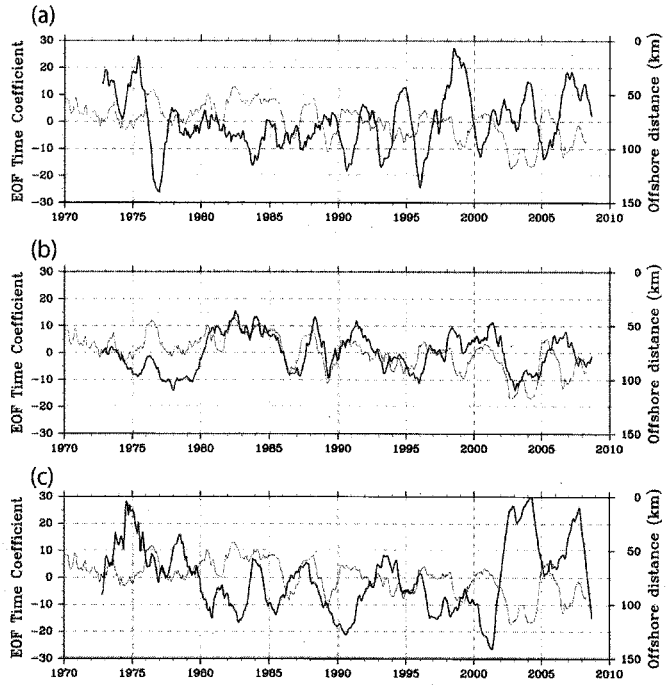


図 2. EOF の時係数(太線)及び都井岬沖の黒潮離岸距離(細線)の経年変動。上段から下段の順に，水温偏差の EOF 第 1 成分(a)，第 2 成分(b)及び塩分偏差の第 1 成分(c)を示す。

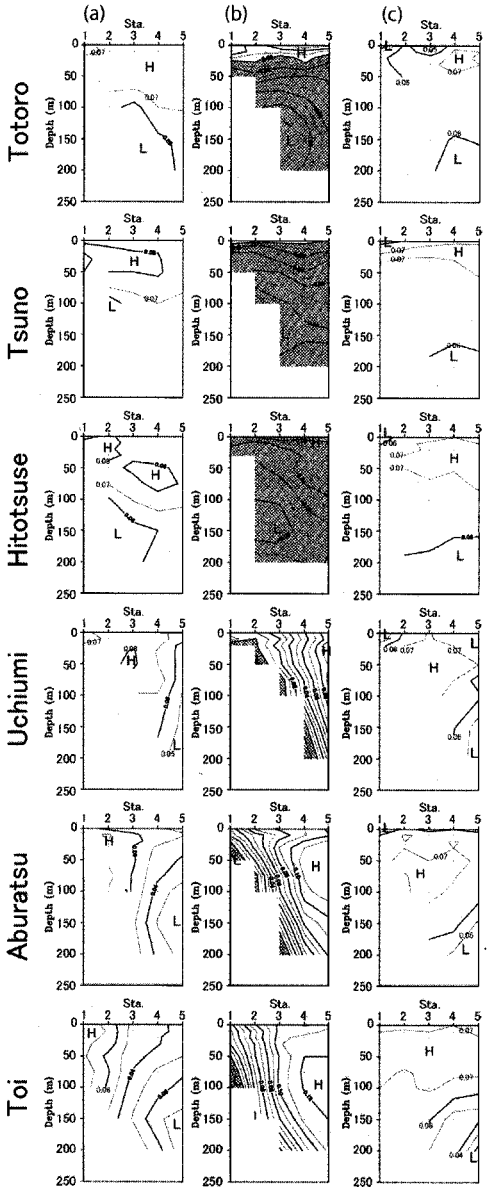


図 3. 水温偏差の EOF 第 1 成分(a),第 2 成分(b)，塩分偏差の EOF 第 1 成分(c)の固有ベクトル。ハッチ領域は負の値を，コンターインターバルは 0.1 を表す。

21 AO－12

衛星データを利用した黄砂の発生・輸送過程の解析

国立環境研究所

原　由香里

目的

衛星 CALIPSO 搭載ライダーCALIOP によって今日まで不十分であったダストの発生源上空や海上でのダストプルームの 3 次元構造が得られるようになった. そこで, 本研究では 2007 年 5 月後半の黄砂イベントを対象に, NIES 地上ライダー, CALIOP, 4 次元変分法を導入した黄砂モデル(RC4; RAMS/CFORS-4DVAR, Yumimoto et al., 2007)を用い, 観測された 2 つの異なるダストプルームの 3 次元輸送構造について解析した.

モデル・データの概要

本研究で使用した黄砂輸送モデルは RAMS/CFORS(Uno et al., 2003)を基礎とし, 4 次元変分法(Four Dimensional Data Assimilation; 4DVAR)を導入したデータ同化システム(RAMS/CFORS-4DVAR;RC4)である. RC4 のデータ同化計算には, NIES ライダー観測の偏光解消度をもとに非球形粒子成分（ダスト）に分離・インバースしたダスト成分の消散係数を用いた(Shimizu et al., 2004). 利用したライダー観測地点は図 1 の 9 地点であり, シミュレーション期間は 2007 年の 5 月 20 日～5 月 31 日までとした. モデルの計算領域は図 1 に示した領域(計算中心を 37.5° N, 115° E)であり水平解像度を 40km (180 × 100 格子点), 鉛直解像度は 140-650m で 23km までを 40 層で分割した. RAMS の気象場計算の初期条件・境界条件には NCEP/NCAR の解像度 2.5° × 2.5° の全球再解析データ（6 時間毎）を用いた.

CALIOP Level 1B Ver.2.01 データには 532/1064ηm における減衰補正なし後方散乱係数と観測偏光解消度が提供されている. 本研究では NIES ライダー観測同様, Fernald のインバージョン法(Fernald, 1984)によりエアロゾルの後方散乱係数を求めた. ライダー比は 30sr を仮定した. Level 2 Ver.2.01 の CAD データは雲マスキングに使用した.

結果と考察

まず, NIES ライダーデータによる 4 次元データ同化の結果, モデルによるダストの総発生量は修正され(17.4%減少),, 各観測地点におけるモデルと観測のダスト AOT の RMSD(Root Mean Square Difference) は 31.2 - 66.9 %にまで減少したことを確認した(表 1). 次に, NIES ライダー, CALIOP, RC4 を用いて寒冷前線の西側を輸送される寒冷域輸送パターンと低気圧の暖気面に取り込まれる温暖域輸送パターンについて解析した. 図 2 (a)にその寒冷域輸送パターン(図 1 の L_1-1-4)についての CALIOP(トーン)と RC4(コンター)によるダスト消散係数を示す. 白抜きの部分は雲/雲以下を示す. 図 2(b)に(a)の実線部領域の平均鉛直プロファイルを示す. 図 2 から, モデルはダスト発生時(L_1-1)のダスト舞い上げ高度や水平スケールを適切に再現していることがわかる. また, ダスト層の厚さは 2-3km であり, 緯度方向に 1400-1600km 程の広がりを持って大気境界層内を発生域から太平洋上まで輸送されてゆく過程が図 2 から明瞭に見て取れる. 図 3 は地上-1km の L_1-1-4 の CALIOP データから得られた粒子偏光解消度と粒子後方散乱係数の 2 波長比についての散布図であり, A は硫酸塩, B はダストを仮定した任意の値である. 実線は A と B の外部混合曲線である. これからダストプルームが輸送されるにつれ, 偏光解消度が減少する傾向が見られ, 人為起源エアロゾルとダストの混合が, 輸送中に外部混合から内部混合へシフトしている可能性が示唆される.

成果報告

原著論文(査読あり)

Asian dust outflow in the PBL and free atmosphere retrieved by NASA CALIPSO and an assimilated dust transport model

Atmospheric Chemistry and Physics, 2009

Hara, Y., K. Yumimoto, I. Uno, A. Shimizu, N. Sugimoto, Z. Liu, and D. M. Winker

Table 1 Locations of NIES lidar Sites, RMSD, and Dust emission statistics

Station	Longitude °E	Latitude °N	CTM/RMSD AOT	RC4/RMSD AOT	Reduced ratio [a] %
Beijing	116.46	39.92	0.487	0.223	-54.6
Seoul	126.90	37.50	0.329	0.109	-66.9
Hedo/Okinawa	128.25	26.87	0.070	0.076	+8.6
Nagasaki	129.86	32.78	0.166	0.171	+3.0
Matsue	133.01	35.21	0.252	0.173	-31.3
Toyama	137.10	36.70	0.217	0.134	-38.2
Niigata	138.94	37.84	0.189	0.130	-31.2
Tsukuba	140.12	36.05	0.189	0.111	-41.3
Sendai	140.84	38.25	0.205	0.134	-34.6
			CTM/ Emission (Tg)	RC4/ Emission (Tg)	Difference [b] Emission (Tg)
Dust Emission	-	-	74.9	61.9	-17.4

a) Improved ratio by data assimilation for AOT

b) Difference in dust emission.

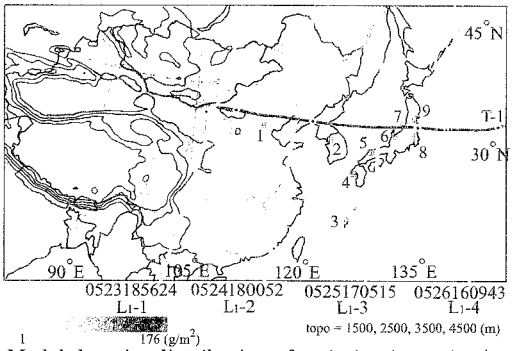


Figure 1. Model domain, distribution of emission intensity (gray tone level) and topographical elevation (contour lines). Dots indicate the locations of NIES LIDAR network; 1:Beijing, 2:Seoul, 3:Hedo, 4:Nagasaki, 5:Matsue, 6:Toyama, 7:Niigata, 8:Tsukuba, 9:Sendai. Thick solid lines with cross are CALIPSO orbit paths, and ten digits number at the bottom of each figure is the CALIPSO path time (mon/day/hr/min/sec). The black line with diamond is the HYPACT forward trajectory (T-1) starting from May 23 19UTC. Diamond shows a location at 0UTC.

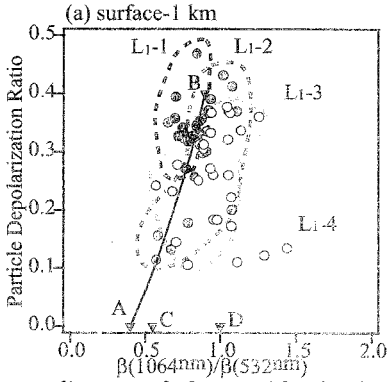


Figure 3. Scatter diagram of the particle depolarization ratio (PRD) and the color ratio (CR) derived from L1-2, 4, 6 and 8 CALIOP data for three altitude levels. Solid line indicate theoretical curve for an external mixture of sulfate (A), dust (B), sea salt accumulation mode (C) and sea salt coarse mode (D).

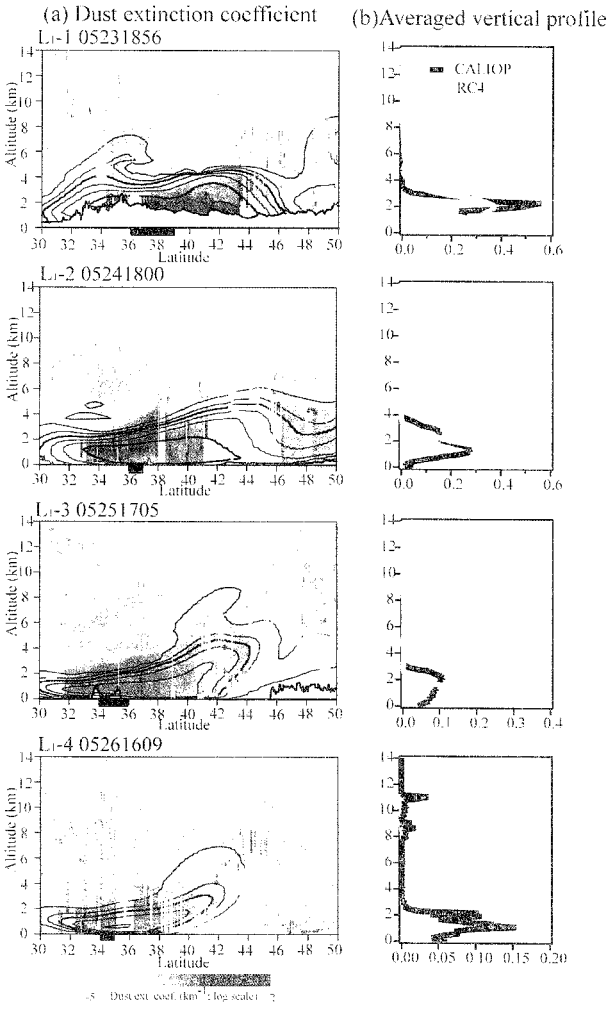


Figure 2. (a) Vertical cross-sections along CALIPSO path (L1-1, 2, 3 and 4) based on CALIOP dust extinction (color) and RC4 dust extinction coefficient (thick line). (b) Averaged dust extinction coefficient vertical profiles based on CALIOP (black) and RC4 (gray).

東アジア域の NO_x 排出と日本域への窒素栄養塩負荷に関する研究

大阪府立大学大学院　工学研究科　坂東 博

【はじめに】

近年の中国における経済発展に伴い、中国国内から排出される窒素酸化物量が増大し、日本国内を含むアジア大陸縁辺地域ではバックグラウンドレベルの反応性総窒素化合物 (NO_y) の濃度増大が今後問題となってくる可能性がある。また、中国－日本間は海であり、中国から飛来してくる NO_y の海への沈着により、日本沿岸への窒素栄養塩降下量が増大することが考えられる。それによって、日本沿岸における海洋の窒素循環にも影響を及ぼす可能性が懸念される。

このような状況下、研究代表者および研究協力者ら (高見昭憲、清水厚、竹中規訓、定永靖宗、弓場彬江) は沖縄県辺戸岬にある、「独立行政法人国立環境研究所　大気・エアロゾル観測ステーション (CHAAMS)」(北緯 26.86°　東経 128.25°, 海抜 60 m) において NO_y, ガス状硝酸 (HNO_3(g)) および粒子状硝酸 (NO_3^-(p)) 濃度の定点通年観測を行なっている。辺戸岬はローカルな窒素酸化物の大きい発生源が少ないリモートサイトであり、バックグラウンドレベルの NO_y 濃度を測定するのに適している。

一方、九州大学応用力学研究所 (所内世話人: 鵜野伊津志) においてはRAMS/CMAQ 化学物質輸送モデルにより、東アジア地域での汚染物質濃度などが計算されている。本研究では、このモデルを利用して、日本周辺域における窒素化合物の沈着量を見積もることが最終目標である。平成 19, 20 年度にかけては、NO_y, HNO_3(g), NO_3^-(p), 硫酸塩 (SO_4^{2-}(p)), アンモニウム塩 (NH_4^+(p)), アンモニア (NH_3(g)) 濃度についてモデルと観測との相互比較を行なった。その結果から、中国大陸からの NH_4^+(p), NH_3(g), SO_y (= SO_2 + SO_4^{2-}) の排出および輸送過程については、CMAQ で非常に良く再現されていると結論した一方、NH_3(g) については、モデルが過小評価する結果となった。これは、CHAAMS 周辺の NH_3(g) は近傍での発生によるものが主であると考えられ、モデルではそれが反映されていないことが理由であると考えられた。更に、HNO_3(g), NO_3^-(p) についてはそれぞれモデルが過大、過小評価する結果となり、その主な理由としてはモデルでは海塩粒子や黄砂と HNO_3(g)との反応が組み込まれていないことにより、モデルにおける硝酸のガス－粒子分配比がガスのほうに偏っていることが挙げられた。しかしながら、全硝酸 TN (= HNO_3(g) + NO_3^-(p)) の濃度を比較すると、モデルのほうが 50% 程度高い結果となった。このことから、モデルと観測との不一致の要因は硝酸のガス－粒子分配比だけではなく、モデルでは全硝酸の多くが HNO_3(g) であることから、HNO_3(g) の沈着速度が実際よりも低く設定されている可能性が考えられた。

平成 21 年度では、HNO_3(g) の沈着速度について議論するため、主に観測の面から NO_y, HNO_3(g), NO_3^-(p)の日内変動について着目した解析を行った。本報告書ではその結果について述べる。

【観測について】

NO_y, HNO_3(g), NO_3^-(p) の濃度測定には Thermo Electron 社製 NO_x 計 Model 42C-TL を大阪府立大学で改良した NO_y, HNO_3(g), NO_3^-(p) 計を用いた。NO_y, HNO_3 の観測は 2005 年から、NO_3^-(p)の観測は 2008 年から継続して行なっている。本研究の解析には NO_3^-(p) の測定を開始した 2008 年 2 月以降に着目し、解析を行なった。

【結果および考察】

2008 年 2 月から 12 月のデータを用い、NO_y, HNO_3(g), NO_3^-(p)の日内変動を解析した。その結果を図 1

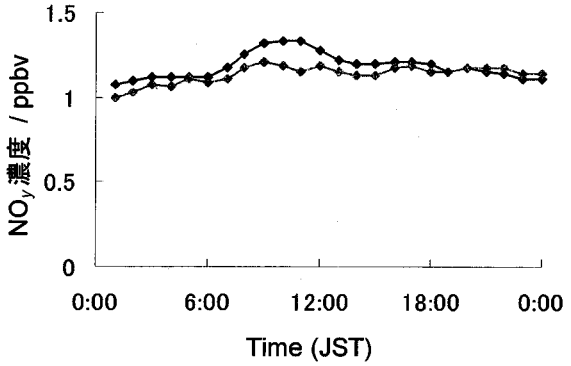


図 1. 2008 年 2 月から 12 月の沖縄辺戸岬における NO_y 平均日内変動パターン。黒は local emission を含む場合、灰色は local emission を排除した場合の解析結果を示す。

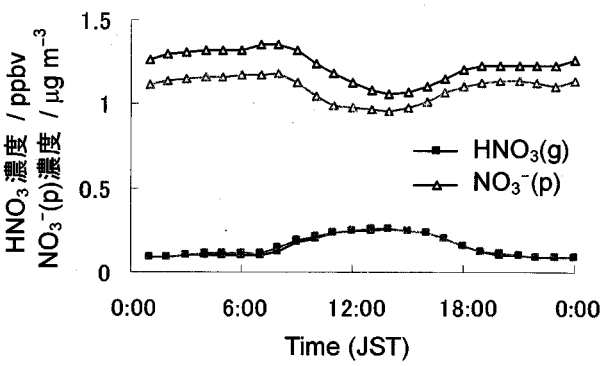


図 2. 2008 年 2 月から 12 月の沖縄辺戸岬における HNO_3(g), NO_3^-(p) 平均日内変動パターン。黒は local emission を含む場合、灰色は local emission を排除した場合の解析結果を示す。

および図 2 に示す。図 1 より NO_y は 9 時から 11 時に濃度の極大が見られた。近傍における窒素酸化物の発生 (=local emission) を考慮するため、一次汚染物質の濃度変動により近い[NO_y]−[HNO_3(g)]の変動値が 0.1 ppbv min^{-1} 以上である場合、local emission と定義し、local emission を含めた場合、取り除いた場合の比較を行なった (図 1)。Local emission を含めた場合に見られたピークが local emission を取り除いた場合には見られなくなった。そのため、清浄地域においても観測地点のごく近傍での窒素酸化物排出によって日内変動が起こる可能性が明らかとなった。

また、図 2 より HNO_3(g) は 14 時に濃度ピークを持つため、大陸からの長距離輸送だけでなく、観測地点近傍における HNO_3(g) の光化学生成の可能性を示す結果となった。NO_3^-(p) は 14 時に濃度が最小となることが明らかとなった。NO_3^-(p) については月別に見ると図 2 で示したような変動が見られない場合もあり、その要因については更なる解析が必要である。一方、HNO_3(g) の日内変動パターンは気塊の輸送経路や季節によって大きく変動しない。更に HNO_3(g) の日変化の振幅を NO_y 濃度で除した値の季節変動を見ると、夏季に高く、冬季に低い結果となった。夏場のほうが太陽光強度が大きいことから、この結果は HNO_3(g) の光化学生成を支持していると考えられる。以上のことから、HNO_3(g) の日内変動を支配する要因は長距離輸送によるものというよりも、むしろ観測地点近傍での HNO_3(g) の光化学生成、輸送であると考えられる。

日の入り後から HNO_3(g) が下がり、夜間の安定した濃度になるまでの時定数は約 2 時間と見積もられた。これは、大気混合層高度を 500 m と仮定した場合、HNO_3(g) の沈着速度は 7 cm^{-1} となる。しかしながら、実際には HNO_3(g) が減る過程は沈着だけではなく、海塩粒子等への取り込みもあるため、この値は上限値であることに注意を払うべきである。一方、モデルで設定されている HNO_3(g) の沈着速度は沈着する地面や気象条件にも依存するが、おおよそ 2-7 cm s^{-1} の範囲であり、今回見積もられた寿命から算出した沈着速度と大きくは異ならない。このことから、モデルと観測との不一致の要因として HNO_3(g) の沈着速度が実際よりも低く設定されているという可能性は低いと考えられる。

【論文目録】

- Characteristic of organic aerosol in a remote area of Okinawa Island, X. Lun, A. Takami, T. Miyoshi, and S. Hatakeyama, J. Environ. Sci. 21, 1371–1377, 2009. 他 3 件

【学会発表など】計 41 件

モデルと観測を統合した東アジア規模のオゾン・エアロゾル汚染に関する研究

海洋研究開発機構　山地一代

1. はじめに

人為起源の排出量増加に伴って、東アジア地域全体のオゾン・エアロゾル広域汚染が、近年ますます深刻になってきている。この問題を解決するには、広域大気汚染の現状を把握し、効率良く汚染濃度を下げる為の環境対策を講じる必要がある。領域大気物質輸送モデルは、東アジア地域の大気汚染状態の定量的な評価および発生源寄与率の算出が可能であるので、東アジア地域の広域大気環境問題の解決にとって欠かせない。本研究では、各種観測データを用いて、領域大気物質輸送モデルの予測精度の向上を進めている。本年度は、モデルによる春期オゾンの過小評価の原因の一つである、農業残さの野焼き起源の排出インベントリの改良を行い、改良した排出インベントリを用いてモデル実験を実施した。

2. モデルシミュレーションの概要

領域大気物質輸送モデルは、CMAQ（Community Multi-scale Air Quality Model）v4.4 を基本モデルとし、CMAQ-MADRID を用いた実験や最新の v4.7 への移行を進めた。CMAQv4.4 モデル実験において、化学・エアロゾルスキームは SAPRC-99 と AERO3 を用いた。計算領域は、北緯 25°・東経 115°を中心とした、水平解像度 80km、78x68 グリッド、鉛直 14 層（最下層 150m、最上部約 23km）である。領域気象条件は、NCEP/NCAR の再解析データ（1.0° x1.0°）を初期値とナッジング時に利用した、RAMS（Regional Atmospheric Modeling System）の 3 時間毎の出力データを用いた。領域モデルの側面境界物質濃度は、CHASER（chemical AGCM for study of atmospheric environment and radiative forcing）の出力データの日平均値を用いた。

3. 人為起源の排出量データ

バイオマス・バーニング起源の排出量は、Yan et al.（AE, 2006）の bottom up 型排出量推計手法を利用して、年間排出量を算出し、衛星からの Hotspots データを用いて、daily gridded emission data（図 1）を作成し、モデル実験に利用した。バイオマス・バーニング以外の人為起源排出量は、REAS (Regional Emission inventory in Asia)を用いた。

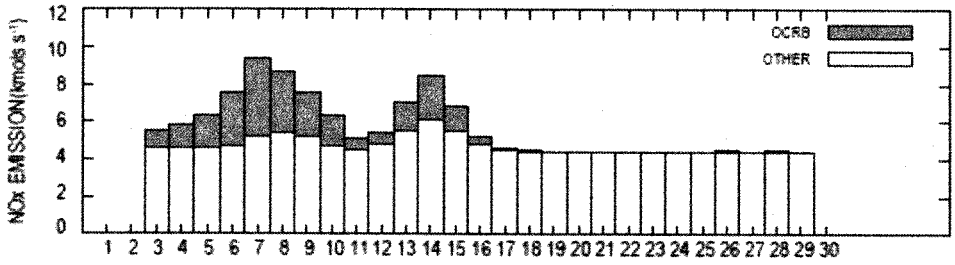


図 1 Central East China (CEC) 域の NOx 日排出量 (OCRB:野焼き起源、OTHER:野焼き以外)

4. 結果および考察

初夏（6 月）、Central East China（CEC）域では、対流圏オゾンや BC 等の大気汚染物質濃度が極大となる。この状況の把握とメカニズムの解明のために、オゾン、オゾン前駆気体、およびエアロゾル等の集中観測が、CEC の中央に位置する泰山山頂(36°N, 117°E, 1533 m a.s.l.)において実施されており、この観測濃度とモデル濃度の比較を行なった。

図２では、バイオマス・バーニングの日々の影響を考慮していないモデルシミュレーションと今回作成した daily emission inventory 用いたモデルシミュレーションの結果を比較する。daily emission inventory 用いる事で、オゾン・エアロゾル（BC と OC）濃度の再現性が向上した（図 2）。daily emission inventory を用いた場合、モデルと観測の間の相関係数は r=0.54-0.66 となり、バイオマス・バーニングの日々の影響を考慮していないもの（r=0.03-0.46）と比べて、非常に良い。さらに、月平均オゾン濃度も、大幅に改善した。特に、6 月前半の二度の高濃度ピーク（6/5-7、12-13）とその間の低濃度を上手く再現する事ができた。この高濃度ピークは、華北平原南部の野焼きと南西風の影響をうけていた。一方、二つの濃度ピークの間（6/9-10）は、風向きが北西へ変わった影響を受け、華北平原南部の野焼きの影響を受けず濃度が下がった事が判明した。バイオマス・バーニングの日々の影響を考慮したモデル実験の実施および観測との比較により、東アジアの領域大気物質輸送モデル実験精度の向上に成功した。

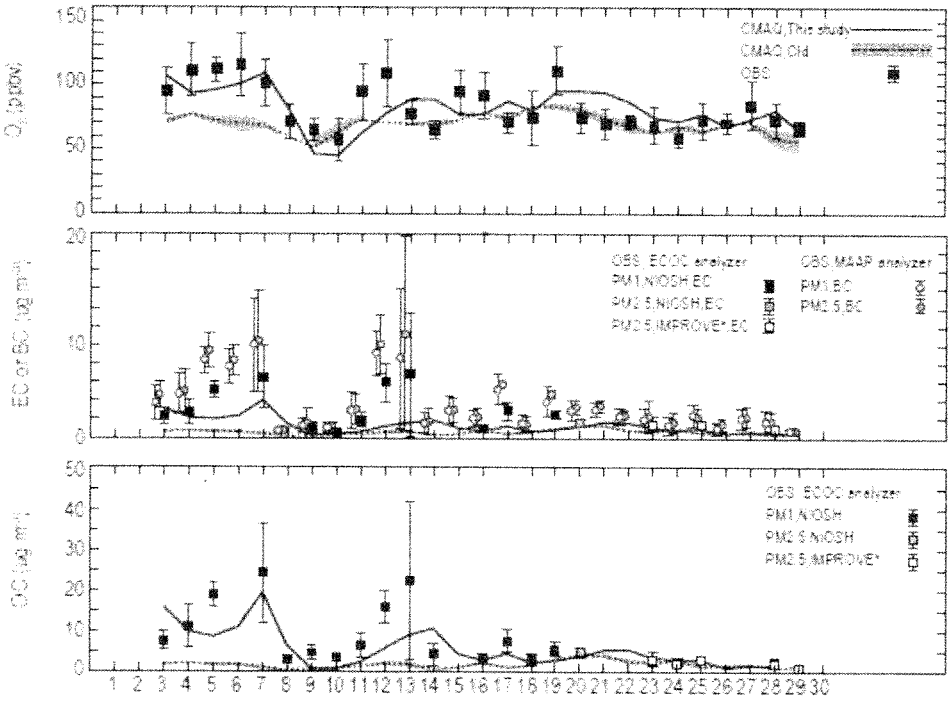


図２ ６月の泰山山頂におけるオゾン・エアロゾル（BC と OC）の観測・モデル濃度の日平均値
（This study: daily emission inventory を用いた、Old: daily emission inventory を用いない）

5. 研究成果

Yamaji et al., 2009, Impact of open crop residual burning on air quality over Central Eastern China during the Mount Tai Experiment 2006 (MTX2006), ACPD, 9, 22103-22141, 2009

6. 研究組織

山地一代、Li Jie、滝川雅之、金谷有剛、八代尚（海洋研究開発機構）、
大原利眞（国立環境研究所）
鵜野伊津志（九州大学 応用力学研究所）

若狭湾の海洋モニタリングにむけた基礎研究

福井県立大学　海洋生物資源学部　兼田淳史

【研究の目的】

若狭湾南部の常神（つねかみ）の沖（図１）では、福井県水産試験場が2003年から水温の観測ブイを設置している。2006年7月、この観測ブイはデータを配信する機能を備えたものに変わり、測定した水温は速やかに公開されるようになった。現在，携帯電話や電子メールを使うことにより、ブイで測定された水温値は誰でも知ることができる。若狭湾では定置網漁業や養殖漁業、釣りなどのレジャー産業が盛んに行われているため、この水温情報は最新の海況を理解するための新たなツールとして期待されているが，この水温情報を有効に利用するためには、常神沖の平均的な水温の季節変動や、年による水温差の大きさ、若狭湾内の別の場所との水温差などの情報が必要である。そこで本研究は、日本海で豊富な調査・研究の実績がある九州大学応用力学研究所（千手智晴准教授、所内世話人）、若狭湾で長年にわたって海況調査を実施している福井県水産試験場（前田英章氏、瀬戸久武氏）と協力し、常神沖における水温の変動特性の知見を得ることを目的として実施した。

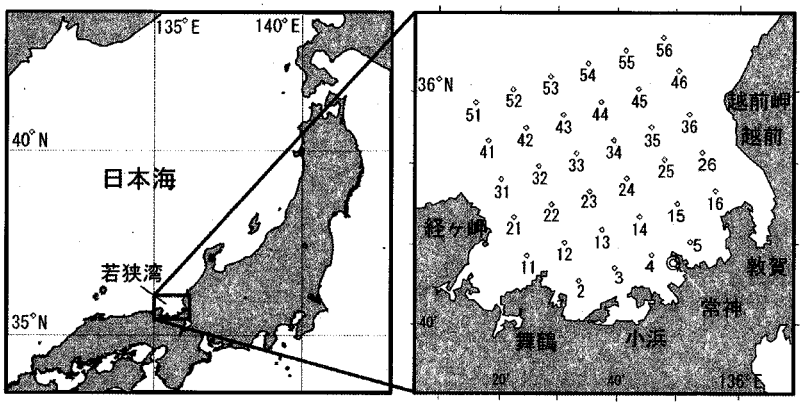


図1　若狭湾および観測地点．◎は水温観測ブイが設置されている常神の観測地点，○は船舶調査の定点観測地点を示している．

【観測および解析データ】

常神沖の水温連続観測は、福井県水産試験場によって常神半島先端付近の岸から500m程度離れた定置網近傍（水深約60m）で実施されている。冬季は海が荒れて観測で用いるブイを係留することが不可能になるため、例年4月上旬から12月頃までが観測時期となる。観測ブイの海面下10m、50mにはメモリー式水温計（Hobo water temp pro，tidbit）を取り付け、10分ごとに測定した。そして、2006年7月から、(社)漁業情報サービスセンターと福井県水産試験場は、上で述べたように新しい水温ブイを導入し、準リアルタイムで水温データの配信を開始した。このとき、観測層数は増加して、海面下１m、10m、30m、50m層の計4層で測定されることになった。本研究の解析では、長期間にわたってデータが揃っている海面下10mと50mの水温データを用いた。ここでは日周期以上の変動について着目することとし、観測データから日平均データセットを作成して解析に利用した。また、測器の故障や大型クラゲの来襲による観測ブイの撤去などにより、長期間にわたって欠測した年もあった。

常神の水温と若狭湾内の別の場所の水温と比較するため、福井県水産試験場が図１に示す若狭湾内の測点で実施している定点観測のデータを利用した。各観測点では、福井県水産試験場の調査船「福井丸」が備えているCTD（FSI社製ICTD）を用いて、海面から海底までの水温と塩分が測定されている。本

研究では、2003 年から 2008 年に観測された定点観測データのうち、常神で水温が測定されている日に観測を実施している日の多かった 2005 年と 2008 年のデータを利用した。

【結果】

結果の一例として、図２には 2003 年から 2008 年の同じ日の平均値および、最高水温、最低水温を示す。2003 年から 2008 年のうち 4 年以上のデータが揃っていない日は、データを示さず空白にしている。海面下 10m の水温は、4 月頃 14℃程度になり，その頃は年による水温の差は比較的小さい。5 月から 6 月にかけて 16℃から 20℃程度まで昇温し、7 月頃になると平均水温は 24.5℃程度になる。初夏よりも年による水温の違いは大きい。8 月中旬から 9 月頃に最高水温を迎え、その後は緩やかに低下し、10 月頃には平均水温は 22℃程度まで下がる。次に、海面下 50m の水温変化に着目すると（図２下）、海面下 10m と 50m の水温時系列では季節変動は大きく異なっている。海面下 50m における 4 月の平均水温は観測日数が十分ではないのでよくわからないが、5 月頃は 14.5℃程度である。その後、6 月から 7 月頃まで、水温は次第に上昇して 7 月には約 21℃程度となり、7 月上旬頃まで水温は上昇するものの、7 月中旬頃から 10 月頃にかけて水温変化の傾向は上層と大きく異なるようになる。海面下 10m の水温は初夏から真夏にかけて高温化するにも関わらず，海面下 50m では水温が上層しない、あるいは低下する傾向があることがわかった。また、海面下 10m，50m ともに真夏には水温は年によって大きな違いが生じる傾向があり、8～9 月頃の年による水温差は約 4℃にも達していた。さらに、常神の水温と若狭湾内の観測点（図１）で同日に測定された海面下 10m と 50m の水温値を比較し、常神の水温との差について調べた。越前岬と経ヶ岬を結んだ線を湾内とすると（図１）、湾内の水温差は海面下 10m、50m ともに 0.5℃以下と小さく、常神の水温が湾内の水温状況の指標の一つとなることが示唆された。湾外にあたる観測点 51-56 周辺では、常神の方が 0.5～１.0℃程度高い傾向があったため、湾口から湾外にかけての水温は、常神の測定値よりもやや高温の傾向があることに注意する必要があることがわかった。

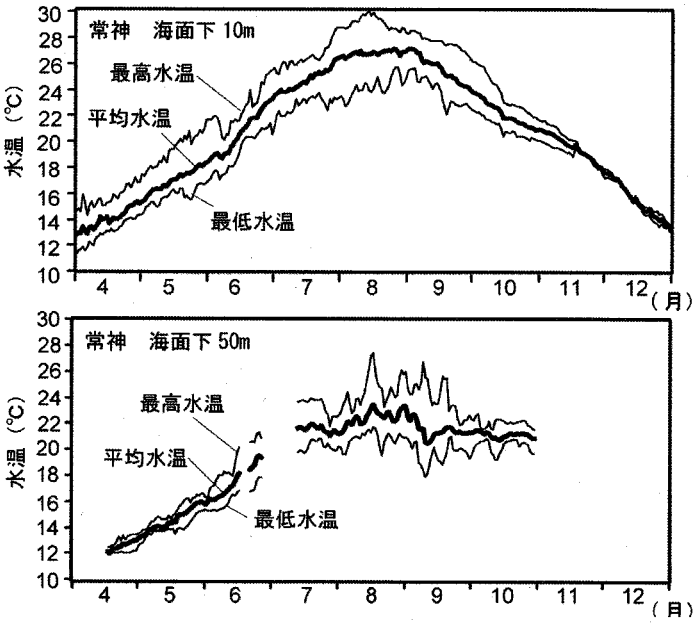


図2　常神沖の海面下 10m（上）と 50m（下）における 4 月 1 日から 12 月 31 日までの平均値と最高水温と最低水温（2003 年から 2008 年までのデータを用いて日ごとの平均値、最高水温、最低水温を示している.）

本研究を通して得た常神沖における水温の平均的な季節変化や年による違いなどの統計値は表、図にまとめて福井県立大学論集に発表し（印刷中）、常神の水温情報とともに有益な情報として利用する予定である。

【謝辞】

本報で利用した海洋データの取得には福井県水産試験場の調査船「若潮丸」、漁業情報サービスセンター、常神須崎定置網組合の皆様にご協力頂いた。ここに厚くお礼申し上げる。

東アジア域における大気エアロゾルの気候影響に関する研究

富山大学大学院理工学研究部（理学）　青木 一真

1．はじめに

東アジア域では、人為起源の大気中に浮遊する微粒子（エアロゾル）が急激に増加しており、越境大気汚染が深刻な問題となっている。エアロゾルは、太陽放射や赤外放射を散乱・吸収することにより地球の大気放射収支に変調を及ぼす。また、それら微粒子が雲の凝結核や氷晶核になることにより雲の微物理的特性を変化させ、気候に影響を及ぼす。2003年から応用力学研究所において、スカイラジオメーターを用いたエアロゾル光学的特性の継続観測を行い、解析を行っている。本研究は、得られた観測データにより、東アジア域のエアロゾル気候影響の現状を評価することを目的とする。観測データを用いてエアロゾル気候影響を評価する際には、応用力学研究所大気変動力学分野で開発・改良されているエアロゾル気候モデルSPRINTARSを用いる。また、同様の測定を行っている長崎大学や福江島と連携して、本研究を進めて行く。

2．観測・解析概要

大気放射観測網SKYNET/Sky radiometer（http://skyrad.sci.u-toyama.ac.jp/）で使われているスカイラジオメーターを使用して、大気放射観測により解析されたエアロゾルの光学的厚さ・オングストローム指数（エアロゾル粒径の指標）・一次散乱アルベド（放射吸収のパラメータ）を用いて、気候変動の指標である放射強制力を求める。また、これらのデータを地上検証として用いてSPRINTARSを改良し、東アジア全体の広域的な放射強制力のさらなる精度向上を目指している。

3．結果及び、考察

九州北部地方での観測データは、東アジア域のエアロゾルの特徴を掴むには非常に重要である。Fig.1は、日本海側に位置する富山県富山市と長崎県福江島の0.5 μmのエアロゾルの光学的厚さの月平均値を示している。一部、平均値が違うところもあるが、概ね、季節変動も絶対量も似た傾向にあった。この結果から、光学的厚さは春に最大で、秋から冬にかけて最小になる傾向であり、大陸の風下にある富山や福江島において、大陸からの影響による光学的厚さの変動が示唆される。特に、春季は黄砂現象に伴う、光学的厚さの増加とオングストローム指数の減少が確認された。また、どのような粒径半径が光学的特性に影響しているか、体積粒径分布を示す。Fig.2は、福江島における2009年3月～5月までの体積粒径分布の月平均値である。粒径半径0.1～0.2 μmの微小粒子による人為起源エアロゾルの影響が示されているが、それ以上に、粒径半径1.0～2.0 μmの黄砂粒子の影響が確認された。それ以上大きな粒径にもピークが見られるが、現在、その粒子がどのような影響によってもたらされているか、検証中である。今後も継続して観測を行い、SPRINTARSや衛星観測等と比較して、越境大気汚染やローカルな影響評価を行い気候影響の解明につなげたい。

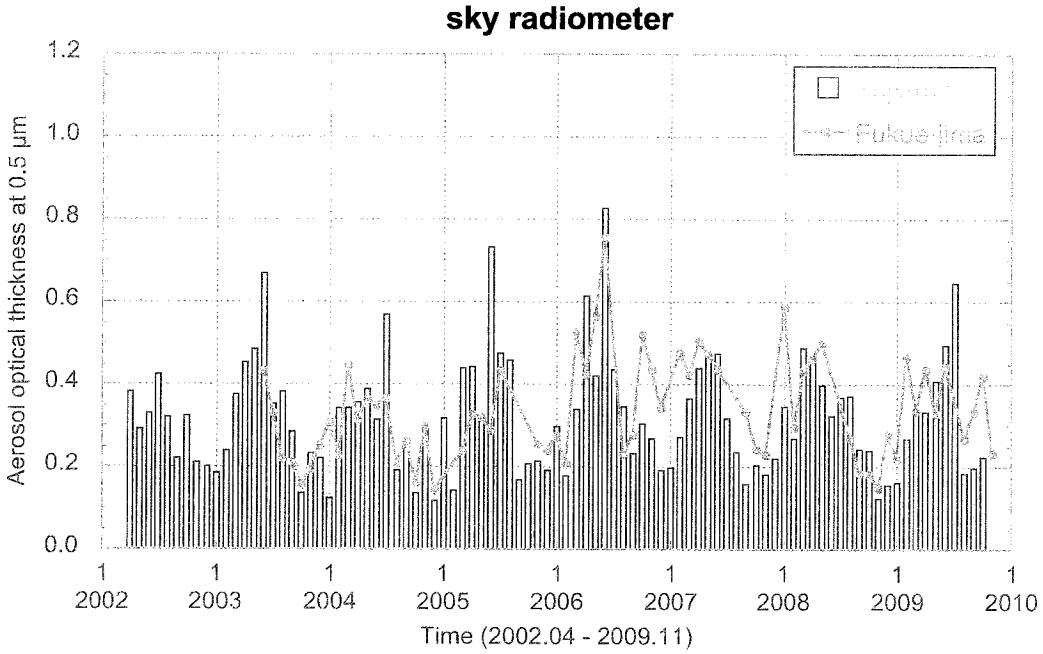


Fig. 1　富山と福江島の0.5µmのエアロゾルの光学的厚さの月平均値

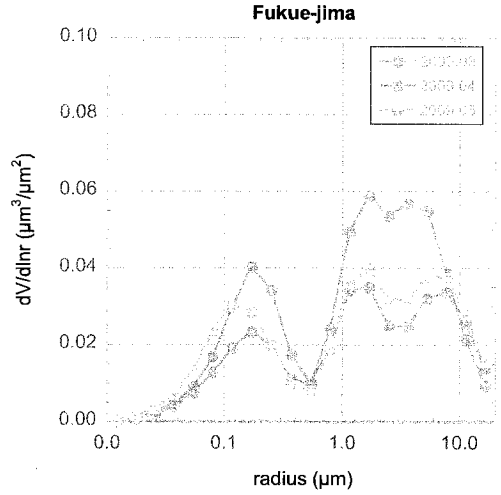


Fig. 2　福江島における2009年3月～5月までの体積粒径分布の月平均値

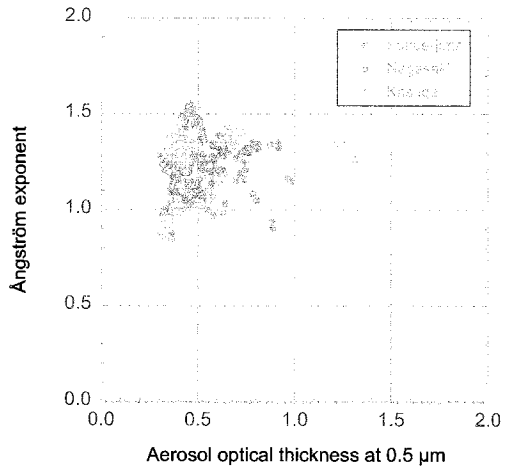


Fig. 3　福江島、長崎、春日における2009年4月7日、8日と5月8日、9日の0.5µmのエアロゾルの光学的厚さとオングストローム指数の関係

４．研究成果

Watanabe, K., H. Honoki, A. Iwai, A. Tomatsu, K. Noritake, N. Miyashita, K. Yamada, H. Yamada, H. Kawamura and K. Aoki (2009), Chemical Characteristics of Fog Water at Mt. Tateyama, Near the Coast of the Japan Sea in Central Japan. Water, Air, & Soil Pollution., DOI 10.1007/s11270-009-0307-2

青木一真（2009）、黄砂（第4.1.3節執筆：放射計による観測）、岩坂泰信他編、古今書院、pp. 342.

Takashima, H., H. Irie, Y. Kanaya, A. Shimizu, K. Aoki, and H. Akimoto (2009), Atmospheric aerosol variations at Okinawa Island in Japan observed by M AX-DOAS using a new cloud screening method, J. Geophys. Res., doi:10.1029/2009JD011939.

青木一真、渡辺幸一（2009），立山連峰における大気エアロゾル観測，エアロゾル研究、日本エアロゾル学会、24，112-116.

Irie, H., Y. Kanaya, H. Akimoto, H. Iwabuchi, A. Shimizu, and K. Aoki (2008), Dual-wavelength aerosol vertical profile measurements by MAX-DOAS at Tsukuba, Japan, Atmos. Chem. Phys., 9, 2741-2749.

５．研究組織

代表者	青木 一真	（富山大学大学院理工学研究部）
協力者	竹村 俊彦	（九州大学応用力学研究所、所内世話人）
	鵜野 伊津志	（九州大学応用力学研究所）
	河本 和明	（長崎大学環境科学部）

日本海におけるスルメイカ漁場の予測技術の開発

石川県水産総合センター　四方崇文

1. 目 的

我が国の主要な水産資源であるスルメイカは,イカ釣り漁業,定置網,底曳網などで漁獲されるが,生産量の約30%は中型イカ釣り漁船(総トン数30～185トン)によるものである.全国の中型イカ釣り漁船の隻数は1970年代には3000隻を超えていたが,漁場競合や資源減少による経営難のため減少し,2008年には134隻になった.中型イカ釣り漁船は,表面水温図を参考にして概ねの漁場を選定し,漁場到着後は魚群探知機等を用いてイカの群を探索し,それらの情報を漁船間で無線連絡して漁場を絞り込んでいる.このため,漁船隻数の減少は漁場探索の効率を低下させ,個々の漁船の探索時間の延長による燃油コストの増加にもつながることが考えられる.今後,隻数はさらに減少することが予想され,効率的な探索のための漁場予測技術が重要になると考えられる.石川県の中型イカ釣り漁船の隻数は青森県に次いで多く,主に日本海沖合のスルメイカを漁獲対象にしていることが特徴である.本研究では,日本海のスルメイカ漁場の予測手法を開発するため,石川県の中型イカ釣り漁船の操業位置と応用力学研究所の日本海海洋循環モデル(RIAMOM)をベースにした日本海海況予測システム(JADE:(独)水産総合研究センター運用)の水温の計算値との関係を調べた.

2. 方 法

中型イカ釣り漁船の操業位置については,石川県水産総合センターで収集整理している県内漁船約10隻の2003～2008年の漁獲成績報告書のデータに基づいた.石川県の2003～2008年の中型イカ釣り漁船隻数は34～28隻であり,本研究で対象とした漁船は県内全体の3割程度である.しかし,中型イカ釣り漁船は船団を構成し(石川県では,小木地区と姫地区の2船団),船団単位で漁場移動することが多いので,本研究の対象漁船で県内漁船全体の動きをほぼ捉えていると考えられる.

中型イカ釣り漁船は連日漁場探索して操業位置を決めているため,操業位置の海況は漁場が形成される条件を反映していると考えられる.スルメイカの漁場形成は中層水温と関係が深いことが知られているが,調査船による海洋観測は月1回のみで,観測点も沿岸に偏っているため,沖合漁場と海洋環境の関係を細かく調べることができなかった.一方,数値シミュレーション手法であるJADEでは,過去から現在までの日本海全域の表中層の水温・塩分・潮流のデータが水平格子間隔1/12°の密度で得られ,2カ月先までの予測も可能であり,漁場と海洋環境の関係を調べるのに適している.そこで,中型イカ釣り漁船の操業位置に最も近い格子点上のデータを抽出し,漁場の月別深度別の水温範囲を求めた.この水温範囲を漁場が形成される条件として,2008年6月から2009年1月の毎月15日のJADEの水温から漁場を推定し,漁船の操業位置と比較した.

3. 結果および考察

2003～2007年の中型イカ釣り漁船の操業位置に最も近い格子点上の水温の計算値を月別深度別に集計した(図1).月別深度別の集計値には,中央値からかなり外れた値も含まれていたことから,それらを除くために10%分位点から90%分位点の範囲を求めた.深度200mの水温は漁期を通じて5.2℃以下(中央値)であり,漁場は主に冷水域に形成されることが確認された.また,深度2.5～100mの水温に着目すると,夏季から秋季には鉛直勾配が大きく,極前線(亜寒帯前線)付近から沖合にかけて漁場が形成され,冬期には鉛直勾配が小さく,極前線よりも沿岸寄りに漁場が形成されていることをうかがわせる結果が得られた.この水温範囲を漁場形成の条件と

して,2008年漁期の漁場を水温から推定し,漁船の実際の操業位置と比較した.その結果,推定漁場と操業位置は概ね一致し(図2),海洋モデルの数値計算で得られた水温から漁場を推定・予測できることが明らかになった.推定漁場の位置は,6～8月の水温上昇期には日本海中央部からやや沿岸寄りに北海道西部海域に向かって移動し,9～12月の水温低下期には沖合から本州沿岸に向かって南下しており,スルメイカの回遊生態とも一致した.推定漁場と実際の操業位置との間にはまだズレがあるが,推定条件としての水温範囲を海域毎に調整し,塩分や潮流も条件に加えることで,精度が向上する可能性もあり,これらについては,今後の研究課題である.2009年8・9月に大和堆周辺の推定漁場で石川県水産総合センターの調査船白山丸(167トン)によるイカ釣り試験操業を実施したところ,スルメイカが高密度に分布することが確認された.特に8月については,北海道西部海域で操業していた漁船の多くが,白山丸の操業以降,大和堆周辺に移動して好漁した.この事例は,漁場予測技術を活用することにより,漁場探索を効率的に進めることが可能であることを示している.

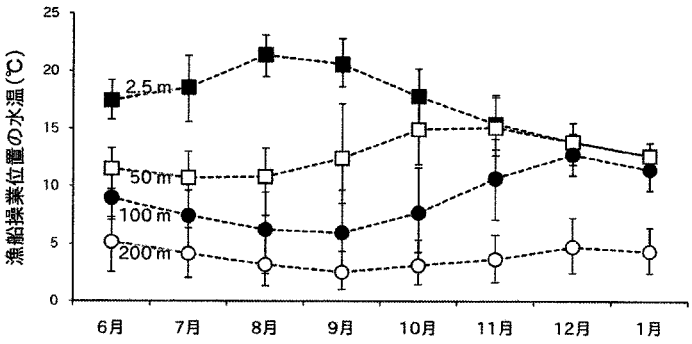


図1. 中型イカ釣り漁船の操業位置に最も近いJADEの格子点上の水温値の月別深度別の集計結果.図中の点と縦棒はそれぞれ中央値と10%～90%分位点を示す.

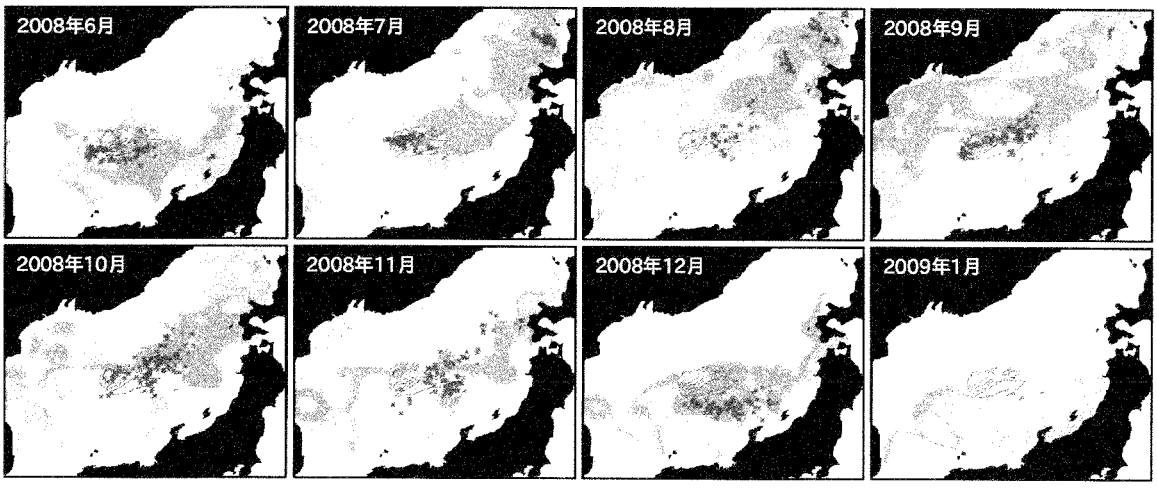


図2. JADEの水温の計算値から推定した漁場と漁船の操業位置の関係.図中の点は漁船の操業位置,図1の水温範囲に適合した深度層の数が多い海域を濃い灰色で示した.

4. 成果報告

四方崇文,広瀬直毅:日本海沖合におけるスルメイカ漁場の探索と予測.平成21年度スルメイカ資源評価協議会報告,pp25-28(2010).

5. 研究組織

四方 崇文 (研究代表者,石川県水産総合センター)
広瀬 直毅 (所内世話人,九州大学応用力学研究所)

海洋大循環の力学とくに中深層循環におよぼす海岸、海底地形の影響に関する研究

北海道大学大学院　地球環境科学研究院　水田元太

1. 目的

海洋中深層の流れは熱塩的な直接強制や、表層で発生した中規模渦の非線型相互作用によって形成され、陸岸、海底地形の影響を強く受ける。本研究では理論、観測、数値シミュレーションなど様々な分野の研究者が集まり、それぞれの研究結果を持ち寄り、知見をまとめ、中深層循環の理解へとつなげてゆくことを目的としている。

2. 手法

2009年11月に九州大学応用力学研究所にて研究会を開き、以下の7つの話題が提供された。各発表には十分な時間が取られ、研究者間で活発に議論を行うことにより有効に研究が進められた。

(1)中野 英之（気象研究所 海洋研究部）
.....「風による黒潮と再循環の南北移動」
(2)西垣 肇（大分大学教育福祉科学部）
.....「よどみ域を伴って海底斜面から離れる西岸境界流：黒潮直進路の力学」
(3)水田 元太（北海道大学地球環境）
.....「再循環からのロスビー波の放射と平均流への影響」
(4)松村 義正（東大気候システムセンター）
.....「Weddell海での棚氷水の沈降に関するモデリング」
(5)平原 幹俊（気象研究所 海洋研究部）
.....「渦許容モデルにおける水平速度勾配に関連した移流フラックスの付加」
(6)石崎 廣（気象研究所 海洋研究部）
.....「東経165度赤道近傍での深層測流結果のまとめ」
(7)増田 章（九州大学応用力学研究所）
.....「渦度力が引き起こす渦度変化の力学 － 局所並進自転系 -」

2. 結果および議論

話題(1),(2),(3)では西岸境界流の離岸と渦、地形の関係、(4), (6)では深層水の形成と輸送過程、(5)では数値モデルの改良、(7)では地球流体力学の基礎、について研究結果と今後の展望が話し合われた。

(1) 北太平洋の10年規模の変動は、流れが弱く線型の力学が支配的な内部領域の変動に対して、非線型性の強い西岸域が追従する傾向があるといわれているが(Taguchi et al., 2007)その詳しい仕組みは分かっていない。ここでは特に西岸境界流の離岸緯度の変動の力学に着目し理想化された条件で数値実験を行ったところ、離岸緯度は内部領域のポテンシャル渦度の南北分布に関係し、内部領域のポテンシャル渦度が常にある一定の値を持った緯度で離岸が起きる傾向があることが示された。またその力学が議論された。

(2) 西岸境界流の離岸とそれに伴うよどみ域や再循環の海底地形に対する依存性を調べた。西岸域に海

底斜面がある場合には西岸境界流が線型解よりも低緯度で離岸し、その北側によどみ域が見られた。これに対し平坦な海底地形の場合は傾圧不安定による大きな蛇行流が卓越し、明瞭な離岸は見られなかった。このことから海底斜面による傾圧不安定の抑制と離岸の関係が示唆される。実際、海底斜面があっても流れが強い場合は傾圧不安定が活発になり、離岸も不明瞭になった。

(3) 黒潮続流や湾流の様な西岸境界域における東向きのジェットから放射されるロスビー波の発生機構とその様なロスビー波が平均流におよぼす影響を数値実験によって調べた。ジェットの不安定によって西向き再循環が生じ、その中を西向きに移流される不安定渦がロスビー波の発生源であることが示唆された。再循環の東部では東向きジェットが弱まり、海洋の内部領域の緩やかな東向き流れに接続する。ロスビー波はこの様な西岸領域と内部領域の流れの間の渦度のギャップを埋め、両者を接続する働きをすることが示唆された。

(4) Weddel 海周辺の大陸棚上で形成された高密度水によって生じる流れである Filchner Overflow において高密度水が沖向きに輸送され、沈降する過程を高解像度数値シミュレーションによって調べた。その結果 Filchner Overflow では、等深線に沿って西向きに輸送された高密度水が、数 10 km スケールの海底 ridge の所で沈降することが示された。流体粒子に働く力の評価から等深線の局率に伴う遠心力と海底勾配の空間変化に伴う加速の二つが高密度水の沈降を決定することが示され、特に後者の効果が Filchner Overflow に重要であることが分かった。

(5) 数値モデルの精度に重要な格子間隔スケールの変動を考慮したトレーサー移流スキームを開発した。格子スケールの変動に伴うトレーサーのフラックスは移流速度を付加する形で表現することが出来る。従来の移流スキームでは渦許容程度の空間分解能において北太平洋における(1)中規模渦の強さ、(2)渦による温度塩分の南北輸送の 2 つを同時に再現することは難しかったが、今回開発された移流スキームではそれらの両方が精度よく再現されることが示された。このことはモデルの長時間積分に有用である。

(6) 化学トレーサーや数値シミュレーションから赤道付近の太平洋では南大洋から流入した深層水が 2000 ないし 3000m付近の深度層を通って南へ戻っていることが示唆されている。このことを検証するために東経 165 度赤道近傍において流速の直接観測を行った。延べ 4 年にわたる観測の結果、年による変動は小さくないものの、幾つかの観測点で数値シミュレーションと整合する南ないし東向きの流れが観測された。また深くなるほど反時計回りに流向が変わる傾向が見出され、温度風の関係から観測海域の南西側に低密度水の南下流が存在することが示唆された。一方底層では溶存酸素の鉛直勾配から観測海域の東の海域と水系が連続していることが示唆された。

(7) 流体力学における渦力は地球流体力学においても有用な概念であるが、それが本当の力と見なせるか、あるいは流体の変形にともなう数式上のものであるか、はっきりとした理論的基礎は与えられていない。ここでは局所並進自転系という座標系を用いることで渦力が地球流体の基本的概念であるコリオリ力と類似の概念として存在が定義できることが示された。これを渦度力と命名した。渦度力を用いると、渦柱の伸縮や傾きによってどの様な流れが生じるかといった基本的な問題が、コリオリ力を使って簡単に説明出来る様になる。

化学的トレーサーを用いた東シナ海の水塊構造解析

富山大学 大学院理工学研究部　張 勁

目 的

東シナ海は，広大な大陸棚を持つ縁辺海であり，沿岸海洋における物質循環のメカニズム・動態や人為起源物質による縁辺海の海洋環境への影響など「沿岸－外洋間」の相互作用に関する研究の格好なフィールドである一方，東シナ海への栄養塩の供給は、黒潮水・長江希釈水などの沿岸水・南シナ海起源水など大変複雑な系からなっている。時空間的に栄養塩供給の動態を正確に把握するためには，酸素同位体組成や希土類元素（REE）濃度等の水塊を特徴づけることが可能なマルチプル化学的トレーサーが有用である。しかし，これらの化学的トレーサーは敏感に水塊区分ができる反面，短時間・広範囲調査による議論への展開には不向きであり，係留系等で得られるような時系列を捉える観測にも応用が難しい。本研究は従来の塩分・水温・栄養塩等のルーチン的分析と，酸素同位体組成やREE濃度の計測に加え，漂流ブイ観測や水温・塩分・栄養塩センサー係留系の結果と組み合わせ，より詳細な水塊解析とその変動の解明を目的として，九州大学応用力学研究所との共同研究を実施した。

研究の方法

a).東シナ海における海洋観測で各層海水試料の採取を行い，栄養塩・REE濃度や酸素水素同位体組成などの化学分析データに，漂流ブイ観測や水温・塩分・栄養塩センサー係留系の結果と組み合わせ，より詳細な水塊解析とその変動解明を試みた。b).表層堆積物・間隙水試料と同時に懸濁粒子の採取も試み，海底起源栄養塩と海水中栄養塩分布との関連を明らかにした。

結果及び考察

まず，(i) REE等複合型化学的トレーサーにより東シナ海陸棚上水塊構造の詳細解析を行った。

その結果，東シナ海の環境を支配する海水は，精度が高い塩分・水温・溶存酸素濃度のデータ（図1.）及びREEパターン解析によって，下記の４つ異なる起源からなると分かった。

I) MSW：陸棚混合水（図1. 塩分＜33；図2.）；

II) KSW：黒潮表層水（図1.　水温＞22.43 ℃；
水深＜90 m；塩分 34.25－35；図2.）

III) KTW：赤道黒潮水（図1. 水深90～360 m；
水温 14 ℃＜T＜25.2 ℃；塩分35～34.4；図2.）

IV) KIW：黒潮中層水（図1.　水深＞360 m；
水温<14 ℃；塩分 ～34.4；及び図2.）

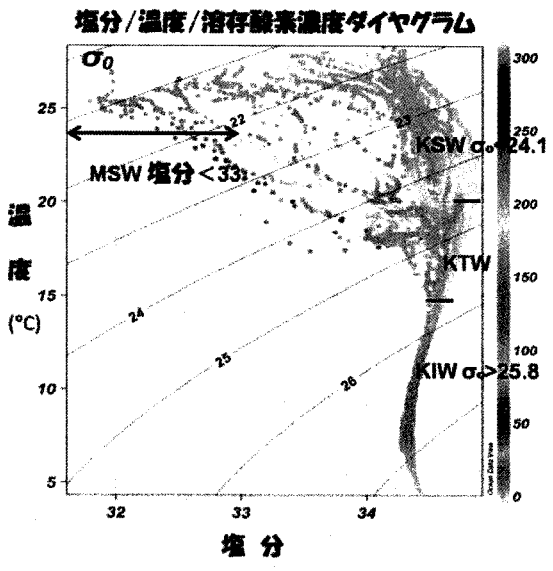


図 1. 塩分／水温／溶存酸素（カラー）と水塊構造解析.

また，陸棚北西中央部の水深130m海域に，夏季において水深400m以深のKIWの流入が明らかとなった。栄養塩に富むKIWが東シナ海陸棚の基礎生産に大きく貢献している報告がこれまで数多くあったが，本研究は最初の実証データをあげた。

次に（ii）栄養塩供給源である起源水供給割合を求めた。

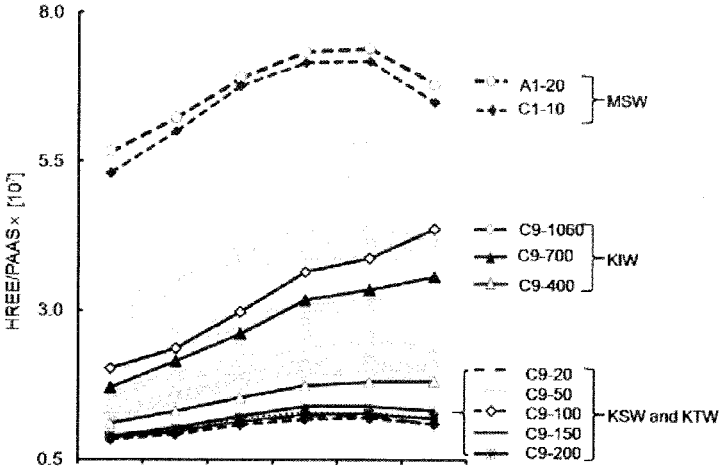


図 2. 頁岩(PAAS)で規格した REE のパターン

最小二乗法を用い，REE・栄養塩（硝酸・ケイ酸・リン）濃度・塩分・水温などのマルチプルトレーサーによって，栄養塩供給源である３つの起源水（KIW・KTW・MSW）の供給割合を算出した。計算式は式 1)である。求められた混合割合の結果の一例を Table 1. に示す。A，B，C はそれぞれ３つの起源水の REE・栄養塩濃度・塩分・水温であり，また，K は水深 130m 海域（測点 A1）における水柱の各水深 100m，120m，130m の実測値である。未知の X，Y，Z は３つの起源水の混合割合を表している。

$$\begin{cases} A_1X+B_1Y+C_1Z=K_1 \\ A_2X+B_2Y+C_2Z=K_2 \\ A_3X+B_3Y+C_3Z=K_3 \\ \quad\vdots \\ A_{10}X+B_{10}Y+C_{10}Z=K_{10} \end{cases} \qquad \text{式 1)}$$

Table 1. MSW, KTW と KIW の混合割合

	MSW (%)	KTW (%)	KIW (%)
A1 (100 m)	10 ~ 14	40 ~ 68	26 ~ 49
A1 (120 m)	1 ~ 4	43 ~ 66	37 ~ 55
A1 (130 m)	1 ~ 4	43 ~ 66	37 ~ 55

黒潮中層水の占める割合が最大で 5 割を超え，東シナ海陸棚へ主な栄養塩供給源であることが明らかにした。更に，陸棚堆積物中間隙水の分析から、栄養塩の供給源として、海底からの湧出の影響が示唆された。詳細は次年度も継続する共同研究を通じて明らかにしていきたい。

成果報告

Bai, L.L. and Zhang, J., Shelf water mass origins and nutrient flux estimation in the East China Sea using low-volume seawater measurement with rare earth element. Adv. Geosci., (in press).

張勁・柏麗麗・郭新宇・松野健，「化学的トレーサーを用いた東シナ海の水塊解析」，東京大学海洋研究所共同利用研究集会「「微量元素海洋学」事始：海洋の微量元素・同位体研究の動向と今後の展望(GEOTRACES 計画)」，2009 年 1 月 東京

Li-li Bai and Jing Zhang, Rare earth element and nutrient distributions in pore water and sediment of the East China Sea, 2009 年度日本地球化学年会 9 月 広島

Zhang, J., Nutrient contributions of Kuroshio subsurface water and pore water to continental shelf subsurface water in the East China Sea, The 2nd Workshop on "Marine Environment in the ¬East China Sea and Its Sound Future", MEECS II, RIAM, Jan 2010, Kyushu.

定期旅客船による山口県沖合海域の表層水温観測

山口県水産研究センター　渡辺俊輝

目的

山口県の日本海沿岸は100m以浅の陸棚が広がっており、特に萩から見島にかけての海域は、マアジ、マサバ、カタクチイワシなどの浮魚類やケンサキイカの好漁場となっている。山口県水産研究センターでは、漁況予報を年2回程度行っているが、現場の漁業者からはより短い期間での予報の実施が要望されている。実際、過去の研究では日本海南西部の沿岸漁場において数日の時間スケールの海況変動が存在し、カタクチイワシなどの浮魚類の魚群も同じ時間スケールで変動することが指摘されている。このような時間スケールでの漁況予報の実施には、日々の漁況に関するデータ（漁獲量、生物測定データ）を得ることはもちろんのこと、時間的・空間的により詳細な観測データを取得し、短期的な海況変動のメカニズムを把握することが必要である。

そこで、本研究では、①萩と見島を結ぶ定期旅客船に水温収録装置を取付けて、航路上での水温モニタリングを行うこと、また得られたデータの解析によって、②当海域における短期的な水温変動やそのメカニズムを明らかにすることを目的とする。なお、本研究は、日本海の海洋研究に総括的に取り組み、かつ山口県沿岸の定置網を利用した海況モニタリングの実績のある応用力学研究所 千手智晴准教授に参加して頂き、共同で実施したものである。

モニタリングの概要と解析データ

観測海域および定期旅客船「おにようず(258 トン)」の航路を図 1 に示す。「おにようず」の水温計は、古野電気社製TI-20(分解能 0.01℃、測定精度±0.2℃)である。水温計の信号は、インターフェースを介して、GPS の位置情報とともに2～3 秒に 1 回の時間間隔でパーソナルコンピュータに収録される。水温計は機関冷却水の取込口に設置されており、喫水を考慮すると海面下約3～4m の水温を計測していることになる。「おにようず」の1日あたりの運行回数は季節によって2～4 回と異なるが、航海中のすべての水温データを記録できるように収録装置を調整している。これらの条件で取得したデータから緯度1分ごとに日平均水温を算出したものを解析用のデータセットとした。

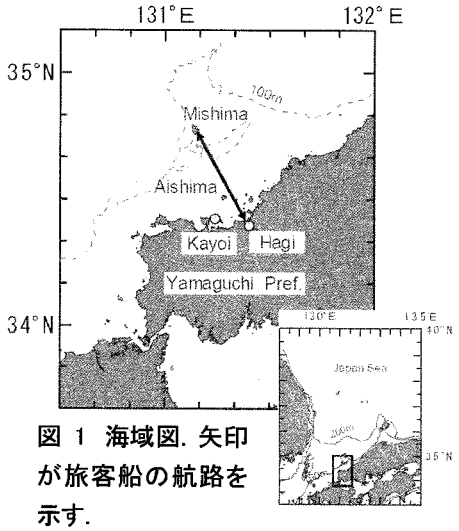


図 1 海域図. 矢印が旅客船の航路を示す.

2009 年 6 月頃から収録装置に不具合がみられ、データの欠測が生じはじめた。11 月下旬以降、欠測日が増えたため、2010 年 1 月にデータ収録用のパーソナルコンピュータおよび周辺装置（インターフェース）の動作チェック、通信ケーブル等の更新を行った。その後、水温データは正常に収録できている。これらを踏まえ、解析には、比較的欠測の少ない 2009 年 4 月 1 日～7 月 31 日の 4 ヶ月間のデータを使用した。また、過去の資料のうち、収録状態の良好な 2007 年の同期間のデータも利用した。この他には、九州大学応用力学研究所が長門市青海島の通地区（図 1）の定置網に取付けた水温・塩分計の水温データを使用した。

結果と考察

2009 年の水温上昇期の水温変動

2009 年の水温上昇期(4～7 月)における緯度-時間断面を図 2 に示す。総じて 34° 34' N 以南の海域で等温線の閉じた領域が多く、空間的に変動も複雑である。詳しくみると、4 月 1 日～5 月 13 日までは、34° 32～34' N を境にして、北部と南部の海域で変動の傾向が異なった。7 月 1～28 日の期間は、

34° 29' N（相島）以南の海域での変動が複雑で、7月1～10日、7月23～30日において周囲より水温が低かったのが特徴的である。7月下旬の水温の低下した時期は、山口県を襲った記録的な大雨の時期と一致している。

2007年の水温上昇期の水温変動

2007年の緯度-時間断面を図3に示す。2007年も34° 34' N付近を境にして、南部の海域で空間スケールの小さな変動がみられた。この水温変動の周期性を調べるため、34° 34' Nをはさむ航路上の2点（34° 39' N、34° 29' N）でMEM法によるスペクトル解析を行った（図4）。2点における水温変動のエネルギーピークの周期帯がすべて一致しているわけではないが、3～5日および7～9日の周期帯は共通していた。次に岸沖間の変動を検討するため、通定置網水温についてスペクトル解析を行ったところ、航路上の2点と共通する周期帯にエネルギーピークがみられた（図5）。そこで、共通する卓越周期帯に注目するために、航路上の代表点(34° 29' N)および通定置網水温の原データに、3～11日のバンドパスフィルターを施し抽出した変動成分を調べたところ、航路上（沖合）の変動成分の方が通定置網（沿岸）よりも先行していた(図6)。今後はさらに定量的な解析を行う予定である。

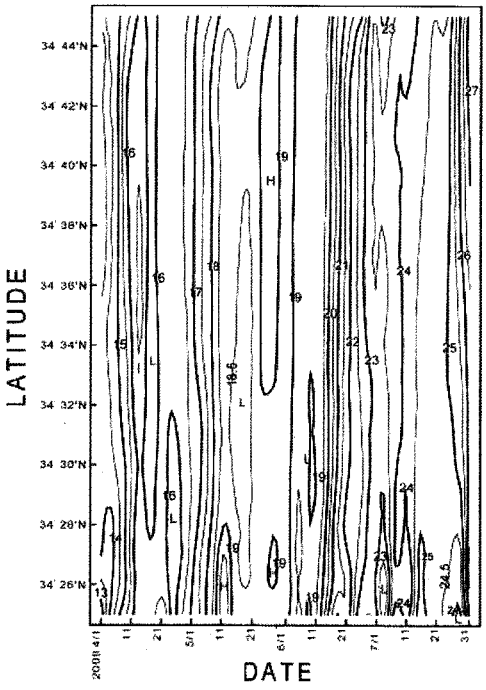


図2 水温の緯度-時間断面(2009年4～7月).

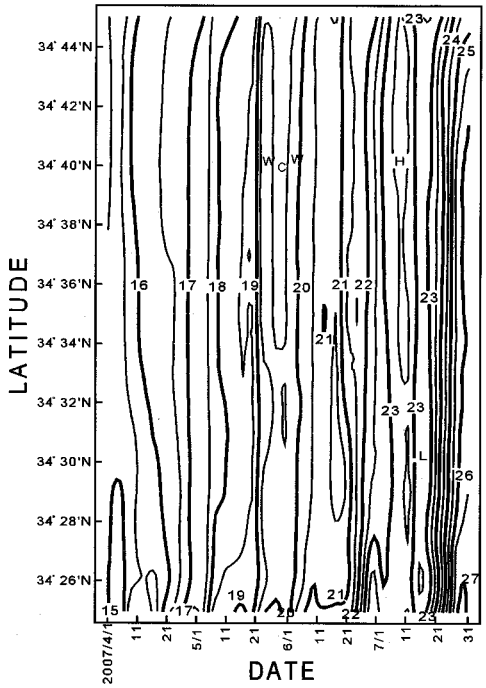


図3 水温の緯度-時間断面(2007年4～7月).

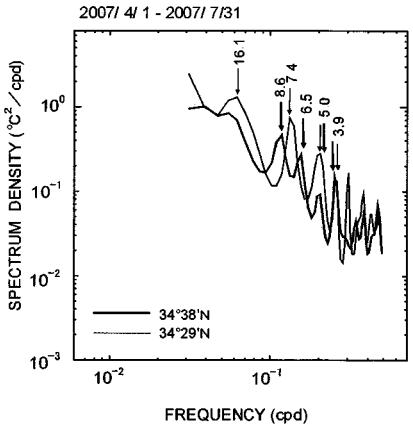


図4 34° 38'Nと34° 29'N水温のスペクトル密度.

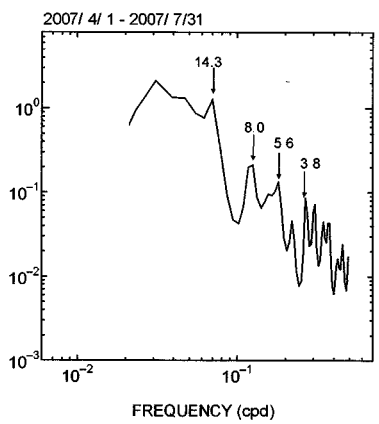


図5 通定置網水温のスペクトル密度.

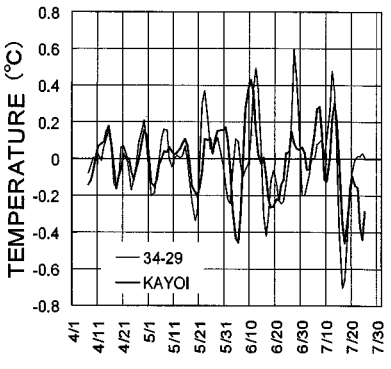


図6 バンドパスフィルター(3～11日)を施した水温変動成分の時系列.

21 AO－21

フェリーニューカメリアを利用した対馬海峡のクロロフィル変動に関する研究

名古屋大学地球水循環研究センター　石坂丞二

目的

対馬海峡は東シナ海と日本海をつなぐ海峡であり、最近東シナ海の環境変化に伴って、赤潮やエチゼンクラゲなどの問題がすでに起こっており、また長江に三峡ダムが建設されるなど、今後の環境変化も予想される。九州大学応用力学研究所では、博多と釜山間を運航するフェリーニューカメリアで流速、水温・塩分、クロロフィル蛍光などのモニタリングを行なっており、すでに数年分のデータが蓄積されている。この中でもクロロフィル蛍光は、生物海洋学的なデータであり、東シナ海の環境変化の指標になる可能性がある。そこで、本研究では、フェリーニューカメリアで取得されたクロロフィル蛍光データに関して、その変動要因について明らかにする。

方法

博多・釜山間の定期フェリー「ニューかめりあ」、長崎大学、韓国海洋データセンタ（KODC）による2003～2007年の水温、塩分、クロロフィル蛍光、クロロフィルａ濃度の東シナ海及び対馬海峡の現場データを用いた。また、人工衛星AQUA（MODIS）の2003～2007年のSST、クロロフィルaの衛星画像を現場データと比較した。人工衛星のクロロフィルaはフェリーで観測されたクロロフィルa濃度で校正した。

結果・考察

フェリー観測によると、2007年は低塩分水（< 32）が、8月下旬から9月上旬にかけて観測された。2006年のように西水道で最も低く、徐々に東水道へ張り出すのではなく、東水道でも西水道と時間差がほとんどなく、ほぼ同等の低塩分（< 31）水が東水道でパッチ状に観測された。また、低塩分化する時期にはクロロフィルa濃度が増加しており、より低塩分であるほどクロロフィルa濃度が高かった。衛星によると、8月中旬から下旬にかけて長江河口域から済州島西方及び南方に張り出していた高クロロフィルa水が、済州海峡及び済州島東方を通り、徐々に対馬南に張り出し、西水道及び東水道に分離して流入していたと推察された。これらにより、対馬海峡で観測された低塩分水は長江希釈水と考えられ、済州島周辺から約10～14日間かけて対馬海峡に流入していたことが示唆された。

低塩分水が対馬海峡で観測された2007年8月下旬から9月上旬の表面塩分とクロロフィルa濃度には有意な負の相関がみられた（R^2=0.62, $p < 0.01$）。また、塩分30～32におけるクロロフィルa濃度は、2006年で0.13～0.39 mg m^{-3}、2007年で0.19～0.56 mg m^{-3}であった。つまり、この２年間で長江希釈水の対馬海峡への流入時期と経路は若干異なったが、低塩分水によってクロロフィルa濃度が上昇する割合自体はそれほど変わらなかった。

また、KODCの済州島周辺（緯度31～34°、経度124～129°）における2003～2007年の8月の表面塩分と衛星クロロフィルaには有意な負の相関がみられた（R^2=0.22, $p < 0.01$）。塩分30～32におけるクロロフィルa濃度は、済州島周辺では0.34～0.51 mg m^{-3}であった。対馬海峡の長江希釈水は済州島周辺から約10～14日間かけて流入しているが、済州島周辺の長江希釈水のクロロフィルa濃度の減少はそれほど大きくなく、クロロフィルa濃度が保たれていることが示唆された。

研究成果報告

1. T. Makino, J. Ishizaka, N. Hirose, T. Matsuno, T. Hasegawa, K. Nishiuchi and I.J. Moon, Enhancement of Chlorophyll-a in the Tsushima Strait by Typhoon Passage in the Middle East China Sea, 6th Korea-Japan Workshop for Ocean Color, アンサン、大韓民国、2009.12.10
2. 牧野高志・石坂丞二・広瀬直毅・松野健・長谷川徹・西内耕・Il Ju Moon 東シナ海を通過する台風と対馬海峡のクロロフィルaの変動との関係 第四回特定領域研究 W-PASS 全体会議、北海道札幌市、2009.11.26（Poster）
3. 牧野高志・石坂丞二・広瀬直毅・松野健・長谷川徹・西内耕・Sinjae Yoo・Jisoo Park 東シナ海陸棚水による対馬海峡のクロロフィルaの変動 2009年度水産海洋学会研究発表大会、長崎大学、2009.11.19
4. T. Makino, J. Ishizaka, N. Hirose, T. Matsuno, S. Yoo, J. Park, T. Hasegawa, K. Nishiuchi, I. J. Moon, Variability of chlorophyll-a in the Tsushima Strait: influence of the East China Sea shelf water, Workshop on Marine Environment in the East China Sea Cooperative Research Meeting, 名古屋大学地球水循環研究センター, 2009.6.15
5. 牧野高志、石坂丞二、広瀬直毅、松野健 東シナ海から対馬海峡に流入する長江希釈水の時空間変動の把握 2009年度日本海洋学会春季大会、2009. 4. 8

研究組織

別紙参照

高レイノルズ数乱流境界層における壁面せん断応力の計測とその評価

名古屋大学工学研究科　　辻　義之

1. 序論

乱流境界層をはじめとする壁乱流における壁面せん断応力（壁面摩擦抵抗）の評価は、工学的応用問題のみならず乱流現象の基礎的問題に関しても重要である。壁面剪断応力は自動車、船舶、飛行機等の輸送機器において主要なエネルギー損失源である。従って、壁面せん断応力を高精度に評価することはエネルギー損失を精度よく見積もる上で必要不可欠であり、これはエネルギーの有効利用という観点に大きく貢献する。また、乱流現象の基礎的問題については、乱流境界層における普遍速度分布型の確定、対数速度則のカルマン定数の確定などの基礎的問題が未だに解明されておらず、これらの問題を解決するためにも、壁面剪断応力を高精度に評価することが望まれる。

壁面剪断応力の計測法には、壁面剪断応力を直接測定する直接測定法と、相似性などを利用し間接的に算出する間接測定法がある。間接測定法には、クラウザーチャート、プレストン管法など速度分布型を暗に仮定する方法が簡便であり、これらの方法が広く用いられてきた。一方、浮動片要素法、MEMS などは直接測定法として分類され、信頼性が高い測定法とされている[1]。

いずれの計測手法を用いたとしても壁面剪断応力値が Re 数の関数として表記されることが望まれ、これまでに、Osaka ら[2]や Österlund[3]等により半理論式や経験式が提案されてきた。しかし、レイノルズ数に対する壁面剪断応力値は数%のレベルで一致しない。この原因を探るためには測定者や測定手法が異なると違いが生じる要素が増え、原因を特定することは難しい。

これらの現状をふまえ、本研究では壁面剪断応力の計測に関して次の試みを行った。壁面剪断応力の測定法として、壁法則の成立など普遍法則を用いることなしに測定可能なオイルフィルム干渉法に取り組んだ。さらに同一実験者、同一実験方法により、異なる境界層風洞を用いて測定を行い、結果の比較を行った。その結果をふまえて、レイノルズ数に対する壁面剪断応力値の不一致問題に対して考察を行った。

2. 実験方法

実験はスウェーデン王立工科大学（KTH）・九州大学の二つの大型境界層風洞を用いて行われた。試験板は主流長さが KTH, 九州大学でそれぞれ、7m,、15m であり、試験板入り口には乱流に遷移させるための DYMO テープによるトリッピングワイヤーを使用した。測定部の位置はトリッピングワイヤーの位置からそれぞれ 5.5m,、10.95m の位置で行った。

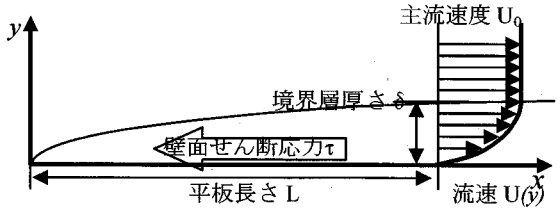


Fig.1 境界層乱流概念図

2.1.オイルフィルム法による壁面剪断応力の測定

測定部の壁面に微小な一滴のオイルを垂らし、流れを作り出すとオイルは流体からの剪断応力の作用で流れ方向に伸びてゆく。上部からナトリウムランプ単色光(波長 589nm)をあて十分にオイルが薄くなると、ニュートンリングと同様の原理から縞模様が見え始める。その縞模様の移動速度 u_k をオイル干渉縞の撮影画像から読み取り、ナビエ・ストークス方程式とオイルの質量収支の式により求めた以下の式(1)に代入することで壁面剪断応力 τ_0 を測定することができる。

$$\tau_0 = \mu u_k \frac{2\left[n^2 - \sin^2\alpha\right]^{1/2}}{\lambda\left[k + h_0/\Delta h\right]} \qquad \cdots(1)$$

ここで μ はオイルの粘度、λ はナトリウムランプの波長、n はオイルの屈折率、k は k 番目の暗の縞模様、h_0 は k=0 でのオイルの高さ、Δh は暗の縞と隣の暗の縞との高さの差、α はカメラの取り付け角度を表している。

2.2.熱線による流速測定

流速は先端に熱線受感部を半田付けした I 型プローブと定温度型熱線風速計を用いて計測した。熱線流速計は熱線および、固定抵抗、可変抵抗によりホイートストンブリッジが構成されており、熱線の過熱比を可変抵抗で調整している。気流の冷却効果による熱線抵抗の変化が、ブリッジ内に不平衡電圧を発生させ、それを平衡状態に戻すように差動アンプを介して数百から数千倍程度に増幅された電圧が瞬間的に負帰還され、熱線温度（抵抗）を一定に保つことができる。これにより、このブリッジ間の電圧を測定することにより、流速及び変動分を測定することが可能である。

3. オイルフィルム測定画像

オイルフィルム法では鮮明な画像を得ることが u_k を精度よく求めるために重要である。そこで KTH では干渉縞のコントラストを高めるために、屈折率の高い SF11 ガラスを壁面に使用した。

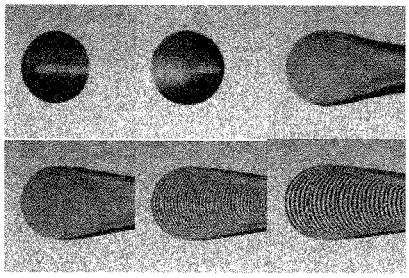


Fig.2　オイルフィルム測定画像（流れは左から右）
(左上) t=0sec, (中上) t=20sec, (右上) t=40sec,
(左下) t=60sec, (中下) t=80sec, (右下) t=100sec
（オイルの動粘度:100cSt, 風速 30m/sec, 風洞の運転スイッチを入れた瞬間を t=0sec）

4. 結果および考察

Fig. 3 に壁面剪断応力の測定結果を示す。横軸に運動量厚さによる代表長さ θ を用いたレイノルズ数 Re_θ ($Re_\theta = U_0\theta/\nu$) 、ν は作動流体（空気）の動粘度、縦軸に壁面剪断応力を以下のように定義した空気の密度 ρ と主流速度 U_0 で無次元化した値である局所抵抗係数 c_f をプロットした。

$$c_f = \frac{\tau_0}{(1/2)\rho U_0^2} \qquad (2)$$

九州大学での測定結果は Osaka らのフィッティング式に近い値をとり、KTH で行った実験は Österlund と同一の風洞で測定を行ったが、測定結果に差が生じていることが示されている。同一の Re_θ において九州大学と KTH での測定結果の差は約 4%であった。

測定された物理量は必ず誤差を含む。誤差は大きく偶然誤差と偏り誤差に分けられる。偶然誤差は各 Re_θ について c_f の測定値を平均値で割った値のばらつきの大きさを確認し、最大で 1.5%であることがわかった。偏り誤差は真の値からの絶対的なずれ幅であるが、真の値を知ることは不可能である。そこで Fig.4 に、この c_f より算出した摩擦速度により無次元化した速度分布が示されている。対数領域においてその重なりはよく一致しており、内層変数により上手くスケーリングできていることが示されている。よって Fig.3 で示された KTH 及び九州大学での約 4%の差は測定誤差ではなく、物理的に有意な差であると結論づけることができる。

なぜ同レイノルズ数において測定した c_f に差が発生するのかについて考察を行う。Fig.4 から、内層変数で無次元化された速度分布は粘性低層($0<y^+<4$)、バッファー層($4<y^+<50$)、対数領域($50<y^+<800$)においてよくスケーリングされていることを確認できるが、後流域($800<y^+$)ではスケーリングできていないことがわかる。

トリッピングワイヤーにより乱流に遷移した乱流境界層は下流方向に進むにつれ発達し、測定部に到達する(Fig.1)。このとき、境界層の厚さの勾配など境界層の発達過程はトリッピングワイヤーの状態に依存し、必ずしも同じではない。事実、KTH で測定を行った際、Österlund の測定時と異なるトリッピングワイヤーを使用した結果、同測定位置に置いて Österlund の測定時とは異なる大きさの境界層厚さが観測されている。逆に、主流速度 U0 は境界層外における物理量であるため、境界層の発達の仕方には依存しない。

ここで、同 Re_θ について c_f の値が異なる点について話を戻す。c_f は壁面剪断応力を主流速度により無次元化を行っているが Fig.4 に示されているように、内層変数では主流速度を含む後流域を上手くスケーリングすることはできず、つまり逆に主流速度によって壁面剪断応力を上手くスケーリングできない事が考えられる。つまり主流速度により局所抵抗係数 c_f を無次元化すると c_f には境界層の発達過程の情報が含まれたままとなっており、境界層の発達過程が異なる c_f を同 Re_θ で比較すると、その分の差が生じてしまうと考えられる。

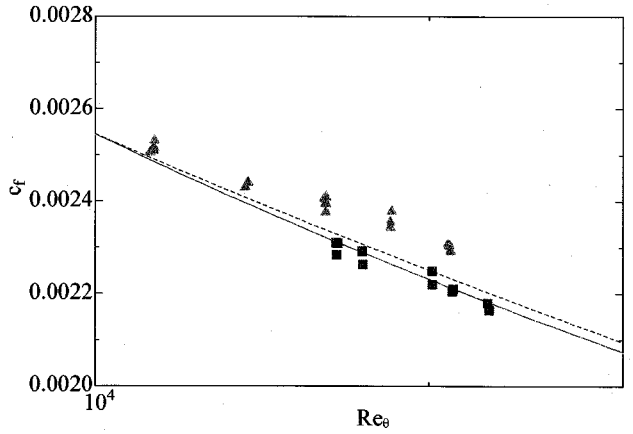


Fig.3 レイノルズ数に対する局所抵抗係数の比較
(▲は KTH、■は九州大学、実線は Osaka らのフィッティング、破線は Österlund のフィッティング)

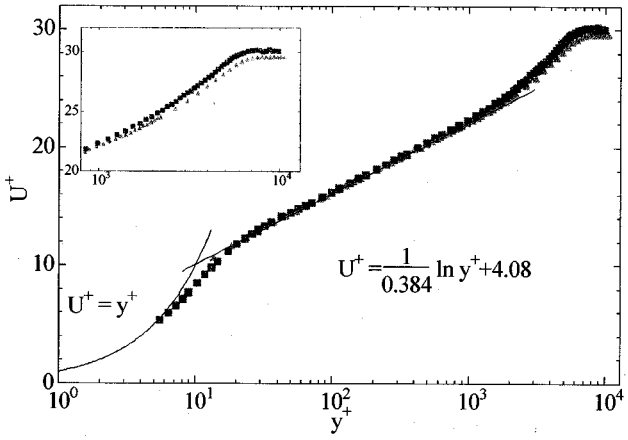


Fig.4 内層変数により無次元化した速度分布
($U^+=U/u_\tau$、$y^+=u_\tau y/\nu$、$u_\tau=(\tau_0/\rho)^{0.5}$、▲は KTH、■は九州大学、$Re_\theta \simeq 20600$)

5. 結言

過去より、多くの研究者によってレイノルズ数と局所抵抗係数の関係が調べられてきたが、その結果に数%レベルのばらつきが生じ、必ずしも一つの関係となることはなかった。

本研究ではその原因を探るため、異なる風洞でオイルフィルム干渉法による壁面剪断応力測定と熱線を使った速度分布測定を行い、運動量厚さを元にしたレイノルズ数 Re_θ に対して比較を行った。オイルフィルム干渉法で得られた c_f の精度に関しては、偶然誤差は最大 1.5%であり、c_f を内層変数として無次元化した速度分布において対数領域をよくスケーリングできることが分かった。その結果を考慮した上で、二つの風洞間で得られた同一の Re_θ に対して約 4%の開きのある局所抵抗係数の結果は実験誤差ではなく物理的に有意な差であると結論づけられた。内層変数により無次元化を行った速度分布から、内層変数では対数領域までをスケーリングすることは可能であるが、後流域が内層変数とは独立していることが示されている。局所抵抗係数はその後流域に属する主流を用いて無次元化を行っていることにより、壁面剪断応力に含まれる内層内の境界層の発達に関する情報を上手くキャンセルできないと考えられ、それが同一のレイノルズ数において局所抵抗係数が一致しない原因であると考えられる。

謝辞　九州大学での実験に際しまして、大屋先生、烏谷先生、渡辺技官、杉谷技官に大変にお世話になりました。改めてお礼申し上げます。

参考文献

[1] Fernholz, F. F. et al., New Developments and Applications of Skin Friction Measuring Techniques, Meas. Sci. Technol., vol.7, pp.1396-1409, (1996)

[2] Osaka, H., Kameda, T., and Mochizuki, S., 1996, Local Skin Friction Coefficient Evaluated by Direct Measurement Method and Mean Flow Quantities in a Turbulent Boundary layer, JSME Int. J. Fluids and Thermal Engineering. Series B, 138-145.

[3] Österlund, J.M., 1999, Experimental studies of zero pressure-gradient turbulent boundary layer flow, Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology.

“８”字型運動を行う長大弾性管模型の渦励振

大阪大学大学院工学研究科　地球総合工学専攻　船舶海洋工学部門　千賀英敬

研究目的

海底資源の開発や海洋温度差発電用に用いられる長大な弾性管には多くの外力が働く。それらの中でも、時々刻々変化する潮流により長大弾性管から流出する渦による励起される渦励振と呼ばれる振動現象がある。

流出渦による揚力によって、長大弾性管は潮流に対して垂直方向に振動するが、渦が流出することにより長大弾性管の抗力も同時に変動する。渦励振による振動周波数と効力変動に伴う主流方向の振動周波数の関係により、長大弾性管断面の軌跡が“８”字型を描く運動は実海域においても容易に起こりうる。

本研究の目的は長大弾性管に“８”字型の運動が発生している場合の長大弾性管の全体にわたる挙動を計測することである。今回、深海機器力学実験水槽にて、長大弾性管模型を用いた強制動揺実験を行った。

実験方法

深海機器力学実験水槽内に中空の弾性管模型をたらし、強制動揺装置を用いて模型上端に強制変位を与え、模型に発生する３次元的な挙動を計測する実験を行った。今回の実験に用いた弾性管模型の主要目をTable1 に示す。模型の長さ方向全体にわたる挙動を計測するために、7台の CCD カメラ内蔵で断面形状が翼型のカメラフレームを２枚用いた計測システムを使用した(Fig. 1)。弾性管模型の計測位置には蛍光テープを用いたマーカーが貼り付けられている。また模型の下端には、初期形状を真直ぐに保つためのおもりを付け、境界条件はおもり付き自由端である。一方で、模型の上端は強制動揺装置に直接取り付けているため、上端の境界条件は固定端である。CCD カメラによって計測した撮影データは実験後に画像解析ソフトを用いて３次元の運動データを求めた。今回の実験では、実際の現象として発生しやすい運動である模型断面に８字型や円形の軌跡を描かせるために、XY 強制動揺装置(Fig. 2)を用いた。使用した XY 強制動揺装置は X, Y 平面内で sin 関数的な強制変位を与えることが出来る。８字運動を発生させる場合、X・Y 方向の運動の位相を 90[deg]ずらすことによって再現したため、強制動揺の軌跡は上下がつぶれた８字になる。発生させた変位の条件を以下に示す。

①８字運動・・・周期　2, 4, 6, 8, 10[sec]

　　半径　2, 4, 6, 8, 10[cm]

②円運動・・・・周期　2, 4, 6, 8, 10[sec]

　　半径　1, 2, 3, 4, 5[cm]

※８字運動の周期は８字を描くまでの時間であり、半径は円を一つの半径である。

Table 1 Principle particulars of the model

Materials		Polyethlene, Teflon
Model Length		6.500 m
Outer Diameter		22.50 mm
Inner Diameter		12.70 mm
Mass per Length		0.400 kg/m
Young's Modulus		8.847 Mpa
Bottom Weight in Water		3.489 N
Natural Frequencies of the Riser Model	1st	0.571 rad/s
	2nd	1.308 rad/s
	3rd	2.207 rad/s
	4th	2.732 rad/s

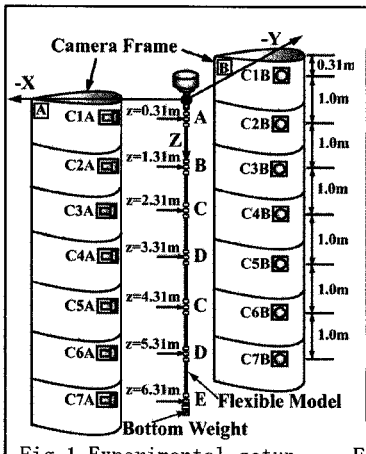


Fig. 1 Experimental setup

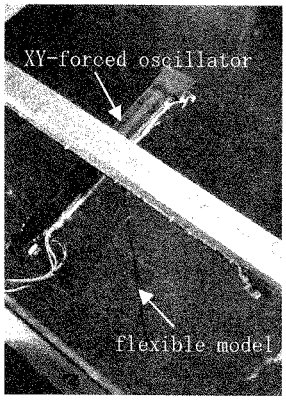
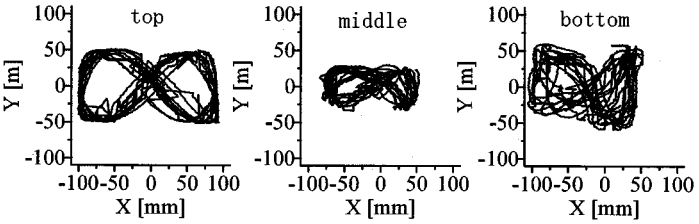


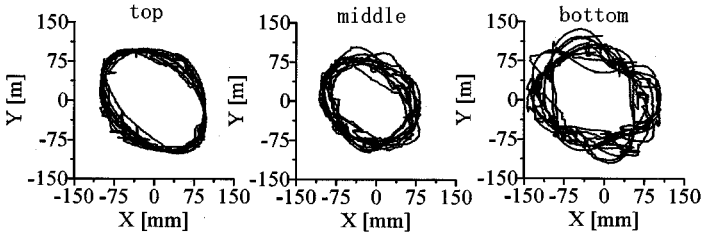
Fig. 2 XY-Forced Oscillator

実験結果と考察

Figs2 は模型上端に周期 10[sec]、半径 5[cm]の８字型の変位を与えた時、また Figs. 3 は模型上端に周期 10[sec]、半径 10[cm]の円形の変位を与えた時の模型上端付近、中央付近、下端付近での模型の運動の軌跡を示している。今回の実験では、８字型の運動や円運動を模型上端に強制的に与えたため、運動振幅は実現象において発生する主運動と渦励振の連成による８字型の運動や円運動よりも大きい。また模型が弾性的性質を持っているため、８字型の軌跡の大きさが異なり、運動の拘束が小さい模型下端付近で運動が大きくなっていることがわかる。



Figs. 2 Trajectories of the flexible model at near top, middle and bottom side ("8" shaped oscillation)



Figs. 3 Trajectories of the flexible model at near top, middle and bottom side (circular oscillation)

弾性管の挙動のシミュレーションを行うための運動方程式として、本研究ではベクトル方程式を用いている（参考文献１）。Figs. 4 は弾性管模型上端に強制円運動（周期：2[sec]、半径 10[cm]）を与えた場合の弾性管模型の X-Z 平面、Y-Z 平面および X-Y 平面での弾性管模型の挙動シミュレーション結果を 0.25[sec]間隔で示したグラフである。このシミュレーションでは、渦励振の原因である流出渦による揚力を考慮していない。下端側の運動が上端で与えた強制動揺に比べて遅れるという模型の弾性的特性が確認できる。ベクトル運動方程式に流出渦による力を考慮するため、CFD を用いた剛体円柱周りの流場の再現シミュレーションを行っている。CPU の性能の向上に伴い、CFD の計算速度は日々向上しているが、弾性管まわりの流場を３次元的に解くことはいまだ多くの時間を要する。本研究では弾性管の異なる深さ位置についての２次元流場を解き、そのシミュレーション結果に対して、弾性管自身の運動の様子や渦の位相を考慮することにより、３次元流場を再現する方法を検討している。現在、剛体円柱まわりの流場の可視化実験を行っている。その実験結果を用いて、円柱まわりの流場計算のための CFD コードの妥当性を検証し、ベクトル運動方程式に導入する。今回、深海機器力学実験水槽において行った実験では、元挙動推定法の精度検証に用いる重要なデータを得ることが出来た。

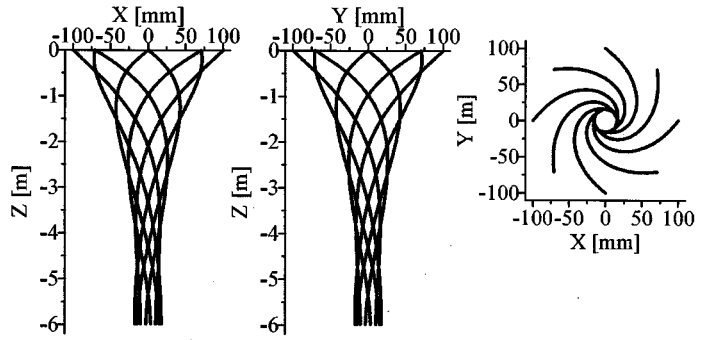


Fig. 4 Configuration profiles of flexible model in X-Z, Y-Z, and X-Y plane

謝辞

今回の実験実施にあたり、九州大学 応用力学研究所 中村昌彦准教授、稲田勝技官には大変お世話になりました。また、ご多忙な中、小寺山亘特任教授には実験時に水槽にお越し頂き、多くのご助言を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

１） R. P. Nordgren, "On Computation of the Motion of Elastic Rods", Transactions of the ASME, Journal of Applied Mechanics, pp.777-780, 1974

洋上風力発電装置が発生する転倒モーメントとそれによる浮体運動への影響

九州大学大学院総合理工学研究院　　経塚　雄策

1．緒言

地球規模での人口爆発や環境問題が深刻化する昨今、クリーンエネルギーが大きな役割を期待されている。

陸地面積が限られ、遠浅の海の少ない日本では、今後の洋上での浮体式風力発電が不可欠である。浮体の安全性を考える場合、浮体の波浪中の安定性能を検討することは重要である。そこで、本研究は、九州大学 SCF 研究会において実施中の六角形浮体式洋上風力発電構想に関する研究の一環として六角形浮体の安定性能に関して大きな影響を及ぼす波浪中の漂流力及び転倒モーメント、係留系の影響、稼働時・暴風時の風車による転倒モーメントの三要素に対して六角形浮体の安定性の検討を行った。

2．実験概要

2.1　係留動揺実験

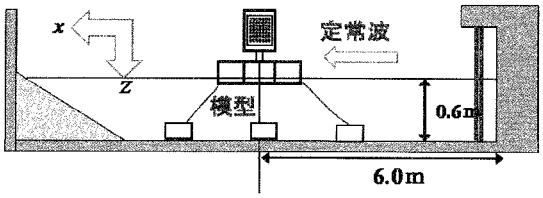


Fig.1　波浪中の浮体動揺実験の概念図

Fig1 は波浪中の浮体動揺実験の概念図である。実験には、ピストン式の造波機を備えた L×B× d =12.0×6.0×0.60（m）の浅海水槽を用いた。実験には Fig.2 の外形 2.4(m) のトラス式構造の六角形浮体を用いた。浮体は六方向からアンカーチェーンによって係留した。造波機側から波高 2.5cm の規則波を起こし、波浪中での浮体の動揺計測には３次元画像解析装置を用いた。模型上に Fig.3 に示すようなプレートを設置して XCL-X700 カメラで 30 秒間撮影し、プレートの点の変位を読み取り、前後揺、上下揺、縦揺の動揺を画像解析ソフト「HALCON」によって解析した。

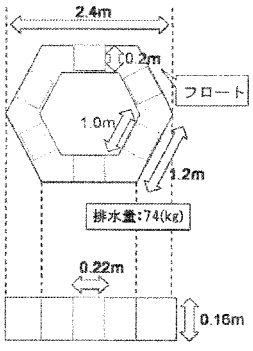


Fig.2　浮体模型の諸元

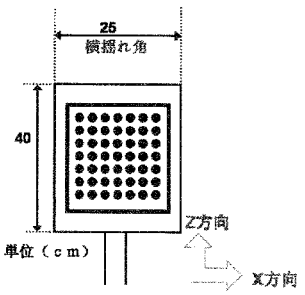


Fig.3 プレートの概念図

2.2　係留ばね定数計測実験

浮体から 0.6m の高さよりテグスを+X 方向へ張り、同じ高さにある滑車を通して滑車の反対側におもりを吊るす。XCL-X700 カメラによって記録した画像データを HALCON によっておもりの重さと X 座標の変位を記録する。おもりの重さは 0~300(g)までの間で変化させた。実験の様子を Fig.4 に示す。

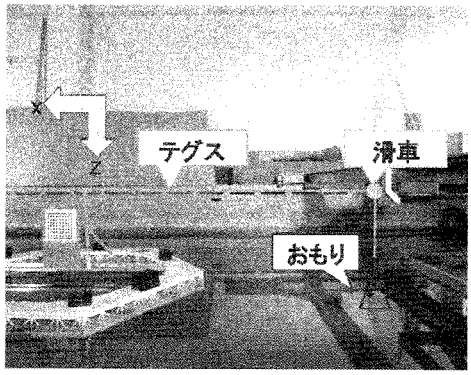


Fig.4　係留ばね定数計測実験の様子

3. 複合外力下での浮体運動

3.1　浮体の前後揺運動方程式

波浪中において運動する浮体の運動方程式は、実験において微小であった上下揺、縦揺による連成を無視し近似的に以下のように表される。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + k(x)x = f\cos wt + F_o$$

減衰係数　線形ばね定数　波浪強制力　波漂流力

上式における流体力係数はポテンシャル理論によって求められた値を用いた。この方程式をルンゲクッタ=ギル法を用いて時系列で計算結果を出力した。

3.2　ランプドマス法による係留力の算定

流体中において強制力を受けて動揺するアンカーチェーンの極めて大きく且つ複雑な係留線の変形量を計算するため、係留線の形状が概念になじみやすいランプドマス法を用いて係留系の数値計算を行った。Fig.5 にその概念図を示す。さらにその計算結果をルンゲクッタ＝ギル法を用いて座標及び浮体に働く係留力を時系列で出力した。

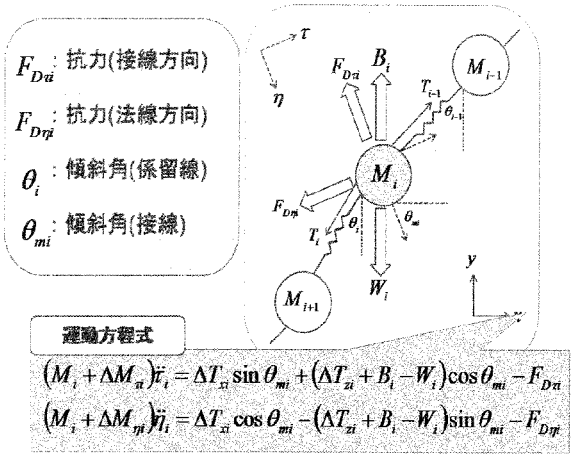


Fig.5 ランプドマス法の概念図

実験結果と、数値計算結果を比較した物を Fig.6 に示す。

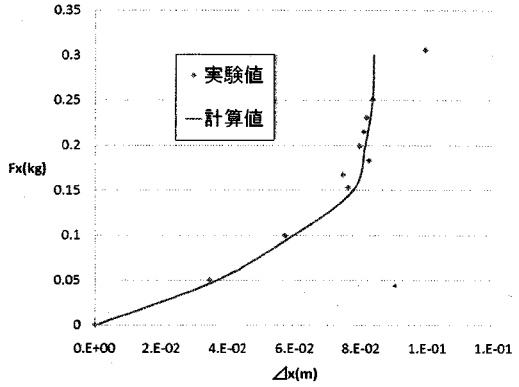


Fig.6 線形ばね定数の実験値と計算値の比較

計算値と実験値はほぼ一致し、ランプドマス法による係留力計算プログラムの精度が確認出来た。

3.2.2 ルンゲクッタ法による数値計算法

動揺実験結果と計算プログラムの前後揺方向への変位を時系列で比較する。**Fig.7** に一例を示す。漂流速度、吊り合い位置等は一致している。T=15(s)付近から減衰の様子に差異が見られるが、これは造波水槽の反射波の影響によるものと考えられる。

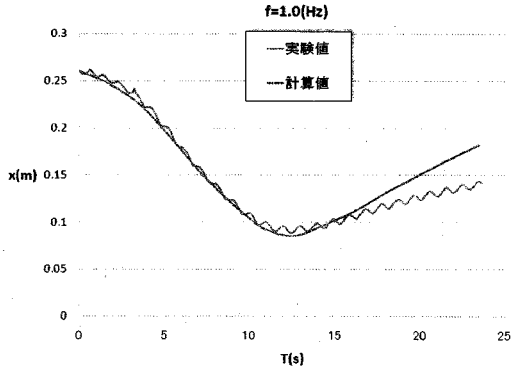
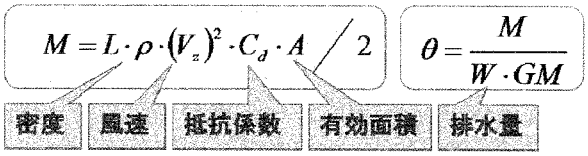


Fig.7 surge 方向の実験値と計算値の比較

4. 玄界灘における フィージリビティスタディ

福岡市西区西浦漁港沖にて外形 60m の洋上風力発電浮体の設置を想定し、その安定性の検討を行った。

風況としては 50 年確率風速である 44.45(m/s)、及び発電最大効率を齎す 12.78(m/s)の２つのケースを想定した。風向は SW 方向である。直径 13.6(m)、高さ 6.8(m)、有効面積 145.2(㎡)の風車を用い、浮体が風車から受ける転倒モーメント及び傾斜角は、L を浮心からの距離、GM をメタセンター高さとして



で表わされる。抵抗係数は、文献値より 0.75 とした。浮体要素の配置として Fig.8 に示す４つのパターンを検討し、X 軸、Y 軸まわりの傾斜角を比較した。また六角形浮体のトラス構造の安定性への寄与を計算するため、トラス構造を考慮する場合としない場合の２つのパターンに分けて計算、比較を行った。

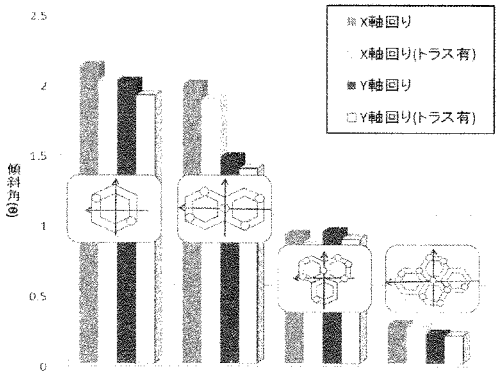


Fig.8 暴風時の浮体要素数別の最大傾斜角の比較

全てのケースにおいても傾斜角は 5° 以内となり、風荷重に対する安定性が確認出来る。特に。要素浮体が４つの場合は傾斜角が 0.5° 以下と小さく、安定性が大きいことが分かる。またトラス構造によって浮体の安定性は約 5% 向上することが分かる。

5. 結論

浮体の動揺、係留に関して計算精度を実験的に確認した。また、風荷重による影響や複数浮体時の傾斜角の算定により、洋上風力発電プラットフォームの安定性能を検討出来た。今後、最適な浮体形状および複数浮体の配置などについてさらなる検討が望ましい。

研究代表者	経塚雄策
研究協力者	粕谷　翔、長沼弘樹
所内世話人	大屋裕二

複雑形状の移動物体流れ解析の検証

独立行政法人　理化学研究所　知的財産戦略センター
機能情報シミュレーションチーム　小野謙二

目的

工業製品の設計や自然物の形状データを基にした流体計算に迅速に対応できる流体解析システムの開発が，産業界を中心として，求められている．特に，設計現場からは，計算時間の短縮とともに高い予測精度も求められる．本研究では，物体形状を表す幾何データから直接物体形状を認識し，格子生成不要で計算する仕組みを開発し，基礎的な流れと比較し，精度検証を実施する．

計算方法

境界に接するセルでの流束の評価に，式１の MUSCL 内挿の表記を用いる．

$$\tilde{f}_{i+1/2} = \frac{1}{2}\left[U_{i+1/2}(u_R + u_L) - \left|U_{i+1/2}\right|(u_R - u_L)\right] \qquad \text{(式１)}$$

ここで，図１の位置関係を参照して，式２のように境界速度を与える．

$$\hat{u}_{i+1} = \left(1 - \frac{3\Delta x}{\Delta x + 2d}\right)\bar{u}_{i-1/2} \qquad \text{(式２)}$$

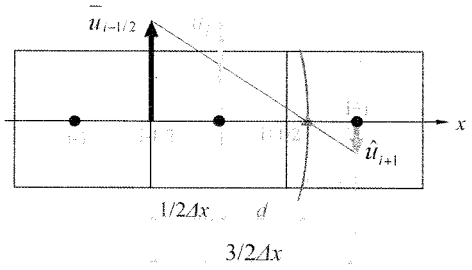


図１　境界部での速度の設定

式２では物体境界からの距離 d がゼロになっても安定に計算できるようになっている．格子定義点と物体境界の間の距離 d は Thomas-Moller[1]による交差判定により求めている．圧力の扱いについては，ボクセル法と同様にマスク関数を用いたノイマン条件をスキーム中に導入している[2]．これらの方法により，Navier-Stokes 方程式を Fractional Step 法で解く．

精度検証

提案する手法の予測精度を検証するため，比較的簡単な系で実験値との比較を行った．テストケースは円柱回りの流れ（Re=40, 100）と地面上におかれた平板である．

三次元円柱まわりの流れ

図２に円柱交流の双子渦の時間的な成長過程を実験値と比較した結果を示す．時間積分には二次精度 Adams-Bathforth 法を用いているが，円柱背後から渦終端までの距離 Ls は良い一致を示す．次に，Re=100 のときの圧力場の様子を図３に示す．計算には，境界層を解像するため，局所的に細かい格子を用いている．計算

の抗力係数は 0.16 であり，実験値と一致している．

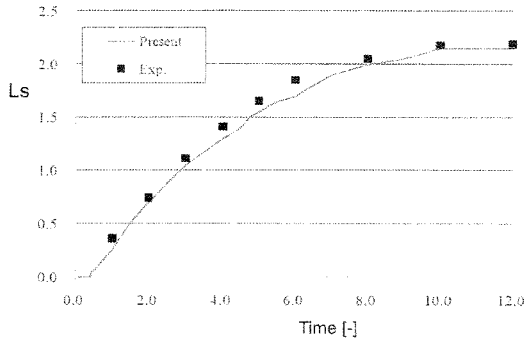


図 2　円柱後方の双子渦の成長過程



図 3　マルチレベル計算格子と圧力等高線

地面上の平板周りのながれ

平板の場合，$Re=5.1\times10^5$ であり，乱流計算のために LES（Cs=0.1）を導入した．計算領域を図 4 に示す．最も細い格子は領域 4 で $\Delta x=0.005$ である．流れに対して垂直な場合と 30 度傾斜させて配置した場合の結果を図 5，図 6 に示す．計算結果の圧力係数は実験結果と定量的にも良く一致していることがわかる．

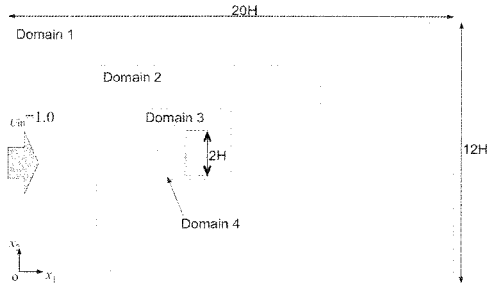


図 4　計算領域

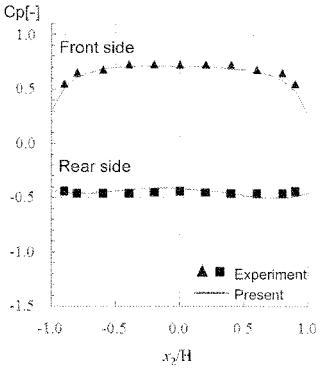


図 5　流れに対して垂直配置

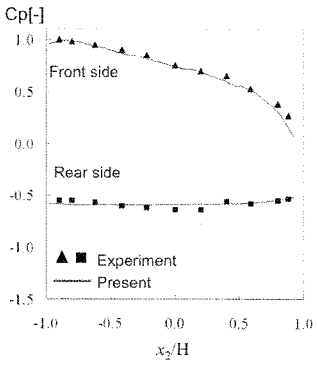


図 6　流れに対して傾斜配置

まとめ

直交格子を用いて，任意形状の物体まわりのながれを計算する手法を開発し，基本的なながれの実験結果をもちいて，計算結果の評価を行った．境界層を解像していることを前提にすれば，本計算手法は実験結果と定量的にも良く一致することがわかった．今後，移動境界の問題を解く手法と比較検証を進めていく．

参考文献

[1] Möller, T., and Trumbore, B., Fast, Minimum Storage Ray-Triangle Intersection, *Journal of Graphics Tools*, No.2, (1997), pp.21-28.

[2] Akasaka, K., Ono, K., An Implementation of Boundary Condition of Incompressible Flow Solver for Complex Geometries on Voxel Method, *Transactions of JSCES*, Vol. 2006, (2006), 20060024.

成果報告

赤坂啓, 小野謙二,「非水密なポリゴン要素で構成された任意形状周りの直交格子を用いた非圧縮粘性流れ解析」, 機論 B，2010，掲載予定．

弱回転サッカーボールの魔球的変化に関する発生メカニズムの空気力学的研究
Aerodynamics study of strange trajectory mechanism for soccer ball flight with less spinning

CM08004　黒木康平　　(指導教員　溝田 武人教授)
Kouhei KUROGI, (Prof. Taketo MIZOTA)

Abstract

Less spinning soccer ball aerodynamics are studied by wind tunnel experiments. Aerodynamic force of unsteady lift and side ones acting on the ball at rest are measured and estimated flight trajectory. Well agreements of flight shift magnitude in lateral direction between observed and calculated ones are obtained. Violent position change of longitudinal twin vortex just behind ball rear surface is observed using flow visualization method by high speed camera and smoke image method. As a result, the cause of this strange behavior of less spinning soccer ball is clarified by self-excited buffeting phenomenon of irregular behavior of omega Ω shaped vortex and longitudinal twin one, which already discovered with supper critical Re number region of smooth sphere by Taneda(1976). These twin vortices appearance are very similar to well known trailing vortices of both side of an air plain wings.

Key Words:　Supper critical Reynolds number, Unsteady air force, Self-excited buffeting, Flow visualization,

1．緒言

球技スポーツをプレーしたり観戦したりするが人々が楽しむのは,選手のパフォーマンスや緊迫した試合の展開など様々である.その中で最も競技人口が多いサッカーでは軌道の変化するシュートが注目されており,サッカーの試合で見られる変化球はカーブボール(バナナシュート)のほかにもキーパーの足元をえぐるような軌道を描くドライブシュートや,ほぼ無回転で飛翔し予測不能な軌道を描く無回転シュート(ブレ球)などがあり,これらの変化球が試合の結果はもちろんゲームを盛り上げる上で重要な要素であることは確かである.

Photo.1 に日本代表で,ロシア・プレミアリーグ PFC CSKA モスクワに所属している本田圭佑選手の弱回転フリーキックのストロボ画像[1)]を示す.この画像から明らかに放物線軌道から外れた軌跡であることが分かる.さらに他の弱回転シュートをいくつか検証したが飛翔軌道に法則性はなく全くのランダムである為ゴールキーパーのボールセーブは困難を極めると思われる.

上述のような変化のメカニズムのすべてについて定量的な説明はない.その魔球的変化は風洞実験,可視化実験により解明しつつあるがさらなる入念な観察が必要である.これまでプロサッカーの試合中に様々な変化球が放たれており映像も残されているが,軌道変化の観察には向いていない場合が多いため再現実験を行う必要がある.

そこで本研究では高架橋からのサッカーボール落下実験,昨年度製作したローラー発射方式のサッカーボール(バレーボール)発射装置で屋内発射実験により得られた弱回転シュート再現動画を解析し非定常空気力を求める.

また大型風洞を使ってサッカーボールに加わる空気力を測定し,高速度カメラによる流れの観察を行った.特に今回の実験では新たな可視化手法として煙法を試みた.

以上の2つの観点から弱回転シュートの魔球的軌道変化メカニズムを定量的に検証,解明する.



Photo.1 Strobe image of shot by HONDA Keisuke[1)]

2．実験装置・方法

2.1 ボール落下実験

実験の設置図を Fig.1 に示す.今回の実験では,図中 Y 方向を揚力方向とした阿蘇長陽大橋にて,サッカーボールの自由落下実験を行った.阿蘇長陽大橋は地上から約 65[m]ある.実験では落下ボールの真上から撮影を行った.自然風の状態は地上で,ほぼ無風,橋の上で 0.4[m/s]程度であった.実験結果は,終端速度 U=22[m/s]で揺れを確認することができた.

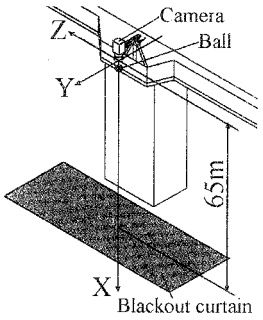


Fig.1 View in 3-D

2.2 屋内発射実験

Photo.2 にサッカーボール発射装置の写真を示す.フレーム内部の中央に三相モーターを二つ設置し,モータシャフトにφ340[mm]のウレタン製ローラーを直結させている.

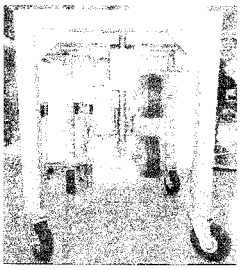


Photo.2 Shooting device

また,それぞれのモーターはインバーターにより回転数を 0～2000[rpm]の範囲で変化させることができる.発射角は水平方向から±37°の範囲で可変できる.ローラーの位置を調整し,カーブボール,弱回転ボールそしてジャイロ回転ボールを発射させることができる.なお発射装置は,ジャイロ技研[2)]の馬場氏の技術指導のもとで製作された.

次に実験の設置図を Fig.2 に示す.ボール飛翔時における自然風の影響を無くすため,福岡工業大学の FIT アリーナを使って,弱回転ボールの発射実験を行った.ボールの着地地点をおよそ 37[m]となるように調整した.そして,発射装置の背後にハイビジョンビデオカメラを設置した.この映像からストロボ画像を製作し画像解析変化球の変位を求める.

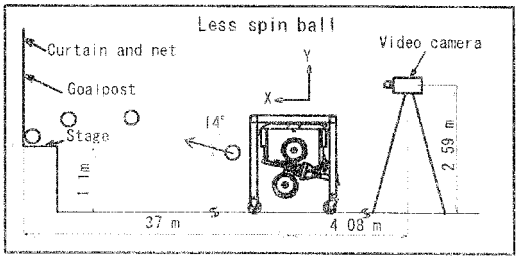


Fig.2 Set-up of shot experiment

2.3 風洞実験

2.3.1 空気力測定装置

実験装置の全体を photo.3 に示す. 測定流速は U=5～30 [m/s] とし3分力ロードセルを用いて抗力, 揚力, 横力を同時に測定する. ボール支持部の固有振動数は, 19 [Hz] であった. ロードセルやアルミ枠などの構造物によりサッカーボール後流が乱れるのを抑制するためにサッカーボールとロードセルの間を φ8 [mm] ×800 [mm] のアルミシャフトで接続した. ボール背面は球面加工したフランジを接着剤で接続し, シャフトに連結させている.



Photo3. Set-up of unsteady force measurement by wind tunnel

2.3.2 タフト法による可視化

タフト法を用いた可視化部分を photo.4 に示す. ボール後方に 50×50 [mm] の格子状のピアノ線に絹糸を結びその揺らぎで空気の流れを可視化する.
ボールの左後方から高速度カメラで空気の流れの様子を 250 [f/s] で撮影した.

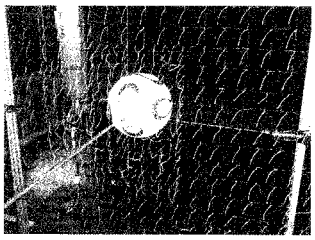


Photo.4 Flow visualization by tuft methods

2.3.4 煙法による可視化

煙を用いた可視化実験の様子を Fig.3 に示す. 球体を後方から支えるシャフトに煙を導くホースを取付け, 球体の背面にホースを近づけ煙を吹き付ける. その煙の流れで空気を可視化する. 煙を得るために, 煙玉を 1 回の実験で 10 個程度用いている. これにより従来にない大量の煙を発生させることが可能になった. 煙は風洞外に設置した密閉容器の中で発生させ, 風洞内圧力が低いことを利用してボール背面に自然放出させ, 勢いが足りない場合はブロアーを使用した. 風洞流速は 20 [m/s], 高速度カメラの撮影フレーム数は 250 [f/s] とした.

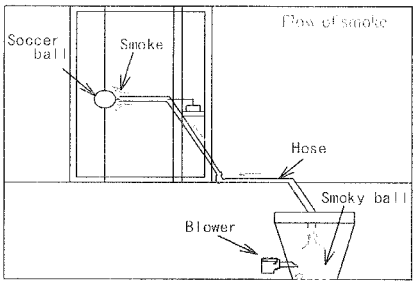


Fig.3 Flow visualization experiment

3. 画像解析結果

3.1 ボール落下実験結果[3)]

Photo.5 にサッカーボールを自由落下させたときカメラで撮影した映像のストロボ画像を示す. 最初右に揺れ, 最後に大きく左方向に揺れているのを確認できた. Fig.4 に横力係数と揚力係数の変化示す. 図中丸印の大きい S 地点が落下開始直後, 丸印の小さい E 地点が地面衝突直前の C_S,C_L の関係である. 落下中のボールに加わる変動空気力の振動数 f=1.25 [Hz] 程度, ストローハル数 St=0.01～0.0125 であった.
特徴的な事は非定常力が滑らかに変化せずに急激な変化であるという点である.

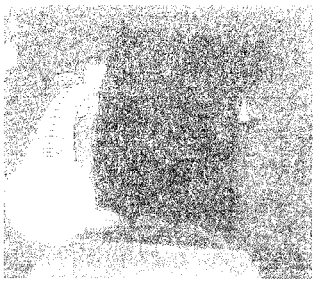


Photo.5 Strobe image of free fall experiment[3)]

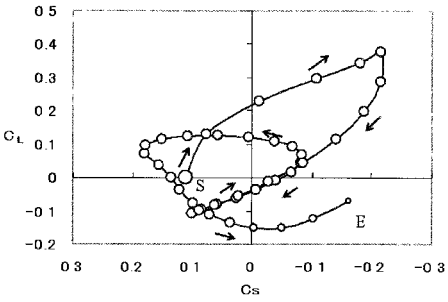


Fig.4 Aerodynamic force of Cs-CL during free fall of soccer ball[3)]

3.2 屋内発射実験結果

Photo.6 に弱回転サッカーボールの飛翔動画からボール軌道をストロボ画像化したものを示す. このときのボール初速は 82 [km/h](22.8[m/s])で発射角は 14°である. このストロボ画像により弱回転ボールの飛翔軌道が左右に鋭く揺れることが確認できる. また, ボール直径や中心位置を表す画像のピクセル数により, X, Y, Z 方向の変位を求め, その値から空力係数を求めた. Fig.5 より Z 方向では最大で 0.37 [m] 程度の揺れを確認することができた. 横力係数と時間の関係を Fig.6 に示す. 周波数は 1.2 [Hz] 程度で前節でのボール自然落下実験の結果に近い値となった.

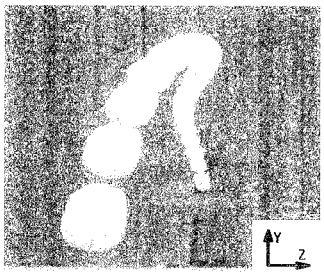


Photo.6 Shot orbit of the ball V=82[km/h]

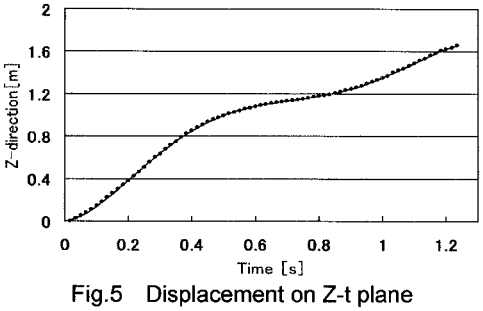


Fig.5 Displacement on Z-t plane

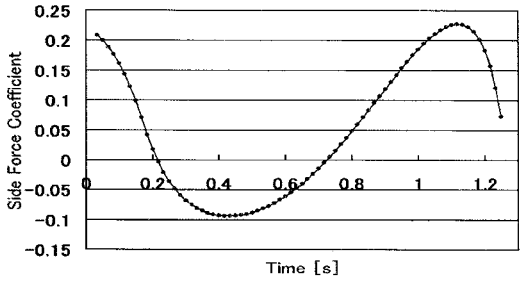


Fig.6 Unsteady side force on Cs-t plane

4．風洞実験結果

4.1　時間平均抗力

Fig.7 に新旧のサッカーボールを一様中流で静止させたときの時間平均抗力を示す．図中 wind speed とは直径 220 [mm] の滑面球とサッカーボールを想定したときの流速 U [m/s] である．滑面球と比べてサッカーボールには表面のパネルに 1 [mm] 程度の段差があり，これが粗さの役割をするため遷移レイノルズ数が流速 U=10 [m/s] 前後の低流速側に促進されている．この結果は浅井ら[4] と同様となった．また粗さ付き球の抗力を測定した E.Achenbach (1972)[5]の結果ともほぼ同様である．

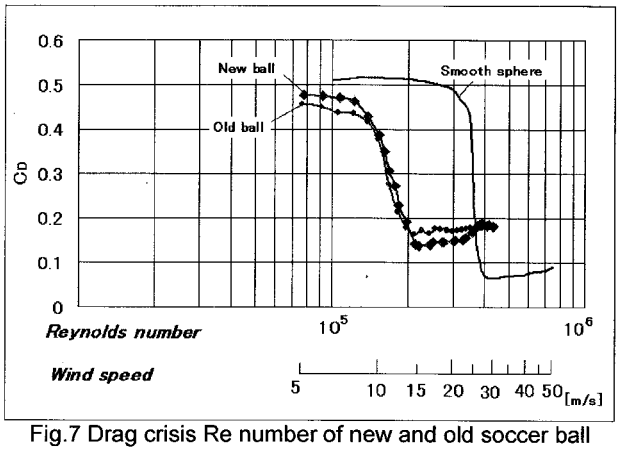
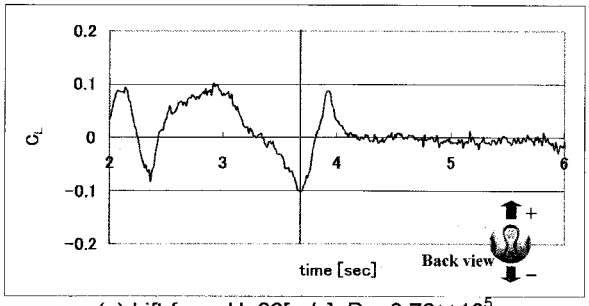


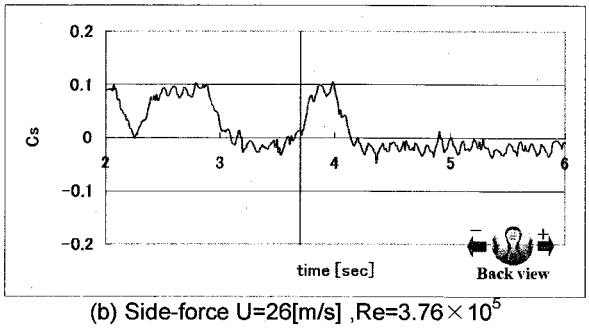
Fig.7 Drag crisis Re number of new and old soccer ball

4.2　非定常横力・揚力

Fig.8, にサッカーボールに加わる揚力係数 C_L, 横力係数 C_S の 4 秒間の変化を示す．C_L, C_S ともに±0.1 程度の非定常空気力が確認された．Fig.8 の 2～4 [s] 間のボール変位を力の時間積分から求め，Z-Y 平面上に描いた結果を Fig.9 に示す．Start（原点）からシュートが放たれたとすると，直後の 0.5[s]付近で Z 方向変位が負から正へと急激な変化をしていることが確認できた．ただし重力は計算に含まれていない．



(a) Lift-force U=26[m/s] ,Re=3.76×10^5



(b) Side-force U=26[m/s] ,Re=3.76×10^5

Fig8. Unsteady lift and side-force

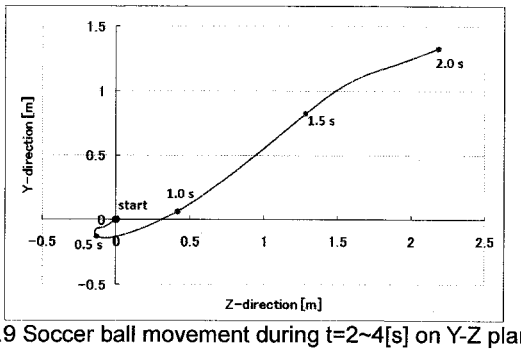


Fig.9 Soccer ball movement during t=2~4[s] on Y-Z plane

4.3　可視化実験結果

4.3.1 後流配置と空気力の対応

高速度カメラ画像の内，Fig.8 の縦線の前後 3.60～3.70 [s] 間の 30 フレームを重ね描きした画像を Photo.7 に示す．図中横力と揚力の合力の方向を F として示す．渦は下流方向から見てサッカーボールの上方向に発生し，C_L と C_S 合力 F は，下方向へ作用している．この写真は Fig.10 に示す Taneda[6] による超臨界レイノルズ数での後流渦スケッチでの 2 本の縦渦を示していると考えられる．また後流は常にランダムにシフトしており，その方向と作用した力の方向の対応関係は良い．

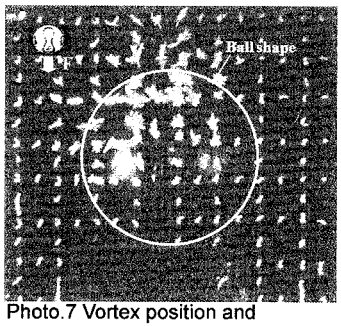


Photo.7 Vortex position and resultant force direction on Y-Z plain

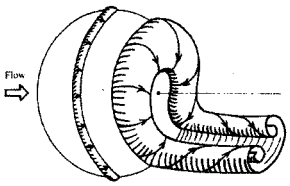


Fig.10 Flow around sphere of Re=3.8×10^5 [6]

4.3.2 煙法による後流渦観察

Photo.8 に PIV による渦の可視化画像を示す．矢印の向きは空気の流れの方向を示している．この画像では，サッカーボール背面の左上(CCW方向の渦)と右下(CW方向の渦)に一対の螺旋渦が発生していることを確認できた．しかし，解析動画としては不十分な部分があるためここでは定性的な評価でとどめている．

Photo.9 に煙による可視化の高速度カメラ画像を示す．各図中左下に①枚目を基準とした経過時間 [sec] を示す．この結果から 2 本の縦渦が発生しており，発生位置は瞬間的にかつランダムに変化することが分かった．この渦は Fig.12 に示す 2 本の縦渦を捉えているものである．①から②のように 0.1 秒程度で 90°の大きな位相変化を起こすこともあれば 1 秒以上同じ場所に留まるケースも見られた．

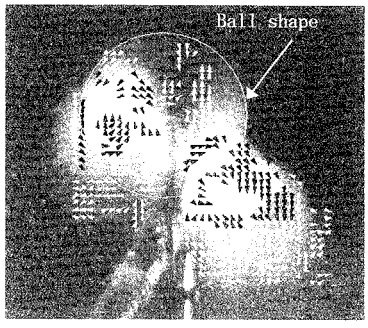


Photo.8　Flow around soccer ball image by PIV analysis

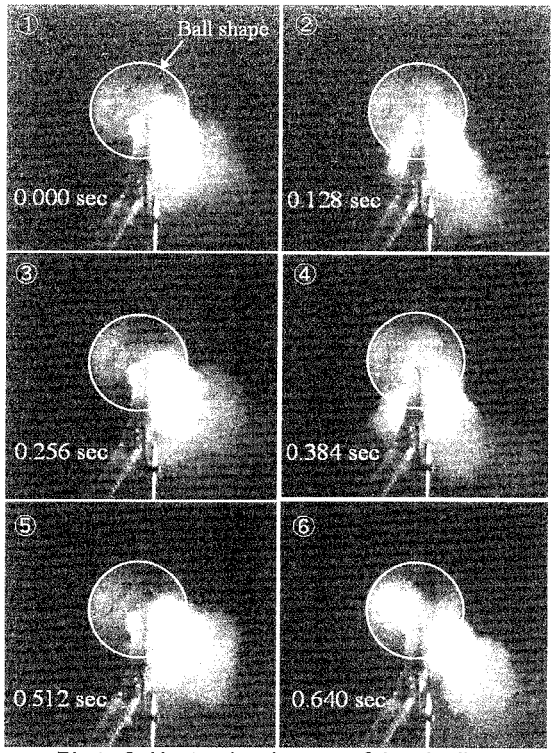


Photo.9 Unsteady change of longitudinal twin vortex position U=20[m/s]

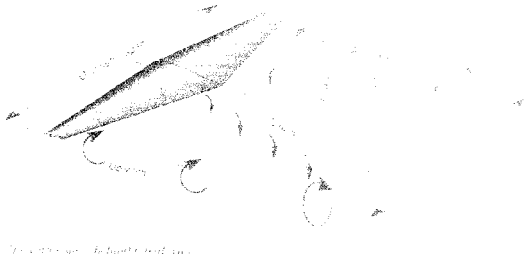


Fig.11 Vortex sheet behind a real wing[7)]

5．考察

阿蘇長陽大橋からのボール落下実験や，サッカーボール発射装置による弱回転シュート再現実験から得られた映像を解析すると揺れのストローハル数はSt=0.012程度，振動数は1.0［Hz］前後であることが分かった．そこで風洞実験によりこのストローハル数付近でボールを強制振動させ空気力を測定したが振動に伴う振幅の増加も見られず，振動変位に対する空気力の位相の進み側への変化も無いためこの現象はフラッタ振動ではない．

風洞気流中でサッカーボールを静止させ空気力を測定したところ横力係数，揚力係数ともに振幅が0.05～0.10程度の非定常空気力が確認された．これにより弱回転シュートの変位を定量化することが出来た．また時間平均抗力の測定ではサッカーボール接合部の粗さによって遷移レイノルズ数が底流速側に促進されており14［m/s］を超える流速では滑面球における超臨界領域の流れになっていると考えられる．

タフト法による風洞可視化実験でボール背面に2本の縦渦が発生し，常にランダムな位相変化を起こしている様子を捉えることが出来た．さらに煙法による可視化により2本の縦渦は点対称の螺旋状の流れをしていることを確認した．これはTaneda(1976)の超臨界領域での滑面球背面流れの説明を適用することが出来る．

なお2本の縦渦はFig.11に示すような航空機の翼端にできる2本の翼端渦と同等なものと考えられる．これは航空機の翼などの表面にできる境界層が統合化して後流に流れ出したものであるが，サッカーボールの2列の縦渦も同じ渦である．

6．まとめ

1) 阿蘇長陽大橋からの落下実験により落下中のボールに加わる変動空気力の振動数f=1.25［Hz］程度，ストローハル数St=0.01～0.0125であった．
2) サッカーボール発射装置による発射実験から画像解析を行った．落下実験と同様の結果を得た．
3) 風洞実験により静止したサッカーボールに加わる非定常力を測定し，変位の定量的なデータを得た。
4) 可視化実験により超臨界領域での2本一対の螺旋渦が発生しランダムな位相変化を確認した．
5) ボールが揺れる原因は馬蹄形渦と2本の縦渦がボールの幾何学的中心軸のまわりにランダムに回転することによる自己励起型バフェティング現象だといえる．2本の縦渦は航空機の翼端渦と等価である．

謝辞

この研究の一部は2007，2008年度文部科学省基盤研究(C)，課題番号19500555で行われた．

サッカー発射装置の製作・管理運営については福岡工業大学モノづくりセンターの協力で行っている．

参考文献

1) 北京オリンピックアジア地区2次予選
2) Gyro Giken HP http://www.gyrogiken.jp/index.htm
3) 山本和幸(福岡工大院)：2006年度福岡工業大学工学研究科知能機械工学専攻　修士研究論文：「サッカーボールに加わる非定常空気力検討と測定装開置発」，(2006) pp4-75
4) 浅井 武(山形大学)，瀬尾 和哉(山形大学)，小林 修(東海大学)，安食 麻紀(山形大学)，塩沢 勝吾(山形大学)：「サッカーの空力特性に関する基礎研究」日本機械学会流体部工学部門講演会論文集　(2005.10.29-30，金沢)
5) E.Achenbach; Experiments on the flow past spheres at very high Reynolds numbers. J. Fluid Mech., vol.54, p.565, 1972
6) S.Taneda : Visual observations of the flow past a sphere at Reynolds numbers between104 and 106, J. Fluid Mech., Vol.85, pp.187-192, 1976
7) http://rc-sailplane.com/niki/niki-sophia_dlg_j.htm
8) 伊藤 慎一郎(防衛大)，浅井 武(山形大学)，瀬尾 和哉(山形大学)，湯木 則博((株)モルテン)：「シューティングマシンの設計と性能」日本機械学会流体工学部門講演会論文集 Vol.2 (2008.8.3-7，横浜市)，pp151-152
9) 岩井 豊(筑波大学)，村上 正秀(筑波大学)，瀬尾 和哉(山形大学)，：「無回転サッカーボールに作用する空気力と流れ場に関する風洞実験」日本機械学会ジョイント・シンポジウム2008講演論文集　(2008.11.6-8，秋田)
10) 溝田武人(福岡工大)，河村良行(福岡工大)：「サイドスピン型ナックルボールの三次元飛翔画像解析による準定常横力について」日本機械学会論文集(B編)，73巻，734号(2007-10)，論文No. 06-1093，pp. 1981-1986
11) T.Mizota, K.Kurogi, Y.Oya and A. Okajima;Strange 3-D trajectory mechanism of less rotation soccer ball flight, 8th UK conference on Wind Engineering, University of Surrey, Guildford, UK, July 14-16, 2008.

風レンズ風車に適した風車翼の設計法の開発

Development of a Design Method for Wind Turbine Blade Suitable to Wind-Lens Turbine

九州大学　大学院工学研究院機械工学部門　古川雅人

1. 緒言

地球温暖化の原因となる二酸化炭素の排出削減という観点から，風力発電システムは再生可能エネルギー源の利用として全世界でその普及が推進されている．しかしながら，日本では，平均風速が低い上に風速と風向の変動が大きく，風力発電に適した地域は非常に限られており，風力エネルギーをより有効に利用するためには，日本の風況に適した風車形態を新たに開発する必要がある．この問題点を克服するため，翼車まわりに風を局所的に集中させる機能をもつ「風レンズ」（集風体）を装着した「風レンズ風車」が九州大学において独自に開発された．

風レンズ風車の場合，図1のとおり，風レンズ体（集風体）内の内部流れと風レンズ体まわりの外部流れが混在すること，風レンズ体後方で流れの剥離が発生すること，集風効果に伴う流入流線の曲率発生によって風レンズ体への流入風速に大きな分布が現れることから，従来の風車よりも複雑な流れ場が形成される．また，風レンズ風車では，翼作用（特にスパン方向の翼負荷分布）が風レンズ体の外部流れに大きな影響を与えること，一方風レンズ体の外部流れ（特に風レンズ体後方の剥離渦流れ構造）が風レンズ体の内部へ流入する風量に大きな影響を及ぼすことから，風レンズ体の内部流れ場と外部流れ場とを連成して空力設計を行うことが求められる．このような風レンズ風車に対して従来の風車設計法を適用することには限界があり，高性能な風レンズ風車を開発するためには，従来の設計法にとらわれない斬新な発想に基づく空力設計法の新たな創出が不可欠である．

以上の観点から，本研究では，子午面粘性流れ解析と二次元翼素選定法とを組み合わせた，風レンズ風車翼の準三次元空力設計法を構築するとともに，その設計法を適用した翼車を試作して，風洞実験によりその空力特性を調べた．

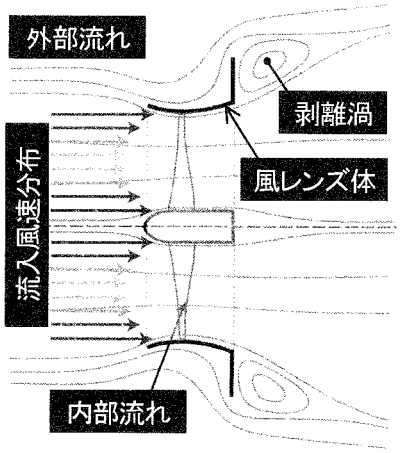


Fig. 1 Flow field around wind-lens turbine

2. 風レンズ風車翼の準三次元空力設計法

本研究で構築した準三次元空力設計法の概要を図2に示す．まず子午面流れ解析を実施することにより，風レンズ周りの外部流れの効果を考慮して，翼車の入口・出口の流速分布を求める．次に，得られた翼車の入口・出口での流速分布および設計条件として与えられる翼の空力負荷分布に従って，二次元翼素理論により翼素形状を求める．新たに求まった翼形状から翼作用(翼力)を算出しなおし，再び子午面流れ

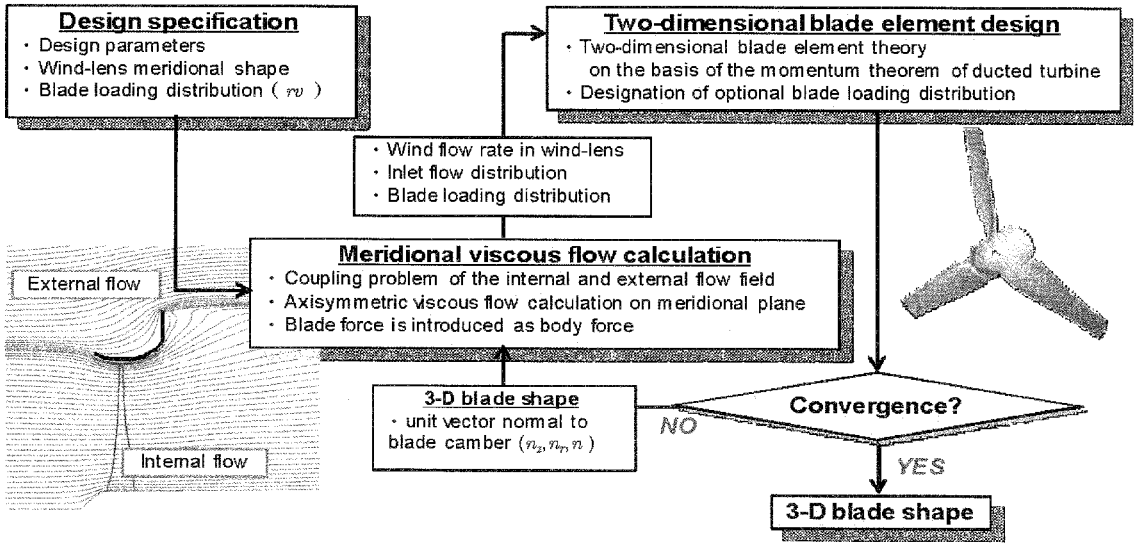


Fig. 2 Quasi-three-dimensional design method for wind-lens turbine blade

Table 1 Design specifications

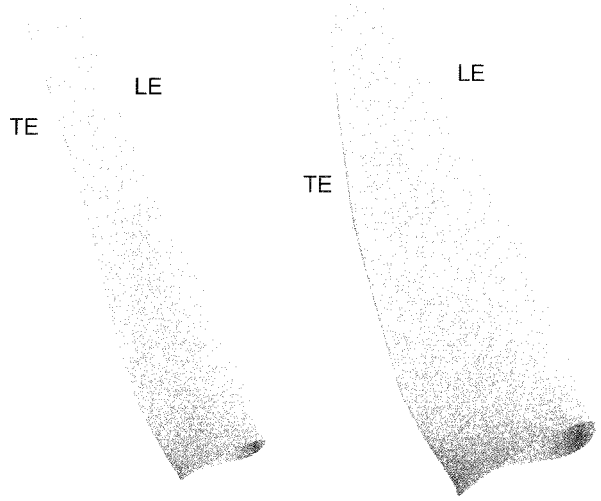
	MT	MTVL
Loading coefficient	0.81	1.2
Approach velocity	10 m/sec	
Blade number	3	
Tip speed ratio	3.5	
Rotational speed	670 rpm	
Rotor diameter	1000 mm	
Tip clearance	10 mm	
Hub / Tip ratio	0.139	

解析を実施する．以上のプロセスを翼形状が収束するまで繰り返す．

3. 準三次元空力設計による風車翼の試作

本研究では，従来の設計法により設計された風車翼を MT 翼と，準三次元空力設計を用いることにより流入速度分布および空力負荷分布を考慮して設計された翼型を MTVL 翼と呼称する．表 1 に MT 翼および MTVL 翼の設計条件を示す．両翼の設計負荷係数はそれぞれΨ_{MT}=0.81，Ψ_{MTVL}=1.2 である．また，スパン方向の翼負荷分布は，MT 翼では一様であるが，MTVL 翼ではスパン中央に最大値を持つように設定した．両翼の三次元形状を図 3 に示す． MT 翼と MTVL 翼について風洞実験により全体性能を調べるとともに，三次元定常 RANS 解析を実施して翼車周りの流れ場を詳細に解析した．

図 4 に MT 翼および MTVL 翼の出力係数を示す．同図中において，EFD は風洞実験結果を，CFD は RANS 解析結果を示す．この図 3 によると，MT 翼および MTVL 翼ともに失速点(MT 翼ではλ=3.0，MTVL 翼ではλ=2.5)より高周速比側でフラットな特性を示す．また，MTVL 翼は MT 翼に比べ低周速比側においても高い出力を示している．これは，MTVL 翼の設計負荷係数 1.2 が MT 翼の負荷係数 0.81 よりも高く，MTVL 翼の設計レイノルズ数が高いことによる．



(a) MT blade (b) MTVL blade

Fig. 3 Three-dimensional blade shape

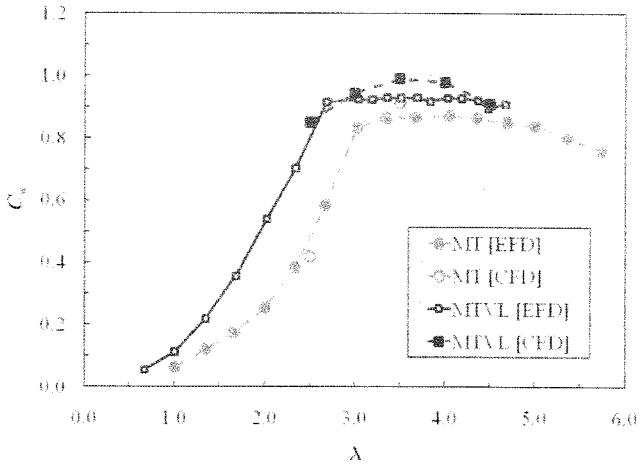


Fig. 4 Output power coefficient

三次元定常 RANS 解析により MT 翼および MTVL 翼の流れ場を詳細に調べた結果，MT 翼の場合には設計作動点においても翼負圧面のコード中央付近ではく離が発生していることが明らかになった．このはく離は翼の根本から先端まで前スパンに及んでいる．一方 MTVL 翼では，翼負圧面において根本部に局所的なはく離が認められるものの，全体的に極めて良好な流れとなっており，MT 翼に見られるような大規模なはく離は発生していない．以上の流れ場の違いは，準三次元空力設計を適用した MTVL 翼では，風車入口のスパン方向速度分布を考慮した翼設計がなされている結果， MT 翼よりも適切な翼素選定がなされていることに起因している．この流れ場の違いは，MT 翼と MTVL 翼との全体性能の差異をもたらしていることは言うまでもない．

4. 結言

子午面粘性流れ解析と二次元翼素選定法とを組み合わせた，風レンズ風車翼の準三次元空力設計法を構築し，その設計法を適用した翼車を試作して，風洞実験および三次元定常 RANS 解析によりその空力特性を調べた．

本研究で提案する準三次元空力設計法では，与えられた風レンズ体の形状および翼負荷分布のもとに，子午面（r-z 面）内の軸対称粘性流れを数値計算により求めることで，風レンズ体の内部流れと外部流れを連成して翼設計が実施される．その結果，風レンズ体後方のはく離渦の効果，風レンズ体まわりの流線曲率の効果，および翼負荷分布の効果を考慮して，風レンズ体の集風量（風レンズ体への流入風量）と流入風速分布を正確に予測することが可能となる．

風洞実験および三次元定常 RANS 解析の結果，準三次元空力設計法を適用して設計された風レンズ風車翼は，従来の設計法を適用した風車翼と比べて，優れた空力特性を有することが確認された．本設計法により，日本の風況に適した高性能な風レンズ風車の設計が可能となり，我が国における風力発電のイノベーションおよび低炭素社会の実現に大きく貢献することが期待される．

沿岸海域の物質循環と環境保全

広島大学大学院生物圏科学研究科　橋本俊也

１．目的

瀬戸内海をはじめとする沿岸海域は豊富な水産資源に恵まれた海域であり，この水産資源の持続的生産を実現することは重要な課題である．水産資源の持続的生産のためには，水産生物の生育環境とともに植物プランクトンの光合成からはじまる低次生産構造を定量的に把握することが重用である．このような観点から，本研究集会では，低次生産構造の定量的把握，低次生産を支える栄養塩供給機構の解明，低次生産における干潟の役割といった物質循環過程に関して，物理･生物･化学といった様々な分野の研究者により研究発表と討論を行うことを目的としている．さらに，生態系モデル，大気中のガス濃度測定，地下水解析といった最先端の研究を行っている研究者の協力を得て，瀬戸内海を中心とした沿岸海域の低次生態系をめぐる物質循環と環境保全に関する現状の問題点や今後の課題について総合的に議論を行うことを目的とした．

２．研究集会の概要

日時：２００９年１２月　１日（火）１２：５０～２日（水）１４：４５
場所：東アジア海洋大気環境研究センター６階　多目的研究交流会議室
発表者：橋本俊也（広島大学大学院生物圏科学研究科）
渡慶次力（宮崎県水産試験場）
谷本照己（産業総合研究所）
多田邦尚（香川大学農学部）
一見和彦（香川大学農学部）
帰山秀樹（香川大学農学部）
山田真知子（福岡女子大学人間環境学部）
上原蓮華（福岡女子大学人間環境学部）
児玉真史（水産総合研究センター中央水産研究所）
徳永貴久（水産総合研究センター中央水産研究所）
大屋充生（神戸大学海事科学研究科）
阪本健太郎（神戸大学海事科学研究科）
小野寺真一（広島大学大学院総合科学研究科）
清水裕太（広島大学大学院総合科学研究科）
加藤愛彬（広島大学大学院総合科学研究科）
齋藤光代（愛媛大学沿岸環境科学研究センター）
郭　新宇（愛媛大学沿岸環境科学研究センター）
小森田智大（愛媛大学沿岸環境科学研究センター）
吉江直樹（愛媛大学沿岸環境科学研究センター）
藤井直紀（愛媛大学沿岸環境科学研究センター）

発表プログラムを資料１に掲載した．

３．研究成果

発表要旨の一部を資料２に掲載した．研究集会では，関係者を含めて約４０名の参加があり，活発な討論がなされ，今後の沿岸海域の低次生産をめぐる物質循環と環境保全についての問題点や課題について議論がなされた．

資料　１．研究集会プログラム

２００９年１２月１日（火）

趣旨説明　（１２：５０～１３：００）　研究代表者，所内世話人

１．沿岸海域低次生態系における藻場の役割　13:00-13:25
　　橋本俊也（広大院生物圏）

２．魚介類の藻場利用と里海方策　13:25-13:50
　　谷本照己（産業技術総合研究所）

３．簡便で精度の高い魚礁効果解析手法の開発　13:50-14:15
　　渡慶次力（宮崎水試）

４．和白干潟のアオサとマクロベントスの季節的消長　14:15-14:40
　　山田真知子　（福女大・環境理）

５．博多湾東部海域環境の現況　14:40-15:05
　　上原蓮華（福岡女大・人間環）

６．内湾における漁業生産と流入負荷・水質変動に関する考察　15:15-15:40
　　児玉真史（水産総合研究センター中央水産研究所）

７．有明海奥部におけるＤＯ低下速度の変動要因の検討　15:40-16:05
　　徳永貴久（水産総合研究センター中央水産研究所）

８．大気・海水中 N_2O 濃度連続測定とデータ補正方法の検討　16:05-16:30
　　大屋充生（神戸大学海事科学研究科）

９．沿岸域における大気・海水中 N_2O 濃度の時空間変動　16:30-16:55
　　阪本健太郎（神戸大学海事科学研究科）

10. 干潟域における物質収支について　9:15- 9:40
　　一見和彦（香川大学農学部）

２００９年１２月２日（水）

11. 瀬戸内海播磨灘南部における植物プランクトン群集の長期変動　9:40-10:05
　　帰山秀樹（香川大農）

12. 瀬戸内海の栄養塩異変と適切な栄養塩管理　10:05-10:30
　　多田邦尚（香川大学農学部）

13. マルチトレーサによる干潟の水・栄養塩流出解析　10:30-10:55
　　小野寺真一（広島大学大学院総合科学研究科）

14. 広島県及び岡山県の河川からの栄養塩流出の長期変動　10:55-11:20
　　清水裕太（広島大学大学院総合科学研究科）

15. 感潮河川における地下水流出と栄養塩供給特性　11:20-11:45
　　加藤愛彬（広島大学大学院総合科学研究科）

16. 燧灘南西部における地下水流出の推定と栄養塩環境に及ぼす影響について　12:40-13:05
　　齋藤光代（愛媛大 CMES）

17. 2009 年の伊予灘・豊後水道の観測結果Ⅰ：水塊構造　13:05-13:30
　　郭　新宇（愛媛大学 CMES）

18. 2009 年の伊予灘・豊後水道の観測結果Ⅱ：栄養塩動態　13:30-13:55
　　小森田智大（愛媛大学 CMES）

19. 2009 年の伊予灘・豊後水道の観測結果Ⅲ：植物プランクトン　13:55-14:20
　　吉江直樹（愛媛大学 CMES）

20. 2009 年の伊予灘・豊後水道の観測結果Ⅳ：動物プランクトン　14:20-14:45
　　藤井直紀（愛媛大学 CMES）

資料２（１）　発表要旨１

沿岸海域低次生態系における藻場の役割

○橋本俊也*・清水健太*・樽谷賢治***・吉田吾郎***・村瀬　昇**

*広大院生物圏，**水産大学校，***水総セ瀬戸内水研

１．はじめに

沿岸海域において、藻場は高い基礎生産力(光合成能力)を持ち，低次生態系において重要な役割を果たしていると考えられる．

本研究では，室内実験の結果をもとに，広島湾南部海域の，藻場の光合成量と分解量を定量的に評価した．また，藻場による栄養塩の吸収・放出量を明らかにし，河川負荷量と比較することにより，藻場が海域の栄養塩収支に与える影響を明らかにした．

２．方法

瀬戸内海においては，面積はアマモ場が最大であるが，生産量はガラモ場が最大であることから，本研究ではガラモ場を対象とした．生産量は村瀬ほか(2009)による光合成－光関係の月別実験値および葉面積指数(LAI)の実測値などを利用し，広島湾南部海域における海水の消散係数と海面到達量を与えて計算した．また，広島湾で実測された藻類現存量を再現できるように，藻類の枯死速度を推定し，藻類の枯死量を計算した．分解速度は，枯死藻体の分解実験の結果（吉田ほか, 2009）をもとに推定した．

３．結果と考察

広島湾における藻類の生産量は８月に最大（5.1 gC m^{-2} day^{-1}）となり，６月に最小（0.6 gC m^{-2} day^{-1}）となった（図１）．年間平均値は 2.7 gC m^{-2} day^{-1} となった．一方，藻類の枯死分解量は４月に最大（4.9 gC m^{-2} day^{-1}）であり（図２），年間平均値は 1.6 gC m^{-2} day^{-1} となった．

講演時には，広島湾南部海域の藻場面積と藻類のC/P比をもとに計算した，藻類による栄養塩（リン）の吸収・放出量と河川負荷量の季節変化を比較し，藻場が海域の栄養塩収支に与える影響と生態系モデルを用いた環境予測についても報告する．

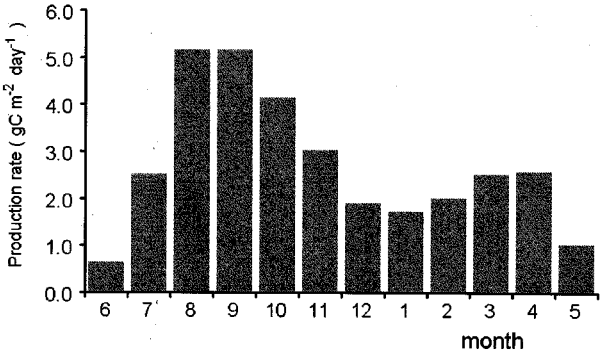


図１．ガラモ場生産量の月別変動

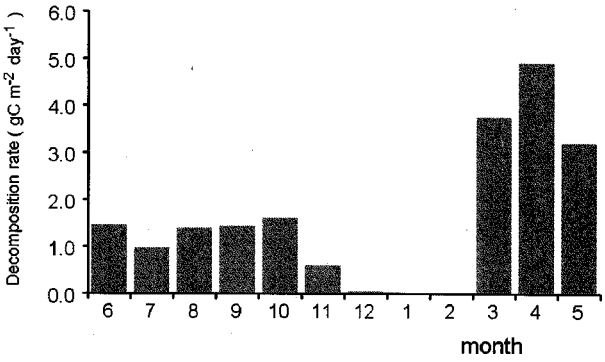


図２．ガラモ場枯死分解量の月別変動

参考

村瀬ほか（2009）：山口県馬島沿岸におけるアカモクとノコギリモクの光合成特性．第 33 回日本藻類学会．

吉田ほか（2009）：褐藻ノコギリモク藻体の枯死分解過程とその炭素収支－室内実験における検討－．平成 21 年度日本水産学会春季大会．

資料２（２）　発表要旨２

魚介類の藻場利用と里海方策

谷本照己
（産業技術総合研究所）

キーワード：藻場、アマモ、魚介類、里海、三津口湾

１．はじめに

多様な生物が生息する藻場は、沿岸域における物質循環に重要な役割を担っている。陸域より流入し、藻場にトラップされた有機物質は底生生物により分解を受け、栄養物質は海草・藻類や葉面の付着微細藻類に取り込まれる。また、藻場は魚介類の産卵場、孵化した幼稚子魚の摂餌、育成場として利用され、食物連鎖という循環を通して成長した魚介類は人間や鳥などに捕獲され、陸域へ運ばれる。このように、藻場は陸域から海域に入った物質が再び陸域へと循環する出発点の１つと考えられる。

瀬戸内海では、高度経済成長期における水質、底質汚濁に加えて、埋め立てなどにより浅海域にあった多くの藻場が消失した。近年、瀬戸内海の水質にある程度の改善が見られるものの、依然として生物生産が向上しない要因の１つとして、食物連鎖の出発点、特に魚介類生産の出発点にあたる藻場の回復が遅れていることが挙げられる。そのため、藻場造成も重要な課題の１つであるが、現存する藻場について、魚介類が産卵、育成場として利用しやすい藻場形態を明らかにし、現存する藻場に適用して生物生産効率を高めると共に、今後の藻場造成にも適用することが重要と考える。呉市安浦町三津口湾を対象に、魚介類が利用しやすい藻場形態について検討した。

２．方法

三津口湾におけるアマモ繁茂期では、葉長２ｍに達するアマモ株が１平米あたり約 150 本の密度で約 180ha にわたって繁茂している。広い藻場における魚介類の藻場利用について、魚介類は藻場の中央部あたりまでは利用しにくく、主に藻場の切れ目近辺を利用しているという仮説を立てた。この仮説が実証されれば、魚介類が広い藻場全体を利用できるような方策を考える必要がある。三津口湾において藻場の内外に刺し網を設置し、藻場海域の場所による魚介類の生息状況の違いを調査した。三津口湾の日ノ浦の５地点において、2009 年 8 月 26 日に刺し網を設置し、刺し網に捕獲された魚介類の種類と個体数を調べた。なお、地点 1、2、5 がアマモ場外（生え際）、地点３と４がアマモ場内にあたる。

３．結果

刺し網では、タイ、メバルなど魚類が最も多く捕獲され、種類数は少ないが貝類のアカニシ、甲殻類のイシガニなども捕獲された。刺し網により捕獲された魚介類の種類数と個体数の結果を図１に示した。藻場外（藻場の生え際）3 地点における魚介類の平均種類数は 10、個体数は 21.3 であるのに対し、藻場内 2 地点における平均種類数は 4、個体数は 7.5 であり、藻場内における魚介類は種類数、個体数ともに藻場外より少なかった。また、藻場の生え際から藻場中心部へ向かうほど魚介類が少なくなる傾向が認められた。

なお、2003 年９月に行われた底生生物の調査によれば、種類数、個体数共に藻場内より藻場の生え際において大きい結果が得られている。

４．魚介類が利用しやすい藻場としての里海方策

三津口湾では約 180ha のアマモ場がある。しかしながら、魚介類は主にアマモ場の周辺、生え際を利用していること、およびアマモ場内部に向かうほど生息数が少ないことがわかった。魚介類は自由に動ける空間を必要とし、空間が無ければ藻場内へ入りにくく生息数が少なくなると推察される。魚類が藻場全体を利用しやすい形態として、アマモを適度に抜き取って藻場内に魚類の通り道を作ることが有効であると考えた。アマモは抜き取られても地下茎を伸ばして新しい株が育って藻場は活性化し、魚介類が藻場全体を産卵、育成場として利用すれば漁業生産が高まり、人間にとっても利となる。人間が手を加えることにより、藻場を保全しつつ生産性の高い藻場、“里海”作りを目指し、藻場内に魚類の通り道を設定する実証実験を行う予定である。

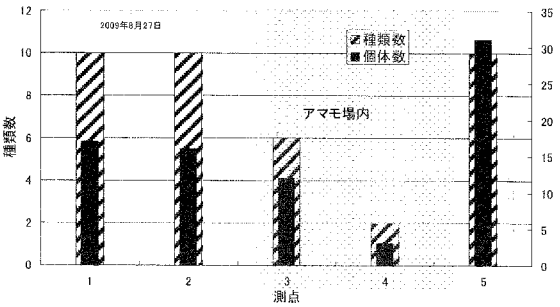


図１．刺し網に捕獲された魚介類の種類と個体数

21 AO－S 2

研究集会「海洋レーダーを用いた海況監視システムの開発と応用」報告

研究代表者
琉球大学工学部　藤井 智史

沿岸域での海況を高時空間分解能で計測でき、その把握や予測に極めて有効な観測手段である海洋レーダを沿岸海況監視システムとして活用する方法や応用技術について議論するため、標記研究集会を平成 21 年 12 月 16 日午後（13:30～17:30）、12 月 17 日午前（10:00～11:45）の日程で、応用力学研究所東アジア海洋大気環境研究センター　W601 号室にて開催した。この研究集会は、海洋レーダの開発や応用を推し進めるにあたり、観測技術開発、解析手法の改良、観測結果の応用などについて研究成果をもちより議論することにより、今後の海況監視システムの改善や新しい解析手法の開発に役立てることを目的としている。研究集会には 12 件の講演があり、36 名の参加があった。

スリーエスオーシャンネットワークの勝呂らは、CODAR 社の SeaSonde レーダの流速ベクトルデータをモデルに同化することにより、漂流探索と救助のオペレーションに活かす試みについて述べた。長野日本無線の小海らは、津波をアレイアンテナ型海洋レーダによる表層流変化によって捉える場合に必要な短時間での高分解能流速計測の方法について、津波シミュレーションの結果を用いて検証した。朝日航洋の岩松らは、瀬戸内海水研で実施されている「沿岸浮遊生物輸送モデルの開発」プロジェクトの一環として中津干潟周辺海域での海洋レーダ観測の実施例を解説した。この中で、SeaSonde レーダで必要となるアンテナパターン計測に干潟内歩行によって行った苦労話も聞かれた。琉球大学の大山らは、津軽海峡での SeaSonde レーダ観測による 1 ヵ月半のデータから調和解析により求めた主要 4 分潮について、既往の観測と傾向が一致しており、レーダ観測によってより詳細な面的分布が明らかになるという期待を示した。北海道大学低温科学研究所の江淵らは、宗谷海峡と紋別沖を観測している海洋レーダに加えて沿岸潮位や ADCP のデータから、オホーツク海に流れ込む宗谷暖流の 5～15 日の短周期変動成分が下流域に 100km/day で伝搬する様子を捉え、その成因について議論した。大阪大学の田尾らは、大阪湾設置の海洋レーダで流速検出時に発生する誤差に対して、信頼度評価指標を導入しデータ同化に活用した。

電力中央研究所を中心に行われた有明海での VHF レーダ観測の結果について同所から 3 件の講演があった。まず、吉井らは、レーダ観測における受信電力低下の原因は塩分低下であると結論づけ、主に筑後川からの淡水流出の可能性が高いことを明らかにした。このことにより、海洋レーダによる淡水追跡が可能であることを示した。坪野らは、諫早湾口付近での日周潮成分の平面流動分布を詳細に調べ、冬季は天文潮が卓越するが夏季には海陸風の影響が大きいことを明らかにした。坂井らは、赤潮の拡大・消失の過程を海洋レーダで観測された表層流の平均流速や発散、渦度などを用いて議論し、粒子追跡モデルを用いて増殖時の条件などを示した。

九州大学の井手らは、海洋レーダの表層流データから見積もられる吹送流の季節変化の原因として熱フラックスの変化を考えた場合について簡単なモデルでの検証を行った。琉球大学の久木らは、石垣島・西表島沖での海洋レーダ観測の流速と JCOPE と比較し、さらに流れパターンを

自己組織化マップを用いて分類した結果を示した。名古屋大学水循環研究センターの高橋らは、東シナ海南部での遠距離海洋レーダの長期間データを用いて、黒潮の北東流速が夏季に最大値をとり冬季に最小となる季節変動を論じた。また、周期 30 日以上の変動は台湾へ西進する中規模渦の影響であることも明らかにした。

各講演に対しては活発な議論がなされた。国内に５０基あまりの海洋レーダが運用されている現状から、解析手法が高度化し応用範囲も広がってきたことによると考えられる。また、塩分観測の可能性も示唆される講演に見られるように新しい知見も示された。これからも海況監視システムとしての海洋レーダの研究開発がより一層進むものと期待される。その進展に対しては、本研究集会が海洋レーダに関する国内では唯一の研究集会として寄与する部分が大きく、今後とも活発な議論の場が提供できることを望むものである。最後になったが、開催に尽力いただいた九州大学応用力学研究所東アジア海洋大気環境研究センターの吉川裕准教授、増田章教授はじめ各位に感謝する次第である。

プログラム

「海洋レーダーを用いた海況監視システムの開発と応用」

研究代表者：藤井智史（琉球大学）

所内世話人：吉川　裕

12月16日(水)

13:30－13:35　あいさつ・趣旨説明

藤井 智史(琉大工)

13:35－14:00　潜在的に重要な海洋短波レーダーによる流速データ活用の可能性

:循環、温度、塩分変動の予測改善

D. Barrick、L. Pederson(CODAR Ocean Sensors)、

勝呂一彦(スリーエス・オーシャンネットワーク)

14:00－14:25　海洋レーダを用いた津波監視のための観測分解能と装置仕様の基礎検討

小海尊宏、千葉修、伊藤浩之(長野日本無線)、

永松宏、村田泰洋(国際航業)

14:25－14:50　海洋レーダ流速観測システムによる中津干潟周辺海域の流向・流速観測

岩松伸宏、山本貴春、宮村茂、斎藤雅司(朝日航洋)、

中川浩一、上妻智行(福岡水海技セ豊前)、

浜口昌巳　(水研セ瀬戸内水研)、伊藤進一(水研セ東北水研)、

清水　学　(水研セ中央水研)、八木宏(水研セ水工研)

14:50－15:15　海洋レーダによる津軽海峡観測における潮流解析

大山尚也(琉大院理工)、藤井智史(琉大工)

15:15－15:25　休憩

15:25－15:50　宗谷暖流の短周期変動

江淵直人、深町康、大島慶一郎(北大低温研)

15:50－16:15　流速データの信頼度評価指標の提案とデータ同化への応用

田尾雄喜、西田修三(阪大工)

16:15－16:40　海洋レーダを用いた筑後川出水後の淡水挙動の観測

吉井匠、坪野考樹、坂井伸一、松山昌史(電中研)、多田彰秀、中村武弘(長崎大工)

16:40－17:05　有明海においてレーダで得られた各季節の日周潮と海陸風の影響について

坪野考樹、吉井匠、松山昌史、坂井伸一(電中研)

17:05－17:30　有明海の赤潮広域化と表層流動場の関連性

坂井伸一、坪野考樹、吉井匠、松山昌史(電中研)、多田彰秀、中村武弘（長崎大工)

12 月 17 日(木)

10:00－10:25　熱フラックスの日変化が吹送流に及ぼす影響

井手喜彦(九大院総理工)、吉川裕(九大応力研)

10:25－10:50　石垣・西表島沖における海洋レーダ観測

久木幸治、Jim Koliyavu(琉大理)、鹿島基彦(神戸学院大人文)

10:50－11:15　台湾北東海域における黒潮の季節変動

高橋大介、森本昭彦(名大水循環セ)、郭新宇(愛媛大沿岸セ)、

佐竹誠、児島正一郎(NICT)

11:15－11:45　総合討論

海洋レーダーを用いた海況監視システムの開発と応用

平成２１年１２月１６日（水）～１２月１７日（木）応用力学研究所西棟(W601号室)

	ご 氏 名	ご 所 属	DVD成果集持ち帰り	備 考
1	勝呂一彦	3Sオーシャンネットワーク	○	
2	岩松伸宏	朝日航洋	○	
3	佐々木則孝	朝日航洋	○	
4	杉本智哉	KANSOテクノス	○	
5	長田俊明	国際航業(株)	○	
6	小沼知弘	国際航業(株)	○	
7	長谷川剛基	大阪大学	○	
8	田尾雄喜	大阪大学		
9	江淵直人	北大低温研		
10	坂井伸一	電力中央研究所	○	
11	伊藤浩之	長野日本無線	○	
12	服部友則	海上保安庁海洋情報部	○	
13	久木幸治	琉球大学・理学部	○	
14	藤井智史	琉球大学・工学部	○	
15	滝川哲太郎	水産大学校	○	
16	増田 章	応用力学研究所		
17	丸林賢次	応用力学研究所		
18	広瀬直毅	応用力学研究所		
19	吉井 匠	電力中央研究所	○	
20	斉田倫範	九大	○	
21	扇塚修平	九大		
22	田井 明	九大		
23	高橋大介	名古屋大学	○	
24	竹内謙介	元教授	○	
25	坪野考樹	電力中央研究所		
26	井手喜彦	九大・総理工	○	
27	石橋道芳	応用力学研究所		
28	吉川 裕	応用力学研究所		
29	井下孝次	国際航業(株)	○	
30	西田芳則	北海道中央水産試験場	○	
31	田中伊織	北海道中央水産試験場		
32	力石国男	弘前大学		
33	灘井章嗣	NICT	○	
34	中田聡史	総合地球環境学研究所		
35	河野史郎	いであ(株)	○	

36	遠藤貴洋	応用力学研究所		

日本海及び日本周辺海域の海況モニタリングと波浪計測に関する研究集会

水産大学校海洋生産管理学科　滝川哲太郎

2009 年 12 月 17 日から 18 日にかけて九州大学応用力学研究所において,「日本海及び日本周辺海域の海況モニタリングと波浪計測に関する研究集会」が開催された．来年度まで,「日本海沿岸域における海況モニタリングと波浪計測に関する研究集会」が行われてきた．今年度から，日本海の諸現象だけでなく，それに類似した様々な海域での海洋現象にも着目し，日本海の海況・波浪のさらなる理解を目指すために，本研究集会が新たに開催されることになった．大学および試験研究機関を中心に 34 名が参加し，合計 10 題の講演があった (プログラム参照)．

気象庁の石崎氏は，海洋データ同化モデルを用い，中規模渦や黒潮変動に伴う沿岸水位の変化を十分予測することが可能であることを示した．弘前大学の力石氏は，アリューシャン低気圧の位置とオホーツク海での海氷面積・北日本での積雪の関係を示した．北海道中央水産試験場の西田氏らは，2008 年春季の北海道西岸の対馬暖流流量が平年と比べ少ないことを示した．さらに，衛星海面高度データを用い，亜寒帯循環域の海面高度の上昇が北海道西岸の流量低下に影響していることを示唆した．総合地球環境学研究所の中田氏らは，対馬暖流沿岸分枝流域中層で，4 月から 10 月にかけて水温が低下すること示した．数値モデルを用い，対馬暖流流路での複雑な地形変化が，沿岸域で湧昇を引き起こしていることを説明した．九州大学の三城氏らは，博多ー釜山間を往復するフェリー「かめりあ」の ADCP データを用い，夏季の釜山沖で南西流が観測され，10～20 日で変動していることを示した．水産大学校の滝川らは，かめりあ ADCP データを用い，対馬東部に発生する反時計回り渦の変動特性，水平シア流と渦運動エネルギーとの関係を示した．名古屋大学の森本氏らは，対馬海峡の水温と栄養塩プロファイルの相関を示した．この関係を用いて，対馬海峡を通過する栄養塩輸送量の経年変動を見積もった．九州大学の吉川氏らは，東シナ海に係留した ADCP データを用い，海底エクマン境界層のらせん構造を検出した．この結果を用い，海底付近の鉛直粘性係数を見積もった．九州大学の福留氏らは，台湾海峡往復フェリーによる ADCP 観測資料を用い，台湾海峡通過流量を見積もり，20 日程度の流量変動を示した．また，台湾海峡と対馬海峡の通過流量から，黒潮域から東シナ海への流量を見積もった．九州大学の増田氏は，主成分解析と特異値分解の解釈について議論した．

このように，観測データに基づいたモニタリングや他の様々な手法によって行われた日本周辺海域の海況に関する研究発表があった．今後とも，日本周辺海域の海況・波浪の研究に携わっている研究者が集まり，活発な議論を行う場となることを期待する．最後に，本研究集会の開催を承諾して頂いた九州大学応用力学研究所，集会を開催するにあたりお世話して頂いた東アジア海洋大気環境研究センター・海洋力学分野の増田章教授をはじめとする諸氏に感謝する．

プログラム

日時： 平成 21 年 12 月 17 日 (木)〜18 日 (金)
場所： 東アジア海洋大気環境研究センター棟 6 階多目的交流室 (W601 号室)

12 月 17 日 (木)

13:30-13:40 趣旨説明
滝川哲太郎 (水大校)

13:40-14:10 沿岸潮位変動の監視における海洋解析システムの利用
石崎士郎 (気象庁海洋気象情報室)

14:10-14:40 冬期のオホーツク海の海況と海氷面積の変動
力石國男 (弘前大理工)

14:40-15:10 北海道西岸における対馬暖流流量の低下現象
西田芳則・田中伊織 (道中央水試)

15:10-15:30 休憩

15:30-16:00 沿岸分枝流域において観測された湧昇流の支配的要因
中田聡史 (総合地球研)・広瀬直毅 (九大応力研)

16:00-16:30 韓国・釜山沿岸に現れる夏季の小規模変動
三城希雄志 (九大院総理工)・尹宗煥・福留研一 (九大応力研)

16:30-17:00 対馬東部における反時計回り渦ーフェリー ADCP 解析結果からー
滝川哲太郎 (水大校)・鬼塚剛 (水研セ中央水研)・福留研一・尹宗煥 (九大応力研)・
森本昭彦 (名大水循環セ)

12 月 18 日 (金)

09:30-10:00 対馬海峡を通過する DIN 輸送量の経年変動
森本昭彦 (名大水循環セ)・後藤暁 (名大院環境)・千手智晴 (九大応力研)・鬼塚剛 (水研セ中央水研)・
滝川哲太郎 (水大校)・渡邉敦 (東工大院理工)

10:00-10:30 東シナ海海底境界層における流動構造の観測
吉川裕・松野健・遠藤貴洋 (九大応力研)・吉村浩・森井康宏 (長崎大水産)

10:30-11:00 フェリーによる ADCP 観測から見積られた台湾海峡の通過流量
福留研一・松野健・市川香 (九大応力研)・Cho-Teng Liu・Po-Feng Chen(国立台湾大)・
Hsien-Wen Chen(台湾中央警察大)

11:00-11:30 仮題: 主軸変換・特異値分解と主成分・正準相関解析
増田章 (九大応力研)

11:30-12:00 総合討論

参加者

	氏　名	所　属
1	竹内謙介	
2	田中伊織	北海道中央水産試験場
3	西田芳則	北海道中央水産試験場
4	光易　恒	
5	柳尾茂文	九大・総理工
6	藤井智史	琉球大学・工学部
7	岩松伸宏	朝日航洋（株）
8	勝呂一彦	３Ｓオーシャンネットワーク
9	高橋大介	名古屋大学
10	灘井章嗣	情報通信研究機構
11	遠藤貴洋	応用力学研究所
12	石崎士郎	気象庁
13	辻　俊宏	石川県水産総合研究所
14	江淵直人	北大・低温研
15	河野史郎	いであ（株）
16	滝川哲太郎	水産大学校
17	坪野考樹	電力中央研究所
18	久木幸治	琉球大学・理学部
19	吉川　裕	応用力学研究所
20	増田　章	応用力学研究所
21	井手喜彦	応用力学研究所
22	福留研一	応用力学研究所
23	丸林賢次	応用力学研究所
24	力石国男	弘前大学・理工学部
25	高山勝巳	日水研
26	森本昭彦	名大・地球水循環研究センター
27	服部友則	海上保安庁・海洋情報部
28	広瀬直毅	応用力学研究所
29	松野　健	応用力学研究所
30	三城希雄志	九大・総理工
31	千手智晴	応用力学研究所
32	市川　香	応用力学研究所
34	中田聡史	総合地球環境学研究所

九州大学応用力学研究所共同研究集会
「日本における里海概念の共有と深化」

研究代表者：鹿熊信一郎（沖縄県）
所内世話人：柳　哲雄

日時：2009年10月9日（金）9:30-18:00
場所：九州大学応用力学研究所W601号室

座長　柳　哲雄（九大・応力研）
9:30-10:00　鹿熊信一郎（沖縄県）「趣旨説明と沖縄の里海イノー」
10:00-10:30　上村真仁（WWFサンゴ礁保護研究センター）石垣島白保コミュニティによる里海の再生～伝統漁具“海垣”の復元とサンゴ礁保全～」
10:30-11:00　足利由紀子（水辺に遊ぶ会）「豊前海・中津干潟里海里浜活動」
11:00-11:30　神田　優（黒潮実感センター）「海の中の森づくり」
11:30-12:00　松田泰明（雄島漁協・米が脇支所）「漁師と友だち」活動

12:00-13:00　昼食

座長　松田　治（瀬戸内海研究会議）
13:00-13:30　金満智男（東京湾に打瀬船を復活させる協議会）「市民との協働による東京湾の里海復活」
13:30-14:00　乾　政秀（水土舎）「漁業者による地先生態系保全の活動と里海概念への接近－青森県尻屋地区に学ぶ－」
14:00-14:30　中島　満（まな出版企画）「うつりゆくこそ里の海なれ―里海とローカルルール」
14:30-15:00　新井章吾（海藻研究所）「植物生態学的視点から見た里海とその管理技術」

15:00-15:30　休憩

座長　鹿熊信一郎（沖縄県）
15:30-16:00　印南敏秀（愛知大学）「モク（水草・海草・海藻）と里海」
16:00-16:30　瀬戸山玄（ドキュメンタリスト）「雑魚と地域経済」
16:30-17:00　松田　治（瀬戸内海研究会議）「里山・里海SGA」
17:00-17:30　柳　哲雄（九大・応力研）「人手と生物多様性」

17:30-18:00　総合討論（座長：鹿熊信一郎・柳　哲雄）

18:00-20:00　懇親会

趣旨説明と沖縄の里海イノー

鹿熊信一郎（沖縄県）

キーワード：開催趣旨・沖縄・イノー・コモンズ

1．趣旨説明

最近、日本各地で里海創生活動が盛んになっている。環境省は平成20年度から里海創生支援事業を開始し、水産庁も平成21年度から環境・生態系保全活動支援事業を開始した。この事業は、漁業者が主体となる藻場・干潟・サンゴ礁などの保全事業である。21世紀環境立国宣言、生物多様性国家戦略、海洋基本計画、水産白書などでも里海が取り上げられている。

海外でもアメリカ・EU・タイなど一部の地域でSato-umi造りが始まっている。2008年に上海で開かれた第8回世界閉鎖性海域環境保全会議では、最終日にSato-umiという言葉の入った宣言が決議された。また、国連大学はSato-yama Sato-umiをテーマとしてサブグローバル・アセスメントを実施している。

このように、里海（Sato-umi）という言葉は頻繁に使われるようになり、里海に関する書籍も出版されている（瀬戸山 2003；柳 2007；中島 2008等）。だが、里海の定義は地域・人によりまちまちで、何を指して里海と呼ぶのか？ 里海創生にはどのような活動が必要なのか？ などの共通理解は得られていない。

そこで、本研究集会では、日本各地で里海造りに関わっている関係者が集合し、議論することで、どのようなものを里海と考えているのか、どのような活動が里海創生に繋がるか、海洋環境・生態系を保全しつつ漁業などの持続的利用を行うにはどうするべきか、等を明らかにする。また、様々な意見のある「里海が生物多様性を高くできるかどうか」についても議論したい。

2．沖縄の里海イノー

沖縄には、本土とは異なったイノーと呼ばれるサンゴ礁の海がある。イノーとは、波が砕ける沖側の礁嶺と岸の間にある、浅い静穏な礁池のことで、栄養塩濃度は低いが生産力は高い海である。

古くより沖縄では、沖合は専業の漁業者が利用し、地先のイノーは村落の人々が、半農半漁の生活の中で、コモンズとして水産資源を利用してきた（玉野井 1995）。現在でも、特に離島部では、このようなコモンズ的利用が行われている。ところが、シャコガイ、サザエ、タコ、ウニ、ヒトエグサ等の定着性資源は、共同漁業権の対象となっていることが多いため、原則として漁協の組合員に採捕の権利がある。このためイノーでは、慣習と漁業権制度の関係が複雑になっている。上田（**2006**）は、沖縄には「海はみんなのもの」という共同体意識が存在し、「漁業者が漁業権に基づいて利用する海と、地元住民が地域の海を慣行使用する住民の海の2つが同時に存在する曖昧さが生じている」としている。沖縄の里海を考えるには、このような曖昧さがあることを前提としなければならない。

私は、日本において里海を議論する限りにおいては、「里海が生物多様性を高くできるかどうか」は、それほど重要ではないと考えている。強いて定義するなら、沖縄の里海は「人々が、サンゴ礁と密接に上手に関わっている海」としたい。これなら、昔のイノーは里海と言える。ただ、現在、イノーでの漁獲量は急激に減少しており、サンゴ群集も急速に失われている。「人々がイノーと上手につきあっている」とは、とても言えない状況にある。このため、里海をテーマとし、昔のつきあいかたも参考にしながら、なんとかイノーの水産資源とサンゴ礁を回復させる道を探せないかと考えている。関連する事例として、沖縄の八重山地域では、現在、日本最大のサンゴ礁海域である石西礁湖の自然再生事業や、MPA（海洋保護区）による水産資源管理が取組まれている。

海外では、漁業と生物多様性を対立の構図でとらえる動きもある。サンゴ礁保全では、漁業が悪者と見なされることも多い。このような場合には、「人手をかけることで生物多様性が高くなる」ことは重要な意味をもつ。沖縄では、石干見（魚垣）の建造や、砂質海域におけるモズク養殖・サンゴ養殖などが行われている。これらのケースでは、人手をかけることで生物多様性が高くなっていると考えることができる。このような事例を数多く探し、アジア太平洋では、サンゴ礁海域の資源を持続的に利用しながら、同時に生物多様性・サンゴ礁生態系を保全していくことが重要であることを示す必要もあるだろう。

参考文献

中島　満（2008）「里海」って何だろう？ －沿岸域の利用とローカルルールの活用－．東京水産振興会，75頁．

瀬戸山玄（2003）里海に暮らす．岩波書店，　東京，　218頁．

玉野井芳郎（1995）コモンズとしての海，中村尚司・鶴見良行編：コモンズの海，学陽書房，1－10．

上田不二夫（2006）第3章海面利用と漁業権，地域の自立シマの力（下），沖縄大学地域研究叢書7．198-224．

柳　哲雄（2007）里海論．恒星社厚生閣，東京，104頁．

石垣島白保コミュニティによる里海の再生

～伝統漁具“海垣”の復元とサンゴ礁保全～

上村　真仁
（WWFサンゴ礁保護研究センター）

キーワード：サンゴ礁文化・サンゴ礁保全・コミュニティ・海垣（石干見）

1．はじめに

琉球列島に連なる八重山諸島の主島である石垣島。その東海岸に位置する白保集落は、12㎞におよぶサンゴ礁に面している。その暮らしは、イノーを中心とした豊富な海産資源を多様に利用するサンゴ礁文化圏に属している（魚垣の会、1988）。

半農半漁の自給自足に近い暮らしは環境負荷も少なく、自然の再生力は充分あり、人の利用が生物多様性を大きく損なうことは無かった。琉球王府から与えられた村の共有財産である海には、里海と呼べる持続可能な人と海の関係があった。しかし、戦後・復帰後の近代化、近年の本土化などは、人々と海との関わりを希薄化させており、環境負荷が増大し「魚湧く海」と呼ばれた生物多様性の豊かさにかげりが見られるようになっている。

本稿では、歴史的な人と海との関わりに学びながら、サンゴ礁環境の保全と伝統文化の継承、地域の活性化に取り組む白保コミュニティの活動を紹介する。

2．“白保村ゆらてぃく憲章”とサンゴ礁保全

2006年白保自治公民館総会で、村づくりの目標と7つの基本方針を定めた“白保村ゆらてぃく憲章”が制定された（上村、2009）。基本方針の一つに“世界一のサンゴ礁環境を守り、自然に根ざした暮らしを営みます”が掲げられ、村を挙げて地先の海の生物多様性保全と持続的な資源管理に取り組むこととなった。

人口約1,600人の白保は、新石垣空港建設に伴う賛否が地域を二分する悲しい時代があったが、概して地縁・血縁の絆の強い集落である。しかし、口承による村の規範の維持や文化の伝承が困難となってきたことから、次世代に守り、受け継ぐものを村人が共有し、団結して取り組むために憲章が作られた。地域関係者の合意に基づくものとなるよう、中学生以上の全住民への意向調査などを行い、地域住民が主体となり議論を重ねている。

3．“白保魚湧く海保全協議会”による里海の再生

白保で、地域コミュニティによるサンゴ礁保全と資源再生の中心を担うのが、2005年に設立した“白保魚湧く海保全協議会”である。白保サンゴ礁を白保の共有財産と位置づけ、漁業者や観光事業者に加え、農業者や畜産農家など多様な村人が参加・協働し、その保全と持続的な利用による地域活性化に取り組んでいる。

2006年、“サンゴ礁観光事業者の自主ルール”と“白保へお越しの皆様へ（観光マナー集）”を取りまとめ、伝統的な定置漁具「海垣（石干見）」を復元（上村、2007）した。2007年、農地からの赤土流出を防止するために畑の周囲に月桃を植える活動をスタートした。この年、協議会は、公民館の傘下団体となっている。2009年には、資源増殖に着手し、7,000個のギーラ（ヒメジャコ）の稚貝を放流した。現在、放流海域を中心に禁漁区を設置し、他の生物の資源増殖につなげる協議を行っている。また、白保を訪れる研究者と協力し“研究者のルール”の策定を進めている。

4．世界海垣（石干見）サミットに向けて

白保魚湧く海保全協議会では、2010年CBD-COP10（第10回生物多様性条約締約国会議）にあわせ、世界海垣サミットを開催する計画である。これまで、第一回日本石干見サミットin長洲が2008年3月大分県宇佐市長洲、第二回日本すけ漁（石干見）サミットin富江が今年5月に長崎県五島市富江町で開催された。

白保で海垣復元の前より続けている環境調査では、海垣周辺部での貝類や魚類の生息数の増加が確認されている（WWFJ、2009）。海垣の復元やギーラの放流など、コミュニティの積極的な関与が沿岸部の生物多様性の維持・向上につながる事例として注目したい。

世界サミットでは、暮らしと海の関わりの深い地域を繋ぐ、「里海ネットワーク」の構築が期待される。

参考文献

魚垣の会（1988）サンゴ礁文化圏の自然生活誌
－八重山白保部落のイノーと暮らし．トヨタ財団

上村真仁（2007）石垣島白保「垣」再生－住民主体のサンゴ礁保全に向けて－．地域研究，3，175-188.

上村真仁（2009）白保村ゆらてぃく憲章に基づく村づくりの推進について．石垣市公民館研究大会，平成20年度，9-15.

WWFJ（2009）海垣復元に関する環境調査報告書

白保魚湧く海保全協議会ﾎｰﾑﾍﾟｰｼﾞ　http://www.sa-bu.com/

豊前海・中津干潟里海里浜活動

足利　由紀子
（ＮＰＯ法人水辺に遊ぶ会　理事長）

１．はじめに

福岡県豊前市から大分県の国東半島のつけ根まで、周防灘に断続的に続く豊前海干潟。そのほぼ中央、中津市沿岸の総延長約10km、沖合3km、面積1345haの干潟を私たちは中津干潟と呼ぶ。その規模や現存する環境が国内屈指の干潟であることが知られるようになったのは、ごく最近のことである。

この沿岸に住む人々は、縄文時代には河口で巻き貝を拾い、遠浅の干潟で二枚貝や魚を捕って糧とし、弥生時代には稲作の傍ら、網を使った漁や、蛸壷漁などを盛んに行っていた。戦後の食糧難を支えたのもこの豊かな海だった。春と秋の浜遠足、ザルを片手に夕飯のおかずを捕る人、風呂の焚き付けに松葉や流木を拾い集める子どもたちの姿…。十数年前まで、海と人は仲良くくらしてきた。ところが時代が豊になるにつれ、人々の足は遠のき、いつの間にか海と浜は忘れられた存在になり、人気がなくゴミが捨てられた海岸は「行ってはいけない」「必要ないから埋めてしまえ」と言われる存在となった。私たちの先祖が大切につきあってきた自然を見つめ直し、海と人の未来を地域の人々と考える必要があるのではないか。「海と人の心の距離」をもっと近くしよう、という思いを込めて里海里浜活動を実施している。

２．水辺に遊ぶ会が展開する活動

設立より11年、活動は多岐に渡る。主な活動を以下にあげる。

・自然観察会をはじめとする行事の企画、運営による啓発活動
・生物や環境を対象とした調査研究活動
・海岸清掃と海岸漂着物調査
・学校や社会教育の場での環境学習のサポート
・海と浜を中心とした民俗学調査
・漁業体験活動
・中津干潟周辺の海岸事業に対する合意形成会議

なかでも調査研究活動や漁業体験活動は高い評価を得ている。過去、研究機関等による調査がほとんどなされてこなかった中津干潟に対し、各方面の研究者の協力を得ることで、市民の手により学術的に通用する調査を継続して実施。その情報を管理、発信することにより、中津干潟に対する認識が飛躍的に高まったと共に、地域に「市民の科学」の裾野を広げつつある。また、地元の産業であり、干潟と密接な関係を持つ漁業に対する理解と漁業者との交流を図る目的で漁業体験を5年前に開始。単なる体験ではなく、歴史的な背景や文化的要素を取り入れたオリジナリティあふれた活動は各方面より注目を集めている。地先の環境の保全に対する漁業者との相互理解や協働を見据えての活動であることを念頭において実施している。

３．「ササヒビ」復活の取り組み

中津干潟では昭和40年頃まで「ササヒビ漁」が行われていた。干潟面に数百メートルに渡り生け垣状に竹を設置し、干満を利用して魚を捕る定置網の一種である。往時は十数基のヒビが干潟に立ち、これに携わる漁業者はヒビにかかる魚を市場に卸したり、雑魚を集落の中で売り歩くことで生業としていたという。ヒビ周辺にはアサリやハマグリなどの二枚貝をはじめ、エビやカニなど多様な生きものが数多く見られ、地域の子どもたちはこれらを集めることで小遣い稼ぎをしたとも聞く。ヒビは魚を捕る施設であるばかりか、生物多様性を促す機能も果たしていたのである。また、設置に当たっては漁業者が里山に赴き地主と交渉、山仕事や農業を生業とする人々が竹を切り出し提供するという、海と山のメットワークが形成されていたことに加え、ササヒビ一基あたり数万本の竹を利用することにより、山での竹の繁茂を抑制する効果があったのではないかと推測される。まさに適度に人の手を加えることにより生産の場の環境が良好に保たれていた里海里浜、更には里山の良い例だと考え、復元への提案を行ってきた。

2008年、漁業者と行政とＮＰＯの協働事業という形でササヒビの復元が行われた。劣化の傾向にある干潟漁場の機能向上、二枚貝の幼生の沈着促進、生物多様性の創出、伝統漁業に触れることによる子どもたちに対する環境教育、里山で問題となっている竹の再利用などを目的とした。5年間の設置期間の間、モニタリング調査や体験漁業などを実施する計画に沿い、現在活動を続けているが、ブルーツーリズムなどの新しい漁業の仕組み作り、漁業者と市民がともに考える沿岸域の保全、など、様々なテーマについてもササヒビをテーマに今後の課題として取り組んでいく必要があると考えている。

海の中の森づくり

神田　優
(NPO法人黒潮実感センター)
キーワード：磯焼け・藻場・アオリイカ・ダイバー

1．海を耕す

高知県西南端にある柏島は、周囲4kmにも満たない小さな島だが、小笠原や沖縄をしのぎ日本一の一千種以上の魚類が生息することで、全国屈指のダイビングポイントとなっている。

NPO法人黒潮実感センターは柏島を「島がまるごと博物館」と捉え、この地に持続可能な里海のモデルを作ろうと活動を続けている。「人が海からの豊かな恵みを一方的に享受するだけでなく、人もまた海を耕し、育み、守る」これが我々が提唱している里海の概念である。今回はその「海を耕す」一例としてのアオリイカの人工産卵床の設置事業について紹介する。

近年柏島ではアオリイカ（モイカ）の漁獲が落ち込んでいた。モイカのモは海藻の藻を意味し、春先ホンダワラなどの大型海藻に産卵にやってくるが、ここ数年磯焼けによって藻場が著しく減少している。産卵場所の不足に伴うモイカ資源の減少を解消しようと、我々はダイバー、漁業者、林業関係者、子ども達、行政、NPOといった多様な主体が協働で行うモイカの増殖産卵床設置事業を実施している。

漁師の知恵でシバ漬け漁というのがある。山からとってきたシバ（木の小枝）を束ね、それに石をくくりつけ海中に投入するとそこにモイカが産卵するというものだ。今回、漁業者とダイバーが人工林に行き、林業関係者によって間伐されたスギやヒノキの枝葉を貰ってきて、両者で産卵床を制作した。これまでの石をくくりつけて放り込む方式とは異なり、ダイバーが海底に鉄棒を打ち込み、それに産卵床をくくりつけ固定する方法を考案した。これまでの石をつけて放り込むだけの方法では波や潮流によりシバが流されたり、シバが動くたびに卵嚢（卵の房、一房に7-8個の卵が入っている）がちぎれたりしていた。今回の固定式を採用することでこれらの問題はクリアされた。この場合コストは確かに掛かるけれども元々競合関係にあったダイバーと漁業者が協働して作業することに意義がある。さらに我々は長年柏島でフィールド調査をしてきた研究者としての立場から、もっとも効果的な場所を割り出しそこに設置した。一つのシバあたり数十から数百の卵嚢が産み込まれれば成功という中にあって、今回の方式では数千から一万五千房の卵嚢が産み込まれ、全国一の成果をあげることができた。こうして得られた成果は水中ビデオで撮影し、黒潮実感センター主催の里海セミナーで漁業者やダイバー、地元住民に還元している。視覚に訴えることでその効果を実感しやすくした。

2．子どもを核に

「山川海のつながり」学習の一環として、宮城県の畠山重篤さんが、“森は海の恋人”というメッセージと共に、漁師や子ども達が山に広葉樹を植える活動を全国的に展開されている。この活動をもう一歩前進させ実感を伴った学習にしたいと考え、産卵床設置事業を始めて3年目、地元柏島の海の子ども達と近隣の三原村の山の子ども達を対象にこの事業を子供たちの環境学習の一環として行った。山川海のつながり学習の一環として、海と山の子供たちが一緒になって人工林に行き間伐体験をする。その中で間伐することの意義や山、特に森の果たす役割を学ぶ。豊かな森を育むことにより、川を伝い栄養塩が海に供給され、豊かな海が育まれる。しかしその過程は直接的には目に触れることが難しい。つまり、豊かな森から供給される栄養塩やそれを使って増殖する植物プランクトン、それを食べる動物プランクトンは目に見えにくい。動物プランクトンを食べる小魚になって初めて肉眼で確認できる。そうすると、栄養段階にして4段階進まないと森と海の結びつきが実感できない。子供たちが山で間伐する大切さを学び、山で不要になった間伐材の枝葉を再利用して海に持ってくると、海が豊かになるということでできたのが、一見すると「海の中の森」のように見えるモイカの増殖産卵床である。その成果は海中映像を元に学校での戻し学習として還元している。

この取り組みによって本来関係が薄かった様々な業種の人々（林業関係者と漁業者、ダイビング業者）が子ども達を中心にすえることによってつながり、また山で不要になった間伐材の枝葉を利用する事でモイカが増えるといった「山・川・海」のつながりが実感できる事につながった。

3．西洋医学と東洋医学的処方箋

モイカの産卵床設置の取り組みは、モイカを増やすという意味で効果が現れやすいものでありイカが獲れないという「痛みを取り除く」と言う意味では西洋医学的な処方箋である。しかし磯焼けによる藻場の消失を回復するものではない。現在同時進行的に藻場再生の研究にも取り組んでいる。藻場の再生といったもともと海の持っている自然治癒力を高めることは時間がかかり、すぐ成果は出にくいかもしれない。じわじわ効果を発揮するという意味では、漢方的な、あるいは東洋医学的な処方箋というふうに考えている。現在この二つの処方箋を使い、様々な主体と一緒になって海の中の森づくりを進めている。

「漁師と友だち」活動

松田泰明（雄島漁協・米ヶ脇支所）

キーワード：漁師、漁業権

1．はじめに

雄島漁協のある福井県坂井市三国町は、北陸の味覚を代表する冬の越前ガニや奇勝地・東尋坊が有名であり、町は九頭竜川河口のサンセットビーチから越前加賀国定公園となる風光明美なリアス式海岸の越前松島に連なるエリアに位置し、関西・中京方面を中心に四季を通じて多くの観光客が訪れる人気の観光の町です。

特に、全国的にも希少な存在となっている海女漁は、春の岩海苔採りから始まり、初夏のワカメ漁、盛夏のウニ・サザエ漁と続く水産物は地元の旅館や民宿の需要を満たすほか、昔から高級贈答品として三国町の名産品として使われています。つまり、観光を支える漁業が盛んなの漁業の町です。

2．太古からつらなる里海　崩壊の危機

潜海漁業者（海女）の高齢化による急激な減少と後継者の枯渇により、数千年続いているであろう「人手を加える」という作業がおろそかになり、「里海」の体をなすことができなくなりはじめ、生態系の変化や生産性の低下など、里海としての様相が変化しはじめています。

また、漁業者自身の「里海の現状」への認識、意識は生産性の低下や生態系の変化など問題点に直面するものの、ある程度の水揚げ（個人の水揚げ）があることや後継者がいないこと、密猟問題など漁業行政への不満などから、排他的な行動傾向があり、特に里海エリアを漁場とする潜海漁業者（海女）に強く表れています。

後継者がいないのであれば、いないなりの手法で、自らが活動し「里海」の典型的なモデル足りえる「誇りの海」をなんとかこのままの状態で将来残すこと、伝えていくことを考えてもらえるような活動が急がれます。

めんめんと守られてきた里海からの恩恵を享受するだけではなく、その海を守り・伝える責任や役割を現役の海女をはじめとする漁業者はもちろん、地域の人たちの理解と協力を得ながら活動をすすめることが私たちの役割であるとかんがえます。

3．漁業者の現状

雄島漁協には多くの漁師や海女が漁で生活していますが、時代とともに水揚げが少なくなり、水産物の価格も低迷する環境の中、専業での生活維持が困難になり、後継者も少なく高齢化の一途をたどっています。老いた漁師や海女はサラリーマンと違い、定年も退職金も有りません。

また、「まだまだ働きたい」「今の国民年金制度では不安だ」等の多くの声を聞くものの、海の仕事は高齢の漁師や海女にはとても厳しいものであり、体を壊せば生活の保障もありません。

しかし、ここで何十年も海に出た経験は貴重な日本の財産です。その財産を次世代に受け継げる場所を考え、高齢化した漁師が生きがいを持って働ける場所・機会をつくることが漁師と友だちの最も大きな目的です。

4．漁業者が自ら展開する漁村と漁業者の活性化活動

そこで暮らす漁師や海女が主体となり、単に里海の保護を訴えるのではなく、「継続できる活動」に責任を持ち、海を守り、人間が生活し、自然が守られ、お互いが共存できる海を守るために、漁師や海女の力を増幅する組織づくり、行動が、多くの人々が豊かになれる海を守れる活動であると信じています。

また、これから必要とされる環境教育のフィールドと指導者を持った組織として、しっかりした基盤の組織体系の整備と継続できる漁業体験活動の事業化を図っていきたい。そのために漁業者を主体に据えることで、地域の人たちと参加者との共生を図り、マリンスポーツ愛好家や地元観光業者、教育ボランティアなどを始めとした各種関係団体等と一体となった、環境教育、自然体験活動としての漁業体験、魚食普及・食育の要素を組み込んだプログラムづくりと実施のためのメンバー確保やグループづくりなど漁業者が、自然体験活動の指導者として活躍できる教育プログラムや課外学級としての運営プランとその実践を始め、事業としての採算性、集客や活動紹介のための広報手段など、総合的な力をつけるための活動を目指します。

市民との協働による東京湾の里海復活

金萬 智男
（「東京湾に打瀬船を復活させる協議会」発起人）

1．はじめに

東京湾の環境保全等を目的として漁業者を中心で設立したのがNPO法人盤州里海の会で、漁業者を中心に市民を巻き込んだ活動を展開してきた。

千葉県木更津市は、東京湾岸に位置する人口約 12 万 4,000 人の市である。平成 9 年には、東京湾を横断し木更津と川崎をわずか 15Km で結ぶ東京湾アクアラインも完成している。東京湾アクアラインの着岸地に盤洲干潟が広がり、多くの漁師が海苔養殖・アサリ・バカガイの採貝等で生計を立てている。

漁業センサスによると、平成 15 年の漁業経営体数は 723 経営体で、専業漁家と兼業漁家の内、漁業が主となっているものは約 80%である。

市内には 6 漁協があるが、金田漁協は市内の漁業経営体の約 58%を占めており最も規模が大きい。しかし、近年はカイヤドリウミグモがアサリに寄生し、漁はバカガイ中心に移行中と共に、漁から離れる漁業者が多くなっている。

2．NPO設立の経緯

金田地区で海苔養殖業に従事していたが、ホームページで東京湾の紹介や海苔のＰＲを始めたことをきっかけで、ネットを通じて様々な人とのネットワークを広げていった。

やがて、東京湾で唯一で最大の砂質干潟である盤洲干潟で漁を営む漁業者自身が、干潟の作用、海産物の恩恵を受ける人々とともに、調査及び広報を通じ東京湾や干潟の環境保全活動をしていきたいという思いから、平成 16 年にＮＰＯ法人盤州里海の会を設立した。発起人は、干潟の海と共に生活をする 10 人の漁業や遊漁従事者である。

主な設立の趣旨は下記となる。

① 漁業者を中心とし、多くの市民とともにこの干潟の豊かさを調査・広報をして、誰でもが親しめるような環境保全活動をしていくこと。

② 近年はなくなってきた伝統の天日で干す海苔加工を中心に、人と自然の強い係わり合いを復活させ、経験豊かな老漁師に働いていただき、生きがいを見つけてもらい、それに伴う施設の建設・運営、または誘致を進めていくこと。また、その施設では多くの人が干潟の大切さを勉強でき体験できるプログラムを進めていくこと。

③ アサクサノリ・ハマグリ・アオギス・スナメリ等、かつての東京湾を代表する生物が、現在は絶滅（絶滅危惧種）となっている。その絶滅した生物達が再びこの東京湾で生息できるようにするにはどのようにしたら良いか、調査・勉強会等を行いながら再生を考え行動していくこと。

3．盤州里海の会の主な活動内容

- アサクサノリ復活プロジェクト（冬場）
- 親子の野外観察・干潟探検隊（四季４回）
- 大学と共に盤洲干潟・小櫃川河口干潟の生物等の調査・観察（随時）
- 江戸前の生物（ハマグリ・アオギス他）復活勉強会（随時）
- 源流の間伐材を利用した東京湾再生拠点の施設（海めぐりの里ビジターハウス）作り（年間）
- 海苔の天日干し加工方法の復活と次世代への継承（冬場）
- アジアの山岳民族の子供たちへの海藻（規格外海苔）ヨード支援、海から山への贈り物
- 干潟漁業から川を巡り源流の林業へのエコツーリズム（年１～２回）
- 東京湾の連携による、お台場海岸での海苔作り教育（冬場）

4．盤洲干潟保全委員会

今まで漁業組合で認知されなかったＮＰＯ活動だったが、数年間の活動実績を認められ、所属組合と里海の会で委員会を組織した。そして、全漁連の資金を得て干潟の漁獲保全活動を実施した。

【状況からの必要性】

現在、地先の盤洲干潟では、沿岸漁業の要でもあり東京湾の浄化作用に強く貢献しているアサリが、「カイヤドリウミグモ」の寄生により大量斃死しており、今後の干潟の漁業生産及び消費者に対する供給低下や干潟浄化機能低下も懸念されている。このウミグモの大繁殖は、生態系のバランスが崩れた事が要因と推測されている。

現在、捕食者（ウミグモの天敵）であるハゼ類やその他小魚の減少が要因の一つと考えられている。また、盤州干潟ではカ

ワウが数多く生息しており、そのため、干潟域のハゼなどがかなり減少していると推測される。

そこで、ハゼ類や小魚などの保護（避難場）、またアサリ稚貝などの沈着促進を目的に、逆さ竹林を設置する。逆さ竹林は独立行政法人水産大学校、・浜野龍夫准教授が発案した「逆さ竹林魚礁」をヒントに、盤州干潟にあったかたちで設置する。

【期待される生態系保全再生効果】

- アサリ幼生着低促進効果及びアサリ稚貝の保護
- 大型種の魚やカワウからの捕食に対して稚魚の保護
- 生態系保全のキーワードでもある海草（アマモ）の保護
- アサリ資源の乱獲防止効果、種場確保によって持続的漁業継続の促進
- 他の生き物（なまこ・アカニシ、エビ･カニ類等）の繁殖促進効果
- 竹林による夏季の干潟砂泥温の低下効果

5．ＮＰＯ活動の休止および「五大力舟ＬＬＰ」と「東京湾に打瀬船を復活させる協議会」の設立

周囲の人々の関心を集め、ネットワークを大きく広げてきたＮＰＯの活動であったが、平成 20 年に入って活動を休止する。その理由は、ＮＰＯの主体である漁業者にとって漁業環境の厳しい現実の中で、助成金のみで無給に近い活動を継続していくことに対して迷いが生じてきたことと、以前からの夢であった東京湾の木造大打瀬舟つくりを実行したいという思いがあったからである。

これまでのＮＰＯ活動を通して一緒に活動してきた東京・神奈川・千葉の環東京湾で活躍する人々に協力を要請し「東京湾に打瀬船を復活させる協議会」を設立した。また、里海の会のメンバーを中心に営利目的である「五大力船有限責任事業組合（ＬＬＰ）」を設立し事業展開中である。

下記は打瀬舟建造プロジェクトの趣旨を要約したものである。

- 豊穣で美しかった東京湾を慕い、それを目指し、係わりのある東京湾流域の市民に知って頂く為にも、見た目の美しいシンボルな打瀬漁の復活は必要である。
- 日本の伝統でもある木造船技術を有する舟大工は消えていくばかり。未来の舟大工を生む為にも今建造し、技法や知識・経験を記録し遺す事が重要である。
- 森林の保全は豊かな海を育む。健全な森林は保水力も高く、自然災害を防ぐ効果もある。木造で打瀬舟を作る事は、海の資源保護と森林の保全に役立つと信じる。
- 東京湾の藻場でも藻エビを獲る打瀬漁が繁栄していたが、高度成長期の埋め立てと共に９０％の干潟・藻場が消失し、この漁は衰退した。その藻場の再生保護も重要と考える。
- 高度な漁具を使わず、風などの自然エネルギーを利用する打瀬舟を復活させる事で、乱獲と言われる漁業も今一度見直され、豊穣な東京湾に戻る事を期待する。
- 子供たちを中心にした打瀬漁体験を実施する。その体験を通じて、森林・藻場干潟の問題や課題に対処するための、環境・海洋教育に役立つと信じる。

現在は「内閣府・地方の元気再生事業」に選択され建造に向け選定事業を実施中である。

「五大力船有限責任事業組合（ＬＬＰ）」は、地区の魚介類を利用した新しい商品開発を行う事業を主にする。五大力船とは、昭和初期まで活躍した廻船である。特に木更津河岸と江戸の日本橋河岸を海路としていた「木更津船」は有名である。これにより、木更津港が上総・安房の海上輸送の玄関口として繁栄したと言われている。その名にちなんで命名した。この名を使い、上総地域の活性化のひとつになる事業をおこなっていく。東京湾の産物のみを素材とした佃煮「江戸前でぃ！」の商品化、その他、里海の会で行ってきた漁業体験などの事業を営利を目的として実施する。

6．全国の漁師仲間で組織するＪｏｙＦ（エンジョイフィッシャーマン）設立中

ある環境フォーラムで一緒になった千葉・京都・福井の漁業者３名を中心に「儲かる楽しく漁業」を目指し、法人格の組織を立ち上げ中である。主な事業は、持続可能な漁村の構造解析、全国の漁村の活性化及び伝統漁業・先輩である漁業者の記録・伝承である。また、各地域海産物の広報・販路拡大等々を考案中である。

7．最後に

「里海」という言葉には、今ではこだわりはない。思うのは、各地方や地域により、歴史や海の管理等が異なる為にローカルな合意形成の中で、それぞれの「里海」が構築されるものだと思う。特に、人間の心情に関わる郷愁や営み、それらを連想させるのが「里海」と言う言葉だと感じる。それでも最低限のルールは、その地域の漁業者が生活を営めるだけの漁業資源が必要で、それを直接に関係の無い市民が共に共生し漁業資源以外の生き物・植物・景観を話し合え楽しむことが出来る場所だと信じる。

漁業者による地先生態系保全の活動と里海概念への接近
－青森県尻屋地区に学ぶ－

乾　政秀（株式会社　水土舎）

キーワード：人・生業・共生・二次的自然・総有・漁業権

1．里海の原体験

1975 年頃、苓北火電の関連で九州・天草の四季咲岬の海に潜った時のことである。発電所用地の埋立によって藻場が広範囲に消滅することから代替藻場を造成するため藻場の調査をしていた。

富岡の四季咲岬地先の海底はウニだらけで大型海藻は皆無、荒涼たる風景が続いていた。一方、隣接する発電所予定地の周辺にはクロメやホンダワラからなる藻場が広範囲に拡がっていた。一体この差は何なのか。大きな疑問が沸いた。

実は、四季咲岬周辺は 1970 年に海中公園に指定され、漁業活動が禁止され、いわば人の関与を許さない「聖域」となっていたのである。一方、海中公園区域以外の海域ではウニやアワビを採捕する漁業が営々として行われていた。藻場は大型海藻を食べるウニやアイゴ等の植食性動物による食圧とのバランスで維持されている。漁業活動（生業）を通じて植食性魚類を採取することが大型海藻への食圧を減少させ、藻場生態系を維持させているという理解に至ったのである。漁業という生業は藻場生態系を維持し、生物多様性を高めていたのに対し、「聖域」として生業を許さなかった海域の生物多様性は大きく失われていたのだ。わが国の沿岸は一部の例外を除き人が集落を形成した時から漁業が営まれ、共同漁業権が設定されている。人が関与するのがいわば常識であるから、人の関与を排除した海は極めて少なく、人の関与の重要性を認識する機会は少ない。四季咲岬の経験は、私が里海という概念を想起した原体験であった。

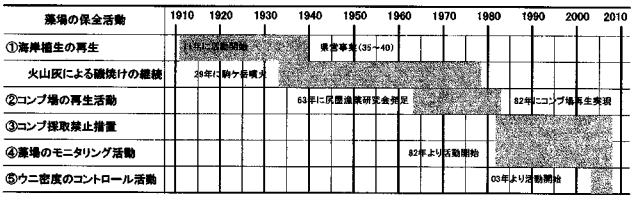
2．青森県尻屋の漁業者の活動

その後、漁業振興の仕事で全国各地の漁村を歩き、漁業者による環境保全の活動に関心をもってきた。ここでは、里海の概念への糸口として、青森県尻屋地区における漁業者の活動を紹介しておこう。

青森県尻屋地区は下北半島の尻屋崎に位置する漁家数38戸程の小さな漁村である。漁業が主産業で、漁港の整備が進むまでは僅か3km程度の海岸線からなる共同漁業権漁場からの水揚で生計を維持してきた。農地はほとんどなく、生産の拡大ができないことから昔から38戸の漁家数が保持されている。この地では約600年前と推定されるアワビの貝塚が近年発見されており、中世から今日に至るまでアワビを絶やすことなく漁獲してきた。

尻屋地区で行われてきた藻場の保全活動は、①荒廃した海岸植生（魚付林）の再生、②北海道駒ケ岳の噴火による火山灰で磯焼けになった海域の立縄式ロープによる藻場の再生、③コンブの採取禁止措置による藻場保全（拾いコンブのみの漁獲）、④藻場の継続的なモニタリング、⑤ウニ移殖による食圧の人為的コントロールなどである（図1）。特に北海道駒ケ岳の噴火によってもたらされた火山灰による磯焼け回復のために試行錯誤を繰り返し、立縄式ロープによって藻場を再生させた活動は特筆に値する。これらの環境生態系保全の活動は1911年以来約100年にわたって継続されてきた。

表1　100年に及ぶ尻屋地区の保全活動の歴史



このような活動を支えた背景は、①三余会の伝統（地域の哲学の存在）、②若い漁業者による事業の主導、③磯根資源の地域総有思想の徹底（利用規制）、④高い磯根資源への依存度、⑤外部の試験機関等との連携などが指摘できる。特に「余暇を利用して励め」という地域に根付いた三余会の哲学は、知的動物である人間にとって思想が如何に重要であるかを示している。

3．里山と里海

里山という造語は、薪炭・刈敷・ホダ木等の採取という人の生業によって利用されてきた生活圏の森林が、エネルギー転換・化学肥料の普及・輸入品の増加という社会経済変化から生業が断絶したことによって生態系が荒廃した結果、人による利用の重要性を再認識する象徴として生まれた。

里海の概念も同様である。漁業は狩猟産業であり、自然の生態系を構成する生物をありがたくいただく産業である。したがって、漁業の存立基盤は生態系の保全であり、生態系を支える環境の保全にある。工業にとって自然は克服すべき対象であるが、漁業にとって自然は共生の対象なのだ。つまり、漁業との共生の中で維持されてきた二次的自然が里海である。

沖の海では資源の先取り競争が繰り広げられたが、地先海域は集落の「総有」の資源として抑制された利用によって共生的利用が持続しており、利用が断絶した里山とは対照的な存在である。しかし、漁業者の減少と高齢化が急速に進むなかにあって、人による地先海域の利用は極めて危ない状況となっている。人々に警鐘を鳴らす象徴として「里海」の概念の普及が求められている。

うつりゆくこそ里の海なれ—里海とローカルルール

中島　満（フリーライター・まな出版企画）
キーワード：漁村の構造・海のコモンズ・漁業権・入会権・ローカルルール

1．はじめに

「里海」を考える視点あるいは定義は、大きく区分すると、ふたつの異なるアプローチを経て提起されているように思う。

一つは、沿岸海域における「生物多様性」あるいは「生態系」の望ましい状態の実現を軸においた論であり、「里海創生」活動や政策のよって立つ論拠となっている。簡潔に言い表せば「海」あるいは「海という自然」と生息する「生物」の生息環境の望ましい姿を追い求め、ヒトをその望ましい環境という循環の仕組みの中に位置づける考え方であろう。あえて言えば、海から「里海」を定義づける視点といいかえられるかもしれない。

もう一つは、沿岸域を生計の場としたり、その環境の恩恵で暮らすヒトの営みを軸において、ヒトと海という自然とのかかわりの望ましい状態を論じようとする考え方である。その状態は、ヒトと地域や国の営みの歴史の流れの中で、「海」という「自然領域」をどのように利用し、つきあっていくかという「価値」の選択のしかたで変化せざるを得ない性格を持っている。陸から「里海」を位置づける視点と言いかえられるかもしれない。

前者を論じる論者は、後者を従的な前提をおいて論じ、後者を論じる論者は前者を従的な条件において論じがちである。そのミゾをうずめ、総合をもとめて、ヒトと海との共存や、持続的な社会経済に組みなおそうというグローバルな準拠を加えた論議になっているとも思えるのだが、果たして、実態的な過不足をうずめる建設的な議論が行なわれているのだろうか。その検証は常になされなければならないのだと思う。

2．「海」ではなく、なぜ「里海」なのか。「漁村」ではなく、なぜ「里海」なのか？

私のスタンスは後者にあり、『「里海」って何だろう？』という小論のなかで、《「里海」ということばで表される沿岸域の利用が、これまで、漁業という産業としての利用（漁業的利用）や、漁業者を中心に海沿いに住む人々の生活に結びついた利用（慣習的利用）に加えて、地域外や漁業者以外の人びとによる利用（市民的利用）とが、漁業制度の枠組みを維持しながらも、「漁業」の定義を一歩踏み越えた解釈をしなければならなくなるような新しい海の利用の姿が、各地で起こり始めている》ということを指摘した。

かつて、沿岸域の漁業生産を規定する漁村の「複雑な構造」を、潮見俊孝は『漁村の構造』（１９５４）として著したが、現在の漁村は、この書で漁業権と地先海面の利用実態を類型化したムラの姿とは、大きく変貌してしまった。

海とヒトとのかかわりを論ずるとき、もはや「漁村」と地先の海の利用関係を示せばこと足りる時代ではなくなった。新しい海とヒトとの関係とは、どのような関係なのか、どのようなかかわりかたが望ましいのかを論ずるときの、「漁村」に替わって「里海」で言い表してみたらどうだろうか、と思うようになったわけがそこにある。「津々浦々」と表現される日本の海の利用実態は、漁村の数だけ多様な姿があるといわれたが、現在なら、多様な顔に変貌した地域の数だけ「里海」はあるということになるであろう。

3．大規模合併統合によって失われた地域性に対し、見えずらかったコミュニティーの核が復活してきたことに眼を向けよう

ヒトと海とのかかわりの望ましい状態ばかりが「里海」ではなく、自然環境破壊や共同体の崩壊によって変貌を遂げた、いわば「望ましくない」状態にある「里海」もまたたくさんあることに眼をそむけてはいけないのだと思う。

ただ、合併や統合という一見して地域性を失わせた施策により、地域の管理団体は大規模化した一方で、古い姿の「地域共同体」の人のつながりが復活してきたことにも注目する必要がある。合併後の大きな組織になった漁協では、もはや旧漁協・支所の地域と地先の海の利用ルールには関与できず、漁場行使実態は地域の決定に任せざるを得なくなる傾向がより強くなった側面を見落としてはならない。地域と地先の浜の管理については、昔がえりの意思決定のメカニズムが浮き出てきたのである。

このような沿岸域の地域実態の事例を追うことによって、漁業権と入会権の地域ルールの規範を前提とする「海のコモンズ」論の構築の方向性も見えてくるのだと思う。そして、海を市民にも「開放」する地域ルールづくりに必要な諸条件が見えてくるのである。

参考文献

中島満著『「里海」って何だろう？』(2008年、「水産振興」No.４８７号)：http://www.manabook.jp/satoumisiryou.htm

浜本幸生監修著『海の「守り人」論』(1996年、まな出版企画)

植物生態学的視点から見た里海とその管理技術

新井章吾
（海藻研究所・海中景観研究所）
キーワード：植物生態学・藻場・遷移・藻刈り・磯掃除

1．はじめに

里海とは、里山の対語として定義されるべきである。里山は、人の経済活動としての薪の採取、林業のための間伐、あるいは焼き畑などによって、植物群落の一部あるいは全部の遷移が低次の段階に戻され、遷移が進行する過程が繰り返されることで維持されている。極相群落では現存量が大きいが、遷移の初期から中期の群落では生産量が大きく、有用種を含む動植物の多様性が高くなる。

海の場合も同様であり、経済的に循環する活動の結果として、海草藻類の遷移が低次に戻され、遷移が進行する過程が人の手によって繰り返される藻場を里海として定義したい。これは植物生態学的視点から見た里海の狭義の解釈である。それらの経済活動に伴って形成されてきた漁場や漁村の景観などは、広義の里海として定義したいと考えている。

2．藻場の利用による里海

沿岸海域で化学肥料が普及する1950年代まで、日本各地で海草藻類が肥料とし採取されていた。中海においては2008年から、環境改善に取り組むNPOと一部の漁業者によって、肥料用の藻刈りがおよそ50年ぶりに再開された（図1-A)。それらの海藻は集水域の水田や畑の肥料として利用され、作物はブランド化され、販売されつつある。また、50年前まで少なくとも隠岐島と出雲地方では、極相のノコギリモクなどの群落が図1-Bの大きな鎌に竹竿を付けて11月に伐採され、ワカメを増殖していた。食用海藻であるアラメなどは船上あるいは潜水によって、鎌で茎が切られて採藻され、藻場にギャップ（藻冠のない場所）が形成さる。

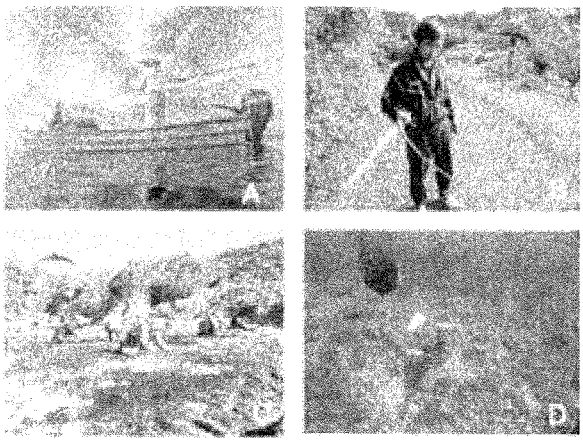


図1　藻場の利用による里海

図1-Cは日本海沿岸に多いイワノリの畑で、海苔島と呼ばれている。イワノリの生育水深帯にコンクリートを張り海苔島を造成し、毎年10月に藍藻などの雑藻を取り除くための磯掃除が行われている。ウニやトコブシを漁獲する目的で礫を反転させることによって、藻場の一部が遷移初期の裸面にされている。

以上のような活動の結果として、藻場にギャップが形成されると、藻場との境界付近に魚の幼稚魚が蝟集し、ギャップ内の光量が高くなることで珪藻や海藻の芽が生育するのでウニやアワビ類の幼稚仔の住み場が形成される副次的効果も認められる。

3．里海の管理技術の展望

里海としての藻場の管理技術は、1950年代までは各地で継承されてきたと思われるが、現在その技術は失われつつある。一方、この50年間に植物生態学はかなり発展してきていて、それらの知見によって過去の技術を体系化していくことで、効率的に里海の管理をすることが可能と考えられる。たとえば、隠岐の砂地海底において、極相を形成する大型多年生海藻を藻食魚に採食させ、1年生のアカモク幼体が堆砂で食害から守られることで、投石礁の実験区において（図2右)、2006年から4年間にわたってアカモクの群落が形成され、採藻されている。

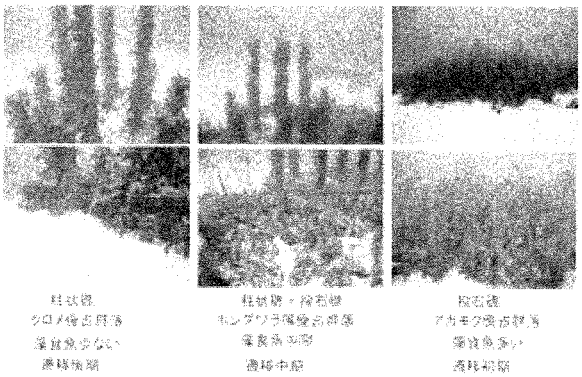


図2　隠岐において造成されたアカモクの畑（右）.

モク（水草・海草・海藻）と里海

印南　敏秀
（愛知大学・民俗学）
キーワード：モク・松・文化多様性

1．はじめに

ここでいう「モク（水草・海草・海藻）」とは、沿海域の藻場を形成する、泥砂地にはえるアマモや石岩場にはえるホンダワラ類などをさしている。モクは地方名称で、瀬戸内海ではモクよりもモバやモとよぶことが多い。

モクは、あまりにありふれた生物で、直接食料や食料加工品の原料にならないため、海産資源として注目されることはなかった。ところが第二次世界大戦後、内湾を中心とした浅海の埋立によって沿海域のモクがはえる藻場が急激に消滅した。その結果、海水汚染も進んで海産資源が激減し、モクの産卵場や稚魚育成場としての役割（ゆりかご）がみなおされた。

そのため自然系の人々が中心となり、生物の生産性や多様性が維持された里海に回復するため、藻場の人工的な造成がさかんに試みられるようになった。自然系にくらべて文化系のモクへの関心はうすく、いまだにモクや藻場についてふれたものは少ない。

たとえば伝統文化を研究する民俗学では、海産資源への関心は生業としての漁業にかたよっている。生活空間としての関心も非日常の儀礼が中心であり、儀礼空間としての浜に集中しているのである。

本稿では、生業と関わる漁業者だけでなく沿岸域に住む生活者にひろげ、非日常と日常がおりなす生活文化のなかで、モクを中心とした人と浅海との伝統的な関わりについてのべる。モクは、他の生物の生産性や多様性の維持に重要な役割をはたすほか、沿岸域に住む人々の生活文化の多様性にも寄与してきたのである。

2．文化の多様性

私のフィールドである瀬戸内海や三河湾は、生物の生産性と多様性が保たれた豊かな海で、人と海の長い歴史のなかで、モクの文化にも多様性がみられた。

モクは島嶼や内海沿岸部の採草地の乏しい農業経営には欠くことのできない大切な肥料だった。さらには肥料として利用しただけでなく、畑に植えたサツマイモの日よけ、崩落しやすい段々畑の保全と修理にも利用された。

海水を濃くして藻塩をつくるためや、一本釣の疑似餌にもモクの先端部が利用された。毎朝、海から海水をくんできて、モクの先につけ、海水を振りまいて家や屋敷を清めた。瀬戸内沿岸部を中心に発達した蒸気浴の石風呂では、熱い床にモクを敷いてから入り療養した。東北地方では寝具や敷物などの繊維素材としても利用したし、三河湾岸ではトイレットペーパーのかわりに使っていた。

地域で幅広く利用するため、モクの継続的な生産性を維持するため沿岸域の人々は共同で管理した。具体的には口明けをきめて一斉に採取した。口明けには村中が家族総出で採取したので、子供たちには祭りのように感じたという。

3．モクと松の類似性

浅海のモクは海中に茂るため、陸から見えないため注目されにくかった。それにくらべ松は「白砂青松」の沿岸の景観を代表し早くから注目されてきた。里山は人手をかけた雑木林で、農業や生活に必要な燃料や肥料などをそこからえていた。瀬戸内海や三河湾の沿岸域の里山は、アカマツやクロマツの松山が多かった。

松は幹が建築の用材などに利用されたほか、燃料としては落ち松葉を中心に利用してきた。毎年安定して松葉を採取するため、松の木は伐採しないよう地域で管理し、松葉は口明けをきめて一斉に採取して平等にわけた。松葉の採取の前には毎年下草を刈っていたので、松山は遷移せず維持できたのである。「青松」の景観は、沿岸域の人々が生活の必要から松を選び、手をかけて維持してきた景観なのである。

浅海のモクと沿岸域の松には類似性が多い。ともに、自然と文化をあわせた総合的な里海づくりを考える重要な生物であり、文化的に多様な手掛かりを残している。

参考文献

印南敏秀（20047）島の生活誌―くらし・交流・環境、山口県周防大島町

印南敏秀（2005～2007）瀬戸内海の民俗文化（1～6）『瀬戸内海』44～49号、瀬戸内海環境保全会議

雑魚と地域経済

瀬戸山　玄
（ドキュメンタリスト）
キーワード：雑魚・安全安心という普遍的価値・漁村の自立

１．はじめに

私は２００３年に『里海に暮らす』(岩波書店)を上梓しました。里海ということばも当時は、まだ一般的に使われるような状況にはなく、ごく一部の限られた研究者たちの間だけで用いられるに過ぎない状況だったと、あとになって知りました。本書では各地の海辺に暮らす人々の、気候風土や地域性との折り合いのつけ方を具体的に紹介しました。とりわけ生計をどう成立させるかは最重要なテーマであり、そこを軸にレポートしました。その過程でかつての農村における雑木林・里山のような、何かしら経済行為を補完する場所としての、身近な海辺や渚を里海として捉えていくと、地域密着の必然性のようなものが浮かび上がることに気づきました。たとえば宮城県唐桑町の木造船大工の棟梁は、唐桑半島の生活事情や沿岸漁の各スタイルをくまなく調べ上げた末の、こまやかな物づくりで一定程度の収入の毎年確保してきました。けれどその後、棟梁は大病を患い、半世紀近く続けて来た造船所を一昨年にやむなく閉めました。また、福島県いわき市でユニークな干物づくりを続ける水産加工業者の場合は、三年魚や二年魚の水揚げが減り続ける中で、早くから規格外れや商品価値の低い雑魚に付加価値をつけるため、工夫を尽くしてきました。まずは至近距離の地元港でだれよりもたくさん雑魚を買付けて、それを鮮度の良いうちに手間ひまかけた加工品にしあげることで、順調なビジネスを伸ばしてきました。けれど中国経済の大躍進によって、地元の主要漁港ではまず高級魚が手に入りづらくなりました。やがてそのしわ寄せは、雑魚のような商品価値の低い分野まで及ぶようになり、現在も原材料の値上がりがつづいています。それでも商品の値上げをせずに済むのは、地元の高齢者をベテランのスタッフとして雇う、地域密着型の加工場運営のおかげでした。

２．グローバリゼーションと里海

１９９０年代から各地で里海的な生活形態を順調に築いてきたかに見える彼らにも、２００５年頃から急激な環境変化が見られるようになりました。一つには、１３億人の人口を抱える中国の経済的な台頭があり、さらにもう一つは漁師の高齢化と燃料高騰が沿岸漁業の統廃合を押し進める結果になりました。福島県いわき地方を例にとりながら、そのありさまを追っていくといくつかのポイントが浮かびあがります。

まずは漁業者激減に伴う漁業組合の統廃合。また廃船にともなう漁業権の売買。それと漁港そのものを維持するために、水揚げ港と競り場所を分けるといった、効率の悪い運営を意図的に行うような事態まで生じています。今回はそのあたりの事情をより分かりやすく見せるために、先ほどの雑魚の干物で特産品に成功した水産加工業者の佐藤勝彦さんの苦労の変遷をくわしく解説していきます。また佐藤さんの物づくりにみられる、環境保全や地産地商の仕組みについても注目すべき内容があります。

産業廃棄物をださない物づくり・即ち養鶏用の飼料製造業者との連携。徹底した製造工程の非加熱化。手間ひまをしっかりかけた塩蔵品化作業。クール宅配便を利用した安全安心な直売方式。輸入魚の完全排除と地魚へのこだわり。技能をもった高齢者の長期雇用、雑魚の詰め合せという、生産者主導の地域に根ざしたバランスの良い商品づくり等。

参考図書／INAX ギャラリー刊「唐桑・海と森の大工」

写真資料、映像資料あり、

３．持続可能な海辺の漁村づくり

近年、海洋基本法の制定によって、日本は初めて世界にむけた領土保全の意志を明らかにしました。しかし、島嶼部や沿岸地帯において島民や住民たちの生計がなりたつ仕組みを定着させない限り、どんどん過疎化と離島の孤立化が進んでしまいます。それぞれの地域や島が自立性を維持していくためには、国からの補助金に頼り切った補助金ビジネスでは、限界があります。そのためにも、小さな経済の歯車がきちんと回りつづける、持続可能な漁村づくりをめざさないといけません。それに必要なのは環境に負荷をかけない非拡大型の計画生産と、そこに暮らす人々の多能工化ではないかと、感じています。そのヒントを得た場所として、最後に隠岐諸島、中ノ島海部町で領域横断的に、民宿、畳屋、漁師、渡船業、農業、養鶏、水産加工ほか七つの職業をこなす宇野さん一家を紹介します。２００３年から６年目をむかえた里海変遷の足跡を追います。

里山・里海 SGA

松田　治　（瀬戸内海研究会議）

キーワード：ミレニアム生態系評価（MA）・SGA・里山・里海

1．SGA とは何か？

20 世紀の後半には、地球上の各地で、人間活動による環境と生態系の破壊や変容がいよいよ顕著になった。その実態を明らかにする目的で、21 世紀を迎えると、国連は、これまでで最大規模のミレニアム生態系評価（Millennium Ecosystem Assessment: MA）を実施した（2001-2005）。この MA は生物多様性条約（CBD）やラムサール条約などからの要求にも対応できるように立案された。また、MA の組織には各国政府、産業界、NGO や先住民族などの多様な関係者で構成される評議会が設けられ、この評価報告書の査読には 95 カ国から 1360 人の専門家が携わったとされる。MA は当然、地球規模（global）の評価を指向したが、同時に様々なスケールの地域別（sub-global）アセスメントを世界中の 34 地域で実施した。これが MA の Sub-Global Assessment (SGA)である。日本では、残念ながらこの SGA は実施されなかった。

2．*Satoyama-Satoumi* SGA

SGA を含む MA の結果が取りまとめられると、新たな課題が浮上した。例えば、実施された SGA では、地理的な大きな空白や、SGA の対象とはならなかった重要な生態系が多数残ってしまったからである。このような問題に対処するために、SGA Follow-up プログラムが計画された。いわば、SGA の続編・追補版である。この SGA Follow-up の一つとして選ばれたのが、Sub-global Assessment of *Satoyama* and *Satoumi* in Japan （日本における里山・里海のサブ・グローバル評価：「里山・里海 SGA」）である。当然、日本では初めての MA の手法が取り入れられた SGA である。このプログラムは国連大学高等研究所（UNU-IAS）が国連環境計画（UNEP）と協力して推進している。2006 年からの予備検討の後に、2007 年には、「里山・里海 SGA」の対象地域（サイト）の公募が行われた。瀬戸内海の評価は、瀬戸内海研究会議・瀬戸内海環境保全協会・瀬戸内海環境保全知事市長会議の 3 者連名により提案され、これが採択された。採択された全てのサイトは、北海道、東北、北信越、関東中部、西日本の 5 つのクラスターに再編成された（図 1）。瀬戸内海は西日本クラスターの中で、サブ・クラスター的な地位を占めている。サイトの選定には、公募制がとられたため、結果的には多くのサイトは里山を中心にしたものとなった。その結果、瀬戸内海は、「里山・里海 SGA」の中で、事実上、里海の評価に関する最重要拠点となっている。

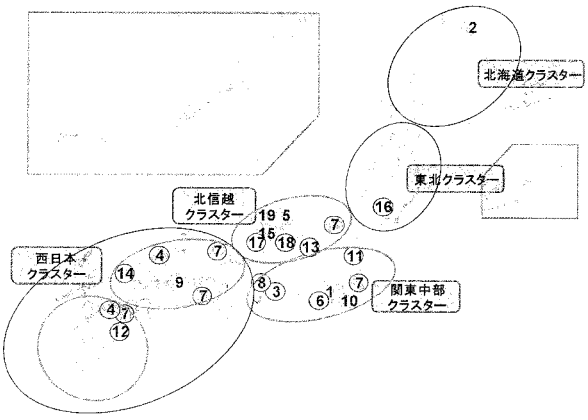


図 1．現在進行中の「里山・里海 SGA」のサイトとクラスター

3．「里海としての瀬戸内海」

「里山・里海 SGA」の中で、瀬戸内海の部の報告書は、現在、「里海としての瀬戸内海」として取りまとめられつつある。クラスター・レポートの取りまとめ手法には、基本的に MA の取りまとめ手法が適用されており、「里海としての瀬戸内海」の目次の概要は以下の通りである。

1） 概要と里海の定義
2） 瀬戸内海の歴史
3） 現状と変化傾向：生態系、生態系サービス
4） 変化の要因
5） 対応
6） 今後の展開

すなわち、このおよそ 40～50 年間に、瀬戸内海の環境、生態系と生態系サービスがどのように変わったか、それは何によるか、どのような対応策が取られたか、これからどうしたらよいか、が整理されつつあるので報告する。また、変動要因は単純ではなく、複雑に関与しているので、間接要因・直接要因などに分類し、相互関係（inter-linkage）が解析されつつある。これらの進捗状況についても紹介したい。これらの結果はクラスター・レポート、国レベルレポートに取りまとめられ、2010 年に名古屋で開催される生物多様性条約第 10 回締約国会議（CBD-COP10）でも報告される予定である。

人手と生物多様性

柳　哲雄
（九大・応力研）
キーワード：人手・生物多様性・石干見

1．はじめに

里海は「人手をかけることで、生物生産性と生物多様性が高くなった沿岸海域」と定義される（柳、1989、2007）。この定義はかなりの人には受け入れられて、21世紀環境立国戦略（2007.6）、第三次生物多様性国家戦略（2007.11）、海洋基本計画（2008.3）、経済成長戦略大綱（2008.6）など、多くの行政施策にこの定義のまま里海という言葉が取り入れられ、日本各地で里海創生活動を支援する予算措置も講じられている。

一方、沿岸海域で人手をかけることがその海域の生物多様性を高くするということに関しては、科学的証拠が十分でないとして、異議を唱える人も多い。

本稿では人手をかけることで生物多様性を高くし、また高い生物生産性を実現する、いくつかの試みを紹介する。

生物多様性は1)生態系の多様性、2)生物種の多様性、3)遺伝子の多様性などの意味に用いられるが、本稿では2)の意味に限定して用いる。

2．石干見

有明海・沖縄・韓国・台湾などでは石干見（いしひみ）と呼ばれる、定置網のような石垣の仕掛けがあった（田和編、2006)。石干見は干潟やサンゴ礁など、遠浅で干満差の大きい海に、半円形あるいは馬蹄形に岩塊やサンゴ石灰岩で石垣を造り、満潮で沖からやってきた魚が干潮で逃げられなくなった所を漁獲するというものである（図1)。沖縄では魚垣（ながき)、垣（かち）と呼ばれている（上村、2007)。

石垣の隙間を様々な生物が隠れ場や付着基盤として使用するため、さらに、付着生物を捕食する魚が蝟集するために、石干見がある場合とない場合では、その海域の生物多様性は異なる。

石干見がその海域の生物多様性を高める理由は、定置網の様に網だけで囲いを作った海域や、琵琶湖のエリのように竹竿で囲いを作った水域と比較すると、理解しやすい。網や竹竿は単なる漁獲の道具だが、石干見の場合は漁獲の道具のみならず、石垣という人造空間が海洋生物の生息に適した一種のハビタット・ビオトープになっている。

生物多様性を保証するものは生息環境の多様性である。石干見は人手をかけて、新たな生息環境をつくりだし、生息環境の多様性、ひいては生物の多様性を実現しているのである。

3．里山と里海

里山の人手は、その場の植生が極相にいかないようにかけられる。すなわち、人手をかけないと、西日本の里山では藪が茂り、最終的には潜在植生であるシイやタブなど常緑広葉樹の森に変わってしまう。常緑広葉樹林は1年中林床に日があたらないために、植物相が貧困となり、落葉広葉樹林と比較すると、生息空間の多様性が著しく減少して、生物多様性は減少する。

一方、里海のおける人手は生息空間の多様性を維持し・創りだすようにかける（ビオトープの維持・創出）ことで、生物多様性を高くするのである。

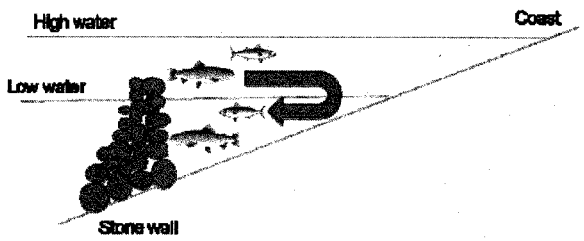


図1　石干見

参考文献

上村真仁（2007）石垣島白保「垣」再生ー住民主体のサンゴ礁保全に向けてー．地域研究，3，175-188.

田和政孝編（2006）石干見：最古の漁法．ものと人間の文化史135、法政大学出版局，313頁.

柳　哲雄（1998）沿岸海域の“里海”化．土木学会誌，21，703.

柳　哲雄（2007）里海論．恒星社厚生閣，東京，104頁.

平成２１年度

核融合プラズマ分野
共同研究成果報告

タングステン被覆壁材料中の水素同位体挙動

大阪大学　大学院工学研究科　上田良夫

1．目的

タングステンは低損耗、高融点という特性からプラズマ対向材料・ブランケット第一壁材料の第一候補となっている。しかしながら、堅くもろい材料であり、構造材料としての使用が難しいため、プラズマ対向面のみにコーティングして使用することが予定されている。このようなタングステン被覆材料にプラズマを照射した場合の、被覆層や被覆－母材界面層での水素同位体挙動、それに伴う材料中のミクロスケールの構造変化や、その材料機械特性への影響等を詳細に調べた研究はほとんどない。

そこで、ブランケット候補材料の一つである、フェライト鋼 F82H にタングステンをプラズマスプレー法によりコーティングした材料について、大阪大学で所有する定常イオンビーム照射装置（HiFIT）や九大応力研所有の APSEDAS を用いて、低エネルギーの重水素イオンビームを照射し、応用力学研究所が所有する TDS、SEM、FIB 等による分析により材料中の重水素保持量、接合部の健全性などを調べる。この結果より、本被覆材の第一壁材料としての適用性について、ミクロスケールでの水素同位体挙動とマクロスケールの材料機械的特性の両面から評価を行う。本研究では、応用力学研究所の装置を使用することが不可欠であるため、共同研究として申請するものである。

2．実験方法・結果

タングステン中の水素吸蔵量測定は多く行なわれており、それらの結果はタングステン中の欠陥密度、微細構造（結晶粒サイズ、結晶粒形状）、あるいはそれと深く関係する熱処理条件に依存することが知られている。最も顕著な例は、微結晶粒タングステン（UFG-W、東北大学、栗下先生）である。この材料については、高密度プラズマ装置（PISCES）にて、300℃で重水素プラズマを照射したところ、ほとんど重水素の吸蔵はなく、また、同条件で照射した場合の他のタングステン材に、通常観察されるブリスタは見られない。

従って、被覆材を研究するに当たり、単に被覆試料のみを実験対象とするのではなく、バルクタングステン材料であっても、微細構造が異なる材料を用いて実験を行ない、基礎的な知見をたくわえておくことが必要と思われる。最近、阪大グループや IPP Garching のグループでタングステンの透過実験が行なわれているが、阪大グループは 1300℃で再結晶化させたタングステン材料を用いて 600K～800K の温度範囲で実験したところ、拡散の活性化エネルギーが約 1.1 eV という結果を得た。この材料は、ほぼ等方的な結晶粒構造を持つ。この我々の結果は従来、1000 K 以上の温度領域で行なわれた実験結果と良く一致する。一方で、IPP Garching では、823K～923K の温度範囲で、応力除去処理材を用いて実験したところ約 2eV の活性化エネルギーの値が得られた。この材料は、表面に平行な結晶組織を持っており、FIB の測定では、結晶粒界にいくつか亀裂が見られた。

これらの結果から分かるように、タングステンの結晶組織は重水素の内部拡散に大きな影響を与えており、タングステン被覆材料の実験と並行して、バルクタングステンの実験も進めなければならない。そこで、本年度は九州大学に新たに設置された昇温脱離装置を利用して、結晶組織の異なるタングステンの重水素吸蔵特性を調べる実験を行なった。使用した材料は、焼結圧延材料で表面に平行な方向に層状の結晶粒界が形成されている材料と、引抜き加工で製作した円柱材料を横方向にスライスした材料（結晶粒界が試料表面に対して垂直に形成されている）について、APSEDAS 装置で低エネルギー

（10~20 eV 程度）の重水素プラズマを照射して、昇温脱離測定を行なった。タングステンの熱処理温度はどちらも 1173 K で 0.5 時間（応力除去処理材）である。その結果を図 1 に示す。低温において、昇温脱離装置の温度制御の問題があり、特に W_Pala の方の試料では、低温に見られる放出はこの温度制御の問題があると見られる。しかしながら、600K 以上の高温では、昇温脱離スペクトルは安定しており、材料の違いが明確に現れている。どちらの材料も 650 K 近傍に大きなピークを持っているが、W_Perp の材料はさらに高い温度にピークを持つ（750 K 近傍と 900 K 近傍）。650 K 付近のピークは、空孔などの欠陥に重水素が捕獲されている可能性がある。また、さらに高温のピークは、高エネルギーイオンで照射損傷を与えたタングステン試料に見られるピークであり、より複雑な構造を持つ欠陥である可能性がある。今後、微細組織の観察なども織り交ぜながら、重水素の吸蔵に関してより詳細に検討を進める必要がある。

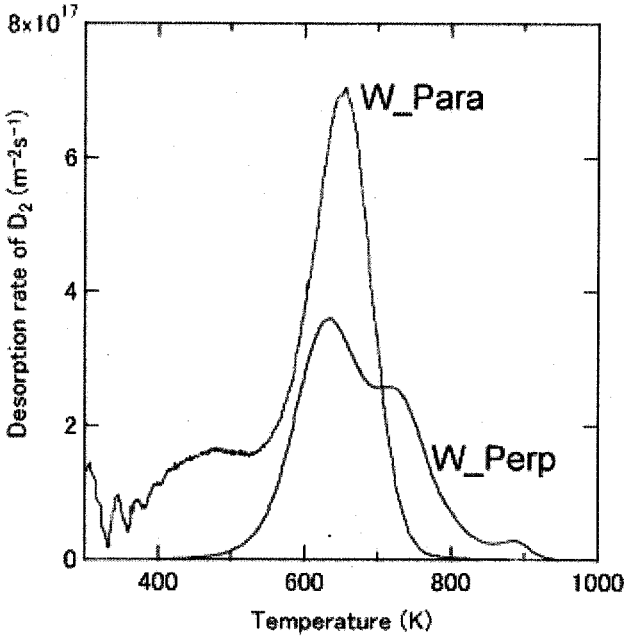


図 1　表面に平行な粒界を持つ W（W_Pala）と、表面に垂直な粒界を持つ W の D_2 昇温脱離スペクトル。

3．まとめと今後の課題

タングステンの結晶組織の違いが、昇温脱離スペクトルの違いに影響するという予備的な結果を得た。表面に垂直な結晶粒界を持つ試料では、高エネルギーイオン照射により発生する高温側の放出ピーク（～750 K と～900 K）が見られた。今後は、被覆材料の実験も進めながら、タングステンの結晶性、表面状態、及び接合部の影響を詳しく調べる必要がある。また、接合材の透過測定なども視野に入れ、総合的にタングステン被覆材料の水素同位体挙動の研究を進める予定である。

4．研究成果発表

1. Y. Ueda et al.," Effect of Radiation Damage on Deuterium Retention in Tungsten", presented at ICFRM14, Sapporo 2009.
2. K. Tanimoto et al., Effect of Radiation Damage on Deuterium Behavior in Tungsten", presented at APFA2009, Aomori 2009.

プラズマ対向壁面上に形成される不純物再堆積層の剥離に関するナノスケール解析

核融合科学研究所大型ヘリカル研究部　時谷　政行

【目的】

プラズマ閉じ込め装置の対向材料表面では，スパッタリング作用によってはじき出された不純物元素がある領域に蓄積することで，堆積層が形成される．それらは物理的に不安定であるものが多く，熱・粒子負荷を受けることで剥離に至る恐れがある．剥離した層が，ダストとしてプラズマに混入すれば，定常的な放電は困難となる．実際に，実験後のプラズマ閉じ込め装置内部の壁面には，剥がれかけた堆積層が数多く見られるのが現状であり，定常プラズマ実現のために，堆積層の形成から剥離に至るメカニズムを早急に明らかにする必要がある．堆積層が形成され剥離に至る過程は，「①スパッタリング損耗」，「②損耗された原子の輸送と堆積」，「③堆積層の成長」，「④堆積層の剥離」，「⑤プラズマへの混入」という段階(ステージ)に区分されるが，①から⑤に向かうに従ってミクロスケールからメソスケールの現象に移り変わっている様子がわかる．すなわち，巨視的な現象の理解には微視的な視点が不可欠となってくることを意味しており，マルチスケールのプラズマ壁相互作用に関して，各スケールで行われている研究の連携を図りながら総合的にプラズマ・壁相互作用を理解することが必要である．本研究は現象の出発点である上記①～③のステージに着目し，電子顕微鏡を用いた堆積層のナノスケール構造解析から，その成長過程を原子レベルで明らかにすることを目的とした．分析には，核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)の第一壁において採取された堆積層を対象とした．LHD の第一壁では Fe，C，O などを含む共堆積層が形成され，これらは剥離し易い状態であることが確認されている．

【実験方法】

2007 年度のプラズマ実験において，真空容器内壁に 4 枚の Si 試料(No.1~4)を設置しておき，堆積層を採取した．設置場所は図 1 に示す．No.1，No.2，No.4 はダイバータアレイから約 20cm の場所であり，No.3 の試料は直線距離で 80cm ほど離れた場所となる．Si 試料のサイズは 10x20x1mm^3 であり，スローカッターで適切なサイズに切断後，プラズマ・材料力学部門設置の走査型電子顕微鏡(SEM)による表面観察，集束イオンビーム加工観察装置(FIB)によるナノ加工，透過型電子顕微鏡(TEM)による断面構造解析を実施した．

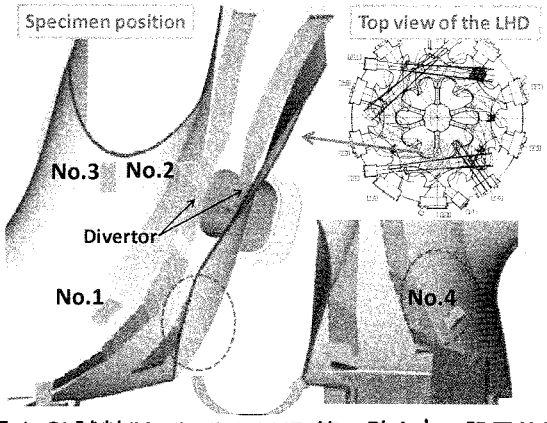


図 1. Si 試料(No.1~4)の LHD 第一壁上での設置位置

【実験結果および考察】

図 2 に表面観察結果を示す．上段の写真を見ると，No.3 の試料のみ，Si 本来の色を保っているが，他のものは灰色あるいは焦げ茶色に変化していることがわかる．この結果より，No.3 は損耗が主の領域，No1，No.2，No.4 は堆積が主の領域であると考えられる．図 2 の中段は SEM 高倍率像，下段は低倍率像である．No.1 と No.4 の試料においては，複雑な隆起を伴う表面変形が確認され，No.2 では 500-1000 nm の均一な凹凸が確認された．一方，No.3 では，数十ナノメートルの微細なホー

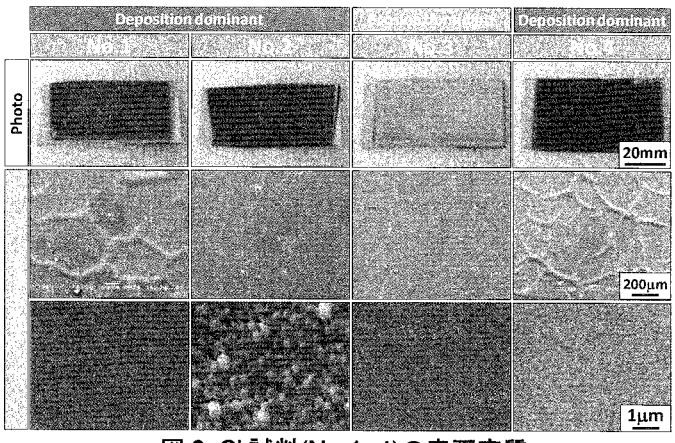


図 2. Si 試料(No.1~4)の表面変質
上段：写真，中段：SEM 高倍率像，下段：SEM 低倍率像

ルが点在しているだけであり，目立った表面変質は見られなかった．

図2に，No.1とNo.2の試料の断面TEM像を示す．それぞれ，Si基盤とその上に堆積した堆積層の範囲を矢印で図示している．No.1の試料では，いくつかの層に分かれて堆積していることがわかる．例えば，(1)，(2)に示す層はFeなどの金属元素を多く含む層であり，初期のグロー放電洗浄時に泰一壁がスパッタリング損耗を受け，堆積したものであると考えられる．一方で，(3)の層は炭素が主であり，主放電中に等方性黒鉛性ダイバータタイルが損耗を受け，堆積したものであると考えられる．この層には矢印で示した方向に，細かい縞模様が一様に見られ，炭素不純物の堆積に方向性があることが示唆される．例えば，図に向かって右側はダイバータタイルの方向，左側はプラズマ中心方向であるため，主にダイバータタイル側から炭素の堆積物が侵入しているということになる．No.2の試料では，Siと堆積層の境界にFe系の金属堆積層が見られるが，その量はわずかであるが， Siの再表面に激しい凹凸が形成されていた．その後は，No.1の試料と同様にCが主の堆積層が確認されたが，No.1と比較して矢印で示した縞模様がより鮮明に表れていることあわかる．堆積層中で暗く見える部分はカーボン原子が密であるが，明るく見える部分は逆に祖であることを意味しており，密度が不均一であることを意味している．おそらく，Siの最表面に初期に形成された凹凸が要因となり，縞模様にも影響が表れたのではないかと考えている．以上の結果より，No.1とNo.2の試料では構造自体に差異が見られることから，第一壁上の位置の違いによって，形成される堆積層の微細構造が異なることが明らかとなった．

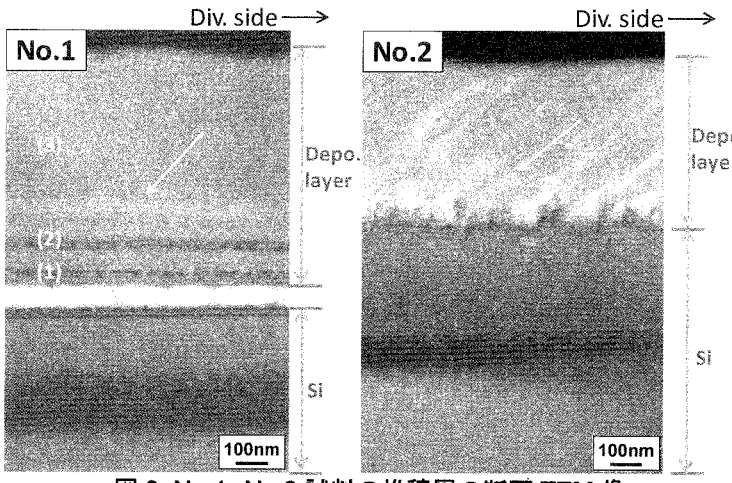


図 3. No.1, No.2 試料の堆積層の断面 TEM 像

さらに，図 4 に，No.3 試料の断面 TEM 像を示す．この試料は，損耗が主の領域に設置されていたものであるため，No.1, No.2, No.4 試料で見られる堆積層は全く確認されなかった．一方で，高エネルギーイオンの入射によって形成されたと思われる直径 1-20nm の大小さまざまな転位ループが深さ 1.5μm の深さまで確認された．損傷のピークは深さ 600-800nm であり，この領域に欠陥を形成するために必要な入射エネルギーは水素の場合約 50-100keV に相当する．このような高エネルギーイオン入射の原因として，イオンサイクロトロン加熱(ICRF)時に形成される高エネルギーイオンが考えられる．

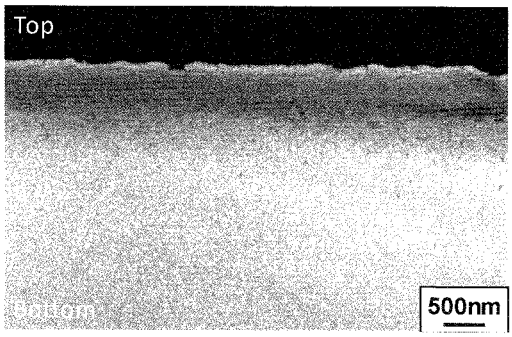


図 4. No.3 試料内部の微細欠陥

本研究結果は，堆積層の材料物性とその形成過程解明のみならず，高エネルギー粒子の振る舞いを知る上でも重要であり，特に，不純物の飛来方向についての情報は，ダストの発生や輸送研究にとって有用である．また，構造解析手法そのものが，各種実機装置で応用できる新しい分析手法として期待され，当該分野の研究の進展に貢献できる可能性がある．

【成果報告】

Micro/nano structural analysis of mixed-material deposition layer formed on the first walls of Large Helical Device and its impact on dust generation, M. Tokitani et al., 14th International Conference on Fusion Reactor Materials, 6-11, September, 2009, Sapporo Convention Center, Sapporo, Japan

プラズマ照射による炭素タイル表面の損耗・再堆積と水素同位体蓄積

徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部　大宅　薫

（1）研究目的

低温高密度プラズマに晒された炭素系材料の化学スパッタリング、放出された炭化水素分子のプラズマ中での輸送や再堆積現象は、ITER の初期フェーズで使用される CFC ダイバータ・ターゲットの寿命と炉内に蓄積されるトリチウムの安全許容量の観点から重要な問題である。特に、炭素再堆積層やそのタングステンあるいはベリリウムとの混合層のプラズマ・壁相互作用について、最近、実機のほか、プラズマやイオンビーム装置等でも精力的に研究され、その詳細な理解が求められている。本研究では、分子動力学シミュレーションコードを用いて炭素堆積層での粒子反射／注入やその損耗過程を調べている。特に、実機における炭化水素不純物の大域的な輸送モデルの構築に必要となる、炉壁でのその反射率（注入率）や再損耗率等の基礎データを収集することを目的とした。

（2）研究方法

本研究では、最近の実機実験や実験室実験において明らかになり始めた、プラズマ照射中の再堆積層の微細構造変化に伴う損耗特性や水素吸蔵特性を理解するため、W-C-H 系ポテンシャルを用いた分子動力学(MD)シミュレーションコードを開発した。これを用いて、まず、図１のような炭素堆積層セルを作製する。タングステン（W）セルに 10eV の炭素原子を連続入射することで W 上にアモルファスカーボン（a-C）層を作り、さらに炭素原子（0.025eV）と水素原子（1-30eV）を同時入射しながら水素化アモルファスカーボン（a-C:H）層を得る。入射する水素原子のエネルギーを変えることによって a-C:H 層中の水素濃度を制御することができる。

次に、作製した炭素堆積層の温度を制御しながら、水素あるいは不純物粒子の単発的な入射を繰り返す。この際、粒子入射によって材料が変化するため、入射ごとに材料を元の状態に戻す。これによって、連続的なプラズマ照射とともに変化するプラズマ・壁相互作用を、照射初期から照射時間ごとのスナップショットとして解析する。ここでは、1eV～100eV の水素原子や炭化水素分子を入射して、その反射率や材料のスパッタ率、さらに放出された粒子種の分布を計算した。

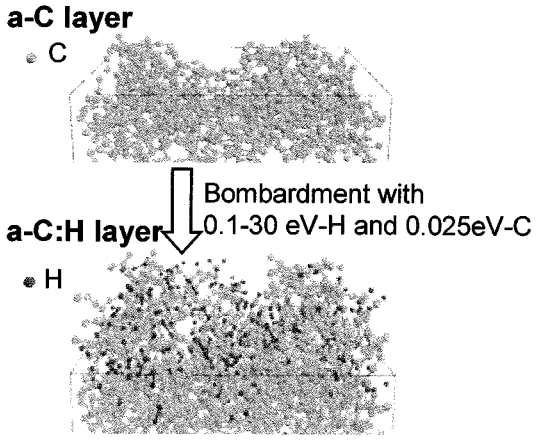


図１．作製した炭素堆積層

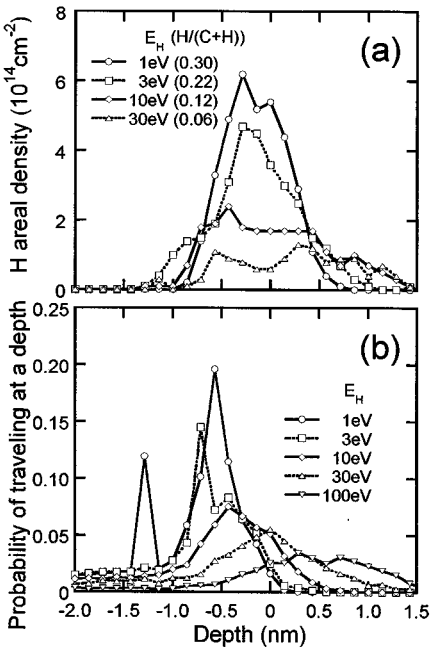


図２．水素濃度分布と水素注入分布

（3）研究成果

図３に、メタン（CH_4）が炭素堆積層に入射したとき、注入される(a)炭素 C と(b)水素 H の個数の入射エネルギーによる変化を示す。5eV 程度まではすべて反射されるが、50e 以上では逆にほとんどの C は注入され、CH_4 の水素（4 個）も半分程度は注入される。そ

の変化は炭素堆積層の水素濃度に依存する。

また、水素原子を入射してスパッタされる粒子種を調べた結果（図４）、（１）水素を注入しない炭素堆積層では、炭素原子のスパッタリングは物理スパッタリング機構に因り、そのエネルギー閾値が二体衝突近似モンテカルロコード（TRIM, ACAT, EDDY 等）と一致すること、（２）炭素堆積層中の水素濃度の増加とともに炭化水素の放出（化学スパッタリング）が顕著になり、物理スパッタリングのエネルギー閾値以下でも炭素原子が放出されること、（３）低エネルギー水素入射によって水素数の多い炭化水素ラジカルが放出されるなど、これまで実験で観測されている特性を再現した。

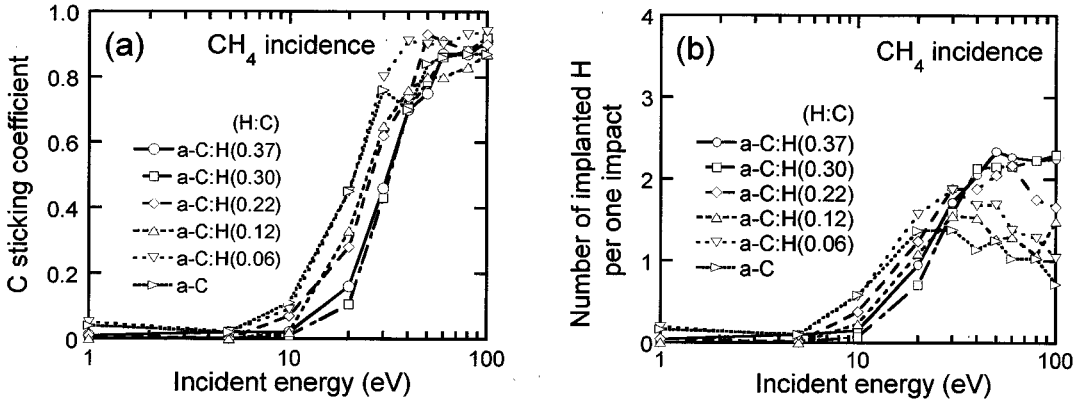


図３．メタン入射により炭素堆積層に注入される炭素原子(a)と水素原子(b)の個数

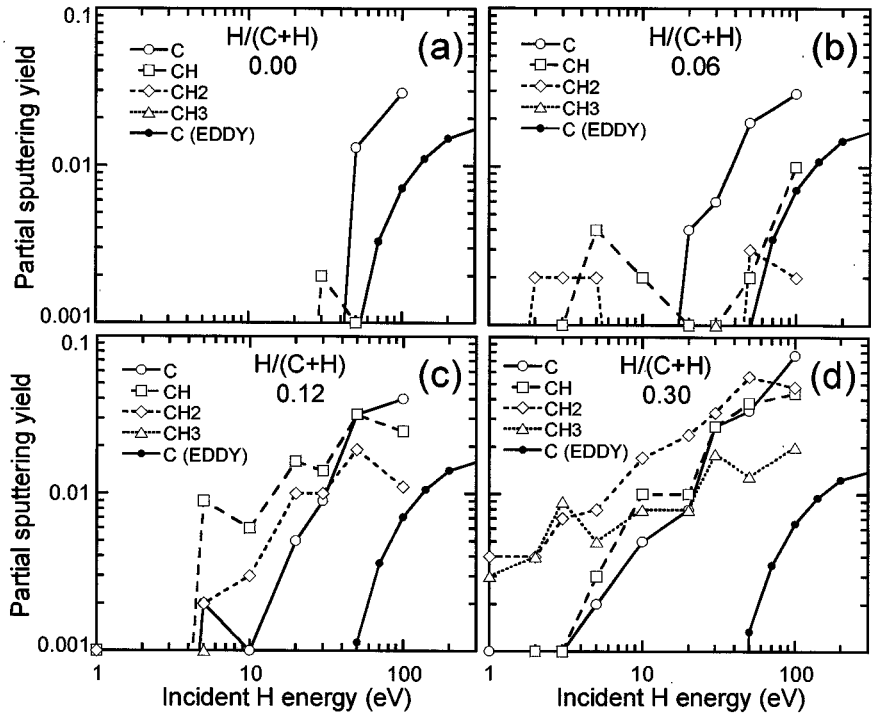


図４．水素原子入射により炭素堆積層からスパッタされる粒子種ごとのスパッタ率

研究協力者　徳島大院：井内健介、三宅洋平、九大応力研：坂本瑞樹、東園雄太

成果発表

[1] K. Ohya et al., Molecular dynamics study on hydrocarbon interactions with plasma facing walls, 14th Intern. Conf. on Fusion Reactor Materials, O-2, Sept. 6-11, 2009, Sapporo.

[2] K. Ohya et al., Molecular dynamics and dynamic Monte Carlo study of mixed material and its impact on plasma wall interactions, 9th Intern. Symp. on Fusion Nuclear Technology, PO3-040, Oct. 11-16, 2009, Dalian.

[3] K. Ohya et al., Molecular dynamics study of plasma surface interactions for mixed materials, D30a2-2, Oct. 27-30, 2009, Aomori.

プラズマ・壁相互作用における巨視的中性粒子挙動に関する研究

筑波大学プラズマ研究センター　中嶋洋輔

1．目　的

磁場閉じ込めプラズマにおける粒子およびエネルギー閉じ込めの評価には、プラズマ中の中性粒子の挙動に関する情報は重要である。特にプラズマ壁相互作用は、その時間・空間スケールが幅広いレンジにわたっているため、非常に多岐にわたる興味深い研究対象が存在する。研究代表者らは、これまで定常トカマク実験装置 TRIAM-1M 及び小型プラズマ壁相互作用実験装置 CPD における$H\alpha$線計測、２次元イメージ計測並びに中性粒子輸送モンテカルロシミュレーション解析に基づいて、長時間定常プラズマにおける中性粒子の挙動解析を進めてきた。

本研究の目的は、上記成果を踏まえて、タンデムミラー装置及び、球状トカマク装置における中性粒子輸送モンテカルロシミュレーション解析に基づき、プラズマ壁相互作用環境下における中性粒子挙動について調べ、特にプラズマ壁相互作用のマクロスケールな局面に関する知見を得ることである。

2．中性粒子輸送モンテカルロコード「DEGAS」

DEGAS コードとは、任意の体系のプラズマをメッシュモデルで近似することにより、プラズマ中の中性粒子の密度・温度分布等をモンテカルロ法に基づいて求めるシミュレーションコードである。[1] 本コードを用いた中性粒子輸送シミュレーションは、これまでガンマ 10 のセントラル部のような軸対称な体系でメッシュを作成し、解析・研究が行われてきた。[2-4] DEGAS を用いた３次元体系での中性粒子輸送シミュレーション計算が近年開始され、現実のモデルに則した３次元シミュレーションが出来るようになった。[5, 6] トカマクプラズマにおいても、数年前からモデリングが行われており、JT-60U における H-mode プラズマにおける中性粒子挙動の研究が進められている。[7]

3．球状トカマクにおける DEGAS を用いた中性粒子輸送シミュレーション

球状トカマクプラズマにおける中性粒子輸送研究は、まだ緒に就いたばかりで、詳細な手法や問題点などについての報告はほとんどなされていない。中性粒子輸送の観点からの、通常のトカマクプラズマと球状トカマクとの相違は、アスペクト比（主半径／小半径）が小さくなるため、中性粒子のトロイダル方向への回り込みが容易になると予想される。図１に示すように、QUEST の最外殻磁気面と真空容器の断面には、かなり大きな空間が存在するために、SOL 領域における中性粒子のトロイダル方向への輸送が無視できないと予想される。現状では、まだ標準的な磁場配位が確立されていないが、昨年度に行われたジュール加熱実験において得られた、プラズマからの可視光の２次元イ

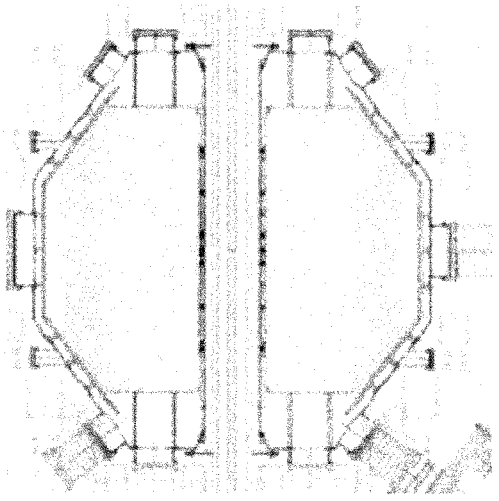


図 1 球状トカマク実験装置「QUEST」の真空容器と磁気面断面図

メージ計測結果に基づいて、メッシュ構築の元となるジオメトリデータの算出を行った。

図２は、３次元 DEGAS シミュレーション解析のメッシュモデルの元となるジオメトリデータの一例である。図から判るように QUEST の真空容器壁並びに、上下のダイバータ板がほぼ現実の寸法通りにモデル化されている。プラズマの形状は、真空容器の内部に可視光の２次元イメージ計測データに基づいて、概略形状で与えている。

今後は、プラズマ生成の最適化を進めて標準的なプラズマ形状を確定した後、真空容器内内蔵物を含めたシミュレーションの為の本格的なメッシュ構築を開始し、実機条件に即した中性粒子輸送シミュレーションを遂行する予定である。

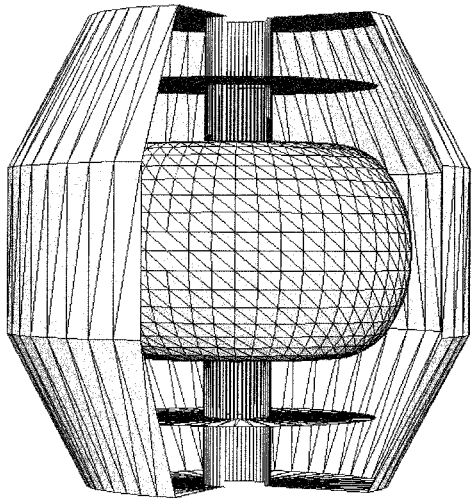


図２３次元 DEGAS シミュレーションのメッシュ構築の元となるジオメトリデータの一例。真空容器壁とプラズマ及び、ダイバータ板がモデル化されている。

４．参考文献

[1] D. Heifetz, D. Post, M. Petravic *et al.*, J. Comput. Phys. **46** (1982) 309.
[2] Y. Nakashima, K. Yatsu, K. Tsuchiya, *et al.*, J. Nucl. Mater. **196-198** (1992) 493.
[3] Y. Nakashima, N. Yamaguchi, K. Yatsu, *et al.*, J. Nucl. Mater. **220-222** (1995) 580.
[4] Y. Nakashima, *et al.*, J. Nucl. Mater. **241-243** (1997) 1011.
[5] D. P. Stotler, *et al.*, Phys. Plasmas **3** (1996) 4084.
[6] Y. Nakashima, Y. Higashizono, *et al.*, J. Plasma Fusion Res. SERIES **6** (2004) 546.
[7] Y. Nakashima, Y. Higashizono, *et al.*, J. Phys.: Conference Ser. **123** (2008) 012029.

５．研究成果

１．中嶋、他「ガンマ 10 セントラルリミターを用いたプラズマ制御」第４回 QUEST 研究会、平成２１年８月３１日－９月１日、九州大学筑紫キャンパス、応用力学研究所
２．東園、他「QUESTおける中速カメラ計測」同上
３．Y. Higashizono, *et al.*, "Observation of separated plasma structure in non-inductive discharge in QUEST" The 7th General Scientific Assembly of the Asia Plasma and Fusion Association (APFA) (October 27-30, 2009, Aomori, Japan) A28a-3.

６．研究組織

研究代表者	中嶋洋輔	筑波大学プラズマ研究センター	准教授
研究協力者	吉川正志	筑波大学大学院数理物質科学研究科	准教授
研究協力者	米永理央	筑波大学大学院数理物質科学研究科	院生
研究協力者	細井克洋	筑波大学大学院数理物質科学研究科	院生
研究協力者	小澤博樹	筑波大学大学院数理物質科学研究科	院生
研究協力者	東園雄太	九州大学応用力学研究所	ＰＤ研究生
研究協力者	坂本瑞樹	九州大学応用力学研究所	准教授
研究協力者	図子秀樹	九州大学応用力学研究所	教授

プラズマ・壁相互作用による材料損傷プロセスのマルチスケールモデリング

森下和功[1]，坂本瑞樹[2]，吉松潤一[1]，山本泰功[1]，渡辺淑之[1]，大貫惣明[3]，
橋本直幸[3]，佐藤　学[4]，金田保則[5]，小田卓司[5]，加藤太治[6]，宮本光貴[7]，
岩切宏友[8]，浜口　大[9]，吉田直亮[2]，渡辺英雄[2]，徳永和俊[2]，矢木雅敏[2]，大沢一人[2]
1) 京大エネ理工研，2) 九大応力研，3)北大工，4)東北大工，5)東大工，
2) 6)核融合研，7) 島根大総理工，8) 琉球大教育，9) 原子力機構

1. はじめに

現存しない核融合炉の材料劣化を評価するには，核分裂炉やイオン加速器などの代替照射場を用いざるを得ない．しかし，それらの代替照射場は，入射粒子フラックス・入射エネルギー・入射粒子数などが実際の照射場とは異なるため，材料劣化を予測するには材料劣化の損傷速度依存性を明らかにする必要がある．また，材料劣化はプラズマの照射による材料のミクロ構造組織変化に起因することが知られており，欠陥の生成，拡散過程のような極めて短い時間，微小な空間スケールの領域も含めた現象の理解が必要である．本研究では，プラズマ対向候補材料であるタングステン中のボイド（空孔集合体）核生成における損傷速度依存性の評価を行った．臨界サイズに満たないボイド（エンブリオ）は，ボイドサイズが大きくなるほど核生成エネルギーが増大する状態であるため，ボイドは平均的に収縮に向かう．そのため，反応速度論で核生成過程を解析することは不可能である．本研究では，モンテカルロ法を用いて空孔・格子間原子のフラックスを確率論的に扱うことで，従来考慮されていなかったボイド核生成の解析を行うことを可能にした．

2. 方法

サイズが R のボイドに点欠陥 i（i は格子間原子および空孔）が流入する確率，およびボイドから点欠陥 i が放出される確率をそれぞれ $J_i^{IN}=4\pi RD_iC_i/\Omega$, $J_i^{OUT}=4\pi RD_iC_i^{eq}/\Omega$ に比例すると考え，乱数を使って実際に起こる事象を決定した（R：ボイド半径、C_i：マトリクス中の点欠陥濃度，C_i^{eq}：欠陥集合体周辺の点欠陥濃度，D_i：点欠陥の拡散係数，Ω：原子体積）．ボイドへの正味の欠陥流入量は $J=J_i^{IN}-J_i^{OUT}$ で決まる．この解析の特徴は，欠陥フラックスの確率論的ゆらぎ効果も考慮している点である．図 1 はボイドサイズの時間変化を表しており，欠陥が過飽和に達してからボイドの臨界核が生成するまでの時間を潜伏期間と定義している．また，ボイドサイズ 1 のときに格子間原子が流入する事象も考慮しているため，エンブリオが消滅する場合も有り得る．核生成率は $I=1/\tau$ で定義され，ボイドが消滅した際の潜伏期間は無限大と考え，その時の核生成率は 0 となる（τ：潜伏期間）．各照射条件での潜伏期間を求める際，どの条件においても 100 回核生成するまで試行を行い，最後に試行回数分の潜伏期間，核生成率の平均をとって評価を行った．

3. 結果・考察

まず，モンテカルロ法を用いて損傷速度，温度ごとの核生成潜伏期間を算出した．図 2 は潜伏期間における損傷速度依存性と温度依存性を表している．同一温度では，損傷速度が速くなるほど潜伏期間は短くなっている．これは，損傷速度が速いほど空孔過飽和度が上昇するためである．また，同一の損傷速度では，温度が高いほど潜伏期間が短くなっている．これは温度が高いほど空孔拡散が活発になるためである．さらに，潜伏期間における損傷速度依存性と温度依存性は非線形の関係にあることが明らかになった．

次に，求めた潜伏期間からボイド核生成の温度領域を算出した．損傷速度 10^{-3}dpa/s におけるタングステンの核生成温度領域は 600K から 1200K だった．照射プロセスにおけるボイド核生成温度領域は，図 3 のように上限と下限がありピーク温度をもつ．このような特徴を示すのは，下限は温度が低いことで空孔が拡散し

にくい状態であり，上限は温度が高いことでボイドが熱的に不安定になるためである．

図 4 は核生成率におけるピーク温度の損傷速度依存性を示す．縦軸は規格化するために核生成率を損傷速度で割った指標である．ボイド核生成においても，損傷速度が遅くなると，核生成のピーク温度が低温側にシフトしていることがわかる．温度が上昇すると，空孔過飽和度は低下し，損傷速度が速くなると，空孔過飽和度が上昇する．そのため，損傷速度が速いほど，より高温側でもボイドが核生成できると考えられる．

今後は，入射粒子スペクトルの違いによる欠陥集合体の非熱形成プロセスの違い，および損傷速度の違いに起因する欠陥集合体の核生成プロセスの違いを考察することで，照射場の違いに起因して発生する材料挙動の違いを計算に反映させる検討を行う．また，現在一般的に核生成の潜伏期間と言われている材料中の欠陥が過飽和に達するまでの時間と，今回扱った欠陥が過飽和に達してから臨界核が生成するまでの時間を比較・検討することで従来指標の妥当性の検証および新たな評価指標の提案につながることが期待される．さらには，プラズマ・壁相互作用による特徴的な微細構造形成のメカニズム究明を行う．

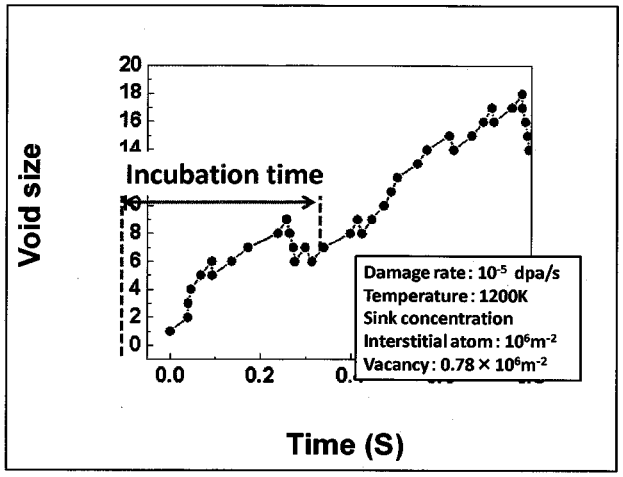


図 1. ボイド核生成の潜伏期間

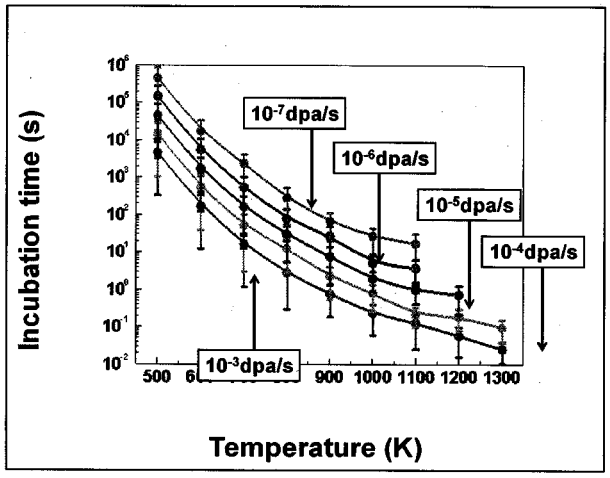


図 2. 潜伏期間における損傷速度依存性と温度依存性

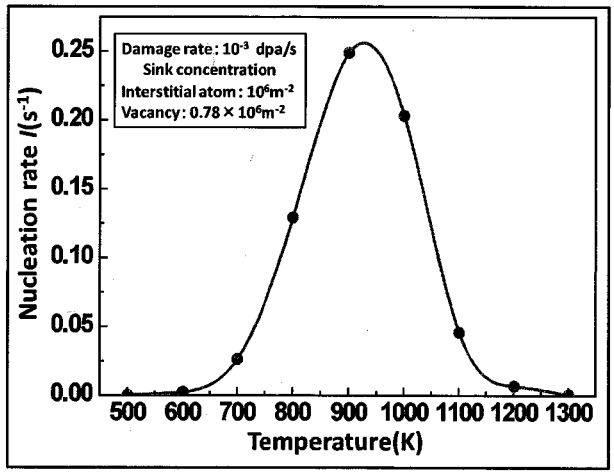


図 3. ボイド核生成温度領域

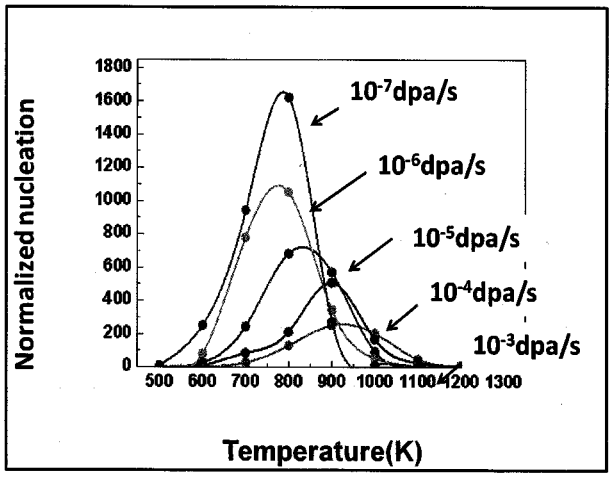


図 4. 核生成率におけるピーク温度の損傷速度依存性 ＊縦軸は核生成率/損傷速度で規格化.

研究会「マルチスケールでのプラズマ・壁相互作用の理解」

京大エネ理工研　森下和功
（所内世話人）九大応力研　坂本瑞樹

●研究会の目的

核融合炉材料の開発研究においては、プラズマ・壁相互作用（PWI）によってもたらされる材料損傷を考慮しなければならない。この材料損傷は、材料構成要素（不純物）のプラズマへの混入（スパッタリングやブリスター形成・剥離）をもたらすものであるから、すなわち、材料そのものの機能喪失や寿命だけでなく、プラズマの安定性にも影響を及ぼすことを意味する。

本研究会の目的は、PWIによる材料損傷プロセスを理解すると同時に、材料要素のプラズマ混入やプラズマへの影響、および、そうした材料ミクロ構造変化の中で時々刻々と変化する水素リサイクリング特性などを扱う。また、こうした現象をモデル化し、それをもとにこのPWI現象を予測・制御するための方法論について議論するとともに、PWIを考慮した材料設計やプラズマ運転シナリオなどの検討を行うことである。

●日時／場所／参加者

・日　時：平成21年度3月18（木）−19日（金）
・場　所：九州大学応用力学研究所西棟W601号室
・参加者：中嶋洋輔（筑波大），星野一生（原子力機構），小田卓司，石野　栞（東大），加藤太治，芦川直子，時谷政行（核融合研），大野哲靖（名古屋大），剣持貴弘（同志社大），森下和功，渡辺淑之，吉松潤一，山本泰功（京大），宮本光貴（島根大），大宅　薫（徳島大），坂本瑞樹，東園雄太，大澤一人，吉田直亮，A. Rusinov，若林竜介，江頭康平，原田裕孝，古本健一郎，川波貴之，片山一成，吉田雅史（九大）

●研究会の概要・成果

本研究会は、以下の５つのセッションにて実施された。まず、第１部「プラズマ・壁相互作用の理解に向けたモデリング研究１」では、主に実機（LHD、JT-60U、TRIAM-1M等）を用いての、プラズマ周辺壁材料における不純物再堆積層の形成・剥離現象をはじめ、ダストの発生メカニズムや移動現象の理解に関する実験的アプローチの現状および課題についての報告があった。続いて、第２部「プラズマ・壁相互作用の理解に向けたモデリング研究２」では、主に研究室実験（NAGDIS-II、APSEDAS、イオン加速器、TDS等）や理論解析による、プラズマ粒子による壁材料の表面構造変化の理解に関する研究の現状および課題についての報告があった。さらに、第３部「プラズマ・壁相互作用の理解に向けたモデリング研究３」では、プラズマ内の中性粒子の輸送現象をはじめ、プラズマ・壁材料間での水素リサイクリングや材料中のガス原子（水素・ヘリウム）挙動の理解に関する計算的アプローチの現状および課題についての報告があった。また、第４部「材料照射損傷の理解に向けたモデリング研究」では、照射下材料ミクロ構造変化に着目し、そのメカニズムの解明や現象の予測に向けた方法論の構築に関する研究の現状および課題についての報告があった。最後に、第５部「総合討論」では、まず、大別した３つの領域（「実機閉じ込め装置」、「モデリング／シミュレーション」、「実験室実験」）それぞれにおける課題が整理された。続いてそれらを基に、領域間の共通課題が設定された。さらに、今後の連携活動の計画についても議論が行われた。

本研究会を通して、様々な手法でPWIを評価する研究者たちの意見交換・情報交換を行い、それぞれの専門分野に捉われない包括的な議論を行うことができた。今後は、各自が自分の専門以外の評価手法とのつながりを意識して研究を行うことで、時間的にも空間的にもマルチスケールな現象であるPWIの解明につながることが期待される。今回の会合を踏まえ、次年度も継続を予定している。

「マルチスケールでのプラズマ・壁相互作用の理解」研究会

－「核融合炉材料中の照射損傷過程のマルチスケールモデリング」第９回検討作業会－

2010 年 3 月 18 日（木）－19 日（金）
九州大学応用力学研究所西棟 W601 号室

プログラム

3 月 18 日（木）

13:00-13:05	開会挨拶	森下和功	京大エネ研
第１部　　プラズマ・壁相互作用の理解に向けたモデリング研究 １ 進行　森下和功			
13:05-14:30	マルチスケールのプラズマ・壁相互作用研究	坂本瑞樹	九大応力研
	プラズマ対向壁面上に形成される不純物再堆積層の形成と剥離に関するナノスケール解析	時谷政行	核融合研
	メソスケールのプラズマ・壁相互作用ダスト発生とその移動現象	芦川直子	核融合研
	実機 PWI 研究の勧め	吉田直亮	九大応力研 特任教授
14:30-14:45	コーヒーブレイク		
※15:00-16:15	見学会　・QUEST（球状トカマク実験装置） ・APSEDAS （PWI 模擬実験装置）		
第２部　　プラズマ・壁相互作用の理解に向けたモデリング研究 ２ 進行　吉田直亮			
16:30-17:45	単結晶及び粉末焼結タングステンへのヘリウム照射によるバブル・ナノ構造形成	大野哲靖	名古屋大工
	可視分光計測及び中性粒子輸送シミュレーションに基づくタングステン近傍の中性粒子輸送解析	東園雄太	九大応力研
	炭素再堆積層におけるプラズマ・壁相互作用のシミュレーション	大宅　薫	徳島大工
	タングステン中の重水素蓄積に関する TDS シミュレーション	剣持貴弘	同志社大生命医
18:30-20:30	懇親会		

3月19日（金）

第３部　　プラズマ・壁相互作用の理解に向けたモデリング研究３ 進行　大宅　薫			
9:15-10:45	D+He+Be混合プラズマ照射したタングステンの微細組織と重水素保持特性	宮本光貴	島根大総理工
	高Z不純物の大域的輸送過程の解析	星野一生	原子力機構
	モンテカルロシミュレーションによる中性粒子挙動と水素リサイクリングの研究	中嶋洋輔	筑波大プラズマセンター
	タングステン結晶中の原子空孔形成における水素捕獲の効果	加藤太治	核融合研
	理論計算による材料中水素の取り扱い	小田卓司	東大原子力国際
10:45-11:00	コーヒーブレイク		
第４部　　材料照射損傷の理解に向けたモデリング研究 進行　石野　栞			
11:00-12:10	タングステン粒界への水素吸蔵と機械的強度の第一原理計算	大澤一人	九大応力研
	炭化珪素（SiC）における自己格子間原子集合体の核生成・成長のモデル化	渡辺淑之	京大エネ科
	照射場の定量化	山本泰功	京大エネ科
	照射下材料中のミクロ組織発達における照射場依存性	吉松潤一	京大エネ科
12:10-13:30	昼食		
第５部　　総合討論 進行　坂本瑞樹			
13:30-15:30	PWI研究活動の課題と今後の方針	全員	
15:30-15:40	閉会挨拶	石野　栞	東大名誉教授

D-He 混合プラズマ照射したプラズマ対向材料の微視的損傷とその重水素吸蔵特性への影響

島根大学総合理工学部　宮本光貴

1. はじめに

プラズマ対向材料中の水素同位体吸蔵特性は，ヘリウム関連欠陥の影響を強く受けることが指摘されている．しかしこれまで報告されている実験条件はごく限られたもので，実機環境下で問題となる複合的なプラズマ照射環境における系統的な研究は少ない．そこで，本研究では，応用力学研究所設置の D-He 混合プラズマ照射が可能な高密度プラズマ発生装置 APSEDAS により，低エネルギー混合プラズマ照射した試料の微視的損傷組織とその重水素保持特性に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした．

2. 実験方法

本実験では，ITER におけるダイバータの有力候補材料であるタングステンを試料として用いた．㈱ニラコ社製の粉末焼結タングステンを 1173K, 30min 真空焼鈍したのち，PWI 模擬実験装置 APSEDAS を用いてプラズマ曝露実験を行った．今年度の実験では，高分解能質量分析装置の不具合のため，僅かな質量差を有するヘリウム，重水素の分離測定ができなかった．その為，ヘリウムプラズマ曝露後の試料を脱ガス熱処理（>1300K）した後に，重水素プラズマに曝す逐次照射を行った．また，重水素吸蔵特性に与える微視的損傷組織の影響を評価するために，UCSD 設置の PISCES で重水素・ヘリウム混合照射した試料の断面組織観察なども行った．

3. 結果および考察

図 1 は，ヘリウム予照射後脱ガス熱処理したタングステン試料における重水素プラズマ照射後の昇温脱離スペクトル(実線)である．He 予照射を行っていない試料からの脱離スペクトル(破線)と比較して，高温側での脱離はほとんど見られず，脱離ステージは低温側に大きくシフトしている．これは，ヘリウム予照射した試料における重水素の強いトラッピングサイトの実効的な消失を示していると思われる．この理由として，本実験結果のみからでは，ヘリウム照射後に行った脱ガス熱処理によるアニールの効果も無視できない．ただし，ヘリウムプラズマ照射による重水素保持量の減少は，他の実験においても報告されており[1,2]，ヘリウム照射に起因した損傷組織が重水素吸蔵に少なからず影響することは確かだと考えられる．図 2 には，PISCES で重水素，ヘリウム混合プラズマ照射したタングステン試料の微細組織観察結果を示す．図は，照射後の試料を照射表面

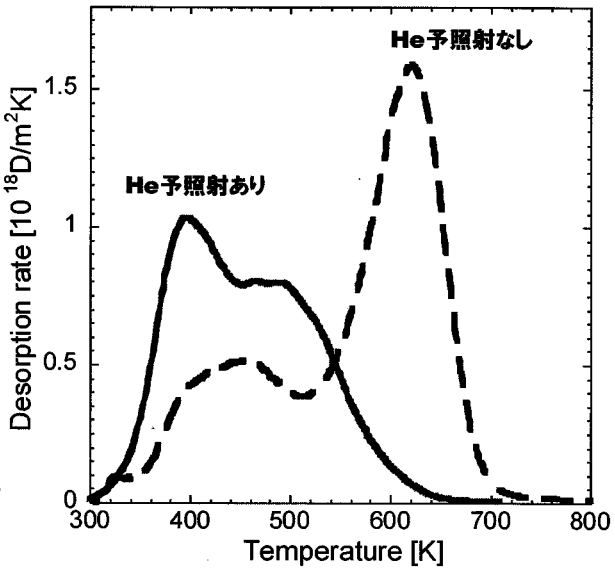


図 1　ヘリウム予照射後脱ガス熱処理(>1300K)したタングステン試料における重水素プラズマ照射後の昇温脱離スペクトル(実線)．比較のため He 予照射なしの試料からの脱離スペクトル(破線)も示している．

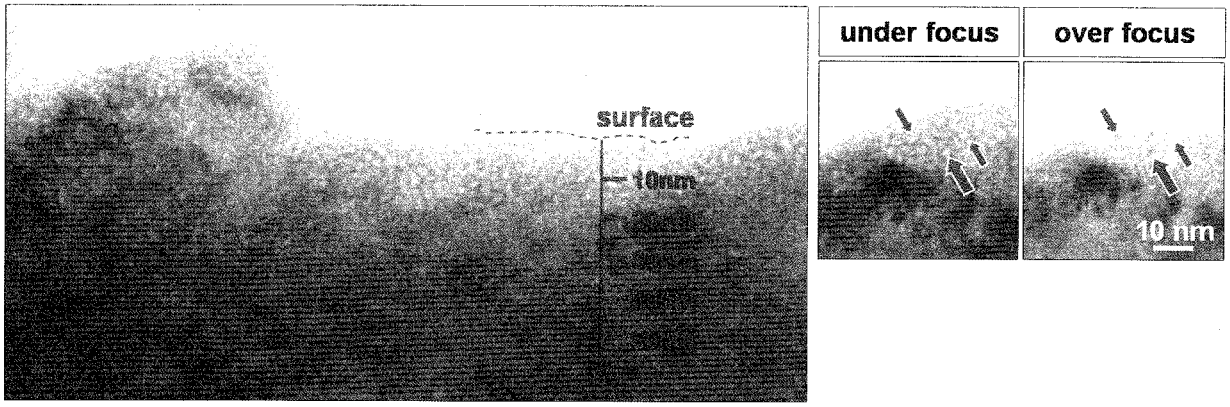


図 2　重水素，ヘリウム混合プラズマ照射したタングステン試料の断面微細組織.

に垂直に切り出し，機械研磨した後に，イオンスライサーにより薄膜化し，断面を TEM 観察したものである．図中に見られる白い円形のコントラストは，不足焦点，過焦点により白黒に反転(位相コントラストによる)することからキャビティの存在を示している．重水素単独プラズマに曝した試料においては，同様のコントラストが観察されないことから，これらはヘリウムバブルだと考えられる．図から，ヘリウムバブルが飛程(~数 nm)を遥かに超えた深部にまで極めて高密度に形成していることが分かる．ヘリウム予照射あるいは混合照射した試料において，重水素の強い捕獲が観察されないのは，こうした損傷組織の影響だと考えられた．一部のヘリウムバブル間では，互いに結合している様子も観られることから，これらが重水素の拡散パスとして機能し，重水素は照射中に容易に再放出され，実質的な重水素保持が減少した可能性が考えられる．

今年度は，APSEDAS による重水素およびヘリウムの単独プラズマを用いた逐次照射を行ったが，今後は，実験条件を拡張し，混合プラズマ照射も予定している．イオン照射装置による実験も合わせて行い，重水素吸蔵特性に与える微細組織の影響を定量的に評価する予定である．

[1] Y. Ueda et al., J. Nucl. Matter., 386-388 (2009) 725
[2] W.R. Wampler and R.P. Doerner, Nucl. Fusion, 49 (2009) 115023

● 学術論文

- M. Miyamoto, D. Nishijima, Y. Ueda, R.P. Doerner, H. Kurishita, M.J. Baldwin, S. Morito, K. Ono and J. Hanna, Kotaro Ono, "Observations of suppressed retention and blistering for tungsten exposed to deuterium-helium mixture", Nuclear Fusion, 49 (2009) 065035 (7pp)

● 学会発表等

- 宮本光貴，西島大輔，上田良夫，R.P. Doerner，M.J. Baldwin，小野興太郎，「D-He-Be 混合プラズマ照射したタングステンの損傷形成と重水素吸蔵特性」，プラズマ核融合学会第 26 回年会，京都，2009 年 12 月

● 研究組織

研究代表者：宮本光貴（島根大学総合理工学部助教)
所内世話人：坂本瑞樹（九州大学応用力学研究所准教授)
研究協力者：迫井佑己[a]，尾崎和基[b]，小野興太郎[a]，吉田直亮[b]（[a]島大総理工，[b]九大応力研)

21 特 3－8

ヘリコン波プラズマ(APSEDAS) を用いたミクロンオーダー・ダスト発生および移動現象に関する研究

核融合科学研究所　大型ヘリカル研究部　芦川　直子

目　的

第一壁の損耗および再堆積に関する問題は，損耗による材料損傷と堆積層による壁リテンション核融合分野でのダスト研究は，将来の ITER 等におけるトリチウム蓄積の問題から大型装置で主体的に行なわれ，採取されたダストの粒子径分布，位置分布およびそれらの組成，形状に関する解析結果が得られている．またカメラ計測による移動現象についても解析が行なわれている．これら大型装置での結果を踏まえ，物理現象として理解するためには小型装置を用いた制御された放電環境下でのデータ補間が必要不可欠である．九州大学・応用力学研究所ではヘリコン波による水素プラズマ生成およびターゲット材の表面変質に関する研究が進められており，プローブ測定などによって電子密度，電子温度，空間電位などが計測されている．このようなパラメータが明確である制御されたプラズマ中において加速されたダストの生成から移動および堆積過程に関する研究を行なうことを希望しており，ヘリコン波プラズマ(APSEDAS)装置を用いた実験を行うために本共同研究に申請した．特に今年度はダストの堆積および水素同位体蓄積に関するデータを得ることを目的として APSEDAS で実施経験のある重水素によるタングステン試料への照射を行うこととした．

実験方法

今年度はマシンタイムの関係上 3 月に実際の照射実験を行うため，実験の準備状況について本報告書では述べる．

制御されたプラズマ照射下においてタングステンダスト粒子およびバルク材への重水素照射実験を行う．これまでに実機におけるダスト粒子のダストを測定するために，基板上に堆積させたダストと同基板のみ，それぞれの水素蓄積量を昇温脱離法(TDS)により測定し，それらの差分からダスト中の水素蓄積量を明らかにするという手法を試みた（図 1 参照）．

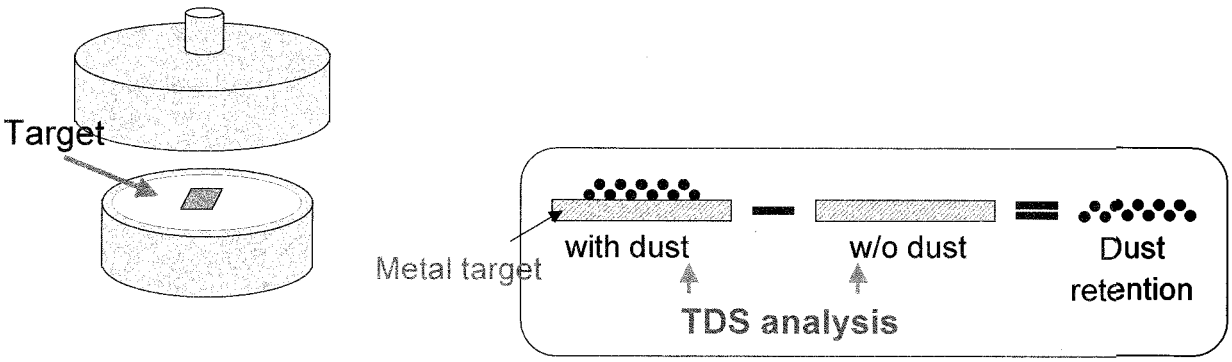


図 1．差分法によるダストの水素蓄積量測定法

これまでにダストの水素同位体蓄積量について報告した文献はあるが，目視でダストを採取しているため，主に 100 ミクロン程度までの粒子に関するデータである．しかし，例えば LHD で真空容器・大気開放後に真空排気法でメンブレンフィルタ上に採取されるダストの粒子径は 8nm～数百ミクロ

ンが主な値であり，粒径の小さなダストほど採取個数は多い．図１に示す差分法を用いるとダスト採取時に粒子径による選択をする可能性が低いため，様々な粒子径に対する蓄積量を評価することが出来る．ただし，これは採取ダストから放出された水素同位体ガスの積算値であり，単体ダストに関する評価ではない．

この方法によりＬＨＤ・ダイバータ板周辺から採取された炭素ダストへの水素リテンションを測定した結果，ダストを含む基板と含まない基板では放出量およびピーク位置ともに優位な違いが観測され，同方法の有効性を示した．

しかしながら，今後より詳細な解析および較正を行うためには実験室実験による制御環境下での分析結果が必要であり，APSEDAS 実験で調整可能なパラメータを議論し，下記のような比較実験を計画した．

１）ダスト粒子とバルク板との比較（ターゲット形状の依存性および総表面積の影響）

２）プラズマ・パラメータ依存性（プラズマ照射下・非照射下の比較）

３）料依存性（タングステンと SS316 の比較）

ダスト粒子はニラコ社で市販されているタングステン粒子（径１ミクロン）を使用することとした．実験に対しては電子天秤にて使用する粒子の重量を測定し，その後重水素プラズマ照射実験を行う．実験終了後は TDS による重水素脱離量を測定すると共に，走査型電子顕微鏡（SEM）もしくは透過型電子顕微鏡（TEM）による表面形状の変化について分析を行う．さらに可能であれば EDX もしくはＸ線光電子分光法（XPS）による組成分析もしくは化学結合状態の分析を行う．

まとめ

今年度は APSEDAS で実験するための議論，準備を主に行い，その結果 3 月に照射実験を行う予定である．ターゲット材料はダングステンとし，ヘリコン波プラズマ・パラメータを規格化し，バルクおよびダスト粒子に対して重水素プラズマを曝露させることとした．その後，事後解析として TDS による重水素保持量に関する分析を行う予定である．

研究組織

代表者　芦川直子　　核融合科学研究所　助教

協力者　相良明男　　核融合科学研究所　教授

　　庄司多津男　　名古屋大学　准教授

　　坂本瑞樹　　九州大学応用力学研究所　准教授（所内世話人）

　　東園雄太　　九州大学応用力学研究所　研究員

大域的な不純物輸送過程のモデリング

日本原子力研究開発機構　核融合研究開発部門　星野一生

目的

スパッタリング等により発生した壁材料不純物は、周辺・炉心領域の大域的な輸送を経て、炉心に蓄積もしくは固体壁に再堆積する。不純物は、大域的な輸送において炉心・周辺プラズマから様々な影響を受けるため、それらを適切にモデル化し解析コードに取り入れる必要がある。

本研究では、炉心・周辺領域における不純物の大域的な輸送過程の解明を目的とする。そのため、慶応大・畑山グループと申請者が開発した IMPGYRO（対象：高 Z 不純物）や、原子力機構・清水、滝塚らが開発した IMPMC コード（対象：低 Z 不純物）等の大域的不純物輸送コードを用いて、実験データ（QUEST、JT-60U 等）の解析を進めると共に、複数コードによる解析結果の比較を行う。これらの結果に基づき、不純物の大域的な輸送過程に対して支配的となる物理機構の解明を行う。また、得られた知見を元に、不純物輸送モデルの精度向上を目指すとともに、炉心・周辺プラズマコード、損耗・再堆積コード等とを結合し、プラズマ-不純物-壁相互作用の総合的な解析を目指す。

研究の経過報告

本年度は、不純物の大域的輸送過程として、トロイダル回転トカマクプラズマにおける高 Z 不純物の炉心輸送を中心に解析を進めた。解析の結果、トロイダル回転しているトカマクプラズマ中では、高 Z 不純物に対して電離・再結合過程に起因する内向きピンチ（PHZ: inward Pinch of High-Z impurity due to the ionization/recombination processes）が起こることがわかった[成果発表 5, 8, 11]。PHZ の発生機構は以下の通りである。

1）トロイダル回転プラズマでは、摩擦力により背景プラズマの回転速度程度まで加速されるため、質量の大きい高 Z 不純物は高エネルギーとなる。

2）エネルギーが高いため、磁気面からの粒子軌道のずれが大きくなる。この結果、不純物の軌道上で電子温度の変化が生じる。

3）電子温度の変化に伴い、不純物の価数 Z が変化する。このとき、電離・再結合過程の時間遅れのため、温度がもっとも高い（低い）位置で、最大（最小）の価数をとらない。(Fig. 1 参照)

4）価数変化に伴う磁気ドリフト速度 v_d（$\propto Z^{-1}$）の、ポロイダル面上部と下部における非対称性から、内向きピンチが発生する。

PHZ は、高温炉心領域においても容易に電離・再結合反応が起こる高 Z 不純物に特有の現象であり、Fig. 2 に示すように回転方向によらず回転速度のみに依存して起こる。PHZ 速度を見積もるために解析モデルを開発と共に、PHZ が実際に起こりうることを IMPGYRO シミュレーションにより検証した。今後、新古典理論でよく知られている径電場によるピンチの効果と合わせ、トロイダル回転速度に依存する高 Z 不純物の炉心蓄積過程の解析を総合的に進めていく予定である。

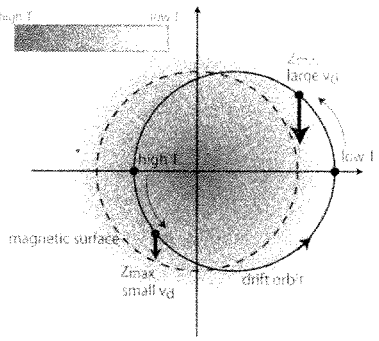


Fig. 1 トロイダル回転プラズマにおける電離・再結合過程に伴う高 Z 不純物の内向きピンチの概念図

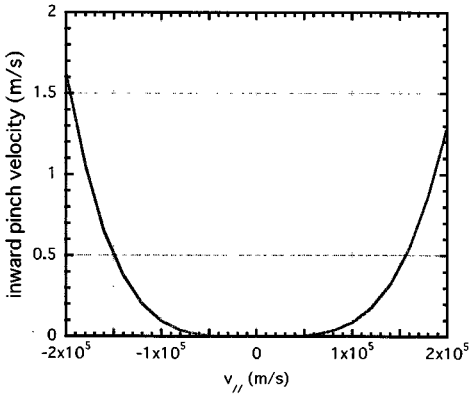


Fig. 2 解析モデルにより見積もった磁力性に平行な速度 $v_{//}$（〜トロイダル速度）に対する PHZ 速度

研究成果報告

1. K. Hoshino, et al., "Numerical Analysis of Incident Angle of Heavy Metal Impurity to Plasma Facing Components by IMPGYRO", Journal of Nuclear Materials, 390-391 (2009) 168-171.
2. M. Toma, et al., "Coupled IMPGYRO-EDDY simulation of tungsten impurity transport in a realistic tokamak geometry", Journal of Nuclear Materials, 390-391(2009)295-298.
3. K. Shimizu, et al., "Kinetic Modelling of Impurity Transport in Detached Plasma for Integrated Divertor simulation with SONIC (SOLDOR/NEUT2D/IMPMC/EDDY)" Nuclear Fusion, 49(2009)065028.
4. M. Toma, et al., "Analysis of the high-Z impurity transport in a tokamak by the IMPGYRO code", Journal of Plasma and Fusion Research SERIES, 8 (2009) 1116.
5. K. Hoshino, et al., "Accumulation process of high-Z impurity in toroidal rotating tokamak plasma", in Proc. 12th International Workshop on Plasma Edge Theory in Fusion Devices, Rostov Veliky, Russia, September 2009, to be published in Contrib. Plasma Phys.
6. K. Shimizu, et al., "Self-consistent integration of core and SOL/Divertor transports (TASK/SONIC) and its application to JT-60SA operational simulation", in Proc. 12th International Workshop on Plasma Edge Theory in Fusion Devices, Rostov Veliky, Russia, September 2009.
7. M. Toma, et al., "Coupling the IMPGYRO and SOLPS codes to analyze tokamak plasmas with tungsten impurities", in Proc. 12th International Workshop on Plasma Edge Theory in Fusion Devices, Rostov Veliky, Russia, September 2009.
8. 星野一生、他、「トロイダル回転に伴う高Z不純物の炉心蓄積過程」、プラズマ・核融合学会　第２６回年会、4pE18P、京都、２００９年１２月.
9. 清水勝宏、他、「主プラズマと周辺プラズマ輸送の統合モデリング」、プラズマ・核融合学会　第２６回年会、4pD42P、京都、２００９年１２月.
10. 藤間光徳、他、「IMPGYRO-SOLPS結合コードによるトカマクプ周辺ラズマの解析」、プラズマ・核融合学会　第２６回年会、4pD35P、京都、２００９年１２月.
11. 星野一生、他、「高Z不純物の原子過程に起因する内向きピンチ」、第８回核燃焼プラズマ統合コード研究会、九大応力研、２００９年１２月.
12. 清水勝宏、他、「主プラズマと周辺プラズマ輸送の統合化　-MPMDシステムとデータ交換について-」、第８回核燃焼プラズマ統合コード研究会、九大応力研、２００９年１２月.

研究組織

氏名	所属	職名	役割、担当分野
星野　一生	原子力機構	博士研究員	サブテーマ代表者
坂本　瑞樹	九州大学応用力学研究所	准教授	所内世話人
清水　勝宏	原子力機構	研究主幹	低Z不純物のモデリング
滝塚　知典	原子力機構	嘱託	低Z不純物のモデリング
畑山　明聖	慶應義塾大学	教授	高Z不純物のモデリング
藤間　光徳	慶應義塾大学	修士２年	高Z不純物のモデリング
大宅　薫	徳島大学大学院	教授	固体表面のモデリング
井内　健介	徳島大学大学院		固体表面のモデリング
仲野　友英	原子力機構	研究員	実験データ解析
図子　秀樹	九州大学応用力学研究所	教授	不純物計測

ヘリウムプラズマ照射によるタングステン繊維状ナノ構造形成に関する研究

研究代表者 名古屋大学大学院工学研究 大野哲靖

1．はじめに

次世代核融合実験炉ITERにおいて、タングステン(W)は高融点、低スパッタリング率、低水素吸蔵などの特性によりダイバータ板や炉内計測用ミラーの候補材料となっている。ヘリウムは核融合反応生成物であるため、タングステンへのヘリウム照射の影響を調べることは重要である。

これまで，低エネルギーイオン照射ではタングステン対向材料には損傷は起こらないと考えられてきた。しかし、最近の実験において、物理スパッタリング閾値以下の入射エネルギーのヘリウムイオン照射によって表面にバブル・ホールや繊維状ナノ構造の形成が観測されている。

これまでバブルについては形成条件が調べられてきたが、繊維状ナノ構造については不明な点が多い。本共同研究では繊維状ナノ構造の形成条件と照射損傷材料の構造を詳細に調べることにより形成機構の解明を目的とする。

2．実験装置

実験には直線型ダイバータプラズマ模擬実験装置NAGDISを使用した。本装置は傍熱型LaB_6陰極を用い、定常的に高密度ヘリウムプラズマ(>$10^{19}/m^3$)を生成することができる。図1に実験装置の概略図を示す。

ヘリウムプラズマ照射中のタングステンの光学反射率をHe-Neレーザーとフォトダイオードを用いて計測した。バックグラウンドの光を取り除くために632.8 nmのフィルタ及び光学チョッパーと参考用フォトダイオードを用いた。入射イオンエネルギーは試料に印加する電圧で調整し、試料温度は入射イオンエネルギーとイオン粒子束によって調整した。試料温度は放射温度計(放射率:0.42)で計測した。粒子束は試料に流入するイオン電流から計測した。プラズマ照射後の試料をSEMで観測した。

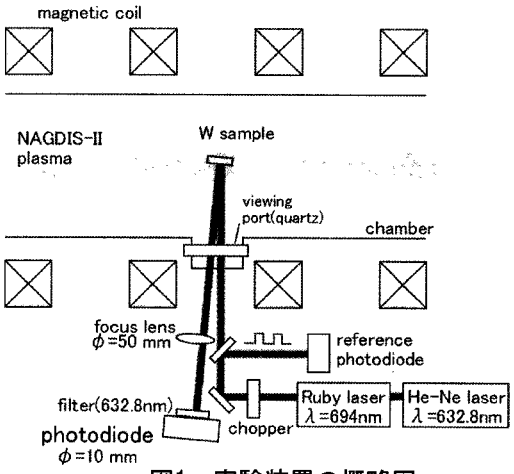


図1 実験装置の概略図

3．実験結果

入射イオンエネルギーE_iを変化させてプラズマ照射中の反射率計測を行った。E_iの上昇とともに試料表面温度は1780 Kから2100 Kまで上昇した。実験結果を図2に示す。E_iを上昇させることで反射率の低下が速く進行した。ヘリウムプラズマ照射後の試料をSEMで観測すると、E_i = 15eVの時にはバブルが形成されており、30 eV以上の時には繊維状ナノ構造の形成が確認された。

E_iを50eV一定とし，試料温度を変化させる実験を行った。図３(b)は，異なる表面温度，入射ヘリウムイオンエネルギーでの，ヘリウムプラズマ照射によるタングステン表面構造変化のSEM写真を示している（パラメータは図３ (a)に対応）。 試

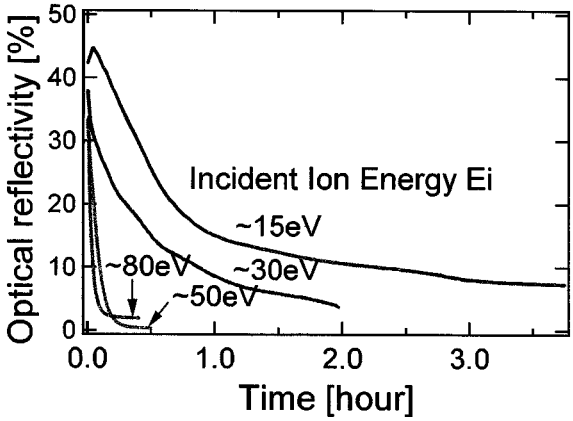
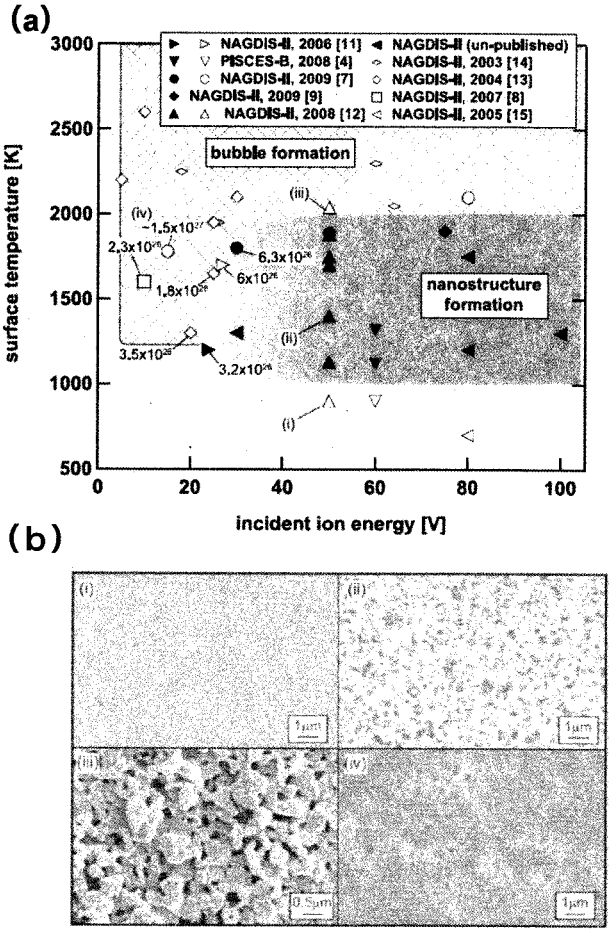


図２ヘリウムプラズマ照射中のタングステン反射率の時間変化

料温度が900 Kのときには表面構造に変化は見られない(i)。一方，1130 K～1750 Kの表面温度では繊維状ナノ構造が形成された（ii)。さらに表面温度を上昇させると試料温度が2000Kの時は，繊維状ナノ構造は形成されず，ヘリウムバブルのみが形成された(iii)。

今回の実験結果とこれまでにNAGDIS-IIを用いて行われた実験結果[1, 3-5]，さらにUCSDの実験結果[6]に基づき，ヘリウムバブルと繊維状ナノ構造形成の入射イオンエネルギーと表面温度依存性をまとめた（図３(a)）。各黒塗り点が繊維状ナノ構造が形成された条件で、白塗り点が形成されていない条件である。

図３(a)の灰色でハッチングされた領域である，試料温度が1000-2000K，入射イオンエネルギーが約20eV以上の領域で，繊維状ナノ構造が形成されることが分かった。



４．まとめと今後の課題

ヘリウムプラズマ照射によるタングステン繊維状ナノ構造形成に関して，表面温度依存性，入射イオンエネルギー依存性を粉末焼結タングステンについて詳細に調べ，タングステン繊維状ナノ構造形成条件を実験的に明らかにした。

さらに，結晶粒毎にヘリウムバブル及び繊維状ナノ構造形成が異なる現象が観測された。以上の成果に基づき今後，（１）ヘリウムバブル及び繊維状ナノ構造形成の結晶方位依存性及び（２）タングステン以外の金属材料での維状ナノ構造形成条件の解明を目的に研究を遂行する。

図３　ヘリウムプラズマ照射によるバブル･ホールと繊維状ナノ構造形成：(a)バブル･ホールと繊維状ナノ構造形成のイオンエネルギーと表面温度依存性，(b)各パラメータ領域でのタングステン表面SEM写真

参考文献

[1] D. Nishijima, *et al.*, J. Nucl. Mater. **329**, 1029(2004).
[2] S. Takamura, *et al.*, PRF **1**, 051 (2006).
[3] D. Nishijima, *et al.*, J. Nucl. Mater. **313**, 97 (2003).
[4] S. Kajita, *et al.*, J. Appl. Phys. **100**, 103304 (2006).
[5] S. Kajita, *et al.*, Nucl. Fusion **47**, 1358 (2007).
[6] M. J. Baldwin, *et al.*, Nucl. Fusion **48**, 035001 (2008).

成果報告（論文、学会発表等）

(1) S. Kajita, W. Sakaguchi, N.Ohno, N.Yoshida and T. Saeki, “Formation process of tungsten nanostructure by the exposure to helium plasma under fusion relevant plasma conditions”, *Nucl. Fusion* **49** No 9, 2009, 095005 (6pages).

(2) W. Sakaguchi, S. Kajita, N. Ohno, M. Takagi, “In situ reflectivity of tungsten mirrors under helium plasma exposure”, *Journal of Nuclear Materials, Volumes 390-391, 2009, Pages 1149-1152.*

タングステン中の水素同位体挙動に及ぼすヘリウム同時照射影響

大阪大学　大学院工学研究科　上田良夫

１．目的

タングステン中の水素の拡散・捕獲挙動は、タングステンプラズマ対向材料の水素吸蔵、水素透過、水素脆化（ブリスタリングなども含む）と密接な関係を持ち、そのメカニズムや、タングステン材料組織の影響を明らかにしておくことは大変に重要である。この目的のため、従来タングステンに水素ビームや水素プラズマを単独で照射する実験や、不純物（ヘリウム、壁材料イオン）を予照射し、その後水素ビームを照射する実験は多く行われている。しかしながら、水素イオンとヘリウムイオンの同時照射実験はほとんどなく、これらのイオンが同時に照射されることによって生じる相乗効果は全く分かっていない。さらに、表面の損耗を伴う条件では、予照射により形成された混合層は、本照射を行う際に損耗により失われてしまう。

そこで、本研究では、大阪大学の水素イオンとヘリウムイオンのエネルギーを独立に制御して照射できる定常高粒子束複合イオン照射装置（HiFIT）を利用して、重水素イオン、及びヘリウムイオン、を同時照射し、タングステン材料中の重水素吸蔵量や、水素透過挙動に影響を及ぼすヘリウムバブルの形成過程を調べる。材料の分析を行うにあたり、応用力学研究所の複合表面分析装置や水素動態観測装置を活用して、水素・ヘリウムの深さ分布やヘリウムバブルの大きさや密度などを測定し、水素・ヘリウム同時照射の影響を詳しく調べる。

２．実験方法・結果

本年度は、重水素とヘリウムを同時照射したタングステン材料の重水素透過挙動を調べた。実験は、大阪大学が所有する高粒子束定常イオンビーム照射装置 HiFIT を利用し、今年度新たに設置した透過実験装置（POD-HD）を用いた。タングステンの試料は、厚み 30 μm と 75 μm を使用し、両面をラップ研磨（鏡面研磨）し、1300℃、1 時間、水素雰囲気中で再結晶化処理を行なった。試料は背面より赤外線ヒーターにて、約 800℃まで加熱することができる。この温度はブランケットの第一壁に相当する温度であり、ブランケット内のトリチウムの拡散挙動を理解するための基礎データを得ることができる。

重水素イオンはエネルギー1keV、フラックス～$1x10^{20}$ $m^{-2}s^{-1}$で照射した。ヘリウムイオン割合については、水素・ヘリウム混合イオンビームの質量分析結果から、イオン源内のヘリウムガスの分圧とヘリウムイオンの割合を求め、その結果が重水素とヘリウムの混合イオンビームでも適用できると仮定した。また、イオンビーム中には、0.1~0.2%の不純物（酸素、炭素）が含まれるが、透過挙動にほとんど影響はない。

実験では、まず重水素のみを照射し、試料温度、フラックス、試料厚を変化させて、透過フラックスの変化を調べた。その結果、遅延時間法（Lag Time Method）から算出したタングステン内の重水素の拡散係数は、従来 1000 K 程度以上で求められていた Zakharov[1]の値と同じアレニウスの関係で表されることが分かった。この時の活性化エネルギーは、1.13 eV であった。また、透過現象の律速仮定をフラックス依存性、試料厚依存性より見積もったところ、表面・透過面とも拡散律速であった。表面を鏡面研磨したことで、問題となる酸化層が大幅に少なくなったため、表面再結合への影響が少なかったと考えられる。

次に、図１に重水素とヘリウムを同時照射した場合の透過フラックスの時間変化を示す。透過フラッ

クスの変化の様子は温度によって大きく異なり、1000 K の場合は、2%のヘリウムイオンを加えると約半分に減少しその後一定値となった。一方、600 K の場合は、ヘリウムイオンが加わると、透過フラックスがほとんど観測されなかった。また、600K の場合に、透過フラックス Γ_p の入射フラックス ϕ 依存性を調べた。重水素のみの場合は、$\sim\phi^{1.2}$ であったが、重水素ヘリウム同時照射では、$\sim\phi^{0.7}$ に変化した。入射重水素イオンの表面からの放出が拡散律速の場合は、$\sim\phi^{1.0}$ で再結合律速の場合は、$\sim\phi^{0.5}$ となることが簡易モデルから知られている（透過面へは拡散律速と仮定)。したがって、ヘリウムを添加したことで、表面からの放出が拡散律速から、再結合律速に変化した可能性がある。考えられる理由として、表面近傍にヘリウムバブル層が形成され、さらにそれが合体して表面への細孔が形成されそこを通って重水素分子が急速に表面に到達するようになり、実効的な拡散係数が減少したため、結果として再結合律速となったことが理由として考えられる。今後は、ヘリウムバブル層の詳細な分析などを通じて、研究を進める必要がある。

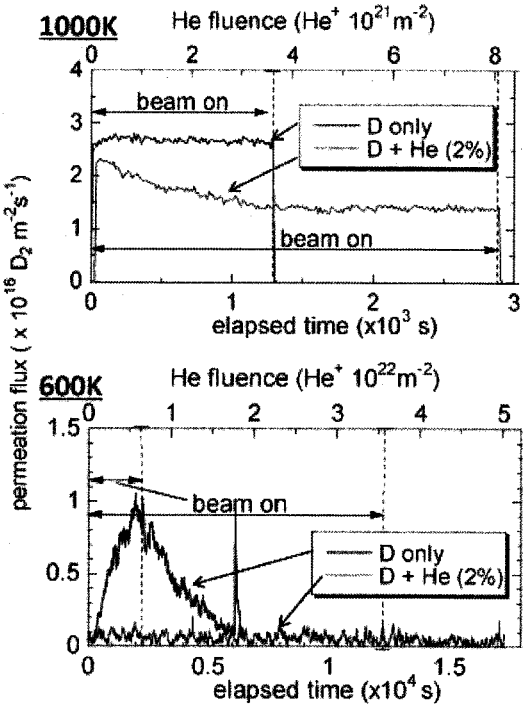


図１　重水素・ヘリウムイオン同時照射時の透過フラックスの時間変化。イオンエネルギー1keV、フラックス 1.4x10^{20} m^{-2}s^{-1}.

３．まとめと今後の課題

重水素とヘリウムを混合照射した場合に、透過フラックスが抑制されることを初めて実験的に明らかにした。また、温度、入射フラックス、試料厚依存性などから、本実験で使用したタングステン中の重水素の拡散係数を導出し、また、透過律速仮定が、表面拡散・背面拡散律速（通称：DD）であることを明らかにした。さらに、ヘリウムを入射した場合は、表面への実行的な拡散が早くなり、その結果透過フラックスが減少したと考えられる。今後はさらにヘリウムの割合やエネルギーを変化させて実験データを取得すると共に、ヘリウムが注入された表面層の微細構造の測定を行ない、タングステン表面近傍での重水素挙動を明らかにする。

４．研究成果発表

1. Y. Ueda, H. Kashiwagi, M. Fukumoto, Y. Ohtsuka, N. Yoshida: EFFECTS OF HELIUM IONS ON HYDROGEN ISOTOPE BEHAVIOR IN TUNGSTEN, FUSION SCI. TECH. 56 (2009)85-90.
2. Y. Ueda, M. Fukumoto, J. Yoshida, Y. Ohtsuka, R. Akiyoshi, H. Iwakiri, N. Yoshida: Simultaneous irradiation effects of hydrogen and helium ions on tungsten, J. Nucl. Mater., 386–388 (2009) 725–728.

参考文献

[1] A.P. Zakharov, V.M. Sharapov, E.I. Evko, Fiz. Khim. Mekh. Mater. 9 (2) (1973) 29.

ニューラルネットワークのQUESTプラズマ計測への応用

電気通信大学　竹田辰興

目的　われわれは、各種の計測データからプラズマ諸量の空間分布を精度良く再構成したり、時系列データから有用な情報を抽出することを目的として、ニューラルネットワーク選点法（NNCM: Neural Network Collocation Method）及びKohonenの自己組織化マップ（SOM: Self-Organizing Maps）に着目して研究している。今年度の共同研究では、時系列データから得られる情報にSOMを適用し異常現象の発生を予測する可能性について検討する。

研究概要　時系列データを解析しシステムの挙動を予測する方法として、測定された時系列データの複数時点のデータを入力して未来の時点の値を予測するニューラルネット時系列予測法がある。これは、システムを支配する（隠れた）力学系の相空間軌道情報の一部が時系列データとして観測されていることを暗黙の内に仮定する非線形予測で、Hernandez 等[1] によってTEXTトカマクのディスラプション予測のために研究され、後に多くの研究者によって研究が進められた。例えば、芳野[2]によるJT60プラズマのディスラプション予測の研究がなされた。

この方法は、ある時間領域における時系列データから未来の時点における値を予測することを目的としているが、それらのデータを用いて、その時間領域におけるシステムの状態を分類することが出来れば、未来の状態の予測だけでなくシステム挙動について更に多くの情報を得られるものと期待できる。各時間領域におけるｎ個の測定値で作られるｎ次元ベクトルを低次元（通常２次元）空間に写像すれば、少ないパラメータ空間内でシステムを分類しシステムが（ディスラプションのような）顕著な現象が起こる状態に近いかどうかを判定できる。この目的のためにKohonenの自己組織化マップ(SOM: Self-Organizing Map) [3] は有効であると考えられる。

具体的には、時刻ｔ（ある幅を持った時間領域をｔで代表する）におけるｎ個のデータを成分とするｎ次元ベクトル$\mathbf{x}(t)$を２次元空間（平面）上の有限個の領域（ユニット）のいずれかに写像する。SOMのアルゴリズムを使うことで、ベクトル$\mathbf{x}(t)$は、何らかの意味で似ているベクトル同士が２次元空間内の同じユニットか近傍のユニット内に写像される。ベクトル$\mathbf{x}(t)$の成分が色々な計測データである場合、一般に、二つのベクトルの表す状態が似ているか否かを判定するのは容易ではないが、SOMはこのような判定を行なう上で有用な技術である。このような解析の可能性を検討するために、楊によるディスラプション予測の研究 [4] で用いられた磁気プローブ信号の時系列データの表す状態の分類を試みた。楊は、この研究で、ディスラプションのニューラルネット時系列予測法の改良案を提案しその有効性を明らかにしているが、誤予測が多いショットと少ないショットがあることも報告している。同じようにディスラプションを予測して

いる時系列データでも、実は異なる状態を表している可能性がある。我々は、この違いをSOMを用いて分類することによって、SOMの可能性を示す。

使用した時系列データは楊の用いた 10 ショット(ショット番号の下2桁で区別して、B13, B15, B20, B21, B23, B24, B25, B26, B27, B28)で、このうち(B13, B20, B21, B23, B27)を学習用(LRN)とし、残りを予測用(PRD)とする。楊の数値実験では、B25 の予測誤差が大きく、B28 の予測は最良であった。測定データは 1.385 ms 毎の磁気プローブ出力で、プラズマ崩壊が発生するまでの測定点数は 490 – 590 である。各ショットから 16 測定点づつずらしながら、幅 48 測定点の窓を作成し、各窓のデータから得た 64 個のフーリエ係数を入力ベクトル x として、SOM によって、ベクトルの分類を行なう。入力ベクトルの数(窓の数)は、学習用が 153 予測用が 184 である。

解析結果の例を図1−4に示す。シンボルの色によって崩壊直前の1, 2, 3窓とそれより前の窓を区別してある。見やすいように、崩壊直前の1, 2, 3窓が含まれるユニットは太枠で表示してある。崩壊直前の1, 2, 3窓が適切に分類されていれば崩壊予測が適切になされると考えてよいであろう。B25 も B28 も学習データで崩壊直前になるユニットに1, 2, 3窓ベクトルが写像されているが、B25 では崩壊前4窓以上前のベクトルもこれらのユニットに多数写像されているので予測誤差が大きくなっていることが理解できる。なお、この数値実験では、多数ある制御パラメータについて最適化はほとんど行なっていない。最適化を行なうことで分類精度を高める余地が十分に残っている。

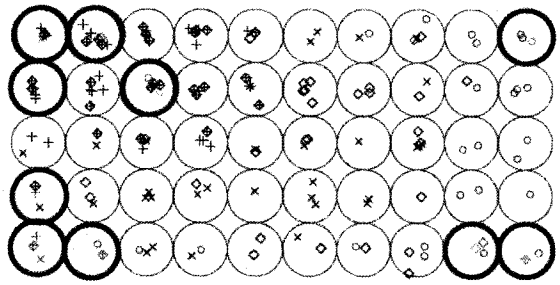


図1 学習データ(LRN)の写像

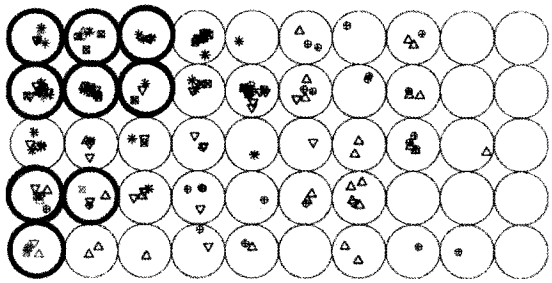


図2 全予測データ(PRD)の写像

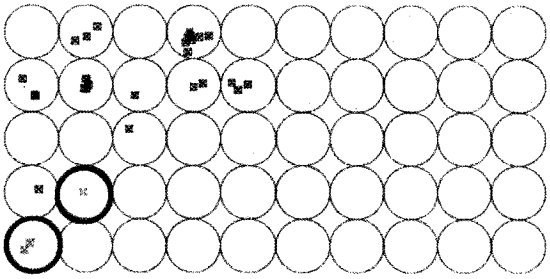


図3 予測データ B25 の写像

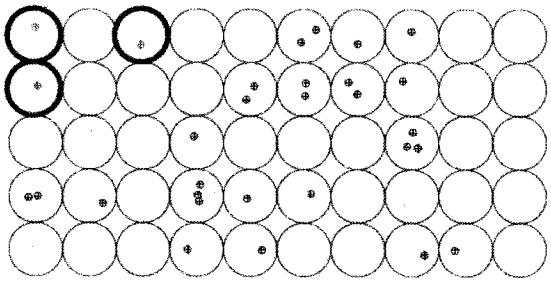


図4 予測データ B28 の写像

参考文献 [1] J.V. Hernandez, et al., Nucl. Fusion **36**, 1009 (1996). [2] R. Yoshino, J. Plasma Fusion Res. **82**, 294 (2006) in Japanese. [3] T. コホネン、自己組織化マップ(シュプリンガー、2005). [4] 楊志紅、ニューラルネットワークを用いた磁場時系列データによるプラズマ崩壊予測(修士論文)(2003, 電気通信大学)

核燃焼プラズマ周辺における沿磁力線輸送の運動論シミュレーション

日本原子力研究開発機構 核融合研究開発部門　滝塚知典

・目的

全日本的な核燃焼プラズマ統合コード計画（BPSI）が九大応力研の矢木教授等を中心に推進されている。その一環として、平成18-20年度に九大応力研特定研究「核燃焼プラズマ統合コード計画」を行った。滝塚はサブテーマの「周辺プラズマモデリング」の研究代表者を務め、統合コード開発に一定の進展を得ることが出来た。その特定研究を終えて、周辺プラズマモデリングにおいては現状よりも精密な物理モデルが必要であることを再認識した。したがって平成21年度は一般研究として、周辺プラズマにおける沿磁力線輸送の運動論シミュレーション研究を行い、流体モデルのための精密物理モデル構築に寄与する。運動論シミュレーションコードとしては、滝塚が開発してきた先進的粒子コードPARASOLを矢木研究室に既に導入し、D2 の A. Froese がシミュレーション研究を始めている。核燃焼プラズマ統合コード開発において、このように整備してきた周辺プラズマ研究環境を活用できるので、応力研の共同研究を実施する価値は非常に高い。

・研究方法

1）粒子コード PARASOL を用いた周辺プラズマの沿磁力線輸送のシミュレーション実行
　電子熱輸送、イオン温度非等方性、イオン粘性、イオン熱輸送
2）沿磁力線輸送シミュレーションのための、PARASOL コードの新物理モデル開発（中心ソースの多様化、リサイクリング領域現象の多様化）とその組み込み、および測定機能とデータ可視出力の充実化
3）多種イオン系の粒子シミュレーションのための二体衝突モデルの開発
4) PARASOL シミュレーションと通常流体シミュレーションの比較
5) PARASOL シミュレーションデータベースに基づく周辺プラズマ流体モデリングの改良
6）統合コードのための周辺プラズマモデリングの検討
7）核燃焼シミュレーションのための周辺プラズマコードとコアプラズマコードとの統合化

・研究結果

1）先進的粒子コード PARASOL 1 次元バージョンを九大矢木研計算機システム上で用いて、遠隔放射冷却がある SOL-ダイバータプラズマ中の磁力線平行方向電子熱輸送のシミュレーションを行なった。衝突が多い場合は、伝導熱流束は Spitzer-Harm 形式に一致することを確かめた。また長平均自由行程のときは限界係数 α_e に制限される自由熱流束になる。このとき限界係数 α_e は低放射損失条件ではシース制限値 0.1 程度に小さくなるが、高放射損失条件では自由流の 1 程度まで大きくなる[3]。さらに 1 次元 PARASOL の粒子源・熱源および放射冷却モデルを発展させて、電子熱輸送に対する分布関数効果を詳しく調べた。遠隔放射冷却ダイバータプラズマ中に残存する高温テールにより限界係数α_e が 1 より大きくなることを定性的に評価した[5,12]。イオンの磁力線平行方向熱輸送についても 1 次元 PARASOL シミュレーション研究を行なった。ダイバータ領域でのイオン冷却が 少ないときは、イオン限界係数 α_i は電子 α_e と同様に 0.1 程度の値になっている。高リサイクリングでダイバータ領域イオン温度が低下すると、残存する高温テールイオンにより α_i は容易に 1 より大きくなる[7,12]。

2）2 次元トロイダル PARASOL コードにより、トカマクの SOL 流構造についてシミュレ

ーションを行なった。セパラトリクスのヌル点の上下の違いで大きく異なる SOL 流構造のシミュレーション結果とトカマク実験測定結果が定性的・定量的に非常によく一致していることを示した。パラメータを変えた一連のシミュレーション結果を基にして、複雑な SOL 流構造形成の機構には、自己無撞着電場効果に加えイオンの軌道効果が大きく寄与していることを明らかにした[1]。上記 PARASOL シミュレーション結果に基づいて、トカマク中の周辺プラズマ流の形成に関する「イオン軌道誘起流モデル」を提起した。このモデルを総合的ダイバータシミュレーションの流体モデルに適用することにより、これまでの流体モデルで再現できなかったダイバータ実験結果を正確に模擬できるようになる [4,10]。

3) 不純物を含む多種イオン系の SOL ダイバータプラズマを粒子シミュレーションするとき、これまでの二体衝突モデルは不十分であった。Takizuka-Abe 二体衝突モデルを発展させ、新たに多種イオン系の粒子シミュレーションに適用できる二体衝突モデル (Kawamura-Takizuka model) を提案した[9]。

4) ダイバータコード SONIC：ダイバータプラズマ流体コード SOLDOR／中性粒子輸送モンテカルロコード NEUT2D／不純物輸送モンテカルロコード IMPMC：(原子力機構)の高精度・高速化を中心に開発を進展させた。特に不純物コード IMPMC の熱力モデル改良と粒子-壁相互作用モデルの改良を行い、放射冷却ダイバータおよびヘリウム排気のシミュレーション研究を行なった[2,8]。

5) 3 次元構造を持つ周辺プラズマに適応し粒子-壁相互作用まで精度よく模擬できる不純物の 3 次元モンテカルロ輸送コードを開発し、LHD における炭素の再堆積についてシミュレーション研究を行った[11]。

6) コアプラズマ輸送コード TASK と周辺プラズマ輸送コード SONIC の統合化作業を進めた。核燃焼プラズマ統合シミュレーション計画のコード間連結データ BPSD の概念を大規模並列計算手法に矛盾無く取り入れることに成功した[6,13]。

7) 大上記の共同研究に関し、BPSI 研究会および実質的な作業会を開催した。
(1) 平成 21 年　5 月 14-15 日；九大応力研（応力研共同研究作業会／3 名）
(2) 平成 21 年　5 月 21 日　　；京大　　（BPSI 作業会／6 名）
(3) 平成 21 年　7 月　9-10 日；原子力機構（共同研究作業会／2 名）
(4) 平成 21 年　9 月 14-30 日；原子力機構（共同研究作業会／2 名）
(5) 平成 21 年 12 月　3 日　　；京都　　（BPSI 作業会／6 名）
(6) 平成 21 年 12 月 17-18 日；九大応力研（BPSI 研究会）
(7) 平成 22 年　1 月 28-29 日；九大応力研（応力研共同研究作業会／3 名）
(8) 平成 22 年　3 月 25 日　　；京大　　（BPSI 作業会／3 名）

・研究成果報告

[1] T. Takizuka, K. Shimizu, N. Hayashi, M. Hosokawa, M. Yagi, "Two-dimensional Full Particle Simulation of the Flow Patterns in the Scrape-off-layer Plasma for Upper- and Lower-Null Point Divertor Configurations in Tokamaks", Nucl. Fusion **49** (2009) 075038 (9pp).

[2] K. Shimizu, T. Takizuka, et al., "Kinetic Modelling of Impurity Transport in Detached Plasma for Integrated Divertor Simulation with SONIC (SORDOR/NEUT2D/IMPMC/EDDY)", Nucl. Fusion **49** (2009) 065028 (9pp).

[3] A. Froese, T. Takizuka, M. Yagi, "Electron Parallel Heat Transport in the Scrape-off Layer Using a Particle-in-Cell Code", Plasma Fusion Res. **5** (2010) S1017.

[4] T. Takizuka, K. Hoshino, K. Shimizu, M. Yagi, "Modelling of Ion Kinetic Effects for SOL Flow Formation", 12th International Workshop on Plasma Edge Theory in Fusion Devices (PET-12),

2-4 September 2009, Rostov Veliky, Russia; to be published in Contrib. Plasma Phys.
[5] A. Froese, T. Takizuka, M. Yagi, "Effect of Source and Sink on Heat Transport in the SOL", PET-12; to be published in Contrib. Plasma Phys.
[6] K. Shimizu, T. Takizuka, K. Hoshino, M. Honda, N. Hayashi, A. Takayama, A. Fukuyama, M. Yagi, "Self-consistent Integration of Core and SOL/Divertor Transports", PET-12.
[7] A. Froese, T. Takizuka, M. Yagi, "Particle Simulation Study of SOL Heat Transport to the Divertor Plate", APFA2009/APPTC2009, 27-30 October 2009, Aomori, Japan.
[8] 大宅薫，井内健介，清水勝宏，滝塚知典，他，"プロジェクトレビュー 核融合炉実現を目指したトリチウム研究の新展開 3. 核融合炉のトリチウム蓄積・排出評価のための理論およびシミュレーションコードの開発"、プラズマ・核融合学会誌 **85** (2009) 695-703.
[9] 滝塚知典，河村学思，"不純物を含む多種イオン系の重み付き粒子シミュレーションのための拡張二体衝突モデル"，第 26 回プラズマ・核融合学会年会，2009 年 12 月 1～4 日，京都市国際交流会館(京都).
[10]滝塚知典，" PARASOL シミュレーションに基づく周辺プラズマ流形成のモデリング"，第 8 回核燃焼プラズマ統合コード研究会 (BPSI-8)，2009 年 12 月 17～18 日，九州大学応用力学研究所.
[11] 河村学思，冨田幸博，"LHD における不純物の再堆積モンテカルロシミュレーション"， BPSI-8.
[12] A. Froese, T. Takizuka, M. Yagi, " Ion and Electron Parallel Heat Transport through the Scrape-off Layer Using PARASOL ", BPSI-8.
[13] 清水勝宏，滝塚知典，星野一生，本多充，林伸彦，高山有道，福山淳，矢木雅敏，"Self-consistent Integration of Core and SOL/Divertor Transports - New MPMD Parallel Computing System and Data Exchange -", BPSI-8.

・研究組織

氏　名	所　属	職　名	役割／担当分野
滝塚　知典	原子力機構	嘱託	代表者／モデリング・粒子シミュレーション
矢木　雅敏	九大	教授	所内世話人
冨田　幸博	核融合研	准教授	境界層プラズマ理論・モデリング
清水　勝宏	原子力機構	研究主幹	ダイバータシミュレーション
河村　学思	核融合研	COE 研究員	3 次元ダイバータモデリング
FROESE Aaron	九大	D2	粒子シミュレーション

金属の損傷組織に及ぼすヘリウムと水素の影響

京都大学原子炉実験所　徐　虬　　義家敏正
九州大学応用力学研究所　渡辺英雄

1. 目的

核融合炉材料の開発と共に、金属中のヘリウムと欠陥との相互作用の研究がますます重要となってきている。高濃度のヘリウムが存在すると、金属の熱伝導性だけではなく、力学特性も低下する。損傷組織の発達を理解するためには、ヘリウムと各種の欠陥との相互作用の知見が重要である。本研究では、FCC 金属におけるヘリウムと転位、原子空孔の相互作用を調べることを目的とする。

2．実験方法

典型的な FCC 金属として Ni を実験に用いた。10%の圧延により転位を導入した。圧延した時に導入された原子空孔は高温での焼鈍により、陽電子寿命が検出できない程度まで消滅させた。焼鈍温度は 673K で、焼鈍時間は 1 時間であった。原子空孔は 100K で電子線照射により導入した。電子照射エネルギーと照射量はそれぞれ 30MeV と $4\times10^{22}e^{-}/m^{2}$ である。その後、マグネットセパレータ付 He イオン銃（オメガトロン社製）を用いてヘリウム注入をした。イオン注入装置においては、バリアブルリークバルブで He ガスの流量を調整し、イオンガンコントローラーでフィラメントの電流や加速電圧等を調整した。He イオンカレントは、ファラデーカップによりを測定した。He イオンビームを均一にするために、ファラデーカップは Φ3 mm と Φ6 mm の 2 つを用いた。その後、試料に He イオンを注入した。なお、He 注入前の真空度は 10^{-5} Pa オーダーで He 注入中はおよそ 2×10^{-4} Pa である。ヘリウム注入は室温で、弾き出し損傷ができない加速電圧 100eV または 150eV で行った。ヘリウム照射量は 5.0×10^{19} He^{+}/m^{2} であった。注入後、1523K まで昇温脱離ガス分析法（TDS）によりヘリウムの放出を調べた。昇温速度は 1K/s であった。

3．実験結果と考察

表 1 にヘリウム注入前後の転位または原子空孔導入した試料の陽電子寿命を示している。良く焼鈍された試料では、一成分の解析しかできない。その寿命は 106.5ps、欠陥が入っていない試料の寿命である。これに対して、10%変形した試料に 164ps の長寿命成分が存在する。その寿命の Intensity は 82.5%である。673K で 1 時間焼鈍後に、長寿命は 164ps から 128.8ps まで減少した。これは転位の寿命と思われる。また、図 1 に示しているように転位網の存在が確認された。一方、低温で電子線照射した試料においては、単原子空孔と思われる 174.1ps の一成分しか存在しなかった。転位または単原子空孔を入れた試料に 5.0×10^{19} He^{+}/m^{2} までヘリウムイオン注入しても、陽電子の寿命はほとんど変わらなかった。

表 1　転位と原子空孔を導入した試料の陽電子寿命測定結果

Procedure		One component	Two components		
		τ_m (ps)	τ_1(ps)	τ_2(ps)	I_2(%)
Well-annealed at 1223 K, 1 hour		106.5±0.2	—	—	
Cold rolled	*Cold rolled to 10% with size*	147.5±0.3	70.2±8.9	164.0±5.6	82.5±2.8
	Annealed at 673 K, 1 hour	116.3±0.2	44.2±4.9	128.8±1.0	85.2±1.3
	Implanted by 0.1 keV He^{+}	120.1±0.3	55.8±7.9	129.4±1.3	87.4±2.4
Electron irradiated	*Irradiated by electron at 100 K*	174.1±1.4	—	—	
	Irradiated by 0.15 keV He^{+}	178.8±0.7	—	—	
Thermal desorption to 1523 K		107.4±0.2	—	—	

図 2 (a) と 2 (b) は、5.0×10^{19} He^{+}/m^{2} までヘリウムイオン注入した転位、単原子空孔を導入した試料のヘリウム放出と昇温温度の関係を示している。図 2 (a)に示している TDS の結果からは 940±10K にヘリ

ワムの放出ピーク A が得られた。これは転位網によるトラップされたヘリウムである。図２(b)に示すように単原子空孔のヘリウム放出ピークは 900 から 1080K である。実はこのピークは 950K の付近に小さなピーク B_1 と 1015K の付近にシャープのピーク B_2 に分かれている。低温で電子線照射によって形成される原子空孔以外に格子間原子も形成される。図２(a)のピーク A の位置と比べ、ピーク B_1 は格子間原子集合体にトラップされたヘリウムである。ピーク B_2 は単原子空孔に放出ヘリウムである。

４．まとめ

本研究では、陽電子消滅寿命測定法と電子顕微鏡の組織観察を用いて、試料の組織を制御しながら、ヘリウムと転位、原子空孔の相互作用を調べた。TDS の結果から転位と単原子空孔から放出されたヘリウムのピークはそれぞれ 940 と 1015K であった。

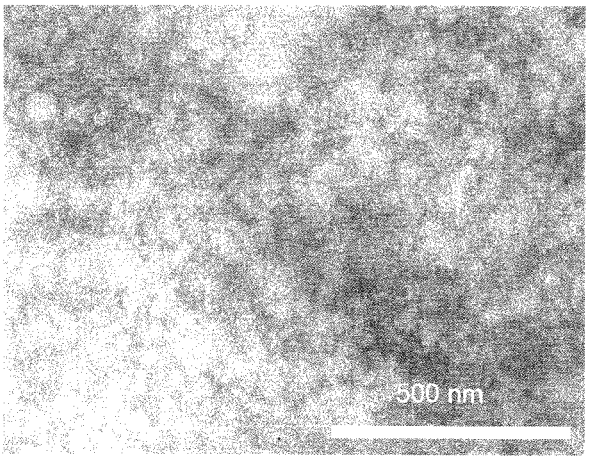


図１　673K で１時間焼鈍した 10%変形の Ni の組織

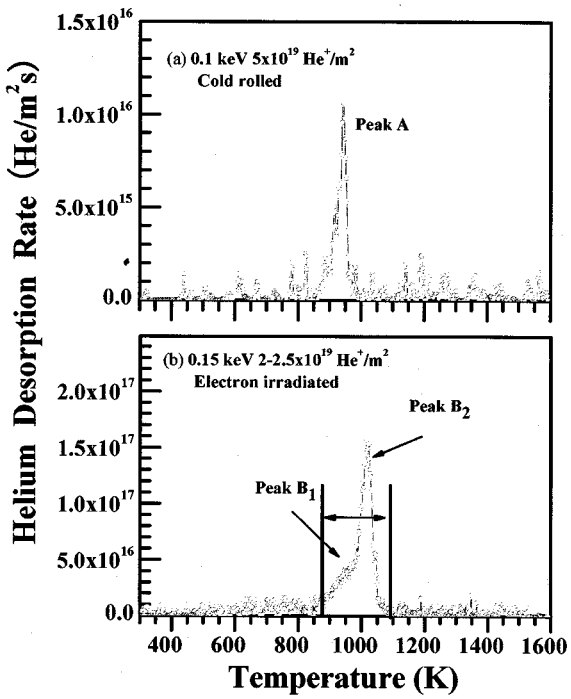


図２　転位(a)と原子空孔(b)導入された Ni のヘリウムの放出

核融合炉材料の高温変形下の内部組織発達過程

核融合科学研究所　室賀健夫

１．目的

核融合炉ブランケット構造材として期待されるバナジウム合金や低放射化フェライト鋼の高温使用限界温度を決めるのは熱クリープ特性と考えられている。熱クリープ変形は、転位のすべり運動、粒界拡散と粒界すべりにより引き起こされ、これを抑えるための組織制御として、転位の固着や粒界の強化などが考えられる。

核融合科学研究所では、「微小試験片高温クリープ試験装置」を製作し、高温クリープ変形実験を進めている。この装置は従来原子炉照射等で用いられていた小型引張試験片（SS-J）を用いた高温一軸引張による熱クリープ試験を可能にするもので、小型で製作の容易な試験片を用いることにより、クリープに及ぼす各材料パラメータの効果の研究を容易に進めることが出来るようになった。

これまでの共同研究で、変形試験を行った V-4Cr-4Ti 合金（NIFS-HEAT-2）及び低放射化フェライト鋼（JLF-1）の組織を応用力学研究所の透過電子顕微鏡で観察することにより、クリープ変形特性と組織変化の関係を明らかにした。 今年度は、新しい視点の研究として、クリープ変形領域以下の低荷重を加えながら長時間時効処理を行い、その後の組織観察、強度特性変化を求めた。本研究は、時効に与える比較的低レベルの荷重効果を明らかにすることを目的とするもので、設計応力以下の荷重を長時間受ける部材の経年変化を明らかにする上で重要なテーマである。

２．方法

核融合科学研究所において、日本と中国の低放射化フェライト鋼候補材（JLF-1, CLAM）の応力下時効を「微小試験片高温クリープ試験装置」を用いて行った。973K で 100h の時効を、荷重を 9, 30, 50MPa 加えながら行なったもので、試験後試料の硬度、引張り強度、高温クリープ特性を求めるとともに、応用力学研究所において、電子顕微鏡観察用試料に切り出し研磨後、微細組織観察を行った。

３．結果と考察

図１は、応力下時効ののち、試料のビッカース硬さの変化を示したものである。時効なしに比べて、荷重が増えるほど硬度が低下していることが分かる。これらは、応力負荷による時効軟化の促進効果を明確に示している。なお、荷重をまったくかけない時効試験はこの装置では不可能であり、最小限の安定荷重を掛けられる条件として、9MPa を採用している。

図２は、応力下事項の後、823K, 250MPa 出クリープ試験を行ったものである。時効時の荷重を上げることによりクリープ寿命が小さくなることが分かる。これは、硬度の低下と対応し、軟化によりクリープ寿命の低下を招いたと解釈される。

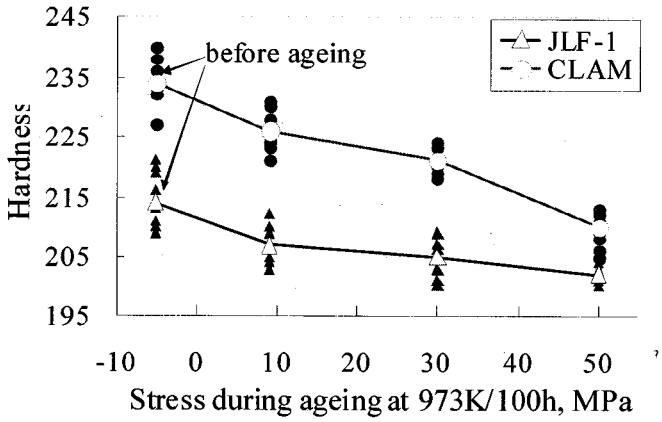


図１、応力下時効による硬度変化

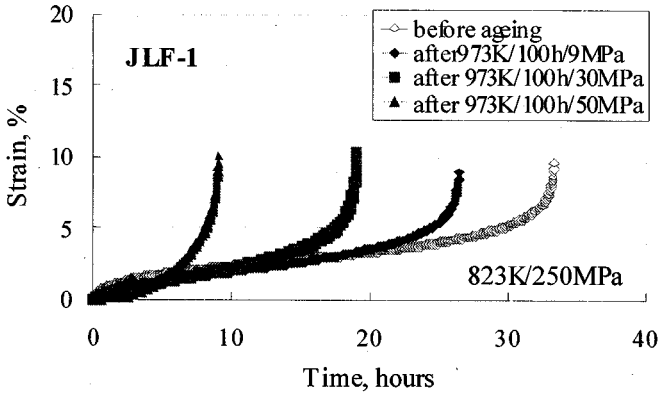
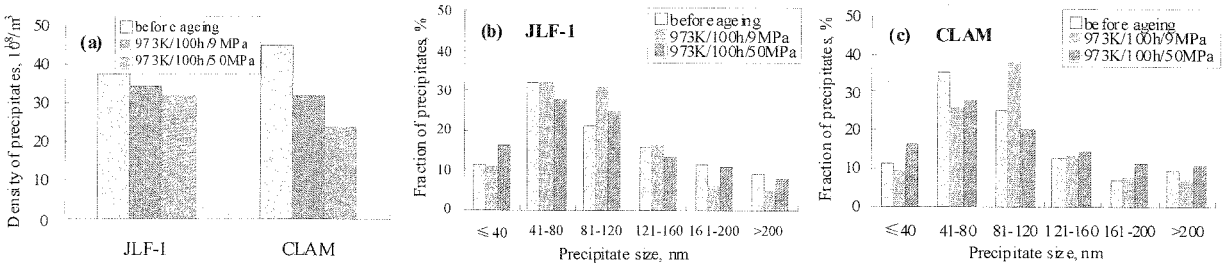


図２、JLF-1 における応力下時効によるクリープ変形の変化



（1）　　（2）　　（3）

図３、応力下時効による、（１）総析出密度の変化、（２）（３）析出サイズ分布の変化

表１　応力下時効による平均ラス幅の変化

lath width, nm	conditions of specimens		
	before ageing	973K/100h/9MPa	973K/100h/50MPa
JLF-1	500	650	700
CLAM	440	550	590

図３は、9MPa と 50MPa 荷重の場合の析出物の総密度と密度分布を示す。荷重の増加により、析出密度が低下することが分かる。サイズ分布からは、時効荷重を上げると、<40nm の析出密度が増加している。これまでの研究により、これらの析出の殆どが TaC であり、TaC は短時間の時効により密度が増加し、更なる時効により低下することが示されている。本研究では、このような時効による TaC 生成効果が、応力負荷により促進されることを示唆している。表１は、平均ラス幅の変化で、時効、及び応力下時効により、ラス幅の成長が促進されることを示している。

以上より、時効中に変形応力以下の荷重をかけることにより、軟化、ラス幅の増加、TaC の形成などの時効変化が促進されることがわかった。今後これらの設計応力への影響などを定量的に評価していく予定である。

４．研究組織

室賀健夫、長坂琢也（核融合科学研究所）　　李艶芬（総合研究大学院大学、現核融合科学研究所）
渡辺英雄、荒木邦明（九州大学応用力学研究所）

５．国際会議での発表

(1) T. Muroga, T. Nagasaka, H. Watanabe and M. Yamazaki, The Effect of Final Heat Treatment Temperature on Radiation Response of V-4Cr-4Ti, presented at 14th International Conference on Fusion Reactor Materials, Sept. 6-10, 2009, Sapporo
(2) Yanfen Li, Takuya Nagasaka, Takeo Muroga, Influence of Stress during Thermal Ageing on Microstructure and Mechanical Properties of JLF-1 and CLAM Steels, presented at 14th International Conference on Fusion Reactor Materials, Sept. 6-10, 2009, Sapporo
(3) H. Watanabe, N. Yoshida, T. Nagasaka, T. Muroga, The microstructure and hardness change of neutron irradiated weld joint of vanadium alloys, presented at 14th International Conference on Fusion Reactor Materials, Sept. 6-10, 2009, Sapporo

透過型電子顕微鏡を用いたLHDダイバータタイル表面層の微細構造解析

核融合科学研究所大型ヘリカル研究部　時谷 政行

【目的】

核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)では，等方性黒鉛性(IG-430U)のダイバータタイルが使用されている．使用後のタイル表面には，金属(Fe, Ti など)や炭素不純物で構成される厚い堆積層が形成されることがわかっている．堆積層が剥離するとプラズマへの不純物，いわゆるダストとして振る舞うことが懸念されるだけでなく，堆積層には多量の水素同位体が捕捉されている可能性が高く，燃料粒子リサイクリングへの影響も考えておかなければならない．昨年度までの共同研究では，現状のダイバータタイルにおけるプラズマ粒子捕捉と表面剥離機構のモデル化を行うことを目的として，集束イオンビーム加工観察装置(FIB)と透過型電子顕微鏡(TEM)を使用した堆積層の断面構造解析を進めた．その結果，特定のタイルについて堆積層の微細構造の理解が大きく進展した．本年度はその知見を更に深めるために，複数のタイルにおける損耗領域，堆積領域の微細構造の違いを整理し，ヘリカルダイバータ全域においてダイバータタイルからの不純物発生機構のモデル化を当初の目的とした．しかしながら，実験を進めていくうちに，昨年度実施した第８セクション内側の黒鉛タイルに対し，2008 年度の実験サイクルで新たに設置したタングステン(W)被覆黒鉛ダイバータの損耗領域・堆積領域の分析を急ぐ必要があり，急遽 W ダイバータの微細構造解析を実施することとなった．本ダイバータの設置場所は第 1 セクションであり，第 8 セクションとはおよそトーラス反対側に位置するため，当初の目的であったトーラス全体の不純物発生機構の知見を得る上でも有用な分析対象である．

ITER を含めた将来の核融合炉では，炉内のトリチウムインベントリーを最小限に抑える必要があり，水素同位体保持率の低いWがプラズマ対向壁材料として有望視されている．Wは加工の自由度が低いため，バルク材を直接用いるのではなく，炭素材等に被覆層を形成しての使用も検討されている．LHD では，第一壁にステンレス鋼(SUS316L)，ダイバータ板に等方性黒鉛(IG: isotropic graphite)が使用されており，プラズマの特性として，イオン温度勾配を駆動力とする径方向外側への強力なプラズマ対流により，中心部での不純物の濃度が減少する“不純物ホール”が現れる運転領域があり，この場合，周辺部で W 不純物が存在する場合でも，プラズマ中心部へのW蓄積が小さい可能性がある．さらに，閉じ込め磁場配位形成にプラズマ電流を要しないことからディスラプションがなく，これによる対向材料への大きな過渡的熱・粒子負荷が発生しないため，W ダイバータ板の予期しない損傷や破壊を引き起こし難いと考えられ，実機における定常長時間の材料照射効果の観測に適している．このように，LHD には，W ダイバータ板の本格的な照射試験を行うにおいて有利な特徴がある．本課題では，LHD の等方性黒鉛製ダイバータ板の内数枚をW被覆黒鉛製ダイバータ板に置き換え，1 サイクル実験期間の使用において，コーティング層/基盤黒鉛材の健全性が維持されているかについて，評価実験を実施した．

【実験方法】

LHD において 2008 年度のプラズマ実験で使用された，等方性黒鉛(東洋炭素 IG430-U)製のダイバータ板表面に真空プラズマ溶射法(VPS: vacuum plasma spray)で製造されたW被覆等方性黒鉛材(VPS-W/IG)を微細構造分析の対象とした．15mm 厚の IG 基板に，100μm 厚のW被覆層を形成している．設置場所はトーラス内側(inner)部のヘリカルダイバータであった．分析には，プラズマ・材料力学部門設置の走査型電子顕微鏡(SEM)，エネルギー分散型 X 線分析装置(EDS)，集束イオンビーム加工観察装置(FIB)，透過型電子顕微鏡(TEM)を用いた．はじめに，SEM と EDS を用いて表面の形状と組成分布を導出後，スローカッターを用いてタイルを切断し，FIB 装置においてナノ加工を行った．ナノ加工後の試料サイズは表面から深さ方向にかけて厚さ約 100nm の均一薄膜とした．加工後の試料において，TEM を用いた詳細な微細構造解析を実施した．

【実験結果および考察】

取り出したVPS-W/IGタイルは，巨視的に見てクラックや剥離などの損傷は確認されず，LHD での使用に十分に耐え得ることが示された．一方で，プラズマに暴露されたことによって微視的な変化が発生している可能性があるため，W 表面の各種分析を実施した．図 1-(a)に，内側(inner)部で使用されたVPS-W/IG タイルの写真を示す．向かって右側がダイバータの Private side，左側が SOL side に対応する．ダイバータプラズマのストライクポイントが集中するタイル中央部はWの光沢が保たれているが，両サイドは黒色に変化している様子がわ

かる. このことから, 中央部は損耗が主な領域, 両サイドは堆積が主な領域であることが推察できる. 図 1-(b)に, reference position に沿った EDS (energy dispersive X-ray spectroscopy)による表面組成分布を示す. 損耗が主であると考えられる領域では W のみが検出されたが, 堆積が主と考えられる両サイドでは, 多量の C に僅かの Fe を含む不純物堆積層の形成が確認された. C は主にプラズマ放電中に輸送され, 堆積したものであり, Fe はグロー放電洗浄中に第一壁材料が損耗を受け, 堆積したものであると考えられる. また, 図 1-(c)は, 25mm, 75mm, 115mm の位置の表面 SEM 像である. 損耗領域に対応する 75mm では, W の溶融塊による凹凸がスパッタリング損耗を受けて形を変えている. また, 堆積領域に対応する 25mm, 115mm の位置では, 照射前の凹凸が残ってはいるが, C の堆積効果により表面形状が変化している. ストライクポイント部が損耗領域, Private side や SOL side が堆積領域という結果は, 同じ場所で使用された等方性黒鉛(IG)製のダイバータ板の分析結果と一致する.

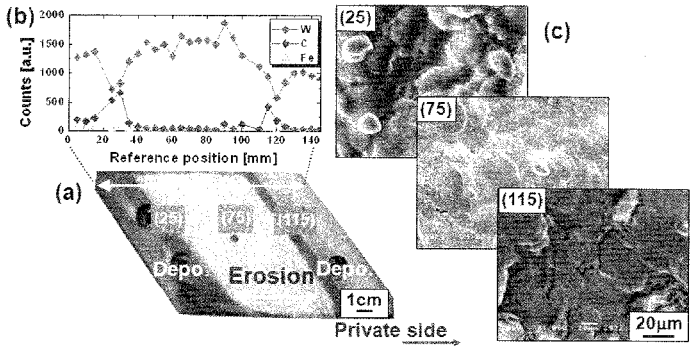


図 1. (a) 内側(inner)部で使用された VPS-W/IG タイル, (b) EDS により導出したタイル表面の不純物分布, (c) 25, 75, 115mm 位置の SEM 像

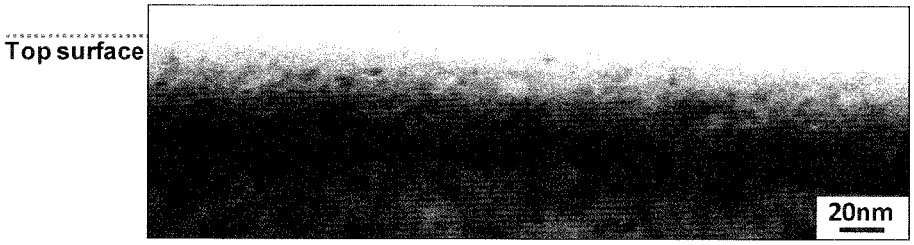


図 2. 内側(inner)部で使用された VPS-W/IG タイル損耗領域の断面 TEM 像

次に, 図 1 のタイルの損耗領域において, FIB を用いて断面ナノ薄膜試料を製作し, TEM による構造観察を実施した. 図 2 に, その断面 TEM 像を示す. 表面から深さ約 40nm に亘って明るく楕円上に見えるものが, 注入されたプラズマ粒子によって形成された高密度のガスバブルである. サイズは大小様々であるが, 大きいものは直径 20nm まで成長していることがわかる. このような欠陥は, 主にヘリウムイオンの照射により形成されたと考えられる. ダイバータプラズマの電子温度はせいぜい 20-30 eV 程度であり, W に対してはじき出し損傷を形成するために必要なエネルギー(E_D~500eV)を超えるようなイオン束の入射はそれほど多くはない. ヘリウムの場合, 材料中に存在する格子欠陥との相互作用が極めて強く, はじき出し損傷を形成しない低エネルギー入射であってもヘリウムバブルや転位ループなどの照射欠陥を引き起こすことが知られている. バブルサイズや密度から判断して, W 表面の温度は 1000°C以上まで上昇したと推察できる. また, バブルの存在深さは 100eV 前後のヘリウム入射の飛程(2~3nm)を大きく越えており, 入射されたヘリウムが材料深部まで拡散して捕捉されたことを示唆している. このような高密度なバブル層の形成は, 表面積の増加による不純物元素の付着だけでなく, マトリクスの密度が減少することによって表面熱伝導率が減少するなど, 予期せぬ弊害に繋がることが懸念される.

一方, 堆積領域においては厚さ約 1μm のアモルファス C 堆積層が形成されており, 黒鉛タイルの分析結果と良く一致するものであった. ダスト発生の抑制のなどの観点において, W ダイバータ化によるメリットは大きいと考えられるが, ヘリウムによる高密度欠陥層の形成に関して, 欠陥を形成しないコーティング層の開発, あるいは形成された欠陥層を効率的に除去する壁コンディショニング法の開発などの検討が今後必要となる.

【成果報告】

「タングステン被覆黒鉛ダイバータタイルの LHD での照射試験結果」, プラズマ・核融合学会第 26 回年会 2009.12/1~4, 京都市国際交流会館

NDB法によるタングステンと銅との接合界面特性に及ぼすイオン照射効果の研究

茨城大学工学部　車田　亮

1. 目的

タングステン材料は、耐熱性・耐熱衝撃性に優れ、高い高温強度や熱伝導性を有するため、現在、研究開発が進められているプラズマ境界力学実験装置（QUEST）や国際熱核融合実験炉（ITER）などの核融合実験装置のプラズマ対向材料として期待されている。今後、実用化を目指すために、それら材料のプラズマとの相互作用の究明や冷却構造材料との接合技術の確立が必要である。一方、最近、無欠陥接合法（NDB；Non Defective Bonding）が開発され、タングステンと銅との接合強度や熱伝達特性の著しい改善がなされている。そこで、本研究は、今までの耐照射損傷性を有するプラズマ対向材料のイオン照射効果の研究実績を踏まえて、特に、NDB 法によるタングステンと銅との接合界面に注目して、その微細組織と機械的特性に及ぼすイオン照射の影響、および照射後アニーリングによる微細組織と機械的特性の回復現象を究明する。得られた結果と他の接合材などとの比較検討を行い、高性能プラズマ対向機器の開発および実用寿命の延長に役立つ知見を得ることを目的とする。

2. 実験方法

供試材料は、日本タングステン（株）製の純タングステン（JT-01W, JT-02W）であり、耐熱性や機械的性質に富み、化学的にも安定な高融点金属材料である。タングステンと銅との接合材は、ろう材や中間材なしの NDB 法により直接接合して作製した。その後、この接合材の機械的特性に及ぼすイオン照射の影響を究明するために、接合界面を含んだ試験片（縦 15mm、横 5mm、厚さ 1mm）と、接合界面の微細組織に及ぼすイオン照射の影響を究明するために、接合界面層の TEM 試験片（直径 ϕ3mm、厚さ 0.2mm）を切り出した。

イオン照射試験は、九州大学応用力学研究所の高エネルギーイオン発生装置を用いて、接合界面を含んだ試験片中央の約 ϕ4mm の範囲に、銅イオン（Cu^{2+}）を、タングステン部分に 3.6dpa, 36dpa、銅部分に 5.5dpa, 55dpa まで、軽照射と重照射を実施した。それらの飛程はそれぞれ 350nm, 550nm である。

機械的特性の変化は、超微小押し込み硬さ試験機（DUH-201）により、対稜角 115 度の Berkovich ダイヤモンド圧子を用いて、ダイナミック硬さを測定した。ダイナミック硬さ D_h は、ビッカース硬さに対応しており、試験荷重 L(mN)と圧子の試料への押し込み深さ h(μm)から、次式で定義される。

$$D_h \equiv \alpha L/h^2$$

ここで、αは圧子形状による定数で、対稜角 115 度の Berkovich 圧子の場合 α=3.8584 である。このダイナミック硬さは、圧子を押し込んで行く過程の荷重と押し込み深さから得られる硬さで、試料の塑性変形だけでなく、弾性変形をも含んだ状態での材料強度特性である。その試験条件は、銅イオンの飛程と圧子の押込み深さがほぼ等しくなるように、負荷荷重を 19.6mN、荷重負荷速度を約 8%full scale/sec、荷重保持時間を 1.0sec とした。また、ダイナミック硬さは、測定位置の両側で 4-5 回測定し平均値を求めた。

また、SEM を用いて、試験片の表面損傷および接合界面の組織分析を行い、機械的性質の変化と微細組織との関係を考察した。

さらに、プラズマ対向機器の実用寿命の延長を目指して、真空熱処理炉を用いて、イオン照射材について、673K, 100min の高温熱処理を行い、照射後アニーリングによる微細組織と機械的特性の回復現象を究明した。

3. 実験結果及び考察

Fig.1 は、一例として、JT-01W タングステン接合材のイオン照射前後におけるダイナミック硬さ試験の結果を示す。データのばらつきや照射ビームの強度分布を考慮して、ダイナミック硬さの結果を各 1mm ごとの領域で平均して比較検討した。Table 1 は、そのダイナミック硬さの平均値とそ

の変化率を示す。まず、室温の軽照射（Cu:5.5dpa, W:3.6dpa）と重照射（Cu:55dpa, W:36dpa）を比較すると、W部とCu部の外側および内側ともに、照射量の増大に伴い照射硬化率が増大した。これは、照射欠陥の増大、転位移動の阻害などによる影響であった。

次に、室温照射と高温照射（573K）を比較すると、W部はほぼ同等の照射硬化を示し、Cu部の573K照射では、母材とほぼ同等まで硬さの低下が見られた。これは、高温で照射欠陥や転位が移動しやすくなり消滅したことや、ボイドによる残留圧縮応力の緩和および銅粒子の再結晶などによる影響であった。

また、室温での軽照射（Cu:5.5dpa, W:3.6dpa）におけるJT-01Wタングステンと JT-02Wタングステンを比較すると、中心部での照射硬化率は、それぞれ1.05および1.18であった。JT-01Wタングステンは、照射硬化の増加率が小さく、耐照射損傷性に優れていることが分かった。また、W部の照射硬化率は、Cu部の照射硬化率1.26より小さく、タングステン材料が結晶構造的に耐照射損傷性に優れていることを裏付けている。さらに、照射ビームの中心部は、外周部より照射硬化率が大きく、照射ビームに強度分布があることも確認できた。

その他、SEM観察により、試験片表面のスパッタリング損傷や、接合界面における不純物（O, C）の偏析などが確認された。また、照射材の照射後アニーリング（673K, 100min）により、W部では硬さの回復が不十分であったが、Cu部では再結晶の影響などにより母材と同等まで硬さの回復が起こった。このことから、プラズマ対向機器が、プラズマによる照射損傷を受けても、高温熱処理をすることにより、微細組織や機械的性質などが回復し、実用寿命の延長が期待できる。

4. まとめ

本研究は、タングステン材料を高性能プラズマ対向機器に応用するために、イオン照射による機械的性質および微細組織の影響について究明した。今後、データの蓄積やデータの解析をさらに進めて、高性能プラズマ対向機器の開発および実用寿命の延長に役立つ知見を得る予定である。

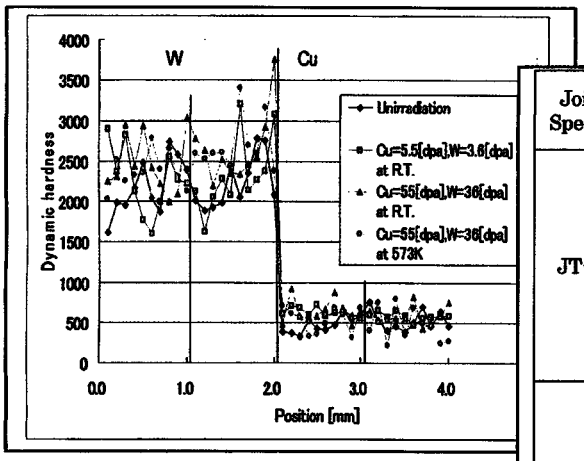


Fig.1 Dynamic hardness of irradiated W-Cu joining material (JT-01W).

Table 1 Changes of dynamic hardness of irradiated W-Cu joining materials (JT-01W, JT-02W).

Joining Specimen	Condition	W		Cu	
		Outside (0-1mm)	Inside (1-2mm)	Inside (2-3mm)	Outside (3-4mm)
JT-01W	Unirradiation	2207		498	
	Light irradiation at R.T.	2264 (×1.03)	2326 (×1.05)	627 (×1.26)	580 (×1.16)
	Heavy irradiation at R.T.	2466 (×1.12)	2654 (×1.20)	702 (×1.41)	588 (×1.18)
	Light irradiation at 573K				
	Heavy irradiation at 573K	2374 (×1.08)	2699 (×1.22)	530 (×1.06)	463 (×0.93)
JT-02W	Unirradiation	1978		534	
	Light irradiation at R.T.	2159 (×1.09)	2329 (×1.18)	673 (×1.26)	611 (×1.14)
	Heavy irradiation at R.T.				
	Light irradiation at 573K	2149 (×1.09)	2368 (×1.20)	545 (×1.02)	481 (×0.90)
	Heavy irradiation at 573K				

5. 研究成果報告

1) 車田 亮、全国共同利用研究成果報告 平成20年度 No.12, 九州大学応用力学研究所, (2009.4), 20FP-4, p.221-222.

2) 車田 亮、共同利用研究経過報告書 平成20年度 No.25、東北大学金属材料研究所附属量子エネルギー材料科学国際研究センター, (2009.7), CD IV 1-1, p.60.

第一原理計算によるタングステン中のガス元素吸蔵および拡散の研究

日本原子力研究開発機構　山口正剛

【研究の背景】

タングステンはその優れた耐摩耗性や低いガス溶解度のため、プラズマ対向材料の中でも大きな負荷がかかるダイバータタイルの候補材料として有力である。しかしながら、核融合炉内では高エネルギーの水素同位体およびヘリウム粒子の照射を受けること、さらに熱による負荷にも長時間さらされることが予想される。このため、材料内部にははじき出し損傷を受け、空孔など格子欠陥が大量に導入されることが予想されている。そのような過酷な環境の中でもタングステンの優れた性質が保持されるかが問題である。

さらに、水素が金属に捕獲された場合は水素脆化が起きることはよく知られている。さらに、ヘリウムも脆化を促進する元素であることが分かってきた。また、核融合炉では重水素・三重水素は核反応の燃料であるため壁材料に捕獲されては都合が悪い。さらに、三重水素は放射同位体であるという点でも材料中に吸蔵・蓄積することは問題である。本研究では、そのような背景をふまえ、タングステン中でのガス元素（水素・ヘリウム）の吸蔵、拡散、および脆化効果を第一原理計算を用いて研究した。特に、水素は空孔型欠陥に選択的に捕獲される。そこで空孔型欠陥の１つである粒界への水素偏析、およびその脆化効果について計算した。

【計算方法】

本研究では第一原理計算の汎用コードであるVienna ab-initio simulation package (VASP)を使った。ポテンシャルは一般化勾配近似タイプのもの、原子緩和は各原子に働く力の成分が0.1eV/nm以下になるまで緩和を繰り返した。

【計算結果】

(1) バルク中の水素の安定位置と移動エネルギー

欠陥の無い完全結晶中での水素の安定配置を計算した。BCC金属中に侵入型原子が入った場合の安定な位置は、図1で示すようにOサイトかTサイトである。次の式で水素の溶解エネルギーを計算した。

$$\Delta E = E(\mathrm{W}_n\mathrm{H}) - E(\mathrm{W}_n) - \frac{1}{2}E(\mathrm{H}_2) \quad (1)$$

ここで右辺第1項はタングステンn個と水素1個で構成されたスーパーセル、第2項はタングステンn個のスーパーセル、第3項は水素ガスのそれぞれの形成エネルギーを表している。水素がTサイトに捕獲された時はΔE=+0.89eV、Oサイトに捕獲された時はΔE=+1.37eVであった。符号がプラスなのは溶解反応が自発的には起こらない吸熱反応であることを示している。水素はTサイトに捕獲された方がより安定であることが示された。また、この非常に大きな反応エネルギーはタングステンの特徴である低い水素吸蔵度とよく一致しており、実験値である+1.1eVともよく対応している。

本研究ではタングステン中の水素の移動エネルギーを計算した。隣り合ったTサイト間の移動を nudged elastic band法を使い計算したところ0.21eVだった。

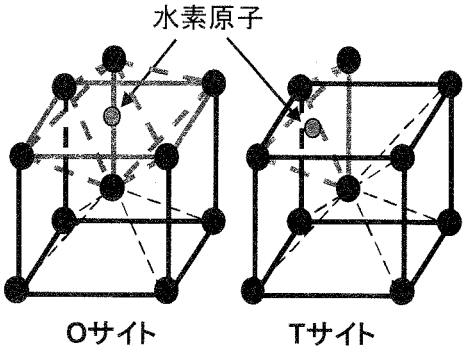


図1：BCC金属での水素の捕獲サイト

(2) タングステン粒界近傍での水素捕獲

タングステン中のΣ3(111)タイプの規則粒界付近に捕獲される水素の捕獲エネルギーを計算した。図2で示すようにタングステンが72個で構成されたスーパーセルを使い、座標c軸方向に1.618nmの真空層を設けた。捕獲エネルギーは次の式で計算した。

$$E_t = E_{gb}(\mathrm{W}_{72}\mathrm{H}_1) - E_{gb}(\mathrm{W}_{72}) - \{E_b(\mathrm{H}_1) - E_b(\mathrm{H}_0)\} \quad (2)$$

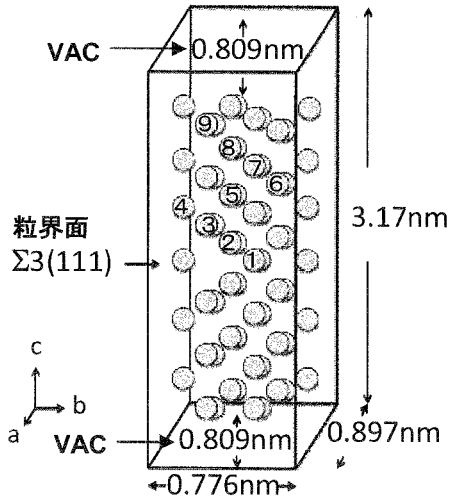


図2：規則粒界Σ3(111)の構造。粒界面に近い方からタングステンの原子面に番号1,2,3...9を付けた。VACは真空層を表す。

ここでE_{gb}は粒界を含むスーパーセル、E_bはバルクの形成エネルギーを表す。従って式(2)はバルク中の水素1個が粒界に捕獲された時のエネルギーの利得を表している。図3には捕獲サイトと捕獲エネルギーの関係を示した。捕獲エネルギーが負であることから、水素は粒界近傍のタングステン第1、2層付近、および表面の8、9層近傍に捕獲されやすいことがわかる。一方で中間の3、4、5、6層では捕獲エネルギーがほとんど無くそこの環境がバルクと変わらないことを示唆している。第7層には水素の捕獲が起こらず、自発的に第8層の方に移動する。

(3) タングステン粒界への水素偏析

粒界に水素m個が偏析する時の偏析エネルギーを計算した。

$$E_s = E_{gb}(\mathrm{W_{72}H_m}) - E_{gb}(\mathrm{W_{72}}) - m\{E_b(\mathrm{H_1}) - E_b(\mathrm{H_0})\} \quad (3)$$

この式はバルク中のm個の水素が粒界に偏析した場合のエネルギーの利得を表している。図4で示すように粒界に偏析する水素の個数が増加すると、次第に粒界偏析エネルギーは低下する。これは複数の水素が粒界近傍に吸蔵されることを示している。また、図4から水素は最高で24個まで偏析することがわかる。これは約35原子/nm²に相当する。

(4)ガス元素偏析による脆化の促進

スーパーセル(図2)をc軸方向に引っ張ることで図5のように応力歪曲線を計算した。図5では粒界にガス元素が無い場合がH0、偏析する水素が1個、2個、24個の場合をそれぞれH1、H2、H24、また特別にヘリウムが1個だけ偏析した場合をHe1で表した。いずれの場合も引っ張り歪が小さいうちは線形応答をするが、やがて破断に至る。水素の偏析個数が多くなるに伴い破断するために必要な外部歪は小さくなり、水素偏析によって脆化が促進されることがわかった。また、ヘリウムが偏析した場合にも脆化促進が見られ、およそヘリウム1個が水素2個分に相当することがわかった。

【考察】

水素がOサイトよりもTサイトに捕獲されやすいのはTサイトの方が近接するタングステンまでの距離が長いからである。また、水素は空孔型欠陥に捕獲される時はその中央に位置するよりも表面(内部表面)に吸着する傾向がある。一方で、ヘリウムは空孔型欠陥に捕獲されるとその中央に位置する傾向がある。このような違いは水素とヘリウムの化学結合を作る能力の違いに原因があると考えられる。

脆化が起こる原因は粒界近傍の電子状態を見ることで説明される。粒界に水素が偏析することで電子状態が乱され粒界をはさんで向かい合ったタングステン間の電子密度は低下する。一方で、ヘリウムは向かい合ったタングステンの中間に割って入り、いわば物理的に結合を切るような作用をすると考えられる。

【まとめ】

プラズマ対向材料であるタングステン中の水素・ヘリウムの吸蔵、拡散、さらに粒界に偏析した時の脆化効果を第一原理計算で研究した。水素ガスは移動エネルギーが低く(0.21eV)拡散しやすく、粒界近傍に偏析する傾向が強い。また水素は最大で35原子/nm²まで偏析することがわかった。また水素とヘリウムはどちらも脆化促進型の元素である。

【研究組織】

研究代表者　日本原子力研究開発機構　山口正剛
所内世話人　九州大学応用力学研究所　大澤一人
研究協力者　九州大学大学院総合理工学府　後藤準也

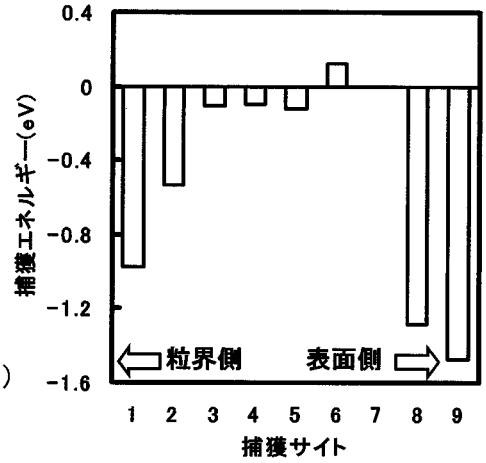


図3:水素1個当たりの捕獲エネルギーのサイト依存性

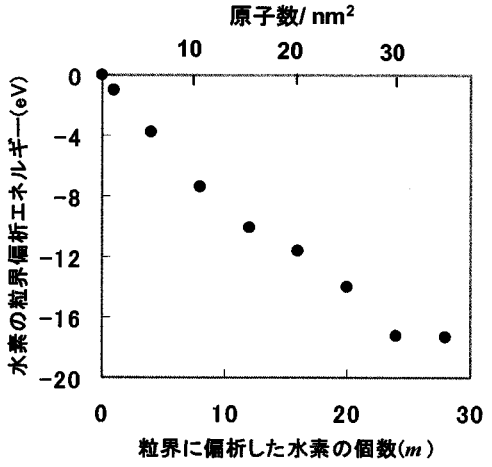


図4:粒界に偏析した水素の個数と粒界偏析エネルギーの関係

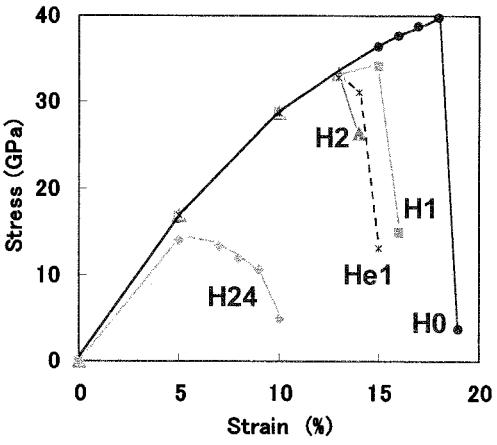


図5:水素が粒界に偏析した時の応力歪曲線。Hnのnは偏析した水素の個数を示す。ヘリウムが偏析した場合を一例だけ計算した。

平成21年度応用力学研究所共同研究
「輸送理論」成果報告書

代表者　核融合科学研究所　伊藤　公孝

研究目的

核融合燃焼プラズマ実験の実現にむけて計画が進展している現在、トロイダルプラズマの輸送理論を一層進展させ、統合コードなどへ成果を糾合することによって定量的予言力を検証することは世界的な急務と認識されている。

本研究では、トロイダルプラズマの乱流に対し、繰り込み理論に基づく遷移理論を構成し、乱流輸送と構造形成の理論基盤を研究することを目的とする。あわせて、輸送コードに用いられる理論式を最新の理論展開に沿ったものへと高度化することを目的とする。

研究基盤と進展の概観

本共同研究の基盤をなす乱流構造形成研究の方法論[1]を再録する。プラズマのダイナミックスを表現する基礎方程式として簡約化方程式を例にとって

$$\frac{\partial}{\partial t} f + L^{(0)} f = N(f) \tag{1}$$

と書こう。ここで$L^{(0)}$は線形演算子、　f は揺動場（例えば静電ポテンシアル、電流、圧力、三変数の揺動に着目した場合は　$f=(\phi, J, p)^{\mathrm{T}}$）、$N(f)$ は非線型項をあらわす。

まず非線型効果を、着目するモード（運動）にたいしてコヒーレントな効果と乱雑なノイズとして扱う効果とに区分する。

$$N(f) = -\Lambda f + \tilde{S} \tag{2}$$

次にコヒーレントな効果に着目し、方程式

$$\left(L^{(0)} + \Lambda\right) f = 0 \tag{3}$$

から非線型な自己無撞着状態を求める。この解は多重解を持ちうる。そしてノイズによる着目するモードへの効果を解析する。特に、非線型な自己無撞着状態の間の遷移を研究する。遷移確率によって、可能な多数の非線型な自己無撞着状態のなかで、どの状態が選択的に実現するかを予言する。

本体系によって研究成果をあげている。かつての「線形不安定性・局所的理論・決定論的理論」の枠に閉じこもって定式化されてきた方法論と比較し、現在は「非線形不安定性、非局所理論、確率統計的理論」に拡張した乱流輸送理論体系を構成している。さらに、実験により理論の結果を検証する方法についても研究を進めて成果を得ている。本共同研究によって、遠非平衡系プラズマの乱流輸送について体系的な理論研究を進めている[2]。今年度の特筆すべき成果から例を挙げれば、乱流が多スケールである場合の体系化を進め、プラズマの運動論的な乱流理論を一段と推進した。以下に成果の一例である「運動論的プラズマ乱流理論」[3]を紹介する。

運動論的プラズマ乱流理論

多成分のプラズマを記述する Vlasov 方程式に対し乱流理論を展開した。森の方法によれば、非線形項を乱雑力と記憶関数に分ける事が出来る。後者には、非線形減衰率に対応する項が含まれる。プラズマの動力学方程式では、速度分布関数の他に揺動場も力学変数になるので、記憶関数がスカラーの関数（マルコフ近似すれば係数）になるので

はなくテンソルになる。分布関数fの発展方程式の中に、コヒーレントな非線形効果として分布関数fに比例する項だけではなく揺動場に比例する項が現れる。イオンと電子の揺動分布関数の発展方程式は

$$(\omega - \mathbf{k}\cdot\mathbf{v}_\mathrm{i} + \eta^{(\mathrm{i})}_{\mathbf{k}\omega}) f^{(\mathrm{i})(1)}_{\mathbf{k}\omega} - \xi^{(\mathrm{i})}_{\mathbf{k}\omega}\varphi^{(1)}_{\mathbf{k}\omega} + \frac{q_\mathrm{i}}{m_\mathrm{i}}\varphi^{(1)}_{\mathbf{k}\omega}\mathbf{k}\cdot\frac{\partial f_\mathrm{i}}{\partial \mathbf{v}_\mathrm{i}} = -\frac{q_\mathrm{i}}{m_\mathrm{i}}\frac{\partial}{\partial \mathbf{v}_\mathrm{i}}\int \mathbf{k}'\varphi^{(0)}_{\mathbf{k}'\omega'} f^{(\mathrm{i})(0)}_{\mathbf{k}''\omega''}\,\mathrm{d}\mathbf{k}'\,\mathrm{d}\omega',$$

$$(\omega - \mathbf{k}\cdot\mathbf{v}_\mathrm{e} + \eta^{(\mathrm{e})}_{\mathbf{k}\omega}) f^{(\mathrm{e})(1)}_{\mathbf{k}\omega} - \xi^{(\mathrm{e})}_{\mathbf{k}\omega}\varphi^{(1)}_{\mathbf{k}\omega} - \frac{e}{m}\varphi^{(1)}_{\mathbf{k}\omega}\mathbf{k}\cdot\frac{\partial f_\mathrm{e}}{\partial \mathbf{v}_\mathrm{e}} = \frac{e}{m}\frac{\partial}{\partial \mathbf{v}_\mathrm{e}}\int \mathbf{k}'\varphi^{(0)}_{\mathbf{k}'\omega'} f^{(\mathrm{e})(0)}_{\mathbf{k}''\omega''}\,\mathrm{d}\mathbf{k}'\,\mathrm{d}\omega',$$

のようなかたちをとる。左辺のηとξの項が繰り込まれたコヒーレントな非線形効果を表し、右辺が乱雑力を表す。(ηが記憶関数の対角項、ξが非対角項。)それぞれの非線形項の表式が与えられた。

この定式化によって得られた知見を説明する。

まず、コヒーレント項については、コヒーレントな非線形効果ηは、通常非線形減衰率として扱われる項であり多くの研究がなされている。この効果は、位相速度と等しい共鳴粒子によって担われる。($v = \omega/k$ において $\mathrm{d}f/\mathrm{d}v = 0$ であれば共鳴的エネルギー交換をしない。)一方、新しいコヒーレントな非線形効果(係数ξ)は、速度空間の非局所的結合が寄与する。その結果、位相速度に等しい速度 $v = \omega/k$ において $\mathrm{d}f/\mathrm{d}v = 0$ であっても、速度 $v = \omega/k$ を持つ粒子がその波と共鳴的エネルギー交換することが可能になる。実空間の非局所結合は近年研究が進んでいるが[4, 5]速度空間でも非局所共鳴結合が起きる過程を明らかにした。

コヒーレント項と乱雑力項の双方によって揺動散逸関係を満たすことができる。そのため揺動の振幅がゼロの極限では、Balescu-Lenard 衝突オペレーターが再現される。同一種同士と異種乱流衝突項とが得られた。次に、乱雑力項によって非モードの励起が起きる。スペクトルの動的発展を考察し、非モードの励起によって、非線形平衡状態へと近接する事が示された。さらに、非モードが集積する事が発見された。その集積が起きるのはスペクトル空間(k, ω)において

$$\omega(\mathbf{k}) = 2\omega'\left(\frac{\mathbf{k}}{2}\right)$$

の関係を満たす。ここでω'はモードの分散関係である。この集積した非モード揺動とモードの結合(または集積した非モード揺動同士の結合)による高次の非モード揺動は

$$\omega(\mathbf{k}) = N\omega'\left(\frac{\mathbf{k}}{N}\right) \qquad N = 3, 4, \cdots$$

の関係を満たす。非モードの定量的観測が近年進歩しており[6]、こうした研究フレームワークによって理解が深まるものと期待される。

参考論文

[1] S.-I. Itoh: J. Plasma Fusion Res. **83** (2007) 241
[2] S.-I. Itoh: Plasma Fusion Res. **4** (2009) 038
[3] S.-I. Itoh and K. Itoh: J. Phys. Soc. Japan **78** (2009) 124502
[4] S.-I. Itoh and K. Itoh: Plasma Phys. Contr. Fusion **43** (2001) 1055
[5] K. Itoh, S.-I. Itoh, M. Yagi, A. Fukuyama, J. Plasma Fusion Res. Series **8** (2009) 119
[6] T. Yamada, S.-I. Itoh, et al.: Nature Phys. Vol. **4** (2008) 721-725

21 FP－10

核燃焼プラズマ統合コードにおける輸送と加熱・電流駆動のシミュレーション

京都大学大学院工学研究科　福山　淳

目的

核燃焼プラズマにおいては，時間尺度と空間尺度が異なるさまざまな現象が，定性的に異なる空間領域にまたがって，相互にかつ複雑に関与しつつ，時間発展している．自律性の高い核燃焼プラズマの全体像を捉えるためには，それらの現象の間の相互作用を取り入れた統合的なシミュレーションによる時間発展の解析が必要である．本研究では，プラズマの形状と空間分布を支配する平衡・輸送コードによる時間発展解析と中性粒子ビームや各種の電磁波による加熱とプラズマ制御の解析を組み合わせた統合シミュレーションを実現するためのコード開発とそれによるトカマク実験データの解析を行う．ITER データベース等の実験データとの比較を行うことによって輸送モデルの信頼性を高めるとともに，周辺プラズマ解析コードとの結合を検討する．

研究方法

- 統合輸送コード TASK の整備と核燃焼プラズマの時間発展シミュレーション
- プラズマ回転および径方向電界を取り入れた流体型輸送コードの開発と輸送障壁形成の解析
- 運動量分布関数の変形を取り入れた複合加熱の統合シミュレーション
- ドリフト運動論的誘電率テンソルによる波動伝播解析

研究結果

1. **輸送解析**：流体型輸送モジュール TASK/TX を拡張し，リップル損失や中性粒子ビーム入射に伴うプラズマ回転と径方向電界の時間変化を含めたトカマクプラズマの輸送シミュレーションならびに新古典トロイダル粘性と磁気面破壊効果を取り入れたヘリカルプラズマの輸送シミュレーションを行った．
2. **波動加熱解析**：速度分布関数の変形を含めた解析を行うため，速度分布関数解析 TASK/FP を多粒子種に拡張し，運動量とエネルギーを保存する非線形クーロン衝突項を導入するとともに，PETSc ライブラリを用いて疎行列方程式反復解法の並列処理を行い，１磁気面１コアでの処理により大幅な高速化を実現した．さらに高速イオンの空間拡散を含めた径方向輸送を取り入れ，陰解法により安定に数値計算できることを確かめた．この速度分布解析を ITER プラズマにおける複合加熱（イオンサイクロトロン波，中性粒子ビーム，アルファ粒子）の解析に適用し，その有効性を確かめた．
3. **波動伝播解析**：ドリフト波や GAM と結合する低周波アルヴェン固有モードを解析するため，速度空間における数値積分によりドリフト運動論的誘電率テンソルを求め，波動光学的伝播解析コードに適用して固有モードの線形安定性解析を行った．

考察

動的輸送解析コードの開発，運動量分布関数を用いた運動論的輸送解析に向けたコード開発，運動論的効果を取り入れた巨視的モードの線形安定性解析等により，核燃焼プラズマ統合シミュレーションの実現に向けて大きく前進した．今後，さらに加熱・電流駆動に関係する解析要素の高度化ならびに高速化，要素間連携機能の標準化ならびに機能強化，ユーザーインターフェースの標準化等を行うとともに，実験データとの比較による妥当性の検証や他のコードとのベンチマークテストを進めていく必要がある．

研究成果報告

1. M. Honda, T. Takizuka, A. Fukuyama, M. Yoshida and T. Ozeki, Self-consistent simulation of torque generation by radial current due to fast particles, Nucl. Fusion, 49(3), 035009 (1-10) (2009)
2. M. Honda, T. Takizuka, A. Fukuyama, M. Yoshida, T. Ozeki, Toroidal Rotation Profiles under the Influence of Fast-Ion Losses Due to Toroidal Field Ripple, Journal of Plasma and Fusion Research Series, 8, 316-320 (2009)
3. H. Nuga, A. Fukuyama, Self-Consistent Analysis of Fundamental and Higher Harmonic ICRF Heating in Tokamak Plasmas, Journal of Plasma and Fusion Research Series, 8, 1125-1128 (2009)
4. A. Fukuyama, T. Okamoto, H. Nuga, S. Murakami, Y. Nakamura, M. Sato, S. Toda, K. Watanabe, and N. Nakajima: Numerical Analysis of Alfven and Acoustic Eigenmodes in Toroidal Plasmas, The 4th IAEA-TM on the Theory of Plasma Instabilities (Kyoto Univ., 2009-05-20)
5. 福山淳: 核燃焼プラズマ統合コードにおける輸送と加熱・電流駆動のシミュレーション, RIAM フォーラム 2009 (九州大学応用力学研究所, 2009-06-12)
6. A. Fukuyama: Research Plan of Kinetic Integrated Modeling for Fusion Plasmas, The 4th Japan-Korea Workshop on Theory and Simulation of Magnetic Fusion Plasmas (JAEA Naka, 2009-08-03) 02
7. H. Nuga, A. Fukuyama: Status of kinetic transport simulation of ICRF heating in tokamak plasmas, The 4th Japan-Korea Workshop on Theory and Simulation of Magnetic Fusion Plasmas (JAEA Naka, 2009-08-03) 14
8. 福山淳, 岡本知久: トロイダルプラズマにおける低周波アルヴェン固有モードの数値解析, 日本物理学会 2009 年秋季大会 (熊本大学黒髪キャンパス, 2009-09-25) 25aYP-4
9. A. Fukuyama, S. Murakami, A. Wakasa, H. Nuga, T. Okamoto: Kinetic Integrated Modeling of Tokamak Plasmas by TASK3G, 51st Annual Meeting of APS-DPP (Atlanta, GA, USA, 2009-11-02) BO4-4
10. 岡本知久, 福山淳: トカマクプラズマにおける低周波アルヴェン固有モードの解析, 第 26 回プラズマ・核融合学会年会 (京都市国際交流会館, 2009-12-04) 4aE17P
11. 奴賀秀男, 福山淳: トカマクプラズマにおける ICRF 加熱の運動論的解析, 第 26 回プラズマ・核融合学会年会 (京都市国際交流会館, 2009-12-04) 4pD21P
12. 福山 淳, 村上定義, 若狭有光, 奴賀秀男, 政岡義唯, 岡本知久: トカマクプラズマの運動論的統合モデリング, 第 26 回プラズマ・核融合学会年会 (京都市国際交流会館, 2009-12-04) 4pE01P
13. H. Nuga, A. Fukuyama: Effects of radial transport on ICRF heating in tokamak plasmas, 19th International Toki Conference (Ceratopia Toki, Toki, Gifu, 2009-12-08) P1-50
14. M. Miki, A. Fukuyama, M. Honda: Transport simulation of helical plasmas using the TASK/TX code, 19th International Toki Conference (Ceratopia Toki, Toki, Gifu, 2009-12-09) P2-15
15. 福山淳: 運動論的統合コード TASK3G に向けた取り組み, 第 8 回核燃焼プラズマ統合コード研究会 (九州大学応用力学研究所, 2009-12-18)
16. 奴賀秀男, 福山淳: ITER プラズマの加熱・電流駆動に関する速度分布解析, 第 8 回核燃焼プラズマ統合コード研究会 (九州大学応用力学研究所, 2009-12-17)
17. 三木真幸, 福山淳: TASK/TX コードによるヘリカルプラズマの輸送シミュレーション, 「自律燃焼系プラズマでの特性予測の高精度化に向けたトロイダルプラズマの閉じ込め・輸送に関する体系的研究」研究会 (核融合科学研究所, 2010-01-08)
18. A. Fukuyama, S. Murakami, A. Wakasa, H. Nuga, T. Okamoto: Kinetic Integrated Modeling of Tokamak Plasmas, US-Japan JIFT Workshop on Integrated Modeling and Simulation of Toroidal Plasmas (MIT, Cambridge, MA. USA, 2010-02-23)
19. A. Fukuyama: BPSI Framework for Integrated Modeling of Toroidal Plasmas, US-Japan JIFT Workshop on Integrated Modeling and Simulation of Toroidal Plasmas (MIT, Cambridge, MA. USA, 2010-02-24)
20. A. Fukuyama: Integral Formulation for Integrated Full Wave Modeling, US-Japan JIFT Workshop on Integrated Modeling and Simulation of Toroidal Plasmas (MIT, Cambridge, MA. USA, 2010-02-25)

磁場閉じ込めプラズマ中の多スケール・多プロセス現象の理論・シミュレーション研究

日本原子力研究開発機構　　石井康友

はじめに

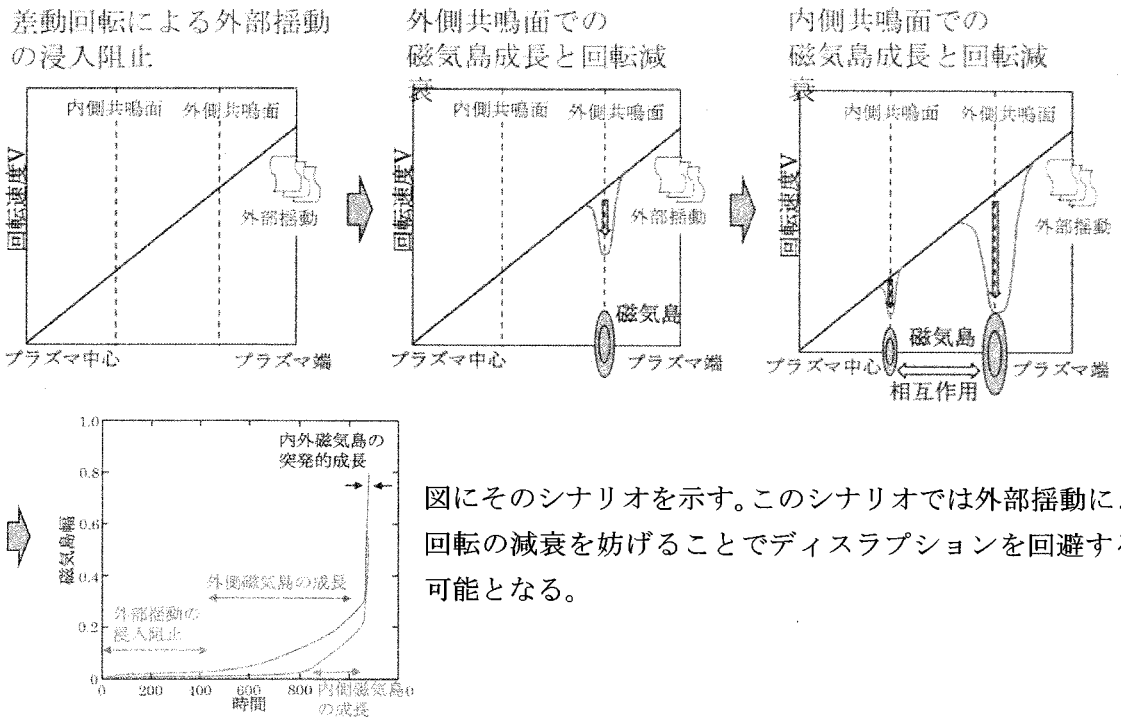
磁場閉じ込めプラズマにおいては、時間尺度及び空間尺度の異なる諸現象（MHD、微視的乱流等）が定性的に異なる空間領域に跨って相互作用し、その結果として核融合炉の特性が決まる。それを総合的に理解し、予測・制御するためには、外部情報入力を伴う、輸送、MHD、乱流、高エネルギー粒子の相互作用を考慮したグローバルシミュレーションが必要であると認識されつつある。本研究では（1）プラズマ周辺における非線形MHD現象およびそれとコアプラズマとの相互作用（2）核融合炉におけるMHD不安定性の飽和・抑制や突発現象を解明するための理論・シミュレーションモデル及び（3）高エネルギー粒子とMHD現象の相互作用を記述する理論・シミュレーションモデルを改良・開発し、核融合炉のMHD特性の総合的な解析を可能にするとともに、核燃焼プラズマの統合シミュレーションを実現する上で必要なモデルを提供することを目指す。

研究成果

今年度は、ディスラプション機構の解明のため2つの物理モデルによるシミュレーション研究を行い、内部輸送障壁の崩壊のシナリオを検討したのでその結果を報告する。

ダブルテアリングモードによる崩壊機構[1]

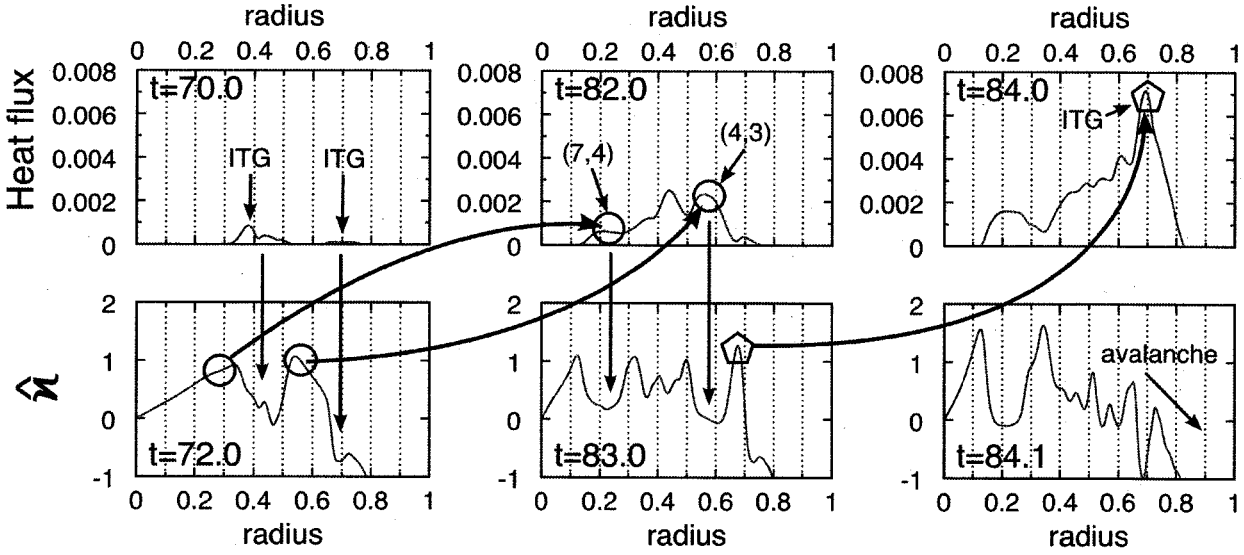
反転磁気シャー配位においては2つの有利面が存在し、テアリングモードが不安定化する可能性がある。テアリングモードによる磁気島の幅が重畳し、グローバルリコネクションにより内部輸送障壁が崩壊する。この機構で重要となるのは外部揺動が存在し、その揺動が内部へ浸透し2つの有利面を連結することである。一方、プラズマの回転が存在すると揺動の侵入を阻止する機構が働く。



図にそのシナリオを示す。このシナリオでは外部揺動による作動回転の減衰を妨げることでディスラプションを回避することが可能となる。

ドリフト波乱流の励起による崩壊[2]

このシナリオではITG乱流の励起と分布の緩和による準線形効果が重要である。q minimum近傍にメゾスケールモードが励起し、これが輸送障壁内部の温度分布を平坦化する。その結果、障壁の端付近がドミノ効果により急峻化し、ITGモードが不安定化する。径電場によりITGモードが支えきれなくなった時点で障壁が大局的に崩壊する。図に熱フラックスと温度勾配の時間発展を示す。



時系列を詳細に観測すると、輸送障壁の内外でITGが不安定化し、その結果、近傍の温度分布が平坦化する。その反動でその外側の分布が急峻化し、(7,4),(4,3)というメゾスケールモードを励起する。それらが励起した付近の分布が平坦化しその外側の分布が平坦化する。ドミノ効果により最終的にITBの端が急峻化しITGモードが不安定化するがしばらくは、径電場シャーにより飽和レベルが抑制される。径電場シャーが徐々にゼロに近づくとITGの爆発的な成長が起こり、なだれを伴って障壁の崩壊が起こる。このシナリオでは径電場シャーを維持することで崩壊を回避できる可能性がある。いづれの場合にも非線形不安定性によるグローバルな構造変化が爆発的な成長を引き起こし崩壊へと導く。今後の課題としては両方の要素を包含したモデルへと拡張し、ITG乱流とDTM(Double Tearing Mode)のマルチスケール相互作用の研究を行うことが重要である。

研究組織

石井康友(JAEA)、徳田伸二(RIST)、小関隆久(JAEA)、栗田源一(JAEA)、中島徳嘉(JAEA)、内藤裕志(山口大)、藤堂泰(NIFS)、古川勝（東京大学)、相羽信行(JAEA)、廣田誠(JAEA)、白石淳也(JAEA)、宮戸直亮(JAEA)

参考文献

[1] Y.Ishii, A.I.Smolyakov, M.Takechi, Plasma rotation effects on magnetic island formation and the trigger of disruptions in reversed shear plasma, Nuclear Fusion 49,1-10 (2009).

[2] S. Tokunaga, M. Yagi, S.-I. Itoh and K. Itoh, Multi-scale transport simulation of toroidal momentum source profile effect on internal transport barrier collapse, Nuclear Fusion, Vol. 49, No. 7, 075023 (2009)

21 FP－12

核融合プラズマにおける連結階層マルチスケールシミュレーション研究

京都大学大学院　岸本泰明

はじめに

核燃焼プラズマにおいては、時間・空間スケールが異なるさまざまな現象が、定性的に異なる空間領域にまたがって、相互にかつ複雑に関与しつつ、時間発展している。プラズマのエネルギー閉じ込め特性を理解するためには、輸送、MHD、乱流の相互作用を考慮したグローバルシミュレーションが必要であることは認識されつつある。しかし、そのようなシミュレーションを第一原理に基づいて行うには計算機のリソースが十分とは言えず、モデル化や方程式の簡約化が必要である。本研究では、核融合プラズマにおける階層シミュレーションの出発点として、MHD とドリフト波乱流の相互作用を考慮したグローバルシミュレーションを加熱項が存在する場合に行い、輸送、MHD、乱流の相互作用を明らかにすることを目的とする。

研究成果

今年度は、大域的な MHD モードと微視的な乱流が共存するプラズマ中で乱流輸送を解明する研究を実施し、1) MHD モードが駆動する渦流が存在する場合の微視的モードの安定性の解析や 2) 磁気島によって駆動される新しいイオン温度勾配モードを発見したので、それらの結果を報告する。

1) 渦流(vortex flow)と微視的乱流の相互作用の理論モデル

微視的乱流によって駆動される帯状流や外部運動量入力などによって駆動される平均流（mean flow）などのプラズマのせん断流は、乱流輸送を抑制する働きがあることが広く知られている。一方、プラズマ中にはこのような平均流に加えて、MHDモードや様々な非線形過程を通して、大域的な渦流（vortex flow）が発生することから、これら渦流が乱流輸送に与える影響を明らかにする必要がある。本研究では、大域的な渦流が存在する場合のITGモードの線形解析および非線形シミュレーションを行い、その影響を調べた[1]。

Fig.1 は、上記項目B1のシミュレーションと同様のティアリングモードによって駆動される渦流 (a) が存在する場合のイオン温度勾配（ITG）モード構造(c)を示したものである。(b) は渦流がな

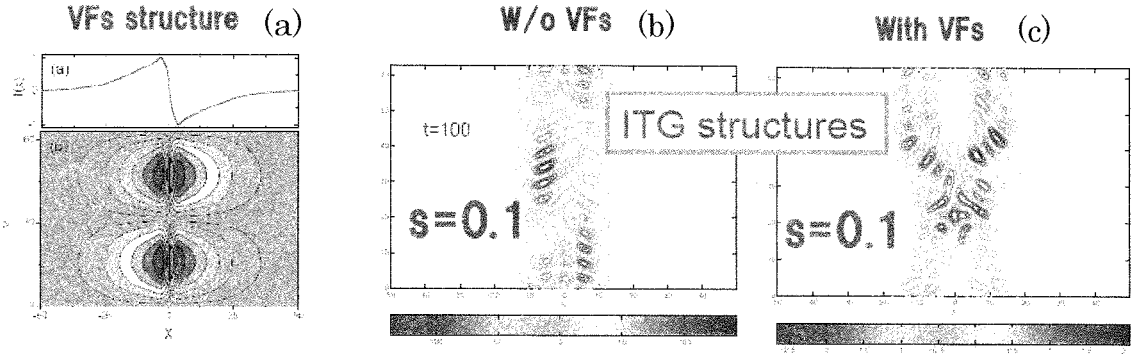


Fig.1 ティアリングモードによって駆動される渦流（a）が存在するときの ITG モードの２次元構造（c)。(b) は渦流がない場合の ITG モード構造を示す。

い場合の通常のITGモードの構造を示している。Fig.1 (c) から分かるように、渦流はITGモードの空間構造を大きく変形させ、この結果、ITGモードの線形成長率が大きく低減することが分かった。さらに非線形シミュレーションを実施し、渦流が存在する領域では異常輸送は低減し、内部輸送障壁の形成と矛盾しない輸送構造が創出することなどが分かった。これらの研究を背景に、ティアリイングモードやダブルティアリングモードが生成する渦流の構造について研究を進展させた。

2) 磁気島駆動の微視的不安定性の理論研究 (Magnetic Island induced ITG mode)

GFM5FCによる大域的なMHDモードと微視的なITG乱流が共存したマルチスケールの研究を推進した。MHDモードによる磁気島幅が比較的狭い場合はITGモードの成長は抑制されるが、磁気島幅が敷値を超えると大きな成長率を有する新しいタイプのITGモード(MITG: Magnetic island-induced ITG)が出現することを見出した(Fig.2・Fig.3)[2]。このITGモードは、磁気島構造に起因する複数の共鳴面の結合によって生成されるグローバルモードであることを明らかにし、非線形シミュレーションにおいてもその存在を確認した。これらの効果を取り入れた非線形シミュレーションを行い、振動する帯状流の存在なども明らかにした[3]。

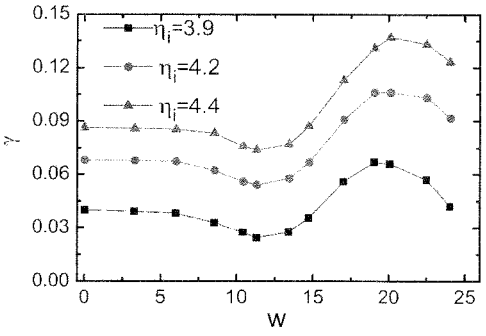


Fig.2 磁気島幅に対するITGモードの線形成長

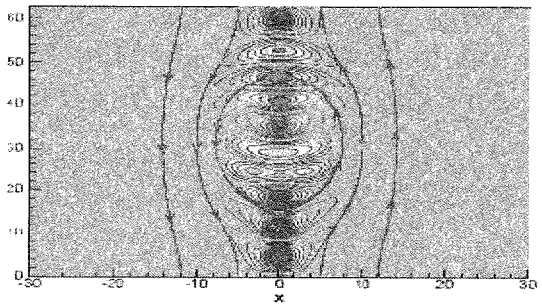


Fig.3 磁気島によって駆動されるITGモードの2次元構造

研究組織

岸本　泰明 (京都大)、Jiquan Li (京都大))、今寺 賢志(京都大))、Janvier Miho (京都大))、Zheng-Xiong Wang (京都大))、宮戸　直亮(JAEA)、井戸村　泰宏(JAEA)、石澤　明宏 (NIFS)、渡辺 智彦(NIFS)、洲鎌　英雄(NIFS)、陰山　聡(神戸大)、草野　完也(名古屋大)、徳永　晋介(九州大)、Aaron Froese(九州大)、Thibaut Voslion(九州大)

参考文献

[1] Z.W. Wang, J.Q. Li, J. Q. Dong, and Y. Kishimoto, "Generic Mechanism of Microtubulence Suppression by Vortex Flow", Phys. Rev. Lett. 103, 015004 (2009)

[2] Z. X. Wang, J. Q. Li, Y. Kishimoto and J. Q. Dong, "Magnetic- island- induced ion temperature gradient mode", Phys. Plasmas 16, 060703 (2009)

[3] J.Q. Li, Y. Kishimoto, Y. Kouduki, Z. X. Wang, and M. Janvier, "Finite Frequency Zonal flows in multi-scale plasmas turbulence including resistive MHD and drift wave instabilities", Nucl. Fusion 49, 095007 (2009)

物理的に無矛盾な渦電流計算機能を備えたプラズマ断面位置形状再構築システム(CCS)のSTプラズマ位置形状制御への適用検討

独立行政法人 日本原子力研究開発機構 栗原研一、川俣陽一、末岡通治
九州東海大学 御手洗 修
九州大学 小嶋康之、内藤梓小里、姜 毅、中村一男

1. 目的

本研究は九大応力研プラズマ実験装置、小型PWI実験装置(小型ST)、および平成20年度より実験を開始した新ST装置(QUEST)のプラズマ断面位置形状の高精度平衡制御系の構築を目指すものである。その手法として、日本原子力機構JT-60で現在稼動中である「コーシー条件面(CCS)法」を用いた実時間プラズマ断面位置形状再構築手法を小型ST、および新ST装置(QUEST)のプラズマ実時間制御へ適用させるための検討を行うものである。特に、着火時消滅時などのプラズマ変動期は勿論、安定化板などに常時誘起され、再構築精度に大きな影響を及ぼすプラズマ近傍の導体中を流れる渦電流の推定法について検討を深め、物理的に無矛盾なモデルによる実時間計算方法の検討も行う。

2. 研究の具体的方法

研究対象としては、日本原子力機構JT-60でのCCS法を用いた実時間プラズマ断面位置形状再構築システムを小型ST、および新ST装置であるプラズマ境界力学実験装置(QUEST)への適用に於いて、STトカマクへの初めての適用になることから、昨年度に引き続き以下の検討を行う。特に、渦電流の影響を精度良く考慮する方法のQUEST実機への適用を検討する。

①CCS法の観測方程式及び境界積分方程式などの方程式系を構成する。
②渦電流分布の考慮方法を検討する。
③以上を踏まえたQUEST装置に適用するためのシステム構築設計を行う。

3. 結果概要

3.1 CCS法の観測方程式及び境界積分方程式などの方程式系を構成する。

CCS(コーシー条件面)法はプラズマ断面形状を再構成する解析解に基礎を置く数値的手法であることから、センサーの数の増加に従い、厳密解に漸近する特長を持っている。従って、装置の計測機器が与えられた状況下では最も精度の高い形状再構築を実現する方法と言える。これまでアスペクト比の小さな球状トカマクに適用するために種々の検討を実施してきた。図1に、その方法の導出のレビュー、図2に、その方

理論計算へ
トカマク装置のトロイダル軸対称の領域の積分方程式

$$rotB=\mu_0 J$$
$$divB=0$$
$$B=rotA$$
$$rot(rotA)=\mu_0 J$$

$$div\left(\frac{grad\phi}{r^2}\right)=-\frac{\mu_0 J_\omega}{r}$$

グリーン関数を使用することによって、

$$\sigma\phi(\bar{x})+\int_{\partial\Omega}\left[G(\bar{x},\bar{y})grad\phi(\bar{y})-\phi(\bar{y})gradG(\bar{x},\bar{y})\right]\frac{dS(\bar{y})}{r_y^2}=\int_{\Omega}\mu_0 j_c(\bar{y})G(\bar{x},\bar{y})\frac{dV(\bar{y})}{r_y}$$

ϕ ：ポロィダルフラックス関数

G(x, y)：グリーン関数(斉次型偏微分方程式を満たす空間2点間の応答関数で、微分演算子を作用させるとデルタ関数となる関数)

$$G(\bar{x},\bar{y})\equiv G(r_x,z_x,r_y,z_y)\equiv\frac{4}{k}\sqrt{r_x\bullet r_y}\left\{\left(1-\frac{k^2}{2}\right)K(k)-E(k)\right\}$$

$$k^2\equiv\frac{4r_x r_y}{(r_x+r_y)^2+(z_x-z_y)^2}$$

$$\sigma=\begin{cases}8\pi^2=(\bar{x}がΩの内部)\\4\pi^2=(\bar{x}が\partial\Omega上にある)\\0=(\bar{x}がΩの外部)\end{cases}$$

$$\bar{x}\equiv(r_x,z_x)$$
$$\bar{y}\equiv(r_y,z_y)$$
$$\mu_0=4\pi\times10^{-7}$$

図1. 方程式の導出レビュー

法を数値解析に変換したベクトル方程式系を示す。

基本的には、磁束に関する観測方程式、磁場に関する観測方程式、仮想曲面上での境界積分方程式の3種類が基本となる方程式である。

フラックスループの方程式

$$\phi(\bar{x}_f)=\sum_{i=1}^{M}W_{F1}(\bar{x}_f,\bar{z}_i)\phi(\bar{z}_i)+\sum_{i=1}^{M}W_{B1}(\bar{x}_f,\bar{z}_i)Bt(\bar{z}_i)+\sum_{i=1}^{NE}W_{E1}(\bar{x},\bar{y}_i)E(\bar{y}_i)+\sum_{j=1}^{NC}W_{C1}(\bar{x}_f,\bar{y}_j)I_{PF}(\bar{y}_j)$$

磁気プローブの方程式

$$Bt(\bar{x}_B)=\sum_{i=1}^{M}W_{F2}(\bar{x}_B,\bar{z}_i)\phi(\bar{z}_i)+\sum_{i=1}^{M}W_{B2}(\bar{x}_B,\bar{z}_i)Bt(\bar{z}_i)+\sum_{i=1}^{NE}W_{E2}(\bar{x},\bar{y}_i)E(\bar{y}_i)+\sum_{j=1}^{NC}W_{C2}(\bar{x}_B,\bar{y}_j)I_{PF}(\bar{y}_j)$$

CCSの方程式

$$\frac{1}{2}\phi(\bar{x}_C)=\sum_{i=1}^{M}W_{F3}(\bar{x}_C,\bar{z}_i)\phi(\bar{z}_i)+\sum_{i=1}^{M}W_{B3}(\bar{x}_C,\bar{z}_i)Bt(\bar{z}_i)+\sum_{i=1}^{NE}W_{E3}(\bar{x},\bar{y}_i)E(\bar{y}_i)+\sum_{j=1}^{NC}W_{C3}(\bar{x}_C,\bar{y}_j)I_{PF}(\bar{y}_j)$$

フラックスループ　磁気プローブ　渦電流　PFコイル

図2. 方程式系の構成

3.2 渦電流分布の考慮方法の検討

渦電流は、これまでのトカマク装置の研究開発において着火消滅といったプラズマの変動期にのみ考慮することが多く、その場合でも実験的な試行錯誤により、条件出しが終わってしまうと、ほとんどその必要性について議論されることが少なかった。

しかし近年、トカマクの性能が不安定性によって制限を受けることが明確になってきたことから、プラズマ変動期の解析の重要性が以前にも増してきており、高精度に形状を再構築する必要性から渦電流の高精度分布が求められてきている。

さらに、超伝導化した装置においては、コイル電流の追従性が問題となるためプラズマ近傍に受動的な導体や常電導コイルを配置するなどの対策が講じられる結果、渦電流源がプラズマの極近傍に存在する場合や、トロイダル磁場コイルのリップル低減のためにフェライト鋼の板を装着する場合では、電気抵抗率が低いために、より大きな渦電流が流れるなど新たな課題も登場してきている。

プラズマ性能を制限する不安定性のうちで、最大の課題である抵抗性壁モード(RWM)では、壁の渦電流とプラズマとの磁気結合が解析対象であることから、渦電流の考慮方法についても、重要な研究対象となっている。

このような背景の中で、QUESTの解析において、留意点を箇条書きすると以下のとおりである。

(a)渦電流は、パルス磁場中におかれた有限な抵抗率を持つすべての材料中で発生する。

(b)トカマク装置の場合では、プラズマ放電の間に磁場が変化するので、渦電流は真空容器・ポロイダル磁場コイル・トカマク構造物などの導体内に流れる

(c)特に電流の立ち上がりと立下り時において磁気測定を用いたプラズマ断面形状再構成において無視できない大きな渦電流があったため、誤差が大きかった。

なお、昨年度CPD真空容器における渦電流を考慮した球状トカマクプラズマの再構成を行った結果は良好であった。即ち、平衡コードとEDDYCAL(JAEA)で計算したCSコイル立上げ時の渦電流分布とプラズマ電流の変化による渦電流分布を基に、CCS法によるプラズマ断面形状再構成を実施した。真空容器に流れる渦電流に関して、プラズマ電流による誘導を考慮することでプラズマ断面形状再構成の精度が飛躍的に向上した。また、プラズマ電流立ち下げ時のプラズマ断面形状についても再構成できることが分かっている。

ここで一昨年度に言及した渦電流を組込む場合の注意点について本質的な課題を含んでいるので再記する。渦電流が外部の計測で求まるかということは重要な問題であり、今の問題は「一般の軸対称電流が流れていると仮定したとき、外部の磁場磁束の情報で内部の電流分布が求まる

か」というように書き換えられるが、軸対称電流は、外部に磁場も磁束も作らない電流分布が存在することが証明出来るので、仮に外部の測定と整合のとれたある電流分布が得られたとしても、その電流分布に外部場を作らない電流分布を足しても引いても解になることから一意ではないことが示せる。従って、一周電圧の測定から渦電流を推定したり、磁場の拡散方程式を解く順問題にするなど物理を入れない限り逆問題だけでは電流分布の一意解を得ることは不可能ということになる。ただ、プラズマ電流という未知のものをさらに含めるとより精度を落とすので、渦電流とプラズマとを分離するため、センサーの配置や数、種類を決めることも選択として重要である。

具体的な組み込みは、磁束センサーの時間微分信号から、軸対称の電流分布を推定することになるので、今後実機における数値的な取り扱いやハードウェア構成について検討を継続する。

3.3 QUEST装置に適用するためのシステム構築

(1)プラズマ断面形状フィードバック制御システムの構成の検討

図3にQUESTにおけるフィードバック制御システムの構成を示す。プラズマ断面形状のフィードバック制御手法は、目標となるプラズマ電流・位置形状値と計測値との偏差に対する比例・微分制御である。プラズマ断面形状の実時間再構成手法は、リミターの外側に配置した16本のフラックスループの観測方程式とCCSの境界積分方程式を連立させ、プラズマ最外殻磁気面を同定する。

フラックスループ信号は絶縁アンプを取合いとしAD変換器で信号処理した後、CCS法により実時間でプラズマ断面位置形状値を算出する。フィードバック制御計算機は、算出されたプラズマ断面位置形状値を用いてPFコイルの電流を制御しプラズマ断面位置形状を目標の位置形状に制御する。これにより、プラズマの垂直位置不安定性の安定化も期待できる。

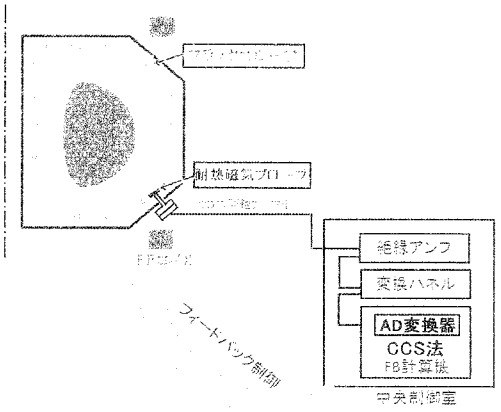


図3. QUESTフィードバック制御システム構成

以下に、プラズマ断面位置形状フィードバック制御における今後の課題を示す。

①CCS上の点での境界積分方程式を組立て、フラックスループの観測方程式と連立させて計算する。

②磁気プローブによって、計算の信頼性が向上することを確認する。

③フラックスループの観測方程式とCCSの境界積分方程式を連立させ、プラズマ断面形状を実時間で再構成する。

④プラズマ断面形状の実時間再構成により、プラズマ断面形状をフィードバック制御する。

(2)実時間断面形状再構築システムの提案

QUESTにいてCCSを実時間で実行するシステムの初期設計を行った。図4にその概念図を示す。詳細設計は、次年度以降の課題である。

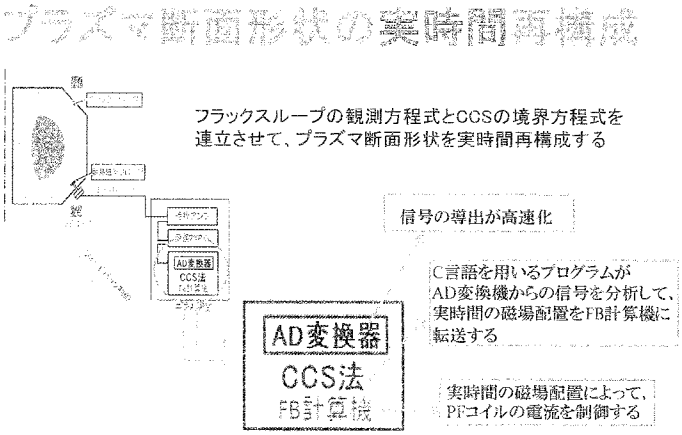


図4. QUEST断面形状システム構成

4.今後の新たな展開に向けて —QUEST実時間制御システムの構成—

以上を総合的に描いたシステム構成を図5に示す。今後QUESTにおける実験を進めながら、緊急性を要する部分から、実製作に移行する予定である。高度な実時間プラズマフィードバック制御の実現を通じて、新たな球状トカマクの学術的発展に貢献することが可能となる。

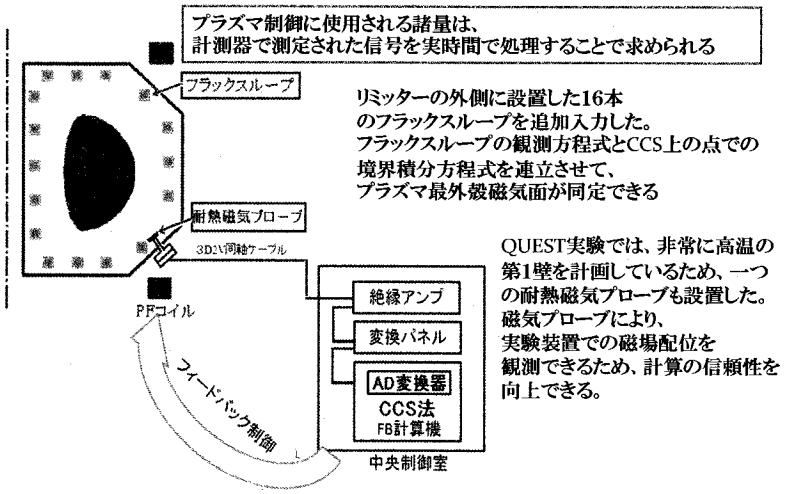


図5 提案するQUEST実時間制御システム

5. 関連文献

・K. Nakamura, et al., "Characteristics of SVD in ST Plasma Shape Reconstruction Method Based on CCS" Journal of Plasma and Fusion Research SERIES, Vol.8 (2009), pp. 1048-1051, Sep. 2009.

・K. Nakamura, et al., "Eddy Current Effect on Plasma Shape Reconstruction Based on CCS Method in CPD and QUEST" Asia Plasma Fusion Association 2009, Festival City AUGA, Aomori, Japan, Oct. 27th-30th, 2009.

・中村一男，他，「CCS法によるSTズマ断面形状再構成における特異値分解の特徴」第25回プラズマ・核融合学会 年会 予稿集 (2008).

・中村一男，他，「CCS法によるSTズマ断面形状再構成における特異値分解」第24回プラズマ・核融合学会 年会 予稿集 (2007).

・姜 毅，他，「渦電流を考慮したCCS法によるQUEST球状プラズマ断面形状の実時間再構成」第13回プラズマ・核融合学会年会(九州・沖縄・山口支部大会) 予稿集 (2009).

・松藤伸治，他，「真空容器渦電流分布を考慮したCCS法によるCPDプラズマ断面形状再構成」第12回プラズマ・核融合学会(九州・沖縄・山口支部大会) 年会 予稿集 (2008).

・F. Wang, K. Nakamura, O. Mitarai, K. Kurihara, Y. Kawamata, M. Sueoka, K. N. Sato, H. Zushi, K. Hanada, M. Sakamoto, H. Idei, M. Hasegawa, et al.: *Engineering Sciences Reports, Kyushu University*, Vol. 29, No. 1 (2007) 7-12.

・K. Kurihara, et al., "The basic methods for understanding of plasma equilibrium toward advanced control" Fusion Eng. Des., 74 (2005), pp. 527-536.

・K. Kurihara, "A new shape reproduction method based on the Cauchy-condition surface for real-time tokamak reactor control" Fusion Eng. Des., 51-52 (2002), pp. 1049-1057.

21 FP－14

巨視的運動論的 MHD 現象解析用のトロイダル版ジャイロ運動論的粒子コードの開発

山口大学・大学院理工学研究科　内藤裕志

目的

トカマク実験で観測される MHD 現象の理解には、従来の MHD 理論を超えた運動論的 MHD 理論に基づくシミュレーション研究が必須である。ジャイロ運動論を基礎とする粒子（PIC: Particle-In-Cell）シミュレーションは、第一原理シミュレーションであるため莫大な計算機資源を必要とするが、流体系のシミュレーションで用いられるモーメント方程式を求める際の"closure"の問題から自由である特徴がある。我々は、MHD 解析に特化したジャイロ運動論的粒子コード GpicMHD（円柱版）を開発した。本研究の目的はトロイダル版の GpicMHD を開発し、ITER 等の高温・高密度の核燃焼を含むトカマクプラズマの巨視的・運動論的 MHD 現象を解明することである。

シミュレーションモデル

円柱版 GpicMHD の概要は以下のとおりである。デルタエフ方を用いたジャイロ運動論的 PIC コード。半径方向は差分法を用い、非一様メッシュに対応している。ポロイダル方向とトロイダル方向は高速フーリエ変換を用いてモード展開している。擬スペクトル法を用いる。フーリエ空間で不必要なモードを消去することにより、時間ステップ幅を大きくしている。自動並列と MPI 並列を併用したハイブリッド並列コードになっている。

研究成果の概要

トロイダル版の作成のための予備的研究を行った。また１次元方向の領域分割コードの並列化性能を確認した。２次元方向の領域分割コードは開発中であるが、現状でも並列化性能は得られている。ジャイロ運動論の定式化を見直し、新しい版の GpicMHD を開発した。従来の版は、基礎方程式系として（１）ジャイロ運動論的ブラソフ方程式、（２）ジャイロ運動論的ポアッソン方程式、（３）アンペールの法則を用いている。新しい版では、（２）・（３）式を直接解くかわりに、それぞれを時間で偏微分して求めた（４）渦方程式、（５）磁力線方向のオームの法則を用い、時間積分により場の量を求めている。粒子のデータは０次（電荷密度）と１次（電流密度）のモーメントの計算には使用する必要がないため、極めて粒子の離散性によるノイズの少なく、理想的なエネルギー保存を示す結果になった。またシミュレーションのパラメータ領域も、実際の実験と同様の高温・大空間スケールの場合にも適用可能になった。

成果報告

[1] H. Naitou, K. Kobayashi, H. Hashimoto, S. Tokuda, M. Yagi, "Development and Parallelization of Gyrokinetic PIC Code for MHD Simulation", J. Plasma Fusion Res. SERIES, Vol.8 (2009).

[2] H. Naitou, K. Kobayashi, H. Hashimoto, T. Andachi, W. Lee, S. Tokuda, M. Yagi, "Proposal of a brand-new gyrokinetic algorithm for global MHD simulation", 51st Annual Meeting of APS-DPP, Nov. 2-6, 2009, Atlanta GA, USA.

銅合金に対する照射効果

東北大学金属材料研究所　畠山　賢彦

目的

我々は、国際熱核融合実験炉（ITER）のヒートシンク候補材となっている Cu-Cr-Zr 合金の微細析出物が、従来定説であった Cu_5Zr ではなく Cr 析出物を核として溶質原子の Zr や不純物の Si, Fe からなる偏析層がその表面を覆った特異な構造であることを報告してきた [1]。銅合金は最稠密な FCC 構造のため、空孔が十分動く回復温度領域における照射で著しいボイドスエリングを生じるが、Cu-Cr-Zr や酸化物分散強化 Cu 銅合金は、100dpa 程度の照射においても殆どボイドスエリングを起さないことが知られている。これらの合金では析出物とマトリックスの界面が照射欠陥のシンクとして働き、空孔集合体であるボイドの形成を抑制すると考えられている。しかしながら、その機構の詳細や、界面構造との関係については未解明の点が多い。本研究では、これら合金の析出物寸法やマトリックスとの整合性をコントロールした試料について、重イオン照射を行い、ボイドスエリング耐性と、析出物／マトリックスの整合性や界面構造の関係を調べる。

実験方法

22 年度は、試料として Cu-0.92Cr-0.14Zr (wt.%) および Cu-0.90Cr (wt.%) 合金を用いた。1233K , 3h の溶体化処理の後、水焼き入れ し、その後 703K で 4h 焼鈍後に空冷(PA)、さらに 873K で 1h の焼鈍後に空冷 (HT1)した。これらについて 3 次元アトムプローブにより析出物の構造を観察した後、各合金の PA, HT1 熱処理材について温度 673K, イオン種 2.4MeV Cu^{2+}, で 0.1, 1, 10dpa の照射を行った。

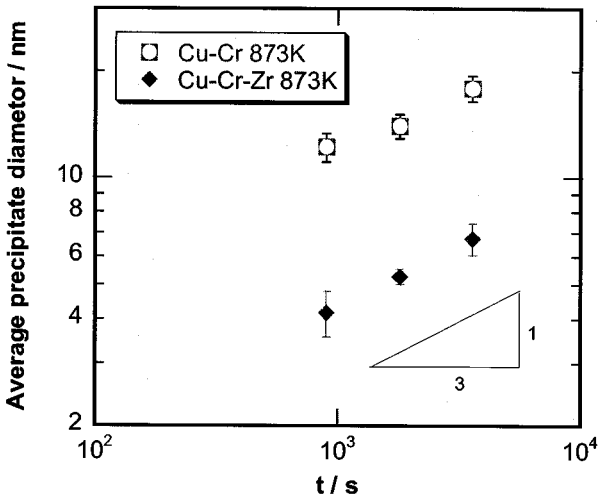


図 1．PA 熱処理後、873K、900-3600s 焼鈍による析出物平均直径の時間変化。

実験結果

22 年度は、試料として Cu-Cr,Cu-Cr-Zr を用いた。図 1 に 873K で焼鈍後の析出物寸法変化を示す。Cr リッチ析出物の寸法は、時間の 1/3 乗に比例し、オストワルド成長していると思われる。析出物界面の状態変化は析出物とマトリックスの界面エネルギーに影響を与えるが、900-3600s の範囲では PA 熱処理後よりわずかに高い界面エネルギーの状態が続き、ほぼ一定の値であると思われる。また、Cu-Cr の析出物が Cu-Cr-Zr の析出物よりも界面エネルギーが大きくミスフィットが大きいことが示唆される。

図 2 に照射前の析出物を 3 次元アトムプローブで観察した結果を示す。PA 熱処理後の析出物寸法は Cu-Cr, Cu-Cr-Zr とも直径 4nm 前後であった。Cu-Cr-Zr においては以

前の報告と同様にCr析出物の周辺にZrや不純物Siからなる雰囲気がみられた。HT1条件ではCu-Cr-ZrにおいてZr,Siが析出物界面に偏析したレイヤーが観察された。このレイヤーに垂直方向に元素分析した結果、不純物SiはCr析出物内部に濃化しており、マトリックスにはほとんど固溶しておらず、析出物／マトリックス界面でわずかに濃化していた。Cu-Cr-ZrはCrリッチ析出物中のCu濃度が17at.%程度とCu-Crと比較して高いことが認められた。本年度は、Cu-CrおよびCu-Cr-Zr合金に対して0.1dpaまでの照射を行ったが、高照射量の照射後に、集束イオンビーム加工を用いたリフトアウト法により試料作製し、TEMによる内部組織観察と、3次元アトムプローブ分析を行う予定である。

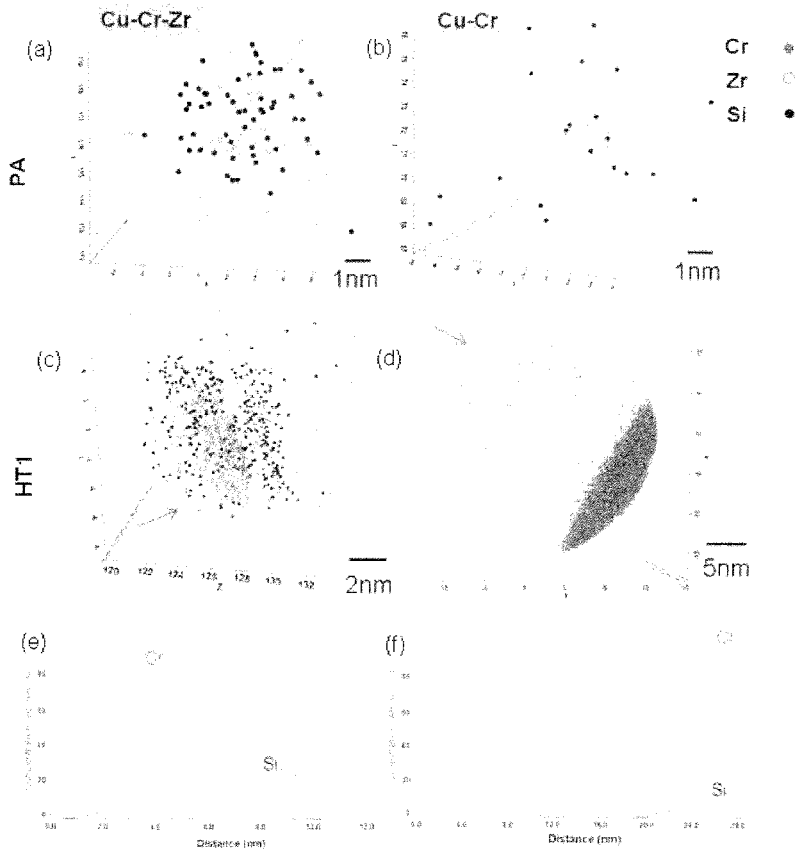


図2. PA熱処理後のCu-Cr-Zr(a)、Cu-Cr (b)、HT1熱処理後のCu-Cr-Zr(c), Cu-Cr(d)の3次元原子マッピング。(e)は(c)の点線内の領域の一次元化学分析結果。(f)は(d)の点線内領域の一次元化学分析結果。

考察

2つの熱処理条件により2種類の合金から4種類の析出物／マトリックス界面構造が形成された。図1に示した析出物の成長過程より、Cu-CrのPA条件とHT1条件では、界面エネルギーが異なることが示唆される。これは析出物寸法によるマトリックスとのミスフィットの違いによるものと思われる。

Cu-Cr-ZrのPA条件では、界面近傍にオーバーサイズのZrが分布しているため、格子が拡張しており、界面エネルギーがPAのCu-Crに比べ大きい状態であると予測される。一方、Cu-Cr-ZrのHT1条件ではZr,Si偏析によるレイヤーが界面エネルギーを下げており、析出物／マトリックスのミスフィットは小さいと思われる。次年度はこれら界面構造変化とシンク強度の関係を継続して調査したいと考えている。

参考文献

[1] M. Hatakeyama et al., Mater. Trans. 49 (2008) 518.

圧力容器鋼の磁気特性に与えるイオン照射効果

岩手大学工学部附属金属材料保全工学研究センター　鎌田康寛

目的

原子力発電プラントの高経年化問題の一つとして圧力容器の照射脆化があり、脆化機構の解明とそれに基づく健全性評価法の確立が求められている。我々は磁気利用による脆化の非破壊評価の可能性を検討しており、磁気特性に与える照射欠陥形成の影響の解明が求められている。欠陥と磁壁の相互作用の解明には、磁場を印加した際の磁区の動的観察が望まれる。本研究では、イオン照射と単結晶薄膜試料の組み合わせに着目した。イオン照射ではカスケード損傷が起こるので、中性子照射と似た損傷組織が得られる。一方、中性子照射と異なり試料が放射化せず扱いが容易になる。イオン照射の損傷深さは一般に1 μm 程度と言われており、薄膜では試料全体が損傷を受け、照射領域の物性測定が容易になる。さらに単結晶を用いることで複雑な粒界の影響を無視することができ、結晶方位を選ぶことで磁区観察が容易になる。本報告では、単結晶鉄薄膜をイオン照射して電気抵抗・磁気特性評価を行い、照射欠陥と磁気特性の関係を調べた結果をまとめる。

方法

単結晶薄膜の作製は分子線エピタキシー法を用いた。MgO(001)単結晶基板上に、30 及び 250nm の鉄を室温で電子ビーム蒸着した後、773K で熱処理を行い、構造評価には、反射高速電子線回折 RHEED を用いた。イオン照射はタンデム型加速器により 3.2MeV Ni^{3+}を室温照射した。SRIM 計算により損傷度は 30, 250nm 深さで 0.3, 0.5dpa と見積もられた。また Ni イオンのほとんどが薄膜を貫通し、鉄薄膜への残留 Ni イオンの影響は無視できると考えられる。本実験では 2 種類の照射試料（①イオンを全面照射した試料、②Al 箔でマスクし、部分照射した試料）を用意した。照射前後で 4 端子法により 15K～室温で電気抵抗率を測定した。また VSM を用いて室温で磁化曲線を測定した。磁区観察は面内磁区像をカー効果により観察する偏光顕微鏡を用いた。ヘルムホルツコイルで試料を消磁し、その後磁場の印加による磁区変化の直接観察を行った。

結果および考察

RHEED パターンから高品位のエピタキシャル単結晶鉄薄膜の作製を確認した。図 1 に電気抵抗の温度変化を示す。30nm 鉄試料の抵抗率は照射により $0.9\times10^{-8}\Omega$m 増加しており照射欠陥が導入されたと考えられる。図 2 は VSM の結果で、左が[100]方向、右が[110]方向に磁場をかけたもので、上段は未照射、下段は照射した試料の結果である。[100]方向で磁化容易に、[110]方向で磁化困難になっている。これはバルク材のものと一致し、本研究の薄膜試料もバルクの結晶磁気異方性と同様の異方性を持つことが確認できた。照射前後で磁化曲線に顕著な違いは見られなかった。図 3 に磁区観察の結果を示す。この写真は未照射と照射域を含んだ薄膜試料の観察結果で、点線は未照射・照射の境界を表す。この写真は消磁状態の磁区を表しており、点線の部分を境として磁区構造に顕

著な違いは見られない。ここで、Fe[100]方向に磁場をかけて動画撮影を行い、磁場を消磁状態から +20Oe、-20Oe まで徐々に印加した。結果、磁化過程においても、未照射・照射域で磁区構造に顕著な違いは見られなかった。これは照射前後で磁化曲線に変化が見られなかった VSM の結果とも対応している。

本研究の照射条件と似た研究に Eldrup らが行った多結晶バルク鉄の中性子照射実験がある[1]。この研究では照射欠陥について詳しく研究されており、陽電子消滅法によるサブナノサイズの空孔クラスター（10^{24} m^{-3} オーダー）と TEM 観察による数ナノサイズの転位ループの形成が確認され、空孔クラスターは転位ループの 10^2 倍の密度であることがわかっている。また、電気抵抗測定から、高密度空孔クラスターの影響により抵抗率が増加した($\Delta\rho$ = 1.8×10^{-8} Ωm)と述べている。本実験の抵抗率の増加量のオーダーはこれと同じであり、本研究でも照射によりサブナノサイズの高密度な空孔クラスターが形成していると考えられる。このような照射欠陥については磁気特性に大きな影響を及ぼさないことがわかった。

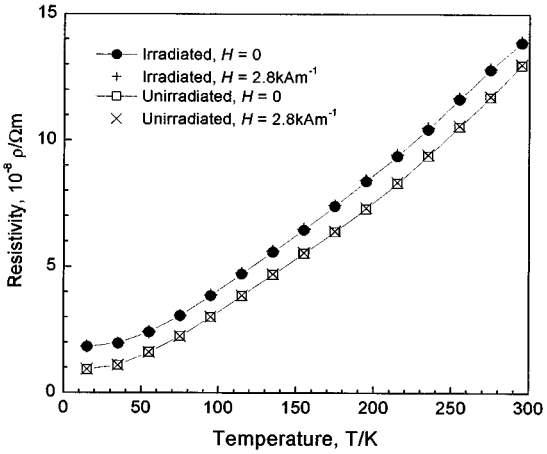


図 1　照射前後での抵抗率の温度依存性

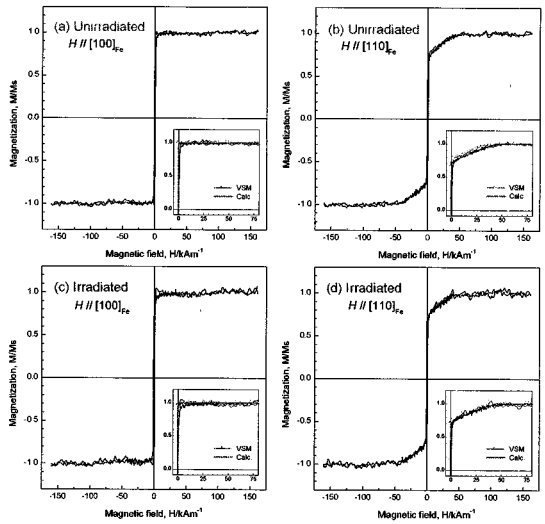


図 2　未照射・照射試料の磁化曲線

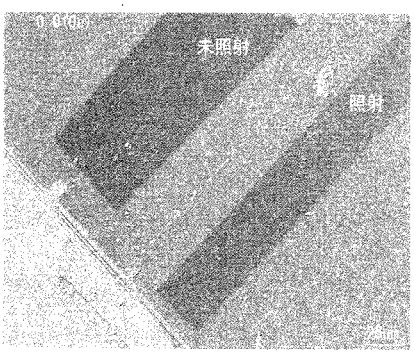


図 3　未照射・照射域での磁区構造

文献[1] M. Eldrup et al., J. Nucl. Mater. 307-311 (2002) 912.

成果報告

(1) 細井三蔵, 鎌田康寛, 越後谷淳一, 菊池弘昭, 小林悟, 渡辺英雄, 吉田直亮, 三谷誠司, 高梨弘毅
"重イオン照射した単結晶鉄薄膜の磁化測定と磁区観察" 第 8 回日本金属学会東北支部研究発表大会, 講演概要集 p.8, 岩手大, 盛岡, 2009.12.5.

(2) 鎌田康寛, 大谷俊博, 中村暢伴, 荻博次, 渡辺英雄, 菊池弘昭, 小林悟, "中性子照射脆化した圧力容器鋼・モデル合金の超音波共鳴特性", 第 17 回超音波による非破壊評価シンポジウム, 東京, 2010.1.29-30.

(3) Y. Kamada, H. Watanabe, S. Mitani, J. Echigoya, H. Kikuchi, S. Kobayashi, N. Yoshida, and K. Takanashi, "Effects of Room Temperature Heavy-Ion Irradiation on Magnetic and Electrical Properties of a Single Crystalline Iron Thin Film", Trans. Mater. Vol.50, (2009) pp.2134-2138

研究組織

鎌田康寛, 菊池弘昭, 小林悟: 岩手大学工学部附属金属材料保全工学研究センター
渡辺英雄 : 九州大学応用力学研究所

ジャイロトロンのミリ波散乱を用いた電子バーンシュタイン波動の直接計測

核融合科学研究所　久保　伸

目的と概要　QUESTにおいては、電子バーンシュタイン波（EBW）による電流立ち上げと定常維持が計画の基幹となっている。しかしながら、これまでEBWの直接検出が困難であるため波動の励起、伝搬及び電流駆動の物理機構については理論的な予想、解析はあるものの、実験的には必ずしも明確にはなっておらず、特にトーラス系磁場閉込め装置においては、直接波動を検出した例は、プラズマパラメータが低く、プローブ測定が可能な装置でしかない。このEBWの波動伝搬とその空間構造を直接検出し、その物理機構の検証と解明を行うことにより、電流立ち上げと定常維持を高効率・高性能化することが本研究課題の目的である。波動の直接検出にはミリ波帯の散乱計測が有効であるが散乱断面積の小ささから大電力のプローブビームを用意する必要がある。応用力学研究所においては170GHz大電力ジャイロトロンおよび伝送入射システムが有効利用できる可能性がある。このため、プローブビームとして170GHzを想定した散乱計測によるEBWの直接検出の可能性を検討する。昨年度は、実際に用いるのEBWを励起アンテナの形状が定まらず、具体的な散乱配置を検討するまでには至らなかったが、今年度に入り、アンテナ形状が確定したため、テストケースとしてこのポートと共存する形で散乱計測のための光学系を検討した。

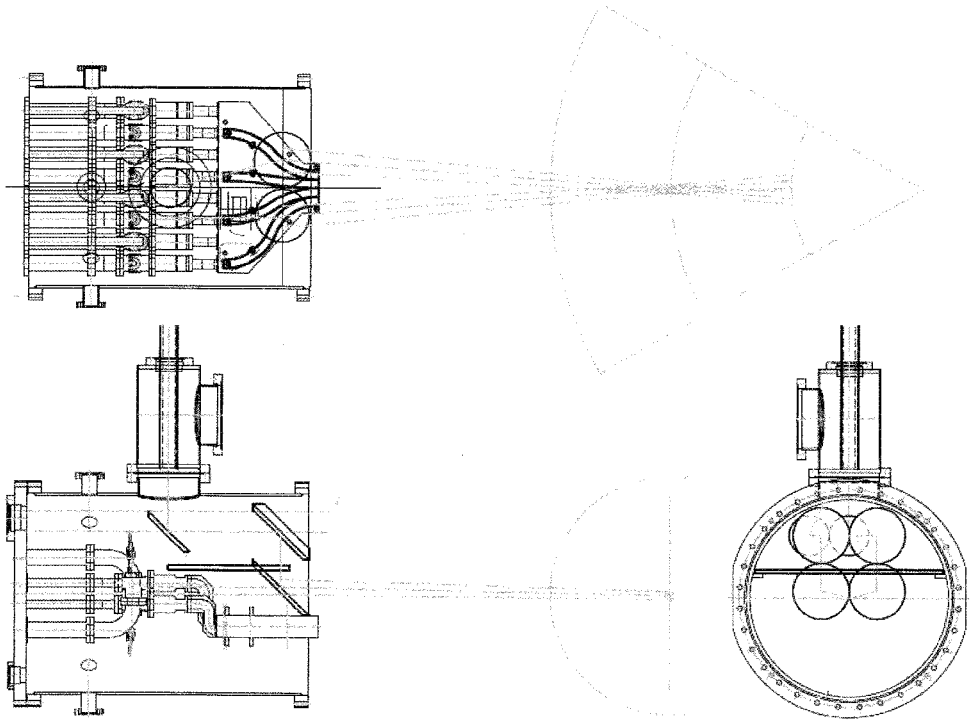


図1. EBWアンテナ とこのアンテナポートに散乱計測用アンテナを設置した場合のミラー配置。上側から導波管で導入された170GHzパワーを装置中心で$1/e$径で10mmになるように設計した

EBWに伴う伝送電力と密度揺動と散乱効率の関係　昨年度、行った予備的検討に基づいて、入射する電力と散乱電力の比率は、密度揺動$\tilde{n}$が存在する場合のプローブビームと散乱波の散乱効率P_s/P_iは、有効散乱体積V中に一様に密度揺動$\tilde{n}$が存在する場合、

$$P_s/P_i = 4\pi r_0^2 \tilde{n}^2 V^2 \qquad (1)$$

と表せる。ここにr_0は古典電子半径である。この表式から明らかなように、散乱体積として、受信、散乱ガウスビームの交差する体積を求める必要がある。散乱効率を上げるためには、この体積をできる限り大きくとることが望ましいが、一方で、この体積を大きくするために大きいビームにすると空間分解能が下がり、今、検出対象とする電子バーンシュタイン波の空間構造を明らかにできない。また、昨年度の検討結果からランチャー前面に近い領域での後方散乱を観測する必要があることも解っている。この両者の条件を満たすビームのウェイストサイズを10 mmとして、この入射、受信光学系をランチャーと同一ポートに収納することを前提にして、具体的な光学系の設計を行った。可能なミラー配置をランチャーとともに示したのが、図1であり、真空窓を介してコルゲート導波管でランチャーポートに導入された170GHzのミリ波を第一、第二ミラーでビームサイズを調整した後、第三ミラー（平面ミラー）で入射角度を可変とするものである。受信ビームはランチャーの対称面を挿んでほぼ対称にミラーを配し、真空導入(取り出し)には、ホーンアンテナで基本導波管にサイズを落として導波管真空窓を、用いることで、取扱が容易となり、入射ビームと同等なビーム性能を得ることとした。このミラー配置を用いて形成可能なビームを検討したのが、図2である。この例では、第二、三ミラー上でのスポットサイズが55 mmに達しており、この配置で許されるミラーサイズ有効直径140 mmϕで辛うじて収束の実現が可能な配置であることがわかる。図1には、緑の一点鎖線でこのスポットサイズを示している。この図からわかるように、これだけビームを絞っても、半径方向の分解能は、約200 mmとなり、浅い角度での後方散乱の弱点が現れる結果となった。一方、上下方向には、高い分解能が得られ、第三ミラーを駆動して、散乱体積を上下にスキャンすることで、上下方向での波動伝播構造は明らかに出来そうである。

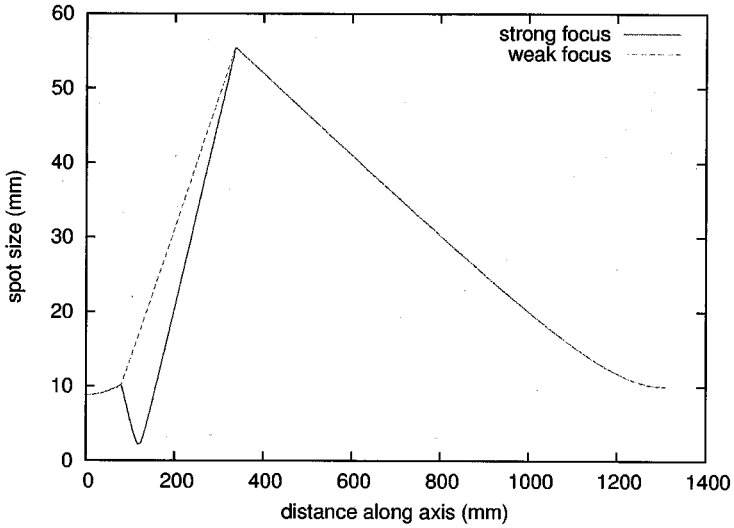


図2. 図1の配置の導波管出口からプラズマ中心への光路に沿ったガウスビームのスポットサイズ、赤線は第一ミラーを強集束鏡にした場合、緑線は凸面鏡にした場合。

プラズマ対向材中の水素同位体及びヘリウムの滞留・放出挙動に関する研究

静岡大学　理学部　奥野健二

【目的】

D-T 核融合炉におけるダイバータ材として、タングステンと炭素繊維複合材(CFC)の併用が考えられている。ダイバータはプラズマに直に曝されるため、CFC がスパッタリングの影響を受け、プラズマより漏洩した高エネルギー粒子および核反応によって生成したヘリウムと共にタングステンに照射され、混合層を形成する。プラズマより漏洩した高エネルギー粒子は排気した後に再度燃料として炉内に導入されるため、トリチウムリサイクリングの観点から、混合層形成と同時に起こる水素同位体の滞留挙動の解明は重要な課題である。昨年度の研究から、実機環境を模擬して炭素、ヘリウムおよび重水素の複合イオン照射を行った際のタングステンにおける微細構造変化と重水素滞留挙動の相関性に関する知見が得られたため、本研究ではヘリウム重水素イオン同時照射において、ヘリウムイオンのイオンフラックスを変化させ、フラックス比が照射損傷に及ぼす影響を見積もった。

【実験】

本研究にはアライドマテリアル社製、1173 K 歪み取り処理済みの多結晶タングステンを使用した。試料を 3 mm^{ϕ}×0.1 mm^{t} に加工した後に種々のフラックス比でヘリウム重水素同時照射を行った。ヘリウムイオン照射条件はイオンエネルギーを 3.0 keV、イオンフラックスを(0.2-1.8)×10^{18} He^{+} m^{-2} s^{-1}、イオンフルエンスを(0.2-1.8)×10^{22} He^{+} m^{-2}、重水素イオン照射条件は、イオンエネルギーを 3.0 keV、イオンフラックスを 1.0×10^{18} D^{+} m^{-2} s^{-1}、イオンフルエンスを 1.0×10^{22} D^{+} m^{-2} として、室温にて照射を行った。照射後、透過型電子顕微鏡(TEM)を用いて表面の照射損傷を観察すると共に温度間隔 100 K で 1073 K までアニーリングを行い、各温度で TEM 観察を行うことで試料表面における照射損傷の消滅挙動を評価し、重水素滞留挙動との相関性の解明を行った。

【結果および考察】

図 1 にヘリウムイオン・重水素イオンフラックス比を変化させた際の室温における TEM 観察像を示す。He/D=0.2 及び 1.0 の同時照射試料では、転位や転位ループなどの照射損傷が形成されていることが確認された。一方、He/D=1.8 の照射試料では室温観察においてもヘリウムバブルが観測された。

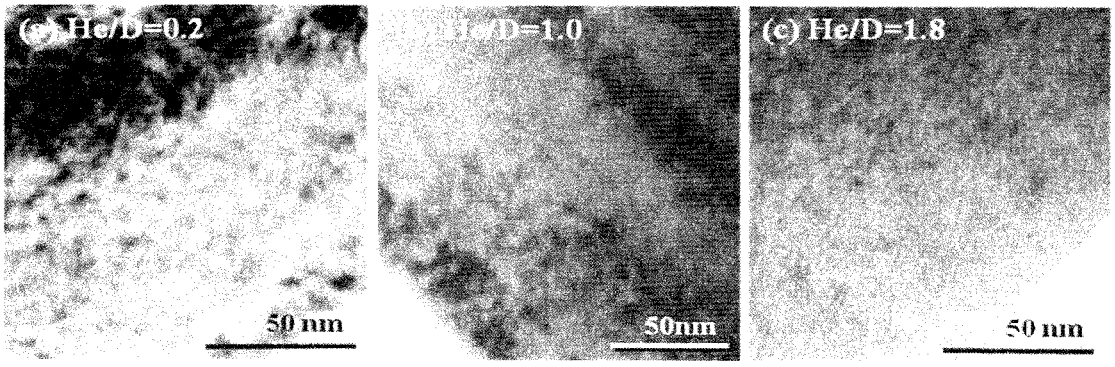


図 1 フラックス比(a)He/D=0.2, (b)He/D=1.0, (c)He/D=1.8 同時照射試料の室温での TEM 観察像(明視野)

また、各照射試料のアニーリング実験結果において He/D フラックス比 0.2 及び 1.0 の同時照射試料では、673

K まで変化は見られなかったが、773 K で転位が動き始め、873-1073 K の温度領域でヘリウムバブルの成長が見られた。He/D フラックス比 1.8 の同時照射試料では 673 K からヘリウムバブルが成長し始め、973 K でバブルどうしが繋がり集合することが分かった。また、ヘリウムイオンフラックスが増加するごとに生成するヘリウムバブルの量、大きさともに増大していることが明らかとなった。

各フラックス比におけるヘリウムイオン・重水素イオン同時照射試料に関して、これまでに得られた TDS 測定結果との比較を行った。図 2(a)に重水素単独照射及びヘリウム重水素同時照射の D_2 TDS スペクトルを、(b)に同時照射でのフラックス比変化における重水素滞留量変化を示す。単独及び同時照射における TDS スペクトル間の比較により、ヘリウムイオンを同時照射することより試料における重水素滞留量が増加することが示された。これはヘリウムイオン照射により、重水素捕捉サイトが形成されるためと考えられる。一方、同時照射でのフラックス比変化における重水素滞留量変化より、ヘリウムイオンフラックスが増加しても重水素滞留量はほぼ一定であった。これは一定フラックス以上ではヘリウムイオン照射によって形成したヘリウムバブルが拡散障壁となり、重水素の内部へ拡散しにくくなるためと考えられた[1,2]。

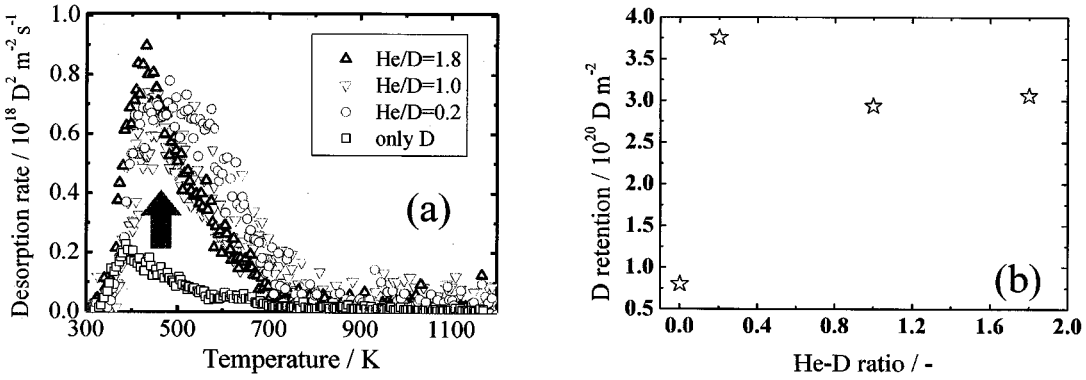


図 2 (a) 各フラックス比におけるヘリウム重水素イオン同時照射後の TDS スペクトル及び
(b) 同時照射でのフラックス比の変化における重水素滞留比変化

【結論および今後の展望】

タングステンにおける照射損傷と水素同位体滞留量の相関をより詳細に明らかにするため、種々のフラックス比でヘリウムイオン・重水素イオンを同時照射し、TEM 観察を行った。各試料においてヘリウムバブルの形成が確認され、その大きさはヘリウムイオンのフルエンスが高くなるほど大きくなり、He/D フラックス比 0.2 及び 1.0 では 873-1073 K の温度領域で、He/D フラックス比 1.8 では 673 K の加熱によりヘリウムバブルが移動及び成長していることが焼鈍実験の結果より示唆された。また、重水素単独照射及びヘリウムイオン・重水素イオン同時照射における TDS 測定結果と比較したところ、ヘリウムイオン・重水素イオン同時照射試料では重水素滞留量は増加し、これよりヘリウムイオン照射により重水素捕捉サイトが形成されることが示唆された。今後は、タングステンにおける炭素イオン、重水素イオン及びヘリウムイオンを照射し、水素同位体滞留挙動に関し、系統的に理解するために、各照射イオンの照射温度および照射エネルギーなど照射条件を変化させることで、より実機に近い環境で生成する照射損傷が水素同位体滞留挙動に及ぼす影響について明らかにする予定である。

参考文献

[1] S. Nagata *et al. J. Nucl. Mater.* 290 (2001) 135 , [2] Y. Ueda *et al. J. Nucl. Mater.* 386 (2009) 725.

核融合材料中の水素拡散･捕獲挙動に関する研究

九州大学大学院総合理工学研究院　田辺　哲朗

目的

将来のD-T核融合実験炉では炉内への放射性水素同位体トリチウムの蓄積を低減することが不可欠である。このため、核融合炉材料中の水素溶解度・拡散係数は小さいほうが好ましい。タングステン(W)材料は、耐熱特性・耐損耗特性に優れており、現在最も有望な炉内材料として注目されている。しかしながら、W中の水素溶解度・拡散係数データは極めて乏しく、40年前に報告された1173 K以上の高温で得られた値を低温度領域に外挿した値が引用されているのが現状である。本研究では、炉運転温度とされる473 K～673 Kで、グロー放電によりW中にトリチウム含有水素を注入し拡散させ、その水素拡散プロファイルをトリチウムイメージングプレート(TIP)法により計測し、W中の水素拡散係数を求めることを目的とした。

実験方法

実験に用いた試料は九州大学応用力学研究所より提供された純度99.99%以上のW材料である。試料形状は図1(a)に示すように4 x 1 x 10 mm^3の矩形である。この試料の片側端面に、473 K～673 Kの一定温度で、DCグロー放電によりトリチウム含有水素（T/H=1.3 x 10^{-4}）を注入した。次に、トリチウム注入分布を測定するため、試料の注入面に垂直な端面（4 x 10 mm^2）を表面から適当な厚さ研磨除去し、この研磨面の水素（トリチウム）分布をTIP法により計測した（図1(a)参照）。TIP計測時は、試料中の水素の動きを抑えるために低温（233 K）でTIP法を実施した。

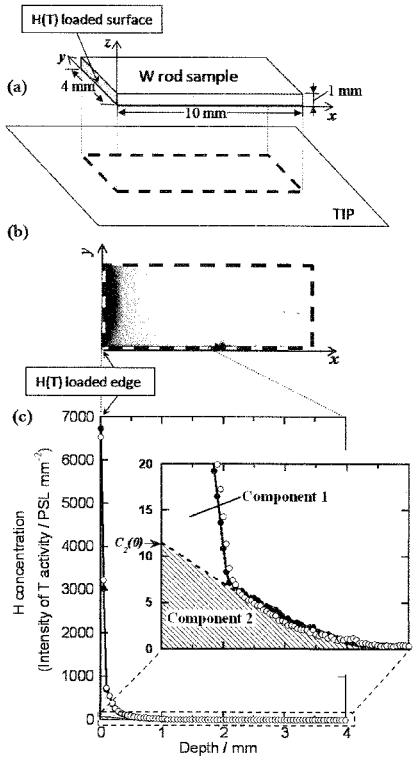


図1　(a) TIP法における試料とIPとの配置状況,

結果および考察

図1(b)はTIPにより計測された水素分布であり、左側が水素注入面である。図中黒色が強いほど水素濃度が高いことを示しており、水素が注入表面から材料内部へと深さ方向に侵入した様子が明瞭に示されている。図1(c)は(b)を数値化して水素深さ分布にしたもので、極めて高濃度の水素が表面近傍に偏在していることを示している。また、拡大図からわかるように、表面偏在水素とは別に内部まで侵入している水素が観察される。以下では両者を、表面偏在水素（成分1）と、内部侵入水素（成分2）に分けて議論する。

まずは内部侵入水素について、その侵入が水素注入時の拡散侵入を反映しているものとして水素の見かけの拡散係数を決定した。得られた拡散係数の温度依存性は、アレーニウスの関係を示しており、下記のように表された。

$$D_2 = (3 \pm 2 \times 10^{-7}) \times \exp\left(\frac{-0.39 \pm 0.03\,[eV]}{kT}\right)$$

図 2 は、このようにして求められた拡散係数と過去の文献データを比較したものである。ここで求められた拡散係数は、過去に 1073 K 以上の高温度領域で得られた Frauenfelder らの値の低温側への外挿値と良く一致しており、W 中の格子間に溶解した水素の拡散係数であると考えられる。一方、成分 1 の水素分布の形状は、注入温度に依らず、いずれも約 1 mm 深さまで侵入していただけでなく、その減衰速度から求めた見かけの拡散係数が温度依存性を示さなかったことから、表面近傍に捕獲された水素によるものと考えられる。

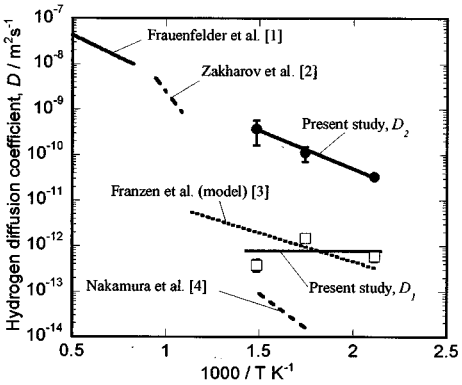


図 2　W 材料中の水素拡散係数

内部侵入水素のプロファイルから外挿して得られる最表面濃度（図 1(c)中の $c_2(0)$）は水素注入温度が上昇するにつれて減少した。W 中への水素の溶解は吸熱的であることから、表面偏在水素の起源は溶解水素ではなく、表面に捕獲された水素であると考えられる。この $c_2(0)$の温度依存性は、表面偏在水素量の温度依存性とほぼ同じであり、いずれもアレニウスプロットによる活性化エネルギーがほぼ同じであった。表面偏在水素の分布に温度依存性が無く、またその存在量の活性化エネルギーが正であることは、この表面偏在水素が、溶解ではなく、活性化エネルギーに対応した捕獲エネルギーを持った捕獲座への捕獲であることを示唆している。また、この活性化エネルギーと $c_2(0)$の温度依存性から求められた活性化エネルギーがほぼ同じ値を示すことは、表面偏在水素が内部溶解水素とほぼ熱力学的平衡状態にあり、かつ前者が後者に比べて極めて多量であるため、前者が内部侵入水素の放出（損失）を、直ちに補っていることを示唆している。

口頭発表・ポスター発表

1) “Visualization of Implanted Hydrogen Diffusion Profile in Tungsten by using a Tritium Imaging Plate Technique”, T. Otsuka, T. Hoshihira, T. Tanabe, 12th International Workshop on Plasma Facing Materials and Components for Fusion Applications, Jülich, Germany, May 2009.

2) “Profiling of Hydrogen on the Surface and in the Bulk of F82H by means of Tritium Tracer Technique”, T. Otsuka, T. Tanabe, K. Tokunaga, N. Yoshida, K. Ezato, S. Suzuki, M. Akiba, 14th International Conference on Fusion Reactor Materials, Sapporo, Japan, Sept 2009.

3) “Behavior of Tritium Accumulated on Materials Surface”, T. Otsuka and T. Tanabe, 9th International Symposium on Fusion Nuclear Technology, Dalian, China, Oct 2009.

4) “Behaviors of hydrogen(tritium) localized on materials surface”, T. Otsuka, 4th International Workshop on Tritium-Material Interactions, Toyama, Japan, Oct 2009.

論文

1) “Visualization of hydrogen depth profile by means of tritium imaging plate technique: determination of hydrogen diffusion coefficient in pure tungsten”, T. Otsuka, T. Hoshihira, T. Tanabe, Phys. Scr. T 138 (2009) 014052.

酸化物・窒化物結晶における照射欠陥形成およびその安定性
～高密度電子励起を付与した CeO_2 結晶における転位形成と回復～

九大工　安田　和弘, 江藤　基稀(院), 澤田　憲一(学生), 松村　晶
九大超高圧電顕室　安永　和史

1. 目的

現在, 軽水炉燃料(UO_2)の高燃焼度化が段階的に進められている, 高燃焼度まで照射した燃料ペレット周辺部では, リム組織と呼ばれる結晶粒の細粒化(結晶粒径:~100 nm)と粗大化気泡(気泡径:~1 μm)の形成を特徴とする微細組織が形成される. このリム組織領域では気泡発生による膨張や機械的な脆化などを伴うため, 燃料健全性への影響が懸念されている. より一層の高燃焼度化を進めるための燃料開発には, このリム組織の形成機構の解明が必要である. 過去の研究から, リム組織形成は希ガス, 照射欠陥の蓄積及び高エネルギー核分裂片による局所的な電子励起効果などの重畳効果により発生すると考えられているが, その詳細な機構は明らかとなっていない.

我々は, これまでに UO_2 の模擬材料として CeO_2 を用いて, イオンまたは電子照射実験により導入される照射欠陥の形成・成長過程を調べてきた. 比較的低エネルギーの Xe イオンを照射して弾性的なはじき出し損傷に伴う転位を導入した後に, 核分裂片を模擬した高速重イオンを照射し, 高密度の電子励起を付与した. 照射後試料の微細組織観察から, 照射欠陥形成・成長に及ぼす高密度電子励起の効果を調べ, 核燃料のリム組織形成機構について検討した.

2. 実験方法

試料は CeO_2 粉末(レアメタリック社製 99.99 %)を用いて作製した. この粉末を一軸加圧器(10 MPa)で成型した後, 冷間静水圧加圧器(150 MPa)で等方圧縮し, 大気中で 1873 K にて 12 h の条件で焼結した. その後, 焼結体を切り出し, 約 200 μm の厚さまで機械研磨した後, イオン照射を行った. 弾性的はじき出し損傷の導入には九州大学応用力学研究所の高エネルギー重イオン照射装置を用い, 2.4 MeV Cu イオンを室温にて 1.0×10^{19} ions/m^2 の照射量まで照射した. 2.4 MeV Cu イオンを照射した一部の試料に対して, 日本原子力研究開発機構のタンデム型加速器を用いて 210 MeV Xe イオンを 513 K にて照射した. 照射量は 1.0×10^{16}~1.0×10^{20} ions/m^2 とした. イオン照射後, イオンスライサー(JEOL, EM-09100IS)を用いて TEM 観察用の試料へと薄膜化し, 電子顕微鏡法による明視野及び暗視野像観察を行った. CeO_2 における入射イオンの電子的(S_e)及び核的阻止能(S_n)は SRIM コードを用いて評価した. 210 MeV Xe 照射において試料表面近傍では S_n に対して S_e が支配的であり, 29 keV/nm である. 2.4 MeV Cu イオン照射により最大 10 dpa のはじき出し損傷が導入された.

3. 結果及び考察

図 1 は 2.4 MeV Cu イオンを室温にて 1.0×10^{19} ions/m^2 の照射量まで照射した CeO_2 試料の断面明視野像である. イオン入射方向は紙面左から右であり, 試料表面からのイオン侵入深さを SRIM コードの計算結果と共に示してある. 試料表面から約 1.5 μm 深さまで格子間型転位ループと考えられるドット状のコントラストが高密度に観察される. 転位ループ密度が最大値を示す深さは, SRIM コードにおけるはじき出し損傷量の最大値(800 nm)よりも深くなっており, さらに深い領域にも転位ループの形成が観察される. 本組織の制限回折図形より, 観察領域は 1 つの結晶粒から構成される CeO_2 であることが確認された.

図 2(a)は 2.4 MeV Cu イオンを室温にて 1.0×10^{19} ions/m^2 の照射量まで照射した後に, 210 MeV Xe イオンを室温にて 1×10^{19} ions/m^2 の照射量まで追照射した試料の表面近傍の断面明視野像である. 図 2 (a)に示し

た制限視野回折図形より，母相からの反射とは異なる余分な回折斑点が出現していることがわかる．(b)および(c)は，(a)中の枠内の拡大像を示す暗視野像であり，(a)の制限視野回折図形に現れた余分な回折斑点を用いて結像したものである．図 2(b)および(c)より，表面気孔周辺に微細結晶粒が形成されているということがわかる．このような微細結晶粒の形成は，240 keV Xe イオンを予め照射することにより高密度の転位ならびに Xe 原子を導入した CeO_2 試料に 210 MeV Xe イオンを重畳照射した場合にも観察された．

高速重イオン照射による高密度電子励起効果の付与は，空孔の拡散及び転位の回復ならびに移動を誘起させると考察されている．従って，本研究により得られた微細結晶粒の形成は高密度電子励起によって，予め導入された転位の再配列が誘起されたことに起因すると考えられる．本研究で形成した微細粒は，実際の核燃料のリム組織形成における結晶粒微細化をモデル実験により部分的に再現したものであると考えられ，リム組織形成も転位の再配列に起因していることが示唆される．

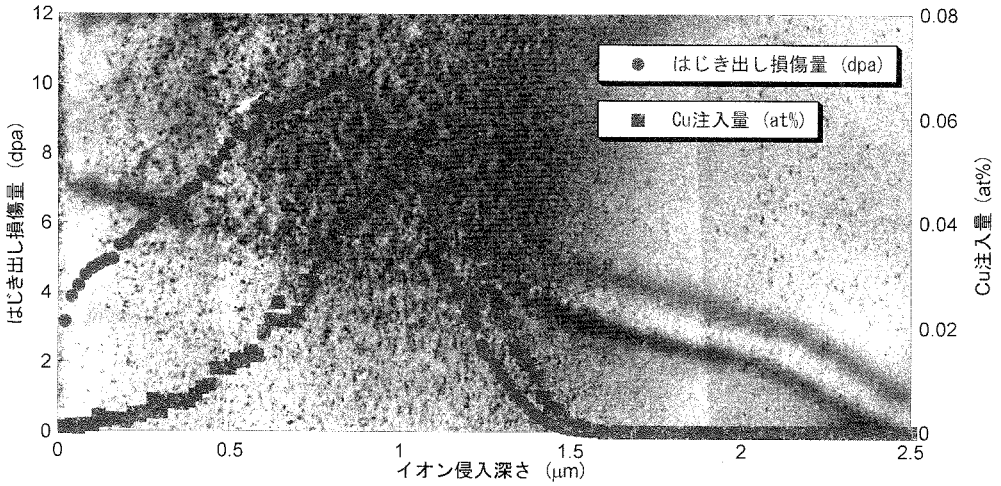


図 1 2.4 MeV Cu イオンを 513 K にて 2.5×10^{19} ions/m^2 の照射量まで照射した CeO_2 の TEM 明視野像と SRIM コードにより評価した 2.4 MeV Cu 照射による CeO_2 中のはじき出し損傷量と Xe 注入量のイオン侵入深さ依存性．

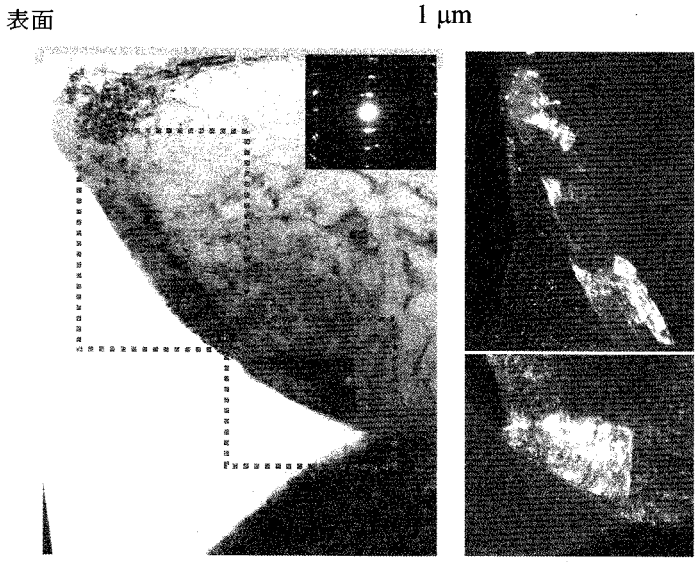


図 2 (a)2.4 MeV Cu イオンを室温にて 1.0×10^{19} ions/m^2 の照射量まで照射し，続いて 210 MeV Xe イオンを室温にて 1×10^{19} ions/m^2 の照射量まで追照射した試料表面近傍の明視野像．(b)及び(c)は(a)中の枠内の拡大像で異なる回折斑点から結像した暗視野像である．

ヘリコン波プラズマのイオンの力学的エネルギーと熱力学的エネルギーの評価

横浜国立大学工学部　津島 晴

(1) はじめに

本研究は、プラズマ対向壁に対するイオンの影響をエネルギーの観点から定量的に明らかにすることを目的に、イオンの力学的なエネルギーと熱力学的エネルギーに分離して評価することを目標とし開始した。しかし、現状ではイオン温度の評価に問題が残っているため、ここでは、ヘリコン波生成プラズマの電子密度、電子温度、空間電位の高周波出力のパワー依存性を測定し、対向壁の入力エネルギーを評価する。

(2) 実験

実験は、直径約 280 mm、高さ約 310mm の真空容器上部に外径 50 mm、長さ 310 mm の石英管の外部に巻いたヘリカルアンテナに、最大出力 5 kW、13.56 MHz の高周波を供給してプラズマを生成する(図1参照)。真空容器内のプラズマには外部コイルによって約 0.05 T の磁場が印加されて、直径約30mmの円筒状に保たれて、装置下方に設置した対向壁で終端しているので、その長さは約 200 mm である。

ここで、約 10 mmTorr のヘリウム、水素、重水素のヘリウム、水素、重水素の3種類の作動ガスで、対向壁から約 100 mm の位置でのラングミュアプローブ測定から電子密度(n)、電子温度(T_e)、浮遊電位(V_f)を得た。これら3種類の作動ガスの場合について、電子密度と温度の関係に整理すると図2のようになる。ヘリウムの場合、電子密度の増加に従い電子温度が減少するが、プラズマ流の増加が伴っているものと考えられる。一方、水素ではあまり顕著ではないが、重水素の場合、電子密度が 10^{18} m^{-3} を超えると電子温度の急激な上昇がみられる。この温度の上昇局面では、プラズマ流の減少が伴っているものと考えられる。これまでのところ、プラズマ流の変化を測定することができなかったが、粒子の生成と損失の釣り合いの式

$$n_0 \langle \sigma v_e \rangle_{ion} \sim L / (c_s - u_{flow})$$

から予想することができる。ここで、n_0 は中性の作動ガスの密度、$\langle \sigma v_e \rangle_{ion}$

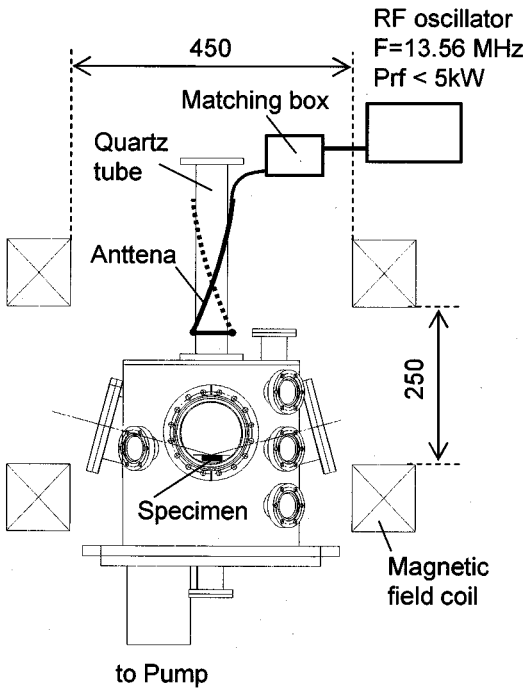


図1　装置概略図。

は電子衝突による電離率で、電子温度の上昇で急激に大きくなる。また、L はプラズマ長、c_s はイオン音速、u_{flow} はプラズマ流の速さである。

(3) まとめ

現状で対向壁へのプラズマの粒子流束密度 Γ およびエネルギー流束密度 P を評価する場合には、それぞれ

$$\Gamma \sim 0.5 n c_s / (1 - u_{flow}/c_s)$$

および

$$P \sim \Gamma\{ 2k_B T_e + V_f + (k_B T_e/e) \ln(8m_i/\pi m_e)^{1/2} \}$$

なる関係式を使って評価することになるが、さらにプラズマ流の測定およびイオン温度の測定を行い、対向壁の入力エネルギーの正確な評価を目指し、対向壁の損傷との関係を調べる予定である。

・ 研究組織

代表者	津島晴	横浜国立大学大学院工学研究院	准教授
協力者	庄司多津男	名古屋大学大学院工学研究科	准教授
	眞銅雅子	横浜国立大学大学院工学研究院	特別研究教員
所内責任者	坂本瑞樹	九州大学応用力学研究所	准教授

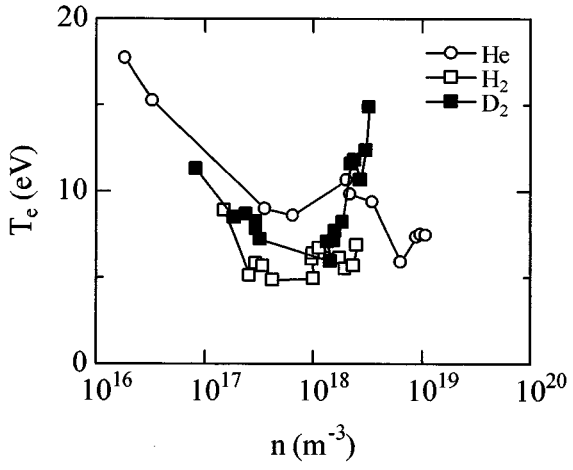


図2 電子密度と電子温度の関係。

中性粒子ビームを用いた球状トカマクプラズマの制御方式の検討

産業技術総合研究所・エネルギー技術研究部門　　榊田　創

・目的

将来の核融合プラントにおいて、高温プラズマの定常化研究は重要なテーマの一つとなっている。特に、応用力学研究所においては球状トカマク（ST）装置 QUEST の放電実験が開始され、定常プラズマ運転に向けた研究を実施しているところである。ST 装置の高温プラズマの生成・保持及び非誘導型の電流駆動方式の可能性を探る手法の一つとして、中性粒子ビームの入射が有効であると考えられている。そこで、高ベータ化、高閉じ込め化、定常化、非誘導電流駆動、計測高度化等を図る目的で、ST 装置における最適な中性粒子ビーム入射装置に関する検討を行ってきた。また、定常にプラズマ運転を行うためには、プラズマと壁との相互作用による影響を検討することも重要な課題と位置づけられており、産総研において開発した高パワー密度イオンビームシステムを用いた壁候補材料へのビーム照射試験、更には水素とヘリウムの混合イオンビームをタングステン材料に照射し、SEM 及び TEM 等を用いた分析、解析を行うことにより、異種成分同時照射時の影響を調べてきた。以上の成果を受けて、連続的な間欠照射が材料に及ぼす影響を調べることを次の目的とする。そこで、平成２１年度は、Edge Localized Mode (ELM) を模擬するために、高パワー密度イオンビームを一部改造して連続パルス運転を可能とさせることを目標として研究を実施した。

・実験方法

ビーム源としては、カスプ磁場を有したバケット型のアークイオン源であり、ビームの集束性を良くするために加速・減速・接地用の３枚の凹型電極（有効径φ345 mm）を採用した点が特徴であり、焦点部でのビーム径は約φ36 mm である。今回行った照射位置でのビーム径は約 60mm である。当該ビームシステムは、ブレークダウンが生じた場合、ある設定時間後に再立ち上げを行うことが出来るようにプログラムが設定されている。図１に自然発生的に得られたパルスビームの時間変化を示す。このように

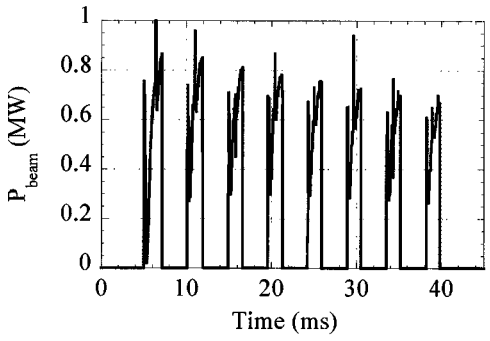


図１．Time evolution of repetitive short-pulse ion beam which is obtained spontaneously in the case of the brake down.

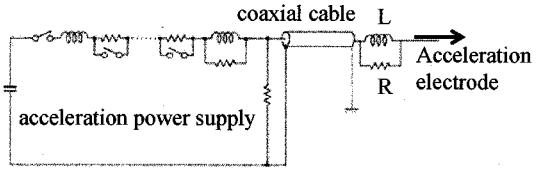


図２．Acceleration power supply system after the modification. The inductance, L is installed between the electrode and long coaxial cable from the power supply.

設計していたことで、電極のエージングにかかる時間を大幅に短縮することが出来た。今回、任意に制御可能な連続的なパルス運転を行うために、図２に示すような加速電源の同軸ケーブルの出力端にインダクタンスが～2 mH のコイルを挿入した。更に、電源出力のオンオフ制御を行っている IGBT スイッチにファンクションジェネレーターによる任意波形を入力することで間欠運転が可能となった。

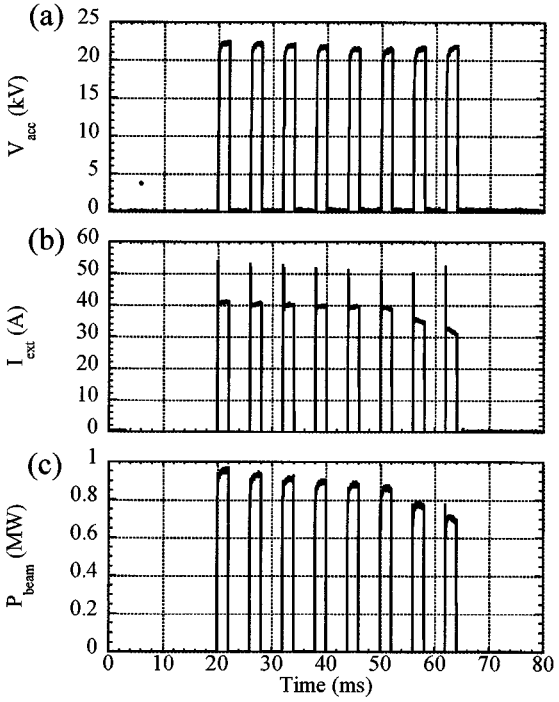


図３． Time evolutions of short-pulse helium ion beam, (a) V_{acc}, (b) I_{ext}, and (c) P_{beam}.

・実験結果

今回は、2 ms 幅のパルスを 4 ms 間隔で連続的に８回出力する波形をビームコントロールシステムに入力した。図３に示すように、１パルスあたり、電圧約 22 kV、電流約 40 A、パワー～0.88 MW, パワー密度～300 MW/m^2、フラックス～8.8×10^{22} particles/m^{2}s の He^+ビームとなっている。以前のデータから、He^+ビームの約 25 %はイオン源からのガスにより中性化していると考えられる。また、ターゲットでのビームパワーは、引き出されたパワーの 90%以下であることが過去の実験結果よりわかっている。つまり、最大で～0.79 MW のパワーと換算される。

今後、タングステン（10mmx5mmx1mm、純度 99.95%）に、この連続的な間欠パルスを照射し、同じパワー・照射量となるロングパルス照射時（１パルスあたり 30 ms のビームを 6 分毎に 6 回照射すると全照射時間は 171 ms となり、総照射量は同じく～1.5x10^{22}/m^2 となる）との比較を行う予定である。

・研究組織

産業技術総合研究所・エネルギー技術研究部門：榊田創、小口治久、木山學、平野洋一
九州大学・応用力学研究所：坂本瑞樹、佐藤浩之助、吉田直亮、徳永和俊
核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部：時谷政行

QUEST に於ける RF による電流立ち上げ、加熱及び電流駆動の研究

上原和也[1)]、花田和明[2)]、出射浩[2)]

[1)]日本原子力研究開発機構・那珂核融合研究所、[2)]九大応用力学研究所・炉心理工学研究センター

概要

TRIAM-1M の電流駆動モードに於ける高効率電流駆動プラズ（Enhanced Current Drive, ECD）及び高イオン温度プラズマ（Hot Ion Temperature, HIT）に対しての考察と JT-60U の極少パワー電子加熱、及び新しい電流駆動の理論についての考察をまとめた。

TRIAM-1M の高効率電流駆動プラズマと JT-60U の局所高効率電子加熱

低域混成波電流駆動(Lower Hybrid Current Drive, LHCD)は多くの電流駆動のなかでも最も高い駆動効率を達成している。TRIAM-1M では、オーミック電場のない完全非誘導電流プラズマで駆動効率が自発的に改善する現象が見つかっている（Enhanced Current Drive, ECD)。LHCD でプラズマの密度が上昇することは他のトカマクでも観測されているが（例えば JIPP-TII[1)]，Versator-II[2、3)]等)、温度が増大するのは、TRIAM-1M が初めてである。又、TRIAM-1M では LHCD で、かなり大きなイオン温度の上昇が観測されている（Hot Ion Temperature, HIT)。　LH 波による通常の電流駆動では波のモード変換が起こらない様にして電場は磁場に平行方向にしている。イオン加熱をする場合はモード変換をさせて電場は磁場に対して垂直方向に向くイオンバーシュタイン波のサイクロトロン減衰を使う。HIT は電流駆動モードで行なっているのでこのようなイオン加熱は起こらないはずである。これは閉じ込めの改善が考えられ、何らかのメカニズムでロスが減(閉じ込めが良くなって)

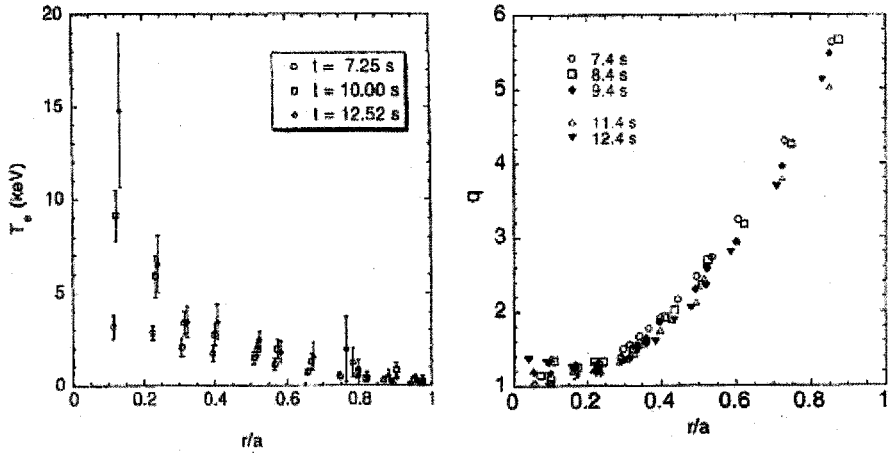


図１　JT-60U における LHCD による高中心電子温度プラズマ[4)]

高周波パワーが電子とイオンに移ったと考えられる。

この他に、LHCD で閉じ込めが改善されて、温度が大幅に上昇する例として、JT-60U の LHCD 実験で、負磁気シア状態に電流駆動すると中心領域（r/a<0.25 の領域）で局所的な電子温度の上昇があることが観測されている(図１左)。この時の実験条件はトロイダル磁場 3.8T、平均電子密度～5 x 10^{19}m^{-3},　LHCD の

平行方向屈折率 $N_{//}$は 1.75, rf のパワーはほんの 1.8 MW で、MSE (Mortional Stark Effect)の計測で取得した安全係数 q の分布に依ると、r/a<0.25 の領域で負磁気シアが形成されている。この放電では rf のパワーは t=7.5 sec から 12.5 sec まで入射されている。電子温度が負磁気シアが達成されない時(OH 時)に 3 keV だったものが負磁気シア達成時 15 keV 程度迄上昇していて、これはイオン温度の2- 3倍である。この電子温度の分布は負磁気シアが形成されている分布にほぼ対応している（図１右)。電流駆動では高周波がランダウ減衰で共鳴粒子がトロイダル方向に高周波電場を直流的に感じて、運動量を得て、電子が集団的に加速され衝突とのバランスで電流が流れる。この電流はポロイダル磁場 B_q をつくるとともに、効果的な直流電場 E_{rf}^{LHCD} と $E_{rf}^{LHCD} \times B_q$ ドリフトによりで共鳴電子がトーラス内側にフラックスを形成する。つまり、LHCD では電流が流れてポロイダル磁場を作るだけではなく、加速された電子は内側に向かうフラックス(ピンチ項)が生じて閉じ込めが改善されるのである[5]。JT-60U の負磁気シア高電子温度の場合を、模擬したシミュレーション結果では、負磁気シアの電流分布の場合は r < 0.2 a の領域で正磁気シアの電流分布の場合よりもピンチ項は遥かに大きい。これにより中心付近で拡散係数が減少して、ロスが減って局所的な温度の上昇が期待される。

TRIAM-1M の ECD でのプラズマ温度の上昇も通常の拡散係数が内側へのフラックスで減少し、少しのパワー入力でも加熱が得られているのかもしれない。HIT の場合はまだ計算していないが、次年度当ってみたい[6]。

- 新しい電流駆動の理論

図２は F.F. Chen の教科書で説明されているランダウ減衰の描像である[7]。この図の energy という言葉を momentum に置き換えれば電流駆動になる。粒子が有限温度の分布関数 f を持つ場合、粒子は波から運動量をもらい、逆に波は減衰して粒子に運動量を与える。波の電場を静電波の進行波 Ecos(kz-ωt) 中の運動方程式は

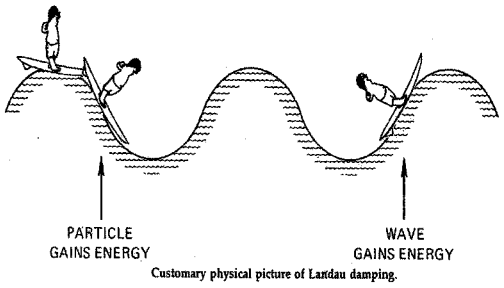


図２ この描像で energy を momentum にすれば電流駆動になる

$$m\frac{dv}{dt} = eE\cos(kz - \omega t) \qquad (1)$$

零次の運動は右辺を零とおいて t=0 で $v=v_0$ および $z=z_0$ という初期条件で得られる自由な流れの運動で $z=v_0t+z_0$. 一次の運動はランダウ減衰が初期値問題であることを考慮して，上記の運動方程式を同じ初期条件で積分して、$v_1=(eE/m\alpha[\sin(kz_0+\alpha t)-\sin(kz_0)]$ および

$$z_1 = \int_0^t v_1 dt = \frac{eE}{m\alpha}[-\frac{\cos(kz_0+\alpha t)-\cos(kz_0)}{\alpha} - t\sin(kz_0)] \qquad (2)$$

ここに、$\alpha=kv_0-w$ である。$z=z_0+v_0t+z_1$ を(5)式に代入して $kz_1<<1$ として $\cos(kz_1)\sim1$ および $\sin(kz_1)\sim kz_1$ の近似を使って、運動量 mv の時間変化を z_0 について平均するとランダウ減衰では共鳴粒子は高周波を直流的に感ずる。この電場で電子が加速される。この電場をドーソンの描像に基づいて求める。第１節で行なった議論を運動量について行なえば良い。粒子の運動量の時間変化を z_0 について平均すると

$$\left\langle \frac{d}{dt}(mv)\right\rangle_{z_0} = k\frac{e^2E^2}{2m}\left(-\frac{\sin\alpha t}{\alpha^2}+\frac{t\cos\alpha t}{\alpha}\right) \qquad (3)$$

- 右辺の括弧の中は t->∴の極限でデルタ関数δの微分になる。この式を $\langle d(mv)/dt\rangle_{z_0} = eE_{eff}$ とおくと E_{eff} は

$$E_{eff} = k\frac{eE_0^2\pi}{2m}\delta(\alpha) \qquad (4)$$

- と表すことが出来る。これはランダウ減衰に於いて共鳴粒子が直流的に感じる電場を表わしている。運動方程式は ν_{ei} を衝突周波数として、 $mdv/dt=eE_{eff}-mv\nu_{ei}$ となり、定常状態（d/dt=0）では

$$v = \frac{eE_{eff}}{m\nu_{ei}} \qquad (5)$$

- よく知られているように電流密度は $j=-e\int_{-\infty}^{\infty}vf(v)dv$ で与えられるからこの式の v の項に上式を代入すると

$$j = \frac{ek\omega_pE_0^2}{8m\nu_{ei}}\left\{\frac{df(v)}{dv}\bigg|_{v=\omega/k}+3\frac{f(v)}{v}\bigg|_{v=\omega/k}\right\} \qquad (6)$$

- という電流駆動の式が得られる。エネルギーを与える場合が電子加熱であり、運動量を与える場合が電流駆動である[8]。

参考文献

1）K. Ohkubo et al., Nucl. Fusion 22 (1982) 203

2）S.C. Luckhardt et al., Phys. Rev. Lett. 48 (1982) 152

3）M.J. Mayberry et al., Phys. Fluids 30 (1987) 2288

４）T. Fujii*, private communication (* ceased on 9 June 2008)
５）K. Uehara , J. Phys. Soc. Jpn. 57, (1988) 4169
６）上原和也他、全国共同利用研究成果報告書第１２号（平成２０年度、九州大学応用力学研究所）
７）F. F. Chen, Introduction to plasma physics (Pennum Press, New York, 1974) p.219
８）K. Uehara, JAEA-Research 2009-049

21 FP－24

炭素および金属共堆積場におけるダスト形成過程に関する研究

金沢大学理工研究域電子情報学系　上杉喜彦

・目的

核融合装置のプラズマ対向壁候補材の一つである炭素材料は低Z材で耐熱衝撃性に優れるため，これまで広く使用されてきたが，核融合燃料である水素同位体による損耗率が高く，多量の再堆積層およびダストが生成されるとともに，これらの炭素系堆積物および炭素壁に多くの水素同位体が取り込まれることが問題視されている。炉壁および堆積物へのトリチウム蓄積は放射性物質の炉内残留をもたらすばかりか，ダスト粒子飛散による放射性物質拡散の可能性があるため，安全面で大きな問題となっている。このため，炭素材の使用には炉内蓄積トリチウムの除去方法および炭素ダスト生成の抑制方法の開発が重要な課題となっている。

本研究は，高周波誘導プラズマを用いて低エネルギー水素原子照射下における炭素ダスト形成過程の解明とその抑制手法の開発を目的としている。高気圧領域で運転される高周波誘導プラズマは他の材料照射用プラズマ源と比べて低エネルギー（電子温度~ 0.5–1.5 eV）かつ高中性粒子束（水素原子束 10^{23}–10^{24} $m^{-2}s^{-1}$）・高熱流束（~ 1 MW/m^2）の定常プラズマを生成できるという特長を有している。このため，本研究では定常核燃焼プラズマの実現に不可欠とされる非接触ダイバータ運転時に重要な役割を果たす低エネルギー水素原子と炭素ダイバータ板との相互作用を対象としている。本報告では高周波誘導プラズマ装置を用いて生成される低温水素プラズマに窒素ガスを導入し，窒素の導入が炭素ダスト形成に与える影響について検討した。

・実験方法

照射材料の炭素材には等方性黒鉛を使用し，これにアルゴン/水素/窒素混合プラズマを照射する。ガス流量はアルゴン 60 slpm，水素 2, 3 slpm，窒素 0–0.3 slpm，チャンバー内圧力は 30 Torr，入力電力は~ 12 kW とした。照射時間は 180 分としている。ターゲットの表面温度は石英観測窓から放射温度計により測定し，照射時の表面温度を~ 1020 K として実験を行った。また，プラズマ照射前後のターゲットの質量変化を測定し，プラズマ照射後のターゲット表面に形成したダストを観測するために走査型電子顕微鏡（SEM）を用いた。

・実験結果

窒素ガスは水素ガスとともにアルゴンプラズマへ導入し，図 1(a)に炭素ダストの数密度および粒子径の水素に対する窒素混入率の依存性を，(b)には炭素材の質量損耗量および発光スペクトル強度の変化を示す。ラジカル粒子の相対的な変化を示すために発光強度の値は Ar I (750.4 nm)の発光強度で規格化している。図 1(a)から，水素に対して 2%以下（$N_2/H_2 < 0.02$）のわずかな窒素添加によって CN 分子スペクトルの強度と炭素ダスト形成に劇的な変化がもたらされ，N_2/H_2~ 2%の窒素付加で炭素ダストの数密度は約 1/10 に減少した。そして N_2/H_2~ 2%以上の窒素を添加した場合には CN 分子スペクトルの緩やかな変化とともに炭素ダスト生成に対する抑制効果が飽和した。窒素添加が炭素ダスト形成に与える影響は CN 分子スペクトルの変化と強い関連があることから CN 結合の形成が炭素ダスト形成の抑制に重要な役割を果たしているのではないかと考えられる。C–H–N 粒子系においては炭素が関与する結合の中で C≡N 結合の結合エネルギーが最も高い（C–H：435 kJ/mol，C≡C：838 kJ/mol，C≡N：887 kJ/mol）。三重結合をもつ CN ラジカル（–C≡N）の形成は炭素原子同士の凝集を抑制すると考えられ，安定な分子として揮発性の HCN や C_2N_2 を形成する。つまり，窒素添加による炭素ダスト形成の抑制がもたらされた要因として，損耗生成物が HCN や C_2N_2 を形成し，装置外へ排気されたことが考えられる。CN の生成過程には主として次の二つの過程が考えられる：(1) 炭化水素分子と窒素原子との気相反応，(2) 窒素原子による炭素材の化学スパッタリング（揮発性の CN や HCN，C_2N_2 を生成）。(2)

については窒素添加によって損耗が促進されたことから，窒素原子による炭素の化学スパッタリングによって CN が生成されていると考えられる。また，窒素/メタン混合プラズマ中の分光観測によって，メタンの解離から気相中で CN ラジカルを生成していることが確認され，CN が損耗と気相反応の両過程で生成されることがわかった。

C–H–N 系においてどのような粒子が優位に生成されるのかを理論的に調べるため，熱平衡条件下での粒子組成の計算を行った。粒子組成は C，H，N，Ar からなる粒子 48 種類と電子の合計 49 種類の粒子を考慮し，系の Gibbs 自由エネルギーを最小化させる手法により計算した。図 2 に Ar を除いた C–H–N 系の粒子組成を示す。(a)は C–H 系の粒子組成を示している。1000 K 以上では CH_4 の解離とともに炭化水素分子やラジカル種（CH_3。 C_2H_4, C_2H など）を生成している。1000～3000 K の温度範囲では C_2H が支配的となっており，数密度は小さいが，C_4 や C_5 等の炭素多原子分子も生成される。一方，図 2(b)に示す C–H–N 系の粒子組成から，窒素の存在の有無によって主に温度が 1000～3000 K の範囲で炭素系粒子の組成が大きく異なっていることがわかる。特に C_4, C_5 等の高次の炭素分子の数密度が C–H–N 系において著しく減少するとともに揮発性の HCN の生成が顕著となっている。つまり，炭化水素の解離生成物は窒素の存在によって炭素間の凝集が抑制され，より安定な HCN の生成に費やされることを示している。この結果は，CN 結合形成による炭素の凝集を抑制するだけでなく，水素を揮発性の HCN として装置外へ排出可能なことを示しており，炭素材の大きな欠点である水素同位体吸蔵が抑制される可能性がある。

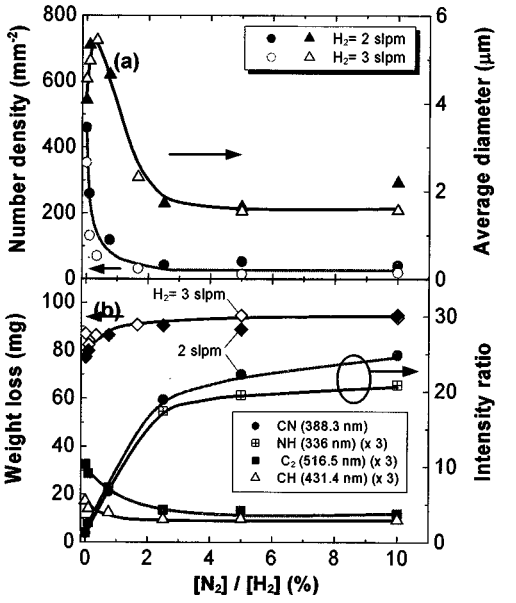


図 1　(a)炭素ダストの数密度と粒子径，(b)炭素材の質量損耗量と各種ラジカル粒子からの発光スペクトルの窒素添加率依存性.

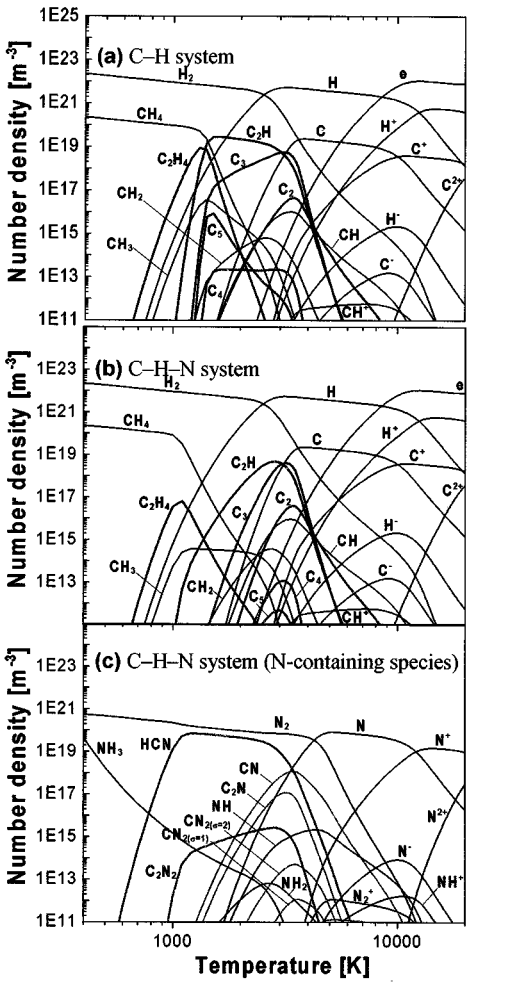


図 2　C–H 系および C–H–N 系の粒子組成.
組成比 C:H:(N):Ar=5:1000:(25):15000，圧力 4 kPa．Ar 系粒子は除いている.

・論文発表

[1] M. Kyo et al., "Suppression of Carbon Dust Formation by Nitrogen Injection into Hydrogen Plasmas in Detached Plasma Conditions", Plasma and Fusion Research Vol. **5**, 004 (2010).

・学会発表

[1] M. Kyo et al., “Suppression of Carbon Dust Formation by Nitrogen Gas Injection into Argon/hydrogen Plasmas”, The 7th Asia Plasma and Fusion Association, Aomori, Japan, October 27-30, 2009.

[2] 京　真観，竹口雄治，上杉喜彦，田中康規，増崎　貴：「窒素添加による炭素ダスト生成抑制効果」，第 26 回プラズマ・核融合学会年会，2009 年 12 月 1 日－4 日，京都.

ヘリウム照射したプラズマ診断用金属ミラー材の光学特性劣化挙動

島根大学総合理工学部　小野興太郎

1. はじめに

核融合研究において，プラズマ診断の多くに用いられる金属第一ミラーは，プラズマから漏洩する高エネルギー粒子に曝され，また不純物堆積等の影響を受ける．その為，光反射率が劣化し，監視システムとしての機能が低下することが懸念されている．ヘリウムは損傷形成に与える寄与が大きいことから，我々はこれまでヘリウム照射の影響について調べ，入射粒子に占める割合はわずかであっても，その影響は無視できないことを指摘してきた．一方，将来の核融合炉での使用を考えれば，ヘリウム，水素同位体共存下での影響を系統的に調べておく必要がある．そこで本研究では，ヘリウム，重水素の各イオン照射下でのミラー材光反射率変化をその場測定し，両者を詳細に比較することで，ミラー材の特性劣化に与える各イオン照射の効果を抽出することを目的とした．

2. 実験方法

本実験では，耐照射特性が良好であり，比較的広範な波長領域で高い光反射率を有する Mo を試料として用いた．㈱ニラコ社製の粉末焼結 Mo を鏡面研磨したのち，室温で 1~5 keV の重水素イオンおよびヘリウムイオン照射をそれぞれ行い，照射下での光反射率変化をその場測定した．また，反射率劣化のメカニズムの解明を目的として，各照射試料における SEM，AFM を用いた表面組織観察， TEM を用いた内部微細組織観察，および分光エリプソメトリーを用いた光学定数計測を行った．

3. 結果および考察

図 1 は，室温で 1,3,5keV の重水素イオンおよびヘリウムイオンを照射した際の Mo における光反射率変化を照射量の関数として示している．いずれの場合においても $1x10^{23}$[ions/m^2]程度までの照射においては反射率は照射量の増加に伴い単調に減少している．特にヘリウムイオン照射下での反射率減少は重水素照射時と比較して著しく大きく，反射率劣化にはヘリウム照射が主要な役割を担うことが明らかになった．反射率劣化の要因を調べるために照射後試料の表面組織観察および内部組織観察を行った結果，ヘリウムイオン照射した試料においては，試料表面のスパッタやブリスターの形成およびその剥離によると思われる著しい凹凸と，試料内部の高密度の転位ループおよびヘリウムバブルの形成が観察された．特に，バブルの形成は重水素照射した試料では観察されないことから，両イオン照射材における反射率劣化程度の違いを支配する重要な要因だと考えられた．

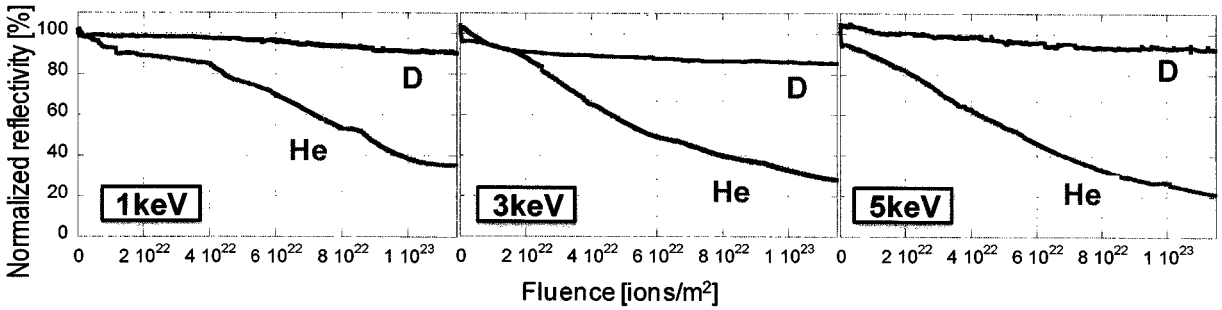


図 1　1,3,5keV の重水素およびヘリウムを照射した Mo 試料における光反射率変化の照射量依存性．

このような照射欠陥の形成が，試料の光学特性に与える影響をより詳細に調べるために分光エリプソメトリーによる各試料の光学定数測定を行った．図2は，未照射，および3keVの重水素，ヘリウムイオンをそれぞれ照射した各試料における屈折率n(実線)と消衰係数k(破線)の光子エネルギー(波長)依存性を示す．いづれの照射試料においても，未照射試料と比較し，屈折率と消衰係数の減少が観察され，各イオン照射が試料表面近傍の電子状態に影響を及ぼすことが明らかになった．特に，ヘリウム照射した試料における影響は著しい．非常に大雑把な見方をすれば，表面近傍の高密度のヘリウムバブルが光子に対して空洞に近い状態(n,k ~1)として振る舞い，結果的に屈折率や消衰係数が大幅に減少したと定性的には理解できる．

現在では，ヘリウム，重水素イオンの同時照射可能な装置系が構築され，今後は，より実機環境に近い広範な条件での実験が可能になっている．このような継続的な実験を通し，反射率劣化メカニズムの解明とともに，プラズマ・壁相互作用計測監視法の開発に寄与することが期待される．

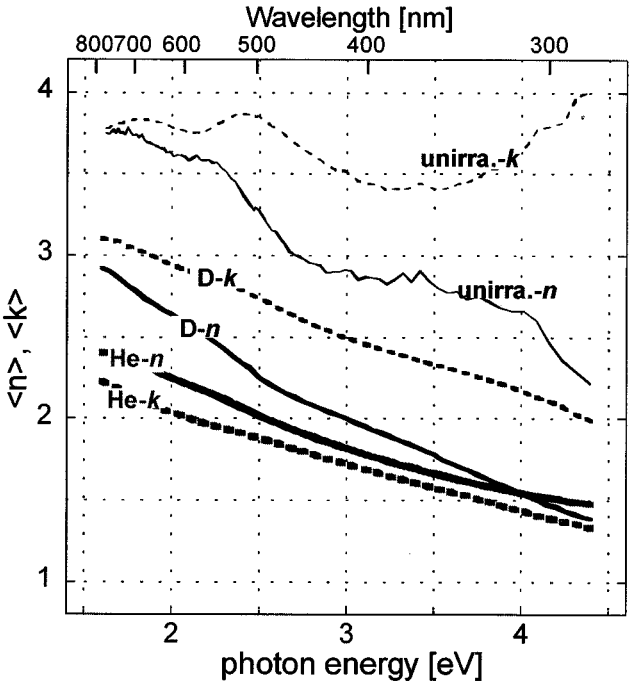


図2　未照射，および3keVの重水素イオン，ヘリウムイオンをそれぞれ照射した各モリブデン試料における屈折率 n (実線)と消衰係数 k (破線)の光子エネルギー依存性．

● **学術論文**

1. M. Miyamoto, K. Ono, H. Urabe, T. Nakano and N. Yoshida, "Deterioration of the reflectivity in first-mirror materials under irradiation with low-energy helium ions", Plasma Devices and Operations, Vol. 17, No. 2 (2009) 155–164
2. H. Urabe, M. Miyamoto, K. Ono, M. Tokitani, N. Yoshida, "Degradation Process of Reflectivity in Stainless Steel Mirrors under Irradiation with Low Energy Helium Ions", Journal of Nuclear Materials, 386-388 (2009) 1038-1040

● **学会発表等**

1. T. Nakano, M. Miyamoto, S. Hasuike, K. Ono, N. Yoshida, "Degradation of Optical Properties in Mo Mirrors under Irradiation with Low Energy Helium and Deuterium Ions", 14th International Conference on Fusion Reactor Materials, 2009.9, Sapporo, Japan

● **研究組織**

研究代表者：小野興太郎(島根大学総合理工学部教授)
所内世話人：渡辺英雄（九州大学応用力学研究所准教授）
研究協力者：宮本光貴[a]，中野健人[a]，坂本瑞樹[b]，吉田直亮[b]（[a]島大総理工，[b]九大応力研）

多相交流ポテンシャル場による対向壁プラズマの能動制御の試み

富山県立大学・工学部　松本和憲
九州大学・応用力学研究所　中村一男

1. 目的

九州大学応用力学研究所の球状トカマク(QUEST)における主な研究課題の一つに、「プラズマ対向壁の能動制御によるリサイクリング研究」が挙げられている。ベルトコンベアー式に移動する対向壁がそのアイデアの一つとなっている。

本研究の目的は、機械的に移動する対向壁ではなく、プラズマが対向壁に対して実効的に移動する能動制御法を提案することである。対向壁面に分割した電極を埋め込み、プラズマと壁との間のシース領域に進行する強いポテンシャル場を形成し、プラズマの流れを能動的に制御することを試みる。

2. 研究の具体的方法

富山県立大学所蔵のインバータ式24相交流電源を用いて、以下の実験研究を行う。

- 印加する電源周波数*の遮断密度より高いプラズマを内径50ｃｍ、長さ70ｃｍの真空チャンバー内に生成する。
- グラファイト製の電極を24個用意し、絶縁を保ちながら装置内壁に沿って方位角方向に並べる。電極に24相交流電源を給電し、方位角方向の正或いは逆方向に進行する電位を与える。
- プラズマと壁面（に埋め込まれた電極）との間のシース領域に進行するポテンシャル場が形成され、更にプラズマの流れがこれにより制御されるかどうかを試験する。

＊インバータ式24相交流電源の性能：

周波数可変範囲100kHz～250kHz、最大出力5kW、相数可変範囲2相～24相

3. 結果概要

今年度も予算の都合上であるが、実験研究を断念し、数値計算をすることとした。本研究では空間的に回転するポテンシャルを形成しようと考えている。電界は磁力線方向であるが、ポロイダル磁場コイルによって真空容器に流れる渦電流の影響で磁力線の歪みが懸念されるので、昨年度に続いて渦電流解析を進めることとした。

3.1 渦電流の計算方法

渦電流密度の発散は0であるので、渦電流密度Jは電流ポテンシャルVを用いて表すことができる[1][2]。

$$J = \nabla V \times n_i$$

すなわち、渦電流は電流ポテンシャルの等高線に沿って流れる。

真空容器を三角形要素に分解して節点の電流ポテンシャルを考える。渦電流による全磁気エネルギーに関するラグランジュ方程式から渦電流の固有値（時定数）および固有ベクトル（渦電流密度分布）を求める。[3][4][5]

$$\sum_j M_{ij} I_j + R_i I_i = 0$$

$$\tau_i \dot{I}_i + I_i = 0$$

3.2 渦電流の計算結果

真空容器は軸対称であり、赤道面に関して対称と仮定する。この対称性のため、第１象限のみを考え、真空容器を三角形要素に分解したときのX-Z平面における節点および節点番号（１～３３）を図１に示す。赤道面上の観測ポートは簡単のため軸対称としている。三角要素に分解したときの様子を図２に示す。X-Z平面に辺をおく三角要素の番号（１～３２）を同図中に示す。

図1および図2に示すように32分割しているので、固有値(時定数)および固有ベクトル(渦電流密度分布)は32個ずつ存在する。その固有ベクトルで表される渦電流モード間は独立であるので、外部コイルからの誘導のみを考慮して渦電流モードを計算し、それらを合計すれば全体の渦電流分布が得られる。

外部コイルとしてCS(センターソレノイド)コイルを考える。CSコイルとしてはオーミック電流駆動を想定してPF4－1、PF4－2(Aコイル)、PF4－3、CCU(1ターン)、CCL(1ターン)を直列接続した場合を考える。CSコイルの電流波形および全渦電流の電流波形を図3に示す。

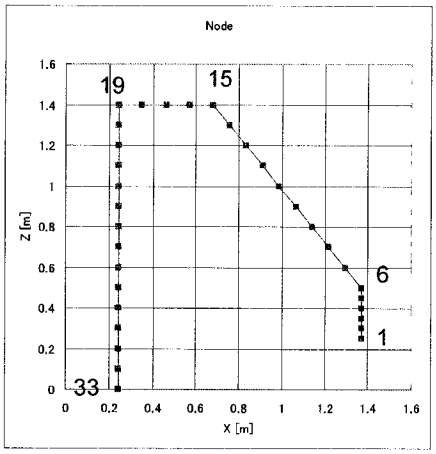


図1. 真空容器を三角形要素に分解したとき、X-Z平面における節点および節点番号

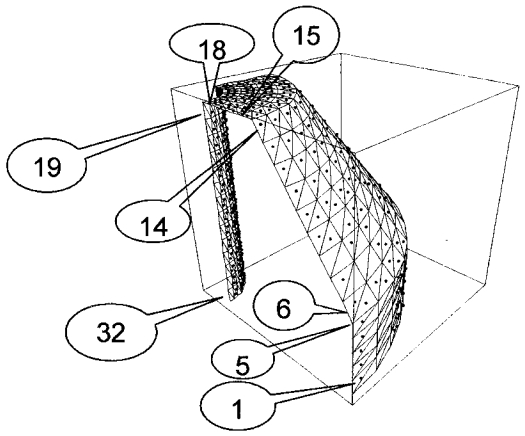


図2. 真空容器を三角形要素に分解したとき、X-Z平面に辺をおく三角要素および要素番号

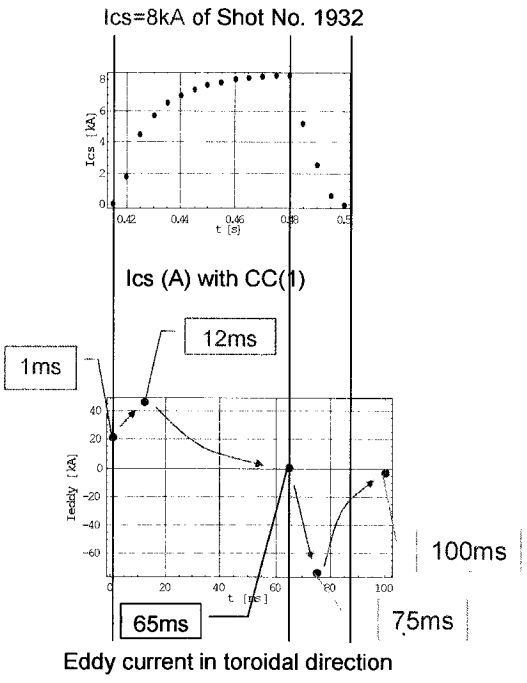


図3. CSコイルの電流波形および全渦電流の電流波形

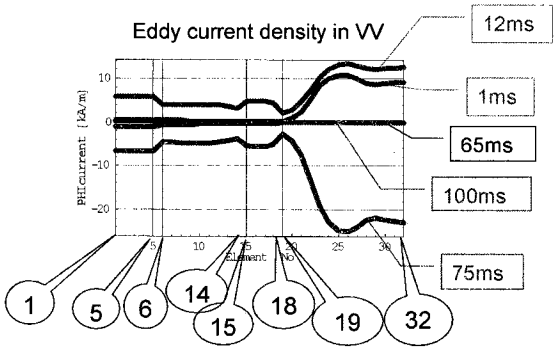


図4. 代表的な時刻における渦電流密度分布

真空容器における渦電流密度分布を図4に示す。図3に示されるように0～65msにおいてCSコイル電流がトロイダル負方向に増加したとき、渦電流はトロイダル正方向に誘起される。図4に示されるように渦電流密度は主半径内側で大となる。続いて図3に示されるように65～85msにおいてCSコイル電流がトロイダル負方向で減少したとき、渦電流はトロイダル負方向に誘起される。図4に示されるように渦電流密度はこの場合においても主半径内側で大となる。

3.3 渦電流が生成する垂直磁場の計算結果

渦電流が真空容器内の赤道面上に生成する垂直磁場強度分布の時間変化を図5に示す。同図に示されるように渦電流が生成する垂直磁場は赤道面上でほぼ一様となる。また、垂直磁場の向きは0～65msにおいて垂直正方向に生成され、65～100msにおいて垂直負方向に生成される。図4に示される渦電流密度分布と考え合わせると、誘起される渦電流は主半径内側で大であるが、生成される垂直磁場については、主半径外側に誘起される渦電流が生成する垂直磁場が大であることが分る。

CSコイル電流が真空容器内の赤道面上に生成する垂直磁場強度分布の時間変化を図6に示す。PF4－1、PF4－2(Aコイル)、PF4－3が生成する正方向垂直磁場とCCU(1ターン)、CCL(1ターン)が生成する負方向垂直磁場が打消し合って主半径0．8mにおいてヌル点が形成されていることが分る。

渦電流およびCSコイル電流が真空容器内の赤道面上に生成する垂直磁場強度分布の時間変化を図7に示す。0～65msにおいては渦電流が生成する正方向垂直磁場のため、ヌル点は主半径0．8mより外側に移動することが分る。また、65～100msにおいては渦電流が生成する負方向垂直磁場のため、ヌル点は主半径0．8mより内側に移動することが分る。

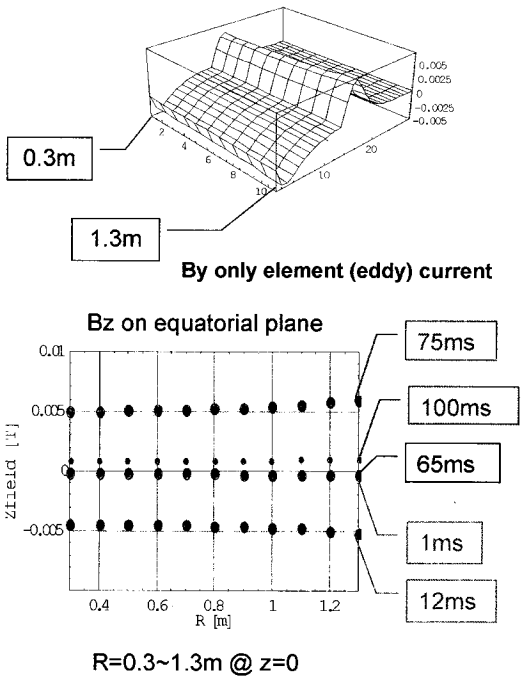


図5．渦電流が真空容器内の赤道面上に生成する垂直磁場強度分布の時間変化

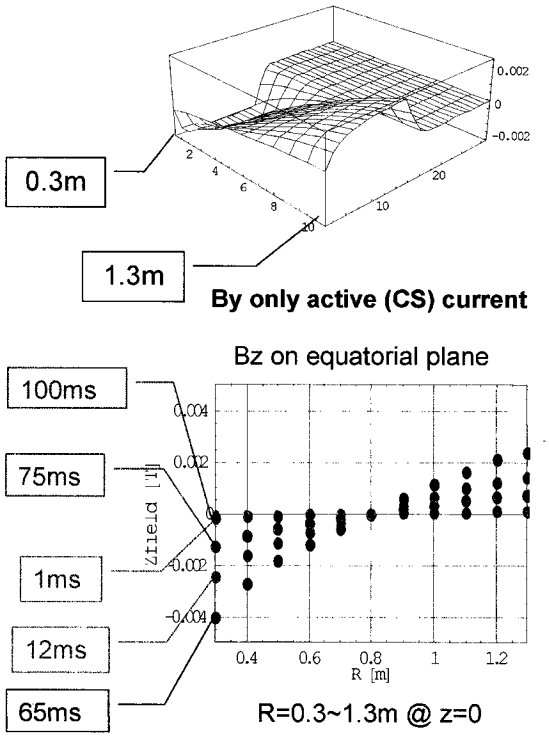


図６．CSコイル電流が真空容器内の赤道面上に生成する垂直磁場強度分布の時間変化

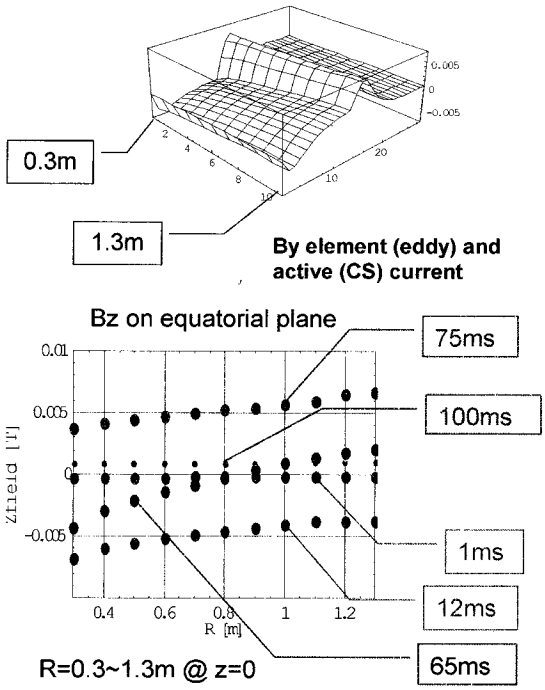


図７．渦電流およびCSコイル電流が真空容器内の赤道面上に生成する垂直磁場強度分布の時間変化

4. 参考文献

[1] A. Kameari, S. Niikura, Nuclear Eng. Design/Fusion, 2, 365-373 (1985).

[2] Y. Nakamura, T. Ozeki, JAERI Report, 1317 (1989).

[3] A. Kameari, H. Ninomiya, Y. Suzuki, JAERI-M Report, 6953(1977).

[4] 中村一男，ライナー絶縁が垂直位置安定化に及ぼす影響，電気学会，福岡 (2008).

[5] K. Nakamura, M. Tomoda, Y. Jiang, X.L. Liu, O. Mitarai, M. Hasegawa, K. Tokunaga, K.N. Sato, H. Zushi, K. Hanada, M. Sakamoto, H. Idei, S. Kawasaki, H. Nakashima, A. Higashijima and K. Araki, Effect of Toroidal and Poloidal Cut on Eddy Current in Conducting Liner for Vertical Position Stabilization in QUEST, 19th Int. Toki Conf., Ceratopia Toki, Dec. 9-11, 2009 (2009) P1-44.

球状トカマクにおけるペレット入射による不純物挙動の研究

大阪大学・工学研究科　岡田成文

１．研究背景・目的

最近まで、九大応力研では連続的にサイズを可変にすることができるペレット入射装置が開発され、良好な結果を得てきた。これは、小さなサイズのペレットを精密な制御のもとに入射することが可能であり、本研究における不純物を含んだペレットの入射研究に適している。不純物を含んだペレットを九大応力研で計画されている球状トカマク QUEST に入射することにより、プラズマ中に不純物を導入しその挙動を実験的に調べることを目的とする。これにより、不純物輸送、プラズマ中の輸送障壁などの構造、旋回半径が大きな粒子の挙動とそれが高エネルギーを持った核融合生成物挙動をどの程度シミュレートできるかなどを検討するなどして、広い知見を得ることを目的とする。

本研究では、上記のペレット入射技術に不純物添加の技術を開発加味し、本研究へ向けた課題について研究を進めてきた。まず第１ステップとして、これまで核融合科学研究所ならびに九大応力研で開発されてきた「サイズ連続可変ペレット入射装置」のさらなる開発を進める。

次に、九大応力研の精密ペレット生成システムの一部を改造し、気体不純物（Ne や Ar など）のペレット化を行い導入を図る。H2 ペレットとの混在化は、固化温度の異なるガスの一様な導入など低温での微妙な技術が必要になる可能性があり、当面は、極小な Ne、Ar ペレットにより研究を進める。また併せて、H2＋Ne、H2＋Ar 混在ペレット技術の検討を進める。さらに、不純物導入による不純物輸送、プラズマ中の輸送障壁の構造などの研究について、いくつかの具体的研究シナリオを作成する。また、そのための項目に適切なペレット仕様を検討し、上記に適合するペレット装置や、導入場所についての仕様を作る。そしてこれらの基礎として、ペレットサイズのプラズマへの影響を予測し概略の傾向を捉えるために、モデルによる溶発計算を行う。

２．具体的方法および研究成果

先年度から今年度にかけて、まずペレットサイズが、アブレーション特性ならびにプラズマへの影響に対していかに敏感であるかを予測し概略の傾向を捉えるために、各種条件下における中性粒子遮蔽モデルによる溶発計算を行った。その結果、推定どおりペレット入射速度を大幅に変化させてもプラズマ表面のみで溶発してしまう領域と、ほんの僅か速度を増加させてもすぐにプラズマを貫通し

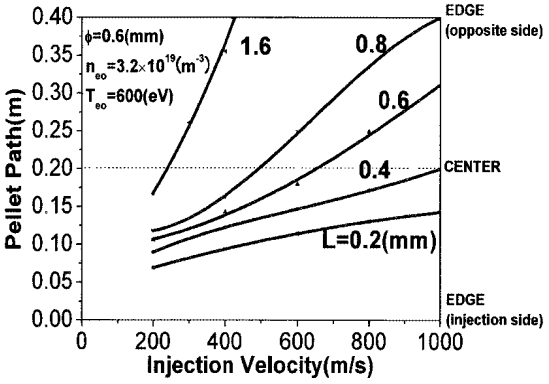


Fig.1　CPD プラズマへのペレット入射のアブレーション特性計算結果：ペレット侵入距離の速度への依存性（ペレットサイズがパラメータ）

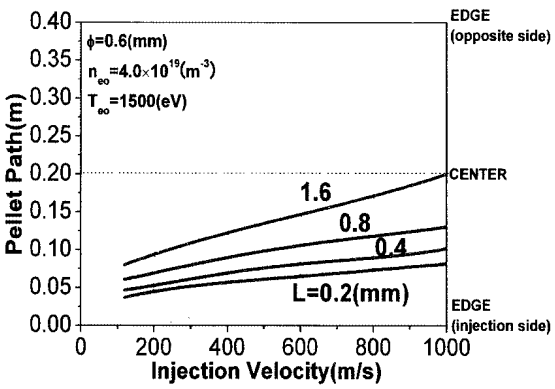


Fig.2　プラズマパラメータが Fig.1 と異なる場合の CPD プラズマへのペレット入射のアブレーション特性計算結果：プラズマパラメータが異なるだけで、ペレットサイズの最適領域が大幅に異なる。

てしまう領域があり、その中間に、ペレットサイズに非常に敏感な狭い領域が存在すること(Fig.1)、またこの領域はプラズマのパラメータや大きさによって大きく異なること(Fig.2)などが明確にされた。

モデル計算は、いろいろな装置での実験結果と必ずしも良い一致を示しているわけではなく、国際ペレットアブレーションデータベース IPAD (Ref. (1))での検討のようにまだまだ研究課題ではあるが、傾向を相対的に捉えるためには適切であり、これらの結果により、ペレットサイズの精密な制御、しかも連続的に可変にする技術が大変有用であろうことが明確に示された。

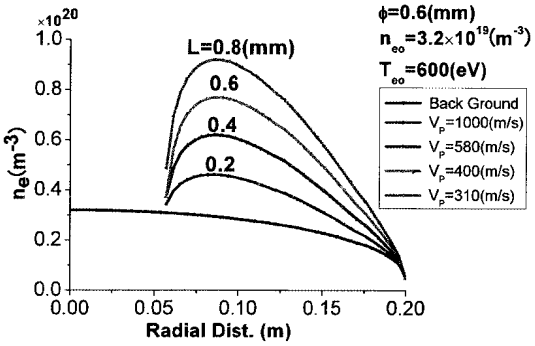


Fig. 3 CPD プラズマへのペレット入射後の電子密度分布計算例－１：同じ位置にデポジション量を変化させた場合

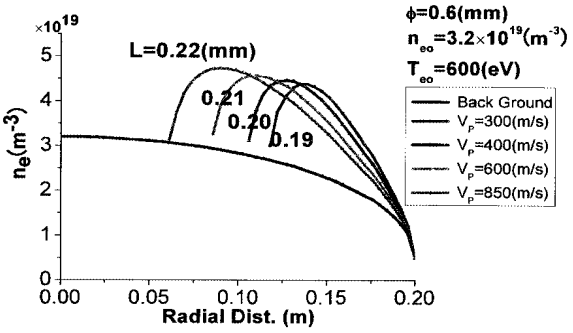


Fig. 4 CPD プラズマへのペレット入射後の電子密度分布計算例－２：デポジションの位置を変化させた場合

さらに、アブレーションや精密なデポジション研究を構想する場合、デポジションの量および位置を独立に可変にできることが期待されるが、連続的サイズ可変性の入射機が存在すれば、そのような実験が可能となることを示した(Fig. 3, 4)。ここで、Fig. 3 は同じ位置にデポジション量を変化させるよう入射した場合、Fig. 4 はデポジションの位置を変えて入射した場合である。

３．今後の開発について

開発を進めてきた入射装置の心臓部を、Fig. 5, 6 に示す。今後これらを用いて、精密な基礎実験に有用な、サイズ連続可変ペレットインジェクターの開発をさらに推進したい。

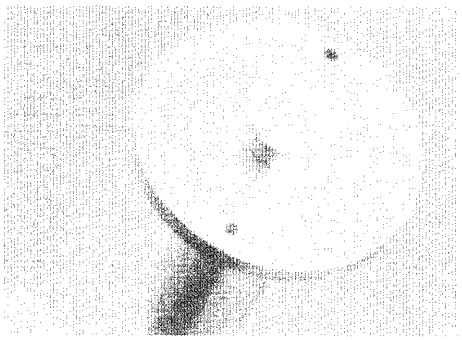


Fig. 5 ディスク型ペレットキャリアー

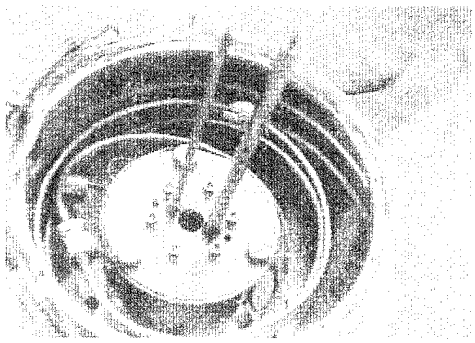


Fig. 6 ペレットサイズ可変機構付ガンバレル

Ref. (1) L. R. Baylor, A. Geraud, W. Houlberg, D. Frigione, M. Gadeberg, T. Jernigan, J. DeKloe, P. Kupschus, B. Kuteev, P. Lang, A. Oomens, A. Quall, K. N. Sato, G. Schmidt : Nuclear Fusion 37 (1997) 445.

衝撃波プラズマからのノズル流による緩和時間差レーザーの特性研究

東京理科大・理工学部　小越澄雄

1．研究背景・目的

不純物を大幅に低減できる無隔膜型の衝撃波管を利用し、CO_2 ガスダイナミックレーザー(GDL)における不純物添加効果を調べる。衝撃波などにより励起された媒質を超音速ノズルから噴き出させると、物質によってはあるエネルギーレベル間において、緩和時間の差に起因した反転分布が生起される可能性がある。この可能性についてはかなり古くに理論的に提案され、実験で一部研究されてきた。しかしながら実験では、媒質として CO_2 のみしか研究されておらず、高出力の可能性のみに着目されてくる傾向があった。各種媒質を用いてこの方式のレーザーの可能性を研究することは、理学的には原子分子の電子・振動・回転レベルの緩和に関する研究につながるもので大変興味深く、また工学的にはいろいろな波長における高出力連続発振実現につながり、各種レーザー加工や高エネルギー密度光照射、またプラズマ研究分野ではトーラスの定常維持実験における長時間計測として、新しい有効な手段に結びつくものである。

本研究では、具体的には、H_2, H_2O などが興味深い課題である。また、各種原子分子における反転分布(各種波長による発振)の可能性も併せて探る。さらに、放電励起法の重畳による反転分布強度の増大（重畳効果の実証）に挑戦し、最終的にはプラズマと中性原子分子の接触によるプラズマダイナミックレーザーの検討を行う。なお、無隔膜衝撃波管は九大応力研の貴重な実験装置であり、特に大口径のものは世界でも類がなく是非とも特色ある研究を進める。

2．実験装置および方法

気体力学や航空宇宙分野、プラズマなどの多くの分野において広く活用されている衝撃波管は、従来、隔膜により高圧室と低圧室を仕切り、その隔膜を破膜させ衝撃波を発生させていた。しかし、実験ごとに隔膜の交換が必要なため、大気開放による不純物混入、実験効率などの問題点が指摘されてきた。これらを改善するため、ピストン動作によって衝撃波を発生させることができる大口径無隔膜衝撃波管を開発した。

これまでに、低不純物状態にして実験することができる無隔膜衝撃波管を用いて、CO_2-GDL の発振実験を行ってきた。今回、衝撃波マッハ数より導出できる CO_2-GDL の基礎パラメータ T_5, P_5 の範囲をさらに拡大するために主ピストンの軽量化を行うことで、更なる高圧室動作の確立を行った。さらに、主ピストン改良前と改良後での基礎パラメータを計測し、ピストンスライド過程による衝撃波マッハ数（Ms）依存性の考察を行った。図１に、これまで開発が進められてきた高圧室ピストン部を示す。

3．実験結果

昨年度から今年度にかけての実験では、ピストンの重量を 19.1%軽量化し、25%のマッハ数の改善を得た。この軽量化したピストンを用い、３種類の試料ガス($0.3CO_2$-$0.7N_2$,$0.2CO_2$-$0.8N_2$, $0.2CO_2$-$0.3N_2$-$0.5He$)を用いて衝撃波発生実験を行った。実験条件として、それぞれの初期試料ガス圧力 P_1=5[Torr]を一定とした。また、衝撃波は高圧室圧力 P_4 と低圧室圧力 P_1 の圧力比 $P_{41}=P_4/P_1$ によって動作される。図 2 に示されるように主ピストンを軽量化することによって Ms が向上した。その結果、レーザー出力に重要なパラメータである T_5, P_5 が極めて大幅に向上した。

4．ピストンスライド過程の考察

２段ピストン構造のピストンスライド過程を明確にするために、ピストンスライド過程による運

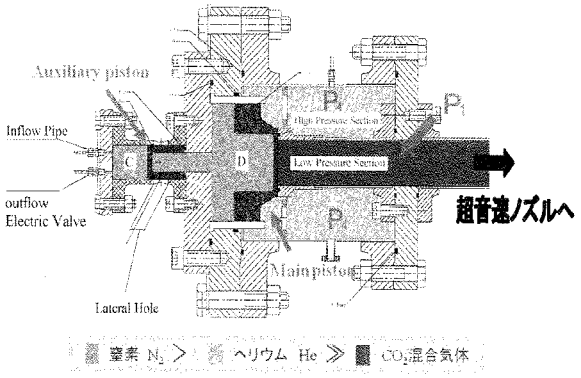
動方程式に基づいたモデル計算を行った。モデル計算によって、衝撃波形成距離と衝撃波そのものに影響していると考えられているピストンスライド時間が推定される。

図3に軽量化比較のために、P_{41}をパラメータとしてピストンが50%開口するまでのピストンスライド時間を示す。主ピストン軽量化によってP_{41}が同条件でもピストンスライド時間が短くなっている。また、P_1の増加によってもピストンスライド時間が短くなっていることが分かる。図4に高圧室から低圧室への気体流入量$Q_{4,out}$を示す。主ピストン軽量化によって同じ時間でもより多くの気体を低圧室へ流入させていることが分かる。

これらの結果から、衝撃波発生において無隔膜衝撃波管のピストン動作によって変化する高圧室から低圧室への気体の流入量が非常に重要な役割を果たしていることがわかる。そして、M_S向上の理由として主ピストンの軽量化によりピストン動作が以前より速くなった可能性があり、低圧室への気体流入率の増加により衝撃波形成距離が短くなったことが考えられる。さらに、P_{41}の上昇によって実験結果においてはM_Sが大きくなり、計算結果においてはピストンスライド時間が短くなることからピストンスライド過程によるM_S依存性があると考えられる。

5．まとめ

無隔膜衝撃波管ピストン可動部の主ピストンを軽量化（19%）することによってM_Sが大幅に向上した（25%）。その結果として、レーザー出力に重要なパラメータであるT_5，P_5を、それぞれ52%，76%向上させることができた。主スライドピストンの運動方程式に基づいたモデル計算を行い、M_S向上の理由として衝撃波形成距離が短くなったことが明確にされた。



※不等号は圧力関係を示す。

図1　高圧室ピストン部

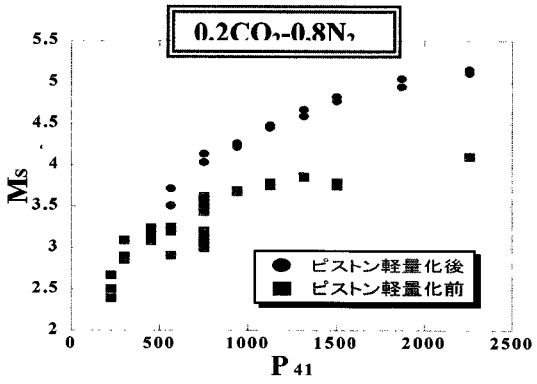


図2　P_{41}に対するM_S比較

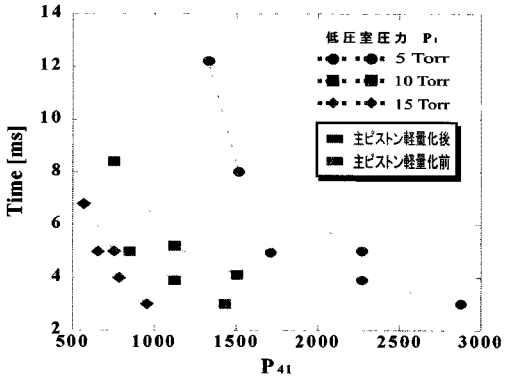


図3　主ピストン軽量化による
ピストンスライド時間変化

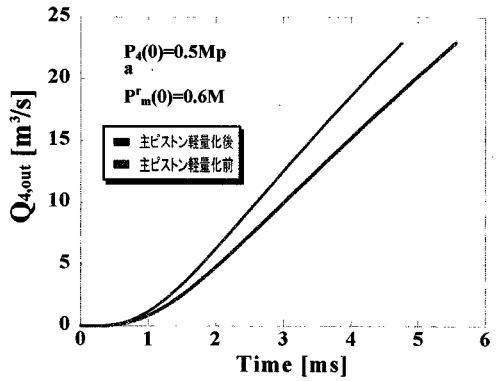


図4 主ピストン軽量化による気体
流入量変化

結晶構造が複雑な固体材料における照射効果

琉球大学教育学部　岩切宏友，三島由美，稲嶺理美
九州大学応用力学研究所　渡邊英雄，吉田直亮
京都大学エネルギー理工学研究所　森下和功，渡辺淑之

【はじめに】

金属材料にヘリウムイオンを照射すると，材料表面領域にナノスケールのヘリウムバブル（ヘリウム原子が3次元的に凝集したもの）が形成される。ヘリウムイオンの照射量が増加すると，ヘリウムバブルは直径2 nm程度まで成長する。材料内部に形成されるヘリウムバブルの密度は極めて高いため，ヘリウムバブルの協力現象（たとえば，バブル間の破断）により様々な表面形状変化を引き起こすことが知られている。本研究では，構造の複雑な固体材料にヘリウム照射を行い，AFM（原子間力顕微鏡）を用いてイオンビーム照射後の表面微細構造分析を行う。

【実験方法】

イオンの照射は，九州大学応用力学研究所の制御イオンビーム照射装置（オリジン電気）を用いて行った。照射イオン種はHe^+及びD_2^+，照射エネルギーは7 keV，照射量は 1.0×10^{21}～3.0×10^{22}ions/m^2 程度の範囲で変化させた。試料は，CeO_2，スピネル，SiC，ZnO，Al_2O_3 及び CaF_2 を使用した。また，比較材として金属である W への照射・観察も行った。イオン照射後は，琉球大学機器分析支援センターの走査型プローブ顕微鏡（SPM-9500，島津製作所）を用いて，表面構造の超微細観察を行った。

【実験結果】

スピネル，SiC，CeO_2，に室温下で 1.0×10^{21} ions/m^2 のHe^+を照射したときの表面微細観察結果を図1に示す。いずれも試料表面にナノスケールでのブリスター（微細な膨らみ）の形成が観察できた。SiCでは，金属材料への照射後と似た直径1μm・高低差50nm程度のブリスターが形成されていることが明らかになった。CeO_2やスピネルにおいては，直径100 nmから300 nm程度で，高低差が20～80nm程度と，大きさにばらつきのあるブリスターが観察された。ZnOについては，He^+照射量を 1.0×10^{21}～3.0×10^{22}ions/m^2 の範囲内を3段階で変化させ，照射量による表面形状の変化の観察を行ったところ，照射量が多いほど細かく大量のブリスターが形成している様子が確認できた。

サファイア，CaF_2 に室温下・照射エネルギー7keVで照射量 1.0×10^{22} ions/m^2 で，それぞれにHe^+と D_2^+を照射し，表面形状の観察を行った。He^+を照射すると，どちらの試料も高低差40nm程度のブリスターが形成されたが，1つ1つのブリスターの大きさや間隔は不規則的であった。また，D_2^+を照射すると，CaF_2ではHe^+を照射した場合とほぼ同じような表面形状変化が見られたが，サファイアの場合は，ブリスターの形成が極めて少ないことが明らかになった。

【考察】

金属材料中におけるブリスター形成のメカニズムはよく知られている。まず，金属表面領域に高密度のヘリウムバブルの形成が行われ，その領域に応力（一種の膨張力）が作用する。ヘリウムバブルのサイズ・密度が限界を超えると，表面層が引き延ばされることで（延性的に）膨れあがることでドーム状となり，これがブリスターとなる。ブリスターが形成されると，その周囲の応力（膨張力）を緩和するので，ある程度の間隔をおいてブリスターは形成されることになる。本研究においては，SiCについては比較的大きなブリスター（金属と近い）の形成が行われたが，CeO_2やZnOにおけるブリスターのサイズはかなり小さく，ドーム状の構造をしているかどうかも判別できなかった。

SiCなどの共有結合性結晶は，延性を全く有さ

ない脆性物質ではあるが，ヘリウム照射下では照射領域はアモルファス化することで照射中における延性を獲得し，200%の組成変形を起こしてドーム状になることが報告されている。したがって，本研究における SiC もアモルファス化によってドーム状，すなわち金属と近い表面形状変化を示したと考えられる。

共有結合性結晶が照射下で容易にアモルファス化を起こすのと対照的に，ホタル石型構造である CeO_2 は重照射下でもアモルファス化しないことがよく知られている。また，Al_2O_3 や CaF_2 もアモルファス化を起こしにくい材料である。したがって，照射によって表面構造がアモルファス化するか否かが表面構造を特徴づけると予想される。つまり，アモルファス化しない材料ではバブルに起因した塑性変形が起こりにくいため，変形が局所的にとどまる傾向にあるために，大きなブリスターを形成しえずに微細な突起の形成にとどまるということである。なお，ZnO については透過型電子顕微鏡観察も行っており，ヘリウム照射下ではアモルファス化が起こらないことが明らかになっている。重水素を照射した試料については，物質中に注入された重水素が分子化する場合にのみ，重水素バブルが形成され，表面構造を変化させることが知られている。遷移金属中では水素の分子化は起こらないが，アルミニウムのような典型金属では水素バブルが形成されることが知られている。これは，物質中で重水素の分子化が生じ，重水素バブルが形成され，表面構造を変化させたことに起因する。ただし，水素は物質中で水素化物や固溶体を形成することで複雑な挙動を示すので，現象を一義的に解釈することは現状では難しい。

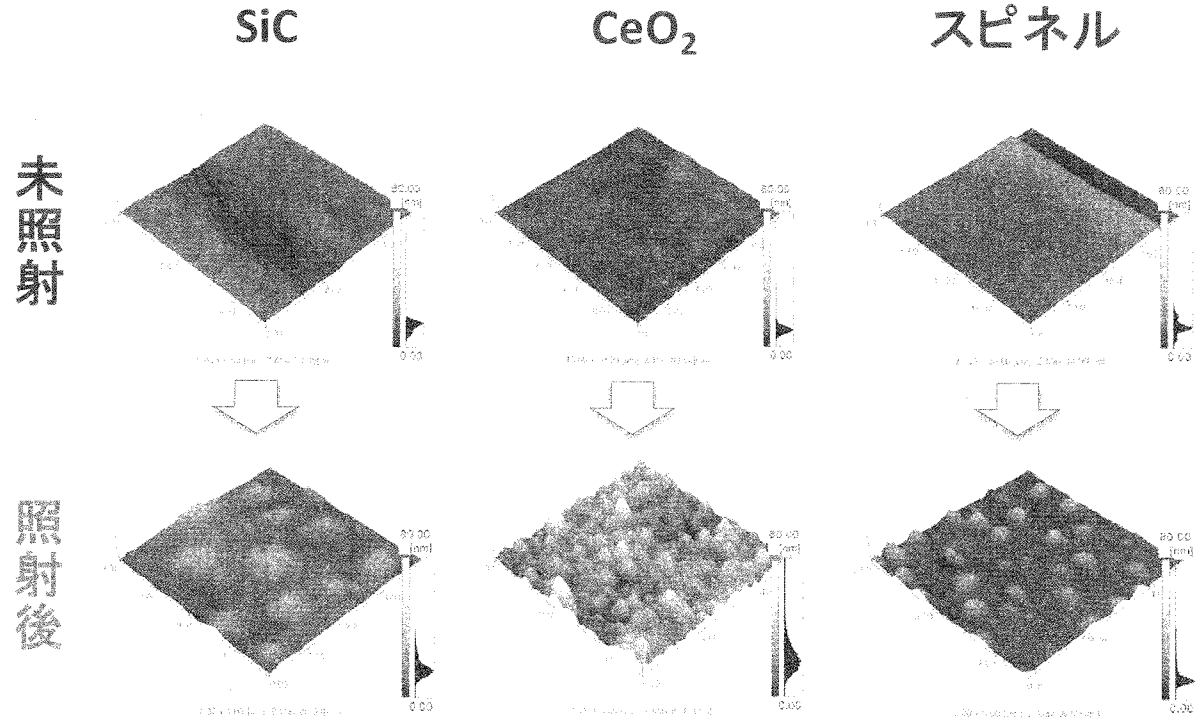


図1　スピネル，SiC ，CeO_2，に室温下で 1.0×10^{21} ions/m^2 の He^+ を照射したときの表面微細観察結果

（成果発表）

岩切宏友，三島由美，稲嶺理美，吉田直亮：半導体・絶縁体に対するヘリウムイオン照射効果，2009 年京都大学原子炉実験所ワークショップ「材料照射効果と応用」

QUESTにおけるプラズマ電流立ち上げ法の実験

東海大学・熊本教養教育センター　御手洗　修

1. 目的

スフェリカルトカマク（ST）核融合炉ではセンターソレノイド（CS）が設置できない可能性が高いので，CSなしプラズマ電流立ち上げの実験研究が重要である．しかし，QUESTは全日本の実験装置であり，多くの研究者，学生が参加する装置であるから多種多様な実験ができるのが望ましい．そのためにもキャンセルコイル（CC）を設置し，オーミック実験が容易に行えるようにした．本共同研究はCCを用いてQUESTにおける，[1]オーミック放電，[2]オーミック立ち上げとRFによる電流駆動，[3] RF加熱を併用して，第一に垂直磁場，ダイバータコイルとCCを用いたCSなし運転，第二にPF4-13とCCによるマージングによるプラズマ電流立ち上げ，について実験的に調べるが，その際の種々の数値計算を行うことが，本共同研究の目的である．

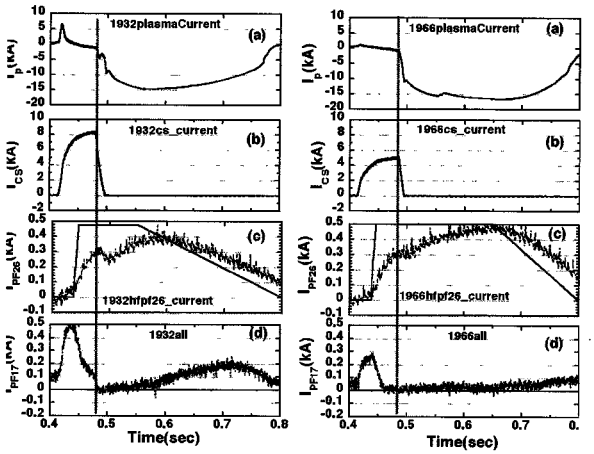


Fig. 1. Plasma current evolution in QUEST at B_t=0.14 T with the one turn cancellation coil. Left column shows I_{CS}=8 kA (#1932) and right one I_{CS}=5 kA (#1966). (a) Plasma current, (b) CS current, (c) PF26 vertical shaping coil current (N_{PF26}=72 turns) and set value, (d) PF17

2. オーミック立ち上げ実験結果

2009年度第1サイクルにおいて行われたCSを用いたパルスOH放電実験では，図1に示すように，矛盾する結果が得られた．即ち，バイアスCS電流が大きいと普通は大きなプラズマ電流が誘起されるが，実際には5kAと小さい場合の方が大きなプラズマ電流がしかもスムースに流れている．

その原因を探って見ると真空容器に流れている電流によって平衡とは逆の垂直磁場ができることがわかった．CSランプダウン時間は10ー15 msと短いので，真空容器に多くの電流が流れ，また垂直磁場の浸み込み時間も10 msと同程度なので，短い時間内に位置の制御ができないからでもある．

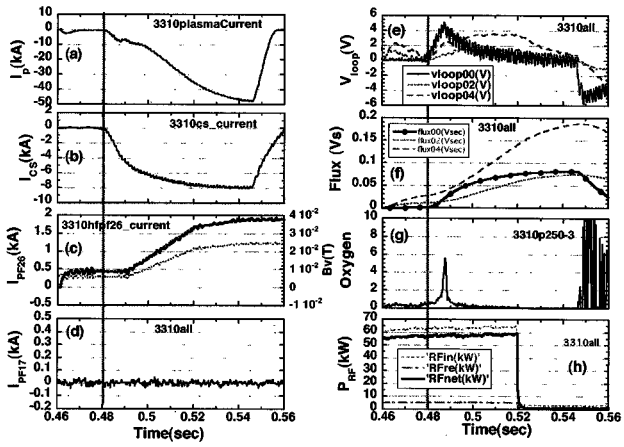


Fig.2. The plasma current evolution for the slower OH coil ramp-down. (a) Plasma current, (b) CS current, (c) PF26 vertical shaping coil current (N_{PF26}=36 turns) and vertical field, (d) PF17 vertical field coil current, (e) loop voltage measure at three locations, (f) measured fluxes at three locations, (g) oxygen impurity line, and (h) 8.2 GHz RF power. (#3310)

そこで，CS電流の時間変化がゆっくりとした，ランプアップ時を利用し，結線を逆にしてランプダウンさせて同じ方向のプラズマ電流を得るように結線して実験を行った．その結果図2に示すように48 kAのプラズマ電流が得られることがわかった．このように，CSの時間変化，垂直磁場の時間変化をゆっくり変化させると大きなプラズマ電流が得られることが実験的に示された．

3．回路方程式を用いた数値計算

この状況を，真空容器とプラズマが相互作用を行う回路方程式を立て，プラズマの粒子，エネルギーバランス方程式も考慮して解く方法を考えた．図3に示すように，真空容器は外側と内側の円筒のみを考え，回路方程式の数を落として物理的理解が可能なように簡単化した．また，こ

こでは上下の真空容器に流れる電流による垂直磁場は小さいことも考慮している．この簡素化によっても内側と外側の真空容器電流による垂直磁場が現れ，かつ垂直磁場のしみ込みも表すことが可能と思われる．その方程式は

$$\begin{cases} L_p\left(\frac{dI_p}{dt}\right)+M_{pV1}\left[\frac{dI_{V1}}{dt}\right]+M_{pV2}\left[\left[\frac{dI_{V2}}{dt}\right]\right]+R_pI_p=-\left(M_{pCS}\frac{dI_{CS}}{dt}+M_{pPF2}\frac{dI_{PF2}}{dt}\right)=V_p & (1)\\ M_{V1p}\left(\frac{dI_p}{dt}\right)+L_{V1}\left[\frac{dI_{V1}}{dt}\right]+M_{V1V2}\left[\left[\frac{dI_{V2}}{dt}\right]\right]+R_{V1}I_{V1}=-\left(M_{V1CS}\frac{dI_{CS}}{dt}+M_{V1pPF2}\frac{dI_{PF2}}{dt}\right)=V_{V1} & (2)\\ M_{V2p}\left(\frac{dI_p}{dt}\right)+M_{V2V1}\left[\frac{dI_{V1}}{dt}\right]+L_{V2}\left[\left[\frac{dI_{V2}}{dt}\right]\right]+R_{V2}I_{V12}=-\left(M_{V2CS}\frac{dI_{CS}}{dt}+M_{V2pPF2}\frac{dI_{PF2}}{dt}\right)=V_{V2} & (3)\end{cases}$$

これに，プラズマの粒子，エネルギーバランス方程式を追加して，あらかじめ連立方程式を解いておき，時間依存のみを計算する．回路のパラメータを別に求めておいて，＃3310 を模擬する計算を行った．CS 波形，PF26 波形は実験結果の波形を用いて，プラズマ電流が実験になるようなパラメータを探した．その結果を図 4 に示す．

この計算では，プラズマ抵抗の中の電子温度を非等方的とし，磁力線方向の逃走電子の効果を考慮するために，

$$T_e \to \frac{2}{3}T_e\left(1-N_{run}\right)+\frac{1}{3}T_e\left(1+G_{run}N_{run}\right)$$

とおいた．ただし，N_{run} は分布関数の中での逃走電子の割合でここでは $N_{run}=0.1$，G_{run} は２ー100 の時間依存の係数で，磁力線方向の逃走電子の分布関数を等価的高温度で表した人工的な数値を導入した．現在までの QUEST 実験では低密度であるために，硬 X 線の計測からもわかるように，逃走電子が支配的であり，それらの計算への正確な導入が必要である．内側真空容器に 50 kA，外側真空容器に 15 kA 程度の容器電流が流れていて，初期の垂直磁場を減少させている（図 4-(e)）．なお，垂直磁場駆動効果を弱めると，プラズマ電流は減少するので，垂直磁場が電流を駆動していることが計算上でも理解できる．

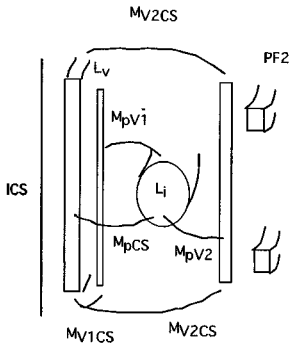


Fig.3. Model circuit between the CS, the inner and outer vacuum chamber, and the plasma current.

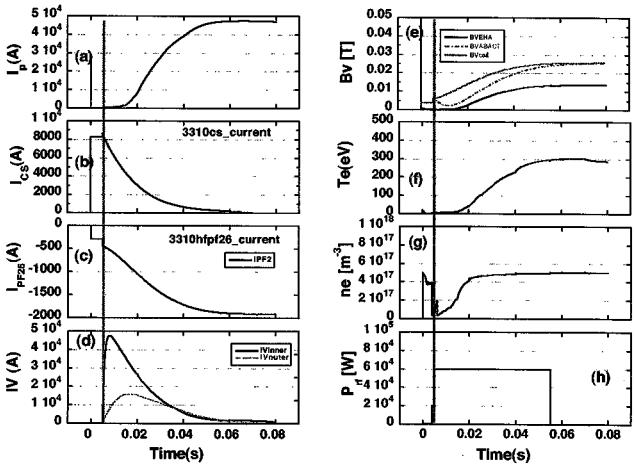


Fig.4. Calculated plasma current evolution for the slower OH coil ramp-down (#3310). (a) Plasma current, (b) CS current, (c) PF26 coil current, (d) inner and outer vacuum chamber current, (e) equilibrium vertical field and applied vertical field subtracted by the vacuum chamber effect, (f) electron temperature, (g) density, and (h) 8.2 GHz RF power.

5. 研究成果報告

[1] O. Mitarai, K. Nakamura, et al., ″First Ohmic Discharge assisted with RF power in QUEST Spherical Tokamak″ 2009. 10. 投稿中

[2] O. Mitarai, K. Nakamura et al., ″Plasma current ramp-up experiments in QUEST″ APFA2009 conference (2009, Oct 27-29, Aomori) P27p2-01, 受理

6. 研究組織　所内世話人：中村　一男　教授

ステンレス鋼の照射誘起応力腐食割れ(IASCC)感受性に及ぼす応力付加重照射の影響に関する研究(その2)

(財)電力中央研究所　宮原 勇一、新井 拓
九州大学　応用力学研究所　渡辺 英雄

1. 目的

原子炉等の炉内構造物材料として用いられるオーステナイト系ステンレス鋼は、軽水炉温度で中性子照射を受けることにより、応力腐食割れ(SCC:Stress Corrosion Cracking)感受性を生じる場合がある。この現象は照射誘起応力腐食割れ(IASCC:Irradiate Assisted Stress Corrosion Cracking)と呼ばれ、高経年化した軽水炉や核融合炉の冷却配管等において問題となる可能性がある。従来の研究は、照射後の試験片を用いた低ひずみ速度引張 (SSRT) 試験によりSCC感受性を評価したものが多く、照射硬化した材料に過大な応力負荷を与えるために、IASCC感受性が高くなる結果が得られている。実機では、定ひずみまたは定応力に近い状態で照射を受けており、その状態におけるIASCC感受性の変化が問題となる。応力負荷状態で照射を受けると、照射硬化や照射誘起応力緩和が同時進行し、IASCC感受性は複雑な挙動を示すことが予想される。本研究では、応力負荷状態の同一試料に対し、照射、応力測定、硬度測定、SCC試験を一連で実施する試験評価方法を確立し、応力負荷照射材のIASCC感受性を評価することを目的とする。

2. 実験方法

2.1 供試材と試験治具

供試材は、市販の316Lステンレス鋼の熱間圧延薄板(3mm厚)を用いた。供試材の化学組成を表1に示す。重イオン照射用試料は幅4mm×長さ12mmに切出し、厚さ0.5または1.0mmに研摩した。試験面表面は、板材初期表面を33～48μm研摩した面とし、5%過塩素酸-95%酢酸溶液中で20V-30秒間の電解研磨により仕上げた。本供試材は、同様の試験片表面仕上げ状態において、一般的なSCC発生感受性試験であるCBB試験によりSCCが発生することが確認されている[1]。 本研究で使用した試験治具を図1に示す。試料は、曲率半径12.5 mmの凸部を有する下型にねじ止めされることにより、表面に曲げ応力・ひずみが負荷される。照射前後の表面組織・応力・硬度試験および照射試験時は下型のみで行うことができる。SCC 発生試験は、試験片表面に隙間形成材のグラファイトウールを載せた後、上型で固定することにより実施が可能である。

2.2 応力測定

照射試験前後における表面微小部の応力を評価するため、X 線回折による応力測定を行った。装置には、二次元検出器を搭載したBruker D8 Discoverを用い、Cr Kα線源による(220)回折の測定を行った。測定では、入射X線のスリット径をφ500μmとし、試験片頂上部中心の1.5×1.5mmの範囲で計9箇所の測定を実施した。応力測定および解析方法には2D法を採用し、(220)デバイリングのフィッティングにはPeason Ⅶ関数を適用し、応力解析では2軸応力状態を仮定した。

2.3 硬度測定

照射材のダメージピーク位置が表面から500nm程度の深さになることを考慮し、ビッカース圧子による硬度測定を荷重35 mN、保持時間10secの条件で実施した。照射試験前後の硬度測定位置は、治具に固定した試料の頂上部とし、板幅方向に150μm間隔で各20点の測定を行った。

2.4 重イオン照射

重イオン照射にはNiイオンを用い、室温、200、300℃で、3.0 dpaの照射を行った。また、比較試料として、試験温度履歴のみを再現した未照射試料を作製した。

2.5 SCC試験

SCC試験は、試験片表面にグラファイトファイバーウールを載せてすきまを形成した状態で、溶存酸素量8ppm、試験温度288℃の条件で1000hr行った。SCC試験後は、試験片表面のSEM観察によってき裂発生の確認を行った。

3. 実験結果と考察

図2に照射試験前後およびSCC試験後の応力測定結果を示す。縦軸の応力σ_{22}は試験片長さ方向の応力であり、

引張が正、圧縮である。全ての試験片で加熱および照射後の応力は低下しており、応力緩和が起こっている。室温および300℃における試験結果から、照射による応力緩和は20～30MPa程度と考えられる。SCC試験後の応力は、300℃加熱材と200℃照射材で約50 MPa、300℃照射材で約135 MPaに低下している。図3に照射試験前後の試料表面の硬度変化を示す。照射前の硬度は全ての試験片でHv=330～360の範囲にあり、試験温度300℃までの加熱・保持による軟化は認められない。照射軟化の効果は照射温度が低いほど顕著になる傾向が見られるが、照射試験後の硬さは、未照射材でSCCが発生する硬さ(HV>235)[1]よりも高い。SCC試験後の試験片頂上中心部の300mm四方で観察されたき裂の数と長さを表2に示す。SCCによるき裂は、300℃熱履歴材と室温および200℃照射材で観察され、300℃照射材はき裂の発生が認められない。図4に未照射材を大気中300℃で保持した時の応力測定結果を示す。未照射材の応力は、300℃-3minの保持で約475 MPaから約425 MPaまで応力が緩和されるが、その後の応力の低下は見られない。表2のSCC試験結果および図2と図3の応力緩和挙動から、重イオン照射は、SCC試験時の応力緩和を促進し、SCCによるき裂の発生を抑制する効果があることが示唆される。

4. まとめ

曲げ応力を付加した状態で照射および応力・硬さ測定を行い、その状態のままの試料でSCC試験を行った。表面硬化層を有する低炭素ステンレス鋼のSCC発生に対して、重イオン照射はSCC試験中の応力緩和を促進する効果があり、SCC発生が抑制されることが示唆される。

5. 参考文献

[1] 宮原 勇一、加古 謙司、黛 正己, 電力中央研究所報告 報告 Q07015,(2008).

表1 供試材の化学組成

Element	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N	Fe
mass %	0.017	0.70	0.79	0.03	0.001	12.07	17.09	2.07	-	Bal.

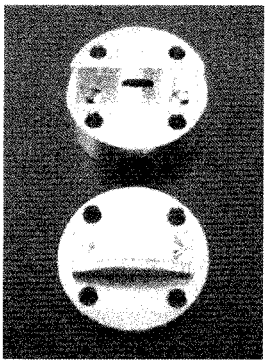


図1 試験治具の外観

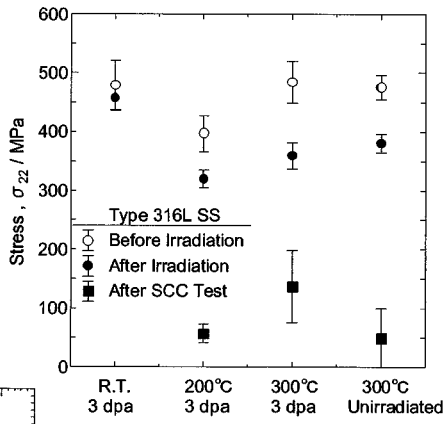


図2 照射試験前後およびSCC試験後の応力測定結果

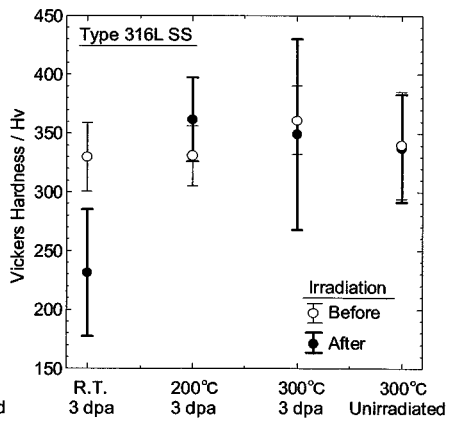


図3 照射試験前後の試料表面の硬さ

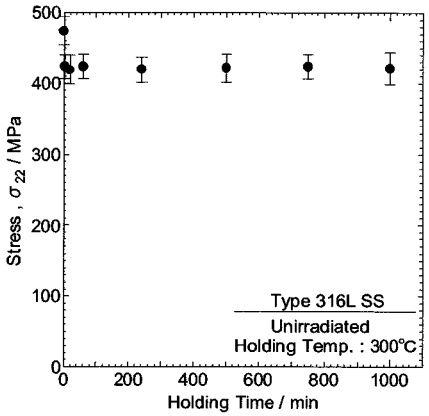


図4 未照射材の300℃保持による応力緩和挙動

表2 SCC試験後のき裂発生数および長さ

	き裂数	き裂長さ(μm)
300℃加熱のみ	65	634
R.T.-3 dpa	15	252
200℃-3 dpa	5	21
300℃-3dpa	0	0

固体表面状態のシース熱流束に及ぼす影響の研究

大阪府立大学 工学研究科 松浦 寛人

1 研究の目的

プラズマと固体境界のシースを介して伝えられる熱流束は、核融合プラズマのダイバーターのみならず、半導体プロセスの基板や宇宙飛翔体の外壁などの健全性に大きな影響を及ぼす。我々はプローブチップの温度変化から直接シース熱流束を測定し、チップのバイアス電圧に対する熱流束の応答からプラズマパラメーターを推定するサーマルプローブ法の研究を行ってきており、その過程でプローブチップの材質や表面状態もまたシース熱流束に影響を与えることを見出している。核融合炉壁の第一候補として上げられているタングステンはヘリウムイオンの混在するプラズマ照射下で表面に様々な損傷を受けることが最近報告されている。そこで、これらの表面損傷の有無がシース熱流束に及ぼす影響を実験的に調べることは重要である。さらに、熱輻射が支配的な高温ターゲットの厳密な熱流解析法は未だ確立されていない。本研究では、赤外線温度計で測定したタングステンターゲットの温度データからプラズマ熱流束を推定した。

2 実験装置及び結果

実験は応用力学研究所高温プラズマ研究センターの PWI 模擬実験装置 APSEDAS を用いて行われた。13.56 MHz の高周波を発生するヘリカルアンテナでヘリウムプラズマが生成された。

照射試料は Nilaco 社製のタングステンで、水冷された試料台に設置されている。厚さは $\ell = 0.1$[mm]、面積は $S = 22 \times 22 = 4.84 \times 10^2$[mm^2] である。図 1 は赤外線温度計 (Chino 社製 IR–CAQ シリーズ) で測定した試料の温度変化を示す。測定は測定可能レンジの異なる 3 つのカメラを組み合わせて行っている。試料と試料台の間の接触を減らしたため、比較的低密度のプラズマ照射にもかかわらず、放電開始直後にタングステン温度は 1700 [K] まで上昇し、放電停止後は 30 [s] 足らずで 1000 [K] も低下している。

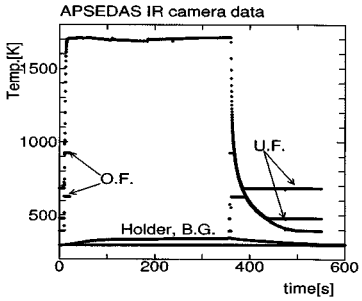


図 1: PWI 模擬実験装置 APSEDAS に置けるタングステン試料の温度変化。

3 熱量損失に関する考察

比較的低温の基板への熱流束を放電停止前後での試料温度の時間微分のジャンプより決定する方法は既に実績があるが、APSEDAS で見られるような放電停止直後の $\frac{dT}{dt}$ を 1000 [K/s] の精度で測定することは、データに含まれている揺動の平滑化の要請と相入れないため困難である。熱輻射が重要でない低温条件であれば、熱損失は温度の 1 次関数であると近似し、温度の時間変化を指数関数でフィッティングすることも可能であるが、図 1 のデータではこの方法を用いると熱流束の過小評価につながる。図 2 は輻射及び伝導を共に考慮した熱量損失のモデル方程式

$$Q_{loss} = -c_p \rho V \frac{dT}{dt} = Q_1 + Q_4, Q_1 = \eta_1 (T - T_0), Q_4 = \eta_4 (T^4 - T_0^4) \quad (1)$$

を APSEDAS の実験条件に当てはめ、数値積分した結果である。放電停止 ($t = 100$[s]) 後数十秒は伝導項 Q_1 の寄与が無視

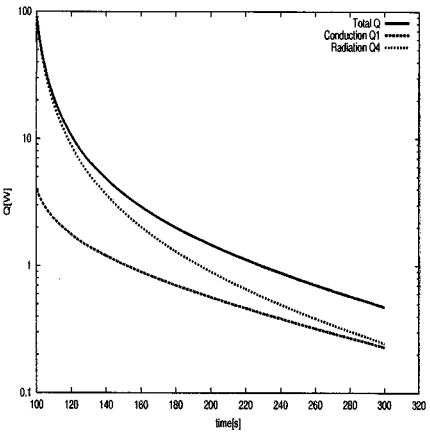


図 2: 熱損失モデル計算

できることが分かる。従って、伝導損失を無視して測定データをフィッティングしてプラズマ熱流束 $Q_{plasma} \sim Q_{loss}$ を評価したほうが良いと考えられる。

輻射項 Q_4 のみを考慮した微分方程式 ($\frac{dT}{dt} = -C(T^4 - T_0^4)$) は解析的に積分でき、以下の陰関数表示の解を得る。

$$log|\frac{T-T_0}{T+T_0}\frac{T_1+T_0}{T_1-T_0}| - 2\{\tan^{-1}(\frac{T}{T_0}) - \tan^{-1}(\frac{T_1}{T_0})\} = -4CT_0^3(t-t_1) \quad (2)$$

ここで、$T_1 = T(t_1)$ は放電停止 ($t = t_1$) 直前の温度、$C = \eta_4/c_p\rho V$ はタングステン試料の放射率に比例するパラメーターである。この式より試料の温度変化の速さはもっぱらパラメーター C の大きさ即ち放射率で決まることが分かる。図 3 は放射率 0.22 を仮定して (2) 式で高温域測定用カメラのデータをフィッティングした例である。(図中の太線。) 放電停止 ($t = 720$[s]) 後の急速な温度低下が輻射による熱輸送で良く説明できていることが分かる。

この放射率の値を用いて、(1) 式からプラズマ熱流束 Q_{plasma} を評価すると、およそ 22[W] あるいは 4.5×10^4[W/m^2] という値が得られる。今回の実験では、高周波パワーを 1[kW] まで上げるとヘリコン波の励起によりプラズマ密度のジャンプが観測された。それに伴い、評価されたプラズマ熱流束の値も 2 倍以上に増加していることが確かめられた。

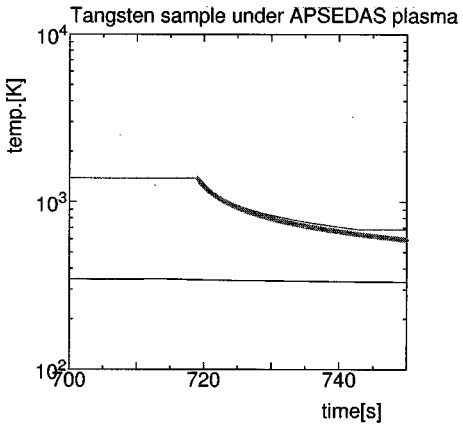


図 3: 高温赤外線カメラデータのフィッティング例。

4 まとめ

1000[K] を越える表面温度に達する APSEDAS プラズマ照射試料へのプラズマ熱流束を推定するための輻射熱伝達モデルを構築し、RF パワーとの相関を調べた。実験を行った最大 RF パワーではヘリコンジャンプによる熱流束の変化も確認されたが、照射フルエンスは比較的小さい値にとどまっていた。表面損傷の影響を詳しく調べるためには、より高い熱流束・粒子束での計測が必要であろう。

5 研究組織

研究代表者	松浦寛人	大阪府大・工	助教
研究協力者	中野賢	大阪府大・工	修士課程 2 年生
研究協力者	坂本瑞樹	九大・応力研	准教授
研究協力者	東園雄太	九大・応力研	特別研究員
研究協力者	徳永和俊	九大・応力研	准教授

6 成果報告（論文、学会発表等）

- 松浦寛人他：第 57 回応用物理学関係連合講演会,（東海大, 2010 年 3 月）発表予定.

QUEST 装置におけるリチウム原子偏光分光を用いたプラズマ電流計測

京都大学大学院工学研究科　四竈　泰一

1. 目的

本研究では，プラズマ中に入射したリチウム原子ビームからの 2s-2p 発光線の偏光観測を利用し，磁場のピッチ角分布を測定する．さらに，MHD 平衡計算を利用し，測定されたピッチ角分布を与えるようなプラズマ電流を推定する．

ピッチ角測定には，従来，光弾性変調器や複屈折性液晶と直線偏光板，干渉フィルタ，光電子増倍管を組み合わせた計測システムが利用されてきたが，本研究では新たにグラントムソン型偏光分離素子と高分解能分光器，高感度 CCD を組み合わせたシステムを提案する．後者を利用する場合，発光スペクトル形状に現れるゼーマン分裂から発光位置の情報を得ることが可能であり，リチウム原子ビーム軌道から計算される計測位置とクロスチェックを行うことができる．また，量子効率が高く暗電流値の小さい背面照射型冷却 CCD を利用することで，数十ミリ秒程度までの時間分解も可能である．

2. 方法・結果

外部磁場下ではゼーマン効果によりリチウム原子発光線のπ，σ光が異なるスペクトル形状を持つ．この性質を利用することで，π，σ光を分離することができ，それらの強度比から観測視線に対する磁場のピッチ角を推定することができる．まず，計測可能性を検証するために，予測される観測スペクトル形状を摂動計算により評価した．図 1 に示すように，偏光分離素子により分離される常光(o-ray)，異常光(e-ray)の電場ベクトル方向および観測視線によって作られる座標系において，磁場ベクトルが角度ϕ, θ 方向を向いている場合を考える．実験条件に近い$\phi = 160°$，$\theta = 30°$，磁場強度 0.5 T を用いて計算した 2s-2p 発光線スペクトルは図 2 のようになる．π，σ光が異なるスペクトル形状を持つため，観測される常光，異常光のスペクトル形状(π＋σ)がわずかに異なったものとなることが確認できる．この結果から，本手法によるピッチ角測定が原理的に可能であることが分かった．

QUEST 装置 BFU302 ポートから入射されるシート状熱リチウムビームからの発光線を観測することを計画し，偏光分離素子を MH16 ポートに固定するための治具を製作した．その後測定を行う予定であったが，QUEST 装置の運営方針によりリチウムビーム入射が取り止めとなったため，データの取得には至らなかった．

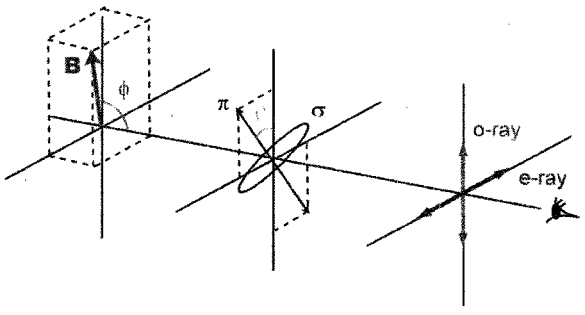


図 1. 観測配置

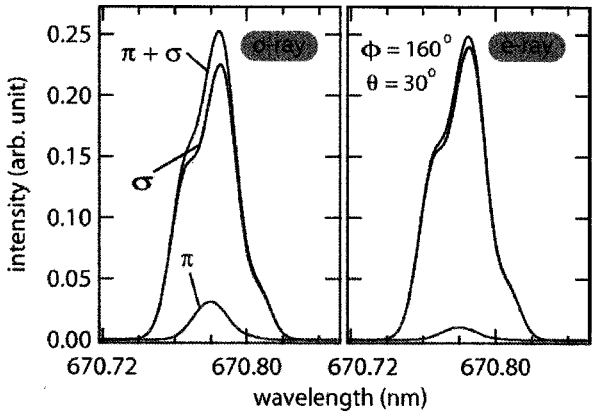


図 2. 磁場強度 0.5 T でのリチウム原子 2s-2p 発光線の常光,異常光の計算結果

3. 成果発表

[1] 西岡朋美，四竈泰一，藤井恵介，蓮尾昌裕，図子秀樹，Sanjeev Sharma「プラズマの電子温度，電子密度の 3 次元分布計測を目指したシート状リチウムビーム源の開発」プラズマ核融合学会 年会 1pE13p (2009).

[2] 西岡朋美，四竈泰一，片山光一，蓮尾昌裕，図子秀樹，了戒智文，Sanjeev Sharma「シート状リチウムビームを用いたグロー放電プラズマの電子温度，電子密度計測」日本物理学会年会 20aTJ8 (2010).

プラズマ対向材料の損耗・損傷評価

核融合科学研究所　大型ヘリカル研究部　芦川　直子

目　的

第一壁の損耗および再堆積に関する問題は，損耗による材料損傷と堆積層による壁リテンションを通じたリサイクリングへの影響などの各々の課題として捉えることでは十分な理解が得られない．特に，将来のトリチウム・インベントリーや核燃焼への影響など重要な課題のアセスメントを展望するには二つの競合過程の関連を，矛盾のなく合理的に説明することが必要である．ITER における壁コンディショニングのひとつとしてICRF壁コンディショニングが検討されており，これまでに本共同研究によりEAST装置（中国，ASIPP）における ICRF 壁コンディショニングの特徴について，表面分析法を用いて研究を行ってきた．今回は ICRF によるボロニゼイションに関する分析を行った．

実験および結果

EAST における ICRF 放電洗浄によるボロン膜の特性を調べるため，ボロニゼイション中に Si 試料を挿入し，その後ボロン膜の特性を X 光電子分光法（XPS）で分析した．ボロン膜と基板界面との区別が分かりやすいよう，表面凹凸の一様性が高く EAST において主なプラズマ対向壁および構造材として使用されていない研磨した Si 材（10 x 10 mm）を使用し，駆動装置を用いて挿入した．EAST ではボロンのソースとして Carborane ($C_2B_{10}H_{12}$)を用いている．常温では粉末であり，これを加熱することで気化させ，He-ICRF 放電中に気化した Carborane ガスを導入し，乖離したボロンが対向壁に被覆される．Carborane によるボロニゼイションは，EAST/HT-7 装置以外に実験室実験としてロシアで用いられていたことがある．各 Si 試料のふちはカバーで抑えられていたために未照射 Si の色をしており，曝露面のみが変色していることが分かる．ボロン膜は厚みにより干渉縞による青や緑などの色を示すが，EAST で被覆されたボロンも変色具合から少なくとも数十 nm 程度であることが目視確認から分かる．XPS による深さ組成分析はこのうちの一枚を用いて行なった．

XPS では Mg-X 線源 300 W を用いて測定し，深さ分析には Ar イオン銃によってスパッタリングを行なった．図 1 にスパッタリング前の結果を示す．ボロン膜表面で構造材であるステンレスの元素の一つである Fe や Si は検出されず，原子組成比で炭素が 37 %，ボロンが 35 %，酸素が 20 %，残りが窒素という結果であった．窒素は通常最面近くでのみ検出され，スパッタリングを進めていくと検出されなくなる傾向にある．EAST のボロン膜でも同じ傾向であり，この後に示す深さ組成分布では，検出されなかった．図 2 に XPS による原子組成比に関する深さ分布を示す．EAST のボロニゼイションによる膜は，ボロンの組成比約 60 %程度であり，約 30 %の炭素が基板まで含まれている

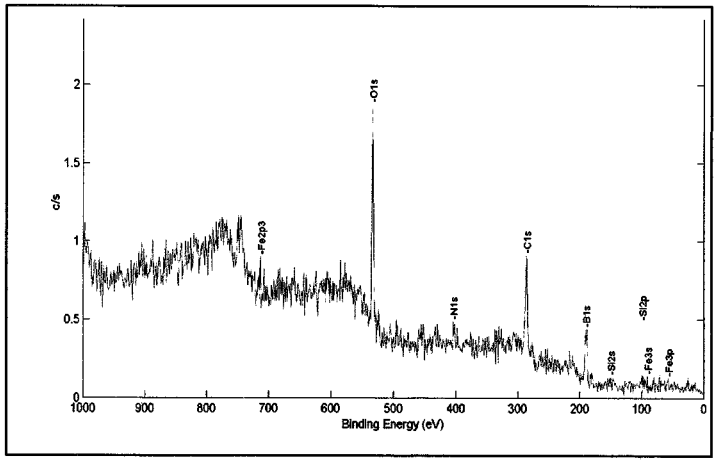


図 1　スパッタリング前の XPS 結果

ことが分かる.

炭素はプラズマ対向壁のタイルがRF放電によってスパッタリングされ，成膜時に取り込まれるか，Carboraneに含まれる炭素が一緒にコーティングされることが考えられる.以前の例としてJFT-2M(2004年にシャットダウン）においてボロン膜の分析が行なわれてきた．これらのうち同じく炭素を含むボロンのソースとしてトリメチルボロン B(CH3)3 があり，例えば JFT-2M ではこれが用いられていた．JFT-2M ボロン膜の結果では約80%の炭素が含まれており，これと大きく異なる傾向である．次に酸素が約 20%程度含まれており，最表面と界面近くで上昇していることが分かる．LHD では，ボロニゼイション初期に対向壁がスパッタリングされることによって放出された酸素が，ボロン膜の成膜時に一緒に取り込まれたと考えており，さらに最表面での酸素上昇はボロニゼイション終了後（ボロンを含むガスが完全に希釈ガスであるヘリウムと置換された後）に表面がスパッタリングされたため，さらに数 nm に関しては試料取り出し時の大気曝露による影響と考えている．EAST での酸素捕捉過程に関しては，より詳細な議論が必要であるが，高い濃度のボロン膜が被覆されていることは，酸素捕捉の観点からは大変重要である．酸素捕捉に関しては，今後ボロンの化学結合状態を詳細に調べる必要がある．さらに炭素堆積層の特徴に関しても，炭素の化学結合状態をより詳細に調べることで今後議論する予定である.

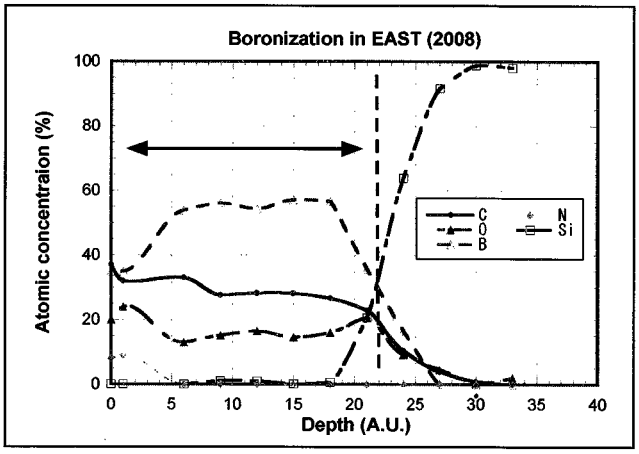


図2　XPSによるボロン膜原子組成比の深さ分布

このボロン膜の厚みについては別途DEKTAKによる触針計測でArイオン銃によるスパッタリング痕周辺の段差を数箇所測定したところ，厚みは30-70 nmであった．一般的に磁場閉じ込め核融合実験装置において 1 回のボロニゼイション運転でコーティングされるボロン膜の実績は数10から200 nm程度であるため，一回あたりの被覆膜としては十分な値であると考える.

研究組織

代表者	芦川直子	核融合科学研究所　助教
協力者	小森彰夫	核融合科学研究所　教授
	森崎友宏	核融合科学研究所　准教授
	増崎　貴	核融合科学研究所　准教授
	坂本隆一	核融合科学研究所　准教授
	渡辺英雄	九州大学応用力学研究所　（所内世話人）
	吉田直亮	九州大学応用力学研究所
	徳永竜也	九州大学大学院総合理工学府
	材料グループ	九州大学応用力学研究所

研究集会「核燃焼プラズマ統合コード研究会」

京都大学　　福山淳

九州大学応用力学研究所研究集会「核燃焼プラズマ統合コード研究会」（実施責任者　福山淳（京都大学））は2009年12月17日～18日の期間、九州大学応用力学研究所において開催された。

はじめに

ITER ならびに核融合炉における核燃焼プラズマの振る舞いを予測し、その制御手法を確立する上で統合シミュレーションコードの開発は核融合シミュレーション研究における最重要課題である。米国では、従来からの輸送コードを中心にした NTCC (National Transport Code Collaboration) 活動に加えて、SciDAC (Scientific Discovery through Advanced Computing)における大規模シミュレーションの成果を取り入れる形で、統合シミュレーションコードの開発を目指す FSP (Fusion Simulation Project) が 2005 年から活動を開始している。一方、欧州においても JET における Transport Task Force (TR-TF) による統合輸送コードの開発に加えて、EFDA の活動として Integrated Tokamak Modeling Task Force (ITM-TF) が 2003 年末に発足し、2004 年初めから活動を開始している。国内においてはITER-BA(Broader Approach)活動も始まり、国際核融合エネルギー研究センター附属計算機シミュレーションセンター(IFERC CSC)の設置に向けたSWG1活動も現在進行中である。このような時期に第8回核燃焼プラズマ統合コード研究会を九州大学応用力学研究所において開催し，国内の研究動向、研究の進め方ならびにこれからの ITER-BA に関する研究協力について議論できたことは意義深い。さらに今年度は応用力学研究所が全国共同利用研究所として評価を受け、文科省から再認された年でもある。これに微力ながらも貢献できたことは喜ばしいかぎりである。「継続は力なり」ということわざがあるが、今後も ITER-BA の議論を深めつつ、核燃焼プラズマ統合コード研究会を継続して開催し、日本における研究のアクティビティを高めていく必要がある。

会議内容

この研究会は毎年、応用力学研究所研究集会として開催されており、今回で第８回目となる。核燃焼プラズマ統合コード構想の活動報告、成果報告の場として位置づけられている。今回、２５件の発表があり、１．５日にすべての講演を入れ込んだため、かなりタイトなスケジュールとなった。プログラムは６つのセッションから構成される。セッションＩは SOL/ダイバータシミュレーション関連で７件の講演があった。粒子シミュレーションに関する講演が２件、不純物輸送および統合化モデルに関する講演が４件、材料の照射損傷に関する講演が１件であった。セッションIIは加熱・電流駆動関連で２件の講演があった。セッション III は統合コードシミュレーション関連で５件あった。大学、原研それぞれのコード開発に関する講演が４件と大規模データ解析支援ツールに関する講演が１件であった。セッション IV は、マルチスケールシミュレーション関連で、MHD と乱流の相互作用シミュレーション、グローバル輸送シミュレーション、コード開発の３件の講演があった。セッションVはジャイロ運動論・ブラゾフ関連で３件の講演があった。モデルに関する講演が１件、簡約化モデルを用いた実験解析が１件、ITG 乱流のエントロピー生成の動力学に関する講演が１件であった。セッション VI はMHDに関する講演で、５件の講演があった。コード開発関連が２件、流れのあるMHD平衡・安定性関連が３件

あった。外国人留学生が２名参加したのでプログラムは英語で作成した。ビューグラフは英語、講演自体は英語、日本語のいずれかで行った。また、次年度の活動計画に関しても議論を行った。

全体を通し、周辺、加熱・電流駆動、統合コード、マルチスケール、乱流、ＭＨＤといったプログラム構成からも推察されるが、比較的バランスのとれたプログラムであったと言える。ヘリカル系統合化シミュレーション結果の報告もあった。今後、この方面の研究も増えていくことが期待される。来年度、研究会は京都大学がホストとなり、US-Japan JIFT workshop との共催で開催したい旨提案があり了承された。なお、プログラムの詳細に関しては下記のホームページを参照頂きたい。
http://www.riam.kyushu-u.ac.jp/sanny/activity/member/yagi/H21workshop.html

最後にこのワークショップを開催するにあたり、九州大学応用力学研究所共同利用研究の支援を受けたので、この場を借りて感謝の意を表したい。

統合コード活動状況

活動環境

大学、核融合研、原研等による連携

（京大、九大、山口大、東大、東工大、慶応大、筑波大、核融合研、原研、電中研等）

活動形態

科学研究費補助金基盤研究(B)「統合コードによるＩＴＥＲプラズマのマルチスケール物理に関する総合的研究」（研究代表者　矢木雅敏、研究期間平成１９年度-２２年度）

科学研究費補助金基盤研究(S)「トロイダルプラズマの運動論的統合シミュレーションコードの開発」（研究代表者　福山淳、研究期間平成２０年度-２４年度）

日韓ワークショップ “Theory and Simulation of Magnetic Fusion Plasmas” (JAEA, Naka 3-4, Aug. 2009, organized by T. Ozeki and J. Y. Kim)

US-Japan JIFT workshop on “Integrated Modeling and Simulation of Toroidal Plasmas” (PSFC, MIT, 23-25, Feb. 2009, organized by A. Fukuyama and P. Bonoli)

九州大学応用力学研究所共同研究

核融合研共同研究、原子力研究機構共同研究

中期的サポートが必要

理論・データ解析・コード開発：若手研究者

参考資料

第 8 回核燃焼プラズマ統合コード研究会

日時：2009/12/17（木）-18（金）

場所：応用力学研究所 2 階大会議室

発表者 24 名

12 月 17 日（木）(8 人)

13:40-13:45 はじめに

13:45-13:50 事務連絡

(20 min talk+5 min discuss, 15min talk+5min discuss)

SOL/ダイバータシミュレーション

座長（矢木）

13:50-14:15　滝塚知典（原子力機構）　PARASOL シミュレーションに基づく周辺プラズマ流形成のモデリング

14:15-14:40　星野一生（原子力機構）　高 Z 不純物の原子過程に起因する内向きピンチ

14:40-15:00　清水勝宏（原子力機構）（代理発表：星野一生）主プラズマと周辺プラズマ輸送の統合化ーMPMD システムとデータ交換についてー

15:00-15:25 A. Froese(Kyushu U.) Ion and electron parallel heat transport through the scrape-off layer using PARASOL

15:25-15:35　休憩

座長（福山）

15:35-16:00 藤間光徳（慶応大）IMPGYRO-EDDY-SOLPS 統合コードの開発

16:00-16:25　河村学思（NIFS）ＬＨＤにおける不純物の再堆積モンテカルロシミュレーション

16:25-16:45　後藤準也（九大）Numerical study on Hydrogen Retention in Tungsten by first principle simulation

加熱・電流駆動

16:45-17:10　奴賀秀男（京大）ITER プラズマの加熱・電流駆動に関する速度分布解析

17:10-17:35　政岡義唯（京大）ヘリカルプラズマにおける α 粒子の閉じ込め

閉会

19:30 懇親会（十徳や筑紫口店にて）

12 月 18 日（金）16 人

8:55-9:00 事務連絡

統合コード

座長（滝塚）

9:00-9:25　福山淳（京大）運動論的統合コード TASK3G に向けた取り組み

9:25-9:50　林伸彦（原子力機構）　原子力機構における統合コード開発の現状

9:50-10:15　本多充（原子力機構）　TASK/TX コードの進展

休憩　10:15-10:25

10:25-10:50　若狭有光（京大）　TASK3D による LHD プラズマの輸送シミュレーション

10:50-11:15 上島（キャトルアイ・サイエンス）どんなシミュレーションも 3 分でクラウド化、DB 化！データ解析ウィザード　on　RCM

マルチスケールシミュレーション

座長（岸本）

11:15-11:40　矢木（九大）Development of multi-scale global transport code

11:40-12:05　徳永（九大）Multi-scale transport simulation of
internal transport barrier formation and collapse

12:05-12:30 T. Voslion（九大）Impact of poloidal shear flow in between a double tearing mode

昼食　12:30-13:30

ジャイロ運動論・ブラゾフ

座長（藤堂）

13:30-13:55　岸本（京大）Study of Entropy dynamics in ITG turbulence based on gyro-kinetic Vlasov simulation

13:55-14:20　宮戸（原子力機構）Push-forward representation in terms of modified guiding-centre fluid moments

14:20-14:45　M. Lesur（原子力機構）Subcriticality and frequency sweeping of Alfven eigenmodes driven by N-NBI in JT-60U tokamak

MHD

座長（林）

14:45-15:10 藤堂(NIFS) MHD 共通基盤コード MIPS について

15:10-15:35 相羽（原子力機構）トロイダル回転シアによる周辺 MHD モードの不安定化機構

15:35-15:45 休憩

15:45-16:10　白石（原子力機構）A matching problem revisited for stability analysis of flowing plasmas

16:10-16:35 伊藤淳(NIFS) 流れをもつ MHD 平衡の拡張

16:35-17:00 中島(NIFS) ストカスティック磁場を持つ MHD 平衡について

17:00-17:30 まとめ

閉会

参加者リスト（28 名）

氏名	所属	氏名	所属
中島徳嘉	NIFS	若狭有光	京大
藤堂泰	NIFS	奴賀秀男	京大
滝塚知典	原子力機構	政岡義唯	京大
星野一生	原子力機構	相羽信行	原子力機構
清水勝宏	原子力機構	白石淳也	原子力機構
本多充	原子力機構	宮戸直亮	原子力機構
林伸彦	原子力機構	上島豊	キャトルアイ・サイエンス
矢木雅敏	九大	宮本斉児	原子力機構
Aaron Froese	九大	河村学思	NIFS
Thibaut Voslion	九大	伊藤淳	NIFS
徳永晋介	九大	Lesur Maxime	原子力機構
後藤準也	九大	岸本泰明	京大
藤間光徳	慶応	大沢一人	九大
福山淳	京大	西原巧修	阪大

材料照射効果の基礎過程の解明
― 軽水炉高経年化技術の向上を目指して ―

研究代表者　　京都大学原子炉実験所　義家敏正
研究協力者　九州大学応用力学研究所　渡辺英雄

1.　はじめに

高エネルギー粒子を材料に照射すると、入射粒子は材料中の原子と相互作用を起こし、様々な現象を引き起こす。材料照射効果の研究は、入射粒子と材料との固体内反応の解明、核融合炉材料や原子炉材料等の耐照射材料の開発、照射効果を用いた材料開発に分けることができる。固体内反応は、入射粒子が材料に入射して原子核との反応（10^{-21} 秒）から原子炉材料の経年変化が問題になる 10^{9} 秒を超える幅広い時間スケールで起きる。大きさ的には原子核から 10mオーダの構造材料のサイズまでの現象を扱わなければならない。また、扱う材料も金属、半導体、セラミックスからプラスチックと広範囲に亘る。

このように幅広い事象を研究するためには、核融合材料、原子炉材料、核破砕中性子源材料等の幅広い分野で研究活動を行っている材料照射効果の研究者を集めて、最新の研究成果について発表し意見交換することが必要である。

本研究集会はトピックスを軽水炉の高経年化技術の向上に絞って開催された。原子炉の高経年化の問題は、現在の原子炉が今後も安全に運転できるかどうかを材料学的にいかに判断すべきかという点と、次世代のより高性能で長期間使用できる軽水炉材料の開発という 2 つの重要な課題をもつ。

このトピックスでの研究会は、2001 年 1 月に京都大学原子炉実験所の研究会として開催され、その後 2005 年 10 月に開催された電力中央研究所での研究会を除いて、東北大学金属材料研究所の研究会として 2006 年度まで毎年継続して開催されてきた。新しい研究の紹介や研究内容の相互理解等に多大の貢献が行われてきた。しかし、東北大学の主催者が定年退職したため、2007 年度は開催されなかった。原子炉材料が主ではあったが、照射損傷を中心とた核融合材料も含む幅広い分野の研究者を集めた研究会でもあったため、多くの研究者の間で開催されなかったことが惜しまれていた。2008 年度に応用力学研究所・研究集会として以前の研究会の趣旨を引き継ぎ開催され非常に好評であった。本研究集会はその 2 回目のものである。

2.　研究集会概要

今回の研究集会は平成 21 年 7 月 9-10 日に学外 29 名、学内 10 名の参加者を集め開催された。発表論文件数は 19 件であり、理論・計算から実験、さらに動力炉の現場での高経年化対策まで幅広い内容で、2 日間に亘り活発な発表と意見交換がなされた。

大学だけでなく日本原子力研究開発機構、電力中央研究所、原子力安全システム研究所等の研究所や原子力安全基盤機構、電力会社等からの参加もあり、幅広い分野で活躍している方々と

交流する機会を持てたことは、参加者にとって大きな収穫であった。

この研究集会で発表・討論された内容は、照射損傷一般に当てはまる現象であり、原子炉材料だけでなく、核融合炉材料や他の照射効果が問題となる材料、例えば核破砕中性子源のターゲット材料の開発にも貢献することが期待される。来年度は場所を改めて開催することが研究集会中に確認された。

3. 講演概要

3.1 圧力容器鋼（1）

原子炉圧力容器鋼は原子炉の重要な構造物であり、その脆化が原子炉の事実上の寿命を決定する。圧力容器鋼（1）では最初にこの分野の研究を推進している、原子力安全基盤機構の活動と今後の方針についての説明があった。次に圧力容器鋼の照射脆化の原因となる添加元素や不純物の偏析に関して、計算機シミュレーションが 1 件、実験が 3 件発表された。計算は第一原理計算であり、この分野では今後の活用が期待される。実験は主に 3 次元アトムプローブを用いた微量の元素の同定とその場所を解析しているもので、新しい偏析や析出機構が述べられた

3.2 SCC（1）

応力腐食割れ(SCC：Stress Corrosion Cracking)はオーステナイト系ステンレス鋼に起こる現象である。材料とそれに加わる応力と腐食環境の 3 つの相互作用により、材料に亀裂が発生し、それが時間と共に進展する。照射誘起応力腐食割れ（IASCC：Irradiation Assisted Stress Corrosion Cracking）は照射下での SCC である。SCC に関係する発表では、変形したステンレス鋼の局所的変形の観察や変形に及ぼす水素の影響、室温付近における照射損傷構造及び照射損傷発達過程の空間的・時間的な構造についての非常に示唆に富む発表が計 5 件あった。

3.3 圧力容器鋼（2）

圧力容器鋼における溶接部の強度変化や組成の変化は照射損傷やIASCCに大きな影響を与える。このセクションでは熱影響部の金属組織と破壊靭性の関連についての詳細な研究、磁性や導電性の変化を用いたイオン照射による鉄単結晶の特性変化の研究、添加元素や照射の初期状態の影響の磁気特性による検出、マンガンの機械的性質に及ぼす影響の 4 件が発表された。

3.4 圧力容器鋼（3）

このセクションでは主に照射硬化に関するテーマが 5 件発表され討論された。超高圧電子顕微鏡による電子照射とその場観察後 3 次元アトムプローブでその組成変化を調べた研究は、この 2 つの手法を結びつけたものとして今後の発展が期待される。原子力材料は必

ず何らかの外力下で照射される。その影響を調べるために圧力容器鋼である低合金鋼の応力下における照射挙動を調べた研究は多くの参加者の興味を引いた。中性子の模擬照射としてイオン照射を用いた原子炉圧力容器鋼の硬化挙動にかんする研究は今後の発展が期待される。最後にタングステン中の水素の挙動に関する第一原理計算結果の発表があり、今まで考えられていなかった新しい知見が得られていた。

九州大学・応用力学研究所・研究会プログラム(最終版)
材料照射効果基礎過程の解明 ― 軽水炉高経年化技術の向上を目指して

場所　九州大学応用力学研究所　中会議室(2階)
日時　平成21年7月9日(木)13:30 p.m.～7月10日(金)12:25 p.m.

7月9日		圧力容器鋼 (1)		座長　福谷耕司
13:30	13:35	義家敏正	京都大学原子炉実験所	挨　拶
13:35	14:05	松澤　寛	原子力安全基盤機構	高照射量領域の照射脆化予測に係わるJNES事業の概要
14:05	14:25	海老原健一	日本原子力研究開発機構	原子炉圧力容器鋼における照射誘起粒界リン偏析の第一原理計算を用いた反応速度論による数値シミュレーション
14:25	14:45	山口正剛	日本原子力研究開発機構	照射誘起粒界リン偏析の素過程に関する第一原理計算
14:45	15:05	武内　伴照	日本原子力研究開発機構	不純物濃度の異なる原子炉圧力容器鋼におけるミクロ組織の中性子照射量依存性
15:05	15:25	外山　健	東北大学金属材料研究所	第2世代原子炉圧力容器鋼監視試験片（ベルギーDoel-4炉）の照射後焼鈍
15:25	15:40			< Coffee Break >
		SCC(1)		座長　藤井克彦
15:40	16:00	福谷耕司	(株)原子力安全システム研究所	EBSDによる高照射ステンレス鋼の局所変形の観察
16:00	16:20	三浦照光	(株)原子力安全システム研究所	照射ステンレス鋼の変形挙動に対する水素の影響
16:20	16:40	宮原　勇一	(財)電力中央研究所	ステンレス鋼の応力腐食割れ感受性に及ぼす応力付加重照射の影響
16:40	17:00	義家敏正	京都大学原子炉実験所	オーステナイト系ステンレス鋼の低照射領域における損傷構造
17:00	17:20	石野　栞	東京大学　名誉教授	照射損傷基礎過程の時間構造
18:00	20:00			懇 親 会（場所：割烹　いしばし、西鉄白木原駅前） 大学より徒歩10分程度
7月10日		圧力容器鋼 (2)		座長　土肥謙次
9:00	9:20	勝山仁哉	日本原子力研究開発機構	原子炉圧力容器鋼溶接熱影響部の金属組織と破壊靭性
9:20	9:40	鎌田康寛	岩手大学工学部	エピタキシャル鉄単結晶薄膜の磁性・伝導性に与えるイオン照射効果
9:40	10:00	小林　悟	岩手大学工学部	圧力容器鋼の磁気特性における添加元素および初期状態の影響
10:00	10:20	藪内　聖皓	京都大学エネルギー科学研究所	マトリックス損傷に及ぼすMn影響
10:20	10:40			< Coffee Break >
		圧力容器鋼 (3)		座長　渡辺英雄
10:40	11:00	土肥謙次	(財)電力中央研究所	超高圧電子線照射材のアトムプローブ観察
11:00	11:20	藤井克彦	(株)原子力安全システム研究所	低合金鋼の照射硬化に対する応力下照射の影響
11:20	11:40	平金晶憲	九州大学総合理工学府	応力下における圧力容器鋼の照射欠陥挙動 － 装置作製と予備実験
11:40	12:00	村上健太	東京大学大学院	イオン照射法による圧力容器鋼の硬化挙動に関する研究
12:00	12:20	大澤一人	九州大学応用力学研究所	第一原理計算によるタングステンへの水素吸蔵の研究
12:20	12:25	渡辺英雄	九州大学応用力学研究所	今後の予定と連絡

参加者リスト

所属	氏名
北海道大学工学研究科	橋本直幸
岩手大学工学部附属金属材料保全工学研究センター	鎌田康寛
岩手大学工学部附属金属材料保全工学研究センター	小林　悟
東北大学 サイクロン・ラジオアイソトープセンター	長谷川　雅幸
東北大学金属材料研究所	外山　健
東北大学金属材料研究所	蔵本　明
日本原子力研究開発機構	海老原　健一
日本原子力研究開発機構	勝山　仁哉
日本原子力研究開発機構	竹内　伴照
日本原子力研究開発機構	山口正剛
東京大学	石野　栞
東京大学	村上健太
東京電力(株) 材料技術センター	浅野恭一
中部電力株式会社	熊野秀樹
(財)電力中央研究所	土肥謙次
(財)電力中央研究所	中島　健一
(財)電力中央研究所	秀　耕一郎
(財)電力中央研究所	宮原　勇一
㈱原子力安全システム研究所	福谷耕司
㈱原子力安全システム研究所	藤井克彦
㈱原子力安全システム研究所	三浦照光
独立行政法人　原子力安全基盤機構	松澤　寛
京都大学原子炉実験所	義家敏正
京都大学エネルギー科学研究科	藪内聖皓
四国電力株式会社	秋山 俊也
九州電力株式会社	山下靖幸
九州電力株式会社	渡辺真次
九州電力株式会社	早野幹人
九州大学	吉田直亮
九州大学	渡辺英雄
九州大学	大澤一人
九州大学	荒木邦明
九州大学	平金晶憲
九州大学	徳永竜也
九州大学	徳永知倫
九州大学	宮本正二
九州大学	関　人史
九州大学	原田裕考

九州大学応用力学研究所

〒816-8580　福岡県春日市春日公園６丁目１番地
連　絡　先　九州大学応用力学研究所事務室

電　　話　092-583-7702
Ｆ　Ａ　Ｘ　092-583-7701