

全国共同利用研究成果報告

第 11 号

平成19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 10 年を越えました。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、2007 年度も、特定研究 4 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、2008 年 6 月 6 日に開催される「RIAM フォーラム 2008」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>) にも掲載されています。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 14 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。法人化後の附置研究所、特に全国共同利用の附置研究所については、個別法人の中での経営の視点から、その存在基盤などの問題点が指摘されています。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。

応用力学研究所は、今後も、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みます。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。

2008 年 3 月
九州大学応用力学研究所
所長 今脇資郎

目 次

平成 19 年度共同研究一覧	i
平成 19 年度研究集会一覧	vi
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	109
核融合プラズマ分野共同研究成果報告	165

平成19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	九州大学 東藤 貢	東藤 貢	1
19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	5名 3
19特1-2		人工関節とバイオメカニクス	佐賀大学 佛淵 孝夫	8名 9
19特1-3		下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	2名 13
19特1-4		生体組織とインプラントのシミュレーション・バイオメカニクス	京都大学 堤 定美	10名 20
19特1-5		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	4名 25
一般研究				
19ME-1	太陽電池のための機能性化合物半導体の結晶成長	宮崎大学 吉野 賢二	柿本 浩一 3名	27
19ME-2	大振幅内部孤立波の二次元相互作用の研究	港湾空港技術研究所 柿沼 太郎	及川 正行 3名	32
19ME-3	太陽電池用高品質多結晶シリコンの結晶成長および結晶評価に関する研究	豊田工業大学 大下 祥雄	柿本 浩一 1名	34
19ME-4	アンチローリングタンクを用いたパラメトリック横揺れ防止に関する研究	大阪大学 橋本 博公	柏木 正 3名	36
19ME-5	デジタル画像相関法を用いた咬合時における歯周組織の変形解析	福岡県工業技術センター 内野 正和	森田 康之 3名	38
19ME-6	高速船の非定常船尾流に関する研究	広島大学 岩下 英嗣	柏木 正 5名	40
19ME-7	垂直衝突におけるゴルフボールの力学モデルの同定	岡山理科大学 中井 賢治	新川 和夫 1名	52
19ME-8	粒子法による動的き裂伝ば解析	宮崎大学 海津 浩一	新川 和夫 3名	55
19ME-9	潮流発電のための高性能ダリウス形水車の開発	九州大学 経塚 雄策	柏木 正 3名	57
19ME-10	複合型数値計算法の実用化に関する研究	防衛大学校 木原 一	柏木 正 2名	59

19ME-11	カーボンナノチューブ/Ti合金による金属基傾斜機能ナノコンポジットの開発	信州大学 倪 慶清	汪 文学 1名	61
19ME-12	曳航水槽を用いた境界層の遷移過程および乱流普遍則に関する基礎研究	名古屋大学 辻 義之	柏木 正 5名	63
19ME-13	浮体型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	柏木 正 3名	65

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	九州大学 中村 昌彦	中村 昌彦	
19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	4名	109
19特2-2		長崎大学 吉村 浩	4名	111
19特2-3		東海大学 渡邊 啓介	1名	113
19特2-4		九州大学 山口 悟	3名	115
19特2-5		大阪大学 加藤 直三	5名	117
19特2-6		北海道大学 西 弘嗣	2名	119
19特2-7		佐世保工業高等専門学校 長嶋 豊	3名	121
19特2-8		海洋研究開発機構 百留 忠洋	8名	123
一般研究				
19A0-1	船舶観測による対馬海峡東水道を通過する物質量の推定	名古屋大学 森本 昭彦	柳 哲雄 5名	125
19A0-2	マニラ湾の物質循環と基礎生産に関する研究	神戸大学 林 美鶴	柳 哲雄 1名	127
19A0-3	風洞実験による弱回転サッカーボールなど飛翔軌道解析について	福岡工業大学 溝田 武人	大屋 裕二 5名	129

19A0-4	対馬海峡東水道の低気圧性渦がクロロフィルa濃度変動に与える影響	水産大学校 鬼塚 剛	柳 哲雄 2名	131
19A0-5	対馬海峡東水道における水塊変動モニタリング	福岡県水産科学技術センター 松井 繁明	千手 智晴 2名	134
19A0-6	東アジア域の光化学大気汚染の将来変動に関する研究	地球環境フロンティア研究センター 山地 一代	鶴野 伊津志 5名	136
19A0-7	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	鶴野 伊津志 5名	138
19A0-8	海洋短波レーダーによる日本沿岸海況監視システムの開発	琉球大学 藤井 智史	吉川 裕 7名	140
19A0-9	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 4名	142
19A0-10	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 水田 元太	増田 章 4名	144
19A0-11	海洋数値モデルにおける日本近海の海況再現性向上に関する研究	気象庁気象研究所 辻野 博之	広瀬 直毅 14名	146
19A0-12	ダリウス形風車/水車の流力特性に関する研究	九州大学 経塚 雄策	大屋 裕二 3名	148
19A0-13	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 4名	150

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 3				
	核燃焼プラズマ統合コード計画	九州大学 矢木 雅敏	矢木 雅敏	165
19特3-1	サブ テ ー マ	多スケール・拡張MHDの理論シミュレーション研究	日本原子力研究開発機構 徳田 伸二	10名 166
19特3-2		多スケールプラズマ乱流シミュレーション研究	九州大学 矢木 雅敏	17名 168
19特3-3		核燃焼プラズマ統合コードにおける周辺プラズマモデリング	日本原子力研究開発機構 滝塚 知典	8名 170
19特3-4		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	9名 174
19特3-5		プラズマ輸送理論	核融合科学研究所 伊藤 公孝	17名 176

特定研究 4				
	照射効果—水素・ヘリウム・不純物元素相互作用	九州大学 吉田 直亮	吉田 直亮	
19特 4-1	サブ テ マ	タングステン中の水素拡散・捕捉挙動に及ぼすヘリウムイオン同時照射の効果	大阪大学 上田 良夫	7名 178
19特 4-2		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	4名 180
19特 4-3		オーステナイトおよびフェライト鋼の照射材中におけるヘリウム挙動と粒界偏析	島根大学 小野 興太郎	6名 182
19特 4-4		金属材料中における照射欠陥と水素同位体との相互作用に関する研究	核融合科学研究所 加藤 太治	4名 184
19特 4-5		核融合炉材料のガス不純物挙動に関するモデリング研究	京都大学 森下 和功	12名 186
19特 4-6		陽子ビーム窓材における水素・ヘリウムトラッピングサイト解明に関する研究	日本原子力研究開発機構 濱口 大	3名 188
19特 4-7		低温高密度ヘリウムプラズマと熱パルス重畳照射によるタングステン材料損耗に関する研究	名古屋大学 大野 哲靖	5名 190
19特 4-8		プラズマ対向材料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 奥野 健二	7名 192
一般研究				
19FP-1	重照射を受けたステンレス鋼の照射誘起応力腐食割れ(IASCC)に及ぼす粒界特性の影響に関する研究	電力中央研究所 秀 耕一郎	渡辺 英雄 2名	194
19FP-2	昇温時におけるタングステン表面ブリスタの爆裂のSEM観察	日本原子力研究開発機構 洲 亘	徳永 和俊 1名	196
19FP-3	プラズマ実時間制御を考慮したプラズマ断面位置形状再構築システム (CCS) のST装置への適用検討	日本原子力研究開発機構 栗原 研一	中村 一男 5名	198
19FP-4	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	201
19FP-5	ニューラルネットワークのCPD/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	203
19FP-6	転位ループの動的挙動に対する溶質原子の効果	大阪大学 荒河 一渡	吉田 直亮 3名	205
19FP-7	FePt-Al ₂ O ₃ グラニューラ薄膜における照射誘起構造変化	九州大学 松村 晶	渡辺 英雄 5名	207
19FP-8	蛍石型結晶の欠陥形成に与える電子励起の効果	九州大学 安田 和弘	渡辺 英雄 4名	209

19FP-9	QUESTにおけるプラズマ電流立ち上げの研究	九州東海大学 御手洗 修	中村 一男 1名	211
19FP-10	タングステンと銅との接合材の組織と特性に及ぼすイオン照射効果	茨城大学 車田 亮	吉田 直亮 5名	214
19FP-11	プラズマ対向材料再堆積層形成における水素同位体挙動に関する研究	九州大学 片山 一成	吉田 直亮 4名	216
19FP-12	周辺プラズマのマッハプローブ計測	横浜国立大学 津島 晴	坂本 瑞樹 2名	218
19FP-13	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	佐藤 浩之助 6名	220
19FP-14	小型プラズマ壁相互作用実験装置における中性粒子とリサイクリング挙動解析	筑波大学 中嶋 洋輔	坂本 瑞樹 4名	222
19FP-15	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 5名	224
19FP-16	小型PWI実験装置における高周波波動伝搬解析および電流駆動検討	有明工業高等専門学校 竹内 伯夫	出射 浩 1名	226
19FP-17	小型PWI装置における電子バーンシュタイン波由来の放射電磁波偏波特性の検討	核融合科学研究所 伊神 弘恵	出射 浩 6名	228
19FP-18	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	吉田 直亮 7名	230
19FP-19	NBI用負イオン源プラズマの生成と制御	山口大学 福政 修	佐藤 浩之助 6名	232

平成19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
19ME-S1	窒化物半導体の結晶成長に関する基礎研究	三重大学 平松 和政	寒川 義裕 14件、25名	応用力学 研究所	19年 7月 27-28日	67
19ME-S2	戸田格子40周年 非線形波動研究の歩みと展望	東京大学 西成 活裕	及川 正行 23件、87名	筑紫ホール	19年 11月 7-9日	71
19ME-S3	地形のダイナミクスとパターン	北海道大学 柳田 達雄	岡村 誠 10件、19名	応用力学 研究所	19年 11月 15-16日	77
19ME-S4	ナノ複合材料の創製及び評価に関する研究	九州大学 宇田 暢秀	汪 文学 16件、39名	応用力学 研究所	20年 1月 10-11日	80
19ME-S5	自由表面流れに関する数理解析	大阪大学 高木 健	柏木 正 14件、29名	応用力学 研究所	19年 12月 14-15日	89
19ME-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、37名	応用力学 研究所	20年 3月 3-4日	93
19ME-S7	乱流現象及び多自由度系の動力学、構造と統計法則	名古屋大学 石原 卓	岡村 誠 27件、41名	応用力学 研究所	19年 11月 23-25日	97
19ME-S8	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 12件、39名	応用力学 研究所	19年 10月 27-28日	103

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
19AO-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 12件、40名	応用力学 研究所	19年 12月 4-5日	152
19AO-S2	瀬戸内海の海底環境	産業技術総合研究所 星加 章	柳 哲雄 9件、14名	応用力学 研究所	19年 5月 10-11日	156
19AO-S3	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	水産大学校 滝川 哲太郎	増田 章 10件、30名	応用力学 研究所	19年 12月 21-22日	160
19AO-S4	有明海の海況と環境 II	長崎大学 石坂 丞二	柳 哲雄 8件、26名	応用力学 研究所	19年 12月 3日	163

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
19FP-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 27件、28名	応用力学 研究所	19年 8月 6-8日	234
19FP-S2	核融合炉材料のヘリウム損傷	京都大学 森下 和功	吉田 直亮 15件、30名	応用力学 研究所	19年 11月 3日	239

平成19年度

力学分野
共同研究成果報告

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、本年度（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 5 つ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。次年度は、細胞、バイオマテリアルから医療機器まで幅広い内容でテーマを公募し、共同研究体制の規模を拡大する予定である。

19 特 1-1：生体吸収性材料の力学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）

生体吸収性を有する生体活性セラミックス/PLLA 複合材料を用いた医療用デバイスは、PLLA 単体では強度・剛性の不足から限定されている使用範囲の拡大や分解までに要する期間の短縮などが期待されている。本研究ではより高いひずみ速度における試験を行い、ひずみ速度の影響を考慮した生体吸収性骨治療材の開発の指針を与えることを目的とし、生体吸収性複合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を実験的に評価した。

19 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）

本研究集会は、一昨年度、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、昨年まではタイトルを「人工関節とバイオメカニクス」とし、主に力学的解析を中心した研究集会であった。今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。

19 特 1-3：下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）

本研究では、下顎無歯顎症例に相当する詳細な 3D-FEA モデルを作成し、インプラント体および骨内応力を解析することを目的とした。まず、ヒト頭蓋骨の X 線 CT 画像を基にして 2 層構造を成す下顎骨モデルの作成を試みた。また、歯と歯根膜を導入した下顎骨モデルも作成した。次に、下顎骨モデルに 4 本のインプラ

ントを埋入するとともに、その上部に固定式補綴装置およびCT画像より作成した人工歯のモデルを装着し、All-on-4モデルを模擬したFEAモデルを構築した。汎用FEAコードを用いて応力解析を行うことで、インプラント、補綴装置および下顎骨について力学的検証を行った。

19 特1-4：バイオメカニクスとシミュレーション技術

研究代表者：堤 定美（京都大学）

本研究集会は、応用力学研究所共同研究集会としては初めてのバイオメカニクスにおけるシミュレーション技術に焦点を絞った研究集会である。生体工学の分野において最先端で活躍されている研究者をお招きし、細胞から医療機器まで15件の講演が行われた。また、特別講演者として、人工股関節置換術数日本一の佐賀大学医学部整形外科の佛淵孝夫教授、厚生労働省の医療機器評価策定事業にお詳しい国立医薬品食品衛生研究所の土屋利江先生をお招きして、貴重なご講演を拝聴することができた。参加者は講演者を含め大学、病院、企業より約53名の参加者があり、各講演とも活発な議論が展開された。

19 特1-5：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）

近年、十分な強度を有する軟骨組織の再生を目指し、最適な培養条件を検討する研究が盛んに行われている。力学的刺激は、軟骨組織の機械的特性を発達させることが指摘されている。また細胞培養に用いる三次元担体の特性も、再生組織の形成に大きく影響することが報告されている。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に周期的圧縮負荷を加え、力学的機能の発達およびECMの産生に及ぼす影響を評価した。また、アガロース濃度を変えることにより、スキャホールド材質による影響について検討した。

近年、我が国においても「生体工学」や「医用工学」が重要視され、各大学・研究機関においても活発に研究が推進されている。細胞、生体組織、そして人体にいたるまで「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。「環境」と「エネルギー」という2大テーマに頼りがちな応用力学研究所において、「生体」という新しい研究テーマが育つ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

医療技術の進歩にともない、QOL(Quality Of Life)の向上が近年重要視されている。現在臨床応用されている骨折固定用プレートやビスはそのほとんどが金属製であるため、治療後は速やかに取り除く必要がある。しかし再手術は患者にとって精神的苦痛であり、肉体的・経済的に負担となる。この再手術による患者の負担を低減するため、現在では生体吸収性を有するポリ L 乳酸(PLLA)や PLLA と生体活性セラミックスとの複合材料を用いた骨折固定材の臨床応用が進められている。このうち生体活性セラミックス/PLLA 複合材料を用いたデバイスは、PLLA 単体では強度・剛性の不足から限定されている使用範囲の拡大や分解までに要する期間の短縮などが期待されている。また生体活性セラミックス/PLLA 複合材料の特徴として、その力学的特性や分解特性を、フィラー含有率を変化させることで制御できることが挙げられる。そこでこの特徴を適切に利用することで、骨疾患の部位や程度に応じて適切な力学的特性・分解特性を生体吸収性骨治療材に対して付与するといったことも期待できる。これまでに生体活性セラミックスをフィラー材とした複合材料の研究が行われ、その力学的特性や *in vivo* 及び *in vitro* 環境における分解特性が評価されてきた。

しかしながら、これまでの研究で行われた力学的特性評価は $10^{-4}[\text{s}^{-1}]$ という低いひずみ速度域のものであり、実際の使用を想定した場合、 $10^{-1}[\text{s}^{-1}]$ 程度までのひずみ速度を考慮することが必要であると考えられる。そこで本研究ではより高いひずみ速度における試験を行い、ひずみ速度の影響を考慮した生体吸収性骨治療材の開発の指針を与えることを目的とし、生体吸収性複合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を実験的に評価した。

2. 実験方法

2. 1 試験片作成

本研究では PLLA 単体と β -TCP/PLLA 複合材料の二種類の試験片を作製した。

PLLA 単体の試験片は PLLA ペレットとして島津製作所(株)製ポリ乳酸ラクティ #5000 を使用し, 日精樹脂工業製小型射出成形機 NR7 Real Mini を用いて 100mm×10mm×4mm のバルク状に射出成形した。射出成形した試験片はホットプレスを用いて上下から加熱し, Non-Annealing (未処理), 70℃で 24 時間, 130℃で 24 時間の 3 つの条件で熱処理を行い, 結晶化度の異なる試験片を作成した。

β -TCP/PLLA 複合材料の試験片はフィラー材である β -TCP(太平化学工業製, リン酸三カルシウム)と PLLA ペレットをフィラー含有率 5wt%, 10wt%, 15wt%でそれぞれ混合後, 100mm×10mm×4mm のバルク状に射出成形した。また, 混合に用いた容器内の β -TCP 残量を測定し, その値を差し引くことにより最終的な含有率を決定した。

2. 2 擬似生体環境浸漬試験

擬似生体環境として, 生体内と同じ pH のリン酸緩衝液(PBS, pH : 7.4)を作成し, 各試験片を 37℃に保たれたインキュベーター内で一定期間(8, 16 週間)浸漬した。各試験片は浸漬後, 吸水の影響を取り除くために常温の真空炉内で絶乾を行った。

2. 3 引張試験

20mm×10mm×1mm のアルミニウムタブを各試験片の両端部に接着した後, 両面にひずみゲージを接着し, 常温の大気中にて引張試験を行った。試験速度は 1, 10, 100, 1000mm/min とした。

2. 4 圧縮試験

各試験片から 10mm×10mm×4mm の圧縮試験片を切り出し, 圧縮面の平行を出すために三点の測定結果が±0.005mm 以内になるよう研磨した。圧縮試験は常温大気中にて試験速度 1, 10, 100mm/min の 3 条件で行い, 各試験片の機械的特性に及ぼすひずみ速度依存性を調査した。

3. 実験結果及び考察

3. 1 引張試験結果

引張試験結果を PLLA 単体のものを図 1 に、 β -TCP/PLLA 複合材料のものを図 2 に示す。両試験片共に弾性率においてひずみ速度に対して変化は見られず、 $10^{-4}[\text{s}^{-1}]$ から $10^{-1}[\text{s}^{-1}]$ 程度ひずみ速度では弾性率にひずみ速度依存性は観察されなかった。しかしながら、引張強度において両試験片共にひずみ速度の増加にともなう引張強度の増加が観察された。PLLA 単体においては結晶化の進んだ 70°C -24h, 130°C -24h 試験片において Non-Annealing よりも顕著なひずみ速度依存性が観察され、結晶化によってひずみ速度依存性がより顕著に現れることが示唆された。 β -TCP/PLLA 複合材料において、フィラー含有率が低い試験片ほどより顕著なひずみ速度依存性を示している。これはフィラー材である β -TCP はひずみ速度依存性が低いもしくは無い為に、ひずみ速度依存性を示す母材の重量比が大きいものほど顕著なひずみ速度依存性を示した可能性が示唆される。以上の結果から、母材のひずみ速度依存性とフィラー含有率から複合材料のひずみ速度依存性が予測可能であることが示唆された。

3. 2 圧縮試験結果

PLLA 単体の試験片に対して圧縮試験を行った結果、引張試験結果と同様に弾性率に関してひずみ速度に対する依存性は殆ど観察されず、降伏応力においてひずみ速度の増加にともなう増加が観察された。

3. 3 浸漬後引張試験結果

16 週間浸漬後の β -TCP/PLLA 複合材料における引張強度を図 3 に示す。16 週間浸漬の結果、各試験片において強度において若干の減少を示したが、16 週までの浸漬においてひずみ速度依存性に関する変化は殆んど観察されなかった。

4. 結言

PLLA 単体と PLLA を母材とする生体吸収性複合材料の実験的評価から母材のひずみ

速度依存性が既知であるならばフィラー含有率から複合材料のひずみ速度依存性が予測可能であることが示唆された。しかしながらフィラー材のひずみ速度依存性の有無、そして複合材料の力学的特性が解析的に予測可能であるかを検討するために今後解析的評価を行う必要があると考えられる。

共同研究者

基礎力学部門 東藤 貢

総合理工学府 高山 哲生

成果発表

- (1) Satoshi KOBAYASHI, Mitsugu TODO, "Experimental Characterization of Mechanical Properties of Bioabsorbable Plastics after Hydrolysis", Proceedings of the International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2007 (CD-ROM), ID P-02
- (2) Satoshi KOBAYASHI, Mitsugu TODO, "The Effect of Hydrolysis on the Mechanical Properties of Injection-Molded Poly(L-lactic acid)", Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, Vol. 1 (2007), No. 12, in press

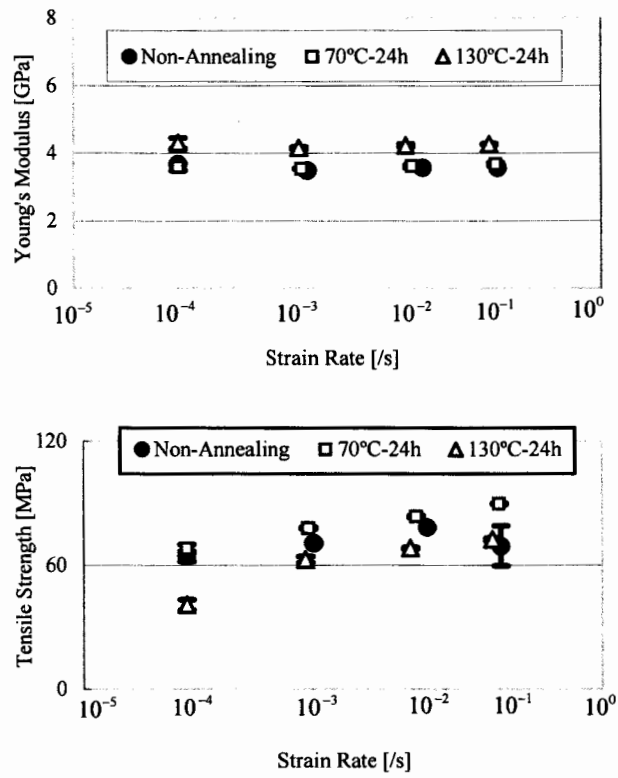


Fig.1 The effect of strain rate on the mechanical properties of monolithic PLLA.

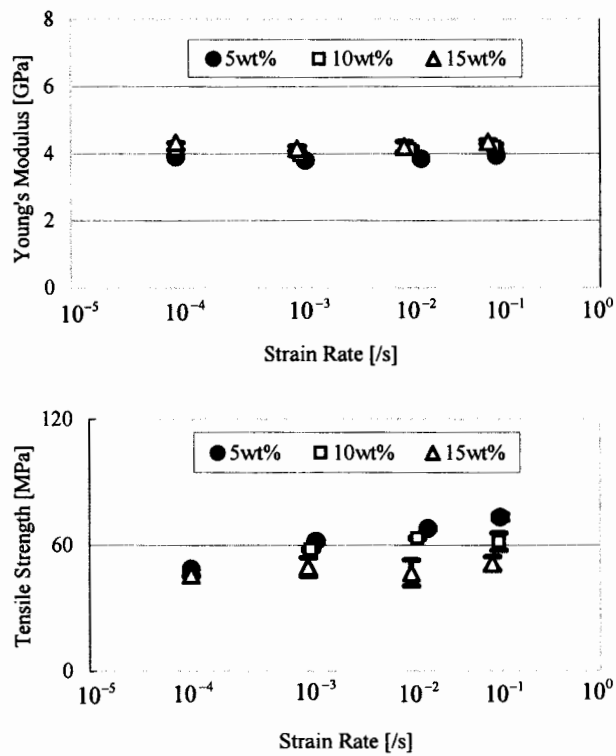


Fig.2 The effect of strain rate on the mechanical properties of β -TCP/PLLA composites.

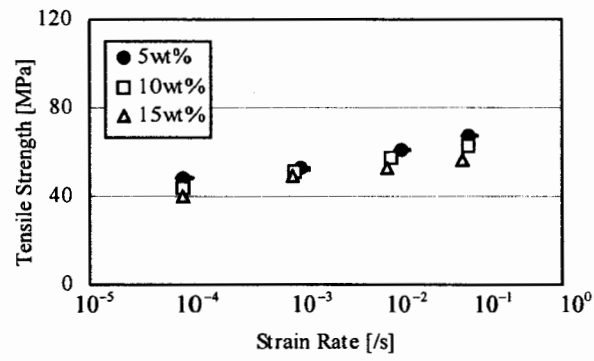


Fig.3 Tensile strength of β -TCP/PLLA composites as a function of strain rates after 16 weeks immersion.

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
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り、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。

佐賀大学医学部附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、昨年の研究集会をさらに発展させる形でタイトルを改め、「人工関節とバイオメカニクス・バイオマテリアル」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

日時：9 月 29 日（土）10：30～17：00

会場：九州大学西新プラザ

10：30 開会の辞 佛淵孝夫（佐賀大学医学部）

セッション 1 バイオメカニクス 1（司会：廣川俊二）

10：40 「和式生活様式に対応した人工関節の開発」

井手衆哉，伊藤 純，馬渡正明，佛淵孝夫（佐賀大医学部整形外科）

東藤 貢（九州大学応用力学研究所）

内山英一，倉 秀治（札幌医科大学）

廣川俊二（九州大学工学研究院）

木口量夫，萩原世也（佐賀大学理工学部）

11：00 「階段昇降動作にみられる加齢の影響」

堀川悦夫，大屋友紀子，森園 亮（佐賀大学地域医療科学教育研究センター）

11：20 「完全屈曲型人工膝関節頸骨コンポーネントと頸骨の有限要素法解析

—従来型人工膝関節との比較—

萩原世也（佐賀大学理工学部）

11:40 休憩 (10分)

セッション2 バイオマテリアル1 (司会: 矢田光徳)

11:50 「overview とドロマイト」

馬渡正明 (佐賀大学医学部整形外科)

12:10 「銀含有ハイドロキシアパタイト溶射技術の開発と特性評価」

野田岩男, 安藤嘉基 (JMM)

宮本比呂志 (佐賀大学医学部病因病態科学)

宮崎真樹, 嶋崎貴文, 米倉豊, 馬渡正明, 佛淵孝夫 (佐賀大学医学部整形外科)

12:30 昼食休憩 (70分)

特別講演 (司会: 東藤 貢)

13:40 「人工関節用UHMWPE -摩耗, 酸化, 疲労-」

迫田秀行 (国立医薬品食品衛生研究所)

14:00 「人工軟骨の高機能化とトライボ性能評価」

村上輝夫 (九州大学工学研究院)

14:20 休憩 (10分)

14:30 「次世代医療機器評価指標事業と整形外科系材料の課題」

土屋利江 (国立医薬品食品衛生研究所)

15:00 休憩 (10分)

セッション3 バイオメカニクス2 (司会: 萩原世也)

15:10 「人工関節評価用関節シミュレータ」

Part 1: Hip Joint 佐々木 誠, 木口量夫, (佐賀大学理工学部)

馬渡正明, 佛淵孝夫 (佐賀大学医学部整形外科)

Part 2: Knee Joint 高野恭寿, 木口量夫 (佐賀大学理工学部)

馬渡正明, 佛淵孝夫 (佐賀大医学部整形外科)

15:30 「深屈曲動作を対象とした下肢の力学モデル解析」

野見山隆洋, 木村勇介, 廣川俊二 (九州大学工学研究院)

15:50 「シミュレーションによる人工股関節と人工膝関節のリスク分析」

東藤 貢 (九州大学応用力学研究所)

馬渡正明, 佛淵孝夫 (佐賀大学医学部整形外科)

長嶺隆二 (吉塚林病院)

16:10 休憩 (10分)

セッション4 バイオマテリアル2 (司会: 馬渡正明)

16:20 「新規銀系抗菌材料の in vitro、in vivo 抗菌性評価」

安藤嘉基, 宮本比呂志 (佐賀大学医学部病因病態科学)

野田岩男, 桜井伸子 (JMM)

宮崎真樹, 嶋崎貴文, 米倉豊, 馬渡正明, 佛淵孝夫 (佐賀大学医学部整形外科)

16:40 「チタネートナノ構造体薄膜の合成と生体材料への応用」

矢田光徳, 井上侑子, 鳥飼紀男, 渡孝則 (佐賀大学理工学部)

野田岩男 (JMM)

佛淵孝夫 (佐賀大学医学部整形外科)

17:00 閉会の辞 東藤 (九州大学応用力学研究所)

3. 講演の概要

(1) 「和式生活に対応した人工関節の開発」 井手衆哉

正座などの深屈曲動作に対応した下肢人工関節モデルを開発することは、日本人の和式生活様式において必要不可欠であるが、未だ達成し得ていないテーマである。我々の研究の目的である和式生活様式に対応した人工関節の開発について、これまで行ってきた人工股関節、人工膝関節それぞれについての紹介があった。

(2) 「階段昇降動作にみられる加齢の影響」 堀川悦夫

高齢者及び若年者の階段昇降動作を3次元解析し、加齢の影響を検討することを目的とした研究を行った結果について報告があった。

(3) 「完全屈曲型人工膝関節脛骨コンポーネントと脛骨の有限要素法解析 —従来型人工膝関節との比較—」 萩原世也

有限要素モデルの荷重境界条件の設定について説明し、2種類のCFK脛骨コンポーネント(1st, 2nd)の比較、脛骨(1st, 2nd)の状態の比較、さらに従来モデルとの比較を行った結果について報告が行われた。

(4) 「抗菌生体材料の開発」 馬渡正明

医療機器に対する抗菌コーティングは、医療機器の安全性を高めるため、また患者から患者への感染伝播のリスクを軽減するためにも重要である。本講演では、銀系抗菌生体材料と新規の抗菌材料としてドロマイトについての紹介がなされた。

(5) 「銀含有ハイドロキシアパタイト溶射技術の開発と特性評価」 野田岩男

骨内インプラントである人工関節および固定材料を用いた整形外科手術における感染は、周術期のみならず長期的にも大きな問題であり、抗菌剤の投与のみでは治療に難渋する。本講演では、溶射法を用いて銀含有ハイドロキシアパタイトを金属表面にコーティングする技術を開発し、銀イオンの溶出挙動を評価することにより、生体インプラントへの抗菌コーティングの可能性を検討した結果についての報告がなされた。

(6) 「人工関節用UHMWPE —摩耗、酸化、疲労—」 迫田秀行

1990年ごろより超高分子量ポリエチレン摩耗粉が緩みの原因になることが明らかになり、人工関節の摩耗量の低減を目指した研究開発が盛んに行われてきた。ガンマ線照射などにより高密度に架橋を施した高密度架橋ポリエチレンは、実験室レベルではほとんど摩耗を生じないとされ、2000年ごろから急速に普及し、現在臨床による成績が待たれているところである。人工関節の長寿命化を実現するためには、摩耗の問題以外にも酸化劣化や疲労について検討しなくてはならないと考えられる。本講演では、力学的な正確性はあえて無視し、抜去インプラントや最終製品の試験が可能のように小さな試験片を使用した実用的な試験方法を考案し、この試験法の妥当性について評価を行った結果についての報告があった。

(7) 「人工軟骨の高機能化とトライボ性能評価」 村上輝夫

超高齢化社会への接近に際して、関節機能障害者が増加することが予測されている。介助労働者の減少も予測されているため、高齢者の多くが健康を維持し自立して生活できることが期待されている。近年では、人工関節を主体にして、国内では年間10万例以上の手術が実施され、運動機能の回復と除痛という恩恵とともに、寝たきりの状態から自分で活動できる状態になる。その結果、新陳代謝の活性化と自主生活領域の拡大により心身両面にわたる向上がもたらされるため、人工関節置換術の重要性が増大している。しかるに、とくに微小な摩耗粉の発生が骨組織の変性をきたし、人工関節の緩みを発生させ再置換手術を要する場合が生じており、人工関節における摩擦摩耗特性の適正な評価と低摩耗・低摩擦化が要望されている。本講演では、人工軟骨の導入による人工関節における潤滑モード自体の改善、摩擦摩耗の問題点と問題解決のための高機能化、その実験室評価についての概説がなされた。

(8) 「次世代医療機器評価指標事業と整形外科系材料の課題」 土屋利江

次世代医療機器評価指標事業に関しての説明がなされた。

(9) 「人工関節評価用シミュレータ Part1:Hip Joint」 佐々木誠

人工股関節置換術において、インプラントの脱臼、破損、摩耗、緩みなどの術後の合併症は非常に深刻な問題である。本講演では、これら合併症の発生リスクと日常生活動作との力学的関係について解明するために開発を進めている、股関節角度と関節間力を自由に再現可能な人工股関節運動シミュレータの構成および制御系についての報告があった。

(10) 「関節シミュレータによる完全屈曲型人工膝関節 CFK の評価研究」 高野恭寿

完全屈曲型人工膝関節 CFK における深屈曲時の軟部組織への影響、膝非荷重下での脱臼抵抗特性、血管・神経への影響などを明らかにするために進められている切断膝実験や関節シミュレータの開発状況について説明がなされた。

(11) 「Model analysis of lower limb at deep knee flexion」 Takahiro Nomiya

The performance of CFK has been evaluated for practical use; however, there have been no practical methods to measure the force acting on the knee joint in vivo. Also, the model analyses or the experimental studies at deep knee flexion are quite few. In this study, we try to calculate the force acting on the knee joint and the muscles' forces of the lower limb by using a mathematical model.

(12) 「シミュレーションによる人工股関節と人工膝関節のリスク分析」 東藤 貢

人工関節は過酷な力学的環境に常時さらされるため、人工関節の設計段階において、予想される力学的条件に対して安全性を十分に考慮したデザインの決定がなされることが重要である。しかし、人体内で人工関節が経験する力学状態を正確に把握することは非常に難しく、詳細はいまだに把握されていない。一方、コンピュータシミュレーション技術の発展にともない、複雑な3次元形状の構造体の力学状態を推定することが可能になってきている。本講演では、人工股関節と人工膝関節について、それぞれ1例ずつFEMを応用して解析を行った結果を紹介し、人工関節のリスクアセスメントにおけるシミュレーション技術の役割についての概説がなされた。

(13) 「新規銀系抗菌生体材料のin vitroおよびin vivo抗菌能評価」 安藤嘉基

人工股関節手術は、損なわれた関節機能を回復させる有効な治療方法であり、近年の高齢化社会の進行にともない手術件数も増加傾向にある。しかし、外科手術である以上危険性もあり、特に問題となるのが感染症である。本講演では、人工股関節表面に抗菌性を付与できるコーティングとして新規に開発した、銀含有ハイドロキシアパタイト溶射被膜について報告がなされた。

(14) 「チタネートナノ構造体薄膜の合成と生体材料への応用」 矢田光徳

本講演では、より簡便で安価な抗菌性インプラントの開発を目的として、抗菌成分として銀イオンを、また、銀イオンを担持する物質として金属の表面に形成させたナノ構造のチタン酸塩を検討した。具体的には、種々の形状を有するチタン、チタン合金などの金属表面上へのチタン酸ナトリウムナノ構造体薄膜の形成と、チタン酸ナトリウムナノ構造体薄膜のチタン酸銀ナノ構造体薄膜への変換と薄膜からの銀イオン溶出特性およびメチシリン耐性黄色ブドウ球菌に対する抗菌特性について検討した結果について報告がなされた。

4. あとがき

本研究集会は、一昨年度、応用力学研究所共同研究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、昨年まではタイトルを「人工関節とバイオメカニクス」とし、主に力学的解析を中心とした研究会であった。今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。本研究集会在、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。

下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 1 : インプラントオーバーデンチャーの3次元FEAモデルの構築と応力解析

長嶋 利夫 平野 喜一 (上智大学理工学部)
松下 恭之 (九州大学大学院歯学研究院)

1. はじめに

下顎無歯顎症例に対して、インプラントを用いたオーバーデンチャーにより臨床的に良好な結果が得られることが報告されている¹⁾。著者らは、インプラントオーバーデンチャーのアタッチメント構造が荷重伝達に及ぼす影響を検討するために、下顎模型にインプラントを埋入したモデルを作成し、ひずみ計測を実施している²⁾。さらにインプラントの形状、配置などがインプラントの変形、応力分布に及ぼす影響を詳細に検討するためには、多くの模型実験が必要となる。このような模型実験を有限要素法による数値解析に置き換えることができれば、形状や物性データで記述されるモデルの変更等が容易となるので、個別の患者ごとのより実際的な応力分布を検討することが可能となると考えられる。本研究では、ひずみ計測実験に用いたインプラントー下顎骨を模倣したモデルを対象とした有限要素法解析を実施し、解析結果と実測結果を比較した結果を示す。

2. オーバーデンチャー模型

Fig.1に示すような下顎無歯顎模型 (歯科用レジン製) に4本のフィクスチャーを埋入し、バーとERAアタッチメントを設置したオーバーデンチャー模型を解析対象とした。本モデルにおいては、オトガイ間に4本のインプラントが基底面に対して垂直にレジメンセメントで固定され、疑似粘膜として、2mm厚のシリコーンラバー系印象材が使用されている。模型内に埋入されたフィクスチャーに連結される維持装置にニューCMバーアタッチメントを採用し、4本のフィクスチャーを、スタンダードアバットメント・ゴールドシリンダー・ニューCMバーによって連結している。最遠心部にERAアタッチメントのフィメールを設け、クリップと弾性アタッチメント (ERA White) を併用している。荷重側インプラント2本の各周囲の軸方向荷重と曲げモーメントを測定するために、各インプラントの近遠心頬舌側面の4箇所抵抗線ひずみゲージが貼付されている。

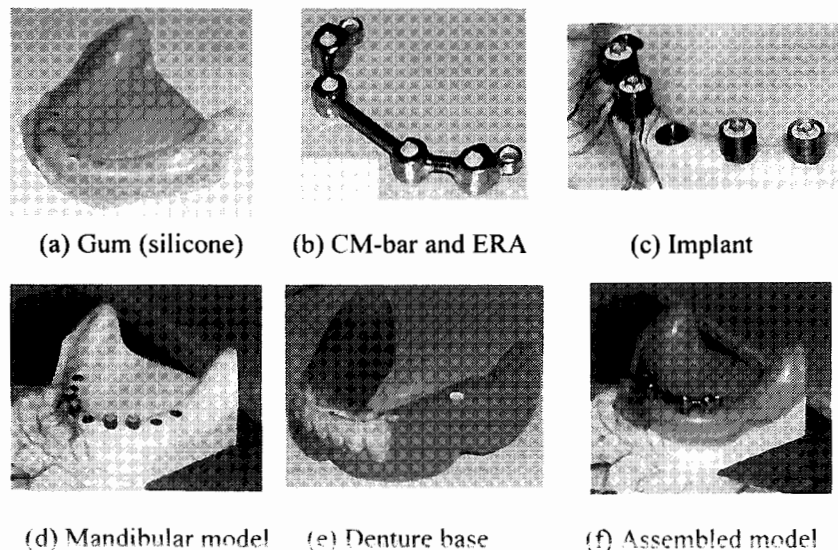


Fig. 1 Overdenture model

3. 有限要素解析

3.1 解析モデルの作成

下顎骨モデル，歯肉モデル，義歯を非接触三次元デジタイザ(VIVID910)で測定し，取得した点群データをRapidForm2004に読み込み，三角形ポリゴンデータに変換した．つぎにポリゴンに編集作業を行い，ポリゴン上にNURBSサーフェスを作成した．このサーフェスデータを三次元CAD(Pro/Engineer)に読み込み，CADの編集機能を用いて，下顎骨モデル，歯肉モデル，義歯モデルそれぞれのソリッドデータを作成した．その他の構成部品はPro/Engineerを用いて作成した．オーバーデンチャー模型を構成する全部品をPro/Engineer上で組み立て，**Fig.2**に示すようなオーバーデンチャー模型のアセンブリモデルを作成した．

3.2 材料物性値

応力解析で使用する各構成部品の材質，弾性係数，ポアソン比を**Table 1**に示す．

3.3 荷重条件

咬合力を模した静的荷重負荷100 Nを，万能試験機を用いて咬合面に垂直に，**Fig.3**に示すように義歯床の右側第二小臼歯相当部に負荷した．

3.4 応力解析ソフトウェア

前述したアセンブリモデルに対して構造解析ソフトウェアMechanicaを用いて応力解析を実施した．Mechanicaはp法による有限要素法ソフトウェアであり，解析者がメッシュ分割を意識せずに有限要素解析(FEA)を実施できる．

3.5 解析結果および考察

クリップ部およびERA部は完全に接触しているものとして応力解析を実施し，**Fig.4**に示すようなA, B, C, D (遠心インプラント) , E, F, G, H (近心インプラント) の8点における軸方向ひずみの計測値をFEAによる計算値と比較した．結果を**Fig.5**に示す．

遠心インプラント (A-D) の方が，近心インプラント (E-H) よりも，大きな曲げを受けている点では，実測とFEAで整合が取れている．しかしながら，近心のインプラントでは，実測では全体に圧縮が負荷されているのに対して，FEAでは曲げを受けており，両者の間で相違が認められる．

4. おわりに

本稿では，3DCADやデジタイザーなどを利用してオーバーデンチャー模型の有限要素モデルを作成し応力解析を実施し，インプラントに発生するひずみの解析値を実測結果と比較した結果を示した．現段階では解析と実測との一致は十分ではないが，今後は部品間の接触条件の導入や物性値の見直しにより，解析モデルの改善を行う予定である．

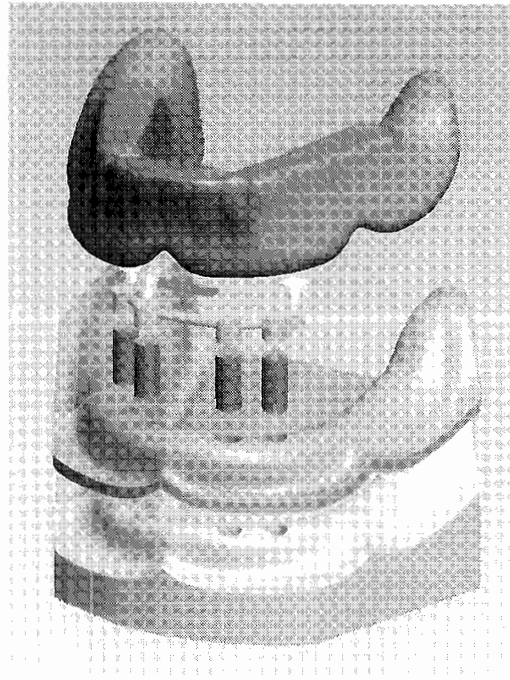


Fig. 2 3DCAD model for the overdenture

Table 1 Material properties

Parts	Material	Young' s modulus [MPa]	Poisson' s ratio
Mandibular model	resin	7000	0.3
Gum	silicone	3	0.47
Implant x 4	titanium	110000	0.34
ERA x 2	polyurethane	100	0.4
CM-bar / Clip	gold arroy	100000	0.3
Denture base	resin	3000	0.35

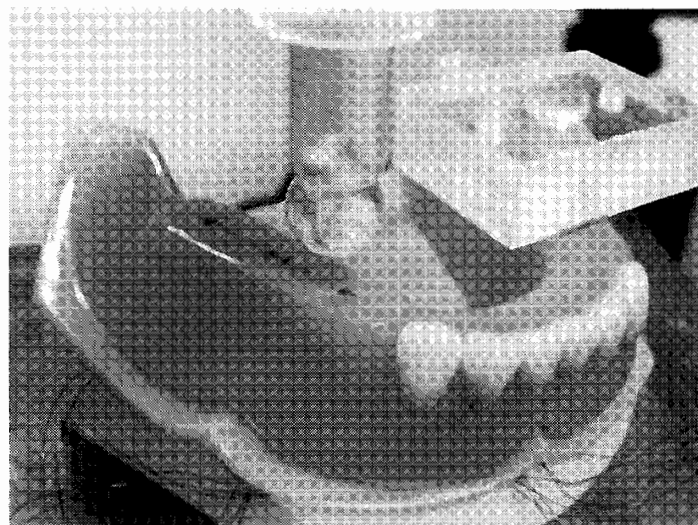


Fig.3 Load point on the overdentures

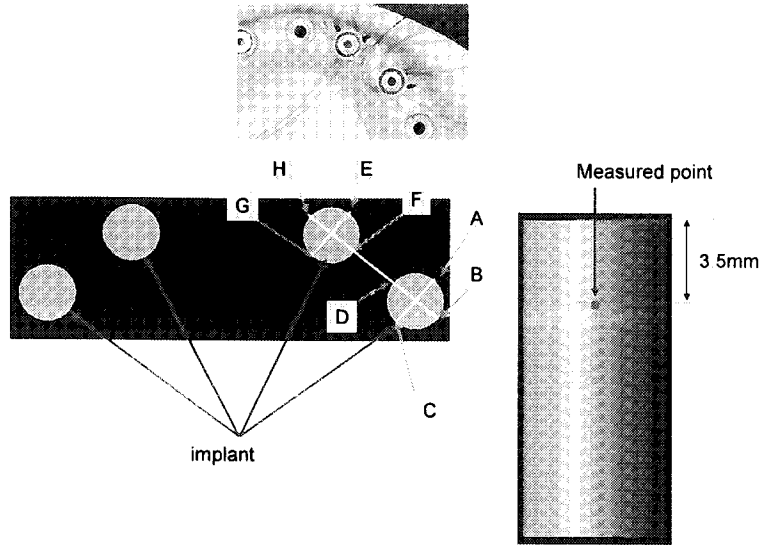


Fig. 4 Positions of gauges for strain measurements

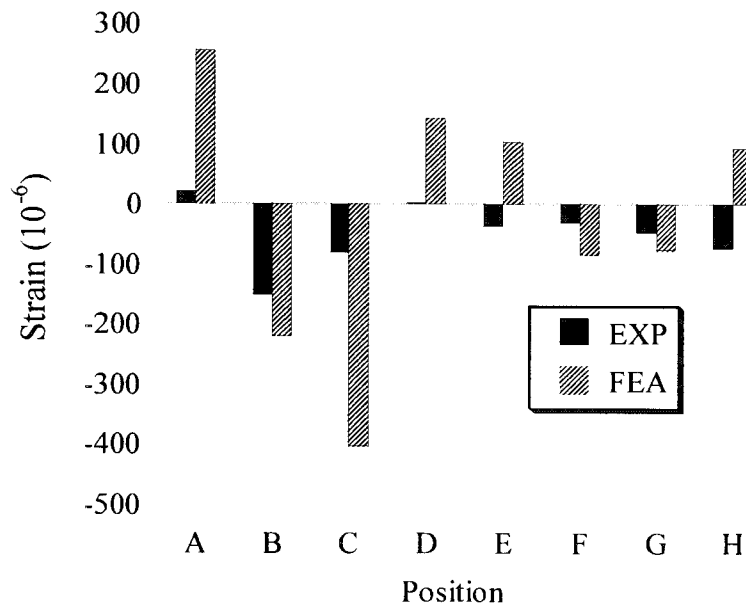


Fig. 5 Comparison of axial strains between measurements and FEA results

謝辞

FEA解析で利用した3DCADモデルの作成においては、元上智大・大学院生の槇戸謙二氏（現、コマツ）に協力いただいた。ここに謝意を表す。

研究協力者

東藤 貢（九州大学応用力学研究所）

参考文献

- 1) Sadowsky, SJ, Mandibular implant-retained overdentures: A literature review, J. Prosthet Dent., 86, pp.468-473 (2001).
- 2) 中尾, 松下, 澤江, 坂井, 村上, 古谷野, 歯科用インプラントを支台としたオーバーデンチャーの力学的評価, 第32回日本臨床バイオメカニクス学会プログラム・抄録集 p134 (2005).

下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2: 歯科インプラント埋入下顎骨の応力状態に及ぼす固定式補綴装置の材料の影響

松下恭之 (九州大学大学院歯学研究院)
東藤 貢 (九州大学応用力学研所)
入江皓平 (九州大学大学院)

1. 緒言

近年、天然歯を失った上下無歯顎の患者は全世界の人口のおよそ 10%いると言われており、無歯顎症例に対する新たな治療法としてインプラント治療を応用した治療法が増えつつある¹⁾。このような治療法において、インプラントの存在が下顎骨に対して力学的にどのような影響を及ぼすのか、さらに力学環境下での骨吸収などの生物学的作用を知ることは、インプラントの安全性や耐久性などとも関連し臨床的に大変重要である。現在、複雑な生体組織の応力状態を近似的に高精度で知ることができる唯一の方法は有限要素解析 (FEA) であるが、多くのインプラントの FEA は、2次元や単純化した3次元モデルを用いた解析がほとんどである。

一方、X線 CT 画像や MRI から得られる画像データより、個体別の詳細な3次元 FEA モデルを作成し応力解析を行う手法は、骨体に生じる力学状態を実際に近い状態で探る方法として医工学分野で期待されている技術であり、顎骨に対しても応用が始まっている^{2,3)}。

そこで本研究では、下顎無歯顎症例に相当する詳細な 3D-FEA モデルを作成し、インプラント体および骨内応力を解析することを目的とした。まず、ヒト頭蓋骨の X 線 CT 画像を基にして 2 層構造を成す下顎骨モデルの作成を試みた。また、歯と歯根膜を導入した下顎骨モデルも作成した。次に、下顎骨モデルに 4 本のインプラントを埋入するとともに、その上部に固定式補綴装置および CT 画像より作成した人工歯のモデルを装着し、All-on-4 モデルを模擬した FEA モデルを構築した。汎用 FEA コードを用いて応力解析を行うことで、インプラント、補綴装置および下顎骨について力学的検証を行った。

2. 下顎骨モデルの構築

ヒト頭蓋骨の X 線 CT 画像から生体骨の輪郭を抽出した。このとき、骨の境界が曖昧な画像については手作業で処理を施した。着目する部分の輪郭を抽出し、3次元の表面点群データとした。次に、作成した3次元の表面点群データよりポリゴンによる面データを作成し、最終的にサーフェイスデータを作成した。FEA 解析用プリプロセッサ FEMAP にサーフェイスデータを読み込み、ソリッド化を行った。以上の作業を下顎骨の緻密骨、海綿骨、歯について行った。CT 画像より作成の困難な歯根膜に関しては、人工的に作成し導入することで、実際の下顎骨の形状を模擬する 2 層構造を再現したモデルを構築した。作成した下顎骨モデルを Fig. 1 に示す。

3. FEA モデルの構築

下顎骨に埋入するインプラントは直径 4mm、長さ 20mm のチタン製、シリンダー型とした。このインプラントを下顎骨モデルのオトガイ孔間の遠心部に傾斜させたインプラントを 2 本、前歯部に 2 本埋入した。また、補綴装置の材料に関してはアクリル樹脂製とチタン製の 2 種類を用いた。

用いた要素は4節点4面体要素であり、要素数は173318、節点数は48726である。また、緻密骨、海綿骨、インプラント、補綴装置および人工歯はすべて線形弾性体と見なしTable 1に示した材料定数を用いた。また、それぞれの界面は接合しているものとした。下顎骨下方の緻密骨の表面ノードを完全拘束とし、左側臼歯部に垂直荷重100Nを負荷して解析を行った。要素分割の様子および設定した境界条件をFig. 2に示す。

4. 解析結果

Fig. 3にアクリル製補綴装置の場合の相当応力の分布状態を示す。図より、臼歯部に傾斜埋入したインプラントの周囲、特に、遠心側において高い応力集中が生じていることがわかる。このような高い応力の発生がインプラントの弛みや骨吸収に関連すると思われる。補綴装置をアクリルからチタンに変更し剛性を増加させることで、同部の骨内応力が70%程度に減少することが確認できた。

Fig. 4にアクリル樹脂製補綴装置の相当ひずみ分布図を示す。図より負荷部分周辺でひずみ集中が生じていることがわかる。このことより、今回の解析モデルにおいては、剛性の低い補綴装置の場合、負荷部分付近での局所的な補綴装置の変形が骨内応力の増大に影響したことが推測される。

5. まとめ

下顎無歯顎症例の治療法の一つであるAll-on-4のFEAモデルの構築を目的として、ヒト頭蓋骨のCT画像を基に下顎骨の3Dを作成した。緻密骨と海綿骨を分けてモデル化し組み合わせることで2層構造の単純化したFEA下顎骨モデルを作成した。このモデルの臼歯部に簡略化したインプラントモデルを2本、前歯部に2本埋入後、固定式補綴装置および人工歯のモデルを組み合わせることで、All-on-4のモデルを構築した。応力解析を行った結果、臼歯部に傾斜埋入したインプラントの遠心側において高い応力集中を確認することができた。この応力集中は補綴装置の剛性を上げることで軽減されることがわかった。

参考文献

- 1) F.Renouard and B.Rangert. Risk Factors in Implant Dentistry-Simplified Clinical Analysis for Predictable Treatment-, 1-7, Quintessence Publishing Co, Inc, 1999.
- 2) 伊能教夫 他. 日本機械学会論文集(A編) 58-551, 1042-1045, 1992.
- 3) 伊能教夫 小関道彦 他. バイオメカニズム学会誌 28-4, 184-185, 2004.

Table 1 Material properties

Material	Young's modulus(GPa)	Poisson's ratio
緻密骨	13.7	0.3
海綿骨	1.37	0.3
インプラント	106	0.3
アクリル樹脂	3.14	0.23
チタン	106	0.3
人工歯	68.9	0.28

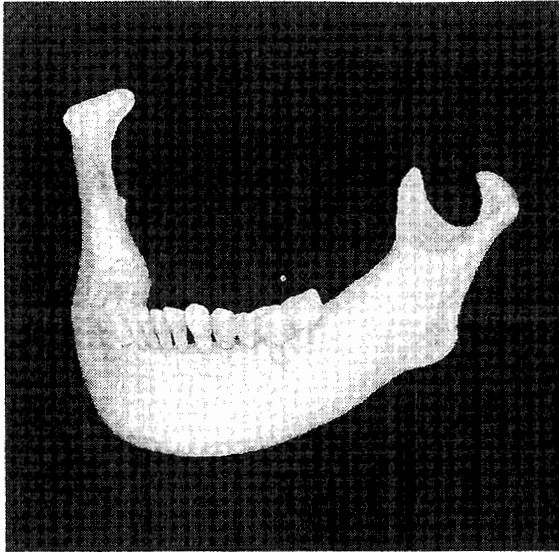


Fig. 1 3D mandibular model

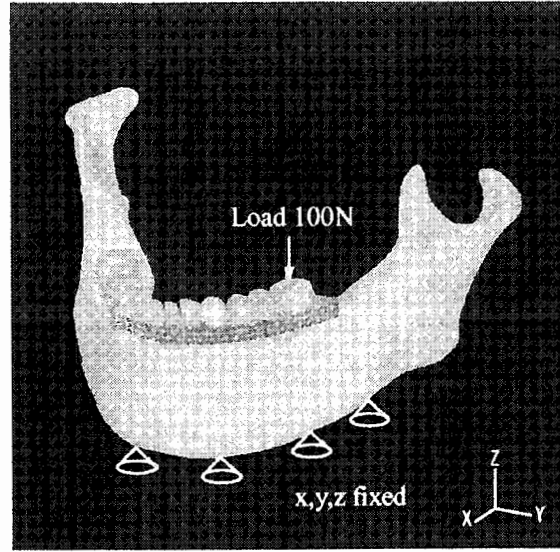


Fig. 2 Boundary conditions for FEA(All-on-4)

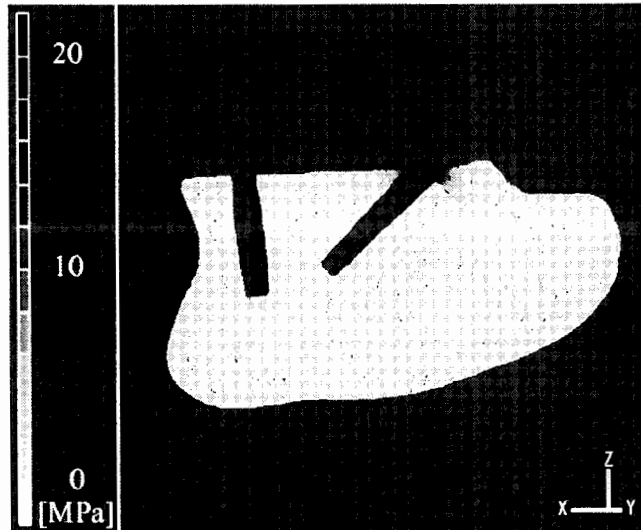


Fig. 3 Mises equivalent stress distribution

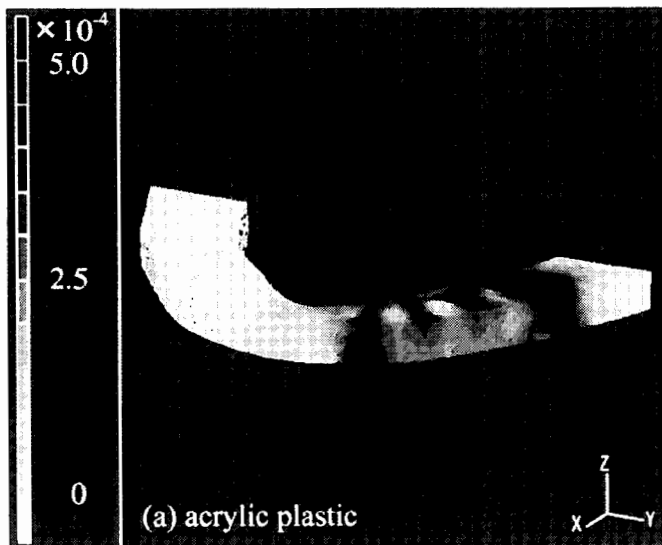


Fig. 4 Equivalent strain distribution (a) acrylic plastic

バイオメカニクスとシミュレーション技術

研究代表者

京都大学再生医科学研究所 堤 定美

1. 序 言

整形外科用インプラントなどの対内埋め込み型の医療機器は、生体内に埋入して使用されるため、その力学的環境は複雑であると共に、実験や計測技術を用いてその力学的環境を知ることが大変困難である。さらに、このような医療機器は複雑な3次元形状と構造を成すことが多く、ある条件下における医療機器自体の力学的状態を知ることが実験的にはほとんど不可能である。このような状況の下、コンピュータやソフトウェアの急速な発展とともに、生体医用工学の分野においても有限要素法に代表されるコンピュータ・シミュレーション技術の応用が盛んになってきている。シミュレーションを用いることで、高精度で医療機器表面や内部での応力やひずみ分布などを知ることが可能になるが、未だ多くの課題が残されているのが現状である。また、医療機器と生体組織の相互作用に起因する臨床上的の問題も多く、細胞や組織などの生体系の力学シミュレーションも重要となっており、活発な研究が進んでいる。

本研究集会では、生体工学分野においてシミュレーション技術を駆使して研究を進められている第一線の研究者にお集まりいただき、生体工学の様々な分野でのシミュレーションの応用と有用性、問題点、今後の検討課題などについてご講演いただいた。最後に、研究集会開催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ます。

2. プログラム

日時：6月2日（土）13：00～17：35

6月3日（日）9：20～12：35

会場：九州大学西新プラザ

6月2日（土）

10：30 開会の辞 堤 定美（京都大学）

セッション1 座長：東藤 貢（九州大学）

13：10 「X線CT画像に基づくヒト下顎骨の個体別有限要素解析」

小関道彦，伊能教夫（東京工業大学）

横 宏太郎（昭和大学）

13：35 「骨の微視構造を考慮した複合構造モデリング」

東藤正浩，但野 茂（北海道大学）

14：00 「ボクセルモデルによる人体頭部衝撃解析」

弓削康平，渡邊 大（成蹊大学）

西本哲也（日本大学）

村上成之，高尾洋之（日本慈恵会医科大学）

14：25 「歩行者保護脚部インパクト挙動の考察（人体FEMモデルTHUMSとの比較）」

山前康夫（トヨタテクニカルディベロップメント（株））

14：50 休憩

セッション2 座長：村瀬晃平（近畿大学）

15：05 「脊柱胸郭構造力学モデルの構築と手術シミュレーション」

- 玉木 保 (日本工業大学)
 金 紅梅 (トヨタテクニカルディベロップメント (株))
 15:30 「関節軟骨の圧縮挙動シミュレーション」
 村上輝夫, 細田菜津子, 石川 格, 坂井伸朗, 澤江義則 (九州大学)
 15:55 「有限要素モデルによる血管内皮細胞の変形挙動の再現」
 山田 宏 (九州工業大学)
 16:20 休憩
 特別セッション「次世代医療機器評価におけるシミュレーション技術」
 座長: 玉木 保 (日本工業大学)
 16:35 「TFコンピュータシミュレーション」
 堤 定美 (京都大学)
 16:50 「FEAによる人工股関節ステム標準モデルの応力解析」
 村瀬晃平 (近畿大学)
 17:05 「次世代医療機器評価について」
 土屋利江 (国立医薬品食品衛生研究所)
 17:20 総合討論

6月2日 (土)

セッション3 座長: 東藤 貢 (九州大学)

- 9:20 「膝関節のモデリングとシミュレーション」
 村瀬晃平 (近畿大学)
 9:45 「大腿骨頭壊死に対する表面置換型人工骨頭置換術の力学解析」
 坂本二郎, 梅本雄一郎, 加畑多文, 坂越大悟, 尾田十八, 富田勝郎 (金沢大学)
 10:10 「骨リモデリングの計算バイオメカニクスと人工股関節ステム形状設計への展開」
 安達泰治 (京都大学)
 10:35 「転倒シミュレーションによる大腿骨頸部の応力評価」
 田中英一 (名古屋大学)
 11:00 休憩

セッション4 座長: 堤 定美 (京都大学)

- 11:15 特別講演「運動器再建とバイオメカニクス」
 佛淵孝夫 (佐賀大学)
 11:45 「人工股関節に関連する骨リモデリングシミュレーション」
 鄭 徳泳 (国立医薬品食品衛生研究所)
 堤 定美 (京都大学)
 15:50 「人工股関節に関連した力学的諸問題と FEA の応用」
 東藤 貢 (九州大学)
 佛淵孝夫 (佐賀大学)
 12:30 閉会の挨拶: 東藤 貢 (九州大学)

3. 講演の概要

(1) 「X線CT画像に基づくヒト下顎骨の個体別有限要素解析」小関道彦

骨体の力学的特徴を非侵襲状態で数値計算によって把握することが可能となれば骨体の診断・治療に役立つ情報が提供できる。そのため、個体別有限要素モデルの生成手法に関する研究が活発に行われている。本講演者は、骨体全体をほぼ等しい要素サイズでモデリング

する手法を開発した。これにより有限要素モデルをほぼ自動的に生成することが可能となった。本講演では、骨体の形状に応じて要素サイズを制御するモデリング手法に関して行われた考察に関する報告がなされた。

(2) 「骨の微視構造を考慮した複合構造モデリング」東藤正浩

Bone tissue is often regarded as a composite material composed of HAp like mineral particles and collagen fiber in a microscopic scale. As the HAp is crystalline structure, an X-ray diffraction method is useful to measure the lattice strain of HAp crystals. The X-ray diffraction method has the possibility to measure the stress of bone tissue nondestructively. In order to estimate the stress from the lattice strain of HAp crystal, it is necessary to understand the relationship between the lattice strain of HAp and the macroscopic deformation of bone tissue. In this study, a modeling method is proposed to simulate the anisotropic properties of bone composed of HAp and collagen matrix. The relationship between the strain of HAp phase and macroscopic strain of bone tissue was evaluated by using the FE analysis of bone composite model.

(3) 「ボクセルモデルによる人体頭部衝撃解析」弓削康平

頭部の衝撃耐性値として現在最も広く受け入れられているHICは並進加速度とその持続時間により計算される評価指標である。しかし、歩行者頭部保護基準として並進加速度のみを考慮したHICだけでは不十分である可能性がある。そこで近年頭部の回転加速度と並進加速度を組み合わせた評価指標を提案しているが、検証データがほとんどないため評価指標として採用されている例は見受けられない。また頭部の並進および回転運動の差異が頭蓋内においてどのような影響があるかについて考察した報告例は少ない。そこで、本報では講演者らが開発した頭部モデルを用いて、まず頭部の衝撃的な回転挙動を再現し頭蓋内応答について、またそれに伴い脳脊髄液を粘弾性体として扱ったことについての検討を行ったことを報告する。

(4) 「歩行者保護脚部インパクト挙動の考察」山前康夫

歩行者の脚部保護性能を評価する手段として、脚部インパクト試験がある。ただし、使用される脚部インパクトは骨のたわみ変形を再現しておらず、膝部の特性も強固であるなど、人の特性と差異が大きいことが指摘されており、評価結果の妥当性についてはまだ不明な点が多い。本報の目的は、生体忠実度の高いと考えられる人体FEモデルTHUMSを用い、脚部インパクト試験での評価の妥当性を明らかにすることである。すなわち、同一のFE車両モデルを用いて、THUMSとの衝突計算および、インパクト試験を模擬したFEM計算を実施する。両者の脚部の傷害のみならず、膝靭帯断裂の重要な因子であると考えられる膝の曲げ角および、発生する衝撃荷重を比較し、脚部インパクトによる傷害の評価精度を明らかにする。

(5) 「脊柱胸郭構造力学モデルの構築と手術シミュレーション」玉木 保

整形外科手術は基本的に力学的再建手術である。最近では CT 撮影によって個人の骨格の形状が取得できるようになり、これを元に力学的な手術シミュレーションを行うことで、手術を支援することが期待される。CT データを元に個人別の手術シミュレーションを行うが、その基となる脊柱および胸郭の標準の構造力学モデルの構築について検討を行った。解析は FEM ソフト ANSYS によった。骨をはり要素（あるいは固体要素）とし、軟組織をはり要素あるいは非線形ばね要素とした。

(6) 「関節軟骨の圧縮挙動シミュレーション」村上輝夫

変形性関節症の病因（変性・修復機構）の解明、および再生軟骨における構造形成・機能向上に及ぼす力学的刺激の役割の解明には、軟骨組織全体・表面及び軟骨細胞周辺・軟骨細胞の力学的環境の理解が必要である。本研究では、可視化実験とシミュレーションによる統合的評価を行った。

(7) 「有限要素モデルによる血管内皮細胞の変形挙動の再現」山田 宏

大動脈や動脈壁の内腔面に存在する血管内皮細胞は血流や血管壁の変形によって外部から力学的刺激を受け、細胞内部で細胞骨格の再構築や遺伝子発現などが生じる。細胞内部での刺激の伝達や細胞骨格形成に果たす力学的場の寄与は明らかにされておらず、仮説に基づいたモデル化が重要である。そこで本研究では、核、細胞質、基質からなる細胞モデルを作成する。

(8) 「TFコンピュータシミュレーション」堤 定美

現在、人工股関節を始めとする外科用インプラントの力学的安定性は主に実験的手法によって評価されており、ISOやASTMでも素材やインプラントを対象とした実験による評価を基本として規格化がなされている。有限要素解析などによるコンピュータ・シミュレーションを使用すれば、解析対象との等価性が比較的得やすく、対象物全体の応力分布が正確に把握できるだけでなく、形状や材料特性などの各設計因子の影響を詳しく効率よく吟味することができる。シミュレーションがインプラントの疲労破壊の推定など強度評価に有効である示唆を基にして、今回シミュレーションに関する作業部会 (Task Force 2) が設けられた。作業概要としては、コンピュータ・シミュレーションの作業実施ガイドラインの骨格の検討、ソフトの解析精度を保証するためのbench mark test法の設定、解析モデルの解析精度を検証するための推奨モデル2種の検討、モデルの分割要素の適正サイズや高次要素の採用などについての検討などである。

(9) 「FEAによる人工股関節ステム標準モデルの応力解析」村瀬晃平

人工股関節ステムの開発・評価に有限要素解析を利用するには、どのアプリケーションでも、だれが作っても、モデルの節点・要素が異なっても同様の解が得られることが重要である。本研究では、FEAを評価指標として使用する際の、使用ソフトウェアの違い、メッシュ化の影響がシミュレーション結果に与える影響を調査した。

(10) 「次世代医療機器評価について」土屋利江

厚生労働省は、医療機器の開発の迅速化、薬事法審査の円滑化に資する評価指標の検討、作成を行うため、経済産業省と合同で検討会を設置し、評価指標を作成する5分野：体内埋め込み型能動型機器分野（高機能人工心臓）、ナビゲーション医療分野（手術ロボット）、再生医療分野（心筋シート）、体内埋め込み型医療機器分野（生体親和性インプラント）、リポソーム等のデリバリーシステム分野（抗がん剤DDSと人工酵素運搬体）について、具体的課題を決定した。本講演では、2年間の各分野の活動状況について発表する。次世代医療機器・医用材料開発を支援し、我が国発の医療機器の産業化と、必要とする患者様に優れた医療機器で治療できる環境の整備が必要不可欠である。

(11) 「膝関節のモデリングとシミュレーション」村瀬晃平

画像情報から3次元FEAモデルを構築する手法、輪郭形状が忠実でないモデル部位の特定、六面体要素によるモデル構築の試みと衝撃解析の結果と実験値との比較、要素数とアスペクト比がシミュレーション結果に及ぼす影響などについての講演がなされた。

(12) 「大腿骨頭壊死に対する表面置換型人工骨頭置換術の力学解析」坂本二郎

In this study, finite-element models of femoral head replacement with the resurfacing implantation were created based on a clinical CT images, and stress analyses were carried out considering inhomogeneous property of bone. Furthermore, influence of stress distribution around the femoral head with arrangement of the resurfacing implantation was investigated by changing implant setting angle to femoral axis.

(13) 「骨リモデリングの計算バイオメカニクスと人工股関節ステム形状設計への展開」 安達泰治

人工股関節ステムと骨との界面で生じる現象には、局所的な力学状態やリモデリングによる骨の構造変化が密接に関係している。そのため、力学的適合性に優れたステムの設計を行

うためには、界面の力学的評価に基づくステム形状の設計が不可欠となる。本研究では骨とステムの界面における応力の一様化を一つの指針としボクセル有限要素法を用いた3次元物体の形状変化シミュレーション手法を用いて、人工股関節ステムの形状決定を試みる。

(14) 「転倒シミュレーションによる大腿骨頸部の応力評価」田中英一

大腿骨単体モデルによる転倒の静的応力解析，簡易全身モデルによる転倒の動的応力解析，マルチボディー有限要素複合モデルによる歩行時の転倒シミュレーション等の研究成果についての報告がなされた。

(15) 「運動器再建とバイオメカニクス」佛淵孝夫

整形外科医の立場から，人工関節置換術の例，骨のリモデリングやインプラントと骨の相互作用に関する臨床例，人工股関節の歴史と現状，プロジェクト人工関節，シミュレーションへの期待と問題点などについての講演がなされた。

(16) 「人工股関節に関連する骨リモデリングシミュレーション」鄭 徳泳

人工股関節における「ゆるみ」や「移動」現象は，人工股関節と生体骨との力学的不適合，埋入位置や姿勢などに起因する応力分布状態の変化によって骨の形状や構造がリモデリングしたために生じると考えられる。これらの問題を解決するためには人工股関節周辺の応力分布状態を知ることが重要であるが，生体内の応力分布状態を実測することは不可能である。そこで，数値シミュレーションが有効な手段となる。本研究では，有限要素法をベースとして，骨リモデリングを考慮した数値シミュレーション法を構築し，人工股関節の周辺骨における骨リモデリング現象と人工股関節の力学的パラメータの関係を調べた。

(17) 「人工股関節に関連した力学的諸問題と FEA の応用」東藤 貢

人工股関節に関連する臨床上重要な問題のうち，力学的要素の強い問題を選定して研究対象とした。破損，脱臼，subsidence 等の問題を取り上げ，CAD データを用いた 3D モデルの構築と，3D-FEA の応用，材料力学に基づくメカニズムの考察などについての報告があった。

4. あとがき

本研究集会は，応用力学研究所共同研究集会としては初めてのバイオメカニクスにおけるシミュレーション技術に焦点を絞った研究集会である。生体工学の分野において最先端で活躍されている研究者をお招きし，細胞から医療機器まで 15 件の講演が行われた。また，特別講演者として，人工股関節置換術数日本一の佐賀大学医学部整形外科の佛淵孝夫教授，厚生労働省の医療機器評価策定事業にお詳しい国立医薬品食品衛生研究所の土屋利江先生をお招きして，貴重なご講演を拝聴することができた。参加者は講演者を含め大学，病院，企業より約 53 名の参加者があり，各講演とも活発な議論を展開して頂いた。本研究集会在，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。

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. 背景と目的

関節軟骨組織の優れた力学的機能は、軟骨細胞が産生する細胞外マトリックス(ECM)の主成分であるプロテオグリカンとⅡ型コラーゲンにより形成される組織構造に由来する。損傷した軟骨組織の治療法として注目される再生軟骨のひとつの課題は、生体関節軟骨の力学的機能を再建することである。そのため、十分な強度を有する軟骨組織の再生を目指し、最適な培養条件を検討する研究が盛んに行われている。

力学的刺激は、軟骨細胞によるECMの産生を促進することにより、軟骨組織の機械的特性を発達させることが指摘されている。また細胞培養に用いる三次元担体(スキャホールド)の特性も、再生組織の形成に大きく影響することが報告されている。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に周期的圧縮負荷を加え、力学的機能の発達およびECMの産生に及ぼす影響を評価した。また、アガロース濃度を変えることにより、スキャホールド材質による影響について検討した。

2. 実験方法

2.1 試験片作製および圧縮培養

牛中指骨遠位端の軟骨組織から酵素処理によって単離した軟骨細胞をアガロースゲルに播種し、再生軟骨モデルとして用いた。スキャホールドとして用いたアガロースゲルは、Sigma Type VII agarose 1wt%、Sigma Type IX-A agarose 3wt%および4wt%の3種類である。試験片の形状は直径4mm×高さ2.5mmの円柱形とした。作製した再生軟骨モデルはそれぞれ24ウェル・カルチャープレート内で培養した。全ての試験片は、37°CのCO₂インキュベータ内で一日静置培養した後、負荷群、コントロール群、静置培養群の3つに分類した。

負荷群には、2軸負荷培養装置⁽¹⁾のスライダ先端に取り付けた塩化ビニール製の圧子を用い、周期1Hzにて15%単軸圧縮ひずみを円柱軸方向に1日6時間与えた。負荷終了後は、圧子を軟骨モデルの上面に接触させたまま、ひずみを与えない状態で培養を継続した。圧子の接触による影響を評価するため、コントロール群はモデル上面に別の圧子を接触させた状態で培養した。培養液(DMEM+20%FBS)は2-3日に1度交換した。

2.2 力学試験

培養1, 8, 15, 22日目に再生軟骨モデルの力学的評価を行った。高精度ロード・セルを備えた力学試験機を用い、20%/minの速度にて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-ひずみ曲線にて、直線近似が可能であったひずみ5%~10%区間の傾きより、接線弾性率(Tangent modulus)を求めた。

2.3 グリコサミノグリカン(GAG)定量

1mlのダイジェスト・バッファ(2.8 mM EDTA, 9 mM cysteine hydrochloride in PBS)に各試験片を浸漬し、70°Cで一時間加熱処理することで溶解した。その後、溶液にパパイン(Papain from Carica Papaya, Fluka)を3Uとアガラゼ(β -Agarase, Wako)を10U加え、37°Cで一晩保温した。翌日60°Cで加熱した後、DMMB (Dimethylmethylene Blue) Assay⁽²⁾によりプロテオグリカンの主成分である硫酸化グリコサミノグリカン(GAG)濃度を測定した。

3. 実験結果

図1-3に力学試験によって得られた再生軟骨モデルの接線弾性率を示す。横軸は培養日数を表している。培養1日目の弾性率の違いは、アガロース濃度とタイプに由来する。Type IXアガロースの濃度を4%から3%に低減することにより、初期の弾性率は減少した。一方、Type VIIアガロースゲルはType IXアガロースゲルより剛性が高く、Type VII 1wt%ゲルはType IX 3wt%ゲルよりも高い弾性率を示した。Type IXアガロースの負荷群、およびType VIIアガロースの全群において、培養15日までに接線弾性率の有意な上昇が認められた。また、Type IXアガロースの培養15日目、およびType VIIアガロースの培養22日目において、負荷群の接線弾性率がコントロール群の接線弾性率と比較し有意に高くなった。Type IXアガロースと比較し、Type VIIアガロースでは培養に伴う接線弾性率の上昇がより顕著であり、また早期に生じた。

図4-6に再生軟骨モデルに含まれるGAG量を示す。縦軸は湿潤重量に対するプロテオグリカンの重量比(GAG%)を表している。Type IXアガロースのGAG量はDay15まで上昇しているが、Type VIIアガロースのGAG量はDay1からDay8にかけて急上昇し、その後の上昇はわずかであった。また、Type IXアガロースでは負荷群のGAG含有量がコントロール群と比較し有意に高くなったのに対し、Type VIIアガロースでは負荷群とコントロール群の間にGAG含有量の差が認められなかった。

4. 考察

いずれのアガロースゲルについても、負荷群の弾性率はコントロール群および静置培養群と比較し高い値を示した。一方、GAG含有量は、Type VIIアガロースの負荷群とコントロール群の間に差が見られなかったものの、それ以外は負荷群のGAG含有量が他の二群と比較し高くなった。このことより、特にType IXアガロースをスキャホールドとした場合、

周期的圧縮負荷が軟骨細胞によるプロテオグリカンの産生とスキヤホールド内への蓄積を促進し、力学的特性を向上させたと考えられる。また、再生軟骨モデルの接線弾性率と GAG 含有量に明らかな相関関係が認められたことから、スキヤホールド内に蓄積された GAG が、圧縮変形に対する再生軟骨モデルの変形抵抗に大きく関与していると考えられる。

本研究では、圧縮負荷を与えることによって再生軟骨モデルの力学的特性が向上することが確認された。そのメカニズムは以下の二つが考えられる。一つは、周期的圧縮がモデル内の軟骨細胞を刺激し、メカノトランスダクション経路を介して ECM の産生が促進されたと考えられる。もう一つは、周期的圧縮がゲル内の物質輸送を促進し、細胞の代謝を向上させたと考えられる。

再生軟骨モデルに用いるスキヤホールドが弾性率と GAG 含有量に大きく影響することが確認された。他と比較し、Type VII 1wt%ゲルでは GAG 含有量と弾性率が早期に上昇した。しかし、Type VII 1wt%アガロースモデルの GAG 含有量は、Day8 以降に上昇しなかった。この理由として、試験片内の GAG 分子の拡散挙動の変化が考えられる。アガロース濃度を低減したことによりゲル内の細孔面積は増加しており、これによりゲル内および培養液とゲル間の物質輸送特性が変化したことが予想される。その結果産生された GAG 分子のゲル内拡散速度と、平衡状態におけるゲル内分子濃度に影響を及ぼしたもののと思われる。Type VII 1wt%ゲルにおいて、負荷群とコントロール群の GAG 含有量と、静置培養群との GAG 含有量の間には有意差が確認された。これは圧子が試験片の上面に接することにより、ゲルと培養液間の物質輸送が影響を受けたことが一因と考えられる。今後は産生された GAG 分子のモデル外への放出を確認するため、培養液中の GAG を定量する予定である。

5. まとめ

本研究では、軟骨細胞-アガロースゲルの再生軟骨モデルに周期的圧縮負荷を与え、力学的機能の発達と細胞外マトリックス (ECM) 産生に及ぼす影響を検討した。その結果、力学的刺激は ECM 産生を促進させる重要な因子であり、プロテオグリカン含有量が再生軟骨モデルの圧縮剛性に大きく寄与することを確認した。また、スキヤホールドに用いたアガロースのタイプと濃度を変えることにより、スキヤホールド材質が ECM 組織の構築と力学的機能発達を大きく影響することがわかった。

参考文献

- (1) 花木, 澤江, 坂井, 石山, 村上, 2005年度年次大会講演論文集 Vol.5, (2005), 211-212
- (2) Farndale R.W., Buttler D.J. and Barrett A.J., *Biochimica et Biophysica Acta* 883 (1986) 173-177.

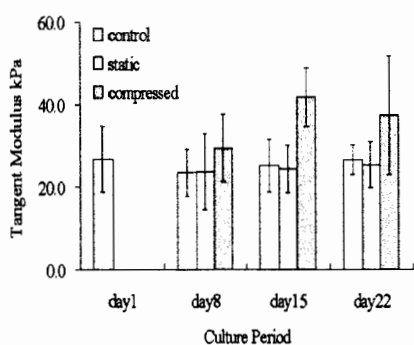


Fig. 1 Tangent Modulus of 4% Type IX-A agarose constructs (n=5-7)

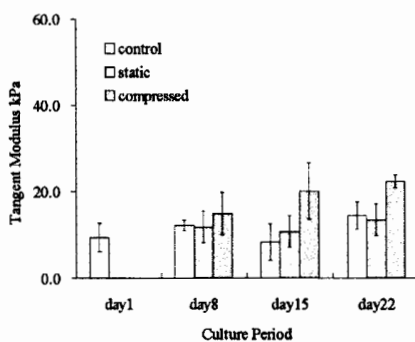


Fig. 2 Tangent Modulus of 3% Type IX-A agarose constructs (n=6-11)

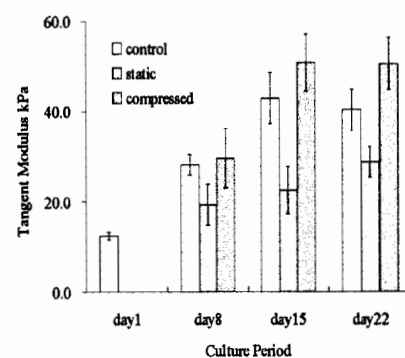


Fig. 3 Tangent Modulus of 1% Type VII agarose constructs (n=6-12)

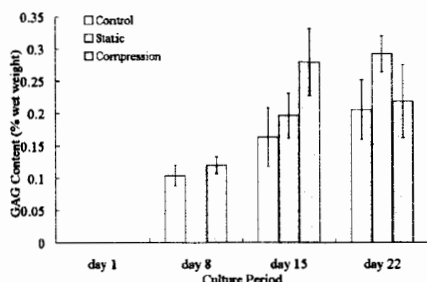


Fig. 4 GAG Content in 4% Type IX-A agarose constructs (n=2-8)

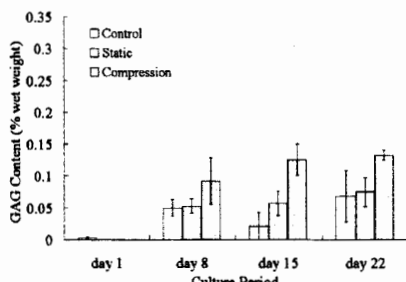


Fig. 5 GAG Content in 3% Type IX-A agarose constructs (n=5-12)

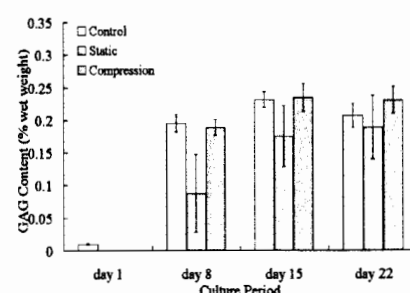


Fig. 6 GAG Content in 1% Type VII agarose constructs (n=6-14)

太陽電池のための機能性化合物半導体の結晶成長

宮崎大学工学部電気電子工学科 吉野賢二、木下 綾、白幡 泰浩

1. はじめに

I-III-VI₂ 族カルコパイライト型化合物半導体は直接遷移型のバンド構造を持ち、禁制帯幅付近で大きな吸収係数をもつ。禁制帯幅は CuAlS₂ の 3.5 eV から CuInTe₂ の 0.8 eV と広い波長域をカバーしている¹⁾。また、カルコパイライト型化合物半導体は太陽電池としての期待が高く、中でも、Cu(InGa)Se₂ 多結晶薄膜をベースとした太陽電池では、19.5%の変換効率が得られている²⁾。一方、Ag-III-VI₂ 族カルコパイライト型半導体の中でも、AgInSe₂ は禁制帯幅 1.2 eV を持ち、光吸収係数は禁制帯幅付近で 10⁵ cm⁻¹ 程度と高く、太陽電池の吸収層として期待されている。現在のところ、AgInSe₂ と AgGaSe₂ の混晶である Ag(InGa)Se₂ 太陽電池の変換効率が 7.3 % という報告がある³⁾。AgInSe₂ の作成法には、薄膜では、MBE 法³⁾ やフラッシュ蒸着法^{4, 5)}、パルスレーザー堆積法⁶⁾ などが報告されている。これまでに、我々は、真空蒸着法による AgInSe₂ 薄膜の研究を行ってきた⁷⁾。しかし、バルク結晶ではブリッジマン法^{8, 9)} や VGF 法^{10, 11)} による作成法が報告されているものの、バルク結晶に関する報告例は少ない。そこで本研究では、ホットプレス法により AgInSe₂ バルク結晶の結晶成長を行った。ホットプレス法は低温、短時間で結晶成長が可能で、真空を必要としないなどの利点がある。これまでに、AgGaSe₂、AgInS₂、CuInS₂ バルク結晶をホットプレス法で作成し、良質なバルク結晶が得られている¹²⁻¹⁴⁾。

本研究では、成長温度 400 °C から 700 °C と変化させ AgInSe₂ バルク結晶を作成し、太陽電池作製のための基礎物性の評価を行った。結晶の評価として、X 線回折 (XRD) によって格子定数と粒径サイズを求め、電子プローブマイクロ分析 (EPMA) より定量分析を行った。また、比重測定から密度を求めた。ホール測定、サーモプローブ分析より、伝導型、抵抗率、キャリア濃度、移動度を評価し、透過率測定より禁制帯幅を見積もった。

2. 実験方法

本研究では、粉末二元系材料の Ag₂Se (99.99 %)、In₂Se₃ (99.99 %) を用いて、化学量論的組成比になるように混合した。これを原料としてホットプレス法を用いて AgInSe₂ バルク結晶を作成した。直径 20 mm のカーボンダイスを用いて成長温度 400 °C から 700 °C、圧力 25 MPa、成長時間 1 時間で AgInSe₂ バルク結晶を作成した。作成した AgInSe₂ バルク結晶はカーボン紙で包まれているため、研磨をした後に XRD 測定、比重測定、透過測定、ホール測定により評価を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 結晶成長

成長温度 400 °C から 700 °C、圧力 25 MPa、成長時間 1 時間で AgInSe₂ バルク結晶を作成した。作成した試料は、カーボンダイスの形状により直径 20 mm、厚さ約 2 mm の円柱形である。Fig. 1 は、作成した試料を表面研磨したものである。成長温度 400、500 °C の試料では、表面が粗く、光沢が見られなかった。試料内部は加圧焼結の際にできる小さな気孔が

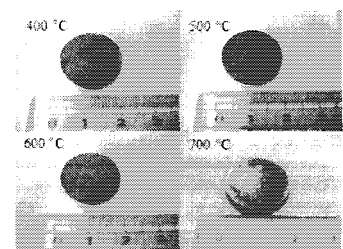


Fig. 1 Sample photographs.

肉眼で観察できる程度の大きさで観察できた。成長温度 600、700 °C と高温になるにつれて表面は滑らかになり、光沢が見られた。また、試料内部の気孔は肉眼では観察できないくらい小さくなった。

3.2 X線回折

Fig. 2 に XRD スペクトルを示す。参考として ICDD カードの AgInSe_2 ¹⁵⁾、 Ag_2Se ¹⁶⁾、 In_2Se_3 ¹⁷⁾、 AgIn_5Se_8 ¹⁸⁾ も同時に示す。評価した試料はすべて多結晶であった。成長温度 400 °C では AgInSe_2 のピークが小さく観察されたが、粉末二元系材料である Ag_2Se の (112)、(121) 面のピークや In_2Se_3 の (006) 面のピークが観察された。また、 AgIn_5Se_8 の (112)、(202)、(204) 面のピークも観察された。二元系材料のピークが観察された理由として、 Ag_2Se の融点は 880 °C、 In_2Se_3 の融点が 890 °C であることから¹⁹⁾、未反応な原料が残留したと考えられる。また AgIn_5Se_8 が観察された理由として、In の融点が 156.61 °C、Se の融点が 220.2 °C なので²⁰⁾、二元系材料から分解し、 AgInSe_2 ができるよりも先に AgIn_5Se_8 ができたと考えられる。成長温度が増加すると、二元系材料のピーク強度が減少し、 AgInSe_2 の (112) 面のピーク強度が増加した。粉末二元系材料のピークは成長温度 600°C で観察されなくなり、また AgIn_5Se_8 の (112)、(202)、(204) 面のピークは成長温度 650 °C で観察されなくなり、ICDD の AgInSe_2 のピークと一致した。

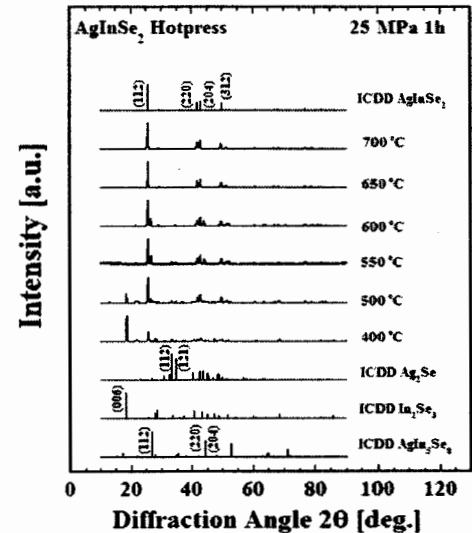


Fig. 2 XRD spectra.

ICDD カードより、 AgInSe_2 の格子定数は $a=6.104 \text{ \AA}$ 、 $c=11.714 \text{ \AA}$ である¹⁵⁾。成長温度 400~550 °C で得られた値と ICDD の値と比較して、多少のバラつきが見られた。これは XRD の結果より、二元系材料のピークや AgIn_5Se_8 の異相のピークが観察されたことから、 AgInSe_2 結晶の格子間に異相が存在していることにより、格子が大きくなったと考えられる。成長温度 600~700 °C で ICDD カードの a 軸、 c 軸の値に近づいた。XRD の結果より、異相の減少により ICDD の値に近づいたと考えられる。同じカルコパイライト型構造を持つ CuInSe_2 の格子定数 c/a 比は $c/a > 2$ であるが、 AgInSe_2 の c/a 比は $c/a < 2$ となることが shay らの論文²¹⁾より報告されている。今回作成したすべての試料で $c/a < 2$ となり、文献と一致した。XRD の結果より、ICDD のピークと一致した成長温度 650、700 °C の c/a 比は 1.91 となり、水平ブリッジマン法で作成された AgInSe_2 と同じ値を得た⁹⁾。

シェラーの式を用いて粒径サイズを求めた。今回の計算では最も強度の強い (112) 面を用いた。XRD スペクトルより、成長温度が増加するにしたがって、(112) 面のピークの半値幅が狭くなっていることから、粒径は増大していることが分かる。成長温度 400 °C での粒径サイズは、最小の 65 nm で、成長温度 650 °C で最大の 88 nm という結果になった。これは、焼結における緻密化機構において、出発粉体粒子の粒径を小さくすること、および焼結温度を増すことは焼結を促進する上で非常に有効であるので、本実験でも成長温度が増加するにしたがって、粒径サイズが増大したと考えられる²²⁾。

3.3 電子プローブマイクロ分析 (EPMA)

成長温度の増加にしたがって、Ag、In、Se の組成比は化学量論的組成比に近づいた。成長温度 400 °C から 600 °C で Ag と In の割合が $[\text{Ag}] < [\text{In}]$ であった。XRD の結果より、このときの成長温度で AgIn_5Se_8 のピークが観察された。 $[\text{Ag}] < [\text{In}]$ のときに OVC (Ordered Vacancy Compounds) が生成されやすいと考

えられる。成長温度 700 °C で最も化学量論的組成の値に近づいた。このとき Ag-poor、In-poor、Se-rich であった。欠陥としては、Ag 空孔 (V_{Ag})、In 空孔 (V_{In})、格子間 Se (Se_i)、Ag サイトの Se (Se_{Ag})、In サイトの Se (Se_{In}) などが考えられるが、サーモプローブ測定、ホール測定の結果より、試料は n 型の伝導型を示したことから、ドナー性欠陥の Se_{Ag} や Se_{In} がアクセプター欠陥よりも多いと考えられる。

3.4 比重測定

文献によると、 $AgInSe_2$ の密度は 5.792 g/cm^3 である¹⁵⁾。成長温度 400 °C から 600 °C では文献値より小さな値を示した。粉末二元系材料の Ag_2Se 、 In_2Se_3 のピーク、さらには $AgIn_5Se_8$ のピークが観察されたことから、結晶内に異相の存在が考えられる。成長温度 650 °C での密度は 5.48 g/cm^3 であり、 $AgInSe_2$ の文献値より小さな値を示した。しかし、この試料の XRD スペクトルでは異相が観察されなかった。同様にホットプレス法を用いて Ag_2Se と In_2Se_3 のバルク結晶を作成したところ、 Ag_2Se が 8.1 g/cm^3 、 In_2Se_3 が 5.5 g/cm^3 であったので、比重測定の結果より、異相の存在が考えられる。成長温度 700 °C での密度は 5.80 g/cm^3 であった。これは文献値とほぼ同じ値であった。Fig. 2 の XRD スペクトルからも異相のピークが観察されなかったので、成長温度 700 °C で $AgInSe_2$ の単相が得られたと考えられる。

3.5 ホール測定

Fig. 3 にホール測定における抵抗率の結果を示す。試料表面にオーミック電極として In を蒸着法で作成した。全ての試料でオーミック特性が得られた。抵抗率は成長温度の増加にしたがって増加傾向を示した。これは XRD の結果より、成長温度 400 °C での XRD スペクトルで粉末二元系材料のピークや異相のピークが他の試料の XRD スペクトルに比べて多く観察されたことから、結晶中の異相が電気伝導のパスとなり、反映されたと考えられる。成長温度上昇にしたがって、異相が減少したことで抵抗率が増加したと考えられる。XRD、EPMA、比重測定より、 $AgInSe_2$ の単相が確認された成長温度 700 °C での抵抗率は $0.16 \text{ } \Omega \text{ cm}$ であった。本実験で得られた値は、抵抗率は VGF 法で作成された $AgInSe_2$ バルク結晶¹⁰⁾ や蒸着法で作成された $AgInSe_2$ 薄膜⁷⁾ と近い値を得た。しかし同じ $AgInSe_2$ 薄膜でも MBE 法で作成された $AgInSe_2$ 薄膜と比べ、大きく値が異なった。これは、MBE 法は超高真空下で薄膜作成を行うため不純物の取り込みが極めて少なく、高品質のものが得られることから、MBE 法で作成された $AgInSe_2$ 薄膜は抵抗率が大きいと考えられる²³⁾。

Fig. 4 にキャリア濃度と移動度の結果を示す。キャリア濃度は成長温度増加にしたがって減少傾向を示した。キャリア濃度が減少した原因として、結晶中の異相によって生じたドナー性欠陥が減少したと

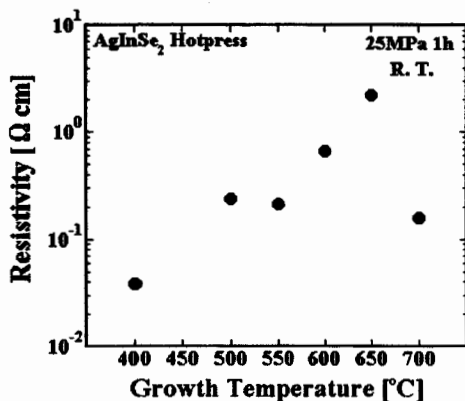


Fig. 3 Resistivity of $AgInSe_2$

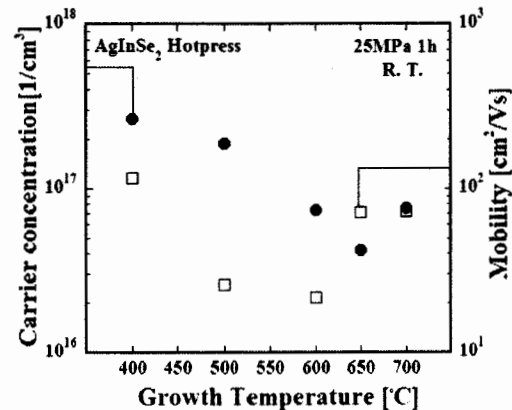


Fig. 4 Carrier concentration and electron mobility

考えられる。また、移動度は増加傾向を示した。移動度が増加した原因として、成長温度が上昇するにしたがって結晶性が良くなったことが原因だと考えられる。抵抗率のときと同様、成長温度700 °Cでのキャリア濃度は $7.6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 、移動度は $73 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ であった。これらの値は、VGF法で作成された AgInSe_2 バルク結晶¹⁰⁾と近い値であった。蒸着法で作成された AgInSe_2 薄膜では、キャリア濃度は $2.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、移動度は $18 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ と報告されている⁷⁾。本実験で得られた値に比べ、キャリア濃度が高く、移動度が低い。これは、バルク結晶のダイス内部での拡散過程と薄膜の基板への堆積過程が異なるためと考えられる。また、ホール測定の結果、ホール係数は全ての試料で負の値を示したので、本実験で作成した試料は全てn型であった。サーモプローブ分析の結果でも、全ての試料でn型の伝導型を示した。ドナー性欠陥がアクセプター性欠陥よりも多く存在しているためn型の伝導型を示したと考えられる。 AgInSe_2 に関する論文^{3, 7, 8, 24)}によると、サーモプローブ分析でn型を示したという報告があるが、本研究で作成した試料においても同様の結果が得られた。

3.6 透過率測定

Fig. 5 に、XRD の結果より AgInSe_2 の単相が得られた成長温度 700 °C における、横軸をエネルギー、縦軸を $(\alpha h\nu)^2$ として禁制帯幅を算出したグラフを示す。この結果から室温での禁制帯幅は 1.204 eV を得た。文献と比較して、バルク結晶の文献では 1.216 eV⁸⁾、1.225 eV²⁶⁾、薄膜の文献では 1.21 eV²⁷⁾、1.25 eV²⁸⁾ と報告されている。本実験で得られた値は文献値と比べ、若干低い値となった。これはキャリア濃度や組成比の相違により、禁制帯幅が低い値となったと考えられる。

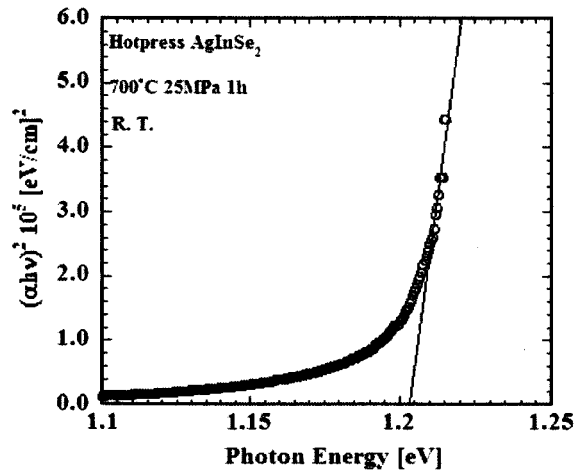


Fig. 5 Relationship between $h\nu$ and $(\alpha h\nu)^2$.

4. まとめ

粉末二元系材料 Ag_2Se 、 In_2Se_3 を用いて、ホットプレス法により、 AgInSe_2 バルク結晶の作成を試みた。圧力25 MPa、成長温度1時間で、成長温度400 °Cから700 °Cと変化させた。

X線回折の結果より、全ての試料で多結晶であった。成長温度400 °Cでは、 AgInSe_2 のピークがわずかに観察されたが、粉末二元材料のピークや AgIn_5Se_8 のピークが顕著に観察された。成長温度増加にしたがって、粉末二元系材料のピークは600 °Cで消え、 AgIn_5Se_8 のピークは650 °Cで消えた。成長温度650、700 °CでICDDカードの AgInSe_2 のピークと一致した。格子定数は、成長温度400~550 °Cで多少のバラつきが見られたが、成長温度600~700 °CでICDDカードの a 軸、 c 軸の値に近づいた。粒径サイズは成長温度増加にしたがって増大し、成長温度700°Cで80 nmが得られた。

電子プローブマイクロ分析の結果より、成長温度増加にしたがって、Ag、In、Seの組成比は化学量論的組成比に近づき、成長温度700 °Cのとき、最も近づいた。このとき、わずかにAg-poor、In-poor、Se-richであった。ホール測定、サーモプローブ分析の結果より、n型の伝導型を示したことから、 Se_{Ag} や Se_{In} のドナー性欠陥が考えられる。

比重測定の結果より、成長温度400~650 °CではICDDカードの値よりも小さい値となった。650 °CのXRDスペクトルでは異相が観察されなかったが、比重測定の結果より、異相の存在が考えられる。成長

温度700 °Cのとき、ICDDカードの値に最も近い5.80 g/cm²となり、X線回折の結果を含め、成長温度700 °CでAgInSe₂の単相が得られた。

ホール測定の結果より、成長温度増加にしたがって、抵抗率は増加、キャリア濃度は減少、移動度は増加傾向を示した。X線回折スペクトルより成長温度増加にしたがって、異相が減少していることから、欠陥が減少し、結晶性が良くなったことが考えられる。XRDの結果より単相が得られた成長温度700 °Cのとき、抵抗率は0.16 Ωcm、キャリア濃度は7.6×10¹⁶ cm⁻³、移動度は73 cm²/Vsを得た。

透過率測定の結果より、XRDの結果から単相が得られた成長温度700 °Cの試料における禁制帯幅を見積もった結果、禁制帯幅は1.204 eVを得た。

引用文献

- 1) 山本 信行：新しい機能性半導体材料をめざして(アイビーシー出版部、1989)。
- 2) M. A. Contreras, K. Ramanathan, J. AbuShama, F. Hasoon, D. L. Young, B. Egaas and R. Noufi, Prog.
- 3) Photovolt: Res. Appl. **13** (2005) 209.
- 4) K. Yamada, N. Hoshino and T. Nakada, Sci. Technol. Advanced. Mater. **7** (2006) 42.
- 5) S. M. Patel and A. D. Patel, Mater. Lett. **2** (1983) 127.
- 5) P. Paul Ramesh, O. Md. Hussain, S. Uthanna, B. Srinivasulu Naidu and P. Jayarama Reddy, Mater. Lett. **34** (1998) 217.
- 6) H. Mustafa, D. Hunter, A. K. Pradham, U. N. Roy, Y. Cui and A. Burger, Thin Solid Films **515** (2007) 7001.
- 7) H. Matsuo, K. Yoshino and T. Ikari, Phys. Stat. Sol. (c) **3** (2006) 2644.
- 8) S. Ozaki and S. Adachi, J. Appl. Phys. **100** (2006) 113526.
- 9) I. V. Bodnar, Inorg. Mater. **40** (2004) 914.
- 10) K. Yoshino, N. Mitani, M. Sugiyama, S. F. Chichibu, H. Komaki and T. Ikari, Physica B **302-303** (2001) 349.
- 11) K. Yoshino, H. Komaki, K. Itani, S. F. Chichibu, Y. Akaki and T. Ikari, J. Cryst. Growth **236** (2002) 257.
- 12) A. Kinoshita, H. Matsuo, K. Yoshino, T. Ikari and K. Kakimoto, Phys. Stat. Sol. (c) **3** (2006) 2093.
- 13) K. Yoshino, H. Komaki, T. Kakeno, Y. Akaki and T. Ikari, J. Phys. Chem. Solid. **64** (2003) 1839.
- 14) H. Komaki, K. Yoshino, S. Seto, M. Yoneta, Y. Akaki and T. Ikari, J. Cryst. Growth **236** (2002) 253.
- 15) ICDD No. 00-035-1099.
- 16) ICDD No. 00-024-1041.
- 17) ICDD No. 00-034-0455.
- 18) ICDD No. 00-036-1397.
- 19) Otfried Madelung 編：Semiconductors-Basic Data (Springer).
- 20) 国立天文台 編：理科年表 (丸善、1999)。
- 21) J. L. Shay, B. Tell, H. M. Kasper and L. M. Schiavone, Phys. Rev. B **7** (1973) 4485.
- 22) 粉体工学会 編：粉体工学便覧 第2版 (日刊工業新聞、1998)。
- 23) 権田俊一：分子線エピタキシー p. p. 15-16 (培風館、1994)。
- 24) M. C. Santhosh Kumar and B. Pradeep, Vacuum **72** (2004) 369.
- 25) 権田 俊一監修：薄膜作製応用ハンドブック (株式会社エヌ・ティー・エス、2003)。
- 26) J. G. Albornoz, R. Sena and M. León, J. Appl. Phys. **97** (2005) 103515.
- 27) A. El-Korashy, M. A. Abdel-Rahim and H. El-Zahed, Thin Solid Films **338** (1999) 207.
- 28) A. H. Ammar, A. M. Farid and M. A. M. Seyam, Vacuum **66** (2002) 27.

(共同研究)

大振幅内部孤立波の二次元相互作用の研究

研究代表者 鹿児島大学工学部 柿沼太郎

研究の目的

最近、辻・及川らは二層流体における有限小振幅モデルを用いて孤立波の二次元相互作用の数値的研究を行い、浅水波の場合と同じように、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うることを示した。しかし、その結果を得るために用いたモデルが微小振幅の仮定の下に導かれたものであるから、振幅の大きな孤立波の相互作用の場合でもそのような結果が得られるかどうかはわからない。その計算を行うにあたっては、二層流体における界面の3次元的運動を精度よくかつ効率よく追跡できる計算法が必要である。この目的に対して、最近、柿沼が開発した変分法に基づく方法が非常に有効であるように思われる。そこで、柿沼グループと辻・及川のグループで協力してこの問題の解明にあたらうとするのが本共同研究の目的である。

計算法と成果の概要

この計算法では非圧縮、非粘性の多層流体における渦なし運動に対する基礎方程式系を変分原理に書き換え、それぞれの層における速度ポテンシャルを鉛直座標 (z とする) の適当な関数系で展開し、それを変分原理に代入し、解くべき方程式系から z 座標を消去する。 z の関数系を適切に選んで、展開項を十分とれば、厳密な方程式にいくらでも近くなる。

われわれが扱う上下を水平な剛体壁で挟まれた二層流体 (密度は上層で ρ_1 、下層 ρ_2 、静止状態での厚さは上層で h_1 、下層で h_2) に対しては、上層および下層の速度ポテンシャル ϕ_1 および ϕ_2 を関数系 $\{Z_{m,\alpha}(z), \alpha = 0, 1, \dots\}$ を用いて

$$\phi_m(\mathbf{x}, z, t) = \sum_{\alpha=0}^{N-1} Z_{m,\alpha}(z) f_{m,\alpha}(\mathbf{x}, t) \equiv Z_{m,\alpha} f_{m,\alpha}, \quad (m = 1, 2) \quad (1)$$

と展開すると、上層に対して

$$Z_{1,\alpha}^\eta \frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\int_0^\eta Z_{1,\alpha} Z_{1,\beta} \nabla f_{1,\beta} \right) - \int_0^\eta \frac{Z_{1,\alpha}}{\partial z} \frac{Z_{1,\beta}}{\partial z} dz f_{1,\beta} = 0, \quad (2)$$

$$Z_{1,\beta}^\eta \frac{\partial f_{1,\beta}}{\partial t} + \frac{1}{2} Z_{1,\beta}^\eta Z_{1,\gamma}^\eta \nabla f_{1,\beta} \cdot \nabla f_{1,\gamma} + \frac{1}{2} \frac{Z_{1,\beta}^\eta}{\partial z} \frac{Z_{1,\gamma}^\eta}{\partial z} f_{1,\beta} f_{1,\gamma} + g\eta + \frac{p_1}{\rho_1} = 0. \quad (3)$$

下層に対して

$$Z_{2,\alpha}^\eta \frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\int_{-(h_1+h_2)}^\eta Z_{2,\alpha} Z_{2,\beta} \nabla f_{2,\beta} \right) - \int_{-(h_1+h_2)}^\eta \frac{Z_{2,\alpha}}{\partial z} \frac{Z_{2,\beta}}{\partial z} dz f_{2,\beta} = 0, \quad (4)$$

$$Z_{2,\beta}^\eta \frac{\partial f_{2,\beta}}{\partial t} + \frac{1}{2} Z_{2,\beta}^\eta Z_{2,\gamma}^\eta \nabla f_{1,\beta} \cdot \nabla f_{1,\gamma} + \frac{1}{2} \frac{Z_{2,\beta}^\eta}{\partial z} \frac{Z_{2,\gamma}^\eta}{\partial z} f_{2,\beta} f_{2,\gamma} + g\eta + \frac{p_1 + (\rho_2 - \rho_1)gh_1}{\rho_2} = 0. \quad (5)$$

を得る。 $\alpha = 0, 1, \dots, N-1$ であって、 β, γ については和をとっている。また、 $z = \eta(\mathbf{x}, t)$ は界面を、 p_1 は界面における圧力を表し、上側境界面は $z = 0$ 、下側境界面は $z = -(h_1 + h_2)$ である。さらに、 $Z_{m,\alpha}^\eta = Z_{m,\alpha}|_{z=\eta}$ 、 $\partial Z_{m,\alpha}^\eta / \partial z = \partial Z_{m,\alpha} / \partial z|_{z=\eta}$ である。

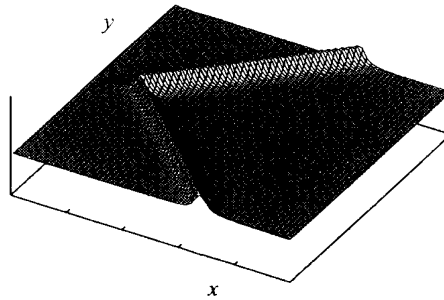


図 1: 初期条件のイメージ

われわれの目標は、図 1 のように孤立波を V 字型にセットした初期値からスタートしたとき、相互作用がどのように起こるかということであるが、この計算を行うためには以下のような課題がある：

1. $Z_{m,\alpha}(z)$ の選択.
2. 孤立波の 1 次元伝播を精度よく計算できるスキームを開発.
3. 1 次元（深さ方向を含めると 2 次元）の有限振幅の孤立波解とそれに伴う流れの計算法.
4. 2 次元（深さ方向を含めると 3 次元）スキームの開発.

課題 1 に対して： $Z_{m,\alpha}(z)$ は出来るだけ少ない個数の展開でよい結果が得られるように選ぶ必要がある。全層の深さが孤立波の水平スケールに比べて浅いときには、 $Z_{m,\alpha}(z)$ は z のベキ関数から作られる系でよいであろう。これはすでにいくつかの例で実証済みである。しかし、全層の深さが深い場合には、今後検討を要する。

課題 2 に対して：1 次元伝播でも fully nonlinear な非定常計算はまだそれほど多くはない。それ自体この方法を用いて研究できることがたくさんある。今年度の成果の 1 つは、この方法を用いたスキームで、ステップ状の初期値からの孤立波の形成過程を調べ、このスキームの有効性を示すとともに、 $N = 3$ で十分よい結果が得られることを示したことである。この結果は現在 Int. J. Numer. Meth. Fluids に投稿中である。

課題 3 に対して：これについてはかなり大きな振幅まで、摂動法による解析解が利用出来る。また、数値計算による方法は積分方程式を利用した方法など様々ある。 $Z_{m,\alpha}$ を定めた時の上記の方程式 (2) から (5) の孤立波解を求めるのも 1 つの方法である。

課題 4 に対して：これについては今年度上記の方法を用いた差分スキームで簡単な 2 次元問題の例題を解くことが出来た。しかし、差分法がよいのか、辻らが使ってきたスペクトル法がよいのかの具体的な検討は今後の課題である。

研究組織

- 研究代表者 柿沼太郎（鹿児島大学工学部）
 研究協力者 中山恵介（北見工業大学工学部）
 研究協力者 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）

太陽電池用高品質多結晶シリコンの結晶成長および結晶評価に関する研究

豊田工業大学 半導体研究室 大下祥雄

目的

太陽電池の生産量はここ数年約30%の伸び率を維持している。市場に出ている太陽電池のうち、約90%が結晶系太陽電池であり、中でも多結晶シリコンの占める割合は全体の60%を超えている(図1)。しかし、現在量産されている多結晶シリコン太陽電池の変換効率は未だ16%程度と低い。従来、多結晶シリコン太陽電池の変換効率が低い理由としては、多結晶の粒径が小さく、光により生成された少数キャリアの多くが粒界で再結合するためであるとされてきた。そのため、多結晶シリコンの粒径を大きくすることが、変換効率を向上させるために必要不可欠であるとして研究開発が進められてきた。

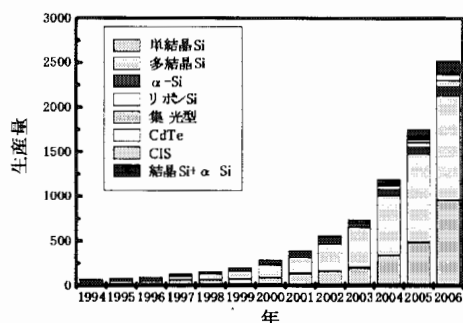


図1 太陽電池生産量の内訳

しかし、少数キャリアの拡散長を超える粒径が実現したにもかかわらず、期待されるほどの変換効率が得られていない。十分に大きな粒径を有する多結晶シリコン太陽電池の変換効率が依然低い理由は、粒界近傍に存在する結晶欠陥と結晶中に残留する金属原子、さらには酸素や炭素からなる複合欠陥が再結合中心として働いているためであると考えられる。

一方、太陽電池市場の拡大にともない、従来よりも鉄などの不純物を多く含む原料を使用する必要性が高くなってきた。それゆえ、先の不純物に起因する問題はより深刻なものとなっている。本研究では、低品位なシリコン原料を用いているにもかかわらず、再結合中心の少ない多結晶シリコンを成長させ、高い変換効率を有する多結晶シリコン太陽電池

を実現することを目的とする。

以上に述べたような状況において、資源量や信頼性などの観点から、結晶シリコン太陽電池に関する研究開発は以前にまして重要となっている。これに対し我々は、九州大学柿本研究室の協力のもと、シリコン結晶成長技術やパッシベーション技術などに関する研究開発を進めている。本報告では、今年度の成果の一部を紹介する。

成果

多結晶シリコン太陽電池の特性向上を目指して、豊田工業大学においては、精密な温度制御が可能で、結晶成長中の坩堝の回転が可能な新たなキャスト成長炉の開発を進めている(図2)。本装置は、従来の1ゾーンヒーターではなく、坩堝側面の2ゾーンヒーターに加えて、坩堝上部および下部に半径方向の温度勾配を制御するためのヒーターを配置してある。なお、使用可能な坩堝のサイズは、円筒型の坩堝で最大直径150mm、角型で1辺100mmである。本結晶成長炉に対して、結晶成長中のシリコン融液温度分布などを九州大学柿本教授が開発したシミュレーターを用いて予測すると共に、実際に結晶成長を行い各種実験を進めている。

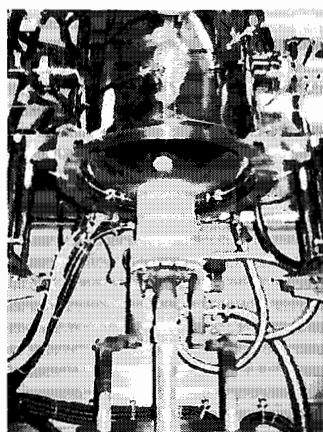


図2 キャスト炉

従来の研究により、Secco エッチングなどにより現れるエッチピットの数と平均的な少数キャリア寿命との間には強い相関が存在することが示されてい

る。本結果は、現在では結晶粒内の欠陥でのキャリア再結合が変換効率の低下の主な原因となっていることを意味する。すなわち、多結晶シリコン太陽電池の変換効率を向上させるには、欠陥構造の解析や欠陥形成機構を明らかにし、それら欠陥密度を低減させることが必要不可欠な状況にある。

エッチピットとして現れる欠陥をTEMにより観察した結果、マイクロツイン、マイクロツインに挟まれた領域に存在する転位、それら転位の集合体、多くの欠陥が集まった非晶質に近い領域などが観測された。詳細な構造に関しては現在解析中であるが、酸素析出において形成される欠陥構造に類似する部分もあり、結晶成長中に発生した微少な析出物がそれら欠陥の生成原因である可能性が高い。特に、結晶成長速度が速い場合において、成長の後半で欠陥を多く含む微少結晶粒が形成される。その領域では、SiCならびにSiNが多く析出する。

シリコン融液中の炭素が欠陥形成に関与している可能性を確かめるため、シリコン結晶中の格子位置に存在する炭素濃度をFTIR測定により求めた(図4)。これら格子位置炭素の状態ならびに量は、格子間炭素の振動に対応する信号 607cm^{-1} における吸収として求めた。図は、キャスト法においてヒーター移動速度を変えて成長させた多結晶シリコン中のインゴット底部から上部にかけての格子位置炭素濃度である。炭素濃度は、インゴット底部から濃度が上昇しその後一定となる。炭素濃度が一定となった領域では、結晶中の炭素濃度は固溶限に達している。炭素の偏析係数は0.07であるため、結晶成長にともないシリコン融液中の炭素濃度は上昇する。それゆえ、固液界面近傍の融液側において偏析により濃度が上昇した炭素が、熱的な過冷却に加えて、固液界面近傍において組成的な過冷却を引き起こすことが予想される。そ

の結果、固液界面近傍の融液中でSiCの析出が生じ欠陥が発生した可能性が高い。離型材シリコン窒素が原因と考えられるシリコン融液中の窒素に関して、結晶成長初期においてシリコン融液中に多く含まれ、かつ偏析係数が小さいことから、炭素と同様な理由によりSiNが析出したと考えられる。

上記炭素濃度を低減させることを目的として、結晶成長中の坩堝を回転しシリコン融液を強制的に対流させるACRT法を採用することにより、炭素濃度が均一に分布することを数値シミュレーションにより予測した。実際にACRT法により結晶成長した結果、ACRT法で成長したインゴットでは、通常のインゴットに比べて炭素濃度が低く抑制されていることが判る。また炭素濃度の均一性もACRT法のインゴットの方が高い結果が得られた(図5)。

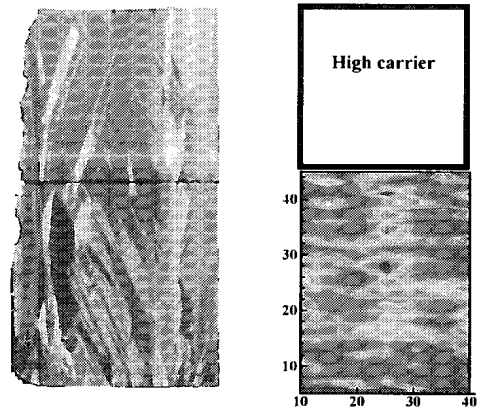


図4 ACRT法により成長させた結晶

謝辞

本共同利用研究の機会を与えて頂きました九州大学応用力学研究所ならびに、共同研究を通じてご指導頂きました柿本教授に深く感謝いたします。

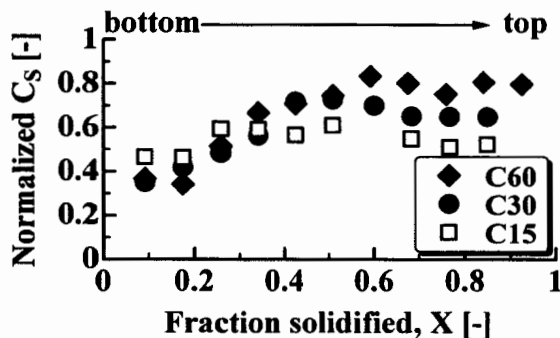


図3 結晶中の格子位置炭素濃度

アンチローリングタンクを用いたパラメトリック横揺れ防止に関する研究

大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 橋本博公

研究目的

近年、海上物流量の増加に伴い輸送効率追求の船型改良が目覚しいが、その結果としてコンテナ船や自動車運搬船においてパラメトリック横揺れという深刻な横揺れ現象が報告されるようになってきている。パラメトリック横揺れの検討は国際海事機関 (IMO) や国際試験水槽委員会 (ITTC) でも急務の課題とされており、その防止の検討が強く望まれている。パラメトリック横揺れの発生を抑えるためには、タンク内水の位相差を利用して減揺効果を得るアンチローリングタンクの装備が有効であるが、その効果を定量的に推定するには制限水路内の大変形流動を取り扱うことのできる計算手法が必要となる。

本研究では、応用力学研究所界面動力学分野で開発されてきた界面の分裂や合体などまで取り扱い可能な粒子法 (MPS 法) を用いたアンチローリングタンク単独での性能評価と、大阪大学が開発してきたパラメトリック横揺れ予測のための非線形船体運動数値シミュレーションを組み合わせることで、パラメトリック横揺れ防止装置としてのアンチローリングタンクの設計・性能評価手法の確立を目指す。

邪魔板付きアンチローリングタンクの自由振動試験

はじめに、MPS 法を用いたアンチローリングタンク単独性能の推定精度を検証するために、タンク両舷をつなぐダクトの高さを水の移動周期が船体横揺れ固有周期に合致する 7.5mm に設定し、実際のアンチローリングタンクに採用されている造渦促進用の 2 次元邪魔板を各ウィングタンクの底面に取り付けた状態にて、タンク左右舷に強制的に水位差を与えた後に開放する自由振動試験を実施した。邪魔板の高さ 2 種類、取り付け位置 2 種類の合計 4 パターンで実験を行った結果、高い邪魔板をダクト側に寄せた場合に最も大きな減衰効果が得られた。

アンチローリングタンクはタンク水の移動周期を船体の横揺れ周期に一致させることで最大の効果が得られるため、タンク水の移動周期の推定が不可欠である。また、摩擦や造渦によってタンク水の運動エネルギーを散逸させる減衰力の推定がパラメトリック横揺れ防止効果の推定には重要となり、従来はこれらの推定にタンクの模型試験が用いられてきた。本研究ではこの模型試験の代替として、MPS 法を用いた数値実験の可能性を検討した。MPS 法を用いたアンチローリングタンクの自由振動試験の再現については、研究協力者である九州大学応用力学研究所界面動力学分野の末吉が担当し、タンクの自由振動試験の手順に倣って、強制的にタンク両舷に水位差を与える粒子配列を初期状態とした数値計算を実施した。その結果、粒子間距離を 0.5mm (総粒子数 約 50000) に設定することで、邪魔板の高さや取り付け位置に関わらず、タンク水の移動周期および減衰力を実用的な精度で推定できることを確認した。

邪魔板付きアンチローリングタンク装備コンテナ船の自由航走模型実験

アンチローリングタンク模型を最新の 6600TEU ポストパナマックスコンテナ模型船のデッキ上に搭載し、タンク非装備、邪魔板非装備、邪魔板の組み合わせ 4 種類の計 6 種類について、弾性ロープで曳航する模擬自由航走模型実験を実施し、波長船長比 1.0、波高波長比 0.03 の規則向波、追波中でのパラメトリック横揺れ観測実験を行った。タンクに水を入れると自由水影響によりメタセンター高さが多少変化するので、バラストウェイトを調整してメタセンター高さを同一にした。実験結果より、造渦効果を高める邪魔板を装備することでタンク単独での減衰効果は向上するが、タンク水の最大傾斜角が抑えられるため、逆にパラメトリック横揺れの最大振幅は増大することが確認された。

タンク模型試験および MPS 法による数値実験から得たタンク単独での減衰力を用いて、船体横揺れ運動とタンク水の振動運動を連成させて解くアンチローリングタンク装備船の船体運動予測シミュレーションを各邪魔板について実施した。その結果、邪魔板を有する場合でもアンチローリングタンクのパラメトリック横揺れ防止・減揺効果の精度良い推定が可能であり、邪魔板の装備が最大横揺れ振幅を増大させる実験結果を再現することができた。(Fig.1)

まとめと今後の課題

MPS 法を採用したアンチローリングタンク装備船のパラメトリック横揺れ推定手法を構築し、造渦効果促進用の邪魔板を装備した場合においても、自由航走模型実験にて観測されたアンチローリングタンクによるパラメトリック横揺れ防止効果を推定可能であることを示した。これにより、模型実験を全く必要としないパラメトリック横揺れ防止のためのアンチローリングタンク設計の道が開かれたといえる。また、パラメトリック横揺れ防止装置として最大のパフォーマンスを得るために、タンク単独での減衰力を抑えたタンク形状の検討が今後の課題となる。

成果報告

橋本博公, 末吉誠, 峯垣庄平, 「パラメトリック横揺れ防止装置としてのアンチローリングタンクの性能推定」, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 6 号, 2007, pp. 305-311

Hashimoto, H. et al. "An Application of CFD to Recent Ship Stability Problems", Proceedings of the 10th International Ship Stability Workshop, 2008, in press.

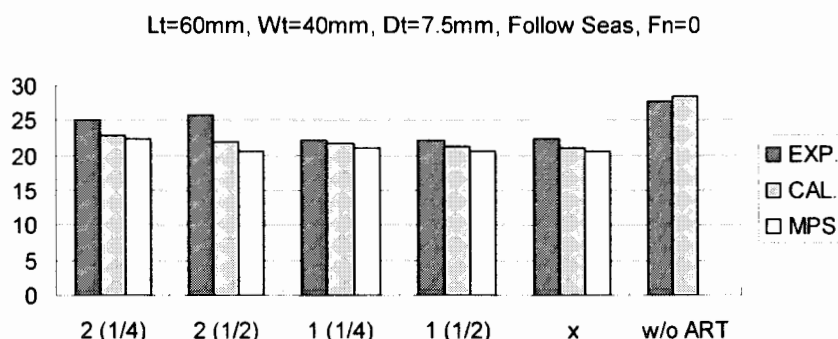


Fig.1 Comparison of maximum roll amplitude of parametric roll

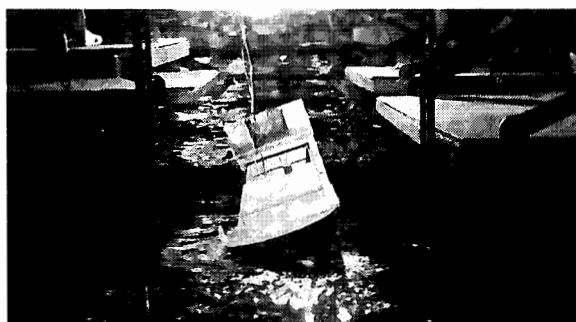


Fig.2 Parametric rolling observation

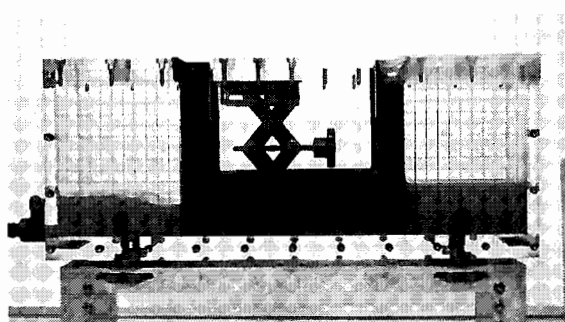


Fig.3 Free oscillation test

デジタル画像相関法を用いた咬合時における歯周組織の変形解析

福岡県工業技術センター 内野 正和

1. 背景と目的

咬合時における歯周組織、すなわち歯牙、歯根膜、歯槽骨（顎骨）の変位・変形挙動の解明は、矯正や歯周病の原因究明の観点から歯科医学分野において重要な研究課題の一つである。したがって、以前より様々な見地からそれに関する研究が行われており、計測手法も多様に開発されている。しかしながら計測装置の空間的制約などにより、歯周組織の局所的な変位量・ひずみである一点計測しか行えていない。したがって現状では、この一点計測による変位情報とロードセルによる荷重情報から荷重-変位曲線を構成し、咬合時における歯周組織の変位・変形挙動を推測しているに過ぎない。以前の研究により、歯周組織の荷重-変位曲線は咬合の初期段階で変位が急激に増加し、その後、荷重が急激に増加するという二相性が指摘されている^{(1),(2)}。しかし、その特徴を変位・変形分布と関連付けた研究はない。

そこで本研究では、咬合時における歯周組織の荷重-変位曲線を得るとともに、デジタル画像相関法を用いて歯周組織の変位・変形挙動の可視化を試み、荷重-変位曲線と変位・変形分布の関連付けを試みた。

2. 実験方法

2.1 デジタル画像相関法 デジタル画像相関法は、被測定物表面の固有に存在するパターン、あるいはスプレー塗料などの噴霧により意図的に作成したランダムパターンを利用する計測法である。被測定物の変位前後を CCD カメラなどで撮影し、得られた変位前後のデジタル画像の輝度値分布を比較することにより、被測定物表面全体の変位ベクトルを計測することが可能な方法である。変位量と変位方向は変位前の画像中の任意の位置を中心とする小さい画素領域（サブセット： $N \times N$ 画素）を基準として、変位後の画像より最も相関の良い画素領域を求め、その中心を変位後の移動位置とする。相関値 C_R を求める方法として使用した残差最小法の式を以下に示す。

$$C_R(X+u, Y+v) = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M |I_d(X+u+i, Y+v+j) - I_s(X+i, Y+j)| \quad (1)$$

ここで、 $I_s(X, Y)$ 、 $I_d(X+u, Y+v)$ はそれぞれ変位前後の画像光強度を示し、 X, Y はサブセットの中心座標、 u, v はそれぞれ x, y 方向への移動量である。また、 $N = 2M+1$ である。式(1)の総和が最小になる位置がそのサブセットの中心が移動した位置の最近接画素となる。しかしながら式(1)により得られた画素の位置が、必ずしも最も高い相関値を得るとは限らない。すなわち、実際の移動量は画素の整数倍とはならないため、画素間に相関のピークが存在することが一般的である。そのため画素間の補間を行う必要があり、それを考慮した相互相関法の式を次に示す。

$$C_d(X+u, Y+v) = \frac{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M I_d(X+u+i, Y+v+j) \times I_s(X+i, Y+j)}{\left(\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M I_d(X+u+i, Y+v+j) \right) \times \left(\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M I_s(X+i, Y+j) \right)} \quad (2)$$

補間方法は、最近接画素の前後の画素で式(2)より得られた相関値を用いて二次曲線近似による補間を行い、二次曲線の極大値を最も相関の良い位置とした。式(2)は式(1)に比べて計算に時間がかかる反面、画素間を補間する場合にはさらに良い相関が得られる利点をもつ。

2.2 試験片 可及的に生体に近い状態を実現するため、二～三日前に食肉用としてと畜されたブタの頭蓋骨を使用した。頭蓋骨から下顎骨を分離し、低速精密切断機（BUEHLER 社製 ISOMET）を用いて、後臼歯・歯根膜・歯槽骨からなる厚さ 2 mm の試験片を作製した。試験片の一例を図 1 に示す。後臼歯と歯槽骨は、歯根全域で厚さ数十～数百 μm の歯根膜と呼ばれる線維性結合組織により接着されている。なお切り出した試験片は、咬合試験を行う直前まで生理食塩水に浸け、乾燥を防いだ。

2.3 実験手順 咬合機能を模擬した圧縮試験に関しては、Gathercole⁽³⁾の手法に倣ったが、デジタル画像相関法を適用するため下記の手順で行った。(i) 生理食塩水から試験片を取り出し、表面の水分をデジタル画像相関法に用いるスプレー塗料が塗布できる程度に乾燥させる。(ii) スプレー塗料の噴霧により試験片表面にランダムパターンを形成する。(iii) 試験片の髓腔周辺の顎骨をバイスにより固定し（図 1 の破線 A）、小型卓上試験機（島津製作所製 EZ Test）に設置する。(iv) 歯冠上端（図 1 の点 B）に圧縮荷重を付与する。(v) CCD カメラにより変位画像を撮影する。

これまでの研究により単一の後臼歯に作用する咬合荷重は明らかになっているが、今回のような薄片の後臼歯試験片に作用する実際の咬合荷重は不明である。したがって本研究では、試験機による強制変位を付与することにより咬合荷重

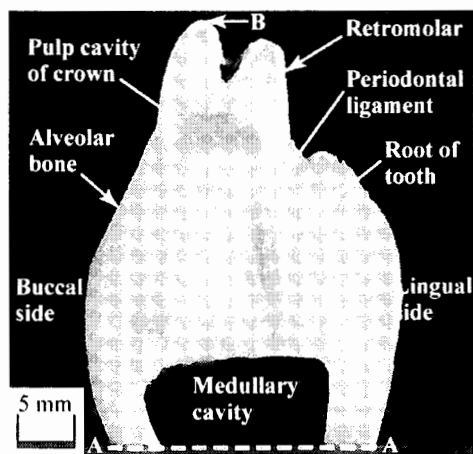


Fig. 1 Periodontium structure.

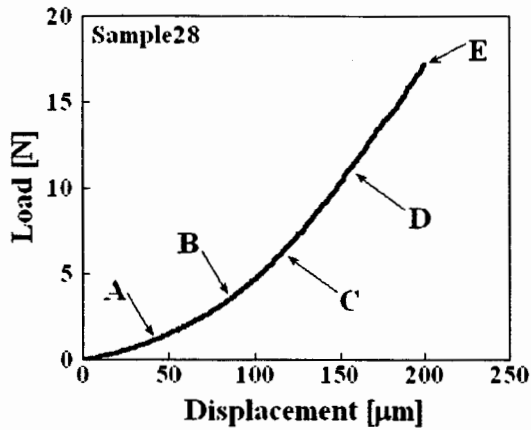


Fig. 2 Load-displacement curve.

を负荷した。その最大押し込み量は 200 μm とし、20 μm ごとに画像を取得した。

3. 実験結果

咬合試験により得られた荷重-変位曲線の一例を図 2 に示す。横軸が強制変位の値、縦軸がその時の荷重を表している。約 100 μm 程度までは荷重が緩やかに増加しているのに対し、それ以降は荷重が急激に増加しており、まえがきで述べた荷重-変位曲線の二相性が実験でも得られていることがわかる。

図 2 に示す点 A~E における変位分布を図 3 および図 4 に示す。図 3 は歯軸方向である y 方向の変位分布を示しており、白色になるほど下方向の変位分布が大きいことを意味する。また図 4 は x 方向の変位分布を示しており、白色になるほど右方向の変位分布が大きいことを意味する。まず歯軸方向である y 方向に注目する。白黒印刷の関係により図 3 からでは若干わかりにくいかもしれないが、(a)~(b) に示す 80 μm 程度までは後臼歯のみ変位しているのに対し、(c)~(e) と押し込み量が増加するにつれ、歯槽骨が変形していることがわかる。すなわち咬合の初期段階では、歯槽骨と歯根膜の間に介在する歯根膜が大きく変形することにより、変位のみが大きく増加している。一方、次の咬合段階では、歯槽骨が変形することにより、荷重が急激に増加することがわかる。

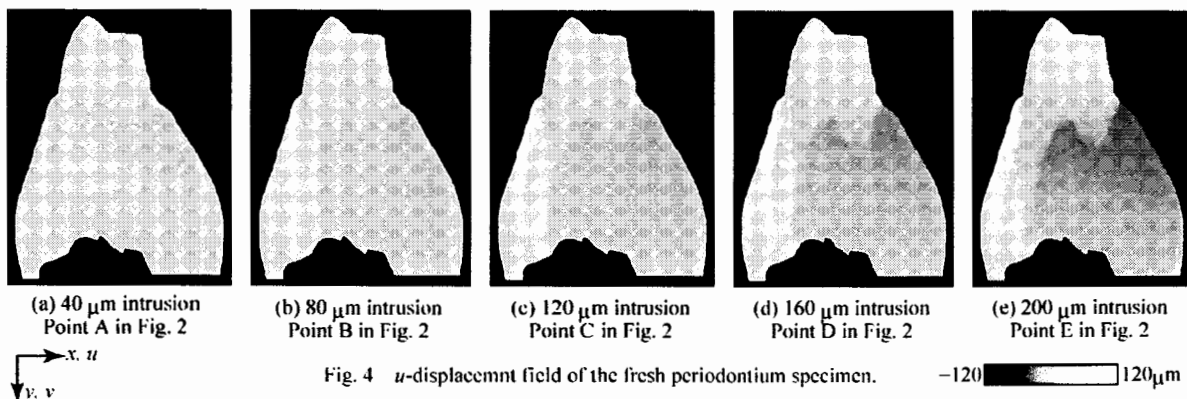
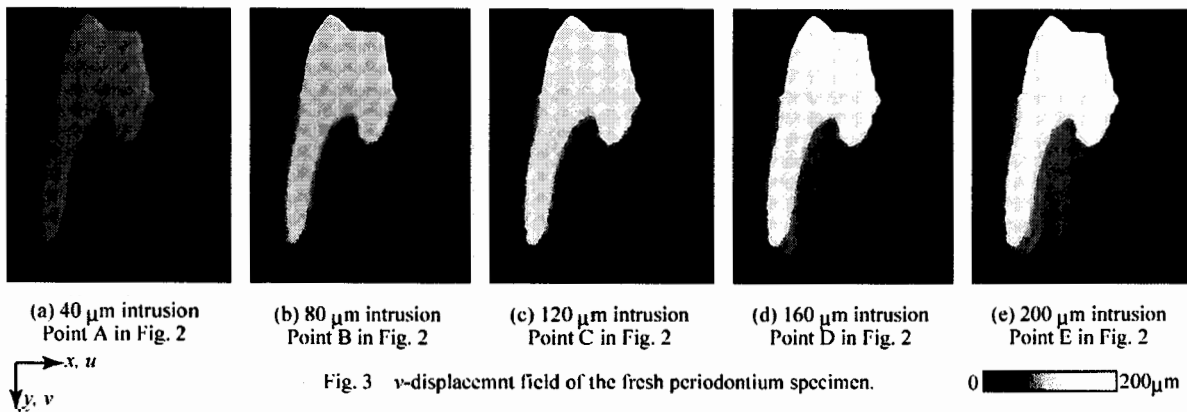
また、図 4 に示す x 方向の変位分布では、咬合が進行するにつれ、頬側の歯槽骨が大きく後臼歯の方向に変位していることを示している。これは、咬合による後臼歯の大きな変位により、歯槽骨と後臼歯の間に大きな間隙が開かないよう歯根膜が歯槽骨を引っ張っていると推測できる。

4. まとめ

咬合時における歯周組織の荷重-変位曲線を得るとともに、デジタル画像相関法を用いて歯周組織の変位・変形挙動を可視化し、荷重-変位曲線と歯周組織の変位・変形挙動の関連付けた。

参考文献

- (1) Parfitt G.J., *J. Dent. Res.*, 39-3, (1960), 608-618.
- (2) Berkovitz, B.K.B, Moxham B.J. and Newman H.N., *The Periodontal Ligament in Health and Disease 2nd Edition*, (1995), 215-241, Mosby-Wolfe.
- (3) Gathercole L.J., *Archs. Oral Biol.*, 32-4, (1987), 249-255.



高速船の非定常船尾流に関する研究

広島大学大学院工学研究科
教授 岩下 英嗣

1. 研究目的

高速船は一般商船と比べて、船の波の中での性能、すなわち設計時の耐航性能の推定が非常に重要となる特殊な船舶である。加えて船尾が打ち切られたトランザム船尾という特殊な形状を有するものがほとんどであり、その流体力学的な扱い方については今日でもなお探究すべき部分が多く残されている。昨年の共同利用研究(特定研究1)において、そのトランザム船尾を有する高速船の耐航性能理論推定法について研究を行い、トランザム船尾の取り扱い方として一つの方法を提案した。また、流体力や船体運動レベルでの水槽試験との比較を通じて、その方法が実用上妥当性のあることを確認している。本研究では、こうした背景をベースに、その方法の波形レベルでの検証を行うことを目的としている。

2. 研究方法

トランザム船尾を有する高速船の2m 供試模型を製作し、波形解析法にて定常波および非定常波の計測を行う。それらの結果と、先に提案した計算法による数値計算結果とを比較し、提案する方法がどの程度船尾流を捕捉できているのかについて考察を行う。

2m 供試模型は広島大学にて製作し、波形計測および解析は応用力学研究所深海機器力学実験水槽において研究所所有の装置、解析ツールを用いて行う。対応する数値計算は広島大学で行い、定常波、非定常波の cos 成分、sin 成分等に関して計測結果と比較検討する。

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
笹重 修平	広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻	修士課程2年	実験補助
黒川 桂介	広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻	修士課程2年	実験補助
沖野 健司	広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻	修士課程2年	実験補助
川瀬 靖彦	広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻	修士課程1年	実験補助
山下 芳郎	広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻	修士課程1年	実験補助
柏木 正	九州大学応用力学研究所	教授	実験指導

4. 研究成果報告

添付原著論文をまとめ、日本船舶海洋工学会論文集へ投稿中である。

5. 研究結果

添付原著論文に全ての研究結果を取りまとめてあるので、具体的な結果については添付原著論文をもってこれに替えることとする。

Seakeeping Estimations of Fast Ships with Transom Stern

by Muniyandy Elangovan*, *Student member* Hidetsugu Iwashita*, *Member*
Hiroyuki Saito**, *Member* Akio Ito**, *Member*

Summary

An estimation method of the seakeeping of fast ships with transom stern is proposed and validated through the comparison with experimental results. The method is based on the potential theory and the Rankine panel method is employed as a numerical computation method. A transom stern is carefully observed in the experiments and it is confirmed that the transom stern is completely dry even in free motion in waves. A condition corresponding to the observation is derived and imposed as the boundary condition at the free-surface just behind the stern.

Numerical results are compared with experiments from the aspects of hydrodynamic forces, ship motions and unsteady waves around the ship. Through the comparisons, the adequacy of the transom stern condition proposed in the present study and also the significant influence of the sinkage and trim in the seakeeping estimations are confirmed.

1. Introduction

In the design of fast ships, the the estimation of the seakeeping qualities is important and must be evaluated from the early stage of the design. This is because the encounter frequency relatively increases due to the high forward-speed and this leads to the large acceleration induced by the ship motions and large wave pressures acting on the hull. Additionally, the nonlinear phenomena such as impact pressure caused by the slamming, bow wave breaking et al. become remarkable compared with conventional ships. The forward speed effect becomes also remarkable and negligible that is an effect from the steady wave field to the unsteady wave field and can be captured even within the framework of the linear and/or quasi-linear seakeeping theories.

Notwithstanding such unconventional properties of fast ships, the strip theory has been broadly applied to their seakeeping estimations from the practical point of view. Recently, application of the three dimensional methods to the fast ships has been also proceeding. The major three dimensional method among them is a frequency-domain Rankine panel method (RPM) based on the potential theory¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾. The time-domain RPM⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾ that makes the nonlinear calculation possible is also attempted, but not yet major from the aspect of the computational cost. Most of the fast ships have the transom

stern and the wave field around the stern is also nonlinear in a sense. When we apply the potential theory to this problem, we therefore need to introduce some appropriate flow model to force the potential flow to be practical flow. The treatment can be recognized as a Kutta condition in the wing theory. This kind of modeling is not related in detail in the most of the literatures and also have not been validated sufficiently.

In this paper, we carried out two experiments for measuring hydrodynamic forces and for measuring ship motions. The unsteady wave fields are also measured in the former experiment on behalf of the pressure measurement on the hull surface. In two experiments, we observe the flow around the transom stern and a corresponding condition is derived as a transom stern condition. Consecutively we carry out numerical calculations and the results are compared with experiments to validate the proposed condition and numerical method.

2. Formulation

2.1 Boundary conditions

We consider a ship advancing at constant forward speed U in oblique regular waves encountered at angle χ , Fig.1. The ship motion $\xi_j e^{i\omega_e t}$ ($j = 1 \sim 6$)

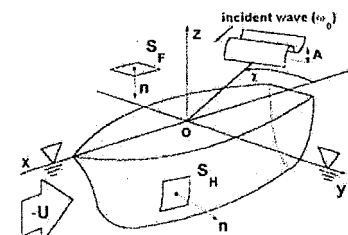


Fig. 1 Coordinate system

around its equilibrium position and the wave amplitude

* Graduate School of Engineering, Hiroshima University

** IHI Corporation

A of the incident wave are assumed to be small. ω_0 is the circular frequency and K the wave number of the incident wave. The encounter circular frequency is $\omega_e (= \omega_0 - KU \cos \chi)$. The linear theory is employed for this problem assuming ideal (potential) flow.

The velocity potential Ψ governed by Laplace's equation can be expressed as

$$\Psi(x, y, z; t) = U[\Phi(x, y, z) + \varphi(x, y, z)] + \Re[\phi(x, y, z)e^{i\omega_e t}] \quad (1)$$

where

$$\left. \begin{aligned} \phi &= \frac{gA}{\omega_0}(\phi_0 + \phi_7) + i\omega_e \sum_{j=1}^6 \xi_j \phi_j \\ \phi_0 &= ie^{Kz - iK(x \cos \chi + y \sin \chi)} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Φ means the double-body flow, φ the steady wave field and ϕ the unsteady wave field. Assuming small disturbance due to the ship, we can linearize the free-surface conditions for φ and ϕ in several forms. In this paper we adopted the following free-surface conditions derived by Yasukawa³⁾ and corresponding body boundary conditions. For φ it becomes

$$\frac{1}{2K_0} \nabla \Phi \cdot \nabla (\nabla \Phi \cdot \nabla \Phi) + \frac{1}{K_0} \nabla \Phi \cdot \nabla (\nabla \Phi \cdot \nabla \varphi) + \frac{1}{2K_0} \nabla (\nabla \Phi \cdot \nabla \Phi) \cdot \nabla \varphi + \frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0 \quad \text{on } z = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0 \quad \text{on } S_H \quad (4)$$

and for ϕ_j

$$-K_e \phi_j + 2i\tau \nabla \Phi \cdot \nabla \phi_j + \frac{1}{K_0} \nabla \Phi \cdot \nabla (\nabla \Phi \cdot \nabla \phi_j) + \frac{1}{2K_0} \nabla (\nabla \Phi \cdot \nabla \Phi) \cdot \nabla \phi_j + \frac{\partial \phi_j}{\partial z} = 0 \quad \text{on } z = 0 \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial \phi_j}{\partial n} &= n_j + \frac{U}{i\omega_e} m_j \quad (j = 1 \sim 6) \\ \frac{\partial \phi_7}{\partial n} &= -\frac{\partial \phi_0}{\partial n} \end{aligned} \right. \quad \text{on } S_H \quad (6)$$

where

$$\begin{aligned} (n_1, n_2, n_3) &= \mathbf{n}, & (m_1, m_2, m_3) &= -(\mathbf{n} \cdot \nabla) \mathbf{V}, \\ (n_4, n_5, n_6) &= \mathbf{r} \times \mathbf{n}, & (m_4, m_5, m_6) &= -(\mathbf{n} \cdot \nabla)(\mathbf{r} \times \mathbf{V}), \end{aligned}$$

$\mathbf{r} = (x, y, z)$, $\mathbf{V} = \nabla \Phi$, $K_0 = g/U^2$, $K_e = \omega_e^2/g$ and $\tau = U\omega_e/g$. m_j in eq.(6) derived by Timman & Newman¹²⁾ is an influence term from the steady flow to the unsteady flow on the body surface. Eq.(3) coincides with the Dawson's free-surface condition in the steady problem¹³⁾ and eq.(5) is its corresponding form in the unsteady problem.

If we put $\Phi = -x$, $\partial \varphi / \partial n = n_x$ and $\mathbf{V} = \nabla[-x + \varphi]$, the formulation (3) ~ (6) leads to the Neumann-Kelvin formulation.

2.2 Hydrodynamic forces and wave elevations

The steady wave elevation and pressure are evaluated by

$$\frac{\zeta_s}{(1/2K_0)} = [1 - \bar{\nabla} \Phi \cdot \bar{\nabla} \Phi - 2\bar{\nabla} \Phi \cdot \bar{\nabla} \varphi] \quad \text{on } z = 0 \quad (7)$$

$$\frac{p_s - p_0}{\rho(U^2/2)} = [1 - \nabla \Phi \cdot \nabla \Phi - 2\nabla \Phi \cdot \nabla \varphi] \quad \text{on } S_H \quad (8)$$

Integrating the pressure over the wetted surface ($z < 0$), we obtain steady forces and moment as

$$F_j = - \iint_{S_H} (p_s - p_0) n_j dS \quad (j = 1, 3, 5) \quad (9)$$

The unsteady wave elevation $\zeta_i = \Re[\zeta e^{i\omega_e t}]$ and unsteady pressure $\Re[p e^{i\omega_e t}]$ are calculated by

$$\zeta = -\frac{1}{g}(i\omega_e + U\mathbf{V} \cdot \bar{\nabla})\phi \quad \text{on } z = 0 \quad (10)$$

$$p = -\rho(i\omega_e + U\mathbf{V} \cdot \nabla)\phi - \rho \frac{U^2}{2} \sum_{j=1}^6 \xi_j (\beta_j \cdot \nabla)(\mathbf{V} \cdot \mathbf{V}) \quad \text{on } S_H \quad (11)$$

$$\text{where } \beta_j = \begin{cases} \mathbf{e}_j & (j = 1, 2, 3) \\ \mathbf{e}_{j-3} \times \mathbf{r} & (j = 4, 5, 6) \end{cases}$$

$\mathbf{e}_j (j = 1, 2, 3)$ are the unit vector in x, y, z axes.

Substituting the radiation potential in eq. (2) into eq. (11), the added mass and damping coefficients acting in i -th direction due to the motion in j -th direction are given by

$$-\frac{A_{ij}}{\rho} + i \frac{B_{ij}}{\rho \omega_e} = \iint_{S_H} \left(1 + \frac{1}{iK_0 \tau} \mathbf{V} \cdot \nabla\right) \phi_j n_i dS - \frac{1}{2(K_0 \tau)^2} \iint_{S_H} (\beta_j \cdot \nabla)(\mathbf{V} \cdot \mathbf{V}) n_i dS \quad (12)$$

The wave exciting forces acting in j -th direction is similarly obtained by substituting the diffraction term in eq. (2) into eq. (11). Putting $\nu = U\omega_0/g$, it becomes

$$\frac{E_j}{\rho g A} = -i \frac{\tau}{\nu} \iint_{S_H} \left(1 + \frac{1}{iK_0 \tau} \mathbf{V} \cdot \nabla\right) (\phi_0 + \phi_7) n_j dS \quad (13)$$

2.3 Transom stern conditions

For the steady problem that treats the steady translocation of ship in calm water, the modeling of the transom stern flow has been already proposed. Referring the Bertram¹⁴⁾ for instance, the dry transom stern condition is derived as follows. Approximating the basic flow by $\Phi \cong -x$, the steady wave elevation ζ_s at the stern should be equal to the depth z_T of the transom stern. Therefore we obtain the relation from eq.(7) in the form

$$\begin{aligned} \zeta_s &= \frac{1}{2K_0} [1 - \nabla(\Phi + \varphi) \cdot \nabla(\Phi + \varphi)] \\ &\cong \frac{1}{2K_0} [1 - (-1 + \varphi_x)^2] = z_T \end{aligned} \quad (14)$$

Then we easily get

$$\varphi_x = 1 - \sqrt{1 - 2K_0 z_T} \quad \text{at } P = (x_T, y_T, 0) \quad (15)$$

where (x_T, y_T, z_T) shows the coordinate of the transom stern.

For the unsteady problem, we carried out experiments first. Through the observation of the transom stern part in the experiments, we confirmed the following phenomena:

- 1) In the measurement of ship motions, the total waves that consists of steady wave, incident wave, diffraction wave and radiation waves due to surge, heave and pitch motions are smoothly separating away from the dry transom stern.
- 2) In the measurement of the wave forces in which the ship motion is restricted, the total waves that consists of steady wave, incident wave and diffraction wave are also smoothly separating away from the dry transom stern.
- 3) In the measurement of the added mass and damping coefficients in which the forced motions (only heave and pitch) are enforced to the model in the calm water, the total waves that consists of steady wave and heave/pitch radiation wave are also smoothly separating away from the dry transom stern.

For the diffraction problem denoted in phenomenon 2), the corresponding formulation can be obtained as follows. The total unsteady waves that consists of incident wave and diffraction wave are calculated by

$$\zeta = -\frac{1}{g}(i\omega_e + UV \cdot \nabla) \frac{gA}{\omega_0} (\phi_0 + \phi_7) \quad \text{on } z = 0 \quad (16)$$

and this must be zero at the transom stern. Then we obtain the condition

$$\left(1 - \frac{i}{K_0\tau} \mathbf{V} \cdot \nabla\right) \phi_7 = -\left(1 - \frac{i}{K_0\tau} \mathbf{V} \cdot \nabla\right) \phi_0 = -\frac{\nu}{\tau} \phi_0 \quad \text{at } P = (x_T, y_T, 0) \quad (17)$$

For the radiation problem denoted in phenomenon 3), substituting $\phi = i\omega_e \xi_j \phi_j$ into (10) and expressing the radiation wave due to mode j by ζ_j , we get the radiation wave as

$$\zeta_j = -\frac{(i\omega_e)^2}{g} \xi_j \left(1 - \frac{i}{K_0\tau} \mathbf{V} \cdot \nabla\right) \phi_j \quad (18)$$

and this must be equal to z -coordinate of the unsteady displacement at the transom stern due to each mode of the forced motion. The unsteady displacement $\Re[\alpha e^{i\omega_e t}]$ at arbitrary position on the hull is expressed by

$$\boldsymbol{\alpha} = (\xi_1 + z\xi_5 - y\xi_6)\mathbf{i} + (\xi_2 + x\xi_6 - z\xi_4)\mathbf{j} + (\xi_3 + y\xi_4 - x\xi_5)\mathbf{k} \equiv (\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z) \quad (19)$$

Considering only z component at transom stern and expressing

$$\alpha_z \Big|_{P=(x_T, y_T, 0)} \equiv \sum_{j=1}^6 \alpha_j \quad (20)$$

where

$$\alpha_3 = \xi_3, \quad \alpha_4 = y_T \xi_4, \quad \alpha_5 = -x_T \xi_5 \\ \alpha_j = 0 \quad (\text{for } j \neq 3, 4, 5)$$

the corresponding condition to phenomenon 3) can be obtained by putting $\zeta_j = \alpha_j$. This condition can be arranged in the form:

$$\left(1 - \frac{i}{K_0\tau} \mathbf{V} \cdot \nabla\right) \phi_j = \begin{cases} 0 & (j \neq 3, 4, 5) \\ 1/K_e & (j = 3) \\ y_T/K_e & (j = 4) \\ -x_T/K_e & (j = 5) \end{cases} \quad (21)$$

If the conditions (17) and (21) are satisfied at the transom stern, then the phenomenon 1) can be automatically explained. Therefore these conditions give us at least one of the solutions although the solution can not be unique. Other solutions may exist that satisfy eq. (19) without decomposing α_z into each mode when we consider the free ship motions in waves corresponding to phenomenon 1).

3. Numerical method

The RPM applied in this study is a panel shift method developed by Jensen¹⁵⁾ and Ando¹⁶⁾ for the steady problem and extended to the unsteady problem by Bertram¹⁾. The radiation condition is satisfied by shifting the collocation point one panel upward on the free surface. The method has been applied to many ships and its estimation accuracy has been confirmed up to now¹⁷⁾¹⁸⁾¹⁹⁾.

The steady and unsteady potentials, φ and ϕ_j , are both expressed by the source distributions on the body surface S_H and the free surface S_F as follows:

$$\left. \begin{matrix} \varphi(P) \\ \phi_j(P) \end{matrix} \right\} = - \iint_{S_H + S_F} \begin{Bmatrix} \sigma_s(Q) \\ \sigma_j(Q) \end{Bmatrix} G(P, Q) dS \quad (22)$$

where $P = (x, y, z)$ and $Q = (x', y', z')$ show the field point and the source point respectively, and $G(P, Q)$ is defined as

$$G(P, Q) = 1/4\pi r, \quad r = \overline{PQ}$$

The body surface and the free-surface are discretized into the finite number of constant panels, and numerical solutions for steady and unsteady problems are obtained such that a corresponding set of the free-surface condition and the body boundary condition are satisfied at collocation points. The collocation points on S_H coincides with the geometric center of each panel and those on S_F are shifted one panel upward in order to force the radiation condition numerically. This numerical radiation condition is valid only for $\tau > 0.5$ in the unsteady problem where the waves do not propagate to the forward direction of the ship¹⁹⁾.

When we impose the transom stern condition derived in the former section, both the free surface condition and the transom stern condition are imposed at collocation points just behind the transom stern²⁰⁾. Fig.2 shows the conceptual illustration of the method based on the panel shift technique. The panels just behind the transom stern are not necessary when the transom stern condition is not

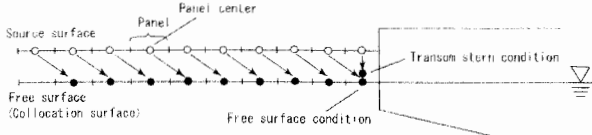


Fig. 2 Panel shift method for the transom stern problem

imposed. Then only the free surface condition is imposed on all the collocation points. When the source surface is shifted in the vertical direction as illustrated in Fig.2, the method is called 'desingularized panel method' and used for solving the fully nonlinear free-surface problem. In the present study, we need not to adopt this vertical shift since our problem is not nonlinear.

4. Experiments

Two experiments were carried out using the towing tank in RIAM, Kyushu University. One experiment is the motion measurement test to measure the ship motions and added resistance in regular head waves. Another one is the forced oscillation test to measure the added mass & damping coefficients and wave exciting forces & moment. The setup of the model and equipments is illustrated in Fig.3, and the perspective view and the principal dimensions of the model are shown in Fig.4 and Table 1 respectively. Values in the parenthesis indicate those of the forced motion test. The hull form is confidential at this moment and we can not denote the details.

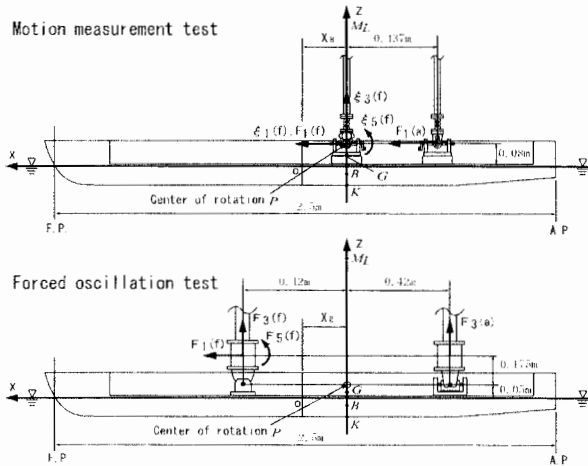


Fig. 3 Setup of the model and equipments

Table 1 Principal dimensions of the model

L_{pp} (m)	2.500	z_G (m)	0.043 (0.020)
B/d	3.000	GM_L (m)	8.584 (8.607)
z_B (m)	-0.024	κ_{yy}/L	0.186 (0.192)

The unsteady wave fields are also measured in the forced oscillation test. They are measured by using the Ohkusu's method²¹⁾ along a longitudinal line of $y/(B/2) = 1.52$ from the center line.

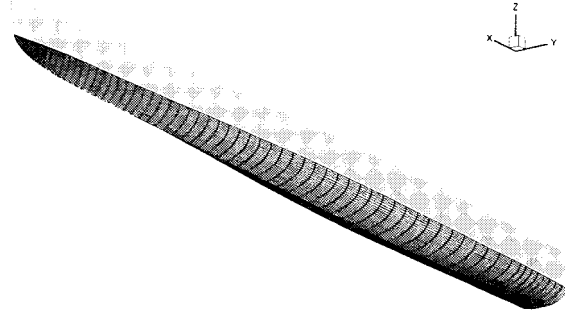


Fig. 4 Perspective view of the model with computation grids

Fig.5 shows a snapshot of the transom stern in the motion measurement test. It is confirmed that the transom stern is completely dry even when the model is freely oscillating in waves. It should be noted that the same phenomenon was also observed in the forced oscillation test.

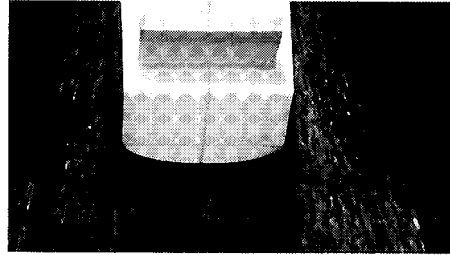


Fig. 5 A snapshot of the transom stern in the motion measurement test

5. Results and discussions

Fig.6 shows the computation grids used in the present calculations. From symmetry, the computation domain can be reduced to the half ($y > 0$). Hull surface is discretized into 1480 panels and the free surface, which consists of two regions, is 3888 panels for the main region and 297 panels for the additional region behind the stern.

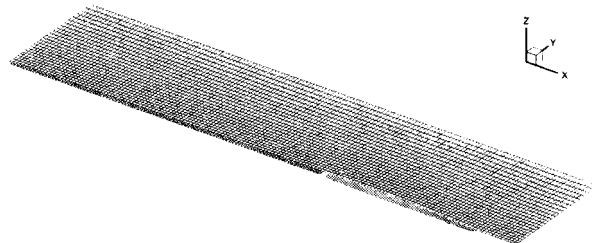


Fig. 6 Computation grids ($N_H = 1480(74 \times 20)$, $N_F = 3888(162 \times 24)$, $N_{FA} = 297(99 \times 3)$)

The region of the free surface is determined so that the disturbed waves by the ship are not truncated in the transverse direction and are captured sufficiently in the longitudinal direction.

5.1 Steady wave field

Fig.7 shows the comparison of the steady wave pattern between experiment and calculation. In both cases the ship motion is restricted in the equilibrium position so that the sinkage and trim are fixed to be zero. The steep diverging wave that is generated around ord. 7 is observed in the experimental wave pattern, but not seen in the computational result. This may be originated in the negrection of the nonlinearity in the present calculation. Nevertheless, the fundamental wave pattern is well predicted including the stern wave.

Fig.8 shows the measured resistance, sinkage and trim in the motion free test. This will be referred later when we calculate seakeeping taking the influence of the sinkage and trim into account.

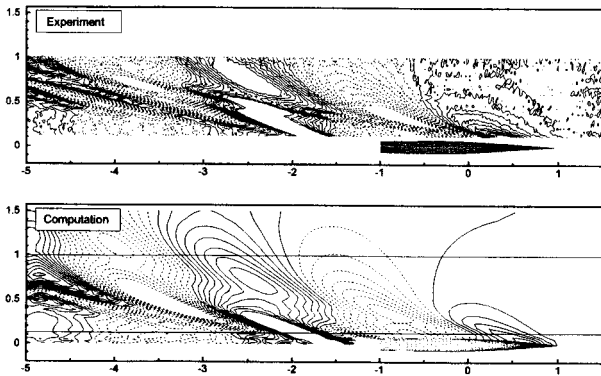


Fig. 7 Steady Kelvin wave pattern at $F_n = 0.5$

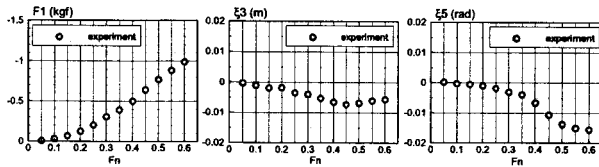


Fig. 8 Measured steady resistance, sinkage and trim

5.2 Added mass and damping coefficients

Figs.9 and 10 are added mass and damping coefficients due to forced heave and pitch motions respectively. The strip method and the RPM are compared with experiments. The strip method seems to predict pure terms well compared with experiments. However the coupling terms that show the interactive hydrodynamic effect between heave and pitch motions are not predicted so well. It will be suggested that the strip method fundamentally based on the two dimensional calculation is not sufficient to capture the forward speed effect and three dimensional effect for the fast ships where these effects become remarkable.

On the other hand, the RPM can predict even the coupling terms. Especially the RPM with transom stern condition presented in this study improves the estimation re-

markably. The bold line shows the result of the RPM with transom stern condition considering the effect of the sinkage and trim. In the calculation, measured sinkage and trim shown in Fig.8 is used and the ship hull surface is rediscritized taking them into account. It must be noted that the bold line is just a reference to show the effect due to the sinkage and trim and not to be compared with experiments and other numerical results. This is because the experiments are carried out by enforcing the heave and pitch motions to the model around its equilibrium position without taking their effects into account. The comparison of the bold line with the thin-solid line has a meaning to see a significant effect of the sinkage and trim in the seakeeping estimations.

5.3 Wave exciting forces and moment

Fig.11 shows the wave exciting forces and moment at $F_n = 0.5$ and $\chi = 180$ degs. We can not see notable differences among estimation methods. Only small advantage is confirmed in the calculation of the RPM with transom stern condition. Fast ships are generally slender as a model employed in this study. Therefore the scattering of the incident wave by the hull may not so significant and the Froude-Krylov force may be dominant. This is why even the strip method presents good estimations.

5.4 Ship motions

Result of ship motions at $F_n = 0.5$ and $\chi = 180$ degs is shown in Fig.12. The strip method underpredicts the experimental ship motions in wide range of λ/L and the resonance point of heave motion is not predicted at all. It is known that the estimation accuracy of coupling terms of the added mass and damping coefficients affects significantly the estimation of the resonance point²²⁾. Then we can conclude that the inaccurate estimation of the coupling terms observed in Figs.9 and 10 will be a cause of the large discrepancy in the motion estimation by the strip method.

The RPMs with and without transom stern condition can predict the resonance point taking account of the forward speed effect and three dimensional effect adequately. The deference between two RPMs is not so remarkable. A small improvement can be seen in pitch motion near the resonance point. It will be rational to understand that the treatment of the transom stern affects the pressure distribution at the stern directly and it affects the pitch moment due to the long moment-lever from the center of gravity. And this leads to some effect in the pitch motion as a result.

If we take account of the effect of sinkage and trim, and use a revised wetted hull surface in the computation considering them, the estimation of ship motion by RPM is drastically improved and gives almost complete prediction as shown by the bold line in the figure. It has been already well understood that the effect of sinkage and trim

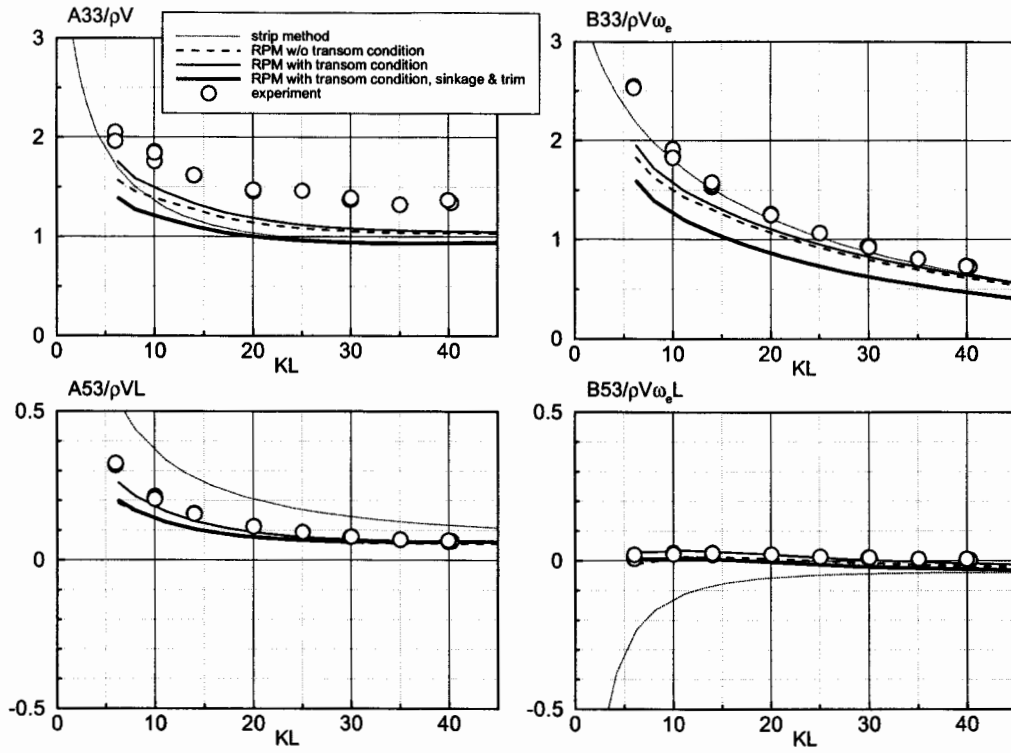


Fig. 9 Added mass and damping coefficients due to forced heave motion at $F_n = 0.5$

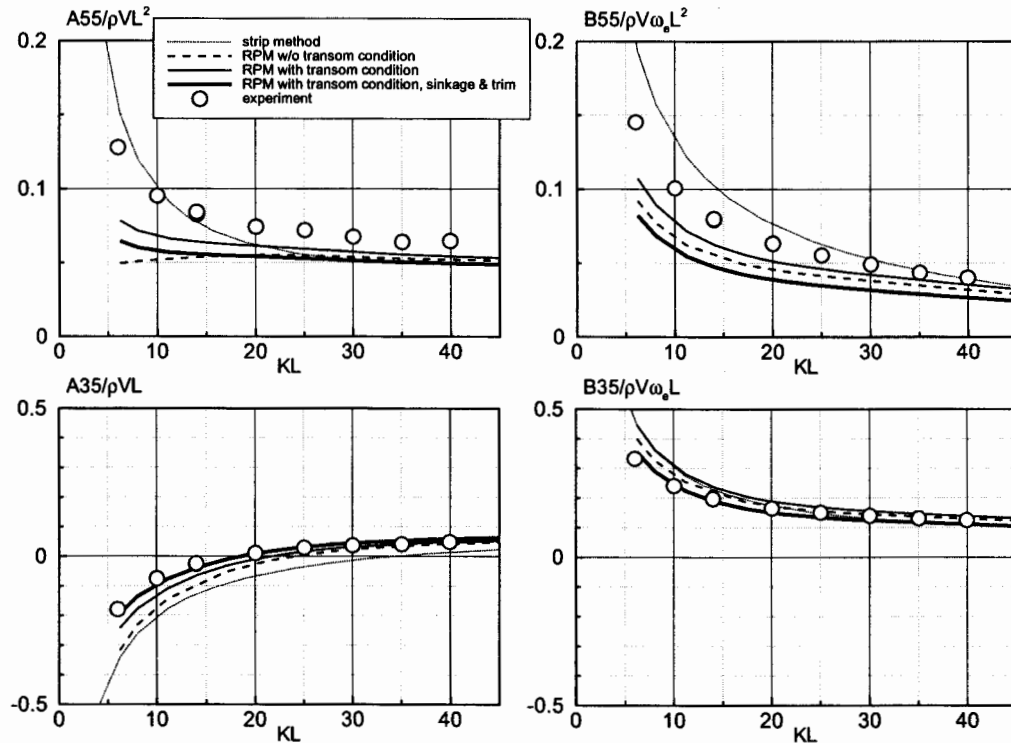


Fig. 10 Added mass and damping coefficients due to forced pitch motion at $F_n = 0.5$

is negligible when we evaluate seakeeping of the fast ships. Now we realize this knowledge also in this result.

We also carried out the computation by the strip method taking account of sinkage and trim although we did not

illustrate the result in the figure. The result was slightly improved compared with the strip method in the figure. However the resonance point could not be predicted at all even by this calculation.

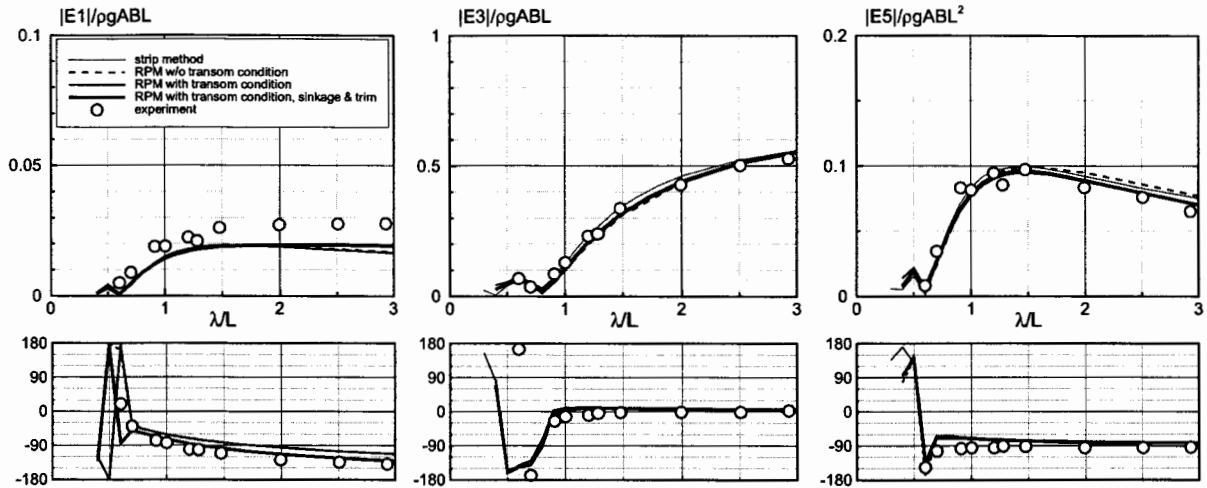


Fig. 11 Wave exciting forces and moment at $F_n = 0.5$, $\chi = 180$ deg.

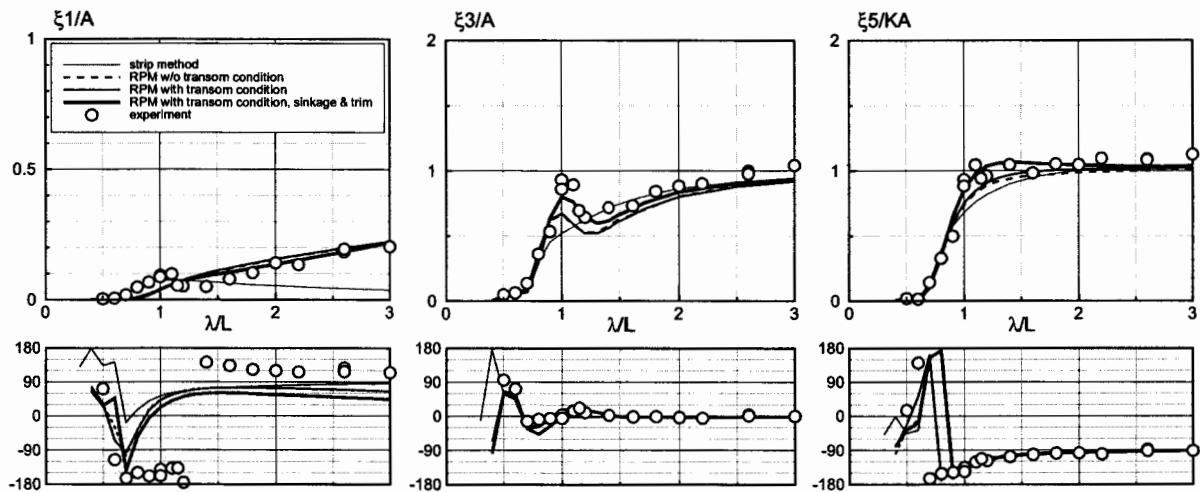


Fig. 12 Ship motions at $F_n = 0.5$, $\chi = 180$ deg.

5.5 Pressure distributions

In order to see the influence of the transom stern condition, the sinkage and trim, we illustrated the pressure distributions on the hull in Figs.13 and 14. Fig.13 is a wave pressure due to $\phi_0 + \phi_7$ and Fig.14 is a total unsteady pressure including the effect of ship motions. The unsteady pressure term related to $-\rho g z$ is also included in this calculation. We can see the influence of the transom stern condition by comparing (a) with (b) in both figures ('TSC' means the transom stern condition). The difference appears only near the stern part and the transom stern condition does not affect so much the whole pressure distribution over the hull. The comparison between (b) with (c) shows the influence of the sinkage and trim in the unsteady pressures. The shape of the wetted surface beneath the calm water surface is changed considering the sinkage and trim. We confirm that its influence spread to the whole hull surface and can not be neglected.

Figs.15 and 16 are showing the two dimensional pressure

distributions at representative ordinates. The horizontal axis θ indicates the angle of the arbitrary point along the girth on the hull surface measured from the bottom toward the water line. The origin is set along the body fixed x axis. Therefore θ becomes smaller than 90 degs. at the stem part and larger than 90 degs. at the stern part in the case of (c) since the sinkage and trim is taken into account. The effect of the transom stern condition can be seen by the comparison between (a) and (b), and it is confirmed that the pressure is remarkably different near the transom stern. On the other hand, the comparison between (b) and (c) shows significant effect of the sinkage and trim on the pressure distributions. Thus, using these figures of two dimensional pressure distributions we can justify the considerations done by the three dimensional pressure distributions, Figs.13 and 14.

5.6 Unsteady wave field

We have not yet validated our numerical results from the pint of view of the local forces such as pressure. Here we

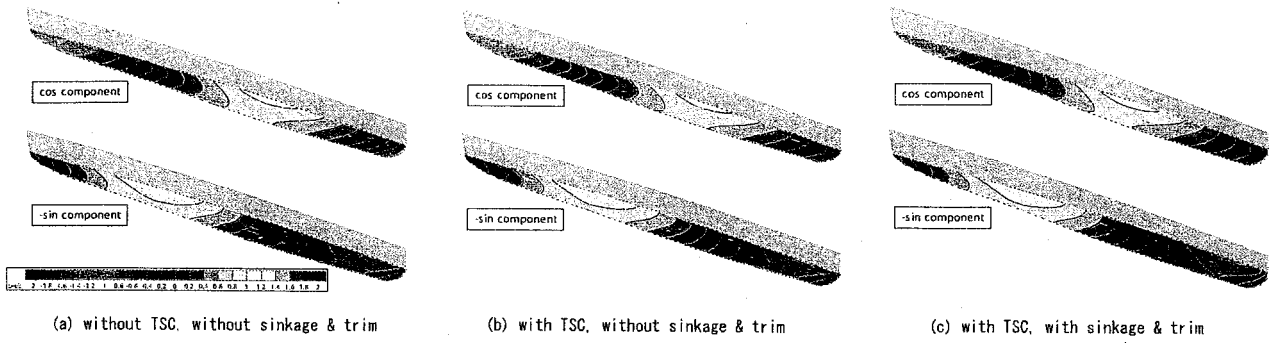


Fig. 13 Wave pressure on the hull at $F_n = 0.5$, $\lambda/L = 1.1$, $\chi = 180$ deg.

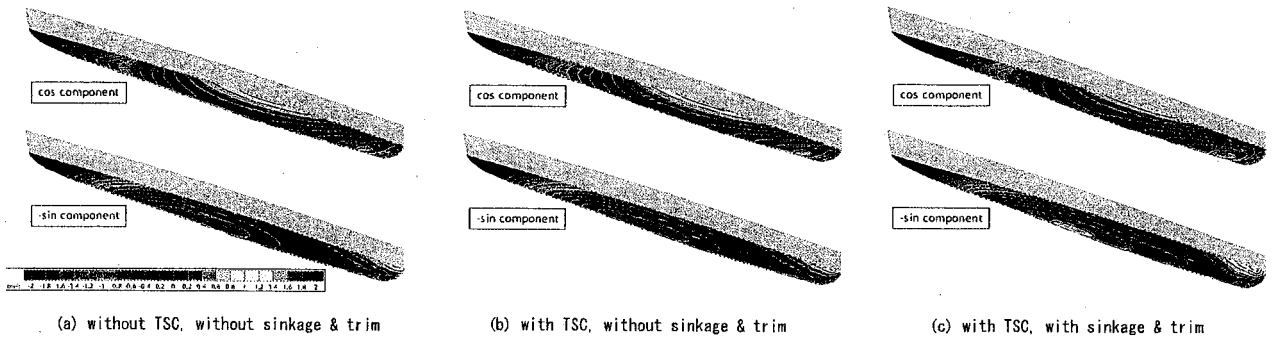


Fig. 14 Total unsteady pressure on the hull at $F_n = 0.5$, $\lambda/L = 1.1$, $\chi = 180$ deg.

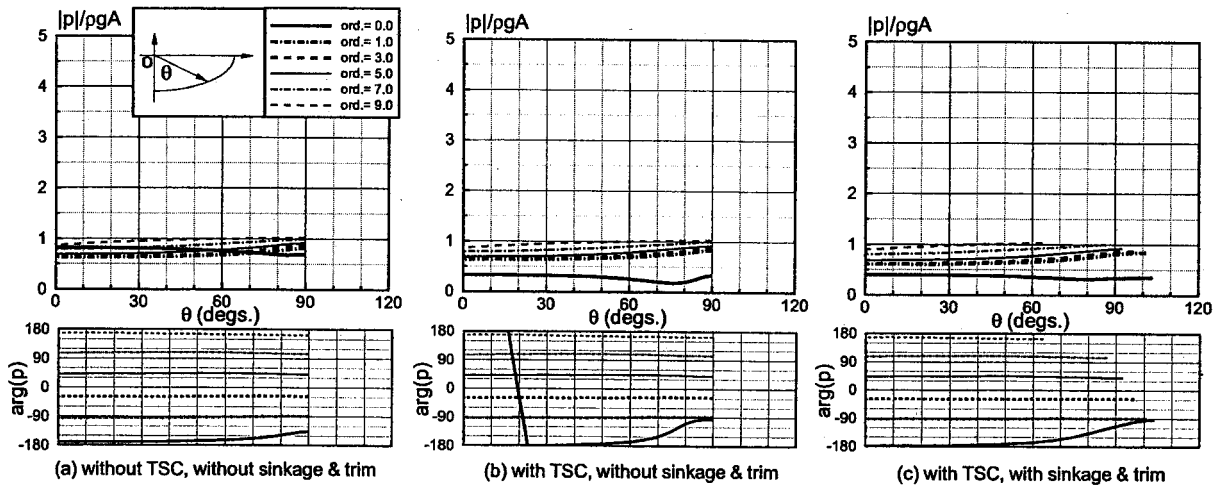


Fig. 15 Wave pressure on the hull at $F_n = 0.5$, $\lambda/L = 1.1$, $\chi = 180$ deg.

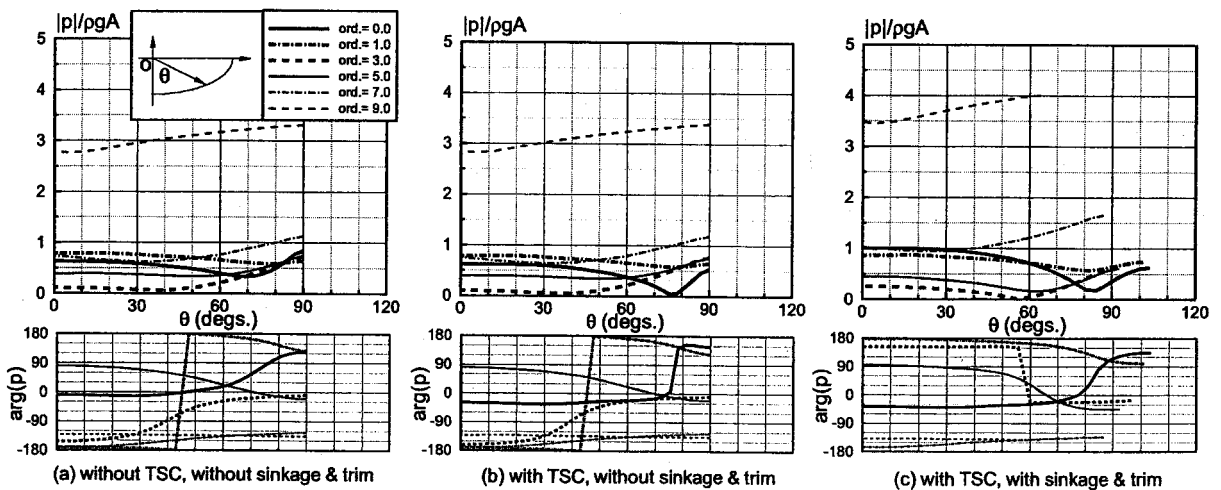


Fig. 16 Total unsteady pressure on the hull at $F_n = 0.5$, $\lambda/L = 1.1$, $\chi = 180$ deg.

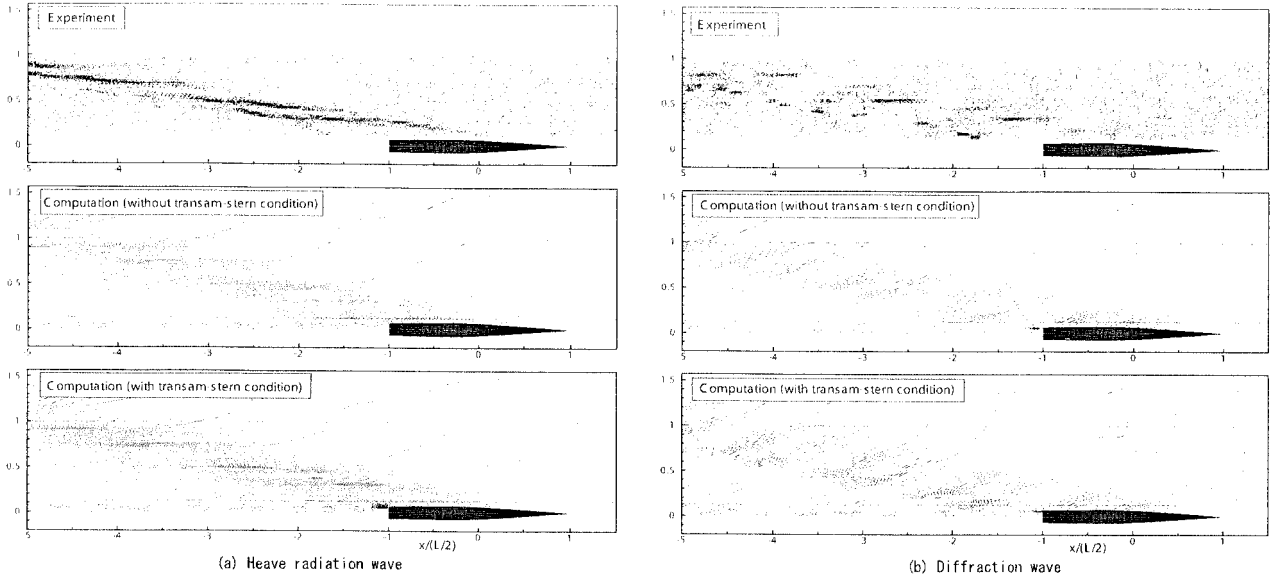


Fig. 17 Comparisons of measured and computed wave patterns ((a): Heave radiation wave at $F_n = 0.5$, $KL = 30$, $\xi_3 = 0.02\text{m}$, (b): Diffraction wave pattern at $F_n = 0.5$, $\lambda/L = 0.7$, $\chi = 180\text{degs.}$, $H/\lambda = 1/20$)

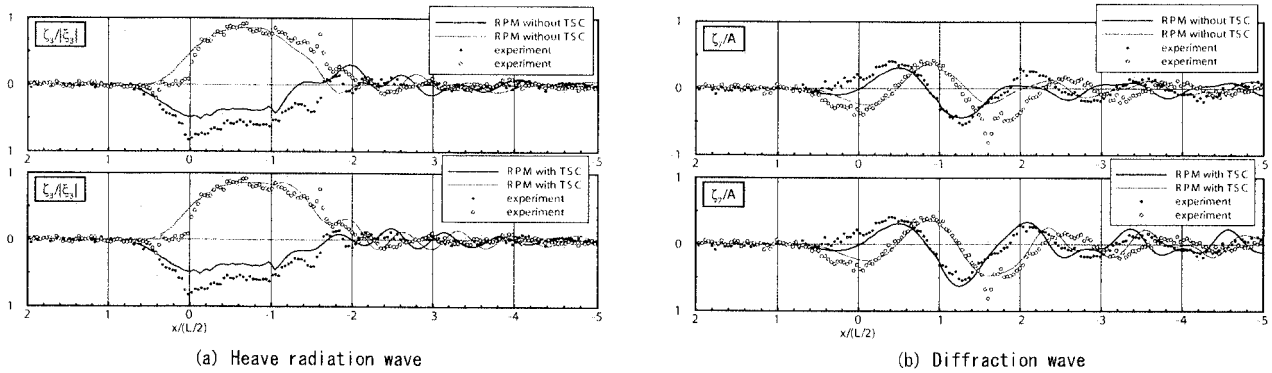


Fig. 18 Comparisons of measured and computed wave profiles along $y/(B/2) = 1.52$ ((a): Heave radiation wave at $F_n = 0.5$, $KL = 30$, (b): Diffraction wave pattern at $F_n = 0.5$, $\lambda/L = 0.7$, $\chi = 180\text{degs.}$) [bold line & solid circle: cos component, thin line & white circle: sin component]

adopt the unsteady wave elevation for this purpose. The wave elevation itself is equivalent to the pressure distribution on the free surface and its measurement is superior to pressure measurement on the hull surface from the point of view of cost and convenience.

The left and right figures in Fig.17 show the contour plots of the heave radiation wave and the diffraction wave around the ship respectively. Two numerical results with and without transom stern condition are compared with experimental results. Both calculations of heave radiation wave agree well with experiments in amplitude. The effect of the transom stern condition appears not only in the wave elevation around the stern but also in that at far field from the ship. It is observed that the transom stern condition makes the phase difference of the wave at far field slightly smaller. In the diffraction wave, the effect of the transom stern condition appears more remarkably in amplitude, and the result with transom

stern condition gives better agreement with experiment than that obtained without the condition. This can be seen more clearly if we illustrate Fig.17 by color contour. The phase difference between measured and computed diffraction waves observed at far field in Fig.17 is also seen for other ships and even for normal Froude number. This is considered to be originated in wave-wave nonlinear interaction²³). Therefore the the present computation based on the linear theory can not predict this phenomenon.

Fig.18 shows the wave profiles obtained by cutting the wave fields in Fig.17 along longitudinal axis of $y/(B/2) = 1.52$. From these figures, we confirm that the wave profile around $-2.5 < x/(L/2) < -1.5$ is fairly improved by imposing the transom stern condition. Since this part of wave is mainly generated from the stern, it is suggested that the transom stern condition improves the pressure estimation especially near the stern part.

6. Conclusions

In this paper, we proposed a transom stern condition in seakeeping calculation of fast ships, and validated it through the comparison of the numerical results and experiments. Through the study we obtained the following results:

- (1) It was confirmed from the experiments that the transom stern was completely dry even when the ship is freely oscillating in waves provided that ship advances at high speed. All the waves that consists of the incident wave, steady wave, radiation waves and diffraction wave flow away smoothly from the bottom part of the dry transom stern.
- (2) A flow model was proposed to satisfy the phenomena denoted in (1) and a corresponding boundary condition was derived.
- (3) It was confirmed that the Rankine panel method with transom stern condition rationally explains the experimental results. Additionally the accuracy of the seakeeping estimations was fairly improved by taking account of the effect of the sinkage and trim incorporated with the present transom stern condition.

Acknowledgment

Here we express our appreciation by denoting that a part of this study was supported by grants-in-aid for scientific research (No.19206093 and No.19206092), Japan Society for Promotion of Science. A part of the present work was carried out within a framework of a Joint-Use Research with RIAM, Kyushu University.

References

- 1) Bertram, V.: *Fulfilling Open-Boundary and Radiation Condition in Free-Surface Problems Using Rankine Sources*, Ship Technology Research, Vol.37/2(1990)
- 2) Sclavounos, P. D., Nakos, D. E.: *Ship Motions by a Three-Dimensional Rankine Panel Method*, Proc. 18th Symp. on Naval Hydrodyn. Ann Arbor (1990)
- 3) Yasukawa, H.: *A Rankine Panel Method to Calculate Unsteady Ship Hydrodynamic Forces*, J. Soc. Naval Arch. Japan, No.168, pp.131-140 (1990)
- 4) Takagi, K.: *An Application of Rankine Source Method for Unsteady Free Surface Flows*, J. of the Kansai Soc. of Naval Arch. Japan, No.213, pp.21-29 (1990)
- 5) Iwashita, H., Lin, X., Takaki, M.: *Combined Boundary-Integration Method for Ship Motion in Waves*, Trans. of The West-Japan Soc. of Naval Arch. No.85, pp.37-55 (1993)
- 6) Lin, W. M., Yue, D.: *Numerical Solutions for Large-Amplitude Ship Motions in the Time Domain*, Proc. 18th Symp. on Naval Hydrodyn. Ann Arbor, pp.41-65 (1990)
- 7) Nakos, D. E., Kring, D., Sclavounos, P. D.: *Rankine Panel Methods for Transient Free-Surface Flows*, 6th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, Iowa City, Iowa, pp.613-632 (1993)
- 8) Bunnik, T.: *Seakeeping Calculations for Ships, Taking into account the Non-Linear Steady Waves*, PhD Thesis, Technical University Delft, Netherland (1999)
- 9) Yasukawa, H.: *Time Domain Analysis of Ship Motions in Waves using BEM*, Trans. of The West-Japan Soc. of Naval Arch. No.100, pp.83-98 (2000)
- 10) Kataoka, S., Iwashita H.: *Estimations of Hydrodynamic Forces Acting on Ships Advancing in the Carm Water and Waves by a Time-Domain Hybrid Method*, J. Soc. Naval Arch. Japan, No.196, pp.123-138 (2004)
- 11) Kataoka, S., Iwashita H.: *Estimations of Unsteady Wave Fields of Ships Advancing in Waves by a Time-Domain Hybrid Method*, J. Soc. Naval Arch. Japan, No.196, pp.139-150 (2004)
- 12) Timman, R., Newman, J.N.: *The Coupled Damping Coefficients of a Symmetric Ship*, JSR 5/4 (1962)
- 13) Dawson, C. W.: *A Practical Computer Method for Solving Ship Wave Problems*, 2nd Int. Conf. on Numerical Ship Hydrodynamics, Berkeley(1977)
- 14) Hughes, M., Bertram, V.: *A Higher-Order Panel Method for 3-D Free Surface Flows*, Institute für Schiffbau der Universität Hamburg, No.558, pp.1-46 (1995)
- 15) Jensen, G., Mi, Z.-X., Söding, H.: *Rankine Source Methods for Numerical Solutions of the Steady Wave Resistance Problem*, 16th Symp. on Nav. Hydrodyn., Berkeley(1986)
- 16) Ando, J., Nakatake K.: *A Method to Calculate Wave Flow by Rankine Source*, Trans. of The West-Japan Soc. of Naval Arch. No.75(1988)
- 17) Iwashita, H., Bertram, V.: *Numerical Study on the Influence of the Steady Flow in Seakeeping*, Proc. of 12th IWWF, Marseille (1997)
- 18) Iwashita, H., Nechita M., Calagrossi, A., Landrini M., Bertram, V.: *A Critical Assessment of Potential Flow Models for Ship Seakeeping*, 4th Osaka Colloquium on Seakeeping Performance of Ships, pp.37-46 (2000)
- 19) Iwashita, H., Ito, A.: *Seakeeping Computations of a Blunt Ship Capturing the Influence of the Steady Flow*, Ship Technology Research, Vol.45, No.4, pp.159-171 (1998)

- 20) Eguchi, T.: *A Study on Power Estimation for High-Speed Vessels Using Panel Shift Rankine Source Method*, Trans. of The West-Japan Soc. of Naval Arch. No.95, pp.9-16 (1998)
- 21) Ohkusu, M.: *Analysis of Waves Generated by a Ship Oscillating and Running on a Calm Water with Forward Velocity*, J. Soc. Naval Arch. Japan, No.142, pp.36-44 (1977)
- 22) Kashiwagi, M., Kawasoe, K., Inada, M.: *A Study on Ship Motion and Added Resistance in Waves*, J. Kansai Soc. Naval Arch. Japan, No.234, pp.85-94 (2000)
- 23) Ohkusu, M., Iwashita, H.: *Revising the Unsteady Wave Pattern of a Ship*, Proc. of 20th IWWWFB, (2004)

垂直衝突におけるゴルフボールの力学モデルの同定

岡山理科大学 工学部 中井 賢治

1. 緒言

最近のゴルフボールとゴルフクラブの高品質化および高性能化を目指した開発は、主として飛距離、方向性の向上を中心に行われている。この目的を達成するためには、ボールとクラブヘッドの衝突に関わる諸現象を的確に把握することが重要であり、そのための第一歩として、ボールの動力学的特性を明らかにする必要がある。これまで、ゴルフボールの衝突性能（接触力、接触時間、反発係数など）に関しては、実験的に理論的に様々な研究がなされてきた。

本研究の目的は、垂直衝突におけるスリーピースゴルフボールの動的挙動を表現する3要素線形離散モデルを同定することである。ゴルフボールと標的の衝突実験を行ない、それから得られる荷重-時間、変形-時間に対してフーリエ変換し、周波数領域で複素コンプライアンスを求め、この複素コンプライアンスに最小2乗法により曲線を当てはめることにより、最初に仮定した3要素線形モデルの各定数を決定する。

2. ゴルフボールの力学モデル

剛体面に垂直衝突させたゴルフボールの動的挙動を表現するために、図1に示すような3要素線形離散モデルを開発する。本モデルは、集中質量、2つの線形ばねそしてダンパから構成されている。図中の m , k_i ($i = 1, 2$), c_2 は、それぞれボールの質量、ばね定数、粘性減衰係数である。 $x(t)$, $y(t)$, $F(t)$ は、それぞれボールの変形、図中の点Aでの変位、剛体面に作用する荷重（接触力）である。図1に示すモデルの運動方程式は次式で表される。

$$m\ddot{x} = -k_1(x - y) \tag{1}$$

ばね (k_1) と Kelvin-Voigt モデル (ばね(k_2)とダンパ(c_2)が平行) それぞれに作用する荷重は等しいため、荷重 $F(t)$ は次式で表わされる。

$$F(t) = k_1(x - y) = c_2\dot{y} + k_2y \tag{2}$$

式(1), (2)より、

$$\dot{y} = \frac{k_1}{c_2}x - \frac{k_1 + k_2}{c_2}y; \quad \dot{z} = -\frac{k_1}{m}(x - y) \tag{3}$$

となる。ここで、 $z \equiv \dot{x}$ である。 z はボール中心の速度である。ルンゲクッタ法を用いて式(3)を解くことにより (初期条件: $x(0) = y(0) = 0$; $z(0) = \dot{x}(0) = V_{in}$: ボールの初速度)、ボールの変形量 $x(t)$ を求め、それを式(2)に代入することで、荷重 $F(t)$ を求める。

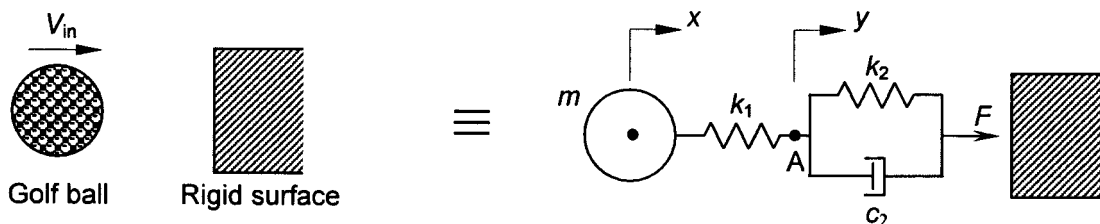


図1 ゴルフボールの力学モデル

3. 3要素線形離散モデルの同定

3・1 ボールの衝突実験 ロードセルを備えた標的（鋼製板）を用いて、スリーピースゴルフボール（ $m = 46 \pm 0.1$ g）の垂直衝突試験が、新川他¹⁾により行なわれている。本試験では、空気圧を制御することにより、異なる4つの速度（ $V_{in} = 28$ m/s, 35.2 m/s, 53 m/s, 61 m/s）でボールを標的に対して発射させた時のボールの接触力、変形量の時間的変化（ $F(t)$, $\delta(t)$ ）を求めている。ボールの変形量 $\delta(t)$ については、高速ビデオカメラを用いて、ボール中心の変位を計測することにより求めている。本試験で計測した $F(t)$, $\delta(t)$ のデータを用いて、スリーピースボールの3要素線形離散モデルを同定する。

3・2 モデルパラメータの決定 スリーピースボールの接触力、変形量の時間的変化（ $F(t)$, $\delta(t)$ ）の計測値をそれぞれフーリエ変換することで、周波数領域内における試験片の接触力 $\bar{F}(\omega)$ と変形量 $\bar{\delta}(\omega)$ を求めることができる。

$$\bar{F}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} F(t) \exp(-i\omega t) dt; \quad \bar{\delta}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) \exp(-i\omega t) dt \quad (4)$$

ここで、 ω は角周波数である。複素コンプライアンス $J(\omega)$ は、 $\bar{\delta}(\omega)$ と $\bar{F}(\omega)$ の比として、次式のように求められる。

$$J(\omega) = \bar{\delta}(\omega) / \bar{F}(\omega) = J_1(\omega) - iJ_2(\omega) \quad (5)$$

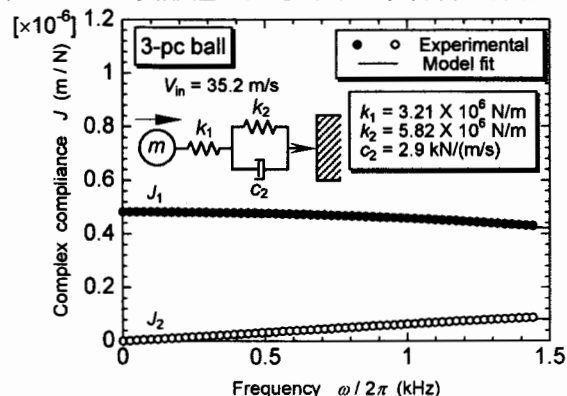
ここで、 $J_1(\omega)$ と $J_2(\omega)$ は、それぞれ貯蔵コンプライアンスと損失コンプライアンスである。 $V_{in} = 35.2$ m/sの実験結果 $F(t)$, $\delta(t)$ を用いて、式(4), (5)を計算することにより複素コンプライアンス $J(\omega)$ を求め、その結果をプロットで、図2に示す。実線は、3要素線形離散モデルの $J_1(\omega)$, $J_2(\omega)$ の理論値であり、次式より求められる。

$$J_1(\omega) = \frac{1}{k_1} + \frac{k_2}{k_2^2 + (\omega c_2)^2}; \quad J_2(\omega) = \frac{\omega c_2}{k_2^2 + (\omega c_2)^2} \quad (6)$$

実験値に最小2乗法を用いて曲線（式(6)の理論値）を当てはめることにより、今回仮定した3要素線形離散モデル（図1参照）の各定数を決定した。モデルの各定数の値は、図2の中に付記されている。両ボールとも、すべての周波数範囲内において、3要素線形離散モデルによって動的挙動がうまく再現できていることがわかる。

3・3 3要素モデルの妥当性 3要素線形離散モデルの精度を検証するため、式(2), (3)より求めたスリーピースボールの接触力 $F(t)$, 変形量 $x(t)$ （= $\delta(t)$ ）の予測値と、実験により得られた $F(t)$, $\delta(t)$ を比較すると、図3のようになる。ここで、実線が実験結果、破線がモデルより予測した結果をそれぞれ示している。 $V_{in} = 40$ m/sまでは、実験値と予測値は良好に一致しており、3要素モデルの各定数が精度よく求められていたことがわかる。しかし、 $V_{in} = 53$ m/sの場合は実験値と予測値とで両者に不一致が認められた。この原因は、 $V_{in} = 50$ m/s以上においては、ボールの変形量が大きくなり、材料の非線形性の影響が生じ始めるためと考えられる。

図2 スリーピースボールの複素コンプライアンス



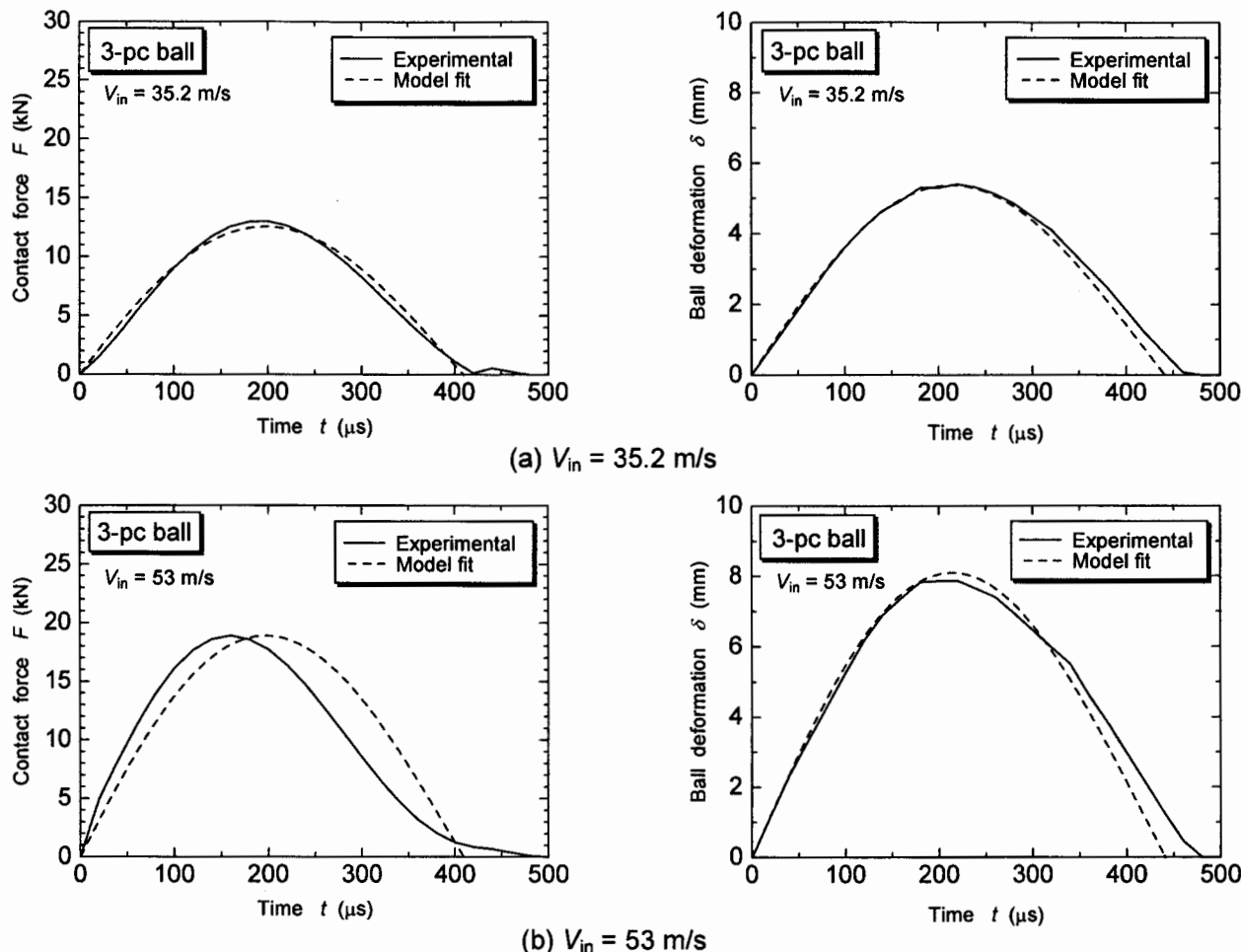


図3 スリーピースボールの接触力・変形量の時間的変化の実験値と解析値の比較 ($V_{in} = 35.2, 53 \text{ m/s}$)

参考文献

- 1) 新川和夫, 馬田俊雄, 小松治男, 清水哲雄, 佐藤正矩, 竹原幸生, 江藤剛治: 垂直衝撃を受けるゴルフボールの動的変形計測, 日本機械学会論文集 (C編), Vol.72, No.724 (2006), pp. 3826-3831.

謝辞

本研究を遂行するにあたり貴重なコメント・アドバイスをして頂いた 新川和夫 氏に感謝する。また、本実験に使用したゴルフボールを提供して頂いたマルマン (株) の 清水哲雄 氏に感謝の意を表す。

研究成果報告

- Nakai, K. and Yokoyama, T.: Identification of a Lumped-Parameter Model for Golf Balls in Normal Impact, *Applied Mechanics and Materials*, Vols.7/8 (2007), pp. 237-242.
- 中井賢治, 横山 隆: 垂直衝突におけるゴルフボールの力学モデルの同定, 第51回日本学術会議材料工学連合講演会講演論文集, (2007), pp. 45-46.

研究組織

- 研究代表者 中井 賢治 (岡山理科大学 工学部 機械システム工学科)
- 研究協力者 新川 和夫 (九州大学 応用力学研究所 基礎力学部門 破壊力学分野)

1. 目的

脆性破壊時にはき裂が材料中を加速・減速しながら高速で伝ばする。そのき裂伝ばは、物体の形状、負荷条件などによる物体内部の応力状態に著しく影響を受けることが指摘されているが、そのような動的なき裂進展のメカニズムはまだ十分に解明されていない。本研究は、そのメカニズムを解明するために粒子法の一つである拡張個別要素法⁽¹⁾ (EDEM) を用いて動的なき裂伝ば現象の解析を試み、Arakawa らの実験結果⁽²⁾⁽³⁾と比較した。

2. 理論

拡張個別要素法 (EDEM) で用いる要素間の力学的な相互作用は弾性ばね、ダッシュポット、スライダを用いて表現する。Fig.1 に示すように、特に要素間の隙間に存在する物質の効果を表すことを目的として、要素ばねとは別に隙間ばねとして、法線方向と接線方向に弾性ばねとダッシュポットを並列に配置している。Fig.1 中の“×”の記号は、要素間のひずみが破壊基準として設定した引張限界ひずみ β に達したときに要素間で破壊が生じること(き裂の発生)を示し、“=”の記号は、要素同士が接触した圧縮状態のみでの力の伝達を示している。さらに接線方向の摩擦力を考慮している。円形要素 i の運動方程式は次式となる。

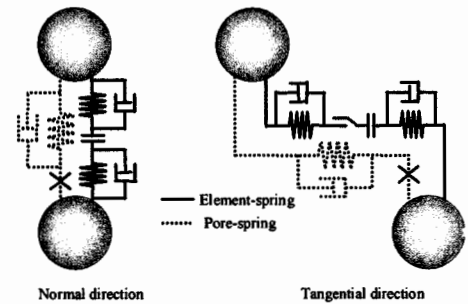


Fig.1 EDEM model

$$m_i \cdot \frac{d^2 u}{dt^2} + C_i \cdot \frac{du}{dt} + F_i = 0 \quad I_i \cdot \frac{d^2 \phi}{dt^2} + D_i \cdot \frac{d\phi}{dt} + M_i = 0 \quad (1)$$

ここで、 m_i は要素 i の質量、 I_i は要素 i の慣性モーメント、 F_i は要素に働く合力、 M_i は要素に働く合モーメント、 C_i 、 D_i は減衰定数、 u は要素の変位ベクトル、 ϕ は要素の回転変位である。各要素の座標や回転は、式(1)を時間について数値積分することにより求められる。本研究では数値積分に Leap-frog 法を用いた。隙間物質にき裂が入った状態を隙間ばねの破壊(き裂の発生)とし、要素間に圧縮力が作用する場合は要素間に法線方向の力 F_n と接線方向の力 F_s が作用するが、要素間に引張力が作用する場合は $F_n = F_s = 0$ となる。隙間ばねの破壊(き裂の発生)に関しては、引張破壊の場合には法線方向の要素間のひずみが β に達したときに隙間ばねが破壊したとみなし、せん断破壊の場合の破壊基準はモール・クーロンの条件を用いている。

き裂進展の非線形挙動を表現するために、Nishioka・Atluri らの動的 J 積分の式⁽⁴⁾を用いた。

$$J'_1 = \int_{+\Gamma_c} [(W + K)n_1 - t_i u_{i,1}] ds + \int_{-V_c} [\rho \ddot{u}_i u_{i,1} - \rho \dot{u}_i \dot{u}_{i+1}] dV \quad (2)$$

ここで、 W はひずみエネルギー密度、 K は運動エネルギー密度、 u_i は変位、 t_i は表面力、 ρ は密度である。

応力拡大係数 K_I は動的 J 積分と伝ば速度 C によって次式で関連づけられている。⁽⁴⁾

$$K_I = \sqrt{2\mu'_1 / A_I(C)} \quad (3)$$

ここで、 $A_I(C) = \beta_1(1 - \beta_2^2) / \{4\beta_1\beta_2 - (1 + \beta_2^2)^2\}$ であり、き裂パラメータ β_1 、 β_2 は次式となる。

$$\beta_1 = (1 - C^2 / C_d^2)^{1/2}, \quad \beta_2 = (1 - C^2 / C_s^2)^{1/2} \quad (4)$$

ここで C_d は膨張波速度、 C_s はせん断波速度である。

3. 解析結果

解析モデルを Fig.2 に示す。材料は Homalite - 100 とし、縦弾性係数 $E=5.3\text{GPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.35$ 、密度 $\rho=1.23 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ を用いた。き裂進展の発生条件として、破面で消費されるエネルギーを考慮した間島らの研究など

⑤⑥を考慮して間隙ばね破壊基準 $\beta=1.000553$ を用いた, また要素半径 $r=2.5\times 10^{-4}$ m, 時間刻み幅 $\Delta t=1.0\times 10^{-9}$ sを用いた. 今回の解析では, 実験結果と比較するために, Fig.2 に示す解析モデルにおいて, き裂が進展する直前までモデル内部にある Load Pin 2 本をそれぞれ上向きと下向きに等速 5.0×10^{-2} m/s で動かし, その後, 実験結果と同じ 1mm/min に相当する 8.33×10^{-6} m/s で動かした. そして, 準静的引張条件に近づけるため, き裂進展開始直前まではダッシュポットの粘性定数を $\eta=2(mk)^{1/2}$ (m:質量, k:バネ定数) と大きくし, 減衰を利用して動的な影響を小さくした. そしてき裂進展開始後はき裂伝ばに伴う応力波の伝ばを考慮し, ダッシュポットの粘性定数 η を 10 分の 1 と小さくした. これは計算開始直後から実験データと同じ引張速度では計算時間が膨大になり解析困難になるため, その解決策として試みたものである. Fig.3 にき裂速度と応力拡大係数の実験結果^②と解析結果を示す. 解析結果は実験結果と同じようにき裂速度の加速・減速を表現できているが, 応力拡大係数は実験結果の約 1.5 倍, き裂速度は約 1.7 倍となっている. この原因としては, き裂進展開始までの引張速度がまだ速すぎることや計算に使用した要素数が少ないことなどが考えられる. 計算精度の向上が今後の課題である. さらに Fig.4 に Load Pin を 4 本にし, 材料を PMMA^③とした場合の解析モデルを示す. この解析例では Load Pin の数と材料パラメータ ($E=5.97$ GPa, $\nu=0.28$, $\rho=1.18\times 10^3$ kg/m³, $\beta=1.000239$) 以外の条件は前述の解析例と同じである. Fig.5 にき裂速度と応力拡大係数の関係を示す. 図からき裂速度と応力拡大係数の関係が加速・減速・加速をしており, 実験結果^③を定性的には表せているが, 前述の例と同様に応力拡大係数とき裂速度の値に大きな差があることがわかる.

4. 参考文献

- (1)伯野元彦, 破壊のシミュレーション—拡張個別要素法で破壊を追う, (1997), 39, 森北出版
- (2) Arakawa, K., Nagoh, D. and Takahashi, K., Int. J. Fracture, 96, (1999), 345.
- (3) Arakawa, K., Nagoh, D. and Takahashi, K., Int. J. Fracture, 83, (1997), 305.
- (4) Nishioka, T. and Atluri, N., Engineering Fracture Mechanics, 18, (1983), 1.
- (5) 間島 理, 末益博志, 日本複合材料学会誌, 25, (1999), 140
- (6) Yu, C., et al., Proc. of Int. Conf. on Fracture and Damage Mechanics, (2001)

5. 研究組織

研究代表者: 海津 浩一 兵庫県立大学大学院教授 (元 宮崎大学工学部准教授)
 研究協力者: 木之下 広幸 宮崎大学工学部助教
 池田 清彦 宮崎大学工学部教授
 新川 和夫 九州大学応用力学研究所教授

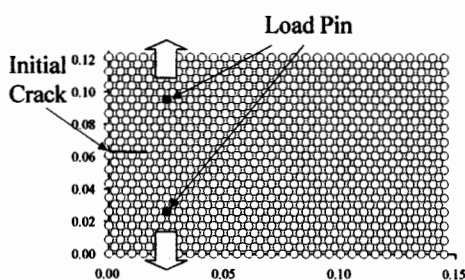


Fig.2 Analytical model I

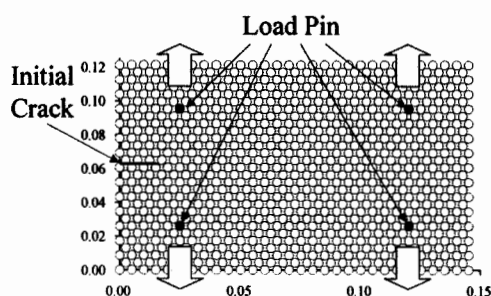


Fig.4 Analytical model II

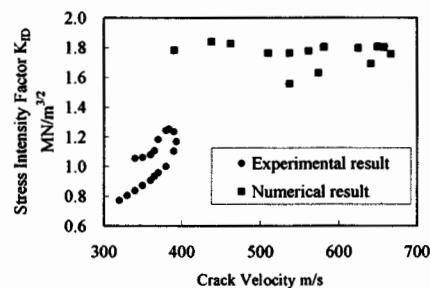


Fig.3 Relationship between crack velocity and stress intensity factor

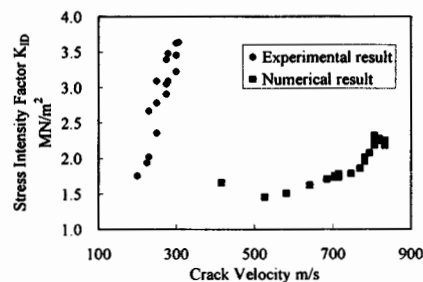


Fig.5 Relationship between crack velocity and stress intensity factor

潮流発電のための高性能ダリウス形水車の開発

九州大学大学院総合理工学研究院 経塚雄策

● 目的

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。ダリウス型水車は、動翼の揚力を利用する水車で流れの中で高いエネルギー変換効率を持つが、静止時の起動トルクが小さなことが問題である。系統連携された発電機の場合にはモータリングによって強制的に回転させることが出来るが、我々の場合には独立電源となっているので、起動特性の問題は重要である。この対策としては、ダリウス水車の動翼数を増やすなどの対策も考えられるが、ここでは図1のように、ダリウス形水車の回転軸にサボニウス水車を取り付けけたダリウス・サボニウス混合水車について実験的な研究を行った。サボニウス型水車は、半円弧形のバケットを用いる抵抗型水車で、構造が単純であるので各種装置に利用されているが、特徴として起動トルクが大きなことが挙げられる。もし、両水車の長所を活かすことができれば高性能な水車を実現できる可能性がある。それを調べるのが本研究の目的である。

● 実験装置および実験方法

実験は九州大学応用力学研究所の深海機器力学実験水槽 ($L \times B \times d = 65\text{m} \times 5\text{m} \times 4.8\text{m}$) において行った。ダリウス水車の翼は、翼弦長が0.1mのNACA0018と同じ厚さ分布で、円弧キャンバーをつけたものを用いた。曳航速度は、1m/sを標準とした。流力特性計測実験では水車を強制回転させ、その時に水車が発生する平均トルク $Q[\text{N} \cdot \text{m}]$ を計測し、トルク係数 (C_Q) およびパワー係数 (C_P) を求めた。発電実験では発電機の実出力電圧により、パワー係数を求めた。

● 実験結果

図2は、ダリウス・サボニウス水車のトルク係数を流力特性計測実験によって比較した。この結果をみると起動トルクは全ての混合水車で改善されたことが分かる。ただし、両水車の取り付け角による影響は大きく、 β が 90° あるいは 135° が大きな起動トルクを与えるが、 45° ではその効果は小さいことがわかる。一方、潮流発電を行う場合に稼働回転数となる $\lambda \approx 2.2$ 付近では、組合せ水車のトルクは総じてダリウス単独時の7割

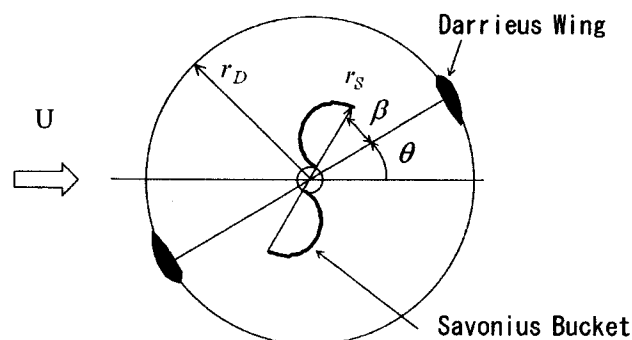


図1 ダリウス・サボニウス混合水車の取り付け角

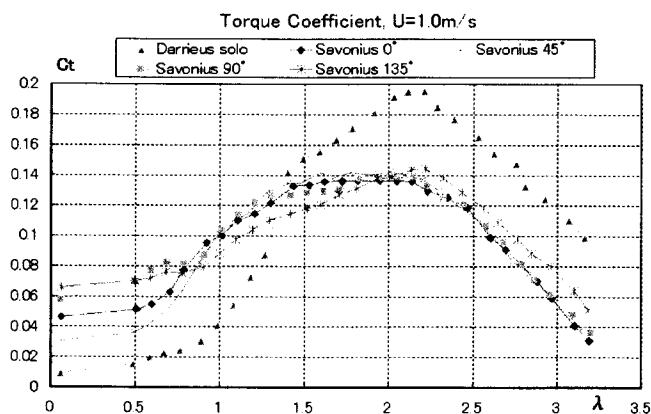
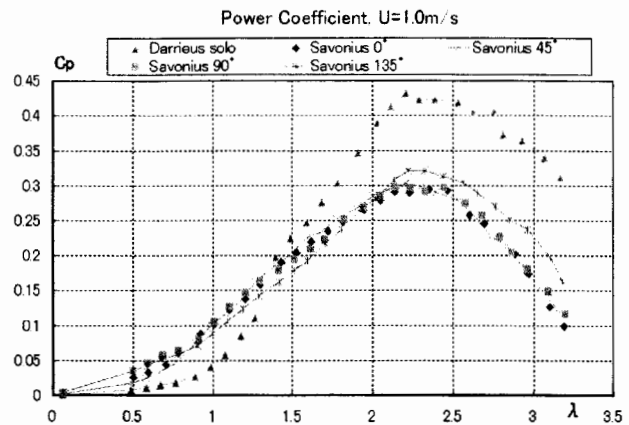


図2 ダリウス単独および混合水車のトルク係数

程度に減少する。すなわち、ダリウス水車に今回のサボニウス水車を追加することによって $\lambda \approx 1.4$ 以下では正のトルクを発生するが、 $\lambda \approx 1.4$ 以上では負のトルクを発生すると考えることができる。

図3は、以上の結果をパワー係数で比較したものである。ダリウス単独の場合には、最高のパワー係数は $\lambda = 2.2$ で $C_p = 0.43$ であるが、混合水車については3割程度効率が悪くなる

図3 ダリウス単独と混合水車のパワー係数の比較



ことが分かる。

図4は、曳航水槽における発電実験装置の写真である。アウターローターコアレス発電機（株式会社スカイ電子製 SKY-HR350 (1 kW)）を直結して用いた。この発電機は48極であり、100rpm程度 of 低回転数でも増速ギア無しで直結して使える特徴がある。発電機の出力は、AC-DC 変換器により直流に変換して計測した。実験では、水車トルク、回転数、動翼角度検出のためのパルス信号、発電機出力電圧、電流を計測した。発電機の負荷は固定抵抗を9段階に切り替えて可変とした。

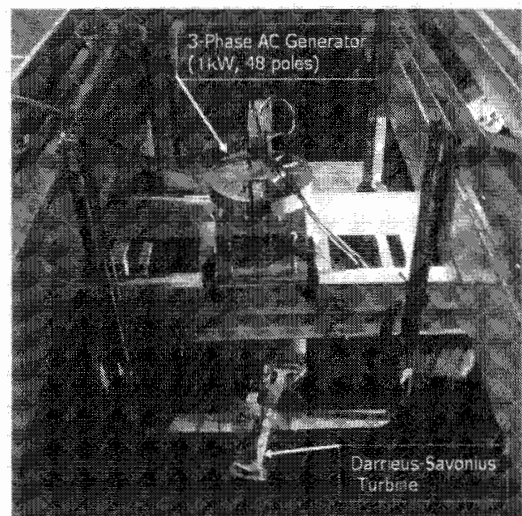


図4 曳航水槽における実験装置

図5は、ダリウス単独とラチェット有のダリウス-サボニウス水車、サボニウスの角度を固定した場合のダリウス-サボニウス水車の発電実験におけるパワー係数を比較したものである。パワー係数は、発電機出力から計算したので発電機の変換効率（約70%）の損失も含まれている。この結果をみると、一番効率が良いのはダリウス単独水車であり、ラチェットの効果については無負荷時の周速比は3を超えており、ダリウス単独とサボニウス固定の混合水車との中間的な性能であることが分かるが、発電機として稼動する $\lambda \approx 2.2$ では他の混合水車との差異は小さい。

● まとめ

- ・サボニウス水車を取付けることによって起動トルクを大きくすることができるが、パワー係数の最高値は7割程度に落ちるので、起動トルクとパワー係数の良い兼合いを取る必要がある。
- ・発電実験により発電性能を確認できた。

● 研究組織

経塚雄策 九大・総理工 教授 代表・総括
 明 宏幸 九大・総理工 M2 実験解析

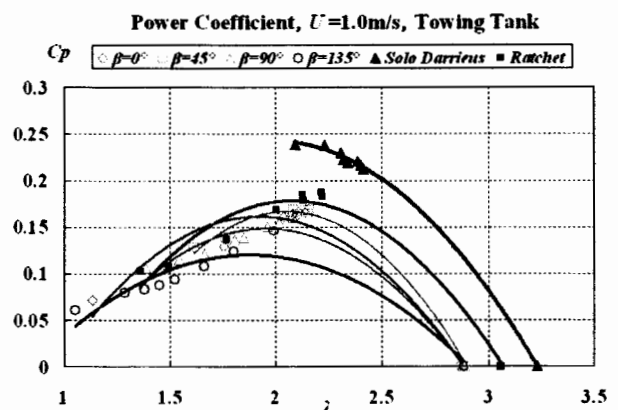


図5 発電実験におけるパワー係数の比較

複合型数値計算法の実用化に関する研究

防衛大学校システム工学群機械システム工学科講座 木原 一

研究目的

浮体と水波の強非線形相互作用に伴う流体现象を解明するために CIP 法や MPS 法といった数値流体力学的手法を用いた研究が近年なされるようになってきたが、その数値解析はしばしば膨大な計算量を必要としていた。本研究の目的は計算手法の一つである MPS 法と境界要素法を組み合わせた複合型計算手法により計算量の大幅な削減を図り、その実用化に向けた各種開発を行うことにある。

研究内容

平成 18 年度に実施した応用力学研究所との共同利用研究の成果により、複合型計算手法が正常に機能することが確認されたため、本年度の研究では主にその実用化に向けた各種問題点の洗い出しに主眼を置いた研究が行われた。

昨年度研究において計算法の課題となっていた点で今年度主に調査検証などを行った項目を以下に列挙する。

1. 高速化効果の量的な検証がなされていない。
2. 長距離を伝搬する水波の計算する際、波振幅の減衰が見られる。
3. 境界要素法と粒子法 (MPS 法) の接合面において移動境界として取り扱う粒子法側の境界形状が水槽端部で異常な挙動を示す。

1 については、大量の粒子を使い MPS 法単独で 2 次元造波水路の問題を計算した例と比較することで高速化効果の量的確認を行った (図 1, 2)。長さ 5 m、水深 40 cm の造波水路を設定し、粒子法単独で 101,234 個の粒子を要する計算を複合型計算法で行った例では粒子数を 31,204 点で実施可能で、この際計算に要した時間は約 6 分の 1 であり、十分な高速化効果が得られていることが確認された (表 1)。

2 については現象の解決には至らなかったものの、減衰量が境界要素法と粒子法間で情報のやり取りをする際に行っていた高周波ノイズ除去を目的とした速度ポテンシャルの空間分布に対する移動平均処理の平滑化幅に相当依存していることを確認し、安定的に計算できる限界の平滑化幅について知見を得た (図 3)。

3 については粒子法側で垂直壁面と流体近傍で不自然な上昇流が発生する現象を発見し、これが原因の可能性と考えその調査を行った。この上昇流の原因は圧力勾配を粒子法で計算する際、壁面近傍で見られる粒子分布の空間的不均一性が計算精度の低下をもたらし、圧力勾配が壁面近傍でのみ過剰評価されることと推定された。そこで計算時に場所によらず一定値としていた重み関数の影響半径を壁面近傍で極端な不均一性が発生しないように変更することで回避が可能であることを確認した。

開発された複合型計算法に関する研究と関連した発表を複数の国際会議で行った。以下に列挙する。

- ◆ A Hybrid Technique Using Particle and Boundary-Element Methods for Wave-Body Interaction Problems, Makoto Sueyoshi, Hajime Kihara and Masashi Kashiwagi 9th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, Ann Arbor, Michigan, August 5-8, 2007
- ◆ A Hybrid Computational Method for Nonlinear Free Surface Problems, Hajime Kihara, Makoto Sueyoshi and Masashi Kashiwagi, International Conference on Violent Flows, Fukuoka Japan, November 20-22, 2007

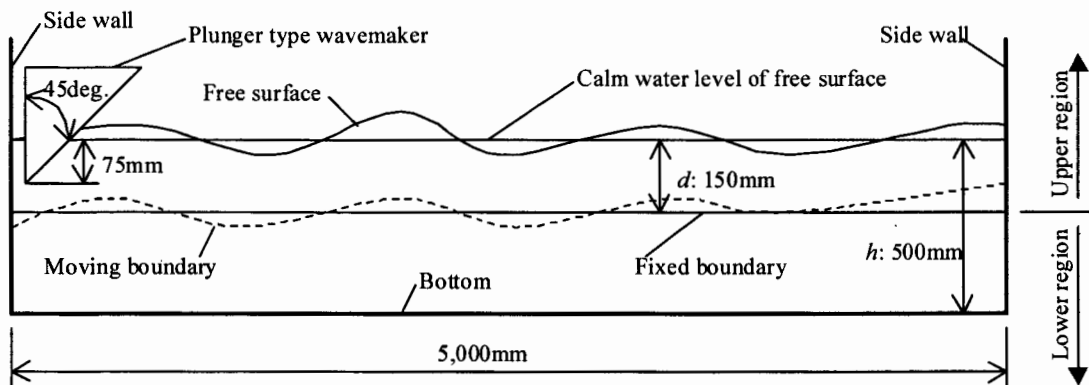


図1：2次元水路における造波問題の設定

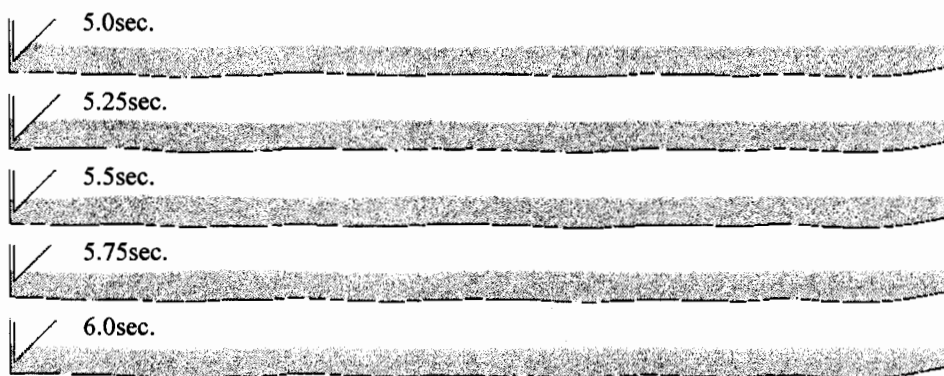


図2：複合型計算法による2次元造波問題の計算例

表1：複合型計算手法による計算量削減効果の1例

	MPS Method	Hybrid Method
Total Number of Particles	101,234	31,204
Computation Time	69h50m	11h40m

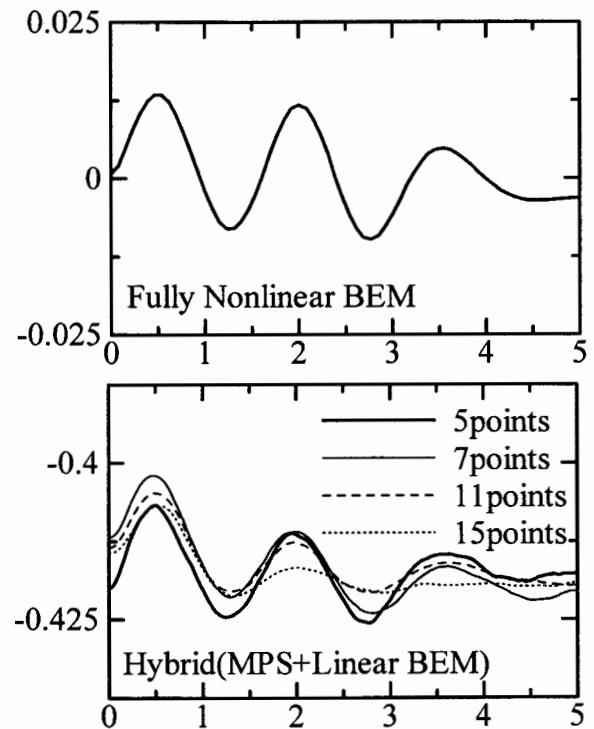


図3：速度ポテンシャルの空間分布に、移動平均による境界での平滑化が与える影響

カーボンナノチューブ/Ti 合金による金属基傾斜機能ナノコンポジットの開発

信州大学繊維学部
機能機械学科 倪慶清

1. 目的

カーボンナノチューブ (CNT; Carbon Nanotube) は機械的および電気的特性に優れ、熱的および化学的に安定性が高いなど、様々な利点を持つナノ材料である。その優れた特性から、CNT を強化材として、セラミクスや樹脂に分散した複合材料が研究され、金属基複合材料 (MMCs) においても、CNT を強化材とした研究がなされている。これらの研究から、CNT 強化 MMCs は優れた特性を持つことが部分的であるが分かっている。しかし、CNT はぬれ性の悪さおよび高アスペクト比のため凝集しやすく、均一に分散させることが困難である。そして、金属と CNT の複合材料においては、比重差の問題もあり均一に CNT が分散した組織を持つ複合材料の作製は困難である。そのため、現在 MMCs における研究では十分な結果が得られていない。

近年、Al は軽量で、加工性、熱および電気伝導性に優れた金属であることから、幅広い分野で使用されている。しかし、純 Al では強度が弱いという欠点がある。その欠点を補うために、他の金属との合金化や、強化材に繊維およびセラミクスを用いて複合化することが考案されている。ところで、セラミクスと金属のように熱膨張係数が著しく異なる材料を組み合わせる場合、加熱および冷却時に大きな熱応力が発生し、材料が破壊してしまう。そこで、混合率を連続的に変化させた傾斜機能材料 (FGMs; Functionally Graded Materials) とすることで、熱応力による破壊を防ぐことができる。FGMs とは「ひとつの材料の中で組成や機能が連続的または段階的に変化している材料」と定義されており、均一な複合材料とは異なった、新たな機能を得られることが知られている。

本研究では、CNT の分散性を改善すべく表面改質を行い、CNT を強化材とする Al 基 FGMs を創製した。そして、創製した FGMs 内における CNT の分散状況を観察し、機械的特性の評価を目的とした。

2. 実験方法

◆試料 母材 Al は平均粒子径 30 μm の純 Al 粉末を用いた。強化材には直径 150 nm、長さ 10~20 μm の CNT (昭和電工株式会社製、VGCF) を用いた。本研究では、CNT の表面改質技術を行い分散性の評価を行った。CNT の凝集を防ぐために、CNT の表面改質を施した。CNT の分散性が良好な溶液を使用し湿式攪拌法を用いて Al/CNT 混合粉末を作製した。試料は Al に対する CNT 含有率 0.3 wt.%、0.5 wt.% および 1.0 wt.% の混合粉末を作製した。作製した Al/CNT 混合粉末を金型に入れ、ロードセルを用いて、円柱状圧粉体を作製した。作製条件は、圧縮圧 120 MPa、クロスヘッドスピード 5 mm/min、保持時間 10 min で常温片側圧縮した。

◆FGMsの創製 FGMs 創製方法として遠心铸造法を用いた。遠心力铸造法とは、熔融金属に遠心力を印加し、強化材と熔融金属との密度差に起因する遠心力の差により生じる移動速度差を利用して、組成傾斜を制御する方法である。遠心铸造を行うにあたり、遠心力を規格化したパラメータである重力倍数 G が CNT の傾斜化に大きく関連する。重力倍数 G は以下の式で与えられる。

$$G = \frac{2\pi^2 DN^2}{g} \approx 2DN^2$$

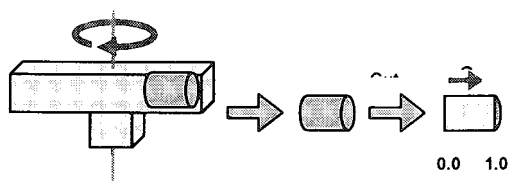


図1 試料の規格化位置

ここで、 D は回転直径、 g は重力加速度、 N は回転数である。

作製した圧粉体に対して遠心鑄造を行い、円筒状試料を創製した。創製条件は、Ar ガス雰囲気中において、熔融温度 640 °C、重力倍数 $G=80$ および保持時間 60 min であった。創製したシリンダ形状 FGMs を遠心力方向に切り出し、図 1 のように遠心力方向に試料を 0.0~1.0 まで 10 分割に規格化した。そして、規格化位置毎における、試料の傾斜化を評価した。

◆性能評価 混合粉末時の CNT 分散状況を確認するために、光学顕微鏡 (OM; Optical Microscope) を用いて、作製した Al/CNT 混合粉末を観察した。さらに、創製した FGMs の母材内部における CNT の分散状況を確認するため、走査型電子顕微鏡 (SEM; Scanning Electron Microscope) を用いて観察した。X 線光電子スペクトル (XPS; X-ray Photoelectron Spectroscopy) を用いて、創製した FGMs を元素分析した。また、組織傾斜による機械的特性を調査するため、規格化位置毎におけるビッカース硬さを測定した。測定条件は荷重 2.9 N (300 gf)、保持時間 15 sec とした。

3. 結果および考察

◆CNT の混合粉末および FGMs における分散状態 混合粉末作製には、いろいろ試行錯誤の結果、溶媒を添加した湿式攪拌法を使用することとした。作製した混合粉末の OM 観察から CNT 凝集体を確認することができなかった。このことから、CNT の分散性は向上したと考えられる。創製した FGMs の SEM による組織観察の写真を図 2 に示す。試料を研磨した後では、CNT を確認することができなかった。これは、研磨による CNT の脱落が原因であると考えられる。そこで、試料を切り出したままの切り口を観察したところ、図 2 のようにわずかな隙間に入り込んだ CNT 凝集体を数点発見することができた。FGMs における CNT の分散は凝集体ではあるが、試料内部に分布していることが確認できた。

◆硬度分布 マイクロビッカース硬さ試験の結果、0.5 wt.%CNT 添加で 37.6 Hv まで硬度が上昇し、純 Al より高い硬度を得ることができた。0.3 wt.%CNT および 1.0 wt.%CNT においては、純 Al の硬度に劣る結果となったが、硬度の傾斜化を得ることができた。また、元素分析の結果からも、強化材としての CNT が Al に影響を与えていることがわかった。

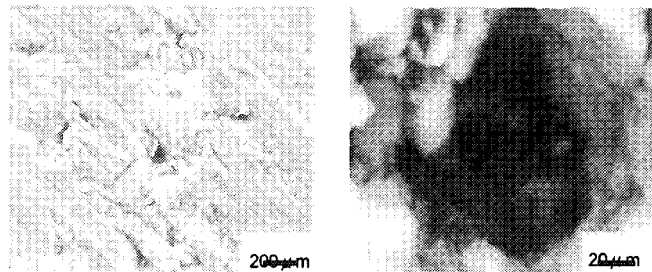


図 2 SEM 観察写真 (1.0 wt.%CNT)

4. 結論

本研究では、CNT の表面改質を行い、CNT の分散性の向上を評価したうえで、Al/CNT FGMs を創製した。その結果、CNT を溶液中に可溶化することおよび超音波攪拌を行うことにより、より良好な分散状態が示された。

XPS を用いて、創製した FGMs を分析した。CNT は確実に FGMs 内に含有され、硬度に影響を与えていることが確認された。遠心鑄造法を用いることにより、0.5 wt.%CNT において、同条件で創製した純 Al より高い硬度を持つ、また硬度の傾斜化を得ることができ、Al/CNT FGMs 材料が創製できた。

5. 研究組織

研究代表者 倪慶清

研究組織 1. 信州大学繊維学部機能機械学科 倪慶清

2. 九州大学応用力学研究所 汪文学

曳航水槽を用いた境界層の遷移過程および乱流普遍則に関する基礎研究

名古屋大学工学研究科 辻 義之

1. 研究の背景

乱流境界層をはじめとする壁乱流において、壁面せん断応力の計測は、工学的応用のみならず、カルマン定数や平均速度プロファイルの確定など基礎的課題の解明をする上でも必要不可欠とされる。せん断応力の計測法には、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るため、広く用いられてきた。速度の計測データを利用するという観点では、運動量積分方程式の各項を評価することから、せん断応力の算出を Prandtl(1927)がおこない、Schlichting(1979)が後に実験データのフィッティングから簡便な表記を導いたのは周知のとおりである。圧力勾配のない平板乱流境界層の局所摩擦抵抗に限れば、カルマンの定式化に従い Schoenherr が実験データを基に導いた経験式が広く利用されてきた（以降、K.S.式と略する）。平板抵抗の計測は、平板の局所抵抗と全抵抗を計測する場合でその手法は大きく異なる。後者の場合には、風洞ではなく水槽中に平板を曳航することにより計測する試みが報告されている。一方、平板の局所抵抗を計測する、かつ速度情報を用いない、手法として注目されるのが、浮動片要素とオイルフィルム法である。その代表例として大坂ら(1996)と Osterlund(1999)により計測された圧力勾配の無い平板乱流境界層の局所摩擦抵抗係数を比較してみると、レイノルズ数が小さい場合には、わずかな相違が認められ、レイノルズ数の増加とともに両者はよく一致するようになる。しかし、従来から信頼されてきた K.S.式と浮動片要素、オイルフィルムによる計測には約 5%の相違が存在する。このような大きな相違が現れた背景は、K.S.式の導出に際して何らかの仮定や実験上の制約があったものと推測される。そこで、本研究では K.S.式の導出過程を再度確認し、あらためて同様の実験をおこない、浮動片要素法やオイルフィルム法との相違について考察した。

2. 実験条件

実験は応用力学研究所深海機器力学実験水槽でおこなった。曳航台車に平板を設置して、一定速度で曳航した際の抗力を計測する。平板の設置方法は、(1) 検力計を介して直接に台車に設置する、(2) フロートを用いて平板を固定して自重をキャンセルする（図 1 参照）、の 2 種類の方法を試みた。前者には測定レンジ 20kg の検力計を用い、後者には測定レンジ 5 kg のビーム型ロードセルによって平板抗力を計測した。平板は 3.3m×1m×0.03m（平板 A）、4.3m×1m×0.03m（平板 B）のアルミ製で製作し、前縁は半楕円形（10:1）とした（ただし、重量を軽くするため内部はハニカム構造とし、発砲スチロールを詰めてある）。また、後縁はシャープエッジ（頂角 15°、長さ 0.3m）を取り付けられるようにした。シャープエッジを用いない場合には、平板背面の圧力を深さ方向に 4 点の位置で、小型圧力センサ（レンジ 70mmH₂O）により計測した。乱流への促進は、トリッピングワイヤ（直径：1.0mm, 2.0mm）を前縁から 20cm の位置に設置した。曳航台車の速度を 0.25～2.0m/s の範囲で 0.25m/s 刻みで変化させ、喫水は約 15cm 間隔で 4 条件変えて実験をおこなった。なお、計測データには電気ノイズや曳航台車の微小な振動が含まれるため、数値フィルタ（Wavelet）を用いて除去した。水面下 2 m まで水温変化は±0.5 であり、物性値の補正は不要と判断した。

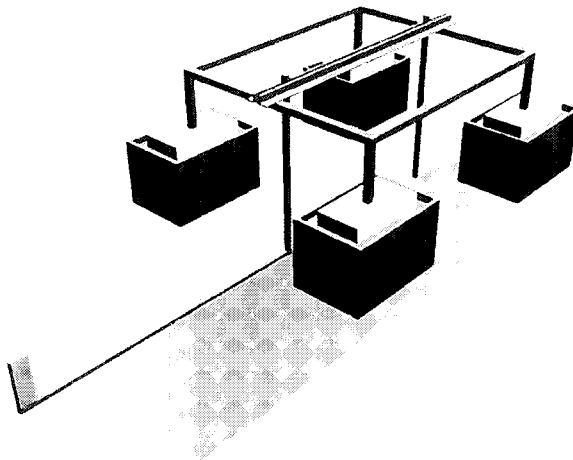


図 1 平板及びフロート部、先端がロードセル

3. 結果及び考察

主流速度 U_0 の一様流中に平板を設置したとき、片面（面積 A 、長さ L ）にかかる全抗力を F 、せん断応力を τ_w とする。全抵抗係数 C_F および局所抵抗係数 c_f は以下のように定義される。

$$C_F = \frac{F}{A \times \rho U_0^2 / 2} = \frac{1}{L} \int_0^L c_f dx, \quad (1) \quad c_f = \frac{\tau_w}{\rho U_0^2 / 2} = \frac{1}{2} \frac{u_\tau^2}{U_0^2}, \quad (2)$$

全抵抗係数 C_F を図 2 (a) に示した。記号の違いは、異なる喫水深さに対応する。喫水深さによらず、各計測結果は同一の傾向を示し、平板 A および平板 B についても同様であった。レイノルズ数が低い場合には抵抗係数は K.S. 式の値に近い値を示すが、レイノルズ数の増加とともに差異が大きくなる。現在の実験体系では、計測される全抗力にはおのずと以下の抗力が含まれることとなる；(a) 造波抵抗、(b) 平板下端面効果、(c) 圧力抗力、(d) トリップングワイヤ抵抗、(e) 水面上部での平板が受ける空気抵抗、である。造波抵抗は平板の曳航によって造られる波に与えるエネルギーに相当し、また、平板下端面で流れが三次元化することによって発生する抗力が (b) である。これらは喫水深さには依存しない。平板の厚さは有限であるために、リーディングエッジ、シャープエッジ形状に起因する圧力抵抗 (c) が生じる。また、トリップングワイヤ抵抗 (d) は、単なる抵抗ばかりではなく、水面ではトリップングワイヤからも波が造られるため、造波抵抗の一部にもなっている。抗力 (c)、(d) は喫水深さに依存してその大きさが変わる。抗力 (e) については、実測の結果、その影響はほとんど無いことが分かった。

この方法で計測される抗力には、造波抵抗 F_w 、圧力抵抗 F_p 、下端面抵抗 F_B 、トリップングワイヤ抵抗 F_T が含まれる。すなわち、

$$F = F_{plate} + F_w + F_B + F_p + F_T, \quad (3)$$

ここで、 F_{plate} が真の平板抗力である。 F_w および F_B は、喫水深さに依存しないため、喫水深さを変えた実験をおこないこれらの抗力を除去した。 F_p と F_T は、長さの異なる二種類の平板を用いた計測から除去する方法を考案した。曳航速度は、0.25 から 2.0 m/sec の範囲で 0.125 m/sec の間隔で変化させ、このとき達成される最大 Re 数は、 $Re_L \cong 10^7$ である。これは運動量暑さに基づく Re 数 $R_\theta \cong 10^4$ に相当する。

図 2 (a) は、平板を曳航した際に計測された効力 F を用いて計算された全抵抗係数である。実線は KS 式を表し、測定結果は、KS 式よりも大きな値を示している。これは、式 (3) に示したように、真の平板抗力以外の効力の影響である。そこで、喫水高さを変えることにより造波抵抗と下端面の抗力を補正した場合の全抵抗係数 $C_F^{(b)}$ を図 2 (b) に示した。当然のことではあるが、計測結果は KS 式により近くなる。圧力抵抗とトリップングワイヤ抵抗の補正は、長さの異なる 2 枚の平板の計測から補正をおこなった。即ち、抗力 $F_{plate} + F_w + F_B$ から計算される全抵抗係数 $C_F^{(c)}$ (図 2 (c)) を図 2 (b) と比較すると、KS 式よりも小さくなっている。これは、(圧力抵抗 + 下端面効力) が測定抗力 F に占める割合が大きいことを表している。4 つの効力をすべて補正し、真の平板効力 F_{plate} を用いて全抵抗係数を計算すると、KS 式よりも約 6% 小さくなることがわかった。Shoenherr は、全抵抗係数を計測した際に、圧力抵抗や造波抵抗の補正をおこなっておらず、その結果として抵抗係数を過大評価したものと考えられる。Shoenherr は K.S. 式の係数を定めるために他の多くの実験結果を参考にしているが、データのばらつきは大きく、これらのデータのばらつきに関しても、抗力 (a) ~ (d) についての適正な補正がなされていないことが最大の原因ではないかと考えられる。

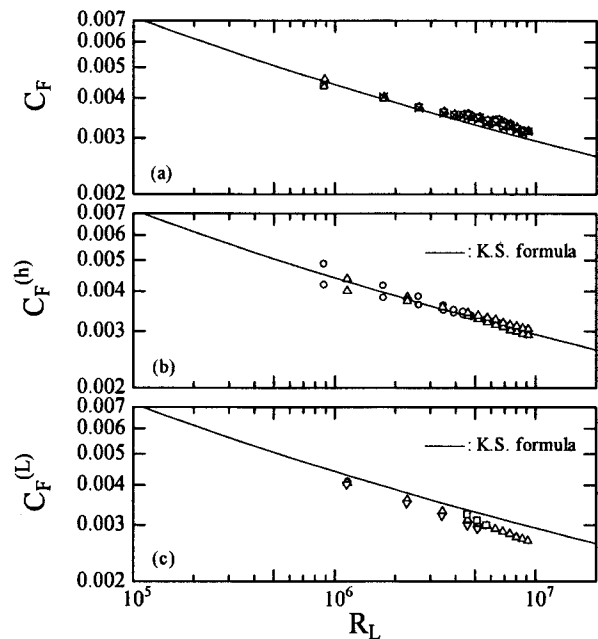


図 2 (a) 全抵抗係数、(b) 抗力 $F - F_w - F_B$ における抵抗係数、(c) 抗力 $F - F_p - F_T$ における抗力係数。

1. 目的

波浪エネルギーから電気的エネルギーを取得する波浪発電システムには数多くの方法が提案され、現在、その実用化の研究が世界各所で行われている。中でも、波浪エネルギーから空気エネルギーへ一次変換し、その後、空気エネルギーから電気エネルギーへ二次変換する浮体式振動水柱型は、現実的で最も実用化に近い方法とされている。しかし、これらのシステムは、波浪エネルギーから空気エネルギーへの一次変換性能を最大にする浮体形状が明確でないという課題がある。実験のみを用いて最適形状を求めることは困難であるから波浪中での浮体運動を予測する数値解析コードが必要である。

そこで、本研究では振動水柱型浮体式波力発電装置[後ろ曲げダクトブイ (BBDB)]を対象に、浮体に作用する流体力の計測実験を行った。この実験結果は数値解析コードの検証に有用である。

2. 実験装置と実験方法

本研究で用いた BBDB 模型及び座標系の概略図を Fig.1 に示す。強制動揺装置、検力計及び BBDB 模型の概略図を Fig.2 に示す。実験に用いた水槽の全体配置図を Fig.3 に示す。

本研究では静止状態にある BBDB 模型に規則波を作用させ、Diffraction 流体力を計測した。また、静水状態で BBDB 模型を Heave 方向、Pitch 方向に強制動揺させ、このときの反力と変位から Radiation 流体力を計測した。

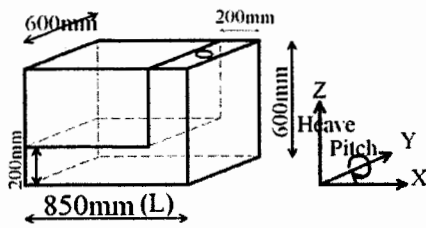


Fig.1 Model of BBDB

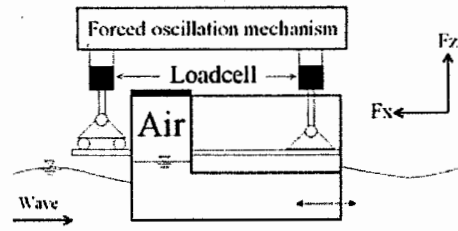


Fig.2 Experimental apparatus

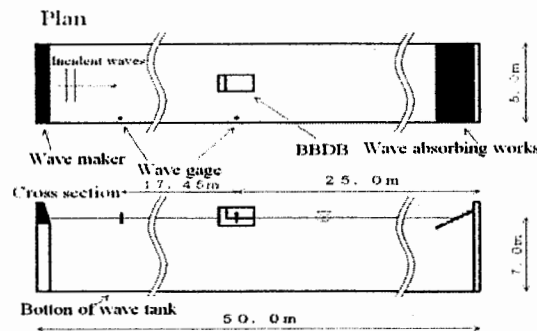


Fig.3 Tank configuration

3. 実験結果及び考察

Diffraction 流体力の実験結果を Fig.4, Fig.5 に示す。Fig.4 は BBDB 模型の空気室内部圧力が変化する場合の結果、Fig.5 は空気室内部圧力が一定(=大気圧)の場合の結果である。Fig.4, Fig.5 共に横軸は λ/L 、縦軸は Diffraction 流体力の水平方向成分 (F_x)、鉛直方向成分 (F_z)、Y 軸周りモーメント (M_y) をそれぞれ無次元化した値である。ここで、 λ (m) は波長、 L (m) は模型全長とする。

本研究では Radiation 流体力は加速度に比例する付加慣性力と速度に比例する造波減衰力で構成されていると仮定し、計測値から付加質量(A33,A55)、および造波減衰係数(B33,B55)を求めた。Radiation 流体力の実験結果を heave、pitch の順に Fig. 6、Fig. 7 に示す。こちらの図では共に横軸は周期(s)、縦軸は付加質量、造波減衰係数をそれぞれ無次元化した値である。

Fig. 4~7 の実験結果において空気室内部圧力が変化する場合と空気室内部圧力が一定の場合で変化がみられる。

4. 結論

- ① Diffraction 流体力については、 $\lambda/L=7\sim 9$ の場合で大きく、特に空気室内部圧力が一定の場合には非常に大きくなる。
- ② 付加質量、造波減衰係数については、いずれも空気室内部圧力が一定の場合の方が周期 2 秒付近の変化が大きい。この周期は Diffraction 流体力が大きく変化する時と同じ周期である。

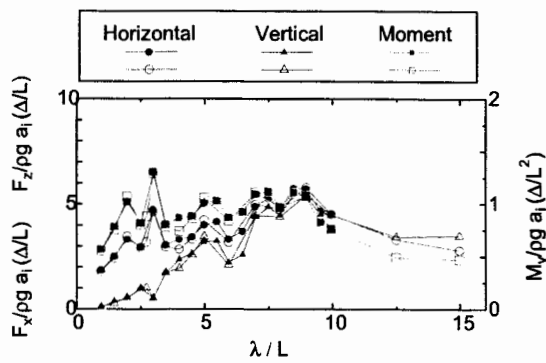


Fig.4 Diffraction force with top cover

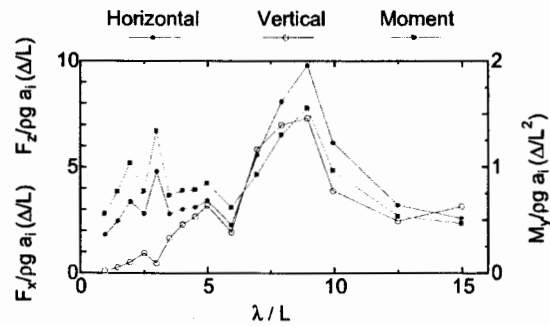


Fig.5 Diffraction force without top cover

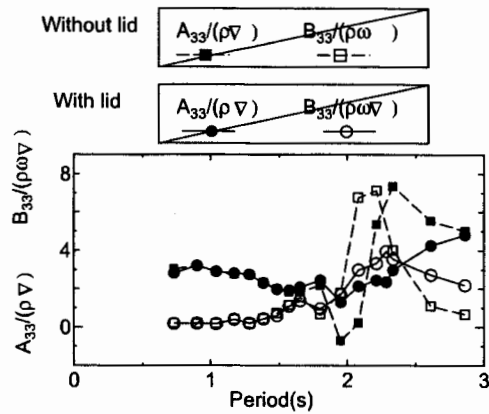


Fig.6 Added mass and Damping coefficient (Heave)

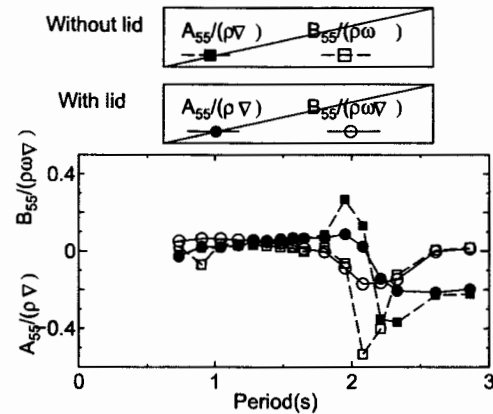


Fig.7 Added mass and Damping coefficient (Pitch)

研究組織

研究代表者： 永田 修一 佐賀大学海洋エネルギー研究センター教授
 研究協力者： 豊田 和隆 佐賀大学海洋エネルギー研究センター准教授
 研究協力者： 今井 康貴 佐賀大学海洋エネルギー研究センター助教
 所内世話人： 柏木 正 九州大学応用力学研究所教授

九州大学 応用力学研究所 研究集会 (19ME-S1)
「窒化物半導体の結晶成長に関する基礎研究」

研究代表者:平松和政(三重大学大学院 工学研究科)

所内世話人:寒川義裕(九州大学 応用力学研究所 基礎力学部門)

日時 : 平成19年7月27日(金)~7月28日(土)

場所 : 九州大学 応用力学研究所 西棟 W601、W606

<http://www.riam.kyushu-u.ac.jp/taiharou/index-j.html> [map 参照]

参加費 : 無料

7月27日(金)

■ **講演発表 13:50~17:00 (参加自由)** 応用力学研究所 西棟 W601

13:50~13:55

「研究集会の趣旨について」

寒川義裕 (九州大学 応用力学研究所)

* **セッションA ; 薄膜・表面/界面** 13:55~15:30 司会 : 柿本浩一(九州大学)

13:55~14:15 (講演15分+質疑応答5分)

「窒化物半導体における成長機構の理論検討」

寒川義裕 (九州大学 応用力学研究所)

14:15~14:40 (講演20分+質疑応答5分)

「励起窒素原子および励起窒素分子照射を用いる RF-MBE 法による Si 上 2H-AIN テンプレート成長」

大鉢忠 (同志社大学 工学部)

14:40~15:05 (講演20分+質疑応答5分)

「SiC 自己形成ナノファセット表面とヘテロ構造の形成」

田中悟 (九州大学大学院 工学府)

15:05~15:30 (講演20分+質疑応答5分)

「rf スパッタ法で作製した AIN 薄膜の微細組織と圧電特性」

桑野範之¹、蒲原敏浩²、秋山守人²

(¹九州大学産学連携センター、²産業総合研究所九州センター)

* **セッションB ; バルク・厚膜** 15:45~17:00 司会 : 寒川義裕(九州大学)

15:45~16:10 (講演20分+質疑応答5分)

「その場ファセット構造制御(In-situ FACELO)を用いた AlGaIn の MOVPE 成長」

平松和政 (三重大学大学院 工学研究科)

16:10~16:35 (講演20分+質疑応答5分)

「非発光電子遷移検出による半導体光吸収スペクトル測定」

福山敦彦、王萍 (宮崎大学大学院 工学研究科)

16:35~17:00 (講演20分+質疑応答5分)

「厚膜エピを目指した原料分子制御 HVPE 法: AIN, AlGaIn および InN」

額額明伯、熊谷義直、村上尚 (東京農工大学大学院 共生科学技術研究部)

7月28日(土)

■ 共同研究テーマの創出に向けた意見交換会 (要 事前予約) 応用力学研究所 西棟 W606
9:00~10:30 (自由討論)

事前予約・問い合わせ先 :

寒川 義裕

九州大学 応用力学研究所 基礎力学部門

〒816-8580 福岡県春日市春日公園 6-1

TEL : 092-583-7742

FAX : 092-583-7743

E-mail : kangawa @ riam.kyushu-u.ac.jp

URL : <http://www.riam.kyushu-u.ac.jp/taiharou/index-j.html>

「研究集会の趣旨について」

寒川義裕 (九州大学 応用力学研究所)

本研究集会では、薄膜成長・表面分析の観点およびバルク・厚膜成長の観点から、窒化物半導体成長の基礎についてご討論いただく予定です。また、両分野の研究者の積極的な意見交換をもとに、新たな共同研究テーマを創出することを目的としています。

「窒化物半導体における成長機構の理論検討」

寒川義裕 (九州大学 応用力学研究所)

現在、III族窒化物半導体は青・緑色LED(Light Emitting Diode)や青紫色LD(Laser Diode)として広く利用されている。製品化に至っているデバイス材料としては、GaNとInNの混晶であるInGaNが主流であり、深紫外域の発光を示すAlGaIn系材料は実用化に至っていないのが現状である。これは、InGaIn系材料ではIn-N-In-N-Inジグザグチェーンクラスターが効果的な発光中心として働くため、非発光中心となる結晶欠陥が多く混入していても高効率の発光が得られること。また、AlGaIn系材料では、InGaIn系材料のような効果的な発光中心が確認されておらず、発光効率に対する非発光中心密度の寄与が大きいことに原因があると考えられる。すなわち、AlGaIn系材料を用いた光学デバイス開発では非発光中心となる結晶欠陥、特に現在の結晶に高濃度含まれている貫通転位の低減が重要となる。本研究では、理論的見地から窒化物半導体の成長機構を解析し、結晶欠陥の少ない高品質結晶の創製に向けた検討を行っている。本講演では以下の研究テーマについて、行った研究内容と得られた知見を紹介する；(1)モンテカルロ法によるInGaIn中の発光中心形成メカニズムの解析、(2)GaN溶液成長における窒素輸送現象の熱流動解析、(3)化学反応を成長の駆動力とする新規AlN溶液成長手法の確立。

「励起窒素原子および励起窒素分子照射を用いるRF-MBE法によるSi上2H-AlNテンプレート成長」

大鉢忠 (同志社大学 工学部)

III族窒化物半導体結晶を用いる電子デバイスは半導体デバイスプロセスラインに使用可能なような大口径で、結晶中の格子欠陥特に転位を減少させたホモエピタキシャル用高品質基板が必要とされている。低転位ホモエピタキシャル成長用の基板成長として、溶液成長法やHVPE法が有利とされる中、溶液成長法やHVPE法用の3インチ種結晶としてSi上にヘテロエピタキシャル成長させた2H-AlNテンプレートを利用する事を目標としている。

ヘテロ基板としてSi(111)を用いSi基板上の成長初期過程にAl照射と窒化膜形成の2方法を利用した。窒化膜形成のために、誘導結合による窒素高周波プラズマ放電(RF放電)により生成される活性窒素の発生を検討し、反応に用いられる窒素原子と励起窒素原子および反応に直接関与せずGa、In、AlIII族金属原子の表面拡散を促進する励起窒素分子の生成を報告する。それらを利用したモード切替マイグレーションエンハンストエピタキシー(MC-MEE)により成長を行い、Al被覆の初期層の性質により六方晶2H-AlNの極性制御を行

うことを報告する。Si(111)の7x7構造清浄表面へAlを約1.8MLの初期被覆の後にそのAlと反応する量の原子窒素をSi上へ照射して窒化シリコンを形成後AIN成長を行うとAl極性に、過剰のAlを照射した場合や直接Si上へ1ML以下のAlを照射して γ 相と呼ばれる表面構造を形成後AINを成長させた場合はN極性が得られた。

「SiC自己形成ナノファセット表面とヘテロ構造の形成」

田中悟（九州大学大学院 工学府）

傾斜SiC表面にはエネルギー安定構造として周期的ナノファセット(ナノ表面)が形成されることがわかっている[1,2]。この自己形成ナノ表面の形成物理を明らかにし、更にヘテロ系物質の形成へと応用することは、メソスコピックスケール領域(<20nm)のボトムアップテクノロジーとして有用である。既に我々は次世代ナノエレクトロニクスとして重要な材料であるグラフェンやワイドギャップ半導体(SiC, GaN)への応用に関して興味深い結果を得ている。本発表では、SiCナノ表面形成機構および構造ゆらぎに関して古典的表面弾性論に基づく考察を行い、更にグラフェン・SiON超構造[3]、ポリタイプGaNの核生成[4]の例を取り上げ「SiCナノ表面」の重要性に関して示したい。

- [1] H. Nakagawa et al., "Self-ordering of nanofacets on vicinal SiC surfaces", *Phys. Rev. Lett.* 91, 226107(2003).
- [2] M. Fujii and S. Tanaka, "Ordering distance of surface nano-facets on vicinal 4H-SiC(0001)", *Phys. Rev. Lett.*, July 5 (2007), in press.
- [3] T. Shirasawa et al., "Epitaxial Silicon Oxynitride layer on a 6H-SiC(0001) surface", *Phys. Rev. Lett.* 98, 136105(2007).
- [4] M. Ebihara et al., "Nucleation and growth mode of GaN on vicinal SiC surfaces", *Jpn. J. Appl. Phys.* 46, L348(2007).

「rfスパッタ法で作製したAIN薄膜の微細組織と圧電特性」

桑野範之¹、蒲原敏浩²、秋山守人²

(¹九州大学産学連携センター、²産業総合研究所九州センター)

窒化アルミニウム(AIN)はこれまで既に坩堝材料からSAW素子材料に亘る広範な分野に応用されており、古くて新しい材料といえる。rfスパッタ法で作製したAIN薄膜は容易にc軸配向を示すことから、我々はAINが高い耐熱性示すことに注目して、AIN薄膜を種々の環境下で使用できる圧電素子材料として応用する開発研究を進めてきた。これまで、AIN薄膜の圧電特性はc軸配向度に強く依存すると信じられ、いかにして配向の振れを小さくするかが求められてきた。しかし、実際にはAIN薄膜の圧電特性は配向性のみならず結晶極性分布が大きな要因であることが明らかになった。本研究では、Ti, Moなどの金属中間層によるAIN膜のc軸配向度の改善を、主に透過型電子顕微鏡とX線回折実験で解析した。その結果、metal/AINの局所的エピタキシャル関係(local epitaxy)が重要な役割を果たしていることが確かめられた。スパッタ条件による圧電特性変化を明らかにするために、極性分布をピエゾ応答顕微鏡(PFM)で評価した。これらの結果を基に高機能圧電素子材料としてのAIN薄膜について議論する。これらの成果は、スパッタ以外の方法で成長させたAIN系機能材料に対しても有益な情報となる。

「その場ファセット構造制御(In-situ FACELO)を用いたAlGaInのMOVPE成長」

平松和政（三重大学大学院 工学研究科）

波長300nm以下での深紫外領域での発光デバイスではAlモル分率が50%以上のAlGaInが必要になる。そのエピタキシャル層には発光効率を低減させる転位が通常 10cm^{-2} 以上と多数存在するので、発光デバイスの高性能化には転位密度低減が不可欠である。転位低減方法には選択横方向成長(ELO)が主に用いられているが、AlGaInではマスクを用いた選択成長が困難であるため、基板表面に凹凸状にエッチングを施した加工基板が一般に用いられている。

そこで下地層として、その場ファセット構造制御(In-situ FACELO)を用いてAINテンプレート基板の上にストライプ状のGaInファセット構造を作製し、その上にAlGaInを成長させ転位密度の低減を試みた。反射光モニタリングを用いてその場観察を行いながらGaInの選択成長を行うことで、{11-20}面と(0001)面からなるファセット構造の精密な制御が可能になった。さらにそのファセットを有するGaIn上に $\text{Al}_{0.51}\text{Ga}_{0.49}\text{In}$ の選択成長を行った結果、クラックの発生が無くかつ転位密度が2桁程低減した。AlGaInエピ層の高品質化のためには、下地GaInのIn-situ FACELOが有効であることを実証した。

「非発光電子遷移検出による半導体光吸収スペクトル測定」

福山敦彦、王萍（宮崎大学大学院 工学研究科）

半導体材料評価においてその光吸収スペクトルを測定することは大変重要である。しかしながら従来の入射光と透過光の強度比から求める手法では光学的に非常に厚いあるいは薄い材料での測定は困難である。そのためフォトルミネッセンス法(PL)やフォトリフレクタンス法(PR)が主に用いられている。共に高い分解能をもち幅広い温度範囲での測定が可能であるが、何れも光吸収の閾値はわかるものの、光吸収スペクトルの形状、すなわちバンドの電子状態密度は分からない。そこで我々は、重要な物理素過程でありながらこれまで測定されずにいた非発光電子遷移に注目している。同過程はそのときに放出されるフォノン(熱)を検出することによって評価が可能で、これに基づき圧電素子光熱分光法(PPTS)を開発した。本講演では PPTS によるこれまでの研究成果を報告する。InGaN 薄膜に関する研究では、多孔質化により PR スペクトルが得られない In 組成比においても感度よく光吸収スペクトルが得られる事が分かった。また GaInNAs 単一量子井戸構造に関する研究では、フィッティングにより井戸内の励起子吸収と2次元化された離散化準位間吸収を明確に分離できたことを報告する。

「厚膜エピを目指した原料分子制御 HVPE 法: AlN, AlGaN および InN」

瀬戸明伯、熊谷義直、村上尚（東京農工大学大学院 共生科学技術研究部）

高品位 GaN 自立基板結晶の成功が次世代 DVD を実現化したことから明らかなように、新機能・高機能素子のためには高品位の窒化物自立基板が不可欠である。現在、実用化されている GaN は大きな成長速度が得られる一塩化ガリウム(GaCl)とアンモニア(NH₃)を原料とした HVPE 法により成長されている。一方、GaN と同様に、AlN および InN 結晶の HVPE 成長を考えると、大きな障害が存在する。AlN の HVPE では、原料である AlCl₃ と石英が反応し石英管の破損およびエピ層内への Si の汚染が起こる。また、InN の HVPE の場合は InCl₃ と NH₃ との反応の自由エネルギー変化(ΔG)が小さく反応が理論的に進行しない。

これまで、我々は①原料分子反応を制御し石英と反応しない AlCl₃ を原料とすることにより、AlN の HVPE に成功した。さらに、② AlCl₃-GaCl-NH₃ 反応系により、AlGaN 三元混晶の HVPE 成長への道筋を立てた。③ InN の HVPE に関しては、気相に安定して存在する InCl₃ に対して分子が持つ全エネルギーの大きな(不安定な) InCl₃ を原料に用いる HVPE 法で InN 成長に成功している。

本研究会では、原料分子を制御した HVPE の反応メカニズムを示すと共に、厚膜基板結晶の理想的な成長方法について議論したい

(研究集会)

戸田格子40周年 非線形波動研究の歩みと展望

研究代表者 東京大学大学院工学系研究科 西成 活裕

研究集会の目的

非線形波動研究は1960年代から本格的になり、今日に至ってはほとんど全ての物理・数学の分野で中心的なテーマとなっている。特に1960年代から1970年前半の日本人による貢献、たとえば、戸田による戸田格子の発見、谷内・矢嶋による逓減摂動法の開発、広田による直説法の考案などはその後の非線形波動研究に多大な影響を与え続けている。中でも、戸田格子は非線形波動研究において最も深い意義を持つもので、その発見のおかげでソリトンの統一理論が進み、また他の分野への応用への道も開かれた。

本年度は、この戸田格子発見のちょうど40周年にあたる記念すべき年である。そして九州大学応用力学研究所は、当時からの非線形波動研究のまさに中心拠点の一つである。そこで、応用力学研究所において戸田格子の誕生を記念する共同研究集会を開催することは重要な意義があり、また非線形研究者の望んでいる声そのものであるといえる。本研究集会では、戸田格子を中心にその研究の歴史を概観するとともに、今後の非線形波動研究に向けての新しい指針を皆で議論し合える場にしたいと考えている。とかく細分化されやすい現在の研究の状況に対して、戸田格子という軸を中心に据え、異分野の研究者が情報を交換し合い、また世代を超えた対話も生まれるようないきいきとした研究集会を開催する予定である。

成果の概要

本研究集会では3日間で特別講演5件、一般講演34件(内ポスターセッション16件)の計39件の講演が行われた。また2日目には戸田格子の研究を中心とした研究発表を行い、その歴史から最先端までの研究を概観することができた。そして戸田盛和先生ご本人のビデオインタビューを会場に流し、若手研究者へのメッセージや研究者として成功する秘訣などの興味深い話をしていただいた。さらに特別賞として広田良吾先生を選出し、その研究業績を称えた。2日目の夕方にはポスターセッションが行われ、大学院生など若手研究者を中心に実験から理論までレベルの高いプレゼンテーションと活発な討論が続き盛況であった。

特別講演は1件が最近発展しているパルペ方程式のレビューであり、残りの4件は戸田格子に関連した話題であった。まず、数式処理ソフトを用いた方程式の解の表現について、そして可積分な離散方程式系における戸田格子の果たしてきた役割について、また応用的な話題として戸田格子を用いたソリトンの異常透過現象、そして最後にソリトン方程式に内在する不安定現象など、様々な分野からの話題提供であった。一般講演で提供された話題も物理・工学から数学まで多岐に渡った。大まかに分類すると(1)非線形波動・非線形力学系の実験と理論(2)離散系・max-plus系・セルオートマトン系の理論とその交通流・生物現象への応用(3)可積分系の理論(4)離散可積分系と数理工学や幾何学・解析学・表現論などとの関わり、となる。

本研究集会への参加者は100人近くへのぼり、連日分野を越えて活発な討論と情報交換が行われた。特に大学院生や学部生の参加と発表が代表者の予想以上に多かったことを注意しておきたい。非線形波動と非線形力学系の中に新しい物理と数理的構造を見だし、そこで培われた技法が別の分野に応用され、またその分野との相互作用で新たな数理・物理が発見されていく、参加者はそのダイナミックな発展を間近に感じ、新たな研究の展望を得ることができた。そして、このような有機的な結びつきの根本の一つをなすものが、戸田格子の発見であったことは疑いようがない事実である。数理の根幹に関わる発見がこのように他分野に波及していくことは大変素晴らしい、ということを実感できたプログラムであった。

またこの研究会は日本評論社の数学セミナーという雑誌にも取り上げられ、取材を経て2008年3月号に特集された。そこで戸田格子40周年の記念の論文が本研究会の研究発表をもとにして掲載され、さらに戸田先生のビデオインタビューも活字になり、多くの研究者や一般の人々の目に触れることとなった。

本研究集会は話題が工学から数学まで多岐に渡り、かつ、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。非線形科学のような横断的な分野ではこのような場を持つことが大変重要であって、応用力学研究所がこの貴重な場を提供していることは大きな意味を持っている。参加者を代表して厚く感謝する次第である。

講演プログラムと概要

11月7日(水)

○ 13:00~13:30 再帰方程式の無限個の生成について

齋藤 暁, 齋藤 革子 (横浜国立大・工)

論文 JPSJ 76/024006 に於いて, 可積分写像の周期点集合は周期点毎に異なる多様体を成すことを示した. その結果, 任意の初期値に対して全ての解が一定の周期を持った周期解となる方程式 (再起方程式) が幾らでも得られることを示す.

○ 13:30~14:00 Appell の補題と KdV 保存則再訪

山本 悠, 長瀬 昭子, 大宮 真弓 (同志社大・工)

2階常微分方程式の2つの解の積の満たす方程式に関する Appell の補題という, 極めて古典的かつ初等的な事実 に 依拠して, Deift-Trubowitz 型跡公式を援用しつつ, 古くから知られている無限個の KdV 保存則の局所密度について報告する.

○ 14:15~14:45 E 型アフィンワイル群対称性を持つ加法的離散 Painlevé 方程式の超幾何解

梶原 健司 (九州大・数理学)

Sakai によって分類された2階の Painlevé 系のうち, $E_6^{(1)}, E_7^{(1)}, E_8^{(1)}$ 型のアフィンワイル群対称性を持つ加法的離散 Painlevé 方程式のもっとも簡単な超幾何解を構成する. これによって超幾何解を許容するとされる2階の全ての Painlevé 系に対して, 解として現れる超幾何関数の同定が完了したことになる.

○ 14:45~15:45 $E_8^{(1)}$ 型 q -Painlevé 系の超幾何タウ関数 (特別講演)

増田 哲 (神戸大・理)

Painlevé 方程式および離散 Painlevé 方程式は, 超幾何関数およびその離散類似で表されるような特殊解を持つ. 本講演では, $E_8^{(1)}$ 型 q -Painlevé 系の超幾何解に対するタウ関数の構成について述べる.

○ 16:00~16:30 代数的ベーテ仮説によるスピネス・フェルミオン模型の相関関数

茂木 康平 (東京大・理), 堺 和光 (東京大・総合文化)

フェルミオン系を直接扱うことのできる量子逆散乱法を用いてスピネス・フェルミオン模型の形状因子や相関関数 (グリーン関数) の厳密な積分表示を求め, 自由フェルミオン点で既存の結果を再現することを確かめた.

○ 16:30~17:00 トロピカル楕円曲線と超離散 QRT 系

野邊 厚 (大阪大・基礎工)

超離散 QRT 系はトロピカル楕円曲線の群構造の定める力学系であることを示す. さらに, トロピカル楕円曲線の Abel-Jacobi 写像を用いて, 超離散 QRT 系をトロピカルヤコビ多様体上で線形化し, 基本周期に関する公式を導く.

○ 17:00~17:30 拡張フロアフィールドモデルによるボトルネック周りの群集運動の解析

柳澤 大地, 友枝 明保, 西成 活裕 (東京大・工)

本研究で, 避難設計において重要な出口から人が単位時間あたりに何人脱出できるかを表す流動係数について, 実験・シミュレーション・理論の三つの方法を用いて研究を行った. 実験では障害物を出口の前に設置すると, 流動係数が大きくなるという結果が得られた. シミュレーションではフロアフィールドモデルの人どうしの衝突を表す衝突パラメータを定数から衝突に関わった人数の関数へと拡張することにより, 実験結果を再現できた. また理論では, 過去の我々の研究成果である流動係数の解析の近似精度を上げることに成功し, よりシミュレーションと一致させることができた. また障害物が流動係数を増加させる原因も考察し, 障害物の位置を変えることによって流動係数が変化することも解析的に調べることができた.

11月8日(木)

○ 9:30 ~10:00 戸田格子と渋滞学

金井 政宏 (東京大・数理科学), 西成 活裕 (東京大・工)

本研究では, 戸田方程式のベックルント変換である Kac-van Moerbeke 系と厳密解を持つ交通流モデルとの関係を明らかにし, KM 系の力学的意味づけを行うと同時に可積分理論の渋滞学への応用を示したい.

○ 10:00~10:30 戸田方程式と微分幾何

井ノ口 順一 (宇都宮大・教育)

1990 年台以降, 2 次元戸田方程式がさまざまな微分幾何学に登場することが明らかになった. 本講演では微分幾何学と戸田方程式のかかわりについて概説する.

○ 10:45~11:45 Exploring the Toda lattice with 3D-XplorMath (特別講演)

Martin Guest (首都大学東京・理工)

We shall demonstrate the software 3D-XplorMath, which contains a series of “exhibits” on lattice dynamics - including, of course, the Toda Lattice. This software was written by Richard Palais and Hermann Karcher in the 1980s, to investigate minimal surfaces. It has been expanded in several directions since then, and can be used for both research and educational purposes. We shall demonstrate some examples of lattice dynamics, in particular the Fermi-Pasta-Ulam experiment. After that we shall mention some recent applications of the Toda Lattice in pure mathematics, such as in quantum cohomology theory.

○ 13:00~14:00 Toda equations as paradigms of integrable (continuous, discrete and ultradiscrete) systems (特別講演)

Basil Grammaticos (パリ第7大学), **Alfred Ramani** (エコル・ポリテクニク)

We investigate the singularity structure of the Toda system. The approach used in this study is through the Painlevé property for differential systems and its discrete analogue, known as singularity confinement. We show that the Toda systems satisfy this integrability criterion. Both discrete/continuous and fully discrete versions of the Toda lattice are examined as well as an extension to the domain of ultradiscrete, cellular automaton-like systems. For the latter a recently proposed integrability criterion is implemented.

○ 14:00~15:00 接合戸田格子におけるソリトンの異常透過 (特別講演)

久保田 陽二 (分子科学研究所), **小田垣 孝** (九州大・理)

非線形媒質間の接続部におけるソリトン散乱を解析するモデルとして2つの戸田格子を線形格子で結合したのを用い、ソリトン散乱を数値シミュレーションにより解析した。透過ソリトンのエネルギーを用いて透過係数を定義し、様々なパラメータについて系統的にソリトンの透過率を求めた。その結果、ソリトンの共鳴透過と遅延透過という2つの異常な透過現象を発見した。共鳴透過の理解を深めるために入射ソリトンの振幅の小さい場合と大きい極限について、共鳴透過の起こるパラメータを解析的に求めた。また、遅延透過が起こるには、準局在現象の存在と、2つのばねの運動の時間スケールの一致が重要である事を示した。

○ 15:15~16:15 ソリトン方程式の不安定解の超離散極限用 (特別講演)

広田 良吾 (早稲田大学名誉教授)

差分 KdV 方程式や戸田方程式の解 U は2種類に分類される。一つは値が $U > 1$ となる解で超離散化すると $u > 0$ である。これを正の解と呼ぶ。もう一つは値が $1 > U > 0$ となる解で超離散化すると $u < 0$ である。これを負の解と呼ぶ。差分方程式の負の解は不安定な解である。しかし、負の解は超離散化すると安定な解になる。正の解と負の解の衝突によって新しい現象が観測される。

○ 16:20~17:00 戸田先生からのメッセージ (ビデオ)

戸田格子秘話, 成功する研究とは? 研究者へのメッセージ

戸田格子40周年記念賞として広田良吾先生を表彰

○ 17:10~18:30 ポスターセッション

(1) 結合振動子の同期現象と非線形発展方程式

山本 悠, 大宮 眞弓 (同志社大・工)

本報告では、ある種の近接接合型の結合振動子の同期現象をその結合振動子の連続極限に対応する非線形発展方程式の解の特性との関係を Kuramoto の秩序変数を用いた数値実験により考察する。

(2) KP 方程式の多ソリトンの最大振幅と Extreme Wave の生成

丸野 健一 (UTPA), **Gino Biondini** (SUNY-Buffalo), **及川 正行, 辻 英一** (九州大・応力研)

KP 方程式の多ソリトン相互作用時における振幅の最大値を厳密に求める方法について報告する。この方法を用いて、通常よりも振幅が大きく増幅される場合を分類する。この機構は海洋における extreme wave 生成機構のひとつとなりうる。

(3) 首都高にみる膨張衝撃波

社本 大輔 (東京大・工)

首都高に発生する渋滞現象を流体力学的な視点から考える。流体力学で発展した特性曲線の議論を車の流れに応用することで交通流でも衝撃波が生成されることを述べる。また交通流で流体力学では起こりえない膨張衝撃波が生成される可能性についても考える。

(4) 特異値分解を用いた画像圧縮方法に関する研究

笹田 昇平, 近藤 弘一 (同志社大・工), **岩崎 雅史** (京都府大・人間環境)

特異値分解を用いた Kakarala-Ogunbona の画像分解アルゴリズムは個々の画像から分解フィルタを

抽出する。そのため、画像の性質を含んだフィルタの生成が可能である。本手法の画像圧縮への応用について考察を行う。

(5) 大域的情報に基づく時間発展ルールを持つ二次元 CA について

中村 伸也 (早稲田大・理工), 岩尾 昌央 (東京大・数理科学), 岩尾 昌央 (早稲田大・理工)

大域的情報に基づき時間発展する二次元 CA を構築する。この CA には孤立波のようなパターンが存在し、そのパターン同士の衝突ですり抜けや消滅が起こる。また、様々な拡張が可能でありその実例をいくつか示す。

(6) 対面 2 粒子流における流動-凝固相転移

鈴木 迪子, 飯塚 剛 (愛媛大・理工)

通路を対面的に流れる 2 種類の粒子について流動-凝固相の転移を統計的に調べた。排除体積的なセルオートマトンモデルを用いて、流れのライフタイムを測定し頻度分布を調べると指数減衰していることが分かり、平均ライフタイムを求めることが出来た。粒子数をパラメタとしてライフタイムが無窮大となる臨界点を推定した。同様の手法を用いて左右向き進行粒子数をパラメタとした平面上で流動相と凝固相に分離し相図を作成した。相図では高密度の異常現象を発見した。

(7) 表面の温度分布を用いた浮遊液滴の振動制御

崔 大宇, 榎 祐作 (東京大・工)

宇宙空間での無容器冷却技術で、液滴の振動制御が問題になっている。本研究では、液滴の表面の温度分布を与えることで表面張力を制御し、液滴の振動を抑えることを提唱する。

(8) Hillman-Grassl 対応の明示公式

足立 進吾 (京大・情報)

Robinson-Schensted-Knuth 対応と呼ばれる組合せ論的アルゴリズムはクリスタル基底の変換という表現論的意味付けを持つと同時に、「逆超離散化」により離散可積分系との関係も知られている。この報告では RSK 対応の一つの拡張と考えられる組合せ論的アルゴリズム、Hillman-Grassl 対応について、有理変換類似を導入し、離散可積分系の手法を応用することで対応の明示公式を与える。

(9) 予測を取り入れたフロアフィールドモデルによる人の対向流のシミュレーションと実験

須摩 悠史, 西成 活裕 (東京大・工)

本研究では、他人の動きを予測して回避する効果を持たせる Anticipation Floor Field を導入したフロアフィールドモデルによる、人の対向流のシミュレーションを行った。その結果、予測の強度や距離により平均旅行時間や衝突回数が増加することがわかった。また、シミュレーションに合わせて 30 人ほどの規模で行った実験の結果との比較、検討も行った。

(10) 付着と脱離を許した多成分 ASEP に対する一考察

有田 親史 (東京大・理)

1次元格子上的各サイトで、粒子の付着と脱離を許した多成分の非対称単純排他過程 (Asymmetric Simple Exclusion Process) を考える。系の時間発展は連続時間のマスター方程式に従うものとし、遷移率は各サイトまたは各ボンドに依存しているとする。本研究では定常状態が局所的な重みの積で書けるためのパラメタ (遷移率たち) に対する条件を導いた。このとき局所的な重みはパラメタから作られるある行列の行列式の形で書けることを示した。

(11) 交互配置化による織込部交通流の渋滞改善策

西 遼佑 (東京大・工)

本稿では、二車線上の車を自発的に交互配置化させ、織込部交通の渋滞を改善する計画を提案する。SOV Model に、隣接車線同士の車が反発する効果を付加し、車を交互配置化する交通流モデルを作成する。Simulation の結果、減速効果による反発作用を加えた場合、交互配置化が誘起され、平均速度が増加し、衝突事故の危険性も下がることが分かる。

(12) Potential Kaup-Newell (Derivative NLS) 方程式の解公式

土田 隆之 (岡山量子科学研究所)

Kaup-Newell 型の Derivative NLS 方程式の解は、通常、Chen-Lee-Liu 型や Gerdjikov-Ivanov 型といった他の Derivative NLS 方程式の解に変数変換を施して、導出される。しかし、それでは、煩雑な表式になってしまう上、potential Kaup-Newell 方程式の解を与えることができない。この講演では、potential 変数に対する直接的で簡潔な解の公式を与える。

(13) CA による微小管の伸縮を考慮した分子モーターの渋滞解析

野口 義朗, 西成 活裕 (東京大・工)

脳内の神経細胞は中心から軸索という長い突起が一本伸びており、他の神経細胞とコネクションをとっている。その軸索内には神経の中核から末端へと様々な物質を運ぶ流れが存在するが、今回はそこでの運び屋である分子モーターに着目した。

この分子モーターは軸索内に散在する微小管という細い管にそって物質を運ぶが、この分子モーター

がどこかで詰まってしまうと神経の末端部に十分量の必要物質の供給が行われず脳の活動に支障をきたす。また、微小管は両端で伸縮が絶えず行われている。

C Aによる分子モーターのモデル化については過去、様々な研究があるが、微小管の伸縮まで考慮したものはない。

そこで、セルの総数を時間ごとに変化させるというA S E P拡張型のモデルを用いて、分子モーターの粒子の振る舞いを調べてみた。その結果、ノーマルのA S E Pと比べて伸縮が流れの混雑をある程度緩和することが確かめられ、相図上においてもS W相が右にずれF R E E相が拡大し、代わってJ A M相が縮小するなど、全体模様がA S E Pにおける基本の相図から変化することがわかった。

(14) 系を不変に保つベクトル場による摂動問題の解の構成方法

巖佐 正智 (名古屋大・理)

常微分方程式における摂動解を構成する際に、その方程式を不変にするベクトル場を導入することにより、ある次数における解から次の次数の解を構成するための漸化式を一般的な形で導出することができたので報告する。

(15) 斜面を転がる球と粉粒体モデル

佐原 亨, 西成 活裕 (東京大・工)

斜面を転がる鉄球を衝突させる実験とそれを模したシミュレーションを行い、その様子を巨視的な粉粒体とみなしてアプローチを試みる。また、衝突の伝播の様子を流体における衝撃波としてとらえて考える。

(16) 拡張結合型バーガス方程式による多車線交通流モデル

山田 剛 (東京大・工)

多車線交通流モデルの一つとして拡張結合型バーガス方程式によるモデルを提案する。一般的な結合バーガス方程式に流出入項を導入した本モデルが、任意の n 車線において解析的に解ける事を示す。

11月9日 (金)

○ 9:30 ~10:00 超離散ソリトン方程式の行列式解

長井 秀友, 高橋 大輔 (早稲田大・理工)

超離散戸田方程式, 超離散 mKdV 方程式, および可変容量箱玉系を表す非自励超離散 KP 方程式について、行列式の定義から符号を取り除いたパーマネントの超離散化によってソリトン解を与えた。また、この新しい形式のソリトン解とすでに知られている摂動形式の超離散ソリトン解との関係を示した。さらに解の証明について、差分ソリトン解の証明を援用することなく、超離散方程式におけるマックスープラス演算で閉じた形で証明を与えた。

○ 10:00~10:30 離散時間戸田格子から得られる再帰方程式について

斎藤 革子 (横浜国立大・工), 斎藤 暁

講演「再帰方程式の無限個の生成について」で得られた結果を離散時間戸田格子に応用した。参照 ArXiv math-ph/0612084 (J.Phys.A to appear)

○ 10:45~11:15 Fano resonances at light scattering by a finite obstacle and their modeling by a discrete chain

Michael I. Tribelsky (九州大・数理, Moscow State Inst. Rad. Electr. Aut.), Sergej Flach (Max plank Inst.), Andrey E. Miroshnichenko (Austr. Nat. Univ.), Andrey Gorbach (Univ. Bath), Yuri S. Kivshar (Austr. Nat. Univ.)

It is shown that elastic resonance scattering of light by a finite size obstacle with weak dissipation is analogous to quantum scattering by a potential with quasidiscrete levels and exhibits Fano resonances. Localized plasmons (polaritons), excited in the obstacle by the incident light, are equivalent to the quasidiscrete levels, while the radiative decay of these excitations plays exactly the same role as tunnelling from the quasidiscrete levels for the quantum problem. Mie scattering of light by a spherical particle and an exactly solvable 1D discrete model with non-local coupling simulating wave scattering in systems with reduced spatial dimensionality are discussed as examples.

○ 11:15~11:45 同次式ポテンシャル系の超可積分性の必要条件

吉田 春夫 (国立天文台)

同次式ポテンシャル系に対する既知の可積分性の必要条件をさらに制限する形で、超可積分性の必要条件を得た。その条件は直線解の周りの変分方程式を変換して得られるガウスの超幾何微分方程式の2つの一次独立な解が共に代数関数となる、と言う条件から導かれる。結果を中心力ポテンシャルに適用すると、ケプラー問題および等方調和振動子のみが条件を満たすことが確認できる。

○ 13:00～13:30 成田空港への応用に向けたイベントモデルの紹介

木村 紋子, 柳澤 大地, 西成 活裕 (東京大・工)

イベントモデルは人の出入りがある現象に対して, マクロな滞在人数変化を把握するためのモデルである。本講演ではこのイベントモデルの厳密解を求め, 安定性の証明を紹介した。またイベントモデルのシミュレーションと実際のイベントでの観測を比較し, イベントモデルが妥当なものであることを示した。更にイベントモデルの拡張を数種類紹介し, より現実の現象にモデルを近づけるよう努力した成果を発表した。

○ 13:30～14:00 非線形シュレーディンガー方程式の記述する大規模乱流構造

佐々 成正, 町田 昌彦 (日本原子力研究開発機構), 坪田 誠, 小林 未知数 (大阪市大・理)

非線形シュレーディンガー方程式 (斥力系, 空間3次元) は多数の量子渦糸が絡まり合った量子乱流状態を記述する。最近, この量子乱流と通常乱流の中間に位置する大規模量子乱流構造を見出したので, それについて報告する。

○ 14:15～14:45 $(-1)^M(d/dx)^{2M}$ に対するディリクレ・ノイマン境界条件境界値問題と対応するソボレフ不等式の最良定数

山岸 弘幸 (大阪大・基礎工), 亀高 惟倫 (大阪大名誉教授), 永井 敦 (日本大・生産工)
渡辺 宏太郎 (防衛大), 武村 一雄 (日本大・生産工)

リーマンゼータ関数 $\zeta(z) = \sum_{n=1}^{\infty} n^{-z}$ ($\text{Re } z > 1$) の特殊値 $\zeta(2M)$ に変分学的な意味づけを行った。

$(-1)^M(d/dx)^{2M}$ に対するディリクレ・ノイマン境界条件境界値問題を考える。グリーン関数はあるヒルベルト空間と内積のもとで再生核となる。対応するソボレフ不等式の最良定数はグリーン関数の対角線値の最大値である。離散変数の場合についても考察した。

○ 14:45～15:15 ソリトン方程式に付随した確率過程と遞減摂動法

矢嶋 徹 (宇都宮大・工), 宇治野 秀晃 (群馬高専)

講演者は, サインゴールドン方程式や非線形シュレーディンガー方程式に関連した確率過程を構成し, その振る舞いを調べてきた。これらの方程式は遞減摂動法によって関連づけられているが, 確率変数のレベルでその対応がどうなっているか検討し, 確率変数の振る舞いを解釈する。

○ 15:30～16:00 人の発進波・停止波シミュレーション～人の反応の速さについて～

友枝 明保, 柳澤 大地, 西成 活裕 (東京大・工)

人が歩き出すときや止まるときの反応の速さというものは一体どれくらいだろうか? 本研究では, 人が歩き出すときや止まるときの反応の伝播速度を実験による測定し, その発進波・停止波の伝播速度に対するシミュレーションと理論計算を行うことで定量的な結果を得た。測定実験から, 発進波・停止波の伝播速度は上り坂と下り坂で異なり, 逆転現象が存在することがわかった。そこで, セルオートマトンモデルを用いてシミュレーションを行ったところ, 伝播速度の逆転現象を再現することに成功した。また, 発進波に関しては, 平均場近似を用いることで道路形状 (平地・上り坂・下り坂) による伝播速度の違いを理論的に計算できた。

○ 16:00～16:30 接続剛体系を移動する非線形局在モード

渡辺 陽介, 濱田 和幸, 杉本 信正 (大阪大・基礎工)

マクロな周期構造における波動現象を考察するための単純な力学モデルとして, 形状や性質が等しい多数の剛体のはり (またはパネル) がそれぞれの両端で連結された“接続剛体系”を考える。連結部では隣り合う二つのはりがなす相対的な回転角 ($\Delta\phi$) に応じて復元モーメントを与える回転バネが仕込まれているものとする。このような周期構造での波動現象の特徴は, 周期構造の代表である結晶格子系の場合と異なり, ‘横波’が強く関与していることである。‘非線形回転バネ’ ($\Delta\phi$ に対して復元モーメントの大きさが $\Delta\phi$ の1次と3次の和の形によって与えられる) を仮定し, 系の変位の大きさの有限性ととも, 系に非線形性を持たせると, 適当な初期条件の下で, 空間的に局在した振動 (非線形局在モード) が現れる。本講演では特に, 非線形局在モードが系内を移動する場合について明らかになったことを報告した。

開催の期間 平成19年11月7日～平成19年11月9日

参加者 87名

地形のダイナミクスとパターン

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 講演内容の概要

超小型水槽を用いた湧水起源チャンネル発達実験

遠藤徳孝

畳一畳程度の大きさの水槽を用いて、地下水の湧水によるチャンネル発達を観察した。実験チャンネルと自然界の河川・溪谷などの形状及び発達過程の比較を行った。また、谷頭の発達過程を記述する数値モデルの可能性について検討した。

地形を見る目を磨くのに役立つ実験

池田 宏

砂礫堆の形成条件を東京教育大学大学院で研究。用いた実験水路を核として筑波大学に水理実験センターが発足し、幅4 m、長さ160 mの大型水路が建設された。砂と礫とを混ぜて流す実験によって、砂と混ざると礫がきわめて運ばれやすくなる混合効果を見出し、内外の研究者との共同研究を続け、グランドキャニオンを流れるコロラド川の環境保全研究に参加。人工洪水による河床の砂州の復元を試みたが、地形環境を見る目が弱かったために失敗。以来、地形を見るために必要な時間の目と比較の目を磨くために役立つ地形実験を考案。地形を見る目を伝えるために、講演と出前実験授業と現地見学会を各地で実施中。実験装置の小型化が現在の課題。瞬間一発芸として見せるために作った簡単な実験をいくつか見てもらった。

河川による地形パターンの形成

佐伯 亜由美, 岡村 誠

地形パターンの形成プロセスは、流体運動や粉体のダイナミクスなど複雑な問題を多く含んでいる。また植生や天候など様々な要因によっても大きく左右され、非常に困難な問題である。そのパターン形成過程を解明するために多くのモデルが考えられてきたが、その複雑さゆえにどうしても経験則を用いたモデルが多い。そこで我々は流体の運動を基礎としたより原理的なモデルを作り、それについて数値シミュレーションを行った。ここでは新しいモデルとそのシミュレーション結果を紹介する。

乾燥破壊によるペーストの記憶の視覚化

中原明生, 篠原 雄, 稲垣翔太, 勝木厚成, 松尾洋介

我々は粉と水を混ぜて作ったペーストが揺れや流れを記憶することを実験的に見出した。記憶によるペーストの構造変化は弱いために、ペーストを直接観察してもその記憶の有無はわからない。ところが、そのペーストを乾燥させ収縮により破壊させることによって、ペーストの記憶を亀裂パターンとして視覚化することに成功した。具体的には、ペーストが揺れを記憶するときは亀裂パターンの方向は揺れに垂直に、そして、ペーストが流れを記憶するときは亀裂パターンの方向は流れに平行になることがわかった。我々はこの記憶効果を工学的に応用して、ペーストを乾燥前に揺すったり流したりすることによって、乾燥によって生じる亀裂パターンを自在に制御することにも成功した。

乾燥破壊での亀裂の伝播

狐崎 創

ゆっくりした乾燥に伴って生じる粉体ペーストの破壊の伝播速度を炭酸カルシウムとコーンスターチの2種類のペーストで測定し、乾燥速度に対する依存性、グリセリンを混ぜた場合の変化、試料の厚さ依存性を調べた。ペーストは柔らかい塑性体の状態で割れ亀裂は逐次的に生成し、個々の亀裂はほぼ一定の速度でゆっくり成長する。両ペーストとも亀裂速度は乾燥が遅くなると減少するが、その範囲と試料の厚さ依存性に著しい違いがあることがわかった。

バルハン砂丘のサイズ分布

勝木厚成

風と砂の相互作用で形成される砂丘は美しく多様で多くの人々を魅了してきた。しかし、砂丘自身のダイナミクスはまだ未解明な部分が多く、特に砂丘間の相互作用に関する研究は数少ない。そこで、粗視化された砂丘模型を使い、砂丘サイズの分布を求めたところ、対数正規分布に従うことがわかった。また、2つの砂丘回廊の境界域での砂丘分布を求めた。

成因不明の「涙型砂丘」の形成環境

—斜交する二方向流下での地形発達を調べる水槽実験—

谷口圭輔, 遠藤徳孝, 関口秀雄

火星面上には、「涙型砂丘」と呼ばれる形成環境未知の孤立砂丘が存在する。涙型砂丘が形成される流れ環境の推定のため、 $0^\circ \sim 180^\circ$ までの幅広い流向変動量を持つ二方向流が作用する環境を実験水槽内で再現し、どのような地形が形成されるのかを観察した。その結果、斜交する二方向流の下では、角度変動量 θ に依存してバルハン型 ($0^\circ < \theta < 30^\circ$)・涙型 ($45^\circ < \theta < 75^\circ$)・セイフ型 ($90^\circ < \theta < 135^\circ$)・反転型 ($150^\circ < \theta < 180^\circ$) という4種類の地形が形成されることが分かった。斜交二方向流下で発達する地形が θ に依存して変わるのは、流向変動時のクレストラインの変形方法が異なるためである。同じクレストラインがそのまま使われる「共有」、上流・下流が逆転して使われる「反転」、既存のものとは無関係に新しいクレストラインが作られる「非共有」という3種類の变形方法が存在した。火星の涙型砂丘と共通の丸いボディと一本の短いホーンを持つ地形は、 $\theta = 75^\circ$ の条件で見られた。火星面上においても、成す角 75° 程度の交互二方向流の存在が推測される。

リーゼガングリングにおけるパターン遷移

寅丸敦志, 山内沙耶香, 上山大信, 三村昌泰, 伊大知晃, 岡村隆広, 原田剛志

リーゼガングリングと呼ばれる沈殿拡散系のパターン形成において、拡散媒質である寒天の成分濃度と伴に、周期的沈殿から枝分かれ構造へとパターン遷移が起こる。講演では、このパターン遷移の実験と数理モデルについて紹介し、パターン遷移の成因について考察する。

つららや鍾乳石の表面上にできる波模様

上之和人, 山口 悟, 松田真一

つららの表面にはリングを積み重ねたような規則正しい波模様が存在する。不思議なことに、つららとは全く成長機構の異なる鍾乳石の表面にもそのような波模様が存在する。波模様の平均波長は、表面を流れ落ちる水量や直径にはほとんど依存せずどれも約1cm程度である。このような普遍性を理論的に説明する試みは誰にもなされていない。つららや鍾乳石が成長する場合、表面は流れる薄い液膜で覆われており、液膜のひとつの面は自由表面であり、もうひとつの面は成長する固液界面である。気液界面の形の影響を考慮に入れた薄いシアー流れ下での固液界面の形態不安定性の理論がはじめて提唱された (K. Ueno, Phys. Rev. E, 2003, 2004)。低温室内で、表面の滑らかな木製の円柱の棒や平らな木製の桶の表面上に水を流して氷の波模様を作る実験を行った。水量や棒の直径を変えて波模様の波長を測定し、理論的予測を検証した。

粉体クレーター形成の動力学

桂木洋光, ダグラス・デュリアン

固体弾を粉体層に衝突させるとクレーターが形成される。その際に固体弾は粉体層から抵抗力を受け最終的に停止に至る。この過程は基本的に一次元の固体弾の運動で記述することが出来る単純なものであるが、その具体的な運動方程式は未だに明らかにされていない。このような状況を受け、近年、ルースな粉体層に固体弾を低速で衝突させた際の侵入深度やダイナミクスが盛んに研究されるようになった。しかし、それら最近の実験結果は一見お互い相容れないように見え、粉体衝突抵抗力の統一的記述は困難な状況となっていた。そこで本研究では、この混乱した状況を解消することを目指し、高精度の固体弾ダイナミクス測定システムを構築した。この新たに開発したシステムを用いて、粉体衝突抵抗力 ΣF が $\Sigma F = -mg + k|z| + mv^2/d_1$ となることを明らかにした。ここで、 m, z, v は固体弾の質量、侵入深さ、速度であり、 g は重力加速度、 k, d_1 は摩擦抵抗、慣性抵抗を特徴づけるパラメータである。

3 プログラム

11月15日(木) ○印は招待講演

- 14:00-14:40 遠藤徳孝(金沢大)
超小型水槽を用いた湧水起源チャンネル発達実験
- 14:45-15:45 池田 宏○(元筑波大)
地形を見る目を磨くのに役立つ実験
- 16:00-16:40 佐伯 亜由美, 岡村 誠(九大)
河川による地形パターンの形成
- 16:45-17:25 中原明生, 篠原 雄, 稲垣翔太, 勝木厚成, 松尾洋介(日大)
乾燥破壊によるペーストの記憶の視覚化
- 17:35-18:15 狐崎 創(奈良女大)
乾燥破壊での亀裂の伝播

11月16日(金)

- 9:00-9:40 勝木厚成(日大)
バルハン砂丘のサイズ分布
- 9:45-10:25 谷口圭輔(阪大), 遠藤徳孝(金沢大), 関口秀雄(京大)
成因不明の「涙型砂丘」の形成環境—斜交する二方向流下での地形発達を調べる水槽実験—
- 10:45-11:45 寅丸敦志○(九大), 上山大信, 三村昌泰(明治大), 伊大知晃, 岡村隆広, 原田剛志(金沢大)
リーゼガンゲリングにおけるパターン遷移
- 13:00-14:00 上之和人○(名大), 山口 悟(防災科学技術研究所), 松田真一(日本気象協会)
つららや鍾乳石の表面上にできる波模様
- 14:05-14:45 桂木洋光(ペンシルバニア大, 九大), ダグラス・デュリアン(ペンシルバニア大学)
粉体クレーター形成の動力学

4 開催日程, 場所

開催日程 2007年11月15日(木) - 11月16日(金)
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 10件
参加者数 19人

(研究集会)

ナノ複合材料の創製及び評価に関する研究

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。

ナノ複合材料の研究は、カーボン・ナノチューブが1991年に発見されたときから盛んになり、15年が経つ。その間、世界各国において、カーボン・ナノチューブをはじめ、様々なナノ複合材料が研究されてきた。特に、カーボン・ナノチューブの卓越した剛性と強度から、カーボン・ナノチューブを補強材とする複合材料の研究は各国が競って研究を進めている。しかし、そのスケールの微小さに生じる様々な困難により、カーボン・ナノチューブの卓越した剛性と強度を有効に発揮できるナノ複合材料はまだ開発されていない。それを実現するには、数多くの研究者の更なる努力が必要である。

また、カーボン・ナノチューブ・ナノ複合材料のほか、シリカ・ナノ粒子強化複合材料やナノ・クレイ強化複合材料など様々なナノ複合材料が研究されている。ナノ・テクノロジーを利用した新しい複合材料の開発には、その複雑さやコストの面から、数多くの研究者の共同研究が成功の鍵となる。

研究代表者はこれまでカーボン・ナノチューブ・ナノ複合材料の作製や力学特性について研究を進めてきた。高雄教授と世話人の汪助教授はナノ複合膜によるFMLの開発やナノ複合材料の力学特性の評価について研究を進めてきた。それらの研究を踏まえ、本研究集会を通じて国内外の研究者との共同研究を進め、ナノ複合材料の研究を一步でも前進させていきたい。

ナノ複合材料は、これまでの材料では克服できなかった領域をナノ・テクノロジーで対処していかうとした材料であり、ナノ粒子、ナノファイバ、ナノチューブなどのナノ・スケールの材料を補強材または機能材とし、様々な用途に適した新しい複合材料である。このため、ナノ強化材及びナノ複合材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、十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、ナノ強化材及びナノ複合材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20年1月10日(木)～11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10日(木)】

- 14:00-14:05 **開会の挨拶**
宇田暢秀 (九州大学)
- 14:05-14:30 **表面処理されたCNT複合材料の力学的特性**
○広瀬秀俊(九大院), 宇田 暢秀, 小野幸生(九大)
- 14:30-14:55 **Tensile properties of ramie yarns by cyclic load treatment**
○祝侶, 合田公一 (山口大)
- 14:55-15:20 **歯質と光重合型コンポジットレジン界面における熱変形評価**
○中西 拓人(九大院), 新川 和夫, 森田 康之(九大), 内野 正和(福岡工技セ)

- 15:20-15:45 一方向CFRPの引張特性に及ぼす繊維配向不良の影響とその改善
○任 保勝(山口大・院), Azmi Nordin(山口大・学),
野田 淳二,合田 公一(山口大)
- 15:45-16:55 休憩
- 16:55-16:20 カーボンナノチューブと樹脂の界面強度測定およびそのMDシミュレーション
○鄧飛(東大・院), 津田皓正(東大・学), 小笠原俊夫(JAXA), 武田展雄(東大・新領域)
- 16:20-17:45 クレイ・ナイロン6ハイブリッドナノ複合材料の時間依存型力学特性
○朱 世杰,岡崎雅則(福岡工大),白杵有光, 加藤誠(豊田中研)
- 17:45-17:10 メカニカルコーティング法による複合光触媒薄膜の作製と機能評価
○中山博之(千葉大・院), 吉田浩之(千葉県産技研), 佐野秀樹(千葉大・学),
魯 云, 廣橋光治(千葉大・工)
- 17:10-17:35 放電プラズマ焼結法によるTi/TiO₂ 複合光触媒の作製とその特性評価
吉田浩之(千葉県産技研), ○中山博之(千葉大・院),
魯 云, 廣橋光治(千葉大・工), 佐野秀樹(千葉大・学)

【1月11日(金)】

- 09:00-09:25 ナノ薄膜の力学特性および微細組織の評価
○巨 東英(埼玉工大), 長谷川浩一(石福金属), 石黒 諭(埼玉工大・院)
- 09:25-09:50 ナノファイラー充填ゴム組成物の高周波領域における粘弾性挙動
○倪 慶清(信州大), 國澤鉄也(住友ゴム工業), 汪 文学(九州大)
- 09:50-10:15 カーボンナノチューブポリマー複合材料の電気伝導特性および高感度ひずみセンサへの応用
○胡 寧(東北大), 軽部嘉文(東北大・院), 福永 久雄(東北大)
- 10:15-10:40 CSCNT分散CFRPの力学的特性評価
○横関智弘, 青木隆平(東京大学), 岩堀豊(JAXA), 石橋勝, 柳澤隆(GSIクレオス)
- 10:40-10:50 休憩
- 10:50-11:15 電導性ナノカーボン/有機ポリマー複合材料
○陶有勝, 加納博文, 金子克美(千葉大・理)
- 11:15-11:40 バクテリア・セルロースを用いた複合材料
○菊地時雄(福島県ハイテクプラザ), 小沢喜仁(福島大学), 渡邊真義(福島県立郡山技術専門学校), 矢吹浩一((株)宮本樹脂工業)
- 11:40-12:05 エレクトロスピニング法によるVGCF 補強ナノファイバーの作製
○山下義裕, 香川浩志(滋賀県大工), 三宅肇, 東山明央(滋賀県東北部工業技術センター)
- 12:05-12:30 ナノウイスキー強化セラミックス義歯の作製
○汪 文学, 高雄 善裕, 松原 監壮(九大・応力研)
- 12:30-12:35 閉会の挨拶
汪 文学(九大・応力研)

講演概要

表面処理されたCNT複合材料の力学的特性

広瀬秀俊(九大院), 宇田 暢秀, 小野幸生(九大)

カーボンナノチューブ(CNT)は軸方向に非常に高い剛性と強度を持ち, また電気伝導率や熱伝導率が高いことからナノ複合材料の強化材としての期待が高い材料である. しかしながらCNTとポリマーの複合材料において, ポリマー中におけるCNTの不均一な分散や界面強度の弱さが問題となりCNTの特異な性質を十分に発揮できないことが多々ある.

NajafiらはUV/ozoneにより多層CNT (MWNT) の表面を酸化することで、カルボン酸、エステル、キノン等の官能基が修飾されることを報告している。これら官能基がポリマーと水素結合することにより界面強度の向上、及びポリマーとの親和性が増すことから、分散性の向上も期待できる。しかしながらこの処理を施したCNTとポリマーの複合材料について力学的特性は報告されていない。そこで本研究ではMWNTの表面をUV/ozoneにより酸化した後、エポキシ樹脂を母材とした複合材料を製作して引張試験を行い、力学的特性を調べた。そして試験後の破断面をSEMにより観察することで母材中のMWNTの分散の様子やエポキシ樹脂との接着性を考察している。さらにMori-Tanaka理論により複合材料の剛性テンソルを求め、弾性率についての考察を行う。

Tensile properties of ramie yarns by cyclic load treatment

祝侶, 合田公一 (山口大)

In order to improve the mechanical properties of ramie yarns, in this study, a new mechanical method, namely, cyclic load treatment, was developed by applying a load on the ramie yarns up to a proper value and then unloading, for different number of cycles under high temperature or wet state. The results of tensile tests revealed that compared to the untreated yarns, a significant increase of around 20-50% in tensile strength and about 70-120% in Young's modulus was obtained for the cyclic load treated yarns. In comparison, after the individual heat or wet treatment without cyclic load, it was found that tensile strength of treated yarns remained unchanged as the original value while Young's modulus was decreased remarkably, which implies that the introduction of cyclic load to the individual heat or wet treatment plays a crucial role in strengthening and stiffening of ramie yarns. To interpret the inner microstructural changes in the cyclic load treated ramie yarn, X-ray diffraction (XRD) measurement has been used. The crystallinity and crystalline orientation degrees calculated from X-ray diffraction diagrams showed little change in ramie yarns after cyclic load treatment. This suggests that the improved tensile properties of ramie yarns can be supposed to relate to the decreased microfibrillar angle and the general orientation, mainly the part of amorphous orientation in the fiber microstructure.

歯質と光重合型コンポジットレジン界面における熱変形評価

中西 拓人(九大院), 新川 和夫, 森田 康之(九大), 内野 正和(福岡工技セ)

現在コンポジットレジン充填は形態付与の容易さなどから、歯科医療に幅広く使用されている。コンポジットレジン充填の欠点の一つとして、天然歯と充填されたコンポジットレジンとの熱膨張係数が異なることが挙げられる。これは口腔内に温度変化が生じた場合、歯質とコンポジットレジンに熱応力を発生させ、界面の破壊につながるという報告もされている。しかしながら、温度変化によるコンポジットレジン充填の熱特性はまだ十分には解明されていない。

そこで本研究では歯質とコンポジットレジン界面における熱変形を評価した。本手法としては、ウシの歯に穴を開け、コンポジットレジン充填し硬化後、加熱していく。このときの歯質とコンポジットレジン界面をデジタルカメラによって撮影し、温度変化による挙動を、デジタル画像相関法によって解析した。

一方向CFRPの引張特性に及ぼす繊維配向不良の影響とその改善

任 保勝(山口大・院), Azmi Nordin(山口大・学), 野田 淳二, 合田 公一(山口大)

本研究は一方向CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics) の引張強度特性に及ぼす繊維配向不良の影響に着目したものである。著者らの経験によると、繊維束を用いてCFRPを成形する場合、繊維を伸張させずに作製したCFRPでは十分な強度が得られない。これは、材料

内部に局所的な繊維配向不良が存在するためと考えられる。本研究では、繊維を伸張させてCFRPを作製できる装置を用い、その伸長CFRPに対して繊維配向不良を人為的に設けるとともに、引張特性に及ぼす影響を調査した。さらに、繊維軸から傾斜して位置する配向不良繊維に対するシアラグモデルを提案し、繊維配向不良部周辺の繊維にかかる応力分布を調べた。さらに、カーボン繊維間の応力伝達を改善することを目的とし、エポキシ樹脂にナノクレイを添加し、そのナノクレイを添加したエポキシ樹脂の機械特性を調査した。

カーボンナノチューブと樹脂の界面強度測定およびそのMDシミュレーション

鄧飛(東大・院), 津田皓正(東大・学), 小笠原俊夫(JAXA), 武田展雄(東大・新領域)

カーボンナノチューブ(CNT)をポリマー樹脂に添加したナノ複合材料に関する研究が盛んに行われている。一方、CNTをポリマー樹脂に埋め込んだときに得られるその機械的特性は、理論的予測値よりも低いことが知られている[4]。CNT添加複合材に荷重が与えられたとき、その荷重は界面を介して樹脂からCNTへ伝達する。複合材料の機械的特性を向上させるには樹脂とCNTの界面特性をまず知ることが重要である。しかし、樹脂とCNTの界面領域のサイズが非常に小さいことや、その界面は複合材内部に存在する等の理由から、この領域に関する実験的な研究がほとんど行われないうのが現状である。

本研究では、走査電子型顕微鏡(SEM)内で、樹脂に埋め込まれたCNTを引き抜くことで、樹脂とCNTの界面強度を直接測定する。また、分子動力学法(MD)による実験のモデル化を行い、CNTの引き抜きをシミュレーションし、実験結果との比較を行う。

クレイ・ナイロン6ハイブリッドナノ複合材料の時間依存型力学特性

朱世杰, 岡崎雅則(福岡工大), 臼杵有光, 加藤誠(豊田中研)

近年、ナノ・テクノロジー・材料の発展は著しく速く、ナノ材料の一種であるポリマー/クレイナノコンポジットが注目を集めている。ポリマー/クレイナノコンポジットとはポリマーマトリックスに、クレイと呼ばれる粘土鉱物などがナノメートルオーダーで分散された複合材料のことを指す。ナノメートルオーダーで分散することにより、従来の複合材料と比べて高い物性値を得ることができ、さらに今まで得られなかった物性が発現する可能性がある。

近年、トヨタ自動車、宇部興産により、ナイロン6(ポリアミド6)クレイハイブリッド(NCH)が世界で初めて実用化され、このNCHの成功が発端となり、ポリマー/クレイナノコンポジットの概念が急速に世界に広まった。NCHの特徴としては、高強度、高剛性、高耐熱、高バリア性などが挙げられる。しかし、強度の負荷速度依存性や時間依存型特性疲労やクリープについての研究が少ない。また設計および寿命評価方法を確立しないことが現状である。

そこで、本研究では、クレイがナノメートルレベルで分散したナイロン6クレイナノコンポジットの疲労およびクリープ特性を明らかにするために、室温において疲労試験、クリープ試験を行い、最大応力と破断繰返し数による疲労強度、応力と破断時間によるクリープ寿命について調査を行った。得られた実験結果より疲労・クリープ破壊機構およびクレイの強化機構について考察を行った。

メカニカルコーティング法による複合光触媒薄膜の作製と機能評価

中山博之(千葉大・院), 吉田浩之(千葉県産技研), 佐野秀樹(千葉大・学), 魯云, 廣橋光治(千葉大・工)

近年、TiO₂光触媒は、汚染物質を分解・除去する環境浄化機能材料として注目され、研究開発が盛んに行われている。水中や空気中の汚染物質を分解・除去する場合一般的に担体に固定させて使用されるが、より汚染物質の吸着量を多くし効率を上げるため凹凸のある多孔性の表面が求められ、多孔質の担体への担持や表面積の大きな薄膜の作製が行われ

ている。光触媒薄膜の作製には、ゾル-ゲル法、PVD法、CVD法などの手法が用いられているが、これらの作製方法はプロセスが煩雑で、また大型装置が必要である。特にこれらの手法では球状などの複雑な表面に均一に成膜することが困難である。これまで粉末冶金における粉末混合の逆発想でポットミル、遊星ボールミルを用いて、アルミナ製のボール、ボタン（円盤）の表面にTiを成膜するメカニカルコーティング法（Mechanical Coating Technique, 以下MCTと略記）を提案してきた[13]。またTi薄膜に酸化処理を行うことでTiO₂光触媒薄膜の作製、およびその機能評価を行ってきた。本研究ではMCTによりTiを成膜した後、更にMCTによりTi薄膜表面上にアナターゼ型TiO₂の複合化を行い、作製した複合光触媒薄膜の機能を評価すると共にこれまでの結果と比較検討を行った。

放電プラズマ焼結法によるTi/TiO₂複合光触媒の作製とその特性評価

吉田浩之(千葉県産技研), 中山博之(千葉大・院), 魯云, 廣橋光治(千葉大・工), 佐野秀樹(千葉大・学)

近年、急激に危機感と問題意識の高まっている生活環境問題に対し環境の保全、また環境浄化の技術が求められている。このため、空気浄化、水浄化、抗菌、防汚等の機能を備えるTiO₂光触媒が注目されており、多孔質、ナノ化および複合化などによる高機能光触媒の研究・開発が盛んに進められている。複合化による高機能化においては、PtやAgなどの金属との複合光触媒が多岐に渡って報告されているが、大変高価な金属が使用されており広範な使用は難しい。本研究では、実用的な観点からTiO₂ナノ粉末を出発原料として、より安価な複合光触媒の作製を行った。複合には、放電プラズマ焼結（Spark Plasma Sintering, 以下SPSと記す）法を用いて複合光触媒を作製し、その結晶構造、表面形状および光触媒機能を解析するとともに、Ti粉末の添加量による光触媒機能への影響について検討した。

ナノ薄膜の力学特性および微細組織の評価

巨東英(埼玉工大)、長谷川浩一(石福金属)、石黒諭(埼玉工大・院)

PVD法によって導電ガラスITO基板上に同じTiターゲットから創製時の雰囲気ガスを変え、Arガス使用時にはTi薄膜を、O₂ガス使用時にはTiO₂薄膜を創製し、それぞれの薄膜について創製条件である創製ガス圧・創製時間・創製温度を変化させて創製する。TiO₂薄膜については、Tiターゲットを用い、薄膜創製後に酸化処理を施すか、あるいはターゲットにTiO₂を使うことで作られることが多い。しかしTiターゲットを用いた薄膜創製中に酸化雰囲気を作ることでTiO₂薄膜を作る例は少ない、しかし薄膜の創製に当たって、雰囲気ガスのみが変わるため、物性の差異を評価するのに適当であると考えられる。また記録メディア用に使用されるAg合金膜に関しては、Al以上の高い反射率を維持しつつ耐熱性、対恒温恒湿特性、耐食性を有することが要求されている。そこで、ガラス基板上にAg合金薄膜(添加元素Pd, Cu, P)を創製し、様々な熱処理を施す。これらの要求を満足させるために種々の添加元素が試されてきた中で、Cu, Pを添加することにより、良好な特性が得られるが特性向上のメカニズムは十分に判明していない。この薄膜の評価を行い、メカニズム解明の一助となれば評価法の有用性の実証となると考えられる。これらの薄膜についてAFMを用い微細構造を観察し、またX線によるin-plane回折測定によって内部の微細構造評価を行い、残留応力解析を行う。さらにナノインデントを用い硬度等の力学特性についても評価を行う。これらの結果について比較・検討し、薄膜における微細構造および力学特性を明らかにする。

ナノフィラー充填ゴム組成物の高周波領域における粘弾性挙動

倪 慶清(信州大)、國澤鉄也(住友ゴム工業)、汪 文学(九州大)

タイヤ開発の重要な課題の1つに安全性向上の観点からグリップや制動距離の改善がある。タイヤのトレッド部表面が走行中に一般的なアスファルト路面のマイクロな凹凸から受ける振動の周波数はメガヘルツ領域の比較的高周波である。しかしながら、従来からの動的粘弾性測定における周波数は、装置の機械的能力の限界から 10^2 Hz レベルまでであり、直接的に高周波にて測定することは、これまであまり成されていない。通常、高周波領域の粘弾性特性は、温度-時間換算則を用いて、比較的低温領域での粘弾性特性に置き換えられ、検討されてきている。従来からの動的粘弾性特性に比べて、高周波振動にて直接的に粘弾性を測定することが出来れば、煩雑な換算が不要となり、より信頼性の高い物性指標を提案できると考えられ、摩擦特性やゴム物性発現のメカニズムを議論する上で有益であると考えられる。これまでも超音波装置を用いてゴム組成物の高周波領域における音速や減衰係数などの調査が行われている。

そこで、本研究では、ゴム組成物において動的粘弾性および超音波装置による高周波での粘弾性を測定し、両特性間の挙動の比較を行った。加えて、湿潤路面における摩擦係数の測定を行い、各粘弾性測定で求めた $\tan \delta$ との関係性を調査し、超音波粘弾性の有用性を検討したので報告する。

カーボンナノチューブポリマー複合材料の電気伝導特性および高感度ひずみセンサへの応用

胡 寧(東北大)、軽部嘉文(東北大・院)、福永 久雄(東北大)

In this research, we employ a 3 dimensional (3D) resistor network model to predict the electrical conductivity of a nanocomposite made from an insulating polymer containing randomly filled carbon nanotubes (CNTs). In this model, with the assumption of randomly distributed CNTs in the polymer, Kirchhoff's current law is used to set up the system of algebraic equations at different nodes in the network connected by CNTs. The macroscopic current of the composite can be calculated with applied external voltage by solving the system equations, and then Ohm's law is employed to predict the macroscopic electrical conductivity of the composite. Moreover, the corresponding experiments are performed. The present experimental results plus some previous experimental results by other researchers are employed to verify the numerical results. The verified numerical model is then employed to construct a simple and reliable empirical percolation theory. For the application of CNT/polymer composites as highly sensitive sensors, by considering the tunneling effect between CNTs, the present numerical model is further extended into the case of composites with prescribed strains. The relation between the strain and the electrical conductivity can be estimated numerically. A highly sensitive strain sensor is made from this new nanocomposite. Finally, both numerical and experimental results demonstrate that this new sensor possesses much higher sensitivity or gauge factor compared with traditional strain gauges.

CSCNT分散CFRPの力学的特性評価

横関智弘、青木隆平(東京大学)、岩堀豊(JAXA)、石橋勝、柳澤隆(GSIクレオス)

カーボンナノチューブやナノクレイをはじめとするナノ粒子は、ポリマーの強化材料や多機能化材料として注目されている。ナノ粒子をポリマーに分散し、複合材化することで、ポリマーの力学特性、熱特性、電気特性、ガス等のバリア特性などを向上させようとする研究が盛んであり、各種成形法の試みや評価試験の実施が行われてきた。カップスタック型カーボンナノチューブ(CSCNT)も注目されているナノ粒子の1つであり、ポリマー中に分散することで、力学特性や電気伝導特性の向上が報告されている。また、岩堀らはエポキシ樹脂に分散させた2相系の複合材、及びさらに炭素繊維織物に含浸させた3相系のCFRPを試作し、圧縮強度等の力学特性の向上を報告している。

CFRPは優れた比強度、比剛性を有するため、航空宇宙構造をはじめとする構造物へ適用されているが、ナノチューブ等のナノ粒子分散樹脂を構造部材として適用を試みる研究も少なくない。しかしながら、強化効率の高い、長いナノチューブを樹脂中に均一に分散する、あるいはボイドやクラスターを生じないように分散・製作するプロセスが実現に至っていないのが現状であり、ナノチューブと樹脂の界面特性にも課題があるため、優れた強度等を期待できる高性能な構造材料としての利用は期待できない状況である。そのため、力学特性だけでなく、熱・電気特性なども含めた多機能材料としての用途を目指す研究が多くなっている。

本研究では、従来のCFRPの優れた力学的特性を認めた上で、樹脂の力学特性をわずかも向上することにより、圧縮強度など、樹脂特性が支配するCFRPの特性を改善することを目的として、分散性・成形性の良好なCSCNT分散CFRPを用いて、その各種力学的特性を評価した。一方向材及び擬似等方性材を製作し、剛性、強度、破壊靱性等の総合的な評価試験を通じ、CSCNT分散によるCFRPの力学的特性の改善効果を調査した。

電導性ナノカーボン/有機ポリマー複合材料

陶有勝、加納博文、金子克美(千葉大・理)

Conductive polymer composites have been widely utilized in a range of applications such as medical devices, biosensors, and electromagnetic interference (EMI) shielding applications. They are generally synthesized with carbon-based fillers such as carbon black, carbon fibers, and recent single-wall carbon nanotubes (SWCNTs).

Single wall carbon nanohorn (SWCNH) is nanostructured graphitic tube^[1], similar to single wall carbon nanotube (SWCNT). Since laser ablation method produces these nanostructural SWCNHs in bulk quantities with high yield (>95%) under ambient conditions without any metal catalyst, SWCNHs have high purity with comparison to SWCNTs. Properties like high surface area, high thermal stability and conductive atomic structures coupled to unique internal nanopore and interstitial nanopore structures make SWCNHs unique materials with numerous potential applications as adsorbents, molecular sieves, catalyst support, and drug delivery. To extend the applications of SWCNHs, we investigated to prepared conductive organic polymer composites with SWCNHs.

バクテリア・セルロースを用いた複合材料

菊地時雄(福島県ハイテクプラザ)、小沢喜仁(福島大学)、渡邊真義(福島県立郡山技術専門校)、矢吹浩一((株)宮本樹脂工業)

21世紀に入り、環境保全、省資源、リサイクルなどがこれまでよりも重要視されるようになってきた。特にエネルギー・資源の観点から過度の石油化石資源への依存からの脱却が要求されるようになり、風力、太陽光、バイオマスのような再生可能資源への転換が進められようとしている。その中でバイオマスは「カーボンニュートラル」であるため、生産—廃棄に伴う環境破壊を低減しながら持続可能な生産を恒久的に継続できる原料として注目を浴びている。最近では、大気中の二酸化炭素低減という環境適応性のみならず、原油価格の高騰に伴う原材料費の削減という観点からも急速に注目を浴びるようになり、バイオマスを用いた素材開発を推し進めるドライビングフォースとなっている。

複合材料開発においても、環境にやさしい材料が求められている。デンプンをマトリックス材料とした生分解性プラスチックの開発が進んでおり一部商品化に至っている。強化繊維としても竹、木材、麻、絹など天然繊維を用いた複合材料の開発も盛んになってきている。

天然高分子の中で多く生産されているものは、草や木から得られる植物性セルロースやデンプンなどの多糖類であり、植物性セルロースは年間約 1000 億トンが生産され⁵⁾、これ

らの新たな利用方法が検討されている。

一方、天然セルロースの中には微生物が生産するバクテリア・セルロース (Bacterial Cellulose, BCと略す) と呼ばれるものがある。これは食酢などの醸造過程において、酢酸菌 (*Acetobacter xylinum*) が造る副生成物であり、ダイエット食品のナタデココとして広く一般に知られている。バクテリア・セルロースは、ヘミセルロースやリグニンなどをほとんど含まない純度の高い生分解性にすぐれたセルロースである。BCはミクロンオーダー以下のマイクロフィブリルの微細な網目構造を特徴とし、力学的特性にすぐれることから、生分解性を有する機能性素材として注目され、その効率の良い培養技術の開発や用途開発が盛んに行われている。

そこで著者らは醸造酢メーカーで産業廃棄物として処理されているBCに注目し、その有効利用のため複合材料のナノファイバーまたはマトリックスとしての利用を検討してきたので紹介する。

エレクトロスピンニング法によるVGCF 補強ナノファイバーの作製

山下義裕, 香川浩志(滋賀県大工), 三宅肇, 東山明央(滋賀県東北部工業技術センター)

The making technology of the nanofiber and the nanocomposite by the electro spinning process was examined. The following two were chosen as a reinforced fiber. 1) Aramid nanofiber. 2) VGCF reinforcement nanofiber. As for the nanofiber reinforced with 5wt%VGCF, the modulus has tripled compared with the original. These nanofibers can make the nanocomposite by some methods. One is a method of spraying the resin (adhesive) at the same time as spinning the nanofiber. Another is a method of impregnating the resin after the nanofiber is made. The volume fraction of the nanocomposite can be controlled according to the compressibility of the molding.

ナノウイスキー強化セラミックス義歯の作製

汪 文学, 高雄 善裕, 松原 監壮(九大・応力研)

A hand made nano-whisker reinforced glass ceramics used for the artificial tooth is developed. Commercially available white nano-whiskers $9Al_2O_3 \cdot 2B_2O_3$ and dental glass-ceramic powders of porcelain AAA are used as reinforcement and matrix. A wet mixing process is conducted to ensure a homogeneous distribution of whiskers in the whisker/powder mixture by the use of a mortar. The remaining hand made procedures and the heating process of nano-whisker reinforced glass ceramics are the same as those of glass ceramics without whiskers used by ordinary dental technician. The hand made ceramics specimens are investigated by means of SEM, EPMA, hardness tester and testing machine for various whisker weight fractions. Slight increase in stiffness and a moderate increase in flexural strength and toughness are observed. The reinforcement does not give serious damage if the weight fraction of whiskers is less than 10%.

おわりに

今年度ナノ複合材料の創製及び評価というタイトルに絞って研究集会を初めて行った。今までは先進複合材料全般を対象とした研究集会を行ってきて学内外において先進複合材料の研究の促進に大きな役割を果たしてきた。

一方、カーボン・ナノチューブが1991年に発見されたから、15年が経つ。その間、世界各国において、カーボン・ナノチューブをはじめ、様々なナノ複合材料が研究されてきた。特に、カーボン・ナノチューブの卓越した剛性と強度から、カーボン・ナノチューブを補強材とする複合材料の研究は各国が競って研究を進めている。しかし、そのスケールの微小さに生じる様々な困難により、カーボン・ナノチューブの卓越した剛性と強度を有効に発揮できるナノ複合材料はまだ開発されていない。それを実現するには、数多くの研究者の更なる努力が必要である。また、カーボン・ナノチューブ・ナノ複合材料のほか、シリカ・ナノ粒子強化複合材料やナノ・クレイ強化複合材料など様々

なナノ複合材料が研究されている。ナノ・テクノロジーを利用した新しい複合材料の開発には、その複雑さやコストの面から、数多くの研究者の共同研究が成功の鍵となる。このような考えに基づいて今回の研究集会を企画した。

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け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

研究集会「自由表面流れに関する線形・非線形解析」

大阪大学大学院工学研究科 高木 健

研究目的

応用力学研究所では、従来から水波の非線形問題、水波と浮体の相互作用を得意分野として研究を行っており、船舶や海洋構造物周りのいわゆる自由表面流体力学では水波と浮体の相互干涉を知る事が重要である。この問題に対するアプローチを大別すると、数理解析、数値解析、実験解析の3者が考えられる。近年、数値計算技術の発達に伴い数値解析手法によるアプローチが飛躍的に発展している。特に若手の研究者は大規模な数値計算を実施して目覚ましい成果を挙げている。しかし本来水波と浮体の干涉問題では数理解析によるアプローチが上手くいく場合が多いことが知られており、従来の研究では数理解析によって、多くの成果が得られている。実験解析はこれらの2つのアプローチに対して相補的に行われ、この分野の健全な発展のためにはこの3者が調和して発展することが望まれている。

本研究集会は、数理解析や実験解析に豊富な経験と知識を持つ研究者と大規模数値計算を精力的にこなす若手研究者が集い、アットホームな雰囲気の中で本音の議論を行い、今後の研究にシナジー効果をもたらすことを目的とする。具体的には、最近の研究成果のReview、進行中の研究の情報交換などを通して、今後の研究進展の方向や課題などに関して緊密な討議を行う。

申請代表者は13,14年度に応用力学研究所共同研究(研究集会)「自由表面流体力学に関する数理解析」を15,16年度に「浮体の流体力学に関する数理解析」を応用力学研究所との共同研究集会として主催した。さらに、「水波と浮体の相互干涉に関する力学」を17,18年度に主催した。初期の研究集会ではテーマを数理解析に絞っていたが、その後数値解析の研究者や実験的研究を行う研究者も加え、前述の3者が一同に会する応用力学研究所でのシリーズ研究会として定着しつつある。また、17,18年度の研究集会では海外からも数名の研究者を招待し、国際的な交流も行った。

昨年度の研究集会の参加者からは本年度も研究集会開催を望む声が大であった。また、この研究集会の特徴の一つである少数の研究者による集中的な討議は、他の研究会では難しい若手とベテランの交流や本音での討議ができることなどから大変好評であった。このような状況から、本年度も引き続き応用力学研究所で研究集会を開催することを企画した。特に本年度は、これらの流れを継承しつつ、線形問題としてのアプローチと非線形問題としてのアプローチの得失をさらに深く理解することを目的とした。

研究集会の内容

この研究集会では大まかに分けて下に示す3つのテーマをコアテーマとし、参加者による従来研究成果のReview、現在直面している問題点の提示、新規研究成果の発表をおこなった。

- 超大型浮体式海洋構造物の流力弾性問題(弾性膜に覆われた自由表面流れ,超多数浮体の相互干涉)
- 船舶や海洋構造物と波浪との干涉問題(界面物体の造波と波動の伝播)
- 浮体の水面衝撃問題(水, 空気, 弾性物体の相互干涉)

なお、従来の研究集会で採用していた少数の専門家による集中的な討議は好評であったが、メンバー固定化の傾向があった。そこで、一昨年度より海外からの参加も呼び掛けるとともに、新しい参加者、特に若手を中心に参加者を募り、集会の規模を少し大きくした。本年度はそれらの工夫が定着し始め、海外からのリピーターが増えた。以下には具体的に行われた講演の概要を示す。

Numerical Simulation on Flooding and Damaged Stability of Ships by VOF Method

Zuogang CHEN and Ning MA (Shanghai Jiao Tong University)

CFD software FLUENT is adopted to simulate the viscous flows around a 2D damaged cabin section. VOF method is used for the tracking of the interfaces. Some important CFD elements are investigated in pilot computations. Based on prescribed motions and 6DOF respectively, the flooding phenomena are simulated. The simulations may predict a physically true flooding. The main challenges, such as smeared interfaces by VOF method, quality control of grid regeneration and pressure oscillation during 6DOF computations, are discussed. The computations will be expanded so that the numerical simulations can be used to take precautions against ship damage.

Influence of a Bottom Mud Layer on the Steady Wave Making Resistance

Masaaki Sano (Hiroshima University)

The rigid bed of many ports, harbors and river estuaries is covered by a mud layer, where ship's hydrodynamic characteristics are changed due to generating internal waves. For a safe navigation, ship behaviors must be predicted precisely.

In this research, three dimensional wave making problem in two layers with finite depth is solved by Rankin source method. And a new interface condition is derived, assuming both fluids are potential flow. As the results, it's shown that the waves on free surface are affected by the interactions from internal waves, causing the wave resistances to be changed. This research is just on the way at the present. So more verifications and discussions to their results must be needed.

Ship Performance Evaluation by Oceangoing Simulation

Noriko Hase and Munehiko Minoura (Osaka University)

We propose a new method to predict the ship performance by means of stochastic oceangoing simulation. This simulation clarifies ship's statistical behavior in actual seas where sea states vary hour by hour and provides the probability density functions of passage time and fuel consumption. We show the result of a test calculation of a container ship crossing the North Pacific.

The oceangoing simulation uses the time series of short-term sea states. We can make many cases of the time series from the stochastic process model determined for the occurrence probability distributions of short-term sea states.

The time series of nominal ship speed loss is simulated in the above sea state time-series. Nominal speed loss are obtained as the solution of an equilibrium equation among engine power, propeller thrust and stationary external forces/moments, i.e. hydrodynamic force/moment, rudder force/moment, maneuverability force/moment and wind force/moment. Through this simulation, short-term ship responses are provided. By using the two time series, namely the sea states and ship responses, we can make the quasi-navigation on a computer. As a result of this oceangoing simulation, passage time and fuel consumption are predicted. This method has the advantage that operational effects can be considered. We will try to calculate it.

Some Numerical Checks on the Acceleration Field in 2D NWT

Guanghua HE and Masashi Kashiwagi (RIAM, Kyushu University)

The problem of vibration of vertical wall by an initial elevation of free surface is solved in nonlinear numerical wave tank based on Mixed Eulerian Lagrangian method. However, we found several numerical problems, such as in satisfaction of the complete absorption of reflection waves. Then, in order to understand what keys in resolving the problems are, we started studying the linearized problem and a comparison was made between numerical results and an analytical solution provided by Sturova. The distribution of temporal derivative of velocity potential on the wavemaker surface is also illustrated with two methods.

Hydrodynamic Derivatives Investigation on Unconventionally Arranged Pusher-Barge Systems

Koh Kho King (Hiroshima University)

Unconventional arrangement of pusher-barge systems were studied in this paper. Pusher-barge systems consisted of 4 barges, 6 barges and 8 barges with one pusher were tested in various combinations. Captive model test was performed on the various combinations at Hiroshima University Towing Tank. Hydrodynamic derivatives of the systems were obtained from the model test data by using least square analysis method. For asymmetry condition, hydrodynamic derivatives Y'_0 , Y'_{bb} , N'_0 , and N'_{bb} were added in force and moment equations in order to get better fitting of the least square curves. Motion equations were modified to cover the asymmetry cases of pusher-barge system with lateral force and yaw moment due to the asymmetry arrangement included. Turning simulations (with 20 degrees in sudden angle change) were carried out and the comparison of advance distance and tactical diameter were made.

Motion Simulations of Tow and Towed Ships in Waves

Hironori Yasukawa (Hiroshima University)

A simulation method was developed for longitudinal motions of tow and towed ships in regular waves. Motion equations were derived of the tow and towed ships, and the towing cable which is expressed by the lumped masses connected by a truss element. Motion simulations of tow and towed ships in regular waves

were carried out by numerically solving the equations. As a result, the simulation shows that longer cable reduces the impact force acting on the towing cable in waves. The verification of the present method is needed through the comparison with model test results as the future work.

Hydroelastic Behavior of a Long Flexible Structure in Irregular Waves

Ken Takagi (Osaka University)

Using one year measured wind data and wave hind-cast data, we investigate the statistical property of the wind and waves in the EEZ of Japan and its surrounding area in which we assume VLMOS navigates. It is confirmed that the stochastic distribution of the wind speed and the significant wave height is approximated by the Weibulle distribution. In addition, we perform a navigation simulation of VLMOS in which we used 144h wave forecast data to increase the generated power and not to meet the high sea. Using the simulation results, the stochastic distribution of wave height experienced by VLMOS is discussed. It is found that deformation of the stochastic distribution obtained from the sailing simulation has a relation with its capacity factor and it is quite reasonable. The result of the fatigue assessment shows that VLMOS seems to have enough fatigue strength for twenty year operation even if its capacity factor exceeds 40%.

Control of Vertical Motion of Fast Ship

Jang-Whan Bai and Yonghwan Kim (Seoul National University)

The application of linear and nonlinear algorithms for controlling vertical motions of a fastship is considered. Three control algorithms, PID, LQR and sliding mode control algorithms, are used to minimize the vertical motion of the hydrofoil vessel considered by Kim and Yamato (2004). The motion responses in regular and irregular waves are compared for all the algorithms and also experimental data. Based on the present study, the followings are found:

- (i) PID control is easy to tune the set of control gains, but hard to get good results in every cases. Sensitivity toward wave height is very strong in irregular waves.
- (ii) LQR control shows a good performance in various wave environments, and it provides effective attenuation of the motion with small control inputs.
- (iii) Sliding mode control provides the most reduction of motion in most of cases with larger control input than LQR. However, motion easily tends to be unstable when with the poor information.

Analysis of Multiple-Body Problem by a Time-Domain Rankine Panel Method

Kyong-Hwan Kim and Yonghwan Kim (Seoul National University)

Demand on the motion analysis of adjacent multiple bodies is getting increased for the design of large offshore structures, e.g. FPSOs for LNG or crude oil, and FSRU. Existing studies on this problem – so called, N-body problem – have been based on frequency-domain method or impulse-response function approach which still requires the solution of frequency-domain solution. The present method adopts a time-domain approach, and Rankine panel method is applied as a method of solution. The linear motion responses of each body in the situations of ship-ship and ship-barge are computed, and the motion RAOs are compared with other computational results and experimental data, showing a fairly good agreement with experimental data.

Introduction of WISH JIP for the Prediction of Nonlinear Ship Motions and Loads in Waves

Yonghwan Kim, Kyong-Hwan Kim, and Yooil Kim (Seoul National University)

Currently WISH joint industry project is being carried out by Seoul National University under support of six sponsors, including Hyundai, Samsung, Hanjin Heavy Industries, Daewoo Shipbuilding and Marine Engineering, STX Shipbuilding, and Korean Register. In this project, we are developing WISH (Wave-Induced SHip motion and loads) program to predict the seakeeping performance of real commercial ships. In this presentation, its theoretical background with some example results is introduced. WISH program is based on time-domain Rankine panel method adopting bi-quadratic B-spline basis function. It is capable to analyze linear and nonlinear ship motion, wave-induced loads, and other motion-related problems. It has other extensions such as springing analysis, multiple-body motion, and parametric roll motion.

Recent Progress of Numerical Modelling of Viscous Free Surface Flows Using Spectral Element Method

Hong Gun Sung and Key Yong Hong (Maritime and Ocean Engineering Research Institute)

With the aim of solving wave and current interaction problems when the background current flows are

non-uniform, we are developing an efficient numerical method for viscous free surface flows. The present methodology analyzes viscous free surface flows in the context of the Navier-Stokes (N-S) equations and this paper presents a numerical model for their simulation with a brief description and extensive numerical validations.

The governing equations are solved through the Spectral Element Method (SEM), which possesses the property of high-order spatial accuracy as proposed by Karniadakis & Sherwin (2005). In order to deal with the free surface motion in time, the Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) method is utilized. It is shown that the proposed SEM and its present implementation produce very accurate and convergent solutions to the Poisson equation, the Helmholtz equation, and a manufactured problem of the N-S equations. Numerical results of the lid-driven cavity flow are compared with other numerical results. As for the viscous free surface flows, viscous sloshing with a prescribed initial free surface profile is simulated and it is shown that the present methodology gives very reasonable results for the small-amplitude problem. Additional computations were done for soliton propagation and run-up against the vertical wall, and wave generation problem by variable pressure distribution.

We anticipate that the present flow model and numerical method produces more realistic and complex viscous free surface flows such as evolution of nonlinear free surface waves in the presence of uniform and non-uniform current in near future.

A Hybrid Method between Particle and Boundary Element method for 2D Simulation of Waves

Makoto Sueyoshi (RIAM, Kyushu University)

A hybrid numerical scheme to compute complicated wave problems is developed. The present method is a kind of domain decomposition methods, which combine NS solver and potential flow solver. A Particle method is employed as the NS solver and a linear boundary element method is employed as the potential solver. In order to exchange flow information between divided regions, a special moving interface boundary is introduced. In this study, numerical details of the scheme and some numerical examples of 2D wave problems are presented and discussed.

Computation of the free surface flows using a conservative interface capturing method

Il-Ryong Park, Kwang-Soo kim, Jin Kim and Suak-Ho Van

(Maritime and Ocean Engineering Research Institute)

This presentation firstly provides a brief introduction of the validated Level-set results for the benchmark test cases adopted by CFD workshop Tokyo 2005 and presents a new developed VOF method, RHRIC (Refined High Resolution Interface Capturing) which is based on the HRIC's differencing schemes with different blending and linear weighting approaches. The present RHRIC solutions for the simple VOF advection problems show more compressive and sharp features of the interface than those of the HRIC and MHRIC (modified HRIC of FLUENT). In the dam break validation case, we found out that turbulent flow effects are apparent in the measured free surface elevations and pressure. The present numerical results obtained by using a high fidelity RANS computation show more reasonable agreements with the experimental data than the laminar flow results. We are performing further validations of the present VOF method for 3D steady and unsteady free surface flows including hull forms.

A Comparative Study on Numerical Methods for Wave-Body Interactions

Masashi Kashiwagi (RIAM, Kyushu University)

At Research Institute for Applied Mechanics (RIAM) of Kyushu University, extremely nonlinear wave-body interactions have been studied by means of CFD techniques and the developed computer code, named RIAM-CMEN (computational method for extremely nonlinear hydrodynamics), is validated in several ways. In this paper, the frequency response characteristics of the wave-induced motions and added resistance on a ship running at constant forward speed in waves are compared to various results measured in a newly conducted experiment and computed by NSM (New Strip Method), EUT (Enhanced Unified Theory), RSM (Rankine Source Method), and RIAM-CMEN. It is shown that the overall agreement of computed results by RIAM-CMEN is relatively good as compared to other linear-theory results.

(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膨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：2008年3月3日(月)～3月4日(火)

会場：九州大学筑紫キャンパス 応用力学研究所 新棟6階 W601号室

講演プログラム

3月3日(月)

○ 13:00-13:10 代表者挨拶

新野 宏 (東京大学 海洋研究所)

○ 13:10-13:40 城戸 敦誉 (九州大学総合理工学府) 和方 吉信 (九州大学応用力学研究所)

金星大気大循環における多重平衡解の再現

Matsuda 1980, 1982 で指摘されていた金星大気大循環における多重平衡解について、大気大循環モデルを用い、その再現を試みた。その結果、帯状一様な加熱を与えた場合と、3次元的な加熱を与えた場合において、多重平衡解を再現することに成功した。しかしながら、3次元的な加熱を与えた場合では、そもその目標であった「昼夜間対流」と「スーパーローテーション」では無く、東西風速が速いか遅いかの違いという結果となった。

○ 13:40-14:10 山本 勝 (九州大学応用力学研究所) 高橋 正明 (東京大学気候システム研究センター)

惑星中層大気大循環の天文パラメーター依存性について

本研究では、エアロゾルで覆われた惑星中層大気を想定し、その加熱によって駆動される大気大循環のパラメーター依存性を、Yamamoto & Takahashi (2007) のモデルを用いて調べた。特に、その数値実験で見られた「超回転と逆回転のメカニズム」や「逆回転の風速が $-\Omega a$ (自転角速度 Ω , 惑星半径 a) に制限されること」について議論する。時間があれば加熱に対する中層大気大循環の依存性についても示した。

○ 14:10-14:40 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)

金星大気スーパーローテーションの力学

金星大気スーパーローテーションの成因はまだ十分に理解されていないが、近年大気大循環モデリングが盛んに行われるようになった結果、平均子午面循環(ギョーラッシメカニズム)、熱潮汐波や重力波などによる運動量輸送の重要性が改めて指摘されると同時に、これらのメカニズムの相互の関係が問題となってきた。我々は雲層で励起された熱潮汐波によって大気スーパーローテーションが生成される可能性を示したが、平均子午面循環の効果は無視されていた (Takagi and Matsuda 2006, 2007)。熱潮汐波メカニズムに対する平均子午面循環の影響について議論した。

- 14:50-15:20 松田 佳久（東京学芸大学 自然科学系）高木 征弘（東京大学 理学系研究科）
金星大気の温室効果の特徴

金星大気の鉛直構造を理解するため、金星と地球における放射平衡の特徴、特に太陽光吸収の鉛直分布の違いが温室効果に与える影響を、簡単な放射モデルを用いて考察した。金星地表面の高温の維持には地表面に到達するわずかな太陽光が重要である。また、金星大気中では雲層での太陽光吸収が下層大気の安定化をもたらすが、その効果は量的には非常に小さいことが示された。灰色大気の仮定の下では、吸収係数の圧力増幅の効果がなくても、二酸化炭素の定圧比熱の温度・圧力依存性を考慮すると、金星下層大気の放射平衡温度分布は対流不安定である。

- 15:20-15:50 加藤 亮平（九州大学大学院 理学府）中島 健介（九州大学大学院 理学研究院）
木星大規模渦の数値モデリング

木星の大気現象を理解するためには、よくわかっていない大気の鉛直構造を知ることが必要である。この鉛直構造は、様々な基本場を仮定した数値実験を行い、大赤斑のような大規模渦の振る舞いを比較することで、推定できる可能性があることが示唆されている(Williams, 1996)。そこで本研究では、ブジネスク近似をしたプリミティブモデルを作成し、様々な数値実験を行っており、最終的には、木星大気の鉛直構造を推測することを目指している。本発表では、交互に変わる東西風を初期に与え、それが不安定を起こすことによって大規模な渦が生じ、長時間安定に存在した例を紹介した。

- 15:50-16:20 杉山 耕一郎（九州大学大学院 理学研究院）
小高 正嗣（北海道大学大学院 理学研究院）
中島 健介（九州大学大学院 理学研究院）
林 祥介（神戸大学大学院 理学研究科）
木星大気の雲対流の直接数値計算

木星大気の雲対流は、地球大気の場合と同様、大気の大規模な循環構造や物質分布の決定に重要な役割を担っていると想像されている。我々は H₂O と NH₃ の凝結および NH₄SH の生成反応を考慮した 2 次元雲対流モデルを新たに開発し、放射を模した一様冷却下で多数の雲の生成消滅が繰り返された結果として決まる循環構造と物質分布を調べてきた。本研究会では、開発した雲対流モデルの概要と得られた結果を紹介した。

- 16:30-17:00 山崎 哲・伊藤 久徳（九州大学大学院 理学府）
ブロッキングの形成・持続機構に関する事例研究

大気ブロッキングに関するメカニズムについて、Shutts (1983)は、傾圧波（高周波擾乱）からフィードバック機構‘Eddy Straining Mechanism(以下ESM)’を提唱した。しかし最近、Arai and Mukougawa (2002)は、ESMは非常に限られた条件でしか成立しないと主張した。そこで、今回の研究では、事例解析により現実場においてESMが効果的に働く条件を探し、ESMに重要な要因を考察した。

- 17:00-17:30 齊藤 洋一・伊賀啓太（東京大学 海洋研究所）
離散進行型スコールラインの数時間変動に関する数値的研究

スコールライン型対流系では、cold poolの前進による空気塊の強制上昇が及ばない数十km前方で新たな対流雲が発生する‘forward convective initiation (forward CI)’が観測されている。さらに、十分発達した新しい対流セルが既存のストームと統合する際に対流系前面が転移することがある。これら一連の過程は‘discrete propagation event (DPE)’と呼ばれている。本研究では、非静力学数値モデルを使用し、下層が非常に湿った基本場を用意することで、理想化実験内でDPEを再現することができた。その結果、forward CIの発現メカニズムについて、先行研究と大きく異なる点が出てきたので、ここに報告した。

- 17:30-18:00 前島康光・伊賀啓太（東京大学 海洋研究所）

前線不安定による大気メソスケール擾乱の非線形発展

冬季日本海西部には帯状収束雲と呼ばれる雲が形成され、それに沿つメソ α スケールやメソ β スケールの擾乱が発生ことがある。本研究では前線状の構造をしたを基本場を考え、その時間発展を計算することによって擾乱の非線形発展期に見られる特徴を調べた。その結果、擾乱発生初期にはメソ β スケールの擾乱が卓越するが、時間が経過すると衰退し次第にメソ α スケールの擾乱に遷移した。このような振る舞いは、成分波間の非線形相互作用によって説明することができた。

3月4日(火)

○9:30-12:00 見延 庄士郎(北海道大学 大学院理学研究院)
十年スケール気候変動と大気海洋相互作用
【集中講義】

○13:00-13:30 坂本 圭・秋友 和典(京都大学大学院 理学研究科)
回転系において潮流が形成する乱流境界層に関する数値的研究

地球回転の下で潮流(時間振動流)によって海底に形成される乱流境界層について、3次元非静水圧モデルによる実験を行った。その結果、コリオリ・パラメータが潮流振動数に近いほど、厚い境界層が形成され、活発な乱流混合が起こることが示された。この緯度依存性の原因を、密度一様実験と成層実験の結果を用いて明らかにした。

○13:30-14:00 田中 潔(東京大学 海洋研究所)
海洋中において大陸棚斜面を沈降する密度流の力学

海洋中において、大陸棚斜面を沈降する密度流に伴う傾圧不安定の力学とそれによる海水輸送を、数値実験によって調べた。特に、地球回転の効果と海底斜面の効果に焦点をあてた。地球回転、海底斜面はともに、傾圧不安定の発達期(微小振幅時)においては密度流の不安定性を強化するのに対して、成熟期(有限振幅時)にはそうした不安定によって生じる渦による高密度水輸送を弱める効果を持つ。

○14:00-14:30 松浦 知徳・下川 信也(独立行政法人 防災科学技術研究所)
季節変化風応力強制場における準地衡流ダブルジャイヤー海洋の非線形現象

海洋大循環を単純化したダブルジャイヤー海洋において、その固有振動と季節変化する風応力外力との非線形相互作用について、1.5層準地衡流渦位方程式及びエネルギー収支に関する力学系モデル(外力のあるブラッセレイター)を併用して調べた。周期的慣性サブジャイヤーの切離が発生する状況のレイノルズ数に固定し、外力の振幅を変化させていくと、非線形現象特有の引き込み現象や慣性サブジャイヤーの切離とモドン状の解との間で間歇的な不規則変動が現れることがわかった。これらは、海洋大循環ダブルジャイヤーの時間変化風応力のある場合における興味深い非線形現象をあらわしており、それらについて詳しく示した。

○14:40-15:10 横嶋 悟・三村 和男(東海大学大学院 理学研究科)
閉ループ内熱対流数値実験 - 2つの計算モデル -

2次元流を仮定したアニュラス型閉ループ内熱対流に関して、有限差分法(FDM)と有限要素法(FEM)の2つの異なる離散化モデルを用いて数値実験を行い、両モデルを比較検証した。さらに、ループのアスペクト比を変化させ、各無次元数(Pr , ϵGr)における流体の振る舞いを分類した。また、初期条件として用いた3変数定常理論解(三村, 2006)との比較により3変数理論について考察した。

○15:10-15:40 松島 和宏(東海大学 地球環境科学研究科)
三村 和男(東海大学 理学研究科物理専攻)
f面水槽とベータ面水槽に生じる惑星波動の比較

本研究は傾圧性による不安定波動の励起と惑星ベータ効果による中立波の共存状態を室内実験で観察する事を目的としている。実験方法として側面加熱・中心冷却を行える円筒型水槽を回転させ傾圧性を、流

体層厚を半径方向に変化させることで(放物底)で惑星ベータ効果を表現している。順圧ではないため地形性ベータと惑星ベータ効果は等価ではないが幾分の効果を期待している。今回は放物底と平面底の実験の比較を行い、結果として生じた流れについて報告した。

○15:40-16:10 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の低次カオス ～スペクトルモデルによる考察～

二重円筒型(アニュラス型)閉ループ内熱対流実験において、あたかもローレンツカオスのような主流の反転現象が見られる。それは、室内実験においても、数値実験においても確認されている。しかしながら、ローレンツシステムのように主流の定常安定領域から、直にカオス反転領域に遷移するのではなく、乱流安定領域を経てカオス反転が観られる点は、大きく異なる点である。この遷移過程を詳細に調査するため、小自由度から大自由度まで対応可能な専用のスペクトルモデルを構築し、無限自由度を持つ現実流体中の低次カオスについて考察した。

○16:20-16:50 百武 宏之・岩山 隆寛 (神戸大学大学院 自然科学研究科)

円形渦のもとで駆動される非線形エクマンポンピングの水平分布について

本研究では、自由大気が動径方向に滑らかに変化する軸対称な円形流の場合に、駆動される非線形エクマンポンピングによる鉛直速度の水平分布を数値的に求めた。非線形項の大きさを表す無次元パラメータであるロスビー数は5から10程度の大きさの場合を対象として研究を行った。下端境界に粘着条件を与えると、高ロスビー数の場合に、中心軸付近のみで鉛直速度は減少するため、ポンピングは中心軸付近で極小となる。

○16:50-17:20 雪本 真治 (東京大学 海洋研究所) 野口 尚史 (京都大学大学院 工学研究科)

新野 宏 (東京大学 海洋研究所) 木村 龍治 (放送大学)

吸い込み渦の構造と力学

吸い込み渦の構造と力学について室内実験・数値実験・境界層理論により調べた。吸い込み渦は一定の角速度で回転する円筒容器の底面に開けた小さな穴から一定の流量の水を流出させ、同量の水を側面から流入させることによって作った。実験の結果、渦核の外側のすべての半径で角運動量一定のポテンシャル渦が実現する場合と、すべての半径ではポテンシャルが実現しない場合の2つの異なる状態があることがわかった。境界層理論から求めたこの2つの状態を区別する判定基準は、実験の結果をよく説明する。

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、本研究集会在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20年3月3日(月)～4日(火)

代表者 組織名 新野宏 東京大学・海洋研究所

参加者 37名

乱流現象及び多自由度系の動力学，構造と統計法則

研究代表者・石原 卓（名古屋大学大学院工学研究科）

1 研究集会の開催目的

プラズマや大気・海洋の流れ，工学的応用分野における流れ，及び，身の回りの多くの流れは乱流である．これらの多様な乱流現象を理解し，予測する理論の構築及び手法を開発することが重要であり，現在，各々の分野で実験・観測，理論・解析，計算科学などの様々な方法論により精力的に研究されている．乱流研究の新たな展開のためには，異なる分野の乱流現象を扱う研究者，及び，異なる方法論を担う研究者が互いの議論を通して，現象を理解するための鍵となる動力学，構造，統計法則について知識を共有し，新たな概念を自らの方法論へフィードバックすることが重要であると考えられる．国際会議やワークショップを見る限り，欧米に比べて日本では，様々な分野と方法論の研究者には，このような機会が少ないのが現状であると思われる．

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 講演内容の概要

決定論的拡散における拡散係数の新しい決定法

小林 幹，森野佳生，宮崎修次

カオスの不安定性が原因で引き起こされる拡散現象，以下決定論的拡散と呼ぶ，における拡散係数を近似的に決定する方法を提案する．最近，カオス的に変動する物理量の時間相関関数を近似的に求めるための方法，以下マルコフ法と呼ぶ，が提案された．拡散係数は，拡散している対象における速度の時間相関関数を用いて得ることが出来るので，マルコフ法を用いて速度の時間相関関数を求めることで，拡散係数を近似的に決定することが出来る．本報告書では，マルコフ法を用いた拡散係数の決定法について簡単に説明した後，決定論的拡散を示す最も簡単な系である一次元区分線形カオス写像を用いて，本方法の妥当性を検証する．

混合を観る—クエット系の不安定周期流解析

木田重雄，田谷貴男

クエット系の不安定周期流中のパッシブ線素の混合特性を数値シミュレーションによって解析した．流れの領域を多数の小立方体に分割し，各立法体内の多数のパッシブ線素の方向分布を不安定周期流の各時間位相ごとに求めた．その結果，線素の方向分布の仕方は，線状（線素が一方方向にそろっている）と面状（線素の方向が面内にある）が大部分であった．この不安定周期流は流れ方向渦や低速ストリークといったクエット乱流の特性をよく再現するが，上記の線状領域は流れ方向渦の内部に，面状領域はその周辺に分布することがわかった．

大規模 DNS データを用いた Kolmogorov の 4/5 法則の検証

吉野順也，石原 卓，金田行雄

本研究では，格子点数が 2048^3 ，Taylor micro-scale で規格化された Reynolds 数が 732 である，周期箱内にしたがう 3次元非圧縮性強制乱流の直接数値計算データをもとに Kolmogorov の 4/5 法則を検証した．検証は非等方性乱流に対する厳密な一般化 Kármán-Howarth-Kolmogorov (KHK) 方程式にもとづいておこなった．検証に関して最も注目した点は，Reynolds 数の有限性とスケール領域の有限性，そして厳密に無視することはできない乱流場の非等方性の影響である．DNS データの解析結果により，KHK 方程式の粘性項と外力項がもつ役割についての定量的な知見が得られた．また解析結果は，乱流場がもつ非等方性が広いスケール領域にわたって 4/5 法則に対して顕著な影響をもつことを示唆した．

一様等方乱流におけるエネルギーカスケード

後藤 晋

一様等方乱流中では大きなスケールに注入されたエネルギーが次第に小さなスケールへと輸送される．このエネルギーカスケードの物理機構を直接数値計算 (DNS) のデータ解析により探った．流体運動の (ガリレイ不変な) エネルギーとその伝達率を位置，時刻およびスケールの関数として導入し，テイラー長に基づくレイノルズ数が 187 の一様等方乱流の DNS のデータ解析を行った．その結果，各スケールのエネルギーは各スケールの管状の渦構造が主に

担っており、一方でエネルギー伝達はそれらの管状の渦構造どうしの際の引き伸ばし場で起こっていることが分かった。つまり、エネルギーカスケード（の少なくとも一部）は、より大きな管状渦間の引き伸ばし場においてより小さな管状の渦構造が生成されることによるものであると考えられる。

格子ボルツマン法による非圧縮乱流の直接数値計算

米本 隆, 後藤 俊幸, 渡辺 威

乱流の数値計算において、スペクトル法による Navier-Stokes 方程式の直接数値シミュレーション (DNS) では、精度の高い結果が得られることが知られている。しかし、大規模な数値計算では、計算効率が上がらないという事実もある。そこで、並列化が容易で通信量の少ない格子ボルツマン法での代用を考えた。本研究では、一様等方乱流の統計的性質を、格子ボルツマン法による DNS の結果とスペクトル法による Navier-Stokes 方程式の DNS の結果とを比較する。乱流場の一点統計量は、ほぼ誤差がない結果を得られたが、エネルギースペクトルや圧力スペクトルの散逸領域では値が一致しなかった。特に圧力スペクトルに関しては、高波数域にピークを持つ結果となり、乱流の計算手法としての格子ボルツマン法のスキームの限界を確認することができた。一方で、計算効率の面では、格子ボルツマン法による DNS が Navier-Stokes 方程式の DNS と比べて見劣りしない結果を得た。

固体粒子の乱流拡散とその乱流への影響

細川 巖

It is proved that the famous third-order structure function of the velocity in homogeneous isotropic turbulence derived by Kolmogorov implies the statistical interdependence of the difference and sum of the velocities at two points separated by a distance r . However, this is inconsistent with Kolmogorov's hypothesis regarding the difference between such velocities, made in 1962, in the sense that it implies that the statistics of the non-dimensional prefactor of the velocity difference are not universal but, instead, depend on the velocity sum.

複雑時系列のパターン・エントロピー時系列解析

石崎 龍二, 井上 政義

私たちが開発しているパターン・エントロピー時系列解析法は、時系列を記号化し、ある時間内にあらわれるパターン数をエントロピーとして時系列の複雑性を特徴づける手法である。私たちは、これまでラットの睡眠覚醒状態のレベルの特徴づけを、脳波のパターン・エントロピー時系列解析により行ってきた。その結果、パターン・エントロピー時系列は、ラットの脳波の睡眠覚醒状態のレベルの解析に有用であることがわかってきた。そこで私たちは、パターン・エントロピーの統計的な意味を理解するために、複雑な時間変化をする定常時系列の典型としてカオス時系列を対象に、パターン・エントロピー時系列による解析を行った。

乱流粘性係数と流体乱流の統計力学

柴田 博史

ラーゼ・エディ・シミュレーション (LES) のサブグリッドスケール (SGS) に対する一モデルとして、統計力学を導入する。渦粘性係数（あるいは乱流粘性係数）は、流体乱流の速度を用いて表現される。これは、分子粘性係数に対する Helfand の公式のアナロジーになっているが、流体乱流の速度が近似的にガウス分布に従っている事に基づく。圧縮性乱流に対する LES を考えると、この統計力学と整合性を持つ熱力学が展開できることを提示する。

Duffing 振動子系の記憶関数スペクトルとローレンツ型パワースペクトル

富永 広貴, 森 肇, 石崎 龍二, 森 信之, 黒木 昌一

巨視変数の熱揺動の dynamics を定式化するために展開された射影演算子法 (H. Mori, 1965) を拡張して、カオス・乱流の random な揺らぎの dynamics を記述する線形確率発展方程式を導出する手法を典型的なカオス力学系の一つである Duffing 振動子系に適用した。この formalism において、非マルコフな線形確率方程式が導かれ、記憶関数とその Fourier-Laplace 変換である記憶関数スペクトルを理論的数値的に求めそれを使って、時間相関関数とパワースペクトルの構造を明らかにする。今回、パワースペクトルに現れる非対称ローレンツ型ピークを記憶関数スペクトルにより表すことができた。

マルチフラクタルなカオス系の状態確率分布：双対遷移確率と実効フラクタル次元

川崎光宏

強い非線形性を持ち自由度の大きなシステムに普遍的に見られる「時空カオス」の非平衡定常状態のマクロな特徴づけを行う理論的枠組みを探索した。定常状態を単に軌道の行先としてではなく具体的に特徴付け、ひいては、系の発展方程式を数値シミュレーションするよりも小さな計算量でマクロな性質を計算する手法を得ることを目的としている。baker's map, および、変形された baker's map の結合写像格子において、双対遷移確率という量を用いて定常確率分布を評価することができた。

非一様乱流の交差独立性完結仮説による統計理論

巽友正

Inhomogeneous turbulence in an incompressible viscous fluid is studied statistically using the cross- independence closure hypothesis introduced by the author for closing the Lundgren-Monin equations of the multi-point velocity distributions. First, the turbulent velocity is decomposed into the mean velocity and the fluctuation velocity around the mean, and then the equations for the mean velocity and the one- and two-point distributions of the fluctuation velocities are obtained. The mean energy dissipation rate is expressed in terms of the fluctuation-dissipation integral. General statistical characters of these equations are discussed and a few typical distributions for inhomogeneous fluctuating turbulence are derived as the solutions.

非平衡統計力学・非線形物理学の発展に向けて—故藤坂博一教授の見果てぬ夢—

宮崎修次

非線形物理学・非平衡統計力学の分野で大きな業績を上げてきた藤坂博一京都大学情報学研究科教授が2007年8月21日にくも膜下出血で急逝した。ここでは、大偏差統計解析に焦点をあて、時間変動する力学量の局所平均の大偏差統計特性や二時間相関関数やパワースペクトルの大偏差統計解析の枠組みでの拡張などの彼の過去の研究から死の直前に公表された大偏差統計解析とレベルダイナミクスを結び付ける研究までを一瞥し、彼の残した問題とその一部に対する答えや今後の展望を述べる。

乱流の秩序化過程と間欠性におけるスケーリング則

渡邊 威

発達乱流、及びそれによって輸送されるパッシブスカラーにおける間欠性とそのスケーリング則について、大規模直接数値計算のデータ(最大格子点数 2048^3 , $R_\lambda \simeq 600$)を用いた解析を行った。特に拡張された自己相似性(Extended Self-Similarity; ESS)とそのスケーリング構造の詳細について解析を行い、スケーリング関数の存在とその漸近形について明らかにした。また乱流におけるエネルギー輸送の自己相似統計を特徴付ける揺らぎスペクトルの解析を行い、その構造について議論した。

コロイド分散系の直接数値シミュレーション

名嘉山 祥也, 金鋼, 岩下拓哉, 山本量一

多様な分散媒中のコロイド多粒子系の挙動を予測するための直接数値シミュレーション法の開発について研究を行っている。Smoothed Profile 法と呼ぶコロイド系の直接数値シミュレーション法を定式化し、コロイド系の流体力学相互作用および電気二重層相互作用を解くことに成功した。

Nikolaevskii 乱流

田中ダン

自発的対称性の破れや保存則などにより、空間一様な中立モードを持つ系は偏在する。このような系では、空間周期的な散逸構造形成が阻まれ、一様静止状態から超臨界に時空カオスや乱流へ至る場合がある。本稿では、モデル系として Nikolaevskii 方程式を挙げ、幾つかの未解決課題を紹介する。

溶融と結晶沈殿、組成変化を考慮したマグマ溜りの数値計算

藤坂洋祐, 並木則行, 中田正夫, 竹広 真一

地中に貫入してできたマグマ溜りは、周囲の岩石を融かし込む。同時に内部では融点を下回った成分が結晶化し沈殿する。これらの溶融と沈殿は組成と組成依存の融点に変化を与える。一連の過程を定式化した。

カオス・乱流の時間相関関数の2重構造

森肇, 岡村 誠

カオス・乱流は、軌道不安定な非周期運動であり、その時間相関関数 $U_n(t)$ の減衰は、初期レジーム ($t < \tau_n^{(u)}$) では、可逆な力学的コヒーレンスによって作り出され、終期レジーム ($t > \tau_n^{(u)}$) では、カオス誘導摩擦や乱流粘性など、不可逆なエネルギー散逸によってもたらされる。したがって、時間相関関数 $U_n(t)$ の減衰は、終期レジーム ($t > \tau_n^{(u)}$) では、指数型減衰 $U_n(t) = \alpha_e \exp(-\gamma_{net}t)$ となるが、カオス・乱流に特有な初期レジーム ($t < \tau_n^{(u)}$) では、代数型減衰 $U_n(t) = U_n(0)/[1 + (\gamma_{na}t)^2]$ となることを見出した。したがって、パワースペクトル $I_{u_n}(\omega)$ は、ローレンツ型ピークと指数型ウイングとからなることが分かった。なお、これらは、カオス領域にある Kuramoto-Sivashinsky 方程式および周波数変調モデルについて、時間相関関数 $U_n(t)$ およびパワースペクトル $I_{u_n}(\omega)$ を直接数値計算することにより実証されたものである。

電磁流体乱流のエネルギースペクトル

吉田 恭, 有光敏彦

一様等方性電磁流体乱流に Lagrange 繰り込み近似 (LRA) を適用し、慣性小領域での全エネルギースペクトル $E(k) = E^u(k) + E^B(k)$ と残差エネルギースペクトル $E^R(k) = E^u(k) - E^B(k)$ を求めた。ただし、 $E^u(k)$ は運動エネルギースペクトル、 $E^B(k)$ は磁場エネルギースペクトルである。得られた全エネルギースペクトル $E(k) = 2A\epsilon^{1/2}B_0^{1/2}k^{-3/2}$ 、ただし k は波数、 ϵ は全エネルギー散逸率、 B_0 は磁場揺らぎの一方方向成分の二乗平均平方根、は Iroshnikov と Kraichnan の現象論と整合している。また残差エネルギースペクトルについては $E^R(k) = A^R\epsilon B_0^{-1}k^{-2}$ となった。現象論では決まらない無次元定数 A と A^R の定量的評価も行った。更に、外力を伴った一様等方性 MHD 乱流の直接数値シミュレーション (格子点数 512^3) を行い、LRA で得られたエネルギースペクトルの検証を行った。

Soft-mode turbulence in dissipative system

Michael I. Tribelsky

Patterns in dissipative systems with weakly broken symmetry are studied based upon the simplest canonical equation (generalized Nikolaevskiy model). The generic cubic dispersion equation governing stability of steady spatially periodic patterns is derived and analyzed. A domain of stable states in the space of the problem parameters (stability balloon) is obtained. It is shown that the domain is characterized by unusual scaling properties, so that its different parts obey different scalings. The results obtained may be applied to describe instabilities of advancing fronts and interfaces, pattern formation in reaction-diffusion systems, nonlinear evolution of seismic waves and other phenomena.

原子気体ボース・アインシュタイン凝縮体を用いた量子乱流研究の実現

小林 未知数

我々は量子流体のダイナミクスを記述する Gross-Pitaevskii 方程式の数値シミュレーションを用いてトラップされた冷却原子気体ボース・アインシュタイン凝縮体における量子乱流の実現可能性を調べた。2軸周りの歳差回転を用いることにより、量子渦が格子状態とはならず、複雑に絡まった量子乱流状態となり、非圧縮性運動エネルギーのスペクトルが乱流の重要な統計則である Kolmogorov 則に従うことを明らかにした。

ボース・アインシュタイン凝縮体に現れる渦格子パターンの流体力学的解釈

梅木 誠

ボース・アインシュタイン凝縮体に現れる2次元の渦格子パターンを、相互運動エネルギー (ハミルトニアン) を極小とする点渦系の安定かつ定常な配置として古典的な流体力学の立場より考察する。勾配系を用いてその配置を探索した数値例、特に渦の個数 $N = 3 \sim 10$ と $N = 100$ の場合を紹介し、後者では十分時間が経過するとその相対位置が正三角形に近い分布になることを示す。

古典乱流と量子乱流

宮崎巧也, 久保 涉, 中野 徹, 後藤俊幸

古典乱流と量子乱流における特異構造のトポロジーの次元依存性を調べた。両者を記述する方程式は異なるが、特異構造のトポロジカルな次元は同じである。2次元では点であり、3次元ではライン、4次元ではシートであることを確認した。それらの性質は、特異構造の間で繋ぎ換えが起こるかどうかが、粘性のない量子乱流においてもエネルギー散逸が起こりうるかどうかを決める。

渦輪の不安定性の直接数値シミュレーション

服部裕司, 泥谷圭亮, 福本康秀

The instability of a vortex ring is studied by direct numerical simulation of the Navier-Stokes equations. We consider a vortex ring con.ned in a torus. The exponential growth of various modes is captured by direct numerical simulation. It is found that the vortex ring is unstable for all values of the parameter ϵ , the ratio of core to ring radius, although exact parametric resonance is limited to discrete values. The structure of destabilized vortex ring is investigated in detail.

音波とシア流(渦)の相互作用の力学的解釈

廣田 真, 福本康秀, 吉田善章

超音速シア流では音波が不安定化することで知られているが, これに対する力学的な解釈を行った. すなわち, 振動のエネルギーをハミルトン力学に基づいて導出し, 音波(固有モード)と渦モード(特異な固有モード)が相互作用して不安定化する過程をエネルギー論的に議論した. これは Krein による力学系の分岐理論とよく似ているが, 渦モードが固有値ではなく, 連続スペクトルに属するため, 流体のような無限自由度力学系に特有の現象である.

ラグランジュ座標でみた2次元オイラー方程式の解の振舞い

松本 剛, Jeremie Bec, Uriel Frisch

空間2次元周期境界条件下でのオイラー方程式についてスペクトル精度をもつ数値解をラグランジュ座標で計算する方法について述べる. この方法を用いて, ラグランジュ座標を解析接続した解が持つ複素特異性について議論する.

矩形オリフィス後方の非対称流における乱流構造と乱流統計量

牧野 総一郎, 河村 洋, 岩本 薫

矩形オリフィスを有する流路における乱流の直接数値シミュレーションの結果から, オリフィス後流の特徴的な乱流構造と乱流統計量の関連について調査した. その結果, 剥離・再付着流の代表例であるバックステップ乱流場では観察されない特徴がいくつか存在することがわかった. また, 急拡大流路などにも見られる, オリフィス後流の非対称現象についても調査し, その乱流モデルによる予測精度に関しても調べた.

正方形ダクト乱流の直接数値シミュレーション: 二次流れのレイノルズ数依存性

関本 敦, 河原源太, M. Uhlmann, A. Pinelli

Spectral direct numerical simulations of fully developed turbulent flow in a straight square duct were performed in order to investigate flow structures at low Reynolds numbers. It was found that turbulence can be maintained for values of the bulk Reynolds number above approximately 1100, and the minimum value for the streamwise period of the computational domain is around 190 wall units, which is roughly independent of the Reynolds number. The flow state at marginal Reynolds numbers exhibits a 4-vortex secondary flow structure alternating in time, whereas the fully turbulent one presents the usual 8-vortex pattern. It is shown that buffer layer coherent structures play a crucial role in the appearance of secondary flow of Prandtl's second kind at the marginal Reynolds numbers. Coherent structures are observed to affect the mean primary and secondary flow even at higher Reynolds numbers.

3 プログラム

11月23日(金)

- 13:30-14:00 小林 幹, 宮崎修次, 森野佳生(京大情報)
シェルモデル乱流における時間運動の統計的性質
- 14:00-14:30 木田重雄, 田谷貴男(京大工)
混合を観る — クエット系の不安定周期流解析
- 14:50-15:20 吉野順也, 石原 卓, 金田行雄(名大工)
大規模 DNS データを用いた Kolmogorov の 4/5 法則の検証
- 15:20-15:50 後藤 晋(京大工)
一様等方乱流におけるエネルギーカスケード
- 16:10-16:40 米本 隆(名工大), 後藤俊幸, 渡辺 威(名工大, CREST)
格子ボルツマン法による非圧縮乱流の直接数値計算
- 16:40-17:10 細川 巖(電通大名誉教授)
Paradox in Kolmogorov's Refined Similarity Hypothesis

11月24日(土)

- 9:00-9:30 石崎龍二(福岡県立大), 井上政義(鹿大名誉教授)
複雑時系列のパターン・エントロピー時系列解析
- 9:30-10:00 柴田博史(崇城大)
乱流粘性係数と流体乱流の統計力学
- 10:20-10:50 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 振動子系の記憶関数スペクトルとローレンツ型パワースペクトル
- 10:50-11:20 川崎光宏(新潟大工)
マルチフラクタル・カオス系の非平衡定常状態の状態確率分布
— 双対遷移確率とアトラクタの実効フラクタル次元 —
- 11:20-11:50 巽友正(京大名誉教授)
非一樣乱流の交差独立性仮説による統計力学
+++++ 故藤坂博一教授の追悼講演セッション +++++
- 13:30-14:00 宮崎修次(京大情報)
非平衡統計力学・非線形物理学の発展に向けて— 故藤坂博一教授の見果てぬ夢 —
- 14:00-14:50 渡邊威(名工大)
乱流の秩序化過程と間欠性におけるスケーリング則
- 14:50-15:40 名嘉山 祥也(九大工), 金鋼(分子科学研), 岩下拓哉(京大工) 山本量一(京大工, CREST)
コロイド分散系の直接数値シミュレーション
- 16:00-16:50 田中ダン(福井大工)
Nikolaevskii 乱流
- 16:50-17:20 藤坂洋祐, 並木則行, 中田正夫(九大理), 竹広真一(京大数理研)
溶融と結晶沈殿, 組成変化を考慮したマグマ溜りの数値計算
- 17:20-17:50 森肇, 岡村 誠(九大応力研)
カオス・乱流の時間相関関数の2重構造
+++++

11月25日(日)

- 9:00-9:30 吉田 恭, 有光敏彦(筑波大数理物質科学)
電磁流体乱流のエネルギースペクトル
- 9:30-10:00 Michael I. Tribelsky (Moscow State Institute of Radioengineering, Electronics and Automation)
Soft-mode turbulence in dissipative systems
- 10:20-10:50 小林 未知数(大阪市立大理)
原子気体ボース・アインシュタイン凝縮体を用いた量子乱流研究の実現
- 10:50-11:20 梅木 誠(東大理)
ボース・アインシュタイン凝縮体に現れる渦格子パターンの流体力学的解釈
- 11:20-11:50 宮崎巧也, 久保 涉, 中野 徹(中大理工), 後藤俊幸(名工大)
ランダムな乗算過程としてのエネルギー散逸の間欠性
- 13:30-14:00 服部裕司, 泥谷圭亮(九工大工), 福本康秀(九大数理)
渦輪の不安定性の直接数値シミュレーション
- 14:00-14:30 廣田 真, 福本康秀(九大数理), 吉田善章(東大新領域)
音波とシア流(渦)の相互作用の力学的解釈
- 14:50-15:20 松本 剛(京大理), Jeremie Bec, Uriel Frisch(仏コートダジュール天文台)
ラグランジュ座標でみた2次元オイラー方程式の解の振舞い
- 15:20-15:50 牧野 総一郎, 河村 洋(東京理科大), 岩本 薫(東京農工大)
矩形オリフィス後方の非対称流における乱流構造と乱流統計量
- 15:50-16:20 関本 敦, 河原源太(阪大基礎工), M. Uhlmann, A. Pinelli (CIEMAT)
正方形ダクト乱流の直接数値シミュレーション: 二次流れのレイノルズ数依存性

4 開催日程, 場所

- 開催日程 2007年11月23日(金) - 11月25日(日)
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 27件
参加者数 41人

(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年間の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ース科学推進事業」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「インターフェース」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ー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においては上記事業に関す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。その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19年度共同利用研究集会19ME-S8の前刷集をご覧ください。

2. 講演概要

(1) 原子間力顕微鏡をプローブとした細胞構造応答特性についての数値的考察

妹尾昌尚(九大院工学府), 高雄善裕, 汪文学(九大応力研)

細胞の剛性に関し、内径数十ナノメートルのピペットで細胞を吸引したり、柔らかい基板上を細胞が運動する時に生じた基板の痕跡から運動時に発生した力を推定するなど様々な研究が行われてきた。しかし、それらは細胞の局所的な応力や剛性の分布を直接測定できなかつたため、運動や形態変化と細胞内に起こる構造的な変化を関連付けることはできなかつた。

近年、急速に発展しつつある原子間力顕微鏡 AFM では、試料の局所的な剛性や粘性などの力学特性の分布を高精度に測定することが可能なことであり、様々な研究が行われている。しかし、その多くは実験的研究に集中しており、数値的な研究は単純な理論モデルを対象としたものにとどまっている。そこで本研究では、粘弾性や構造内部の不均質性といった細胞本来の特質を考慮に入れた細胞構造モデルを用い、AFM 試験の測定結果に影響を及ぼす要素に関して、有限要素法(Finite Element Method : 以下 FEM と記す)による数値的な考察を行う。

(2) 擬似咬合状態での歯周組織の力学状態解析

吉岡 友彦¹, 森田 康之², 東藤 貢², 松下 恭之³, 古谷野 潔³, 内野 正和⁴,
新川 和夫²

¹九大院総合理工学府, ²九大応力研,

³九大歯学研究院, ⁴福岡県工業技術センター機械電子研究所

咬合機能の解明において歯牙の動態・変形に関する研究は、歯科医学分野の大きな研究対象の一

つであり、以前より数多く行われている。しかしながらいずれの手法においても、歯牙の局所的変位量・ひずみを求めることを目的とした一点計測や、乾燥状態の歯牙単体における解析であり、咬合解析に十分な情報量とは言い難い。そこで本研究では、と畜されてすぐの生体に近い状態であるブタの試験片を用いて変形計測を行った。全視野計測による変形解析には、デジタル画像相関法を用いた。さらに、組織の力学的挙動を明らかにするために、組織の3次元モデルによる有限要素解析 (FEA) を行った。

(3) 3-D stress analysis of dental implant with model bone

Lihe QIAN, Mitsugu TODO (*RIAM, Kyushu Univ.*), Yasuyuki MATSUSHITA,
Kiyoshi KOYANO (*Faculty of Dental Sciences, Kyushu Univ.*)

With an increased application of implants in dentistry for rehabilitation of damaged or missing teeth in partially or completely edentulous patients, raising the long-term success rate of endosseous implants has become critically important. A reduced long-term success rate is due to various reasons including biomechanical interactions between implants and jawbone. Although such biomechanical interactions have been recognized to play an important role in prolonging the lifetime of the jawbone and implants, the underlying mechanisms are still unclear. It has been experimentally demonstrated that an overload acting on an oral implant can result in loss of the marginal bone or even complete loss of osseointegration. The loss of marginal bone can cause loss of implant, leading to the loss of implant function. It is also indicated that, however, if the strain or stress is below a critical value, disuse of the bone occurs and remodeling results in a loss of bone, i.e., atrophy occurs. Therefore there exists an optimal stress/strain for the bone formation, which is closely related to the design of the implant, and dentists' clinical operation. And therefore, in order to reduce the implant failure and to protect the surrounding bone, a thorough investigation of stress and strain distributions in the bone and the implant may be of vital importance. The aim of this work is thus, by means of a finite-element (FE) analysis, to investigate the effects of implant size, implant insertion depth and loading condition on the stress/strain distributions in an implant and in a jawbone surrounding the bone.

(4) インプラント支持オーバーデンチャーの有限要素法モデル化に関する基礎的検討

松下恭之、佐々木健一、江崎大輔、春田明日香、長嶋利夫²⁾、東藤貢³⁾、
古谷野潔
九大歯学研究院口腔機能修復学講座、²⁾上智大理工学部、³⁾九大応力研

下顎無歯顎症例に対して、当科ではインプラントを用いたオーバーデンチャーにより臨床的に良好な結果を得ている。その生体力学的特性について下顎模型に埋入したインプラントモデルでひずみ計測を行い、力学的影響について報告した。インプラントの形状、配置などが及ぼす影響を検討しようとする、多くの模型実験を必要とすることになる。一方有限要素法解析ではモデルの変更等が容易であり、個別の患者ごとのより実際的な応力分布を検討することが可能となる。そこで今回このひずみ計測モデルをもとに有限要素法モデルを構築することを目的とした。

(5) 造成骨再生評価のための光干渉型レーザー誘起超音波装置開発の試み

森田康之(九大応力研)、井上寿志(九大院総合理工学府)、東藤貢(応力研)、
松下恭之(九大歯)、新川和夫(九大応力研)、古谷野潔(九大歯)

We propose the non-contact displacement measurement method for various materials based on laser-induced ultrasound. We illuminate nanosecond pulse laser to the material surface. The various kinds of elastic waves whose maximum frequency is several hundreds MHz are excited by laser-induced ultrasound. And then, only elastic waves which depends on the thickness of specimen remains selectively. The elastic waves occur displacement. We propose the collector optics type Twyman-Green interferometer as non-contact measurement method for displacement of rough surface. Using the aluminum whose thickness is 1 mm, we can detect the resonance signal of elastic waves and the

resonance frequency that is 3.8 MHz by FFT.

(6) モノマー含浸・重合による医療用ポリマー複合型多孔質チタン材料の開発

仲井正昭、新家光雄、赤堀俊和（東北大金材研生体材料学研究部門）

チタン材料は、特に比強度、耐食性および生体適合性に優れる材料であり、生体用金属材料として骨代替器具等に利用されている。また、これらの特性に加え、ヤング率が骨の値（10-30 GPa）に近い材料を用いることが、骨の健全な治癒および再生に対して有利であるとされていることから、近年では、低ヤング率型チタン材料の開発が精力的に進められてきている。

金属材料の低ヤング率化に極めて有効な手段のひとつとして、多孔質化が挙げられる。しかしながら、その反面、多孔質化には、機械的性質の低下を招くという問題点も存在する。この機械的性質の低下は、多孔質体空隙部の応力集中に起因すると考えられることから、それが緩和されることにより、ある程度抑制されると推測される。応力集中の緩和には、空隙部への他材料の充填が有効と考えられる。このとき、充填物として低ヤング率の生体活性物質を用いれば、多孔質化によりもたらされる低ヤング率を維持しつつ機械的性質の低下が抑制されると同時に、金属材料には本来備わっていない生体機能が付与されることになる。

低ヤング率であり、かつ生体活性な充填物の候補材料として、種々の医療用ポリマー材料が挙げられる。これは、医療用ポリマー材料が、一般的に、生体用金属材料およびセラミックス材料と比較してヤング率が低く、また、特に生体軟組織あるいは血液等に対する生体活性に優れるためである。そこで、本研究では、モデル実験として、多孔質純チタンに医療用ポリマー材料のひとつであるポリメタクリル酸メチル（PMMA）を充填し、多孔質純チタンの機械的性質に及ぼすPMMA充填の影響を調査・検討した。

(7) Hydroxyapatite Formation on MOCVD-CaTiO₃ coated Ti

Mitsutaka Sato¹, Rong Tu¹, oTakashi Goto¹, Kyosuke Ueda¹, and Takayuki Narushima²

¹ Inst Mater Res, Tohoku U., ² Tohoku U. Biomed Engr Res Org

Ca-Ti-O films were prepared by MOCVD using Ca(dpm)₂ and Ti(OiPr)₂(dpm)₂ precursors. The phases, composition and morphology of Ca-Ti-O films changed depending on the molar ratio of Ca to Ti precursors (RCa/Ti), total pressure (*P*_{tot}) and substrate temperature (*T*_{sub}). CaTiO₃ films in a single phase were obtained at *T*_{sub} = 973 and 1073 K. CaTiO₃ films prepared at 873K had a dense structure and smooth surface. CaTiO₃ films prepared at *T*_{sub} = 1073 K had complicated rough surface with a cauliflower-like texture. Hydroxyapatite (HAp) formed in 3 days on the CaTiO₃ film prepared at *T*_{sub} = 1073 K.

(8) リン酸オクタカルシウムの物理化学的性質と骨再生促進能

穴田貴久¹、本田義知¹、熊谷崇²、島内英俊²、鈴木治¹

¹ 東北大歯学研究科顎口腔機能創建学分野、

² 東北大歯学研究科歯内歯周治療学分野

リン酸オクタカルシウム（OCP: Ca₈H₂(PO₄)₆・5H₂O）はヒドロキシアパタイト（HA: Ca₁₀(PO₄)₆(OH)₂）の前駆物質であり、実際に歯のエナメル質、象牙質や骨のHAマトリックス中に同定されている。これまでに我々は、合成OCPをマウス頭頂骨骨膜下あるいはラット頭蓋冠の規格化骨欠損部等に埋入すると、HAに比べ、生体内で吸収されつつ骨再生を促進することを報告してきた。OCPは骨再生過程において骨芽細胞やその前駆細胞等に作用することで骨形成を促進し、OCP自身が骨形成の核となって骨修復が促進する所見が得られている。本研究はOCPの骨再生能を明らかにすることを目的とし、骨再生材料として臨床応用されているHAセラミックスと比較することで、培養骨芽細胞の細胞増殖・分化に与える影響を検討した。

(9) PLLA scaffold の試作と圧縮変形挙動

倉岡宏行 (九大院総理工学府), 東藤 貢 (九大応力研)

金 鎮雄, 瀧健太郎, 大嶋正裕 (京大工学研究科)

生分解性高分子であるポリ(L-乳酸) (PLLA) は, その生体適合性や生体内での吸収性の高さから医療分野において幅広く使用されている。例えば, 再吸収可能なプレート, ロッドそしてスクリューなどといった骨固定材がPLLAから作られ, 整形外科, 口腔外科, 脳外科などで使用されている。また, 最近では, 生体内での分解速度, 機械的強度, 生体適合性を改善するために, PLLAにハイドロキシアパタイト (HA) 粒子を複合化したHA/PLLA複合材料の実用化が始まっている。一方, 再生医療においても生体吸収性材料としてPLLAは期待されており, 特に多孔質構造のPLLAはscaffoldとしての研究開発が進んでいる。Scaffoldとしては, PLLA単体に加えてHAやTCPのような生体活性セラミックスを複合化した材料が候補として考えられている。このような多孔質構造のscaffoldの内部で特定の細胞を培養することにより組織の再生を促進するといった効果が期待されている。しかし, 多孔質という特異な構造とその力学特性の関係については, いまだ未知の部分が多いのが現状である。そこで本研究では, PLLAの3次元多孔質構造を作製し, 構造と力学的挙動との関係を調べることを目的とした。相分離法を用いて多孔質構造を作製し, 圧縮試験を行って応力-ひずみ関係を評価した。また, 微細構造の特徴を明らかにするため, 試料の表面を電解放射形走査型電子顕微鏡 (FE-SEM) で観察した。さらに, 圧縮変形前と後の表面のFE-SEM画像を比較することで, 圧縮変形メカニズムについて考察した。

(10) 三次元有限要素法による下顎骨に対する応力解析

寺嶋雅彦¹⁾, 中島昭彦¹⁾, 赤司篤政²⁾, 高雄善裕²⁾

¹⁾九大歯学研究院口腔保健推進学講座, ²⁾九大応力研

顎変形症の発現因子には, 遺伝要因に加え環境要因として咬合干渉など顎口腔機能の異常による下顎の偏位, 筋機能の不均衡など多様な要因が考えられ因果関係は複雑である。顎顔面骨格には咀嚼筋から種々の力が加わり, それによって骨の形成が誘起され, 個人特有の顎顔面形態が決まる。なかでも歯列に加わる機能圧は, その大きさや加わる時間の上で骨形成への影響力が最も高いと思われる。咬合異常などによって長期間に亘り異常な圧力が歯列に加わるとそれは顎顔面構造全体に伝達され, 若年者においては不均衡な成長が起こると考えられる。しかし, これら顎機能異常の原因は不明な点が多く, 患者個人の骨体に生じる力学的状態を応力解析する方法は未だ確立されていない。そこで, 本研究の目的は, spiral/helical computed tomography より構築した顎顔面骨格, 咀嚼筋, 歯根形態のデータに非接触型三次元形状計測装置を用いて計測した歯列咬合面データをもとに, 患者個人の三次元的な有限要素モデルを構築し, 下顎骨に対する応力解析を可能にするシステムを構築したので報告する。

(11) リン酸オクタカルシウム/コラーゲン複合体による膜性骨嵩上げ促進の可能性

鈴木祐子¹⁾, 鎌倉慎治²⁾, 羽鳥弘毅¹⁾, 佐々木和夫³⁾, 本田義知¹⁾, 穴田貴久¹⁾, 佐々木啓一¹⁾, 鈴木治¹⁾

¹⁾東北大歯学研究科 ²⁾東北大医学系研究科 ³⁾日本ハム株式会社

骨や歯を構成する生体アパタイトは, リン酸カルシウム的一种であるリン酸オクタカルシウム (Octacalcium Phosphate; OCP) を前駆物質として経由し形成される。これまでの研究で, OCP と collagen の複合体 (OCP/Col) は, 自然治癒しない大きさの骨欠損内に埋入した場合, 生体内吸収に伴って骨形成を促進することがわかっている。その骨形成能は従来骨再生材料として用いられてきたハイドロキシアパタイト (Hydroxyapatite; HA) や β -三リン酸 (β -tricalcium phosphate; β -TCP) よりも優れており, 骨欠損辺縁からの骨伝導のみならず, 欠損内に埋入された OCP 顆粒を核として骨形成が行われることが示唆された。しかし, 骨欠損内では旺盛な骨形成を示す本材料の骨上骨膜下における反応はほとんど知られていない。そこで本研究では, 厚さの異なる OCP/Col をラット頭頂骨上骨膜下に埋入し, 骨の嵩上げ促進の可能性を探ることを目的とした。

(12) アクリルレジン義歯床に潜む微生物の検出とその生物学的性質の解析

竹内裕尚^{1,2}、中條和子¹、佐藤拓一¹、佐久間陽子²、佐々木啓一²、高橋信博¹

(東北大学歯学研究科 ¹口腔生化学分野、²口腔システム補綴学分野)

これまでに、アクリルレジン義歯床表面に付着する微生物についてはいくつかの報告があるが、レジン内部への細菌の侵入を示したのは僅かに一報のみである。本研究演者である中條らは、長期使用したアクリルレジン義歯床を割断し、電子顕微鏡にてレジン断面の観察を行い、複数の微生物の存在を確認している。しかし、レジン義歯床内部の微生物の量や種類、そして生物学的性質を詳細に調べた報告は未だない。そこで本研究では、アクリルレジン義歯床内部から微生物を分離・同定し、さらにその生化学的性質を検討することで、義歯に起因する各種口腔疾患や義歯特有の腐敗臭との関係について明らかにするとともに、これら微生物の付着を制御しうる新しい義歯床レジンの開発することを目的とする。

3. まとめ

高機能バイオマテリアル-生体インターフェイスの創製に関する第2回目の研究集会であり、3研究機関からそれぞれ7件、2件、3件の講演発表があり、異分野間の活発な討論が行われた。参加者は東北大学から12名(内院生3名)、九州大学から27名(内歯学研究科2名、院生11名)の合計39名であった。平成20年度は平成20年秋に、同様の3回目の研究集会を開催したいと考えている。

平成19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、浅海域における海洋探査や海洋環境モニタリングに利用するための水中グライダーの実用化を目指して、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」の実験機 ALEX (Fig.1) を開発した。ALEX は、ラジコン制御およびマイコン制御によって水中での静止や後退、垂直降下、機首揺れ回転をしながらの浮上／潜降、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、実機の開発に向けて自律制御システムを確立するためには、深海水槽における多岐に亘る基礎データの収集が不可欠である。

ALEX は、今年度、自律制御の実現に向けて、(株)ワイズラブの超小型軽量汎用制御基板 (MAVC2: Micro Aerial Vehicle Controller) を設計・製作して実装した。MAVC2 システムは、マイコン (H8S/2368F シリーズ) と ALEX を駆動するためのサーボコントローラーやセンサー等で構成される。

ALEX を制御するためのプログラム開発を進めており、その妥当性・有効性を確認するために、深海機器力学実験水槽において実験を実施した。具体的な実験項目は、① 水中グライダー実験機の耐圧試験、② マイコン制御のために搭載したセンサーの校正、③ MAVC2 制御システムによるグライディング試験、の3項目である。また、実機開発のために、海洋観測機器を用いた可能性試験も実施した。

□実験方法

1. 深海機器力学実験水槽において、水中グライダー実験機を1時間程度着底させて耐圧試験を行う。
2. 1m ごとにマーカーを付けたロープで水中グライダー実験機を吊り下げ、機体を1m ごとに降下・浮上させて深度センサー (フジクラ製: FPOW-08G, 定格圧力 49.0 kPa, 最大負荷圧力 196 kPa) の校正を実施する。
3. プレプログラム方式および設定深度をトリガーにしたオープン制御方式によって、マイコン制御の妥当性を検証した。3軸加速度計および3軸角速度、水圧計からのセンサー信号は、内蔵のEEPROM に 10 samples per second で記録される。この場合の記録時間は約 20 分間であるが、サンプリングレートを下げることによって更に長時間の記録も可能となる。得られたデータは、無線モデムによるワイヤレス通信またはシリアルケーブルによる有線接続によって PC に取り込むことができる。

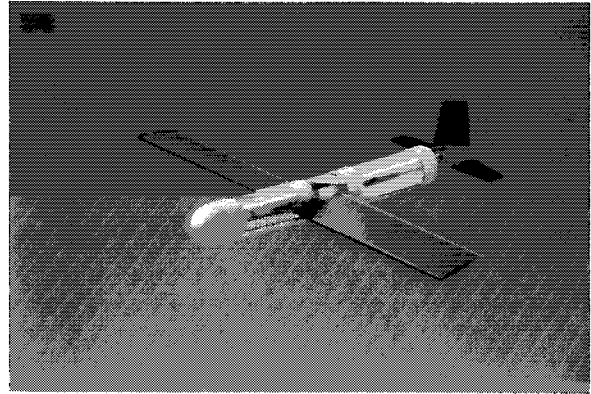


Fig.1 主翼独立制御型水中グライダー ALEX

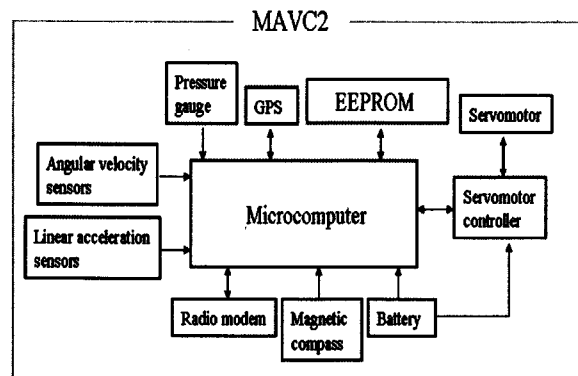


Fig.2 MAVC2 と周辺機器

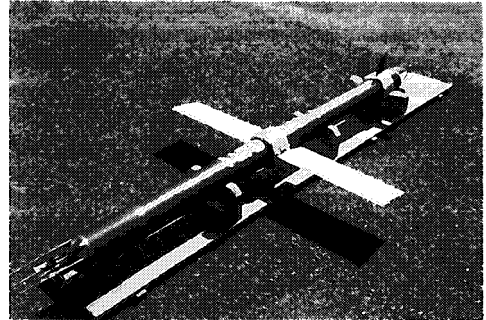
□実験結果

● 第1回

実施日：平成19年10月11日（木）～12日（金）

参加者：有馬 正和，池淵 卓郎，市橋 伸理

実験内容：本研究では、実海域における性能評価のための主翼独立制御型水中グライダー「ALEX-II」の計画を進めている。そこで、「ALEX-II」用に製作した主翼および垂直・水平尾翼をアレック電子(株)の乱流微細構造プロファイラー「TurboMAP」に取り付けて、グライディング試験を実施した。



TurboMAPの後端部に同社の小型メモリー電磁流速計 Compact-EM を取り付けて、潜航速度を計測した。TurboMAPに内蔵された加速度を解析した結果、乱流微細構造を計測・解析するのに問題となる機体の振動レベルも小さく、潜航速度も適切であることがわかった。本実験によって、主翼独立制御型水中グライダーの応用事例として、乱流微細構造の計測に有用であることが明らかとなった。

● 第2回

実施日：平成19年12月12日（水）～14日（金）

参加者：有馬 正和，池淵 卓郎，市橋 伸理

実験内容：本実験では、①水中グライダー実験機の耐圧試験，②マイコン制御のために搭載したセンサーの校正，③グライディング試験，を行い，開発した制御プログラムの妥当性を確認することができた。その後も自律制御と高度知能化の実現に向けて，プログラムの改良を重ねている。複数のセンサー信号によるフィードバック制御および外乱に対するロバスト性の実現を次年度の目標とする。

□研究成果報告

- M.Arima, N.Ichihashi, T.Ikebuchi: Motion Characteristics of an Underwater Glider with Independently Controllable Main Wings, Procs. of OCEANS'08 MTS/IEEE KOBE - TECHNO-OCEAN'08 (OTO'08), (2008). (印刷中)
- 市橋伸理, 池淵卓郎, 有馬正和: 主翼独立制御型水中グライダー「ALEX」の開発 —自律型運動制御システムの構築—, 第20回ロボティクス・メカトロニクス講演会 (ROBOMECH 2008 in NAGANO), (2008). (印刷中)
- N.Ichihashi, T.Ikebuchi, M.Arima: Development of an Underwater Glider with Independently Controllable Main Wings, Procs. of ISOPE 2008, (2008). (印刷中)

□研究組織

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
勝井 辰博	大阪府立大学・大学院工学研究科	講師	実験計画・船舶流体力学
池淵 卓郎	大阪府立大学・工学部	B 4	実験・解析
市橋 伸理	大阪府立大学・工学部	B 4	実験・解析
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・回収方に関する研究

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ものから、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、作業がいつ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。多様な形状のビークルに対応可能で、簡単にビークルを投入・回収することが可能な装置は、海洋観測・調査に大きく貢献するものと考えられる。

2. 水中ビークルの投入・回収試験

2007年、長崎県高島海域（水深：約45m、底質：砂地）（Fig.1）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パ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

2. 1 投入・回収装置

ビークルの投入・回収装置を Fig.2 に示す。ステンレス製の枠（2.5 m × 2.5 m × 1.5 m）の3面に網を張ったものである。

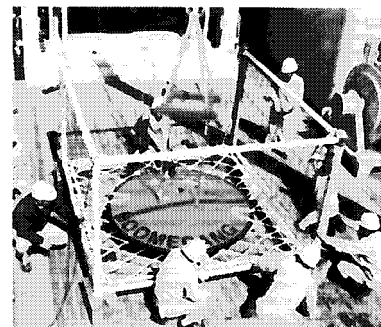


Fig. 2 ビークル投入・回収装置

2. 2 母船がアンカーを打たない状態での投入・回収

母船がアンカーを打たない状態での投入時の様子を Fig.3 に回収時の様子を Fig.4 に示す。投入、回収の手順は以下のとおりである。

[投入]

- ・クレーンでビークルを吊り上げ、甲板上に置かれた投入・回収装置の中にセットする。
- ・クレーンでビークルの入った投入・回収装置を吊り上げ、船尾より振り出す。
- ・海面まで装置を下ろし、ビークルを海面に浮かす。
- ・船を前進させてビークルを投入・回収装置より出す（流れがある場合はビークルが自然に投入・回収装置より出て行く。）。

[回収]

- ・右舷後方に投入・回収装置を海面に半分没する状態で吊り下げる。
- ・投入・回収装置の中にビークルが入るように船を操船する。
- ・ビークルが投入・回収装置に入った時点で装置を吊り上げ、甲板に回収する。

ビークルを破損することなく、短い時間で投入・回収を行うことができた。なお、本投入・回収方法は”BOOMERANG”に限らず、小型ビークルの投入・回

収に利用できると思われる。

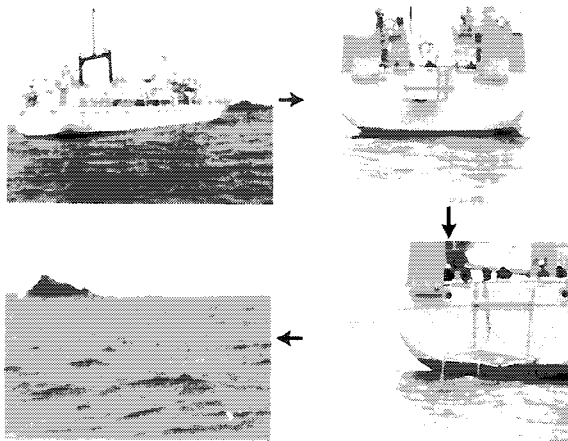


Fig. 3 ビークルの投入

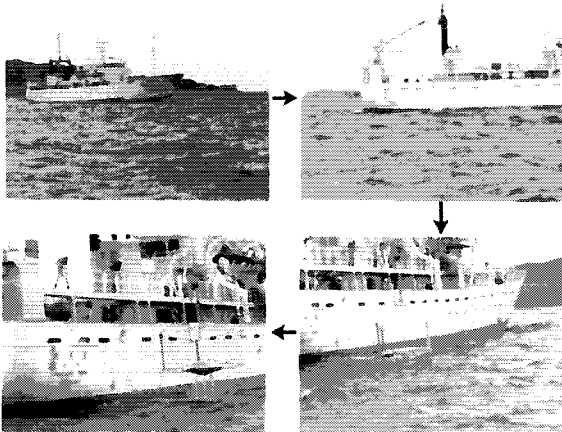


Fig. 4 ビークルの回収

2. 3母船がアンカーを打った状態での回収

母船がアンカーを打った状態では、回収は母船に搭載された小型ボートを使用することになる。手順は次の通りである。(Fig.5)

- ・小型ボートでビークルに近づき、網でビークルを囲んで、母船まで曳航する。
- ・投入・回収装置の中にビークルを入れる。
- ・投入・回収装置を吊り上げ、甲板に回収する。

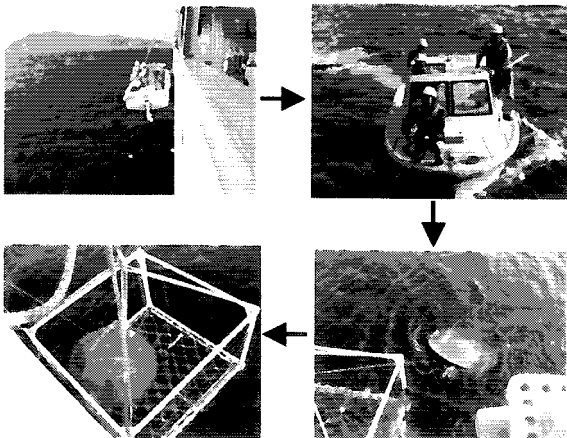


Fig.5 小型ボートによるビークルの回収

3. 投入・回収装置の改造

ビークル回収時、ビークルを投入・回収装置 (Fig.2) の中央に入れ、吊り上げるのが困難であったので、装置の中に帆布で Fig.6 に示すような誘導板を設置した。装置に入ったビークルは自動的に装置中央に誘導される。しかしながら、帆布が大きな流体力を受け、装置の姿勢を適性に保つことが困難になった。帆布を網に変える等の改良を図って行きたい。

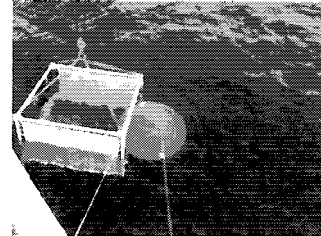


Fig. 6 投入・回収装置の改造

4. 水中ビークルの投入・回収に関する情報収集

海中ビークルの開発・運用を精力的に行っている海洋研究開発機構を訪問し、観測船「なつしま」のビークル運用時の支援方法、ビークル投入・回収用 A フレームについて情報収集を行い、技術者・研究者と意見交換を行った。さらに専用母船を必要としない小型 AUV「ピカソ」の投入・回収方法について情報収集を行った。

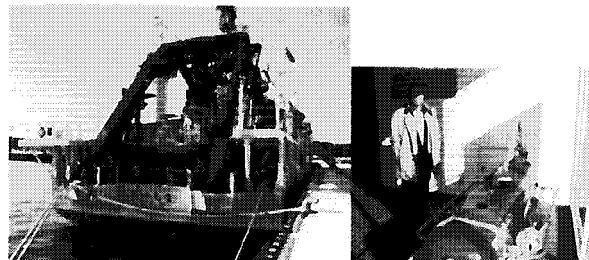


Fig. 7 「なつしま」及び小型 AUV「ピカソ」

5. 研究成果報告

- ・中村昌彦、兵頭孝司、小寺山亘、稲田勝、丸林賢次、吉村浩、森井康宏：バーチャルモアリング用海中ビークルの研究開発、九州大学応用力学研究所所報、第 133 号、pp.99-115、2007
- ・中村昌彦、兵頭孝司、小寺山亘、稲田勝、丸林賢次、吉村浩、森井康宏：バーチャルモアリング用円盤型水中グライダーの開発 (- 実証機の建造と投入・回収方法について)、日本船舶海洋工学会講演会論文集、第 5E 号、pp.91-94、2007

6. 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、長崎大学水産学部准教授
山脇信博、筒井博信、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)

1. 目的

AUV 単体は、非常に高価ではあるが、商用実用機も実現化されるようになった。しかし、単体 AUV による作業は、時間空間的に限界がある。そこで、今後、複数 AUV 同士、或いは洋上の無人船と AUV といった複数プラットフォームによる協調作業について研究を進めていく必要がある。そのためには、実海域実験に先立ち、多くの水槽実験を積み重ねる必要がある。これらの水槽実験を実施するために、小型 AUV テスト機 TAMA(Test-bed for AUV Multi Agents)の実験システムを構築しているが、本研究では、水槽内での水中ロボットの座標を検出する超音波位置検出システムの構築を目的としている。協調作業を実現するためには、ロボット同士がお互いの位置情報を共有するシステムが不可欠と考えられるが、市販されている実海域用の超音波装置は高価な上に、出力が大きすぎて水槽実験には適していない。そこで、水槽実験用の超音波システムの構築が必要である。

2. 複数 AUV 協調作業に必要な超音波位置検出システムの概要

複数 AUV が協調作業するためのインフラとして、1) 個々の AUV の座標を検出するシステム、2) 検出した全ての AUV の位置情報を蓄積する位置情報マッピングマスターシステム、3) 自分の位置や自分の作業に必要な他エージェントの位置をマッピングマスターからダウンロードするための通信システム、4) 自分と他のエージェント間の通信システム、が必要である。本研究では、1) に相当する部分を構築した。これらのシステムは、全て超音波で実現する必要があるが、周波数割り当ての問題や、マルチパスの問題など実装の課題、マッピングマスターの構築と情報のダウンロードのアルゴリズムの課題など、実際的水槽実験を通じて検証していかなければならない。

3. 今回作成した超音波位置検出 LBL

今回の実験では、1対の送受波器を用いてトランスポンダを設計試作し、これを3セット使用した LBL(Long Base Line)システムを構築して座標検出を試みた。超音波振動子は試作コストを低減するため、陸上用の防滴型超音波振動子(秋月電子にて購入)を使用した。端子に同軸ケーブルを半田付けした後、市販の液体ゴム(製品名プロト)を用いて振動子ごと防水加工した。これまで、防水にはエポキシ樹脂を使用したり試行錯誤を行ってきたが、エポキシでは振動子ケースが拘束されて感度が落ちる上に、水で劣化して浸水することなどがあったが、今回使用した液体ゴムは、振動子への拘束も少なく、超音波の受信感度にあまり影響を与えないようである。実験期間を通じて浸水は無かったが、より長期的なテストで確認する必要がある。今回使用した振動子は陸上で 40kHz になるように機械的な共振加工が施されているが、振動子のコンデンサ成分が約 2.7nF であることから、市販の 1mH の可変コイルを用いて電氣的共振回路を構成し、超音波の周波数は約 100kHz と設定した。

送信回路は、マイクロチップ CPU である PIC から必要な数のパルス列を発生し、トランジスタ(C1815)のベースに入力し、コレクタ側にトランスを構成して昇圧している。今回は、キャリアとして 100kHz のパルスを 20 波とし、電源電圧は 5V のままでトランスによって±30V 程度まで昇圧するように構成した。

受信回路は、共振回路からの微弱な入力電圧を電源電圧を±2.5V に分圧したオペアンプによる非反転増幅回路 2 段で 200 倍に増幅した後、トランジスタで波形整形して TTL レベルに戻すという単純な構成である。PIC には送信開始のタイミングでクリアしたカウンタを通じて、100kHz のカウンタパルスが入力されており、受信のタイミングでこのカウンタを読み出すことにより時間を計測している。距離計算は水中音速が 1500m/s と仮定して計算し、実測値から補正した。

4. 実験の様子

応用力学研究所深海機器水槽での実験は、3種類実施した。まず、設計試作した超音波回路の距離検出限界を調べるため、水槽の長手方向に沿って、トランスポンダを対向させ、50cm ずつずらしながら距離を測定する実験（実験1）。これを用意したロボット側のトランスポンダとLBLを構成する3チャンネルのトランスポンダそれぞれについて計測した。次に、この実験から水中音速や回路による計時遅れを補正し、水槽の壁にロボット側と想定したトランスポンダ、5m程度離れた短手方向の対岸の壁に設置した2個のベースラインによる2DLBL実験（実験2）。最後に、ベースラインを3個にした3DLBL実験（実験3）。3DLBL実験では、最終的に、九州工業大学所有のツインバーガーを実際に航行させて位置検出のテストも試みた。

5. 実験結果

各実験の結果をFig.1～Fig.4に示す。Fig.1は、実験1の結果、Fig.2は、実験2の結果、Fig.3は、実験3の結果を示す。Fig.4はツインバーガーが前方に移動してから行進した結果である。指向性が広くないため、ベースラインを1.5mより大きく取れなかったが、距離測定が3cm程度ずれると座標としては10cm程度の誤差が出てしまう。ツインバーガー程度の大きさではこの誤差は許容できるが、TAMAではもう少し精度を上げる必要がある。

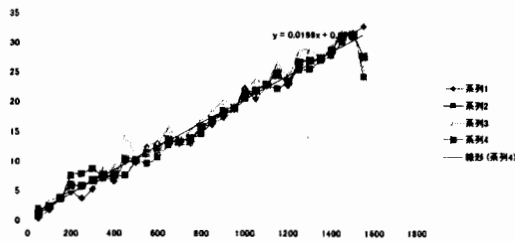


Fig.1 Distance-Error relation at face to face ranging.

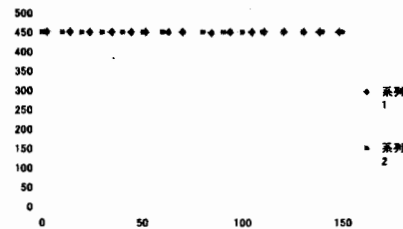


Fig.2 2D LBL result(Pink=actual, Blue=measured)

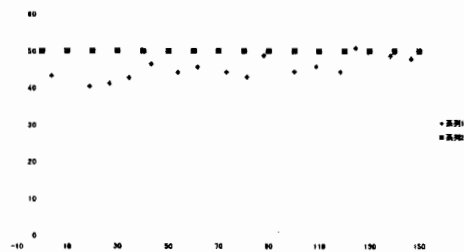


Fig.3 3DLBL result(Pink=actual, Blue=measured)

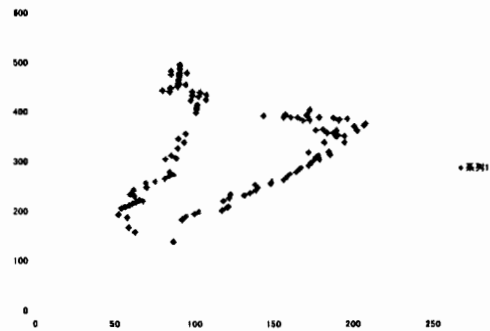


Fig.4 3DLBL result using Twin-Burger

6. 考察と今後の予定

今回の実験によって、今回設計した回路システムを利用して約15m程度までの距離計測が可能であることが明らかになった。また、指向性があまり大きくないため、LBLを構成するベースライン距離が大きく取れないため、座標検出にはトランスポンダ間の計測距離誤差の影響が現れてしまう。けれども、約10cm程度の座標検出誤差は可能であることが明らかになった。ツインバーガーへの実装は時間が十分に取れなかったため、もう少し調整が必要であるが、ロボットが運動している場合でも位置検出が可能であることが明らかになった。

今後、指向性のもう少し広い振動子を用いてLBLの計測誤差を軽減するとともに、トランスポンダをアレイにして広範囲の座標検出を可能とし、各ロボットの座標を記録するマッピングマスターの構築を行う予定である。それと並行して、マルチパスに強い通信システムを開発する必要があるが、これにはM系列信号処理が不可欠と考えており、AD変換によるデジタル信号処理も含めた超音波回路の設計試作を実施していく予定である。

1. はじめに

近年、世界各地で化石燃料の大量消費、熱帯雨林の伐採などを原因とする地球温暖化に伴う自然災害が、我々の生活に甚大な被害をもたらしている。このような環境問題を解決するためには、海洋の環境を詳細に調査し、地球規模で起こる気候変動の仕組みを解明する必要がある。特に、大気海洋の相互干渉に大きな影響を与えている海洋混合層における、物質、熱、運動量の変動を的確に把握することは不可欠である。

このような背景の下、当研究室では海洋観測のためのツールとして、無索無人のグライダー型海洋観測ビークルの開発に取り組んできた。開発中のグライダー型海洋観測ビークルは、水中重量を調節することにより潜降・浮上を繰り返しながら長距離を航行することを想定しており、従来のスラスタを用いるタイプに比べ高い推進効率と静粛性を有するため、広い海域の海洋観測のための有望なツールであると考えられる。

本研究では、グライダー型ビークルが航行するための推進機構とその制御系の開発を目的とする。運動制御のためのセンサーとしては、深度を計測するための圧力センサーとビークルの姿勢角を測定するための加速度センサーを使用する。すなわち、圧力センサーにより測定された機体深度に基づき、潜降・浮上を切り替えるための浮力調節装置を制御し、同時に機体内部に設置した重心移動装置を前後に動かすことにより機体のピッチ角を変化させ、潜降・浮上時の機体姿勢の安定化を計る。更に、機体のロール角とピッチ角を制御するために、加速度センサーにより機体姿勢角を計測する。

2. 水槽実験

はじめに深海機器力学実験水槽において、機体の運動特性を調査するための機体滑空試験を種々条件を変えて実施した。本実験では機体のグライディングの様子を水槽壁面に設けられた観測窓から撮影し、得られた映像を解析して滑空中の機体速度と姿勢角を算出した。機体滑空試験におけるビークルの様子を Fig.1 に示す。

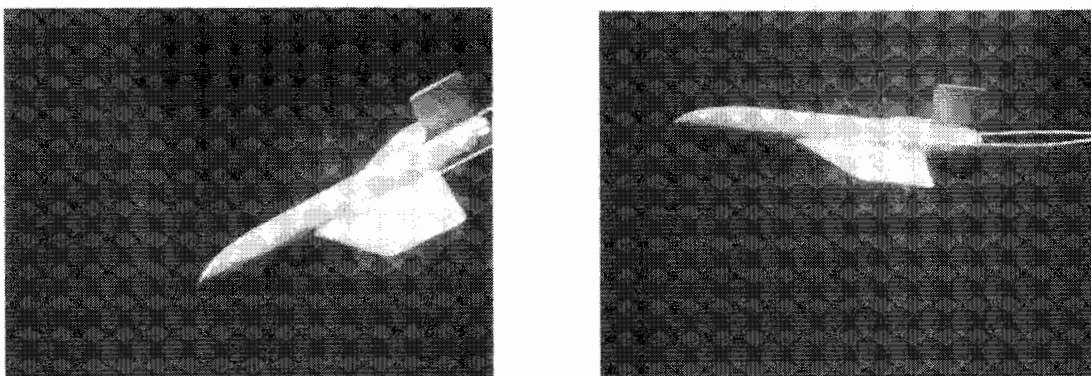


Fig.1 Gliding of the vehicle

Fig.1 左の状態では滑空時の機体速度は約 0.67 m/sec であり、ピッチ角は約 -28.1° であった。ただし、ピッチ角は頭上げを正とする。右の状態では、前述の実験条件と比べて重心位置を後方に移動したため、頭上げの姿勢で機体が滑空していることが分かる。また、同じく先の実験条件と比較して水中重量を減少させたため、機体速度も大きく減少した。機体速度は約 0.35 m/sec、ピッチ角は約 5.2° であった。前者の実験条件と同条件を用いた数値シミュレーション計算を実施し、実験結果と比較して Fig.2 に示す。

図中、点線が実験結果を、実線がシミュレーション結果を示す。これらの結果より、試験結果と計算結果が概ね一致することが確認され、計算に使用した機体運動方程式の有効性が確認できた。

次に、シミュレーション計算等に基づいて開発された運動制御系を用いて、潜降・浮上時における機体の動作確認試験を実施した。本試験により、自動制御系による航行において、潜降中の速度は約 0.12 m/sec であり、ピッチ角は約 -8.2° であることが確認された。浮上時においては機体速度は潜降中と同じく約 0.12 m/sec であり、ピッチ角は約 11.9° であった。本実験により、自動制御系による航行時においても潜降・浮上中の滑空姿勢が安定しており、重心移動装置が有効に機能していることが確認された。

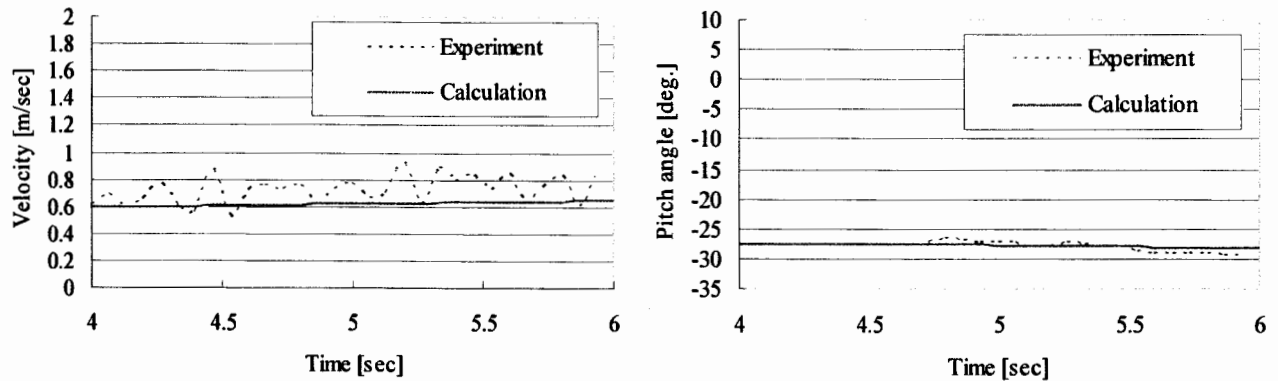


Fig.2 Time histories of velocity and pitching angle

得られた水槽実験結果を基に、浮力調節装置の改良を行った。新装置では従来別々であった重心移動装置と浮力調節装置を 1 つに統合し、観測機材の搭載のために機体内部のスペースを確保した。また、浮力調節装置の駆動装置が空気ポンプからステッピングモーターへ変更されたため、従来に比べ正確かつ柔軟な浮力の制御が可能となった。新浮力調節装置の写真を Fig. 3 に示す

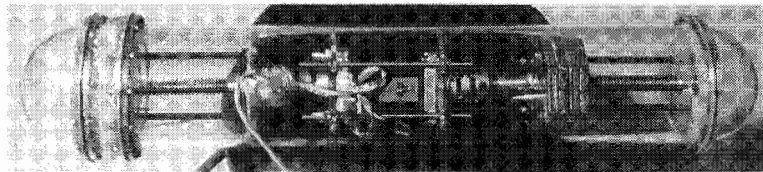


Fig.3 Photo of the new buoyancy control device

3. まとめ

本研究では、グライダー型海洋観測ビークルのための推進機構として、浮力調節装置と重心移動装置の開発を実施した。また、ビークルの自動航行のために圧力センサーと加速度センサーを使用する運動制御系を開発し、水槽試験によってその有効性を確認した。さらに、これらの実験結果をふまえて新浮力調節装置の設計と製作を行った。今後、新装置の有効性を水槽実験により検討して行く予定である。

4. 研究成果報告

グライダー型海洋観測ビークルの運動制御機構の開発に関する研究

日本船舶海洋工学会講演会論文集第 4 号 pp. 517-520 (平成 19 年 5 月)

著者 山口悟、内藤誉、釘宮武志、赤星顕悟、藤本尚孝

グライダー型海洋観測ビークルの実海域における運用計画について

日本船舶海洋工学会講演会論文集第 5W 号 pp. 87-88 (平成 19 年 11 月)

著者 山口悟、内藤誉

1. 緒言

1997年1月に発生したタンカー“ナホトカ”の大規模重油流出事故後も、船舶からの油流出事故は2002年にスペイン沖で座礁・沈没した“プレステージ”、2007年11月に黒海で発生したタンカー“ボルガネフチ”の船体破損事故など、世界各地で発生している。

流出重油が沿岸に漂着した場合の残存性は高く、環境に与える被害及びその被害からの回復には多大な時間と労力を必要とし、地域経済にも大きな被害をもたらす。

浮流重油の沿岸への漂着を防止し、油流出事故による環境被害を最小限に止めるためには、重油を海上で回収すること、数に限りのある流出油回収機材を漂着予測沿岸域へ適切に配置することが重要となる。前者には流出油の正確な現在位置が必要であり、後者には流出油の高精度漂流予測を行うために漂流海域におけるリアルタイムでの気象・海象条件が有益であるが、これらの情報をリアルタイムで供給できる機器は現存しない。

本研究では船舶など事故による油流出直後から重油を自動追従すると同時に、漂流位置及びその周りの気象・海象条件をリアルタイムで基地局へ供給する浮流重油自動追従ブイシステムの開発を目指している (Fig.1)。

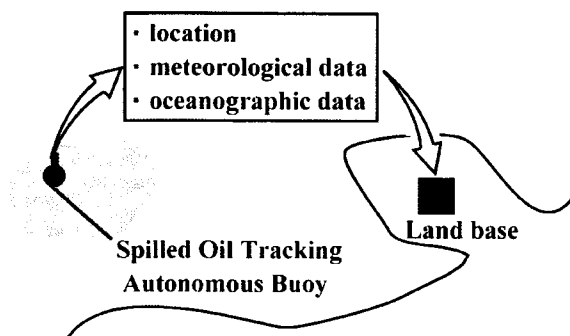


Fig.1 Spilled oil tracking autonomous buoy system

2. 研究方法

浮流重油自動追従ブイは、流出した重油中に船舶などから投入された後、主として重油とともに漂流することを想定している。しかし、海面上にある重油は表層を吹く風に

よる影響を大きく受けるため、ブイとは漂流速度が異なる状況が考えられる。ブイは重油塊から離れたことを上部に取付けられた接触式センサーによって検知する。その後、浮力調整装置を用いて潜航を行う。設定深度に到達後、非接触式センサーによる海面にある重油塊の位置を検知する。そして、検知された重油位置を目指して可動翼をきりながら浮力調整装置による浮上を開始する (Fig.2)。

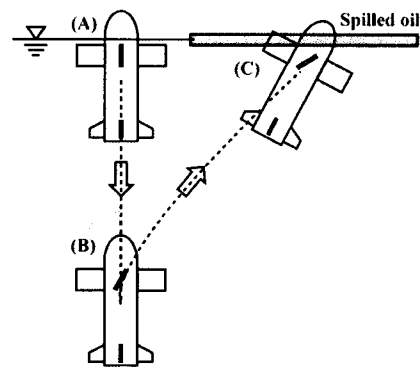


Fig.2 Procedures to track spilled oil

浮流重油自動追従ブイを開発するために、現在までにブイの運動方程式の導出、ブイ模型を用いた性能実験を行った。その後、ブイに搭載される非接触式センサーにより重油位置が検知できたと仮定してブイに目標位置を与え、その目標位置までブイを誘導する制御プログラムを開発した。静水中・波浪中における誘導制御プログラムの検証実験は大阪大学の長水槽、本研究 (浮流重油自動追従ブイシステムの開発) の共同研究機関である(独)港湾空港技術研究所の水中作業環境再現水槽にて確認した。

実海域において常に発生している潮流がブイの運動性能に与える影響を検証するため、平成19年6月18日～22日に九州大学応用力学研究所の深海機器力学実験水槽にて直接型流速発生装置を用いた水流中でのブイの誘導制御実験を行った。水槽内でのブイの位置計測には音響測位装置を用い、ブイ内蔵の計器によって深度や傾斜角を計測した。実験に用いたブイの写真および主要目をそれぞれ Fig.3 と Table1 に、実験概略図を Fig.4 に示す。

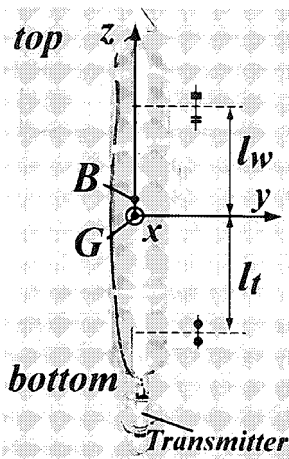
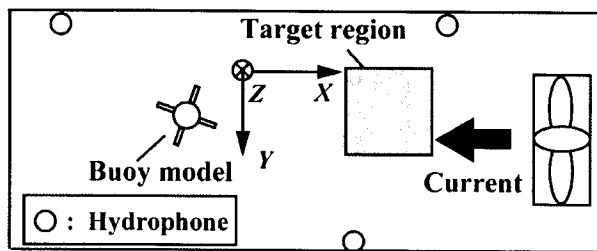


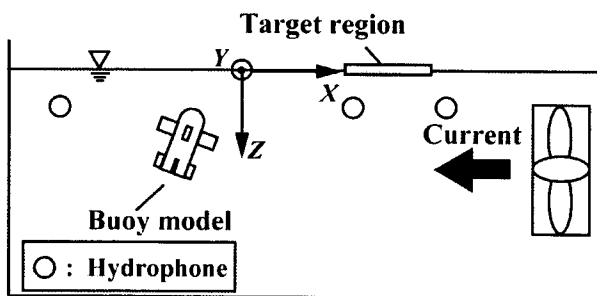
Fig.3 Buoy model

Table1 Principle particulars of the buoy model

Total length (m)		0.9155
Diameter (m)		0.165
Main wings (m)	Chord	0.130
	Span	0.260
	l_w	0.3275
Tail wings (m)	Chord	0.100
	Span	0.200
	l_t	0.355
Weight (kgf)	in air	18.837
	in water	-0.3 ~ 0.3
BG (m)		0.04



Topside view



Side view

Fig.4 Overview of experimental set up

Fig.4 に示すように、非接触式センサーによる重油位置 (X, Y) が検知できたと仮定して、ブイ内蔵の CPU に目標位置 (X, Y) を与え、水流中でのブイの運動性能を検証した。

3. 実験結果及び考察

誘導制御実験結果の一例として、ブイにとって最も追従条件として厳しい上流方向に目標位置がある場合の実験結果を Fig.5 に示す。同図に示す実験ではブイの初期位置を $(X, Y)=(0,0)$ とし、目指すべき目標位置を $(X, Y)=(4,0)$ とした。目標位置は非接触式センサーで検知された重油塊の中心を想定しているため、目標位置を中心とする半径 0.5[m] の円内にブイが到達した時、誘導制御は終了する。今回の実験では、ブイは音響により目標範囲への到達判定を行う。

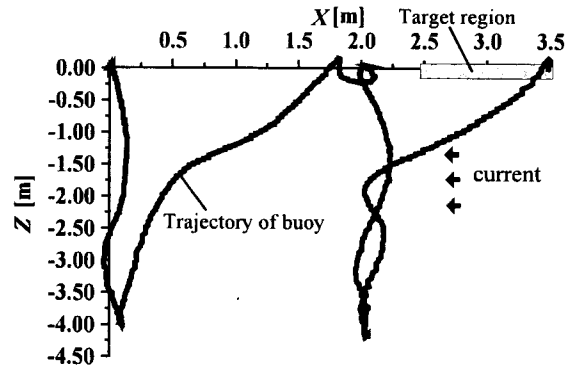


Fig.5 Trajectory of the buoy model (X-Z plane)

直接型流速発生装置により発生させた水流は水深 1.0~3.0[m] の位置では Fig.5 における $+X \rightarrow -X$ 方向に 0.1[m/s] で、その他の水深においては水槽内の水が回流しているため $-X \rightarrow +X$ 方向に流れている。Fig.5 においてブイはこれらの潮流の影響を受けているが、目標範囲に到達している。

今回の実験により、水流がブイの運動に与える影響が大きいことが改めて確認できた。今後の実機ブイを検討する際、ブイが少ない潜航・浮上回数で確実に目標位置に到達するためには、ブイは潮流の影響も含めた自身の水中での移動距離を正確に推定する必要があり、従ってブイ周囲の潮流も推定する必要がある。現在までに開発したブイの運動解析プログラムに、深度で異なる水流の平均値、また Fig.5 で示す実験の水流速度及びその分布を入れてブイの誘導制御をシミュレートした結果を Fig.6 に示す。

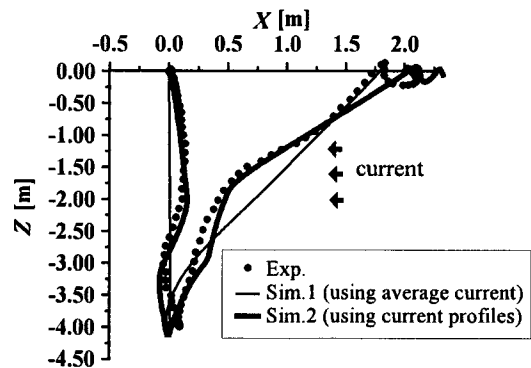


Fig.6 Comparisons of exp. and numerical results

Fig.6 に示されるとおり、水流分布が得られれば、ブイの運動の推定を精度良く行うことが可能である。今後、水流の推定方法について検討していく。

研究組織

加藤直三、千賀英敬、有吉友和、伊東飛鳥、仁王大樹（以上、大阪大学）、中村昌彦（九州大学 応用力学研究所）

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 大学院 理学研究院 西 弘嗣

目的

化石には「動き」の情報は直接的には残らないため、絶滅動物の運動様式や生態は、現生種の動く様子から類推することとなる。しかし、全く独自の形態をした古生物に関しては、現生種を手がかりとすることができない。その一方で、水中生活をする動物の形態は流体のふるまいにより強く制限されることが知られており、動物の形態と動きの関係を流体力学的な問題として解決できると期待される。本研究では、そのように独自の形態をした水棲動物である長頸竜類 plesiosauria について、復元模型 Long-necked and Rigid-bodied Instrument (LoRI) を開発し曳航試験を行うことにより、その運動様式を再現した。

実験方法

長頸竜類の形態を再現した模型を水槽中で曳航し、模型に作用する流体力を計測した。模型の形態は *Hydrotherosaurus alexandrae* の模式標本の数値データ (Welles, 1943) に基づき、縮尺を 1/4 とした。全長 2.1 m、細長比 9.2 の回転体の後部に翼幅 0.8 m、翼型 NACA0012 のテーパー翼を 2 対装備する (図 1)。前後の翼の取付角(迎角)は変更可能である。機体の浮心は前翼の取り付け位置の近傍で、前翼と後翼の取り付け位置の midpoint に防水型 6 分力計を備える。模型を分力計に取り付けられたストラットを介して曳航装置に固定する。この曳航装置側の接合部で、機体の迎角と方位角を変更する。

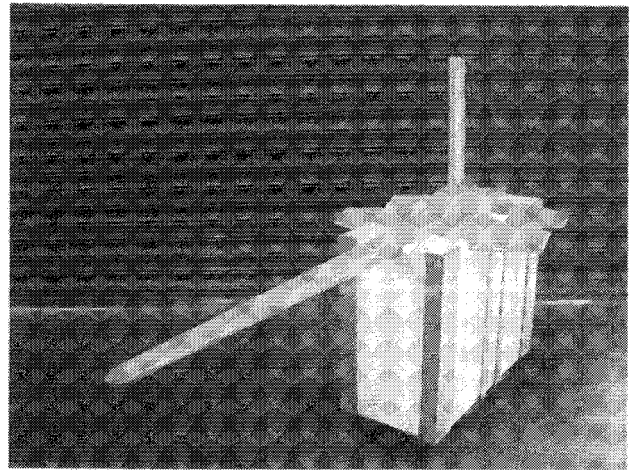


図 1: 左前方から見る LoRI の外観。

水槽は、深海機器力学実験水槽を用いた。模型は、水面下 0.58 m (水温 25 °C) を曳航した。各曳航実験では速度、翼の取付角、頭の向きは変化させず、異なる条件で繰り返した 132 回の実験を総合することで、各パラメータと力-偶力系との関係を求めた。曳航速度は 0.2 から 1.4 m/s で等速度とし、速度方向に対する頭の向きや前翼と後翼の取付角 (迎角) はそれぞれ $\pm 30^\circ$ とし、作用する力の大きさに応じて適宜打ち切った。

実験結果

機体軸および前後の翼の翼弦が速度方向と平行である場合、抗力と、その約 2 倍の大きさの揚力を腹側方向に生じる。前方投影面積による抗力係数は 0.210 である。

前翼あるいは後翼のみの迎角を変化させる場合には揚力が卓越する。無揚力となる迎角は、それぞれ前縁上げ 5° と 4° 程度である。それぞれ前縁上げの場合に背側方向の揚力が生じる。揚力傾斜は後翼を用いるほうが 2 割程度大きい。浮心 (重心近傍) の周りの縦揺れのモーメントは、前翼の前縁を上げる場合には頭を上げる向きに、後翼の前縁を上げる場合には頭を下げる向きに作用する。失速角は前後ともに前縁下げ 12° 、前縁上げ 15° である。失速角付近での揚力の低下は、NACA0012 の二次元翼とは異なり緩やかである。前翼が失速している場合には力やモーメントの振動が顕著となる。前翼と後翼の迎角がともに 0° でない場合の値を含めて重回帰分析を行った結果、前後の翼の迎角の間に交互作用は認められなかった。

機体の迎角のみを変化させる場合、二対の翼も迎角を得るために大きな揚力を生じる。失速角は $\pm 12^\circ$ 、トリム角は頭下げ 1° 程度である。縦揺れのモーメントは、ばらつきが大きいもののゼロに近い値である。このばらつきには再現性があり、大局的には迎角の変化に対し負のフィードバックを生じるが、迎角 0° 付近に不安定的となる小さい領域が存在する。方位角の変化に対しては、横滑りの力と偏揺れのモーメントが正のフィードバックを与えるように作用する。

考察

以下、これまでに LoRI を用いて行った実験の結果と併せて考察する。過去の実験では、厚さが等しく翼弦長が小さい翼の組を用いた。その形状は四肢の骨格の外形を近似したものであり、一方の今回の実験に供した翼は後縁に未発見の軟組織を想定したものである。いずれの実験も、波のない水中をグライディングしている状態に相当する。

機体に迎角を与える場合の縦揺れのモーメントは、前後の翼の迎角をそれぞれ変更する場合の縦揺れのモーメントと、機体に方位角を与える場合の偏揺れのモーメントの足し合わせで十分説明でき、縦揺れモーメントのうちの胴体の寄与分を概算できる。このとき、胴体と前翼は不安定さを増し、後翼は安定化するように作用している。つまり、後翼は前翼だけでなく長大な胴体分まで相殺できるよう、重心から離れた位置にあつて、かつ十分に揚力を得られる薄く大きい翼でなければならない。機体の迎角を変化させる試験は小さい翼を用いては行っていないが、この場合に生み出せる揚力やモーメントがごく小さいこと、前後の翼に生じる縦方向の力や縦揺れのモーメントの傾向が大きく異なることから、大きい翼と同様に静的安定性ないし中立性を維持することは不可能であると考えられる。長頸竜類の中には、名前に反して頸の短いタイプの種がいる。このようなものでは長細い頸の代わりに巨大な頭蓋を備える。この場合にも、頭部を含む体幹で生じる大きなモーメントを相殺するために、巨大な後翼が必要となる。

長頸竜類は常時水中を浮遊していたわけではなく、二対あるうちの一对の翼の羽ばたき運動によって推力を得ていたと考えられている。後翼は受動的に水平安定性を維持する役割を果たすため、積極的に羽ばたいていたとは考えがたく、すなわち、前翼のみを用いて推力を得ていたと考えられる。本実験は羽ばたかない状態のみを再現するにとどまるが、小さい前翼に迎角を与える場合の全機揚抗比は高々 1.3 あり、全身に生じる抗力に反して満足に推進できるだけの揚力を前方に向けて得ることは極めて困難だと考えられる。逆に、大きい翼であれば容易に前進できることになる。

頸が長いタイプの長頸竜類は、その四肢を翼に見立てたときの高アスペクト比からアホウドリなどに対比され、グライディングを主体とするような生態が想定されてきた。しかし、安定してグライディングするためには、後縁を広げアスペクト比を小さくしなくてはならない。また、長い頸は遊泳の妨げとなると考えられてきたが、十分な強度さえ維持できれば大きな流体力を生み出す装置となり、機動性の向上に寄与しうる。

縦方向の安定性は骨を伴う巨大な「水平尾翼」によって維持されるが、横方向の安定性を維持する機構は化石記録に残っていない。しかし、おそらくそれは必要な機構である。たとえば LoRI では翼の後退角を無視しているため、その効果を評価する必要がある。あるいは、やや飛躍気味ではあるが尾に垂直尾翼様の軟組織があつた可能性などもあり、新たな状態の良い化石記録が望まれる。

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)

成果報告

望月 直 (2008MS) 模型実験による長頸竜類の遊泳能力評価, 北海道大学大学院 修士論文

参考文献

Welles, S.P. (1943), *Elasmosaurid plesiosaurs with description of new material from California and Colorado*, University of California Press, CA.

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

最近発表された「国連の気候変動に関する政府間パネル」第4次報告書によると、地球温暖化と共に急激な海洋環境の変化が起こっている。その結果、南方系の魚群が北上、藻場を食い荒らして磯焼けが増大したために、在来種の魚が激減して沿岸漁業の不振が一層大きな問題となっている。こうした背景から詳細な原因を解明するための海洋環境調査に海中ロボットの利用が注目されている。沿岸域における海洋調査には、小型、軽量で、1～2名で調査ができる海中ロボットが期待されている。表層域でのカタクチイワシ調査や表層環境調査から、浅海域の魚種や藻場調査まで柔軟に対応できる「ハイブリッド型海中ロボット」が求められている。特に、いつでも、どこでも汎用的に使用できるように空中重量30kgと軽量なロボットを開発した。表層海調査に特化した、無線のみで操縦ができる無線式海中ロボット（無線ROV: Wireless Remotely Operated Vehicle、以下WROVと略す。）と水深30m程度の浅海域では光ケーブルを用いて操縦する細径ケーブル式海中ロボット（Untethered ROV、以下UROVと略す。）を容易に切替できるハイブリッド型海中ロボットシステムを開発した。それに関連したマイコン制御システム、制御ソフトウェア、操縦者支援ソフト、ロボットデータ通信及びロボット-ブイ間測距システムの開発を行った。性能評価実験を貴学深海機器力学実験水槽及び実海域で行ない、良好な結果が得られたので報告する。

2. ハイブリッド型ロボットのシステム構成

ハイブリッド型海中ロボットとして、無線式WROVと細径ケーブル式UROVをワンタッチで切替できるように工夫した。図1に今年度新規に開発した、小型ROV3号機写真を示す。従来のROV1号機と比べて判るように、直径を330mmから220mmへ、空中重量も75kgから30kgへ減少させた。コンパクト化を図るために、バリバックプロペラを1個搭載した。図2にハイブリッド型ROVでUROVとWROV時のシステム構成図を示す。交換部を入れ替えるだけで用途に応じたROVとして使

用できる。特に、UROVとして使用する場合には、海面上のブイと光ケーブルにより接続し、ブイから支援船か陸上間のデータ伝送は無線を使用した。その結果、沿岸から400m未満ならば、支援船が不要で、ミッションを処理できるようになった。いずれのモードでも直接プロポにより海中ロボットの操縦を行ない、海中ロボットに搭載しているGPS、電子コンパス、ソナー、深度データ等は、ブイを中継して操縦者の手元モニターへ伝送される。図3にデータ伝送システム図を示す。

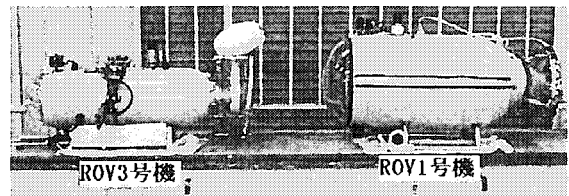


図1 開発した小型ROV3号機

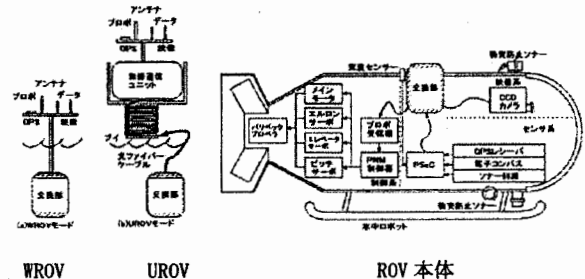


図2 ハイブリッド型ROVシステム構成図

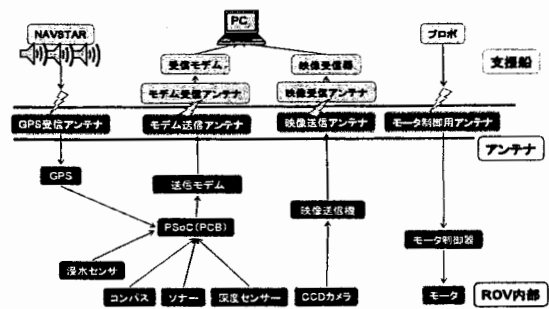


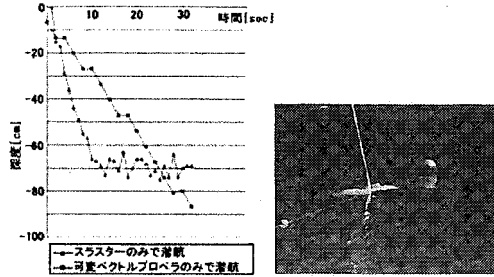
図3 WROVデータ伝送システム図

3. 実験結果及び考察

(1) ROV運動性能実験

ROV3号機をUROV方式で使用する場合は、ブイを海面に浮かべるが、バリバックプロペラを搭載しているた

めに、潜航・浮上時には旋回動作を伴っていた。しかし、光ケーブルを捻ることや、潜航・浮上速度が遅いため、その改善策として、小型 21W スラスタを海中ロボット側面に 2 個取付けた。その特性実験を、小倉南区お糸池における絶滅危惧種・沈水植物の「ガシヤモク」調査時に行ったのを図 4 に示す。バリベッ



潜航特性図

お糸池調査

図 4 お糸池における潜航特性

クプロペラのみ場合よりもスラスタを用いた方が約 3 倍速くなることを確認した。その時操縦者支援モニタで受信したデータ伝送結果を図 5 に示す。池の縁を正確に航行したことを示している。伝送データのエラーもなく正常なデータ通信を行った。

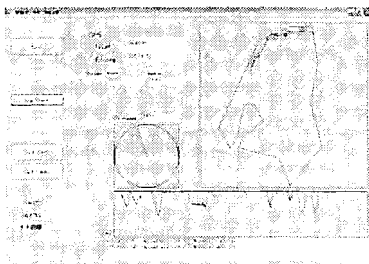


図 5 操縦者支援モニタ上の GPS による ROV 軌跡

(2) ROV コントローラの開発

WROV 及び UROV ではデータフォーマットや取込みタイミングの異なる複数のセンサデータを操縦者の手元でグラフィカルに表示する必要がある。PSoC マイコンボードを新規に設計・製作した。図 6 に開発した基板を示す。コンパクトで信頼性の高いデータを統合、送受信する機能を有している(図 5)。

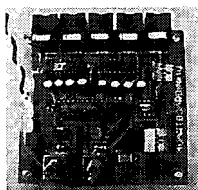


図 6 開発した PSoC コントローラ

(3) 海中ロボット用簡易測距装置

支援船やブイと海中ロボットを光ケーブルで繋い

でミッションを行う場合、現在位置、方位、距離が判らなければ意味がない。本年度は、PLD (Programmable Logic Device) を用いて、超小型測距システムを設計製作し、評価実験を行った。約 6 m の距離に対して 7 cm 程度の誤差であり、高精度で有ることを示した。開発した PLD 回路及び計測結果を図 7 に示す。

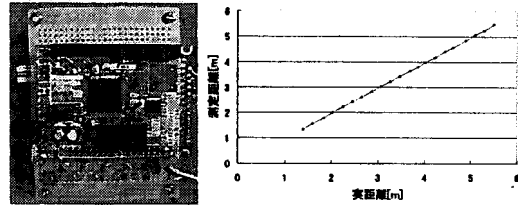


図 7 測距基板及び計測結果

4. 結論

表層域用と浅海域用を融合した小型、軽量「ハイブリッド型海中ロボット」を新規に開発した。今後の課題としては、ハイブリッド型 ROV と自律型 AUV との統合をめざして改善を行うことである。

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の小寺山亘教授及び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職員にお世話になりました深く深く感謝いたします。

5. 研究成果報告

・Kosei Shimoo, Takakazu Ishimatsu, Satoru Kishima, Nobuyoshi Taguchi, Yutaka Nagashima: Development of a compact untethered remotely operated vehicle, Proceedings of The 2007 International Conference on Mechatronics and Information Technology, pp46-51, 2007.12

・長嶋豊、真部広紀、志久修、下尾浩正、田口喜祥: 浅海域用コンパクトなハイブリッド型海中ロボットの開発、佐世保工業高等専門学校研究報告第 44 号、PP35-42、2007.12

・長嶋豊、下尾浩正、杵嶋暁、田口喜祥、石松隆和: コンパクトなハイブリッド型海中ロボットの開発、第26回計測自動制御学会九州支部学術講演会、PP.65-66 2007.12

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, 佐世保高専助手
- ・所内世話人: 中村昌彦, 九州大学応力研准教授
- ・研究協力者: 小寺山亘, 九州大学応力研教授

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
 先端技術研究開発プログラム
 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広範囲に運用するにはエネルギー効率のよい航走が可能である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。

数式モデル導出とシステム同定：

$$M\dot{v} = \tau$$

$$M = \begin{bmatrix} m + A_{11} & 0 & 0 & 0 & mz_G & 0 \\ 0 & m + A_{22} & 0 & -mz_G & 0 & mx_G \\ 0 & 0 & m + A_{33} & 0 & -mx_G & 0 \\ 0 & -mz_G & 0 & I_{xx} + A_{44} & 0 & 0 \\ mz_G & 0 & -mx_G & 0 & I_{yy} + A_{55} & 0 \\ 0 & mx_G & 0 & 0 & 0 & I_{zz} + A_{66} \end{bmatrix}$$

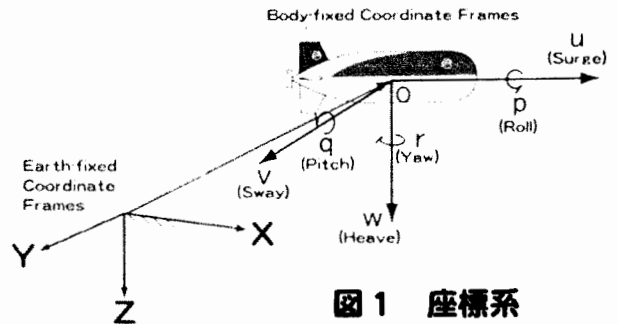


図1 座標系

$$F_x = -(m + A_{33})qw + (m + A_{22})rv + mx_Gq^2 + mx_Gr^2 - mz_Gpr - (m - \rho\nabla)g\sin\theta - R + X_{vv}v^2 + X_{ww}w^2 - L_{hr}\delta_H - L_{hl}\delta_H - L_{vu}\delta_V - L_{vl}\delta_V + \rho n_{MT}^2 D^4 K_T$$

$$F_z = (m + A_{11})uq - (m + A_{22})vp - mx_Gpr + mz_Gp^2 + mz_Gq^2 + (m - \rho\nabla)g\cos\phi\cos\theta + Z_w w + Z_q q + Z_{ww}w|w| + Z_{qq}q|q| + Z_{wq}w|q| - L_{hr}\delta_H - L_{hl}\delta_H$$

$$M_y = ((I_{zz} + A_{66}) - (I_{xx} + A_{44}))rp + mx_Gpv - mx_Gqu - mz_Gqw + mz_Grv - (mx_G - \rho\nabla x_B)g\cos\phi\cos\theta - (mz_G - \rho\nabla z_B)g\sin\theta + M_w w + M_q q + M_{ww}w|w| + M_{qq}q|q| + M_{wq}w|q| - L_{hr}\delta_H x_{Rhr} - L_{hl}\delta_H x_{Rhl}$$

図1に示す座標系により導出した数式モデルに対して、水槽および実海域実験により得られた実データを用いてシステム同定を行った結果、図2、3に示すように実データに近い計算結果が得られるようになった。図中、青線が実験値、赤点線がシステム同定前の計算結果、緑点線がシステム同定後の計算結果を表している。なお、ビークルの運動特性試験において、試験項目は九州大学応用力学研究所の中村准教授とともに策定した。また、実海域試験は共同研究者の月岡SLらおよび中村准教授と供に実施した。

実運動を表す数式モデルを構築することでモデルに基づく高度な制御系を設計することができるようになる。

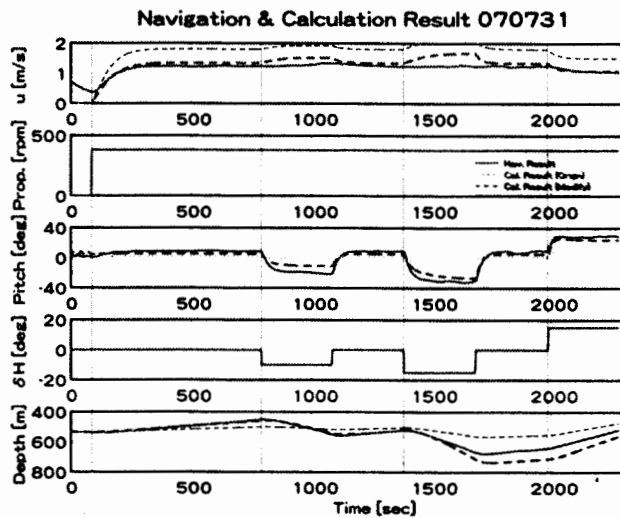


図2鉛直方向運動

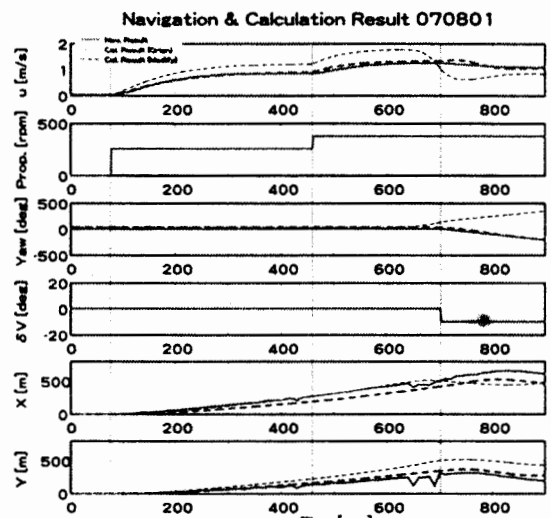


図3水平方向運動

成果報告：

1. The 18th International Offshore (Ocean) and Polar Engineering Conference 投稿中
タイトル：Maneuverability Experiment of AUV
2. 日本船舶海洋工学会平成20年春季講演会 投稿中
タイトル：数式モデル構築のための自律型無人潜水機の実運動特性試験

船舶観測による対馬海峡東水道を通過する物質量の推定

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

膨大な熱や物質が対馬暖流により東シナ海から日本海へ水平輸送されている。東シナ海の海洋環境は三峽ダム建設や南水北調により大きく変化しつつあり、その変化に伴い東シナ海から日本海への物質輸送量も変化すると予想される。数値モデルや物質収支モデルにより、対馬海峡から流入する栄養塩の量が日本海表層の栄養塩環境に大きく影響を与えることが示唆されている。しかしながら、対馬海峡を通過しどれだけの物質が流入しているのか、またその季節・経年変化はどのようなものかなど不明な点が多く、今後の低次生態系を含めた日本海の海洋環境の変化を知るためには日本海の入り口である対馬海峡を通過するエネルギーおよび物質量を実測する必要がある。本研究では、対馬海峡東水道を横断する測線上において、船舶観測により流速、水温、塩分、栄養塩濃度、生物量を観測し、海峡を通過する物質量を推定することを目的とする。なお、本研究グループは2005年より対馬海峡を通過する物質量に関する観測的研究を継続している。本観測を継続することにより物質輸送量の季節・経年変化を明らかにすることも目的としている。

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	(水産大学校 水産情報経営学科)
渡邊 敦	(名古屋大学 地球水循環研究センター)
柰 雅利	(水産大学校 海洋生産管理学科)
柳 哲雄	(九州大学 応用力学研究所)

3. 研究成果の概要

3-1. 海洋観測とデータ処理

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海洋モデリング分野が長期にわたり対馬暖流の流量をモニターしている日韓往復フェリーカメラの航路上に8つの観測点を設け8, 9, 10, 11月の計4回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、PARを、FRRF（高速励起蛍光光度計）により基礎生産速度と植物プランクトンの生理パラメーターを、ポンゴネットとニューストーンネットにより仔稚魚のサンプリングを行った。また、標準層において採水を行いクロロフィル a、栄養塩、炭酸系、溶存酸素の分析を行った。さらに、航行中に多層流速と表層水（水面下5m）の水温、塩分、蛍光強度、二酸化炭素分圧（ $p\text{CO}_2$ ）の連続測定を行った。

CTDにより測定された塩分と溶存酸素量は採水サンプルから得られた値によりキャリブレーションを行った。また、CTDにより測定された蛍光強度と海水サンプルを分析し得られたクロロフィル a 濃度を線形回帰し、蛍光強度からクロロフィル濃度への変換式を各航海ごとに計算した。ADCPにより測定された流速データは、Takikawa *et al.* (2003)の潮流調和定数を使い潮流成分を除去した。

3-2. 対馬海峡東水道を通過する物質輸送量と二酸化炭素分圧の分布

図1に2007年8, 9, 10月の対馬海峡東水道を通過する流量、淡水輸送量、DIN輸送量を示す。流量は8月に最も多く9, 10月と少なくなっている。2005, 2006年の平均流量1.0 SvおよびTakikawa *et al.* (2005)に比べると2007年の流量は小さな値となっている。淡水流量は8, 9月とほぼ同じであり10月に非常に少なくなっている。季節変化の傾向は過去2年と同じであるが、過去2年の夏季の平均淡水輸送量が約 40×10^6 kg/sであることを考えると、2007年度の輸送量は極めて少ないことがわかる。事実、2005年と2007年の8月の表層塩分を比べると2007年の塩分は2005年より1.5 psu以上高く、長江を起源とする低塩分水の対馬海峡への流入が少なかったことがわかる。DIN輸送量は9月が少なく、8, 10月がほぼ同じ値となっている。しかし、その値は過去2年の平均値3.6 kmol/sに比べてかなり少ない。これは、夏季から秋季に水道底層に現れる高栄養塩の低温高塩分水の層厚が薄かったためである。水道内の塩分が高い2007年にDIN輸送量が減少していることから、水道内の密度の経年変化がDIN輸送量の経年変化、つまり底層の低温高塩分水の流入量に関係している可能性が示唆された。

図2に8, 9, 11月の海表面の二酸化炭素分圧の分布を示す。各月とも対馬海峡の pCO_2 は大気(380 ppm)よりも低く二酸化炭素の吸収域となっていることが分かる。 pCO_2 の低い海域は海面塩分分布と大凡一致しており、夏季の低塩分水の広がり対馬海峡の pCO_2 に大きな影響を与えていることが分かる。水道内の塩分が高かった2007年の pCO_2 は過去2年に比べ高い値となっていた。

本研究の結果から、東シナ海からの淡水輸送量の減少は、生物生産に直接関係する栄養塩の輸送量と二酸化炭素吸収量を減少させることが明らかとなった。今後も観測を継続すると共に、栄養塩輸送量の変化が日本海の低次生態系にどのように影響を与えるのか明らかにしていく必要がある。

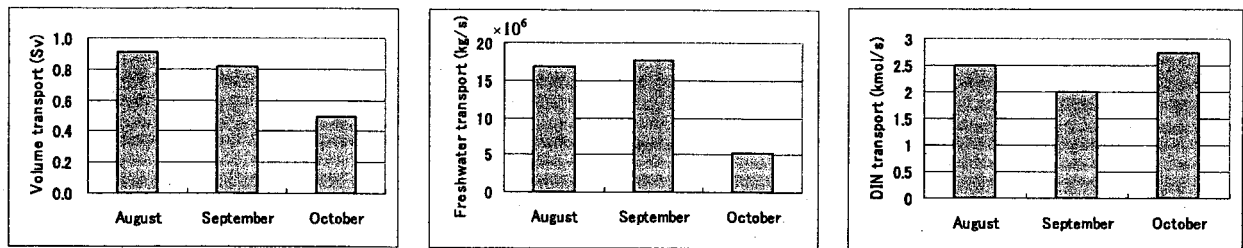


図1 対馬海峡東水道を通過する2007年8, 9, 10月の(a)流量、(b)淡水輸送量、(c)DIN輸送量。

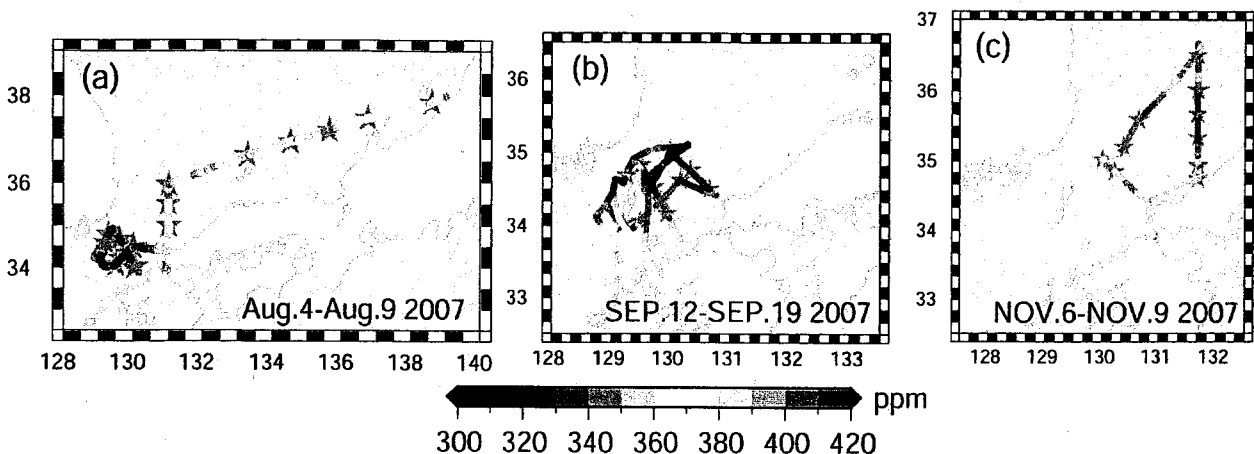


図2 海表面の pCO_2 分布(a)8月4~9日、(b)9月12~19日、(c)11月6~9日。図中のトーンは、白色が大気の pCO_2 を表しており、寒色の範囲では海洋の pCO_2 が大気よりも低いことを示している。

マニラ湾の物質循環と基礎生産に関する研究

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

近年、マニラ湾では赤潮が頻繁に発生している。その原因を解明するためには、まずマニラ湾の物質循環を明らかにする必要がある。これまでに、マニラ湾の一次生産の制限元素である窒素について、雨期と乾期の循環機構の違いを数値生態系モデルにより解析した。また、陸上からの窒素負荷を減らした場合に、マニラ湾の物質循環構造がどの様に変化するかにについて検討した。今年度は、3年間各月のデータを元に、より詳細な物質循環機構を明らかにする。

2. 方法

マニラ湾の地形図を図1に示す。解析には、水温、塩分、クロロフィル濃度、栄養塩などについて、図1の各観測点で1996年3月から1998年12月まで毎月1回観測されたデータを用いた。このデータから、解析対象海域をPasig River河口の水深10mまでの表層とした。Pasig Riverはマニラ市街を通り、河口付近は富栄養化が著しい海域である。またこの海域は、雨期に河川から淡水が流入して成層が強くなり、日射が強い乾期の方が混合層深度は深く約10mである。これらのことから、図1の境界線内の水深10mまでを1つのボックスとして、その月平均場を解析した。

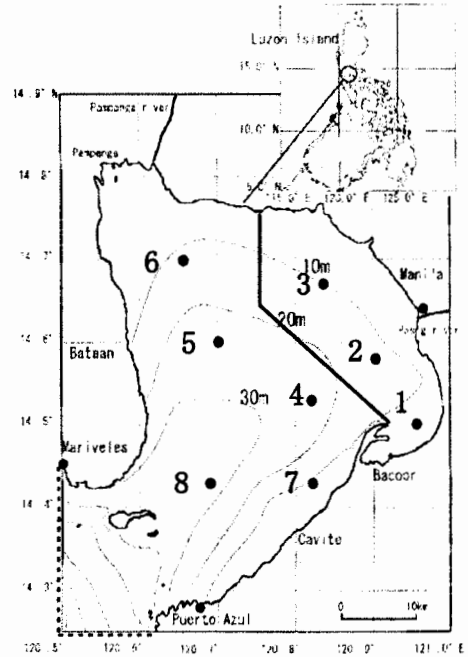


図1 観測解析海域

数値生態系モデルのコンパートメント、及びボックス内での生化学過程や境界条件は図2に示す通りである。各コンパートメントの濃度を定式化し、3年間の月変動を再現する定常計算を行った。水平・鉛直拡散係数(K_h , K_v)及び水平移流流速(U)は、Fujiie *et al.* (2002)が示した雨期と乾期の値から、Pasig Riverの河川流量により月変動を与えた。鉛直移流流速(W)は、流量保存から逆算した。河川からの溶存態窒素(DIN)負荷量は、年間の負荷量($900 \times 10^6 \text{ moles y}^{-1}$)と毎月の河川流量から見積もり、これに陸域からの直接負荷量($600 \times 10^6 \text{ moles y}^{-1}$)を加えた。植物プランクトンとデトリタスの沈降速度は、ボックス全窒素濃度の保存から見積もった。計算に使ったパラメータは表1の通りである。

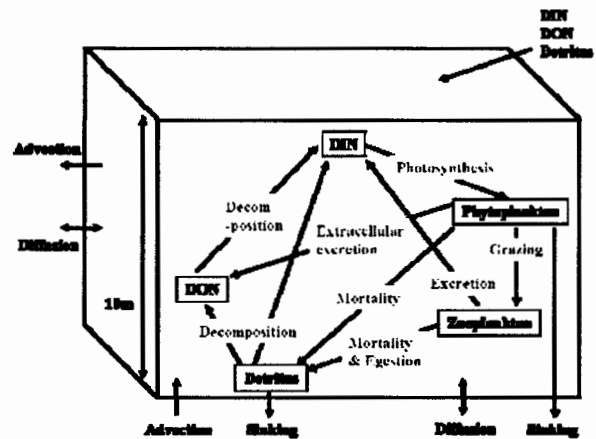


図2 数値生態系モデル

3. 結果

図3に、chl.a濃度(a)とDIN濃度(b)の計算結果を観測結果と共に示す。計算結果は観測値を概ね再現していた。光合成の制限要因であるDIN濃度、光量及び水温について、どの要因がどの程度影響を持っているかを、3年間で各月毎に平均して示した図を図4に示す。光合成は、日射量が高い3~6月に強光阻害によって制限され、雨期の終盤以降の10~11月は低水温に制限される。chl.a濃度が平均的に高い7~11月は全ての要因がほぼ同等であり、光合成はほとんど制限を受けていない。この様に、植物プランクトンの増殖が制限されるのは物理的要因によるところが大きいが、最も赤潮が発生しやすい環境においては物理的な制限がなくなることから、富栄養化に伴って赤潮の発生が危惧される。図5は、

DIN の供給量を、供給源毎に 3 年間で各月毎に平均した図である。chl.a 濃度が平均的に高い 7~11 月を中心とする雨期は、河川流量の増加に伴う河口循環流の強化により、下層からの DIN 供給が大きい。

そこで、上記の計算結果(case-1)に加え、陸からの DIN 負荷をゼロにした場合(case-2)と下層の DIN 濃度を 1/10 にした場合(case-3)を計算し、その比較を図 6 に示す。陸域からの負荷をゼロにしても、chl.a 濃度は 94%、DIN 濃度は 73%しか低下しないが、下層の DIN 濃度を 10%に低減すると、chl.a 濃度は 22%、DIN 濃度は 38%まで低下する。このことから、表層の植物プランクトンの増殖には下層の栄養塩が影響しており、では下層の栄養塩がどこから供給されているのかを明らかにすることが次の課題である。

表 1 数値生態系モデルのパラメータ

Parameters	Value	unit
Maximum specific nutrients uptake rate by diatom	2.0	day ⁻¹
Half saturation constant of nitrogen to diatom	0.3	μM
Optimum water temperature	31.0	°C
Optimum photon	110	Em ² s ⁻¹
Ratio of extra cellular excretion of DON and DOP by photosynthesis	0.135	g m ⁻² s ⁻¹
Mortality speed of phytoplankton at 0 deg-C	14.5	m ³ gP ⁻¹ day ⁻¹
Temperature dependency of mortality of phytoplankton	0.069	°C ⁻¹
Threshold of phytoplankton density for grazing	0.1	mg chl.a ⁻¹
Ivlev constant	0.47	(μg chl.a ⁻¹) ⁻¹
Grazing speed of phytoplankton by zooplankton at 0 deg-C	0.2	day ⁻¹
Temperature dependency of grazing by zooplankton	0.069	°C ⁻¹
Constant for urine generation	0.4	
Constant for fecal pellet generation	0.3	
Mortality speed of zooplankton at 0 deg-C	30.0	m ³ gP ⁻¹ day ⁻¹
Temperature dependency of mortality of zooplankton	0.069	°C ⁻¹
Decomposition speed of detritus to Dissolved Inorganic Matter at 0 deg-C	0.0100	day ⁻¹
Decomposition speed of detritus to Dissolved Organic Matter at 0 deg-C	0.0075	day ⁻¹
Decomposition speed of DOM to DIM at 0 deg-C	0.0150	day ⁻¹
Temperature dependency of decomposition of detritus to DIM	0.069	°C ⁻¹
Temperature dependency of decomposition of detritus to DOM	0.069	°C ⁻¹
Temperature dependency of decomposition of DOM to DIM	0.069	°C ⁻¹

4. 研究成果報告

M. Hayashi, T. YANAGI and M. L. San Diego - Mcglone : Seasonal Variation of Nitrogen Cycling in Manila Bay. ISOPE-2008 (査読中)

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

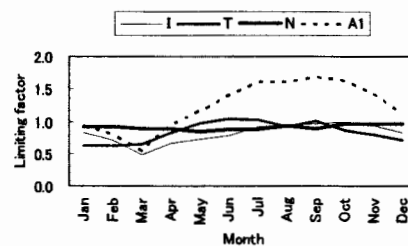
担当：生態系モデル解析

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



図

図 4 光合成の制限度合い

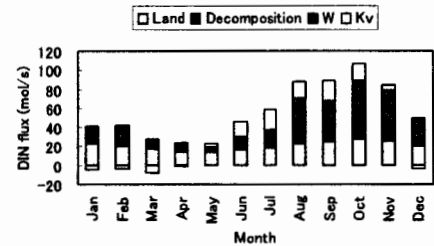


図 5 DIN 供給量

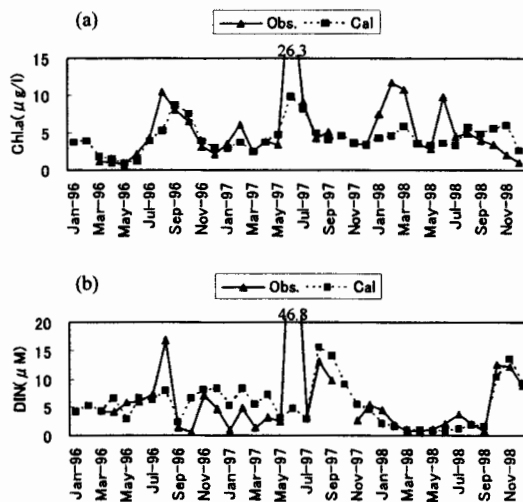


図 3 計算結果と観測値の比較

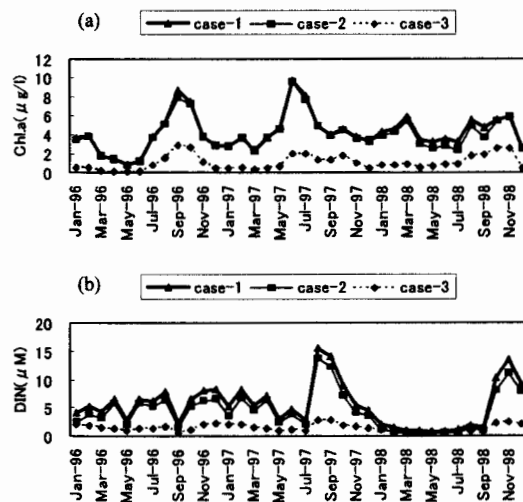


図 6 DIN 供給量を変化させた場合の結果

風洞実験による弱回転サッカーボールなど飛翔軌道解析について

福岡工業大学 工学部 溝田 武人

1. 緒言

サッカーの試合で放たれるシュートには主に2種類の変化するボールがある。ボールに強烈な回転をかけてボール飛翔軌道に変化をさせるバナーシュートと、それに対してほぼ無回転で飛翔し、ランダムな軌道変化を起こすシュートである。後者は無回転シュート、ブレ球と呼ばれ注目を集めているシュートである。その変化の原因はボールがほぼ無回転で飛翔することにより、ボール後流のゆらぎによる反力が発生し、変化すると考えられている。しかし、これについての流体力学的なメカニズムはわかっていない。

そこで本研究では大型風洞を使ってサッカーボールの空気力を測定し、高速度カメラによる流れの観察を行った結果から無回転シュートのメカニズムを検証する。

2. 使用記号と実験装置

2.1 使用記号

$C_D (=2D/\rho U^2 A)$: 抗力係数
 $C_L (=2L/\rho U^2 A)$: 揚力係数
 $C_S (=2S/\rho U^2 A)$: 横力係数
 $Re (=Ud/\nu)$: レイノルズ数
 $U=5\sim 30[m/s]$ の範囲で測定した。

D : 抗力[N], L : 揚力[N], S : 横力[N],
 ρ : 空気密度 [kg/m^3], U : 流速 [m/s],
 A : 直径断面積 [m^2],
 d : サッカーボール直径 [m]

2.2 大型風洞

九州大学応用力学研究所の風洞装置（大気動態シュミレーション装置）を使って風洞実験を行った。風洞測定部の寸法は、高さ×幅×長さ=2×3.6×15[m]である。

2.3 空気力測定装置

実験装置の全体をPhoto.1に示す。三分力ロードセルを使い、揚力、横力、抗力を測定する。ボール支持の固有振動数は19[Hz]であった。

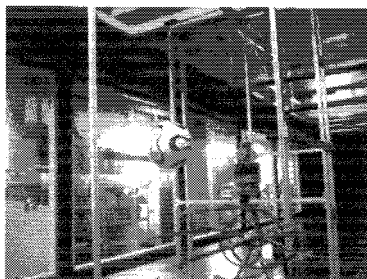


Photo.1 実験装置全体

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されることが少なくなるようにサッカーボールとロードセルの間を約800[mm]のφ8[mm]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。

2.4 可視化実験装置

タフト法を用いた可視化部分をPhoto.2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空気の流れを可視化する。

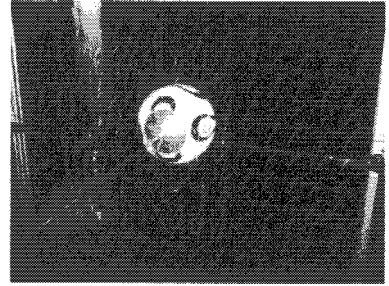


Photo.2 可視化部分

ボールの左後方から高速度カメラで空気の流の様子を250[f/s]で撮影した。可視化の流速範囲は $U=11[m/s]\sim 30[m/s]$ とした。

3. 実験結果

3.1 揚力と横力の空気力

Fig.1, Fig.2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。ボール後方から見た力の方向を図中に示す。

C_L 、 C_S ともに±0.05程度の変動空気力が確認された。また、去年の研究¹⁾よりサッカーボールの揺れる周波数は1.0~1.3[Hz]と分かっており今回の実験でも同様の結果が得られた。

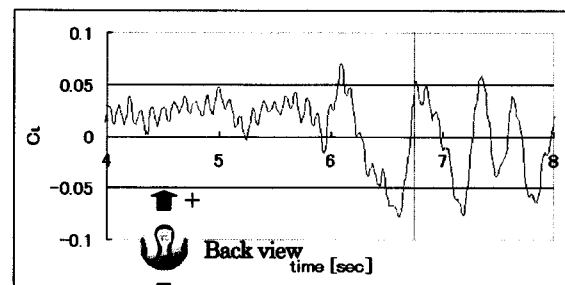


Fig.1 揚力の時間変化 $U=22[m/s]$

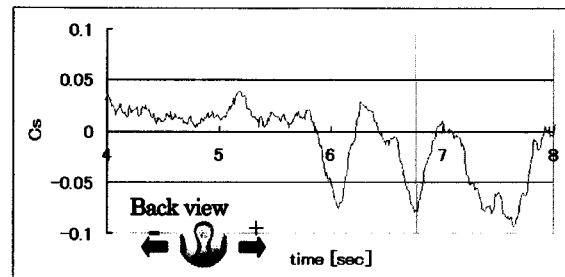


Fig.2 横力の時間変化 $U=22[m/s]$

3.2 変位解析

Fig. 1, Fig. 2 の 6~8 [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. 3 示す。Start (黒丸印大: 原点) からシュートが放たれたとすると、わずか 2 秒の間にキッカーから見て右側に約 1.0 [m] 曲がり、左側に約 0.3 [m] 戻ってきている。ただし重力は計算に含まれていない。

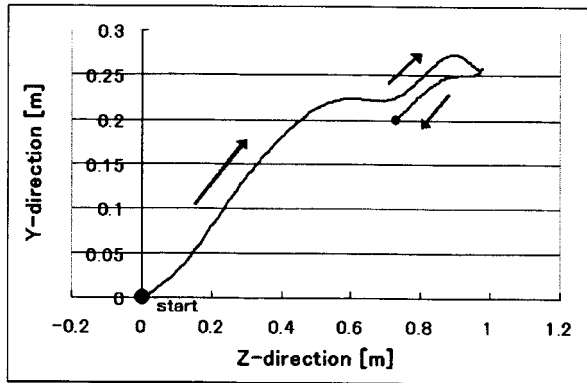


Fig. 3 Z-Y direction movements from kicker's view
U=22 [m/s] t=6~8[sec]

3.3 可視化実験

高速度カメラ画像の内、Fig. 1, Fig. 2 の縦線の前後 6.75~6.85 [s] 間の 30 フレームを重ね描きした画像を Photo. 3 に示す。渦はサッカーボールの右下方向に発生し、 C_L と C_S 合力 F は、画像左上に示した様に左上方へ作用している。

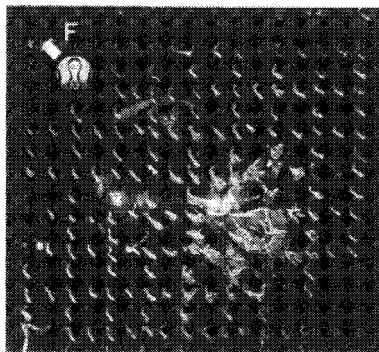


Photo. 3 30 フレーム分の重ね描き

4. 考察

4.1 揺れの原因

滑面球では、 $Re=3.8 \times 10^5$ 以上になると、超臨界レイノルズ数領域に達し、Fig. 4 のような馬蹄形と 2 本の縦渦が発生する。これらの渦が球中心軸周りにランダムに位相変化することが指摘されている²⁾。高速度カメラ映像のスロー再生でも十分に確認された。渦による力の反作用でボールがゆれると考えられている。これは自己励起型バフェティング現象である。

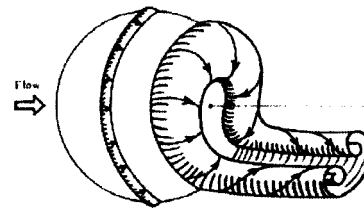


Fig. 4 Flow around sphere of $Re=3.8 \times 10^5$ ²⁾

4.2 渦の発生

Fig. 5 にレイノルズ数と抗力係数の関係を示す。実際の試合で放たれる無回転シュートは、20 [m/s] 付近であり、グラフ中の縦線はその前後 2 [m/s] をとって 18~22 [m/s] の範囲を示している。

Fig. 5 より、サッカーボールで亜臨界領域から超臨界領域へと遷移している様子が文献³⁾と同様に確認された。また、縦線で示した範囲では、十分に超臨界領域に達しており、ミドルシュート時のサッカーボール背面にも滑面球と同様に馬蹄形渦と 2 本の縦渦が発生していると思われる。

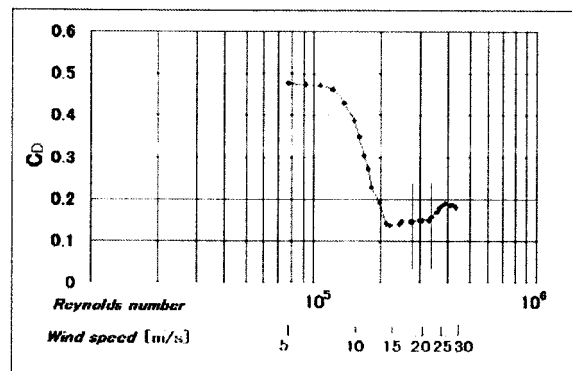


Fig. 5 レイノルズ数と抗力係数の関係

5. 結言

- 1) 大型風洞による空気力測定により、揚力係数、横力係数の振幅は約 0.05 程度であることが確認された。これにより無回転シュートの変位を定量的に説明できた。
- 2) 可視化実験により、2 本の縦渦の回転運動と中心軸周りのランダムな位相変化が観察された。渦の方向と作用力の方向の対応が分かった。
- 3) ボールがゆれる原因は、渦のランダムな位相変化による自己励起型バフェティング現象である。

参考文献

- 1) 山本 和幸 2006 年度 福岡工業大学 工学研究科 知能機械専攻 修士研究論文:「サッカーボールに加わる非定常空気力の検討と測定装置開発」
- 2) S. Taneda: Visual observations of the flow past a sphere at Reynolds numbers between 10^4 and 10^6 , J. Fluid Mech., Vol. 85, pp.187-192, 1976
- 3) 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 流体工学部門講演会論文集 (2005.10.29-30, 金沢)

対馬海峡東水道の低気圧性渦がクロロフィル a 濃度変動に与える影響

独立行政法人 水産大学校 水産情報経営学科 鬼塚 剛

1. 目的

対馬海峡は、九州と韓国を結ぶ幅約 200 km, 平均水深約 100 m の狭く浅い海峡であり、対馬暖流の日本海への流入口として、古くから精力的に海洋観測が行われてきた。九州大学応用力学研究所では、博多-釜山間の往復旅客船や HF レーダーによって、対馬海峡における対馬暖流の詳細な流動構造を継続して観測している。それらの観測結果から、対馬暖流の平均流量や対馬周辺の表層流速ベクトルの空間分布が明らかになりつつある。このように流動構造に関しては研究が進んでいるが、生物・化学的なデータが不足しているため、生物生産過程に関する研究はこれまでほとんど行われていない。2004-2006 年に独立行政法人水産大学校練習船によって行われた調査で、対馬海峡では日本海と同じく春と秋の年 2 回植物プランクトンブルームが起こっていること、対馬島陰に発生する低気圧性渦がクロロフィル a 濃度に影響を与えていることが明らかになった。本稿では、2007 年 11 月に行われた観測で明らかになった対馬海峡東水道における低気圧性渦とクロロフィル a 濃度の関係について報告する。

2. データ

本研究では、2007 年 11 月に独立行政法人水産大学校練習船天鷹丸で実施された CTD 観測によって得られた水温、塩分、クロロフィル a を用いた。CTD 観測点を図 1 に示す。

3. 結果と考察

海面力学高度偏差は CD04 付近で最も小さい値を示し、地衡流は CD04 付近を中心として反時計回りの循環をしている(図 2)。また、CD ラインの断面図では、CD04 において低温・高塩分の底層水塊がドーム状に盛り上がり、躍層が浅くなっている(図 3)。以上の観測結果は CD04 付近を中心とする低気圧性渦の存在を示唆している。この渦の中心では表層から密度躍層の存在する 40 m 深付近にかけてクロロフィル a 濃度が高かった(図 3)。ここでは示さないが、水温-塩分相関図より、この低気圧性渦は 2 日前に CL05 に中心があったと推定され、両地点の距離から移動速度は約 10 km day^{-1} と見積もられた。図 3 によると対馬島陰にあたる CD01a にも、CD04 と同様に、底層水塊のドーム状構造がみられ、次の渦の発生が示唆された。この CD01a 付近は吉川・中園(2007)が指摘した渦発生海域とほぼ一致している。ただし、CD01a でクロロフィル a 濃度の増加はみられなかった。

渦中心でクロロフィル a 濃度が高くなるのは、表層混合層の浅化による光環境の好転の結果と考えられる(鬼塚ら, 2007)。対馬島陰で渦が発生した後、渦の発達とともにクロロフィル a 濃度が増加するとみられるが、今回 CD01a で観測された渦中心付近でクロロフィル a 濃度は高くなく、濃度が増加する前の状態だった可能性がある。CD04 で観測された低気圧性渦が CD01a で発生し、 10 km day^{-1} の移動速度だったと仮定すると、CD04 で観測された低気圧性渦の発生は約 5 日前となる。この 5 日間で植物プランクトンが増加したと仮定し、その間の増殖速度について検討する。光合成による増殖や動物プランクトンによる摂食の影響を含んだ植物プランクトンの見かけの比増殖速度 μ' は次式で表される。

$$\mu' = \ln(N_2/N_1)/(t_2-t_1)$$

ここで、 N_1 , N_2 は時刻 t_1 , t_2 のときのクロロフィル a 濃度である。図 3 より、 $N_1 = 0.5 \text{ mg m}^{-3}$, $N_2 = 1.5 \text{ mg m}^{-3}$,

$t_2 - t_1 = 5 \text{ day}$ とすると、 $\mu' = 0.22 \text{ day}^{-1}$ となる。この値は既往の研究と比較しても十分にあり得る範囲に収まっている。このことから、CD04 で観測されたクロロフィル a 高濃度は、低気圧性渦の発達に伴う表層混合層の浅化によって引き起こされたと推測される。

4. 今後の課題

HF レーダーや人工衛星のデータ、数値モデルを用いて渦の時空間変動とそれに伴うクロロフィル a 濃度変動について定量的に明らかにすることが今後の課題である。本研究では、クロロフィル a 濃度に加えて、栄養塩や動物プランクトン湿重量、仔稚魚のサンプリングも行っている。それらのデータを含めて解析することで、対馬海峡東水道に発生する低気圧性渦が当該海域の海洋生態系に及ぼす影響を明らかにしたい。

5. 研究組織

鬼塚 剛 水産大学校 助教 研究代表者：対馬海峡観測，クロロフィル分析
 柳 哲雄 九州大学応力研 教授 所内世話人：データ解析
 吉川 裕 九州大学応力研 准教授 研究協力者：データ解析

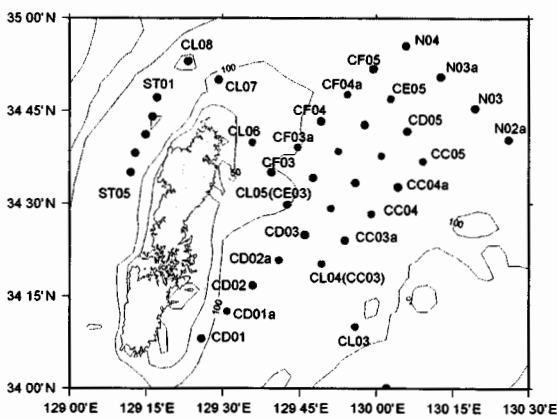


図1 CTD 観測点

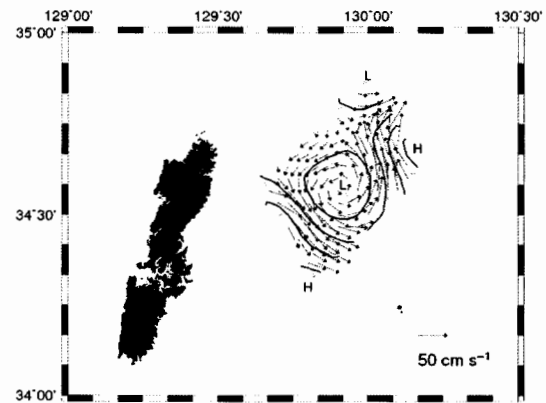


図2 95 dbar を基準とした海面力学高度偏差と地衡流ベクトル

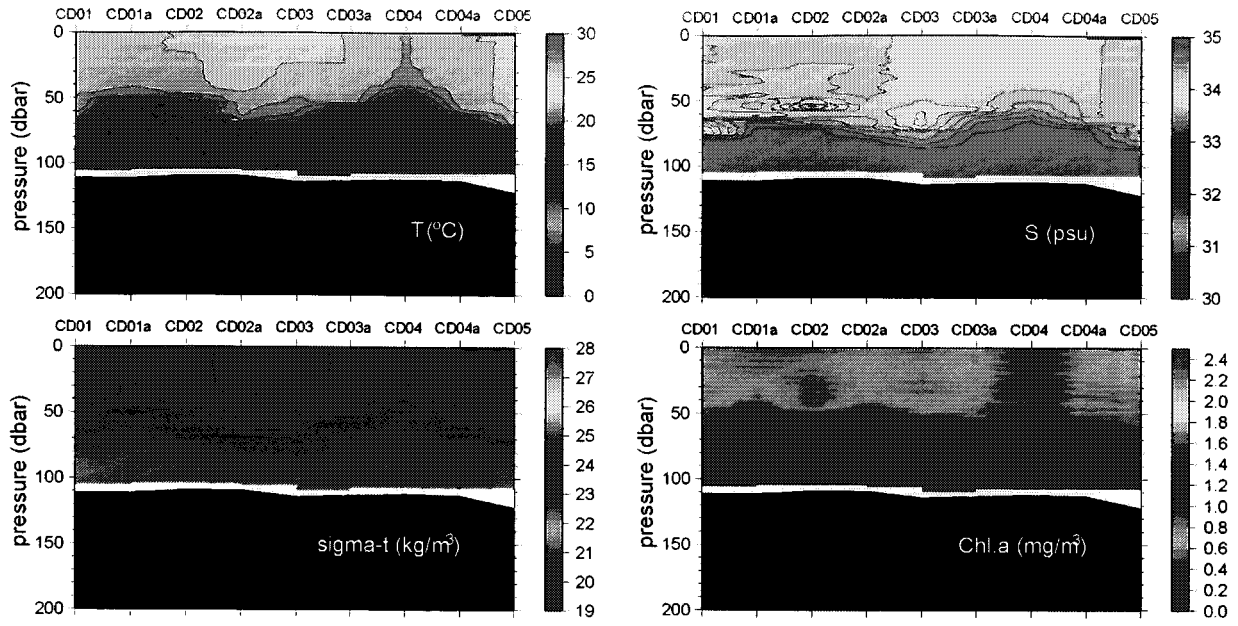


図3 2007年11月のCDラインにおける水温、塩分、密度、クロロフィルa濃度の鉛直断面図

対馬海峡東水道における水塊変動モニタリング

福岡県水産海洋技術センター 松井繁明

1. 目的

近年、東シナ海での海洋環境の変化が、日本海的环境や生態系に影響を及ぼすことが懸念されている。例えば昨今の大型クラゲ被害などは、その端的な例と考えられる。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、東シナ海から日本海に輸送される物質は必ずこの海域を通過する。そこで本研究では、対馬海峡のうちでも地理的に日本本土に近い東水道で係留系による水温・塩分の連続観測を実施し、水道を通過する海水の特性とその時間変動を把握することを目的とする。

2. 方法

対馬海峡東水道をほぼ東西に横断する3測点(蓋井島, 沖ノ島, 美津島)に水温・塩分計を設置し、1時間間隔で表層水温・塩分を計測した(Fig. 1)。各点における観測期間は以下の通りである。

蓋井島	2007/05/09 11:00 ~ 2007/11/05 10:00
沖ノ島	2007/05/21 13:00 ~ 2007/11/14 11:00
美津島	2007/06/06 14:00 ~ 2007/11/20 09:00

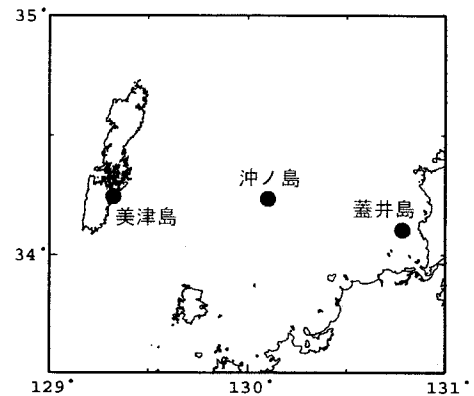


Fig. 1 観測点

観測は、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、それぞれ水深 4~5m 深に測器を設置した。

3. 結果と考察

各測点で得られた水温・塩分の時系列を Fig. 2 に示す。各点とも 6 月上旬から徐々に水温上昇・塩分低下を示し、8 月下旬から 9 月上旬にかけて最高水温・最低塩分を記録した後、11 月にかけて水温低下・塩分上昇するような季節変化を示している。

測点間の変動の関連性を調べるため、48 時間タイドキラーフィルターをかけた水温・塩分の時空間ダイヤグラムを Fig. 3 に示す。水温については、7 月および 10 月では水道の東西でほとんど差が認められないが、最高水温を記録する時期(8~9 月)に注目すると、水道東部の方が中央部よりも 2~3 日早く最高水温に達している。一方、塩分については、最低値は 8 月下旬から 9 月上旬に水道西部から中央部に現れており、この時期の美津島、沖ノ島での低下が著しい。このことは、観測された低塩分水は対馬海流によって移流された水塊であることを示している。それ以外の期間では、水道東部の蓋井島で低い値を示す傾向が認められる。

季節的な変動に加えて、数日の時間スケールをもつ変動が水温・塩分に認められる。特に沖ノ島では 8 月 5 日頃、8 月 26 日頃に低塩分水、8 月 15~17 日に高温水が認められ、パッチ状の低塩分水、高温水が通過したことが示唆される。

4. 研究組織

研究代表者 福岡県水産海洋技術センター 松井繁明
 研究協力者 独立行政法人水産大学校 滝川哲太郎
 九州大学応用力学研究所 千手智晴

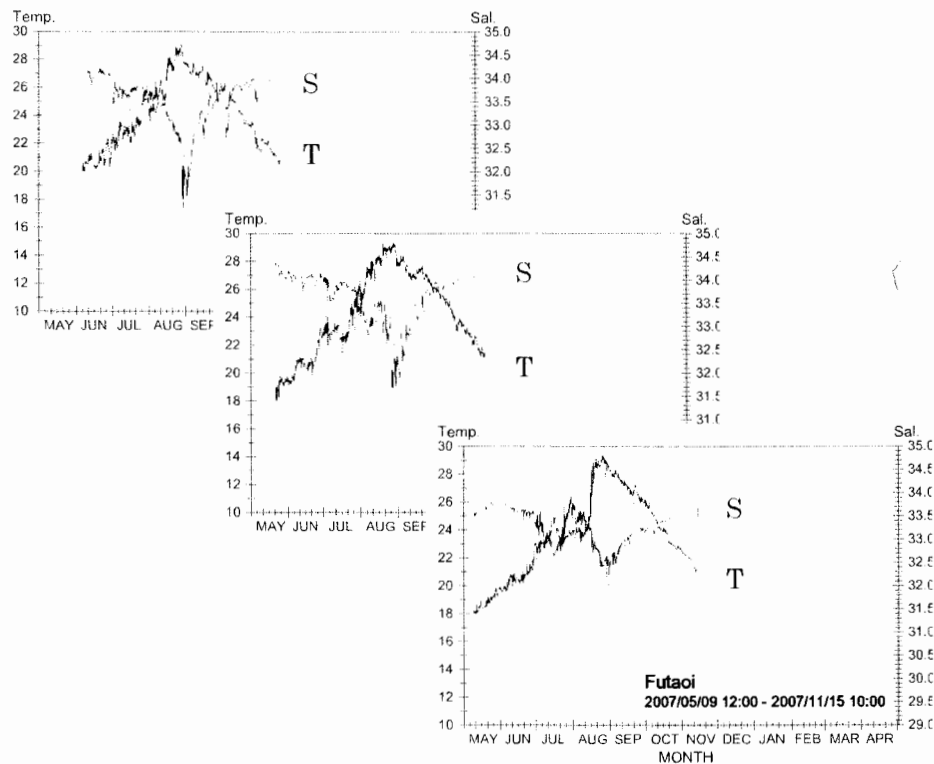


Fig. 2 美津島 (左), 沖ノ島 (中央), 蓋井島 (右) での水温・塩分時系

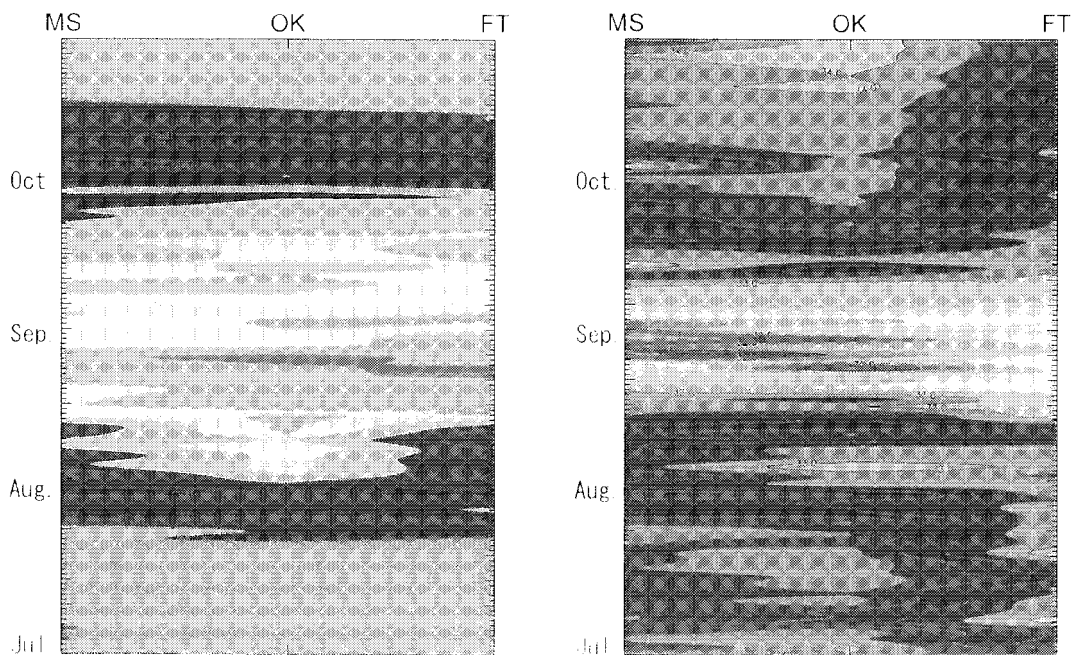


Fig. 3 水温(左), 塩分 (右) の時空間ダイアグラム (MS:美津島, OK:沖ノ島, FT:蓋井島)

東アジア域の光化学大気汚染の将来変動に関する研究

海洋研究開発機構 地球環境フロンティア研究センター 山地 一代

1. はじめに

光化学大気汚染問題は、人間活動によって排出される汚染物質が大気の構成物質の濃度や組成を変化させる事に起因しており、今後も経済発展が続くであろうと予測されている東アジア域各国からの汚染物質排出量の増大が懸念されている。特に、アジア大陸の風下に位置する日本においては、越境大気汚染問題が年々深刻化している。このような背景のもと、大気汚染の将来予測研究が注目されており、本研究において、東アジア域各国の社会経済活動の将来動向が考慮された将来の排出量予測値を入力データとして用いた化学物質輸送モデルを用いた大気汚染の変動予測を進めている。本年度は、この地域の光化学大気汚染影響の高まる初夏（6月）に注目し、解析を行なった。さらに、対流圏オゾン濃度に着目し、オゾン前駆体物質（NO_x/NMVOC）の排出量変化に対するオゾン濃度変動の感度を調べた。

2. モデルシミュレーションの概要

領域化学輸送モデルはCMAQ Ver.4.4 (Byun and Ching, 1999) を利用した。化学反応モジュールはSAPRC-99 (化学種:72種, 反応:214本)、エアロゾルモジュールはAERO3を用いた。計算領域は、北緯25°・東経115°を中心とした、水平方向に80km格子、78グリッド×68グリッド、鉛直方向に、14層(最下層150m、最上部約23km)である。鉛直座標は、Z*系座標を採用した。領域気象場には、NCEP/NCARの気象データ(2.5° reanalysis data)を利用したRAMS Ver.4.3の計算出力を与えた。モデルの境界濃度条件は、全球化学輸送モデル、CHASER (Sudo et al., 2002) の出力濃度を与えた。モデル入力用排出量データ(人為起源排出量のみ)には、地球環境フロンティア研究センターで開発したエミッション・インベントリ、Regional Emission inventory in Asia (REAS) を利用し、現在(2000年排出量)と将来(2020年排出量)の通年シミュレーションを行なった。自然起源(VOC)とバイオマスバーニング起源の排出量は、それぞれGEIA (Guenther et al., 1995)とACCESS (Streets et al., 2003)の排出量データを用いた。REAS以外のモデル入力用値(自然・バイオマスバーニング起源の排出量、気象場、境界濃度)は、現在・将来シミュレーションともに同じ値を用いている。

3. 結果および考察

初夏(6月)の将来オゾン濃度:2000-2020年の対流圏オゾン濃度の増加予測量を図1に示す。2020年のREAS排出量は、中国に対しては3種類の排出シナリオ:PSC(対策強化型)、REF(持続可能性追求型)、PFC(現状推移型)を採用し、他国に対しては国際エネルギー機関(IEA)のエネルギー需要予測に基づく1種類の基準排出シナリオのみを採用している。中程度の排出シナリオ(REF)に従うと、我が国の対流圏オゾン濃度は、2000-2020年の間に、年平均値が0-4 ppbv増加すると予測された。排出量増加の少ないシナリオ(PSC)は、年平均値が2 ppbv程度以下の増加を示した。最も排出量増加の多いシナリオ(PFC)に従うと、年平均値が2-6 ppbv、対流圏オゾン濃度の高くなる

6月の月平均値が2-14 ppbv増加すると予測された。中国以外の国の将来排出量はシナリオ間に差が無い事を思い起こすと、中国の排出量の将来変動が、将来、我が国の対流圏オゾン濃度に大いに影響する事が予測される。もし、2000年以降の急激な成長が今後も続くならば、2020年にはPFCが現実となり、日本の対流圏オゾン濃度は、年平均値が45-60 ppbv、6月の月平均値が50-75ppbvに達すると予測される。

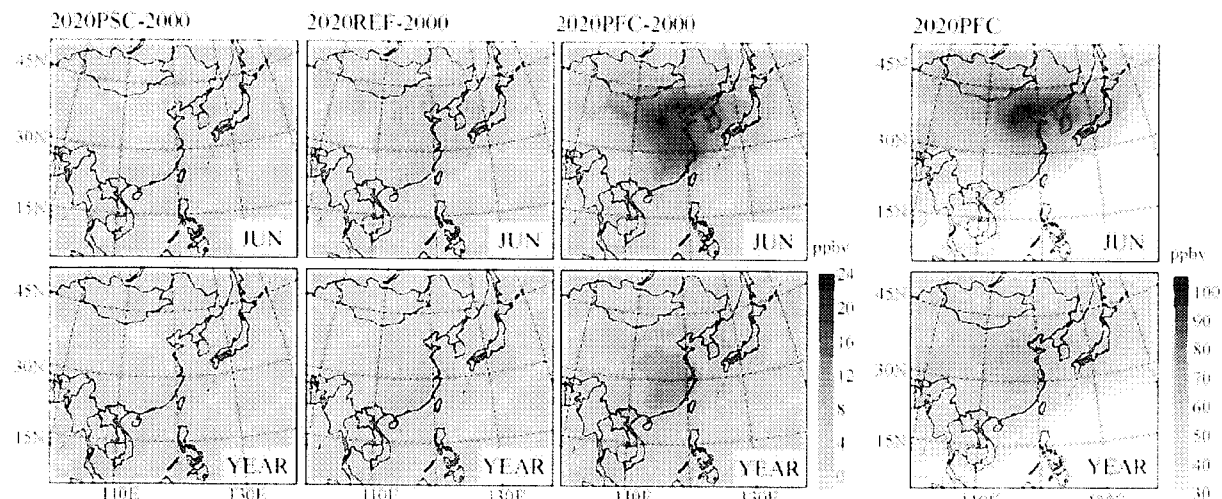


図1 REAS(PSC, REF, PFC)を用いた対流圏オゾン濃度予測 2020PSC-2000: PSCによる2000-2020年の間のオゾン濃度増加量。2020REF-2000: REFによる2000-2020年の間の濃度増加量。2020PFC-2000: PFCによる2000-2020年の間のオゾン濃度増加量。2020PFC: 2020年のオゾン濃度。

初夏(6月)におけるオゾン前駆物質(NO_x/NMVOC)

排出量変化に対するオゾン濃度変動:

図2は、CEC(Central East China、華北平原域)におけるオゾン前駆物質(NO_x/NMVOC)排出量変化に対する、CECおよび日本域(JPN)のオゾン濃度変化を示す。本解析には、6月の正午付近(3UTC)のオゾン濃度を用いた。CEC域のNO_x排出量変化と両地域(CECおよびJPN)のオゾン濃度変化は正の相関を示しており、CEC域のNO_x排出量の増大が、両地域のオゾン濃度増加に影響する事が判明した。一方、両地域ともに、CEC域のNMVOC排出変化に対するオゾン濃度変化の感度が小さい事が判明した。

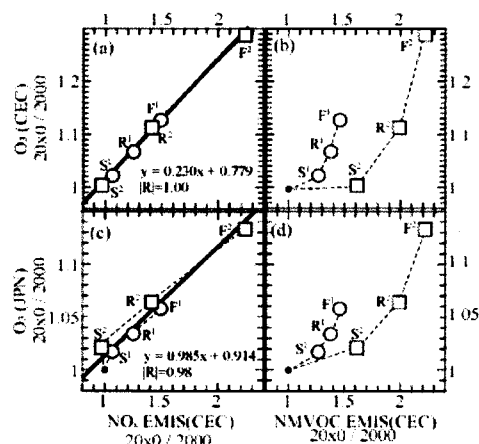


図2 (a)CEC(Central East China)のNO_x排出量の変化に対する、CECのオゾン濃度の変化。(b)CECのNMVOC排出量の変化に対する、CECのオゾン濃度の変化。(c)CECのNO_x排出量の変化に対する、JPN(JAPAN)のオゾン濃度の変化。(d)CECのNMVOC排出量の変化に対する、

4. 研究組織

山地 一代 (海洋研究開発機構 地球環境フロンティア研究センター ポストドクトラル研究員)
 大原 利眞 (国立環境研究所 室長)、菅田 誠治 (国立環境研究所 主任研究員)、
 江守 正多 (国立環境研究所 室長)、杉本 伸夫 (国立環境研究所 室長)、
 植松 光夫 (東京大学 教授)、竹村 俊彦 (九州大学 応用力学研究所 准教授)、
 鵜野 伊津志 (九州大学 応用力学研究所 教授)

【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 (高見昭憲、竹中規訓、定永靖宗) ら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」(北緯 26.86° 東経 128.25°, 海拔 60 m) において NO_y, ガス状硝酸 (HNO₃(g) と表記する) および粒子状硝酸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。また、大気中の硝酸はNO_y の中の最終化学形態であり、輸送過程におけるNO_y の反応進行度の指標として重要な化学物質である。

一方、九州大学応用力学研究所 (所内世話人: 鶴野伊津志) 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。推定する窒素化合物の沈着量の確度・精度の向上には、モデルで得られるデータと沖縄辺戸岬での連続観測結果とを相互比較し、窒素循環に関するモデルの評価を行なうことは必須である。平成 19 年度では主にモデルと観測結果の相互比較を行なった (濱名実、定永靖宗、坂東博、鶴野伊津志) ので報告する。

【観測とモデルについて】

NO_y, HNO₃(g) の濃度測定にはThermo Electron社製NO_x計TECO 42C-TLを大阪府立大学で改良したNO_y, HNO₃(g) 計を用いた。比較に用いた観測期間としては、2006/1/1~2006/11/13 である。

一方のRAMS/CMAQモデルについては、以下のような条件である。気相反応系モデルはSAPRC-99、雲・液相モデルはRADM、エアロゾルモデルはAERO3 を用いている。SAPRC-99 では多くの反応を扱っているが、ガス・粒子間の不均一系の反応は組み込まれていない。本研究に関わるところとしては、海塩粒子や黄砂とHNO₃(g)の反応が組み込まれていない。排出源モデルはREASを用いた。REASモデルの計算範囲は主に東南アジア域を焦点にし、北緯 50~南緯 10 度、東経 60~東経 150 度であり、排出量を 0.5 度格子で算出している。また、RAMS/CMAQ モデルでは想定解像度 80 km × 80 kmと、20 km × 20 km で計算されたが、本報告書では 20 km × 20 km の結果と考察のみ述べる。

【結果および考察】

まず、後方流跡線解析により辺戸岬へ到達する気塊が中国由来か否かについて分類を行なった。到達気塊を流跡線が辺戸に到達する前に最後に通過した海岸線によって区分し、中国 (CH), 韓国 (KR), 日本 (JP), 太平洋 (PO) に分けた。さらに、CHは北京より北域 (CH1)、北京から上海付近までの中域 (CH2)、上海より南域 (CH3)に分け、計 6 つに区分した。本報告書ではCH2 の気塊についての解析結果のみ述べる。図 1 に観測値とモデル計算値との相関プロットを示す。NO_y, HNO₃(g)濃度ともに決定係数は小さいが、NO_y 濃度については、明確に片方に値が偏ることはなく、また、時系列変化のデータか

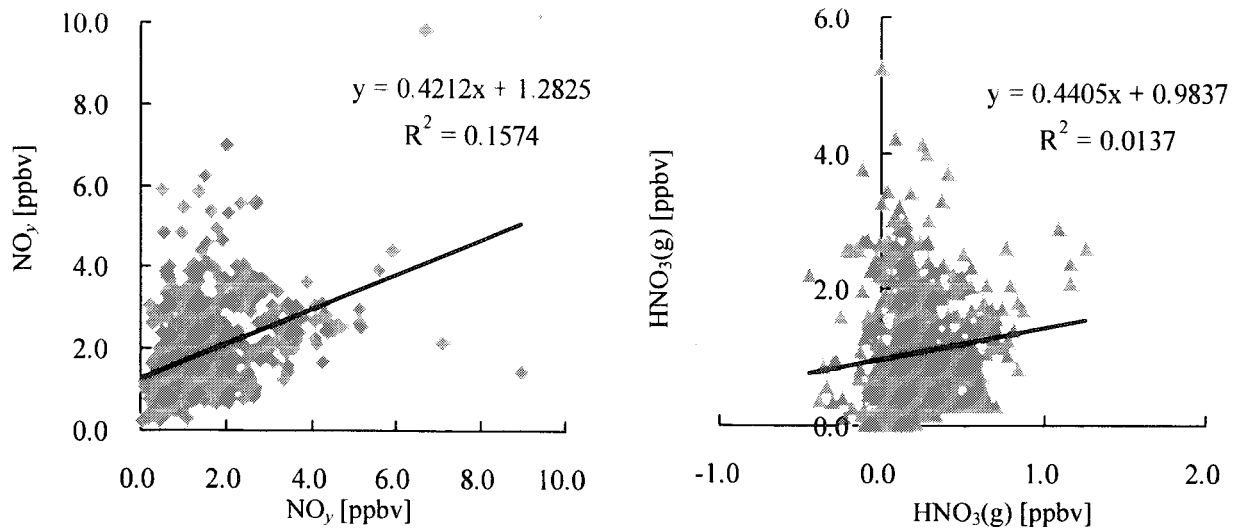


図 1. 観測値(横軸)とモデル計算値(縦軸)との比較。左がNO_y, 右がHNO₃(g) 濃度である。直線は一次近似直線を示す。

らもおおむね良好にモデルが実態を再現していると考えられる。しかしながら、HNO₃(g) 濃度についてはモデルのほう大幅に過大評価している結果となった。これは、CMAQ モデルでは海塩粒子や黄砂とHNO₃(g)との反応が組み込まれていないことが理由の一つとして挙げられる。中国から辺戸岬までの間はずっと海であり、そこには海塩粒子が存在するため、HNO₃(g) が海塩粒子に取り込まれる過程というのは無視できない。そのため、モデルでは硝酸のガス-粒子分配比がガスのほうに偏っていることが考えられ、モデルが示すHNO₃(g) 濃度の過大評価もこのことを反映した結果と考えられる。

次に、これらのデータを季節別に分け、平均値をまとめたものを表 1 に示す。2006 年 1 月~3 月を冬季、4 月~9 月を夏季と定義した。観測値については、NO_y, HNO₃(g) 濃度ともに、冬季のほうが夏季よりも高く、一方のモデル計算値についてはHNO₃(g) 濃度について夏季のほうが高い結果となった。これは、CMAQ モデルで使われている排出量モデル REAS が排出量の季節変動を考慮していないことが可能性として考えられる。実際中国での NO_y の排出量は暖房器具の使用などにより、冬季のほうが夏季より 2 割程度高いと考えられている。更には、モデルでは粒子状硝酸の生成過程がアンモニアとHNO₃(g) との反応から成っており、この反応は温度依存性の強い平衡反応である。それ故、モデルでのHNO₃(g) 濃度について、夏季のほうが高い結果となったのは妥当な結果であると推察された。

表 1. CH₂ 由来の気塊のNO_y, HNO₃(g) 濃度平均値の比較。単位はppbv である。

	冬季		夏季	
	観測	モデル	観測	モデル
NO _y	1.91	2.04	1.50	1.98
HNO ₃ (g)	0.40	1.05	0.15	1.26

【論文目録】

・ Numerical study of the atmospheric input of anthropogenic total nitrate to the marginal seas in the Western North Pacific region, I. Uno, M. Uematsu, Y. Hara, Y. J. He, T. Ohara, A. Mori, T. Kamaya, K. Murano, Y. Sadanaga, and H. Bandow, Geophys. Res. Lett., 34, L17817, doi:10.1029/2007GL030338, 2007.

・ Transport and transformation of total reactive nitrogen over the East China Sea, Y. Takiguchi, A. Takami, Y. Sadanaga, X. Lun, A. Shimizu, I. Matsui, N. Sugimoto, W. Wang, H. Bandow, and S. Hatakeyama, J. Geophys. Res., in press.

【学会発表など】計 7 件

海洋短波レーダーによる日本沿岸海況監視システムの開発

琉球大学工学部 藤井 智史

海洋表層流観測や波浪を高時空間分解能で計測できる海洋レーダは、沿岸域での海況把握・予測に極めて有効な観測手段である。日本国内において、研究機関を中心にその開発や導入が進んできているところである。この共同研究では、沿岸海況監視システムとして海洋レーダの開発や利用を進めるにあたり、計測精度の検証や解析手法の改善などの課題は多いことから、これらの技術開発にかかる問題や各機関における研究開発の状況、各海域における観測結果とその応用に関する研究成果などの情報をもちより議論することにより、今後の沿岸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。

この目的のために、海洋レーダに関連する機関の研究者が一堂に会する研究集会を、平成 19 年 12 月 20 日午後 (13:00~18:15)、12 月 21 日午前 (9:30~12:30) の日程で、応用力学研究所力学シミュレーション研究センター棟 W601 室にて開催した。

まず、スリーエス・オーシャンネットワークの勝呂は、米国において IOOS システムで統合運用されている CODAR 社の Sea Sonde レーダネットワークを解説した。また、同時に紹介された新型アンテナなどの情報は、導入時検討に有益であると思われる。

HELZEL Messtechnik 社の T. Helzel からは、WERA 海洋レーダシステムの紹介があった。CODAR 社とならぶ世界的な海洋レーダメカとして、その性能や特徴などを概説された。連続送信による FMCW 方式を用いることにより、高い SN 比の信号が受信されることは興味を引くところである。

九州大学応用力学研究所の石橋らの発表では、応用力学所で運用開始から 6 年目に入った対馬海峡表層海況監視システムの設置から現在までの維持運用にかかる故障、復旧、対策、改善などの事例が紹介された。このような事例報告は、実運用に関するさまざまな問題点を把握するうえで非常に役立つと考えられる。

国際航業の小笠原らは、現在国土交通省が整備しつつある港湾海況監視システムのうち、東京湾環境情報システムセンターの気象海象リアルタイム情報システムについての概要を解説した。現業としての海況監視の事例として、今後港湾関係部署での利用が重要になると考えられ、これらのシステムの構築や高度化が重要である。

電力中央研究所の坪野らは、海洋レーダの流速値読み取りの自動化手法を開発した。海洋レーダでは、広範囲の海域で連続して多量のデータが得られるが、これを人的に処理するのは困難であり、流速読み取りの自動化は必須の技術であるといえる。1 次散乱ピークの読み取りに画像処理的手法を用いた推定法は大変ユニークであり、注目に値する。

長野日本無線の伊藤らは、アレイアンテナ方式の海洋レーダにおいて、素子アンテナ本数を削減した際の流速観測への影響について報告を行った。アレイアンテナ方式の場合、アンテナ設置面積が設置時の制約になる場合も多く、このような検討はその解決に向けて有益である。

電力中央研究所の吉井らは、有明海で観測された VHF 海洋レーダにおけるデータ取得率の変化の原因を探った。様々な可能性を検討した中、干満の潮位との関係が大きいことを示唆した。

情報通信研究機構の灘井は、海洋レーダで得られるスペクトルデータにおいて、流速のビームフットプリント内の空間的変化が視線方向流速計測に与える影響について考察した。

朝日航洋の岩松らは、2005年2006年に実施された鳴門海峡と明石海峡での観測結果について報告した。このような強調流域での観測は、他の観測装置では困難であることから、海洋レーダ観測が有効性が実証されたといえる。

琉球大学理学部の久木は、低SN比のドップラペクトルからの波浪推定を試みた。適切な係数調整により、高々10dB程度のデータについても低波高の場合は推定できることを示した。

琉球大学工学部の玉那覇らは、送受切替方式の海洋レーダにおいて潮流解析に対する時間補間の影響を検討した。各レーダのデータ取得時刻から求めた潮流楕円と比較して、時間補間が長軸を小さくする方向に影響することが示された。

北海道大学低温科学研究所の江淵から、5年目に入った宗谷海峡からオホーツク海沿岸にかけて設置された海洋レーダシステムについての運用上の問題点、データ取得率の変化や観測特性の劣化の可能性などについて紹介があった。

海上保安大学校の寄高らの発表では、海上保安庁が八丈島と野島崎に設置した長距離レーダを用いて、伊豆諸島付近における黒潮流路が、蛇行時と非蛇行時でどのように異なるかを各レーダの視線方向流速から示された。

九州大学応用力学研究所の吉川は、対馬海峡に設置した海洋レーダの流速値から吹送流成分を抜き去り内部地衡流成分を推定した。これにより、対馬海流の詳細な挙動が把握できると考えられる。

琉球大学工学部の富森らは、有明海での流速データと風との比較を行い、EOF解析により風向と流向との角度差の風向依存性を確かめた。平均では約24度である角度差が北西風ではより大きい角度差になることが示された。

国土技術政策総合研究所の日向らからは、東シナ海海岸域における漂着ゴミ予測実験における海洋レーダ観測について、その意義と計画が述べられた。さらに、初期観測結果が速報された。

愛媛大学の高橋らは、情報通信研究機構が運用している遠距離海洋レーダを利用して、台湾北東部における日周期の表層流の変化を調べた。その結果、海陸風の風速変動との高い相関関係が明らかにされた。

情報通信研究機構の鹿島らは、上記の遠距離海洋レーダによって観測された2003年9月の黒潮表層流の流速増加が強い高気圧性渦の影響であることを述べ、その後の2004年の黒潮大蛇行を引き起こした可能性を示した。

総合討論では、各講演についての議論のほかに、琉球大学の藤井からITU-R活動においてWRC07会合で海洋レーダの利用周波数確保のための検討開始が決議されたことが紹介され、今後海洋レーダ関係者の協力が要請された。

今回の研究集会では18件の講演が行なわれ、活発な議論がされた。現在、国内に約50基のレーダが配備・運用されてきたことから、観測や運用、解析方法、応用分野に関して多くの研究が行なわれてきている結果である。これは同時に各所において、海況監視システムとしての海洋レーダの利用の進展が図られてきたことを示している。今後さらに研究を進めるため、来年度以降も研究連携や議論の場となる研究集会開催が望まれる。

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 青木 一真

1. はじめに

東アジア域では、化石燃料消費等による人為起源の大気浮遊微粒子（エアロゾル）が急激に増加し、越境大気汚染問題が深刻化している。人為起源エアロゾルは、大気汚染を引き起こす他、太陽放射や赤外放射を散乱・吸収することにより地球の放射収支に変調を及ぼす。また、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と言われている。本研究では、応用力学研究所において2003年から継続観測を行っているスカイラジオメーターを用いてエアロゾル光学的特性の解析を行っている。それらの観測データにより、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した。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を用いて、観測データを用いたエアロゾル気候影響の評価も試みた。

2. 観測概要

アジア域を中心に世界約50箇所に展開しているSky radiometer（大気変動力学分野により応用力学研究所に設置されているスカイラジオメーターも含まれる）を用いて、晴天時10分おきの鉛直積算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）・1次散乱アルベド（放射吸収のパラメータ）の算出を行っている。それらを用いて、気候変動の指標である放射強制力を求める。Fig. 1は、九州大学応用力学研究所のSky radiometerの観測概要を公開しているwebサイトである。

(<http://skyrad.sci.u-toyama.ac.jp/kasuga.html>)

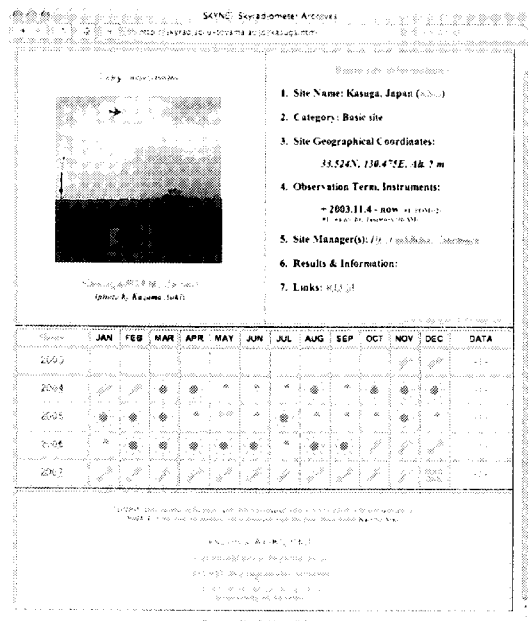


Fig. 1 九大応力研の観測概要webサイト

3. 結果及び、考察

Fig. 2は、応用力学研究所に設置されているスカイラジオメーターから得られた0.5 μ mのエアロゾルの光学的厚さとオングストローム指数と0.5 μ mの一次散乱アルベドの2007年の月平均値を示したものである。ただし、2007年8月は、測定機器の故障のため、月平均値を示していない。季節変動は、昨年度の報告書と同様に春季の高い光学的厚さと低いオングストローム指数が見られるが、初夏に光学的厚さが高い理由として、雲の影響を受けていると考えられ、今後、正確なエアロゾルの光学的特性を示す上で、それらの評価が必要になってくると思われる。また、大陸起源の人為起源エアロゾルや黄砂粒子の影響も観測されている。4月に

一次散乱アルベドが低いのは、黄砂粒子のみならず、人為起源の吸収効果のある粒子の影響も考えられ、今後も継続して観測を行い、SPRINTARSや衛星観測等と比較して、越境大気汚染の影響評価をする必要があると考える。

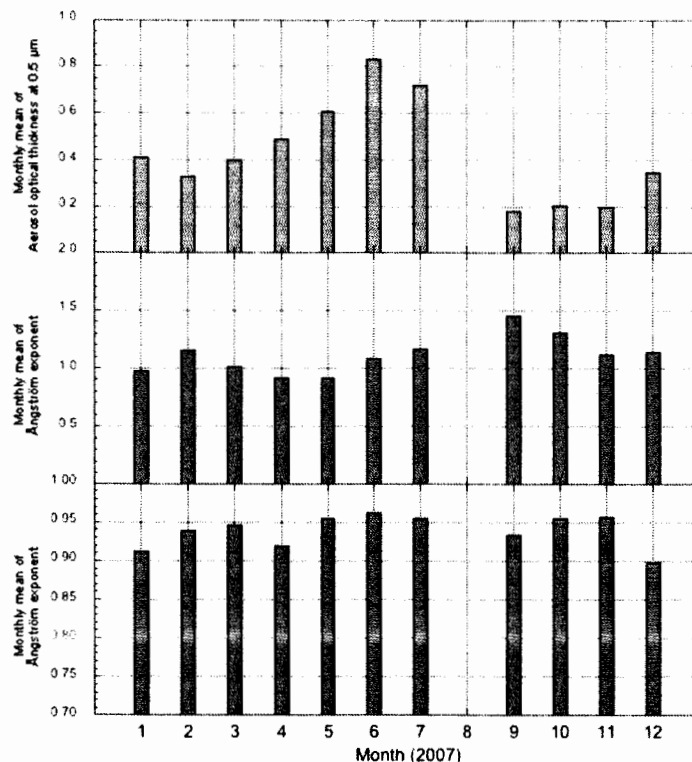


Fig. 2 福岡県春日市（九州大学応用力学研究所屋上）における2007年の0.5μmのエアロゾルの光学的厚さとオングストローム指数と0.5μmの一次散乱アルベドの月平均値

4. 研究成果

Nakajima, T., S. C. Yoon, V. Ramanathan, G. Y. Shi, T. Takemura, A. Higurashi, T. Takamura, K. Aoki, B. J. Sohn, S. W. Kim, H. Tsuruta, N. Sugimoto, A. Shimizu, H. Tanimoto, Y. Sawa, N. H. Lin, C. T. Lee, D. Goto, and N. Schutgens (2007), Overview of the Atmospheric Brown Cloud East Asian Regional Experiment 2005 and a study of the aerosol direct radiative forcing in east Asia, *J. Geophys. Res.*, 112, D24S91, doi:10.1029/2007JD009009.

Sohn, B.J., T. Nakajima, H. W. Chun, and K. Aoki (2007), More absorbing dust aerosol inferred from sky radiometer measurements at Anmyeon, Korea. *J. Meteorol Soc. Jpn.*, 85, 815-823.

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) |
| | 鶴野 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) |
| | 日暮 明子 | (国立環境研究所) |

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

北海道大学地球環境科学研究所 水田元太

1. はじめに

海洋の中深層循環は熱や二酸化炭素などを輸送することにより、地球の気候の維持や長期変動に重要であるといわれているが、その実態や仕組みについては十分には理解されていない。特に、北太平洋中層に見られる塩分極小構造や、深層の水温・塩分構造の形成と変動機構には不明な点が多い。また大規模な中深層循環の形成に特に重要な海岸・海底地形、中規模渦や波動といった非定常な流れの影響についての理解も十分ではない。本研究では観測、数値モデル、理論の分野の研究者が一同に集まり、情報を交換・整理し、問題提起をすることによって、これらの問題について調べてゆく。この目的のために2007年11月に研究集会を行い、以下の話題が提供された。次節ではそれぞれについて述べてゆく。

- (1)「WHP 再観測から得られる、北太平洋中深層の循環、及び、その変化」額瀨 慎也 JAMSTEC-IORGC
- (2)「気象研究所海洋データ同化システム(MOVE/MRI.COM-G)を用いた同化再解析実験結果による北太平洋回帰線水の変動について」中野俊也 気象研究所 海洋研究部
- (3)「北太平洋低緯度の中層塩分極小の形成機構」蓮沼 啓一 海洋総合研究所
- (4)「MRI.COM 計算結果を用いた前線間帯の水の動き・その2」北村尚士 海洋総合研究所
- (5)「モデル結果の中層における親潮水の混合比、その渦輸送、及び塩分分布」石崎 廣 気象研究所 海洋研究部
- (6)「渦許容モデルにおけるサブグリッド輸送の拡散型表現」平原 幹俊 気象研究所 海洋研究部
- (7)「黒潮続流域における再循環」中野英之 気象研究所 海洋研究部
- (8)「東向ジェット周りの変動と層厚輸送」水田 元太 北大 地球環境
- (9)「中層での水温・塩分季節変動について」細田 滋毅 JAMSTEC-IORGC
- (10)「深層水形成に伴う熱塩循環と渦成循環」吉川 裕 九大応力研
- (11)「北太平洋亜寒帯循環に及ぼす天皇海山列の影響 -天皇海山列東側境界流量機構-」和川 拓 九大総合理工
- (12)「日本海の深層循環のためのパラメタリゼーションについて」尹 宗煥 九大応力研
- (13)「地衡流平衡の一つの見方」(14)「熱塩循環に関する疑問、問題」増田 章 九大応力研

2. 結果と考察

北太平洋中層に見られる塩分極小構造の成因については、[A] 本質的には亜熱帯、亜寒帯の水塊の境目と捉えられるとされる一方で、[B] 独自の供給源が存在する、という考え方もある。(1)の話題では太平洋の水塊特性は最近10-20年間に、中層塩分極小を境に上層で低温低塩、下層で高温高塩となる傾向があり、塩分極小を中心に見かけの酸素消費量が増加する傾向があることが示された。これらは塩分極小層を中心とした海水交換が弱くなったとする[B]に近い考えと整合するよう見え、実際、インバージョンによって求められた子午面循環は弱くなっていた。

一方で(3)では水塊構造の空間的遷移から塩分極小は[A]の考え方で合理的に解釈可能であることが北太平洋東部、西部両方について示された。さらに、西部については、亜熱帯系の水である密度 25.5 ~

26.2 シグマの黒潮躍層水が黒潮続流北部で海面に露出し、変質を受けながら緩やかに北上し、親潮前線を形成することが示唆された。(4)では気象研究所の高解像度数値モデルの結果に粒子追跡法を適用することで、この点が詳しく調べられ、黒潮、親潮両前線ではさまれた前線間帯の水は 26.6 シグマ以浅に黒潮起源のものが多く、それらは下層から湧昇してくる傾向があること、前線間帯の水の交換には渦など非定常の流れが重要であることが示された。

(5)では非定常な流れによる各密度面間の黒潮、親潮起源の水の輸送量を同じく気象研究所の高分解能数値実験の結果を用いて調べた。これらの水の輸送にはフィラメント構造に代表される様な準地衡流乱流による微細構造が重要であることが指摘された。一方、この様な高解像度数値モデルを長期間積分することは今なお難しい。そこで(6)では低解像度モデルにモデル格子で表現できないサブグリッド輸送 (SGT) を流体の変形率を元に簡単な調和型拡散によって組み込む新たな手法を導出した。

(14)ではこれらの問題を力学的観点から整理し、(4)や経験的インバージョン法 (Ried, 1997) などの観測データから求められた中深層循環は従来の風成・熱塩循環の理論で解釈可能か否かについて問題提起がされた。また、(1)の様なインバージョン法によって求められた太平洋の鉛直午面循環に 2 つ以上のセルが存在すること、鉛直拡散係数の値が乱流観測と、化学トレーサーの年齢から評価される場合で異なることや氷期の熱塩循環について力学的な問題提起がされた。この他、(2)は新たな研究手法として、データ同化が有効であることを北太平洋回帰水を例に示し、回帰水の 1997/8, 2002/3 El Nino に伴う変動には、偏西風と降水が重要であり、東部と西部で明瞭な違いがあることを指摘した。

上記の中深層の循環の形成には、海底・海岸地形の影響、中規模渦やロスビー波などの非定常な流れの効果が本質的に重要である。黒潮の再循環や日本海の深層循環はこの様な影響が表層から深層まで及ぶ例と考えられている。(7)では黒潮の離岸と再循環には西岸境界の粘性による高渦位水と、慣性境界層内の低渦位水の 2 つが重要であること、黒潮に見られる 10 年スケール変動は風による大規模循環場に追従して再循環の位置が変動したものであることが示された。また黒潮再循環以東にも、緯度線に沿った流れが普遍的に見られる点について問題提起がなされた。

(8)では黒潮続流のようなジェットから遠方に放射されるロスビー波の特性について調べ、それらの波の位相速度が再循環の最大流速と一致する法則があることを示した。またそれらの平均流への影響を論じた。一方、(9)では太平洋全域に展開された中層フロートによって得られたデータからロスビー波の特性を調べ、中層の水温塩分変動の伝播速度や鉛直構造は傾圧第 1 モードのロスビー波と一致すること、熱帯東部太平洋では風応力に直接起因しない大きな変動が存在するらしいこと、が示された。

(10)では熱塩強制、渦強制、海底地形が深層循環に与える影響について新たな問題提起がされた。日本海の様な中緯度縁辺海を理想化して行った数値実験の結果から、熱塩強制は傾圧的、渦強制は順圧的、海底地形は上下層で decouple した循環をそれぞれ引き起こすこと、3 者は単純な重ね合わせでは表現できないことが示された。(12)では高解像度数値モデルで得られた日本海の数値実験結果が紹介され、日本海の深層循環は渦と海底地形のパラメタリゼーション (Greatbatch & Li, 2000) を使った場合のみ観測に近づくことが示された。また観測された深層循環は冬季に強まるが、これは冬季モンスーンによる冷却によって直接駆動されるのではなく、渦エネルギーが増えるためであることが示唆された。

一方(11)は風成循環の季節変動成分と天皇海山列の関係を理想化された条件での数値実験によって調べ、海山列の上を通過する流量は海底圧力項、地形による背景渦位の等値線のブロックの 2 つの要因に支配されることを示した。(13)は関数解析の概念を用いて地衡流調節を捉え直した。

海洋数値モデルにおける日本近海の海況再現性向上に関する研究

気象庁気象研究所 辻野 博之

・ 目 的

海洋数値モデリング技術の進歩と計算機の処理能力の向上により、日本近海を覆うような広領域において水平 10 km 程度の高解像度で海洋数値シミュレーションを行い、観測等と比較可能なレベルの再現性が得られるようになってきた。しかしながら、実際の観測やデータ同化などから得られる、いわゆる真値に対して、数値モデルの再現性はいま一步及んでおらず、今後本格的に実用化される海況予測の信頼度向上のためには、モデリング技術のさらなる進展が不可欠となっている。本研究では、独自に開発した海洋数値モデルを用いて日本近海の海況モデリングを行っている研究者がお互いのノウハウを交換し、様々な数値スキーム群の組み合わせによる日本近海数値シミュレーションを行い、これらのスキームの最適な組み合わせを探ることを目的とする。

・ 方 法

本研究に参加する各機関で開発されている海況予測システムに使用されている海洋モデルでは、それぞれが対象とする海域の特徴にあわせる形で異なる移流、拡散、粘性等のスキームが採用されている。これら選定されたスキームの相違がどのような結果の相違をもたらすのかを、共通の外的条件のもとでの海況再現実験をおこなって明らかにする。この結果を受けて、数値スキームの組み合わせを変更した実験を数例行い、どの組み合わせが最もよく海況を再現するかを検証する。この際、お互いが持つ数値スキームやノウハウを交換し、相互のモデリング技術の向上を図る。数値シミュレーションは主に九州大学の大型計算機センターにおいて行う。

普段の研究は各自がリモートで応力研のコンピューターにアクセスして数値計算を行い、e-mailなどで情報交換する。年1回応力研に集合して、研究報告・討論会を行う。

・ 結果 と 考察

(1) 参加各機関が開発している海洋数値モデルのコードレベルの比較と技術情報交換

本研究に参加した各機関（気象庁気象研究所 (MRI.COM)、京都大学（京都モデル）、東京大学気候システム研究センター (COCO)、九州大学応用力学研究所 (RIAMMOM)）では独自に海洋数値モデルを開発しており、高解像度モデルを使用した海況予測や温暖化予測などが行われている。それぞれのもつ数値スキーム、モデル運用上のノウハウ、技術的な懸案事項について情報交換を行った。各モデルが有する機能について目立った過不足はみられず、また、技術的課題（トレーサー移流・渦粘性・拡散スキームの改良、並列計算効率化など）もほぼ同様な状況であることがわかり、これらの解決のための情報交換を今後も継続していくことになった。一方、プログラミング言語は全て FORTRAN であるが、コーディングスタイルや、FORTRAN77 と FORTRAN90 の違いなどがあり、例えば物理スキームのプログラムレベルの交換や差し替え等は、現状で困難であることも確認された。日本のモデリングコミュニティとして今後世界に伍していく上では、数値スキームの相互交換による開発資源の有効利用も重要であると考えられるため、今後コーディングスタイルの変更を各機関が検討する際には、スキーム交換の容易さ考慮することも確認された。

(2) 最適な数値スキームの選定

各機関で用いられる高解像度モデルにおいては、冬季の日本海北部にみられる、海面水温の高温バイアス、日本南岸の黒潮の大蛇行傾向など、モデルで再現される場に不完全な部分も残されている。これらの問題点を解決するにあたり、最近コミュニティに導入された新スキームや現実を再現するための特別なパラメタリゼーションを試み、その効果を確認した。トレーサー移流スキームとして、数値拡散を抑える高精度の second order moment (SOM) スキーム(Prather 1986)、粘性スキームとして、非等方粘性(Smith and McWilliams 2001)、または日本南岸における背景調和型粘性、および速度場に依存し、倍調和型よりもさらに微小な擾乱に作用する粘性・拡散スキームの一例として Tokioka (1980) の2次元版を試みる。これに加えて、大気と強い相互作用が存在する系における、海面フラックスを模して、海面水温と大気温度の差の分だけ(差に係数1をかける)海上の風速を大きくすることにより全体的な高温傾向の修正を試みた。

気象研究所で開発された日本近海の海洋環境予測システムを使用し、標準ケースに加えて、4ケースの感度実験を行った。① 背景調和型粘性+風速修正、② SOM+背景調和型粘性+風速修正、③ SOM+高次の粘性拡散スキーム+風速修正、④ SOM+非等方粘性+風速修正 である。

日本海の水温と黒潮大蛇行の頻発に対する改善の効果に着目して結果を示す。図1は日本海の海面水温の観測からの偏差である。今回の実験では全て風速修正が行われているが、これにより、日本海北部の冬季の海面水温が低温化し、観測に近づいていることがわかる。ただしケース③ではその効果が他と比較して顕著でなく、高次の水平拡散が必要以上に拡散をおこしていることが推察される。また SOM を用いたケース②、③、④では、北緯40度の極前線付近の高温偏差が改善された。

図2には海面高度を示した。調和型の粘性を採用しないケース③では黒潮の大蛇行がおきているのに対し、ケース①、②、④では大蛇行が抑制されている。

以上からケース②、④を使用することにより、日本海の高温暖バイアスと黒潮大蛇行頻発の問題は改善が期待される。しかし、ケース④ではケース②などで生じていた中規模渦の活動が不活発になる傾向があり、粘性係数の選定等になお課題が残っている。

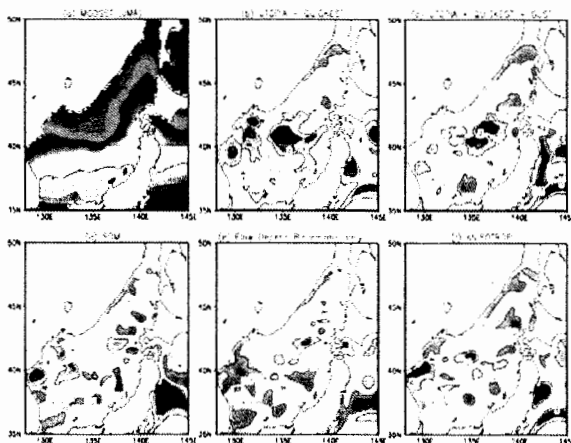


図1. 計算開始5年目の日本海2月の海面水温の気象庁のMGDSST (a)からの差。(b) 現行モデル、(c) ケース①、(d) ケース②、(e) ケース③、(f) ケース④。

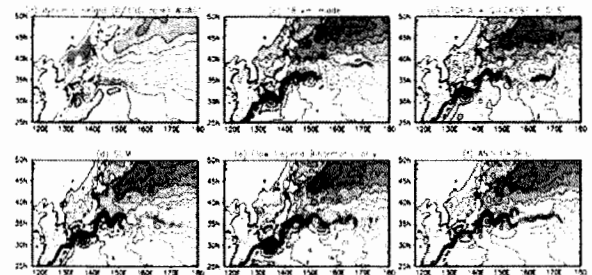


図2. 計算開始5年目の年平均海面高度。(a) WOA 2001 に基づく1500dbar 準拠の力学的海面高度。(b) 現行モデル、(c) ケース①、(d) ケース②、(e) ケース③、(f) ケース④。

サボニウス形水車の流力特性に関する研究

九州大学大学院総合理工学研究院 経塚雄策

● 目的

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。ダリウス型水車は、動翼の揚力を利用する水車で流れの中で高いエネルギー変換効率を持つが、静止時の起動トルクが小さなことが問題である。系統連携された発電機の場合にはモータリングによって強制的に回転させることが出来るが、我々の場合には独立電源となっているので、起動特性の問題は重要である。この対策としては、ダリウス水車の動翼数を増やすなどの対策も考えられるが、ここではダリウス水車の回転軸にサボニウス水車を取り付けたることを考えてサボニウス水車の性能について実験的な研究を行った。サボニウス型水車は、半円弧形のバケットを用いる抵抗型水車で、構造が単純であるので各種装置に利用されており、特徴として起動トルクが大きくなことが挙げられる。もし、両水車の長所を活かすことができればダリウス・サボニウス混合水車は高性能となることが期待される。本研究では、その第一段階としてサボニウス水車単独の性能について実験的な研究を行った。

● 実験装置および実験方法

実験は応用力学研究所の大型境界層風洞（計測部：BxHxL = 1.8m x 2m x 3m）を借用した。

図 1 のように流れの方向を定義し、半円形バケットに働く力を 3 分力計によって計測した。半円バケットは、市販の亚克力パイプを半分に切断し、両端に 0.2m 角のエンドプレートが付けたものを用いた。（LxD = 0.975m x 0.12m）風速は 10m/s, 15m/s, 20m/s としたが、水槽実験で標準流速とした 1m/s と同じレイノルズ数となるのは 15m/s である。

図 2 は、半円形バケットの揚力、抗力、モーメント係数の結果を示す。流れの迎角が 90 度付近において、揚力、抗力係数が大きく変化することがわかる。流速による違いは、モーメント係数に出ているが、揚力、抗力には表れていない。模型の亚克力が薄かったこともあり、風速が大きな場合には風圧で変形した影響がモーメントに表れたかもしれない。ただし、絶対値としては大きなものではない。これらの計測データは、単一流管理論による計算の中で用いられる。

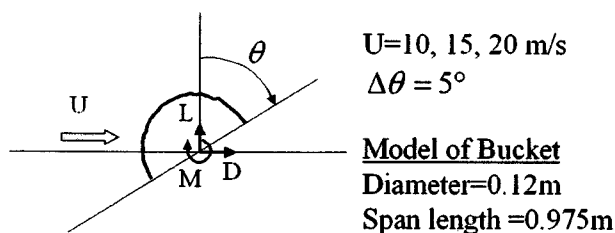


図 1 半円弧バケットの 3 分力計測

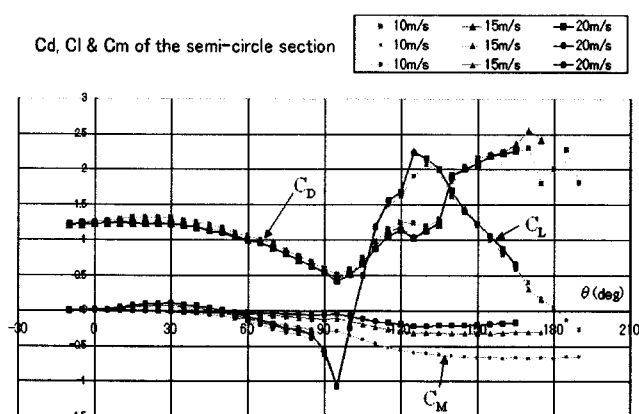


図 2 半円弧バケットの流力係数

● 実験結果

図3において定義される2枚バケットのサボニウス水車の回転トルクの計測を回流水槽において行った。現実的なサボニウス水車では、これとバケットの角度を90°回転させたものをスパン方向に半分ずつ組み合わせるのであるが、本研究では実験の単純化と計測トルクを大きくし、誤差を少なくするために2枚バケットとした。2枚バケットの取り付け位置による回転トルクの違いをみるために表1のような4つの組合せについて実験を行った。

トルクの無次元化は以下の式によって行った。

$$C_t = \frac{Q}{0.5\rho r_{\max} A_s U^2} \quad (1)$$

ただし、 $A_s = 2r_{\max} L_{\text{span}}$ ：水車の最大投影面積

一様流速を $U = 0.6, 0.8, 1.0 \text{ m/s}$ とし、周速比を

$$\lambda_s = \frac{r_{\max} \omega}{U} \quad (2)$$

によって定義した。

図4は、今回行った4ケースのトルク係数の結果を比較したものである。Case-1は、 $\lambda_s = 0$ 付近におけるトルク係数が大きくて良好な性能であるが、 $\lambda_s = 0.6$ 付近で負のトルクとなっている。一方、Case-3については、 $\lambda_s \leq 0.9$ の範囲でトルクが正となり、他の場合よりも広い周速比範囲で良好な結果となっている。Case-4については λ_s の全範囲でCase-3よりもトルクが小さな結果となっており、回転軸とバケットの隙間の存在は水車の性能を低下させることが分かる。

● まとめ

・サボニウス水車の流力特性を求めた。バケットの配置が水車性能にとって重要であり、今回の実験ではCase-3の性能が最も良好であった。他の研究者の結果と比較すると、回転軸の影響は小さいものと思われる。

● 研究組織

経塚雄策 九大・総理工 教授 代表・総括
明 宏幸 九大・総理工 M2 実験解析

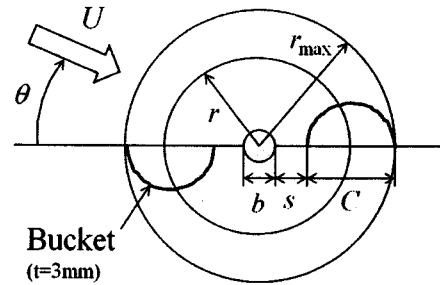


図3 サボニウス水車のバケット配置

表1 4つのバケット配置

	S (mm)	Rmax (mm)
Case-1	-36	94
Case-2	-26	104
Case-3	4	134
Case-4	24	154

C: 120mm, b: 20mm

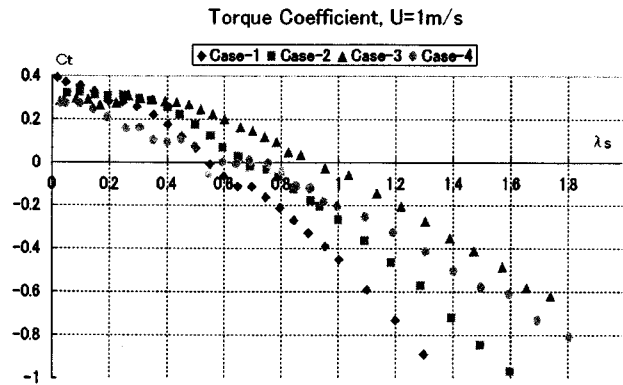


図4 トルク係数の比較

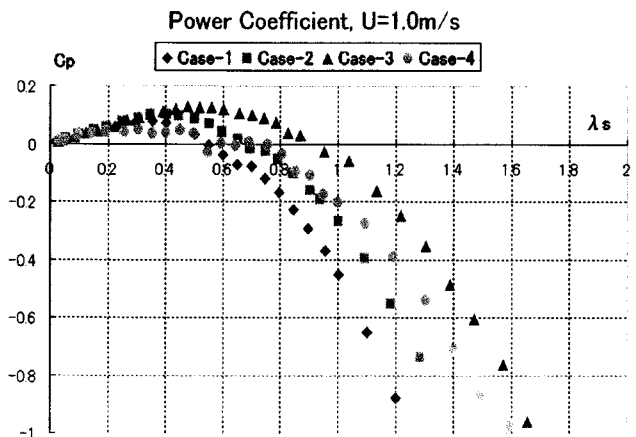


図5 パワー係数の比較

風レンズ風車に適した風車翼の設計法の開発

九州大学 工学研究院 機械科学部門 古川 雅人

1. 緒言

これまでに、風レンズ周りの流れ場を考慮することが可能な翼設計法として三次元空力設計法が構築され、Midpeak型と称されるスパン方向負荷分布が風レンズ風車に適していることが示されている。そこで本研究では、三次元空力設計法を用いて、スパン方向に加えてコード方向の翼負荷分布も考慮した検討を行い、コンパクトタイプ風レンズ風車翼の空力性能向上が見込まれる翼負荷を提案する。

2. 三次元空力設計法

2. 1. 設計手順

子午面流れ解析過程では翼力を考慮した軸対称粘性流れ解析を行い、風車翼上流における速度分布など、翼設計に必要な各物理量を算出する。また、流れ場が周方向に一様と仮定した軸対称流れ解析を行うことで計算負荷を低減し、翼設計に要する時間の短縮を図っている。

これら二つの過程において、翼設計の結果得られた翼形状を子午面流れ解析に、子午面流れ解析の結果得られた子午面流れ分布を翼設計にフィードバックするという一連の作業を収束するまで繰り返し行うことで、一つの翼形状を得る。これが本設計手法の大まかな流れである。

2. 2. 逆問題解析による翼設計

本設計手法では、翼設計に逆問題解析を用いた。逆問題解析には、市販ソフト TURBdesign¹ (Advanced Design Technology Ltd.) を使用した。この解析手法は Zangeneh の逆解法理論に基づいており、翼周りの束縛渦分布を周方向平均角運動量 (rV_θ) 分布から定め、翼キャンパー面を渦層で近似し、渦層が誘起する速度が翼面に沿って流れるという条件から翼形状を決定する。

3. 翼作用を考慮した軸対称子午面流れ解析

3. 1. 数値解析手法

Reynolds 平均を施された三次元圧縮性ナビエ・ストークス方程式 (RANS) を基礎方程式とし、数値計算手法として、有限体積法を用いた緩和陰的高解像度風上スキームを用いた。非粘性・粘性流動および体積力は、時間方向にすべて陰的に離散化され、空間上では六面体の計算セルを用いた cell-centered 法による有限体積法に基づいて離散化された。人工粘性を小さく抑えて境界層および渦構造を鮮明に捉えるために、非粘性流動は Roe の近似リーマン解法を用いた TVD スキームと 3 次精度の MUSCL 法を組み合わせた高解像度風上スキームにより評価した。粘性流動は Gauss の発散定理を用いて中心差分的に求められた。乱流モデルには壁面粗さを考慮した $k-\omega_2$ 方程式モデルを用いた。

3. 2. 計算格子

図 1 に、解析に用いた計算格子を示す。外部流れに風車を設置した状態を正しく再現するため、外部領域はブレード長さの 10 倍とした。また、風レンズを有する風車周りの複雑な流れ場を正確にシミュレートするために、全計算領域を 3 ブロックに分割した。

格子点数は、風車翼周りの領域では約 2.6 万点 (流れ方向に 115 格子点、スパン方向に 114 格子点、ピッチ方向に 2 格子点)、風車前方から上流境界までは約 4 万点、風車後方から下流境界までに 2.7 万点を設定した。全計算セル数は約 4.6 万セルであった。

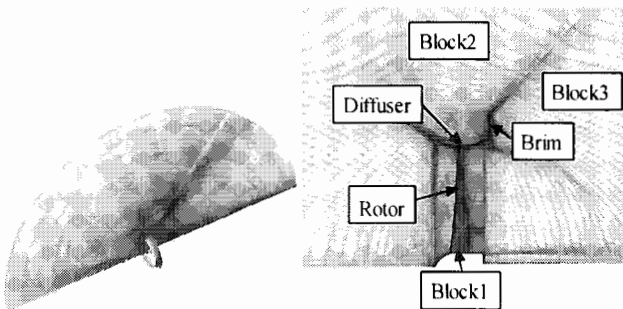


Fig.1 Computational grid

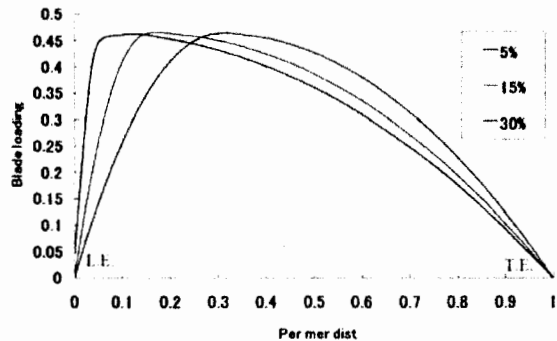


Fig.2 Chordwise loading distribution

4. 翼負荷分布の検討

4. 1. コード方向翼負荷分布

コード方向翼負荷分布に関しては、負荷ピークを 5%、15%、30% コード位置に変化させて翼設計を行った。そのコード方向翼負荷分布 $\partial(rV_\theta)/\partial m$ を図 2 に示す。なお、スパン方向翼負荷分布は Midpeak 型に固定した。

Table 1 にコード方向翼負荷のピーク位置が 5%、15%、30% のそれぞれにおける集風効果係数 K と出力係数 C_w を示す。Table 1 から、より前縁側に負荷ピークを設定するほど、集風効果係数、出力係数共に増加していることがわかる。

ピーク位置が 5% の場合、他のケースと比較して翼のスタック角が小さいため、軸方向の抵抗が小さくなる。さらに式 (5) より、スパン方向負荷分布および平均翼負荷が等しいとき、集風効果係数が大きいほど出力係数は高い値を示す。このことから、ピーク位置が 5% のときに集風効果係数 K および出力係数 C_w が高くなったと考える。

	5%	15%	30%
K	1.334	1.276	1.270
C_w	0.904	0.870	0.857

Table.1 Total performance (chordwise loading distribution changed)

4. 2. スパン方向翼負荷分布

本研究では前述の Midpeak 型を基礎とし、翼根側および翼端側の負荷をそれぞれ変化させることでスパン方向翼負荷分布を検討した。図3に、設計した翼のスパン方向負荷分布を示す。便宜上、ハブ側の翼負荷を高くしたものを Midhub 型、翼端側の翼負荷を大きくしたものを Midtip 型と呼称する。なお、コード方向負荷分布については、5%位置に負荷ピークを設定した。Table2に、Midhub 型、Midpeak 型、Midtip 型それぞれの集風効果係数 K および出力係数 C_{IF} を示す。Midhub 型と Midpeak 型を比較すると、スパン方向の翼負荷ピーク位置を翼根側に移動することによって、集風効果係数は大きくなったものの、出力係数が減少していることがわかる。

また、Midpeak 型と Midtip 型を比較すると、翼端側にスパン方向翼負荷ピーク位置が移動することで、集風効果係数はほぼ変化せず、出力係数のみが増加していることがわかる。これは、翼端側の負荷増大に伴う遠心力効果の増加によるものであると考える。遠心力効果により風レンズ内の流れが半径外向きに押し上げられるため、風レンズ体のディフューザ内壁近傍の流れの剥離が抑制される。その結果、集風効果の低下が抑制されたと考えられる。

したがって、スパン方向翼負荷分布については、Midtip 型のような翼負荷分布を採用することで、集風効果を維持しつつ、更なる出力係数の増加を見込むことができることがわかる。

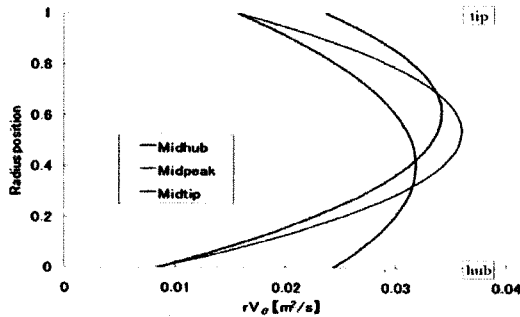


Fig.3 Spanwise loading distribution

Table.2 Total performance(spanwise loading distribution changed)

	Midhub	Midpeak	Midtip
K	1.355	1.334	1.333
C_{IF}	0.843	0.904	0.936

4. 3. 風レンズ体に適した翼負荷分布

前節までの検討の結果、c-ii タイプ風レンズに適した設計翼負荷として、図4に示すようなコード方向およびスパン方向負荷分布を有し、かつ平均翼負荷が $rV_0 = 0.674 \text{ (m}^2/\text{s)}$ である風車翼を提案する。

この条件で設計した翼に対して、前節までと同様にして評価パラメータの計算を行ったところ、集風効果係数 $K = 1.266$ 、出力係数 $C_{IF} = 1.324$ となることがわかった。

図5に子午面流線図を示す。ここで図5(b)より、ディフューザ上面で剥離していることがわかる。これは、平均翼負荷を高く設定したことにより、風レンズ内への流入流量が適正な値とならなかったためと考えられる。一方で、平均翼負荷を低く設定することは、風車翼の発電性能の低下につながる。したがって、風レンズ風車において集風性能と発電性能の両方を向上させることは難しい。

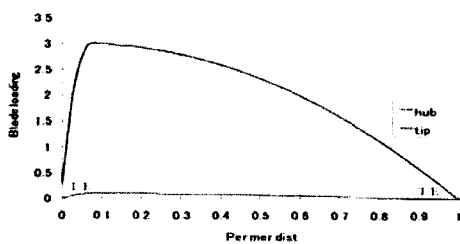
このことから、本研究では風レンズを c-ii タイプに固定し翼負荷分布を検討してきたが、風レンズ風車の設計には、風レンズ体と風車翼の相互の影響を考慮した設計の必要性が示唆される。

また、本設計手法においては、翼面における境界層の発達や剥離の発生を考慮することができないため、この点に関しても更なる検討が必要であると考えられる。

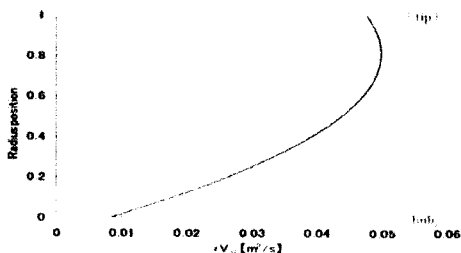
5. 結言

本研究では、三次元空力設計法を用いた風レンズ風車翼の翼負荷分布に関して検討を行い、以下の知見を得た。

- (1) コード方向負荷に関して、前縁側に負荷ピーク位置を設定することで集風効果係数と出力係数の増加が見込まれる。
- (2) スパン方向負荷分布に関して、翼端側に負荷ピークを設定することで出力係数の増加が見込まれる。
- (3) 平均翼負荷に関して、 rV_0 を大きくすることで出力係数の増加が見込まれる。
- (4) 風レンズ風車においては、集風性能と発電性能の両方を向上させることは難しい。したがって、風車翼だけでなく風レンズ体との相互作用も考慮した設計の必要性が示唆される。

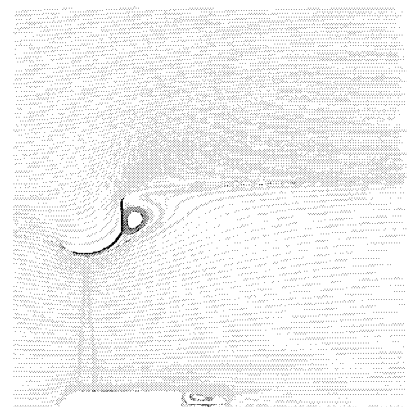


(a) Chordwise



(b) Spanwise

Fig.4 Loading distribution



(a) near rotor

Fig.5 Meridional streamlines

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、人工衛星画像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：2007年12月 4日（火）13：10～ 5日（水）12：10

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：清水健太（広島大学生物生産学部）
多田邦尚（香川大学農学部）
樽谷賢治（水産総合研究センター瀬戸内海区水産研究所）
谷本照己（産業総合研究所）
石井大輔（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）
一見和彦（香川大学農学部）
林 美鶴（神戸大学内海域環境教育研究センター）
郭 新宇（愛媛大学沿岸環境科学研究センター）
湯峯充彦（神戸大学自然科学研究科）
山田真知子（福岡女子大学人間環境学部）
濱田建一郎（北九州市立大学アクア研究所）

発表プログラムは資料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.

沿岸海域の物質循環と環境保全

研究代表者：橋本俊也（広島大学大学院生物圏科学研究科）

所内世話人：柳 哲雄

日時：2007年12月4日（火）13：10～2007年12月5日（水）12：10

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

第一日 2007年12月 4日（火）

趣旨説明（13：10～13：15） 研究代表者、所内世話人

1. 御前浜沖の海洋構造と水・物質収支計算 13:15-13:45
林 美鶴（神戸大内海域環境教育研究センター）
2. 海水中 N₂O に関する数値モデルの構築 13:45-14:15
湯峯充彦（神戸大学自然科学研究科）・林 美鶴（神戸大内海域環境教育研究センター）
3. 沿岸海域低次生態系における藻場の役割 14:15-14:45
清水健太（広大生物生産）・橋本俊也（広大院生物圏）・樽谷賢治（水総セ瀬戸内水研）
4. 沿岸域の低次生産を支える藻場の計測 14:45-15:15
谷本照己¹・高杉由夫¹・星加 章¹・榎本康之²・山本房市³
(1:産業技術総合研究所)(2:四国電力)(3:四電技術コンサルタント)
5. 伊予灘における底部冷水の形成と栄養塩の変動特性 15:15-15:45
郭 新宇¹・張 弼勳¹・棚内康浩¹・山口一岩¹・高橋大介¹・二村 彰²・武岡英隆¹
(1:愛媛大 CMES)(2:弓削商船高専)
6. 植物プランクトンからみた博多湾と洞海湾の比較内湾学 15:45-16:15
山田真知子（福岡女子大学人間環境学部）
7. 流入負荷されるリンに対する河口干潟域の機能 16:15-16:45
一見和彦・浜口佳奈子・山本昭憲・多田邦尚（香川大学農学部）

第二日 2007年12月 5日（水）

8. 博多湾奥における貧酸素水塊発生機構 9:20- 9:50
柳 哲雄・石井大輔（九大・応力研）
9. 半閉鎖性水域における赤潮指数の時空間変動 9:50-10:20
石井大輔（九大応力研）・柳 哲雄（九大応力研）・佐々倉 諭（いであ株式会社）
10. 北九州市・洞海湾の水質改善と一次生産環境の変化 10:20-10:50
濱田建一郎¹・多田邦尚²・村田達海¹・上田直子¹・山田真知子³・米村菜美⁴・堤 裕昭⁴・門谷 茂⁵
(1:北九大アクア研)(2:香川大農)(3:福女大環境)(4:熊本県大環境)(5:北大院環境)
11. 瀬戸内海における植物プランクトンの季節変動と長期変動 10:50-11:20
多田邦尚（香川大）・西川哲也（兵庫県水産総合技術センター）・吉松定昭（香川県赤潮研究所）
樽谷賢治（水総セ瀬戸内水研）
12. 夏季の瀬戸内海における粒状態炭素・窒素・リンの分布 11:20-11:50
樽谷賢治（水総セ瀬戸内水研）

資料 2 ①

御前浜沖の海洋構造と水・物質収支計算

林美鶴 (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)

梅沢有・石飛智稔・谷口真人 (地球研)、小野寺真一 (広島大)

1. はじめに

兵庫県西宮市夙川河口の御前浜は自然海岸で、潮間帯から沖合にかけて海底から地下水が湧出している。この、周囲を埋め立て地に囲まれた閉鎖性海域の水・物質収支に対する地下水の影響を明らかにするため、2006年8月22～23日に、地下水湧出量測定と同時に海洋観測と河川観測を実施した。ここでは、海洋観測結果とこれを元にした水・物質計算について述べる。

2. 観測概要

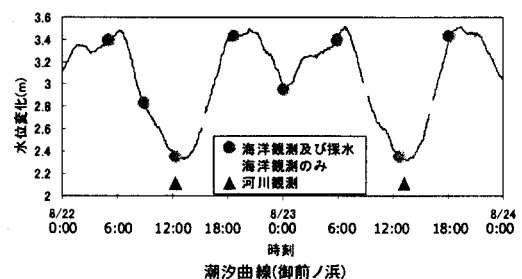
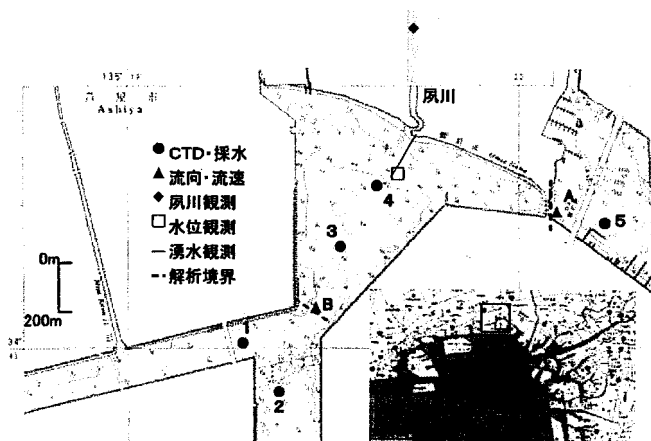
観測場所と水位変動を下に示す。5地点でCTD観測と採水を、2地点で電磁流速計観測を、基本的に高潮、平均水位、低潮時に行った。また夙川河口から沖にかけて地下水湧出量の連続計測を、また水位を連続計測した。さらに夙川で、一日一回低潮時に流速計測と採水を行った。海洋での採水は海面と海底上約1mで行い、濾過後に全リン・栄養塩・Chl.a・DO濃度を分析した。夙川での採水分析は、栄養塩と全リンについて行った。

3. 観測結果

海域境界のA・B地点の流れは、流向が水位と連動して変化し、また鉛直的にほぼ同様であったことから、潮流が卓越していたと考えられる。ただし流向と潮位変動の関係は、下げ潮時に御前浜を東から西に通過する場合と西から東に通過する場合、また上げ潮時に御前浜を西から東に通過する場合と両側から御前浜に入ってくる場合の、それぞれ二種類あった。夙川流量を流速観測値から、蒸発量を気象観測値から、地下水湧出量を湧出速度観測値から、A地点での通過流量を流速観測値から算出して、B地点の通過流量を水収支から逆算した。この結果、通過流量はそれ以外の100倍で、水収支は通過流でほぼ決まっていた。また地下水湧出量は夙川流量の25%、地下水からのTP負荷量は夙川の3.5倍だった。

表層の混合層(高温、低塩)は、観測期間の前半で水深約2m、後半にかけて浅くなり、最終的に1m以下、底層には低温、高塩水が分布し、観測期間前半は水深約6m以深だったが、後半にかけて上層に広がり、最終的に約4mまで広がった。この底層水の上昇は、B地点における23日0時以降の強い北流成分と一致することから、大阪湾からの流入が示唆される。また底層水は低酸素、低クロロフィル、高濁度だった。クロロフィルは底層高濁度層の上に約1mの幅

で極大層を形成しており、夜間も高濃度でも分布し、分布状態は物理構造変化に影響を受けていた。



資料 2 ②

北九州市・洞海湾の水質改善と一次生産環境の変化

○濱田建一郎¹・多田邦尚²・村田達海¹・上田直子¹・山田真知子³・米村菜美⁴・堤 裕昭⁴・門谷 茂⁵

(¹北九大アクア研・²香川大農・³福女大環境・⁴熊本県大環境・⁵北大院環境)

キーワード：洞海湾, 栄養塩, 粒子状物質

【はじめに】九州の北部に位置する洞海湾は、全長約13km、湾幅は湾口部約1.2km、湾奥部0.3km、航路域の平均水深約10mの水路状の内湾で、国内で最も富栄養化した水域とされている。1997年に全窒素・全リンの環境基準(TN:1.0mg/L以下, TP:0.09mg/L以下)が適用され2001年には基準をクリアするまでに水質は改善された。本研究では環境基準達成前後の湾内における栄養塩類の分布と、それを利用して増殖する植物プランクトンや粒子状物質の生化学的特長を検討し湾内の一次生産環境について考察した。

【方法】調査は環境基準達成前の1995年8月・9月, 1996年8月(2回), 1997年5月・8月・11月, 1998年8月の8回と達成後の2006年5月・7月・11月, 2007年1月の4回実施した。湾内に設けた7箇所の調査定点(図1)で採水し、NH₄-N, NO₃+NO₂-N, PO₄-P, Si(OH)₄-Si, Chl_a, POC, PONについて分析した。今回のデータ解析には表層水の平均値のみを使用した。

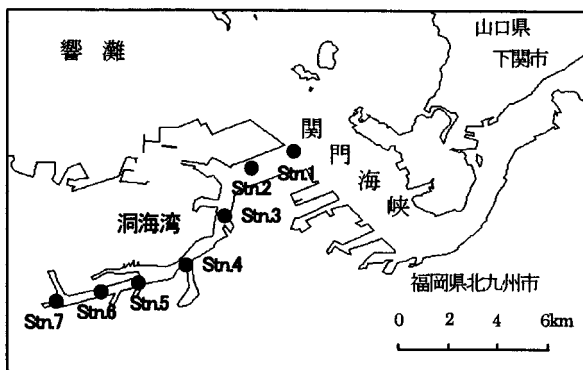


図1 調査定点

【結果及び考察】洞海湾における95~98年の栄養塩濃度は、NH₄-Nが4.97~1590 μM, NO₃+NO₂-Nが3.63~812 μM, PO₄-Pが0.066~11.3 μM, Si(OH)₄-Siが0.750~98.6 μMであった。06~07年の栄養塩濃度はNH₄-Nが0.120~63.0 μM, NO₃+NO₂-Nが0.140~157 μM, PO₄-Pが0.105~5.08 μM, Si(OH)₄-Siが0.720~115 μMであった。湾内の栄養塩濃度(Si(OH)₄-Siを除く)は、06~07年の調査結果は95~98年より低い値を示し、各定点のNH₄-N(図2)とPO₄-Pは低下していた。これら栄養塩濃度の減少は、負荷源である工場排水が約3割削減されたことを反映していた。一方、Si(OH)₄-Siは95~98年と06~07年の間で平均値に差がなかったことから、その負荷源は他の栄養塩と異なり、湾奥に流入している河川由来と考えられた。次に植物プランクトンの指標となるChl_a濃度を見ると、95~98年が1.5~146 μg/L, 06~07年が1.4

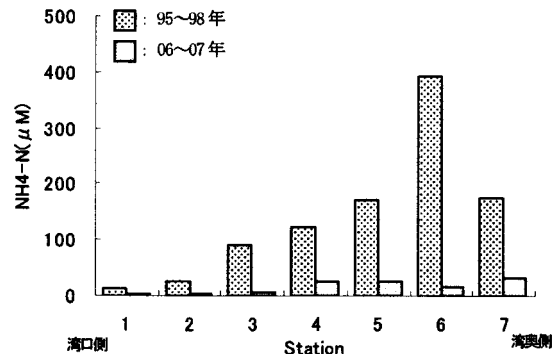


図2 各調査定点(表層)のアンモニア濃度の比較

~218 μg/Lであった。環境基準達成前後でStn.1~Stn.5のChl_a濃度は低下傾向が見られたが、湾奥のStn.6, Stn.7に差は無く、植物プランクトンのバイオマスは減少していないと考えられた。粒子状物質の有機物濃度を見るとPOCは95~98年が0.317~2.83 mg-C/L, PONが0.042~0.599 mg-N/L, 06~07年はPOCが0.150~3.05 mg-C/L, PONが0.030~0.694mg-N/Lで、95~98年と06~07年の間で有意な差は認められなかった。また、各調査定点のPOC・PONの平均値から求めたC/N比は、95~98年が5.7~8.1, 06~07年が5.5~6.3で粒子状物質の質的变化は見られず、レッドフィールド比(6.6)に近いことから、その主な起源は植物プランクトンであると考えられた。

このように、環境基準の達成による栄養塩濃度の低下は確認されたが、湾内におけるChl_a濃度は依然として高い(1.4~218 μg/L)ままで、粒子状物質の質や量についても変化がみられなかった。このような状態は、栄養塩濃度の低下が植物プランクトンの増殖を抑制するレベルまで達していないためと考えられる。多田ら(2007)は96~97年の洞海湾では、大過剰の栄養塩が常に存在し、この栄養塩濃度に植物プランクトンが応答して増殖しない状況を「富栄養」よりは「過栄養」とするほうが適切であると指摘している。今回の結果から判断すると、洞海湾は、いまだ栄養塩が過剰に存在する過栄養状態にあり、環境改善の途上といえよう。

参考文献

多田邦尚・一見和彦・濱田建一郎・上田直子・山田真知子・門谷茂(2007):洞海湾の河口循環流と赤潮形成。沿岸海洋研究, 44, 147-155.

瀬戸内海の海底環境

産業技術総合研究所 主任研究員 星加 章

1. 目的

本研究集会の目的は、瀬戸内海的环境修復・改善に重要な役割を果たしていると考えられる、瀬戸内海の海底環境の特性を、海底地形の成立過程、底質の移動特性、底泥の堆積特性、海底の底質・ベントス特性、リン・窒素の溶出特性、海砂の役割と海砂採取の影響、などの観点から明らかにして、今後、瀬戸内海の海底に対するどのような施策が瀬戸内海的环境改善に最も有効かを明らかにすることにある。

2. 研究集会の概要

研究集会のプログラムを資料1に添付する。

参加者は、早稲田大学1名、京都大学1名、大阪工業大学1名、広島大学1名、産業技術総合研究所2名、九州大学6名、コンサルタント1名、出版社1名の、計14名であった。

3. 研究成果

本研究集会の討議結果をもとに、「瀬戸内海の海底環境」という市販本を、2007年12月末までに恒星社厚生閣から発刊することとなった。

資料 1

応用力学研究所共同研究集会プログラム

「瀬戸内海の海底環境」

日時: 2007年5月10日(木)13:30~5月11日(金)11:30

場所: 応用力学研究所 W601号室

◆5月10日(木)

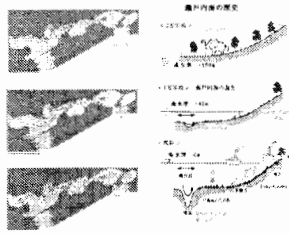
- | | |
|---------------------------------|------------|
| 13:30~13:40 趣旨説明 | 柳 哲雄(九大) |
| 13:40~14:10「瀬戸内海の成立と海底地形」 | 井内美郎(早稲田大) |
| 14:10~14:40「瀬戸内海の底質中重金属濃度と堆積速度」 | 星加 章(産総研) |
| 14:40~15:10「瀬戸内海の底泥輸送」 | 柳 哲雄(九大) |
| 15:10~15:40 休憩 | |
| 15:40~16:10「瀬戸内海の底質・ベントス変化」 | 駒井幸雄(大阪工大) |
| 16:10~16:40「瀬戸内海底質からのリン・窒素溶出」 | 山本民次(広大) |
| 16:40~17:10「瀬戸内海の貧酸素水塊」 | 柳 哲雄(九大) |
| 17:30~19:30 懇親会 | |

◆5月11日(金)

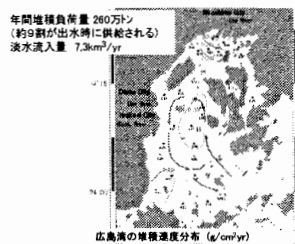
- | | |
|----------------------------|------------|
| 9:30~10:00 「海砂採取の歴史・現状・今後」 | 井内美郎(早稲田大) |
| 10:00~10:30「海砂採取の藻場への影響」 | 高橋 暁(産総研) |
| 10:30~11:00「海砂とイカナゴ」 | 藤原建紀 (京大) |
| 11:00~11:30 総合討論 | |

資料 2 発表要旨

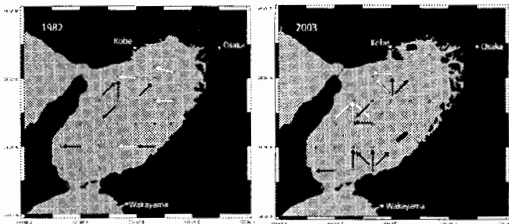
1. 「瀬戸内海の成立と海底地形」井内美郎(早稲田大)



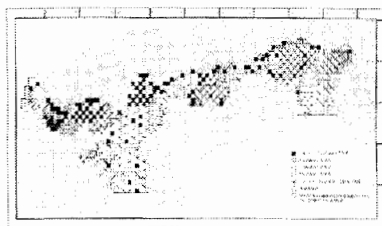
2. 「瀬戸内海の底質中重金属濃度と堆積速度」星加 章(産総研)



3. 「瀬戸内海の底泥輸送」柳 哲雄(九大)



4. 「瀬戸内海の底質・ベントス変化」駒井幸雄(大阪工大)



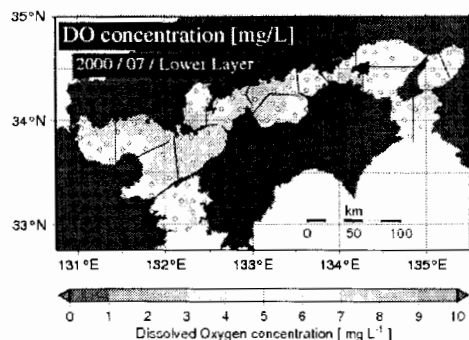
5. 「瀬戸内海底質からのリン・窒素溶出」山本民次(広大)

DIN溶出速度と陸域からのDIN負荷量の鑑別比較

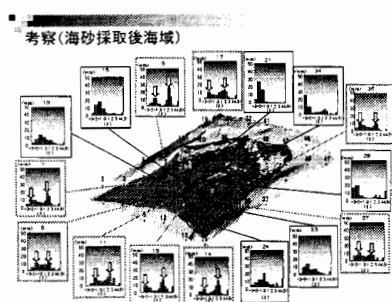
	(ton N d ⁻¹)		
	溶出	負荷*	比
大阪湾	21	140	0.15
播磨湾	32	55	0.58
備讃瀬戸	1.6	15	0.11
姫瀬+備後瀬	19	23	0.83
安芸瀬+広島湾	11	19	0.58
伊予瀬	13	21	0.62
周防瀬	33	33	1.0

*Nakanishi et al. (1985)およびYamamoto et al. (1996)を参考に算出。

6. 「瀬戸内海の貧酸素水塊」柳 哲雄(九大)



7. 「海砂採取の歴史・現状・今後」井内美郎(早稲田大)

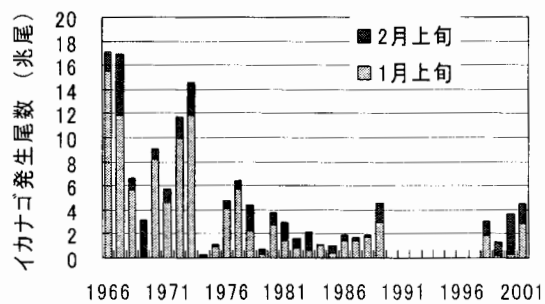


8. 「海砂採取の藻場への影響」高橋 暁(産総研)



9. 「海砂とイカナゴ」藤原建紀 (京大)

備讃瀬戸



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

水産大学校海洋生産管理学科 滝川哲太郎

2007年12月21日から22日にかけて九州大学応用力学研究所において、「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」が開催された。九州大学応用力学研究所では、平成10年から「日本海研究集会」を、その後、これを引き継ぎ平成12年より本研究集会を開催しており、今年で10年を迎える。また、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が新しく設立された節目の年でもある。

今回は、大学および試験研究機関を中心に27名が参加した。合計10題の講演があり、この中で対馬海峡を対象海域とした研究発表が、8題と大半を占めた。一題あたり、質疑応答を含め30分程度の時間を割いたため、非常に活発な議論が行われた。

九州大学応用力学研究所では、博多-釜山間往復フェリー「かめりあ」に設置されたADCPによる流れの鉛直断面観測を1997年から10年以上継続して行っている。さらに、同研究所によって、海洋レーダーを用いた対馬海峡表層海流のモニターが2002年から行われている。これらのモニタリングによって、時空間的に密な流れの情報を得ることが可能となり、対馬海峡における海洋の物理過程に関する研究は、本研究集会の講演にあるように、ここ数年間で飛躍的に進展している。

研究集会初日には、対馬海峡通過流量に関して、フェリー「かめりあ」のADCP観測結果を用いた対馬海峡を通過する対馬暖流の流量変動について2題、対馬暖流の流量変動と冬季大気場との関係について1題の講演があった。また、対馬海峡における中規模渦について、フェリー「かめりあ」によるモニタリング、数値モデル結果、海洋レーダー観測結果から、それぞれ3題の講演があった。

研究集会2日目前半は、前日から引き続き研究対象海域は対馬海峡であり、2003年から開始されたフェリー「かめりあ」を利用した水温・塩分・クロロフィルaのモニタリングの講演に始まり、定置網におけるモニタリング結果を用いた台風接近時に観測された沿岸湧昇についての講演があった。その後の講演は、北海道渡島半島西岸を南下して津軽海峡に流入する流れ、アジア周辺海域における海面高度計データの潮汐誤差の検証と非常に幅広いものであった。

今回、研究対象海域を対馬海峡とする講演が多かったこと、波浪に関する話題が提供されなかったことが気にかかったが、本研究集会の目的は、対馬海峡から津軽・宗谷海峡に至る長い日本海の海岸沿いにおいて、各研究機関・研究者が個々にモニタリングしている海況・波浪情報を持ち寄り、情報交換・議論をことである。本研究集会は、観測データに基づいたモニタリングに注目しているが、今後とも様々な手法により日本海と波浪の研究に携わっている研究者が一堂に会する集会に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・海洋力学分野の諸氏に感謝する。

プログラム

日時：平成19年12月21日(金)～22日(土)

場所：九州大学応用力学研究所西棟(W601号室)

12月21日(金)

14:00-14:10 趣旨説明

滝川哲太郎(水大校)

14:10-14:40 対馬海峡における10年間のADCP観測

福留研一(九大総理工)・尹宗煥(九大応力研)

14:40-15:10 Non-tidal variability of the transport through the Tsushima/Korea Strait

Alexander Ostrovskii (P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences),
Ken-ichi Fukudome (ESST, Kyushu Univ.), Jong-Hwan Yoon (RIAM, Kyushu Univ.),
Tetsutaro Takikawa (National Fisheries Univ.)

15:10-15:40 対馬暖流が冬季大気場に与える影響

西村和也(九大総理工)・広瀬直毅(九大応力研)

15:40-16:00 休憩

16:00-16:30 対馬海峡のかめりあライン上における中規模渦に関する研究

中小原拓也(九大総理工)・尹宗煥(九大応力研)・福留研一(九大総理工)・
In-seong Han(韓国水産科学院)

16:30-17:00 対馬海峡におけるサブメソスケールの変動について

尹宗煥(九大応力研)

17:00-17:30 対馬海峡東水道に見られる反時計回り渦の変動特性(II)

中園隆司(九大総理工)・吉川裕・増田章・丸林賢次・石橋道芳(九大応力研)

12月22日(土)

09:00-09:30 定期フェリーを利用した水温・塩分・クロロフィルaのモニタリング

広瀬直毅・松野健・千手智晴・高山勝巳(九大応力研)・福留研一(九大総理工)・
石坂丞二(長大水産)・牧野高志(長大生産)・矢津敏弘(アレック電子)・In-Seong HAN・
Young-Sang SUH(韓国水産科学院)

09:30-10:00 台風接近時に対馬海峡蓋井島で観測された沿岸湧昇

滝川哲太郎・竹内謙介(水大校)・浅田里恵(WDB株式会社)

10:00-10:20 休憩

10:20-10:50 北海道渡島半島西岸を南下して津軽海峡に流入する流れ(3)

田中伊織・澤田真由美・中多章文・西田芳則(中央水試)・渡野邊雅道(函館水試)

10:50-11:20 アジア周辺海域における海面高度計データの潮汐誤差の検証

森本昭彦(名大HyARC)

11:50-12:20 総合討論

参加者

氏名	所属
沖本久司	長崎海洋气象台
田中伊織	北海道中央水試
江淵直人	北大低温研
西村和也	九大応力研
吉川 裕	九大応力研
滝川哲太郎	水産大学校
竹内謙介	水産大学校
灘井章嗣	NICT
久木幸治	琉球大
森本昭彦	名大
丸林賢次	九大応力研
広瀬直毅	九大応力研
増田 章	九大応力研
福留研一	九大総理工
ヴァーラモフ セルゲイ	九大応力研
松野 健	九大応力研
高山勝巳	九大応力研
和川 拓	九大総理工
中小原拓也	九大総理工
岩松伸宏	朝日航洋
藤井智史	琉球大
日向博文	国土総合研究所
中園隆司	九大総理工
尹 宗煥	九大応力研
柿木康児	九大総理工
鹿島基彦	NICT
オストロフスキー	九大応力研

平成19年度 応用力学研究所 研究集会

有明海の海況と環境 II

13:30－ 趣旨説明

13:35－14:00

日向博文(国総研):成層期における有明海湾奥部の残差流変動特性

14:00－14:25

竹之内健太(長崎大)・坂井伸一(電中研)・坪野孝樹(電中研)・吉井匠(電中研)・多田彰秀(長崎大):有明海におけるDBFレーダー観測結果

14:25－14:50

万田敦昌, 玉置昭夫, 兼原壽生, 青島隆, 木下宰, 内田淳(長崎大):早崎瀬戸周辺の物質輸送過程のラグランジュ的記述

14:50－15:15

松野 健・堤 英輔(九大):微細構造の計測結果から見た内部潮汐による鉛直混合

15:15－15:40

石井大輔・柳 哲雄(九大)・日向博文(国総研):漂流ブイによる収束発散構造の現場観測

15:40－16:05

山本恵李・石坂丞二(長崎大):初夏の有明海における潮汐周期に伴う栄養塩とクロロフィル a 濃度の変動

16:05－16:30

堤 裕昭・高松篤志(熊本県立大):有明海奥部で観測される貧酸素水の大規模化とその原因

16:30－16:55

Sam Wouthuyzen(LIPI), Joji Ishizaka(Nagasaki Univ.): Monitoring Algal Blooms Using Terra and Aqua MODIS Satellites Data in the Jakarta Bay

16:55－17:15 討論

平成19年度

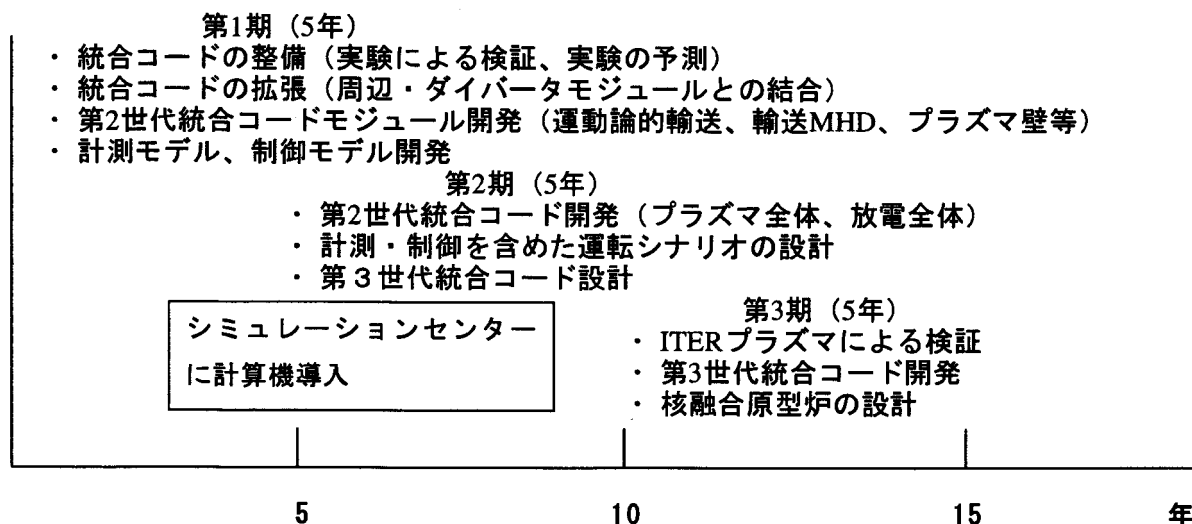
核融合プラズマ分野
共同研究成果報告

核燃焼プラズマ統合コード計画

九州大学応用力学研究所 矢木雅敏

2006年、ITER(International Thermonuclear Experimental Reactor)協定に関する署名が7極(日, 欧, 米, 露, 中, 韓, 印)間で、またBA(Broader Approach)協定に関する署名が日・欧間で行われ、核融合研究はまさに分岐点を迎えた。ITER および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最重要課題と考えられる。核燃焼プラズマ統合コード(Burning Plasma Simulation Initiative)はボランティアな活動として2002年7月31日に準備会を発足させ、今日に至る(<http://bpsu.nucleng.kyoto-u.ac.jp/bpsi/>)。核燃焼プラズマ統合コード構想とその進展に関する詳細に関しては、文献(福山淳、矢木雅敏、J. Plasma Fusion Res. Vol. 81, No. 10 (2005) 747-754)をご参照願いたい。この特定研究は今年度で2年目を迎えるがBPSIの進展に寄与するところが大きく、多くの結果が得られている。科研費基盤研究(B)(1)「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)が新規採択されたこともこの特定研究の支援によるところが大きい。今後、さらなる大型資金獲得をめざし研究を継続する予定である。BPSIの活動は、(1)統合コードのフレームワーク開発、(2)統合コードに必要な階層型物理モデルの開発、(3)効率的な分散並列処理の実現の3つに集約されるが、本特定研究においては5つのサブテーマ(1)多スケール・拡張MHDの理論シミュレーション研究、(2)多スケールプラズマ乱流シミュレーション研究、(3)核燃焼プラズマ統合コードにおける周辺プラズマモデリング、(4)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、(5)プラズマ輸送理論、から構成されBPSIを支援する体制になっている。

BPSI開発計画ロードマップ



図にBPSI開発計画ロードマップを示す。ITER BAの一貫として六ヶ所村にシミュレーションセンターが建設され、4年後にスパコンが導入される予定であるが、それまでに第1期開発計画の完了をめざす。この特定研究においては、階層型物理モデルの開発という点において貢献できればと考えている。

多スケール・拡張 MHD の理論シミュレーション研究

日本原子力研究開発機構

核融合研究開発部門

先進プラズマ研究開発ユニット

プラズマ理論シミュレーショングループ

徳田 伸二

研究目的

核燃焼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と認識されつつある。本研究では (1) プラズマと炉の構成部分 (壁および外部回路) との巨視的な電磁的相互作用、(2) プラズマ周辺における MHD 現象およびそれとコアプラズマとの相互作用並びに (3) 核融合炉における MHD 不安定性の飽和・抑制や突發現象を解明するための理論・シミュレーションモデルを開発し、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的とし、九州大学応用力学研究所 (矢木) が中心となって進めている核燃焼プラズマ統合コード計画の一環として行うものである。研究成果の一部は 2nd Japan-Korea workshop on 'Theory and Simulation of Magnetic Fusion Plasmas' combined with 6th Burning Plasma Simulation Initiative(BPSI) meeting(平成 19 年 8 月 6-8 日、九州大学応用力学研究所)で発表された。

研究成果報告

今年度は、特に上記 (1) と (3) について進展があった。高性能トカマクの定常運転においては、導体壁の電気抵抗が有限であることから発生する抵抗性壁モード (RWMs) の安定性解析および制御が重要な課題となっている。安定性解析のため、理想 MHD エネルギー原理を拡張したエネルギー汎関数法に基づいて磁気流体力学安定性解析コード MARG2D の拡張を行った。すなわち、プラズマと導体壁との間の真空磁場エネルギー並びに導体の外側の真空磁場エネルギーを計算するモジュールを開発、およびプラズマ中に発生する MHD モードが導体壁中に誘起する渦電流の時間発展 (Faraday の法則) を記述する二次形式を求めるモジュールを開発を行った [3]。これにより、トカマクにおける抵抗性壁モード解析が可能となった。エネルギー汎関数法は、プラズマと外界との電磁的相互作用が明快に分離するので、プラズマの圧力の変化による抵抗性壁モードの応答を高速に計算でき、それゆえ核燃焼プラズマの統合シミュレーションに組み入れる上で有利であるという特徴を持つ。

次に (3) に関しては回転プラズマ中での外部揺動に起因する磁気島成長の理論・シミ

ュレーション研究を行い、アルフベン共鳴面（プラズマの回転速度がアルフベン波の速度と一致する面）の重要性を発見した。すなわち、外部駆動磁気島の初期成長段階では、磁気島が形成される共鳴面よりも外側にアルフベン共鳴による電流シートが形成され、この電流シート分布が、プラズマ回転の減衰とともに通常の共鳴面に形成されている磁気島のX・点及びO・点の近傍でピークを持つようになり、その後、磁気島の突発的な成長を引き起こすことをシミュレーションによって示し[1,4]、突発的な磁気島成長に関する新たな物理機構を提示した。また、MHD現象の解析・シミュレーションモデルの開発において、完全陰解法の応用研究を進め[5]、従来の漸近接続法に対して数値解法的に有利な新しい接続法が提案された[2]。

成果リスト

論文

- [1] Y. Ishii and A. Smolyakov, Formation and long term evolution of externally driven magnetgic island in rotating plasmas, submitted to Plasma and Fusion Res.
- [2] Y. Kagei and S. Tokuda, A Numerical Matching Scheme for Linear MHD Stability Analysis, Submitted to Plasma and Fusion Res.

学会発表等

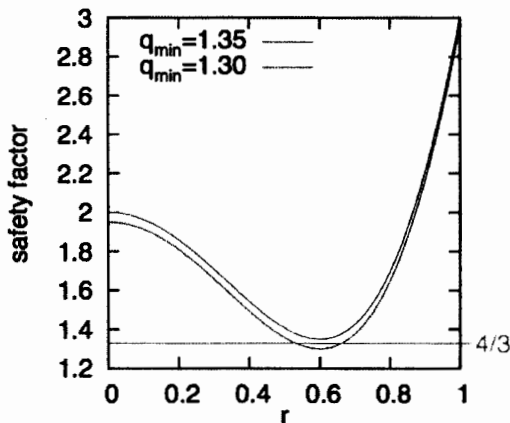
- [3] S. Tokuda, Progress in the numerical methods for linear ideal MHD stability analysis of a tokamak, 2nd Japan-Korea workshop on ‘Theory and Simulation of Magnetic Fusion Plasmas’ combined with 6th Burning Plasma Simulation Initiative(BPSI) meeting、平成19年8月6-8日、九州大学応用力学研究所
- [4] Y. Ishii, Plasma Rotation Effects on the Driven Magnetic Island Evolution, 2nd Japan-Korea workshop on ‘Theory and Simulation of Magnetic Fusion Plasmas’ combined with 6th Burning Plasma Simulation Initiative(BPSI) meeting、平成19年8月6-8日、九州大学応用力学研究所
- [5] 影井康弘、徳田伸二、MHD発展方程式への変分原理の応用、第24回プラズマ・核融合学会年会（平成19年11月28日、姫路市）

1. はじめに

核燃焼プラズマにおいては、時間尺度および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。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。本研究では、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。これにより輸送障壁形成の機構解明をめざす。また、多スケール乱流シミュレーションを粒子・流体ハイブリッド乱流モデルや第一原理に基づいて行い、飽和機構の解明や輸送係数の評価をめざす。さらに階層シミュレーションに適した計算機アルゴリズムの開発や並列化も併せて行っていく予定である。

2. ITG 乱流による内部輸送障壁崩壊機構の研究

乱流の非局所的な効果を調べるため、輸送・乱流・帯状流のマルチスケール間相互作用を取り扱うことのできるグローバル ITG コードの開発を行っているが、このコードを用いて反転磁気シャー配位における内部輸送障壁崩壊機構の研究を行った[9]。非常に興味深い結果が得られたのでそのエッセンスを報告する。安全係数が最小となる場所が有利面をもつ場合と持たない場合の2つのケースを調べた結果（図参照）、その有無にかかわらず、その近傍において(4,3)モードが励起されそれが輸送障壁を崩壊させることがわかった。



非共鳴の場合、ITG モードの3波結合により mediator mode（仲介モード）が励起される。このモードは安全係数が最小となる場所から離れたところに現れる。このシミュレーションの例では(7,4)と(11,7)がプラズマコアとコアと輸送障壁の中間領域に現れる。それらのメゾスケールの構造が3波結合により(4,3)モードを輸送障壁近傍に励起し、その振幅が増大するにつれて輸送障壁が崩壊する。共鳴する場合は mediator mode を介さないエネルギーのチャンネルが存在するため、崩壊が起こる時間が早くなる。この場合

(4,3)モードは ITG モード(30,20)と(34,23)の3波結合により直接、励起される。その後、(11,7)モードが(4,3)と(15,10)の3波結合により励起され、その結果、(7,4)モードが(11,7)と(4,3)の3波結合により励起される。その後の崩壊プロセスは非共鳴の場合と同じである。ITB foot は崩壊後、しばらく維持されるがこれはその近傍の速度シャーによる ITG モードの安定化に関係している。安定性が維持できなくなると ITB foot が崩壊し、温度の緩和によってリミットサイクル的な温度のバースト現象が起こる。このような非局所効果により輸送障壁が崩壊する可能性を示したのは本研究が初めてであり、マルチスケール相互作用の重要性を提示できたことは特定研究の大きな成果と言えよう。

3. 研究組織

研究代表者

九州大学応用力学研究所 矢木雅敏

研究協力者

京都大学 岸本泰明、J.Q. Li、鶴沢憲、三木一弘、Johan Anderson

日本原子力研究開発機構 宮戸直亮、井戸村泰宏、鈴木喜雄、松本太郎

核融合科学研究所 石澤明宏、渡辺智彦、洲鎌英雄

海洋研究開発機構地球シミュレータセンター 陰山聡、草野完也

九州大学総合理工学府 徳永晋介、西村征也

参考文献・講演

- [1] A. Smolyakov, P. Diamond, M. Yagi, K. Itoh, and S.-I. Itoh, Turbulent Stabilization of Neoclassical Tearing Modes, *J. Phys. Soc. Jpn.* **76** (2007) 113501.
- [2] M. Yagi, S.-I. Itoh, K. Itoh, M. Azumi, P. H. Diamond, A. Fukuyama and T. Hayashi, Nonlinear Drive of Tearing Mode by Microscopic Plasma Turbulence, *Plasma Fusion Res.* **2** (2007) 025(1-9)
- [3] S. Nishimura, M. Yagi, S.-I. Itoh, M. Azumi and K. Itoh, Thermal Transport Effects on Drift-Tearing Mode, *J. Phys. Soc. Jpn. Vol.76 No. 6* (2007) 064501(1-7)
- [4] N. Kasuya, M. Yagi, M. Azumi, K. Itoh and S.-I. Itoh, Numerical Simulation of Resistive Drift Wave Turbulence in a Linear Device, *J. Phys. Soc. Jpn. Vol.76 No.4* (2007) 044501(1-12)
- [5] M. Ignatenko, M. Azumi, M. Yagi, S. Shinohara, S.-I. Itoh and K. Itoh, Numerical Study of Neutral Gas Transport in Linear Plasma Device, *Jpn. J. App. Phys. Vol.46 Part1 No.4A* (2007) 1680-1691
- [6] M. Yagi, S.-I. Itoh, K. Itoh and P. H. Diamond, Disparate scale nonlinear interactions in edge turbulence (Review talk), 11th International workshop on Plasma Edge Theory in Fusion Devices (2007/05/23, Takayama, Japan)
- [7] S. Tokunaga, M. Yagi, S.-I. Itoh and K. Itoh, Multi-scale Transport Simulation with Ion Temperature Gradient Driven Drift Wave Turbulence, The 2nd Japan-Korea Workshop on Theory and Simulation of Magnetic Fusion Plasmas, Kyushu University, 2007/08/6-8, RIAM, Fukuoka
- [8] S. Nishimura, M. Yagi, S.-I. Itoh and K. Itoh, Poloidal Flow Generated by Drift-Tearing Mode, The 2nd Japan-Korea Workshop on Theory and Simulation of Magnetic Fusion Plasmas, Kyushu University, 2007/08/6-8, RIAM, Fukuoka
- [9] S. Tokunaga, M. Yagi, S.-I. Itoh and K. Itoh, Multi-scale transport simulation with ion temperature gradient driven drift wave turbulence, 11th IAEA Technical Meeting on H-mode Physics and Transport Barriers, September 26-28, 2007, Tsukuba
- [10] M. Yagi and BPSI group, Status of BPSI activity in Japan, 13th ITPA Confinement Database and Modeling TG meeting, JAEA Naka, Japan, 1-3 Oct. 2007
- [11] M. Yagi, S.-I. Itoh and K. Itoh, Multi-scale interaction between drift wave and NTM, US-Japan workshop on MHD Behavior and Control of Burning Plasma, Naka, JAEA, 25-29, Feb. 2008.

核燃焼プラズマ統合コードにおける周辺プラズマモデリング

日本原子力研究開発機構 核融合研究開発部門 滝塚知典

・ 目的

核燃焼プラズマにおいては、時間尺度および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。特に開いた磁場構造を有する周辺プラズマ領域は、閉磁気面に閉じ込められた中心プラズマと大きく異なる物理機構に支配されながら、中心プラズマ領域と強く相互に影響を及ぼしあっている。また、周辺プラズマのダイバータは核燃焼プラズマにおける粒子と熱の制御には不可欠なものである。本研究では、これまでに大学・研究所において開発されてきた周辺プラズマシミュレーションコード群をモジュールとして、核燃焼プラズマ統合コードに統合化することを目標とする。コード群には大規模シミュレーションコードも含まれており、これらのコードについては直接的統合化は現状では困難である。したがって、大規模シミュレーション結果に基づいて、統合コードのための周辺プラズマモデリングを構築することも本研究の目的である。

このプロジェクトは九州大学応用力学研究所（矢木）が中心となって進めている核燃焼プラズマ統合コード計画（Burning Plasma Simulation Initiative）の主要な一環をなすものである。共同研究として申請するものである。また、この研究課題で扱っている原子力機構開発のダイバータシミュレーションコードは、応用力学研究所で計画されているST装置のダイバータ設計に活用されており、この共同研究の意義は大きい。

・ 研究方法

- 1) 粒子シミュレーションによる周辺プラズマモデリングのための基礎物理データベース作成
- 2) 大規模ダイバータシミュレーションによる周辺プラズマモデリングのためのダイバータシミュレーションデータベース作成
- 3) 基礎物理データベースに基づいた周辺プラズマモデリングの構築
- 4) ダイバータシミュレーションデータベース及びダイバータ実験データベースに基づいた周辺プラズマモデリングの構築
- 5) 統合コードのための周辺プラズマ簡易コードの開発
- 6) 周辺プラズマ簡易コードを統合化した核燃焼プラズマ統合コードによるシミュレーション
- 7) 大規模ダイバータシミュレーションコードと核燃焼プラズマ輸送コードへのインターフェース開発

・ 研究の経過報告

- 1) 先進的粒子コード PARASOL（原子力機構）を用いて、ELM 崩壊により SOL 領域に流出する粒子と熱の過渡的な伝搬についてシミュレーションを行い、運動論的效果および径方向損失効果による熱輸送特性について調べた[3,6,28]。また 2 次元トロイダル PARASOL コードにより、SOL に囲まれたトカマクプラズマにおける電場形成についてシミュレーションを行い、ラーマー半径効果とバナナ巾効果を明らかにした[33]。核融合研/Innsbruck 大協力研究による粒子シミュレーションで、シースを含むプラズマと壁との遷移領域を詳しく調べた[17]。ジャイロ運動論モデルシミュレーション（京大）と粒子シミュレーション結果を比較しつつイオンの壁入射特性を定量的に調べた[13]。モンテカルロ法による中性粒子輸送シミュレーションについては、NEUT2D（原子力機構）[6,8,21,27,29]、DEGAS（筑波大）[11,34]、ENRENE（慶應大）[14,25] を用いて研究を進めている。またモンテカルロ法を用いた不純物輸送シミュレーションについては、IMPMC（原子力機構）では新モデル

を開発し非定常問題への拡張が成功した[7,20]。また IMPGYRO (慶応大学)では高 Z 不純物の輸送研究を進めている[19,24]。

2) 統合ダイバータコード SONIC (原子力機構)は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 を無撞着に結合したものである。この SONIC コードを用いた統合シミュレーションで JT-60U 中の MARFE の形成を再現することが出来た[20,29]。不純物輸送は簡易放射冷却モデルを採用した SOLDOR/NEUT2D 結合コードを用いて、JT-60U のダイバータ実験解析および JT-60SA ダイバータ予測シミュレーションを行い中性粒子輸送に密接に関連するダイバータ密度制御特性を調べた[8,21,27,29]。また DEMO 炉における熱と粒子制御についてもシミュレーション研究を始めた[29]。慶應大では SOLPS5.0 を用いて、SOL ダイバータプラズマにおけるドリフトの重要性を調べた[14,25]。また原子力機構と慶應大と協力して、それぞれのダイバータコードのベンチマークを進めている[5,14,16]。

3) ダイバータ板近傍におけるダスト粒子の振るまいについて、理論および粒子シミュレーションにより基礎的物理解特性を調べた[2,10,23]。

4) PARASOL シミュレーションの結果から、流体モデルに適用できるいくつかの物理モデルの解析的表現を提示してきた。原子力機構において、この物理モデルを採用しつつ ELM の熱流を記述できる動的ポイントモデルを開発した[15,22,35]。

5) 電中研は慶應大はと協力して簡易 SOL-ダイバータポイントモデルを開発している。ポイントモデルを非接触ダイバータまで拡張し、さらに 0 次元コアプラズマと結合することにより、次期トカマク装置の運転領域最適化を行なった[12]。

6) 原子力機構においては、コアプラズマ輸送と周辺プラズマ輸送とを統合的にシミュレーションするために TOPIC-IB コードの開発を進めている。SOL プラズマの輸送には動的ポイントモデルを採用して、ELM による閉じ込めエネルギー損失をシミュレーションし、損失機構の解明とエネルギー損失割合の定量評価に成功した[1,15,22,31,32,35]。

7) 大規模ダイバータシミュレーションコードと核燃焼プラズマ輸送コードを結合するための実質的な作業会を開催した。

- (1) 平成 19 年 10 月 11-12 日 ; 京大 (BPSI 研究会)
- (2) 平成 19 年 8 月 8 日 ; 九大応力研 (日韓WS後 BPSI 研究会)
- (3) 平成 20 年 1 月 23-24 日 ; 核融合研 (核融合研共同研究)
- (4) 平成 20 年 2 月 6 日 ; 核融合研 (核融合研共同研究会)

・研究成果報告

- [1] N. Hayashi, T. Takizuka, N. Aiba, T. Ozeki, N. Oyama, "Integrated Simulation of ELM crash with Dynamic Response of SOL-Divertor Plasmas", 3rd IAEA Technical Meeting on the Theory of Plasma Instabilities, 26-28 March 2007, University of York, U.K.
- [2] Y. Tomita, R. Smirnov, T. Takizuka, D. Tskhakaya, "Charging of a Spherical Dust Particle on a Plasma-Facing Wall". J. Plasma Phys. 72 (2006) 1015.
- [3] T. Takizuka, M. Hosokawa, "Dynamics of SOL-Divertor Plasmas after an ELM Crash in Tokamak H-mode Plasma", Trans. Fusion Sci. Technol. 51 (2007) 271.
- [4] T. Takizuka, A. Fukuyama, "Integrated Modeling Activities in Japan", 12th ITPA CDBM TG meeting, 7-10 May 2007, EPFL, Lausanne, Switzerland.
- [5] H. Kawashima, D. Coster, K. Shimizu, K. Hoshino, X. Bonnin, N. Asakura, A. Hatayama, T. Takizuka, A. Kukushkin, Y. Suzuki and JT-60 Team, SOLPS5.0 and SOLDOR/NEUT2D Modelings of JT-60U Discharge, ITPA D-SOL TG meeting, 7-10 May 2007, IPP-Garching,

Germany.

- [6] T. Takizuka, N. Oyama, M. Hosokawa, Effect of Radial Transport Loss on the Asymmetry of ELM Heat Flux, 11th Int. Workshop on Plasma Edge Theory in Fusion Devices, 23–25 May 2007, Takayama, Japan; to be published in *Contrib. Plasma Phys.* **48** (2008).
- [7] K. Shimizu, T. Takizuka, H. Kawashima, "Extension of IMPMC Code toward Time Evolution Simulation", *ibid.*; to be published in *Contrib. Plasma Phys.* **48** (2008).
- [8] H. Kawashima, K. Shimizu, T. Takizuka, "Analysis of Particle Pumping Using SOLDOR/NEUT2D Code in the JT-60U Tokamak", *ibid.*; to be published in *Contrib. Plasma Phys.* **48** (2008).
- [9] M. Yagi et al., P. Diamond, "Disparate Scale Nonlinear Interactions in Edge Turbulence", *ibid.*; to be published in *Contrib. Plasma Phys.* **48** (2008).
- [10] Y. Tomita, R. Smirnov, T. Takizuka, D. Tskhakaya, "Effect of Oblique Magnetic Field on Release Conditions of Dust Particle from Plasma-Facing Wall", *ibid.*; to be published in *Contrib. Plasma Phys.* **48** (2008).
- [11] Y. Nakashima et al., "Neutral Transport Analysis in Non-Axisymmetric Plasma Confining System Based on a Monte-Carlo Simulation", *ibid.*; to be published in *Contrib. Plasma Phys.* **48** (2008).
- [12] R. Hiwatari, A. Hatayama, T. Takizuka, "Application of Simple Core-SOL-Divertor Model to Detached Divertor Plasma Operation", *ibid.*; to be published in *Contrib. Plasma Phys.* **48** (2008).
- [13] G. Kawamura, A. Fukuyama, "Gyrokinetic Approach to the Sheath Formation in a Magnetized Plasma", *ibid.*; to be published in *Contrib. Plasma Phys.* **48** (2008).
- [14] K. Hoshino, A. Hatayama, D. Coster, X. Bonnin, R. Schneider, H. Kawashima, N. Asakura, Y. Suzuki, "Benchmarking Kinetic and Fluid Neutral Models with Drift Effects", *ibid.*; to be published in *Contrib. Plasma Phys.* **48** (2008).
- [15] N. Hayashi, T. Takizuka, N. Aiba, T. Ozeki, N. Oyama, "Integrated ELM Simulation with Edge MHD Stability and Transport of SOL-Divertor Plasmas", *ibid.*; to be published in *Contrib. Plasma Phys.* **48** (2008).
- [16] Y. Suzuki, H. Kawashima, D.P. Coster, S. Sakurai, K. Shimizu, T. Takizuka, "Simulation Study of Radiative Cooling in the Divertor on JT-60 Super Advanced (JT-60SA)", *ibid.*; to be published in *Contrib. Plasma Phys.* **48** (2008).
- [17] D. Tskhakaya, S. Kuhn, Y. Tomita, et al., "Self-consistent Simulations of the Plasma-Wall Transition Layer", *ibid.*; to be published in *Contrib. Plasma Phys.* **48** (2008).
- [18] K. Itoh, S. Toda, A. Fujisawa, S.-I. Itoh, M. Yagi, A. Fukuyama, "Turbulent Transport of Poloidal Momentum and Bifurcation", *ibid.*
- [19] K. Hoshino, M. Noritake, A. Fukano, A. Hatayama, "High-Z Impurity Transport Code by Monte Carlo Method in a Realistic Tokamak Geometry –IMPGYRO–", *ibid.*; to be published in *Contrib. Plasma Phys.* **48** (2008).
- [20] K. Shimizu, T. Takizuka, H. Kawashima, "A New Fast Velocity-Diffusion Modelling for Impurity Transport in Integrated Edge Plasma Simulation", *J. Nucl. Mater.* **363–365** (2007) 426.
- [21] H. Kawashima, K. Shimizu, T. Takizuka, et al., "Simulation of Divertor Pumping in JT-60U with SOLDOR/NEUT2D Code", *J. Nucl. Mater.* **363–365** (2007) 786.
- [22] N. Hayashi, T. Takizuka, M. Hosokawa, "Modelling of Dynamic Response of SOL-Divertor Plasmas to an ELM Crash", *J. Nucl. Mater.* **363–365** (2007) 1044.
- [23] Y. Tomita, R. Smirnov, H. Nakamura, S. Zhu, T. Takizuka, D. Tskhakaya, "Effect of Truncation of Electron Velocity Distribution on Release of Dust Particle from Plasma-Facing Wall", *J. Nucl. Mater.* **363–365** (2007) 264.
- [24] K. Hoshino, R. Yamazaki, A. Hatayama, "Modelling of Multi-Dimensional Impurity Transport in a Realistic Tokamak Geometry", *J. Nucl. Mater.* **363–365** (2007) 211.
- [25] K. Hoshino, A. Hatayama, N. Asakura, H. Kawashima, R. Schneider, D. Coster, "Numerical

Analysis of the SOL/Divertor Plasmas Flow with the Effect of Drifts", J. Nucl. Mater. **363-365** (2007) 539.

- [26] Y. Nakashima et al., "Edge Plasma Behavior in the GAMMA 10 Tandem Mirror Based on Gas Puff Imaging Experiments with a High-Speed Camera", J. Nucl. Mater. **363-365** (2007) 616.
- [27] H. Kawashima, K. Shimizu, T. Takizuka, "Development of Integrated SOL/Divertor Code and Simulation Study of the JT-60U/JT-60SA", Plasma Phys. Control. Fusion **49** (2007) S77.
- [28] T. Takizuka, N. Oyama, M. Hosokawa, "PARASOL Simulation of the ELM Heat Flux in SOL-Divertor Plasmas", 2nd Japan-Korea workshop on Theory and Simulation of Magnetic Fusion Plasmas, 6-8 August 2007, RIAM, Kyushu University, Kasuga.
- [29] T. Takizuka, K. Shimizu, H. Kawashima, "Prediction for Divertor Performance of JT-60SA and DEMO Reactor (SlimCS) with SONIC Simulation", *ibid.*
- [30] M. Honda, T. Takizuka, A. Fukuyama, T. Ozeki, "Present Status of Dynamic Transport Code, TASK/TX", *ibid.*
- [31] N. Hayashi, T. Takizuka, N. Aiba, T. Ozeki, N. Oyama, "Simulation Study of Pressure Profile Effect on the ELM Energy Loss with TOPIC-IB", *ibid.*
- [32] N. Hayashi, T. Takizuka, N. Aiba, T. Ozeki, N. Oyama, "Integrated Simulation of ELM Energy Loss Determined by Pedestal MHD and SOL Transport", Nucl. Fusion **47** (2007) 682.
- [33] T. Takizuka, M. Hosokawa, "Two-Dimensional Full Particle Simulation of the Formation of Electrostatic Field in a Tokamak Plasma", 11th IAEA Technical Meeting on H-mode Physics and Transport Barriers, 26-28 September, Tsukuba.
- [34] N. Asakura, H. Kawashima, et al., "ELM Propagation in the High-Field Side Scarape-Off-Layer of the JT-60U ", *ibid.*
- [35] N. Hayashi, T. Takizuka, N. Aiba, T. Ozeki, N. Oyama, "Simulation Study of Density Effect on the ELM Behavior with TOPIC-IB", *ibid.*
- [36] S. Tokunaga, M. Yagi, S.-I. Itoh, K. Itoh, "Multi-Scale Transport Simulation with Ion Temperature Gradient Driven Drift Wave", *ibid.*
- [37] Y. Nakashima et al., "Three-Dimensional Neutral Transport Simulation during Transport Barrier Formation in the JT-60U Plasmas", *ibid.*

・ 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	研究副主幹	代表者/モデリング・粒子シミュレーション
畑山 明聖	慶応大	教授	ダイバータモデリング・シミュレーション
富田 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
中嶋 洋輔	筑波大	准教授	ペDESTALモデリング
川島 寿人	原子力機構	研究主幹	ダイバータシミュレーション
高山 有道	核融合研	助教	周辺プラズマシミュレーション
日渡 良爾	電中研	主任研究員	周辺プラズマ輸送モデリング・シミュレーション
河村 学思	京大	D3	境界層プラズマ粒子シミュレーション
矢木 雅敏	九大	教授	所内世話人

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り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

- 核燃焼プラズマ統合コードにおける標準データセットと要素間インターフェースの開発
- 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イオンサイクロトロン波加熱の統合シミュレーション
- 有限ラーモア半径効果を取り入れた積分方程式による波動伝播解析
- 中性粒子ビーム加熱と高速イオン閉じ込めのシミュレーション

研究結果

1. **要素間連携機能**: 要素間の連携を容易に実現するため、データ交換用標準データセットおよび標準インターフェースを BPSD として定義し、従来のように TASK/PL の一部としてではなく、独立した実装を実現した。さらに実行制御用標準インターフェース BPSX について、一体型実装と独立型実装について検討を行い、部分的な実装を行った。
2. **統合シミュレーション**: 統合輸送コード TASK を用いて、ITER ハイブリッドシナリオのシミュレーションを行った。
3. **輸送解析**: 流体型輸送解析要素 TASK/TX を開発し、プラズマ回転および径方向電界の時間変化を含めた輸送シミュレーションを行い、リップル損失に伴うプラズマ回転の解析を行った。
4. **波動加熱解析**: 波動伝播解析要素 TASK/WM の計算手法を改良し、速度分布関数の変形を含めたイオンサイクロトロン波少数イオン加熱の解析を行った。
5. **波動伝播解析**: 有限ラーモア半径効果を取り入れた運動論的誘電率テンソルを積分形で記述する定式化を 1 次元スラブ配位から 3 次元トーラス配位に拡張し、TASK/WM への実装を行った。
6. **NBI 加熱解析**: JAEA において開発された NBI 解析要素 TOPICS/NBI ならびに核融合研で開発された FIT3D を TASK に組み込み、NBI 加熱を伴う輸送シミュレーションを行った。

考察

モジュール間連携機能の標準化、原子力機構により開発されている統合コード TOPICS との連携、波動加熱の統合化等により、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、さらに解析要素の機能強化や新規開発、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. A. Fukuyama: Integrated Full Wave Analysis of ICRF Waves in Burning Plasmas, 17th Topical Conference on Radio Frequency Power in Plasmas (Clearwater, FL, USA, 2007-05-07)
2. A. Fukuyama: Code Interface Development Activities in Japan, 12th Meeting of the ITPA CDBM Topical Group (Lausanne, Switzerland, 2007-05-09)
3. A. Fukuyama: Integrated Modeling of Steady State Scenarios for ITER Using the TASK Code, 5th IAEA Technical Meeting on Steady State Operation of Magnetic Fusion Devices (Daejeon, South Korea, 2007-05-16) PO_SS.1
4. M. Honda, A. Fukuyama: Dynamic Transport Simulation Including Plasma Rotation and Radial Electric Field, 11th International Workshop on Plasma Edge Theory in Fusion Devices (Takayama, Japan, 2007-05-23) P1-11
5. 福山淳, 矢木雅敏: 核燃焼プラズマ統合コード計画, 九州大学 応力研フォーラム (九州大学 春日, 2007-06-14)
6. A. Fukuyama: Integrated Modeling of Toroidal Plasmas and Standard Component Interfaces, 2nd Korea-Japan Workshop on Theory and Simulation of Magnetic Fusion Plasmas (RIAM, Kyushu U, Kasuga, 2007-08-06)
7. A. Fukuyama: Integration Strategy of the TASK Code, ITER Integrated Modelling Workshop on Component Interface (Cadarache, France, 2007-09-10)
8. A. Fukuyama: Standard Data Structure and Interface of BPSD, ITER Integrated Modelling Workshop on Component Interface (Cadarache, France, 2007-09-10)
9. 奴賀秀男, 福山淳: 速度分布関数の時間発展を含めた波動による加熱・電流駆動の解析, 第24回プラズマ・核融合学会年会 (イーグレひめじ, 2007-11-30) 30aC36P
10. 福山淳: TASKのモジュール構造と適用例, PWIとシミュレーション研究に関する合同会合 (核融合研, 2008-02-06)
11. A. Fukuyama: Full Wave Analysis in Toroidal Plasmas by the TASK Code, US-Japan Workshop on RF Physics (PPPL, NJ, USA, 2008-02-27)
12. 奴賀秀男, 福山淳: 速度分布関数の時間発展を含めたイオンサイクロトロン波加熱の解析, 日本物理学会第63回年次大会 (近畿大学, 2008-03-25) 25pQF-12
13. 福山淳, 奴賀秀男: トロイダルプラズマにおける波動伝播の積分方程式による解析, 日本物理学会第63回年次大会 (近畿大学, 2008-03-25) 25pQF-13
14. M. Honda, A. Fukuyama, Dynamic transport simulation code including plasma rotation and radial electric field, Journal of Computational Physics, 227(5), 2808-2844 (2008)

研究組織

氏名	所属	職名等	役割・担当分野
福山 淳	京都大学	教授	代表者
村上 定義	京都大学	助教授	加熱解析
中村 祐司	京都大学	助教授	輸送解析
河村 学思	京都大学	D3	輸送解析
奴賀 秀男	京都大学	D1	輸送解析
出射 浩	九大応力研	助教授	電流駆動解析
滝塚 知典	原子力機構	研究副主幹	輸送解析
濱松 清隆	原子力機構	研究主幹	加熱解析
林 伸彦	原子力機構	研究員	輸送制御解析
本多 充	原子力機構	博士研究員	輸送解析

プラズマ輸送理論

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]を概観する。プラズマのダイナミ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

$$\frac{\partial}{\partial t} f + \mathcal{L}^{(0)} f = \mathcal{N}(f) \quad (1)$$

と書こう。ここで $\mathcal{L}^{(0)}$ は線形演算子、 f は揺動場(例えば $f = (\phi, J, p)^T$)、 $\mathcal{N}(f)$ は非線型項をあらわす。

- (1) 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。

$$\mathcal{N}(f) = -\Lambda f + \tilde{S} \quad (2)$$

- (2) コヒーレントな効果に着目し、方程式

$$(\mathcal{L}^{(0)} + \Lambda) f = 0 \quad (3)$$

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。

- (3) 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。

従来より本体系によって研究成果をあげている。今年度の特筆すべき成果から例を挙げれば、乱流ノイズによる巨視的なモードの統計的励起と、それに起因する状態遷移確率、高閉じ込め状態の寿命を求めた。乱流が多スケールである場合の体系化を進め、メゾスケール揺動と微視的揺動の共存する系の乱流理論を一段と推進した。その典型的な例である zonal flow の総合報告を拡張し、輸送解析コードに取り入れる形への定式化を進めた事などがあげられる。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。

帯状流を着た乱流による輸送係数

メゾスケール揺動と微視的揺動の共存する系の乱流理論の進展と輸送解析コードへの応用を進めている。上記方法論のレベル(2)を適用したものについて多くの成果が得られている。プラズマ密度のようなスカラー量の異常輸送についての研究例[2]を昨年度報告したが、ベクトル場の輸送問題に拡張した成果[3]を紹介する。

乱流輸送係数については、ドリフト波が帯状流と共存し、エネルギーが帯状流との間

で分配される。すなわち、ドリフト波（波数 k 、振幅 ϕ_d ）があると、その波のモジュレーション（波数 $q_x \hat{x}$ ）が増幅される。（ \hat{x} は密度勾配方向の単位ベクトル。）モジュレーション（振幅 ϕ_Z ）が加わると、 $k_{\pm} = k \pm q_x \hat{x}$ の波数を持つビート・モードが生まれる。ビート・モードもとの波は、波数 $q_x \hat{x}$ を持つ変動（振幅 $\delta\phi_Z \propto \phi_d^2 \phi_Z$ ）を生む。 $\delta\phi_Z$ が ϕ_Z と同符号なのでモジュレーションは成長する。成長率は

$$\gamma_Z = q_r^2 D_{rr}, \quad D_{rr} = -\frac{c^2}{B^2} \int d^2k \frac{k_{\theta}^2 k_r}{\Delta\omega_k} (1 + k_{\perp}^2 \rho_s^2)^{-2} \frac{\partial N_k}{\partial k_r} \quad (1)$$

となる（ N_k と $\Delta\omega_k$ はドリフト波のアクションスペクトル及び非相関率、 ρ_s はイオン・ラーマー半径）。

この結果からは、巨視的な速度不均一も乱流により拡散型の波数依存性（ q_r^2 ）を持って増幅される様に見える。乱流による巨視的スケールの運動量の輸送（乱流粘性の問題）を考えるには、このレベルの理論では不十分であることが分かる。そのために、帯状流の高次の非線形効果を繰り込んだ乱流粘性の理論を構成する。速度場を $V = V_L + V_Z$ （ V_L : 巨視的な流れ V_Z : 帯状流）、 $U = dV/dx$ を渦度とする。

$$\frac{\partial}{\partial t} U + D_{rr} \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} U + K_0^{-2} \frac{\partial^4}{\partial r^4} U \right) - D_3 \frac{\partial^2}{\partial r^2} U^3 - \mu_{\parallel} (1 + 2q^2) \frac{\partial^2}{\partial r^2} U = 0, \quad (2)$$

$$D_3 \sim k_{\theta}^2 K_0^{-2} (1 - \mu)^{-1} \Delta\omega_k^{-2} D_{rr} \quad K_0^2 = \Delta\omega_k^2 (\partial\omega/\partial k_r)^{-2}$$

帯状流がより速い時定数で非線型定常状態 $U_Z = U_m$ に達するので、巨視的な流れは

$$\frac{\partial}{\partial t} U_L + D_{rr} (1 - \mu) \frac{\partial^2}{\partial r^2} U_L - 3D_3 U_m^2 \frac{\partial^2}{\partial r^2} U_L = 0, \quad (3)$$

にしたがって発展する。（ μ は1より小さな数係数。）帯状流の非線型定常振幅 $U_m^2 = (3/4) (1 - \mu) D_{rr} / D_3$ を(3)式に代入すれば、巨視的な流れは[(3)式左辺第二項のみを考えると $-(1 - \mu) D_{rr}$ という負の粘性に支配されるように見えるが] $5(1 - \mu) D_{rr} / 4$ という正の粘性係数によって減衰することが分かる。

この結果は、微視的乱流と帯状流の非線型結合の研究が重要であることを示しており、実験的観測法についても[4]に最先端の展望を報告した。

参考文献

- [1] S.-I. Itoh: J. Plasma Fusion Res. Vol.83 No.3 (2007) 241
- [2] K. Itoh, S.-I. Itoh, P. H. Diamond, T. S. Hahm, A. Fujisawa, G. R. Tynan, M. Yagi and Y. Nagashima: Phys. Plasmas 13 No. 5 (2006) 055502
- [3] K. Itoh, S. Toda, A. Fujisawa, S.-I. Itoh, M. Yagi and A. Fukuyama: J. Phys. Soc. Jpn. 76 (2007) 084502
- [4] K. Itoh, A. Fujisawa, Y. Nagashima, S.-I. Itoh, M. Yagi, P.H. Diamond, A. Fukuyama and K. Hallatschek: On Imaging of Plasma Turbulence, Plasma Fusion Res. 2 (2007) S1003

タングステン中の水素拡散・捕捉挙動に及ぼすヘリウムイオン同時照射の効果

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・捕捉挙動は、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（プリスタリング等も含む）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わかっていない。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、水素イオン、ヘリウムイオン、及び壁材料イオン（炭素）を同時照射し、材料中の水素吸蔵量や、水素挙動に影響を及ぼすヘリウムバブルの形成過程、水素の捕捉に伴って生じるプリスタリングへの影響を調べる。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

平成 19 年度は、水素・炭素とヘリウムの同時照射を行ったタングステン試料に対して、TEM による微細組織観察を行い、He バブルの発生の確認とその特徴について詳細に測定を行った。また、水素・炭素混合イオンビームとヘリウムイオンビームのエネルギーを変えてタングステンに同時照射し、プリスタリングの発生に及ぼす相対的エネルギーの影響を調べた。

イオン照射試料を TEM 観察した結果を図 1 に示す。イオンビーム中の He イオン割合が 0.1%、及び 1.0% のどちらの場合においても、大きさ 1nm 程度のヘリウムバブルが観測された。図 1 で測定範囲は、タングステン表面から 20 nm 程度の厚さの領域であるが、He の飛程は 10 nm 程度であるため、形成されたヘリウムバブルの大部分が観測されている。また、深さ 15 nm 程度までは、タングステンと炭素の混合層となっているが、本測定からはこのような混合層にもヘリウムバブルが形成されることが明らかになった。

これらのヘリウムバブルが、タングステ

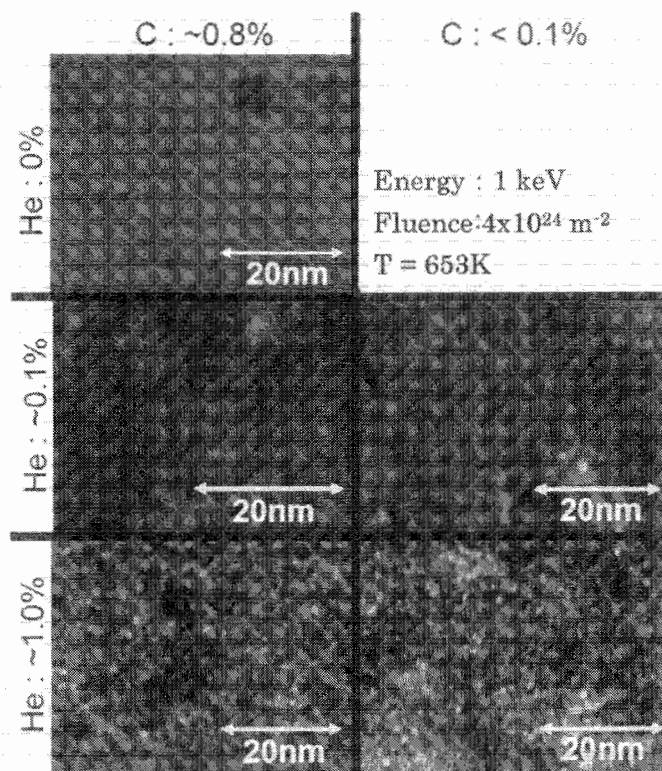


図 1 水素・炭素・ヘリウムを同時照射したタングステンの TEM による微細組織観察

ン中の体積を占有している割合は、TEM 測定層の厚みを 20 nm とすると約 2%であった。また、この値は、ヘリウムイオン割合が 0.1%と 1%でほとんど違いがなかった。水素炭素混合ビーム（炭素割合~0.9%）照射でプリスタリングが発生し、そこにヘリウムイオンを 0.1%混合しただけで、プリスタリングが抑制されることが昨年度の実験から明らかになっている。また、0.1%のヘリウムイオンで水素の内部へのフラックスが 1/3 以下に抑制されることが明らかになっている。これらより、わずかに 2%程度の体積率のヘリウムバブルにより、1/3 以下に水素のフラックスが抑制されることが明らかになり、ヘリウムバブルの拡散障壁効果を ITER のタングステン中におけるトリチウムの蓄積量の見積りに際して考慮することが必要である。

ヘリウムバブルが水素の透過に影響を与えるためには、ヘリウムバブルが水素の飛程より深いところに存在する必要がある。もし、ヘリウムバブルが水素の飛程より浅いところであれば、逆に水素の表面への拡散を抑制する可能性がある。従って、ヘリウムイオンと水素同位体イオンの飛程比を変えることでヘリウムバブルの効果は変化する可能性がある。このことを検証するために、水素イオンとヘリウムイオンのエネルギーを変えてタングステンに照射し、プリスタリングの発生を調べた。ここでは、水素イオンのエネルギーを 1.5 keV (H_3^+) とし、ヘリウムイオンのエネルギーを、1 keV と 0.6 keV に変化させた。そのときの飛程を図 2

に示す（ヘリウムイオンは試料垂直方向に対して、40 度の角度で入射）。この時、ヘリウムイオンが 0.6 keV の場合は、プリスタリングが発生したが、一方で 1.0 keV の場合は、プリスタリングが発生しなかった。これより、わずかなヘリウム飛程の違いで結果が異なることが分かった。従って、壁材料のトリチウム吸蔵に及ぼすヘリウム効果を正しく評価する場合には、水素同位体イオンとヘリウムイオンのエネルギー分布を知り、ヘリウムバブルの存在位置を正しく評価する必要があることが分かった。

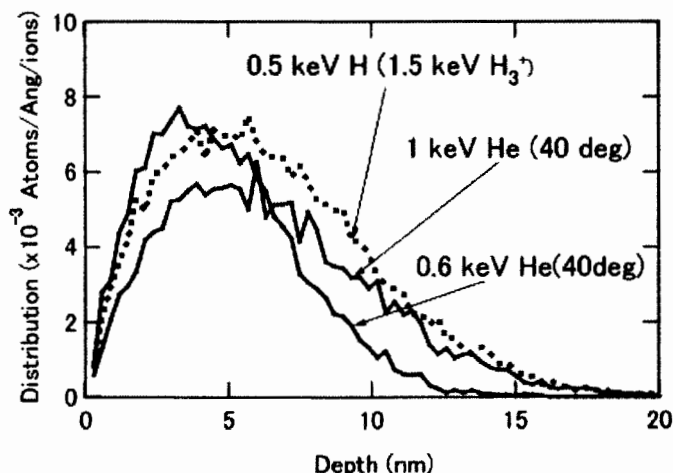


図 2 水素イオンとヘリウムイオンの飛程

・成果報告

○ 柏木紘典、福本正勝、大塚裕介、上田良夫、「水素・ヘリウム同時照射がタングステンに与える影響」プラズマ核融合学会 第 24 回年会 30aB20P、2007 年 11 月

○ Y. Ueda, M. Fukumoto, J. Yoshida, Y. Ohtsuka, R. Akiyoshi, H. Iwakiri, N. Yoshida “Simultaneous irradiation effects of hydrogen and helium ions on tungsten” presented at ICFRM13, December 2007.

・研究組織

上田良夫 (大阪大学)	教授	研究代表者
吉田直亮 (九州大学)	教授	
徳永和俊 (九州大学)	准教授	
栗下裕明 (東北大学)	准教授	
岩切宏友 (大阪大学)	助教	
福本正勝 (大阪大学)	D 2	
柏木紘典 (大阪大学)	M 2	

金属の損傷組織に及ぼすヘリウムと水素の影響
—鉄における刃状転位によるヘリウム拡散への影響—

京都大学原子炉実験所 徐 虬 佐藤紘一 義家敏正
九州大学応用力学研究所 岩切広友 渡辺英雄 吉田直亮

1. 目的

核融合炉開発のための技術の発展と共に、金属中のヘリウムの挙動についての研究が盛んになってきた。プラズマ対向材料中のヘリウムは核融合プラズマから材料表面に侵入するものと材料内部で核反応(n, α)により生成したものである。これらのヘリウム原子が中性子照射によって形成された原子空孔と結合し、材料のスエリングを起こし、材料の力学特性が劣化する。ヘリウムは α -Feの完全結晶中に拡散が非常に速く、移動エネルギーは0.08eVである。本研究では、分子動力学法により転位を含む実際のFe中のヘリウムの拡散挙動を調べる。

2. 計算方法

α -Feにおいては、分子静力学法により格子間原子型ヘリウムと刃状転位の結合エネルギーを調べた。図1に示すように $1/2[111]$ (0-11)バーガース・ベクトルを持つ刃状転位をセルに導入した。計算セルのx、y、z軸をそれぞれ $[111]$ 、 $[2-1-1]$ 、 $[0-11]$ 方向、また各軸の長さを $30\sqrt{3}a_0$ 、 $10\sqrt{6}a_0$ 、 $20\sqrt{2}a_0$ とした。 a_0 はFeの格子定数である。Fe、ヘリウム及びFe-ヘリウムの相互作用ポテンシャルはそれぞれAckland、WilsonとJohnson及びBeckのものを使った。ヘリウムと刃状転位の結合エネルギーの定義はFeの完全結晶中のヘリウムの形成エネルギーと刃状転位を含むFe結晶中のヘリウムの形成エネルギーの差である。Fe結晶中の格子間ヘリウム位置は八面体である。

3. 計算結果と考察

図2に(2-1-1)面にある八面体内の格子間ヘリウムと刃状転位の結合エネルギー分布を示す。刃状転位芯の位置は(0, 0.1)で、転位線は紙と垂直である。すべり面の上部に正の結合エネルギーで、最大2.26eVである。これは900Kにおいてもヘリウム原子が転位にトラップされることを示唆している。しかしながら、転位芯から離れると、結合エネルギーが急激に下がる。転位芯から $[111]$ 方向に0.5nm離れたところ、結合エネルギーは0.2eVとなる。これは77K液体窒素温度においてはヘリウム原子が転位から開放されると示している。一方、すべり面の下部における格子間ヘリウムと刃状転位の結合エネルギーは負となる。最も低いエネルギーは-0.38eVである。結合エネルギーの変化は格子間ヘリウムと刃状転位の相互作用の応力場に一致する。引張り応力場においては格子間ヘリウムが吸引される(結合エネルギーは正となる)のに対して、圧縮応力場においては格子間ヘリウムが排斥される(結合エネルギーは負となる)。図3に、結合エネルギーは正となることから転位芯近づくと、最初に八面体にある格子間ヘリウムは転位芯のところに再配列する様子を示している。

実際の材料中に殆どどの転位はジョグを含む。図4にジョグを含む刃状転位を示す。 $1/2[111]$ 転位の2原子面を持つジョグは(2-1-1)面にあり、転位線の方向は $[0-11]$ である。図5に格子間ヘリウムとジョグを含む刃状転位の結合エネルギーを示す。ジョグの位置破線で示されている。最高結合エネルギーはジョグのところで、2.87eVである。ジョグを含まない刃状転位と格子間ヘリウムの結合エネルギー2.26eVより高いことが分かった。これはジョグが純転位よりヘリウムの強いシンクであることを示している。その原因はジョグのところに引張り応力がもっと高いことである。その他、矢印を示すように $[2-1-1]$ 方向x軸の中心に転位pipeが存在され、転位pipe周辺に格子間ヘリウムとの結合エネルギーは約2.0eVである。

4. まとめ

分子動力学法により格子間ヘリウムとジョグを含まないと含む刃状転位の相互作用について調べた。結合エネルギーは格子間ヘリウムと刃状転位の弾性的作用によって決められる。ヘリウム原子が転位の引張り応力場にトラップされ、逆に圧縮応力場に排斥される。また、ジョグを含む刃状転位は格子間ヘリウムの最も強いシンクである。

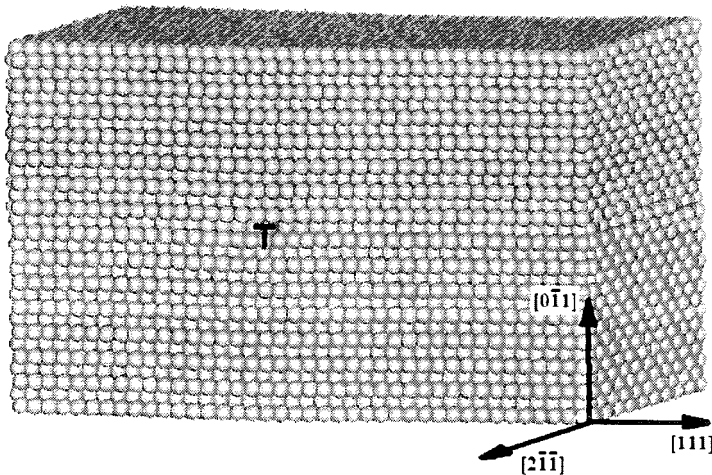


Fig. 1 Schematic of a $\frac{1}{2}[111]$ edge dislocation in a simulation cell.

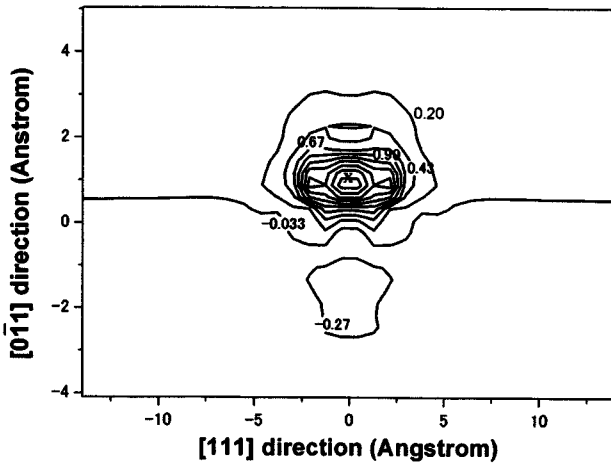


Fig. 2 Binding energy map of an interstitial He to a dislocation in the plane. The separation between contours is about 0.23 eV and the position denoted by the cross star is the maximum binding energy (2.26 eV).

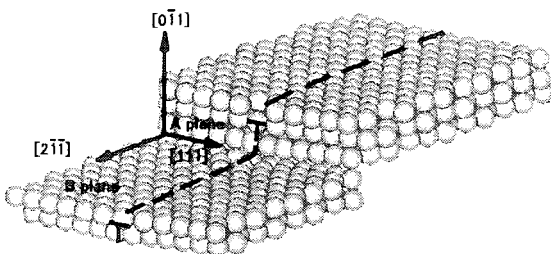


Fig. 4 Schematic of a $\frac{1}{2} [111]$ jog. Dashed line represents the dislocation line.

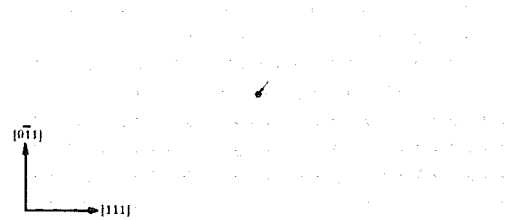


Fig. 3 Rearrangement of an interstitial He atom in the dislocation. Large white circles are Fe atoms. Small white circle is the initial octahedral position of a He atom, and small black circle is the final position of a He atom after relaxation. An arrow connects the initial and final position of a He atom.

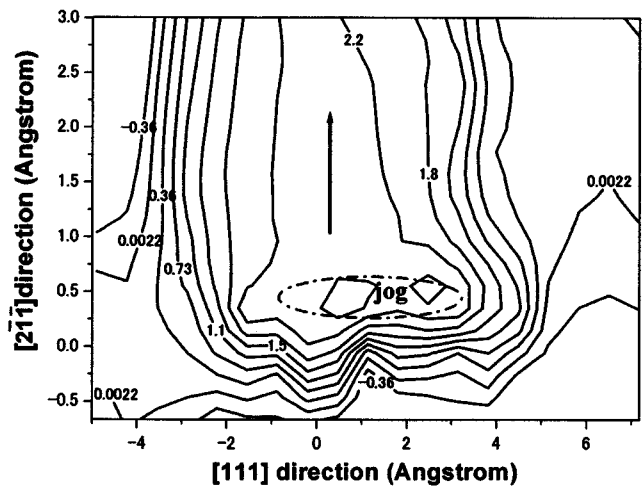


Fig. 5 Binding energy map of an interstitial He to a dislocation with a $\frac{1}{2} [111]$ jog in the plane. The dashed line shows the jog position and an arrow denotes the dislocation pipe.

1. 背景と目的

核融合炉構造材料では、中性子による激しい照射損傷に加え、核変換反応によりヘリウムが蓄積する。ヘリウムは、高温下では粒界に偏析し、粒界割れの主要因となる事が指摘されているが、ヘリウムの高温挙動に関する実証的知見は依然として乏しい。そこで昨年度は、2種類のオーステナイト系ステンレス鋼(SUS304, SUS316L)を用いてヘリウムの高温挙動を調べ、添加元素が大きく寄与している可能性を示した。本研究では、核融合炉構造材料の有力候補である Fe-9Cr および Fe-9Cr-2W を対象として、ヘリウムおよび高エネルギー電子による照射損傷発達過程のその場観察を行い、W の添加効果を明らかにすることを試みた。

2. 実験方法

試料作成のため、高純度 Fe-9Cr, Fe-9Cr-2W を圧延、打ち抜きによりディスク状(t0.1mm×φ3mm)に加工後、1323 K で 30 分の真空焼鈍を行った。その後、ツイングジェット電解研磨を施し、電子顕微鏡観察用薄膜試料とした。これらの試料にイオン照射装置直結型の透過型電子顕微鏡を用いて、ヘリウム照射中の損傷発達過程をその場観察した。尚、照射中の試料温度は 673K および 873K であり、照射強度を約 10^{17} He/m²s, エネルギー 20keV とした。さらに、ヘリウムの影響を明確にする目的で、超高压電子顕微鏡を用いて、同程度の損傷速度の 1 MeV の電子線照射実験を行い、損傷組織発達過程をヘリウム照射と比較した。

3. 結果および考察

ヘリウム照射した試料下での損傷組織発達過程その場観察の結果、非常に高密度の欠陥形成が確認された。図 1 は 673K でヘリウム照射した Fe-9Cr および Fe-9Cr-2W 中の転位ループ発達過程の電子顕微鏡像(左)と欠陥密度の照射量依存性(右)を示した。ヘリウム照射時の欠陥の数密度は、電子線照射の場合と比較して一桁以上高く、ループの核生成が促進されることが明らかになった。この核生成の促進は、873K 照射でも観察され、電子線照射ではループ形成は確認されないのに対し、ヘリウム照射では依然としてループの形成が観察された。さらに、673, 873K いずれの照射温度においても、Fe-9Cr の方が少ない照射量で転位ループの形成が確認されており、Fe-9Cr-2W ではループの核生成が抑制されることが明らかになった。これらの相違は、Fe-9Cr-2W 中のオーバーサイズ原子[1]である W の影響によると考えられた。Fe 中では He と原子空孔の集合体(He-V)が格子間原子(I)を捕獲し、転位ループの核生成を促進することが確認されている[2]が、Fe-9Cr-2W 中では、オーバーサイズの W が原子空孔と強く相互作用することで、He-V 集合体が減少し転位ループの核形成が抑制されたと考えられる。

一方、ヘリウムバブルの形成においても Fe-9Cr および Fe-9Cr-2W において違いが観察された。図 2 には、673K でヘリウム照射した Fe-9Cr および Fe-9Cr-2W 中のヘリウムバブルの電子顕微鏡像(左)と単位面積あたりにヘリウムバブルが占める総体積の照射量依存性の比較(右)を示した。Fe-9Cr-2W は Fe-9Cr に比べバブル形成が抑制されていることが分かる。また、673K 程度顕著ではないが、873K 照射においても同様の傾向が観察された。この相違の原因もオーバーサイズの添加元素 W が寄与していると考えられた。すなわち Fe-9Cr-2W 中では、W と原子空孔の強い相互作用によりバブルの核となる He-V の形成や移動が抑制された結果であると考えられた。

[1] H. W. King, J. Mater. Sci. 1, 79 (1966)

[2] K. Arakawa, K. Ono et al. J. Appl. Phys. 89(2001)4752-4757

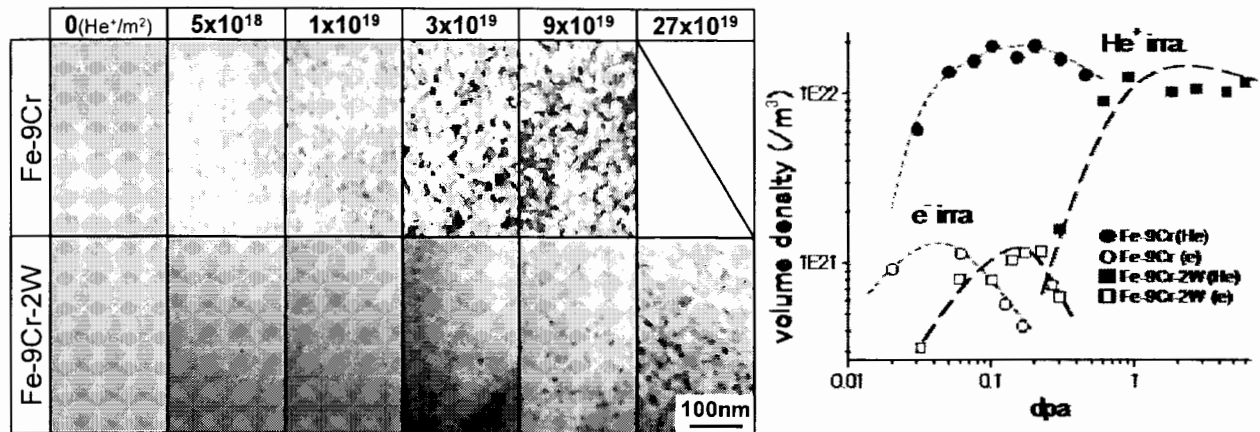


図1 673Kにてヘリウム照射した試料中の転位ループ. 電子顕微鏡像(左)と体積密度(右).

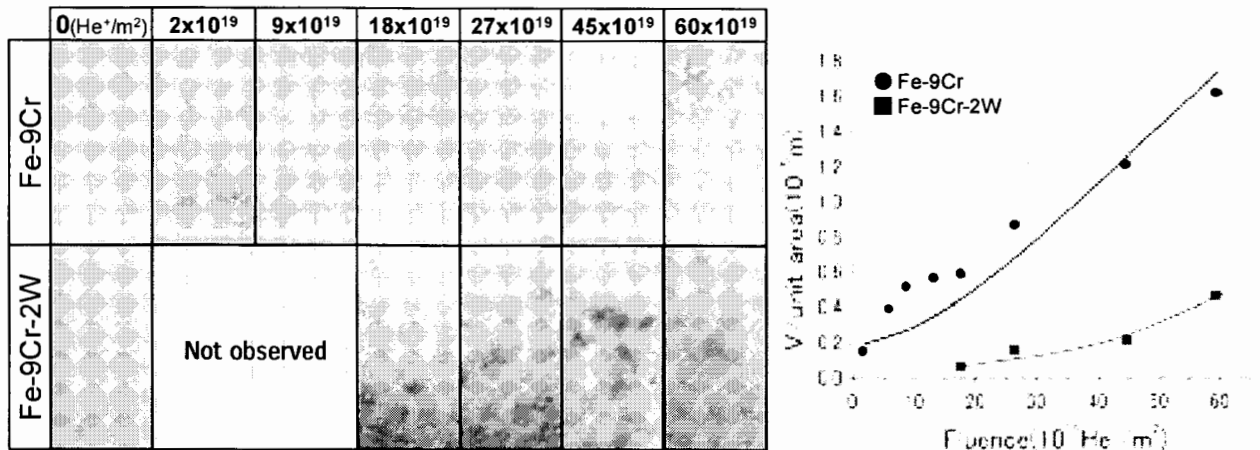


図2 673Kにてヘリウム照射した試料中のヘリウムバブル. 電子顕微鏡像(左)と総体積(右).

● 学会発表

1. K. Ono, M. Miyamoto, K. Arakawa and R.C. Birtcher: "Dynamical Interaction of Helium Bubbles with Cascade Damages in Fe-9Cr", 13th ICFRM, Dec. 2007, Nice, France.
2. H. Urabe, M. Miyamoto, K. Ono, M. Tokitani and N. Yoshida: "Degradation Process of Reflectivity in Stainless Steel Mirrors under Irradiation with Low Energy Helium Ions", 13th ICFRM, Dec. 2007, Nice, France.
3. M. Miyamoto, K. Ono, Y. Mori and D. Shitabou: "Difference between Helium Retention Properties of 316L and 304 Stainless Steels", 13th ICFRM, Dec. 2007, Nice, France.
4. 檜高祐生, 宮本光貴, 小野興太郎: 「Fe-9Cr-2W の He イオン照射損傷に与える W 添加効果」, 日本金属学会 2007 年秋季大会, 2007 年 9 月, 岐阜
5. 笹川秀幸, 檜高祐生, 宮本光貴, 小野興太郎: 「Fe-9Cr-2W における He 保持特性に与える W の効果」, 日本金属学会 2007 年秋季大会, 2007 年 9 月, 岐阜
6. 宮本光貴, 卜部洋史, 中野健人, 外 勇介, 小野興太郎, 吉田直亮: 「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」, 日本金属学会 2008 年春季大会, 2008 年 3 月, 東京

● 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: 吉田直亮(九州大学応用力学研究所教授)
 研究協力者: 宮本光貴^a, 檜高祐生^a, 渡辺英雄^b, 岩切宏友^b, 大多和義久^b (^a島大総理工, ^b九大応力研)

・ 目的

プラズマ対向材料の表面は極めて高濃度の水素同位体に曝される。水素が金属材料中に進入すると各種欠陥(原子空孔や不純物など)と結合し、水素の滞留を引き起こすことが知られている。第一原理分子動力学法を用いた代表者等の最近の研究により、純鉄中の原子空孔における水素の捕獲状態等の基礎的物性が明らかになってきている。これらの結果は従来までの一部の実験結果と定性的な整合性を有するが、今後の炉工学に重要な諸特性を直接的に予測していくためにはさらなる高度化が望まれる。そのためには基礎的な実験結果との対比が必要不可欠となり、理論計算との双方をフィードバックさせた研究を展開していくのが効果的である。九州大学応用力学研究所には水素同位体と材料との基本的な相互作用を解明するのに適した各種装置や、この分野に精通した研究者が充実しているために、本共同研究を遂行することで当該研究分野全般における著しい進展が期待できる。

・ 研究方法

本研究の特徴は、第一原理分子動力学を用いて、固体中の原子間相互作用を非経験的に計算する点にある。従来の分子動力学では、実験的に知られている固体の機械的性質を再現するような、経験的相互作用ポテンシャルを仮定する。一方、本研究で用いる第一原理分子動力学では、密度汎関数理論に基づき、任意の原子配置での基底状態の電子密度分布を計算し、電子密度分布から正しい相互作用ポテンシャルを量子論的に求める。

鉄への重水素イオン打ち込み実験で約 0.63, 0.43 eV の結合エンタルピーに対応する水素放出ステージが観測されている。有効媒質理論 (EMT) による計算結果との比較から、これ等は単原子空孔と水素原子クラスタの結合エネルギーに対応すると考えられている。これを検証するために、鉄原子 54 個から成る bcc 超格子から原子 1 個を取り除いて単原子空孔を作り、その 8 面体サイト付近 (それより若干原子空孔中心に向かってずれた位置) に水素原子を 6 個まで付着させたクラスタの安定構造と全エネルギーの第一原理分子動力学計算を行った。また、タングステンについても同様の計算を行った。本計算では密度汎関数理論に基づいた VASP コードを用いた。

・ 研究結果

本計算による鉄の単空孔形成エネルギーは 2.18 eV であり、ポジトロン崩壊を用いた実験値 (1.4–2.0 eV) と近い値が得られた。鉄超格子の形成エネルギーを $E_F(\text{Fe}_{54})$ 、格子間位置 (4 面体サイト) に 1 個の水素原子が固溶した超格子の形成エネルギーを $E_F(\text{Fe}_{54}\text{H}_1)$ 、単原子空孔と n 個の水素原子から成るクラスタを含む鉄超格子の形成エネルギーを $E_F(\text{Fe}_{53}\text{V}_1\text{H}_n)$ として、格子間位置 (4 面体サイト) を基準にした水素原子とクラスタの結合エネルギー: $e_B = E_F(\text{Fe}_{53}\text{V}_1\text{H}_{n-1}) - E_F(\text{Fe}_{53}\text{V}_1\text{H}_n) + E_F(\text{Fe}_{54}\text{H}_1) - E_F(\text{Fe}_{54})$ を計算した。計算結果を実験で観測された水素放出ステージと比較すると、高エネルギーのものは水素原子 1–2 個が含まれるクラスタ、低エネルギーは 3–5 個の水素原子が含まれるクラスタの結合エネルギーとよく一致した。一方、水素原子を 6 個含むクラスタの場合、EMT による予測と異なり、結合エネルギーは固溶エネルギー: $e_S = E_F(\text{Fe}_{54}\text{H}_1) - E_F(\text{Fe}_{54}) - 1/2 E_F(\text{H}_2)$ よりも小さい値になった。つまり、格子間位置にある 6 個目の水素原子がクラスタに結合するよりも、水素分子として表面から出てゆく方がエネルギー利得は大きいことを意味している。

タングステン (bcc) についても同様の計算を行った。計算で得られたバルクの単位胞の平衡体積や体積弾性率は実験値とよく一致した。また、空孔形成エネルギーの計算値は 3.25 eV であった。ちなみに、Finnis 等 (1984 年) の経験的相互作用ポテンシャルを用いた計算値は 3.71 eV である。鉄とタングステンについて、今回の計算で得られた結合エネルギーを図 1 に示す。いずれも、1–2 個まではほぼ一定の結合エネルギーを持つが、3 個以上の場合には、水素同士の反発相互作用で結合エネルギーが低下する結果となった。また、4

個目から5個目のときに結合エネルギーの値が増加する傾向が見られた。

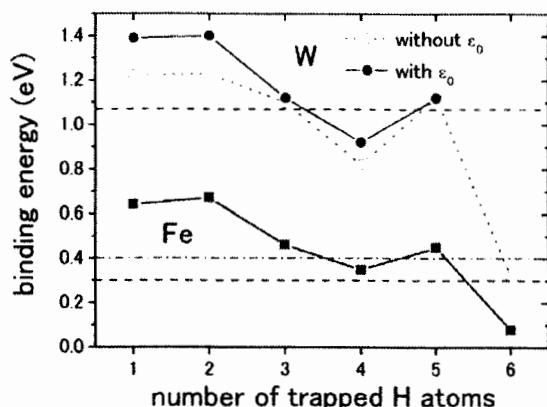


図1：鉄，タングステン中の単原子空孔と水素原子の結合エネルギーの計算値．○はゼロ点振動エネルギーによる補正を省いた結果．破線は、鉄とタングステンの水素の固溶エネルギー．一点差線は、タングステンの場合の、単原子空孔からマトリクス中への水素の浸透エネルギー．

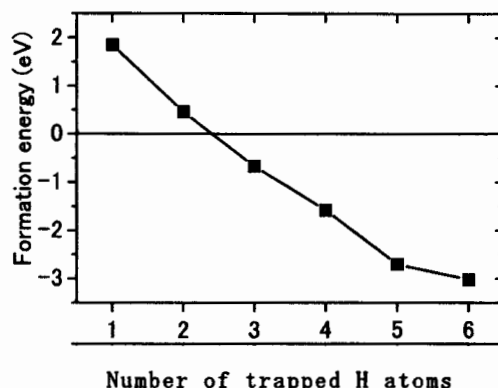


図2：タングステンの単原子空孔と水素原子が結合した場合の形成エネルギー，

$$e'_f(\text{VH}_n) = e_f - \sum_{i=1}^n e_b(i), \quad e_f = 3.25 \text{ eV}.$$

・ 考察

タングステンについては、ゼロ点振動エネルギーの補正を省いた計算結果と比較した。捕獲された水素原子の数が1-2個の場合、単原子空孔の8面体サイト付近に捕獲された水素原子のゼロ点振動エネルギーは格子間位置（4面体サイト）でのゼロ点振動エネルギーよりも水素原子1個当たり約160meV小さい。8面体サイトを含む面と平行方向の振動エネルギーが小さいことが主な原因である。つまり、面方向のポテンシャル局面の曲率が格子間位置よりも緩やかなことを示している。また、面方向のポテンシャルが浅いため、捕獲された水素原子は空孔の淵に沿っておおきな分布を持つと考えられる。捕獲された原子数が3個以上になると、水素原子1個あたりのゼロ点振動エネルギーが増加し、格子間位置のものと近い値をもつようになる。これは、水素原子同士の反発相互作用が強くなるためと考えられる。

タングステンについて、今回の計算により得られた水素原子の結合エネルギーから、水素原子を捕獲した単原子空孔の形成エネルギーを求めた結果を図2に示す。図の通り、形成エネルギーの値は捕獲した水素原子の数が増えるほど低下し、3個以上捕獲した場合には形成エネルギーが負の値（発熱過程）になる。これは、捕獲した水素原子の数が多いほど単原子空孔の熱平衡濃度は指数関数的に増大することを示唆している。ただし、深井等[日本金属学会誌 61(8) 663 (1997)]のボルツマン統計を用いた熱力学的考察によれば、水素原子と結合した状態の単原子空孔が熱力学的に高い確率で存在するためには、格子間水素原子の濃度が十分に高い必要がある。核融合炉のプラズマ壁相互作用において、これがどのような条件で満たされるのかは今後の研究課題である。

・ 成果報告

以上の成果の一部は、日本原子力学会2007年秋の大会（2007年9月27-29日，北九州国際会議場）の材料部会企画セッション「原子炉材料損傷のマルチスケール解析に向けた要素モデルの高度化」、IAEA Research Coordination Meeting “Data for Surface Composition Dynamics Relevant to Erosion Processes”（2007年10月17-19日，IAEA本部，ウィーン）で口頭発表した。

核融合炉材料のガス不純物挙動に関するモデリング研究

森下和功¹, 渡辺淑之¹, 岩切宏友², 金田保則³, 陳 迎³, 坂口紀史⁴, 加藤太治⁵, 徐 虬⁶,
吉田直亮², 香山 晃¹, 室賀健夫⁵, 義家敏正⁶

1)京大エネ理工研, 2)九大応力研, 3)東大工, 4)北大エネマテ, 5)核融合研, 6)京大炉

1. はじめに

SiC/SiC 複合材料は、過酷な中性子負荷が予想される核融合炉ブランケットの構造材料としての使用が期待されている。現在、多くの研究機関によって、核分裂炉、核破砕中性子源、イオン加速器などを用いた照射研究が精力的に進められているが、いずれの照射場も、実際の核融合炉の照射条件とは異なる条件での照射になる。そのため、材料照射を考慮した核融合炉設計においては、材料の耐久性に関するマージンを不必要に大きくとらざるを得ない状況に陥っている。このような擬似照射場を使って得られた材料照射データを、実際の核融合炉の照射で期待される材料照射データに翻訳することができれば、それは、今後の材料開発・設計・寿命評価・炉設計の高精度化に対して大きなプラスになる。このような翻訳作業の方法論を照射相関と呼ぶが、我々は、照射材料シミュレーションによってこれを実現しようと考えている。

照射材料内には、種々の格子欠陥が生成され、マイクロ組織が変化し、材料の諸特性が変化（劣化）する。特に He 等のガス不純物の材料内の挙動は、その材料の健全性を検討する上で重要な因子となるが、SiC/SiC 複合セラミックス材料の照射下挙動に対するガス不純物の効果の研究は、世界的にも始まったばかりである。

これまで我々は、金属内の He 挙動に関する実験的および理論的研究を行ってきたが、今後は、SiC/SiC 複合材料に対するガス不純物挙動についても明らかにしていく。そこで本研究では、その準備のために、SiC/SiC 複合材料内の種々の格子欠陥に関する基礎パラメータの取得を行った。具体的には、分子動力学法を使って、 β -SiC 中の点陥集合体の形成エネルギーおよび点欠陥の移動エネルギーの評価を行った。

2. 方法

解析に用いた原子間ポテンシャルは Gao-Weber ポテンシャル[1]である。これは、Brenner [2]タイプのボンドオーダーポテンシャルである。MD 解析では、体系内に任意の欠陥や原子を配置し、有限温度で十分に緩和させたあと系をクエンチし、そのときの全エネルギー値を得た。得られたエネルギーより、欠陥の形成エネルギーや移動エネルギーを算出した。ここで欠陥の形成エネルギーとは、完全結晶中に欠陥を導入するのに必要なエネルギー（完全結晶中に欠陥を導入した際のエネルギー増加分）である。

3. 結果

図 1 は、 β -SiC 中の単一の Si 格子間原子（左）および C 格子間原子（右）の安定構造である。単 Si 格子間原子は TC 侵入型（4 つの C 格子原子に囲まれた四面体中心を占有した配置）で、C 格子間原子は C-C ダンベル型（C 格子原子と格子点を共有した配置）であり、形成エネルギーはそれぞれ、3.17 eV と 3.24 eV であった。ここで、各構造中の C-C, Si-Si, Si-C のボンド長は、pure な C（ダイヤモンド）、Si, β -SiC それぞれの完全結晶中の C-C, Si-Si, Si-C の平衡ボンド長にほぼ等しくなっており、そのような原子配置を有する構造が最も安定だと考えられる。

図 2 は、各サイズ n （集合体中の点欠陥の総数）に対する格子間原子（SIA）集合体および空孔集合体の形成エネルギーを示したものであり、純金属の場合と同様に、それぞれ $An^1+Bn^{1/2}$ および $Cn^{2/3}+Dn^{1/3}$ の形の式で表せることが判った。両者のエネルギー差は小さく、これは鉄（Fe）などの純金属の場合とは大きく異なる傾向である。各集合体の構造に関しては、SIA 集合体中の Si と C は、それぞれ上記で示した TC 侵入型および C-C

ダンベル型を構成していた。また、空孔集合体に関しては、Si空孔数とC空孔数のバランスが崩れるに従って周辺にアンチサイト欠陥の形成を含んだ構造になっていた[3]。

図3は、単一のSi格子間原子 (I_{Si}) が隣接サイトにジャンプする際のポテンシャルエネルギー変化を示したもので、最大値が移動エネルギーとなる。有限温度で系を十分に緩和させることで、0Kの場合よりも低い移動エネルギー (1.58 eV) を得た。さらにこの値は、dynamicsな計算により得られた移動エネルギー値 (1.52 eV [4]) とも非常に近く、本計算手法の有用性が確認された。また、Si空孔 (V_{Si}) の移動エネルギーの調査結果を図4に示す。(比較のため、同ポテンシャル関数を用いて算出された文献値[4]も示している。) 本計算で得られたSi空孔の移動エネルギー (1.80 eV) は、文献値 (2.35 eV [4]) よりも低い値であるが、これは、文献的手法 (nudged elastic band method [5]) では系は十分に緩和されなかったからである。

今後は、引き続き点欠陥の形成・移動エネルギーに関する情報を取得しながら、同時に、SiC中の欠陥集合体の核生成・成長のモデル、さらには、ガス不純物挙動に関するモデル等の構築を目指す。

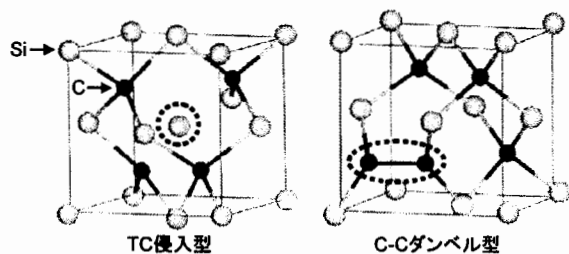


図1 単Si格子間原子(左)および単C格子間原子(右)の安定構造
 ●TC侵入型:4つのC格子原子に囲まれた四面体中心を占有した配置
 ●C-Cダンベル型:C格子原子と格子点を共有した配置

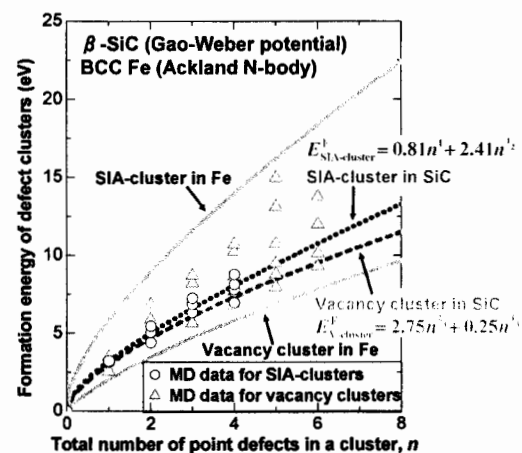


図2 欠陥集合体の形成エネルギーのサイズ依存性

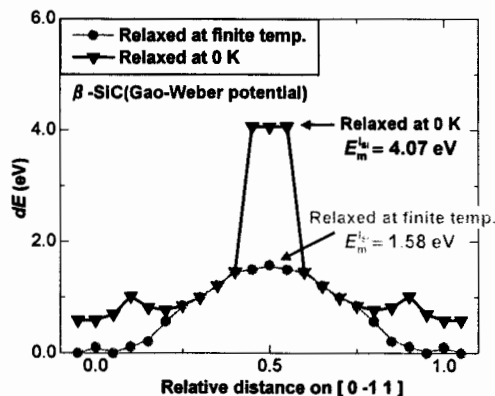


図3 Si格子間原子 (I_{Si}) が最密方向へジャンプする際のポテンシャルエネルギー変化

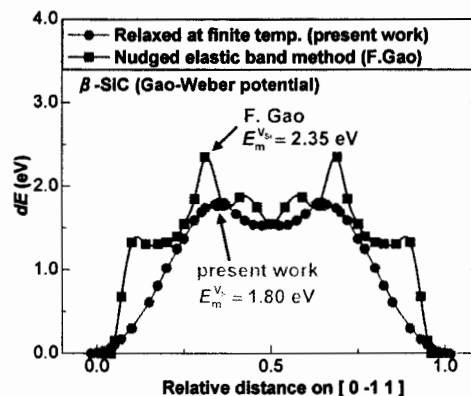


図4 Si原子空孔 (V_{Si}) が最密方向へジャンプする際のポテンシャルエネルギー変化

参考文献

- [1] F. Gao and W. J. Weber, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B 191(2002) 504
- [2] D. W. Brenner, Phys. Rev. B 42 (1990) 9458
- [3] K. Morishita, et al., to be published in J. Nucl. Mater.
- [4] F. Gao et al., Phys. Rev. B 69 (2004) 245205
- [5] M. R. Sorensen, et al., Phys. Rev. Lett. 77 (1996) 5067

陽子ビーム窓材における水素・ヘリウムトラッピングサイト解明に関する研究

日本原子力研究開発機構 J-PARC センター 濱口大

【概要】

日本原子力研究開発機構では、原子力発電所の使用済み燃料に含まれる高レベル放射性廃棄物のうち、処分上最も問題となる長寿命放射性核種を核反応により安定又は短寿命核種に核変換処理し、長期にわたる環境への負担を軽減することを目的とした加速器駆動未臨界システム (ADS) の開発を行っている。ADS は、大強度陽子加速器と核破砕中性子源、その中性子源の周囲に配置される長寿命核種を含む燃料 (炉心) で構成されるが (図 1 参照)、核破砕ターゲット (中性子源) 兼冷却材として溶融鉛ビスマスを用いることを想定している。この鉛ビスマスタargetと加速器のインターフェースとして陽子ビーム導入窓の使用を検討しているが、その技術的開発課題として材料の高エネルギー陽子に対する耐照射性向上が挙げられる。高エネルギー陽子線照射に曝されるビーム導入窓材では、材料中の水素およびヘリウムガスの生成率が極めて高く、これらのガスは材料中に蓄積されると照射脆化の一因となることより、このような環境下での材料中の水素やヘリウムガス蓄積挙動を把握することは、特に寿命評価の上で重要となっている。従って本研究では、材料中のこれらのガス捕獲挙動に対する基礎的知見を得る目的で、水素およびヘリウムイオン注入された材料の昇温脱放出ガス分析および内部組織評価を行った。

【実験方法】

本研究では、ADSにおける陽子ビーム導入窓候補材料であり、かつ核融合炉第一壁としての使用も検討されている低放射化フェライト鋼F82Hを用いた。イオン注入は九州大学応用力学研究所の低エネルギーイオン照射装置を用い、5keVの He^+ と0.5keVの D_2^+ をそれぞれ照射により注入した。

He^+ 照射では照射温度 873Kにおいて総注入量 $1 \times 10^{21} \text{He}/\text{m}^2$ まで照射を行い、また D_2^+ 照射は室温で総注入量 $1 \times 10^{21} \text{D}/\text{m}^2$ まで行った。ここで、 D_2^+ 照射における 0.5keV というエネルギーは、鉄系材料に対して弾き出し損傷を伴わないエネルギーである。照射後の試料は、集束イオンビーム加工装置 (FIB) を用いて透過型電子顕微鏡 (TEM) 観察用薄膜試料を作成し、その後高分解能昇温脱離装置 (TDS) を用いて放出ガス分析を行った。

【結果および考察】

図 2 に、 He^+ 照射後に D_2^+ を追照射した試料の重水素およびヘリウムの昇温脱離スペクトルを示す。この結果より、重水素の放出は 600K以下の温度でほぼ終了するのに対し、ヘリウムの放出は主に 900K以上の高温で始まることが明らかとなった。図 3 はヘリウム照射された試料の内部組織写真であるが、873Kで $1 \times 10^{21} \text{He}/\text{m}^2$ までヘリウムを照射すると、表面近傍にヘリウムバブルが高密度に形成されることがわかる。図 2 で見られるようなヘリウムの放出挙動は、このようなヘリウ

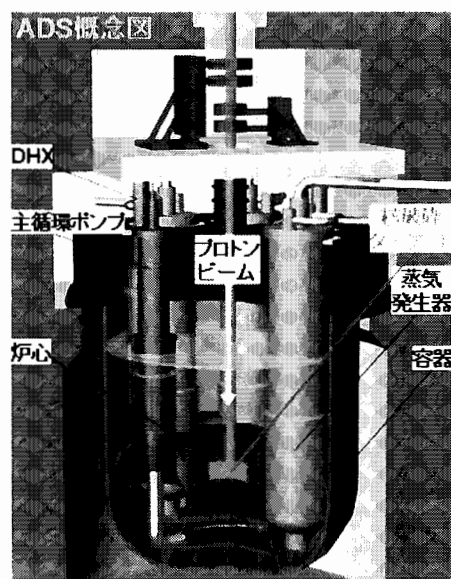


図 1. ADS 概念図

ムバブルの拡散に起因するものと考えられるが、ヘリウムが放出される温度領域において重水素の放出が見られないことより、ヘリウムバブルは重水素を強く捕獲しない、即ち重水素はヘリウムバブル内に捕獲されないと考えられる。一方、図4はヘリウムを予照射した試料と予照射を行っていない試料からの重水素脱離スペクトルを比較したものであるが、ヘリウム予照射された試料では423K近傍の重水素放出ピークが、ヘリウム未照射材と比べると30Kほど高温側にシフトすることも明らかとなった。このピークシフトは、ヘリウムバブル周囲の歪み場に重水素が捕獲されたことに起因すると考えられる。このような重水素放出ピークの高温側へのシフトは、スイス・パウルシェラー研究所のSINQ加速器を用いて高エネルギー陽子照射を行い、非常に高密度のヘリウムバブルが形成されたF82H鋼のガス放出分析においてもこれまでに確認されている現象であり、本結果は、ヘリウムバブルは水素に対して強い捕獲挙動を示さないにもかかわらず、その周囲が新たに水素の捕獲サイトとして機能しうることを結論づけるものである。

【成果報告】

本研究成果は、2007年12月にフランス・ニースにおいて開催された第13回核融合炉材料国際会議(ICFRM-13)において、九州大学応用力学研究所の吉田直亮教授、岩切宏友准教授と共著のもと、「The trapping behavior of hydrogen and its isotope in F82H ferritic/martensitic steel」と題して報告を行っているものであり、Journal of Nuclear Materialsに掲載予定である。

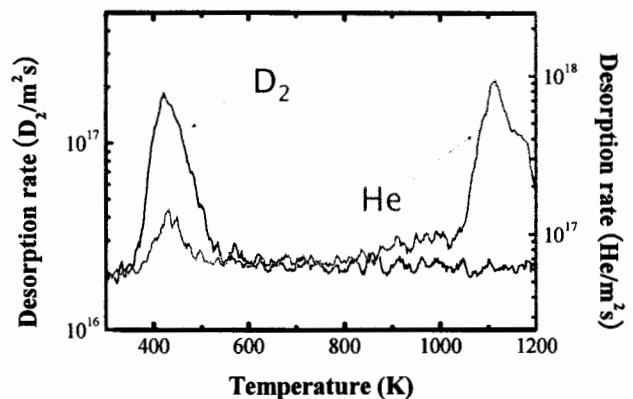


図2 重水素およびヘリウムの昇温脱離スペクトル

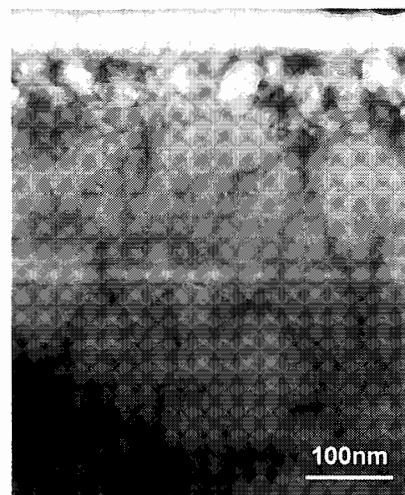


図3 ヘリウム照射試料の内部組織

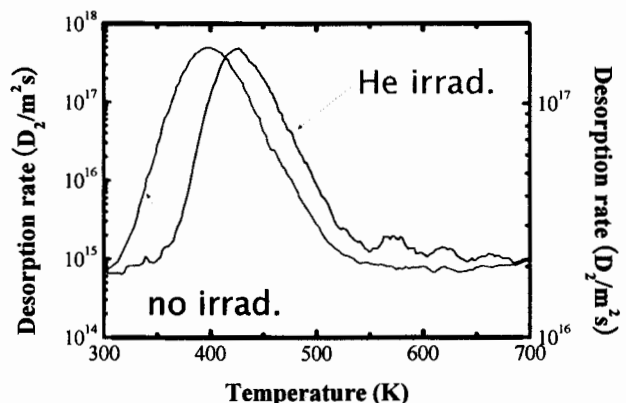


図4 ヘリウム予照射材および未照射材の重水素放出スペクトル

低温高密度ヘリウムプラズマと熱パルス重畳照射による タングステン材料損耗に関する研究

研究代表者 名古屋大学エコトピア科学研究所 大野哲靖

1. はじめに

タングステンは国際熱核融合炉 (ITER) においてダイバータ材に使用される予定であり, DEMO 炉や慣性核融合炉においては第一壁の候補材に挙げられている. 加えてレーザー導入のためのミラーとしても使用されることが検討されている. 近年, スパッタリング閾値以下の低エネルギーにおいても, 高粒子束定常ヘリウムプラズマ照射によってタングステン表面近傍でヘリウムバブルやホールが形成されることが実験的に確かめられてきた(図1). 表面近傍での損傷によりタングステンの特性の劣化が起こると, Edge Localized Mode (ELM)やディスラプションなどに伴う間欠的な熱負荷によってタングステンが溶融することが懸念されている.

本研究においては, ヘリウムホールが形成されたタングステンに数 ns のパルス幅の Nd:YAG レーザー及びサブ ms のパルス幅のルビーレーザーを照射し, 間欠的な熱負荷が表面損傷を受けたタングステンに及ぼす影響を実験的に調べた. 加えて, タングステン内での温度変化を熱伝導方程式を基とした数値計算により求め, レーザー照射に伴う物理過程についての考察を行った.

2. 実験装置

タングステンへのプラズマ照射効果を調べるために直線型ダイバータプラズマ模擬実験装置 NAGDIS-II を用いて, 低温高密度のプラズマ照射を行った. 間欠的な熱負荷を模擬するためにレーザー (Nd:YAG:波長 532 nm, パルス幅 5-7 ns, ルビー:波長 694 nm, パルス幅 600ns) を用いた. タングステン試料はプラズマとレーザーに対して 45° の角度で設置した. プラズマ照射中の試料温度は 1500 K とした. タングステン中性線の干渉フィルターを装着したイメージンテンシファイ付 CCD カメラ (ICCD) を用いて, レーザーを照射後のタングステン発光を撮影した (図2).

3. 実験結果

図3(a),(b)に示すように, Nd:YAG レーザー ($\lambda=532$ nm, 2 kJ/m², 10 Hz, パルス幅 5-7 ns) を照射した場合にはレーザー照射に伴い表面損傷が劇的に促進された. ホールを含むモデルに対して, 3次元の熱伝導方程式を解き, 温度評価を行うと, 熱負荷に伴いホールの上部の温度が局所的に上昇し溶融し, その結果ホールが爆発している可能性が示唆された.

一方パルス幅が長いルビーレーザー($\lambda=695$ nm, 0.03 Hz, パルス幅 0.6 ms)照射においては, 対照的な現象が観測される. 図3(a),(c),(e)はヘリウム照射により損傷を受けた粉末焼結タングステン

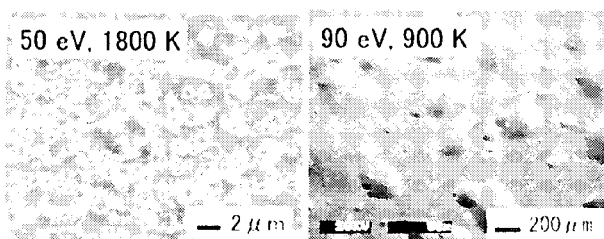


図1 プラズマ照射によるタングステン材料の損傷 (左図がヘリウムプラズマ, 右図が重水素プラズマ)

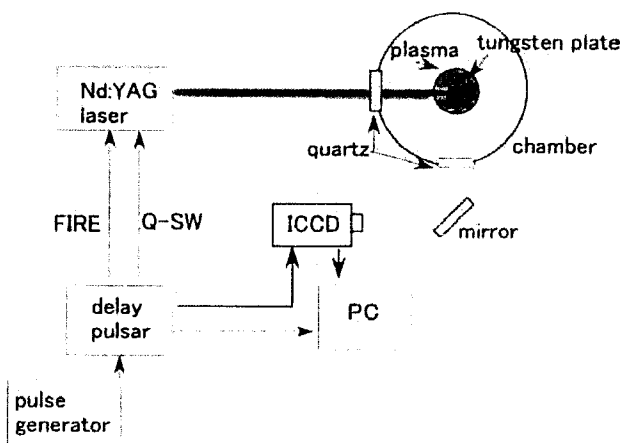


図2 実験装置配置図

((a),(c)及びプラズマブレータングステン被覆黒鉛(e)であり, (b),(d),(f)はルビーレーザー照射後の様子を示している. レーザー強度が 70 kJ/m^2 程度のレーザーパワーではホールが形成されていても表面の様子は変化しない(図 3 (a),(b)).

一方で, 一桁程度レーザー強度が高い場合には (図 3 (c),(d))ホールは消滅しており, 表面温度が一時的に融点近くにまで至り再結晶化していると考えられる. これは適切なレーザーに照射によりプラズマによるタングステンの表面損傷を修復することが可能であることを示唆している. (e)ではホールではなくタングステンの微細構造が形成され表面が黒色化している場合であり, この場合にはレーザー強度が 100 kJ/m^2 と弱いにも関わらず熔融の形跡が見られ(f), 表面の熱拡散係数が数桁減少していると考えられる.

一方, ヘリウムプラズマ照射後ではレーザーパワーに対するタングステン発光の閾値が大きく低下し (図 4), 間欠的な熱負荷に対する耐性が大きく低下していることが確認された. レーザー熱パルスによるヘリウムバブル破壊の際にタングステンとヘリウムが瞬間的に放出されることも新たに見出された(図 5).

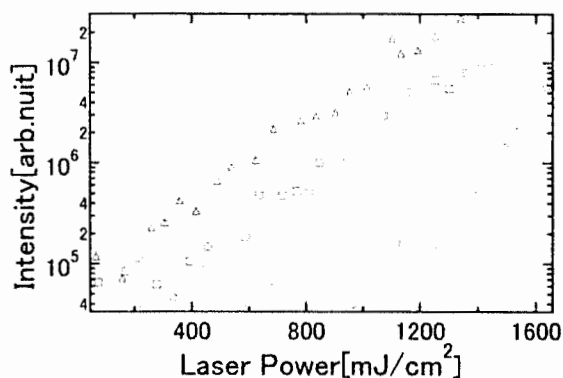


図 4 プラズマが照射されたタングステンへ Nd:YAG レーザーを照射した時のタングステン原子の発光 (□ ヘリウム+重水素プラズマ 30 分照射, △ ヘリウム+重水素プラズマ 90 分照射, ○ 重水素プラズマ 30 分照射)

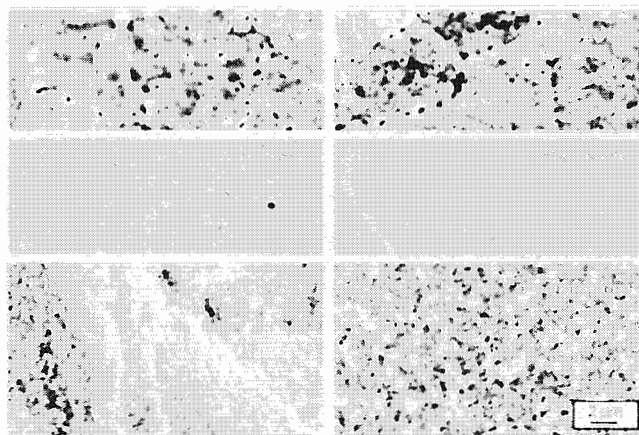


図 3 タングステン表面の SEM 像. (a), (c), (e)はレーザー照射がない場合であり, 表面温度 1600 K においてフルエンス 3×10^{25} , 9×10^{24} and $3.7 \times 10^{27} \text{ m}^{-2}$ のヘリウムイオン照射を行った. (b), (d), (f)はそれぞれ (a), (c), (e)の試料へのルビーレーザー照射を行った後の表面の SEM 像. (d)はホールが消えているが, ルビーレーザー照射により表面温度が融点近傍まで加熱されるとレーザーアニーリングにより表面状態が改質されることを示している. (e)の表面には 10 nm オーダーの微細構造が形成されており, この場合には表面の熱伝導率が数桁減少しており, 弱いレーザー強度でも表面が融点に至り (f)のように熔融の形跡が見られる.

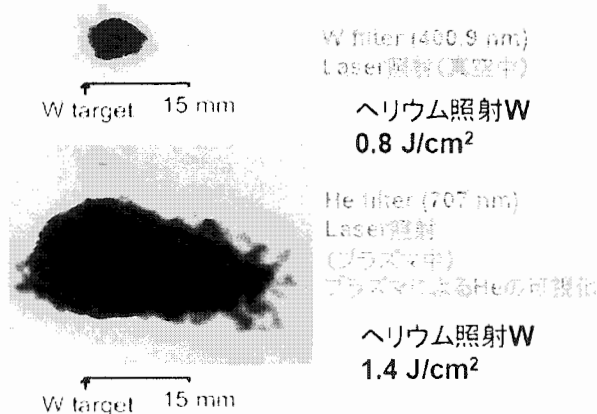


図 5 プラズマが照射されたタングステンへ Nd:YAG レーザーを照射した時のタングステン原子とヘリウム原子からの発光の 2 次元分布

成果報告 (論文、学会発表等)

1. S. Kajita, S. Takamura, N. Ohno, D. Nishijima, H. Iwakiri, N. Yoshida, "Sub-ms Laser Pulse Irradiation on Tungsten Target Damaged by Exposure to Helium Plasma", Nuclear Fusion, Vol. 47, 2007, pp. 1358–1366

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 理学部附属放射化学研究施設 奥野 健二

【目的】

D-T 核融合炉において、燃料として使用されるトリチウムは放射性核種であることから核融合炉内でのトリチウムの動態挙動の解明は、核融合炉の安全性評価の観点から非常に重要な課題である。

核融合炉におけるプラズマ対向壁材料のひとつとして、現在 SiC をはじめとする炭化系セラミックスが考えられている。D-T 核融合反応ではトリチウムをはじめとする水素同位体の他にヘリウムも生成し、それらは高エネルギーでプラズマ対向壁に照射されることが考えられる。特に照射されたトリチウムの材料中での滞留挙動に及ぼすヘリウムの照射効果に関する知見は核融合炉の安全性の観点から重要になる。そこで、本年度の特定研究では、SiC に照射された重水素の滞留挙動が及ぼすヘリウムの照射効果およびヘリウムの滞留挙動の解明について検討した。

【実験】

本研究で使用した試料は β -SiC である。SiC についてははじめに不純物処理を目的とした加熱処理を 1323 K で十分間行った。その後、ヘリウムイオン (He^+) や重水素イオン (D_2^+) の照射を行った。その際、ヘリウムイオンの照射条件は、イオンエネルギーは 1.3 keV、イオンフラックスは $1.0 \times 10^{18} \text{ He}^+ \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ であり、イオンフルエンスは $1.0 \times 10^{22} \text{ He}^+ \text{ m}^{-2}$ であった。一方、重水素イオンの照射条件については、イオンエネルギーは 1.0 keV、イオンフラックスは $1.0 \times 10^{18} \text{ D}^+ \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ であり、イオンフルエンスは $1.0 \times 10^{22} \text{ D}^+ \text{ m}^{-2}$ であった。なお、各イオンの照射エネルギーについては、TRIM コードを用いた計算結果より、照射深さが同一になるようなエネルギーに設定された。SiC には D_2^+ のみの照射、そして He^+ 前照射 (He^+ 照射後 D_2^+ 照射) および He^+ 後照射 (D_2^+ 照射後 He^+ 照射) の 3 種の照射を行い、それぞれについて、昇温脱離法 (TDS) を用いて 1323 K までの加熱を 30 K min^{-1} で行った。さらに、上記の照射条件で He^+ のみを照射した SiC に対しては、九州大学応用力学研究所において走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いた試料表面観察を行った。

【結果および考察】

図 1 に各条件で照射した SiC 試料における (a) 重水素および (b) ヘリウム TDS スペクトルを示す。図 (a) より、

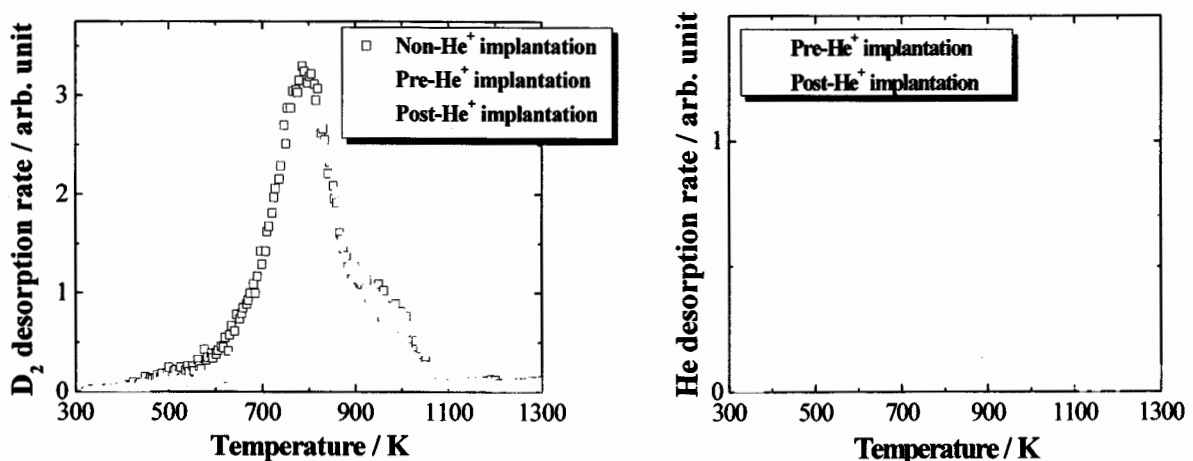


図 1 各条件で照射された SiC 試料における (a) 重水素および (b) ヘリウム TDS スペクトル

SiCにおける重水素の捕捉サイトとしては、800 K と 1000 K の二種存在することがわかっており、またそれぞれについては Si-D 結合、そして C-D 結合としての重水素捕捉サイトであることがこれまでの研究よりわかっている[1]。また、ヘリウム照射された SiC 試料においては、重水素の滞留量は減少することがわかり、特に He 後照射された際においてはその減少量はより顕著であることがわかった。本結果については、He 前照射時においては重水素の捕捉サイトである結晶格子中に He⁺が捕捉されていることから、また、He 後照射時には捕捉された重水素が、照射された He によるスパッタリングの影響を受けるため重水素滞留量は減少することが示唆された。一方、ヘリウムの TDS スペクトルからは、特に He⁺後照射時にはおよそ 1000 K に鋭いピークが観察された。このピークに関しては He 照射に伴いプリスタが形成したことが示唆された。また、He⁺前照射時にはプリスタ形成後の D₂⁺照射に伴うプリスタの破壊が示唆された。

図 2(a)は He⁺照射された SiC における SEM 画像結果 (倍率 100 倍)であり、また、(b)は He⁺未照射領域および(c)は He⁺照射領域を拡大した SEM 画像結果を示す(b, c は倍率 5000 倍)。図 2(b)の未照射領域においては SiC に由来する繊維状の表面状態が観察されたが、照射領域である図 2(c)においては(b)とは明らかに異なる表面状態が観測された。また、(c)においてはプリスタも観測された。以上は、図 1 で示したヘリウム TDS スペクトルと一致する結果が得られた。



図 2 He 照射された SiC における(a)SEM 画像、(b)He⁺未照射領域、(c)He⁺照射領域における SEM 画像観察結果

【結論および今後の展望】

SiC における水素同位体挙動に及ぼす He⁺照射効果を解明するために、He⁺前後照射による重水素滞留量変化および放出挙動に関する測定を行った。実験結果より、He⁺照射により D₂⁺のみの照射時と比較し重水素滞留量が減少し、特に He⁺後照射時においてその減少はより顕著に見られた。また、SEM 表面観察結果および TDS 測定結果より、He⁺照射によりプリスタの形成が確認された。今後は、SiC 中の水素同位体およびヘリウムの化学的挙動についてより詳細に検討するため、SiC に対して D₂⁺あるいは He⁺のフルエンスを変化させて照射し、照射により捕捉された重水素の放出挙動および滞留量の変化、またヘリウム照射効果について明らかにする。また、各フルエンスのヘリウムイオン照射に伴う膜表面の構造変化について、九州大学応用力学研究所に設置された SEM、透過型電子顕微鏡(TEM)および原子間力顕微鏡(AFM)を用いて解明し、これらの表面観察の結果と TDS における結果を組み合わせ、SiC に照射された水素同位体の動的挙動に及ぼすヘリウム照射効果について総合的に評価する予定である。

参考文献

[1] Y. Oya et al., *Fus. Eng. and Des.*, **81** (2006) 987-992.

(財)電力中央研究所 宮原 勇一、秀 耕一郎
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。秀ら^[1,2]は、304系ステンレス鋼の溶体化材と熱鋭敏化材についてIASCC感受性の中性子照射量依存性を調べ、両材種間の中性子照射量依存性の違いがマクロ変形挙動の違いに起因する可能性について報告した。しかし、このマクロ変形挙動に差異を与える微小領域の変形挙動については解明されていない。このため本研究では、結晶粒の微小領域の変形挙動を明らかにすることを目的として、結晶粒内の変形能の解明を行っている。これまでの研究^[3,4,5,6]により、照射硬化を室温引張で模擬した試料では、変形が進むと粒界近傍への転位の蓄積により結晶方位差が増加することが確認されている。一方、重イオン照射材については、照射量の増加と共に結晶方位差が増加する結果と変化しない結果の相反する結果が得られている。本報告では、EBSPを用いて照射前後の結晶方位差を測定することにより、結晶方位差変化の照射量依存性について検討を行った。

2. 実験方法

2.1 供試材と照射条件

供試材は、316L ステンレス鋼の20%冷間圧延材とした。供試材の化学組成を表1に示す。重イオン照射用試料は3mm φ x 200 μm の TEM ディスク形状とし、照射面については5%過塩素酸-95%酢酸溶液中で20V-30秒間の電解研磨を行った。重イオン照射は400°Cで、0.3または3.0 dpa まで実施した。それぞれの照射量を中性子照射量に換算すると、約 5×10^{24} 、 5×10^{25} n/m²(E>1MeV)となる。

2.2 EBSP 測定

EBSP測定は、照射面に荷重10gfで打痕したピッカース圧子の痕を目印とし、照射前後で行った。測定は各試料の4箇所について実施した。今回評価したKernel Average Misorientation (KAM)は、各結晶粒内の隣接する測定点間の結晶方位差を測定領域内で平均化したものである。

3. 実験結果と考察

重イオン照射前後のEBSP測定結果の代表例を図1に示す。この図で、Inverse Pole Figure (IPF)は測定される結晶方位、KAMは上記のミスオリエンテーションである。照射後の像には、汚れや取り扱いによる傷でデータの欠損する部分が存在するが、照射に起因した像の乱れや結晶方位差の増加はほとんどみられない。図2にKAMの重イオン照射量依存性を示す。照射によりKAMは僅かに高くなる傾向が見られるが、0.3dpaと3dpa照射での差は見られない。図3に照射前後におけるKAMの変化量とデータ欠損領域の増加割合の関係を示す。データ欠損領域は、試料取り扱いにより傷の付いた領域と対応している。図より、照射後試料のKAMの増加は、試料取り扱いによるダメージに比例しており、3dpaまでの照射では、KAMの照射量依存性は現れないことが分かった。冷間加工で導入される転位は、粒界近傍に蓄積するため、粒界近傍では連続的な結晶方位の変化をもたらすが、照射材で結晶粒内に独立した転位ループが形成されるために、連続的な結晶方位の変化が観察されなかったものと考えられる。

4. まとめ

EBSP測定による結晶方位差は、3.0dpaまでの照射では照射量依存性を示さないことが明らかとなった。この結果から、IASCC感受性の発現に対する主要因子は塑性ひずみではないと推測される。

5. 参考文献

- [1] K. Hide, M. Mayuzumi, K. Tsuji, M. Narui, Proc. of 13th APCCC, 16-21 Nov 2003, Osaka Univ.
- [2] K. Hide, T. Onchi, M. Mayuzumi, S. Dumble, Proc. 10th Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System, Aug. 5-9, 2001, Lake Tahoe, Nevada, NACE (2001)
- [3] 秀耕一郎、渡辺英雄、九州大学応用力学研究所 全国共同利用研究成果報告 第7号 (2003)
- [4] 秀耕一郎、太田丈児、渡辺英雄、九州大学応用力学研究所 全国共同利用研究成果報告 第8号 (2004)
- [5] 秀耕一郎、渡辺英雄、九州大学応用力学研究所 全国共同利用研究成果報告 第9号 (2005)
- [6] 秀耕一郎、宮原勇一、渡辺英雄、九州大学応用力学研究所 全国共同利用研究成果報告 第10号 (2006)

表1 化学組成と熱処理の条件

Element	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N	Fe
	0.016	0.7	1.2	0.031	0.002	12.2	17.3	2.1	-	bal.

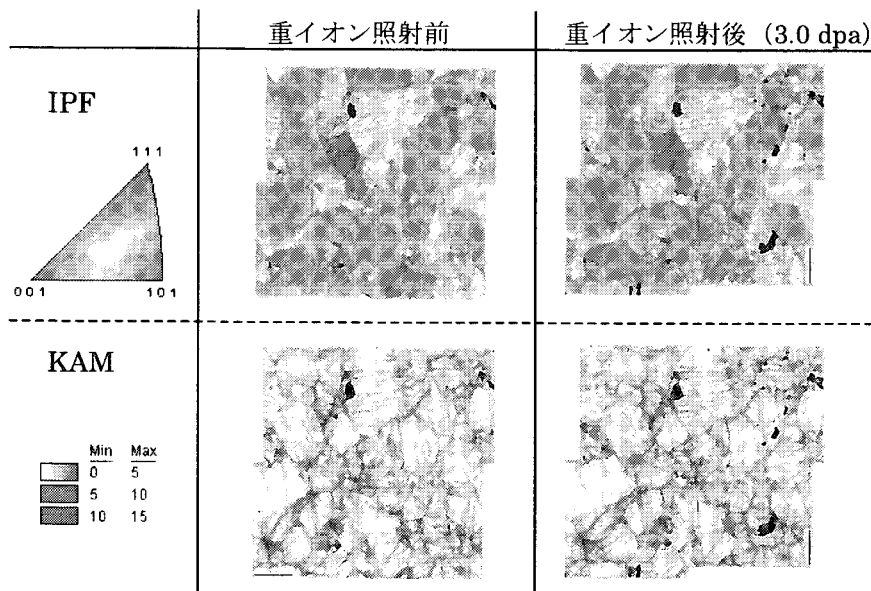


図1 重イオン照射前後のIPF像とKAM像の変化の例

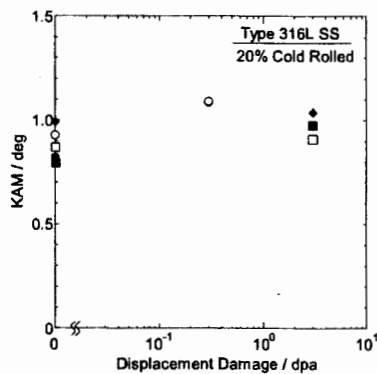


図2 KAMの重イオン照射量依存性

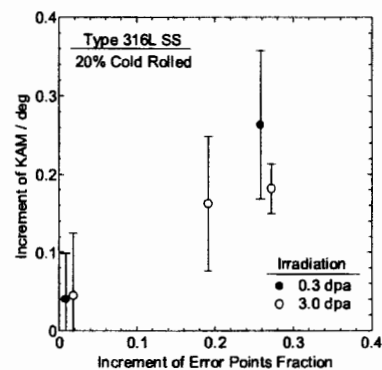


図3 照射前後におけるKAMの変化量とデータ欠損領域の増加割合の関係

昇温時におけるタングステン表面プリスタの爆裂のSEM観察

独立行政法人 日本原子力研究開発機構 核融合研究開発部門
トリチウム工学研究グループ 洲 亘

1. 目的

九州大学応用力学研究所の昇温機構付き走査型電子顕微鏡を用い、低エネルギー高フラックスの重水素プラズマ照射によるタングステンでのプリスタについて、昇温に伴う爆裂を直接観察し、ITER ダイバータのプラズマ対向材料であるタングステンにおけるプリスタの爆裂挙動を解明する。

2. 実験方法

- (1) タングステン試料：切断研磨後1800°Cで再結晶熱処理
- (2) プラズマ照射実験：低エネルギー高フラックスの重水素プラズマ照射装置を用いタングステンでのプリスタ試料を作製した。照射条件は、エネルギー38 eV; フラックス 10^{22} D/m²s; フルエンス 10^{27} D/m²まで; 温度310~1000 Kである。
- (3) 昇温脱離(TDS)実験：プリスタの爆裂に伴った重水素の突発的な放出を測定した。
- (4) SEM観察：昇温脱離(TDS)実験後プリスタの様々な爆裂様子をSEMで観察した。

3. 実験結果

(1) 重水素の突発的な放出：Fig. 1に示すように、TDS実験においてプリスタの爆裂に伴った重水素の突発的な放出ピークが400~750 Kまでの広い温度範囲で多数観測された。

(2) プリスタの様々な爆裂様子：Fig. 2に示すように、TDS実験後プリスタの様々な爆裂様子（結晶粒界付近、プリスタの層界面、プリスタの横、プリスタのトップ、プリスタの蓋の一部、プリスタの全部）が確認された。

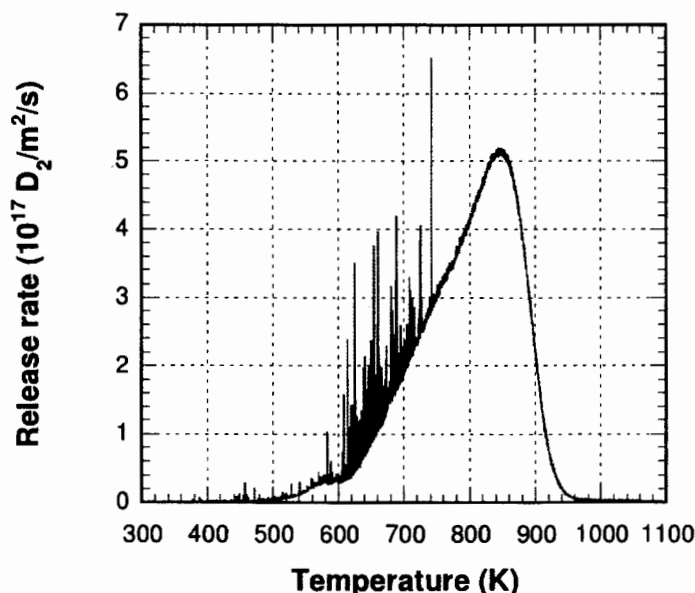


Fig. 1 TDS spectra of tungsten exposed to the fluence of 10^{26} D/m² at 500 K (heating rate: 0.5 K/s).

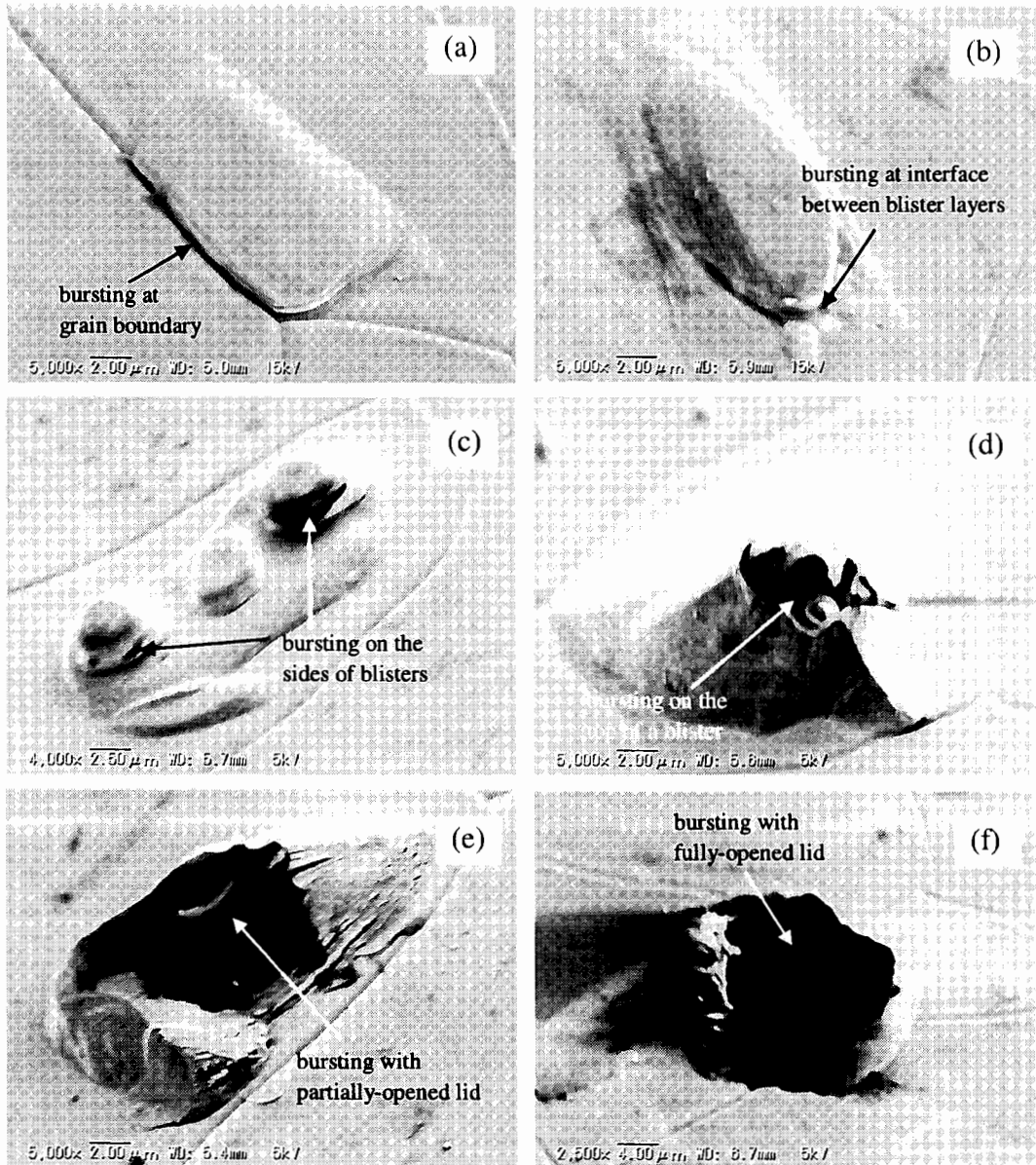


Fig. 2 SEM images of various bursting features of small blisters at the recrystallized tungsten exposed to fluence of 10^{26} D/m² at 520 K and then heated to over 1000 K.

4. 研究組織

原子力機構側：洲 亘、核融合研究開発部門 核融合エネルギー工学研究開発ユニット トリチウム工学研究グループ、研究主幹

九州大学側：徳永和俊、九州大学 応用力学研究所、プラズマ・材料力学部門 プラズマ表面相互作用分野、助教授

5. 参考文献

- [1] W.M. Shu, K. Isobe and Y. Yamanishi, "Temperature dependence of blistering and deuterium retention in tungsten exposed to high-flux and low-energy deuterium plasma," **Fusion Eng. Des.**, in press (2008).
- [2] W.M. Shu, A. Kawasuso and Y. Yamanishi, "Recent findings on blistering and deuterium retention in tungsten exposed to high-fluence deuterium plasma," **J. Nucl. Mater.**, in press (2008).

プラズマ実時間制御を考慮したプラズマ断面位置形状再構築システム(CCS)のST装置への適用検討

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 王 楓、中村一男

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)、計画中の新STの検討に伴い、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研究開発機構 JT-60 で現在稼動中である「CCS(コーシー条件面)法」を用いた実時間プラズマ断面形状再構築動画可視化システムを小型ST、および新STへ応用するための検討、システム設計の提案を行うものである。

研究の具体的方法

研究対象としては、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への適用に向けて、引き続き以下の検討を行う。

- ①最小自乗法によるCCS法の観測方程式を、係数マトリクスを特異値分解した方法で精度の検討を行う。
- ②渦電流解析の検討。
- ③以上を踏まえたシステム構築設計を実施する。

結果概要

①CCS法の特異値分解による精度検討

CCS(コーシー条件面)法はプラズマ断面形状を再構成する数値的手法であり、通常のコカマクにおいて良い精度を有する。アスペクト比の小さな球状コカマクに適用するため種々の検討を実施してきた。これまで、CCS法における観測方程式を最小自乗法で解いてきたが、ここでは、係数マトリクスを特異値分解し、特異値(図1)の大きな成分から順に一般逆行列を求めた。図2にフラックスループによる測定値と最大特異値に対するモードを示す。

平衡コードにて求めたCPD磁気面形状の一例を図3に示す。図4には特異値の大きな成分から順に、第1成分のみ、第3成分まで、第5成分までの逆変換を示している。図5は全成分を用いたCCS法による再構築結果を示す。本断面形状の場合は図2に示す第1成分のみによる逆変換によりほとんど再構成されていることが分かる。従って、実験においてフラックスループにノイズが重畳された場合でも高次成分を打切ればノイズにロバストな再構成が期待されることが分かった。

また、大きい特異値に対するフラックスループの種類確認や、渦電流の存在する系で適用した場合の再構築精度を検討した。

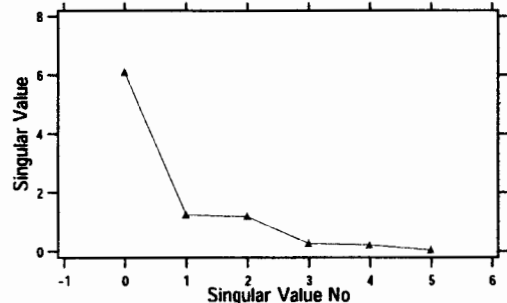


図1 観測方程式の係数行列の特異値

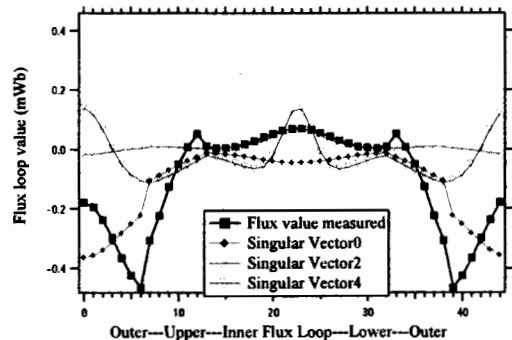


図2 特異値とフラックスループ測定値

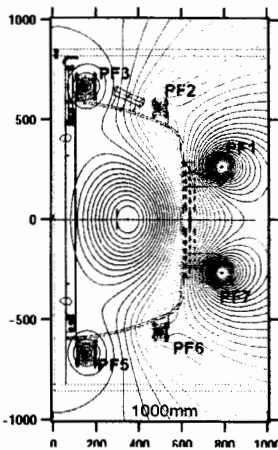


図3 平衡コードによる磁気面形状

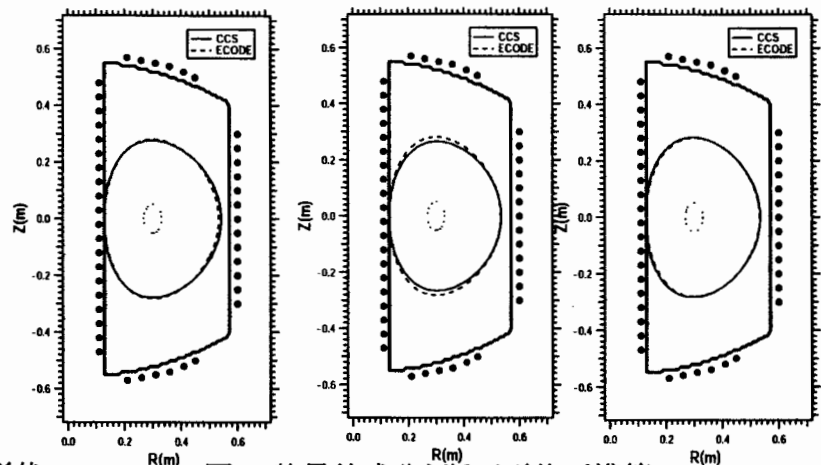


図4 特異値成分と断面形状再構築

②渦電流解析の検討

CPDにおける解析では、渦電流は以下を仮定した。

- (1) PFコイル位置に実効的渦電流。
- (2) 真空容器に部分的な渦電流。

この条件下で、渦電流解析を実行した。その結果、渦電流分布を適当に選ばないと特異値分解は有効とならないことが判明した。

また、渦電流を組込む場合の注意点として、渦電流が外部の計測で求まるかという問題があり、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

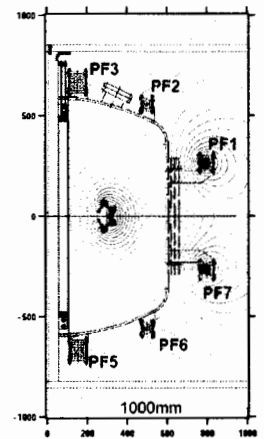


図5 CCS法による再構築結果

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。

③実時間プラズマ断面形状再構築／動画可視化システム設計の提案

現在、JT-60で稼働中の「プラズマ映像データベースシステム」の構成を図6に示す。CCS法による演算ロジックを組込んだ6台のPCIバスシステムは、電磁気センサー信号(磁気プローブ、磁束ループ)とポロイダル磁場コイル電流信号を入力後、並列動作しプラズマ断面形状の再構築を最長1.0ms周期の実時間で計算処理している。同時に、プラズマ断面形状の再構築時に得られるプラズマ位置形状パラメータを基に汎用OSパソコン1台でプラズマ断面形状を実時間動画可視化(約16ms/1フレーム)を行っている。この実時間制御におけるデータ通信はRM(リフレクティブメモリ:VME/PCI_VMIC5576, 256KB, 6.2MB/s, GE Fanuc社製)を用いている。更に、放電毎の動画可視化データはプラズマムービーキャプチャーシステムによりMPEG2ファイルとしてRAIDに蓄積される。その後、映像データベース用WebサーバでMPEG4ファイルに変換された動画可視化データは所内LANへ配信する。また、汎用PCによる即時プラズマ断面形状ビューワーシステムにより放電終了後、即時にプラズマ断面形状の確認が出来る。

本システムは、上記市販のハードウェアを組み上げ、ソフトウェアをインストールすることで、九大応力研プラズマ実験装置などへ適用することが可能であり、効率的実験データ解析に貢献出来ることから、導入を提案する。

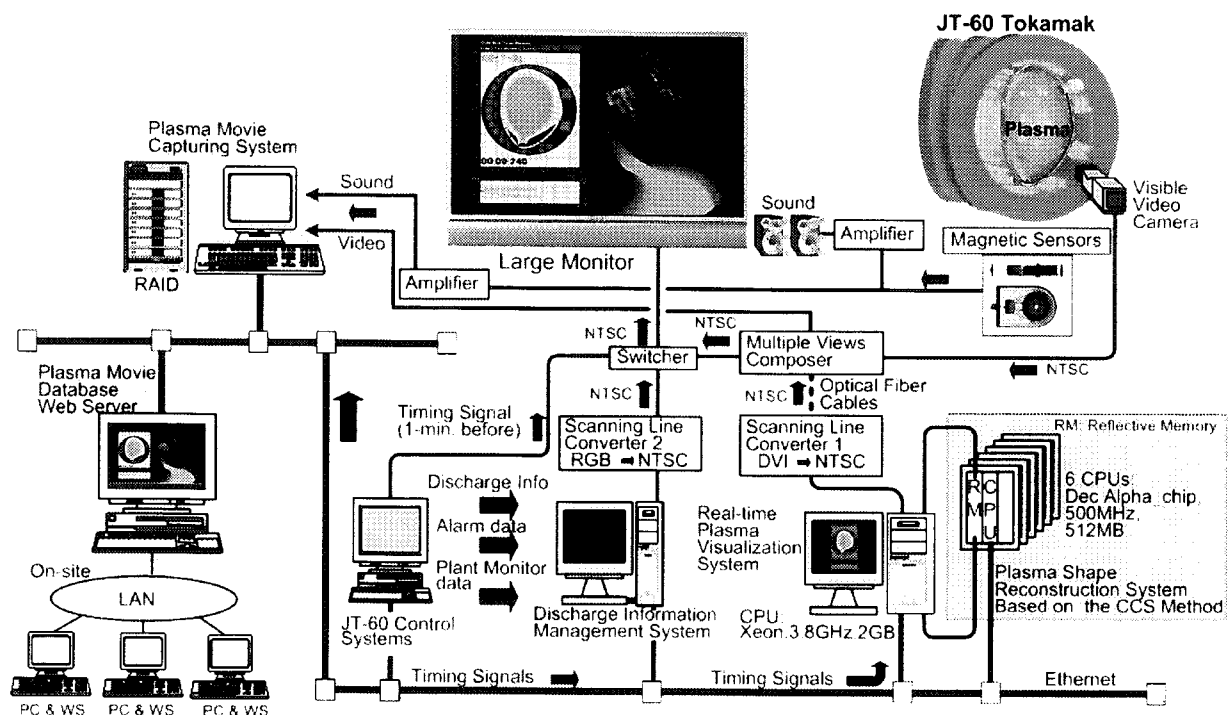


図6 プラズマ映像データベースシステム

関連文献

- K. Kurihara, et al., "The Basic Methods for Understanding of Plasma Equilibrium toward Advanced Control," Fusion Eng. Des., 74 (2005), pp.527-536
- 中村一男, 他, 「CCS法によるプラ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)
- M. Sueoka, et al., "The Plasma Movie Database System for JT-60," Fusion Eng. Des., 82 (2007), pp.1008-1014
- M. Sueoka, et al., "Development of the Supervisory Discharge Operation Monitoring System for JT-60," Fusion Eng. Des., Accepted for publication.

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と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であると考えられている。熱クリープ変形を抑えるための組織制御として、バナジウム合金では、微小 Ti-CON 析出物の高密度分散、低放射化フェライト鋼では、焼き戻し熱処理温度の調整によるマルテンサイトラス組織の微細化が挙げられる。これらの組織制御による性能向上の可能性を明らかにするには、高温クリープ変形による分散析出の変化、ラス構造の変化、それらと変形転位組織の発達との関係を明らかにする必要がある。

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、実験を開始した。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。

本研究では、この試験装置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することを目的とする。2007 年度は本研究の初年度として、析出強化 V-4Cr-4Ti の熱クリープ変形後の組織変化を中心に研究を進めた。

2. 方法

核融合科学研究所において、V-4Cr-4Ti 合金 (NIFS-HEAT-2) のクリープ変形試験を「微小試験片高温クリープ試験装置」を用いて行った。スタンダードの熱処理 (1000°C 2 時間 : STD) 以外に、溶体化後析出分散熱処理を行い高密度微細 Ti-CON 析出分散を行なった試料 (SAA)、さらにそれに 20% 冷間加工を加えた試料 (SAACW) について比較試験を行い組織制御の効果を明らかにした。変形試験済みの試料を、電子顕微鏡観察用試料に切り出し、応用力学研究所の透過電子顕微鏡により観察し、析出分布、変形転位の分布およびバーガースペクトルを求め、クリープ特性と内部組織の関係を明らかにした。

3. 結果と考察

図 1 に、SAA と SAACW 材を荷重なしで 750°C で熱処理を行なったときの組織変化を示す。SAA 材では、析出が発生し粗大化するが、SAACW では、転位はある程度回復するものの析出の粗大化は見られず、加工転位を導入することにより、析出の粗大化を抑制できることが分かる。図 2 は STD と SAACW 材のクリープ変形曲線を示したもので、SAACW ではクリープ変形が抑制されていることが分かる。しかし、抑制幅は限定的で、176MPa、80 時間で 3% ほどの変形が起こっている。

図 3、図 4 はそれぞれ SAACW 材の 750°C、80 時間無荷重で熱処理した材料と、同じ時間 176MPa 応力をかけてクリープ

変形させた試料の、結像条件を変えて撮影した転位像を示す。これらの解析により、無荷重の場合は、 $a\langle 100 \rangle$ 型と $a/2\langle 111 \rangle$ 型が混在しているが、クリープ変形の場合は、ほとんどが $a/2\langle 111 \rangle$ 型で、バーガースペクトルが引張方向に近いことが分かった。

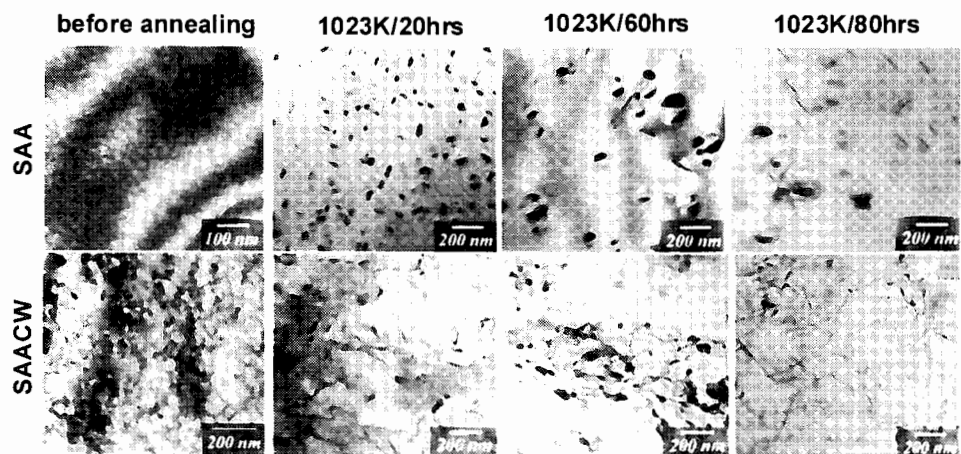


図 1 SAA、SAACW 材の 750°C 熱処理による組織変化

このように、加工により導入される転位は、 $a\langle 100 \rangle$ 型と $a/2\langle 111 \rangle$ 型の混合型であるが、クリープ変形を進めると、 $a/2\langle 111 \rangle$ 型が支配的になることが分かった。 $a\langle 100 \rangle$ 型転位は組織の安定化に寄与する不動転位であり、この型の転位の回復を抑制することが、析出の粗大化を防ぎ高温強度を向上させるために必要であることが明らかになった。

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）、譚継明（中国西南物理研究院）、吉田直亮、渡辺英雄、荒木邦明（九州大学応用力学研究所）

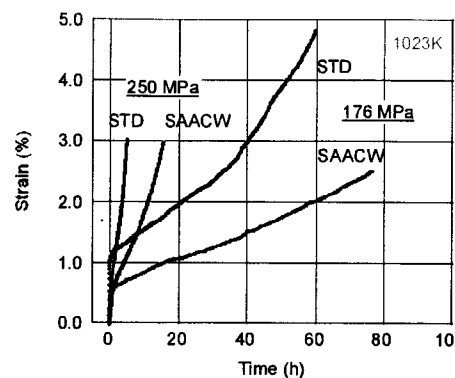


図2 STD, SAACW材のクリープ変形。

5. 発表論文

- (1) T. Muroga, J.M. Chen, V.M. Chernov, K. Fukumoto, D.T. Hoelzer, R.J. Kurtz, T. Nagasaka, B.A. Pint, M. Satou, A. Suzuki and H. Watanabe "Review of advances in development of vanadium alloys and MHD insulator coatings" Journal of Nuclear Materials, 367-370, 2007, 780-787
- (2) J.M. Chen, T. Nagasaka, T. Muroga, S.Y. Qiu, C. Li and N. Nita, Mechanical properties of V-4Cr-4Ti strengthened by precipitation and cold rolling, Journal of Nuclear Materials, Volume 374, 2008, Pages 298-303
- (3) T. Muroga, T. Nagasaka, J.M. Chen, Y.F. Li and H. Watanabe, Microstructure of Creep-deformed V-4Cr-4Ti Strengthened by Precipitation and Cold Rolling, 13th International Conference on Fusion reactor Materials, Dec. 2007, Nice.



図3 SAACW 750°C、80時間熱処理後の転位像、結像条件を変えて撮影。結像条件による像の変化から、1, 2, は $a\langle 100 \rangle$ 型、3, 4, は $a/2\langle 111 \rangle$ 型の転位であることが分かった。

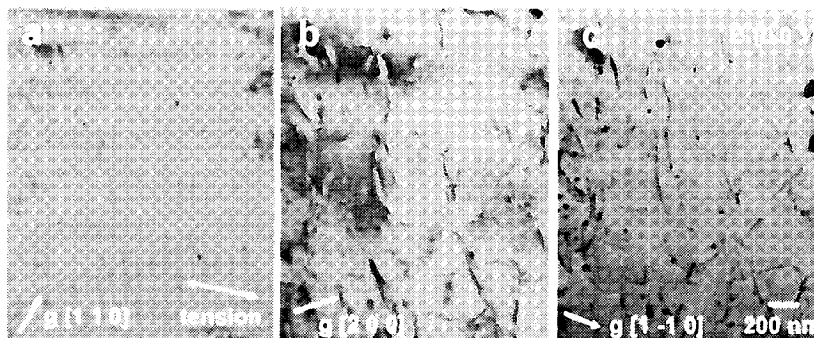


図4 SAACW 750°C、80時間、176MPa 荷重後の転位像、結像条件を変えて撮影。結像条件による像の変化から、ほとんど全ての転位が $a/2\langle 111 \rangle$ 型であることが分かった。

ニューラルネットワークのCPD/QUESTプラズマ計測への応用

電気通信大学 竹田辰興

目的

CPD/QUESTの計測データ解析を念頭に、ニューラルネットワーク選点法(NNCM: Neural Network Collocation Method)の新しい応用法について研究開発する。特にこれら球状トカマクでは磁場やプラズマ諸量の空間構造の大きな変化がその安定な閉じこめを保証する上での大きな要素となっておりプラズマ諸量の空間分布等を精度良く再構成することが重要な課題となることを考慮して、NNCMを用いたトモグラフィ像再構成法について詳しく検討する。

研究概要

NNCMは本共同研究の代表者が考案した多層ニューラルネットワークの学習スキームで、通常行われている教師有り学習と対照的な方法である。多層ニューラルネットワークは入力データを独立変数、出力データを従属変数とする関数と考えられる。この関数の形を決めるために、既知の入力データと出力データの組(教師データ)を多数用意して、補間式を構成するのが教師有り学習である。NNCMでは、入力データと出力データの関係が微分方程式や積分方程式等で表されるとして、教師データを使わずに、選点法を用いて解が測定データと矛盾しないようにこの関数関係を定める。教師データを用いないために、教師データを用意する際に不可避な「モデル依存性」を回避できる。また、NNCMにおいては、「ニューラルネットワークの学習」は「データ解析」そのものである。このため、教師有り学習を行ったニューラルネットワークによるデータ解析に比べて計算時間が大きい、種々の利点を考慮するとデータ解析のためにNNCMは極めて有用であると考えられる。色々な応用が考えられるが、プラズマ解析に有望と見られるトモグラフィ関連問題に限って検討した。

◇ 直線投影経路型トモグラフィ

X線計算機トモグラフィ(CT)のように投影経路が直線で近似できるものを直線投影経路型トモグラフィと呼ぶことにする。電磁波がプラズマ中を通過したときに受ける位相遅延量は経路に沿った電子密度の線積分に比例する。多数の経路に沿った位相遅延量を測定して逆変換すれば電子密度分布のトモグラフィ像が再構成される。既にGPS衛星からの電磁波を用いて電離圏プラズマの電子密度分布再構成に成功している。核融合プラズマの密度測定に用いられる「干渉計」では、通常、すべての投影経路が同一方向であるので、この情報だけでは密度分布は再構成されない。NNCMでは数値計算で得られたMHD平衡形状と連立させることにより密度分布再構成が可能であることも既に示した。いずれも核融合プラズマ計測に直ちに適用可能である。これらの応用に関して分解能と安定性を保障するために適切なメッシュ幅の離散化が有効であることを明らかにした。この計測データの場合被積分量は診断対象である密度分布のみに依存し入射電磁波の強度、エネルギー等に依存しないが、X線や粒子線等の減衰量に基づくCTでは投影経路に沿った粒子線等の強度Nの変化を考慮してウエイト更新量を計算しなければならない。この問題におけるNNCMの重み更新式を以下のよ

うに求めた。入射ビームは有限のエネルギー幅を持つとし、減衰係数はエネルギー依存性を持つ因子 $s(e)$ に密度 $\rho(\mathbf{x})$ を掛けたものと仮定する（慣性項は省略）。

$$\Delta w \propto -2(N - N_{obs}) \left[\int_{e_{low}}^{e_{high}} n_0(e) s(e) \exp\left(-s(e) \int_0^L \rho(\ell') d\ell'\right) de \right] \left[\sum_{j=1}^J \alpha_j \frac{\partial \rho_j}{\partial w} \right]$$

一方、単位長さあたりのエネルギー損失が $(a + b \cdot e)\rho(\mathbf{x})$ であるようなビームのエネルギーが e^* から e_c まで減衰するときに $e^* = e_c + \Delta e$ を計算する NNCM の重み更新は次式の通りである。

$$\Delta w \propto \frac{\partial E_p}{\partial w} = 2(e^* - e_{obs}^*) \sum_{j=1}^J \frac{\partial e^*}{\partial \rho_{p,j}} \frac{\partial \rho_{p,j}}{\partial w}, \quad \frac{\partial e^*}{\partial \rho_{p,j}} = -g_j (a + b e_c) \exp\left[-b \sum_{j=1}^J g_j \rho(\mathbf{x}_{p,j})\right]$$

これは、透過可能エネルギーの閾値 (e_c) に注目して像再構成を行う場合に利用できる。これらの更新式に基づき、減衰ビームのデータを使ったトモグラフィ像再構成が可能である。

◇ 波線追跡（レイトレーシング）型トモグラフィ

2つの点の間を伝播する波動に関する情報から波動が通過した媒質の諸量を再構成する際の課題は、波動の通過する経路の形があらかじめ知られていないことである。この種の解析の典型例は地震波による地球のトモグラフィで、通常は経路と媒質分布の決定を交互に反復的に解くことにより実行する。NNCMによるトモグラフィでは、次式に示される目的関数を最小化するように経路決定と媒質分布決定を同時に行うことができる。

$$E = E_A + E_B, \quad E_A = \sum_{s,m} T_{s,m}, \quad E_B = \sum_{s,m} (T_{s,m} - T_{s,m,obs})^2, \quad T_{s,m,obs}, \quad T_{s,m} = \sum_{j=1}^J \frac{\|\mathbf{x}_j^{s,m} - \mathbf{x}_{j-1}^{s,m}\|}{\bar{v}_j}$$

T は波動伝播時間、 s, m, j は、波源、観測点、経路上の選点の番号を表す。ここで、選点を安定に決定するためには、波源と観測点を結ぶ直線に直交する平面上を探索する等の制約条件を課することが必要である（図1）。図2に示すシステム構成でトモグラフィ像再構成を行う。核融合プラズマの診断については利用する波動の種類を選択を含めて更なる検討が必要であるが、同様の方法でトモグラフィ像再構成が可能であると考えられる。

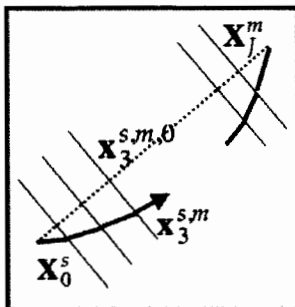


図1

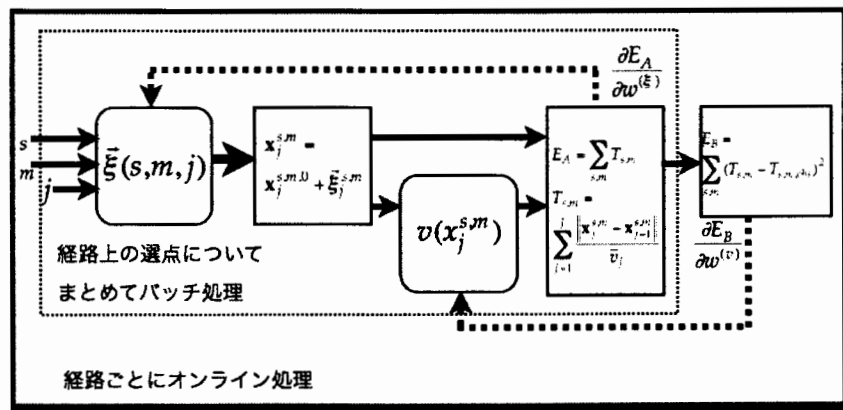


図2 （角の丸い四辺形はニューラルネットワークを表す）

※ 竹田、ニューラルネットワークトモグラフィの発展、画像計測研究会 2007 (NIFS、2008. 3. 5-6)

転位ループの動的挙動に対する溶質原子の効果

大阪大学超高压電子顕微鏡センター 荒河一渡

目的

格子間原子の集合体の動的挙動は、D-T 核融合による中性子照射下での材料中の微細構造発達過程において重要な役割を果たすことが知られている。我々はこれまでに、高エネルギー電子照射によって純 Fe 中に形成される二種類の格子間原子型転位ループ (Burgers ベクトル $b=1/2\langle 111 \rangle$ のループと $b=\langle 100 \rangle$ のループ) の動的挙動を調べ、両種類のループともに Burgers ベクトル方向に一次元移動し得ること、 $b=1/2\langle 111 \rangle$ のループの一次元移動の頻度は $b=\langle 100 \rangle$ のループのそれより極めて高いことなどを明らかにしてきた。

本共同研究は、平成 17 年度より開始された。これまでに、核融合炉構造材料の候補である Fe-Cr 合金のうち、Fe-Cr モデル合金を実験対象とし、Fe 中のループの移動過程に Cr が及ぼす効果を抽出することを目的として、純 Fe (純度 99.998 %) および Fe-0.1at.%Cr, Fe-3 at.% Cr, Fe-9at.%Cr, Fe-15at. % Cr 合金におけるループの動的挙動を TEM その場観察法により系統的に調べてきた。その結果の一部は、平成 17 年度および平成 18 年度の報告書に記載した。

一方、研究の進展の過程で、意図的に添加していない ppm オーダーの極微量な不純物原子までもが、ループの移動に大きな影響を与えることが明らかとなってきた (Arakawa *et al.*, *Science* 2007)。本報告では、純 Fe 中の $1/2\langle 111 \rangle$ ループの移動過程について調べた結果を述べる。

実験方法

大阪大学超高压電子顕微鏡センターに付随する超高压電子顕微鏡 H-3000 (Hitachi) を用いて各 TEM 用薄膜試料に高エネルギー電子照射を行い、直径数ナノメートルの微小ループを導入した。ループを導入した試料を汎用電子顕微鏡に移し、加速電圧 200 kV あるいは 300 kV にて試料を加熱しながら、ループの挙動を観察した。ここでは、(a) ループの移動頻度の温度・時間依存性の測定、および (b) ほぼ孤立したループの挙動の調査、という二種類の実験をおこなった。実験 (b) においては、表面起因のものを含む様々な内部応力をループの移動に影響を及ぼさない程度に減じた。試料の温度は、290 から 700 K とした。

実験結果および考察

ループは時折一次元移動を示した。ループの移動頻度の温度・時間依存性を FIG 1 に示す。ここで、移動頻度は全ての見えているループの数に対する移動しているループの数の比で定義した。試料を一度約 450 K (T_c) まで加熱すると、初回の加熱時には移動したループが T_c 以下の温度では移動できなくなることがわかる。このことは、初回の加熱において、C や N などの高い拡散係数を持つ格子間型不純物原子によるコトトレル雰囲気 T_c 程度でループの周りに形成され、ループをロックすることを示唆する。雰囲気中の不純物原子の平衡濃度は、フェルミーディラック分布関数によって与えられる。例えば、刃状転位と C 原子の結合エネルギーは最大で 0.7 eV 程度と計算されている。本実験に使用された試料中の C 原子の濃度は 僅かに 0.8 wt. ppm であるが、これらのサイトは C 原子によって 450 K にて 100%、700 K においても 30% も占められることになる。次に、移動頻度が温度に対してほぼ単調に増加する T_c 以上の温度域においてほぼ孤立した個々のループの挙動について調べた。

FIG 2A は、ループ像の重心位置を $1/30$ s (Δt) ごとに測定することによって取得したループの位置の一次元変位の時間変化を示す。FIG 2B は、そのウェーブレット変換を示す。高周波領域に欠損期間が存在することがわかる。これらの欠損期間は、ループを構成する

転位の分散した静的な不純物原子によるトラッピングによると考えられる。トラッピングサイトからデトラップされたループの移動は Δt の時間ステップでも連続的に追跡するのが可能なほど遅い。よって、その平均二乗変位の時間変化からループが拡散を行っているのか否かを調べ、拡散を行っている場合には拡散係数 D を求めることができる。FIG 3 は、デトラップされたループの D の温度依存性を示す。 D の温度依存性は、アレニウス則を満たしていることがわかる。この図の各直線の傾斜からループ拡散のための活性化エネルギー E は、ループサイズにかかわらず、統計的なばらつき 0.03 eV 以内で、1.3 eV と求められた。分子動力学法により計算されている純金属中のより微小なループの E のサイズ依存性をここで求めたループのサイズ範囲まで外挿すると、サイズによらず $E < 0.1$ eV となり、本実験で求められた値はこの値より大幅に大きいことになる。ここで見られたループの拡散の劇的な減速の要因は、動的な雰囲気のドラッグに帰せられる。

今回、意図的に添加していない ppm オーダーの不純物原子ですら、(i) ループの静的なトラッピングサイトとして働くことにより、(ii) ループ周りに雰囲気を形成しロックすることにより、さらに (iii) 高温では雰囲気はループにドラッグされることにより、ループの移動を阻害することが明らかとなった。今後、より精確な実験によって、これらの現象を包括する理論的な枠組みを構築する必要がある。

研究組織

代表者：大阪大学超高压電子顕微鏡センター 荒河一渡
 協力者：大阪大学超高压電子顕微鏡センター 森博太郎
 所内世話人：九州大学応用力学研究所 宮本好雄
 所内世話人：九州大学応用力学研究所 吉田直亮

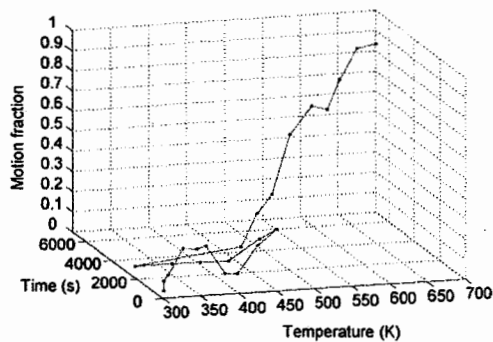


FIG. 1. Dependence of motion fraction of loops on temperature and time.

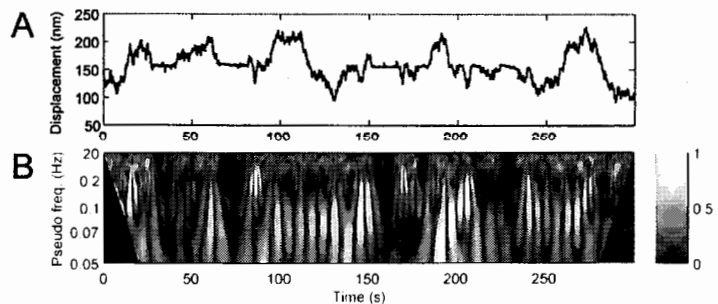


FIG. 2. Analysis of loop motion. (A) temporal variation in the one-dimensional displacement of an almost isolated loop. (B) wavelet transform of the temporal variation in the one-dimensional displacement shown in panel (A).

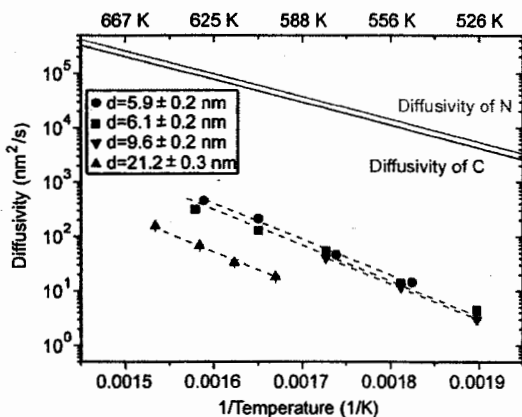


FIG. 3. Dependence of loop diffusivity on temperature.

FePt-Al₂O₃グラニューラー薄膜における照射誘起構造変化

九州大学大学院工学府：白井学 津守孝一

同 工学研究院：轡田政則、安田和弘、松村晶

【序論】

イオン照射は弾性的なはじき出しおよび電子励起を引き起こし、材料に選択的にエネルギーを与えることができる。特に重イオンは材料に与えるエネルギー密度が大きいので、ナノ構造制御方法としての利用が期待できる。本研究グループでは、次世代の高密度記録媒体として期待されているFePtナノグラニューラー薄膜の構造制御方法としてイオン照射の可能性について検討を進め^{[1][2]}、主に透過型電子顕微鏡(TEM)によるナノ粒子の構造解析を行っている。本報告では通常の2次元観察に加えて、電子線トモグラフィーを用いたFePtナノ粒子の3次元形状変化について報告する。

【実験方法】

本研究で用いた試料はSi基板上の非晶質Al₂O₃中にFePtナノ粒子が分散する膜厚20nmのFePt-Al₂O₃ナノグラニューラー薄膜であり、イオンスパッタ法により試料組成(FePt₅₅Pt₄₅)₄₇(Al₂O₃)₅₃で作製されたものである。この試料に対して、まず真空中において650°Cで20分間の熱処理を施した。その後、九州大学応用力学研究所に設置される高エネルギーイオン発生装置(タンデム型加速器)を用いて室温にて2.4MeVのCu²⁺イオンを照射した。照射は試料板面に対して垂直に行い、照射量は $5.0 \times 10^{18} \sim 1.0 \times 10^{20}$ ions/m²である。イオン照射後、TEMを用いて照射による構造変化を観察した。電子線トモグラフィーは九州大学超高压電子顕微鏡室のJEM-3200FSK(日本電子社製)を用いて、-66°~+66°の角度範囲で2°ステップで合計67枚の明視野像を取得し、その後コンピューターによる3次元構築計算を行った。

【結果および考察】

図1にイオン照射前の試料(650°C20分間熱処理)

の明視野像を示す。図1において黒いドット状のコントラストで観察されるものがFePt粒子である。照射前の試料は多くのFePt粒子がお互いに結合していることが分かる。図2に照射前試料の断面観察結果を示す。これより照射前のFePt粒子はほぼ球状であり、膜中に均一に分散していることがわかる。図3にはCuイオンを 5.0×10^{18} ions/m²まで照射した試料の明視野像を示す。この照射量では粒子同士が結合し、照射前と比べほとんど変化がなかった。照射量をさらに増やすと粒子に変化が観察された。図4にCuイオンを 1.0×10^{20} ions/m²まで照射した試料の明視野像を示す。照射前はお互いに結合していた粒子が分断されていることがわかる。この試料に対して電子線トモグラフィーによる3次元構築像を図5に示す。これよりいくつかのFePt粒子はイオン照射方向である膜厚方向に伸びた形状へと変化していることが分かる。このような粒子変形の原因としてFe原子、Pt原子の弾性的なはじき出しが考えられる。しかし、SRIMコードによるとFePt粒子におけるはじき出しdpaは約0.4であり、粒子を細分化するには小さい。そのためはじき出し効果のみでは粒子の変形を説明することは困難である。その他の原因としては、アモルファスAl₂O₃母相への照射効果が考えられる。アモルファスAl₂O₃母相へイオンが入射するとイオンの軌跡に沿った熱が発生し、イオン入射方向に垂直に局所的な応力が働くイオンハンマリングと呼ばれる効果が発生する。すなわちはじき出し効果とイオンハンマリング効果の2つの影響により粒子が変形すると考えられる。

【結論】

本研究では、FePtナノグラニューラー薄膜の微細構造における2.4MeV Cu²⁺イオン照射の効果について調べた。照射量が 5.0×10^{18} ions/m²程度の低照射量で

はFePt粒子に顕著な変化は観察できなかつた。しかし、Cuイオンを 1.0×10^{20} ions/m²まで照射すると、結合していた粒子が分断され、膜厚方向に伸びた粒子が存在していた。Cuイオン照射により粒子の形状変化が起こったことからイオン照射はナノ構造制御

の手法として期待することができる。

【参考文献】

- [1] S.Matsumura et al.:Scripta Mater. 53 (2005) 441
- [2] M.Shirai et al. :Mater.Trans. 47 (2006) 52

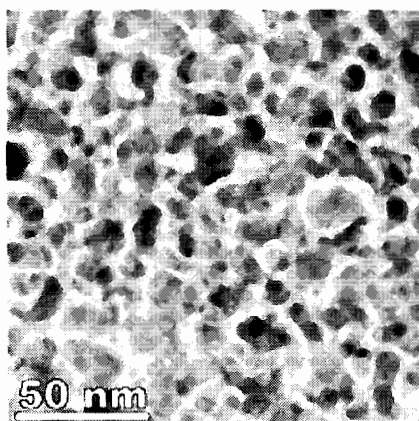


図1 照射前試料(650°C20分間熱処理)の明視野像

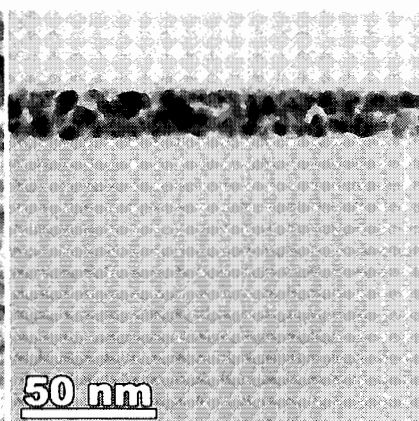


図2 照射前試料(650°C20分間熱処理)の断面図

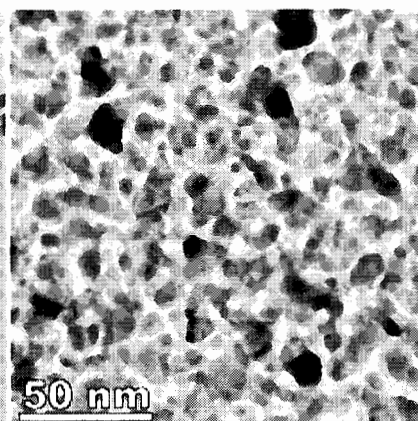


図3 2.4 MeV Cuイオンを 5.0×10^{18} ions/m²まで照射した試料の明視野像

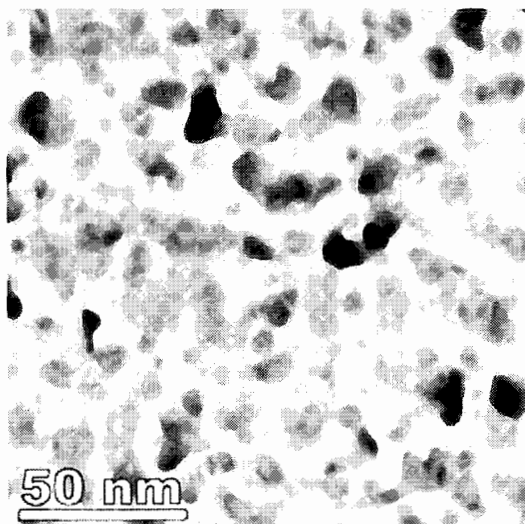


図4 2.4 MeV Cuイオンを 1.0×10^{20} ions/m²まで照射した試料の明視野像

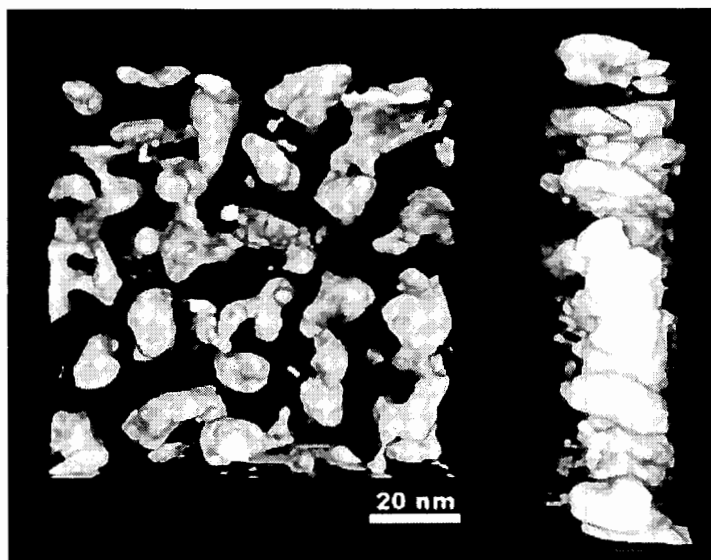


図5 2.4 MeV Cuイオンを 1.0×10^{20} ions/m²まで照射した試料の3次元構築像

蛍石型結晶の欠陥形成に与える電子励起の効果

～La 系元素を添加した CeO₂ の電気伝導度と照射誘起微細構造変化～

九大院・工 山本将史、安永和史、響田政則、椎山謙一、安田和弘、松村晶

1. 緒言

高燃焼時の UO₂ 燃料では、結晶粒の微細化および気孔の粗大化を伴う「リム組織」が燃料ペレット外周部に形成される。リム組織の形成は、核分裂生成物(FP)ガスの放出挙動の増大や熱伝導率の低下を引き起こすため、燃料体の健全性を損なうことが懸念されている。これまでの研究から、リム組織の形成は、照射により蓄積された転位やFPと、核分裂片が誘起する高密度電子励起の相互作用に起因すると考えられているが、その詳細な機構は不明である。

CeO₂ は UO₂ と同じ蛍石型構造を有し、融点が近く、約 1000 K までほぼ等しい熱伝導度を持つ。また、他の ZrO₂ などの蛍石型酸化物と比べて相対的に安定であることなどの理由により、CeO₂ は UO₂ の模擬材料として照射損傷研究が進められている。

CeO₂ に 4 価の Ce イオンとは価数が異なる 3 価のランタノイド(La 系元素)を添加すると、電気的中性条件を保つために酸素空孔が導入される。La 系元素を添加した CeO₂ では、電気伝導度が増加するという報告があり¹⁾、電気伝導度の増加は酸素空孔の移動度の増加と密接に関係があると考えられている。そこで我々はまず、La 系元素である Nd および La を添加した CeO₂ の電気伝導度測定を行い、添加元素濃度と電気伝導度の関係について調べた。また、La 系元素を添加した CeO₂ の照射欠陥の形成・成長過程は、高濃度の酸素空孔を含むため、CeO₂ のそれとは異なることが予想される。以上の背景に基づき、本研究では、La 系元素を添加した CeO₂ の電気伝導度と照射欠陥の形成・成長過程を調べ、蛍石型酸化物の照射誘起微細構造変化に及ぼす空孔の効果を明らかにすることを目的とした。照射実験は単純なフレンケル対を導入する電子照射と、軽水炉燃料中に生じる核分裂片を模擬した高速 Xe イオン照射を行った。

2. 実験方法

純度 99.99 % の CeO₂ 粉末および Ln₂O₃(Ln: Nd, La)粉末を秤量し、ボールミルにて 24 時間混合することにより、0 ~ 20 mol% の Ln₂O₃ を添加した CeO₂ 粉末を得た。得られた粉末を一軸加圧(50 MPa)および冷間静水圧圧縮(150 MPa)して、円柱状ペレットに成型した。このペレットを 1873 K にて 12 時間大気中で焼結し、多結晶バルク試料を得た。

電気伝導度測定用試料の作製については、まず焼結体を切り出し、約 350 μm の厚さまで機械研磨し、Ti 金属を用いてセンター、ガードリングおよびグラウンド電極を蒸着した。電気伝導度測定は温度 373 ~ 573 K、印加電圧 1 ~ 100 V、真空度 2.0 × 10⁻³ Pa の条件下で、直流三端子法を用いて行った。

電子顕微鏡観察用試料の作製については、まず焼結体を切り出し、約 200 μm の厚さまで機械研磨した後、日本原子力研究開発機構(JAEA)のタンデム型加速器を用いて、210 MeV の Xe イオンを 5 × 10¹⁵ ions/m² の照射量まで照射した。照射後の試料を、ディンブラーおよびイオン研磨装置を用いて透過型電子顕微鏡観察に適する試料に薄膜化し、微細組織観察を行った。

3. 結果および考察

図 1 に Ce_{1-x}Nd_xO_{2-x/2} (0 ≤ x ≤ 0.15) の電気伝導度の温度依存性を示す。図 1 より、全ての試料において電気伝導度は温度の増加とともに増加していることがわかる。また、Nd₂O₃ を添加した試料は、CeO₂ (x = 0) よりも 2 ~ 5 桁高い電気伝導度を示している。しかしながら、電気伝導度は、添加濃度の増加に対して単調に増加せず、添加濃度が 5.4 mol% (x = 0.054) の時に極大を示した。

イオン伝導に起因する電気伝導度 σ [S/m] は、

$$\sigma T = A \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (1)$$

$$E_a = \Delta H_m + \Delta H_a \quad (2)$$

と表される²⁾。ここで、 T [K] は絶対温度、 k [J/K] はボルツマン定数、 E_a [J] は酸素イオンの移動の活性化エネルギー、 ΔH_m は酸素イオンの移動エンタルピー、 ΔH_a は相互作用エンタルピーである。本研究で測定した電気伝導度を式(1)に代入し、得られた活性化エネルギー E_a の Nd₂O₃ 濃度依存性を図 2 に示す。添加濃度の増加とともに活性化エネルギーは減少し、5.4 mol% の時に極小を示し、それ以上の添加濃度では活性化エネルギーは増加している。

Nd₂O₃ を添加すると、酸素空孔が形成されるため、 ΔH_m は減少すると考えられる。しかし、ある添加濃度を超えると、酸素空孔が過剰に形成される為、空孔-空孔、または空孔-Nd イオンの結合対の寄与が大きくなり、 ΔH_a が増加すると考察されている。その結

果、図 2 に示すように $Ce_{0.946}Nd_{0.054}O_{1.973}$ で E_a が最小値を示したと考えられる。

図 3 に 200 keV 電子を照射した CeO_2 および $Ce_{0.946}Nd_{0.054}O_{1.973}$ の明視野像、および 1000 keV 電子を照射した $Ce_{0.946}Nd_{0.054}O_{1.973}$ の明視野像を示す。 $10^{25} e/m^2$ 程度の電子照射により、 CeO_2 では酸素イオンの集合体と考えられる転位ループ³⁾が形成されたが、 $Ce_{0.946}Nd_{0.054}O_{1.973}$ では照射欠陥は形成されなかった。1000 keV の電子照射においても 200 keV の電子照射と同様に $Ce_{0.946}Nd_{0.054}O_{1.973}$ では照射欠陥は観察されなかった。以上の結果は、電気的中性条件を保つために導入された酸素空孔と格子間原子の再結合により照射欠陥集合体の形成が抑制されたことによると考えられる。

図 4 に 210 MeV の Xe イオン照射により $Ce_{1-x}Nd_xO_{2-x/2}$ ($0 \leq x \leq 0.15$) に形成されたイオントラックの明視野像を示す。写真は Xe イオンの照射方向に垂直な方向から観察を行っている。イオントラック形成率には、添加元素および濃度による違いは見られなかった。しかしながら、 CeO_2 および $Ce_{0.99}Nd_{0.01}O_{1.995}$ では、円形のイオントラックが形成されたのに対し、添加濃度の高い $Ce_{0.946}Nd_{0.054}O_{1.973}$ および $Ce_{0.85}Nd_{0.15}O_{1.925}$ では、十字型の形状を持つイオントラックが形成された。この十字型のイオントラックの腕の方向は、一つの結晶粒内ではほとんどが同一であり、 $Ce_{0.946}Nd_{0.054}O_{1.973}$ の挿入図に示すように[100]方向に伸長していることが判明した。 $Ce_{1-x}La_xO_{2-x/2}$ においても同様に十字型のイオントラックが観察された。以上の結果は、高濃度の酸素空孔を介した酸素イオンの移動がイオントラックの形成過程に影響を与えていることを示唆している。

4. 結論

- (1) Nd_2O_3 を添加した CeO_2 の電気伝導度は、 CeO_2 と比較して増加し添加濃度 5.4 mol% で極大値を示した。
- (2) Nd_2O_3 を添加した CeO_2 においては、 CeO_2 と異なり電子照射による照射欠陥は形成されなかった。
- (3) 高濃度の Nd_2O_3 を添加した CeO_2 では、 CeO_2 とは異なり高速 Xe イオン照射により十字型のイオントラックが形成された。
- (4) La 系元素を添加した CeO_2 では、添加濃度に依存して、空孔濃度およびその移動の活性化エネルギーが変化した。これは、電子照射では照射欠陥形成の抑制に寄与し、高速 Xe イオン照射では十字型のイオントラックの形成に寄与していると考えられる。

参考文献

- 1) B.C.H. Steele, Solid State Ionics 129 (2000) 95.
- 2) S. Dikmen, P. Shuk, M. Greenblatt, Solid State Ionics 126 (1999) 89.
- 3) K. Yasunaga, et al., Nucl. Instr. and Meth. B 250 (2006) 114-118.

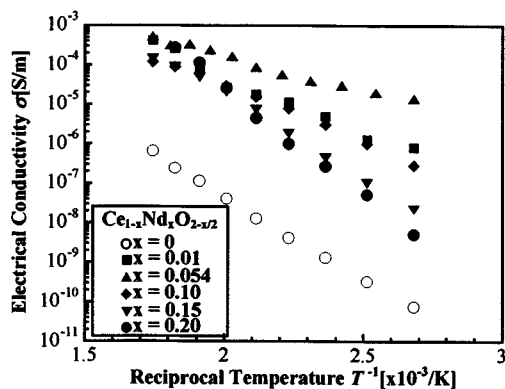


図 1 $Ce_{1-x}Nd_xO_{2-x/2}$ ($0.01 \leq x \leq 0.20$) の電気伝導度の温度依存性

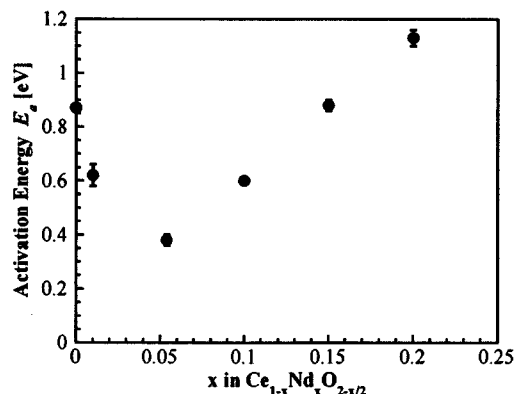


図 2 酸素空孔の移動の活性化エネルギーの Nd_2O_3 濃度依存性

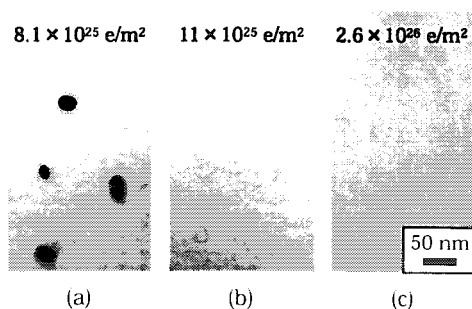


図 3 200 keV 電子を照射した (a) CeO_2 および (b) $Ce_{0.946}Nd_{0.054}O_{1.973}$ の明視野像、および 1000 keV 電子を照射した (c) $Ce_{0.946}Nd_{0.054}O_{1.973}$ の明視野像

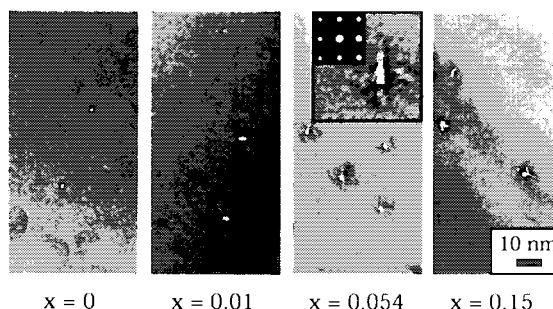


図 4 $Ce_{1-x}Nd_xO_{2-x/2}$ に形成されたイオントラックの明視野像 ($x = 0.054$ の挿入図はイオントラックの拡大図である。)

九大スフェリカルトカマク装置におけるプラズマ電流立ち上げの研究

九州東海大学 産業技術研究所 御手洗 修

1. 目的

スフェリカルトカマク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、現在の装置で CS なしプラズマ電流立ち上げの実験研究を行っておく必要がある。また、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ような配慮も必要である。本共同研究は QUEST (主半径 $R=0.68$ m, 小半径 $a=0.40$ m, アスペクト比 $A=1.7$, トロイダル磁場 $B_t=0.25$ T, プラズマ電流 $I_p=300$ kA) 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キャンセルコイルを用いた CS なし運転, 第二に PF4-13 とキャンセルコイルによるマーキングによるプラズマ電流立ち上げ, について調べることを目的としている。

2. キャンセルコイル

EBW 電流駆動のためには, EBW 波がプラズマ中に入りやすいように, オーミックで立ち上げ早い段階で密度勾配を作り, その最適条件を探せるようにしておかねばならない。即ち, いろいろなプラズマ条件を作れるようにしておかないと EBW 入射実験はうまくいかないと考えられる。そのために誘導運転も十分に可能なように設計しておく必要がある。そのためにもこのキャンセルコイルは重要である。

しかしながら QUEST ではすでに PF コイルの設置位置が決定していて, 理想的な PF 2 コイル近傍に設置することはできない。図 1 に示すように設置場所は限られている。このキャンセルコイルは, PF4-2 コイル電流と直列に流しプラズマ電流立ち上げ時の PF4-2 コイル電流による漏れ垂直磁場をキャンセルするコイルである。(1) プラズマブレイクダウン時にヌル点を作るので PF2 コイルに両極性電源がなくてもすむし, PF2 コイル電流にリップルがある場合特に有効であり。

(2) PF4-2 からの漏れ磁場がなくなるので, プラズマ電流一定のとき, オーミック放電でパルス時間を長くしても, 垂直磁場 PF2 コイル電流を増大させる必要がなく一定でよく, 制御が簡単。

(3) ダイバータと垂直磁場を用いた CS なし立ち上げ実験時の調整に活用でき, (4) プラズママーキング実験が今までの MAST とは異なりさらに改善した配位でできる可能性がある。すなわち, このキャンセルコイルによって, ブレイクダウン, オーミック放電, 定常放電時の問題点を緩和できるとともに, さらに進んだ CS なし実験, マーキング実験が期待できる。

コイルの詳細断面図を図 2 に示す。巻数は 1~4 巻で可変, 装置全体の組み立て後に設置できるように 8 分割 SUS 巻き枠とする。コイル巻きは作業の容易性を考え 1 巻きずつとし, 外で結線する方式を用いる。

3. 計算結果

3.1. 長い CS を用いたオーミック放電

PF4-2, PF4-1-3 を直列に接続すると長い CS コイルとなる。漏れ磁場が少ないのでキャンセルコイルの巻き数が 4 巻きするとき, 図 3 に示すように共鳴領域よりも若干外側にヌル点ができる。しかしながら, PF4-123 直列接続と CC コイルを用いた OH 放電の場合, CS コイルの巻き数が多いので, ループ電圧 V_L が小さくなり, 放電が困難な可能性がある。実際ループ電圧は ($V=$ 充電電圧/一次巻線の巻数 $=1.3$ kV/288 turn) 4.5 Volts 程度で小さい。通常の装置では 9V 前後なので, この配位でのプラズマ生成には注意が必要である。

3.2. 短い CS を用いたオーミック立ち上げ, RF 定常維持放電

PF4-2 とキャンセルコイルを用いると, ループ電圧は (充電電圧/一次巻線の巻数 $=1.3$ kV/144 巻) 9 Volts 程度で, 通常の ST のループ電圧と同程度であり, この観点からはあまり心配ない。このレイアウトを用いた場合のオーミック放電の計算結果の一例を図 4 に示す。ダイバータコイ

ルの電源電圧が低いので応答が遅く、オーミック放電時にプラズマ電流波形に応じてコイル電流波形を変化させることがなかなか困難である。しかしプラズマ電流を 50 kA と低くするとダイバータ放電も可能となるので、そのシナリオについて計算を行った結果である。実際のコイルの電流増加率(65 kAT/40ms)を用いる場合に OH パルス放電でダイバータ配位の実験が可能となる。

3.3. CS なし立ち上げ

CS を全く用いなくても、ダイバータコイル、CC コイルを用いて CS なし立ち上げシナリオも可能であり、次年度はそこを詳細に計算する予定である。

一方、PF4-1,3 とキャンセルコイルを用いて、上下にヌル点を形成し、マーキングによってプラズマを立ち上げる実験もできる可能性がある。プラズマ周辺の上下 2 カ所にヌル点ができるのを示した計算結果を図 5 に示す。最初に PF4-1,3 と CC コイルの電磁誘導で上下 2 カ所にプラズマを生成し、それらのプラズマをダイバータコイルで斜め外側中央部に向けて押し、同時に垂直磁場を印加してプラズマ電流を立ち上げる。そのためには電源の柔軟性が必要である。

これは CS の上下コイルと CC コイルのオーミック放電の一種と考えることもできる。必ずしも ST 核融合炉には直結はしないが、立ち上げフェーズの研究としては興味深い。

4. 考察

キャンセルコイルの役割は PF2 コイルの起磁力の増強計画等によって若干の役割減少はあるものの、オーミック実験のブレイクダウン時のプラズマ電流立ち上げを容易にし、かつ運転制御を簡素にし、運転領域拡大に大きな役割を果たすものと考えられる。また、CS なし立ち上げの微細調整、マーキング実験でもより進んだタイプの実験が可能となるなど、QUEST の運転領域を広げる重要なコイルになると考えられる。

しかしながら、使用するケーブルは冷却パイプがないためにコイル直径が大きく、フィーダー部において曲げにくく、局所的な不整磁場が発生する可能性がある。従って将来ロックモードなどには十分な注意が必要であろう。しかし、全体的な不整磁場を打ち消すことができる分だけ有効であると思われる。

5. 研究成果報告

6. 研究組織

所内世話人：中村 一男 教授

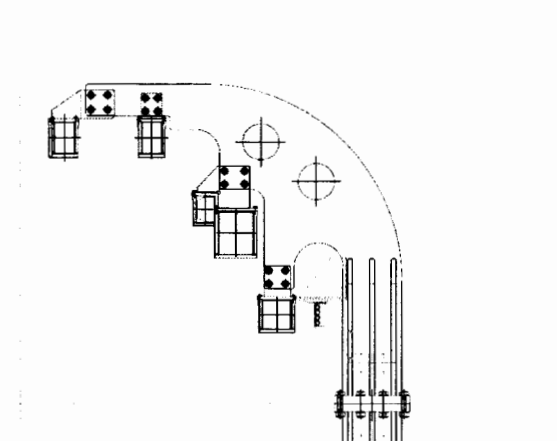


図 1. PF コイル設置箇所とキャンセルコイル設置位置

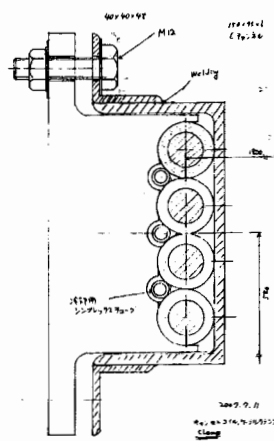


図 2. キャンセルコイル詳細断面図

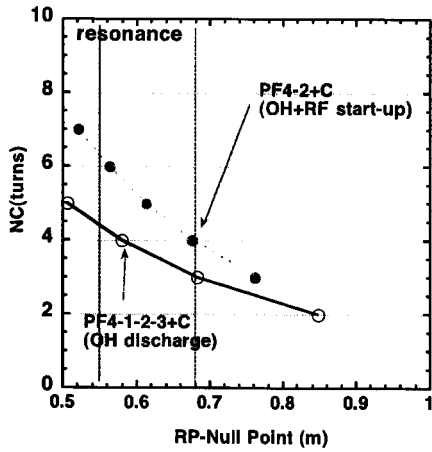


図3. ナル点の位置のキャンセルコイル巻き数依存性

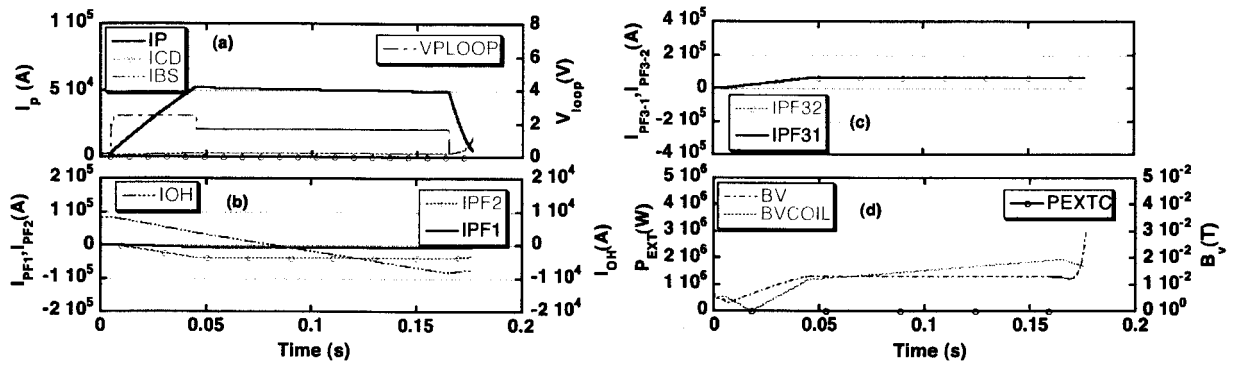


図4. PF3-1-2 ダイバータ直列接続で、 $I_p=50$ kA の場合の放電波形計算結果.

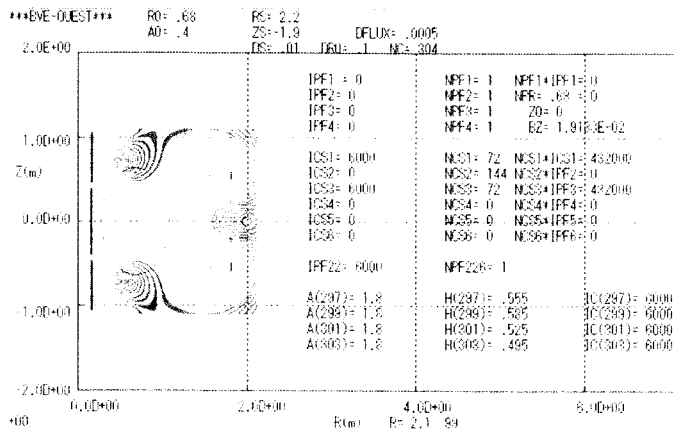


図5. PF4-1, 3 とキャンセルコイルを用いたマージング実験のための上下ナル点

タングステンと銅との接合材の組織と特性に及ぼすイオン照射効果

茨城大学工学部 車田 亮

1. 目的

現在、耐熱性およびプラズマ粒子制御の観点から、核融合実験装置のプラズマ対向材料として、タングステン等の高Zプラズマ対向材料の使用が考えられている。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。今までの応用力学研究所との共同研究において、C/C コンポジット、カーボンアロイ、炭素系接合材料、タングステンおよびSiC/SiC コンポジットについて、それらの微細組織と力学特性に及ぼすイオン照射の影響を究明し、耐照射損傷性を有するプラズマ対向材料の開発に役立つ知見を得てきた。本研究は、その対象材料を、プラズマ対向機器により近い状態のタングステンと銅との接合材に拡張し、接合材料の微細組織と力学的特性に及ぼす室温におけるイオン照射の影響、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、カーボンアロイと銅と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

本研究に用いたタングstenは、日本タングsten (株) 製の純タングsten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stenや無酸素銅の接合面を#2000まで研磨及びアセトン洗浄した後、真空熱処理炉を用いて、接合温度 1333K、60min 保持、小さな接合圧力 (0.014MPa) を加えた条件で、タングstenと銅との接合材を製作した。その接合において、接合時の残留熱応力を緩和するために、中間材としてモリブデン板 (2.0mm) を挿入し、インサート材としてチタン箔 (0.05mm) と銅箔 (0.05mm) を挟んで、チタンと銅との共晶反応を利用して拡散接合した。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、TEM 試験片 (直径 ϕ 3mm、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 ϕ 3mm の範囲に、6nA のイオンビーム電流で、Cu²⁺イオンを、タングsten部分に 3.6, 36dpa、銅部分に 5.5, 55dpa まで、接合界面に照射した。それらの飛程はそれぞれ 350, 550nm である。

機械的変化は、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、ピ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 (μ m) 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 $\alpha=3.8584$ 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し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、データ数は、5 から 10 点である。

また、SEM および TEM を用いて、試験片の表面損傷および微細組織の変化を観察し、機械的性質の変化と微細組織との関係を考察した。

3. 実験結果及び考察

Fig.1 は、一例として、タングstenと銅との接合界面の Cu²⁺イオン照射試験の前及び後における TEM 写真を示す。(a)の照射前の TEM 写真から、中間材のモリブデンの結晶粒内にはすでに斑点のように見える転位が存在し、黒く見える結晶粒および結晶粒界には銅-チタン合金の偏析が確認できた。(b)の照射後の TEM 写真から、結晶粒内の転位は照射欠陥の増大により増大し、斑点がより高密度になるとともに、黒色がさらに濃くなっているのが確認できた。



(a) Before irradiation

(b) After irradiation

Fig.1 TEM images of a joining layer (a) before and (b) after irradiation. 500nm

一方、接合材は、 Cu^{2+} イオン照射により、36dpa 照射でタングステン部分が約 1.1 倍の照射硬化を起こした。この値は、銅材（約 1.2 倍）や炭素材（約 2 倍）より非常に小さく、タングステンが耐照射損傷性に優れていることが分かった。また、673K、100min の照射後熱処理により、低照射損傷（3.6, 5.5dpa）では、母材の約 99%まで硬さが回復し、アニーリング効果が得られた。このことから、照射後熱処理により、タングステンダイバータの熱処理による実用寿命の延長が期待できた。

4. 研究成果報告

- 1) 車田 亮、今村好男、全国共同利用研究成果報告 平成 18 年度 No.10, 九州大学応用力学研究所, (2007.3), pp.201-202.
- 2) 車田 亮、共同利用研究経過報告書 平成 18 年度 No.23、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, (2007.6), CD-IV-1, p.43.
- 3) 小室直樹、車田 亮、本橋嘉信、伊藤吾朗、寺本修一、茨城講演会講演論文集、日本機械学会 関東支部・精密工学会, (2007.9.28), No.109, pp.17-18.

5. 研究組織

茨城大学工学部： 車田 亮（准教授）

九州大学応用力学研究所： 渡辺英雄（准教授）、徳永和俊（准教授）、吉田直亮（教授）

茨城大学大学院生： 小室直樹（M2）、遠山弘幸（M2）

プラズマ対向材料再堆積層形成における水素同位体挙動に関する研究

九州大学大学院総合理工学研究院 片山一成

【緒言】 核融合炉の開発研究において、プラズマ-壁間での水素同位体挙動の把握は、プラズマ閉じ込め制御及びトリチウムの放射線安全対策の観点から重要な課題である。プラズマ-壁相互作用によりプラズマ中に放出された不純物粒子は、プラズマ対向壁表面に再堆積層を形成する。そのため、対向壁材料のみならず再堆積層における水素同位体挙動を理解しておかなければならない。これまでの研究により、水素 RF プラズマにより形成されたタングステン再堆積層には、多量の水素が蓄積され得ることが明らかとなっている。なお昨年度、応用力学研究所との共同研究により、ヘリウムプラズマを用いてタングステン再堆積層を作成した場合には、多量のヘリウムが捕捉されることが明らかとなった。タングステン再堆積層は、ナノオーダーの結晶粒からなるアモルファス構造をもち、多数のバブルが存在することから、水素やヘリウムは微細構造内に物理的に捕捉されていると推測される。

再堆積層における水素捕捉・放出挙動を把握する上で、堆積時の基板温度は重要なパラメータのひとつである。そこで本研究では、基板温度制御下で再堆積層を形成させ、水素捕捉量及び水素放出挙動に及ぼす基板温度効果を調べた。なお、窒素、酸素などの不純物ガスの影響についても検討した。スパッタターゲット材料にはステンレス鋼を用いた。ステンレス鋼は、核融合科学研究所 LHD 装置のプラズマ対向壁に用いられており基礎データの取得が進められている。

【実験】 容量結合型 RF プラズマにより 316 ステンレス鋼(ニラコ社製)をスパッタリングして、タングステン基板及び石英基板上に再堆積層を作製した。RF プラズマ装置の概略図を Fig.1 に示す。タングステン板(5cm×5cm,厚さ 0.1cm)を RF 電極に設置し、基板として石英片(2cm×0.5cm,厚さ 0.1cm)及びタングステン箔(2cm×0.5cm,厚さ 0.02cm)をグラウンド電極に設置した。グラウンド電極内部には 300℃までの温度変化が可能なヒーターを設置した。ターゲットを除く部分はステンレス製のメッシュでアースシールドをし、電極構造材の損耗を防いだ。また、グラウンド電極及び真空容器はアースした。実験前に真空容器を加熱することで壁に吸着している水蒸気を除去し、 10^{-4} Pa 程度まで排気を行った。容器内に水素ガスを導入し 10Pa に調整した後、100W の電力を供給しプラズマを発生させ、基板上に堆積層を作製した。電極表面に熱電対を接触させることで雰囲気ガス温度を測定した。Table1 に再堆積層作製条件を示す。不純物ガスの影響を評価するため、3つの試料については空気を微量混入させた状態で実験を行った。堆積量は実験前後の基板の重さをマイクロ天秤によって量り決定する。またラングミュアープローブを用いプラズマパラメータを測定した。

再堆積層をアルゴン雰囲気中で加熱し、水素放出挙動を観測した。実験は 200℃から始め 3 時間毎に 100℃ずつ 1000℃まで段階的に昇温し、その際 30 分おきに反応管を開きアルゴンガスを流通させ、反応管内に放出された水素をガスクロマトグラフに導入した。また、EDX によって元素分析及び、TEM による微細構造観察を行った。

【結果及び考察】 プラズマ診断の結果、プラズマ空間電位、電子密度及び電子温度はそれぞれ約 30 [V]、 1.1×10^{16} [$1/m^3$]、2.0 [eV]となった。プラズマ放電時の電子密度 1.1×10^{16} [$1/m^3$]に対して 110℃で堆積させた際の水素密度は 1.9×10^{21} [$1/m^3$]であるため、実験中の電離度は 10[ppm]程度となる。

EDX による元素分析結果では堆積時の温度に拘らず全ての堆積層の金属元素比は SUS316 に類似した値を示した。空気成分混入条件下で堆積させた層の中には約 30%の N_2 が含まれていた。また空気成分の混入がない条件下で作製した堆積層では基板温度の増加と共に層中の酸素濃度が増加していることが分かった。これは、真空容器内に残留する水蒸気に起因する酸素が金属元素と反応し酸化物として取り込まれたためであると考えられる。

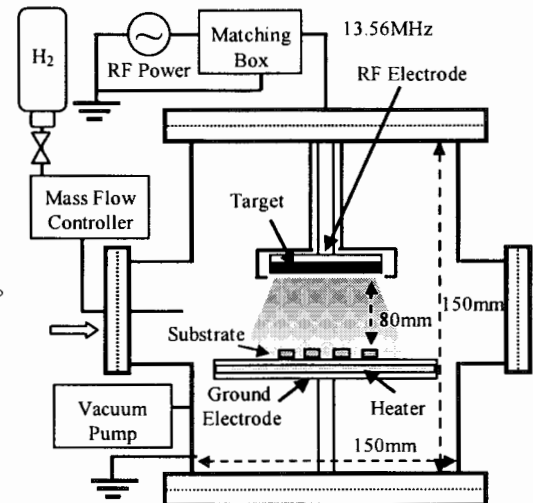


Fig.1 RF プラズマ装置概略図

Table 1 再堆積層作製条件

Gas	H ₂			H ₂ with Air		
Temperature [°C]	110	150	200	70	180	250
RF power [W]	100					
Pressure [Pa]	10			H ₂ =9.5, N ₂ =0.5		
Gas flow rate [sccm]	1.2					
Discharge period [h]	240			120		

各温度で堆積させた層からの水素放出挙動を Fig.2 に示す。横軸に時間[h]、左側縦軸に 30 分当たりの水素放出量 [H/SUS]、右側縦軸に加熱温度[°C]を取る。H/SUS は EDX による堆積層の元素分析から算出した Fe, Cr, Ni, Mo 原子の数に対する水素原子の割合である。このグラフから各条件によって放出挙動が異なることが分かる。110°C で形成された堆積層からは、700°C に大きなピークが見られるが、150°C 以上で作製した試料からは 700°C 付近に大きなピークは見られない。また全ての試料について、温度を上げた直後の測定で多量の水素が検出されるが、その後の測定では放出速度が急激に減少し、緩やかな放出が続くという現象がみられた。このことは数 100°C の加熱を長期間続けてもすべての水素を放出させることは困難であることを示す。

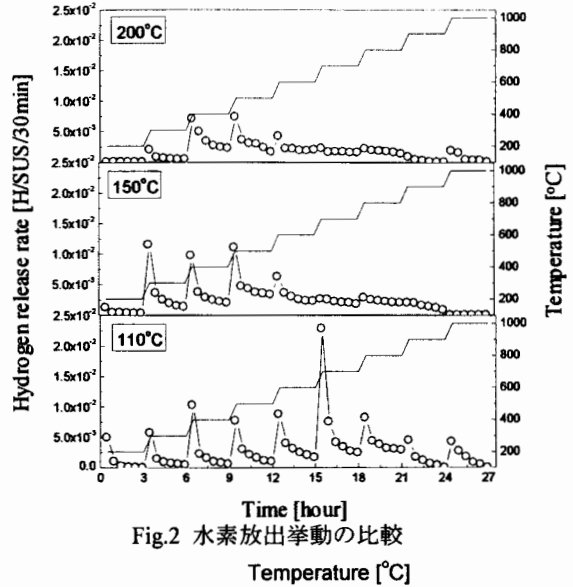


Fig.2 水素放出挙動の比較

Fig.3 には、ステンレス鋼からの再堆積層への水素捕捉量の堆積時の基板温度依存性を示す。比較のため、タングステンへの水素捕捉量及び大気圧水素ガス雰囲気での鉄への水素吸収量を示す。ステンレス鋼再堆積層について、空気混入のない条件では、基板温度の増加とともに水素捕捉量が減少することがわかる。しかし、空気混入条件では、捕捉量にばらつきがみられ、温度効果と不純物効果によって複雑な現象が生じていると推測される。実験によって得られたステンレス鋼堆積層への水素捕捉量(110°C, 150°C, 200°C)に対する直線近似により次式が得られた。

$$q_{\text{sus}} = 1.33 \times 10^{-2} \exp(7970/RT) [H/SUS] R: \text{気体定数} [J/\text{mol} \cdot K]$$

Fig.3 に示すようにタングステン再堆積層への水素捕捉量もこの直線上にある。本実験で用いた手法で作製された堆積層には材料によらず、同程度の水素が捕捉されることが示唆される。

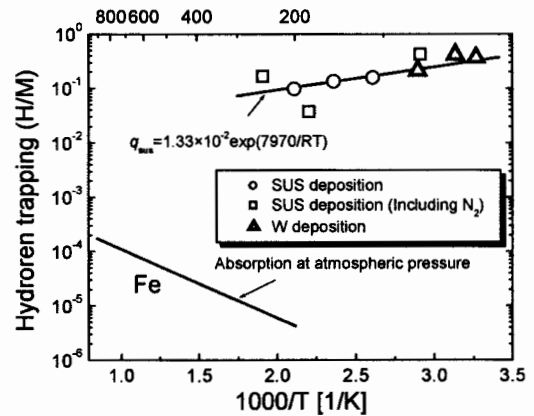


Fig.3 再堆積層への水素捕捉量と鉄の水素吸収量

Fig.4 には、80°C 及び 150°C で形成されたステンレス鋼再堆積層の TEM 画像(明視野像)を示す。80°C 試料の白い像はバブルを示しており、数 nm 程度のバブルが存在していることがわかる。一方、150°C 試料においては、数 10nm サイズの結晶粒が観測されており、80°C-150°C 間で微細構造が大きく変化していることがわかった。基板温度による水素捕捉量及び水素放出挙動の違いは、このような微細構造の違いが反映されたものと考えられる。

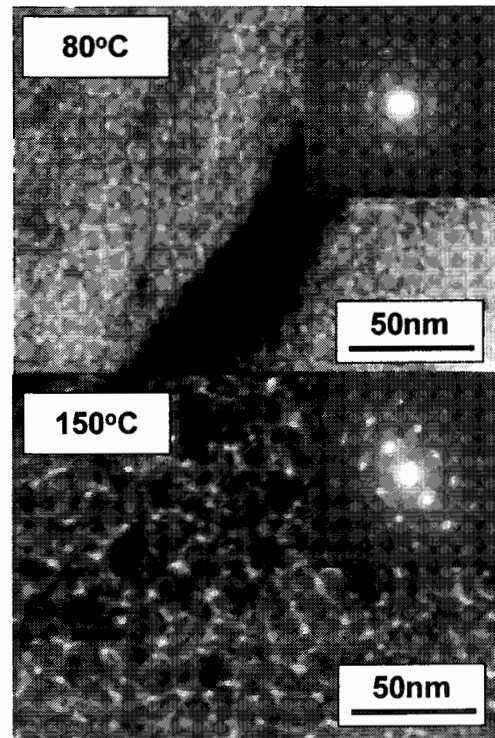


Fig.4 ステンレス鋼再堆積層の明視野 TEM 画像

【結言】水素 RF プラズマによるスパッタ法によりステンレス鋼から再堆積層を作製した。再堆積層への水素捕捉量及び水素放出挙動は、堆積時の基板温度や不純物ガスにより異なる事がわかった。これは堆積時の雰囲気条件により、再堆積層の微細構造が異なるためと考えられる。

【成果報告】 [1] Y.Uchida et al., Proc.International Conf. On Tritium Science and Technology, Sep.16-21,2007, Rochester, New York.

[2] K.katayama et al., Proc.International Conf. On Tritium Science and Technology, Sep.16-21,2007, Rochester, New York.

[3]内田勇太他、日本原子力学会 2007 秋、北九州市

[4]片山一成他、第 27 回水素エネルギー協会大会、東京都

・ 目的

リサイクリングに関与しているプラズマ対向壁近傍を含む周辺プラズマは非平衡で、大きな流れが存在している。そのプラズマの流れをマッハプローブによって計測し、その特徴を調べる。

・ マッハ・プローブ概略

実験で用いたプローブ先端の構造は、右の図1のように、円筒絶縁物の先端中央にプラズマの流れを遮る壁（絶縁物）の両側面に1本ずつのタングステン製円筒形電極から構成されている。この場合、遮へい壁の両側の電極Aのイオン飽和電流 $I_{is}^{(A)}$ と電極Bのイオン飽和電流 $I_{is}^{(B)}$ の比、すなわち $R = I_{is}^{(B)} / I_{is}^{(A)}$ からプラズマの流れのマッハ数 $M (=V_{FLOW}/C_s; C_s$ はイオン音速) を、流体モデルを使って磁力線に沿うプレシースの性質を解析して得られる関係式

$$M = 2(R-1)/(R+1) \quad (1)$$

を利用して求めることができる。ここで、 $M > 0$ なら流れの向きは、図1に示されているプラズマ電流と同じ向きであり、 $M < 0$ ならプラズマ電流と逆向きであることを示している。ただし、この式が適用できるのは、 $|M| < 1$ の場合である。

・ 計測結果

大半径：0.3 m、小半径：0.2 m とトカマクと比べ小さなアスペクト比 1.5 の小型 PWI 実験装置 CPD において、トロイダル磁場：0.11 T、RF加熱入力：25 kW で、トロイダル電流：1.1 kA (#507639) および 0.6 kA (#507648) の2つの場合の電極AおよびBのダブル・プラズマ V-I 特性を図2に示す。この図2(a) および (b) の特性から、電極Aと電極Bのイオン飽和電流の比がそれぞれ $R \sim 0.5$ および $R \sim 0.8$ であることが分かる。そこで、関係式(1)を使って、それぞれのマッハ数を $M \sim -0.33$ および $M \sim -0.22$ と見積もることができる。どちらの場合も $R < 1$ であるために負のマッハ数($M < 0$)が得られているので、プラズマの流れ向きはトロイダル電流の向きと反対、すなわちトロイダル電流を駆動し

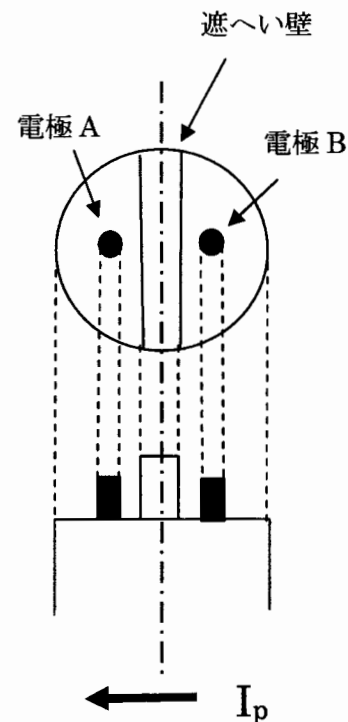


図1 プローブ先端部の概略。

ているエネルギーの高い電子と同じ向きであることが分かる。そこで、プラズマの流れの運動量はトロイダル電流を駆動している電子とすると、マッハ数は絶対値はトロイダル電流とともに大きくなると予想でき、矛盾しない測定結果が得られている。しかし、マッハ数の絶対値はトロイダル電流の値に比例していないので、輸送過程と関連付ける議論（課題）が必要である。

・ 検討

アスペクト比の非常に小さい CPD や球状トカマク QUEST において、周辺部のプラズマは磁力線に沿って磁場の強度が大きく変化しているため、本研究で用いた通常型のマッハ・プローブが適用できる均一（一様）プラズマの条件が不十分である可能性がある。このような場合、空間分解能のあるプラズマ流の測定プローブ（対向電極ダブルプローブ）測定が有効と考えられる。

・ 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
	庄司多津男	名古屋大学大学院工学研究科	准教授
所内責任者	坂本瑞樹	応用力学研究所	准教授

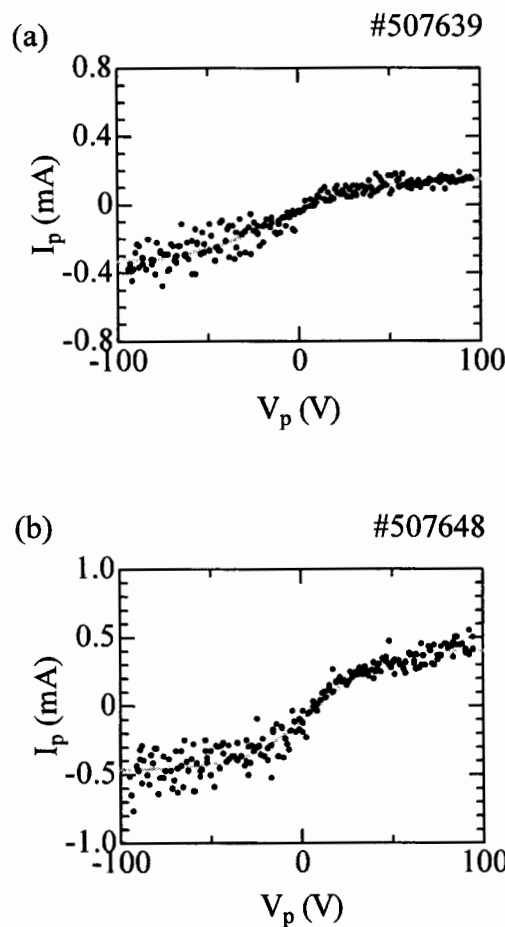


図2 マッハプローブのダブルプローブ V-I 特性。

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) 装置の定常プラズマ運転の研究環境を立ち上げているところであり、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入射が有効と考えられている。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ている。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を行ってきている。そこで、水素イオン、ヘリウムイオン、及び両イオンの混合ビーム等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、各イオン成分の違いによる影響を調べることを今年度の研究目的とする。

・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 ϕ 345 mm) を採用した点特徴であり、焦点部でのビーム径は約 ϕ 36 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。無酸素銅の基板に掘った溝にタングステン (10mmx5mmx1mm、純度 99.95%) を装着し、その上からタングステン板 (純度 99.95%) で押さえている。基板には4個の材料が一度に取り付けられる。図1はそのうちの1つを拡大した写真であり、中心の穴の奥にタングステン1枚が固定されている (ビーム照射後の写真)。

・実験結果

今回報告する実験では、電圧約 25 kV、電流約 40 A、1パルスあたり 30 ms のビームを照射し、照射回数を変えることで全照射量を調節した。図2に、ヘリウムイオンビーム、水素イオンビームをそれぞれ照射した場合の実験結果を示す。照射量 1.5×10^{22} He/m² のヘリウムを照射した場合、FE-SEM による像から、ある塊の中に径の小さな穴が多数あいているのがわかる。断面 TEM 像から、横に長い穴が多数あいていることが見出された。また、照射量 4.0×10^{22} He/m² のヘリウムを照射した場合、FE-SEM 像から、1面に穴が多数あいているのがわかる。断面

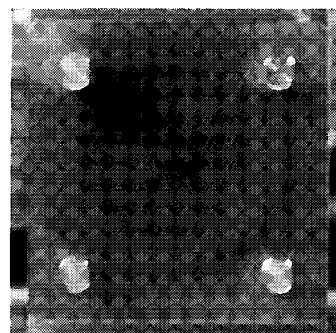


図 1. Tungsten material fixed on copper plate.

TEM 像から、縦に長い大きな穴が多数あいていることが見出された。

更に、タングステン材料の照射後の特性を調べるために、190 nm から 2500 nm の光反射率を評価した。何も照射していないタングステンの光反射率に比べて、照射量 1.3×10^{22} H/m² の水素イオンビームを照射したタングステンの反射率は、長波長領域で若干下がるものの、大きくは変化していない。

一方、照射量 1.5×10^{22} He/m² のヘリウムイオンビームを照射した場合、約 20% 反射率が低下した。照射量 4.0×10^{22} He/m² のヘリウムイオンビームを照射した場合、低波長領域で反射率が更に低下した。しかしながら、長波長領域では反射率が逆に増加する傾向が見られた。これは、低波長領域 (500 nm 以下) では試料表面にある 1 nm - 200 nm におよぶ大小様々なヘリウムバブルが反射率劣化に寄与していると考えられ、照射量が多い方が、バブル密度・径・存在深さがより高いため、顕著な劣化を生じさせたと考えられる。ところが、照射量 1.5×10^{22} He/m² の材料表面を低倍率で観察した場合、プリスター形成によるマイクロオーダーの凹凸がより多く見られることがわかった。照射量 4.0×10^{22} He/m² の場合は、プリスターの表皮が全てなくなるほど高い照射量であるために第一層が全て剥離され、マイクロオーダーでの平滑度がむしろ高くなったと考えられる。従って、反射率劣化に寄与する微細構造が波長によって変化しており、その境界が今回の場合 1700 nm 近傍にあると考えられる。

・ 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、木山學、小口治久、平野洋一
九州大学・応用力学研究所：佐藤浩之助、吉田直亮、坂本瑞樹、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

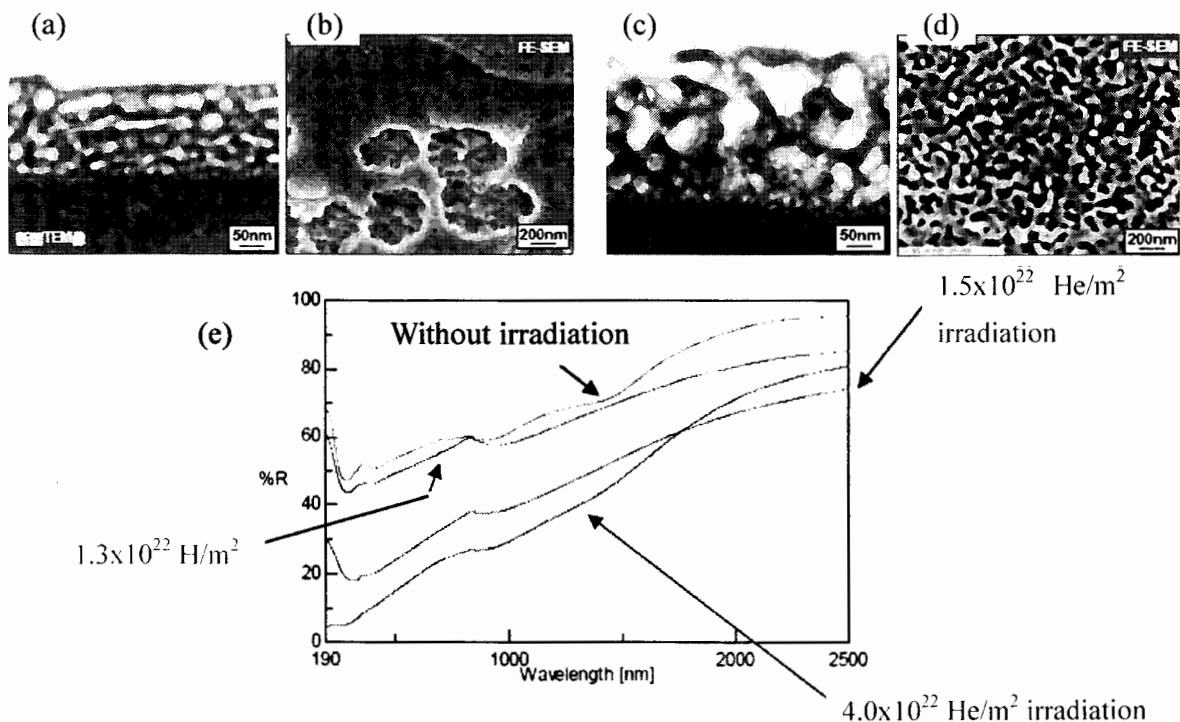


図 2. 1.5×10^{22} He/m² irradiation case; (a) TEM image, (b) SEM image. 4.0×10^{22} He/m² irradiation case; (c) TEM image, (d) SEM image. (e) Light reflection rate, R.

1. 目的

プラズマ中の粒子並びにエネルギー閉じ込め特性の評価やリサイクリング挙動を定量評価する為に、プラズマ内の中性粒子の密度・温度分布を知ることは、重要な研究課題となっている。特にプラズマ・壁相互作用の時定数が長い時間スケールを持っていることから、長時間・定常状態における中性原子・分子の振る舞いは、非常に興味深い研究対象である。

本研究は、小型プラズマ壁相互作用実験装置 (CPD) における中性粒子並びにリサイクリング挙動を知ることを目的として、中性粒子輸送モンテカルロコードを用いて様々なジオメトリにおけるシミュレーション解析を行い、その結果からプラズマ壁相互作用に特徴的な中性粒子の挙動についての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3次元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] DEGAS コードでは、水素原子・分子に関わる種々の過程が考慮されているが、水素分子の解離過程に於て、解離反応の際に励起に関わる反応過程が考慮されていなかった。この過程は低密度の周辺プラズマ領域で特に影響が強いと考えられる為、後述するようにガンマ 10 タンデムミラープラズマや CPD における長パルス放電プラズマに適用する為には、上記反応を考慮するような改造が必要とされ改造を施した DEGAS コードを用いて計算を行ってきた。^[2]

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。^[2-5] 近年、DEGAS において3次元体系での中性粒子輸送シミュレーション計算が可能なバージョン (ver.63)^[6] の利用環境が整い、さらに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。

3. DEGAS を用いた中性粒子輸送シミュレーション

中性粒子輸送におけるプラズマと壁との相互作用の影響を調べる為に、円筒軸対称メッシュモデルを構築し、それを DEGAS に適用してシミュレーションを行った。図1は作成したメッシュモデルを示す。円筒の中央に粒子源を設定し、その近傍のメッシュ間隔を細かくしたシミュレーション空間を定義し、プラズマ領域とその外側の壁までの領域 (SOL) の関係を変化させることにより、それらの依存性について検証を行った。

トラス系装置におけるプラズマ磁気面外側の Scrape Off Layer (SOL) 領域、及びミラー装置のリミター外側の領域には、プラズマ密度がプラズマ中心と比較して、一桁以上低くなるため、中性粒子輸送への影響が大きいと考えられる。そこで、SOL 領域の幅・密度を変化させ、その影響を調べた。図2 (a) では、真空容器壁は一定で、プラズマと SOL の幅を変化させた場合の SOL 幅に対する H α 線 1/e 減衰長の変化を示したグラフである。図を

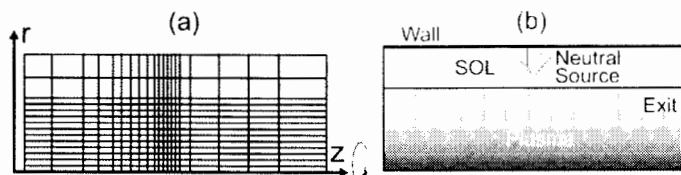


図1 シミュレーションに用いた円筒メッシュモデル

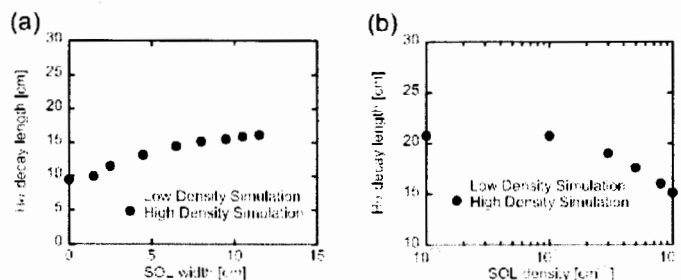


図2 SOLのパラメータを変化させた際の軸方向H α 線強度の軸方向減衰長, (a) SOL幅依存性, (b) SOL密度依存性

見ると、SOL 幅の上昇とともに H α 線減衰長は増加することがわかる。特に、SOL 密度の薄い低密度プラズマのほうが増加の割合は大きく、高密度では SOL 幅増大とともに、飽和しているように見える。図 2 (b)では、SOL 密度を変化させた場合の SOL 密度に対する H α 線減衰長の変化を示したもので、両プラズマともに SOL 部の密度、 $n_e \sim 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ まではほぼ一定で、それを越えると減少することがわかった。これは、壁での反射と SOL 部でのプラズマとの反応が強く影響していると考えられる。SOL 密度が低いと反射の影響が支配的であり、SOL 幅の依存性が大きく、それに対して SOL 密度が高いと、SOL 密度依存性が大きくなり SOL 幅の影響は少なくなると考えられる。

図 3 は、プラズマに接触したりミターが中性粒子に及ぼす影響について調べたシミュレーション結果である。図中で H α 線強度分布は片対数分布で示されている。内蔵物有の状態では構造物近傍の真空容器壁に粒子源を配置した分布(●)では、構造物の反対側で H α 線減衰長は急激に減衰していることがわかる。またリングの内側、すなわちプラズマ直近に粒子源を与えた場合、H α 線強度分布(□)は、

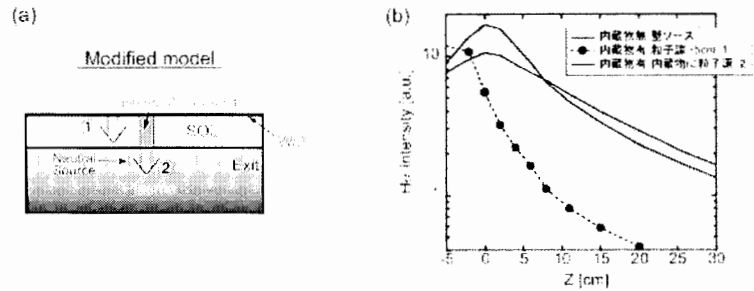


図 3 プラズマに接するリミターに対して種々の粒子源を設定した際の軸方向 H α 線強度の分布, (a) シミュレーション条件の概略図, (b) H α 線強度のシミュレーション結果

2 成分を持った Exponential 分布でフィッティングすることができた。粒子源近傍の直線は、構造物のない状態で壁から与えた粒子源より急峻な直線となり、粒子源から離れた位置の直線は壁粒子源の直線(○)とほぼ等しい傾きを示していることがわかった。以上のことから、幾何学的な形状(容器壁・粒子源の位置)やパラメータ分布(SOL 領域の密度・体積)に依存して、中性粒子は大きく影響を受けることが判った。

4. まとめと今後の展望

比較的単純な円筒モデルを用いて、中性粒子輸送における真空容器壁や SOL プラズマの影響について、詳細な輸送解析が出来ることが明らかになった。今後得られた結果にもとづいて、更に実機の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。

5. 参考文献

- [1] D. Heifetz, D. Post, M. Petravac *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] 中嶋, 庄司, 他 プラズマ・核融合学会 第 10 回年会予稿集 26aD8, p.146.
- [5] 中嶋, 庄司, 他 プラズマ・核融合学会 第 12 回年会予稿集 23aC1, p.261.
- [6] D. P. Stotler, *et al.*, *Phys. Plasmas* **3** (1996) 4084.

6. 研究成果

H. Kawano, Y. Nakashima, *et al.*, *J. Plasma Fus. Res.* **2** (2007) S1126.

河野博一, 中嶋洋輔, 他 プラズマ・核融合学会第 24 回年会, 2007 年 11 月, 姫路 30aA04P.

Y. Higashizono, Y. Nakashima, *et al.*, to be published in *Jpn. J. Appl. Phys.*

7. 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	東園雄太	筑波大学大学院数理物質科学研究科	博士課程 5 年生
研究協力者	河野博一	筑波大学大学院数理物質科学研究科	博士課程 2 年生
研究協力者	坂本瑞樹	九州大学応用力学研究所	准教授

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

日本国内では 2007 年末現在 55 基の原発が稼働しており、そのうち 13 基が運転開始 30 年を越えている。原発の新規建設が困難な状況の中、当初 30 年としてきた運転期間を 60 年まで延長する計画が進んでいる。これに伴い、原発構造物の高経年化対策が重要視されている。その中で原子炉圧力容器の照射脆化は大きな問題であり、脆化機構の解明と信頼性の高い評価技術の開発が必要となっている。脆化の新しい評価技術の候補として、照射欠陥などの格子欠陥の形成に敏感な磁性に着目した非破壊評価技術が期待される。

本研究グループでは、原子力機構・材料試験炉を用いた中性子照射中の圧力容器鋼のその場磁気計測や米国・UCSB グループが所有する照射済み試験片の磁気計測を実施しており、機械特性と磁気特性との間に負の相関があることを見出している。その機構解明のためには詳細な損傷組織評価が必要であるが、中性子照射実験では照射条件が限定されること、試料の放射化のため取扱いが制限されることにより、幅広い観点から実験を行うことが難しい。本研究では、イオン照射や電子線照射を活用することで照射条件を系統的に変えて詳細な損傷組織観察を行うとともに、中性子照射実験の結果と比較して、照射損傷組織と磁気特性の関係を明らかにすることを目的としている。

圧力容器鋼である A533B 鋼の照射脆化機構としては、①Cu 析出物、②マトリックス中において形成される転位ループ、によるものが提案されている。低 Cu 濃度の A533B 鋼の場合は後者が重要となり、その脆化機構を考える上で、照射欠陥集合体の形成挙動に与える各種元素の影響を調べる必要がある。最近、高照射量領域での Mn 添加効果を示唆する報告が幾つかなされているが、その詳細は解明されていない。本研究では、低 Cu 濃度の A533B 鋼と、Mn 含有量の異なる 2 種類の合金に対して行った、硬度測定、転位ループの形成挙動観察、予備的磁気計測の結果を示す。

実験方法

純鉄、Fe-0.6Mn, Fe-1.4Mn, A533B 鋼 (0.05wt%) にイオン加速器を用い 2.4MeV の Fe^{2+} を照射した。照射温度は室温および 290°C、損傷量は 0~1dpa である。イオン照射後、超微小押し込み硬さ試験機による硬度測定および透過電子顕微鏡(TEM)による内部組織観察を行った。また、超高压電子顕微鏡を用いた電子線照射その場観察実験 (2.5×10^{-4} dpa/s) を実施した。並行して、同じ材料を用いて $20 \times 6 \times 0.3$ mm の磁気計測用の板状試料 (次年度以降に中性子照射を実施予定) を切り出した。励磁・検出コイルを試料周りに巻き、デジタル BH トレーサーに接続して照射前の磁気ヒステリシス曲線を計測した。

実験結果

図 1 に各試料に対して Fe^{2+} 照射した際の硬度上昇の照射量依存性を示す。照射により純鉄ではわ

ずかに硬度上昇を示す一方、A533B 鋼と Fe-Mn では照射初期から硬度が大きく上昇し、その後飽和傾向を示すことがわかった。TEM 観察により、欠陥数密度は A533B 鋼、Fe-Mn、純鉄でそれぞれ 2.4×10^{22} 、 1.2×10^{22} 、 $5.6 \times 10^{19}/\text{m}^3$ であった。これらの結果は、添加元素が照射硬化に対して重要な役割を果たし、Mn がその有力な影響元素の一つであること示唆している。

図 2 に A533B 鋼の電子線照射その場観察実験結果 (290°C) を示す。照射初期にまず微小な格子間原子型のループがマトリックス中に一様に形成され、照射が進むにつれ転位近傍でのループの成長が顕著となる。転位近傍でのループ成長は転位周りの応力場を緩和する可能性があり、中性子照射による磁気パラメータの減少を支持する観察結果であると言える。

図 3 に照射前の板状試料について励磁周波数 0.2Hz で計測した磁気ヒステリシス曲線を示す。いずれも反磁界により曲線の傾きが見られるが、A533B 鋼では曲線が囲む面積が大きい。挿入図に各試料の保磁力をまとめた。Fe-Mn や純鉄に比べて、結晶粒径が小さく、炭化物や転位を多数含む A533B 鋼で保磁力が大きく、図 1 に示した照射前の初期硬度の違いと対応している。

成果報告

- (1) 鎌田康寛, 中村暢伴, 荻博次, 菊池弘昭, 荒克之, 高橋正氣, 海老根典也, 鬼沢邦雄, 鈴木雅秀, 渡辺英雄, 吉田直亮: “超音波共鳴法による中性子照射した圧力容器鋼の弾性特性評価”, 第 141 回日本金属学会秋期大会, 2007.9.16-18, 岐阜大, 概要集 p.442
- (2) 鱒淵俊児, 真崎信吾, 渡辺英雄, 吉田直亮, 鎌田康寛, 高橋正氣: “鉄イオン照射による Fe-Mn の内部組織と硬度変化” 第 141 回日本金属学会秋期大会, 2007.9.16-18, 岐阜大, 概要集 p.443
- (3) Y. Kamada, H. Kikuchi, S. Kobayashi, K. Ara, S. Takahashi, H. Watanabe, N. Yoshida, N. Ebine and M. Suzuki, “Post-irradiation annealing effect on hardness, microstructure and magnetic properties of reactor pressure vessel steel”, 2007 Review of Progress in Quantitative NDE, Abstract p.188, Golden, USA, July 22-27 2007.

研究組織

鎌田康寛, 菊池弘昭, 小林悟, 荒克之: 岩手大学工学部附属金属材料保全工学研究センター, 吉田直亮, 渡辺英雄: 九州大学応用力学研究所

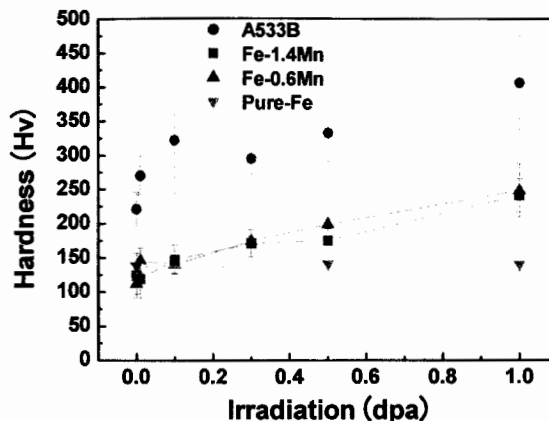


図 1 イオン照射による硬度変化

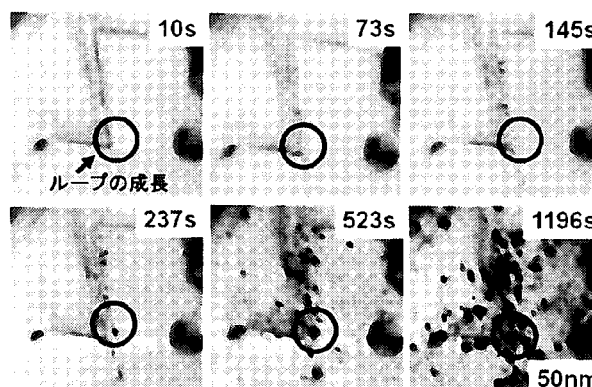


図 2 A533B 鋼の電子線照射その場観察実験結果

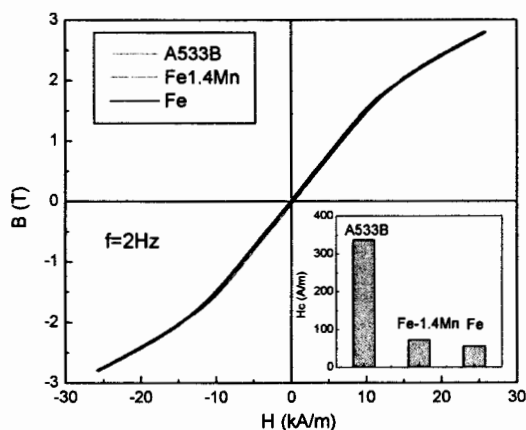


図 3 磁気ヒステリシス曲線

小型 PWI 実験装置における高周波波動伝搬解析および電流駆動検討

有明工業高等専門学校・一般教育科 竹内伯夫

【研究背景・目的】

球状トカマク型実験装置において、高周波を用いた電子加熱・非誘導電流駆動として電子バーンシュタイン波 (EBW) を励起する方法が提案され、九州大学の小型 PWI 実験装置 (CPD)、東京大学の TST2@K、京都大学の LATE 等で実績をあげてきた。EBW は、伝搬に密度上限を持たない、モード変換によって低温プラズマでも波動エネルギーがよく吸収される等の有用性から、広く研究・開発されている。

電子サイクロトロン共鳴加熱用伝送系から発振された GHz 帯の高周波がプラズマへ入射された後、正常波 (O モード) カットオフの位置において異常波 (X モード) に、高域混成 (UH) 共鳴層において EBW (B モード) にそれぞれ変換される (O-X-B モード変換)。さらに、高磁場側の中心付近においてドップラーシフト効果によるエネルギー吸収が起きることが分かっており^[1]、このことは O-X-B モード変換のシナリオが、EBW による電流駆動 (EBWCD) の可能性をもつことを示唆している。

高周波の電子加熱・電流駆動の解析には光線追跡法が適している^[2]。平成 18 年度の応用力学研究所共同利用研究において、光線追跡法による軌跡計算には分散式 D の値が大きく影響することを指摘した^[3]。本研究では O-X-B モード変換における EBW の光線追跡法の解析法について検討し、計算コードの問題点および改良点を明瞭にした。

【計算方法・原理】

光線追跡法は、位置ベクトル \vec{r} 、波数ベクトル \vec{k} 、波の振動数 ω として

$$\frac{d\vec{r}}{ds} = \frac{\partial D}{\partial \vec{k}}, \quad \frac{d\vec{k}}{ds} = -\frac{\partial D}{\partial \vec{r}}, \quad \frac{d\omega}{ds} = -\frac{\partial D}{\partial \omega} \quad (1)$$

で表される方程式から、光線を追跡する手法である。ここで D は波の分散式を示すもので、O-X モード変換、および X-B モード変換までは $D_{\text{cold}} = 0$ 、B モ

ード中は $D_{\text{electrostatic}} = 0$ を満たすように伝搬・吸収される。ただし、

$$D_{\text{electrostatic}} = \frac{\mu^2 N^2}{X^2} + 1 + z \sum \exp(-\lambda) I_m(\lambda) Z(z - m\alpha) = 0 \quad (2)$$

$$\left(\begin{array}{l} \mu = \frac{v_{th}}{c}, z = \frac{1}{\sqrt{2\mu N_{\parallel}}}, X^2 = \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2}, \\ \alpha = Yz, \lambda = \frac{\mu^2 N_{\perp}^2}{Y^2}, Y = \frac{\omega_{ce}}{\omega} \end{array} \right)$$

である。プラズマ分散関数 Z は引数の値によって解析手法を変え、引数の値が小さい領域では実数部と虚数部に分けて積分

$$Z(\zeta) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{x - \zeta} \exp(-x^2) dx \quad (3)$$

を直接解いた^[4]。また、O-X モード変換では、O モードカットオフでモード変換する最適角度 θ^{opt} が

$$\cos \theta^{opt} = \sqrt{\frac{Y}{1+Y}} \quad (4)$$

で存在する。したがって、O モードカットオフの位置で磁場に対して最適の入射角となるように、入射波にはプラズマ中へ入射角をあらかじめ与えている。パラメータには平成 21 年度から実験が行われる長時間維持球状トカマク装置 (QUEST) の値を採用し、プラズマ大半径 $R = 0.64\text{m}$ 、プラズマ小半径 $a = 0.36\text{m}$ 、ポロイダル磁場が存在しないトカマクモデル、入射位置を $x = 1.0\text{m}$ 、 $y = 0\text{m}$ の地点、入射波の周波数を 8.2GHz とした。

【計算結果・考察】

図 1 に装置の赤道面に対する光線の軌跡を示す。軌跡は波のエネルギーが 0 になるまで描いている。 $x = 0.95$ 付近で O-X モード変換、X-B モード変換され、入射した波が EBW としてプラズマの中心に向かっていくことが確認できる。モード変換には複

雑な過程が伴うので、光線追跡の際には屈折率の磁場平行成分 (N_{\parallel}) を保存していること、また、分散式の値 D が 0 になっていることを確認する必要がある。

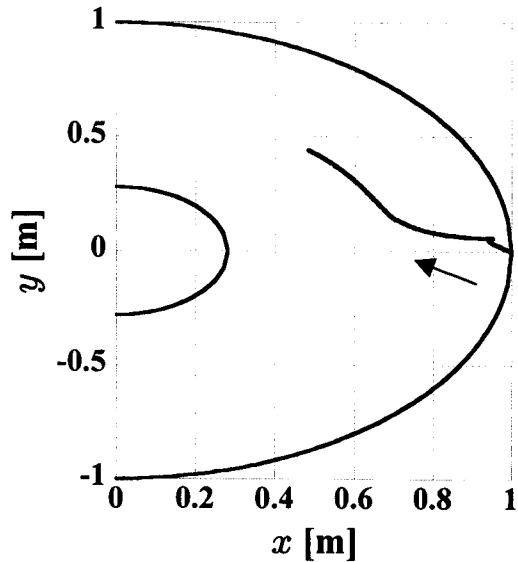


図 1 光線追跡法による軌跡

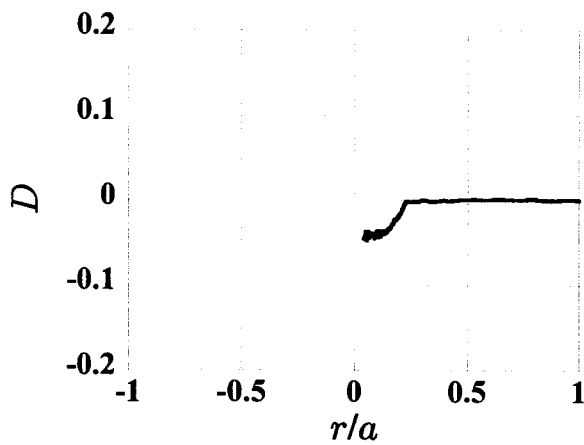


図 2 D の値の規格化小半径分布

図 2 はこの光線追跡における、規格化小半径に対する D の値を示したものである。図 3 の波動エネルギーの吸収分布と比較して、 D の値が 0 になっていない $0 < r/a < 0.2$ の領域はサイクロトロン吸収が起きていることが分かる。 D の値が 0 でないことは $D = 0$ の場合に比べて軌跡がずれている可能性があるため注意が必要である。

図 3 は波動エネルギーの吸収分布である。入射エ

ネルギーの初期値を 1 とし、規格化小半径毎のエネルギー変化 ΔP を示している。エネルギー吸収分布は電流駆動の分布と密接に関わっており、電流駆動実験および装置の開発には大変重要である。特に (2) 式から分かるように、 N_{\parallel} の値は波のエネルギー吸収分布に影響を与えるので、光線追跡法により電流駆動を検討する際には正確な追跡・解析が必要である。

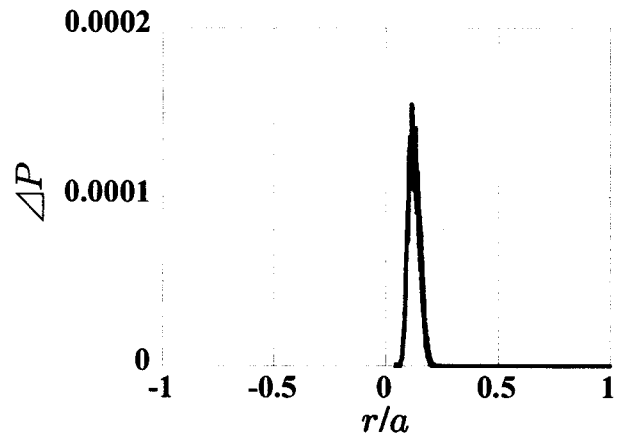


図 3 波動エネルギーの吸収分布

【まとめ】

本研究において、光線追跡法を用いて O-X-B モード変換シナリオにおける波動伝搬および電流駆動の解析を行った。O-X-B モード変換シナリオでは入射波が EBW となって必ず吸収されることを念頭に置き、今後は N_{\parallel} の保存と $D = 0$ を両立させたコードの改良を行い、CPD および QUEST において電子加熱・大電流電流駆動を目指す。

【参考文献】

- [1] 出射 浩, プラズマ・核融合学会 インフォーマルミーティング (2005).
- [2] N. Takeuchi, T. Seki, Y. Torii, K. Saito, T. Watari, *et al.*, Journal of Plasma Fusion Research SERIES, Vol.6 (2004)
- [3] 竹内 伯夫, 全国共同利用研究成果報告第 10 号, p.205 (2007).
- [4] Watari, T, Hamada, Y, Notake, T, Takeuchi, N, Itoh, K., Physics of Plasmas, Vol.13 062504 (2006).

本研究の目的

電子密度が電子サイクロトロン共鳴周波数帯の電磁波のカットオフ密度以上となる、いわゆるオーバードレンスなプラズマでは、電子サイクロトロン共鳴層付近で輻射された電子バーンシュタイン波(EBW)からモード変換した電磁波を検波し温度測定を行うことになる。この電磁波の偏波とEBWからのパワー変換効率は伝播角度とモード変換領域の密度勾配及び磁場強度により異なる。これまでの検討により、小型PWI装置、およびQUEST装置でのプラズマパラメータではEBWから磁場に対して斜め伝播する電磁波モードへのモード変換効率が高く、密度分布形状によっては放射電磁波偏波が正常波と異常波の混合波となる場合が存在すると予想される。球状トカマクではモード変換がおこるプラズマ境界部において、ポロイダル磁場強度がトロイダル磁場強度と同程度になる場合もあり得るため、強いシアを持つ磁場で、任意の方向に伝播する電磁波とEBWのモード変換過程を調べる必要がある。本研究では、任意の磁場配位、伝播方向において、電磁波モードとEBWのモード変換効率、EBW由来の放射電磁波偏波を計算する数値計算コードを整備して、小型PWI装置およびQUEST装置で計測される放射電磁波の伝播特性を明らかにし、電子温度計測およびモード変換領域のプラズマパラメータ測定のための新たな手法の開発に供する。

研究の方法

任意の磁場配位、伝播方向において、電磁波とEBWのモード結合を記述する散乱行列を求める数値計算コードを整備する。これまでは、このコードでは、プラズマ境界での電磁波モードの伝播角度をトロイダル角度、ポロイダル角度で定義できるようにし、検討の際の利便性を図ることとする。

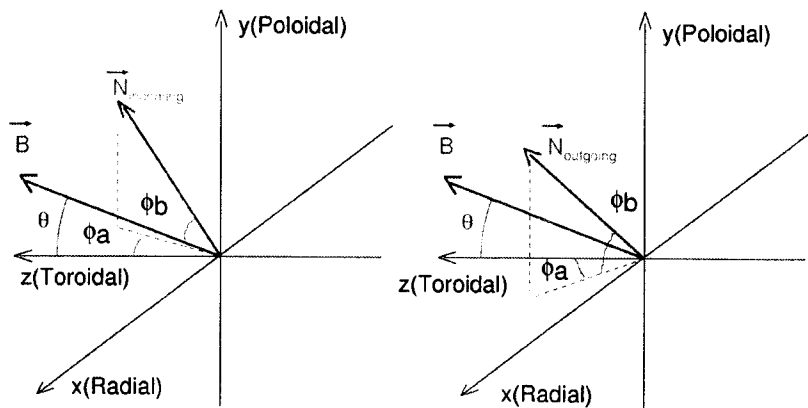


図: プラズマへ向かう波とプラズマから離れていく波の伝播角度の定義。

経緯と結果

計算では、cold プラズマの波動方程式の初期値問題を解く。本研究では、任意の磁場、伝播方向の問題を扱えるように、数値計算コードの改良を行った。まず、図1のように計算における座標系を定義する。プラズマに向かう波(加熱の際の入射波)とプラズマから外部へと向かう波(加熱の際の反射波、EBW由来の放射電

磁波)を示す。密度と磁場はx軸方向に関してのみ変化するとする。この場合、x軸方向に垂直な屈折率成分 N_y, N_z は保存され、プラズマ境界部でのトロイダル方向からの角度 ϕ_a 、xz平面からの角度 ϕ_b を用いて $N_y = \sin\phi_b, N_z = \phi_a * \phi_b$ と表すことができる。磁場はyz成分のみ持つとし、z軸方向からの角度 θ を用いて、トロイダル磁場 $B_t = B_z = B(x) * \cos\theta(x)$ 、ポロイダル磁場 $B_p = B_y = B(x) * \sin\theta(x)$ とする。

初期値はプラズマ内部のモード変換領域よりも高密度側のエヴァネセント領域で与える。電場のx,y,z成分をそれぞれ $E_x,$

E_y, E_x とし、関数 $F_a = N_y E_y + N_z E_z, F_b = N_y E_z - N_z E_y, F_c = dF_b/dx, F_d = iS E_x + D(E_y \cos\theta - E_z \sin\theta)$ を定義する。ここで S, D はいわゆる Stix notation である。 N_y, N_z が一定であり、磁場の z 軸からの角度が θ である場合の波動方程式を変形することで、以下の連立常微分方程式が得られる。

$$dF_a/dx = i(N_y^2 + N_z^2 - S)E_x - D(E_y \cos\theta + E_z \sin\theta),$$

$$dF_b/dx = F_c,$$

$$dF_c/dx = iD(N_y \cos\theta + N_z \sin\theta)E_x - \{N_y^2 N_z + N_y(P - S) \cos\theta \sin\theta + N_z^3 - N_z(S \cos^2\theta + P \sin^2\theta)\}E_y + \{N_y^3 - N_y(S \sin^2\theta + P \cos^2\theta) + N_y N_z^2 + N_z(P - S) \cos\theta \sin\theta\}E_z$$

$$dF_d/dx = iD(N_y \cos\theta - N_z \sin\theta)E_z + \{N_y(S \cos^2\theta + P \sin^2\theta) + N_z(P - S) \cos\theta \sin\theta\}E_y + \{N_y(P - S) \cos\theta \sin\theta + N_z(S \sin^2\theta + P \cos^2\theta)\}E_z$$

P も Stix notation である。また、電場の x, y, z 成分は $E_y = (N_y F_a - N_z F_b) / (N_y^2 + N_z^2), E_z = N_z F_a - N_y F_b / (N_y^2 + N_z^2), E_x = (F_d - D(E_y \cos\theta - E_z \sin\theta)) / iS$ として計算できる。

初期値はモード変換領域より高密度側のエヴァネッセント領域において、波動方程式の解のうち x 軸負方向に減衰する解 2 つを選ぶ。これらをそれぞれ E_{01}, E_{02} とし、それぞれに関して上記の方程式を用いてプラズマ境界部に向かって積分を行い、プラズマ境界部での解、 E_1, E_2 を得る。プラズマ境界部で二つの電力直交する直線偏波 $e_1 = (\sin\phi_a \sin\phi_b, \cos\phi_b, -\cos\phi_a \sin\phi_b) \exp(-i|N_x| \cdot x), e_2 = (\cos\phi_a, 0, \sin\phi_a) \exp(-i|N_x| \cdot x)$ を定義し、これらの線形結合でプラズマへ向かう波を記述する。 $\phi_a = 0$ 度の場合、 e_1 が異常波モード、 e_2 が正常波モードと一致する。また、 $f_1 = (-\sin\phi_a \sin\phi_b, \cos\phi_b, -\cos\phi_a \sin\phi_b) \exp(i|N_x| \cdot x), f_2 = (\cos\phi_a, 0, -\sin\phi_a) \exp(i|N_x| \cdot x)$ を定義し、これらの線形結合でプラズマから外部へと向かう波を記述することにする。 E_1, E_2 はそれぞれ $e_1 + S_{11} \cdot f_1 + S_{21} \cdot f_2 = c_{11} \cdot E_1 + c_{12} \cdot E_2, e_{12} + S_{12} \cdot f_1 + S_{22} \cdot f_2 = c_{21} \cdot E_1 + c_{22} \cdot E_2$ と記述できるため、これらの連立方程式をとり、未知数 $S_{11}, S_{12}, S_{21}, S_{22}, c_{11}, c_{12}, c_{21}, c_{22}$ を得ることができる。これらを用いて、EBW から電磁波モードへのパワー変換効率を求めることができ、また、EBW 由来の電磁波偏波も計算できる。

最適入射角度設定により、O-X-B モード変換効率が 100% となる密度勾配領域において、プラズマ境界部でポロイダル磁場強度がトロイダル磁場強度の 50% あるとして計算を行ったところ、同じ入射角度設定でポロイダル磁場無しでは 100% の EBW-電磁波モード変換効率であったのに対し、変換効率は 72% と減少する結果が得られた。シアがあることにより、磁場に平行な屈折率成分が変化し、最適値からはずれた結果を示していると考えられる。今後はパラメータ探査を行い、ポロイダル磁場が変化しても高変換効率が得られるパラメータ領域と入射角度設定を求められるようにする。

今後の課題

モード変換領域がプラズマ境界部から離れている場合、同じ EBW に由来する正常波モードと異常波モードの、モード変換領域からプラズマ境界部へ至る軌道が一致しない可能性が考えられる。このような場合、スラブプラズマ近似を用いて研鑽する領域をできるだけせばめ、モード分離の手続きはモード変換領域近傍で行い、分離されたモードの軌道についてそれぞれ光線追跡コードで計算し、受信アンテナにおける EBW 由来の電磁波偏波を求める必要がある。光線追跡コードと組み合わせ、モード分離点の違いにより受信アンテナ近傍に達する EBW 由来の電磁波偏波がどの程度変化するかを検討する。

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。

LHDは第一壁材にステンレス、ダイバータ板に炭素を用いているが、これまでの研究により炭素の損耗は主に主放電中に生じ、ステンレスの損耗はグロー放電中に生じることが明らかとなっている。また、真空容器内に設置された材料プローブによるポロイダル分布に関する分析では、プラズマとの距離の観点からプラズマ中で発生した荷電交換粒子による影響が高いと想定される位置で損耗率が高く、プラズマから離れた位置で再堆積の影響が高く炭素の組成比が高い。

本研究では、特に ICRF を用いたコンディショニング放電と対向壁との相互作用について研究を行った。この放電は、強磁場中におけるコンディショニング法として着目されており、ITER では特に残留トリチウム除去の観点から注目されている。壁への粒子束評価として、計測装置によるエネルギー分布と、その時の試料上損傷レベルとを比較することにより、水素同位体除去に対する RF 放電条件の選定を目指すものである。

実験方法

ICRF 放電を用いた磁場中での水素除去を目的としたコンディショニング実験を第 11 サイクル実験 (2007 年度)LHD において行った。動作ガスは He を用いて第 10 サイクル (2006 年度) 同様全圧 $\sim 10^{-4}$ Pa オーダーで実施した。実施前の壁中の水素リサイクリングを規格化するために、ICRF 放電前に NBI 加熱による水素プラズマ生成を行なった。RF 入射フェーズは 3 秒 ON, 2 秒 OFF の繰り返しであった。

この放電時に試料駆動装置を用いて第一壁位置での試料照射を行った。今回の分析は透過型電子顕微鏡 (TEM) によるヘリウム損傷を評価するため、直径 3mm のステンレス 316 試料を回転機構によるシャッター機能を持つホルダーに設置し、ICRF コンディショニング放電すべてに曝露した試料、およびそれぞれの条件毎に曝露した試料との切り分けを行った。本共同研究では、主に TEM 試料の準備および分析に関して協力を得た。

結果および考察

今回の実験では、1) 動作ガスである中性 He と He⁺の比較、2)

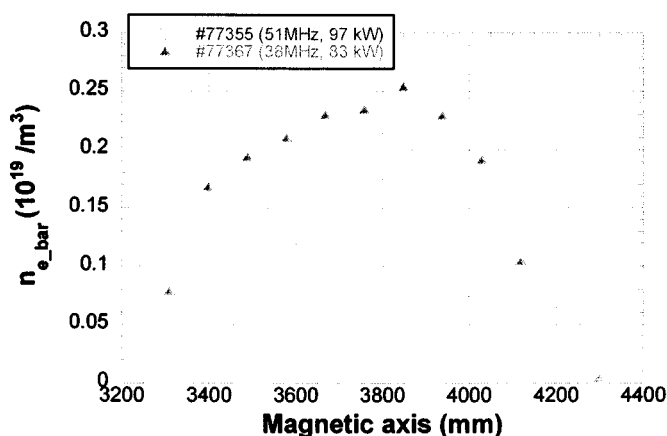


図 1. 線平均密度

38.75MHz, 51MHz の異なる周波数帯における水素脱離, 高エネルギー分布などプラズマ計測データによる比較, および材料プローブ分析による比較, 3) トロイダル方向のプラズマ伝搬を確認するための基礎データとして, 3.5 アンテナ近傍での磁気プローブ測定 (35MHz・HPF 使用), 4) ω_{ch}/ω と電子密度との相関関係を, を目的とした. ただし4) については磁場強度を0.5Tに変更した後に比較データを取得予定であったため, 今回は実施できなかった.

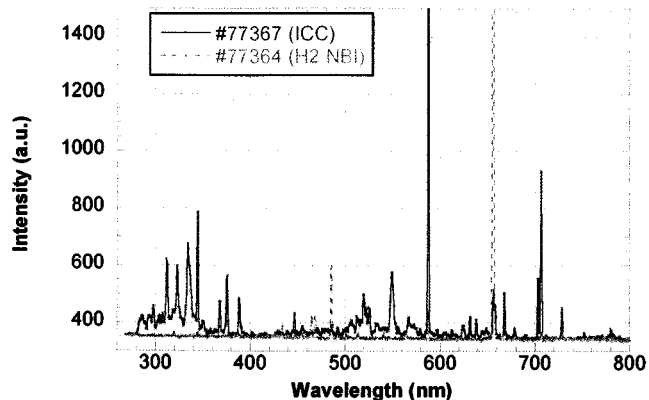


図2. 分光計測によるスペクトル線

図1に51MHzおよび38MHz時の線平均密度を示す. いずれも入射パワーに対する net パワー比が約25%で Net パワーはほぼ等しいショットで比較を行なったところ, 密度が1桁程度異なることが分かった. 図2に分光スペクトルの結果を示す. 38MHzでのICRFコンディショニング時と, 参照ショットとして水素NBI放電時の比較を行なった. 露光時間は50msとした. Heは5876nm, He⁺は4686nmで観測されるが, 水素NBI放電では若干ながらHe⁺が観測されていたが, ICF放電洗浄時にはHeのラインのみが顕著に観測されるということが明らかとなった.

現在, 同実験で曝露したTEM試料に関する分析を3月に実施する予定となっており, 図1に示す51MHzおよび38MHzでのRF入射時のHe損傷に関する比較を行う予定である.

まとめ

強磁場中におけるICRFコンディショニング放電をLHDで実施し, その際He損傷を観測するためTEM分析用試料を試料駆動装置によって挿入した. 放電はRF入射周波数が51MHzおよび38MHzで実施し, Netパワーがほぼ等しいショットにおいて電子密度のデータでは違いがあることが明らかとなった. 今後応用力学研究所のTEM装置を用いてそれぞれの条件における損傷を分析し, 計測データとの比較を行う予定である.

研究組織

代表者	芦川直子	核融合科学研究所	助教
協力者	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
	吉田直亮	九州大学応用力学研究所	(所内世話人)
	岩切宏友	九州大学応用力学研究所	
	材料グループ	九州大学応用力学研究所	

NBI 用負イオン源プラズマの生成と制御

山口大学大学院理工学研究科 福政 修

1. 研究の目的

中性粒子ビーム入射装置 (Neutral Beam Injector : NBI) 用の水素/重水素負イオン源の開発を進めている。今後のNBI用負イオン源では、イオン源の長寿命化と高負イオン比 (負イオン/正イオン密度 ~ 1) のプラズマ生成が必要である。本研究では、従来法と異なる「フィラメント不要」、「セシウム不要」、「磁気フィルター不要」の理想的な負イオン源の開発を目指す。具体的には、RF放電プラズマを対象にその生成と制御により負イオン源プラズマへの応用可能性を検討する¹⁾。

DC放電プラズマ中のプラズマパラメータ制御には磁気フィルター法が用いられているが²⁾、RF放電プラズマのパラメータ制御に関してはそれほど有効な手法ではない³⁾。これまでにグリッド負バイアス法^{4, 5)}によるRFプラズマパラメータ制御を試み、磁気フィルター法との比較も含めてグリッドバイアス法がRFプラズマの制御には効果的であることを示し、負イオン生成の高効率化を検討した^{6, 7)}。今回は重水素(D_2)放電プラズマ中でのD生成を対象として、軽水素(H_2)放電プラズマ中でのH生成と比較しながらプラズマ生成および負イオン生成に関する同位体効果について検討した。

2. RF 負イオン源の概要

図1にRF放電プラズマ実験装置の概略図を示す。放電容器は直径21cmのステンレス製の円筒容器で、プラズマ生成領域 (上流)、メッシュグリッド、拡散プラズマ領域 (下流) から構成されている。メッシュグリッドを軸方向の原点として、メッシュグリッドから上流側 13.5cm の位置に円盤アンテナを設置して、13.56MHz の高周波電圧を印加してプラズマ生成を行う。容器外周に永久磁石 (ネオジウム) を配置して構成した12極のラインカスプ磁場によって、生成されたプラズマは閉じ込められている。

メッシュグリッドとして50、30および7 mesh/inch の3種類を用い、負バイアス印加によるプラズマの空間分布制御について検討した。また、ロッド型磁気フィルターをメッシュと交換して磁気フィルター制御による負イオン生成の比較実験を行った。

エンドプレート後方より軸方向に可動なプローブを挿入して拡散プラズマ領域を、また $z = 4, 11\text{cm}$ の位置に径方向より挿入したプローブによりプラズマ生成領域のプラズマパラメータ (電子密度 n_e 、電子温度 T_e 、空間電位 V_s 、浮遊電位 V_f) を測定した。エンドプレート中央に設けた単孔 (10 ϕ) より負電流を引出し、磁場偏向型イオン分析器により引出し負イオン電流および電子電流を測定した。

3. 実験結果および考察

グリッドバイアス法による D_2 プラズマ制御は、 H_2 プラズマの場合とほぼ同様な結果であった。プラズマ制御の一例として、メッシュグリッド下流側 (引出し領域) のプラズマパラメータ (電子密度 n_e 、電子温度 T_e) のグリッド電圧依存性を図2に示す。グリッドバイアス電圧 V_g を正から負へ変化するにつれて T_e は低下し、 n_e はある電位で極値を取る形の変化を示す。 V_g が負になる領域で負イオン生成にとって最適なプラズマ状態 ($T_e \leq 1$ で高 n_e) が形成される。

図3に引出し負イオン電流のRF放電電力(P_{RF})依存性を示す。実験条件は、 $p(H_2) = p(D_2) = 3 \text{ mTorr}$ 、 $V_g = -50\text{V}$ 、 $Z_{\text{end}} = -7 \text{ cm}$ 、引出し電圧 $V_{\text{ex}} = 1 \text{ kV}$ 、メッシュサイズ50 mesh/inchである。エンドプレートの位置はほぼ最適位置をとっている。負イオン電流は P_{RF} の増加に比例して増加していることが分かる。これは P_{RF} が増加することによる拡散プラズマ領域での (T_e は1 eV程度にとどまったままで) n_e の増加が主な原因である。 P_{RF} とともにD電流とH電流の差が開いていく傾向を示すが、引出し電圧は同じなので質量比による速度の違いを考慮するとほぼ同じ電流値となる。今後は引出し電子電流も含めてD負イオン源の高効率化について検討していく。

参考文献

- 1) Y. Nakao et al.: Proc. 6th Inter. Conf. Reactive Plasmas / 23rd Symp. Plasma Processing (2006), pp. 185-186.
- 2) O. Fukumasa and S. Mori: Nuclear Fusion 46 (2006) S287.
- 3) Y. Tauchi and O. Fukumasa: IEEE 30th Inter. Conf. Plasma Science, 2PA16 (2003).
- 4) K. Kato, S. Iizuka and N. Sato: Appl. Phys. Lett. 65 (1994) 816.
- 5) S. Iizuka, K. Kato, A. Takahashi and N. Sato: Jpn. J. Appl. Phys. 36 (1997) 4551.

- 6) J. Okada, Y. Nakao, Y. Tauchi and O. Fukumasa: Rev. Sci. Instrum. 79 (2008), 02A502-1.
 7) Y. Jyobira, D. Ito and O. Fukumasa: Rev. Sci. Instrum. 79 (2008), 02A508-1.

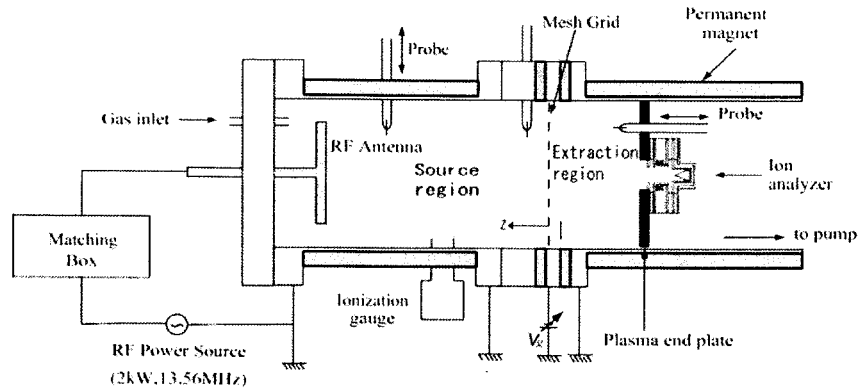


図1 RF負イオン源の概略図

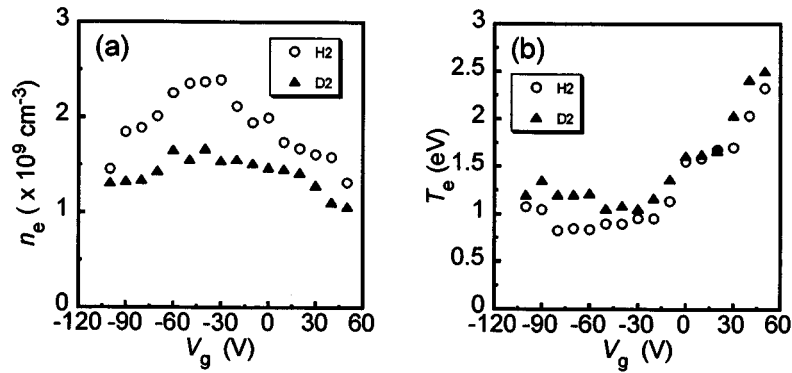


図2 プラズマパラメータのグリッドバイアス依存性: (a) n_e , (b) T_e .
 実験条件: $P_{RF} = 200 \text{ W}$, $p(\text{H}_2, \text{D}_2) = 3 \text{ mTorr}$, プローブ位置 $Z_{pr} = -5 \text{ cm}$,
 エンドプレート位置 $Z_{end} = -10.5 \text{ cm}$, メッシュサイズ = 50 mesh/inch.

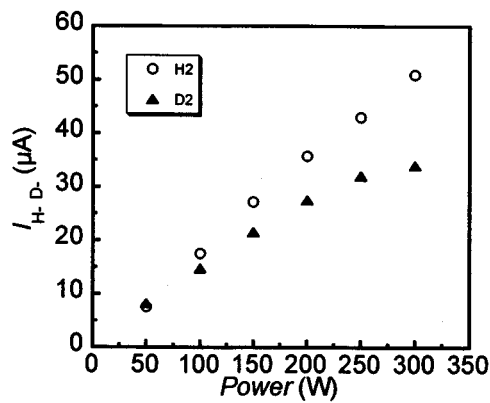


図3 引出し負イオン電流の放電電力依存性
 実験条件: $p(\text{H}_2, \text{D}_2) = 3 \text{ mTorr}$, $V_g = -50 \text{ V}$, $Z_{end} = -7 \text{ cm}$,
 引出し電圧 $V_{ex} = 1 \text{ kV}$, メッシュサイズ = 50 mesh/inch.

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2007年8月6日~8日の期間、九州大学応用力学研究所において開催された。この研究会は第2回日韓ワークショップ「磁気核融合プラズマの理論とシミュレーション」(実施責任者 矢木雅敏(九州大学)、C. S. Chang(KAIST), J. Y. Kim(NFRC))との共催で行われた。

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これからの最重要課題である。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 Modelling 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)に関する議論も始まり、六カ所村に国際核融合エネルギー研究センター 計算機シミュレーションセンターの設置も予定されている。自己点火にむけた核融合実験の機運も盛り上がり、今後のシミュレーション研究に大きな期待が寄せられているこの時期に、第6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。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

参加者は28名、発表件数は27件(日本18件、韓国9件)であった。発表件数の比率は2対1の割合であり、国内開催という点を考慮すればバランスのとれたワークショップであったと言える。プログラムは8つのセッション:(I) Project (日:1、韓:1)、(II) BPSI (日:2)、(III) Turbulence(日:5)、(IV) Transport (日:2、韓:3)、(V) デモ炉 (日:2)、(VI) プラズマ周辺 (日:1、韓:1)、(VII) RF (日:1、韓:3)、(VIII) MHD (日:4、韓:1) から構成された。

セッション(I)では J. Y. Kim と佐藤(幸)がそれぞれ KSTAR、QUEST 計画の進捗状況、今後の研究計画を報告した。セッション(II)では福山、中島がトカマク、ヘリカルにおける統合コード計画等の進捗状況、今後の研究計画を報告した。セッション(III)では Ferrando Margalet、井戸村がジャイロ運動論モデルに基づくシミュレーション結果やコード開発・ベンチマーク結果を報告した。宮戸は電磁 ITG 乱流による帯状場生成について報告した。岸本は、変調不安定性に基づく帯状流の生成機構の理論モデルを拡張し、その結果を報告した。徳永は ITG 乱流による輸送障壁崩壊機構に

ついて報告した。セッション(IV)では本多が流体モデルに基づく輸送コード TASK/TX について報告し、Na は KSTAR の定常運転シナリオの輸送シミュレーション結果を報告した。林と Ko はそれぞれ ELM の影響を取り入れた統合輸送モデルによるシミュレーション結果を報告し、S. S. Kim は KSTAR ダイバータプラズマの輸送シミュレーション結果を報告した。セッション(V)では、滝塚は SONIC コードによるデモ炉のダイバータパフォーマンスの予測結果を報告した。小関は BA (Broader Approach) 活動におけるデモ炉設計ワークショップの内容を紹介した。セッション(VI)では C. S. Chang が周辺ペDESTALにおける共鳴磁場摂動の影響を粒子シミュレーションにより解析し、その結果を報告した。滝塚は PARASOL コードを用いて SOL-ダイバータプラズマにおける ELM による熱流速のシミュレーションを行い、その結果を報告した。セッション(VII)では、福山が RF 加熱と電流駆動の輸送と統合化された波動解析とその結果を報告し、Jhang は抵抗性壁モードに対する RF 波の影響を研究してその結果を報告した。G. Y. Park (C. S.Chang) は RF と粒子の非線形相互作用の解析のために 5 & 1/2 次元モデルを構築し、シミュレーション結果を報告した。B. H. Park は KSTAR プラズマにおける ICRH 加熱シミュレーション結果を報告した。セッション(VIII)では西村(矢木)はドリフトテアリングモードによるポロイダル流の生成機構を研究し、その結果を報告した。石井は駆動された磁気島発展におけるプラズマ回転の効果を報告した。S. M. Yi は KSTAR における Advanced Tokamak モードの安定性解析の結果を報告した。内藤は MHD シミュレーションのための新しいジャイロ PIC コードを開発し、Validation 結果を報告した。徳田はトカマクにおける線形理想 MHD 安定性に関する数値手法の発展に関し報告した。

全体を通し、ワークショップ前半はプロジェクトの研究計画やフレームワークを中心に報告がなされ、後半は各論についての結果報告がされた。プラズマ乱流のセッションは日本側からのみの発表であったが、韓国でも SciDAC に類似のプロジェクトを今後推進する模様で、数年後には結果を聞くことができるかもしれない。統合化シミュレーションの結果も今後、増えていくことが期待される。来年度は韓国側が同様のテーマで大田にて開催したい旨、提案があり了承された。韓国の大学の研究者も参加できるように基礎プラズマのセッションを新しく設けることが提案された。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/H19workshop.html>

最後にこのワークショップを開催するにあたり、日韓核融合協力事業および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)(1)「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)(新規採択)

科学研究費補助金特別推進研究「乱流プラズマの構造形成と選択則の総合的研究」(研究代表者 伊藤早苗、研究期間平成 16 年度-20 年度)

日韓ワークショップ

Theory and Simulation of Magnetic Fusion Plasmas (2007/8/6-8, Kasuga, Japan)

九大応力研共同研究 特定研究 (平成18年-20年度)

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

2nd Japan-Korea workshop on ‘Theory and Simulation of Magnetic Fusion Plasmas’ combined with 6th Burning Plasma Simulation Initiative(BPSI) meeting

#W601, Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Kasuga, Fukuoka, Japan, 2007/8/6-8

Aug. 6 (Mon)

9:00-9:10 Welcome to Kyushu University (Director Imawaki)

9:10-9:15 Announcement (M. Yagi)

Project I (Korea) (Chairman Y. Kishimoto)

9:20-10:00 J. Y. Kim, Current status and plan of KSTAR project

10:00-10:20 Coffee Break

BPSI (Chairman Y. Kishimoto)

10:20-10:50 A. Fukuyama, Integrated modeling of toroidal plasmas and standard component interface

10:50-11:20 N. Nakajima, Simulation project in Dept. of simulation science of NIFS

Turbulence (Chairman M. Yagi)

11:20-11:50 N. Miyato, Generation of zonal flow and zonal magnetic field in tokamak plasmas

11:50-13:00 Lunch

13:00-13:30 Sergi Ferrando I Margalet, Zonal flows and ITG instabilities in multiple-helicity magnetic fields

13:30-14:00 Y. Idomura, First principles based conservative gyrokinetic toroidal full-f 5D Vlasov simulation

14:00-14:30 Y. Kishimoto, Global nature of zonal flows due to finite band width

14:30-15:00 S. Tokunaga multi-scale transport simulation with ion temperature gradient driven drift wave turbulence

15:00-15:20 Coffee Break

Transport Simulation I (Chairman A. Fukuyama)

15:20-15:50 Y.S. Na, Simulations of KSTAR steady-state operation scenarios

15:50-16:20 M. Honda, Present status of dynamic transport code, TASK/TX

Design (Chairman C. S. Chang)

16:20-16:50 T. Takizuka, Prediction for divertor performance of JT-60SA and DEMO reactor (SlimCS) with SONIC simulation

16:50-17:20 T. Ozeki, Report on first workshop on DEMO design in the broader approach activities

Project II (Japan) (Chairman C. S. Chang)

17:20-18:00 K. N. Sato, Present Status of the New Project "QUEST" for Long Term Sustained Spherical

Tokamak Studies

18:10 Welcome Party (2F)

20:20 Adjourn

Aug. 7 (Tues)

Plasma Edge (Chairman A. Fukuyama)

9:00-9:30 C.S. Chang, Kinetic study of Resonance Magnetic Perturbation effect on edge pedestal

9:30-10:00 T. Takizuka, PARASOL simulation of the ELM heat flux in SOL-divertor plasmas

10:00-10:15 Coffee Break

RF (Chairman T. Takizuka)

10:15-10:45 A. Fukuyama, Integrated full wave analysis of RF heating and current drive in tokamak plasmas

10:45-11:15 H. G. Jhang, A feasibility study of the influence of the rf waves

on resistive wall mode

11:15-11:45 G. Y. Park (C. S. Chang), A new 5&1/2 D technique for simulation of nonlinear RF-particle interaction

11:45-12:15 B. H. Park, ICRH heating and preionization modeling for KSTAR plasmas

12:15-13:20 Lunch

MHD (Chairman T. Ozeki)

13:20-13:50 S. Nishimura (M. Yagi) Poloidal flow generation by drift tearing mode

13:50-14:20 Y. Ishii, Plasma Rotation Effects on the Driven Magnetic Island Evolution

14:20-14:50 S.M. Yi, MHD stability analysis of KSTAR target AT mode

14:50-15:20 H. Naitou, Development of a new gyro-PIC code for MHD simulation

Coffee Break 15:20-15:40

15:40-16:10 T. Tokuda, Progress in the numerical methods for linear ideal MHD stability analysis of a tokamak

Transport Simulation II (Chairman J. Y. Kim)

16:10-16:40 N. Hayashi, Simulation study of pressure profile effect on the ELM energy loss with TOPICS-IB

16:40-17:10 S. H. Ko, Coupled simulation of kinetic pedestal evolution and MHD ELM instability.

17:10-17:40 S. S. Kim, Transport simulation studies in KSTAR divertor plasmas

17:40 Adjourn

Aug. 8 (Wes)

9:00-9:30 Discussion on future collaboration

9:30-9:45 Summary

9:45 Closing

9:45-10:00 Photo (Entrance of RIAM Research Bld.)

10:00-10:15 Coffee Break

10:20-11:20 Sight-seeing (Advanced Fusion Research Center)

11:20-11:50 Sight-seeing (LMD, H Bld.)

10:20-12:00 BPSI meeting (W601)

参加者リスト（日本 20 名、韓国 8 名）

Name	Affiliation
Y. Ishii	JAEA
Y. Idomura	JAEA
T. Ozeki	JAEA
Y. Kishimoto	Kyoto U
K. Sato	Kyushu U
T. Takizuka	JAEA
S. Tokuda	JAEA
S. Tokunaga	Kyushu U
H. Naitou	Yamaguchi U
N. Nakajima	NIFS
H. Nuga	Kyoto U
N Hayashi	JAEA
A. Fukuyama	Kyoto U
M. Honda	JAEA
N. Miyato	JAEA
M. Yagi	Kyushu U
S. F. Margalet	NIFS
S. Sugita	Kyushu U
Y. S. Na	NFRC
S. S. Kim	NFRC
B. H. Park	NFRC
H. G. Jhang	NFRC
J. Y. Kim	NFRC
S. H. Ko	KAIST
S. M. Yi	POSTEC
C. S. Chang	KAIST
H. Mori	Kyushu U
Y. Nariyuki	Kyushu U

核融合炉材料のヘリウム損傷

研究代表者 京都大学エネルギー理工学研究所 森下 和功

研究協力者 九州大学応用力学研究所 岩切 宏友

標記研究会を平成 19 年 11 月 3 日に九州大学応用力学研究所で開催した。タングステン材料におけるヘリウム照射効果に関する研究が特に活発に行われていることから、平成 19 年度核融合科学研究所 LHD 計画共同研究「先進タングステン材のプラズマ対向機器への適応評価」との合同開催とした。昨年度に引き続き、特定研究「照射効果－水素・ヘリウム・不純物元素相互作用」とも連携し、核融合炉材料における粒子負荷全般を視野に入れた総合的な議論を行い、当該研究分野のシームレスな知的拠点の構築を目指している。国内の7つの大学や大学共同利用機関である核融合科学研究所からの参加があり、総勢 30 名での研究集会が行われた。

はじめに、九州大学の吉田氏により本研究会の趣旨及び合同開催の意義についての説明があり、その後当該分野に関連する各講演が行われた。まず、金属材料中におけるヘリウムや水素の挙動のモデリングに関する三件の講演が行われた。京都大学の徐氏は、各種格子欠陥とヘリウムとの相互作用に関する重要な知見を分子動力学法に因って示し、核融合科学研究所の加藤氏は水素原子の多重捕獲機構についての数値的考察を第一原理電子状態計算に基づいて導出しており、それぞれ最新の研究成果報告が行われた。京都大学の森下はヘリウムバブルの生成・成長過程などを含んだマルチスケールモデリングや、IFMIF、J-PARKと各種シミュレーションとの関連性に関する報告を行った。

静岡大学の矢野氏は炭化ケイ素中の水素同位体およびヘリウムの滞留挙動に及ぼす照射エネルギー依存性に関しての発表を行い、物理スパッタリングやノックオンなどの影響により重水素滞留挙動が変化することを明らかにした。同大学の吉河氏はボロン膜中における水素同位体の滞留挙動に及ぼすヘリウムイオン照射効果に関する解析を多角的に行い、ヘリウム前照射と後照射における差異やプリスターの形成が滞留挙動に及ぼす影響を明らかにした。

透過型電子顕微鏡を研究の主軸とし、ヘリウム照射材における欠陥形成過程の基本プロセスの解明を目指した研究についての二件の発表が行われ、島根大学の檜高氏は低放射化フェライト鋼のモデル合金である Fe-9Cr と Fe-9Cr-2W におけるヘリウムバブルの形成過程に関する研究を、九州大学の岩切は 1000℃以上の高温下でヘリウム照射されたタングステン材料における微細組織観察結果をそれぞれ示した。

本質的に「脆い」タングステン材料を改良し、プラズマ対向機器への適応評価を行った講演が二件あり、東北大学の栗下氏は超微細結晶粒 W-TiC の超塑性の発現と高靱性化に関する講演を、長谷川氏は超微細結晶粒を有したタングステン材料におけるプリスター（ヘリウム照射に起因する）の形成抑制機構に関する講演を行った。これらの研究成果は、今後のプラズマ対向材料としてのタングステン材料の高度化に大きく貢献すると考えられる。

ダイバータ候補材料であるタングステンにはヘリウムなどの粒子負荷に加えて高い熱負荷を受け、諸々の相乗効果が生ずる。この現象の解明を目指した二件の発表があり、名古屋大学の野村氏はヘリウムプラズマ照射を行ったタングステン材料にルビーレーザーの照射を行い、表面に形成されるサブミクロンレベルの構造変化に関する新規的な研究発表を、九州大学の徳永氏はヘリウム予照射したタングステンに電子ビーム照射を行い、表面形状変化や損耗特性などを詳細に示した。

タングステン被膜材料に関する二件の研究報告も行われた。九州大学の徳永氏は二種類のタングステン被膜炭素材料を LHD ダイバータプラズマ照射実験に供し、放電実験後の材料健全性などの調査に関する講演を行い、

同じく九州大学の八尋氏はタングステン被膜低放射化フェライト・マルテンサイト鋼の材料特性に関する各種評価を行い、溶射法や溶射時の基材の温度並びにタングステンの粒径によってタングステンの積層構造や F82H 鋼に与える影響が異なることや、再熱処理を行うことで界面にフェライト相が形成され、界面が緩和される現象などについて示した。

大阪大学の上田氏は水素・ヘリウム・炭素同時照射時のタングステン中の水素同位体挙動に関する新規的な研究発表を行い、注入されたヘリウムによって表面領域に形成されたヘリウムバブルが水素の拡散障壁となり、粒界剥離に起因したプリスターの形成を抑制することを示した。核融合科学研究所の時谷氏は LHD マテリアルプローブシステムを用いたヘリウムと水素のダイバータプラズマへの材料照射実験から、タングステン中に形成される照射欠陥の観察とそこに保持されるプラズマ粒子の定量的な評価を行い、損傷形成機構およびガス保持特性についての成果報告を行った。九州大学の吉田氏はさまざまな実験データや解析結果を示しながら、最終的な克服課題であるヘリウム照射による各種損傷や損耗の抑制に向けての提言を行った。

昨年に引き続いて本研究集会を開催したことにより、非常に深化した情報交換が行われた。当該研究分野に関する共同研究の意義の深さを互いに認識し、来年度も特定研究「照射効果－水素・ヘリウム・不純物元素相互作用」を継続して行うことになった。

平成 19 年度

九州大学応用力学研究所研究集会「核融合炉材料のヘリウム損傷」

核融合科学研究所 LHD 計画共同研究「先進タングステン材のプラズマ対向機器への適用評価」

合同研究会

11 月 3 日 (土) 9:00-17:00

九州大学応用力学研究所共通棟 2 階会議室(福岡県春日市春日公園 6-1)

プログラム

11 月 3 日(土)

9:00 - 9:10 開会の挨拶
森下和功 (京大エネ理工)、
吉田直亮 (九大応力研)

座長 (栗下裕明)

9:10 - 9:40 核融合炉材料のヘリウム損傷
森下和功 (京大エネ理工)

9:40 - 10:00 水素原子を多重捕獲したタングステン単原子空孔の形成エネルギーと
熱平衡濃度の第一原理計算
加藤太治 (核融合研)

10:00 - 10:20 Fe における格子間原子転位ループとヘリウムの相互作用
徐 虬 (京大原子炉)

10:20 - 10:30 休憩

座長 (長谷川晃)

10:30 - 10:50 炭化ケイ素中における水素同位体の滞留挙動に及ぼす
ヘリウム照射エネルギー依存性
大矢恭久 (静岡大院理)

10:50 - 11:10 酸素含有ボロン膜中の水素同位体の滞留挙動に及ぼす
ヘリウムイオン照射効果
吉河朗 (静岡大創科院)

11:10 - 11:30 He 照射した Fe-9Cr-2W における損傷発達過程と He 保持特性
檜高祐生 (島根大総理工)

11:30 - 12:00 W 材料の He 照射効果は抑制できるか?
吉田直亮 (九大応力研)

12:00 - 13:00 昼食

座長 (野田信明)

13:00 - 13:30 超微細結晶粒 W-TiC の超塑性発現と高靱性化
栗下裕明 (東北大金研)

13:30 - 13:50 MA 法で作製したタングステン - TiC 合金の He イオン照射効果
長谷川晃 (東北大院工)

13:50 - 14:10 水素・ヘリウム・炭素同時照射時のタングステン中の水素同位体挙動
上田良夫 (阪大院工)

14:10 - 14:20 休憩

座長 (上田良夫)

14:20 - 14:40 タングステン材へのプラズマとパルスレーザーの複合照射効果
大野哲靖 (名大エコ研)

14:40 - 15:00 高温下でヘリウムイオン照射されたタングステンにおける微細組織観察
岩切宏友 (九大応力研)

15:00 - 15:20 ヘリウム予照射タングステンのパルス電子ビーム熱負荷による損傷
徳永和俊 (九大応力研)

15:20 - 15:30 休憩

座長 (高村秀一)

15:30 - 15:50 LHD ヘリウム放電におけるプラズマ対向材料の損傷
時谷政行 (核融合研)

15:50 - 16:10 タングステン被覆炭素材料の LHD ダイバータプラズマ照射実験
徳永和俊 (九大応力研)

16:10 - 16:30 タングステン被覆低放射化フェライト・マルテンサイト鋼の材料特性
八尋由樹 (九大総理工)

座長 (吉田直亮、森下和功)

16:30 - 16:50 まとめと今後の予定等

16:50 - 17:00 閉会の挨拶
森下和功 (京大エネ理工)、
吉田直亮 (九大応力研)

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
