

全国共同利用研究成果報告

第 10 号

平成18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年になります。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、2006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、2007年6月14～15日に開催される「RIAMフォーラム2007」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12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。

九州大学が2004年に国立大学法人として文部科学省から独立して3年になります。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、理学と総合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。

2007年3月

九州大学応用力学研究所

所長 今脇資郎

目 次

平成 18 年度共同研究一覧 i

平成 18 年度研究集会一覧

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 91

核融合プラズマ分野共同研究成果報告 157

平成18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				
	水波と浮体の強非線形相互作用に関する研究	九州大学 柏木 正	柏木 正	1
18特1-1	サブ テ マ	移動境界まわりの強非線形流れ解析	東京工業大学 青木 尊之	11名 2
18特1-2		THINCスキームを応用した強非線形スロッシ ングの数値シミュレーション	東京工業大学 肖 鋒	7名 8
18特1-3		トランザム船尾を有する高速船の耐航性能推 定法に関する研究	広島大学 岩下 英嗣	4名 10
18特1-4		海洋巨大波の実態と生因の解明	海上技術安全研究所 富田 宏	9名 15
18特1-5		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	2名 21
18特1-6		複合型数値計算法の開発に関する研究	防衛大学校 木原 一	2名 23
18特1-7		流体・構造の強非線形連成問題に対する数値 解析法の研究	広島大学 藤久保 昌彦	4名 25
一般研究				
18ME-1	生体吸収性プラスチック複合材料の力学的特性に及 ぼす微視的分解の影響	首都大学東京 小林 訓史	東藤 貢 4名	27
18ME-2	カオス・乱流における輸送特性	崇城大学 柴田 博史	岡村 誠 2名	29
18ME-3	カーボンナノチューブ/NiTi粒子/ポリマーによる三 相複合材料の開発	信州大学 倪 慶清	汪 文学 1名	32
18ME-4	デジタル画像相関法による歯周構造の変形解析	福岡県工業技術センター 内野 正和	森田 康之 3名	34
18ME-5	深屈曲を目指した新型人工膝関節の応力解析	佐賀大学 萩原 世也	東藤 貢 3名	36
18ME-6	廃GFRPの複合材料強化材としての再利用に関する研 究	九州大学 青野 雄太	高雄 善裕 4名	38
18ME-7	下顎骨に埋入された歯科インプラントの3次元モデ ルの構築と応力解析	九州大学 松下 恭之	東藤 貢 2名	40
18ME-8	潮流発電のための高性能ジャイロミル型水車の開発 (側壁影響調査のため深海機器力学実験水槽使用)	九州大学 経塚 雄策	柏木 正 3名	42
18ME-9	ブリッジマン法による機能性化合物半導体の結晶成 長と成長時の融液流動解析	宮崎大学 吉野 賢二	柿本 浩一 3名	44

18ME-10	半導体基板における電子部品接合部の界面評価	愛媛大学 黄木 景二	高雄 善裕 1名	47
18ME-11	太陽電池用高品質バルク多結晶シリコン成長に関する研究	豊田工業大学 大下 祥雄	柿本 浩一 1名	49
18ME-12	レーザー誘起衝撃波の医療応用に関する破壊力学的検討	豊橋技術科学大学 鈴木 新一	新川 和夫 2名	52
18ME-13	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	54

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				
	東シナ海における海洋変動、その物理・化学・生物過程	九州大学 松野 健	松野 健	91
18特2-1	サブ テ ー マ	対馬海峡底層水の変動特性	水産大学校 滝川 哲太郎	4名 92
18特2-2		東シナ海における栄養塩環境の変動予測	愛媛大学 郭 新宇	5名 94
18特2-3		Finite Volume Coastal Ocean Model (FVCOM)を用いた黒潮前線渦による黒潮フロント横断方向輸送量の定量的評価	九州大学 磯辺 篤彦	1名 96
18特2-4		東シナ海における基礎生産への長江水の影響	長崎大学 石坂 丞二	5名 98
18特2-5		化学的トレーサーを用いた東シナ海の水塊構造解析	富山大学 張 勁	3名 100
一般研究				
18A0-1	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	102
18A0-2	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 7名	104
18A0-3	次世代海中ビークルの研究開発	海洋研究開発機構 山本 郁夫	中村 昌彦 11名	106
18A0-4	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	117
18A0-5	数値モデルを用いた気圧擾乱に対する日本海の水位応答の研究	東北大学 木津 昭一	広瀬 直毅 2名	119
18A0-6	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	121
18A0-7	ジャイロミル形潮流発電装置の高性能化	九州大学 経塚 雄策	中村 昌彦 3名	123

18A0-8	可変ベクトルプロペラを用いたハイブリッド型海中ロボットの運動制御に関する研究	佐世保工業高等専門学校 長嶋 豊	中村 昌彦 3名	125
18A0-9	対馬海峡におけるクロロフィルa濃度の時空間変動	水産大学校 鬼塚 剛	柳 哲雄 1名	127
18A0-10	主翼独立制御型水中グライダーの運動性能評価に関する研究	大阪府立大学 有馬 正和	中村 昌彦 4名	129
18A0-11	安心・安全なマイクロ風車の開発研究	九州工業大学 西 道弘	大屋 裕二 3名	131
18A0-12	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	気象庁 石崎 廣	増田 章 12名	133
18A0-13	海生爬中類の遊泳時の流体力学研究	北海道大学 西 弘嗣	中村 昌彦 2名	135
18A0-14	沿岸域における観測を目的とした水中ロボットの開発	九州工業大学 石井 和男	中村 昌彦 5名	147

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	157
18特3-1	サブテーム 多スケール・拡張MHDの理論シミュレーション研究 多スケールプラズマ乱流シミュレーション研究 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 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 プラズマ輸送理論	日本原子力研究開発機構 徳田 伸二	10名	158
18特3-2		九州大学 矢木 雅敏	14名	160
18特3-3		日本原子力研究開発機構 滝塚 知典	8名	163
18特3-4		京都大学 福山 淳	7名	166
18特3-5		核融合科学研究所 伊藤 公孝	16名	168
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	
18特4-1	サブテーム 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 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 金属の損傷組織に及ぼすヘリウムと水素の影響 金属およびセラミックス中の水素移動・集積挙動の解明	京都大学 森下 和功	12名	170
18特4-2		静岡大学 奥野 健二	8名	172
18特4-3		京都大学 徐 虬	4名	174
18特4-4		九州大学 田辺 哲朗	4名	176

18特4-5		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	5名	178
18特4-6		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	7名	180
18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	182
一般研究					
18FP-1		軸対称イオン感受プローブによるイオン温度と流れの測定	横浜国立大学 津島 晴	坂本 瑞樹 2名	184
18FP-2		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	186
18FP-3		低放射化材料のブランケット腐食環境における組織組成変化	核融合科学研究所 室賀 健夫	渡辺 英雄 3名	188
18FP-4		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 1名	190
18FP-5		長時間プラズマにおける中性粒子の挙動	筑波大学 中嶋 洋輔	坂本 瑞樹 4名	193
18FP-6		FePt-Al ₂ O ₃ 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 松村 晶	渡辺 英雄 5名	195
18FP-7		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 5名	197
18FP-8		カスケードを伴う照射組織の発展に及ぼすヘリウムの効果	九州大学名誉教授 北島 一徳	吉田 直亮 2名	199
18FP-9		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 7名	201
18FP-10		重イオン照射による固体内高励起現象と物質改質	大阪府立大学 岩瀬 彰宏	吉田 直亮 6名	203
18FP-11		TRIAM-1M および小型PWI 実験装置における高周波波動伝搬および電流駆動の検討	有明工業高等専門学校 竹内 伯夫	出射 浩 1名	205
18FP-12		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	日本原子力研究開発機構 洲 亘	徳永 和俊 1名	207
18FP-13		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 7名	209
18FP-14		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 御手洗 修	中村 一男 1名	211
18FP-15		重イオン照射されたフェライト鋼のクラスタ形成に及ぼすシリコンの影響に関する研究	電力中央研究所 土肥 謙次	渡辺 英雄 4名	214
18FP-16		渦電流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 4名	216
18FP-17		応力集中部から発生・伝播する疲労き裂成長挙動のSEMによる詳細観察	九州大学 後藤 浩二	渡辺 英雄 3名	218
18FP-18		小型PWI装置における電子バーンシュタイン波加熱のためのマイクロ波入射条件の検討	核融合科学研究所 伊神 弘恵	出射 浩 7名	220

18FP-19	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 5名	222
18FP-20	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 高橋 正氣	渡辺 英雄 6名	224
18FP-21	電界効果型MOS水素原子検出器の開発と実時間粒子リサイクリング計測への応用	大阪大学 福田 武司	坂本 瑞樹 2名	226
18FP-22	ドリフトチューブ内固体水素ペレットの挙動解析	九州大学 横峯 健彦	佐藤 浩之助 3名	228
18FP-23	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 6名	230
18FP-24	TRIAM-1Mでの非対称プローブによるイオン温度データの解析とCPDおよびQUESTでのPWI研究	日本原子力研究開発機構 上原 和也	坂本 瑞樹 3名	232
18FP-25	周辺プラズマ中の間欠的密度揺動の統計的解析	名古屋大学 大野 哲靖	坂本 瑞樹 3名	235
18FP-26	ニューラルネットワークのTRIAM-1M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	237
18FP-27	プラズマ対向材料再堆積層形成に伴う水素同位体及びヘリウム挙動に関する研究	九州大学 片山 一成	吉田 直亮 7名	241

平成18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
18ME-S1	人工関節とバイオメカニクス	佐賀大学 佛淵 孝夫	東藤 貢 13件、40名	全労済モルティ天神ビル	18年10月 21日	56
18ME-S2	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 10件、35名	応用力学 研究所	19年2月 17-18日	60
18ME-S3	高分子固体のメカニクス	金沢大学 新田 晃平	東藤 貢 11件、20名	総理工 講義室	18年10月 5日	64
18ME-S4	複合材料の強度とその損傷モデル	九州大学 高雄 善裕	高雄 善裕 14件、45名	応用力学 研究所	19年1月 11-12日	68
18ME-S5	非線形波動現象における基礎理論、数値計算および実験のクロスオーバー	東京大学 西成 活裕	及川 正行 46件、94名	筑紫ホール	18年11月 6-8日	72
18ME-S6	水波と浮体の相互干渉に関する力学	大阪大学 高木 健	柏木 正 11件、26名	応用力学 研究所	18年10月 27-28日	80
18ME-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 23件、37名	応用力学 研究所	18年11月 23-25日	84

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
18A0-S1	沿岸海域の低次栄養段階をめぐる物質循環	広島大学 橋本 俊也	柳 哲雄 9件、20名	応用力学 研究所	18年12月 5-6日	149
18A0-S2	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 16件、40名	応用力学 研究所	18年12月 21-22日	153
18A0-S3	有明海の家況と環境	長崎大学 石坂 丞二	柳 哲雄 6件、30名	応用力学 研究所	18年12月 4日	156

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
18FP-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 19件、23名	応用力学 研究所	18年12月 21-22日	243
18FP-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 19件、26名	応用力学 研究所	18年6月 6日	248

共同研究報告（特定研究）

水波と浮体の強非線形相互作用に関する研究

所内責任者 柏木 正

標記特定研究は、平成17年度から公募を開始し2年間で行ってきた。本年度（平成18年度）は下記のテーマについて研究集会・共同研究を実施し、下記のようにそれぞれに成果をあげている。特定研究のテーマとしては今年度で終了するが、水波と浮体の強非線形相互作用に関する研究は継続して行い、共同研究は一般研究として受け入れていく予定である。

18 特 1-1: 移動境界まわりの強非線形流れ解析(研究集会)

研究代表者: 青木尊之(東京工業大学)

船舶海洋工学のみならず、機械工学, 土木工学, 構造工学などの学際的な分野から、主として数値流体力学的手法による計算法, 実験との比較による Validation など多彩な研究発表があった。招待講演を含め海外から3名の参加があり、講演は全て英語で行った。

18 特 1-2: THINC スキームを応用した強非線形スロッシングの数値シミュレーション

研究代表者: 肖 鋒(東京工業大学)

強非線形スロッシング問題では、特に水と空気の境界面の安定で鮮明な追跡が重要であるが、それに関する新しい手法として THINC (Tangent Hyperbola for Interface Capturing) 法がどの程度有効であるかを調べるため、数値計算法のノウハウに関する情報交換を行った。

18 特 1-3: トランザム船尾を有する高速船の耐航性能推定法に関する研究

研究代表者: 岩下英嗣(広島大学)

船速の違いによるトランザム船尾での流れの変化を広範な水槽実験によって計測した。その計測結果をモデル化して非線形境界要素法に反映させる方法について研究した。

18 特 1-4: 海洋巨大波の実態と生因の解明(研究集会)

研究代表者: 富田 宏(海上技術安全研究所)

Freak Wave として知られている海洋巨大波に関する研究最前線について研究集会を開催した。理学的・工学的観点からの講演があり、異分野における最新情報の交換が行われた。

18 特 1-5: 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

研究代表者: 橋本博公(大阪大学)

応用力学研究所で開発した粒子法(MPS法)による計算と実験でアンチローリングタンク内の水の挙動と流体力を求め、それを船の横揺れ運動の解析に組み入れることにより、パラメトリック横揺れの特性とその防止法について研究した。

18 特 1-6: 複合型数値計算法の開発に関する研究

研究代表者: 木原 一(防衛大学校)

粒子法は計算領域が広がると計算時間が膨大となるが、その欠点を克服するために境界要素法との Hybrid Method について基礎的研究を共同で行い、良い見通しを得た。

18 特 1-7: 流体・構造の強非線形連成問題に対する数値解析法の研究

研究代表者: 藤久保昌彦(広島大学)

今後どのような強非線形問題が重要となり、どのような解析手法を適用・開発しなければいけないかについて、最新情報を基に主としてブレインストーミングを行った。

船舶海洋工学分野では今日的な重要研究課題である「水波と浮体の強非線形相互作用」に関する研究を応用力学研究所の特定研究課題として設定し、積極的に推進する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。

(研究集会)

移動境界まわりの強非線形流れ解析

研究代表者

東京工業大学学術国際情報センター

青木 尊之

1. 目的

移動境界と考えられているのは、波浪中での浮体や水中曳航体のように、規則的あるいは不規則に動く物体である。それによって引き起こされる物体まわりの流れ解析や、物体の運動と流れの相互作用に関する問題は、最近の発展が著しい数値流体力学の分野でも難しい研究テーマの一つである。それらに対する新しい解析手法を探り、種々の知見を得るために、同様の研究を行っている多くの分野の研究者が一同に会し、研究成果の議論を行うことが目的である。また、国内だけでなく海外からの参加者も加え、移動境界、界面、強非線形問題、などをキーワードとする研究の国際的情報発信源としての役割を果たすことも重要な目的となっている。

2. 研究集会の開催日時、場所

開催日時：平成18年12月7日(木) 13:15~17:55

12月8日(金) 9:00~15:40

開催場所：九州大学応用力学研究所西館6階多目的交流室(W601号室)

3. 講演プログラムと概要

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

最初に、この研究集会世話人である、応用力学研究所・柏木 正教授より、今回の海外からの招待講演者(Prof. Derek Causon & Dr. Clive Mingham (Manchester Metropolitan University, UK), Dr. Ould A. el Moctar (Germanischer Lloyd, Hamburg, Germany))の紹介、並びに招待講演をお願いするに至った経緯などが披露され、研究集会がスタートした。

Fluid Simulation by Using Multi-Moment Scheme and Conservative Formulation

青木尊之(東京工業大学学術国際情報センター)

通常の数値計算のように格子点上の物理量だけを計算するのではなく、その空間勾配や区間積分値を従属変数として時間発展させて流体方程式を解くIDO (Interpolated Differential Operator) 法を説明し、これを用いた爆発解析、気泡流計算、高解像度台風シミュレーションなどを紹介した。最近の発展として、完全な保存形形式のIDO法について解説し、さまざまな分野での成果が期待できることを述べた。最後に個別要素法と、それを発展させた複雑形状の岩石落下のシミュレーションも紹介した。

Numerical Simulation on Turbulent Transports over Free Interface

山下 晋, 肖 鋒(東京工業大学大学院創造エネルギー専攻)

高橋桂子(海洋研究開発機構地球シミュレータセンター)

気流のシア応力と自由界面との相互作用により発生する風波での高精度な交換物理量評価のために本研究では、高精度且つロバストなCIPマルチモーメント有限体積法に基づく気液二相流計算コードを構築した。本手法の有効性を示すために気液二相流計算における検証計算を行い、自由界面の大変形にも十分に対応で

きる精度を有し、乱流現象解析においても妥当な結果を得ることができることを示した。

Solid-Fluid Interaction Analysis by Full Eulerian Formulation

中尾賢司, 岡澤重信, 藤久保昌彦 (広島大学工学研究科社会環境システム専攻)

これまでの固体・流体連成解析では、固体解析には解析格子が物体の変形に追従するラグランジェ型解法、流体解析には解析格子を空間に固定したオイラー型解法を適用して、それらを組み合わせる手法がほとんどであった。本研究では固体と流体を統一的なオイラー型解法の枠組みで取り扱えるような方法を新たに提案した。そして本研究で開発した解析コードの正当性を、固体解析、流体解析及び固体・流体連成解析において確認した。

Computational Modelling of Free Surface Flows Using a Surface Capturing Cartesian Cut-Cell Method

Derek Causon & Clive Mingham (Manchester Metropolitan University, UK)

Two flow solvers from the MMU AMAZON suite of free surface flow codes will be discussed. The AMAZON-CC model can cope with shallow water problems with arbitrarily complex flow geometries and bed topography. Cartesian cut cells are used to boundary fit and track solid boundaries at rest or in relative motion across a background uniform Cartesian grid. No re-meshing either globally or locally is necessary to accommodate moving boundaries. All that is necessary is to update the points of intersection between any moving boundary elements and the background Cartesian grid for as long as the motion continues. The general two-fluid numerical wave tank (NWT) AMAZON-SC is based on the solution of the incompressible Navier-Stokes equations for a variable density fluid system with a free surface. The computational domain encompasses fully both fluid regions and the free surface is treated as a discontinuity in the density field which is captured automatically, without special provision as part of the numerical solution using a time-accurate artificial compressibility method and high resolution Godunov scheme. Boundaries are fully fitted using the same Cartesian cut cell approach as used in AMAZON-CC. Several tests cases will be used to demonstrate the effectiveness of the methodology. These include wave overtopping and wave inundation of obstacles to the flow; modelling of a near-shore hinged-vane wave energy device; wave interaction with a floating body in a beam sea and slamming of a two-dimensional rigid wedge.

Comparison of Different CIP-Based Interface Capturing Methods for Sloshing Computation

胡 長洪 (九州大学応用力学研究所)

This presentation is about a recent research on comparison of different CIP-based interface capturing methods, which have been implemented in our CFD code named RIAM-CMEN (Research Institute for Applied Mechanics, Computation Method for Extreme Nonlinear hydrodynamics). Emphasis is addressed to the effect of different interface-capturing schemes on the computation quality for a two dimensional violent sloshing problem. Five schemes are investigated: (1) original CIP, (2) CIP with tangent transformation, (3) CIP with linear transformation, (4) CIP-CSL3, and (5) THINC. The free surface compactness, the mass conservation, and the pressures at the tank wall are compared. It is found that the THINC method gives the best results for the discussed sloshing problem.

Numerical Simulation of Flow and Motion of Underwater Vehicle with Mechanical Pectoral Fin Devices

鈴木博善, 加藤直三 (大阪大学大学院船舶海洋工学専攻)

オーバーラッピンググリッド法を援用した胸鰭運動装置付き水中ロボット周りの粘性流れ解析法を開発し、これと水中ロボットの運動方程式を同時に解くことにより、胸鰭付き水中ロボットの運動をシミュレートする方法を示した。これにより、単純な鰭運動(揚力型, 抗力型)で生じる水中ロボットの運動を計算した結果, 計測で得られた運動と, シミュレーション結果は定性的に一致することを示した。

Numerical Prediction of Wave Loads and Ship Structural Response in Heavy Seas Ould A. el Moctar (Germanischer Lloyd, Hamburg, Germany)

The paper presents a numerical procedure based on the combined use of a boundary element method (BEM), a statistical analysis using random process theory, an extended (with rigid body motion module) Reynolds-averaged Navier-Stokes equation (RANSE) solver, and a finite element method (FEM) to obtain the structural response of ships in a seaway. The BEM is used to compute the hydrodynamic database, needed for a statistic/probabilistic long-term analysis of the ship's operation to obtain so-called equivalent regular design waves. The RANSE solver then is applied to obtain ship motions and the corresponding pressure distribution acting on the ship in design wave conditions by solving the nonlinear rigid body equations of motions in the time domain. Wave-induced loads, including impact-related effects caused by slamming and green water on deck, were computed simultaneously. The resulting hydrodynamic pressures were transformed into nodal forces and became part of the input for the FE code. For two large containerships, extreme values of sectional loads for different loading conditions were analyzed. For one ship, the effect of slamming-related hull girder whipping on the stress level was investigated by one-way coupling the extended RANSE solver to the FE code. For a typical critical design wave situation, the whipping effects led to an increase in stresses in the hatch coamings of up to 20 percent.

Numerical Analysis on Dynamics of Pinch-Off in Immiscible Liquid/Liquid Jet Systems

井上 智博, 渡辺 紀徳, 姫野 武洋 (東京大学大学院航空宇宙工学専攻)

液体分裂現象は、様々な分野で重要な役割を果たしている。そこで、界面形状の精緻な捕捉と、良好な体積保存性を有する数値解析手法 CIP-LSM(CIP-based Level Set & Mars)を用いて、界面張力が卓越して液柱が分裂に至る Pinch-Off を計算した。実験結果との比較を行い、CIP-LSM が Pinch-Off を概ね再現できることを確認した。また、液柱内部構造の形成機序を明らかにし、液柱内部構造と界面形状が密接に関連することを示した。

Liquefaction Analysis by Numerical Simulation Based on Fluid-Particle Interaction

森口周二 (東京工業大学原子炉工学研究所)

青木尊之 (東京工業大学学術国際情報センター)

液状化地盤の挙動シミュレーションを目的とした粒子-流体系連成解析を紹介した。土粒子の挙動は DEM、間隙水の挙動は CFD により解き、Immersed Boundary Method (IBM) により流体と粒子の相互作用を表現することにより、全体として液状化地盤の挙動の再現を試みている。実地盤を対象とした大規模計算のための計算コードの改良および実現象との比較が今後の研究課題である。

Numerical Simulation Method for Free Surface Flows Using the Boltzmann Equation

西 佳樹 (九州大学応用力学研究所)

This study develops a new numerical method for the simulation of free surface flows in ocean engineering problems using the Lattice Boltzmann equation, since this method has a good potential to provide a simulation work more comfortably in practical uses compared to some previous methods using the Navier-Stokes equation. The schemes for the capturing of free surface, the incorporation of a moving solid body, and dynamic boundary condition on the free surface have been formulated based on the kinetics of fluid molecules. Several 2-D preliminary computations (the deformation of water mass, forced oscillation of a body in a numerical wave tank, and propulsion of a body near the free surface) have been conducted, and show that this method can reproduce these phenomena at least qualitatively. The quantitative validation of this method will be performed in the future.

Momentum Conservative Sharp Interface Cartesian Grid Method for Free-surface Flow

滝沢研二 (海上技術安全研究所)

近年、CFDによる自由界面問題は発展してきており様々な問題に適応されている。一方で、高レイノルズ数での計算は未だ精度が出ていない。そこで、高レイノルズ数流れを考慮して、保存形 IDO 法をベースとする自由界面付き流れの計算法を開発している。自由界面付き計算では、GFM のような非保存形モデルが主流であるが、本手法では運動量保存則に基づき、境界条件を与える手法を提案している。計算例として、4 次ストークス

波を初期条件とし、剛体伝播から、変形、碎波現象までを行った。

A Computing Method for the Flow Analysis around a Prismatic Planing-Hull

木原 一 (防衛大学校 機械システム工学科)

水面上を航走する滑走艇がつくる自由表面流れのシミュレーション法として、境界要素法を用いた MEL (Mixed Eulerian Lagrangian) 法による研究例を紹介した。特にチャイン部からの液体剥離やスプレーにいたる液体分離に関する数値計算モデルを適用し、物体近傍において自由表面が大変形するような非線形問題に対する解析法としての有効性を検討したものである。

CFD Simulation of Resistance and Seakeeping Performance for Multi-Hull Vessels

佐藤陽平 (海上技術安全研究所)

多胴船型の抵抗性能と耐航性能を推定可能な CFD シミュレーション法について発表された。抵抗性能のシミュレーションにおいては、抵抗値と姿勢(トリムとシンケージ)の計算結果が水槽試験結果と比較され、両者が高い精度で一致することが確認された。耐航性能においては、単胴船型、双胴船型および三胴船型について4自由度の船体運動の計算が行われ、シミュレータの有効性が示された。

CFD Simulation of Diffraction Flow Fields about a Blunt Ship in Oblique Waves

折原秀夫 (ユニバーサル造船(株)技術研究所)

CFD simulations have been carried out of flows about a blunt ship advancing in regular oblique waves. Unsteady RANS code called WISDAM-X is employed. This method employs an overlapping grid system to implement rigorous wave generation, the interactions of ships with incident waves, and the resultant ship motions. The motion of the ship is simultaneously solved by combining the solution of ship's rigid motion with the solution of the flow about the ship. The characteristics of diffraction waves in the vicinity of a full ship with a blunt hull form advancing in deep water are studied numerically. The computed results show that the features of diffracted waves vary significantly with the wave-incident angle and that the hull surface pressures due to the wave diffraction increases in the case of head waves. The effect of diffraction of incident waves on added resistance is also discussed.

4. おわりに

今年度も昨年度に引き続き、多くの分野で関連の深い「移動境界まわりの強非線形流れ解析」を取り上げ、種々の研究テーマや解析手法に関して知見を深め、情報交換をするためにこの研究集会を国際研究集会として企画した。今回の講演会でも「数値流体力学」を共通のキーワードとしていろいろな分野における最新の研究成果を聞くことができ、学際的な研究の発展が強く実感できた。特に、数値計算法の中に強非線形現象に対して有効と考えられている「CIP 法」に関して、いくつかの論文が発表され、集中した議論・理解ができた。さらに、特別招待講演として、東京工業大学の青木尊之教授、イギリス Manchester Metropolitan University、ドイツ Germanischer Lloyd の Ould A. el Moctar 博士から最新の研究成果をじっくり聞くことができた。今回も外国からの研究者が参加していたため、すべての講演・議論を英語で行った。この研究集会がすでに有意義な国際研究集会として認知されていることを確信した。

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

プログラム

期 日： 2006（平成18）年12月7日（木）、8日（金）

場 所： 九州大学応用力学研究所西館6階W601号室

12月7日（木）

- 13:10～13:20 代表者挨拶
青木尊之（東京工業大学学術国際情報センター）
- 13:20～14:20 基調講演：
Fluid Simulation by Using Multi-Moment Scheme and Conservative Formulation
青木尊之（東京工業大学学術国際情報センター）
- 14:20～14:55 **Numerical Simulation on Turbulent Transports over Free Interface**
山下 晋， 肖 鋒（東京工業大学大学院創造エネルギー専攻）
高橋桂子（海洋研究開発機構地球シミュレータセンター）
- 14:55～15:30 **Solid-Fluid Interaction Analysis by Full Eulerian Formulation**
中尾賢司， 岡澤重信， 藤久保昌彦（広島大学工学研究科社会環境システム専攻）
- （休 憩）
- 15:45～16:45 招待講演：
Computational Modelling of Free Surface Flows Using a Surface Capturing Cartesian Cut-Cell Method
Derek Causon, Clive Mingham (Manchester Metropolitan University, UK)
- 16:45～17:20 **Comparison of Different CIP-Based Interface Capturing Methods for Sloshing Computation**
胡 長洪（九州大学応用力学研究所）
- 17:20～17:55 **Numerical Simulation of Flow and Motion of Underwater Vehicle with Mechanical Pectoral Fin Devices**
鈴木博善， 加藤直三（大阪大学大学院船舶海洋工学専攻）

（懇 親 会）

12月8日(金)

9:00~10:00 招待講演：
Numerical Prediction of Wave Loads and Ship Structural Response in Heavy Seas
Ould A. el Moctar (Germanischer Lloyd, Hamburg, Germany)

10:00~10:35 Numerical Analysis on Dynamics of Pinch-Off in Immiscible Liquid/Liquid Jet Systems
井上 智博, 渡辺 紀徳, 姫野 武洋 (東京大学大学院航空宇宙工学専攻)

(休憩)

10:50~11:25 Liquefaction Analysis by Numerical Simulation Based on Fluid-Particle Interaction
森口周二 (東京工業大学原子炉工学研究所)
青木尊之 (東京工業大学学術国際情報センター)

11:25~12:00 Numerical Simulation Method for Free Surface Flows Using the Boltzmann Equation
西 佳樹 (九州大学応用力学研究所)

(昼食)

13:15~13:50 Momentum Conservative Sharp Interface Cartesian Grid Method for Free-surface Flow
滝沢研二 (海上技術安全研究所)

13:50~14:25 A Computing Method for the Flow Analysis around a Prismatic Planing-Hull
木原 一 (防衛大学校 機械システム工学科)

14:25~15:00 CFD Simulation of Resistance and Seakeeping Performance for Multi-Hull Vessels
佐藤陽平 (海上技術安全研究所CFD研究開発センター)

15:00~15:35 CFD Simulation of Diffraction Flow Fields about a Blunt Ship in Oblique Waves
折原秀夫 (ユニバーサル造船(株)技術研究所)

15:35~15:40 閉会の挨拶
柏木 正 (九州大学応用力学研究所)

THINC スキームを応用した強非線形スロッシングの数値シミュレーション

東京工業大学・大学院総合理工学研究科 肖 鋒

研究目的

液化ガス運搬船が波浪中を航行する場合、部分的に満たされたタンク内の液体が船の動揺によって激しいスロッシングを起こし、タンクの側壁や天井に高い衝撃圧力が発生する。場合によっては、この衝撃圧力によってタンクに損傷を起こすことがある。したがって、スロッシングによって発生する衝撃圧力に関する正確な予測は液化ガス運搬船の設計において非常に重要である。激しいスロッシング現象は強非線形な流体力学の問題であり、自由表面の砕波、空気巻き込み、壁への液体の衝突など非常に複雑な現象を伴うため、このような現象を数値シミュレーションする際現存の数値計算法（VOF 法、MAC 法など）では、大変形・砕波する自由表面の処理にまた問題が多くあり、よりロバストで、高精度な自由表面処理方法の開発が必要である。本研究では、研究代表者が開発された THINC (tangent of hyperbola for interface capturing) 方法を応用してこの強非線形スロッシング現象のシミュレーションを行い、THINC 法の強非線形スロッシングへの有効性を検証する。

THINC 法概要

THINC 法は非圧縮性自由表面流体の界面捕捉スキームである。密度関数については各計算セル内の積分平均値（ここで簡単にセル平均値と言う）を使用し、時間積分は有限体積法により行われるからスキームの保存性が保証される。自由表面の捕捉にはセル平均密度関数が使われるため、流体の体積（質量）が保存される。また、セル境界を通過する流量の計算には Semi-Lagrangian 方法を採用し、界面の数値拡散を抑えることができる。非圧縮性流の場合はこのセル平均密度関数は VOF (Volume Of Fluid) 関数と同じ物理意味を持っている。密度関数は自由表面以外のところに 1 か 0 の値を持っており、自由表面において、0 から 1 まで急激に変化する特徴は、双曲正接関数 (hyperbolic tangent function) の性質に似ていることから、THINC 法の開発動機となった。式 (1) は 1 次元の場合にセル $[x_{i-1/2}, x_{i+1/2}]$ 内の密度関数 ϕ の分布を表す双曲正接関数の例である。

$$F_i(x) = \frac{\alpha}{2} \left\{ 1 + \gamma \tanh \left[\beta \left(\frac{x - x_{i-1/2}}{\Delta x_i} - \delta \right) \right] \right\} \quad (1)$$

式には 4 つのパラメータ、 α 、 β 、 γ と δ があり、それぞれ適切な方法で決められる。

本研究ではこの THINC 法を界面捕捉法として応用力学研究所で開発された強非線形流体現象の CFD コード RIAM-CMEN (Research Institute for Applied Mechanics, Computational Method for Extremely Nonlinear hydrodynamics) に組み込んで、強非線形スロッシングの数値計算を行う。

数値シミュレーション結果

数値計算は応力研で行ったタンクスロッシングの実験に対応するものである。矩形タンクの寸法は Fig.1 のように $60\text{cm} \times 30\text{cm} \times 10\text{cm}$ であり、静止水位 $h=12\text{cm}$ の水が満たされている。 $P_1 \sim P_3$ は圧

力の計測位置である。タンクは強制動揺装置で左右に $x = A \sin(2\pi t/T)$ になるように振動させる。本計算では、 $A = 5 \text{ cm}$ 、 $T = 1.0 \text{ s}$ のケースに対して行った。数値計算には二つの等間隔格子を使用した。格子数はそれぞれ fine mesh: $200 \times 100 \times 40$ と coarse mesh: $100 \times 50 \times 20$ である。

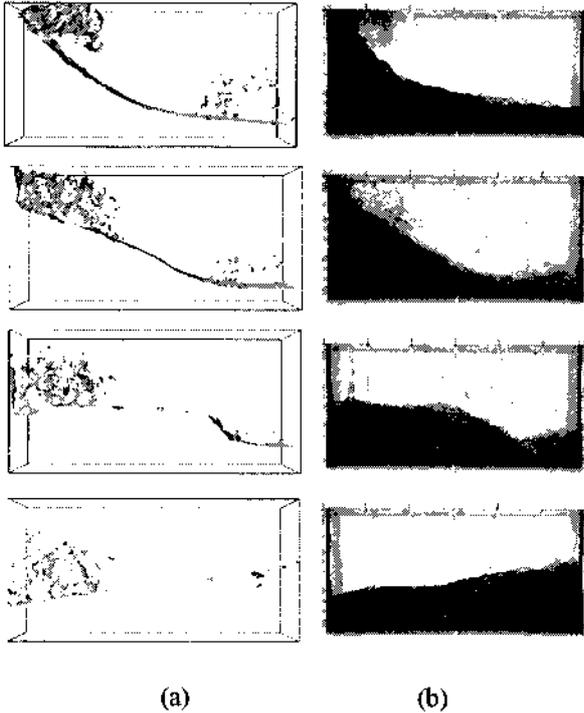


Fig.2 Comparison of free surface profiles for $h = 12 \text{ cm}$, $T = 1.00 \text{ s}$. (a) Computation, (b) Experiment

に形成された液滴も再現できている。計算は安定で、タンク内の水の質量保存は完璧であることを確認した。Fig.3 には格子の解像度の影響について調べるために、fine mesh と coarse mesh により計算した自由表面を比較している。自由表面の形状については殆ど同じであるが、fine mesh ではより細かい液滴が再現できる。

結論と今後の課題

THINC 法を用いた液化ガス運搬船のタンク内スロッシングによる衝撃圧力の定量的推定法の開発はまだ進行中である。今回の共同研究により、THINC 法が界面捕捉法として強非線形スロッシングの数値計算に有望であることが分った。今後の課題として、並列化計算による数値計算の高速化と更なる解像度の向上、より複雑なタンク形状に対する計算とその検証などを行う予定である。

今回の共同研究の成果について応力研側との共著論文として、国際会議等に投稿する予定である。

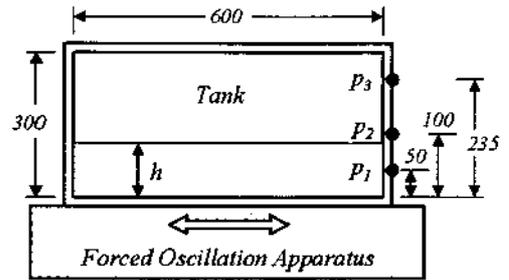


Fig.1 Schematic view of tank sloshing experiment

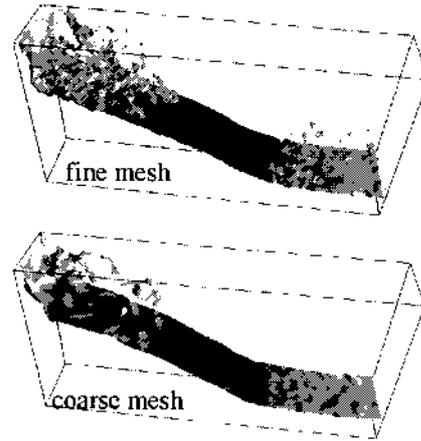


Fig.3 Computed free surface profile by different grids

Fig.2 は、自由表面の時間的変化に関する計算結果と高速ビデオカメラで撮影されたスナップショットの比較である。この計算結果は fine mesh を用いたものである。自由表面の変化は概ね一致しており、自由表面がタンクの天井に衝突した後

特定研究1「水波と浮体の強非線形相互作用に関する研究」の副課題として トランザム船尾を有する高速船の耐航性能推定法に関する研究

広島大学大学院工学研究科
助教授 岩下 英嗣

1. 研究目的

今回の特定研究課題にある「水波と浮体の強非線形相互作用」に関連する実際の問題として、波浪中を高速航走する船舶の耐航性能理論推定法に関わる問題がある。高速船の場合、トランザム船尾を有するため、その近傍の流場は非常に非線形性の高い部分となる。理想流体を仮定する実用的な理論推定法によってそうした問題を扱う場合には、トランザム近傍の流場に関して何らかのモデル化を導入する必要があるが、その適切な方法はまだ確立されていない。

本研究では、トランザム船尾を有する高速船の水槽曳航試験を実施し、船体運動および船尾近傍の波形データを取得した上、トランザム部の理論面での扱いについて検討を行う。それに基づいた数値計算を実施し、実験結果との比較を通してその妥当性を検証する。これらを通じてトランザム船尾の実用的な理論計算上での取り扱い方を提案することを目的としている。

2. 研究方法

トランザムスターンを有する高速船の模型実験と理論数値計算をベースに次の手順により研究を遂行する。

- (1) 1.5m 供試模型を製作し、深海機器力学実験水槽において、船体運動計測試験および波形計測試験を行い、非線形運動および船尾部に着目した非定常波を計測する。
- (2) 取得データを解析し、非線形性の特性についてまとめるとともにトランザム船尾の理論解析上の扱いについて検討する。
- (3) 非線形問題を扱える理論推定法として当方の開発したランキンパネル法を適用し、トランザム部の流場のモデル化を組み込んだ数値計算を実施して、その結果を実験結果と比較することにより推定法の妥当性や問題点等について考察する。
- (4) 一連の研究を総括する。

3. 研究組織

本研究は下記のような組織で行った。

氏名	所属	職名	役割・担当
岩下 英嗣	広島大学大学院工学研究科地球環境工学講座	助教授	代表者
渡部 雅晃	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	広島大学第四類生産基盤工学課程	4年	実験補助
日下 綾美	広島大学第四類生産基盤工学課程	4年	実験補助
芋野 亮介	広島大学第四類生産基盤工学課程	4年	実験補助
山下 芳郎	広島大学第四類生産基盤工学課程	4年	実験補助
延広 隆行	広島大学第四類生産基盤工学課程	4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

- (1) 斎藤宏幸, 伊東章雄, 岩下英嗣: 高速多胴船の波浪中応答解析, 第2回推進性能・運動性能合同研究会, 10月13日(2006)

5. 研究結果

5.1 理論計算

ポテンシャル理論をベースに船体が波浪中で非定常な動揺をする際に、トランザム船尾に適用するための条件式を導出し、ランキンパネル法による計算プログラムを開発した。本理論計算法の妥当性を検証するために水槽試験を実施し、特に船体運動に着目して比較を行なっている。

5.2 供試模型

本研究で対象とした三胴船を Fig. 1 に示す。三胴船の主船体 ($L = 4\text{m}$) を Series-64 船型をベースとする形状とし、船尾は高速域航行のためトランサム形状とした。副船体であるアウトリガーには、対象翼型の形状を用い、その大きさは主船体の排水量の 1% および 3% 相当の二種類としている。



Fig. 1 Trimaran model (1% ∇ outrigger and 3% ∇ outrigger)

5.3 アウトリガー配置

主船体に対するアウトリガーの配置位置は、まずは造波抵抗の観点から非常に重要である。本稿で報告する耐航性能の検討に先立ち、その配置に関しては、アウトリガーの長さ、船長方向および船幅方向の配置位置について実験をベースに検討を重ね、いくつかの候補を抽出した後、本稿に示す以下の耐航性能の検討を行なっている。

検討するアウトリガーの配置を Fig. 2 に示す。主船体排水量比 1% の場合、船長方向の配置位置を $X/L_{pp} = 0.1$ とした。X は主船体の A.P. からアウトリガーと中央までの距離を意味し、 $X/L_{pp} = 0.1$ の配置で主船体とアウトリガーの A.P. が並ぶことになる。このときのアウトリガーの船幅方向位置は $Y/B = 0.5$ としている。Y は主船体側面からアウトリガー側面までの距離を表す。以後、このアウトリガー配置を Trimaran-1 と呼ぶ。

主船体排水量比 3% の場合は、船幅方向配置を $Y/B = 1.0$ とし、船長方向には $X/L_{pp} = 0, 0.5$ の二種類の場合を検討している。 $X/L_{pp} = 0$ のアウトリガー配置を Trimaran-2-aft、 $X/L_{pp} = 0.5$ を Trimaran-2-mid と呼ぶことにする。なお、アウトリガーのない主船体だけの状態を Monohull と称する。

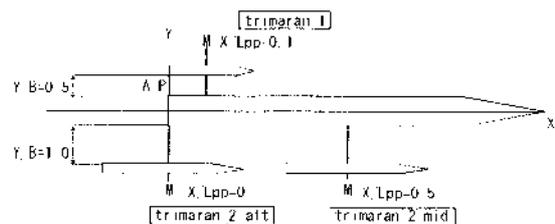


Fig. 2 Arrangements of outriggers

5.4 試験条件

理論計算法検証の目的も含めて、まず供試模型 Trimaran-1 の正面規則波中試験を実施した。計測項目は heave 運動、pitch 運動、および主船体の船底圧力（船長方向7点）であり、船速は $F_n = 0.76$ とした。続いて、アウトリガーの配置影響を検討するために、供試模型 Trimaran-2-aft および Trimaran-2-mid の正面規則波中試験を実施し、 $F_n = 0.69$ にて heave 運動、pitch 運動を計測している。

5.5 計算結果と実験結果の比較

Trimaran-1 供試模型に対し、実験状態と同じ $F_n = 0.76$, $\chi = 180$ degs. の条件でランキンパネル法 (RPM) による計算とストリップ法 (NSM) による計算を行なった。Fig. 3 に RPM で使用した要素分割を示している。主船体の分割数は、 x 方向、 y 方向に 75×20 、アウトリガーは 31×21 、自由表面は 156×26 としている。RPM による計算については、定常攪乱影響の取り入れ方等を変えた以下の3種類の計算を実施して実験結果と比較している。

- 1) RPM-1：自由表面条件式において $\Phi = -x$ として計算。いわゆる一様流近似。トランサム条件なし。
- 2) RPM-2：二重模型流れベースの計算。トランサム条件なし。
- 3) RPM-3：RPM-2 に2節に記したトランサム条件を付加。

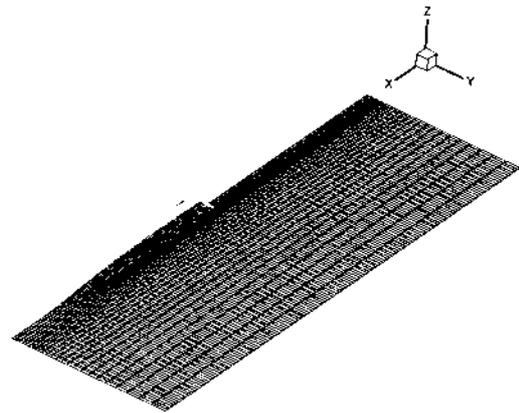


Fig. 3 Computation grids of trimaran-1 for RPM

Fig. 4 は Trimaran-1 に対する heave 運動振幅、pitch 運動振幅の計算と実験の結果を示したものである。図中、ストリップ法および RPM-1, RPM-2, RPM-3 の結果はアウトリガーを無視した主船体のみに対する計算結果を示している。ストリップ法は運動の同調点の位置が実験結果と比べてズレるなど不具合が見られるのに対し、RPM の結果は実験結果と良い一致を示していると言える。3種類のRPMの結果を実験と比較すると、定常攪乱の影響を考慮した方が、またそれに加えてトランサム条件を付加した方が実験結果とより良い一致を示すことが明瞭に現れている。

まず、RPM-1 と RPM-2 の結果から、二重模型流れベースの計算の方が実験結果を良く説明していることが分かる。前述のように、二重模型流れの定式化は定常問題においては低速を仮定した理論であるが、非定常問題においては今回のような $F_n = 0.76$ というかなりの高速域であっても、一様流近似と比べて二重模型流れの影響を取り入れた方が波浪中運動等の推定精度が向上することが示されたことになる。また、RPM-2 と RPM-3 の結果を実験と比べると、トランサム条件の付加により推定精度がかなり向上することが分かる。更に、RPM-3 と、アウトリガーを考慮した結果である RPM-3 trimaran-1 とを比較すると、その相違は顕著でない。Trimaran-1 船型のアウトリガー配置に対してはアウトリガーと主船体との干渉が、少なくとも運動振幅のレベルで評価したときに小さいことを示している。特に pitch 運動に関しても相違が小さかったことは、アウトリガーの主船体に対する排水量が小さかったためと考察されよう。

Fig. 5 に、Trimaran-1 に対する RPM-3 およびストリップ法による主船体船底圧力の計算結果を実験結果と比較して示している。RPM による圧力分布は、おおむね実験結果を説明している。 $\lambda/L = 1.5$ の運動の同調点付近において船首尾での圧力の計算値と実験値との差が大きいが、これは船体運動が大きいことによる非線形影響と考えられる。こうした波長域でも船体中央近傍での RPM と実験の合致度は良好で、その積分量を介して算定される運動の結果も、先に示したように良好であったものと思われる。

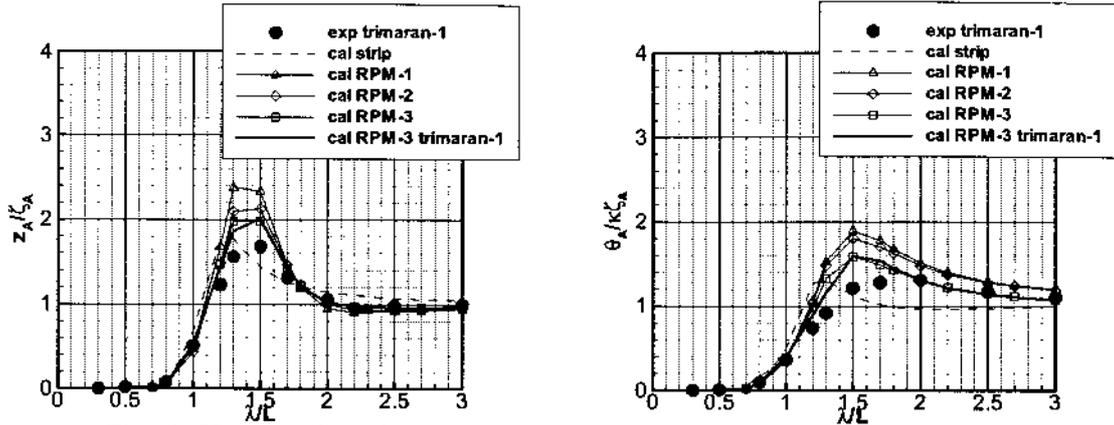


Fig. 4: Heave and pitch motions of Trimaran-1 at $F_n = 0.76$, $\chi = 180$ degs.

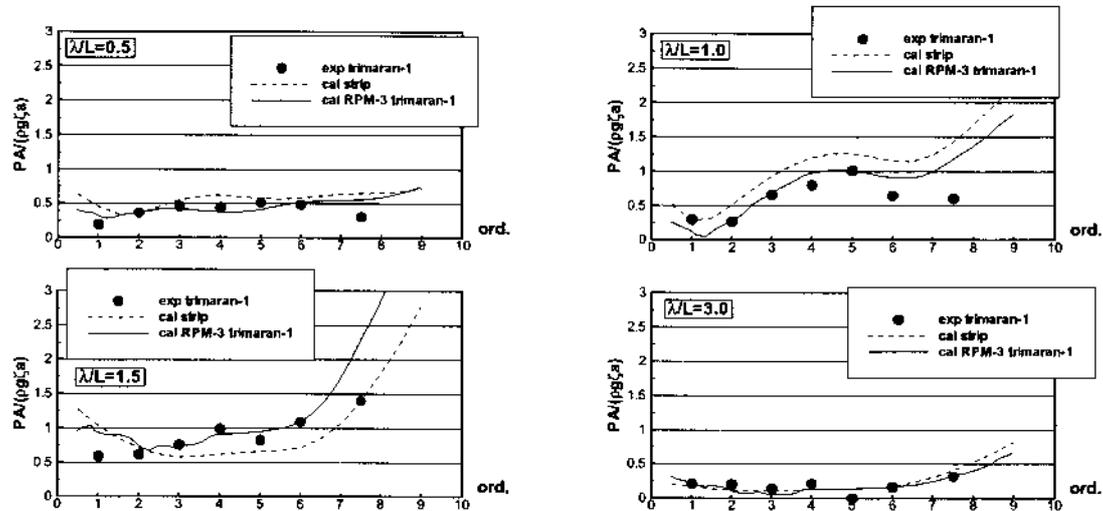


Fig. 5: Unsteady pressure distributions on hull bottom of Trimaran-1 at $F_n = 0.76$, $\chi = 180$ degs.

5.6 アウトリガー配置による影響

Trimaran-2-aft, Trimaran-2-mid について RPM-3 による数値計算を行い、アウトリガーの配置位置について検討を行なってみた結果を Fig. 6 に示している。実験に使用した供試模型の大きさに対して治具が大きく、慣動半径や重心高さなどが設計上想定したものと大分異なってしまったが、数値計算内で同じ値を用いることで実験に対応した計算を行なっている。計算結果は、heave の同調点付近で僅かながら実験値との相違は見られものの、全体的には実験との合致は良好である。

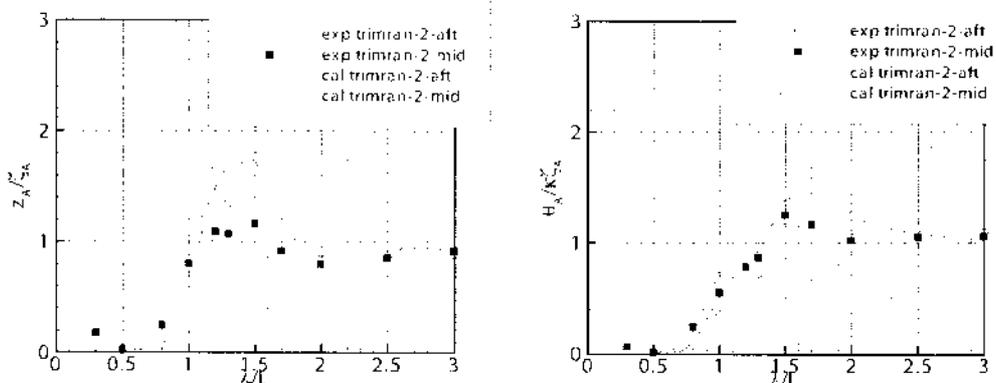


Fig. 6 Comparison of heave and pitch motions among three hull-forms at $F_n = 0.69$, $\chi = 180$ degs. (computed with experimental conditions)

6. まとめ

トランザム船尾を有する高速船の造波問題を理論的に扱いための船尾条件を提案し、ランキンパネル法による計算プログラムを開発した。その検証のために多胴船を含めた各種高速船の水槽実験を実施し、提案した理論計算法による結果との比較を通じて検証を行なった。多胴船に関してはアウトリガーの配置影響等についても船体運動の観点から議論している。ここで得られた結論をまとめると次のようになる。

- (1) 本理論計算法は、ストリップ法と比べ実験結果を良く説明している。また、推定精度を高めるためには、自由表面条件として二重模型流れを用いると同時にトランサム条件として本稿で提案するものを適用することが有効であることが分かった。
- (2) 本計算法は、アウトリガーの配置を変更した場合の試験結果を良く説明しており、多胴船の計算に有効であることを示した。
- (3) アウトリガーの位置によるシリーズ計算では、アウトリガーを後方に配置した場合に船体動揺が小さくなることが示された。

(研究集会)

海洋巨大波の実態と成因の解明

研究代表者

海上技術安全研究所

富田 宏

目 的

最近、従来の設計基準では想定されていなかった巨大な波が船舶や海洋構造物に大きな被害をもたらすことが認識されてきた。これらは freak wave あるいは rogue wave と呼ばれ、長い間船乗りの伝説としては語り伝えられていたものであるが、目撃情報や観測データなどの集積によって、最近になって研究者の注目を引くようになったのである。このような巨大波の実態や生成機構を理解することは船舶や海洋構造物を設計する上で極めて重要である。freak wave は深海域でも浅海域でも起こるといわれており、また様々な生成機構が提案されている。わが国でもいくつかのグループが異なる観点・手法で freak wave の研究に取り組んでいる。これらのグループの成果・情報を交換することは互いの研究の発展に対して極めて有意義と考えられる。そのため、昨年度に引き続いて「海洋巨大波の実態と成因の解明」という題目及び上記のような組織で小規模な研究集会を開催することを提案する。また、この研究計画は、特定研究「水波と浮体の強非線形相互作用に関する研究」のサブテーマとして最適であると考えられる。

研究集会の日時・場所

日時：2007年3月9日（金）・10日（土）

場所：九州大学応用力学研究所 W601(多目的研究交流室)

プログラム

3月9日（金）

13:00-13:05 開会の挨拶

富田 宏（海上技術安全研究所）

13:05-14:05 海洋波研究における狭帯域仮定の有効性の数値的検証

田中 光宏（岐阜大・工）

14:05-15:05 Freak wave 予測のための2, 3の検討

森 信人（大阪市大・工）

15:20-16:05 WAVE GROUP 中の浮体の挙動と安全性

影本 浩（東京大・工）

16:05-16:50 水面孤立波の横方向不安定性

片岡 武（神戸大・工）

- 16:50-17:35 **マイクロ波レーダによる平塚沖波浪観測**
林 昌奎 (東京大・生産研)
- 17:35-18:20 **Analysis of observed wave data to investigate of characteristics of freak waves**
Seung-Ho SHIN, Keyyong Hong (KORDI, Korea)

3月10日(土)

- 9:00-9:45 **Structural and Motion Responses on Large Container Ships in FreakWaves**
石 江水, 早稲田 卓爾, 鈴木 克幸 (東京大・工)
木下 健 (東京大・生産研)
- 9:45-10:30 **実海域波浪データの統計解析 (北海におけるフリーク波)**
富田 宏 (海上技術安全研究所), 早稲田 卓爾 (東京大・工)
- 10:45-11:30 **フリーク波の生成理論の現状と問題**
富田 宏 (海上技術安全研究所)
- 11:30-12:30 **不規則波列の非線形発達における方向性と砕波の影響**
早稲田 卓爾 (東京大・工)
- 13:30-14:15 **GISを利用した航行支援情報提供フレームワークの開発**
稗方 和夫, 大和 裕幸 (東京大・工)
- 14:15-15:00 **地形の影響を受ける浅水孤立波の二次元相互作用**
辻 英一, 及川 正行 (九州大・応力研)
- 15:00-15:05 **閉会の挨拶**
及川 正行 (九州大・応力研)

講演概要

海洋波研究における狭帯域仮定の有効性の数値的検証

田中光宏：岐阜大学工学部数理デザイン工学科

近年、分散性をより高次まで取り込んだ修正非線形シュレーディンガー方程式 (mNLS) に基づく海洋波の研究が盛んに行われ、JONSWAP スペクトルなど現実的なスペクトルを有するような状況にまでその適用範囲を広げている (例えば Socquet-Juglard et al. JFM(2005)). 同一条件の波動場を対象にして、狭帯域仮説とは無縁の直接シミュレーションを遂行することにより、現実的スペクトルを有する波動場に対する mNLS 方程式の適用可能性を検証する。

Freak wave 予測のための 2, 3 の検討

森 信人：大阪市立大学大学院 工学研究科 都市系専攻

ヨーロッパ中期気象予報センターでは Operational Model に Freak Wave 予測システムを導入しようとしている。本研究では、現在用いられている狭帯方向スペクトルモデルを適用した Freak Wave 予測結果の検証例を紹介すると共に、Freak Wave 予

測に必要な 1) 多方向性の影響 (2D-NLS Eq.), 2) 有限のデータ数による線形的な統計変動の影響に関するの検討結果について講演する.

WAVE GROUP 中の浮体の挙動と安全性

影本 浩：東京大学大学院 工学系研究科

浮体にとって 1 発大波 (Freak Wave) よりも, 比較的大きな波高を持つ中程度の波が数波連続して押し寄せる Wave Group 中の方が危険な状態に陥る場合もあると考えられる. 本講演はこのような Wave Group 中の浮体の挙動と安全性について論じる.

水面孤立波の横方向不安定性

片岡 武：神戸大学

水面孤立波の横方向安定性を Euler 方程式系を基に調べた結果を報告する. 水面孤立波は, その最大波高が水深の 0.781 倍よりも小さいときに, 進行方向に安定 (孤立波の進行方向のみに依る攪乱に対して安定) であるが, 0.713 倍よりも大きいと, 横方向に不安定 (孤立波の峰方向にも依る攪乱に対しては不安定) であることを理論的に示す. さらに数値計算による線形安定性解析および横方向攪乱を受けた孤立波の時間発展数値シミュレーションをおこなった結果も合わせて示す.

マイクロ波レーダによる平塚沖波浪観測

林 昌奎：東京大学 生産技術研究所

X-バンド連続波マイクロ波レーダを用いて相模湾平塚沖にて行った波浪観測例を示す. マイクロ波レーダは海面におけるマイクロ波の照射幅より短い波長の水面波をフィルタリングする働きがあるため, 空中式超音波波高計で計測した波浪に比べて波長の短い水面波成分が少ない. そのため, 観測波高においてはレーダ観測値と空中式超音波波高計値との間には非常に良い相関を示しているが, 風波成分が卓越する波浪分布の場合の平均波の波周期の相関が良くない. 連続波マイクロ波レーダによる海洋波浪観測は, 比較的波長の長いうねり成分の波浪観測に適している.

Analysis of observed wave data to investigate of characteristics of freak waves

Seung-Ho SHIN, Keyong Hong：韓国海洋研究院 海洋システム安全研究所

This study is carried out the investigation of nonlinear characteristics of the ocean based on the field wave observation data acquired the western sea area in Jeju island during one year. It is aimed to offer the fundamental data for Freak wave forecasting in real sea. For this, the nonlinearity parameters of ocean waves, which are Skewness, Atiltness, Kurtosis and Spectrum band width parameter, are introduced, and the parameters are compared and discussed with some characteristic wave components, ie, significant wave height, maximum wave height, and so on.

Structural and motion responses on large container ships in freak waves

石 江水, 早稲田卓爾, 鈴木克幸, 木下 健

石 江水, 早稲田卓爾, 鈴木克幸: 東京大学大学院 工学系研究科

木下 健: 東京大学生産技術研究所

Freak waves are extraordinary larger water waves with potentially devastating effects on ships as well as offshore structures. The recent remote sensing data shows that freak waves occur more often than it had ever been thought. From 1969 to 1994 twenty-two super-carriers were lost due to collisions with freak waves in the Pacific and Atlantic Oceans causing 525 fatalities. Hence, it is of great importance to understand wave impact load on ship hulls subjected to abnormal waves and corresponding structural and motion responses so as to enhance the safety of ships and offshore structures. Freak or rogue waves can be generated by different mechanisms and there is not a clear criterion to identify such a wave. In the present research, taking linear dispersive focusing and Benjamin-Feir instability as possible freak wave generation mechanisms, linear dispersive focusing waves and unstable waves were generated in the laboratory wave tank. Before that, a series of regular waves were made to validate and verify our experimental instrumentation. Then the seakeeping tests were carried out in such freak and regular waves using a full elastic container ship model made of urethane foam whose scaling ratio is 1:141.9. Furthermore, the influences of the freak wave parameters such as wave height and wave length on wave loads and ship motion are systematically investigated. At the same time, the numerical simulation based on time domain strip theory code is also performed to verify the experiment. Finally the effect of whipping responses on the longitudinal strength of the hull is examined using FEM. The objective of this research is to explore the possibility of using rogue or freak waves as additional wave load conditions to be considered in the design of ship and offshore structures.

実海域波浪データの統計解析 (北海におけるフリーク波)

富田 宏, 早稲田卓爾

富田 宏: 海上技術安全研究所

早稲田卓爾: 東京大学大学院 工学系研究科

北海北部海域に設置されたノルウェーの観測点 Kvitebjorn における 2003 年から 2005 年にわたる荒天時波浪・風速・風向観測データを解析して、実海域におけるフリーク波を含む大波高波の長期にわたる性質を調べた。極めて典型的な孤立型フリーク波の存在を確認したが、20 分毎のレコードに分割して解析する限りは有義波高に対する BFI インデックスや高次統計量 (クルトシス) の相関は非常に低かった。

フリーク波の生成理論の現状と問題

富田 宏: 海上技術安全研究所

フリーク波の生成機構についての理論的研究は今世紀に入ってから急速に進み, Benjamin-

Feir 不安定, NLS 方程式のプリザーブド解, 逆散乱スペクトル問題 (IST), 非ガウス過程における 4 波相互作用理論からの時間-空間統計量の関係の導出等 2, 3 の理論体系に絞り込まれている. ここではこれらのコンセプト間の関係について整理し, さらにこれらの 1 次元理論の隘路としてここ 1, 2 年再浮上してきた波浪の方向分散について議論する.

不規則波列の非線形発達における方向性と砕波の影響

早稲田卓爾: 東京大学大学院 工学系研究科

フリーク波の発生確率は, いまのところ, 与えられた方向スペクトルを持つ不規則波列における波高の確率密度分布に, 弱い非線形性の効果をどのように考慮すべきかということで, いくつかの理論が提唱されている. これまでに, 束縛波 (Bound Wave) の存在, 非共鳴相互作用 (Benjamin-Feir 不安定) の影響が, 弱非線形理論, もしくは保存系の非線形数値計算で検討された. この発表では, 東大生研海洋工学水槽 (木下研・林研) で行った, 方向性を考慮した不規則波実験の結果から, 強い非線形性 (砕波) と方向分散性が波浪の発達に及ぼす影響を明らかにする. 方向分散性が大きくなると非共鳴相互作用が弱くなり異常波発生確率が急速に減ることがわかった. また, 砕波の影響でスペクトルは 4 波共鳴による非線形伝達による発達よりも, はるかに早い速度でダウンシフトし, 波浪の岨度, スペクトルバンド幅双方が波浪の発達とともに変化することがわかった. この結果は, 既存の方向性を考慮しない理論, 砕波の影響を考慮しない実験結果の解釈に新たな視点を与えるとともに, 海洋波の発達において, 4 波共鳴と砕波を伴う非共鳴相互作用とのどちらが本質的であるかという根源的な疑問を投げかける.

GIS を利用した航行支援情報提供フレームワークの開発

稗方和夫, 大和裕幸

稗方和夫: 東京大学 工学系研究科 環境海洋工学専攻 大和裕幸: 東京大学 新領域創成科学研究科 人間環境学専攻

OPeNDAP (Open-source Project for a Network Data Access Protocol) というインターネットを介して海洋や気象データを流通させる仕組みの普及により, 研究用途のデータの一般公開が進んでいる. OPeNDAP 形式のデータを GIS 形式に変換し, 航海中の船舶の航路計画に利用可能な可読性の高い形式で提供可能なフレームワークを提案する. また, 複数のデータソースから提供されるデータを GIS に統合・可視化するシステムのプロトタイプを開発し, その有効性, 実現可能性について検討する.

地形の影響を受ける浅水孤立波の二次元相互作用

辻 英一, 及川正行: 九州大学応用力学研究所

地形効果によって, 浅水孤立波の二次元相互作用によって生成される新しい波の振幅が大きく影響をうけるかどうかについて調べた結果を報告する.

おわりに

目的にあるような趣旨でこの研究集会を開催することを企画した。昨年度に引き続き2回目である。昨年度の開催が3月であったため、今回も3月の開催となった。freak waveは国際会議の開催や雑誌の特集号が組まれるなど注目を集めている話題である。昨年度は、理論、実験、数値シミュレーション、深水域から浅水域までの話題と当初目論んだ通りの多様な講演がなされ、大変有益であった。講演における議論でそれぞれ課題も指摘され、今回はそれらの課題がどう解決されたか楽しみである。前回よりもさらなる発展が期待される。

研究組織

富田 宏（海上技術安全研究所）	研究代表者・海洋波浪
川村 隆文（東京大学工学系研究科）	研究協力者・計算流体力学
木下 健（東京大学生産技術研究所）	研究協力者・海事流体力学
早稲田 卓爾（東京大学工学系研究科）	研究協力者・海洋環境流体力学
森 信人（大阪市立大学工学研究科）	研究協力者・海岸環境工学
田中 光宏（岐阜大学工学部）	研究協力者・非線形波動
及川 正行（九州大学応用力学研究所）	研究協力者・非線形波動
辻 英一（九州大学応用力学研究所）	研究協力者・非線形波動
柏木 正（九州大学応用力学研究所）	所内世話人・海洋工学

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、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による深刻な事故が数多く報告されている。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とされているが、その性能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。

そこで本研究では、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 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推定のための船体運動シミュレーションを組み合わせることで、実海域での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・評価手法の確立を目指す。

アンチローリングタンクの自由減衰試験

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調整可能な U 字型タンク模型をアクリルで製作した。実際の船舶に取り付けるアンチローリングタンクには、減衰効果を高めるためにスリット状の板を取り付けるなどの工夫がなされているが、MPS 法による推定精度の検証の第一歩として、今回は 2 次元 U 字型形状を採用した。

製作したアンチローリングタンク模型を用いて、ダクト高さおよびタンク水位を変更しながら、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減衰試験を実施し、その様子を撮影したビデオカメラの映像からタンク水の傾斜角と移動周期の計測を行った。その結果、タンク両舷の水位は移動周期および減衰にほとんど影響がなく、ダクト高さが両者に対して支配的であることを確認した。

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ポストパナマックスコンテナ船のデッキ上に搭載し、ダクト高さを 0.75cm に調整したタンクに水を入れた場合と入れない場合について、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 1.6、波高波長比 1/30 の規則向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。この際、横揺れ固有周期に多少の差が生じるが、曳航速度を調節してパラメトリック横揺れの条件を満たすようにした。

はじめに、タンクに水を入れない場合（アンチローリングタンク非装備に相当）は、横揺れ振幅約 26 度のパラメトリック横揺れが観測された。次にタンクに水を入れた状態では、水位が底面から 1、2cm までは横揺れ振幅約 17 度のパラメトリック横揺れが観測されたが、水位 3cm の場合は完全に横揺れが消滅した。これと同様の手順にて、ダクト高さを 1.0cm に変更した場合についても同様の実験を行い、パラメトリック横揺れ発生限界を探索した。

MPS 法による自由減衰試験の再現

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固有周期に一致させる必要があることから、移動周期の

推定が不可欠である。また、摩擦や渦によって横揺れエネルギーを散逸させる減衰力の推定も設計時には重要であり、従来はこれらの推定に模型実験が主に用いられてきた。本研究ではこの模型実験の代替として、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減衰試験の再現については、応用力学研究所界面動力学分野の末吉が担当し、タンクの自由減衰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、粒子間距離を約 0.15cm（総粒子数 5000 程度）に設定することで、タンク両舷の水位やダクト高さに関わらず、タンク水の移動周期および自由減衰の程度を精度良く推定できることを確認した。

MPS 法を採用したパラメトリック横揺れの推定

アンチローリングタンクを装備した状態での船体自由横揺れ試験から求めたタンク単独の減衰係数と MPS 法を用いて得られたそれぞれの減衰係数を、船体横揺れ運動とタンク水の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モデルに用いて、タンクの減衰係数の推定精度がタンク装備船のパラメトリック横揺れの推定にどの程度影響を及ぼすのかを検証した。ここで、タンク水挙動を記述する数学モデル中の係数および連成項の係数はタンクの各寸法から求めた値を両者ともに用いているので、シミュレーション結果に見られる差は、純粋にタンクの減衰係数の影響と考えることができる。

はじめに自由横揺れ試験より得られた減衰係数を用いた場合のシミュレーション結果では、水位が 1cm、2cm の場合には横揺れ振幅約 12 度のパラメトリック横揺れが得られ、水位が 3cm の場合にはパラメトリック横揺れは非発生であった。これは自由航走模型実験の結果と定性的に合致している。また、MPS 法により得られたタンク単独の減衰係数を用いた場合でも、自由横揺れ試験から得られた実験値を用いた場合と同程度の精度にてパラメトリック横揺れの発生領域、およびその最大振幅を推定できることを確認した。

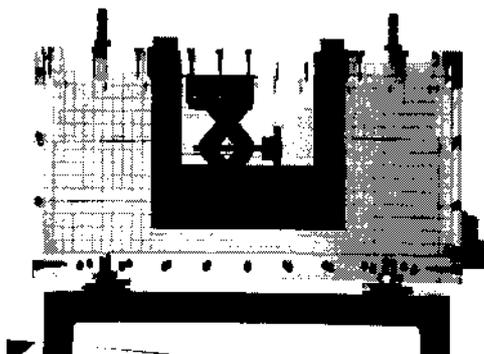
考察と課題

MPS 法を採用したパラメトリック横揺れ推定手法を構築し、自由航走模型実験にて観測されたパラメトリック横揺れの発生限界と横揺れ最大振幅を定性的に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。今後は強制動揺試験結果と MPS 法計算の横揺れモーメントの比較、3 次元形状のタンクへの適用、タンク形状や水量の最適化などが課題として挙げられる。

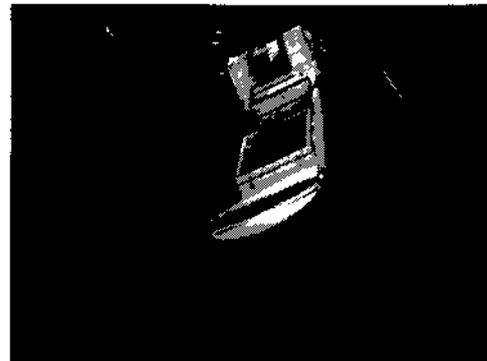
成果報告

平成 19 年 5 月 24、25 日開催の日本船舶海洋工学会春季講演会にて成果発表予定

「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の性能推定」 著者：橋本博公、末吉誠、峯垣庄平



アンチローリングタンク模型



パラメトリック横揺れ観測実験

複合型数値計算法の開発に関する研究

防衛大学校機械システム工学科 木原 一

研究目的

水波と浮体の相互干渉問題について高精度の計算を効率的に行うために、全く異なるアルゴリズムをもつ複数の数値計算法を組み合わせ、それぞれの利点を生かした複合的な数値計算法を新たに創造することを目的とし、本研究を実施した。

研究内容

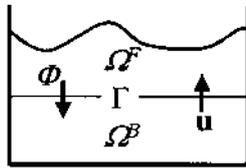
自由界面の大変形への対応が容易な粒子法と、水波の問題に高精度かつ高速な計算が可能な境界要素法を組み合わせることで、効率的で柔軟性の高い計算法の構築を試みた。この2種類の計算方法は自由表面問題の計算方法としては両極端に位置付けられる手法で、実際の数値計算プログラム上でもそのデータ構造など根本的な面で差が大きく接手法は確立されていなかった。粒子法は MPS (Moving Particle Semi-implicit) 法を使用し、境界要素法として線形ポテンシャル理論に基づき構成されたものを使用した。粒子法には水面近傍の界面変形が大きな領域を担当させ、境界要素法には界面の変形が小さなその他の計算領域を担当させることで、計算負荷の大きな粒子法の担当領域を局限し、効率化を図る方針で計算法の設計を行った。この種の異種計算法を組み合わせる方法としていくつかのアプローチが存在するが、今回採用したものはディリクレ型と呼ばれる各時間タイムステップに境界上で速度ポテンシャルとそのフラックスをやり取りしながら各計算手法間での値を相互作用させるものである。本研究で開発を試みた計算手法では、計算法間の境界面において粒子法側で計算された圧力から境界要素法側に引き渡すポテンシャル値を計算し、境界要素法側では速度ポテンシャルのフラックスから粒子法に引き渡す界面の変位速度を計算する構成を採用した。境界要素法と粒子法の接合面は線形近似を行うことで仮想移動境界を設定し境界要素法の計算において最も負荷の高い部分である影響係数の計算やマトリクスの逆行列の計算回数を計算格子構成時の一回だけにとどめ高速化を図った。この仕組みでは境界要素法側で各時間ステップに必要な計算はほぼ三角行列とベクトルの後退代入だけであり、線型連立方程式をはじめから解く必要がないため、将来的に3次元問題を取り扱い計算規模が大きくなった場合でも粒子法を含めた全体の計算量と比較して少ない計算量に抑えることが可能な構成となっている。

開発において初期段階では粒子法側で計算される速度ポテンシャルの空間分布が数値的な高周波振動などを含んでおり、これをそのまま境界要素法側の境界からの入力とした場合、計算が数値的に不安定となり正常な結果が得られなかった。そこで一種の空間的ローパスフィルタ処理と線形化に伴うポテンシャル計算位置のずれに起因する静水圧力差の補正処理をかけることで、安定した正常な計算結果を得ることが可能になった。

この開発した複合計算方法を用いて、2次元水路における造波問題の計算を行った結果、水深、波長、周波数の理論関係である分散関係をほぼ満たしており、正常に異種計算方法同士の接合が行われていることの確認材料が得られている。本研究の成果は2007年8月開催の The 9th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics で発表される予定である (Abstract 受理済)。

粒子法 (MPS法)

担当領域: 水面近傍 Ω^F
 境界条件: 境界 Γ での流速 \mathbf{u}



線形境界要素法

担当領域: その他水底側 Ω^B
 境界条件: 境界での速度ポテンシャル ϕ

図 1 : ディリクレ型複合計算手法

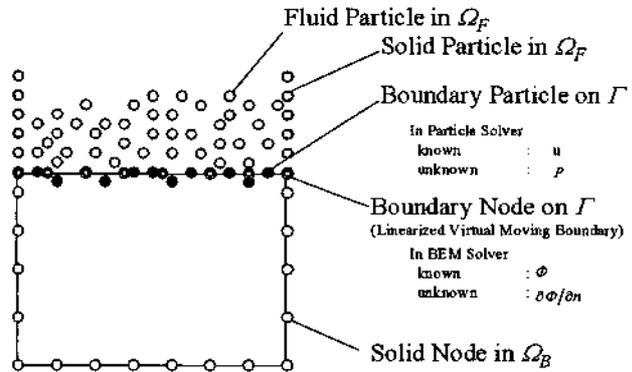


図 2 : 計算点等配置構成概念図

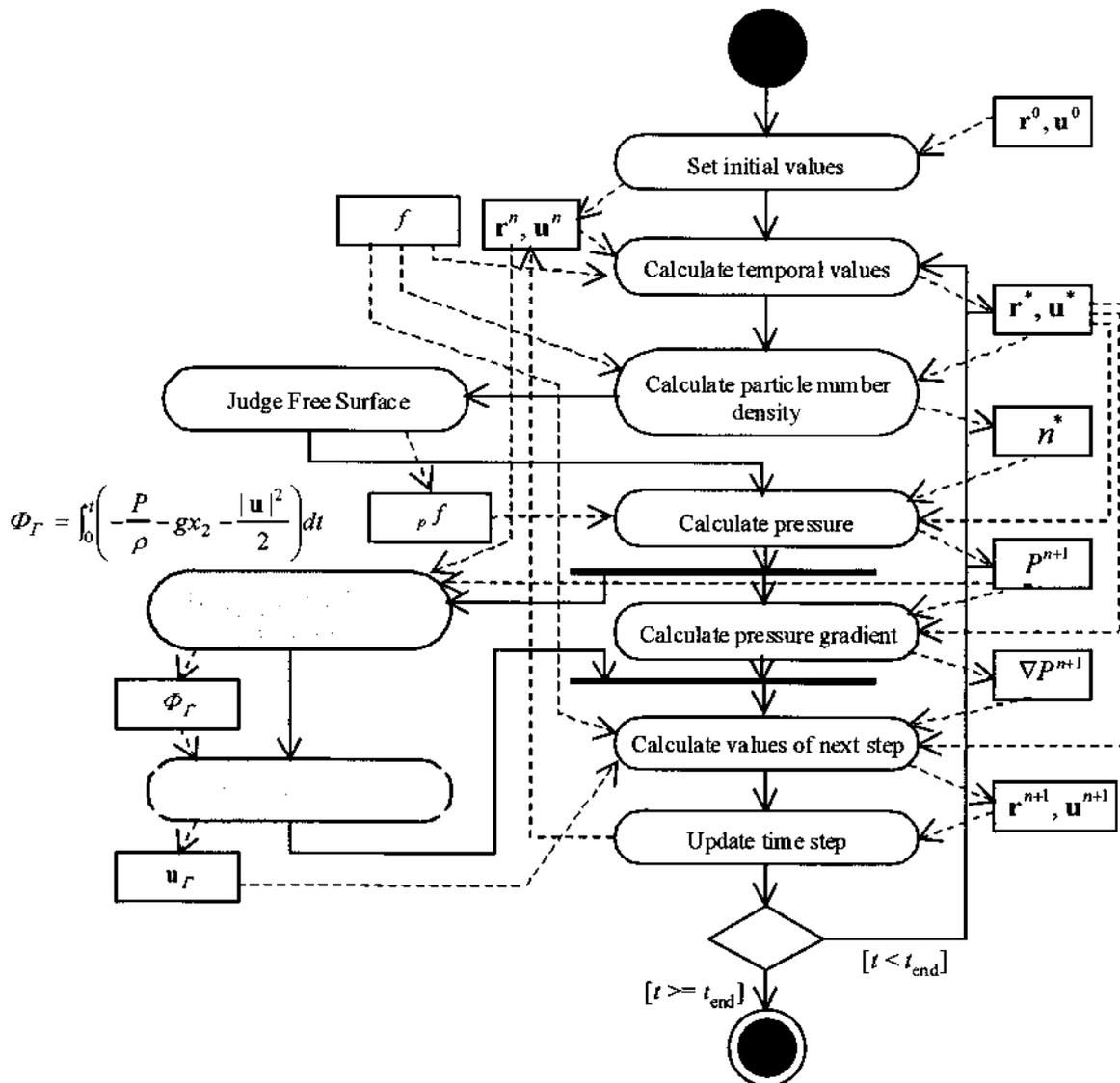


図 3 : 開発手法の UML アクテビティダイアグラム

完全オイラー型解法による固体-流体連成解析

藤久保昌彦・岡澤重信

広島大学 大学院工学研究科 社会環境システム専攻

1. 背景

有限要素法における数値解析手法は、大きく2つの方法に分類することができる。1つはラグランジュ型有限要素法であり、物質の変形をラグランジュ的に捉えて時間毎に位置を追跡していく方法である。もう1つはオイラー型有限要素法であり、物質の変形をオイラー的に捉えて解析領域のどこに位置しているかを評価する方法である。一般的に固体解析においてはラグランジュ型有限要素法が用いられ、流体解析においてはオイラー型有限要素法が好んで用いられる。

固体と流体の連成問題を有限要素法で解析する際は、固体変形が微小な連成度合いの弱い問題では、Fig.1(左)に示すように、固体に対してラグランジュ法を、流体に対してオイラー法を適用し、それぞれ独立に取り扱って解析を行うことが可能である。この方法は、固体にラグランジュ法を用いて解析しているため、固体の境界面の追跡が正確にできるという利点がある。しかし、固体に大変形や破壊の伴う問題では境界面形状が複雑になり、メッシュの破綻が発生する。また、流体と固体それぞれの解析コードが存在し、その境界面では互いにデータをやり取りすることで連成解析が行われるため、そのアルゴリズムの複雑さから計算コストの面でも効率的な方法ではない。



Fig. 1 従来の手法(左)と本手法(右)での連成解析

2. 目的

本研究では、Fig.1(右)に示すように、固体と流体の双方をオイラー法により表し、1つの解析コードで解析を行う方法を提案する。解析コードとしてはオイラー型固体解析コードをベースとし、これに流体の応力と圧力を考慮し、流体用コードを付加する形で固体-流体連成解析に拡張する。

この方法では、固体に対してもオイラー法を用いて解析するため、固体の境界面の正確な追跡ができないという課題は残るが、メッシュが変形しないため大変形や破壊問題にも対応することが可能である。また、解析コードが1つであるため、計算コストの面からもより効率的に解析を行うことができる。この時、流体と固体の境界面での接触力の計算には混合物理論(Mixture Theory)^{1),2)}と呼ばれる考え方を用いる。本研究では、以上のようなアプローチで固体と流体の連成問題の解析を試みる。そして、その妥当性や有効性を検討し、より効率的で汎用性の高いシミュレーション手法の構築を目指す。

3. 解析手法

本手法はオイラー型解法であるため、支配方程式は移流項を含む。本研究ではこの支配方程式の解くために、計算を非移流ステップと移流ステップに分ける²⁾。解析の流れとしては、Fig2に示すように、非移流ステップでラグランジュ的に計算した後、変形したメッシュは元の位置に戻され、続いて移流計算が行われる。

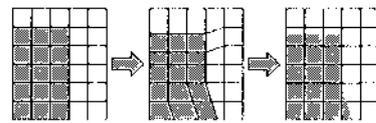


Fig. 2 非移流ステップと移流ステップ

(1) 非移流ステップ

非移流ステップでは、通常ラグランジュ型解法の解析手法をそのまま適用することができる。本手法では、既存の動的問題における固体解析コードを解析の流れの軸とする。この流れに対して、流体の応力を考慮するために、後に述べるように混合物理論を用いて固体と流体の応力を平均化し、固体解析の流れにフィードバックさせる。さらに、流体の圧力による速度の変化を考慮するために、非圧縮流体のナビエ-ストークス方程式を基に Fractional Step 法と呼ばれる方法を用いて速度更新を行う。

(2) 移流ステップ

オイラー型解法における計算精度は、その大部分は移流ステップに依存している。本研究では、2次の移流精度を持つ差分法を用いた MULCS(Monotone Upwind Schemes for Conservation Laws) 法³⁾と呼ばれる移流解法を用いる。非移流ステップでは固体と流体の解変数はそれぞれ独立に計算されるのに対し、移流ステップでは混合物理論により固体と流体が混合された後に、これらの解変数の移流がまとめて計算される。

4. 混合物理論 (Mixture Theory)

本手法では Fig.3 に示すように、固体と流体の接触面で2物質以上を含む要素が存在することがある。この要素の取り扱いに混合物理論を用いる。本研究で用いる混合物理論では、1要素内に存在する全ての物質についてひずみ速度は同じであると仮定する。この仮定を元に要素内の各物質の応力を計算し、密度関数で平均化して要素の応力を求める。

5. 解析結果

(1) 障害物の存在するダムブレイク問題

解析モデルとして Fig4 に示すような、水柱が崩れ弾塑性体である棒(壁)に衝突するシミュレーションを取り挙げる。流体は密度 $1000[\text{kg}/\text{m}^3]$ 、動粘性係数 $0.001[\text{Ns}/\text{m}^2]$ の水であり、固体は仮想的なもので変形の様子が良く確認できるよう、比較的やわらかい物質を想定している。物性は密度 $1200[\text{kg}/\text{m}^3]$ 、ヤング率

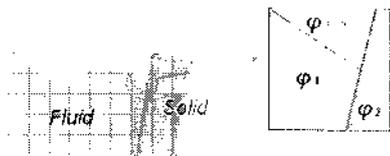


Fig. 3 固体と流体の境界面での2物質以上を含む要素

は15[MPa], ポアソン比は0.3, 降伏応力は0.1[MPa]となっている. また, メッシュの分割数は 60×40 である.

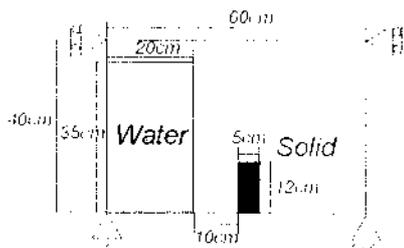


Fig. 4 障害物の存在するダムブレイク問題: モデル

Fig.5はシミュレーション結果である. 水が衝突した後, 水の圧力により棒が流れの方向に曲げられる様子が良くシミュレートできている. 棒は弾塑性体であるため, その可塑性により曲げられた後も元の形に戻ろうとせず変形したままになっている. また, 水の流れは棒を超えた後に渦を作るように自由表面が巻き込む挙動を示している. このように, 流体力により変形する固体の挙動と, 流体が作る複雑な自由表面形状をよく捉えることができています.

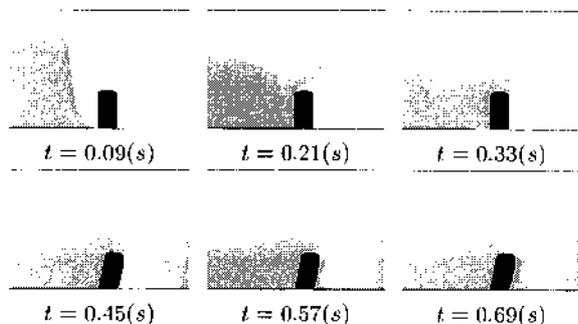


Fig. 5 障害物の存在するダムブレイク問題: 解析結果

(2) 波浪中の船体挙動

Fig.6に示す解析モデルのように, 水槽中の水平方向の動きを拘束された船体に波がぶつかる様子をシミュレートする. 流体は水を仮定しており, 船体はプラスチック模型船を仮定している. 物性は密度 $950[\text{kg}/\text{m}^3]$, ヤング率 $600[\text{MPa}]$, ポアソン比0.3である. また, メッシュの分割数は 50×20 である.

Fig.7は解析結果である. 前方からの波の力によって船体が持ち上げられ, その後船首部分から水面にたたきつけられている様子が分かる. また, 船体の動きにより船体の前後方にできる波の様子もシミュレートできている. このように, 固体と流体の相互作用による挙動の変化をよく捉えることができています.

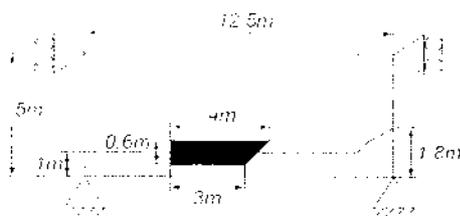


Fig. 6 波浪中の船体挙動: モデル

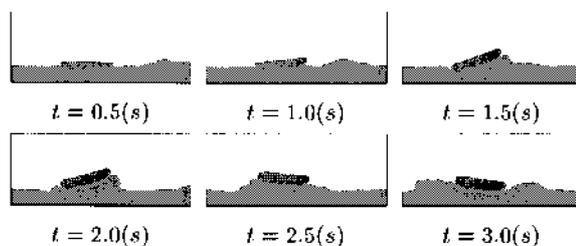


Fig. 7 波浪中の船体挙動: 解析結果

6. 結言

本研究により, 比較的剛性の低い固体と流体との連成問題に対しては本解析手法で良好な結果を得ることができていることが分かった. また, 既存の固体解析コードを拡張することで, 本手法の汎用性の高さも示すことができた. 一方, 本手法で金属などの固体と流体の連成解析を行うと, 混合物理理論で応力を平均化する際に金属と水とで剛性の違いが大きすぎるために, 流体側から見ると応力が大きく計算されてしまい, 良好な結果を得ることができないという知見も得た.

以上のことより, 本手法の適用範囲としては, 比較的柔らかい固体と流体の連成問題と考えられ, 適用分野としては例えば, 血液の流れ解析などの生体力学の循環器系シミュレーション等が挙げられる.

今後の課題としては, 他手法の解析結果や実験結果との比較による定性的, 定量的な評価をすることにより, 本手法の正当性の評価が必要である. また, 本研究室では粒子法⁴⁾による完全ラグランジュ型解法による固体-流体連成解析の研究も行い, オイラー型解法との比較, 検討を進めていく方針である.

参考文献

- 1) Benson D.J., Okazawa S.: Contact in a multi-material Eulerian finite element formulation, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 193:4277-4298, 2004.
- 2) Benson D.J.: A mixture theory for contact in multi-material Eulerian formulations, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 140:59-86, 1997.
- 3) Van Leer B.: Towards the ultimate conservative difference scheme iv, Journal of Computational Physics, 23:276-299, 1977.
- 4) 越塚誠一: 粒子法, 計算力学レクチャーシリーズ 5, 2005

生体吸収性プラスチック複合材料の力学的特性に及ぼす微視的分解の影響

首都大学東京 都市教養学部 小林 訓史

1. 緒言

従来用いられている骨折固定材は、その多くが金属製であり、周囲組織の炎症や骨の弱化を防ぐために、治癒後速やかに体内から取り除く必要がある。そこで現在、この再手術による患者の負担を低減するために、生体吸収性を有するポリ L 乳酸 (PLLA)を用いた骨折固定材が臨床応用されている。しかし PLLA 単体のデバイスでは、強度・剛性の面から使用部位を限定されることや、分解までに一年以上かかること、結晶化度が高い場合における線維状分解生成物による周囲組織の炎症などの問題が生じる。そのため、強度及び生体適合性を改善する目的で、PLLA と生体活性セラミックスとの複合材料の研究がなされている。これまでに生体活性セラミックスとして、骨の無機主成分として知られるハイドロキシアパタイト(HA)や同じリン酸カルシウム系で生体吸収性を示す β 型リン酸三カルシウム(β -Ca₃(PO₄)₂, β -TCP)をフィラー材とした複合材料の研究が行われ、その機械的特性や分解特性が評価されてきた。その中でも、これらの複合材料が長期間にわたって生体内で使用されることから、生体内にインプラントした場合の複合材料における特性の経時変化を明らかにすることは、生体安全性の観点から非常に重要であるといえる。

そこで本研究では、生体吸収性骨治療材の長期間にわたるインプラントによる力学的特性への影響を明らかにすることを目的として、生体活性セラミックスのうち、生体親和性に優れ、高い生体溶解性を示す β -TCP を用い、PLLA との複合材料の作製し、その *in vitro* 環境における力学的特性について評価を行った。

2. 実験方法

2.1 試験片作製

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、マトリックス材である PLLA(島津製作所(株)製、ポリ乳酸ラクティ#5000)を重量比 10/190, 20/180, 30/170 でそれぞれ混合後、射出成形機を用いて 100mm×10mm×4mm の曲げ試験片形状に成形した。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、最終的な混合比を決定した。

2.2 浸漬試験

擬似生体環境として pH6.4 及び pH7.4 のリン酸緩衝液(PBS)を用いた。射出成形によって作製した試験片を、突出棒の痕のある面を下面として、37°C のインキュベーター内にて PBS への浸漬を行った。浸漬期間は、各 pH で 8, 16, 20 週間とした。

2.3 力学的特性評価

各期間浸漬した試験片の力学的特性は、引張試験及び大気中 4 点曲げ試験によって評価した。引張試験は、試験片端部にアルミタブを接着後、試験片の両面にひずみゲージを接着後、試験片の両面にひずみゲージを接着し、クロスヘッド速度 1mm/min にて行った。また、大気中 4 点曲げ試験では、試験片の圧縮面にひずみゲージを接着し、外支点間距離 66mm, 内支点間距離 22mm の治具を用い、クロスヘッド速度 1mm/min で行った。

3. 実験結果及び考察

3.1 力学的特性評価

射出成形によって作製した β -TCP/PLLA 複合材料の、各 pH における β -TCP 含有率を以下に示す。

pH6.4 : 5.2, 9.1, 13.6wt%

pH7.4 : 5.0, 9.5, 14.0wt%

作製した試験片はバリ、ひけなどのない良品であったが、どの試験片においても β -TCP の凝集体が観察された。 β -TCP の凝集体は含有率の増加に伴いより多く観察された。未浸漬の試験片の力学的特性は、引張及び曲げの負荷形態に関わらず、 β -TCP の含有率の増加によって、強度は低下し、弾性率は増加した。

Fig.1 に pH7.4 の PBS に一定期間浸漬した β -TCP/PLLA 複合材料の引張試験結果を示す。浸漬による影響は、5.0wt%の試験片において、引張強度及び引張弾性率に関して 20 週まで確認されなかった。その一方で、9.5wt%及び 14.0wt%の試験片では、浸漬 20 週後で、引張強度・引張弾性係数において顕著な低下がみられた。14.0wt%の試験片に関しては、浸漬後 16 週において、すでに弾性率の低下がみられる。これは 9.5 及び 14.0wt%の試験片では、5.0wt%の試験片と比較して多くの β -TCP 凝集体が観察されたことを考慮すると、 β -TCP 凝集体が浸漬による影響を優先的に受けていることに起因すると考えられる。つまり複合材料の内部における β -TCP 凝集体は、吸水によって荷重を負担できないほど脆弱になっていたと示唆される。また Fig.2 に pH6.4 の PBS に浸漬した試験片における引張試験結果を示す。pH6.4 の PBS における浸漬では、20 週の浸漬後、全ての試験片において引張強度及び弾性率の低下がみられ、9.5 及び 14.0wt%の試験片に関しては、それらの低下率が pH7.4 における浸漬よりも大きかった。浸漬 20 週後の最も β -TCP 含有率の高い試験片において、引張強度の低下率は pH7.4 及び pH6.4 でそれぞれ 22%及び 27%、引張弾性係数の低下率はそれぞれ 17%及び 23%であった。浸漬 20 週後において、9.1wt%及び 13.6wt%の試験片の引張弾性率は 5.2wt%の試験片よりも低い値を示した。

Fig.3, 4 は、pH7.4 及び pH6.4 の PBS に浸漬した各浸漬期間後の曲げ試験結果を示している。pH7.4 において、引張試験結果同様に、20 週の浸漬後 5wt%の試験片では、その影響が見られなかったのに対し、9.5 及び 14.0wt%の試験片では、曲げ強度及び弾性率ともに顕著に低下することが確認された。また pH6.4 の PBS に浸漬した試験片の曲げ試験結果は、引張試験と同様の

傾向を示し、浸漬 20 週後の最も β -TCP 含有率の高い 13.6wt% の試験片において、曲げ強度は 33% 低下し、曲げ弾性率は 26% 低下した。

これらの結果から、本研究で作製した β -TCP/PLLA 複合材料の力学的特性は、pH6.4 の PBS における浸漬において pH7.4 と比較して、浸漬による力学的特性の低下が顕著であることが確認された。pH に関わらず力学的特性の低下は、 β -TCP と PLLA 界面や β -TCP 凝集体が、浸漬によって荷重を負担できないほどに脆弱になったことに起因すると考えられる。pH6.4 のような低 pH における浸漬では、生体内において PLLA よりも優先的に分解すると考えられる β -TCP の挙動を再現できる可能性があることが示唆された。

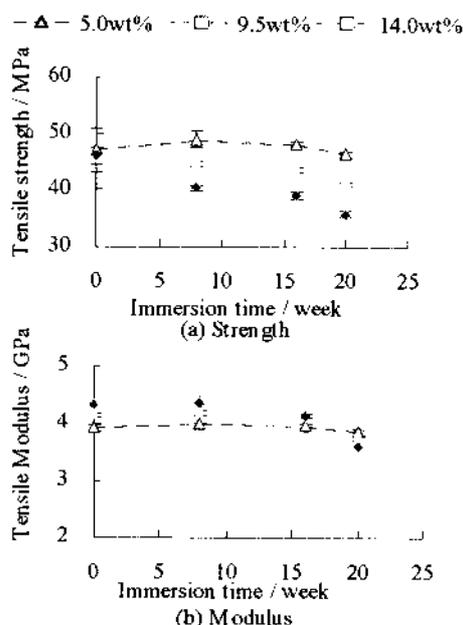


Fig.1 The results of tensile tests of β -TCP/PLLA composites with different immersion periods in PBS(pH:7.4)

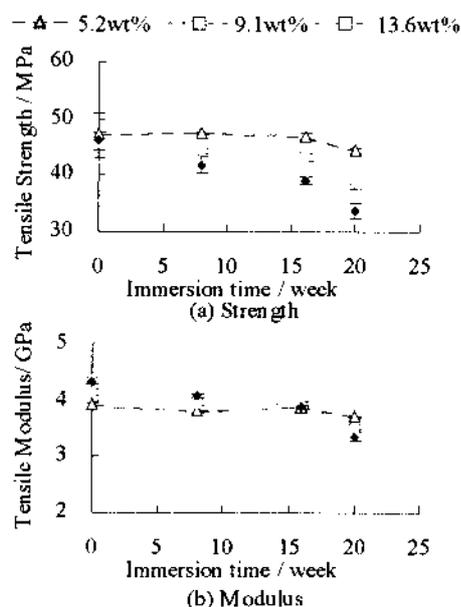


Fig.2 The results of tensile tests of β -TCP/PLLA composites with different immersion periods in PBS(pH:6.4)

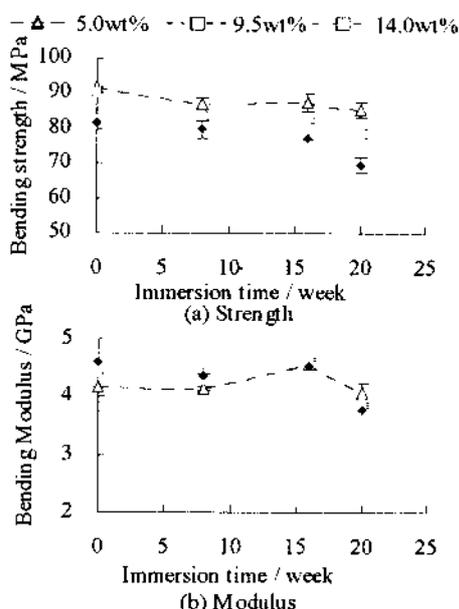


Fig.3 The results of bending tests of β -TCP/PLLA composites with different immersion periods in PBS(pH:7.4)

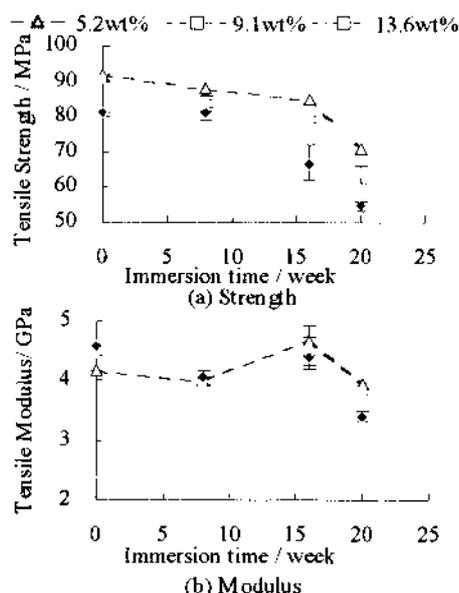


Fig.4 The results of bending tests of β -TCP/PLLA composites with different immersion periods in PBS(pH:6.4)

4. まとめ

本研究では、異なる pH の PBS に β -TCP/PLLA 複合材料を浸漬し、その力学的特性の変化に関して以下の結論を得た。

- (1) pH7.4 の PBS 浸漬において、曲げ及び引張荷重下における強度及び弾性率は、5wt% に関して 20 週の浸漬では変化せず、9.5 及び 14.0wt% の試験片においては、未浸漬のものと比較して顕著な低下が見られた。
- (2) pH6.4 の PBS における浸漬では、pH7.4 と比較して、複合材料の力学的特性に与える影響が大きかった。

1. 研究目的

カオスや乱流状態にある流体について、その輸送特性を明らかにする。昨年度は、レーリー・ベナール対流における流体の粘性係数の発散の他、熱伝導率の発散も見出すことができた。これを受けて、粘性係数の発散のメカニズムを理解することを一つの目的とする。また、蔵本-シバシンスキー方程式やヘノン-ハイレス系を取り上げ、射影演算子法を用い、渦粘性を数値的に評価したり、物理量と揺動力の時間スケールの比較を行う。

2. 研究方法

研究のデザインは、共同研究者各々の意見を尊重し、共同研究者各々がその方針を決める。ある程度研究がまとまった段階で研究についての報告を互に行ない、内容について議論をし研究内容を吟味する。応用力学研究所での研究集会をはじめ、研究集会や学会会合での発表を積極的に行ない、計算結果や研究内容の吟味を必ず行う。意見をもらった場合は、研究の再検討や今後の研究のデザインに役立てる。

3. 研究結果

昨年度までレーリー・ベナール対流を扱ってきたが、レーリー・ベナール対流のシミュレーションを行うのに柳田-金子モデルを用いてきた。柳田-金子モデルは、その連続極限がナビエ-ストークス方程式になることが証明されていない。そこで、シミュレーションを行うのに、さらに信頼性の高い格子ボルツマン法を用い、乱流粘性係数の計算を行なった。具体的には、空間3次元一様乱流における運動量流れとその2時間相関関数の計算を行なった。結果は、レイノルズ数が大きいほど運動量流れの2時間相関関数のとる値は大きく、レイノルズ数が大きいほど乱流粘性係数が大きいことを示していた。(柴田)

森の射影演算子法を援用して、ヘノン-ハイレス系の運動方程式を非マルコフ的な線形確率方程式に変換した。さらに、非線形力の時間相関関数を用いて、振動数依存性のあるカオス誘導摩擦係数や記憶関数を数値的に求めた。その結果、ヘノン-ハイレス系のカオス運動は、時間相関関数の相関時間と記憶関数(揺動力の時間相関関数)の相関時間に、あまり差がなく、長いタイムスケールと短いタイムスケールの揺らぎに分離できないということがわかった。(石崎)

4. 研究成果

論文による発表

- [1] R. Ishizaki, H. Mori, H. Tominaga, S. Kuroki and N. Mori,
The Memory Function and Chaos-Induced Friction in the Chaotic Henon-Heiles System,
Progress of Theoretical Physics, 116(6), 1051-1067(2006).
- [2] M. Ioualalen, M. Okamura, S. Cornier, C. Kharif and A. J. Roberts,
Computation of short-crested deepwater waves,
Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 132, 157-165(2006).
- [3] M. Okamura,
Evaluation of the time correlation function for the Kuramoto-Sivashinsky equation with a projection operator method,
Progress of Theoretical Physics, 116(1), 47-59(2006).
- [4] M. Okamura,
Validity of the essential assumption in a projection operator method,
Physical Review E, 74, 046210(2006).
- [5] H. Shibata,
Correlation Length in the Rayleigh-Bénard Convection,
Journal of the Physical Society of Japan, 76(2), 024002(2007).

会議や会合における主な発表

- [1] 石崎龍二, 森肇, 富永広貴, 黒木昌一, 森信之,
ヘノン-ハイレス系の記憶関数とカオス誘導摩擦係数,
九州大学応用力学研究所研究集会「乱流現象及び多自由度系の動力学, 構造と統計法則」, 2006年11月.
- [2] 岡村 誠,
射影演算子法における渦粘性の数値的評価,
九州大学応用力学研究所研究集会「乱流現象及び多自由度系の動力学, 構造と統計法則」, 2006年11月.
- [3] 岡村 誠,
射影演算子法における渦粘性の数値的評価,
日本物理学会 2007年春季大会, 鹿児島大学, 2007年3月.
- [4] H. Shibata,
Percolation in the Rayleigh-Bénard convection,
The American Physical Society (59th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics), Tampa, Nov. 2006.
- [5] 柴田博史,
低レイノルズ数乱流における乱流粘性係数,
九州大学応用力学研究所研究集会「乱流現象及び多自由度系の動力学, 構造と統計法則」, 2006年11月.

- [6] 柴田博史,
低レイノルズ数乱流における乱流粘性係数,
京都大学数理解析研究所研究集会「乱流と輸送現象: コーヒーカップから宇宙まで」,
2007年1月.

5. 研究組織

柴田博史 (崇城大学・工学部), 石崎龍二 (福岡県立大学・人間社会),
岡村 誠 (九州大学・応用力学研究所).

カーボンナノチューブ／NiTi 粒子／ポリマーによる三相複合材料の開発

信州大学繊維学部
機能機械学科 倪 慶清

1. 目的

近年、金属粒子、カーボン粒子、カーボン繊維などの導電性フィラーを高分子に添加することにより、静電防止材、半導体材、電磁波遮蔽材、正的温度係数材として電子電気分野への応用が展開されている。材料性能に対しては、十分な強度と電気特性を要求されるとともに耐熱性、ダンプ特性も必要である。これらの要求を満たすには、カーボンナノチューブ／形状記憶合金(NiTi)粒子／耐熱性ポリマーによる三相複合材料が有力な候補である。そこで、本研究では気相法で合成された平均直径 150nm のカーボンナノチューブと形状記憶合金(NiTi)粒子を用い、ポリマーマトリックスに添加することにより電気伝導性に優れた三相複合材料を創製した。形状記憶合金(NiTi)粒子を添加したため、形状記憶効果を保持すると同時に電気伝導機能を兼備することができた。形状記憶効果については別途に報告するが、ここで創製した三相複合材料材料の電気伝導安定性について報告する。

2. 材料開発および電気伝導性評価

◆三相材料の創製 導電性フィラーとして、気相法により合成された高結晶性のカーボンナノチューブ(昭和電工(株), VGCF®)およびニッケルチタン合金粒子(Ni/Ti=50/50, 高純度科学研究所)を用いた。マトリックスとして不飽和ポリエステル(UPR)と硬化剤はパーメック N(日本油脂株式会社)を用いた。耐熱性ポリマー母相に平均直径 150nm または 80nm のカーボンナノチューブをフィラーとして用い、マイクロサイズの形状記憶合金(NiTi)粒子を添加することにより、形状記憶効果を有すると同時に電気伝導機能を兼備することのできる三相複合材料を創製した。

◆性能評価 基本的力学的に特性のほか、開発した三相複合材料に対して、形状記憶効果を熱力学的サイクル試験により検討した。また材料の電気抵抗や伝導性について、デジタルマルチメータ VOAV7510 IWATSU(株)を用いて、CNF 含有率が異なる各 5 個の試験片の電気抵抗値を測定した。また電気抵抗の温度依存性及び時間依存性、電流・電圧特性(V-I)と電流減衰特性(I-t)を測定した。

3. 結果および考察

3.1 電気抵抗と含有率の関係

Fig.3 に 10wt%NiTi 粒子を充填した CNF/NiTi10wt%/UPR 三相複合材料の体積抵抗率と CNF 含有率の関係を示す。CNF の含有率の増加に伴い、CNF/UPR 複合材料及び CNF/NiTi10wt% 粒子/UPR 三相複合材料の体積抵抗率は減少した。特に、CNF の含有率 3wt%前後までは抵抗率が急に低下し、この含有率を超えると抵抗率が緩やかに変化して、パーコレーション現象が発生したことがわかった。これは、パーコレーション閾値で、絶縁体であるポリマーマトリックス中に、伝導性フィラーのつながりからなる導電ネットワークが形成されたことを意味している。2wt%CNF に限定した CNF2wt%/NiTi/UPR 三相複合材料の体積抵抗率と NiTi 粒子含有率の関係からは、NiTi 粒子の含有率の増加に伴い、体積抵抗率は線形的に増大した。

3.2 電気抵抗の温度依存性及び熱サイクルとの関係

1 回目の熱サイクル(昇温後冷却)測定結果から、CNF/NiTi10wt%/UPR 三相複合材料の電気抵抗率と温度の関係を Fig.2 に示す。CNF 含有率が 2wt%-5wt%の範囲で温度の上昇に伴い電気抵抗値が徐々に上昇し、160°C前後に最大値になり、PTC (Positive Temperature Coefficient)効果が発生し、その後抵抗値が低下し、NTC (Negative Temperature Coefficient)効果も発生したことがわかった。また CNF/NiTi10wt%/UPR 三相複合材料の昇温・冷却の熱サイクル後の電気抵抗率

変化から(図は省略), 1 回目よりも 2 回目の低下幅は小さくなっている。これは非結晶性ポリマーを用いた伝導性複合材料ではポリマーの網状化が電気抵抗率に大きな影響を与えていることが起因している。一般に反応温度を高くするとその抵抗値が低くなる。ここで, 昇温・冷却サイクル試験に伴い不飽和ポリエステル樹脂の網状化が進むほど体積は収縮するため, 実際のマトリックスの体積は小さくなり, 従ってカーボンナノチューブ間の接触面積が増加し抵抗率が小さくなる。

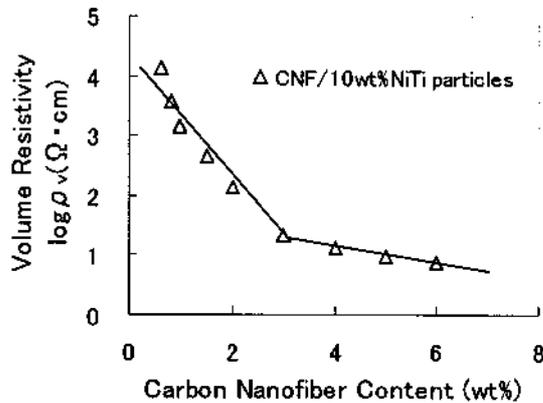


Fig. 1 Relationship between electrical volume resistivity and CNF content for CNF/NiTi10wt%/UPR composites.

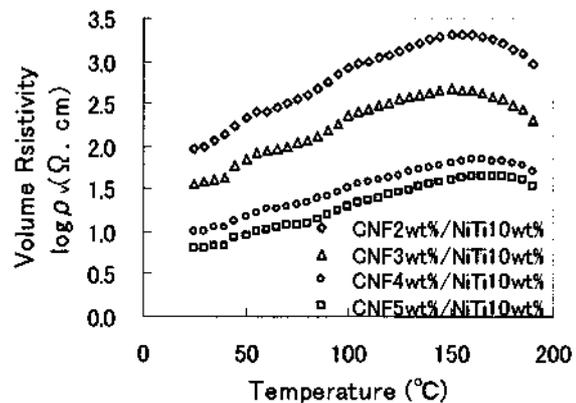


Fig. 2 Temperature dependence of volume resistivity in CNF/NiTi10wt%/UPR composites.

以上の研究成果をまとめると, 次の諸見が得られた。

(1) チタン粒子の重量含有率 10wt%の三相複合材料, CNF/NiTi10wt%/UPR, に対して, CNF 含有率の増加に伴い電気抵抗が減少した。この場合, パーコレーション閾値は CNF 含有率約 3wt%であることが示され, カーボンナノチューブのパーコレーション閾値への寄与が認められた。

(2) 創製した三相複合材料は温度の増加に伴い電気抵抗率が増加し, PTC 効果が表れたが, PTC 強度は大きくなかった。

(3) 熱サイクル数が増えることに従い電気抵抗率は減少した。一定温度条件下で電気抵抗の時間依存性は, 初期では電気抵抗が急激に上昇し, 最大値になってから急激に低下するという動的パーコレーション現象を示した。電圧と電流の間はほぼ直線関係にあり, オームの法則に従うことが示された。また, 過電流保護効果を発現することが分かった。

4. 研究成果報告

(1) 武世宏, 倪慶清, 小岩康三, 倉鋪憲, 岩本正治, CNF/NiTi 粒子/UPR 三相複合材料の電気的特性, 材料(日本材料学会), Vol. 55, No.8, pp.766-771, 2006.8.

(2) Q.-Q. Ni, S. Wu, Y. Fu, T. Natsuki, K. Kurashiki, Properties of CNT/NiTi/UPR three-phase Composites, NANOTUBE 2006

(3) Chun-Sheng Zhang, Qing-Qing Ni, Wen-Xue Wang, Ken Kurasiki, Masaharu Iwamoto, Development and Damping Properties of Hybrid Laminates with Shape Memory Polymer, *Innovative Development, Characterizations and Applications of Composites*, 2006, pp.141-149, China Agricultural Science & Technology Press.

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

デジタル画像相関法による歯周構造の変形解析

福岡県工業技術センター 機械電子研究所
内野 正和

1. まえがき

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。したがって、その計測手法も多様に開発されており、ひずみゲージを用いたもの⁽¹⁾、レーザー変位計を用いたもの⁽²⁾、磁気効果を用いたもの⁽³⁾などがある。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であり、咬合解析に十分な情報量とは言えない。

全視野計測による変形解析は、Sobolewskiら⁽⁴⁾およびKishenら⁽⁵⁾のグループによって行われている。しかしながら、乾燥状態の歯牙単体における解析であり、咬合機能の解明には不十分と言える。咬合機能を考えるとき、歯牙のみでなく、歯根膜・歯槽骨(顎骨)も重要な役割を果たしており、それらの機能を無視できない。しかし歯根膜・歯槽骨に関しても、それら単体の動態解析・物性評価^(6,7)などの研究は行われているが、歯牙・歯根膜・歯槽骨の歯周組織を構造体として考え、それらの動態解析を全視野で行った研究は光弾性材料を用いたモデル実験⁽⁸⁾のみであり、実際の構成物での計測は我々の知る限りない。

そこで本研究では、可及的に生体に近い状態を実現するため、前日に食肉用としてと畜されたブタを使用した。ブタの下顎骨を分離し、大白歯・歯根膜・歯槽骨で構成された薄片の試料を作製した。その試験片に、万能試験機により強制変位を付与することで咬合形態を模擬し、変形計測を行った。また、その試験片が十分乾燥した後、同様の実験を行い、変形形態の比較を行った。変形解析には、デジタル画像相関法を用いた。実際の歯周組織を用いたこのような研究はこれまでになされておらず、咬合機能における歯周組織の変形形態の解明に大変意義深い知見を与えるばかりでなく、歯根膜という緩衝材を介さず直接歯槽骨とオッセオインテグレートされる歯科インプラントにおいて、目指すべき理想的変位分布の指標となると考えている。

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測定対象物表面に何らかの模様(例えば、塗料スプレーなどの噴霧によるランダムパターン)を作成し、測定対象物の変形前後をCCDカメラなどで撮影する。そして、得られたデジタル画像に画像処理を施すことにより、試験片表面の変形量と変形方向を同時に計測することが可能な方法である。変形量と変形方向は変形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、変形後の画像より最も相関の良い画素領域を求め、その中心を変形後の移動位置とする。相関値 C 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。

$$C(X+u, Y+v) = \frac{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M I_a(X+u+i, Y+v+j) - I_a(X+i, Y+j)}{\sqrt{\left(\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M I_a(X+u+i, Y+v+j) \right)^2 + \left(\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M I_a(X+i, Y+j) \right)^2}} \quad (1)$$

ここで、 $I_a(X, Y)$ 、 $I_d(X+u, Y+v)$ はそれぞれ変形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、実際の移動量は一面素の大きさよりも小さく移動するために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。

$$C(X+u, Y+v) = \frac{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M I_d(X+u+i, Y+v+j) \times \sum_{l=-M}^M \sum_{m=-M}^M I_a(X+l, Y+m)}{\sqrt{\left(\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M I_d(X+u+i, Y+v+j) \right)^2 + \left(\sum_{l=-M}^M \sum_{m=-M}^M I_a(X+l, Y+m) \right)^2}} \quad (2)$$

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、前日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、歯牙(大白歯)・歯根膜・歯槽骨を有する厚さ 2mm の薄片を作製した。試験片の一例を図1に示す。大白歯と歯槽骨は、歯根全域で厚さ数十～数百 μm の歯根膜を介して接着されている。

2.3 実験手順

咬合機能を模擬した圧縮荷重を付与する測定は、下記の手順で行った。①試験片の観測領域の水分を、デジタル画像相関法に用いる塗料スプレーが塗布できる程度に乾燥させる。②塗料スプレーにより観測領域にランダムパターンを形成させる。③髄腔周辺の顎骨をバイスにより固定し、小型卓上試験機(東京試験機社製 LSC-1)に設置する。④歯冠上端の一部に圧縮

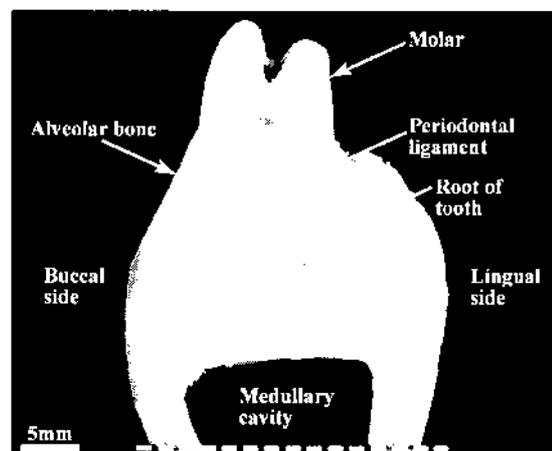


Fig.1. Structure of periodontium.

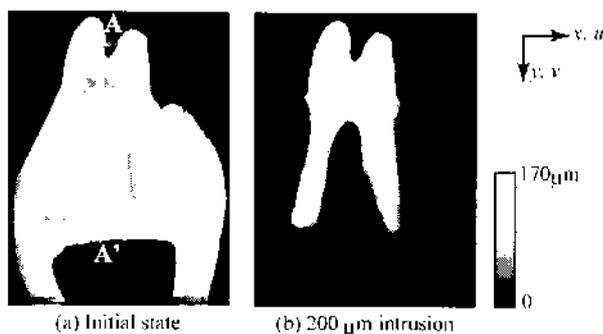


Fig.2. v-displacement field of the periodontium specimen (wet state).

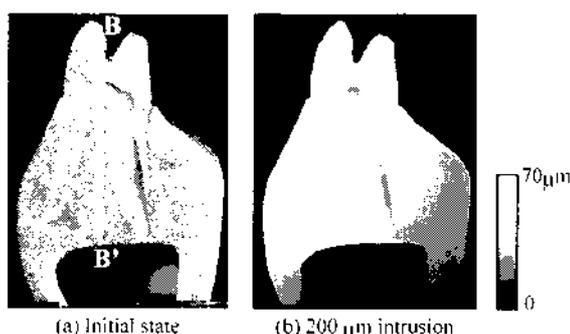


Fig.3. v-displacement field of the periodontium specimen (dry state).

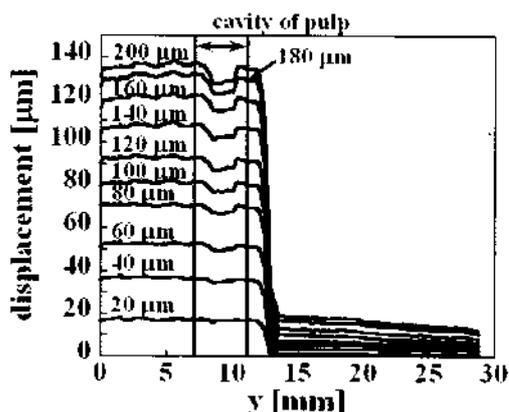


Fig.4. v displacements of the periodontium specimen (wet state).

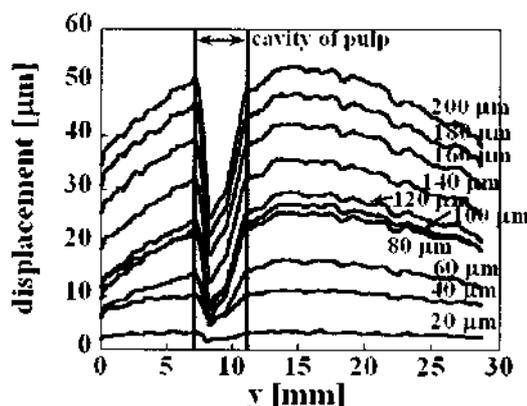


Fig.5. v displacements of the periodontium specimen (dry state).

荷重を付与する。⑤CCDカメラにより変形画像を撮影する。

薄片の試料に作用する実際の荷重は不明であるため、本研究では試験機による強制変位を採用した。押し込み量を0~200 μmとし、20 μmごとにカメラ撮影を行った。

3. 実験結果

デジタル画像相関法により得られたy方向の変位分布の一例を図2に示す。(a)は初期状態、(b)は200 μm押し込んだときの状態を表している。(b)において歯牙の形状が明確に示されており、歯牙と歯槽骨の境界、すなわち歯根膜に大きな変形が生じていることを示している。

図3に、同じ試験片を十分乾燥させた後に計測を行った変位分布を示す。(a)は初期状態、(b)は200 μm押し込んだときの状態を表している。図2(b)と比べて、変位分布が大きく異なることがわかる。図2に示す生体に近い状態では、歯根膜の緩衝作用により歯槽骨がほとんど変形していないのに対し、図3に示す乾燥歯では、歯槽骨が大きく変形している。すなわちこれは、歯周組織の咬合機能を解析する場合、生体歯を用いることの重要性を示唆している。

図4は、図2(a)のA点を原点としA'方向のyの変位量を表している。図中の変位量はそれぞれ20 μmずつ押し込んだときのものである。歯髄腔の変位量はノイズが大きく正確に測定できなかったため、無視する。この図より、①咬合の初期段階では、歯根膜のみが大きく変形すること、②歯根膜の変形後、歯槽骨が変形すること、③歯牙はほとんど変形せず、剛体変位していることがわかる。図5は、図3(a)のB点を原点としB'方向のy方向の変位量であるが、この図からも生体歯と乾燥歯の変位形態が大きく異なることが見てとれる。

4. まとめ

デジタル画像相関法を用いて、咬合機能に対する歯周組織の変位分布を可視化した。そして、歯根膜が重要な役割を果たしており、咬合時の歯周組織の変形解析には生体歯を用いることが重要であることがわかった。

参考文献

- (1) 清水明彦, 鈴木明彦, 岸本裕充, 長谷川誠実, 吉岡濟, *日保歯誌*, 38-2, (1995), 370-374.
- (2) 陳俊呈, *九州歯会誌*, 52-1, (1998), 200-209.
- (3) 大塩恭仁, *補綴誌*, 44-2, (2000), 254-264.
- (4) Sobolewski, P.A. and Wood, J., *Proc. 2004 SEM X International Congress*, (2006), Paper No.266.
- (5) Kishen, A. and Asundi, A., *J. Biomed. Opt.*, 10-3, (2005), 034010.
- (6) 松本俊郎, 杉村忠敬, *光学*, 10-3, (1981), 184-189.
- (7) 小松浩一郎, 金指幹元, 川田次郎, 千葉元丞, *顎顔面バイオメカ*, 5, (1999), 76-78.
- (8) 遠藤英昭, 山野浩樹, 佐々木具文, 伊藤秀美, 安倍敏, 島内英俊, 小松正志, *実験力学*, 6-1, (2006), 24-30.

研究成果報告

- (1) 森田康之, 内野正和, 新川和夫, 東藤貢, *機講論*, No.06-1, Vol.1, pp.835-836, 2006.
- (2) 内野正和, *日本実験力学学会合同ワークショップ2006*, pp.36-39, 2006.
- (3) 森田康之, 内野正和, 吉岡友彦, 東藤貢, 松下恭之, 新川和夫, 古谷野潔, 第33回日本臨床バイオメカニクス学会プログラム・抄録集, pp.129, 2006.
- (4) 森田康之, 内野正和, 吉岡友彦, 東藤貢, 松下恭之, 新川和夫, 古谷野潔, *機講論*, No.06-65, pp.206-207, 2007.
- (5) 内野正和, (社)日本非破壊検査協会九州支部技術サロン講演, 2007.

1. 緒言

現在人工膝関節全置換術(TKA)に用いられている人工膝関節は、術後の屈曲角度について正座等を伴う日本人の和式生活に完全に適応していない。屈曲可動域が比較的大きい人工膝関節としてBi-surface model [1]があるが、これよりさらに屈曲可動域日本人の和式生活に適応した改良型として、完全屈曲型の人工膝関節が提案されている。そこで、この完全屈曲型の人工膝関節(CFK)の設計を行うためには生体骨内部や人工膝関節にどのような応力が生じているかを知ることが重要になる。特に、CFKは形状的に従来の人工膝関節と異なる部分があるために、このような生体骨内部や人工膝関節に生じる応力の予測は有限要素法により可能となる。ここでは、従来の人工膝関節と形状が異なる脛骨コンポーネントと脛骨内を中心有限要素法による解析を進める。

2. 解析方法

汎用有限要素法コードを用いて、精度の検証を行うために複数の要素数により結果の検証を行った。用いた二つのモデルに対して、四面体二次要素を用いて複数の要素分割により解析を行い、要素分割数を決定した。それぞれ、脛骨も含め約26万要素に分割して解析を行った。

脛骨は人工的に作成した疑似脛骨として Fig.1のように海綿骨と皮質骨のモデルを作成し、脛骨コンポーネントと脛骨における局所の影響について解析を行った。このとき材料定数は以下のものを用いた。

脛骨コンポーネント (Co-Cr-Mo材)

ヤング率：115000 MPa, ポアソン比：0.3,

皮質骨

ヤング率：18000 MPa, ポアソン比：0.3,

海綿骨

ヤング率：2000 MPa, ポアソン比：0.3

CFKの脛骨コンポーネントは1st modelと2nd modelの二種類の脛骨コンポーネントについて行った。この二つの脛骨コンポーネントはCFKの特有な脛骨への切れ込み形状に差がある。これ

らに2パターン荷重を負荷し、脛骨コンポーネントと脛骨に生じる応力の解析を行った。

3. 結果と考察

Fig. 2に示す二つの異なる形状のCFK脛骨コンポーネント(1st model, 2nd modelモデル)に、[2]の文献を参考に膝の屈曲角度が80°(2点で接触)120°(ポストとカムで接触)の状態、すなわち接触形態が異なる状態のうちで最も脛骨コンポーネントに厳しい荷重を選定し、垂直方向と水平方向に設定した。その結果をFig.3に屈曲角度120°のときの脛骨の最大主応力の分布図、Fig.4に屈曲角度80°のときの最大主応力の分布図を示す。これらより、二種類の脛骨コンポーネントによって発生する最大主応力の差はないものの、屈曲角度120°の場合により高い応力が発生しているのがわかる。また、1st modelでは、切込み部にやや高い応力が発生している。

次に脛骨コンポーネントに生じる相当応力の分布図を屈曲角度120°と80°についてFig.5とFig.6にそれぞれ示す。これらの場合も最大応力については、二つのモデルについて大きな差は見られない。屈曲角度についての比較では、120°のときの方が大きな応力が生じている。

荷重条件はそれぞれの接触条件において最も厳しい荷重であるが、脛骨コンポーネントおよび脛骨には、相対的に高い応力が見られるが、絶対的には高い値は現れていない。

4. 結言

二種類の脛骨コンポーネントの2パターンの荷重を加えたが、脛骨コンポーネントの形状により、脛骨コンポーネントおよび脛骨に、局所的に応力が集中する部分が見られることが分かったが、絶対的な値は低い結果が得られた。

参考文献

[1]上尾豊二, 関節外科, 22-3, (2003), 57-62

[2]Dahlkvist, N. J., et al., Engineering in Medicine, 11-2, (1982), 69-75

5. 研究組織 (共同研究者)
九州大学応用力学研究所 東藤貢

佐賀大学医学部 佛淵孝夫
佐賀大学医学部 馬渡正明

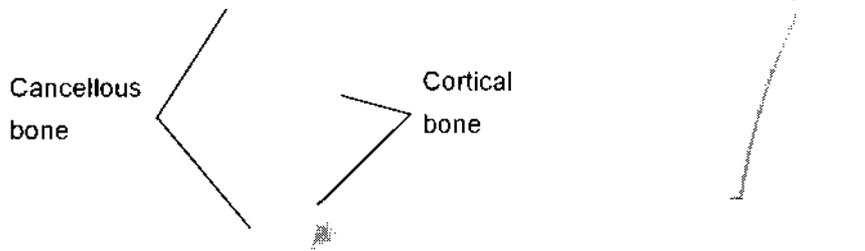


Fig.1 海綿骨と皮質骨の擬似モデル

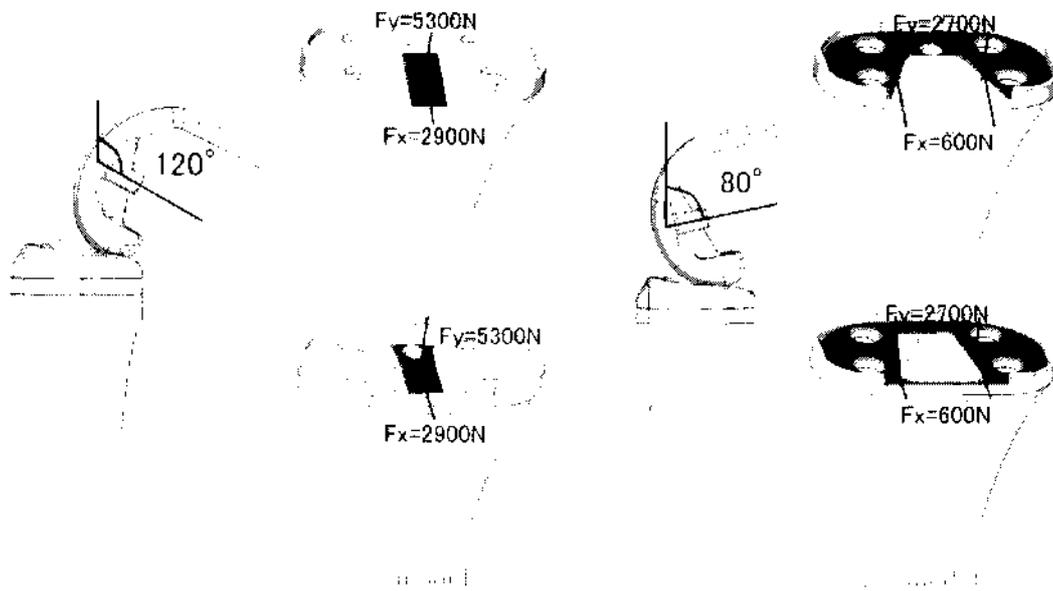


Fig.2 膝の屈曲角度と負荷荷重

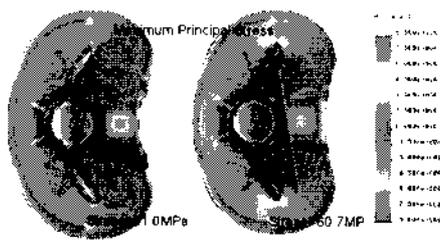


Fig.3 屈曲角度120° の最大主応力の分布

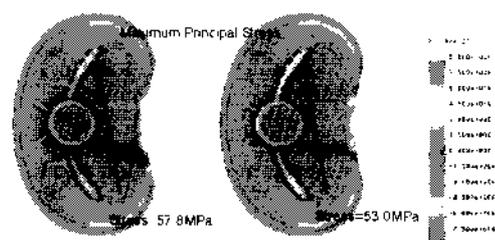


Fig.4 屈曲角度80° の最大主応力の分布

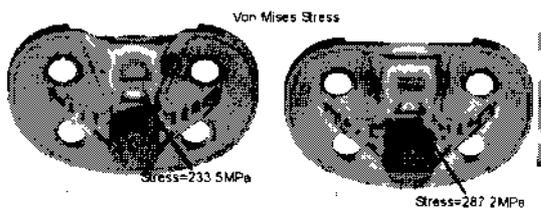


Fig.5 屈曲角度120° の相当応力の分布 (脛骨コンポーネント)

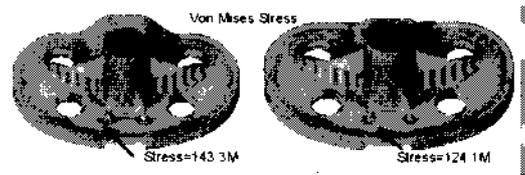


Fig.6 屈曲角度80° の相当応力の分布 (脛骨コンポーネント)

廃 GFRP の複合材料強化材としての再利用に関する研究

九州大学工学研究院 青野雄太

1 目的

強化プラスチック協会によれば、2005 年の廃 FRP 発生量は 45.6 万 t であり、今後もこの 40 万 t オーダーでの廃棄が見込まれている。現在、この廃 FRP の多くは GFRP (Glass Fiber Reinforced Plastics) であり、全発生量の 1.7% はセメント原燃料化が行なわれている。しかし、残りのほとんどは埋立て処理(焼却後埋立てするものも含めて)または投棄されているが、最終処分地の不足が問題になっている。一方、焼却はダイオキシン発生など環境汚染の恐れや、GFRP の場合、ガラス繊維が焼却炉を傷めるため焼却には向かない。したがって、今後は廃 FRP を再利用することでごみを減らすことが望ましい。

本研究では分離を含まない簡単なリサイクル方法として、破碎によって廃 FRP を再利用することについて検討する。具体的には、破碎した廃 FRP を、Lee らが開発した不織布層間強化材としての利用方法の開発したい。そのため、新品の FRP の層間に、廃 FRP 破砕片の層を挿入した FRP 板を製作し、層間強化材として有効に使用できる条件について明らかにすることを目的とする。

2 実験方法

試験片を切り出す板材は VaRTM (vacuum assisted resin transfer molding) によって製作した。通常の FRP となる層のガラス繊維には日東紡ロービングクロス、樹脂にはビニルエステルを用いた。層間に挿入する材料の調達と破碎はラサ工業に製造をお願いした。用いた廃 FRP は水槽として使用されたもので、破砕片は図 1 に示すように大きさ 10~20mm 程度である。この大きさは Lee らにより開発された層間強化材の大きさと目視では同じ程度である。各層はスプレーのりを用いて接着し、接着しなかった破砕片と厚い破砕片を落とした。図 2 に破砕片の積層の様子を示す。通常の FRP は 4 層積層した。一方、破砕片を入れる場合、4 層全ての層間に挿入した。

図 3 と 4 はそれぞれ通常の FRP と廃 FRP 破砕片を挿入した FRP の断面写真である。今回の条件では、破砕片を挿入した試験片は板厚が板厚 2~3mm 程度の間で波打ち、また、樹脂が含浸していない部分も多く見られた。

次に図 5 に示す引張試験片を製作し、引張試験を行なった。引張試験機には島津 AG-5000A を使用した。クロスヘッド速度 0.5 mm で試験し、ゲージ長 50mm の伸び計で伸びを測定した。

3 実験結果

図 6 に引張試験で得られた応力ひずみ線図を示す。ヤング率は通常の GFRP は 27.3 [GPa]、破砕片を用いた GFRP は 17.2 [GPa] であった。破砕片を用いた GFRP はつかみ内側で破断した。

4 考察

破砕片を挿入した FRP がつかみ内側で破断した理由は、試験片が板厚方向に波打っていることが原因と考えられる。また通常の FRP に比べてヤング率が極端に低いのは空窩が多く存在するためであると考えられる。

波打ちと空窩を減らす方法の一つに、含浸する樹脂の量を増加させるが考えられる。Lee らの開発した不織布挿入方法では不織布と共にレジフィルムを挿入することで、この問題を解決している。VaRTM においてどのようにできるか今後検討したい。

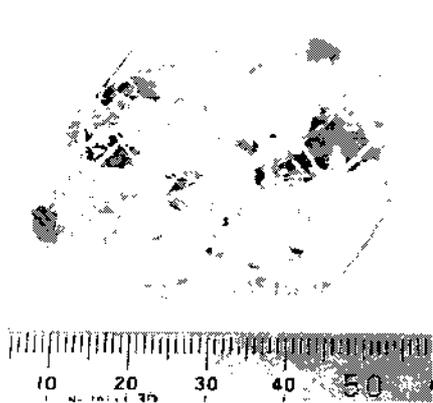


Fig. 1 GFRP chips by milling

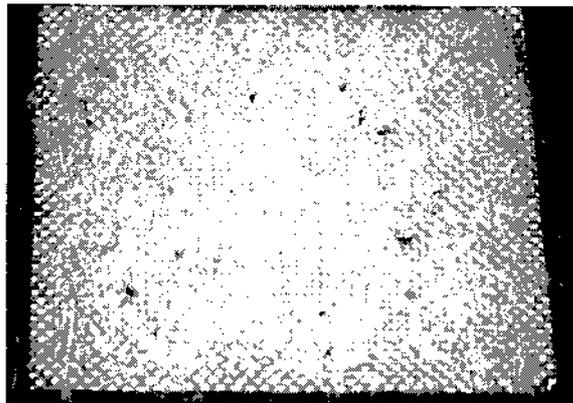


Fig. 2 Lamination of wasted GFRP chips



Fig. 3 Section of normal GFRP

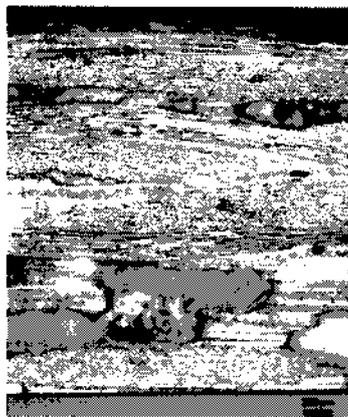


Fig. 4 Section of GFRP with wasted GFRP chips

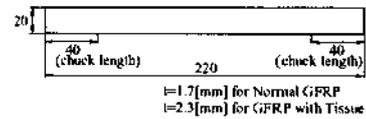


Fig. 5 Specimen configuration

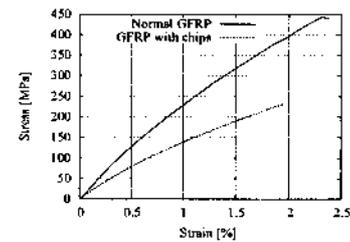


Fig. 6 Stress-strain curve

また、破碎片の大きさおよび廃 FRP 破碎片の層の厚さを揃えることも有効であると考えられる。波打ちの原因は強化繊維の層が厚さにばらつきがあることが原因と考えられる。通常の FRP も板厚方向の波打ちがあり、最大で $150\mu\text{m}$ ほど板厚の差があった。これが生じるのはロービングクロスが元々波打っているためであるが、板厚方向のガラス繊維の剛性が高いため、波打ちの大きさが積層枚数に比例して増加することはないと考えられる。

同様に破碎片の場合も、破碎片個々の大きさと板厚方向への剛性が問題になると考えられる。破碎片断片それぞれの厚さを測定すると、およそ $10\sim 80\mu\text{m}$ 程度の厚さであったが、ガラス繊維そのものに比べて剛性が低いように思われた。したがって、破碎片個々の寸法を小さくして破碎片同士をより密にして板厚方向剛性を上げることができれば、層間強化材としての機能が期待できると考えられる。

5 研究組織

研究代表者	青野雄太	九州大学工学研究院機械科学部門
所内世話人	高雄善裕	九州大学応用力学研究所基礎力学部門
研究協力者	古山隆	九州大学工学研究院地球資源システム部門
研究協力者	宇田暢秀	九州大学工学研究院航空宇宙工学部門
研究協力者	野口博司	九州大学工学研究院機械科学部門

下顎骨に埋入された歯科インプラントの3次元モデルの構築と応力解析

九州大学大学院歯学研究院
松下 恭之

1. 緒言

近年、天然歯を失った場合の新たな治療法としてインプラント治療が注目を浴びている。また、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。このような治療法において、インプラントの埋入位置や長さ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も大変重要である。しかし、そのような観点からの研究は少ないのが現状である。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、FEAによるインプラント解析は一部行われているものの、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次元有限要素解析(3D-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。

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モデルを構築しインプラント解析へ応用することを目的として、標準的なヒト頭蓋骨の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、歯についてもCT画像よりモデル化を行い、人工的に歯根膜を導入することで歯を含む下顎骨モデルについても構築を試みた。次に、前述の下顎骨モデルに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物を装着したオール・オン4を模擬したFEAモデルを構築した。実際の下顎骨に即した境界条件を設定し応力解析を行うことで、インプラント、補綴物および下顎骨について力学的検証を行うことを目的としている。

2. 下顎骨モデルの構築

標準的なヒト頭蓋骨の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が施してある。ソフトウェアの性質上、着目する部分の外周しか抽出できないため、まず緻密骨について輪郭を抽出し3次元の表面点群データを得た。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。Fig.1に作成した下顎骨モデル(緻密骨のみ)を示す。以上の作業を下顎骨の海綿骨についてもを行い、緻密骨と海綿骨モデルを組み合わせることで、実際の下顎骨の形状を模擬する2層構造のモデルを構築した。3D-下顎骨モデルの断面形状を Fig.2 に示す。

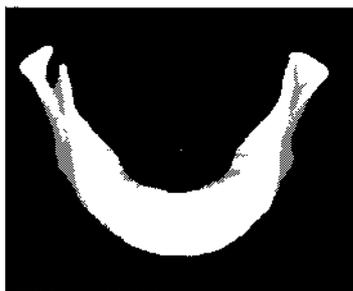


Fig. 1 3D-model of mandible.

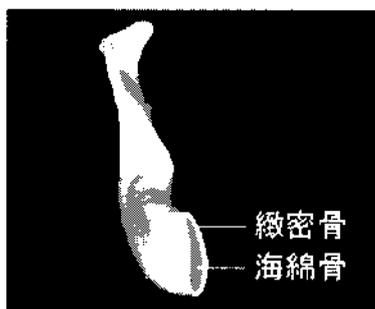


Fig.2 Cross-section of mandibular model.



Fig.3 Mandibular model with implants.

3. FEA インプラントモデルの構築と応力解析

下顎骨に埋入するインプラントは直径4mm、長さ20mmのシリンダー型とした。このインプラントを Fig.1 に示した下顎骨モデルの臼歯部に2本、前歯部に2本埋入した。ただし、臼歯部の2本のインプラントに関してはおよそ45°の傾斜角をつけて埋入した。また、固定式補綴物に関しては顎骨を参考に作成した。4本のインプラントを下顎無歯顎モデルに埋入して作成したオール・オン4モデルを Fig.3 に示す。

境界条件としては、骨体に働く筋力として4種類の筋群の作用を考えた。咀嚼筋の作用方向、各歯

列に加わる反力は元の CT 画像および、伊能らによる一連の研究を参考にした。なお、咀嚼筋の力による下顎頭まわりのモーメントと歯列の力による下顎頭まわりのモーメントがつりあうように設定してある。また、拘束を与えた下顎頭の一節点に応力が集中するのを避けるため、下顎頭に加わる反力を計算し、固定式補綴物の表面下に分散荷重として与えている。設定した境界条件を Fig.4 に示す。

用いた要素は 4 節点 4 面体要素であり、要素数は 51657、節点数は 16487 である (Fig.5)。今回の解析では緻密骨、海綿骨、インプラントおよび固定式補綴物はすべて線形弾性体とし Table1 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みなした。

解析結果の一例として、ミーゼス相当応力分布図を Fig.6 に示す。今回の解析モデルでは、前歯部に埋入したインプラントよりは臼歯部に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見られた (Fig.6(b)の矢印)。このような高応力の発生がインプラントの緩み等に関連することが考えられる。骨吸収等のモデルを組み込んだ FEA 解析は今後の検討課題としたい。

Table 1 Material properties for FEA.

材 料	ヤング率(GPa)	ポアソン比
緻密骨	17.2	0.3
海綿骨	0.35	0.3
インプラント	124	0.3
固定式補綴物	10	0.3

4. まとめ

下顎無歯顎症の治療法のひとつであるオール・オン4の FEA モデルの構築を目的として、標準的なヒト頭蓋骨の CT 画像を基に下顎骨の 3D モデルを作成した。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、固定式補綴物モデルを組み合わせることで、オール・オン4のモデルを構築した。下顎骨に働く筋力を想定した境界条件を設定し、応力解析を行った結果、臼歯部に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。

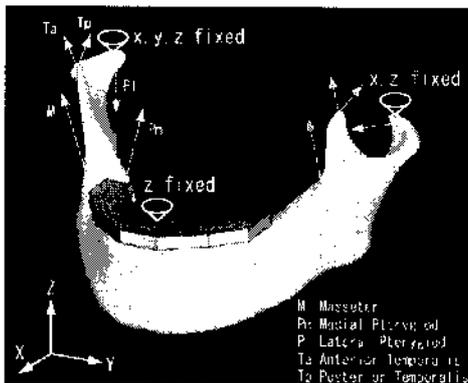


Fig.4 Boundary conditions for FEA.

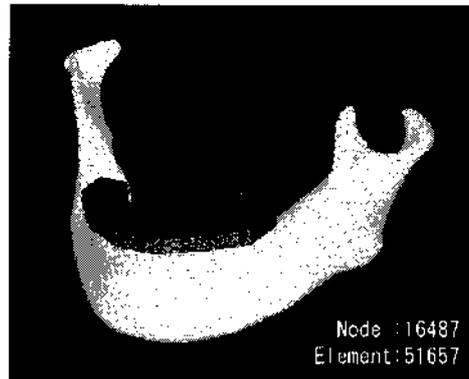
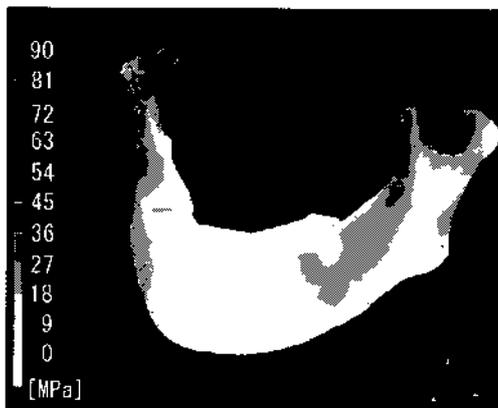
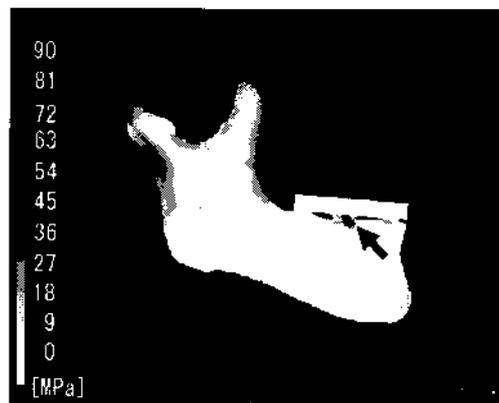


Fig.5 Finite element mesh.



(a)



(b)

Fig. 6 Mises equivalent stress distribution.

研究組織

研究代表者：松下恭之(九大歯学)，所内世話人：東藤 貢，研究協力者：入江皓平(九大院)

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り、平成17年度には回流水槽においてダリウス形水車の実験を行ってきた。実験では、1枚翼、2枚翼、3枚翼のダリウス形水車をモーターで回転させ、トルク計によって水車のトルクを計測した。そして、水車のパワー係数を求め、水車の性能を評価した。それらを、ダリウス形風車の実験結果と比較したところ、回流水槽でのパワー係数は3割ほど高くなっていた。その原因としてまず考えられるのは回流水槽の断面積に比較して模型寸法が大きすぎる時に現れるブロックエッジの影響である。ただし、回流水槽の計測部は幅1.5m、水深1.2mであり、水車は直径0.6m、スパン長0.6mであるので、断面積比は5であり、ブロックエッジ影響は小さいと思われた。しかし、パワー係数で3割の違いは無視できないので、ブロックエッジ影響を無視できる大型水槽での実験を行い、結果を比較すれば回流水槽実験の評価が可能となる。このことを確かめること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。実験日程の都合上、2枚翼と3枚翼の水車について実験を行った。翼断面は、翼弦長が0.08mのNACA0018(以後、対称翼)と翼弦長を0.1mとし、円弧キャンバーをつけたもの(以後、円弧翼)の2種類を用いた。曳航速度は0.5m/sと1m/sとしたが、標準速度は1m/sを採用した。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。

● 実験結果

図1は、円弧翼の起動トルクの実験結果であり、2枚翼の起動トルクとそれを角度で120度および240度ずらして足し合わせた6枚翼の計算結果を翼角に対してプロットした。つまり、2枚翼を3段にした水車の起動トルクに等しい。2枚翼の起動トルクはある角度で負の値をとるが、6枚翼では全周で0を取る所がないことが分かる。

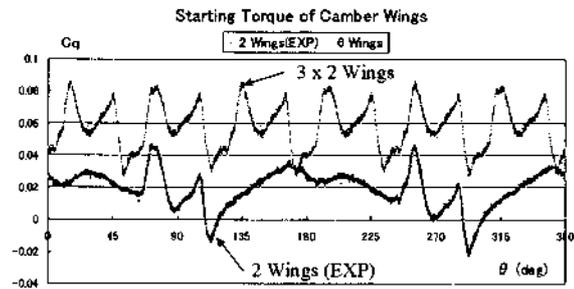


図1 円弧翼の起動トルク (2翼と2翼3段の比較)

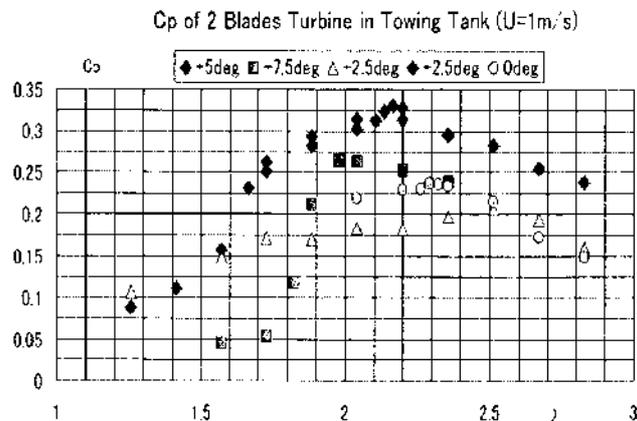


図2 2枚円弧翼水車のパワー係数

図2は、2枚円弧翼水車のパワー係数であり、5種類の翼の取付け角について比較した。この結果から2枚翼では取付け角によってパワー係数がかなり変化すること、最高効率は周速比が2.2付近であることなどが分かる。

図3は、周速比が2.2におけるパワー係数を翼取付け角に対してプロットしたもので、5点を使って多項式近似すると、最大値は3.5°であることが分かる。

図4は、回流水槽と曳航水槽における2枚円弧翼のパワー係数を比較したものである。翼取付け角は0°と+5°である。0°については、回流水槽の結果が一般に曳航水槽の結果を大きく上回っていること、しかし、+5°については $\lambda=1.5\sim 2.0$ まで両者はほとんど同じになっていることが分かる。 $\lambda=+5^\circ$ の結果から回流水槽のプロセージ影響は大きくないと結論できる。 $\lambda=0^\circ$ に現れた両水槽の違いは、水槽幅の影響ではなく、一様流の乱れの影響などによるものと考えられるが、更に他の原因についても検討を要する。

● まとめ

以上の実験結果により以下の結論を得た。

- ・翼の取付け角は、水車性能において重要である。2枚円弧翼では周速比が2.2で最適取付け角は+2.5°である。
- ・回流水槽においてパワー係数が大きくなる原因はプロセージ影響ではなく、一様流の乱れ強さが曳航水槽とは異なるためと思われるが、これについては更なる検証が必要である。

以上の実験結果を受けて、図5のように実海域実験用に直径2m、スパン長1mの2翼3段のダリウス形水車を製作し、平成18年11月20日に現場に設置した。現在、実海域で実験中である。

● 研究組織

経塚雄策 九大・総理工 教授 代表・総括
 若濱久敬 九大・総理工 M2 実験解析

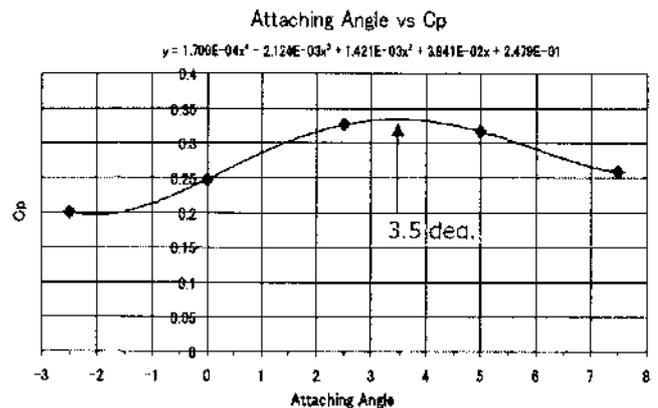


図3 取付け角による円弧翼のパワー係数 ($\lambda=2.2$)

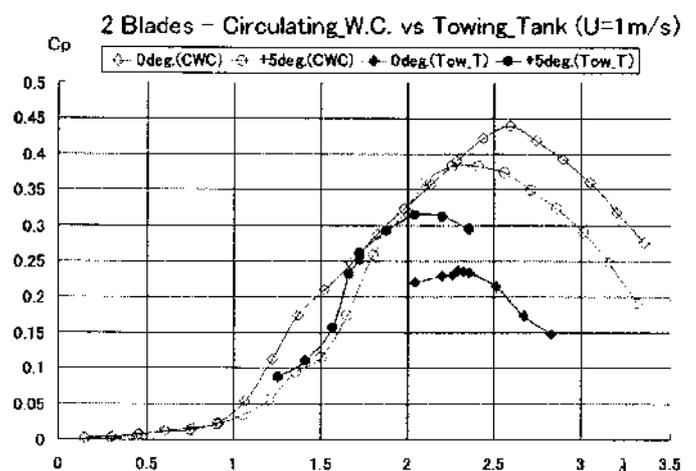


図4 回流水槽と曳航水槽におけるパワー係数の比較 (2枚円弧翼)



図5 2翼3段実海域水車 (直径2m、高さ3m)

機能性化合物半導体の結晶成長と成長時の融液流動解析

宮崎大学 工学部 電気電子工学科 吉野 賢二、木下 綾、野元 恵太

1. 序論

I-III-VI₂ 族カルコパイライト型半導体は直接遷移型のバンド構造を持ち、バンド端より大きい光エネルギーに対して吸収係数が大きいので、太陽電池吸収層として期待されている。中でも CuInGaSe₂ 太陽電池については広く研究されており、変換効率 19.5% という報告もある¹⁾。CuInS₂ は禁制帯幅 1.5 eV を持ち、太陽光スペクトルの強い波長領域に対応し、また、光の吸収係数は 10⁴~10⁵ cm⁻¹ 程度であることから、太陽電池の吸収層として期待できる材料である²⁾。我々は、これまでに 22.5 MPa の高圧下で、成長温度を 400~700°C まで変化させ、CuInS₂ の融点である 1050°C よりもはるかに低温である 700°C で CuInS₂ バルク結晶を得ることに成功した³⁾。

本研究では Cu/In の比を変えて CuInS₂ バルク結晶を作成し、太陽電池作成のための電気的物性を調べることを目的とした。

2. 実験方法

CuInS₂ バルク結晶をホットプレス法を用いて育成するために、粉末二元系材料 Cu₂S(99.9%)、In₂S₃(99.99%)を用いて、Cu/In の比が 0.6~1.5 となるようにそれぞれ混合させた。化学量論的組成の場合は、基本的に以下の化学式が成り立つと考えられる。



ホットプレス法は、加圧形成を高温で行い、形成と焼結を同時に進行させるものである。原料の Cu₂S と In₂S₃ は今回の成長温度 400~700 °C では固体のため、室温で粉末同士を接触させても反応することはないが、融点以下の高温に加熱すると、イオンや原子が結合を断ち切って動き始め、固相焼結が起こる。焼結の過程をモデル的に図解すると図 1 のようになる。まず、(a) のような形成形態を拡散が十分に起こる高温になれば、(b),(c) を経て (d) のような単結晶粒子となる。焼結過程においては、表面自由エネルギー最小状態へ変化する過程で粒子間隙の空孔の消滅が起こり、その過程は初期段階での粒子接点におけるネックの成長に基づく焼結体の大きな収縮に伴う緻密過程、次いで中間段階での粒成長を伴う課程における孤立した空孔形態で、中間段階の円筒形空孔は単調に収縮して緻密化が進行し、粒子の接する角に存在する空孔が完全に消えたとき、焼結体は理論密度に到達する。いずれの段階でも何らかの物質移動が起こる。物質移動の機構としては、①蒸発・凝縮、②体積拡散、③粒界拡散、④表面拡散、⑤粘性流動、⑥塑性流動の各機構が考えられる。

試料はカーボンダイスに原料を充填し、Ar-5%H₂ 雰囲気中で、設定温度 700 °C、圧力 25 MPa、焼成時間 1 時間で CuInS₂ バルク結晶を育成させた。育成後研磨を行い、カーボン箔を除去した。ホットプレス法は、真空を必要とせず、大気中で低温かつ短時間で結晶成長ができるという利点がある。評価として、X線回折によって格子定数と粒径を求め、比重測定から密度を求めた。また断面の SEM 写真を取り、電子プローブマイクロ分析 (EPMA) により組成を行い、サーモプローブ測定により伝導型、四探針法により抵抗率を測定した。

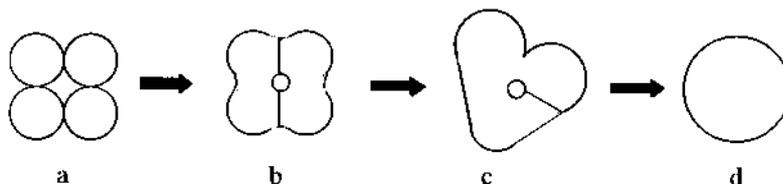


図 1 粒子の焼結過程モデル

3. 結果と考察

図2に、25 MPa、700 °C、Cu/In=8/12~12/8 で、ホットプレス法によって作成した CuInS_2 バルク結晶を示す。作成した試料はカーボンダイスの形状により、直径 20 mm、厚さは約 2~3 mm の円柱状であった。融液成長法やブリッジマン法等の方法と比べ、ひびや穴は見られず、比較的きれいなバルク結晶であった。In-rich になる程黒く光沢はなく、Cu-rich になる程光沢が観測されるようになった。

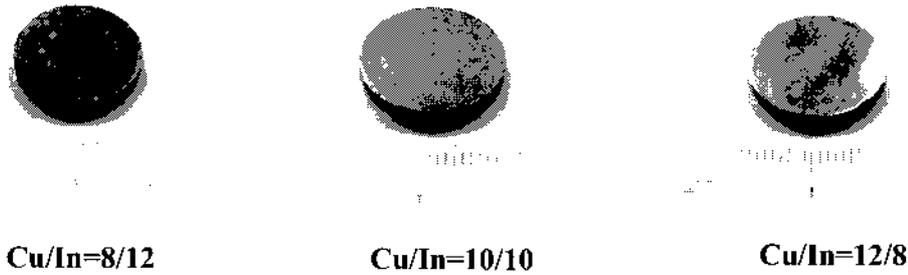


図2 samples(25MPa、700°C)

図3にX線回折の実験結果を示す。 CuInS_2 と CuIn_5S_8 の JCPDS データも示す。多数のピークが観測されたことより、全ての試料が多結晶であることを示している。In-rich である Cu/In=8/12~9.5/10.5 において CuIn_5S_8 の異相がみられた。しかしながら、Cu/In 比を増加させるにしたがって、この異相は減少し、ストイキオメトリーで CuInS_2 の単相が得られた。Cu-rich の試料においても異相は観測されず、 CuInS_2 の単相が得られた。したがってCu-rich において式(1)が促進され、 CuInS_2 が作成された。Cu-rich で異相がなくなるという傾向は、スパッタ法やスプレー法で作成された試料でも報告されている^{4,6)}。

X線回折から求めた格子定数は、Cu/In=1.1 付近で JCPDS の値に最も近くなり、その前後で In-rich では JCPDS より小さくなり、Cu-rich では JCPDS より大きくなった。In-rich で格子定数が小さいのは、異相が観測されたことにより、立方晶の CuIn_5S_8 の影響が考えられる。特に c 軸では a 軸に比べその影響が強くみられた。Cu/In の比を増加させるにしたがって、格子定数は増加した。これらは格子間原子の増加によるものと考えられる。移動ヒーター法 (THM) によって作成された単結晶⁷⁾と比較すると a 軸は小さく、c 軸は大きい傾向を示した。

X線回折から求めた粒径は、In-rich から Cu-rich になるにしたがって、粒径は増加している。In-rich、Cu-rich で粒径が異なる理由として、Cu 原子が粒界の成長を促進させた、または、In 原子または異相が粒界の成長を妨げたということが考えられる。スプレー法によって作成された試料でも同様の結果が得られている⁶⁾。

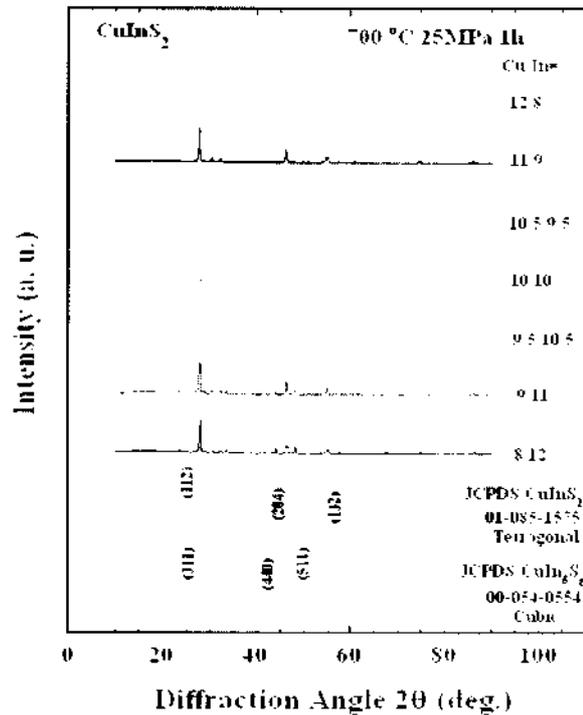


図3 XRD patterns

EPMA ではすべての試料で S-poor、Cu-rich、In-rich となった。しかし、 $[[\text{Cu}]-[\text{In}]]$ に対する S 原子空孔の割合は、Cu/In=12/8, 11/9 の試料では $[[\text{Cu}]-[\text{In}]]$ が支配的となり、Cu/In=10.5/9.5, 10/10 の試料では S 原子空孔が支配的となり、同じ Cu-rich の試料でも違いがみられた。サーモプローブ分析により、Cu-rich の試料で p 型、In-rich の試料で n 型を示した。EPMA の結果より、p 型伝導の起因の欠陥は、 Cu_{In} で、n 型伝導の起因は、 $\text{V}_{\text{S}}, \text{In}_i, \text{In}_{\text{Cu}}$ が考えられる。

4. 結論

粉末二元系材料 Cu_2S 、 In_2S_3 を用いて、ホットプレス法により、 CuInS_2 バルク結晶を育成させた。Cu/In の比は 0.6~1.5 と変化させた。X 線回折の結果により、In-rich の試料で異相が観測された。一方で、ストイキオメリー、Cu-rich の試料では CuInS_2 の単相が得られた。Cu/In の比を増加させるにしたがって、格子定数、粒径は増加した。サーモプローブ分析により、Cu-rich の試料で p 型、In-rich の試料で n 型を示した。EPMA の結果により、p 型伝導の起因の欠陥は、 Cu_{In} で、n 型伝導の起因は、 $\text{V}_{\text{S}}, \text{In}_i, \text{In}_{\text{Cu}}$ が考えられる。Cu/In の比を変えることによって、伝導型を変えることができた。

5. 引用文献

- 1) M. A. Contreras, K. Ramanathan, J. AbuShama, F. Hasoon, J. Keane, D. L. Young, B. Egaas and R. Noufi, *Prog. Photov. Res. Appl.* **13**, 209 (2005).
- 2) J. Klaer, J. Bruns, R. Henninger, K. Siemer, R. Klenk, K. Ellmer and D. Bräunig, *Semicond. Sci. Technol.* **13**, 1456 (1998).
- 3) H. Komaki, K. Yoshino, S. Seto, M. Yoneta, Y. Akaki, T. Ikari, *J. Crystal Growth* **236**, 256 (2002).
- 4) Y. Shi, Z. Jin, C. Li, H. An and J. Qiu, *Appl. Surf. Sci.*, **252**, 3737 (2006).
- 5) M. Krunk, V. Mikli, O. Bijakina and E. Mellikov, *Appl. Surf. Sci.*, **142**, 356 (1999).
- 6) M. Krunk, V. Mikli, O. Bijakina, H. Rebane, A. Mere, T. Varema and E. Mellikov, *Thin Solid Films*, **361**, 61 (2000).

1. 緒言

基板に電子部品を実装する場合、機械的特性、熱的特性の異なる異種材を接合するため、成形時及び運転時に定常または非定常な熱応力（熱残留応力）が発生する。この熱応力はしばしば接合部のはく離・損傷や、素子・部品の機能低下につながる有害な変形を生じる。最近の鉛フリーはんだの使用は、接合部の実装信頼性に対して新たな問題点を生んでいる。すなわち、鉛フリーはんだは濡れ性が悪く、ボイド、界面剥離、凝固割れ、あるいは金属間化合物の異常成長などの欠陥を生じ易い。またスーパーコンピュータの電子部品接合や高精度センサーのダイボンドやパッケージングに使用されている Au-Sn 系鉛フリーはんだの場合も、金属間化合物の抑制が課題になっている。現在、PVD-Au-Sn/Au/Pt/Ti の多層膜を使用して電子部品をマイクロ接合させる技術が一部実用化されている。本稿ではサンプル接合層のせん断試験と破壊表面の XRD 分析の結果について報告する。

2. 実験方法

せん断試験用のサンプルは、PVD-Au/Pt/Ti ($t=0.3/0.2/0.1 \mu\text{m}$) の金属膜でメタライジングされた AlN セラミックス ($L \times D \times t=1.3 \times 0.8 \times 0.3 \text{ mm}$) と Si 板 ($3 \times 3 \times 0.5 \text{ mm}$) を、PVD-Au-Sn のはんだ膜 ($1.3 \times 0.4 \text{ mm}$, $t=3 \mu\text{m}$) を使用して約 300°C で接合させたものである。接合界面は Si 板/Ti/Pt/Au/Au-Sn はんだ/Au/Pt/Ti/AlN セラミックスである。PVD-Au-Sn のはんだ膜はメタライジング AlN セラミックス表面上にフォトリソ法で蒸着されている。せん断試験は MTS 試験機を使用した。サンプルを高炭素鋼のスリットに差し込み、上から 0.1 mm/min の変位速度で押し、Au-Sn 接合層がせん断破壊するまでの荷重-変位データを PC に採取した。せん断破壊表面の金属間化合物の同定にはリガク XRD を使用した。

3. 結果および考察

3.1 せん断試験用サンプル

図 1 (a) (b) (c) はせん断試験用のサンプルの光学写真とせん断の模式図である。(a) が接合を行う前のメタライジングされたセラミックス表面である。フォトリソ法で蒸着した PVD-Au-Sn はんだ膜も観察される。(b) は Si 板とセラミックスを接合した後のサンプルである。破線から下の部分をスリットに差し込み (c) のせん断試験を行った。

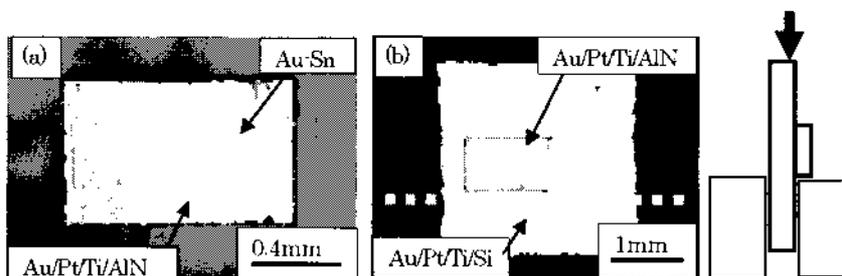


図 1 サンプルの光学写真と模式図 (a)接合前のセラミックス (b)接合後のサンプル (c)模式図

3.2 せん断試験

図 2 (a) (b) はせん断応力-変位の線図である。ミクロに見ると値が上昇する途中に小さな変動が箇所が見られるが、この変動がき裂の進展とサンプルの塑性変形の主にどちらに対応しているかの判定は難しい。マクロに見るとせん断応力の最大値で破壊しているが、これは金属よりもセラミックスによく見られる傾向である。また、線図 (b) の方が破壊のせん断応力 τ の値は小さいが、しかし、せん断応力/変位の傾きは大きい。これは次の 3.3 項で述べるが、硬くて脆

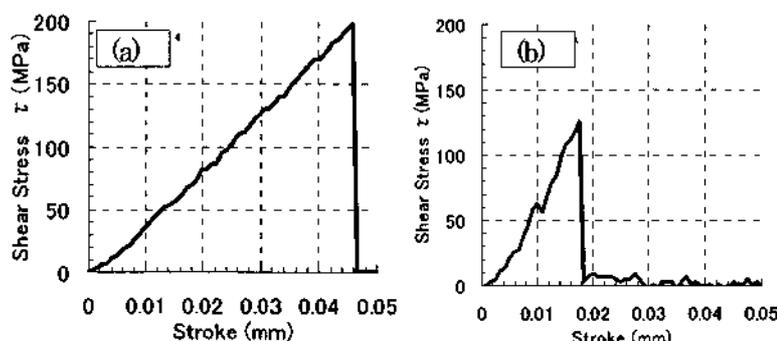


図 2 せん断応力-変位の線図 (a)破壊 τ 値大 (b)破壊 τ 値小

い金属間化合物を多く形成したためと思われる。

表1は今回のPVD-Au-Sn接合層のせん断強度 τ の値と、文献から引用したAu-20%Snはんだの引張強度 σ の値の比較である。せん断強度 τ の平均の値は165MPaで、これは引張強度 σ の値290MPaの約57%に相当する。純粋せん断と単純引張の応力状態を比較したトレスカ(Tresca)の条件のせん断降伏応力は引張降伏応力の約50%で、ミーゼス(von Mises)の条件のそれは約58%になることが知られている。今回のサンプルがAu-Sn系合金のほぼ本来の強度で接合されていたのが分かる。

PVD-Au-Sn 接合層のせん断強度 τ (MPa)	Au-20%Sn はんだの引張強度 σ (MPa)	せん断強度 τ / 引張強度 σ (%)
165 (130-200)	290	57(45-69)

3.3 破壊表面の観察

図3(a)(b)は接合層の破壊面の光学写真である。せん断試験で純粋せん断を生じさせるのは難しいが、今回のサンプルの接合層のほぼ全体がせん断で破壊されているのが分かる。破壊のせん断応力 τ の値が小さな方の面に、金属間化合物に特有な菱形の組織(写真(b)の矢印)が多く観察された。金属間化合物の形成がサンプル接合層のせん断強度の値を小さくしているのが分かる。

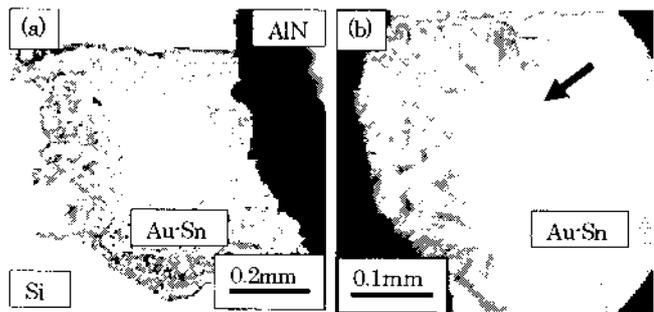


図3 破壊面の光学写真 (a) $\tau = 200\text{MPa}$ 面、(b) $\tau = 130\text{MPa}$ 面

3.4 XRD 分析

図4(a)(b)はXRD分析のプロファイルである。接合する前の(a)のプロファイルには、 2θ の角度が小さい方から金属のAuや金属間化合物の Au_5Sn とAuSnの強いピークが現れる。しかし、接合した後のせん断破壊面(b)のプロファイルではAuSnのピークが弱くなっている。報告済みのEPMA分析から明らかのように、接合の際に、PVD-Au-Sn接合層の上部と下部のPVD-Au/Pt/Ti多層膜からAuとPtが拡散し、Au-Sn共晶反応による金属間化合物の形成を抑制したと思われる。

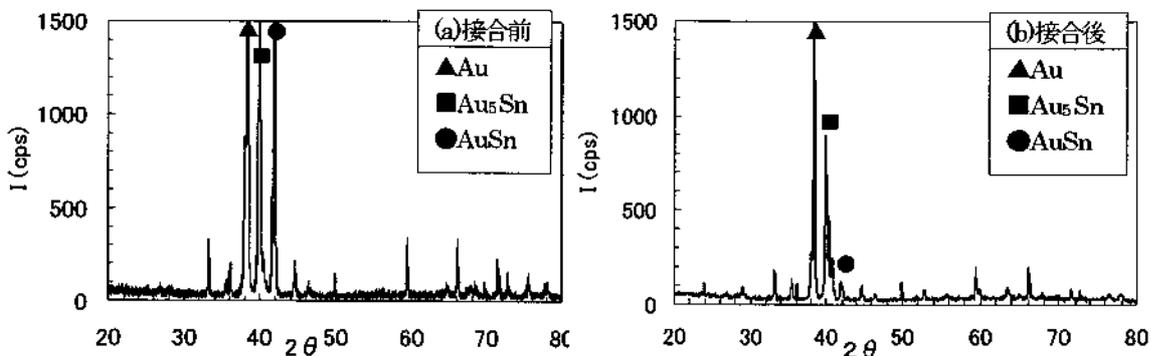


図4 XRD分析の結果 (a)接合する前サンプル数6個、(b)接合した後サンプル数5個

4. 研究成果報告

[1] 松原監壮, 黄木景二, 高雄善裕, 岡部永年, 電子部品マイクロ接合用はんだPVD-Au-Sn/Au/Pt/Tiの金属間化合物抑制機能, 表面技術協会第115回講演大会(2007).

5. 研究組織

研究代表者: 黄木景二, 所内世話人: 高雄善裕 (九州大学応用力学研究所)

6. 謝辞

本共同研究にあたって全面的に協力をしてくださいました九州大学応用力学研究所松原監壮氏に感謝いたします。

太陽電池用高品質バルク多結晶シリコン成長に関する研究

大下祥雄

豊田工業大学 半導体研究室

1. はじめに

近年、太陽電池生産量は急速な伸びを示しており(図1)、2005年度の生産量は1.7GWに至っている[1]。その中で、結晶シリコン太陽電池の生産量は太陽電池総生産量の90%以上を占めている。特に、多結晶シリコン太陽電池の比率は総生産量の60%であり、2030年における日本の総電力需要の10%を太陽電池で担うという目標を実現するには、基板材料である多結晶シリコンのさらなる品質向上やコスト低減が必須な状況にある。

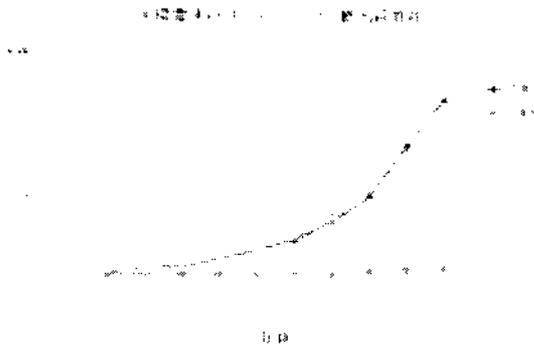


図1 太陽電池市場

一方、結晶シリコン太陽電池の生産量拡大に伴い、原料シリコンが不足する問題が生じている。原料の需給バランス改善には、今後数年を要すると予想されている。また、今後の市場拡大に対しては、従来の高純度原料のみでの対応は難しく、低品位原料を用いた太陽電池の製造が必要となると考えられる。

このような状況のもと、コスト低減、高効率化、原料不足への対応、などを目的として、単位発電量あたりのシリコン使用量の削減(図2)、すなわちシリコン結晶基板の薄型化が進められている。具体的には、将来において、50 μ m以下の極薄シリコン基板を用い、25%の高変換効率を有した太陽電池を実用化することが目標となっている。この目標を達成するには、1) 間接遷移型の半導体であるシリコン結晶において、入射した光を効率よく吸収させる、2) 少数キャリアの界面での再結合を抑制する、

3) 基板の機械的強度を上げる、4) 薄型基板のハンドリング技術の開発、など多くの技術課題が存在する。加えて、シリコン原料供給の観点からは、5) 低品位原料からの高品質結晶成長技術、の開発が重要である。

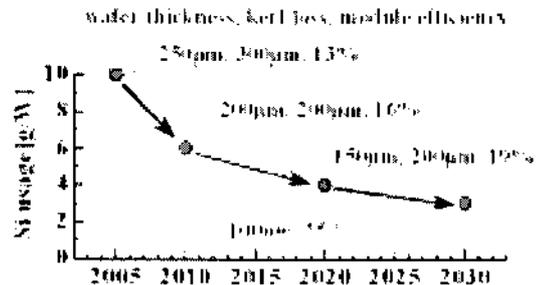


図2 極薄化による低シリコン消費の実現

多結晶シリコン太陽電池の変換効率向上を議論する上で最も重要な事項は、粒界そのものよりもむしろ、多結晶シリコン中に含まれる $5 \times 10^{14} \sim 8 \times 10^{16}$ atoms/cm³ 程度の鉄、結晶成長時の雰囲気から混入する $10^{17} \sim 10^{18}$ atoms/cm³ 程度の酸素ならびに $10^{17} \sim 10^{18}$ atoms/cm³ 程度の炭素、転移などの結晶欠陥、格子間シリコンや空孔などの点欠陥、ならびにそれらの複合体である。また、多結晶シリコンプロセス中に生じる、酸素析出、ゲッターリング、不純物拡散などは、多結晶シリコンの電気的特性に大きな影響を与える。それゆえ、多結晶シリコン太陽電池の変換効率を向上させるには、これら欠陥ならびに不純物が複合した複雑な欠陥構造、さらには、それらに与える多結晶シリコン太陽電池プロセスの影響を明らかにする必要がある。特に、先に述べたように原料の品質が低下した場合には、上記が原因となる結晶性の劣化の問題がより顕著に現れることが予想される。それゆえ、それら不純物が結晶成長やデバイスに与える影響を詳細に調べる必要がある。

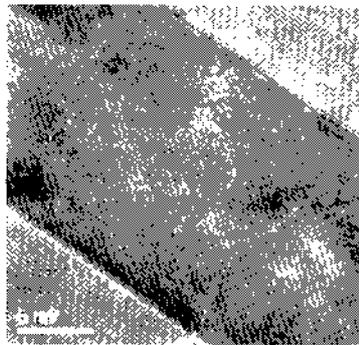
以上に述べたような状況において、資源量や信頼性などの観点から、結晶シリコン太陽電池に関する研究開発は以前にまして

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。

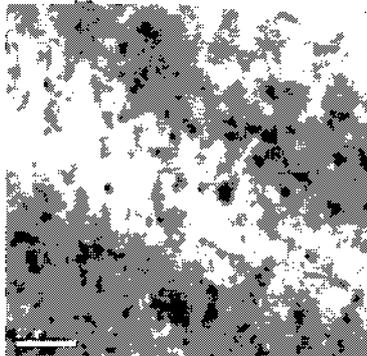
2. 多結晶シリコン

2-1: 結晶評価

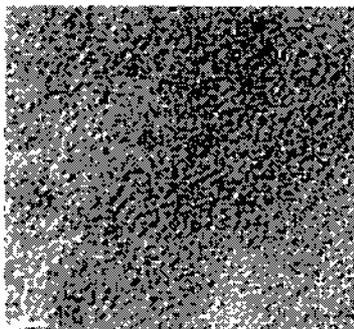
多結晶シリコンにおいては、粒界に加えて結晶欠陥が再結合中心として働く。これまでは、少数キャリア寿命を長くすることを目的として、粒径の拡大が図られてきた。その結果、p型半導体における少数キャリアである電子の拡散長と比較し、キャスト法で成長させた現在の多結晶シリコンの粒



(a)



(b)



(c)

図3 断面 TEM 像：結晶欠陥

径は十分に大きく、粒界よりも結晶欠陥が平均的なキャリア寿命を決定するに至っている。昨年度までの研究の結果、それら欠陥生成には結晶成長中に析出した炭化珪素が深く関与している可能性が高いこと、また、結晶成長後に固相中を拡散する鉄がそれら欠陥にトラップされ再結合中心となっている可能性があることなどが、実験ならびに九州大学におけるシミュレーションの結果から明らかになっている。

しかし、エッチングによりピットとして現れる欠陥の構造は明らかではなく、その構造、さらにはそれら欠陥が形成される理由を明らかにする必要がある。そこで現在、透過型電子顕微鏡(TEM)観察、Spring-8のSOR光を用いた鉄を中心とした XANES 測定ならびに炭素や酸素に関する IR 測定、PL 観察などにより欠陥構造の解明を進めている。

これまでに得られた TEM 像の一部を図3に示す。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(a)、それら転位の集合体(b)、非晶質に近い領域(c)、などが観測されている。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と考えている。

一方、キャスト法により成長させた多結晶シリコン中には、時には 10^{13} 個/cm³ を超える多くの鉄が含まれている。それら鉄のいくらかは結晶欠陥にトラップされ電氣的に悪影響を与えることが予想される。それらの多くは、結晶成長が終了した後、結晶の冷却時に固相中を拡散していることが九州大学柿本研究室のシミュレーションから明らかになっている。すなわち、太陽電池特性を向上させるには、欠陥構造に加え、結晶中のこれら鉄の分布とその電子状態を明らかにすることが重要である。これまでの XANES の測定等からは、特定の場所における鉄の偏析やその電子状態に関する情報が得られつつある[2]。また、PL 測定からは、先の TEM により観察された欠陥よりも大きな構造を有し、再結合中心として働く欠陥の存在が確認されている[3]。それら欠陥の低温 PL 測定では、いわゆる D ラインが観測され、再結合中心として働く欠陥の一部が、転位と鉄の複合欠陥である可能性が示唆されている。

2-2: 多結晶シリコン成長技術

結晶中の欠陥評価の結果、特定の領域に生じた析出物が原因となり、結晶欠陥が形成された可能性が高いことが示された。一方、キャスト法による結晶成長の実験では、成長速度が速い場合に、成長の後半で欠陥を多く含む微小結晶粒が形成された。また、結晶全体に渡り固溶限程度の格子位置炭素が存在するとともに、微小結晶粒が形成された領域では SiC の析出が観測された (図 4)。

以上の結果から、欠陥形成の原因として次の可能性が考えられる。キャスト法による結晶成長時においては、融液中には多くの炭素原子が存在する。結晶成長に伴い、固液界面近傍の融液側の炭素濃度は偏析により上昇する。その結果、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し、最終的に SiC の析出が生じた。



図 4 EDS 像 : SiC の析出

融液中の炭素による組成的過冷却が、SiC を析出させ結晶性が劣化させた原因である可能性を確認するため、次の成長を試みた。最初に、ヒーターを上昇させてある程度結晶を成長させた後、再度ヒーターを下方に移動させて成長した結晶の一部を再度融解させ、固液界面近傍の炭素濃度を低下させる。以上のことを繰り返して結晶を成長さ

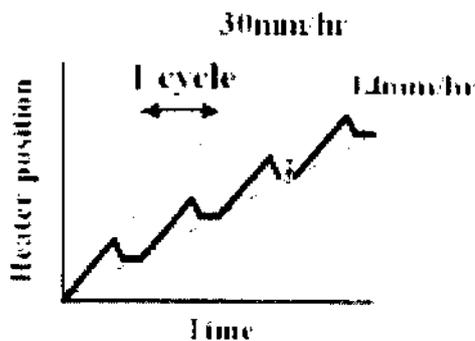


図 5 Growth-Remelt-Cycle (GRC) 法

大きな結晶粒 Top

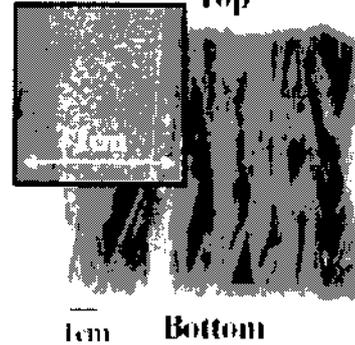


図 6 GRC 法により成長させたインゴット

せた (GRC 法 : 図 5)。その結果、微小結晶粒の発生が抑制され、粒径の大きな結晶が成長した (図 6)。

以上の欠陥評価ならびに結晶成長実験の結果から、結晶性が劣化する理由の一つが、組成的過冷却による SiC の析出である可能性が示された。しかし、熱勾配に加えて、結晶方位や欠陥など他の因子が、局所的な過冷却に与える影響は明らかではない。今後結晶成長過程をより明らかにし、高品質な結晶成長技術の実現を目指す。

3. まとめ

実験ならびにシミュレーションの結果から、固液界面近傍における過冷却状態が結晶性を劣化させている可能性が示された。具体的には、融液中に多く含まれる炭素が固液界面近傍で析出し、それが結晶欠陥発生の原因となっている可能性が高い。そこで新たに GRC 法開発し結晶性が改善できることを示した。

今後、現在進めている九州大学との共同研究をさらに深め、将来における高効率・低コスト結晶シリコン太陽電池の実現を目指す。

謝辞

本共同利用研究の機会を与您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。

参考文献

- [1] PV News, Vol. 25 (No. 3), (2006)
- [2] K. Arafune, E. Ohishi, H. Sai, Y. Terada, Y. Ohshita, and M. Yamaguchi, Jpn. J. Appl. Phys., **45**(8A) (2006) 6153.
- [3] H. Sugimoto, M. Inoue, M. Tajima, A. Ogura, and Y. Ohshita, Jpn. J. Appl. Phys., **45**(25) (2006) L641.

レーザー誘起衝撃波の医療応用に関する破壊力学的検討

豊橋技術科学大学 鈴木新一

1. 研究の背景と目的

近年、体内結石の治療には、水中衝撃波による結石の破砕が用いられている。この方法は、パルス放電、ピエゾ素子などにより発生した水中衝撃波を体内の結石に集束して破砕するものであり、手術なしに治療できる特長をもつ。しかし、実際の治療においては、衝撃波が周辺臓器に損傷を与える問題があり、その解決が必要である。

衝撃波が周辺臓器を損傷する力学的機構は、未だ十分には明らかでないが、損傷を低減する方策がいくつか考えられている。そのひとつに、擬似位相共役衝撃波の方法がある。

衝撃波による結石の破砕治療では、結石に向かって集束する球面衝撃波を体外から入射する。しかし、人体には脂肪や筋肉など、音速の異なる組織が存在するため、異なる方向から入射した衝撃波は、結石に同時には到達しない。そのため、結石に加えられる衝撃力が低下し、効果的な結石破砕に繋がっていないのではないかと指摘されている。

この問題を解決するための方法のひとつとして、筆者らは、レーザー誘起衝撃波を用い、体内の音速分布に合わせて衝撃波の波面をあらかじめ変形させる方法（擬似位相共役法）を提案している。

本研究では、円筒凹面にパルスレーザー光を照射し、円筒中心軸に向かって集束する衝撃波を発生させる。発生した衝撃波をシャドウグラフ法で可視化し、集束衝撃波の圧力波形を測定する。また、得られた圧力波形を、破壊力学的観点から検討する。

2. レーザー誘起水中集束衝撃波

図1に示すように、多数の薄い金属板を積層し、その薄板をスライドすることにより、積層版の端面を円筒形にする。したがって、円筒面は、階段状の段差から構成されている。この積層版を水中に設置し、円筒面にパルスレーザー光を照射する。レーザー光は円筒表面で吸収され、表面近傍の水と固体を瞬間的に加熱する。瞬間的な加熱による体積膨張の結果、水中には衝撃波が発生する。レーザー誘起衝撃波は、発生した固体表面と同じ形状を持ち、且つ、固体表面に直角な方向に伝播する。したがって、円筒凹面で発生した衝撃波は、円筒中心軸に向かって集束する。

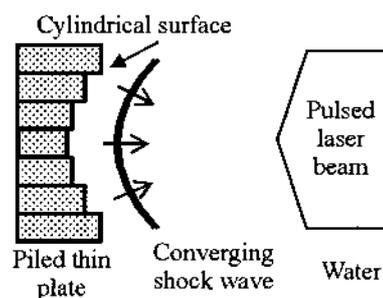


Fig. 1. Generation of laser induced cylindrical shock wave.

3. 衝撃波の可視化

レーザー誘起衝撃波のシャドウグラフ写真を図2に示す。図2(a)は、パルスレーザー照射から0.84μs後の写真である。写真中の左側に見える黒い部分が薄板で構成された円筒面である。薄板一枚々々から発生した円筒形の要素衝撃波の包絡線として円筒中心軸に集束する衝撃波が現れている。図2(b)は、衝撃波が円筒中心軸に集束した瞬間を示している。

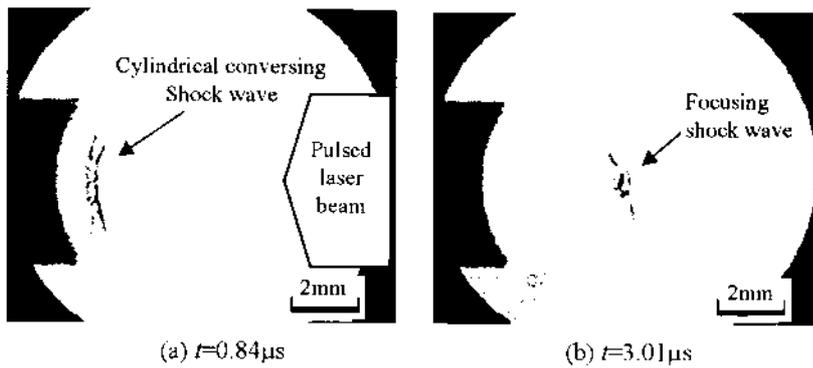


Fig. 2. Laser induced cylindrical shock wave.

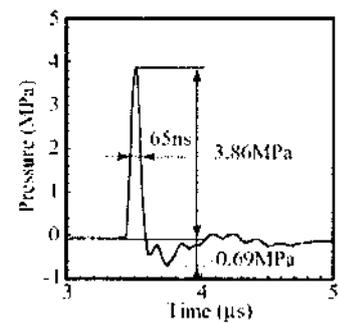


Fig. 3 Pressure of focusing laser induced cylindrical shock wave.

4. 集束衝撃波の圧力波形

レーザー誘起衝撃波が、円筒中心軸に集束したときの圧力波形を図3に示す。横軸は、パルスレーザー照射からの時間である。衝撃波の圧力波形は、正圧の部分と負圧の部分から構成されている。最初に正の圧力領域が到達し、その背後に負の圧力領域が現れる。正の圧力の半値幅は65nsであり、パルスレーザー光の半値幅30nsより長い。負の圧力の半値幅は、約200nsである。正の圧力の最大値は、負の圧力の最大値の約5.6倍大きい。

5. 破壊力学的検討と結論

レーザー誘起衝撃波の有効性： 図2からも明らかなように、レーザー誘起衝撃波の方法は、レーザー光が照射される固体表面と同じ形の波面を持つ衝撃波を発生させることが出来る。したがって、薄板をスライドさせることにより、任意形状の波面を持つ衝撃波を発生させることが出来る。これは擬位相共役法に適した方法であり、結石に強い衝撃力を付加することが可能である。

き裂分岐の発生： 固体材料に衝撃的に力が加わると、秒速数百m以上の高速で進展するき裂が発生することがある。き裂速度が十分速いとき、き裂は突然2つに分岐することが知られている。結石に強い衝撃力を負荷し、結石内部でき裂を分岐させることが出来れば、結石をより細かく破碎することが出来る。これにより、より効果的な治療に繋がる可能性がある。

インキュベーション時間仮説から反論： 図3に示すように、レーザー誘起衝撃波の半値幅は、65nsと短い。動的破壊力学におけるインキュベーション時間仮説は、衝撃力の持続時間が短くなるにつれて、より高い破壊応力が必要になることを主張する。これは、レーザー誘起衝撃波の場合、より強い衝撃力が要求されることを意味する。しかし、インキュベーション時間仮説の正当性は、未だ立証されていない。

6. 成果の公表

日本機械学会へ投稿準備中

7. 研究組織

研究代表者	鈴木新一	豊橋技術科学大学 機械システム工学系
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
研究協力者	森田康之	九州大学応用力学研究所 基礎力学部門 破壊力学分野

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

滑面の平板上に発達する乱流境界層は、カノニカルな流れ場の1つであり、従来から多くの研究対象となってきた。特に、平均速度プロファイル型（普遍速度分布）をめぐる論争は、依然として混沌としており明確な指標は得られていない。普遍速度分布を定める際には、物理量を摩擦速度と動粘性係数によって無次元化するが、そのためには壁面での摩擦応力の計測が不可欠となる。工学の分野では、Schoenherr と Karman が70年ほど前に独自に導いた半理論式（以降、KS式と略す）が広く用いられてきた[1]。しかし近年、測定技術の進歩に伴う精度の向上から、計測値はKS式との間に約5%の相違があることを報告している[2]。本研究では、Schoenherr がおこなった実験を再度ふりかえり、高精度の計測機器を用いることで、測定精度の改善を試みることを目的とする。

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5kg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3m×1m×0.03mで製作し、前縁は半楕円形（10:1）とした。平板Aは木製、平板Bはアルミ製（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2m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。

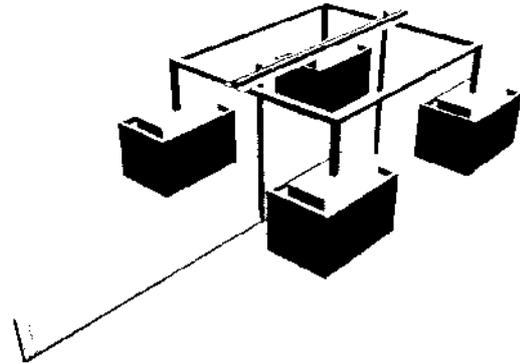


図1 平板及びフロート部、先端がロードセル

3. 結果及び考察

測定される全抗力には、平板の抗力のみならず、(a)造波抵抗、(b)粘性圧力抵抗（渦抵抗、剥離抵抗）、(c)トリッピングワイヤ抵抗、(d)自由表面抵抗などが含まれる。喫水深さ h における全抗力（測定値）を $F(h)$ とすると、曳航速度が一定の場合には、便宜的に

$$F(h) = F^*(h) + F_D(h) = F^*(h) + F_a(h) + F_b(h) + F_c(h) + F_d(h) \quad (1)$$

と表すことができる。ここで $F^*(h)$ は真の平板抗力であり、 $F_D(h)$ には(a)~(d)の抗力が含まれている。しかし、両者を明快に分離することは難しく、幾つかの試行錯誤の結果を以下にまとめる。

図2はトリッピングワイヤを設置しない場合の結果である。この状況では、平板先端から発達した層流境界層はある距離まで持続され、自然遷移を経て乱流となる。局所摩擦抵抗係数は、 $C_f = 0.455 / (\log Re)^{2.58} - A / Re$ と見積もられる。ここで、レイノルズ数 Re は平板長さ L と曳航速度 U に基づき計算され、 A は遷移位置に関するパラメータである。仮に造波抵抗（ F_a ）が喫水深さ h に依存しないとすると、異なる喫水での全抵抗力を引き算することにより、その影響をキャンセルすることがで

きる。従って、粘性圧力抵抗 (F_b) を軽減することによって真の抗力が計測できることになり、実験ではシャープエッジを平板後縁に取り付けて渦抵抗の軽減を試みた。比較のために Hughes による測定結果も載せた。両者とも理論式に傾向はよく一致している。

トリッピングワイヤを設置した場合には、測定される全抵抗にトリッピングワイヤによる抵抗 (F_c) が加わることになる。議論を複雑にしないために、シャープエッジを取り付けて粘性圧力抵抗 (F_b) の影響を無視できる場合について考える。つまり、測定される全抗力から F_a および F_c を精度よく除去できれば良いこととなる。いま、両者が独立で喫水深さに依存しないと仮定すると、 h を変えて全抗力を計測すれば、その差から真の抗力 $F^*(h)$ を得ることができる。しかし、この方法を試みた結果、局所摩擦抵抗係数は、レイノルズ数 Re が小さな場合には、K S 式や他の計測結果と同程度の一致を示すが、 Re 数が高く ($> 4 \times 10^6$) になると傾向が異なってくるのがわかった。これは、トリッピングワイヤ自身が自由表面に波をつくり、平板による造波抵抗 F_a と独立には扱えないためと考えられる。

薄い平板がつくる造波抵抗を見積もる方法として、Michell が考案した Thin Ship Theory がある [3]。この理論では幾つかの仮定が用いられているため、実測値とは定量的な一致は望めないが、定性的傾向は再現できると考えられている。トリッピングワイヤの抵抗に関しては、一様流中の円柱の抗力としてオーダーを見積もることが可能である。そこで、 F_a を Thin Ship Theory から見積もり、 F_c を円柱の抗力 (ただし、その定数 α 倍) として見積もることにより、真の抗力 $F^*(h)$ を計算した。レイノルズ数 Re が小さな場合には、 F_a と F_c を独立と仮定でき、その際にもとまる抵抗係数の値が一致するように、定数 α 倍を $\alpha = 0.6$ と定めた。局所摩擦抵抗係数を図 3 に示す。全ての計測結果が Osaka から、Osterlund らの計測結果に定量的にもよく一致していることがわかる。

最後に粘性圧力抵抗 F_b について考えたい。これは主に平板後縁でのカルマン渦の生成や剥離抵抗に起因していると考えている。平板後縁では、深さ方向に約 15cm 間隔で背面圧力を計測しているので、この値を用いて、 F_b を算出した結果を図 4 に示す (ただし、造波抵抗は、喫水を変えた計測から補正をおこなった)。シャープエッジを取り付けた場合と比較すると明らかなように、背面圧力の直接計測に基づく補正は十分な精度を補償しないことが分かる。

4. まとめ

平板抗力の計測にはフロートを用いた方法が有効である。平板後縁にはシャープエッジを取り付けることが不可欠であり、乱流への促進にはトリッピングワイヤを用いず、全抗力に加味されない方法で乱流遷移をおこなう必要がある。今後は、これらの点を踏まえ、平板をより軽量化して測定精度を向上させることを試みたい。

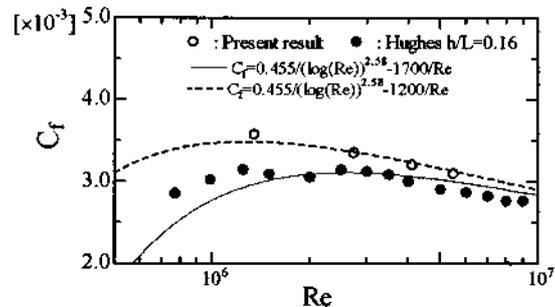


図 2 トリッピングワイヤを用いない場合の抵抗係数

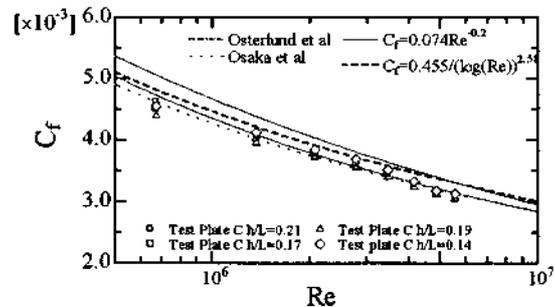


図 3 トリッピングワイヤを用いた場合の抵抗係数

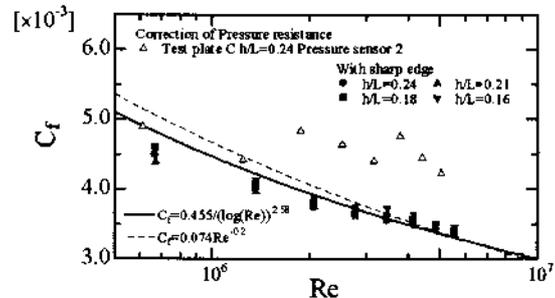


図 4 背面圧力補正とシャープエッジを取り付けた場合の比較

[1] Schoenherr, K. E., 1932, Resistance of Flat Surfaces Moving through a Fluid, Trans. Soc. N. A and M. E., 279-313
 [2] Hideo Osaka, Takatsugu Kameda, Shinsuke Mochizuki, 1996, Local Skin Friction Coefficient Evaluated by Direct Measurement Method and Mean Flow Quantities in a Turbulent Boundary layer, JSME Int. J. Fluids and Thermal Engineering, Series B, 138-145 [3] 柏木ノート、第 10 章定常造波抵抗理論 pp.302-370

人工関節とバイオメカニクス

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る。求められる機能とは無痛性、支持性、可動性と耐久性であろう。さらに安全で正確な手術が求められることは言うまでもない。

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

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

今回、昨年に引き続き、九州大学応用力学研究所研究集会「人工関節とバイオメカニクス」を開催できたことは感銘深いことである。研究集会開催に奔走いただいた東藤貢助教授はじめ遠方よりご参加いただいた各先生方に心より深謝申し上げます。

2. プログラム

開催日：2006 年 10 月 21 日（土）

会 場：全労済マルチビル天神ビル（福岡市）

10:00 開会の辞 佛淵孝夫（佐賀大学医学部）

セッション1 座長：東藤 貢（九州大学応用力学研究所）

(1) 10:10-10:25 「ツインリップカップの臨床成績」

馬渡正明（佐賀大学医学部）

(2) 10:25-10:40 「人工膝関節置換に関する有限要素法」

萩原世也（佐賀大学理工学部）、小木健一郎、東藤 貢（応力研）

長嶺隆二（片井整形外科病院）、佛淵孝夫（佐賀大学医学部）

(3) 10:40-10:55 「下肢の 3 次元力学モデルを用いた PS タイプおよび CR タイプ人工膝関節の接触状態解析」

坂口淳平（九大院）、勝原忠典、廣川俊二（九大工学研究院）、大月彩香

特別招待講演1 座長：村上輝夫（九大工学研究院）

(4) 11:15-11:45 「数値シミュレーションを用いた人工股関節周りの骨リモデリングに関する研究」

- 鄭 徳泳(国立医薬品食品衛生研究所), 姜 有峯(京都大学再生医
科学研究所), 山本貴士, 丘 進卿, 堤 定美
(5) 11:45-12:15 「人工膝関節の耐久性向上」
富田直秀(京都大学国際融合創造センター)

特別招待講演2 座長:佛淵孝夫(佐賀大学医学部)

- (6) 13:45-14:15 「膝関節形成術に対する生体力学的検討ーアライメント3次元評価法
開発の背景ー」
古賀良生(新潟こばり病院)
(7) 14:15-14:45 「人工股関節におけるカップネックインピンジメントまでの理論可動域と
その応用(至適 oscillation angle 大きさと至適カップネック設置位置に
ついて)」
吉峰史博(東京都保険医療公社大久保病院)

セッション2 座長:廣川俊二(九大工学研究院)

- (8) 15:05-15:25 「人工関節の高機能化とその実験室評価」
村上輝夫(九大工学研究院), 澤江義則, 中嶋和弘, 坂井伸朗
(9) 15:25-15:40 「局座標を用いた股関節可動域」
北島 将(佐賀大学医学部)
(10) 15:40-15:55 「内骨格型パワーアシストロボットの研究」
木口量夫(佐賀大学理工学部)

セッション3 座長:馬渡正明(佐賀大学医学部)

- (11) 16:15-16:30 「深屈曲可能な人工膝関節置換術の問題点」
長嶺隆二(片井整形外科病院), 東藤 貢(応力研)
(12) 16:30-16:45 「完全屈曲人工膝関節の研究」
井手衆哉(佐賀大学医学部)
(13) 16:45-17:00 「新型人工膝関節の深屈曲状態での応力解析」
東藤 貢(応力研), 井手衆哉(佐賀大学医学部), 宮崎真樹
伊藤 純, 佛淵孝夫

17:00 閉会の辞 東藤 貢(応力研)

3. 講演の概要

(1) 「ツインリップカップの臨床成績」 馬渡正明

人工股関節の臨床状況, 脱臼, 可動域を拡大した新しいデザインのカップであるツインリップカ
ップの開発とその臨床応用について説明があった。

(2) 「人工膝関節置換に関する有限要素法」 萩原世也

人工膝関節全置換術による人工膝関節装着の影響を知るために, 医療用 X 線 CT 画像から3
次元膝関節有限要素モデルを作成し, 有限要素解析を行い, 生体骨における応力分布の違いを
確認した。また, 人工膝関節内の応力分布も求めた。人工膝関節挿入後の骨リモデリング挙動をシ
ミュレートするため, 汎用有限要素解析コード MSC.MARC に成長ひずみ解析を組み込むためのユ
ーザーサブルーチンを作成した。

(3) 「下肢の3次元力学モデルを用いたPSタイプおよびCRタイプ人工膝関節の接触状態 解析」 坂口淳平

大腿・膝蓋ー脛骨関節を一体とした人工関節置換膝の3次元力学モデルを構築した。このモデ
ルは, これまでのモデルにみられたような膝蓋骨の省略や関節面形状の単純化などを行わない厳
密なものであるため, 関節コンポーネント間の過大な前後移動, 以上回旋運動, 内外側接触面の片

当たりやリフトオフなどの現象も取り扱うことができる。今後はこのモデルを用いてシミュレーション解析を行い、種々の人工膝関節タイプと歩行条件の組み合わせの下で、人工膝関節の運動形態や関節面接触状態などを定量的に求める予定である。

(4) 「数値シミュレーションを用いた人工股関節周りの骨リモデリングに関する研究」

鄭 徳泳

人工股関節埋入後における問題点の一つとして、人工関節の固定が不安定となり、部材が動揺する「ゆるみ」現象、あるいはステムやカップが本来の埋入位置から「移動」する現象があげられる。これらは人工股関節と生体骨との力学的特性の違いによる力学的不適合や、人工股関節の不適切な埋入位置による応力集中などに起因する応力分布状態の変化によって、骨の形状や構造が変化したために生じる。こうした問題を解決するためには、まず人工股関節周辺での応力分布状態を知ることが重要である。しかし、生体内に発生する応力の実測は不可能であるので、有限要素解析法などによる数値計算を用いた応力分布解析が有効な手段となる。さらに、「ゆるみ」や「移動」現象は応力変化に伴う骨の経時的な形状・構造変化の結果であるため、応力の変化に伴う骨の変形過程を考慮したシミュレーションが必要となる。しかし、これまでの技術では単純な応力分布状態について計算するだけであった。そこで我々は骨吸収にとまなう「ゆるみ」や「移動」現象を再現し、影響を及ぼす人工関節の力学的設計パラメータを明らかにするために、骨の力学的適応変形(リモデリング)を考慮した、リモデリングシミュレーション技術を開発した。

(5) 「人工膝関節の耐久性向上」 富田直秀

人工関節置換後の関節運動は、かなりの程度の動揺性、つまり「がた」を有している。その動揺性の範囲が実際の患者の日常生活に不便を来さないとしても、人工関節の耐久性には重大な影響を与え得る。また、人工膝関節の可動域の議論でも、この動揺性の問題を無視することはできない。動揺性を考慮しなくてもいいのであれば、人工膝関節の可動域は思いのまま広げることができるはずである。本講演では、キネマティクスの原点に戻って、動揺性といった視点から人工膝関節のデザインを捉えなおし、また最後に、ビタミンE含有のポリエチレンが、デラミネーション破壊のみならず、人工膝関節の磨耗特性も改善する知見が得られたので、これを紹介する。

(6) 「膝関節形成術に対する生体力学的検討ーアライメント3次元評価法開発の背景ー」

古賀良生

人工関節置換術が登場して半世紀になろうとしている。膝関節において人工関節はデザインや蝶番型など機構の変遷を経て semi-constrain type が一般化し、20年生存率も90%を超える報告もでて、外科手術として最も成功した治療法と評価されている。しかし、この間の発展において耐久性向上の検討は、デザイン、金属や骨セメントの問題を始め、術後臨床例の問題点解決という形で進んできた。設置位置が耐久性に、軟部組織緊張や表面形状が機能に影響することも臨床検討から指摘され、それらの課題を後に生体力学的検討が行われることが多かった。下肢アライメントの3次元評価法の開発を開始し15年以上経過し、商品実用化に至った。この研究開発の背景と言及について報告を行う。

(7) 「人工股関節におけるカップネックインピンジメントまでの理論可動域とその応用 (至適 oscillation angle 大きさと至適カップネック設置位置について)」

吉峰史博

本講演では、理論的可動域の算出数式の作成、各ネック前捻角におけるカップ至摘設置位置範囲の作成、oscillation angle がカップセーフゾーンに及ぼす影響、カップ前捻角とネック前捻角の至摘組み合わせ、oscillation angle の大きさとヘッド径、ネック径、回転中心位置との関係について発表を行う。

(8) 「人工関節の高機能化とその実験室評価」 村上輝夫

超高齢化社会への接近に際して、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。たとえば、変形性関節症や関節リウマチが進行し、歩行等が困難となり疼痛が強くなった場合には、人工関節置換術が適用される。近年では、人工股関節、人工骨董、人工膝関節を主体

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通という恩恵が得られている。寝たきり状態から自分で活動できる状態になると、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。しかし、特に微小な磨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磨耗特性の適正な評価と低磨耗・低摩擦化が要望されている。本講演では、人工関節における摩擦磨耗の問題点やそれらの問題解決のための高機能化、およびその実験室評価について概説する。

(9) 「局座標を用いた股関節可動域」 北島 将

カップインピンジメントまでの理論上の股関節可動域(理論的 ROM)を算出するために、極座標の考え方を用いて算出することを試みた。本講演では、その算出法の概略について講演する。

(10) 「内骨格型パワーアシストロボットの研究」 木口量夫

筋力が衰えた高齢者や障害者等の日常生活での活動を維持するため、体内に直接埋め込み、体の内側から動作を補助する2自由度の内骨格型パワーアシストロボットを提案する。内骨格型パワーアシストロボットは、基本的には人工関節として用いられることから、動力付人工関節、あるいは次世代型人工関節として位置づけられ、装着者の意思通りの動作補助を行うものである。動作ロボットシステムとしての基本的な原理は、これまで研究を進めてきた日常生活補助用あるいはリハビリテーション補助用の外骨格型パワーアシストロボットと同じである。

本報では、装着者の肘の屈伸運動と前腕部の回内外運動を補助する2自由度の内骨格型パワーアシストロボットを提案する。

(11) 「深屈曲可能な人工膝関節置換術の問題点」 長嶺隆二

PS型TKAにおいて、コンポーネントのデザインの進歩に伴い深屈曲を獲得することが可能となってきた。しかし、深屈曲が可能のために逆に出現してきた問題点も多数存在する。それらの多くは依然、解決するための方法や手段が確立されていないものもある。本研究では、手術手技とコンポーネントのデザインに関して4つの研究を行った。

(12) 「完全屈曲人工膝関節の研究」 井手衆哉

In the present study, three different kinds of mechanical analyses such as 3D model analysis of lower limb, motion analysis of cadaveric knee and finite element analysis are combined to understand the mechanics of the newly developed joint, and the problems found through those analyses are thoroughly examined to accomplish clinical application of the knee joint.

(13) 「新型人工膝関節の深屈曲状態での応力解析」 東藤 貢

現在臨床応用されている人工膝関節のほとんどは屈曲角度に制限があるため、日本人の生活様式たとえば畳の上への着座や和式トイレなどには適応しない。したがって、TKA後も和式の生活に適応するためには、さらなる屈曲角度を実現する新しいデザインの人工膝関節が必要不可欠である。このような背景の下、佐賀大学医学部整形外科を中心とした我々研究グループは、完全屈曲を目指した新型人工膝関節の研究開発を進めている。本研究では、我々が提案する新型モデルの3D-CADデータからFEM解析モデルを構築し、0度から135度の深屈曲状態までの応力解析を行った。得られた結果より、特に脛骨インサートの応力状態について考察した。

4. あとがき

本研究集会は、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、今年度で2回目を迎えた。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13件の講演があった。参加者も講演者を含め大学、病院、企業より合計45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。

(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

生体-バイオマテリアル界面（インターフェース）におけるマテリアルサイエンス、生物学、力学の連携を図ることで、自己組織化能、生体力学適応能、生体応答制御能を具備した高機能インターフェースに関する新たな学問領域を創出し、口腔、生体の精緻な形態と機能の新たな創建設法開発に資するための3分野3研究機関、すなわち、東北大学金属材料研究所生体材料グループ、東北大学歯学研究科口腔健康科学グループ、九州大学応用力学研究所生体工学グループによる研究集会を開催する。

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っている。

なお、本共同利用研究集会は当初平成19年3月福岡で開催する予定であった。しかし、この研究集会に関連の深い口腔健康科学に関する国際シンポジウムが2月18日午後から19日にかけて仙台市国際センターで開催されることになったので、これに合わせ、2月17日から18日にかけて、東北大学歯学研究科で開催した。報告内容の概要を示す。

2. 講演概要

1. ECRプラズマ酸化法による酸化チタン被膜上へのOCP誘導

佐々木啓一、折居雄介、増本 博*、鈴木 治**、本田義知**、穴田貴久**、後藤 孝*
(東北大学 大学院歯学研究科口腔システム補綴学分野、*金属材料研究所 **大学院歯学研究科顎口腔機能創建学分野)

金属チタンは、生体適合性や機械特性に優れていることから、インプラント材料として歯科、整形外科で用いられている。チタンの具備する生体適合性、オッセオインテグレーション能は、チタンの表面酸化膜（酸化チタン (TiO₂) 膜) の性質に負うところが大きであると考えられている。

しかしチタン、チタン合金と酸化チタンの熱膨張率は大きく異なるため、チタン材料表面へ優れた特性を有する酸化チタン膜を作製するには、プロセス温度を低下させる必要がある。

電子サイクロトロン共鳴 (ECR: Electron Cyclotron Resonance) プラズマは、他のプラズマに比べてプラズマ密度や電子温度が高い高活性なプラズマであるため、チタン材料上への低温での酸化チタン膜生成を期待できる。本研究では、チタン基板の ECR プラズマ酸化を行い、その酸化条件と結晶構造および石灰化能との関係を検索した。

2. 歯科CAD/CAM 用チタン合金の開発

菊地聖史 (東北大学 大学院歯学研究科歯科生体材料学分野)

チタンの歯科鑄造には表面硬化層の形成や鑄造欠陥の発生など、完全には解決し難い問題が残されている。そのため最近では歯科CAD/CAM システムによる機械加工も行われるようになってきたが、チタンは代表的な難削材であり、長い加工時間や短い工具寿命が問題となっている。また強さの面でも純チタンは大型のブリッジのように大きな力が加わる用途には不十分である。工業用快削合金は基本となる金属にほとんど固溶しないような元素 (快削添加物) を細かく分散させることで機械加工性を向上させ、機械的性質との両立も図っている。本研究では安全性や耐食性などの点から従

来の快削合金のような快削添加物を用いず、代わりにチタンを合金化して脆性相を適度に析出させることで機械加工性に優れた新しい歯科用チタン合金を開発できないか試みている。

今までチタンに様々なβ安定化元素を添加した合金をアルゴンアーク溶解炉で試作し、歯科用として様々な評価を行ってきた。その結果、いくつかの組成で機械加工性と機械的性質が純チタンより優れていることが明らかになってきた。ここではTi-Ag合金について紹介する。

3. リン酸オクタカルシウム (OCP) の骨芽細胞分化促進能

穴田貴久¹、本田義知¹、鎌倉慎治²、佐々木啓一³、鈴木治¹

(¹東北大学 大学院歯学研究科顎口腔機能創建学分野、²医学研究科創生応用医学研究センター
³歯学研究科口腔システム補綴学分野)

リン酸オクタカルシウム (OCP: $\text{Ca}_8\text{H}_2(\text{PO}_4)_6 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) はヒドロキシアパタイト (HA: $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) 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。OCPは生理的pHにおいて熱力学的に不安定で、HAへ不可逆的に加水分解(転換)する傾向がある。私たちは、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⁽¹⁻³⁾。OCPは生体内および培地中でHAに転換することや^(1,3)、OCPとコラーゲン(CoI)との複合体(OCP/CoI)による骨再生においても、OCP-HA転換が認められることがわかった⁽⁴⁾。今回、OCPの骨再生能を明らかにする目的で、骨再生材料として臨床応用されているHAセラミックスとの比較で、培養骨芽細胞による細胞増殖能・分化能を検討した。また、骨再生においてOCP-HA転換が重要と考えられることから、OCPをコラーゲン(CoI)に析出させたOCP/CoIにおける結晶転換を検討した。

4. MOCVDによる生体適合セラミックスコーティングの作製

後藤孝、佐藤充孝、塗溶(東北大学 金属材料研究所)

TiおよびTi合金は高い生体適合性や加工性、優れた機械特性を有することから、医療分野において人工歯根や人工骨などのインプラント材料として広く使用されている。近年、セラミックス材料が持つ骨伝導能の高さを生かし、インプラントの生体適合性をさらに高めるためにセラミックスコーティングに関する研究が数多く行われている。しかし有機金属化学気相析出(MOCVD)法を用いた生体適合性セラミックス膜の作製例はない。本研究ではMOCVD法を用いてCaTiO₃膜を始めとするCa含有セラミックス膜を合成し、微細組織、成膜速度に及ぼす成膜条件の影響および疑似体液溶液中でのヒドロキシアパタイト(HAp)の生成の様子を調べた。

5. Metal-on-metal wear behavior in biological environment of high carbon cast and low carbon forged Co-29Cr-6Mo alloys

Akihiko Chiba, IMR, Tohoku University

Cobalt chromium molybdenum (cobalt chrome or CoCr) alloys are widely used as implant materials such as hip and knee prosthesis due to their excellent corrosion and wear resistance as well as their good mechanical properties. Although the use of the CoCr/UHMWPE bearing couple has provided consistent results in total hip arthroplasties, wear of the UHMWPE component is a major obstacle limiting the longevity of these reconstructions. There is renewed interest in metal-on-metal (MOM) bearings in view of their potential for greatly improved wear performance. There are at least two possibilities for establishing the CoCr/CoCr MOM bearing couples with the greatest wear resistance; one is the couple of the low carbon forged CoCrMo with itself and the other is one of the high carbon forged CoCrMo with itself. Thus the aim of the present investigation is to reveal the wear behavior of the MOM pairings of the obtained forged CoCrMo alloy with fine-grained structure and without carbon addition in comparison with a high carbon commercial cast CoCrMo alloy (standardized ASTM F75).

6. 生体用β型Ti-Nb-Ta-Zr系合金の表面活性化処理と力学的特性

新家光雄(東北大学 金属材料研究所)

生体用Ti-29Nb-13Ta-4.6Zr (TNTZ)合金は溶体化処理状態において約60GPaの低弾性率を示し、加工熱処理によって強度・延性バランスを比較的容易に制御可能であり、さらに細胞毒性が他の生体用金属材料と比較して極めて低いことが実証されている¹⁾。しかし、生体適合性が他の生体用金属材料と比較して良好とされるTNTZ合金においても、骨に対して生体活性を得るためには表面処理等によるさらなる生体適合性の向上が必要と考えられる。現在、TNTZ合金表面へリン酸カルシウム系ガラスを塗布後、大気中にて1000K以上の温度で焼成することにより、その表面にリン酸カルシウ

ム結晶化ガラスを強固に接合させるディップコーティング処理が研究されている²⁾。しかし、同処理に含まれる焼成工程では、試料が大気中にてTNTZ合金の通常の溶体化温度(1063K)以上に加熱され長時間保持されるため、本合金の機械的性質の低下が懸念される。したがって、コーティング処理後に時効処理等による機械的性質の改善が必要であると考えられる。

そこで、本研究では、リン酸カルシウム結晶化ガラスコーティングした生体用Ti-29Nb-13Ta-4.6Zr合金の力学的特性を調査し、特に疲労特性に及ぼすコーティング処理の影響について調査・検討した。

7. 個々の患者の下顎骨に対する応力解析方法についての研究

高雄善裕、*高橋純平、**寺嶋雅彦、汪 文学、**中島昭彦
(九州大学 応用力学研究所、*工学府大学院、**歯学研究院)

近年、先天異常や顎変形症等の下顎の不全を訴える患者数が増加し、治療の際に様々な困難な対応が必要となってきている。顎矯正手術では顎骨の平行移動および回転が組み合わさった複雑な移動が行われるため、術後に問題が起きることがある。そのため、診断、治療方針の決定の際に3次元的な顎骨の形態把握の必要性が高まってきている。特に、術後の下顎骨に発生する咀嚼時応力状態の予測は2次的な合併症を防ぐために重要である。

ここでは、個々の患者の解析モデルを比較的短時間に市販の解析コードを使用し比較的高速なPCで解析できることが求められている。そこで、頭部下顎の有限要素解析モデルを個々の患者について短時間で作成するシステムを作り、下顎骨の外科手術の力学的支援を行おうと考えた。本研究では、下顎骨の組織に準じた要素数の少ない有限要素基本モデルを作成し応力解析を行い、また、この基本モデルを変形させることにより複数患者の下顎骨有限要素モデルを再現する変形アルゴリズムを確立する。

8. Nano-whisker Reinforced Glass Ceramics for Artificial Tooth

Wen-Xue Wang, Yoshihiro Takao, Terutake Matsubara, and Shin-ichi Ukon*
RIAM, Kyushu University, *Fukuoka Dental College

A hand made ceramics used for the tooth crown and worked by a dental technician, that is practically a glass ceramic crown, is reinforced by white whiskers $9Al_2O_3 \cdot 2B_2O_3$ in an ordinal dental furnace at $930^\circ C$ under between atmospheric and 29mmHg pressure. Stiffness, strength and melting points of the matrix and whisker are 35GPa, 85MPa, $1500^\circ C$ and 400GPa, 8GPa, $1440^\circ C$, respectively. The resulted products are investigated by the use of SEM, EPMA, hardness tester and testing machine for various whisker weight fractions. A slight increase of stiffness and a moderate one in toughness are observed, though the strength increase is not detected. The reinforcement does not give serious damage if the weight fraction is less than 10%.

9. 歯科インプラント埋入下顎骨の3次元モデルの構築と応力解析

東藤 貢、*入江皓平、**松下恭之、**古谷野潔
(九州大学 応用力学研究所、*総合理工学府大学院、**歯学研究院)

近年、天然歯を失った場合の新たな治療法としてインプラント治療が注目を浴びている。また、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。このような治療法において、インプラントの埋入位置や長さ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を知ることは臨床的にも大変重要であるが、そのような観点からの研究は少ないのが現状である。また、有限要素法を応用した応力解析も一部行われているものの、簡略化したモデルを用いた解析がほとんどである。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モデルを構築しインプラント解析へ応用することを目的として、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。次に、前述の下顎骨モデルに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物を装着したオール・オン4を模擬したFEAモデルを構築した。実際の下顎骨に即した境界条件を設定し応力解析を行うことで、インプラント、補綴物および下顎骨について力学的検証を行った。

10. 咬合時における歯周組織の変形解析

森田康之、*内野正和、東藤 貢、**松下恭之、新川和夫、**古谷野潔

(九州大学 応用力学研究所、**歯学研究院、*福岡県工業技術センター)

咬合時における歯周組織の変位・変形動態の解明は、歯科医学分野において大きな研究テーマの一つであり、古くから行われている。しかしながら現状では、実際の生体歯周組織を使用する場合

には、レーザー変位計等で歯牙の局所的な変位量およびひずみを求めることを目的とした一点計測、あるいは多点計測の場合には、歯周組織を高分子材料によりモデル化し、従来の実験力学的手法により測定が行われているのみであり、咬合解析に十分な情報量とは言い難い。すなわち、実際の歯周組織を使用し、全視野で変位・変形動態の可視化を行う必要がある。そこで本研究では、可及的に生体歯に近い状態を実現するため、数日前に食肉用としてと畜されたブタの下顎骨を使用した。下顎骨から歯周組織の薄片を採取し、咬合試験を行うことによりその変位・変形様態を可視化した。計測手法にはデジタル画像相関法を使用した。結果として、咬合時における歯周組織の変位・変形過程を可視化した。また同一の試験片において、試験片が乾燥後、同様の咬合試験において生体歯と変位分布が大きく異なることを示し、咬合時における歯根膜の働きの重要性を示した。

3. まとめ

高機能バイオマテリアル-生体インターフェースの創製に関する第1回目の研究集会であり、3研究機関からそれぞれ3件、3件、4件の講演発表があり、異分野間の活発な討論が行われた。各研究の詳細は平成19年3月発行予定の応用力学研究所研究集会講演論文集 18ME-S2「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」をご覧ください。平成19年度は平成19年秋に、同様の2回目の研究集会を開催したいと考えている。

高分子固体のメカニクス

研究代表者
金沢大学 新田晃平

1. はじめに

いまや高分子材料は様々な分野で利用されており、種々多様な力学環境下で使用されている。したがって、各種高分子材料の力学的挙動を実験的あるいは理論的に解明することが重要である。本研究集会では、高分子固体の力学に関する研究分野で活躍している研究者が一堂に介し、研究の最新動向について紹介し、議論を通じて今後の研究の方向性を見出すことを目的とした。

なお、本研究集会は、九州大学筑紫キャンパスで開催された第54回レオロジー討論会の1セッションとして行われた。レオロジー討論会の実行委員長であられる先導物質化学研究所の高原淳教授、実行委員の先生方ならびに関係者各位に謝意を表す。

2. プログラム

実施日：2006年10月5日（木）

会場：九州大学筑紫キャンパス総理工講義室

セッション1 9:30-10:45 座長：東藤 貢（応力研）

- (1) 「結晶性ポリマーの階層性に基づく構造と変形のモデル化とその応用」
内田 真（岡山工大）、富田佳宏（神戸工大）
- (2) 「球状ドメインを有するブロック共重合体の力学的性質への流動履歴の影響」
長谷川 聡（九大院総理工）、高野敦志（名古屋大院工）、松下裕秀
高橋良彰（九大院総理工）
- (3) 「延性高分子材料の弾塑性構成式」
佐野村幸夫（玉川工大）

セッション2 10:45-12:00 座長：内田 真（岡山大）

- (4) 「結晶性高分子における Poisson's ratio のひずみ依存性」
山名真佐宏（金沢大院自然）、新田晃平
- (5) 「ガラス転移点近傍における環状ポリオレフィン系材料の力学特性」
久野忠昭（金沢大院自然）、河村幸伸、新田晃平
- (6) 「分子鎖すべりモデルと自由体積変化に基づく非弾性応答則を用いた非晶性ポリマーの大変形 FEM 解析」
灘 裕統（慶応大理工）、志澤一之

セッション3 13:00-13:50 座長：新田晃平（金沢大）

- (7) 「ポリ L 乳酸の力学特性に及ぼすリジントリイソシアネート添加の影響」
高山 哲生（九大院総理工）、東藤 貢（九大応力研）、新川和夫
- (8) 「ポリ L 乳酸の破壊メカニズムに及ぼす延性生分解性樹脂のブレンドの影響」
原田亜矢子（九大院総理工）、東藤 貢（九大応力研）、新川和夫

セッション4 13:50-15:05 座長：志澤一之（慶応大）

- (9) 「変形下におけるポリイソプレンゴムの動的粘弾性[II]」
宮本嘉久（京都大人環）、田口 健、関本 謙（Paris 第7大 MSC）
- (10) 「エポキシ/CTBN 反応ブレンドによるエネルギー吸収樹脂設計」
岸 肇（兵庫県立大院工）、長尾厚史、小林友作、松田 聡、浅見敏彦、村上 惇

- (11)「ポリシアノビフェニルアクリレートのエンタルピー緩和：活性化エネルギーに対する分子量の影響」
田中 穰（福井大工）

3. 講演概要

(1)「結晶性ポリマーの階層性に基づく構造と変形のモデル化とその応用」内田 真

軽量かつ成形性に優れるポリマー材料の構造部材としての用途をさらに拡大するためにはその力学特性を適切に評価することが不可欠である。ポリマー材料は一般的に非晶性と結晶性に分類できる。これまで、分子鎖が秩序構造を持たない非晶性ポリマー、あるいはそのブレンド材の変形挙動に関する研究が数多くなされてきた。一方、結晶性ポリマーは非常に複雑な階層構造を有しており、その取り扱いが困難なため、解析的な研究としては、主として巨視的に平均化された変形応答の解明に焦点が置かれていた。

本研究では、均質化法に基づく有限要素法を用いて結晶性ポリマーのミクロおよびメゾ領域の構造と変形を表現可能なマルチスケールモデルを構築し、その変形挙動を解明することを目的としている。本稿では、結晶性ポリマーのメゾ領域に存在するラメラが放射状に成長した球晶の変形挙動、および材料の耐衝撃性を向上させるために軟質なゴム粒子を充填したゴム/結晶性ポリマーブレンド材の変形挙動を評価する。

(2)「球状ドメインを有するブロック共重合体の力学的性質への流動履歴の影響」

長谷川 聡

ポリスチレン-ポリイソプレン-ポリスチレントリブロック共重合体 (SIS) などの ABA 型トリブロック共重合体は工業的に広く用いられている。ABA 型トリブロック共重合体はミクロ相分離構造をとり、A/B の比率によって、球、シリンダー、ラメラといった構造を示す。ABA 型トリブロック共重合体の B 分子鎖は両末端が異なる A ドメインに固定されているブリッジ構造と両末端が同じ A ドメインに固定されているループ構造をとり、その割合は誘電率測定および引張測定などを行うことで定量されてきた。

本研究では、ずりを印加した SIS フィルムをずりに対して平行および垂直方向で引張測定することにより、ずり流動が SIS の構造に与える影響について考察した。

(3)「延性高分子材料の弾塑性構成式」佐野村幸夫

プラスチックは押出加工することによって、押出方向の剛性と強度が著しく改善される。このような押出材料の異方弾性定数は横等方性となる。また、延伸フィルム成形、延伸ブロー成形のように、2 軸の延伸変形を成形の際に付与して、成形品の力学的性質を向上させている。

本研究では、有理連続体力学理論に基づいて、延伸材料の弾塑性構成式を定式化する。まず、延伸高分子材料の異方弾性を予測する理論の概要を説明する。続いて、延伸高分子材料の塑性構成式を導出する。

(4)「結晶性高分子における Poisson's ratio のひずみ依存性」山名真佐宏

結晶性高分子は、延伸過程中に生じるくびれを伴う不均一変形を示す。変形過程中における寸法変化から算出されるポアソン比を評価することは、不均一変形を伴う力学的非線形挙動を理解する上で非常に重要になる。本研究では、一軸延伸過程中で生じる寸法不安定領域におけるポアソン比を精密に測定し、不均一変形がおよぼす応力-ひずみ挙動への影響について検討した。さらに、3 次元寸法測定の結果より、結晶性高分子について、一軸延伸過程中における不均一変形下での真応力の値を算出し、力学的非線形性について検討した。

(5)「ガラス転移点近傍における環状ポリオレフィン系材料の力学特性」久野忠昭

平面ディスプレイの市場拡大に伴い、透明・高耐熱・高強度の特性を有するガラス状高分

子である環状ポリオレフィン(CPO)系材料が近年注目され市場で広範囲に使用されている。一方、CPOの使用環境と材料破壊の機構とに関してはほとんど知られていない。我々はCPOの力学特性について調査しており、今回はガラス転移点近傍の温度における延伸特性について報告する。

(6) 「分子鎖すべりモデルと自由体積変化に基づく非弾性応答則を用いた非晶性ポリマの大変形 FEM 解析」瀬 裕統

筆者らは、非晶性ポリマに対して結晶塑性論のアナロジーから「分子鎖すべり系」の概念を提案し、「分子鎖すべり理論」を構築した。さらに、Hasanらによって確率論的立場からモデル化された非弾性応答則を硬化則に採用することで、非晶性ポリマの大変形応答を分子鎖挙動の観点から再現するモデルを構築した。

本報では、上述の理論を用いて非晶性ポリマに対する大変形 FEM 解析を行い、分子鎖の配向を可視化するとともに、せん断帯形成とその伝播を再現する。さらに、従来の硬化則では表現できなかった非線形粘弾性挙動をも再現する。また、非弾性応答則に新たにひずみ速度を導入し、その影響について検討する。

(7) 「ポリ L 乳酸の力学特性に及ぼすリジントリイソシアネート添加の影響」高山 哲生

植物を原料とするポリ乳酸(PLA)は、生分解性樹脂として注目されており、医療、自動車、電化製品、食品などの各産業で使用が始まっている。筆者らは PLA/PCL ポリマーブレンドにリジントリイソシアネート(LTI)を添加することで、LTI が PLA および PCL と架橋反応することで相構造が劇的に変化し、破壊特性が大幅に向上することを報告している。この反応は PLA 単体に LTI を添加した場合についても発生すると考えられるが、この検討は未だなされていない。そこで本研究では、PLLA に LTI を添加した材料を試作し、LTI 添加が PLLA の力学特性、破壊特性および破壊メカニズムに及ぼす影響について検討した。

(8) 「ポリ L 乳酸の破壊メカニズムに及ぼす延性生分解性樹脂のブレンドの影響」原田亜矢子

生分解性プラスチックの一種であるポリ(L-乳酸)(PLLA)は、環境にやさしい材料として一般成形品や自動車、農業など様々な分野で使用されている。また、生体内でも分解されることから医療の分野でも利用されている。しかし PLLA は脆性破壊を示すことがあり、汎用性を持たせるためには破壊特性の向上が必要である。比較的単純に破壊特性を改善させる方法として、延性生分解性樹脂とのブレンドが挙げられる。本研究では、PLLA の破壊特性の向上を目的として、PLLA に PBSC や PCL をブレンドし、破壊特性について比較を行った。さらに試験後の破面を電解放射形走査型電子顕微鏡にて観察し、破壊メカニズムについて考察した。

(9) 「変形下におけるポリイソブレンゴムの動的粘弾性[II]」宮本嘉久

ガラス転移点近傍で網目状高分子に変形を与えると、粘弾性応力が生じ、温度の低下・変形速度の増加とともに、一様な粘弾性変形から、不均一な塑性変形、破壊へと変形様式が変化する。このような変形挙動の変化を定量的に解析するためには、系の緩和挙動についての詳細なデータが必要である。本研究では、平衡に近い状態での基本緩和時間および緩和時間分布の温度・ひずみ依存性を求めることを目的として、線形粘弾性測定、解析を行った。複素ヤング率と複素コンプライアンスを用いた解析が進行中であり、現在までに得られた結果について報告する。

(10) 「エポキシ/CTBN 反応ブレンドによるエネルギー吸収樹脂設計」岸 肇

熱硬化性樹脂の中でも接着性に優れているエポキシ樹脂は、一般にエポキシ主剤と硬化剤の反応により得られる架橋高分子であり、反応させる分子構造の選択次第でさらなる機能を付与できる可能性を秘めている。本研究はエポキシ樹脂と反応性エラストマーである CTBN

オリゴマーとのアロイ化により広い温度領域において高いエネルギー吸収能力を有する樹脂組成を見出した。さらには、その相構造、動的粘弾性挙動と、エネルギー吸収機構の関係について考察した。

(11)「ポリシアノピフェニルアクリレートのエンタルピー緩和：活性化エネルギーに対する分子量の影響」田中 穰

ポリ・シアノピフェニル・ヘキシルアクリレート (PCBA) は液晶ポリマーとしてよく知られており多方面で研究されている。そのガラス転移温度は 37 度付近にある。ガラス転移温度以下の温度で熱処理するとエンタルピー緩和が現れる。こういった緩和現象は以前より良く知られていることであるが、本研究では、活性化エネルギーモデルを考慮して緩和現象の解析を試みた。

4. おわりに

本研究集会では、高分子化学系と機械工学系の異なる研究分野で活動し、通常交流することが少ない両分野において高分子の力学に携わる研究者が一同に介し、情報交換を行うとともに活発な討論を行った。高分子力学の研究を遂行し今後ますます発展させるためには、ミクロな分子鎖レベルからマクロな力学挙動までを関連付けて取り扱うが必要であり、そのためには、高分子化学、高分子物理から連続体力学までの幅広い知識が必要とされるため、高分子力学に関連する異分野間の連携が今後ますます必要になるであろう。そのような背景の下、この研究集会が高分子力学研究の今後の発展に寄与することを願ってやまない。

(研究集会)

複合材料の強度とその損傷モデル

研究代表者

九州大学応用力学研究所

高雄 善裕

1. 研究集会の目的

応用力学研究所は複合材料強度に関する研究拠点の1つであり、各種複合材料の損傷や破壊の計測、解析、実験を行ってきた。これまで、およそ隔年おきに各種環境下での挙動と強度モデリングについて応用力学研究所・力学専門部会・共同研究集会を開催してきた。この結果、応用力学研究所は複合材料強度分野の研究ネットワークの拠点としても全国的に定着してきており、より一層アカデミックな観点から基礎力学に貢献したい。以下に各講演の概要を示す。

2. 講演概要

1. 天然繊維グリーンコンポジットの特性発現性の解明

合田 公一 (山口大)

The purpose of this study is to improve the strength and stiffness of natural fiber green composites through mechanical treatment, and to equalize the mechanical properties of the composites with those of glass fiber composites. Cyclic tensile stress at 50% or 70% level of their initial strengths was applied five or twenty times for single ramie fibers, twenty or a hundred times for ramie fiber green composites. Tensile strength of the as-supplied fibers was improved approximately 50% higher than their initial value, if the cyclic stress is their 70% level and the number of cycles is twenty, while this mercerized fibers was improved in strength approximately 20% higher than the original value. On the other hand, the mechanical treatment was not so largely affected in strength for ramie fiber green composites, approximately 10% higher than that of the untreated green composites, while Young's moduli of cyclic-loaded green composites were significantly improved, 56% to 67% higher than that of untreated green composites. Young's moduli of the improved composites are comparable to the level of glass fiber composites.

2. CFRP ピン継手の疲労と準静的引張負荷における強度と損傷進展の比較

清家 聡 (九大院)、高雄善裕、汪 文学、松原監壮 (九大応力研)

機械継手は分解可能で表面処理の工程を必要としないなどメリットも多く重要な技術である。本研究では、機械継手の基本的理解のために板厚方向拘束が無いピン継手のベアリング強度の静的試験と疲労試験を積層構成 $[0/\pm 45/90]_{90}$ と $[90/\pm 45/0]_{90}$ について行い、それらの強度と損傷進展様式を比較検討した。両者の損傷を比べると、外観に違いは認められないが内部の損傷形態が異なる。静的試験の破壊では0度層のキックを起点として剥離やせん断亀裂が発生するのに対し、疲労破壊では接触部の圧壊が起点となる。この機構の違いは、疲労の(総剥離長さ)/(総せん断亀裂長さ)の比が静的負荷時の場合より大きくなることの原因にもなっている。

3. Fracture Toughness and Fatigue Crack Propagation of Fiber/Particle Hybrid Metal Matrix Composites

K.H. Oh and K.S. Han (Dept. Mechanical Engineering, Pohang University of Science & Technology)

We have studied the effect of short-fiber/particle hybrid reinforcement on fracture toughness and fatigue crack growth in metal matrix composites. Reinforcement hybridization was achieved by a hybrid preform process, and composites were fabricated by the squeeze casting method. Al6061 matrix alloy and four composites having different short-fiber/particle ratio were tested. The fracture toughness (K_{IC}), and the fatigue threshold (σ_{th}) increased with increasing particle contents, whereas the Paris' exponent (m) was insensitive to the short-fiber:particle ratio. These results were emerged as a shift of the crack growth curve which implies on enhanced crack resistance over the whole stress intensity factor range. The positive aspect of particulate reinforcement is advocated by observation of the crack path and surfaces. Based on the hybrid effects of these

composites, the difference in crack growth behavior between matrix and composites is set out. The clear advantage of hybrid composites both economically and in damage tolerance, is emphasized.

4. 耐熱複合材料の高温環境における層間破壊挙動とファイバーブリッジング

村田知代子 (九大院)、宇田暢秀、小野幸生、永安忠 (九大工)

耐熱性複合材料IM600/PIXA-M を用いてモード I 層間破壊挙動を解明することを本研究の目的とし、一方向積層板の板厚を変化させて常温及び高温環境下でDCB 試験を実施した。実験結果には高温環境下でのエネルギー解放率に板厚による依存が見られた。また高温環境下の試験では破壊面に多量のファイバーブリッジングが発生し、板厚が薄い場合にはマイクロクラックも多数発生していることが観察された。そこでDCB 試験結果から、ファイバーブリッジングの定量的評価を行うとともに、マイクロクラックの多少とエネルギー解放率の関係を検証する。

5. CFRPの超音波探傷評価

松嶋正道 (JAXA 複合材技術開発センター)

複合材料の炭素繊維強化樹脂材料が広範囲に適用されている。軽くて強い性質を利用して軽量構造に最適であり、全体重量が軽減されて燃料消費が少なくする事が可能となる。しかし、損傷形態が金属材料と比較して複合材料特有は複雑であり、この損傷形態を定量的に評価する場合に超音波探傷を用いると板厚(積層)方向のはく離が明瞭に観察することができる。ここでは、CFRP板に衝撃損傷を与えて、はく離損傷を超音波探傷で観察を行った。

6. Damage Analysis of a Type 3 Cryogenic Propellant Tank after LN₂ Storage Test

S.G. KANG, M. G. KIM, S.W. PARK, C.G. KIM (KAIST), C.W. KONG (KARI)

The application of composites to cryotanks has been one of major concerns for lightweight launch vehicles. In this study, a prototype of a Type 3 cryotank was fabricated with the composite developed for cryogenic application and an aluminum liner, and the cryogenic conditions that general cryotanks undergo in service were applied to it. For this purpose, liquid nitrogen (LN₂) was stored in the cryotank as cryogenic medium and gaseous nitrogen (GN₂) was used to pressurize it. During the test, the delamination inside the cryotank happened. Several attempts were made to investigate this phenomenon through both analytical approach with thermo-elastic analysis in consideration of the progressive failure and experimental one with a LN₂ immersion test of composite/aluminum ring specimens which are suitable for simulating a Type 3 tank structure.

7. エッジ効果と熱残留応力を考慮したトランスバースクラックを有するCFRP積層板の応力解析

細井厚志、八木志奈子 (早大院)、永田啓一 (東レ)、川田宏之 (早大)

本研究は、変分原理を用いて90°層内にトランスバースクラックを含む{(S)/90_n}_k積層板の3次元応力状態について評価をおこなった。なお(S)は、任意の直交異方性材料を示している。この解析によって、トランスバースクラックが存在する積層板において、エッジデラミネーションを引起す原因となるエッジ効果を考慮した面外方向応力を表現することが出来た。また提案されたモデルは、有限要素法を用いて算出された結果と良い一致を示した。

8. マイクロボンド試験法に対する損傷解析モデルを用いた複合材料界面破壊特性の評価

西川雅章、逸見啓、武田展雄 (東大)

T800S 炭素繊維・エポキシ樹脂を用いてマイクロボンド試験を行い、従来の複合材料界面特性評価方法の妥当性を検証した。また、樹脂の塑性変形、樹脂に発生するき裂の影響を考慮して、マイクロボンド試験の繊維引き抜き過程における損傷発生・進展の有限要素シミュレーションを行い、界面特性の定量的評価を試みた。マイクロボンド試験において、ある埋め込み長さに対する引き抜き荷重はばらつくが、実験を繰り返していくと、得られる上限値にはき裂の影響が無視できることがシミュレーションにより明らかとなった。従って、樹脂の塑性変形を考慮した界面はく離進展解析によって上限値のみを評価すれば、界面特性のより適切な定量化が可能と考えられる。

9. 結合力要素を用いたFRP直交積層板における損傷進展に関する数値シミュレーション

岡部朋永 (東北大・工)

本研究では結合力要素を用いたFRP直交積層板における損傷進展に関する数値シミュレーションモデルを提案する。特に、トランスバースクラックの初生・進展過程を再現するために、結合力要素領域内に初期欠陥領域を導入した。これにより、90度層厚が薄くなった場合のクラック発生

に関する抑制効果とクラック増加特性の両方を再現することが可能となった。この点に関しては、他の破壊力学モデルと比較することで、より詳細に検証してある。最後に数値シミュレーション結果と実験結果とを比較し、本モデルが実験結果をよく説明できるモデルであることを確認した。

10. 結合力要素を用いた CFRP 積層板の疲労損傷進展シミュレーションの提案

矢代茂樹 (AIST 計測フロンティア研究部門)

本研究では、複合材料積層板に対する新たな疲労損傷進展シミュレーションを提案する。Mindlin 板要素とき裂面を表す結合力要素を用い、複合材料積層板の損傷解析を行うレイヤーワイズ有限要素モデルを構築した。ここで、結合力要素の残留強度の低下プロセスに疲労損傷進展則を適用することで、積層板における疲労損傷の進展を表現した。本研究では、引張疲労負荷下の切り欠きを有する CFRP クロスプライ積層板に対し、提案した疲労損傷進展シミュレーションを適用した。本シミュレーションで得られた損傷形態は実験結果を概ね表現でき、提案した手法の妥当性を示した。

11. 複合材料構造の粘弾性挙動のマルチスケール解析

渋谷 嗣 (秋田大)、関根英樹 (東北大)

熱可塑性樹脂を母材とした炭素繊維複合材料は高靱性な複合材料として注目されているが、耐熱性の高い樹脂の開発によって高温環境下での応用がさらに期待できる。その環境下において材料設計を含めた複合材料構造の全体特性評価のためには、マクロ・メゾレベルからのマルチスケール解析が必要不可欠である。

本研究では、高温環境における複合材料構造の粘弾性挙動の評価のためにマルチスケールモデルについて検討した。均質化理論に基づく一方向繊維複合材料のラミナの粘弾性特性から各種の積層構成を有する複合材料構造の挙動の解析を行った。粘弾性特性解析は弾性とラプラス変換における粘弾性解との対応原理が適用できることから、ラプラス変換の粘弾性解から Duhamel 積分を用いて逆変換して定式化した。数値計算においては円孔を有する積層複合板を対象とし、ラミナの解析から積層板の円孔周りのマクロな粘弾性挙動を明らかにした。

12. Mechanical and electrical characteristics of carbon noatube (CNT)/Polymer nanocomposites

Q.Q. Ni (Shinshu Univ.), C.S. Zhang (Kyto Institute of Technology), W.X. Wang (Kyushu Univ.)

The nanocomposites with carbon nanotubes (CNTs) and shape memory polymer (SMP) were developed for mechanical and electrical applications. The specimens with different CNTs weight fractions were prepared. Their mechanical property, electrical resistivities and electromagnetic interference (EMI) shielding effectiveness (SE) were investigated. As a result, for the developed nanocomposites, the mechanical strength and modulus increased obviously due to the filler of carbon nanotubes. Even lower weight fraction of CNTs could achieve a high level of conductivity and a low percolation threshold was confirmed. The electrical resistivity for the developed nanocomposites is dependant obviously on temperature with a linear relation like metals. The interconnected conducting network was formed more easily than other fillers. The experiments to evaluate EMI SE were carried out in three different frequency bands, 8~26.5 GHz (K band), 33~50 GHz (Q band) and 50~75 GHz (V band). The EMI SE of CNT/SMP nanocomposite had a strong dependence of carbon nanotube content and the specimen thickness at all of three frequency bands. The higher the frequency, the larger EMI SE is.

13. Prediction of electrical properties of carbon nanotube polymer composites

N. Hu (Tohoku Univ.), Z. Masuda (Graduate School of Engr., Tohoku Univ.), H. Fukunaga (Tohoku Univ.)

Carbon nanotubes (CNTs) of high aspect ratio possess excellent electrical conductivity. Therefore, with a little amount of CNTs, which are dispersed in insulating polymers, it is possible to produce the composites with high electrical conductivity. This kind of conductive composites can be applied to various fields, such as highly sensitive strain sensors, electromagnetic-wave shielding materials etc.

In this research, first we propose a 3 dimensional (3D) numerical model to predict the behavior of electrical conductivity in polymers filled by CNTs. In this numerical model, with the assumption of uniformly and randomly distributed CNTs in polymer materials, the percolation threshold is predicted at the volume fraction of CNTs when a complete conductive pathway connected by some CNTs is built up. Furthermore, a 3D resistor network model for electrical conduction problems of composites is proposed, in which Kirchhoff's current law is used to build up the system equations at different nodes in the network connected by CNTs, and finally Ohm's law is used to predict the global electrical conductivity of composites.

Second, the CNT/polymer composites are practically made by us. The various DC and AC electrical properties of composites, such as electrical conductivity, are measured by LCR meter. The obtained experimental results and other researchers' results are employed to verify the present theoretical model.

Third, for the purpose of application of CNT/polymer composites as sensors, the present theoretical model for predicting the electrical conductivity of CNT/polymer composites is further extended into the case of composites subjected to external loads. The relationship between the strain of composites and the electrical conductivity of composites is estimated theoretically. It was found that when the volume fraction of CNTs is closer to the percolation threshold, the electrical conductivity of composites changes more significantly when composites are deformed. Also, the experiments are carried out. Both theoretical and experimental results demonstrate that the composites possess much higher sensitivity or gauge ratio compared with the traditional strain gauge.

14. Models for piezoresistance in CFRP laminates

K. Ogi (Graduate School of Sci. & Engr., Ehime Univ.)

This paper presents the mathematical models describing the piezoresistance behavior in carbon fibre reinforced plastics (CFRP) laminates. First, two-dimensional models are proposed to predict the change in the resistance and impedance due to tensile loading in unidirectional (UD) laminates. The equivalent DC and AC circuits consisting of the resistance and capacitance elements are considered to express the piezoresistance and piezoiimpedance behavior in the UD laminates. Especially, the temperature effect is taken into account in the piezoresistance model. The gage factors and temperature coefficients are expressed as functions of off-axis angle. Secondly, a one-dimensional model is proposed to describe the piezoresistance behavior in CFRP cross-ply laminates with transverse cracking loaded in tension. The residual resistance change and gage factors are associated with transverse crack density on the basis of an equivalent resistance circuit.

3. まとめ

複合材料に関する集会は今回で10回目であり、大学、国立研究所、企業から14件の講演発表があり活発な討論が行われた。韓国 KAIST 及び POSTECH からの若手研究者による2件の発表もあった。POSTECH の HAN 教授には昨年に続き参加して頂いた。各研究の詳細は平成19年1月発行の応用力学研究所研究集会講演論文集18ME-S4「複合材料の強度とその損傷モデル」をご覧いただきたい。平成19年度からは複合材料の中でも特に興味深い話題に焦点を絞った集会企画を予定している。研究所側の世話人も汪先生に変わって頂く事にした。九州大学工学部の宇田先生に代表者になって頂き、ナノ複合材についての研究集会の申請が計画されていると聞いている。省エネルギーや環境問題に新たな展開を切り開いて行く複合材料に関する力学研究者の活発な意見交換サロンとして引き継いで頂けると期待している。

(研究集会)
非線形波動現象における基礎理論、数値計算および実験のクロスオーバー

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

非線形現象の解明は、現在ほぼすべての理工学での中心的な研究テーマとなっており、そのための基礎理論の構築、現象のモデル化とその数値計算法などが盛んに研究されている。さらに様々な実験や観測により、新しい非線形現象も次々と見出されている。その中でも、非線形波動に関連する研究は歴史的にも最も良く研究されてきており、これまで多くの研究成果が生まれてきた。非線形波動論の特徴のひとつに、その手法や結果が分野を超えた普遍性を持つことがあげられる。例えば特異摂動論により様々な基礎方程式から弱非線形現象を抽出すると、その縮約された式は様々な分野で共通に現れるものになる。こうしてソリトン理論やカオス理論が発展し、広く研究者の間で非線形現象の解析に使われる標準的な手法になってきた。そして得られた縮約方程式の高精度な数値計算法も精力的に研究されている。もとの基礎方程式を直接数値計算するのではなく、理論的な現象の理解を目指して精度のより高い差分法などが工夫されている。さらに実験に関しても、流体、プラズマなどは工学の応用と結びついて近年ますます技術レベルの高いものになってきている。装置や測定器の限界に挑戦するようなものから、既存のシステムの全く新しい組み合わせの実験などを通して、新たな非線形現象の発見や工学的諸問題の解決方法などが提案されている。しかし一方で近年は数学理論、数値計算および実験の乖離も進んでいるのも現状である。非線形波動研究初期の頃はこれらが有機的に関連していた時期があり、そのことがお互いの進展に相補的に貢献した。そこで現在の状況を鑑みて、再び共通の非線形波動という対象のもとに、理論から実験まですべての研究者が一度に会して議論し、お互いの問題意識を確認して話し合う場が必要であると考えられる。応用力学研究所は歴史的にも非線形研究の中心の一つであり、理論から実験までこれまでの非線形研究をリードしてきた。従って、本研究集会による理論、数値計算および実験分野の非線形波動研究者のクロスオーバーは応用力学研究所の共同利用事業にふさわしいものだと考えられる。

成果の概要

本研究集会では3日間で特別講演4件、一般講演42件(内ポスターセッション20件)の計46件の講演が行われた。また2日目のポスターセッションでは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行われ、盛況であった。また、ベストポスター賞を選ぶことをあらかじめ告知していたため、良い意味での競争的環境が実現できたと思われる。そして、今回新しくパネルディスカッションが開かれ、5名のパネリストを迎え本研究集会のメインテーマである「非線形研究における基礎理論、数値計算および実験のクロスオーバー」について話し合った。5名は、それぞれこの3つの分野を横断的に研究している第一線の研究者であり、それぞれの考え方を述べた後、会場の多数の参加者を交えて活発な討論がなされた。この討論は会場の若手研究者にも大いに刺激を与え、新しい試みは大いに成功したのではないかと考えている。特別講演も基礎理論、数値計算および実験の3分野を意識したもので、基礎理論1名、数値計算1名、実験2名の話のクロスオーバーを意識して講演していただいた。特に、実験の背後には理論が必要であることや、数値計算と理論の相互関係など様々な具体例とともに講演していただき、最新の研究の話題とあわせて参加者には好評であった。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人近くのにぼり、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。そして基礎研究と実験の立場の人がお互いに研究討論することも活発であった。これによって研究集会の目的は十分に達成できたと考える。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6日(月)

○13:00~13:30 Computation of high order pull-back transformations for algebraic Painlevé VI solutions

Raimundas Vidunas (九州大・数理学研究院)

Pull-back transformations of the hypergeometric differential equation occur prominently in the theory of algebraic solutions of second order ordinary differential equations (thanks to a famous theorem of Klein), and with algebraic transformations of Gauss hypergeometric functions. Properly branching pull-back transformations can be applied to algebraic solutions and algebraic transformations of Painlevé equations as well, as was noticed first by R. Fuchs, and recently by Ohyama and Kitaev. The talk demonstrates computation of high order pull-back transformations that give several complicated icosahedral solutions of the Painlevé VI equation.

○13:30~14:00 渦輪を用いた渦のつなぎ変え実験

松村直樹, 渡辺慎介 (横浜国大・工)

同じ方向に進む二つの渦輪の相互作用に関する実験を行い, 渦輪対が一つの歪んだ楕円渦輪につなぎ換わり, その後再び二つの渦輪へとつなぎ換わる様子を実験により観測した.

○14:15~14:45 時間差分間隔の規格化と超離散化

岩尾 昌央 (東京大・数理学)

超離散化が可能になるメカニズムを知りたい. 以下の手続きを考える.

(イ) あるハミルトン系の一般解を作る

(ロ) 一般解をそのまま保存するように, 方程式の離散化を行う

(ハ) 離散系と一般解の双方を超離散化する

以上の手続きの(ハ)において「時間差分間隔の規格化」を行うことにより, 自動的に「超離散化」が可能になることを解説する.

○14:45~15:45 分岐制御による非線形現象の制御と利用の実例(特別講演)

藪野 浩司 (筑波大・システム情報工学)

機械システムモデルに発生する2, 3の非線形共振現象をビデオで紹介し, その励振メカニズムを明らかにしつつ分岐制御による安定化制御法を提案する. さらに, 分岐現象の積極的な利用の一例として劣駆動マニピュレータの運動制御を紹介する.

○16:00~16:30 周期箱玉系の逆散乱法

国場 敦夫 (東京大・総合文化), 高木 太郎 (防衛大・応物), 竹野内 晃 (東京大・総合文化)

最も基本的な周期箱玉系において(Bethe仮説を利用し)逆散乱法を定式化する. これにより周期箱玉系の初期値問題が解かれる. また逆散乱法の副産物として周期公式および状態数上げ公式が導かれる.

○16:30~17:00 極低温原子気体における非線形ダイナミクス

佐々 成正 (日本原子力研究開発機構)

近年, 極低温下で量子凝縮状態にある原子気体系が注目されている. この系の(古典的)ダイナミクスは, ボーズ粒子系なら非線形シュレーディンガー方程式, フェルミ粒子系ならギンツブルグランダウ方程式で記述される. それぞれの系に特徴的なダイナミクスについて議論したい.

○17:00~17:30 From canonical bilinear forms to bi-hamiltonian structures

ウイロックス ラルフ (東京大・数理学)

KP階層の簡約として得られる1+1次元可積分系のbi-hamiltonian構造を考える. 1+1次元可積分系に関するrecursion operatorを「canonical」と呼ばれている双線形形式という形で表現し, その「canonical bilinear form」に対応するBaeklund変換を用いて, 元の可積分系のbi-hamiltonian構造を導き出す.

11月7日(火)

○9:30~10:00 確率的に拡張された交通流セルオートマトンの相転移ライン導出

酒井 聡士 (龍谷大・理工), 西成 活裕 (東京大・工), 飯田 晋司 (龍谷大・理工)

交通流セルオートマトンモデルについて, 車の慣性の効果, 運転手の見通しの効果, ランダムブレーキ効果をそれぞれ確率的に与えるモデルを提案し, そのシミュレーションと解析結果を発表する. この交通流モデルは, 確率パラメータを変えることで, これまでに発表された交通流モデルを表すことができる. シミュレーションについては, 現実の基本図と似た現象を再現した. 一方, 解析では, 開放系相図の相転移ラインについて, 主に平均場近似を用いて理論式を導くことができた.

○ 10:00~11:00 パターン・ダイナミクスの数理モデリングとシミュレーション (特別講演)

柳田 達雄 (北海道大学電子科学研究所)

パターン形成現象に関する話題として、

1. 粉体分離現象 (偏析現象) のセル・オートマトンによるモデリング
2. 反応拡散系におけるパルスダイナミクスに関する講演を行った。

粉粒体はサイズ、質量、表面の材質などの違いにより分離することが知られている。その典型例が回転円筒中の2種混合粉粒体である。この分離過程は短時間で径方向分離した後、回転軸方向のバンド状パターンの形成とその粗視化過程の3段階の時空間スケールから成る。偏析現象は多数粒子の相互作用に起因しているため、離散要素法などの直接的 (第一原理的) アプローチが困難な系である。また、なんらかの縮約なしにパターン生成機構を明らかにする事は難しいであろう。そこで、粒子の滑り運動と円筒回転運動を時間空間的に離散化されたセル・オートマトン (CA) によるモデル化を行い、分離3過程のメカニズムを解析した。

1次元 FitzHugh-Nagumo 方程式は、神経軸索の信号伝播現象を定性的に記述する簡単なモデルであり、波形を保ち一定速度で伝播する安定なパルス解を持つ。この興奮媒質の境界に周期的刺激により現れる伝播不全と共鳴伝播なる現象を見出した。これらの現象の生成機構は、パルス間相互作用が興奮的または抑制的にパルス間距離に依存する結果として生じることを数値的に示した。

○ 11:15~11:45 弾性棒の運動に対する変分原理と進行波解

福本 康秀 (九州大・数理学)

断面が円形で長さ方向に一樣な弾性棒の運動方程式を変分原理によって導いた。剛体的に並進運動するひもの形を渦ジェット糸とのアナロジーを援用して計算した。

○ 11:45~12:15 Wigner formula of rotation matrices and quantum walks

宮崎 玄洋, 香取 眞理 (中央大・理工), 今野 紀雄 (横浜国大・工)

量子的な拡散過程のモデルとして導入された量子ウォーク模型は、量子情報理論などとも関係して注目されている。最近、今野 (横浜国大工) は1次元上の2状態量子ウォーク模型に対して、量子ウォークの擬速度分布のモーメント収束定理を証明した。この極限分布は、古典的なランダム・ウォークで見られるガウス分布とは対照的で、中心 (出発点) 近くでの値が小さい逆釣鐘状の関数 (今野の密度関数) で表される。本講演では、多状態 (($2j+1$) 状態) に拡張した1次元量子ウォーク模型を提案し、一般にその弱極限分布が、今野の密度関数を適当にスケール変換したものの重ね合わせで与えられることを示す。計算機シミュレーションの結果との比較も報告する。

○ 13:30~14:30 球と多面体のあいだの形: 合金中の微細な粒子の形状に関する考察 (特別講演)

尾中 晋 (東京工業大・総合理工)

ある組成の合金に適切な条件の熱処理を施すと、母相と呼ばれる地になる金属中に析出物と呼ばれる微細な粒子が出現する。析出物の形状は様々であるが、合金の種類と熱処理条件によっては、球と立方体のあいだの形状を持つ析出物が生じる。球と立方体のあいだの形を与える数式を用いて、この場合の析出物形状の由来と遷移を材料科学の観点から考察する。また、球と立方体のあいだの形を与える数式を発展させ、球と種々の凸型多面体のあいだの形状を与える数式を導出する。それらの数式は、何種類かの異なる低指数結晶面で構成される析出物の形状を考察する際に有用になる。

○ 14:45~15:15 $2+1$ 次元多成分長波短波共鳴相互作用

及川 正行 (九州大・応力研), 太田 泰広 (神戸大・自然科学), 丸野 健一 (The University of Texas-Pan American)

自由表面をもつ二層流体系における長波と短波の2次元相互作用を考える。短波の搬送波の波数ベクトルが長波短波共鳴の条件を満たす $(k_x, k_y), (k_x, -k_y)$ の2つの場合に、近似方程式系を導き、簡単な解を与える。また、共鳴条件を満たす短波が多数ある場合の近似方程式系が推測される。

○ 15:15~15:45 Laurent 双直交多項式の持つ組合せ論的側面について: Schroeder 路を用いた行列式の計算と漸化式の導出

上岡 修平 (京都大・情報学)

Laurent 双直交多項式の行列式表現に現れる行列式の値を、複数の Schröder 路の配置の重みの総和を用いて書き下す。さらに、そこに現れる配置の構造から多項式の満たすべき三項間漸化式が導かれることをみる。

○ 15:45~16:15 新しい型のソリトン方程式

広田 良吾 (早稲田大名誉教授), 太田 泰広 (神戸大・自然科学)

現在までよく知られているソリトン方程式の N -ソリトン解はソリトンの相互作用を表す phase-shifts の項がすべて2体の積で表されている。phase-shifts の項が2体の積として表現できないソリトン方程式を発見し、 N -ソリトン解の pfaffian による表現および方程式の差分化に成功した。

○ 15:20~17:00 パネルディスカッション

「非線形波動現象における基礎理論, 数値計算および実験のクロスオーバー」について

パネリスト

加藤 毅 (京都大学大学院理学研究科)

藪野 浩司 (筑波大学大学院システム情報工学研究科)

柳田 達雄 (北海道大学電子科学研究所)

中村 佳正 (京都大学大学院情報学研究科)

梶原 健司 (九州大学大学院数理学研究院)

司会 西成 活裕 (東京大学大学院工学系研究科)

非線形現象の解明は、現在ほぼすべての理工学での中心的な研究テーマとなっており、そのための実験や基礎理論の構築、現象のモデル化とその数値計算などが盛んに研究されている。しかし一方で研究が進み高度に専門化してきたため、理論、数値計算および実験の研究者の間の乖離も進んできているのも現状である。そこで、これら3分野において分野横断的に第一線で活躍している5名の研究者を迎え、今後いかにしてクロスオーバーしてゆくかについて考えを述べてもらった。また、約60名の会場参加者からも活発な意見を頂き、今後の非線形研究における新しい進展と異分野同士の有機的な結びつきについて話し合った。

○ 17:10~18:30 ポスターセッション

(1) 経路積分に基づく音場 (おんば) 解析の試み

小柳 慎一郎 (九州大・芸術工学)

波の伝播速度が不均一な媒質における音波の運動を記述する経路積分を、停留位相法を用いて解析的に調べる。そして、高周波近似によって得られる従来の幾何音響理論の結果と比較し、より現実的な音波伝播の記述を探る。

(2) Nahm 方程式の q -離散化とその解析

中村 厚 (北里大・理), 鎌田 勝 (木更津高専)

昨年に引き続き、モノポール方程式として知られる Nahm 方程式の q -離散化について考察する。特に戸田方程式型に簡約した系について、特異点解析、保存量の構成等を行う。

(3) 特異値分解を用いた画像分解における特異値クラスタを緩和するアルゴリズム

笹田 昇平, 近藤 弘一 (同志社大・工), 岩崎 雅史 (JST, SORST), 中村 佳正 (京都大・情報学)

本論では Kakarala-Ogunbona (KO) の画像分解アルゴリズムについて考察する。KO アルゴリズムは行列の特異値分解 (SVD) により画像分解を行う手法である。KO 分解における特異値はある画像においてクラスタをなすことがある。一般的な数値計算法は特異値がクラスタをなすとき左特異ベクトルを高精度に求められない。このとき、KO アルゴリズムの分解、再構成に悪影響を与える可能性がある。そこで本論では特異値クラスタを緩和するアルゴリズムを提案する。元画像にランダム模様を付加した画像から得られる左特異ベクトルをフィルタとして用いる。数値実験により提案アルゴリズムの有効性を示す。さらには、フィルタ行列の量子化について議論する。

(4) B スプラインガラーキン法による数値シミュレーション

杉本 昌平, 近藤 弘一 (同志社大・工)

発展方程式に対する数値スキームの多くは不連続な波やなめらかな波に対して不向きである。ウェーブレット変換は不連続な波に対して有効である。しかし、ウェーブレット変換の代表的な直交基底は明示的な関数で表されない。基底関数のサンプリング点は数値計算のみで計算可能であり、計算結果には数値誤差が含まれ得る。一方、双直交なウェーブレット基底の1つに B スプラインがある。B スプラインは区分多項式として明示的な関数で定義される。したがって、B スプラインを用いた数値計算においては基底関数に起因する数値誤差は少ないと期待される。本論では B スプラインガラーキン法による微分方程式の数値解法に関する詳細な実験を行い、実用上の有効性を検証する。

(5) Lie Symmetry を用いたくりこみ群の方法の差分方程式系への応用

巖佐 正智, 野崎 一洋 (名古屋大・理)

力学系における摂動問題について、系の対称性 (Lie Symmetry) を利用してその漸近解を構成するくりこみ群の方法を常微分方程式系に対して考案し、昨年の本研究会において発表した。今回、その方法を差分方程式に対して拡張し得たので、発表する。

(6) 等方的な BZ 反応セルオートマトンについて

西山 了允, 時弘 哲治 (東京大・数理科学), 田中 宏志 (島根大総合理工)

従来のセルオートマトンモデルではパターンを等方化するために非常に広範囲な近傍セルを選ぶ必要があり、反応拡散方程式を数値的に解くのに比べてセルオートマトンの利点を十分に生かしきれていなかった。我々のモデルでは、ルールに適当なランダムネスを加えることで、ムーア近傍程度でこれが可能

能となる。これにより大規模な系で、より現実的な解析が容易に行えるようになる。

(7) シンプレクティック変換で不変なソリトン方程式

土田 隆之 (岡山光量子科学研究所)

直交変換で不変なソリトン方程式 (例えば、結合型 mKdV 方程式) やユニタリ変換で不変なソリトン方程式 (例えば、結合型非線形シュレディンガー方程式) については、比較的多くの研究がなされてきた。この講演では、これまでほとんど調べられていないシンプレクティック変換で不変なソリトン方程式について報告する。

(8) 超離散 QRT 系の性質と拡張 Newton 多角形の形状との対応

坂元 琢治 (東京大・総合文化)

超離散 QRT 系の保存量を (tropical 幾何学の意味で) 逆 tropical 化してできる拡張 Newton 多角形の形状により分類した。その上で、超離散 QRT 系の性質をその拡張 Newton 多角形の形状との対応を利用して調べた。更に拡張 Newton 多角形の形状をもとに、ある保存量での周期に対する明示公式も得た。

(9) 対面二体流における異常現象

飯塚 剛 (愛媛大・理工)

セルオートマトンを用いて対面二体粒子の流れを考えた。流れが詰まる現象を、流れの持続時間および、粒子のクラスター化という立場で解析した。これは、歩行者流や粘性流における粉体などに応用できると考える。

(10) 3 粒子系戸田ポテンシャルと軌道の関係

河辺 哲次 (九州大・芸術工学)

可積分系である 3 粒子系戸田ハミルトニアン $H(q, p)$ の軌道は、 $p=0$ とした任意の初期値 q 、つまり、“自由落下運動”に対しては、特別な振舞をする。この原因を、ポテンシャルの対称性、可積分性、および、同次性などの観点から考察する。

(11) ソリトン理論を用いた 1 次元弾性体離散モデルのシミュレーション

崔 大宇 (東京大・工)

宇宙工学の分野のテザーで代表されるような 1 次元弾性体の挙動を、ソリトン理論を融合した離散モデルを用いてシミュレーションする。今回の発表ではこの理論を用いて、振動する 1 次元弾性体の安定化を図ってみる。

(12) 空中に浮遊した液滴表面の固有振動数について

榎 祐作, 井上 道雄 (東京大・工)

液滴表面を伝わる表面波の、液滴形状依存性を考察する。実験によると、空中に浮かんだ液滴を一定角速度で回転させて扁平形状にしたとき、その表面の固有振動数は無回転のときに比べ上昇することがわかっている。本研究では、その現象をシミュレーションで実現することを目的としている。

(13) 離散確率過程と q -超幾何関数

何 健志 (立教大・理)

Claudio Albanese は Feynman-Kac の定理の偏微分方程式から、ラプラス変換を利用して 2 階の常微分方程式を導き、その解を超幾何関数で表現した。また、E. Csaki は、確率過程として対称ランダムウォークを用いて Feynman-Kac の定理の差分化を提案した。ここではパラメータ q を含む確率過程の Feynman-Kac の定理の差分化の 1 つを提案し、その解を q -超幾何関数を用いて表現する。

(14) 超幾何関数の関数等式と算術調和平均

榎 武史 (立教大・理)

算術幾何平均と超幾何関数との関係は Gauss によって、また 3 次の算術幾何平均と超幾何関数との関係が Borwein によって発見された。一方、算術調和平均は、中村らによって行列の平方根の数値計算に応用されている。

今回の研究では、超幾何関数の関数等式と積分で表される保存量を持つ差分方程式との対応について調べることで算術調和平均と、ある超幾何関数の関数等式との関係を考察する。さらに同様の手法を用いて得られる差分方程式のリストを作る。

(15) 富松-佐藤解の Legendre 多項式表現に関する考察

島崎 朋之 (立教大・理)

Ernst 方程式に対して、Neugebauer-Kramer 解という行列式型の特解が知られており、富松-佐藤解はそこからの退化で得られる。今回は、その場合の行列式の成分が Legendre 多項式で表わせることを示す。

(16) 確率共鳴に基づいた温度制御

小泉 一弥, 石渡 信吾 (横浜国大・工)

確率共鳴に基づいた確率的温度制御の方法を提案し, その実現を図った. 微弱な温度変化にノイズを加え閾値応答させるとチャタリング状態となる. このチャタリング出力でペルチェ素子の加熱-冷却を直接 ON/OFF 制御することによってマイコンを用いずに従来のパルス幅制御に比較し得る安定性を得る事ができた.

(17) 出入口付近でトラップされるキンクの運動

光藤 哲也, 早川 尚男 (京都大・基礎物理学研究所)

一次元 TASEP において, 系の端以外の場所で出入口を作るとキンクがトラップされることがわかった. 分子モーターモデルにおけるキンクの運動についても報告したい.

(18) 密度変化に伴う車線占有率の逆転現象関係についてのシミュレーション

山田 剛 (東京大・工)

2車線以上の高速道路において起こる, 密度によって車線占有率が逆転する現象についての研究成果発表

(19) 織込部における交通流シミュレーション

西 遼佑 (東京大・工)

織込部とは, 車線間の流量交換が頻繁に行われる「X」字型の道路であり, 渋滞が多発している. そこで, 実測データをもとに織込部をモデル化し, 数値シミュレーションを行うことにより, 渋滞発生メカニズムの解明および渋滞の改善を目指す. 交通流モデルとしては, CA モデルの一つである SOV モデルを用い, 車線変更のルール化にあたっては, 進路変更する車の占有セルを拡大させることにより, 後続車への影響を見積もる. シミュレーションの結果, 織込部の合流部への流入条件が渋滞の発生に大きく寄与していることがわかる.

(20) 踏み切りで一時停止は必要か?

友枝 明保, 西成 活裕 (東京大・工), 原田 義昭 (衆議院議員, 自民党)

本研究では, 従来の SOV モデルを改良したモデルを用いて踏切での一時停止の有無による流量について考察した. 遮断機が開いている状態の踏切での一時停止は日本特有の法律であり, この一時停止により様々な問題が生じていると考えられる. 中でも, 踏切での一時停止により流量が制限され, 踏切がボトルネックとなる深刻な渋滞が引き起こされている. そこでまず, 意図的に止まる状態と意図せずに止まる状態を区別することで, 従来の SOV モデルを改良したモデルを構成した. さらに, このモデルを用いて踏切での一時停止の有無による流量の比較をした結果, 一時停止がない場合は一時停止がある場合に比べて最大二倍多い流量になることがわかり, これは実際の実験データにも対応していることがわかった.

11月8日(水)

○9:30 ~10:00 回り込みと壁・障害物の効果による人の移動流量の変化

柳澤 大地, 西成 活裕 (東京大・工)

自己駆動粒子である人が多数集まった群集は統計的性質を示すため, その運動を予想することが可能になる. 我々はこれまでセルオートマトンを用いたフロアフィールドモデルで群集運動を研究してきた. 群集運動の重要な指標の一つに出口などのボトルネックを通過する人の流量がある. 流量が大きいことは人がスムーズに移動していることを意味し, 小さいことはボトルネック付近で渋滞が起きていることを意味する. 本研究では居室にいる全ての人々が共通の出口に向かって移動していく場合における出口付近での人の振る舞いをモデル化し, シミュレーションを行うと同時に平均場近似により出口から出る人の流量の式を導いた. 式を解析することにより, 出口が狭い場合は人のお互い協力した方が流量が大きい, 広い場合は競争した方が大きくなることが分かった. また人がゆっくりと出口に向かっている場合は出口が部屋の壁の真ん中にある方が流量が大きい, 急いで出口に向かっている場合は出口が部屋の角にある方が大きくなるということも発見した.

○10:00~10:30 黒微分と DS 方程式のはなし

井ノ口 順一 (宇都宮大・教育)

多くの 1+1 次元可積分系は微分幾何学的なモデルをもつことが知られている. 本稿では 1+2 次元の可積分系の例である Davey-Stewartson 方程式 (DS 方程式) の幾何学的意味を共形曲面論とシュワツ微分 (黒微分) を用いて考察する.

○10:45~11:15 確率量子化の手法で導かれる確率過程と非線形シュレディンガー方程式

矢嶋 徹 (宇都宮大・工), 宇治野 秀晃 (群馬高専)

非線形シュレディンガー (NLS) 方程式の適切な保存則を選び, 密度関数の保存則である Kolmogorov の前進方程式に対応させると, 確率微分方程式が得られる. この方程式に従う確率変数は, NLS 方程式のソリトン解に付随して変化するが, 確率量子化の手法で, NLS 方程式を通じて対応づけられるハミル

トニアンを用いてその振る舞いを解釈することができる。

○ 11:15~11:45 **Connection matrices for ultradiscrete linear problems**

Chris Ormerod (The University of Sydney)

One may consider the appropriate domain for ultradiscrete equations to be the max-plus semiring. An analog of associated linear problems over the semiring are considered. Our main result being that despite the restrictive nature of this semiring, it is still possible to define a theory of monodromy analogous to that of Birkhoff and his school for systems of linear difference equations over the max-plus semiring. We use such theory to provide evidence for the integrability of some ultradiscrete difference equations.

○ 11:45~12:15 **液体シートのマランゴニ現象を表す二つの非線形方程式**

吉永 隆夫, 菅 健太郎 (大阪大・基礎工)

最近, 両面間で温度差のある液体シートに現れるマランゴニ現象を記述する二つの新しい非線形方程式を導出した. 講演ではこれらの方程式に対して解析的, 数値的に得られた定常, 振動, 爆発解などのいくつかの解や安定性について報告する.

○ 13:30~14:30 **力学系からのパターン形成とファミリーのくり返し写像 (特別講演)**

加藤 毅 (京都大・理)

ファミリーのくり返し写像から構成される力学系は, 極めて複雑なふるまいをし, その挙動を推測することはほとんど不可能といってよい. 一方で, 射影やスケール変換をして多くの情報を落とすことで, ある種のパターンを持ちうるものへと変換することが可能である場合がある. それをここでは力学系からのパターン形成とよぶ. ここでは非常に具体的なファミリーの写像から KdV 方程式の解への力学系のパターン形成を構成する. その過程で, トロピカル幾何学を用いる.

○ 14:45~15:15 **Calogero-Moser 模型の超可積分離散化 - Suris の可積分離散化との比較**

宇治野 秀晃 (群馬高専), Luc Vinet (Univ. Montreal), 矢嶋 徹 (宇都宮大・工), 吉田 春夫 (国立天文台)

Calogero-Moser 模型の可積分離散化には, Nijhoff-Pang による方法の他に, Suris による方法も知られている. 射影法の離散化によって導かれる超可積分離散化とこれらの可積分離散化を比較し, 相違点を挙げる.

○ 15:15~15:45 **ボトルネックによる渋滞形成**

只木 進一 (佐賀大・総合情報基盤センター), 山元 祥平 (佐賀大・工), 日永田 泰啓 (佐賀大・総合情報基盤センター)

ボトルネックのある高速道路を考える. ボトルネックは, トンネルやサグなど, 最高速度の低下を起こすことで, 実質的に流量の制限を行う. ボトルネックのある開放端の系について, 結合写像型最適速度交通流模型を用いたシミュレーションを行う. ボトルネックのすぐ上流には高密度の様な流れが発生し, その様な流れが不安定化することで, 上流に渋滞が発生する. ボトルネック強度 (速度低下の割合) と, 渋滞発生の有無, start-and-stop 波の発生位置, 移流不安定性との関係を議論する. さらにボトルネック強度と渋滞発生に関する現象論を構築する.

○ 15:45~16:15 **超離散 KdV 方程式のベックルント変換について**

磯島 伸 (青山学院大・理工), 久保 奨 (総務省統計局), 村田 実貴生 (東京大・数理学), 薩摩 順吉 (青山学院大・理工)

KdV 方程式のベックルント変換については代数計算のみで原理的に N ソリトン解を構成できる「重ね合わせ公式」が知られている. 本講演では, まず離散 KdV 方程式のベックルント変換と重ね合わせ公式を明示した. 重ね合わせ公式を用いて有界な N ソリトン解を得るためには, 連続系と同様に特異点を持つ $(N-1)$ ソリトン解が必要になることを示した. 次にベックルント変換の超離散類似を導出した. 離散ソリトン解の超離散類似がこの変換を満たすことは明らかである. 一方, 重ね合わせ公式を超離散化するには特異解を扱う必要があるため, さらに研究が必要であることも報告した.

○ 16:25~16:55 **バスルートモデルとクラスター形成の解析**

友枝 明保, 西成 活裕 (東京大・工)

本研究では, CA を用いて新しいバスの運行システムを構築し, バスルートのシステム効率というものについて考察した. バスの運行システムにおける大きな問題点として「だんご運転」が挙げられる. これは, バス停での乗客の乗り降りの時間の影響で生じる問題であり, バスの運行システム効率に大きく関わってくる. そこで今回のモデルでは, まずバス停を設置するシステムとバス停を設置しない Hail-and-Ride システムとの比較をすることで, バス停を設置する条件について考察した. さらに, 今回導入した乗客の乗り降りに要する時間の効果で, バスのクラスター形成が再現でき, この結果は平均場近似による計算との整合性も確認できた. また, バス停に Information を持たせバス同士の間隔を調整することで, バスのクラスターが分散されることも示し, このことがより良いシステムにつながることもわかった.

○ 16:55～17:25 1/f noise の生成

佐藤 陽輝, 石渡 信吾, 渡辺 慎介 (横浜国立大・工)

1/f noise に関して, ある1つの生成メカニズムを提案した。これは, スペクトルが $1/f$ を示すパルスの多数の重ね合わせによって 1/f noise を構成するものであり, RC回路を用いた指数緩和の組み合わせによって 1/f noise generator circuit を実現した。また, 同メカニズムで 1/f noise が破綻する条件についても考察した。

開催の期間 平成18年11月6日～平成18年11月8日

参加者 94名

研究集会「水波と浮体の相互干渉に関する力学」

研究代表者

大阪大学大学院工学研究科 高木 健

1. 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渉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渉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。

応用力学研究所の船舶海洋工学グループは、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、過去においても、「船体運動理論研究会」という少人数での研究会を主催していた。これを発展的に引き継いだ研究グループとして、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」、17 年度に「水波と浮体の相互干渉に関する力学」を主催した。これらの研究集会ではテーマを数理解析に絞って一定の成果を得た。特に、昨年度の研究集会では、海外から3名の参加者があり、国際的な広がりを持つこともできた。また、(社)日本船舶海洋工学会西部支部の協賛を受け、研究集会参加者募集における、メール等での宣伝に便宜をはかってもらった。本年度もこのような動きをさらに発展させることを目的として研究集会を開催した。

2. 開催日時、場所

開催日時：平成18年10月27日(金) 13:00~18:00

10月28日(土) 9:00~12:30

開催場所：九州大学応用力学研究所西館6階
共同利用セミナー室(606号室)

3. 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渉)
- 船舶や海洋構造物と波浪との干渉問題(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、弾性物体の相互干渉)

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、昨年度に引き続いて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。以下には具体的に行われた講演の概要を示す。

1. A Numerical Analysis of Coupled Dynamics of Ship Motion and Sloshing Including Multi-Body Interactions

Sa Young Hong and Seok-Kyu Cho (MOERI/KORDI, Korea)

A numerical analysis method is developed to investigate coupled dynamics of ship motion and sloshing as well as multi-body interaction, which can effectively describe global behavior of FPSO and shuttle tanker and FSRU and LNG carrier. Ship motion including multi-body interaction effect is analyzed using a higher-order boundary element method to effectively describe multi-body interaction problem. Time-domain ship motion analysis is made using Cumins' model to utilize frequency-domain analysis results. Sloshing behavior is solved by Finite volume method and free surface is captured using VOF. Hamming method is used to couple ship motion and sloshing in time-domain, iteration is repeated until required convergence criterion is satisfied. Coupled effect due to ship motion and sloshing investigated for the case of ITTC stability committee comparative study on free decay problem of a tanker. The result showed very good agreement with experimental one. Finally coupled effect between FSRU-LNGC is solved for partially filled FSRU and LNGC. It is found that filling ratio of LNGC influences significantly on LNGC motion and the sloshing motion gives favorable effect to the LNGC near resonance period range.

2. Motion of LNG-FPSO, Coupled with Sloshing: Experiment vs. Computation

Boo-Woo Nam (Seoul National Univ., Korea), Don-Yeoul Yu (Samho Shipbuilding Co., Korea)
Dae-Woong Kim (Daewoo Shipbuilding & Marine Eng. Co., Korea),
Yong-Soo Kim (Daewoo Shipbuilding & Marine Eng. Co., Korea) and
Yonghwan Kim (Seoul National Univ., Korea)

In the present study, the coupled problem has been solved by not only numerical method but also experiment. The numerical method to be considered is based on the coupling of an impulsive-response-function approach for ship motion and a finite difference method for sloshing flow. In particular, the sloshing flows are assumed to be governed by the Euler equation, and then the fully nonlinear sloshing-induced forces and moments are added to the wave excitation for ship motion. This implies the ship motion is solved in linear regime with nonlinear excitation. When this is the case, the motion responses of ships can be nonlinear with respect to wave condition. A series of model tests is carried out for the validation of the developed numerical scheme. The experimental model is the 1/100-scale model of a 284-m LNG-FPSO with two prismatic tanks. The ship motions are measured at different wave frequencies and amplitudes, and the motion RAOs are compared with numerical results. In actual ship design, the difference of sloshing-induced impact loads is of great interest between the coupled and uncoupled cases. Comprehensive computations are carried out for the observation of impact pressure on the tank walls when the ship motions are both coupled and uncoupled. In the present model, i.e. the LNG-FPSO, the ship motion shows coupling effects in shallow filling conditions, particular at high frequencies. When the coupling effects appear, it is found that the sloshing-induced loads can have significant difference with those of uncoupled case. Furthermore, due to the nonlinearity of sloshing flows, such difference is dependent on wave condition. A fair agreement of motion response is found between the numerical results and experimental data

3. Resistance Characteristics of a High-Speed Multi-Hull Ship

早川 功 (大阪大学大学院工学研究科学生)

本研究では超高速三胴船の性能向上とさらなる発展を目指し、超高速船について抵抗特性の見地から三胴船の可能性を追求する。まず、現在稼働中の高速船約 150 隻について統計分析をおこない、それらの船型要目、推進性能、輸送効率についての傾向を把握でき、高速船における三胴船の位置づけを確認できた。また、Wigley model を用いた模型実験（抵抗試験、波形解析）による造波特性と線形理論を比較し、理論の応用性を確認できた。次に、排水量一定の元で Wigley 型の単胴船、双胴船、三胴船の抵抗性能についてシミュレーションをおこない、Ship scale の全抵抗において、三胴船は単胴船に比べ有利であったが双胴船よりは不利であった。

最後に、三胴船の安定性、操縦性を考慮して、船長 114.8m の三胴船を船長 130m に伸ばして、同じ抵抗性能についてシミュレーションをおこなったところ、三胴船は双胴船よりも全抵抗を低くすることができた。これらより、三胴船は単胴船より全抵抗が小さいことはもちろん、双胴船よりも全抵抗を小さくすることが可能であることがわかった。

4. Approximation of the Kochin Function

黒田麻利子(大阪大学大学院工学研究科学生)

A resistance of a ship with forward velocity in waves is larger than that in still water. It is known as the added resistance in waves. As the calculation method of added resistance in waves, Maruo's linear theory has been generally used. In this theory, a disturbance of waves is expressed by distributing singularities on wet ship surface, and this function is called Kochin function. However because of a long calculation time and a precision, an approximation method based on the slender assumption is used. Under this assumption, the calculated results agree with experimental data in slender ships. In case that a ship has a blunt bow or a ship is in the shallow draft condition, the results do not agree. In order to improve results in ships other than a slender ship, we propose approximation methods of the Kochin function according to ship shape type.

5. Reflection and Transmission Waves Past an Antisymmetric Body Oscillating in Waves

柏木 正(九州大学応用力学研究所)

A theoretical study is made first on the reflection and transmission of surface waves by a 2-D antisymmetric floating body which is oscillating in response to a regular incident wave. As a consequence, a proof is given for the 'reciprocity' relationships associated with the transmission and reflection waves in the incident wave incoming from the right and incoming from the left, and also for the energy splitting law for the symmetric and antisymmetric components of the waves about a body. Next these findings are confirmed to be true by numerical computations performed with an antisymmetric Lewis-form body for all cases where the body motions are completely fixed, only the heave motion is free, and all modes of body motion are free.

6. Sensitivity Study on SPH Method

Yoo-II Kim and Yonghwan Kim (Seoul National Univ., Korea)

A sensitivity study on the smoothed particle hydrodynamics method (SPH) has been carried out. This gridless Lagrangian particle method has been of great interest, particularly to simulate violent free surface flows. Despite the recent popularity of this method, unlike traditional grid-based numerical schemes, systematic sensitivity study for computational parameters is very limited for SPH. In the present study, the effect of computational parameters in SPH simulation is explored through two-dimensional dam-breaking and sloshing problems. The parameters to be considered are the speed of sound, the type of kernel function, the frequency of density re-initialization, particle number, and smoothing length. Through a series of numerical test, detailed information can be obtained about how SPH solution can be more stabilized and improved by adjusting computational parameters. So far, it is found that (i) naturally, increasing number of particles is beneficial, (ii) the speed of sound is one of most critical parameters in SPH simulation, (iii) applying density re-initialization in regular base shows huge improvement of results, (iv) the kernel function should cover a enough region for better accuracy, but the type of function does not provide dramatic difference, and (v) pressure quantity is dependent on numerical scheme to interpolate/extrapolate.

7. Time Domain Approach on Hydroelastic Analysis of VLFS in an Extreme Wave

Johyun Kyoung and Sa Young Hong (MOERI/KORDI, Korea)

A numerical method is developed for transient hydroelastic response of VLFS in time domain. A finite element method is adopted for both the hydroelastic deformation of a pontoon-type very large floating structure and fluid motion with fully nonlinear free surface conditions. In the previous researches, the transient responses of VLFS are mainly treated by mode-expansion method and Fourier transform which uses so called retardation function which accounts the memory-effect. Because those approaches are basically linear problem, its use is not appropriate to solve the nonlinear problem such as storm surge response by a huge solitary wave elevation. In this study, a three-dimensional free surface flow is formulated in the scope of potential flow theory with the nonlinear free surface conditions. A finite element method based on Hamilton's principle is employed as numerical scheme for fluid domain. To describe the motion of VLFS the Mindlin plate modeling is adopted. The equation of plate motion is discretized by finite element method using virtual work principle and solved by Newmark method. To consider the fluid-structure interaction, the nonlinear problem is numerically solved through an iterative method at each time step. The developed numerical method is proved to be very robust and applicable to any arbitrary shape

of VLFS and fluid domain due to unified finite element formulation for fluid domain and plate.

8. A pFFT-FE Coupling for Hydroelastic Analysis of Floating Flexible Structure in Waves

高木 健(大阪大学大学院工学研究科)

A pFFT-FE coupling method, which can calculate the hydroelastic behavior of floating flexible structures, has been developed. The method can handle a very large number of constant hydrodynamic panels in a reasonable CPU time. The scheme uses a consistent way of the data passing in which the energy is conserved between the generalized modal damping and the radiation waves if the hydrodynamic analysis is accurate enough. In addition, the scheme satisfies the generalized Haskind-Newman relation between the modal diffraction force and the Kochin function. These properties are important to ensure the numerical accuracy. The numerical convergence and the accuracy of the method are demonstrated in various ways including the comparison with an experimental data. Finally an application to the sailing type offshore wind-power plant is shown to demonstrate the applicability of this method to the challenging problem.

9. Simulation of Wave-Induced Motions of a Turning Ship

安川宏紀(広島大学大学院工学研究科)

A practical method for simulating both ship maneuvering and wave-induced motions is presented. Separating the basic motion equations into 2 groups where one is for high frequency wave-induced motion problem and the other is for low frequency maneuvering problem, we derive the total 10 motion equations which are composed of 6DOF equations for high frequency problem and 4DOF (surge, sway, roll and yaw) equations for low frequency problem. New Strip Method was used for estimating the hydrodynamic force components such as added mass, wave damping and wave exciting forces for high frequency problem. The present method coincides with the time domain strip method when dealing with a ship straight moving problem. And when the wave height is set to be zero, the method coincides with the maneuvering simulation method in still water, so-called MMG model. Wave-induced motions for SR108 container ship model in turning condition were predicted using the present method. The predicted results are compared with the free-running model test results. The results roughly agree with the test results. The present method can capture the overall tendency of the wave-induced motions of the turning ship in time domain.

10. Applying THINC Scheme for Computation of Strongly Nonlinear Wave-Body Interaction

胡 長洪(九州大学応用力学研究所)

This presentation is about a recent research on implementation of THINC (tangent of hyperbola for interface capturing) scheme as an interface-capturing method to our CFD code named RIAM-CMEN (Research Institute for Applied Mechanics, Computation Method for Extreme Nonlinear hydrodynamics). The THINC scheme is a high efficient conservative interface-capturing scheme that can guarantee a sharp and non-oscillatory interface. However, treatment of the interaction between free surface and floating body is rather complicated. In this research, a new approach is shown with some numerical examples to simplify such treatment.

11. Numerical Computation Including the Free Interface by Means of a Conservative IDO Method

滝沢研二(海上技術安全研究所)

近年、CFDによる自由界面問題は発展してきており様々な問題に適応されている。一方で、高レイノルズ数での計算はあまり精度のよくないものが多い。そこで、本研究で既存の手法よりも高い精度で計算が行えるように、自由界面追跡に、位相誤差の小さな手法であるパーティクルレベルセット法を用い、流場の計算には非圧縮性流体の1相モデルとしてIDOを用い、これを保存形に拡張した。IDO法は乱流DNSでも精度が確かめられ、特に高レイノルズ数での計算を得意とする手法である。保存形IDO法は、保存形CIP法との類似点が多く、既存の手法の延長として扱えるが、保存性を重視し、また計算精度を損なわない工夫をするために様々な方法を検討している。計算例として、線形近似できる非常に小さな波高の伝播テストを行った。このテストでは高さ方向に2セル以下という荒いメッシュでも十分解析できることがわかった。

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

固体粒子の乱流拡散とその乱流への影響

鈴木敏夫，渡邊 威，後藤俊幸

乱流中に浮遊する固体粒子の拡散の基本的性質（1粒子拡散，2粒子拡散，粒子の分布法則）とその乱流場への影響を直接数値計算を用いて解析を行った。固体粒子は点として扱い，ストークスの抵抗法則に従うと仮定した。この時，粒子の相対拡散がストークス数にどのように依存するかを調べた。また，固体粒子が存在することにより乱流がどの程度変形を受けるか，スペクトルやエネルギー輸送の観点から解析を行った。その結果として，ストークス数の増加に伴い乱流場への影響，特にエネルギースペクトルの散逸領域の増加という大きな影響がみられ，逆に散逸領域より低い低波数帯では若干のエネルギースペクトルの減少が確認された。それに伴ってエネルギー散逸率とレイノルズ数の減少，全エネルギーの減少が確認できた。粒子拡散係数についてもストークス数が増加すると大きく影響を受けて増大するのが確認された。

超流動場における渦輪の運動の数値解析

栢原正行，後藤俊幸

超流動場における渦輪の運動を，渦系法を用いて解析した。Biot-Savartの法則に加えて，常流体・超流体の二流体モデルを導入し，1つ，2つと少数の量子渦輪の運動から，多数の渦輪へと順を追って調べた。また，渦輪のつなぎ換え・分離条件の検証を行った。多数の量子渦輪の解析を行った結果，量子乱流は温度を変化させることで，振る舞いが大きく異なることがわかり，さらに長時間にわたる渦輪の拡散を調べた。

有限温度の減衰量子乱流における散逸構造の研究

小林 未知数，坪田 誠

我々は量子乱流とその周りの素励起を記述する Gross-Pitaevskii 方程式と Bogoliubov-de Gennes 方程式の連立系を数値的に解くことにより，量子乱流における散逸の微視的構造を調べた。低温では散逸が渦芯よりも小さなスケールでのみよく働くのに対して，高温では散逸が渦芯よりも大きなスケールにまで広がることによって量子渦のダイナミクスに直接影響を与えるようになる。我々はこの効果を超流動液体 ^4He における量子渦の相互摩擦力の効果と関連づけることにより，希薄原子気体ボース凝縮体中の量子渦における相互摩擦力係数の温度依存性を初めて導き出すことに成功した。

4次元乱流の微細構造

志賀義孝，中野 徹，後藤俊幸

直接数値計算によりシミュレートされた4次元(4d)乱流と3次元(3d)乱流を比較することにより，乱流の統計性や間欠性の次元依存性を調べた。4次元乱流の2-form(渦度に対応する) Ω_{ij} の空間分布の可視化した結果や歪テンソル $s_{ij} = (\partial u_j / \partial x_i + \partial u_i / \partial x_j) / 2$ の固有値の確率密度関数から，3次元乱流の Ω_{ij} がライン状に分布するのに対して4次元ではシート状に拡がりを持って分布する。4dでのtotal散逸率 $\nu \sum_{i,j} (\partial u_j / \partial x_i)^2$ とそれに対応するスケール r での

速度差(球対称速度差)の間欠性は3dよりも弱く, surrogate 散逸率 $\nu(\partial u_1/\partial x_1)^2$ とそれに関係する縦速度差はわずかに強い。球対称速度差と縦速度差のスケーリング指数も調べた結果, 球対称速度差は4dのほうの間欠的でなく, 縦速度差は4dのほうの間欠的であった。

ヘノン-ハイレス系の記憶関数とカオス誘導摩擦係数

石崎龍二, 森肇, 富永広貴, 黒木昌一, 森信之

決定論的な時間発展方程式を非マルコフな線形確率方程式に変換し, 記憶関数を数値的に求める方法を, ヘノン-ハイレス系を例にして報告した。具体的には, 森の射影演算子法を援用して, ヘノン-ハイレス系の運動方程式を非マルコフな線形確率方程式に変換した。さらに, 非線形力の時間相関関数を用いて, 振動数依存性のあるカオス誘導摩擦係数や記憶関数を数値的に求めた。その結果, ヘノン-ハイレス系のカオス運動は, 時間相関関数の相関時間と記憶関数(揺動力の時間相関関数)の相関時間に, あまり差がなく, 長いタイムスケールと短いタイムスケールの揺らぎに分離できないということがわかった。

Duffing 振動子系の記憶関数とカオス誘導摩擦係数

富永広貴, 森肇, 石崎龍二, 黒木昌一, 森信之

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周波数依存カオス誘導摩擦係数を理論的に求め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。

二軸回転球を用いた乱流生成装置

後藤 晋, 石井伸和, 木田重雄, 西岡通男

歳差運動する球体を用いた新しい乱流生成維持装置を提案する。球体の歳差運動は一定角速度 Ω_p で回転するターンテーブル上で, 一定角速度 Ω_s で球体を回転(自転)させることで容易に実現される。われわれは自転軸と歳差軸とが直交する場合の室内実験を遂行した。その結果, 自転角速度に基づくレイノルズ数 $Re = a^2\Omega_s/\nu$ (ここで a は球体半径, ν は流体の動粘性係数) が数 1000 以上であれば, 十分に弱い歳差でも乱流状態が維持されることが示された。また, $Re = O(10^4)$ 程度の乱流の複雑度は, 同じレイノルズ数なら歳差強度 Ω_p/Ω_s が 0.1 程度で最大化することも明らかとなった。

2 軸回転球体流れの安定性

木田重雄, 松原大樹

一定角速度 Ω_s で回転する球の回転軸が, その軸に垂直な軸のまわりに別の一定角速度 Ω_p で回転している。この球の内部の非圧縮粘性流体の運動の様相は, レイノルズ数 $Re = a\Omega_s/\nu$ (a は球の半径, ν は流体の動粘性係数) と歳差強度 $\Gamma = \Omega_p/\Omega_s$ の大きさに依存して異なる。ここでは, これら 2 つの支配パラメーターで張られる面上において, 流れの定常状態と非定常状態の境界をナビエ・ストークス方程式の直接数値シミュレーションにより求め, 臨界値が約 $(Re, \Gamma) = (1, 270, 0.14)$ であることを示す。

経済物理と乱流現象

中野 徹

経済での価格の変動と乱流での速度の変動は大変似ているので, 両者を共通の手法で持って理解出来るはずである。経済と乱流での揺らぎの分布とその増分の構造関数に焦点を絞った講演をする。

連結階層シミュレーションで探るマルチスケール・マルチフィジクス・ダイナミクス— 現状と展望—

草野完也

極めてスケールの異なる物理プロセスの相互連関が本質的役割を果たすマルチスケール・マルチフィジクスダイナミクスのシミュレーションは様々な科学技術分野における共通した課題になっている。連結階層シミュレーションはマクロスケールとミクロスケールに適合した計算モデルを有機的に連結することで, マルチスケールの連関を計算に取り込む試みであり, 流体力学のみならず固体力学, プラズマ物理学, 大気科学などにおける応用が期待されている。本稿では粒子モデルと連続体モデルの連結を中心に, 典型的な階層間連結手法の概要を説明すると共に, その応用として地球シミュレータセンターで実施している燃焼流体および雲形成に関する連結階層シミュレーション研究の成果を紹介する。

カオス力学系の大偏差統計, ギブス測度, 位相共役変換に関する若干の考察 宮崎修次

Chaotic piecewise linear map whose statistical properties are identical to those of a random walk on directed graphs such as the world wide web (WWW) is constructed, and the dynamic quantity is analyzed in the framework of large deviation statistics. Gibbs measures include the weight factor appearing in the weighted average of the dynamic quantity, which can also quantitatively measure the importance of web sites. Currently used levels of importance in the commercial search engines are independent of search terms, which correspond to the stationary visiting frequency of each node obtained from a random walk on the network or equivalent chaotic dynamics. Levels of importance based on the Gibbs measure depend on each search term which is specified by the searcher. Also is discussed topological conjugate transformation between one dynamical system with a Gibbs measure and another dynamical system whose standard invariant probability measure is identical to the Gibbs measure.

不安定周期軌道を用いた多自由度カオス力学系における動的相関関数の決定 小林 幹, 藤坂博一

近年, 乱流に埋め込まれた一本の不安定周期軌道を用いて, 乱流の静的特性を再現する研究がなされた。それに対し, 我々はカオスに埋め込まれた一本の不安定周期軌道を用いて, 多自由度カオス力学系の動的な特性である時間相関関数を近似的に決定する方法を提案した。ここでは, 多自由度カオス力学系の一つである大域結合ロジスティック写像を用いて, 我々の方法の妥当性を検証した。

液晶電気対流の乱流間相転移における Directed Percolation ユニバーサリティ 竹内一将, 黒田真史, Hugues Chaté, 佐野雅己

Directed Percolation (DP) クラスに属する相転移の実験的証拠を示す。独立な臨界指数全てが良い精度で一致したのは実験研究では初めてのことである。

DP は吸収状態への相転移を議論する際の基本モデルであり, そのユニバーサリティクラスは多種多様なモデルで見られることが数値的・理論的に確立されているが, 実験的にそれが十分な信頼性をもって観測されたことは未だかつてなく, 大きな未解決問題の1つとして認識されている。本研究では, 時空間欠性乱流が DP で記述できるという Pomeau の予想に着目し, ネマティック液晶の電気対流系でみられる2種類の乱流状態間 (DSM1-DSM2) の時空間欠性を扱う。実験は電圧一定の定常状態と電圧急降下の際のクエンチ状態の2通りについて行い, 臨界指数も含めて DP と精度よく一致する結果が得られた。

我々はまた, DSM1-DSM2 転移において知られていた, 電圧の掃印速度に依存する特異なヒステリシス現象が DP と稀な自発生成を仮定することで説明できることを示した。それにより, このヒステリシスがほぼ吸収状態への相転移でユニバーサルに見られるものであることが判明した。

三次元一様等方性乱流直接数値計算データベースのウェーブレット解析—エネルギー伝達について— 岡本直也, 芳松克則

十分に発達した高レイノルズ数乱流における, エネルギートランスファー(グリッドスケールに含まれるあるスケールから, サブグリッドスケールへのトランスファー)の小スケールの統計について調べた。テラーマイクロスケールレイノルズ数 $R_\lambda = 167$ から 732 にわたる三次元非圧縮一様等方性乱流の正規直交ウェーブレット解析を行った。位置とスケールで局在したエネルギートランスファーの各スケールにおけるゆらぎや, グリッドスケールからサブグリッドスケールへの流入に対する, グリッドスケール中の各スケールの役割を調べた。また, そのエネルギートランスファーとエネルギーの各スケールにおける相関を調べた。本報告では, $R_\lambda = 471$ のデータに対する結果の一部について述べる。

パッシブスカラーの異常スケーリングに関する固有値問題の数値計算 水野吉規, 金田行雄, 山本有作

Kraichnan モデルに基づいて, 乱流中のパッシブスカラー場の4点相関関数の支配方程式を得ることができるが, 4次構造関数などの微小なスケールにおけるスケール依存性は, この方程式から導かれる固有値問題の解によって決定される。ここでは, この固有値問題を数値的に解くことを行った。計算された固有値は, 同じ方程式に対する漸近解析の結果と, パッシブスカラーの直接数値シミュレーションから得られる構造関数のスケーリング指数ともよく一致していることが確認された。ただし, 本計算の特色は固有値としてさまざまな統計量のスケーリング指数が得られるだけでなく, 固有関数としてそれらの観測点の配置への依存性も得られることにある。ここでは, この固有関数を用いて, スカラー差 $(\psi(\vec{x}_1) - \psi(\vec{x}_2))^2$ と $(\psi(\vec{x}_1) - \psi(\vec{x}_3))^2$ の相関を調べた。パッシブスカラーに対する相関はガウス場に対する相関よりも, 特に $\vec{x}_1 - \vec{x}_2$ と $\vec{x}_1 - \vec{x}_3$ の方向が大きく異なる範囲で強くなることがわかった。

渦輪の非線形不安定性

服部裕司, 福本康秀

渦輪の不安定化現象について, 非線形領域における挙動を調べるため, 直接数値シミュレーションを行った. 曲率不安定性をとらえることを目的として, トーラス内部に閉じ込められた渦輪を対象とし, トロイダル座標系における Navier-Stokes 方程式の数値解法を開発した.

Modeling of a vortex ring flow at high Reynolds number

Felik Kaplanski

Typical shapes of laminar and turbulent vortex rings were demonstrated in paper by Glezer and Coles (1990). The first one is characterized by a relatively thin core compared with the second one. It was shown that the hydrodynamic impulse in both cases is conserved within the experimental error. Based on the above-mentioned findings an approximate model for describing of the vortex ring at high Reynolds numbers is suggested. The present contribution extends the analysis reported previously (F. Kaplanski, and Y. Rudi, 2005), where only the diffusive scale was considered. As expected, the formulation of the problem with the arbitrary scales allowed us to select cases when approximate solutions exist and take into account the turbulent length scales. Introducing the time-dependent turbulent eddy viscosity (Lugovtsov, 1976), the model for a laminar vortex ring is generalised to flows at high Reynolds numbers. This generalised model, based on the computational methodology reported in (B.J. Cantwell, Introduction to Symmetry Analysis, 2002), is used to obtain the topological change of the flow.

低レイノルズ数乱流における乱流粘性係数

柴田博史

空間 3 次元一様乱流について, 乱流粘性係数の計算を行なった. 系の大きさは $2\pi \times 2\pi \times 2\pi$, 格子点を $100 \times 100 \times 100$ にとり, 格子ボルツマン法を用いて一様乱流のシミュレーションを行なった. 比較した一様乱流のレイノルズ数は 19.09 と 4.44 である. また, 周期境界条件を設定した. 実際には運動量流れの 2 時間相関関数の計算を行なった. 結果は, 運動量流れの 2 時間相関関数の取る値が, レイノルズ数が 19.09 のとき 4.44 のときに比べ, 圧倒的に大きかった. これは, レイノルズ数が大きいほど乱流粘性係数が大きいことを示唆しており, 乱流運動が発達するほど乱流粘性係数は大きくなると思われる.

射影演算子法における渦粘性の数値的評価

岡村 誠

空間 1 次元の乱流モデルである Kuramoto-Sivashinsky 方程式を基礎方程式として, 射影演算子法の定式化において渦粘性を数値的に評価した. 別の方法によって渦粘性を評価した過去の研究の結果とほぼ同じ値が得られた.

ランダムな乗算過程としてのエネルギー散逸の間欠性

金田行雄

発達した乱流中の単位時間あたりのエネルギー散逸率 ε の統計を非圧縮一様等方性乱流の直接数値計算 (最大格子点数 2048^3 , テイラーマイクロスケールレイノルズ数約 728) のデータを用いて調べた. $\alpha < 1$ と r_0 を定数, $r_n = r_0 \alpha^n$ とし, ε_n を散逸率 ε の半径 r_n の球内における平均, $\alpha_n = \varepsilon_{n+1}/\varepsilon_n$ とするとよく知られているように $\varepsilon_{n+1} = \alpha_n \varepsilon_n$ と書くことができ, 数列 $\{\varepsilon_n\}$, ($n = 0, 1, 2, \dots$) はランダムな係数 α_n が次々と掛け算される乗算過程とみなすことができる. DNS データによれば $\{\alpha_n\}$, ($n = 1, 2, 3, \dots$) どのの相関は ε_n の統計に無視できない影響を持つ. また, α_n と α_{n+k} の相関の n への依存性が弱いという意味で相似的なスケール領域が存在する.

低レイノルズ数正方形ダクト乱流の秩序構造

河原源太, 関本 敦, M. Uhlmann, A. Pinelli

正方形断面をもつ真っ直ぐなダクト内の十分発達した乱流の直接数値シミュレーションを行った. 乱流が持続する限界状態に現れる秩序構造, 及びプラントルの第二種二次流れの出現と秩序構造との関連性について議論する.

壁乱流における圧力統計量のスケーリングについて 辻 義之

境界層中で計測された圧力変動データを基に、その標準偏差やスペクトルなどの統計量のスケーリングについて考察する。とくに、従来から議論されている内層変数、外層変数での無次元化が圧力等計量にどの程度有効なのかを、速度変動との相違に触れながら報告する。また、幾つかの DNS (境界層, チャンネル, 円管) などとの比較と Re 数依存性についても考察する。

乱流シェルモデルの準周期解 梅木 誠

2つの代表的な乱流シェルモデルである、Gledzer のオリジナルな実変数モデルと、Gledzer-Ohkitani-Yamada (GOY) 複素変数モデルの少数 (4 ~ 10) モードでの数値計算を、粘性係数 ν を詳細に変化させて行い、2重周期解を含むアトラクターの詳細な分岐構造を明らかにした。2重周期解のポアンカレ写像は、一般化したサークル写像でよく近似できる。また、複素変数モデルの対称性について考察し、対称性を課せば、外力の数が 1 または 2 の場合には複素モデルが実モデルを含んでいることを示した。

3 プログラム

1 1 月 2 3 日 (木) ○印は特別講演

- 13:30 14:00 鈴木敏夫, 渡邊 威, 後藤俊幸 (名工大)
固体粒子の乱流拡散とその乱流への影響
- 14:00 14:30 栢原正行, 後藤俊幸 (名工大)
超流動場における渦輪の運動の数値解析
- 14:50 15:20 小林 未知数, 坪田 誠 (阪市大院理)
有限温度の減衰量子乱流における散逸構造の研究
- 15:20 15:50 志賀義孝, 中野 徹 (中大理工), 後藤俊幸 (名工大)
4次元乱流の微細構造
- 16:10 16:40 石崎龍二 (福岡県立大), 森隆 (九大応力研), 富永広貴 (佐賀大医), 黒木昌一 (福岡女子大),
森 信之 (九州共立大工)
ヘノン-ハイレス系の記憶関数とカオス誘導摩擦係数
- 16:40 17:10 富永広貴 (佐賀大医), 森隆 (九大応力研), 石崎龍二 (福岡県立大), 黒木昌一 (福岡女子大),
森 信之 (九州共立大工)
Duffing 振動子系の記憶関数とカオス誘導摩擦係数

1 1 月 2 4 日 (金)

- 9:00 9:30 後藤 晋, 石井伸和, 木田重雄, 西岡通男 (京大工)
二軸回転球を用いた乱流生成装置
- 9:30 10:00 木田重雄, 松原大樹 (京大工)
2軸回転球体流れの安定性
- 10:20 11:20 中野 徹 ○ (中大理工物理)
経済物理と乱流現象
- 13:00 14:00 草野完也 ○ (海洋研究開発機構地球シミュレータセンター)
連結階層シミュレーションで探るマルチスケール・マルチフィジックス・ダイナミクス—現状と展望—
- 14:20 14:50 宮崎修次 (京大情報)
カオス力学系の大偏差統計, ギブス測度, 位相共役変換に関する若干の考察
- 14:50 15:20 小林 幹, 藤坂博一 (京大情報)
不安定周期軌道を用いた多自由度カオス力学系における動的相関関数の決定
- 15:40 16:10 竹内一将, 黒田真史 (東大理物理), Hugues Chaté (CEN Saclay), 佐野雅己 (東大理物理)
液晶電気対流の乱流間相転移における Directed Percolation ユニバーサリティ
- 16:10 16:40 岡本直也, 芳松克則 (名大院工)
三次元一様等方性乱流直接数値計算データベースのウェーブレット解析—エネルギー伝達について—
- 16:40 17:10 水野吉規, 金田行雄, 山本有作 (名大院工)
パッシブスカラーの異常スケーリングに関する固有値問題の数値計算

11月25日(土)

- 9:00-9:30 服部裕司(九工大工), 福本康秀(九大数理)
渦輪の非線形不安定性
- 9:30-10:00 Felik Kaplanski (Tallinn University of Technology)
Modeling of a vortex ring flow at high Reynolds number
- 10:20-10:50 柴田博史(崇城大工総合教育物理)
低レイノルズ数乱流における乱流粘性係数
- 10:50-11:20 岡村 誠(九大応力研)
射影演算子法における渦粘性の数値的評価
- 13:00-14:00 金田行雄[○](名大院工)
ランダムな乗算過程としてのエネルギー散逸の間欠性
- 14:20-14:50 河原源太, 関本 教(阪大基礎工), M. Uhlmann, A. Pinelli (CIEMAT)
低レイノルズ数正方形ダクト乱流の秩序構造
- 14:50-15:20 辻 義之(名大院工)
壁乱流における圧力統計量のスケールリングについて
- 15:40-16:10 梅木 誠(東大理)
乱流シェルモデルの準周期解

4 開催日程, 場所

開催日程 2006年11月23日(木) - 11月25日(土)
開催場所 九州大学応用力学研究所多目的研究交流室(W601号室)
講演数 23件
参加者数 37人

・ 目的

九州の西方に広がる東シナ海は、黒潮をはじめ、中国大陸の河川や台湾海峡からの水と物質を受け入れ、豊かな生物相を育ててきた生産性の高い海である。しかし、過剰漁獲による水産資源の減少、中国大陸の水環境の変化、地球温暖化などの気候変動の影響など、近年のエチゼンクラゲの頻繁な大量来遊などに現れているように、東シナ海の海洋環境は変化しつつあり、近い将来のさらに大きな環境変化が危惧される。応用力学研究所では黒潮前線渦の挙動や低塩分水の広がり、また海水混合過程について主として物理的な側面から研究を進めているが、環境変化を評価するためには、多様な時間スケールを持った化学・生物過程の研究も欠くことができない。本特定研究では東シナ海の海洋環境の変動について、物理・生物・化学の面からのアプローチを通じて、環境変化予測手法を構築するために必要となる様々な過程の理解と、その共有化を目的とする。

・ 個別課題の概要

東シナ海における栄養塩環境の変動予測 (愛媛大学 郭 新宇)：渤海、黄海、東シナ海を対象とする高解像度数値モデルと現地観測データを用いて、長江と黄河の淡水流出量の変化による流動場と栄養塩供給の変化を明らかにすることを目的とし、今年度は主として渤海における黄河期限水の広がり、黄海への影響について、物質の動きを再現する結果を得た。

対馬海峡底層における水塊特性 (水産大学校 滝川 哲太郎)：2004年から2006年にかけて、対馬海峡を横断する観測を繰り返し、海峡を通過する流量・淡水・熱・栄養塩・クロロフィルを見積もった。夏季に対馬海峡を通過する栄養塩は、長江起源の栄養塩の2倍程度になり、その他から、特に黒潮域からの寄与が示唆された。また、初冬期においても、混合層以深で低温高塩分で低酸素の水塊が観測され、東シナ海陸棚縁辺部に起源を持つことが推測された。

Finite Volume Coastal Ocean Model(FVCOM)を用いた黒潮前線渦による黒潮フロント横断方向輸送量の定量的評価 (九州大学 磯辺 篤彦)：昨年度 FVCOM を用いて黒潮前線渦の挙動とそれに伴う物質輸送について、概ね満足できる評価が可能になったことから、今年度は、長江起源の栄養塩が河川リユームの中を長時間、従って長距離運ばれうる力学的メカニズムについて、多層モデルを用いた比較的シンプルなモデルを用いた計算を行い、浅海域の高濁度水が光を遮ることによって、栄養塩が枯渇せず遠くまで運ばれ得る可能性をしめし、同時に高クロロフィルの分布と低塩分水の分布がずれている理由を説明することを試みた。

東シナ海における基礎生産への長江水の影響 (長崎大学 石坂 丞二)：九大応力研で設置した定期フェリー「ニューかめりあ」による水温・塩分および蛍光光度のモニタリング結果と、衛星リモートセンシングデータとの比較検討に基づいて、7月の低温水は黄海起源、8月の高温低塩分水は長江起源であったと推測された。このことから、対馬海峡の低次生産は長江起源水だけでなく、黄海起源水にも影響を受けている可能性が示唆された。

化学的トレーサーを用いた東シナ海の水塊構造解析 (富山大学 張 勁)：2004年夏季に九大応力研および長崎大学と共同で実施した東シナ海陸棚域の観測で得られた試料の分析を進め、希土類元素の組成比分布の形状から、陸棚域に分布する水塊には、黒潮表層水と長江起源水の単純な混合では説明できない水がしばしば認められ、海底湧水を含む他からの起源を検討する必要が示された。

・ まとめ

本研究は、東シナ海の海洋環境の変動について、物理・生物・化学の面からのアプローチによって研究を進めるという幅広い枠を持っているが、特に東シナ海の生物環境を支配している栄養塩あるいは栄養塩を含む海水の挙動という点で共通する部分を持っている。長江起源の栄養塩が、陸棚上の広範囲の基礎生産に寄与しうる物理過程が示唆されると同時に、対馬海峡を経て日本海に流入する栄養塩は、長江起源ばかりではなく、黄海や黒潮起源の割合も少なくないことを示唆する結果が、独立した複数のデータソースから得られた。中国大陸寄りの海域のデータを収集することの重要性が示唆され、今後、中国との共同研究を進めていく必要性が再確認された。

対馬海峡底層水の変動特性

水産大学校海洋生産管理学科 滝川哲太郎

1 はじめに

対馬海峡(図1)は、東シナ海と日本海を結ぶ狭く浅い海峡であり(幅約180km, 平均水深約100m), 対馬暖流は東シナ海からこの対馬海峡を経て日本海に流入し, 対馬海峡から日本海にかけての水塊特性や一次生産過程に大きな影響を与えている. 本研究では, 対馬海峡とその周辺海域における物理・生物・化学過程に関する船舶観測を行い, 対馬海峡通過流量から東シナ海から日本海に流入する熱, 淡水, 栄養塩, クロロフィルといった輸送料を見積もる. また, 初冬季の混合層以深に観測された低温高塩分水・低温低塩分水の水塊特性に着目し, その起源について考察する.

2 観測・データ

2004年から2006年にかけて, 対馬海峡から山陰沖(図1)におけるCTD観測(水温, 塩分, 溶存酸素, 蛍光強度)・標準採水層での採水(塩分, クロロフィルa, 溶存酸素, 栄養塩類, 炭酸系)・ADCP観測・pCO₂測定が季節を通じて年間3-8回行われた. これらの海洋観測は水産大学校練習船「天鷹丸」・「耕洋丸」, 長崎大学練習船「長崎丸」・「鶴洋丸」, 海洋研究開発機構学術研究船「淡青丸」によって行われた. また, 対馬暖流上流域の水塊特性との比較のために, 1965年から2004年までの気象庁PN線(図1)の観測データを用いた.

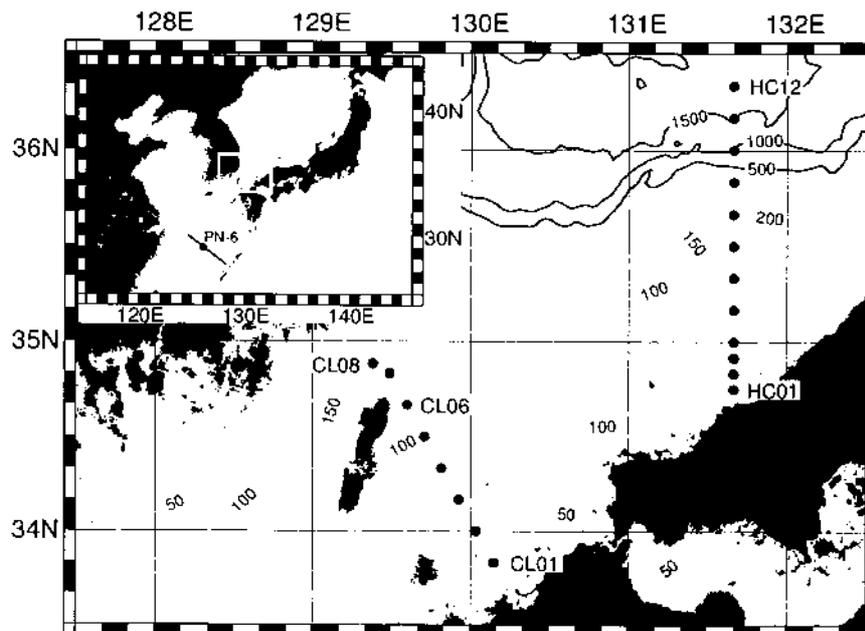


図1: 対馬海峡と山陰沖の代表的な観測点(CL, HC測線). 実線と灰色線は海底地形を表し, それぞれ200mと50m間隔. 左上図の実線は気象庁PN線.

3 対馬海峡を通過する物質輸送

対馬海峡東水道(図1中CL測線)を通過する物質フラックスおよび輸送量(流量・淡水・熱・クロロフィルa)を船舶観測により測定した結果を図2に示す. 流量, 熱・淡水輸送量は過去の研究(Isobe et al., 2002JGR, Takikawa et al., 2005JPO)と同程度である. ここでは示さないが, 初冬季・春季の栄養塩輸送量は長江からの輸送量と同程度であるが(Zhang, 1996CSR), 夏季はその2倍以上が対馬海峡を通過し日本海に流入している. この夏季の栄養塩輸送量の増加は台湾海峡からの輸送量では説明できず(Chung et al., 2001JO), 黒潮域からの大陸棚への栄養塩供給が考えられる.

4 初冬季混合層以深の水塊特性

初冬季の対馬海峡の混合層以深において、上層の水塊と異なる低温高塩分と低温低塩分で特徴付けられる2種類の水塊を毎年観測した。低温低塩分水の溶存酸素は表層と同程度高く、比較的最近、形成されたことが考えられる。この低温低塩分水 (19°C 以下, 塩分 34.0 以下) は日本海表層の低温低塩分水と高温高塩分な表層の対馬暖流水の混合水として説明できる (図 3)。一方, 低温高塩分水 (19°C 以下, 塩分 34.5 以上) は溶存酸素が表層と比べ相対的に極端に低く、形成されてから長期間経過していることが考えられる。この低温高塩分水の水塊特性は、東シナ海の大陸棚縁 (図 1 中 PN-6) の底層 (100 m 深) の水塊特性と一致する (図 4)。

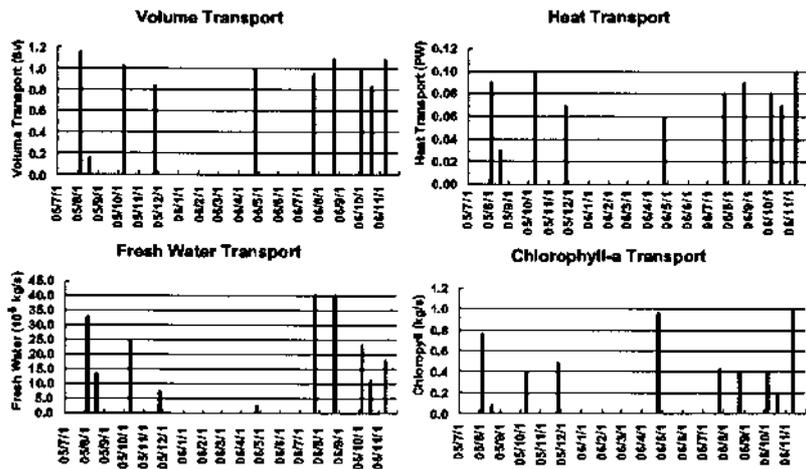


図 2: 東シナ海から日本海へ流入する対馬海暖流流量と熱, 淡水, クロロフィル a.

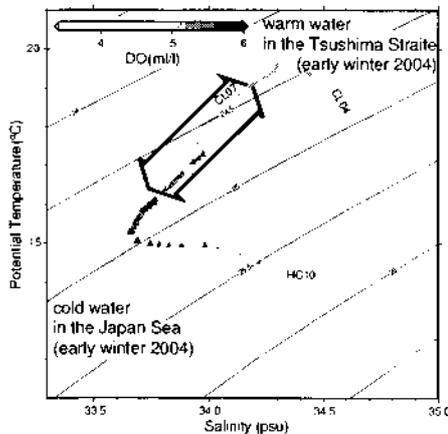


図 3: 対馬海峡で観測された低温高塩分水と低温低塩分水の水塊特性.

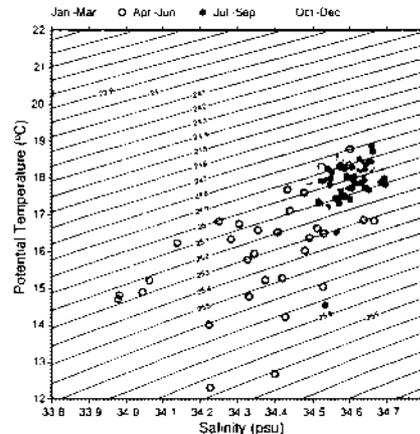


図 4: PN-6(図 1) の底層 (100 m 深) における各季節の水塊特性.

研究組織

滝川哲太郎 (水大校), 尹宗煥 (九大・応力研), 森本昭彦 (名大・HyARC), 鬼塚剛 (水大校), 渡邊敦 (名大・地球環境)

成果報告

Atsushi Watanabe, Akihiko Morimoto, Tetsutaro Takikawa and Goh Onitsuka: Summertime pCO₂ variability associated with freshwater flux in the Tsushima Warm Current in 2005-2006. *Geophysical Research Letters*, submitted.

研究目的

東シナ海、黄海、渤海という縁辺海での海洋環境は、陸上の人間活動に強く影響されている。本研究の目的は渤海、黄海、東シナ海を対象とする高解像度数値モデルを構築し、現地観測データを用いて、長江と黄河の淡水流出量の変化による流動場の変化と栄養塩供給の変化を明らかにすることである。

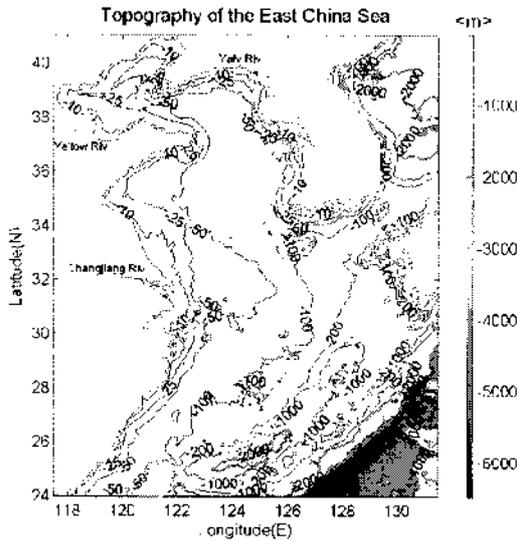


図 1. モデル領域と地形。

研究方法

昨年度、図 1 に示された領域で、4 大分潮、月平均の河川流量、風応力、熱フラックスと開境界における流れ、水温と塩分値で駆動した海洋モデルを構築した。今年度は、このモデルを用いて、河川流量、潮汐、風応力に対する応答を調べた。また、モデルの応答について、渤海に集中して解析を行った。このような選択をした理由は以下の通りである。1) 過去 50 年間、長江の流量は大きな変動がなかったが、黄河の流量は激減してきた (図 2 の上段)。2) 長江プルームの挙動は最近の研究 (Chang and Isobe, JGR, 2003; Chang and

Isobe, JO, 2005) によりかなり明らかになった。

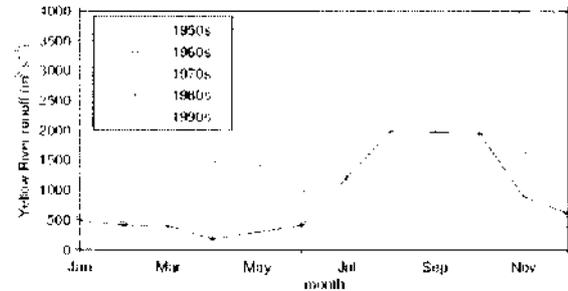
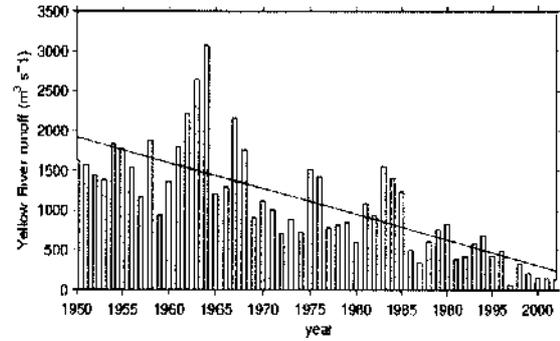


図 2. 過去 50 年の年平均黄河流量 (上段) と 10 年毎の月平均流量 (下段)

計算結果

月平均の外力で得られたモデル結果の評価は観測データから求めた 2 月、5 月、8 月と 11 月の渤海における水温と塩分の水平および鉛直分布 (図省略) で行った。モデルは冬の混合状態と夏の成層構造をよく再現していることを確認できた。また、黄河プルームを注目すると、計算値と観測値ともに、1) 冬の低塩分水が莱州湾 (渤海の南部にある) の東南部に出現すること、2) 春の低塩分水が莱州湾の西南部に出現すること、3) 夏の低塩分水が黄河口から北東方向に延びること、4) 秋の低塩分水が莱州湾沿岸に沿って南下すること、を示しており、数値モデルが黄河プルームの挙動をよく捉えていることがわかる。

黄河プルームの挙動を支配する要因は、季節風と潮流が考えられる。数値実験として、潮流と風応力を無くして、再計算を行った (図省略)。潮

流がなくなると、低塩分水が早く黄海に流出し、冬季の莱州湾にある低塩分水がなくなる。一方、季節風がなくなると、夏に北東方向へ延びる黄河プルームや秋に莱州湾東南部に移動する低塩分水がなくなる。

黄河プルームの挙動を把握した上に、渤海海峡における海水交換流量の季節変動とその黄河流量変動に対する応答に調べた。図3に渤海海峡における海水交換流量中の潮汐残差流、密度流、吹送流の割合を示す。これらの成分は三つの実験から得られた。実験1は潮汐のみで、実験2は潮汐と浮力にかかわる外力で、実験3は実験2の外力にさらに風応力を加えて駆動した。実験2と1の差を密度流、実験3と2の差を吹送流の影響とみなしている。図3に示されるように、密度流と吹送流はそれぞれ潮汐残差流(約 $57000\text{m}^3/\text{s}$)の半分の交換流量をもたらしている。また、両者は異なった季節変動を示している。さらに、冬から夏までの密度流による交換流量の増加量は河川流量の増加量の10倍前後に達していることが分かる。

ほかの外力を変化させず、図2に示された過去50年間の黄河流量のみ変化させた計算から、黄河流量変動に対する渤海海峡における交換流量の変動を見積もった(図4)。50年代の値を基準とすると、90年代の黄河の河川流量はその2~3割前後に落ちている。一方、渤海海峡における交換流量は季節によるが、50年代から90年代まで最大で約2割減少している。一番大きく減少しているのが5月である。これは黄河プルームの挙動に関する。黄河から入った淡水は潮流と風の影響により、すぐ黄海に流出せず、次の年の春に流出することがモデル結果から分かった。

ほかに、外洋起源水と河川水を代表するトレーサー実験も行ったが、結果の解析は進行中である。

成果報告

王強・郭新宇・武岡英隆(2007): A numerical study on the seasonal variation of Yellow River plume path in the Bohai Sea, 日本海洋学会2007

年度春季大会, 3月, 東京都。

郭新宇・王強・武岡英隆・高会旺(2007): 渤海海峡における海水交換とその黄河流量に対する応答, 日本海洋学会2007年度春季大会, 3月, 東京都。

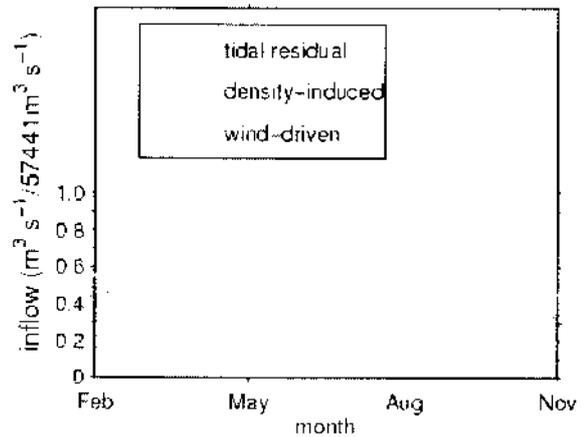


図3. 渤海海峡における海水流入量に対する潮汐残差流、密度流と吹送流の割合の季節変動

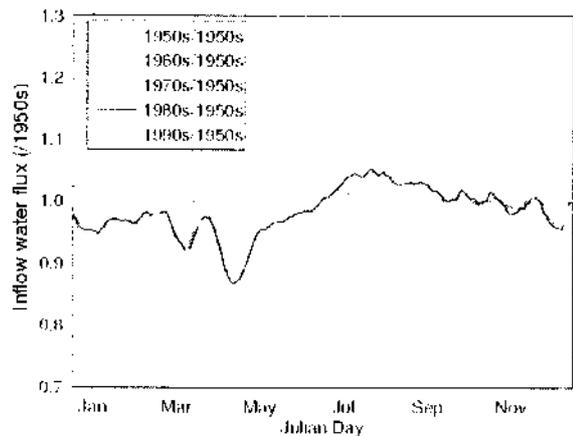
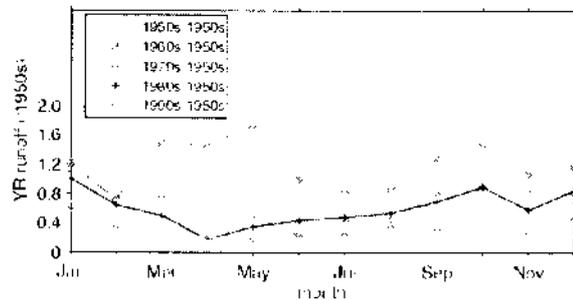


図4. 50年代を基準にする60、70、80と90年代の黄河流量(上段)と渤海海峡における海水流入量(下段)

Finite Volume Coastal Ocean Model (FVCOM)を用いた黒潮前線渦による

黒潮フロント横断方向輸送量の定量的評価

九州大学・大学院・総合理工学研究院 磯辺篤彦

1. はじめに

東シナ海陸棚上の基礎生産を支える栄養塩の供給源として、本研究では、陸棚縁での黒潮フロント横断方向輸送に注目している。そのため、黒潮前線波渦の発達や崩壊過程に伴う、陸棚上への海水輸送量の定量化を目指してきた。そして、三角形格子の配置によって陸棚縁周辺における精緻な地形表現が可能な有限体積法沿岸海洋数値モデル(FVCOM)を利用し、そのような輸送量を定量化することに成功した。結果は昨年(2006年)の報告書に示したとおりである。しかし、東シナ海において重要な位置を占めるであろう、長江起源の栄養塩を無視して、海域全体の収支を議論することは出来ない。そこで本年度は、一旦、黒潮起源の輸送量から離れて、長江起源の栄養塩の動態を研究する。これは、黒潮起源の栄養塩を含めた、対象海域全体における栄養塩収支を包括的に明らかにしていく一助となるであろう。

さて、夏季の東シナ海陸棚上では、しばしば長江希釈水周辺に植物プランクトンのブルームが衛星観測される(Fig.1)。このことより、ブルーム形成への長江起源の栄養塩の大きな寄与が伺える。しかし、夏季の活発な基礎生産のもと、長江を発した栄養塩が陸棚を横切る数ヶ月間も維持されるとは考えにくい。本研究では、長江を発した栄養塩が基礎生産に供されることなく長距離輸送され、広い範囲で基礎生産を活性化させる輸送モデルを提案する。

2. モデル

長江希釈水は、東シナ海の陸棚を 10cm/s 程度の平均流で東向きに運ばれる。この状況を多層モデルで表現する。Fig.2 に示すように、無限深の海洋上に多層構造のプリュームを浮かばせ、流速 U_b の背景流で流す。例えば、図のような三層構造にした場合、 f 平面上で水平粘性や移流項を無視すると、プリュームの支配方程式は、

$$h_{k1} + J(q_k, h_k) = \nabla \cdot (A_k \nabla h_k)$$

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= f^{-1} \{ (g_2 + g_3) h_2 + g_3 h_3 + P_b \} \\ q_2 &= f^{-1} \{ (g_2 + g_3) h_1 + g_3 h_3 + P_b \} \\ q_3 &= f^{-1} \{ g_3 h_1 + g_3 h_2 + P_b \} \end{aligned} \right\}$$

と、 k 層目の層厚 h_k の移流・拡散方程式に帰着する。 A は境界面摩擦に起因する係数(詳細は略)で、 g_k は reduced gravity、 P_b は背景流と地衡流平衡にある圧力場である。

以上の物理モデルに生態系モデルを組み合わせる。各層内で移流・拡散される植物プランクトン(P)、栄養塩(N)、デトリタス(D)で構成される単純な系に、以下の生化学項を加えた数値解の時間発展を求める。

$$\left. \begin{aligned} N_i &= -vN/(K+N) \cdot P + dD \\ P_i &= vN/(K+N) \cdot P - mP - S_p/H \cdot P \\ D_i &= mP - dD - S_d/H \cdot D \end{aligned} \right\}$$

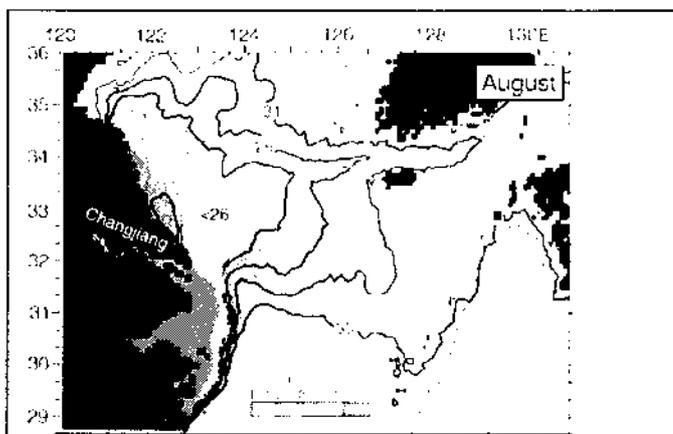


Fig.1 環日本海海洋環境ウォッチのウェブサイト (<http://www.npec.or.jp/>) からダウンロードした MODIS のクロロフィル a イメージのコンポジット画像(8月)。2002年から2006年の画像を使用した。図には Chang and Isobe (2003) のモデルで得た表層塩分分布を重ねている。

植物プランクトンの基礎生産速度(v)、半飽和定数(K)、分解速度(d)、枯死速度(m)、プランクトンとデトリタスの沈降速度(S_p, S_d)、そして有光層厚(H)を適当に選び(詳細は講演時)、60日間の計算を行った。ただし、上層に覆われた層では基礎生産速度を0とした。これは、濁った長江希积水内では、希积水底部まで十分に光が届かない状況を表している。

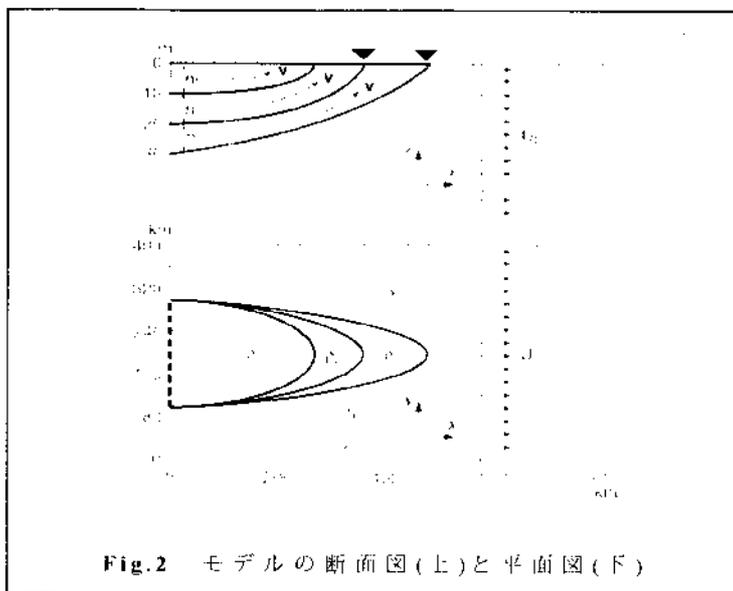


Fig.2 モデルの断面図(上)と平面図(下)

3. 栄養塩の長距離輸送過程

Fig.2の左側境界から、長江希积水を模した空間スケールで、適当な時間経過と共に下層から順番に放出する。Fig.1の衛星画像を比較するべく、層数を6に増加させた場合の各層の端(破線: $h=0$)と、各グリッドでの最上層の植物プランクトン濃度を、Fig.3に示す。

東進するプルームの先端から南側に、下層のアウトクロープ領域が形成される。そして60日の経過後でも、Fig.1と同様に、表層プランクトンは東進するプルームの南側で高濃度を維持する。

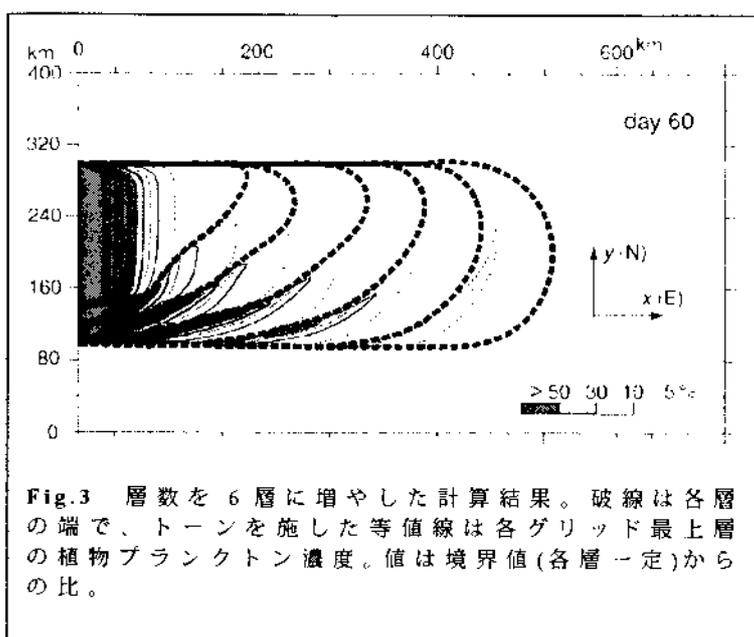


Fig.3 層数を6層に増やした計算結果。破線は各層の端で、トーンを施した等値線は各グリッド最上層の植物プランクトン濃度。値は境界値(各層一定)からの比。

【目的】

東シナ海に流入する長江水には栄養塩が多く含まれる。長江起源水は東シナ海を通過して対馬海峡に流入していることが知られている。そのため、対馬海峡の生産は長江起源水の影響を受けている可能性がある。

長江の流量は夏季に多く、冬季に少ないと言われている。そこで本研究では、夏季の対馬海峡のクロロフィル a 濃度に対する低塩分水の影響を明らかにすることを目的とした。

【方法】

博多・釜山間の定期客船「ニューかめりあ」で 2006 年 7 月と 8 月に観測された表層水温、塩分、クロロフィル蛍光、2006 年 7 月 20~27 日に長崎大学練習船長崎丸で観測された水温、塩分、クロロフィル a 濃度、栄養塩、人工衛星 AQUA 搭載センサー MODIS の 2006 年 7 月と 8 月の SST とクロロフィル a、東北大学で衛星センサー MODIS、AVHRR、AMSR-R から合成された新世代海面水温 (NGSST) のデータを用いた。

【結果】

ニューかめりあ のデータによると、7 月に低温水、8 月に高温低塩分水が対馬海峡に存在しており、いずれも高クロロフィル a であった。また、7 月と 8 月の中旬には海峡全域に低温高塩分度高クロロフィル a となっている水も存在していた。(図 1)

MODIS のデータでも、7 月 13 日に低温度高クロロフィル a の水、8 月 5, 7, 14 日には高温度高クロロフィル a の水が対馬海峡に存在していたことが分かった。また、7 月中旬には済州島の南にパッチ状の低温水が存在していた。(図 2)

長崎丸のデータでも、西水道および五島列島北西に低温水、五島列島南西に高温低塩分水が存在し、いずれも高クロロフィル a であった。五島列島南西の高温低塩分水が北上し、8 月に対馬北に存在していた可能性が示唆された。

NGSST のデータでは、7 月の上旬から中旬にかけて黄海から東シナ海および対馬海峡に低温水が張り出していた。また、7 月中旬には済州島の南にパッチ状の低温水が存在していた。そして、7 月下旬から済州島および対馬海峡に向かって東シナ海から高温水が移動していた。

これらのデータから 7 月の低温水は黄海起源水、8 月の高温低塩分水は長江起源水であったと考えられた。対馬海峡の低次生産は長江起源水だけでなく、黄海起源水にも影響を受けている可能性が示唆された。

さらに、7 月の低温高塩分度高クロロフィル a の水は済州島の南で湧昇した水が対馬海峡に流入していた可能性があった。また、8 月の低温高塩分度高クロロフィル a の水はこの時期に台風が対馬海峡を通過していることから台風の影響によるものと考えられた。

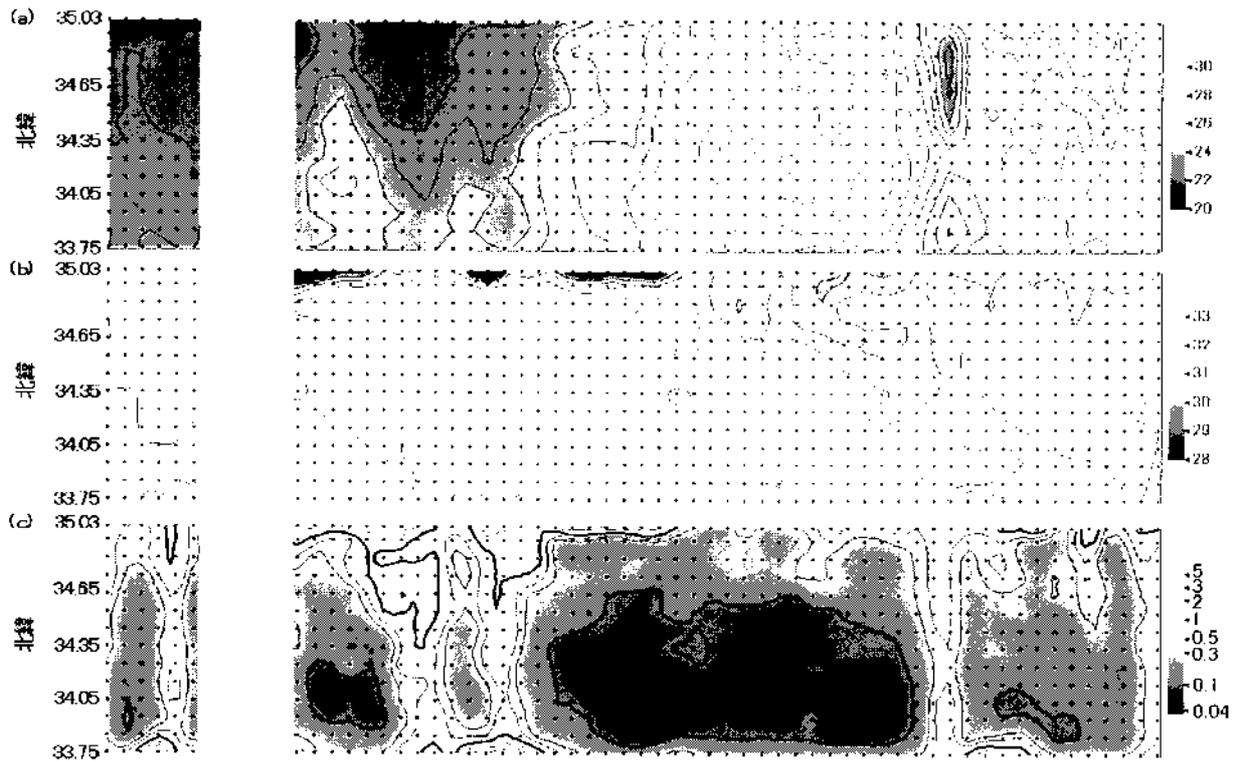


図 1. ニューカレドニアで観測された水温(°C)(a)と塩分(b)およびクロロフィル a ($\mu\text{g l}^{-1}$)(c)

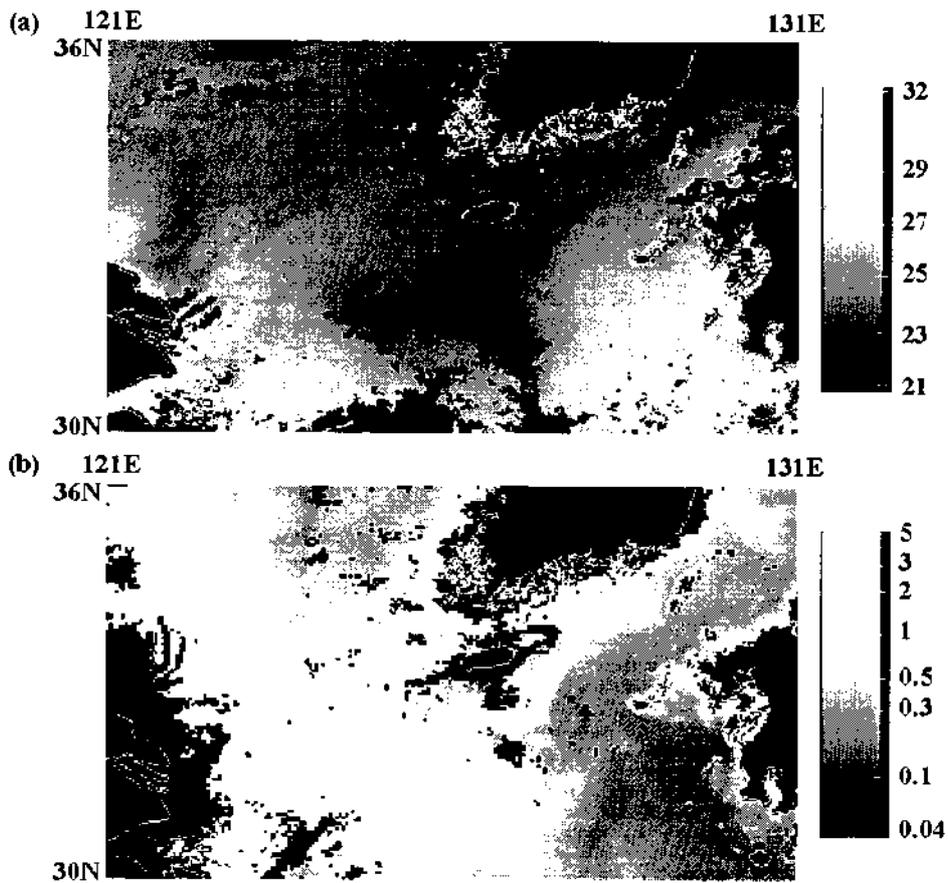


図 2. 7月9日から16日にかけてのMODISの表面水温(°C)(a)とクロロフィル a ($\mu\text{g l}^{-1}$)(b)の平均画像

化学的トレーサーを用いた東シナ海の水塊構造解析

富山大学大学院理工学研究科 張 勁

目的

東シナ海は、広大な大陸棚を持つ縁辺海であり、沿岸海洋における物質循環メカニズムや、人為起源物質による縁辺海洋環境への影響を視野にいたした沿岸－外洋間の相互作用等の研究に格好なフィールドである。また、日本海へ流入する対馬暖流水の流入経路にあたり、東シナ海のみならず日本海の研究にも大変重要である。一方、赤道付近に源をもつ黒潮と沿岸水の特性和それらの東シナ海への寄与率、また栄養塩の供給源とその供給状況の変動等を明らかにする際に、酸素同位体組成や希土類元素等微量元素濃度は、水塊を特徴づけることが可能であり、トレーサーとして大変有用である。しかし、これらのトレーサーは敏悦に水塊区分ができる反面、短時間・広範囲の観点からの調査に不向きであり、係留等時空間的变化を捉える観測には応用が難しい。そこで、本研究は従来の塩分・水温・栄養塩等ルーチン的分析と、酸素同位体組成や希土類元素濃度の計測に加え、漂流ブイ観測や水温・塩分・栄養塩センサー係留系の結果と組み合わせ、より詳細な水塊解析とその変動の解明を目的としている。物理データとリンクさせて解析する必要性から、東シナ海の海洋物理構造に関する研究に豊富な経験をもつ九州大学応用力学研究所との共同研究を実施した。

研究方法の詳細

1. 東シナ海及び日本海の海水試料採取とその化学分析

- a) 東シナ海において海水試料の採取を行い、塩分・栄養塩等ルーチン分析を行う。
- b) 酸素同位体比及び溶存態希土類元素の濃度を測定する

2. 東シナ海における詳細な水塊解析とその変動の解明

- a) 化学分析データから、東シナ海の水塊構造と長江水・黒潮による混合状況を把握し、対馬暖流水の水塊特性も考察する
- b) 化学分析データに、漂流ブイ観測や水温・塩分・栄養塩センサー係留系の結果を組み合わせ、より詳細な水塊解析とその変動解明を行う。

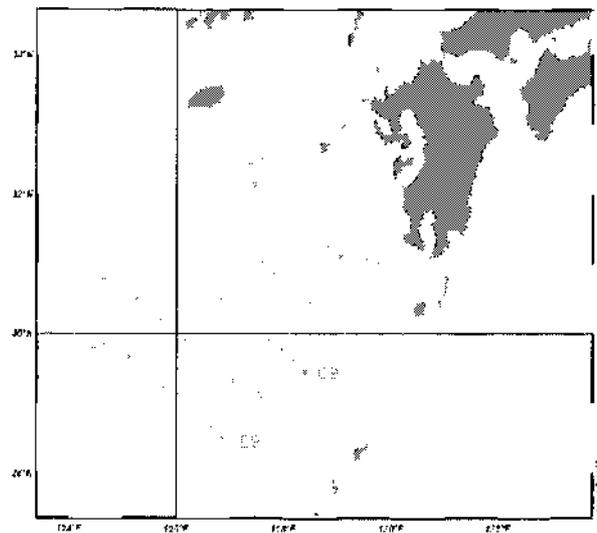


図1. 赤点は希土類用海水試料の採取を行った測点

結果及び考察

本年度は昨年度の結果を基に、さらに溶存希土類元素の濃度(図1)を加え、東シナ海陸棚上水塊構造の詳細解析を試みた。

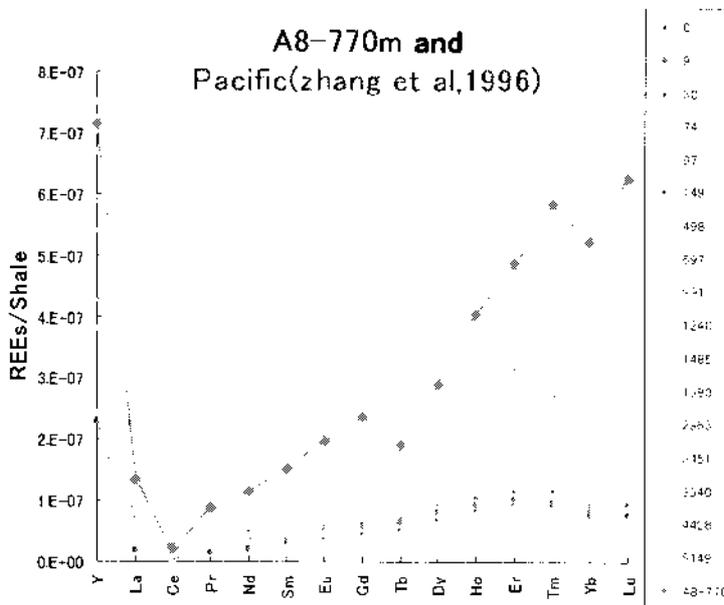
その結果、1996年 K96-05 航海と同観測点(A1)において、溶存酸素の低い水塊は同じ希土類パ

ターンが得られた。また、A1の0~30mとC1の0mとD1の0m~65(海底直上)の希土類濃度が、その起原水と思われる長江水・黒潮水・南シナ海表層や浅層海水・雨水のそれよりはるかに高く、右上がりであった。これは、異なった希土類濃度を持つ他の水塊が流れ込んできたことを示唆する。一つの可能性として、この水塊は、長江の旧河口域付近に海底から染み出した地下水、或いは地下水と混合した再循環水ではないかと推測された。

そして、陸棚縁に位置する四つの測点について、C9の中層水(水深90m; 34.86psu; 22.43°C)は黒潮表層水、深層水(水深600m; 34.28psu; 7.16°C)は黒潮中層水だと分かった。一方、E9及びD9が黒潮水と陸棚水との混合水からなると考えられた。さらに、測

点A8(図3)では600m以浅が黒潮水と陸棚水の混合水だと考えられたが、水深700m(海底より53m)

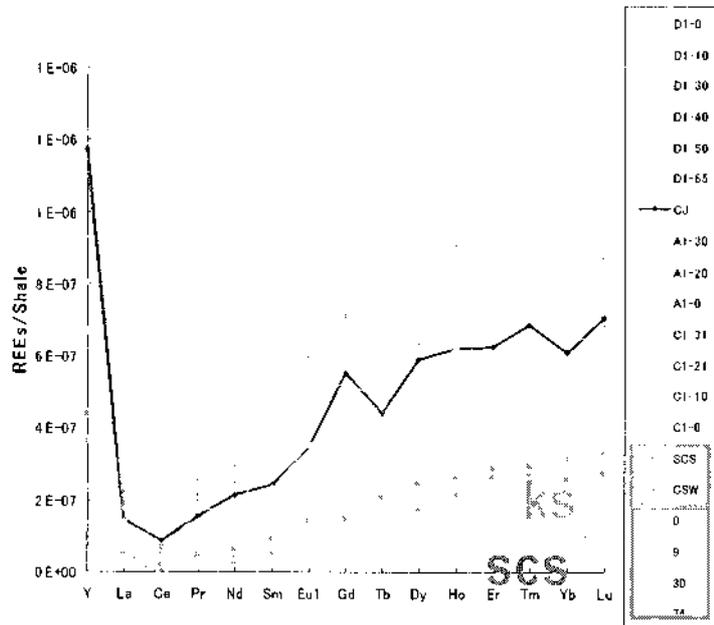
図3. 陸棚斜面底層水と太平洋深層水の希土類パターン



Sea · A Miniature Case of the World's Oceans Ocean Science Meeting, Hawaii, Feb., 2006.

Hatta, M. Zhang, J. and Bai, L.-L. Water mass characterization using geochemical tracers: IS SGD responsible for the low dissolved oxygen water in the East China Sea? WPGM, Beijing, Jul., 2006.

図2. 頁岩で規格した東シナ海陸棚上海水の希土類パターン



が重希土類の濃度が浅層水に比べて2倍も高く、滞留時間は比較的長い太平洋深層水(2000m)のパターンと類似していた。これらのことから、陸棚斜面の深層水は、(1)黒潮表層水・中層水、(2)北太平洋中層水、(3)長江の影響を強く受けている陸棚水、(4)太平洋深層水(湧昇?)や斜面から移流してきた間隙水の影響を受けていることが分かった。

成果報告

Hatta, M. and Zhang, J. Subduction Water Mass Characterization by Rare Earth in the Japan

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ーは、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。沿岸海況監視システムとして海洋レーダーの開発や利用を進めるにあたり、各機関における研究開発の状況、技術開発にかかる問題点、観測結果などを発表し、計測精度や解析手法の改善点、技術応用の可能性を議論することを目的に、海洋レーダーに関連する機関の研究者が一堂に会する研究集会を開催した。

研究集会は、平成 18 年 12 月 20 日午後 (13:00~18:15)、12 月 21 日午前 (9:00~12:20) 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 室にて開催された。

まず、琉球大学理学部の宮里らは、石垣島と与那国島に設置された情報通信研究機構の 9.2MHz 帯海洋レーダーの正負の一次散乱ピーク比を用いた海上風向推定法に関し、QuickSCAT とメソ客観解析データと比較し空間的に一致することを示した。また、現場データである係留ブイとも比較し、さらに、前線通過時の空間パターンの時間変化をとらえられることを示した。

次に、スリーエス・オーシャンネットワークの勝呂は、CODAR 社の Sea Sonde レーダーのアンテナパターンの計測方法を紹介し、実測パターンをスムージング処理し方向分離を行なう方法について解説した。さらに、方位特性を精度よく保つための良いアンテナパターンの条件ならびに不良パターンの要因について実例をあげて示した。CODAR 型レーダーを用いる際の指針になると思われる。

琉球大学工学部の富森らは、電力中央研究所の 41.9MHz レーダーと国土技術政策総合研究所の 24.5MHz レーダーの異なる周波数のレーダーで同時に観測された有明海の観測実験の流速データを用い、観測波長の違いによる流速観測深度差によって発生する流速・流向差の検出を試みた。大潮時では 2 レーダーで求まる流速・流向に違いはほとんどなかったが、小潮強風時には 24.5MHz レーダーで観測された流向は、41.9MHz レーダーのそれに比べて右向きになっていることを示した。

大阪大学工学部の宮本らは、観測時期が異なる HF 帯レーダーと VHF 帯レーダーとの観測流速について精度評価を行った。両者の残差流には沖ノ瀬環流の空間パターンが明瞭に出ており、最大流速で 2cm/s の違いで両者は一致していることを示された。また、各レーダーの流速観測値を用いて行い粒子追跡シミュレーションを実施し、浮遊物挙動の可視化をデモンストレーションした。

情報通信研究機構の鹿島らは、石垣島と与那国島に設置の遠距離海洋レーダーと 24.5MHz レーダーとの比較および係留ブイ COMPASS との比較を行い、南北成分に誤差が大きく与那国レーダーからのビームの読み取りにスパイク状のエラーが出ていることを示唆した。原因の同定までは至っていないため、今後の検証が待たれる。

情報通信研究機構の灘井は、海洋レーダーで得られるスペクトルデータにおいて、Wave-Current Interaction を考慮して、流速場の空間変動による海面散乱断面積の非一様性を加味して渦度場や発散場を求める際の影響についてシミュレーションを行って検証した。

九州大学応用力学研究所の石井らは、対馬海峡東水道に設置した海洋レーダーの表層流速観測値から収束および発散場を求め、漂流ブイでの観測と比較し、その評価を行なった。

愛媛大学の高橋らからは、情報通信研究機構の石垣島と与那国島に設置のレーダーで得られた 3 年

分(2002,2004,2005 年)の流速データを詳細に解析し、黒潮流路の 3 つのモードの時空間変動を明らかにした。

北海道大学低温科学研究所の江淵から、4 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レーダー観測について、引き続き漂流ブイ、底面設置流速計などとの比較結果の報告があった。長期にわたる観測結果から、宗谷暖流の水平構造(幅 50km、岸から 20~30 km)と夏季に 1m/s 程度と大きくなる季節変動が明らかにされた。

海上保安大学の寄高らは、海上保安庁が八丈島と野島崎に設置した長距離レーダーの流速観測の精度検証を行った。係留ブイに設置した ADCP との比較では、アンテナパターンの修正による効果が現れているが、まだ誤差が大きいとの報告であった。この原因としては、係留 ADCP の傾きによる誤差と表層でのノイズの影響とした。

電力中央研究所の坪野は、2003 年に大阪湾において異なる場所で実施された 2 回の観測データを統合して M2 潮流の平面分布を求めた。4 つまたは 3 つの視線方向流速が求まる領域での処理法に注意点が示されたが、結果として大阪湾の北部全体での M2 潮流の大きさと方位の分布を詳細に得ることができた。

九州大学応用力学研究所の吉川の発表では、吹送流構造の詳細把握のため、対馬東水道に設置した海洋レーダーと筏での係留 ADCP 観測から得られる流速と気象庁メソ数値モデルの風速データに関して共変成分の抽出するために主成分解析を行なった。その結果、エクマン螺旋が検出され、風の影響を受ける表層厚の見積もりが行なえることを示した。

電力中央研究所の坂井らは、有明海諫早湾口での VHF レーダー観測の結果から、水平流動場に関して ADCP や先行的研究の結果との比較を行い、秋季から冬季にかけての季節特性を最大流速値、発散・収束場の解析から明らかにした。

九州大学応用力学研究所の柳らの発表では、同じ有明海において国土技術政策総合研究所で観測された 24.5MHz レーダーによる流動場変動と GPS ブイの漂流軌跡から表層流の収束・発散を求め、有明海湾奥の低塩分でクロロフィル A が高い水塊の挙動を把握する試みが述べられた。

琉球大学理学部の久木は、1999 年と 2000 年に沖縄本島西岸域を対象として実施された海洋レーダー観測のデータに加えて、QuikSCAT 海上風データ、TMI 海面温度データ、JCOPE データなどの種々のデータを用い、沖縄本島西方海域の表層海流は主に南向きに流れていることを示した。

九州大学大学院総理工研究科の渡慶次らは、情報通信研究機構の遠距離海洋レーダーの結果と衛星高度計から得られる SSHA を用いて、黒潮と黒潮に接近する中規模渦の挙動の詳細解析の可能性を示した。海洋レーダーの流速から吹送流成分と潮流成分を除去して得られた高分解能な地衡流成分で見られる中規模渦と、広域であるが時空間分解能の低い SSHA から求まる中規模渦との違いについて論じた。

今回の研究集会では 16 件の講演が行なわれ、活発な議論がされた。特に今回は、多くのレーダーが配備されてきたことによる多周波での観測や、収束・発散場の議論という流速値そのものよりも面的観測の利点を活かした解析の研究発表が多く行なわれた。各所において、徐々に海況監視システムとしての海洋レーダーの高度な研究開発やデータ利用の進展が図られてきたことを示している。ただ、多くはその端緒に立ったところであるため、今後さらに研究が必要と考えられる。海洋レーダーに関する研究の進展のために、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. 目的

地球温暖化や様々なスケールの大気汚染等の環境問題は、人間活動によって排出される汚染物質が大気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、各国の経済発展に伴う汚染物質の排出量の増大が、将来の大気構成物質の濃度や組成を変化させ、環境問題の深刻化を招くと危惧されている。とりわけ、経済活動の著しい拡大や人口増加が今後も予測されているアジア域は、地域から地球規模の環境問題に大いに影響を及ぼすであろうと危惧されている地域の一つである。このような問題の解決には、高精度の排出量データベース [エミッション・インベントリー] と化学輸送モデルを用い、大気構成物質の組成や濃度を定量的に評価することが重要である。これらの背景を踏まえて、地球環境フロンティア研究センター [FRCGC] では、アジア域を対象とした、過去 [1980-2000] および将来 [2010、2020] の人為起源エミッション・インベントリー [Regional Emission inventory in ASia (REAS)] の開発を行ってきた。

本共同研究において、REAS と九州大学応用力学研究所鶴野教授グループが進められている領域大気モデル研究を連結させ、大気構成物質濃度の将来変動予測を行なう。とりわけ、NO_x や NMVOC 等の大気汚染物質を主要な前駆体とする二次汚染物質であるオゾン¹は、対流圏において強力な温室効果気体となり、さらに、人間の健康や植物に直接的なダメージを与える光化学大気汚染物質として、近年、そのアジアスケールでの汚染が問題視されている。そこで、本研究では、東アジアにおける対流圏オゾンの将来変動に着目する。

2. モデルシミュレーションの概要

領域化学輸送モデルに USEPA で開発された CMAQ Ver.4.4 [Byun and Ching, 1999] の入力データとして、FRCGC で開発したエミッション・インベントリー [REAS] を利用し、現在 [2000 年排出量] と将来 [2010、2020 年排出量] の通年シミュレーションを行なった。CMAQ の化学反応モジュールは、SAPRC-99 [化学種:72 種, 反応:214 本] 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。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] のデータベースを用いた。領域気象場には、2000 年 NCEP/NCAR の気象データ [2.5° reanalysis data] を利用した RAMS Ver.4.4 [Pielke et al., 1992; Cotton et al., 2003] の計算出力を与えた。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。REAS 以外のモデル入力用データ [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 [2000 年] ・将来 [2010、2020 年] のモデルシミュレーション共に同じ値を用いた。

3. 将来排出量推計の概要

2010、2020 年将来排出量データは、社会経済シナリオに基づくエネルギー需要予測 [Long-range Energy Alternatives Planning system (LEAP 2000)] によって算出、排出規制動向、FAO の将来予測値等より作成された。中国に関しては、環境政策成功型 [PSC]、通常成長型 [REF]、および環境政策失敗型 [PFC] の 3 種の社会経済シナリオに沿った排出量予測が行なわれた。他の国に対しては、REF レベルの排出シ

ナリオが適用されている。

4. 結果及び考察

モデル計算によるオゾン濃度の再現性を確認するために、日本の観測地点[東アジア酸性雨ネットワーク (EANET)]について、2000年排出量を用いたモデル計算と2000年の観測データの比較を行なった[図1]。図1に示すように、モデルはオゾンの濃度レベルや季節変動特性を上手く再現しており、モデルと観測の相関係数は、0.61-0.85であった。

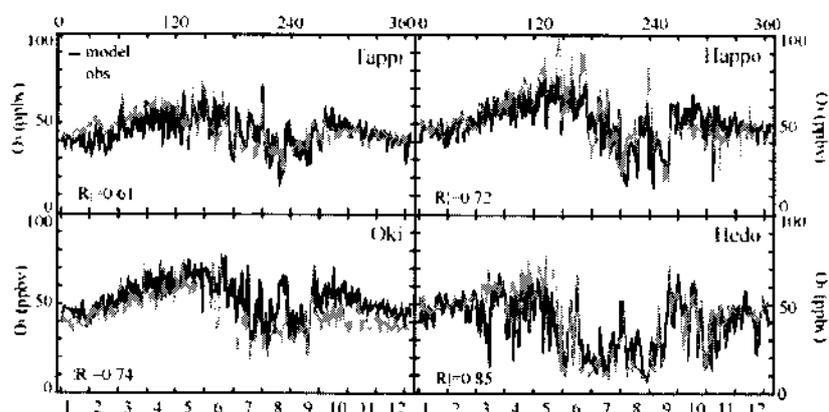


図1 EANET[竜飛、八方、隠岐、辺戸]における観測(OBS)とモデル(CMAQ)の日平均オゾン濃度

図2は、2000年から2020年間の、各排出シナリオ [PSC, REF, PFC] に従った、年平均オゾン濃度の増加量を示す。2020年 REF シナリオに従うと、中国東・南部において、オゾン濃度は4-8ppbv 増大する。日本域では、最大で4ppbv 程度のオゾン濃度が増大すると予測された。2020年 PFC シナリオでは、中国東部を中心にオゾン濃度の増大が非常に大きく、揚子江流域以南の地域において、10-12ppbv のオゾン濃度の増大が予測された。日本域のオゾン濃度は2ppb 以上増大し、特に、西日本の一部地域において、6-8ppbv の増大が予測された。PSC シナリオに従うと、中国北部地域において、オゾン濃度の若干の減少 [5ppbv 程度] がみられた。他に地域においても、REF シナリオに比べて、低い濃度上昇 [0-6ppbv] が期待できた。特に、30° N以北の地域において、オゾン濃度の上昇は、2ppbv 以下に抑えられることが判明した。

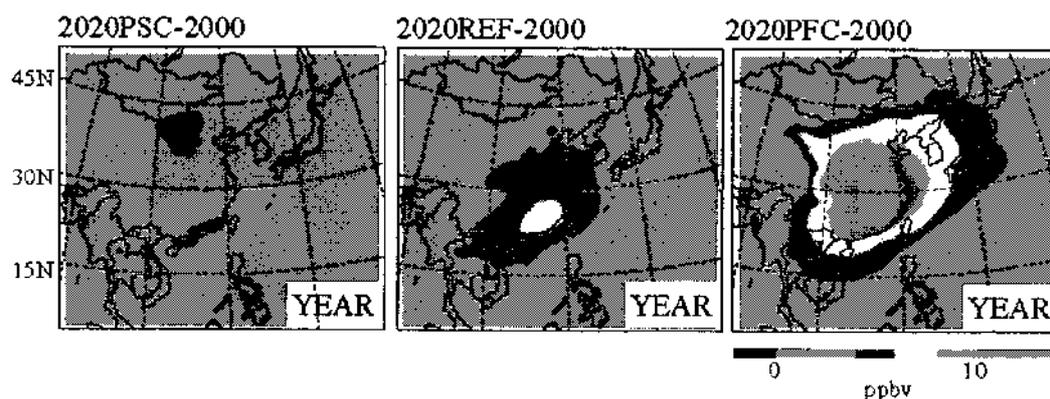


図2 各排出量シナリオ [PSC, REF, PFC] に従って計算された、2000-2020年の月平均オゾン濃度の増加量 [2020PSC-2000、2020REF-2000、2020PFC-2000]

5. 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 利真 (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 助教授)、鶴野 伊津志 (九州大学 応用力学研究所 教授)

次世代無人探査機の研究開発

(独) 海洋研究開発機構 山本郁夫

1. はじめに

地球温暖化の原因究明には、海洋における二酸化炭素の収支量や溶存量の観測が重要となる。この二酸化炭素の観測が、全地球規模的に精度良く行えれば、地球温暖化解析の精度向上に寄与することができる。このような海洋観測を、広い海域で効率良く行い、大量に精度の良い海洋データを取得するためには、自律型無人探査機（定深度観測用巡航探査機、表層広域観測用自律ヨットブイ、低エネルギー消費型水中グライダー等）が有効な手段である。また、気象変化観測のみならず、海洋の鉱物資源や生物資源探査、地震予知支援等にも広域な探査領域をカバーできる自律型無人探査機の開発ニーズが高い。自律型無人探査機において、広域探査のために航走の長距離化が望ましい。長距離探査航走を実現するためには、製作前の設計段階で、力学及び数理工学に基づく航走体最適モデル構築、試作模型を用いた水槽試験による事前性能検証とモデル改良、実機展開に向けての検討を入念に行う必要がある。その中で、フォルトトレランス的設計（故障許容安全設計）の観点から、フェールセーフ性等故障時のミッションの継続遂行を可能なシステムの開発を行う必要がある。

本研究では、上記必要性を鑑みて構築した探査機開発のあるべき姿に基づき、新しい探査機メカニズムと制御システムを開発した。

本報告書では、通常世の中に存在する探査機をベースに開発したものと概念を多少超えた革新的なアプローチとして水棲生物等の運動原理をベースに開発したものについてまとめる。最後に、それらを総括した次世代無人探査機の将来像について述べる。

2. 開発法のあるべき姿

宇宙船、航空機、自動車、船舶、発電プラント等一般の機械システム製造にも共通することであるが、大規模化や高度システム化された機械の創出、製作においては、大規模複雑性、システム高度性の度合いが高まれば高まるほど、製作後判明した不具合による機械の再製作は費用的にも技術的にも困難になる。潜水機分野においても例外ではなく、特に初期設計時に、運用スペックを満たす入念な試設計を行い、製作前に問題がないことを詰めておく必要がある。

図1に本研究の中で構築した潜水機開発法のあるべき姿についてまとめる。図中左側のフローはビークル開発における大まかな流れを示す。ビークルの運用スペックが策定された後、ビークル仕様決め、模型試作による検証を経て、

実機設計、製作、海上試験を行い運用に資するものを開発していかなければならない。図中右側のフローはビークル開発をシステムテックを行うための設計面のプロシージャを示す。ビークル初期仕様を決めた後、ビークルの6自由度運動を力学的に記述するビークル非線形運動モデル（数学モデル）を構築し、制御も含めた全体フィードバックシステムを鑑み、制御系設計モデルも構築し、ビークル運動の数値シミュレーション解析を行う。解析結果はビークル仕様決めへの再検討に使用する。ビークル仕様を決定後、模型を試作し、水槽試験を行う。ここでは運動制御特性の試験を中心にを行い、その過程で得られた流体特性のデータは数値シミュレーションで用いたモデルの流体力係数の修正にも活用し、モデルの精度を上げる。また、試験では実機航走を想定した制御ロジックを用いて行い、実機試験時にも対応できるものを目指す。水槽試験の検証結果はビークルの仕様決めへのフィードバックし、数値シミュレーションを再試行して、満足な結果が得られるまでビークル仕様決めと模型試験のループを実行する。検討後、実機製作に向けた基本設計、詳細設計を行うが、製作までの設計のシームレス性を鑑み、CAD/CAM 設計化と製作図面の電子化を行っておくことが重要である。

上記開発のあるべき姿に基づき、探査機の開発検討を行ったので次章にて詳細を述べる。

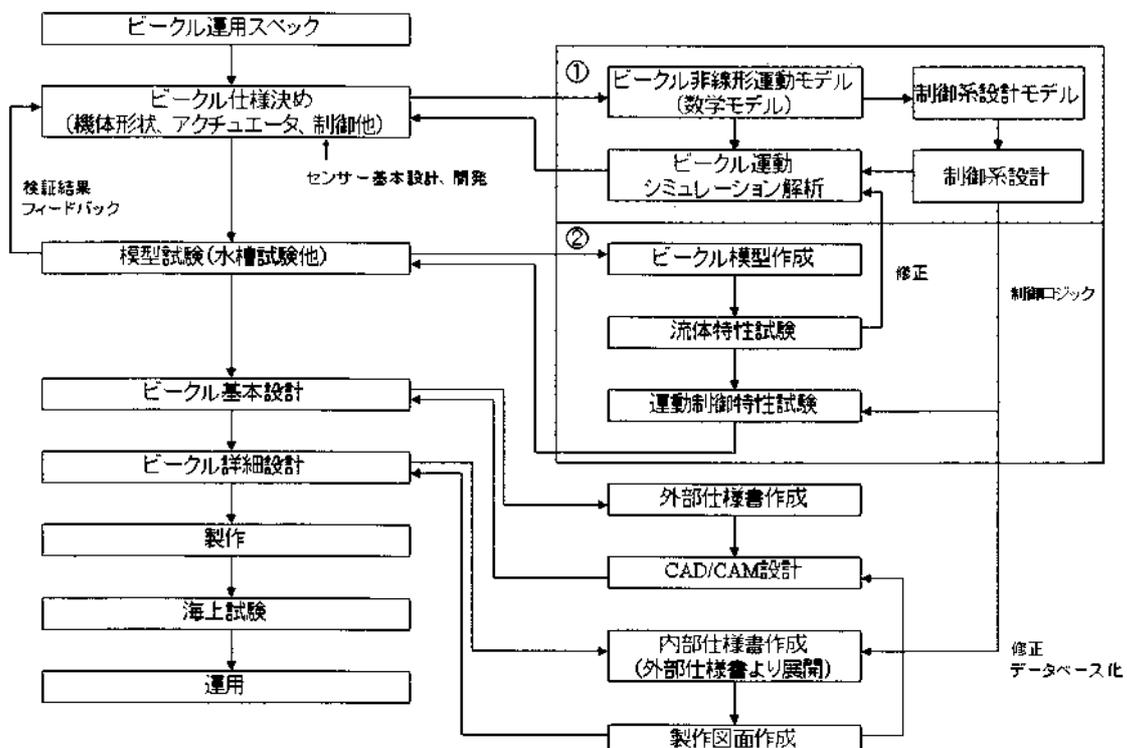


図 1 開発法のあるべき姿

3. 長距離航走用無人探査機

長距離航走用無人探査機の開発においては、長期にわたり航走し、広範囲な海域の観測を確実に実現することが必要で、そのために、効率の良い航走が可能な探査機設計法と航走制御アルゴリズムの確立と故障時のフェールセーフ性を確保する航走システムの確立が重要である。

航走体の効率の良い航走を可能とするために、航走時に受ける流体抵抗を最小化する形状最適化設計と航走延伸用のアクチュエータの検討が考えられる。

機体形状最適化設計のために、CFD (Computer Fluid Dynamics) による流体形状最適化設計を行った。シリンダ形状を従来形とし、Renolds Averaged Navier-Stokes 法により、外皮表面の圧力分布が均一になるように形状設計を行った。図2に結果を示す。右側の新しい形状では、圧力変動が少なく、即ち、表面流の速度変動が小さいため、乱流発生が発生しにくい低抵抗型形状となる。

航走延伸用アクチュエータとして水中翼の装着を考えた。図3にコンピュータグラフィックス (CG) による水中翼付探査機の設計例を示す。翼揚力、抗力の力学シミュレーションによる検討を行い、実現性の目途を確かめた後、図4に示す水槽試験用のモデル試作を行った。水槽試験と解析の結果、エネルギーと体積を同一にすれば、水中翼付低抵抗形状探査機にて従来形より2倍以上の航走延伸の可能性があることがわかった。さらに、ZIGZAG 航走等に対しても機体機首回頭の追従性が良く、例えば、ケーブル等複雑な側線に沿った航走にも運動性の観点から対応の可能性が高い。また、フォルトトレランス的設計法に基づき、故障時のフェールセーフ性の確保の観点からは、壊れてもミッション遂行可能なシステム設計法を構築し、制御ロジック面でのアルゴリズムを開発した。

本モデルの実用化に向けての設計では、探査機の着揚収時の安全性の問題、海中計測点から次の点までの移動に水中翼を使う等運用上の問題を鑑み、リトラクタブル (引き込み) 式水中翼付探査機の検討を行った。これにより、探査機の着水時、揚収時、及び、高度保持探査等の水中翼がない方が望ましい折にも対処できる構造を構築できた。

また、故障時のフェールセーフ性を確保する制御ロジックに関しては、ロボット系に汎用的に応用できる形にまとめた。全体システムのブロックダイアグラムを図6に示す。考え方は、制御目標と実際の運動との偏差を補正すべく、コマンドジェネレータにて制御アクチュエータのトータル力・トータルモーメント (サージ、スウェイ、ヒープの3方向力成分、ロール、ピッチ、ヨーの3方向モーメント成分) コマンドを演算し、コマンドに基づき個々の制御アクチュエータ配分力を非線形計画法もしくは線形計画法にて演算する。ジョイスティック操作との連動も考え、手動力、モーメントの力学変換により手動コマンド

を演算し、制御アクチュエータ配分則へ入力し、制御アクチュエータ配分力演算を行える形とする。個々のアクチュエータは配分力信号に基づき制御信号を発生する。本ロジックでは、図7に示す通り、アクチュエータ等制御力発生端が故障すれば、故障を検知して壊れた制御力発生端を除いて正常なもののみで配分力を演算して航走に支障のない制御を行う。また、図8に示す通り、センサー検知の異常等自動航走に重大な故障が生じれば、手動制御に切り替え、目標の方向と推進力をジョイスティック操作により手動力とモーメントコマンドをアクチュエータに配分し、航走を継続させることが可能となる。故障してもミッションを遂行できるフォルトトレランス的设计法の基本ロジックを創出できた。

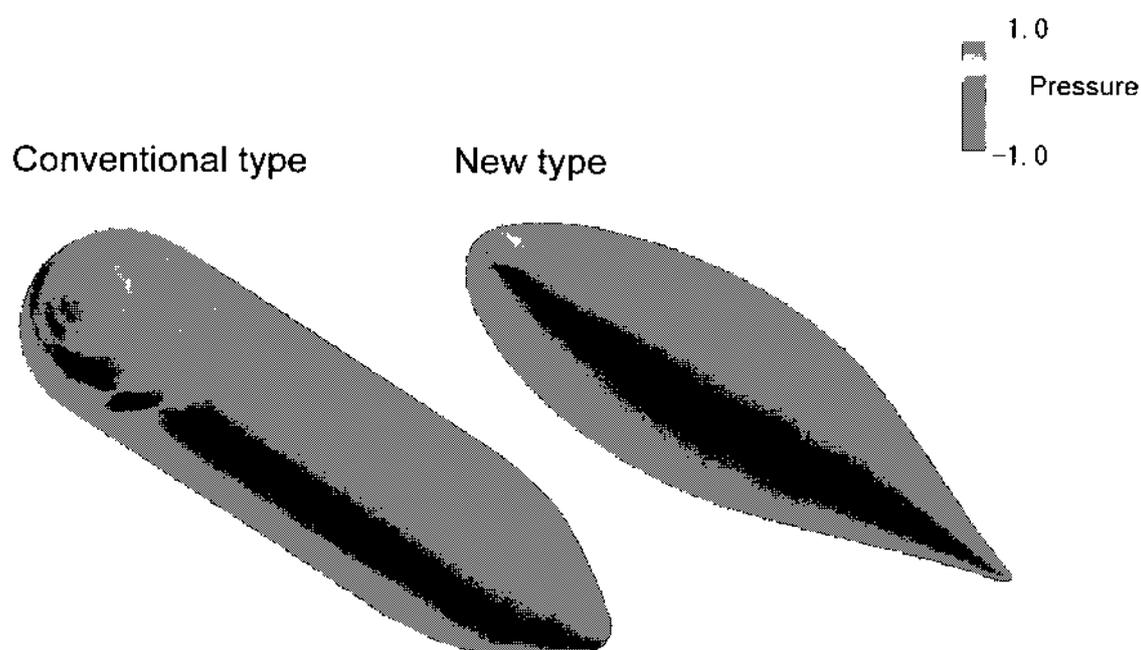


図2 CFDによる流体形状最適化設計

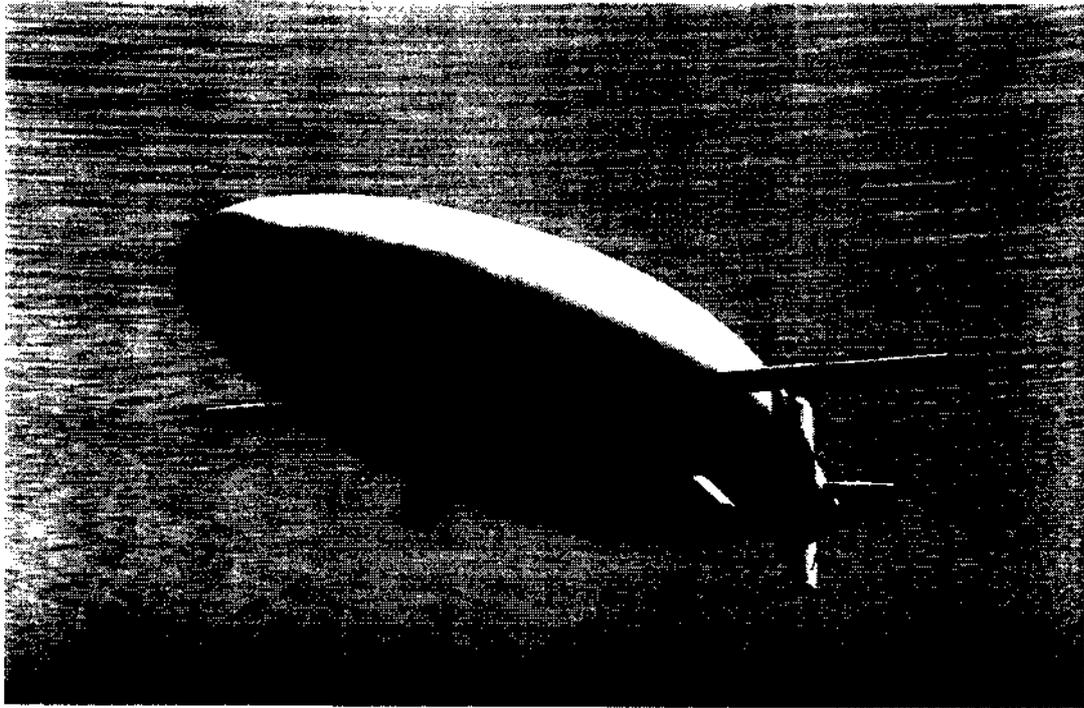


図3 CGによる水中付探査機的设计

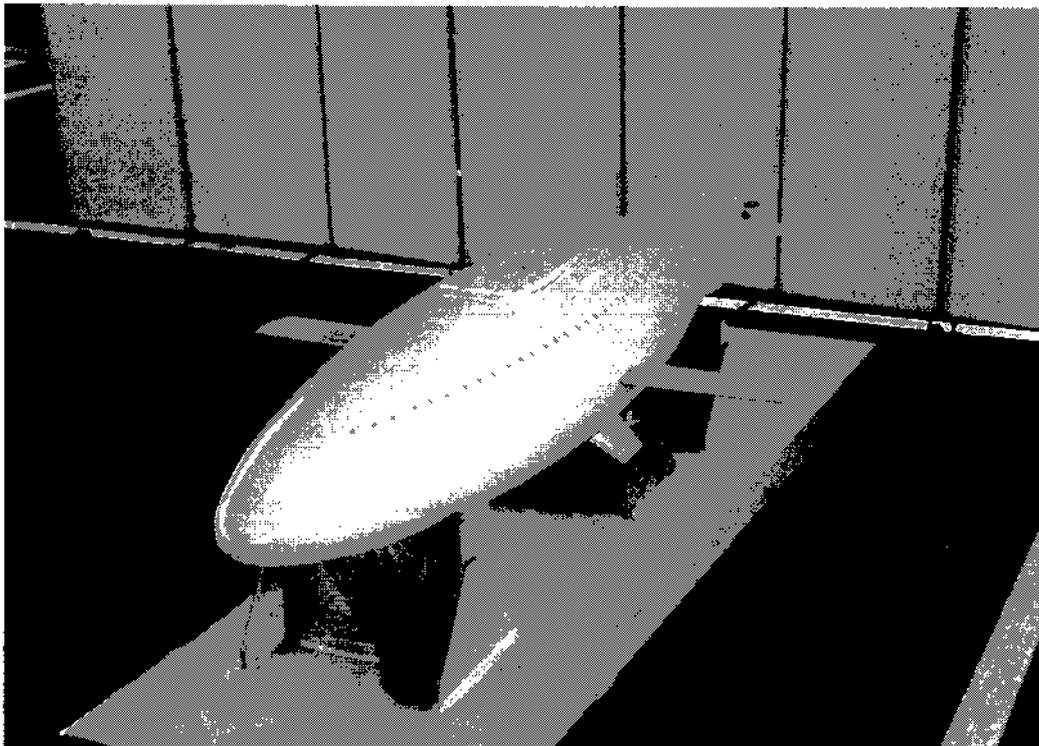


図4 水中翼付探査機モデル

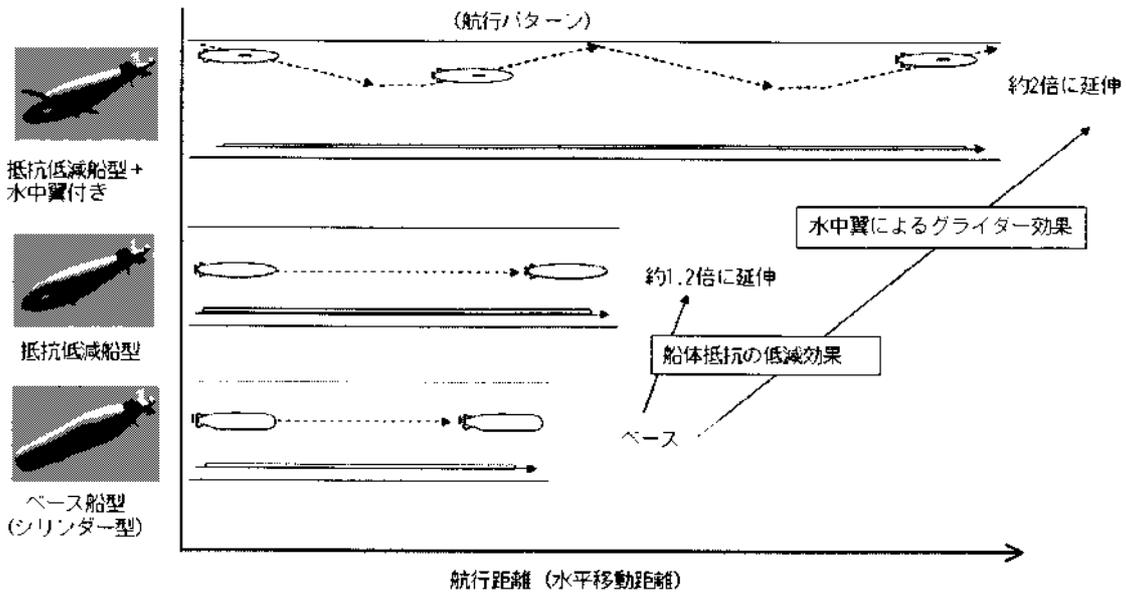


図5 次世代型と従来型の航続距離の比較結果

安定ロバスト制御システム

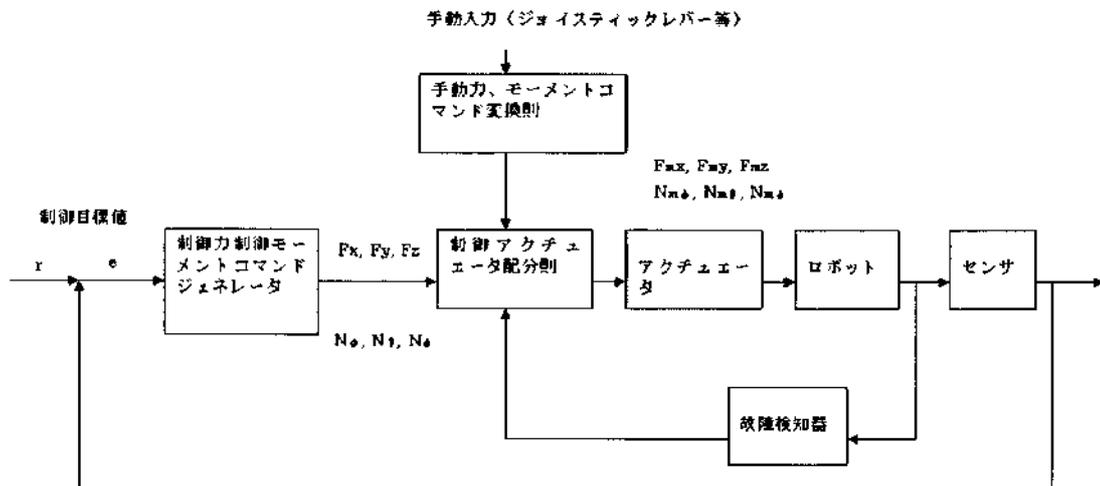


図6 安定ロバスト制御システム

制御アクチュエータ配分則内

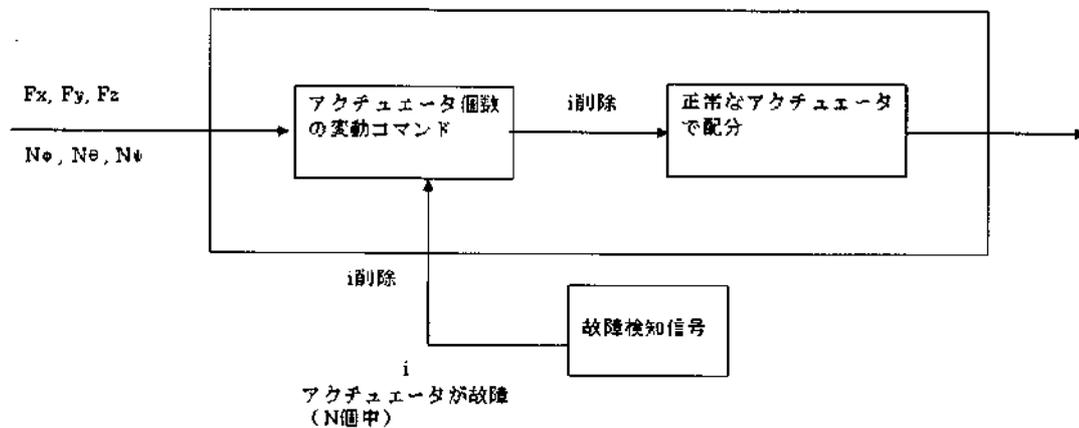


図7 故障検知制御システム作動図 (アクチュエータ故障時)

制御アクチュエータ配分則内

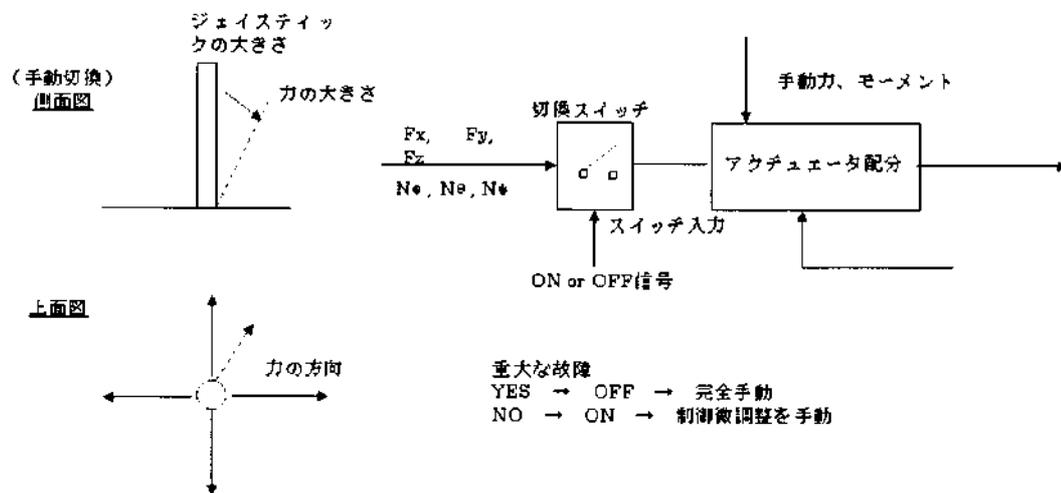


図8 故障検知制御システム作動図 (センサー故障時)

4. 生物運動型潜水機

運動体のメカニズムやシステムは、生物の運動の研究を通して得られたものが多く、潜水機分野でも水棲生物等の運動原理を通して革新技術が生まれる可能性が高い。本研究では、魚の運動原理を応用した生物運動型潜水機の開発を行った。ベースとなる技術は振動翼推進システムであり、弾性体の変形量を

考慮した振動翼力学モデルを構築し、良好な推進力を出せる弾性振動翼の設計を行った。次に、図9に示すような、潜水機を運動させるための機器（弾性振動翼推進システム、浮量調整システム、センサーシステム、制御CPU、電源、充電システム他）を配置設計し、運動振動や浮沈のロジックを実際の魚との整合性をとって、本物そっくりの遊泳を実現させた。図10に遊泳状況、図11にオペレーション画面例を示す。自動遊泳システム、高運動性を実現するメカニズムの開発を行い、潜水機としての実現性の高いレベルまで技術を高めた。

一連の開発を通して、生物運動型潜水機の活用の幅が広がり、アミューズメント向けのみならず、水中調査・監視用、水中作業用、生物生態観測用の機器としての応用が考えられる。また、陸上・空中・宇宙ロボットへの技術応用も期待され、米国NOAAアクエリアス（フロリダ沖海中ステーション）との技術交流会議（テレビ会議）においてもNASA、若田光一宇宙飛行士らより要素技術の宇宙ロボットへの応用性を高く評価された。

高速性、高運動性、高瞬発性を目指した生物運動型潜水機開発の期待も高く、弾性振動翼推進システム、流体抵抗最小形状胴体、フレキシブルな新材料、運動制御用ひれ、生物型センサー等の要素技術の開発をベースに、ドルフィン型やマグロ型的高速運動ロボットの創出は近い将来実現できると思量する。

機器配置図

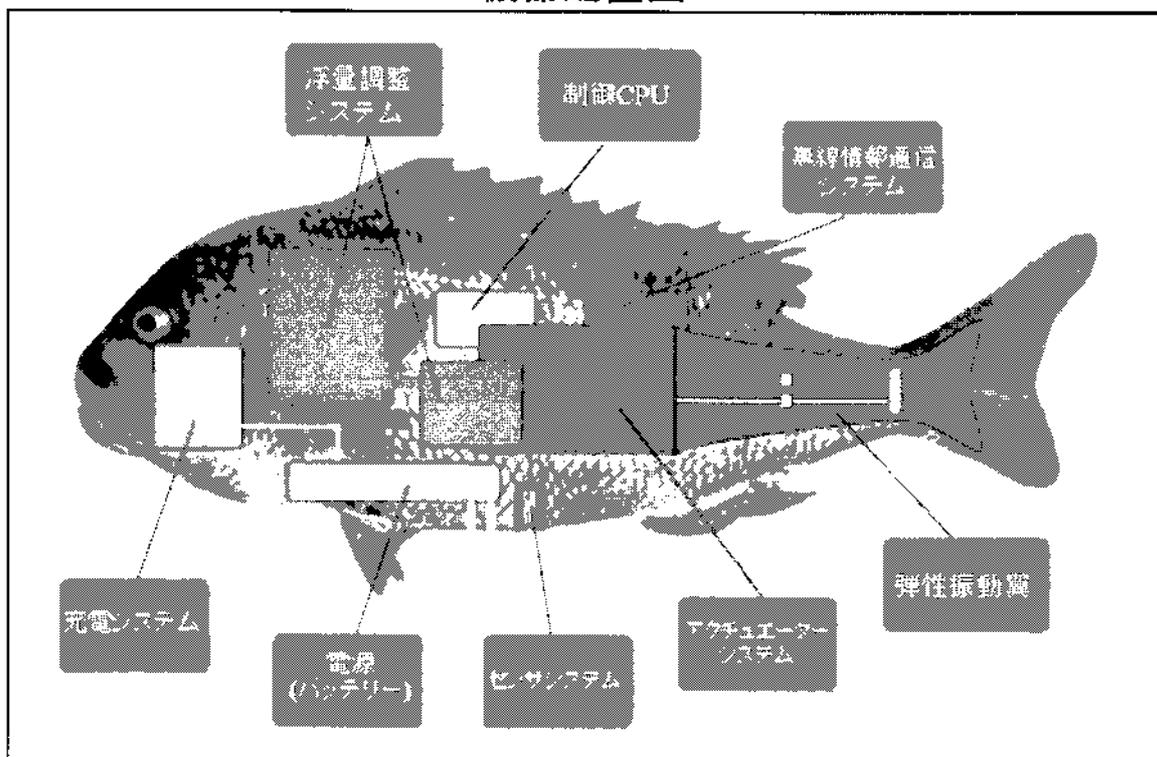


図9 機器配置図



図 1 0 遊泳状況

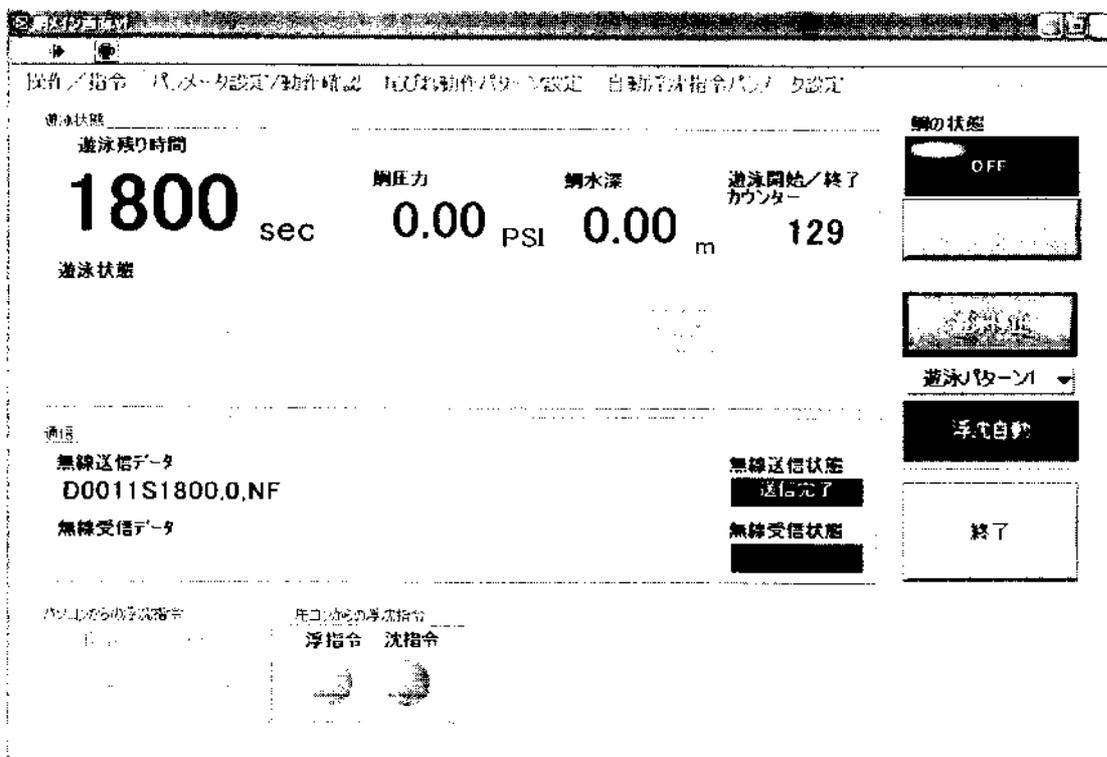


図 1 1 オペレーション画面例

5. 次世代型無人探査機の将来像

次世代型無人探査機の設計試行を提案のあるべき姿に基づき実施してきたが、CFD 流体解析による最適形状設計による外郭形状設計及び航続距離延伸のための水中翼と運動のしなやかさを実現する尾ひれ翼を装備した外部形状は図12左図のようになる。これは、生物運動型弾性振動翼推進システムとの複合型ロボットの形状としている。CAD/CAM設計により、内部重量バランスを考慮した内部機器配置設計が可能になってきており、本複合型ロボットでの内部設計例を図12右図に示す。製造現場にCAD/CAM加工設備を配備すれば、電子図面よりシームレスな製造加工が可能となる。以上が無人探査機単体の設計、製作方法の将来像となる。

次世代の探査を考えると、探査領域を効率良く探査し、高品位なデータを収集しなければならない。探査領域は2次元平面、3次元海中・海底空間まで広がってきており、広範囲な領域をきめ細かく短時間で探査できることが探査機に求められる。無人機探査機単体の運動性、稼動性を上げることは当然であるが、複数個の無人探査機等を用いた探査機群による探査が重要となる。これにより、無人探査機単体が故障しても他の探査機で探査をカバーできるため、探査機群全体としての探査稼動率は向上する。また、1個1個の無人探査機の慣性力は小さいため、無人探査機間の双方向制御により機動性の良い探査システムの実現が可能となる。図13に上記無人探査機群による探査、及び、他の海洋機器との連動を勘案した海洋機器システムの将来像をまとめる。探査以外の潜水機の用途も含めてまとめたが、これにより海中・海底探査、作業、収集データの陸上への速やかな通信が可能となる。

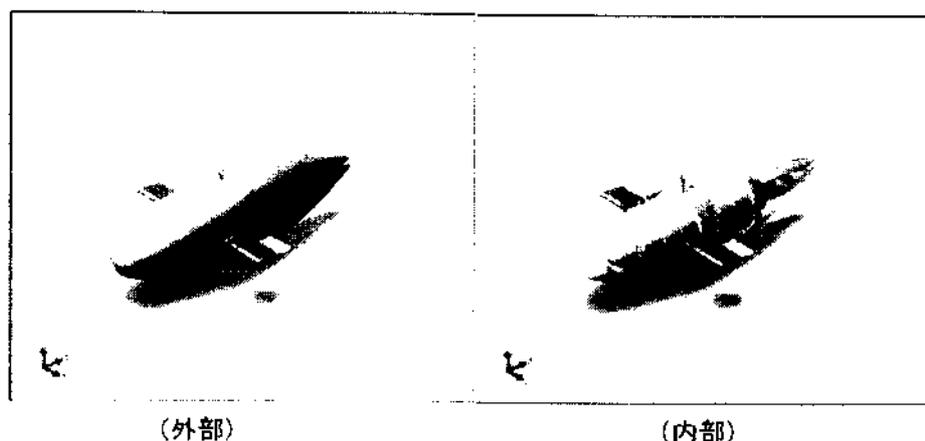


図12 新しい複合型ロボット

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

富山大学理学部 青木 一真

1. 目的

近年の経済発展が著しい東アジア域では、化石燃料消費等による人為起源の大気の大気微粒子（エアロゾル）が急激に増加している。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大気放射収支に変調を及ぼしたり、雲の凝結核になることにより雲の微物理的特性を変化させたりすることを通して、気候変動を及ぼすと言われている。本研究では、これまでに蓄積、及び現在も進行しているスカイラジオメーターを用いたエアロゾル光学観測の解析データをベースとして、東アジア域のエアロゾル気候影響の現状を評価することを目的とする。観測データを用いてエアロゾル気候影響を評価する際には、応用力学研究所大気変動力学分野で開発・改良されているエアロゾル気候モデル SPRINTARS を用いる。また、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は、大陸から日本へ輸送されてくるエアロゾルをいち早く直接的にとらえることが可能な地理的位置にあるため、本研究で有効な観測データとなる。

2. 方法

日本を含むアジア域に展開している大気放射観測網 SKYNET を構成しているエアロゾル光学観測機器スカイラジオメーター（図1）のデータから解析されたエアロゾル光学的厚さ（エアロゾルによる太陽放射の減衰の指標）・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（放射吸収の指標）を用いて、アジア域の大気エアロゾルの現状を把握する。特に、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データを継続的に取得し、アジア大陸から日本へ輸送されてくるエアロゾルについて詳細に解析する。また、エアロゾル気候モデル SPRINTARS によるシミュレーション結果との整合性を評価する。

3. 結果・考察

図2には、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のデータを解析することにより得られたエアロゾルの光学的厚さ・オングストローム指数・1次散乱アルベドの2004年から2006年の時系列を示す。スカイラジオメーターは晴天時のエアロゾルのみを測定するため、曇天時は欠損となる。また、測器の不具合により欠損となっている期間もある。観測は10分毎に行われている。季節変動としては、春季の大きい光学的厚さ・小さいオングストローム指数（すなわち大粒子が卓越）・小さい1次散乱アルベド（すなわち太陽放射を吸収するエアロゾルの比率大）が顕著である。この理由として、アジア大陸起源の大気汚染エアロゾルや黄砂が周期的な高低気圧の通過に伴い輸送されてくることが挙げられる。小さいオングストローム指数は黄砂粒子、小さい1次散乱アルベドは黒色炭素エアロゾル（煤）の飛来を示唆している。また、秋季にも1次散乱アルベドが小さくなっており、黒色炭素エアロゾルを含む大気汚染エアロゾルが大陸から



図1：応力研に設置されているスカイラジオメーター

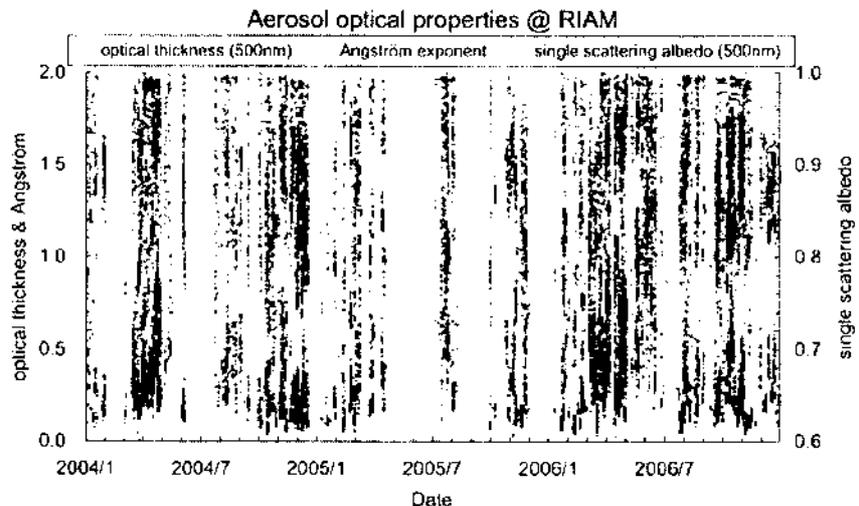


図2：応力研で観測されたエアロゾルの光学的厚さ（青）・オングストローム指数（緑）・1次散乱アルベド（赤）

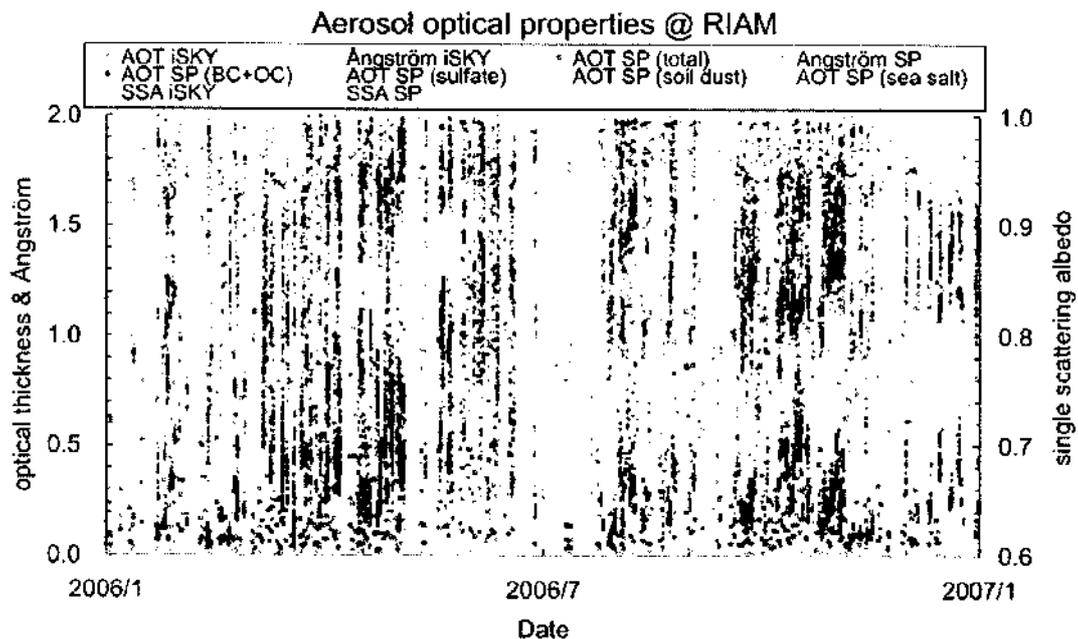


図3：応力研での観測 (iSKY,小円) と SPRINTARS でのシミュレーション (SP,四角) によるエアロゾル光学特性。光学的厚さのシミュレーション結果はエアロゾル種ごと (大円) にも表示

飛来していることを示している。一方、夏季は比較的光学的厚さ小さく、1次散乱アルベドが高くなっている。これは、太平洋高気圧に覆われて清浄な空気塊が流入し、主にローカルな発生源の影響のみを受けることが理由である。

図3には、応用力学研究所における観測結果とエアロゾル気候モデル SPRINTARS との2006年の比較を示している。SPRINTARSの結果は日平均値である。先に述べたように、春季と秋季に相対的に光学的厚さが大きく、1次散乱アルベドが小さいという傾向、およびオングストローム指数が春季に小さいという傾向は、SPRINTARSでも概ね再現されていることがわかる。SPRINTARSの結果は、春季には炭素性エアロゾル(BC+OC)や硫酸塩(sulfate)といった人為起源が主要な起源である粒子と土壌性エアロゾル(すなわち黄砂)が混合して輸送されてきていることを示している。一方、5月下旬から6月にかけてのシミュレーションによる光学的厚さの過小評価の原因として、SPRINTARSで用いられている人為起源エアロゾルに関連する排出量データにおける東アジア域の不備が挙げられる。東アジア域は近年の急激な経済発展により大気汚染物質排出量が増加しており、それを考慮したデータベースを用いる必要性を示唆している。また、8月下旬から9月上旬にかけて SPRINTARSの光学的厚さが過大評価している。これは硫酸塩の光学的厚さが過大であることが原因であり、シミュレーションでの化学反応プロセスの再現性が良くない場合がある可能性を示している。このように、観測とシミュレーションを詳細に比較することにより、観測された現象の説明やシミュレーションの改良すべき点が明確になり、東アジア域における大気エアロゾルの変動の定量的な解明につながる。

4. 研究成果

- Aoki, K., 2006: Aerosol optical characteristics in Asia from measurements of SKYNET sky radiometers. in *IRS2004: Current Problems in Atmospheric Radiation*, H. Fischer and B.-J. Sohn, Eds., A. Deepak Publishing, 311–313.
- Arao, K., J. Ishizaka, N. Sugimoto, I. Matsui, A. Shimizu, I. Mori, M. Nishizawa, K. Aoki, A. Uchiyama, A. Yamazaki, H. Togawa, and J. Asano, 2006: Dust Event on 13 April 2003 over Western Kyushu, Japan. *SOLA*, 2, 100–103.

5. 研究組織

代表者	青木 一真	(富山大学理学部)
協力者	竹村 俊彦	(九州大学応用力学研究所, 所内世話人)
	鷓野 伊津志	(九州大学応用力学研究所)
	河本 和明	(総合地球環境学研究所)
	日暮 明子	(国立環境研究所)

数値モデルを用いた気象擾乱に対する日本海の水位応答の研究

代表者 東北大学・大学院理学研究科・助教授 木津昭一
分担者 東北大学・大学院理学研究科・博士課程3年 稲津大祐
分担者* 九州大学・応用力学研究所・助教授 広瀬直毅
(※兼・研究所内世話人)

・目的

海水位は総観規模の気象擾乱(気圧・風)によって変動する。気圧変動に対する水位の応答は **Inverted Barometer** と呼ばれ、これまで気圧の上昇(減少)が水位の下降(上昇)をほぼ静力学的に引き起こすものとして扱われてきた。また、風擾乱に対しては地球回転のもとで主にエクマン輸送を介して水位が変動する。一方、閉鎖的な日本海の高盆平均水位は、気象擾乱に対し外洋と異なる応答をすることがわかってきた。気圧変動に対し従来の **Inverted Barometer** 応答から数時間程度遅れて水位が応答することが、近年の研究(Lyu et al., 2002, *Geophysical Research Letters*; Lyu and Kim, 2005, *Journal of Geophysical Research*)、および、昨年度までの本研究所共同利用研究の成果等(稲津ら, 2005, 海の研究; Inazu et al., 2006, *Journal of Oceanography*)で明らかにされてきた。また、風擾乱に対する日本海の水位変動は、主に対馬海峡を通した海水交換によって引き起こされることがわかってきた。Lyu and Kim (2005) は、風擾乱に起因する対馬海峡を通した海水交換が、単純化された方程式に従って、海峡に沿う風応力によって引き起こされるとして扱ったが、Jacobs et al. (2005, *Deep-Sea Research*) は、現実的なモデルを使用して、海峡と交差する向きの風応力が対馬海峡流量を効率的に変動させると主張した。今年度は、両者の説明の矛盾点を解決するため、気圧擾乱によって変動する日本海の水位変動の研究に引き続き、風擾乱に起因する日本海の水位変動に直結する対馬海峡流量変動について明らかにすることを目的とした。引き続き代表者は日本海の数値モデルに詳しい分担者(広瀬)の協力を仰ぎ、標記の課題名で本研究所共同利用研究に応募し採択された。

・実験の方法と結果

分担者(広瀬)の順圧モデルに $111^{\circ}\sim 165^{\circ}\text{E}$, $17^{\circ}\sim 63^{\circ}\text{N}$ の領域の現実的な海底地形を設定し、ヨーロッパ中期気象予報センター(ECMWF)の再解析値に基づく風強制力(水平解像度 $1.125^{\circ}\times 1.125^{\circ}$, 6時間ごと)を与え、日本海の高盆平均水位と海峡流量の様子を観察すると、日本海の高盆平均水位変動はおよそ 1 cm の標準偏差を示し、その変動は主に対馬海峡を通した海水交換によって担われていることが確認された(図は示さない)。日本海の高盆平均水位が負の標準偏差の2倍を超える極小ピークを引き起こす風の場合、合成図解析によって抽出したところ、対馬海峡付近では海峡を横切る北西風が優勢であった(図1)。この結果は、Jacobs et al. (2005) の主張を支持する。これについて、海峡を横切る風が海峡に沿う風に対してどの程度効率的に対馬海峡流量を変動させるのかを、理想的な風強制力を与える実験によって定量的に確かめた。理想的な風強制力は、対馬海峡付近の半径 600 km の領域において、振幅 0.1 N/m^2 で任意の角度で一様に往復振動する風とする(図2(a))。図2(b), (c) は、3日周期で往復振動する風強制力に対する対馬海峡流量の

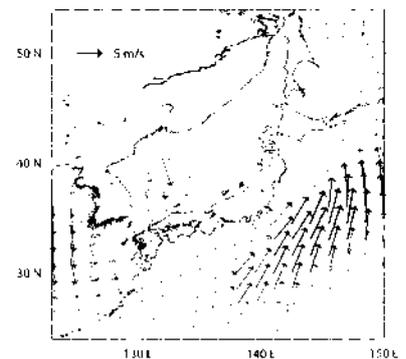


図1: 風擾乱に起因する日本海の高盆平均水位が、負の標準偏差の2倍を超えるピークに到達する直前の、日本海からの合計流出量が極大となる時刻の風速ベクトル場の合成平均図。

応答を示す。海峡を横切る風 (τ_e) に対する応答強度は、海峡に沿う風 (τ_l) に対する応答強度よりも大きい。流量は、 τ_e に対し遅れて応答するが、 τ_l に対し先行する。10 日以下の周期の振動強制力に対して、同様の傾向が得られた。 τ_l に対し流量が先行する原因は、対馬海峡流量の変動に伴って、日本海内の水位が変動することにある。このことは、Garrett (1983, *Oceanologica Acta*) や Toulany and Garrett (1984, *Journal of Physical Oceanography*) などに基づく理論を応用して確かめられる。

τ_e によって効率的に流量が駆動されることについて、対馬海峡周辺の発達した陸棚に着目する。図 3 (a), (b) に示すように、海峡周辺の陸棚の有無によって、陸棚の効果を確認する。東側の海盆は日本海と同程度の面積を、西側の海盆は十分広い面積を設定した。これらの地形に図 2 (a) と同様な 3 日周期の往復振動風を与えたところ、海峡流量は図 3 (c), (d) に示す応答を示した。海峡付近に発達した陸棚がある場合は、 τ_e によって効率的に流量が駆動されるが、発達した陸棚がない場合は、 τ_l の方が支配的である。この傾向は 10 日以下の周期帯で共通する。いずれの地形の場合でも、南 (北) 風によって、海峡から南北に伸びる沿岸で発生する沿岸捕捉波が海峡に侵入し東 (西) 向き地衡流を形成する。特に、発達した陸棚がある場合、南 (北) 風によって、海峡から南北に伸びる沿岸で発生する沿岸捕捉波が海峡に侵入する際に、発達した陸棚の縁で陸棚波に散乱される。海峡外部の陸棚上で、この散乱陸棚波に起因する東 (西) 向きの地衡流が形成され、海峡を通過する流量に寄与する。

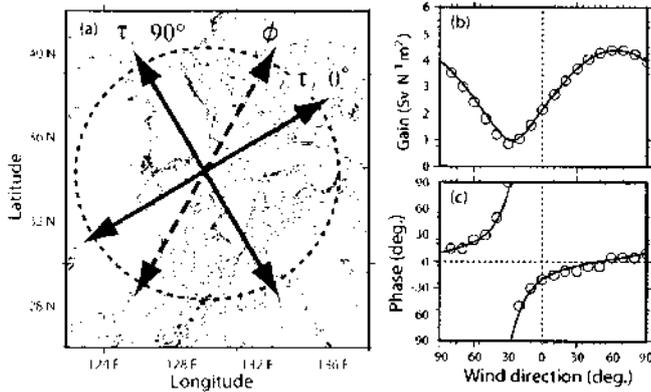


図2: (左側; a) 現実的な対馬海峡を理想的な往復振動風で強制する実験の概念図。半径600 km (減衰半径400 km) の破線円の内部に一樣に往復振動する風を与えた。風の軸の角度 (ϕ) は、 $-90^\circ \sim 90^\circ$ まで 10° ごとで実験した。海峡に沿う軸の角度を 0° とする。(右側) 3日周期で往復振動する風に対する海峡流量の応答。(b) と (c) はそれぞれ応答強度と位相ラグである (実線はフィッティング曲線)。正の位相ラグは風強制力に対して流量が遅れることを示す。

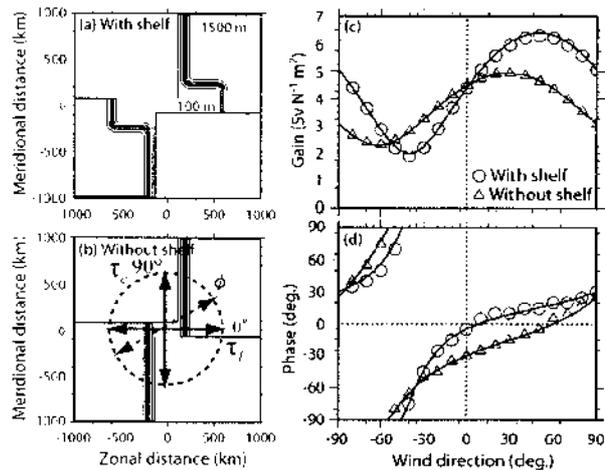


図3: (左側) 発達した陸棚の有 (a) 無 (b) によって表現した対馬海峡と周辺地形 (海峡付近だけを図示)。水深は、海峡で100 m、東西海盆で1500 mとする。図1 (a) と同様の風強制力を、海峡周辺に与える。(右側) 3日周期で往復振動する風に対する海峡流量の応答。(c) と (d) はそれぞれ応答強度と位相ラグである。○と△はそれぞれ (a) と (b) の地形における流量の応答を示す。正の位相ラグは風強制力に対して流量が遅れることを示す。

・まとめ

理想的な地形および風強制力を用いた数値実験により、対馬海峡流量は、従来の理論と異なり、海峡を横切る風に対して効率的に変動することがわかった。海峡の外側の発達した大陸棚の縁で散乱する陸棚波が原因となり、海峡を横切る風に対する海峡流量の応答が強化される。以上の結果は、EGU General Assembly 2006 で発表された。また、2007 年度日本海洋学会春季大会や 2007 年 5 月に開催される 14th PAMS/JECSS Workshop など発表予定である。これまでの3年間にわたる本研究所共同利用研究の成果の大部分は、分担者 (稲津) の博士課程学位論文(2006年12月)としてまとめられた。

マニラ湾の物質循環と基礎生産に関する研究

神戸大学 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。昨年度は、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。今年度は、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ついて検討した。

2. 方法

解析対象海域は、図1に示す14.5Nよりも北部のマニラ湾である。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12測点で1999年5月と10月に観測されたデータを用いた。5月は日射量が多く、河川流量が少ない乾期に該当し、10月は雨期の終期である。乾期の混合層深度は約10mであることから、水深10mまでの表層を1つのボックスとして解析した。

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、それぞれの月について定常計算を行った。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)を参照し、 K_h は $10^5 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ 、 K_v は乾期に $1.4 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ 、雨期に $0.7 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ 、 U は乾期に 0.23 cm s^{-1} 、雨期に 3.5 cm s^{-1} である。鉛直移流流速(W)は、流量保存から乾期に $6.7 \times 10^5 \text{ cm s}^{-1}$ 、雨期に $1.6 \times 10^3 \text{ cm s}^{-1}$ と見積もった。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5月及び10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。今回は、この負荷量の場合と、負荷量が半分になった場合の二通りについて計算を行った。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、それぞれ $6.7 \times 10^6 \text{ cm s}^{-1}$ and $6.7 \times 10^5 \text{ cm s}^{-1}$ と見積もった。植物プランクトンの最大増殖速度は 1.4 day^{-1} 、半飽和定数は $0.9 \mu\text{M}$ である。また、雨期は乾期よりも表層のクロロフィル濃度が高いことから、雨期の水温と水中平均光量を最適水温・光量とし、 28.3°C と $551,623 \text{ cal m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ を用いた。他のパラメータはKawamiya *et al.* (1995)を用いたが、観測値を再現する様に分解速度は1/2とした。計算時間間隔は1時間で、10日目まで定常状態が得られた。

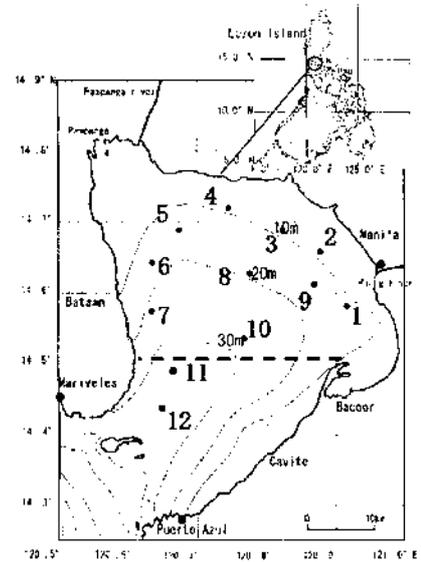


図1 観測解析海域

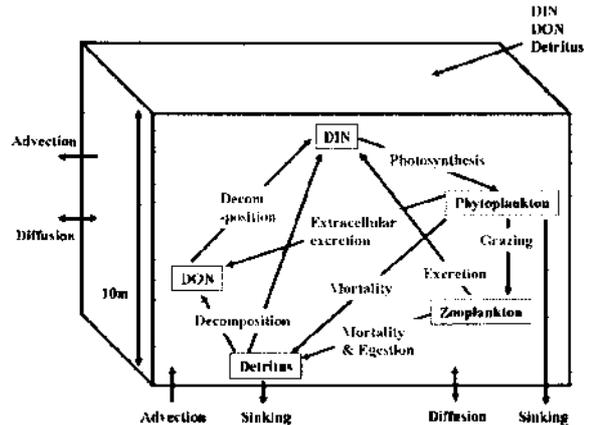


図2 数値生態系モデル

3. 結果

図3に、計算結果を観測結果と共に示す。上段は推定された陸域からの負荷量の場合、下段は負荷量を半分にした場合で、左が乾期、右が雨期である。また表1に、陸域からの負荷量を半分にしたときの全窒素濃度(TN)、溶存無機態窒素濃度(DIN)、溶存有機態窒素濃度(DON)、懸濁態窒素濃度(PON)、クロロフィル濃度(Chl.a)及び基礎生産量の低下率を示す。図4上段の結果は、昨年報告書で述べたので、ここでは陸域からの負荷量を半分にした場合について議論する。

陸域からの負荷量を50%にした場合の各形態の窒素濃度は、負荷量100%の場合に比べて全体に低くな

るが、全体の濃度分布やフラックスの傾向は変わらない。TN 濃度の低下率は、雨期は 9%、乾期は 15% だった。これは、陸域からの負荷量が半分になったとしても、マニラ湾の窒素濃度は 1.2 割程度しか低下せず、負荷量規制だけではマニラ湾の環境を大幅に改善することは困難であることを示している。また季節間の割合の違いは、Chl.a 濃度、すなわち植物プランクトンでは見受けられないが、有機態窒素では差がある。すなわち、溶存有機物及びデトリタスについて季節間の差があり、乾期におけるこれらの形態のみ減少率が低いと言える。これは、河口循環流の強さに関係している。雨期は河川流量が多いため河口循環流が強く、且つ密度成層が強い。逆に乾期は河川流量が少ないため河口循環流が弱く、密度成層が弱くて鉛直混合している。このため、上層から沈降したデトリタスはそのままの形態で上層に舞い戻り、すなわち上下間を往復するのみで減少しにくいと考えられる。これに対し雨期は、河口循環流で下層から物質が輸送されるが、この多くが下層で分解された無機物であり、また水平移流も大きいため湾外に物質が輸送される。マニラ湾の物質循環は、河口循環流の強さと下層からの物質輸送に大きな影響を受けているが、これは陸域からの負荷量削減に伴う環境改善効果にも表れると言える。

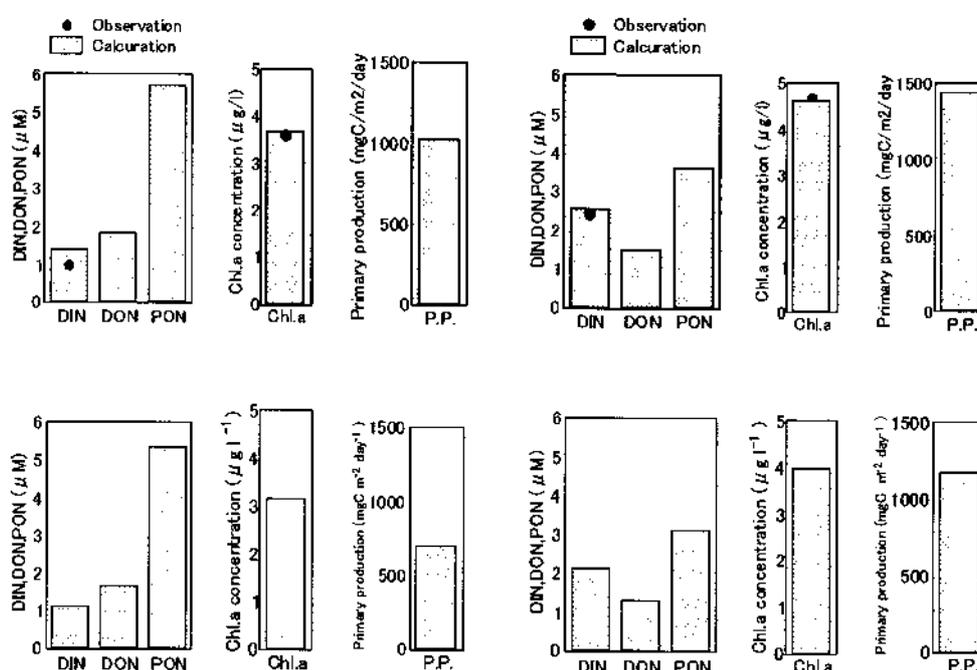


図3 推定された陸域からの負荷量の場合(上)と負荷量を半分にした場合(下)の、乾期(左)、雨期(右)、それぞれでの計算結果。

表1 陸域からの負荷量を半分にしたときの窒素濃度と基礎生産量の低下率

	Reduction ratio (%)					
	TN	DIN	DON	PON	Chl.a	P.P.
March (Dry season)	9	18	9	6	14	20
Nov. (Rainy season)	15	17	14	13	14	18

4. 研究成果報告

Mitsuru Hayashi and Tetsuo YANAGI : Nitrogen Cycling in Manila Bay, 6th National coordinators' meeting of JSPS multilateral core university program "Coastal Marine Science", 2006年11月

5. 研究組織

代表者	林 美鶴	神戸大学	内海環境教育研究センター	助教授	生態系モデル解析
	柳 哲雄	九州大学	応用力学研究所	教授	モデル評価

ダリウス形潮流発電装置の高性能化

九州大学大学院総合理工学研究院 経塚雄策

● 目的

地球温暖化対策として、我が国においても環境負荷の軽減、エネルギー効率の向上があらゆる分野に求められている。日本は、京都議定書によって、2008～2012年の間に1990年比で6%のCO₂削減という目標達成のために環境負荷低減の一層の促進が急務となっている。そこで、生活レベルを維持しつつエネルギー消費量を低減するためには、自然エネルギー利用を図ることが肝要である。自然エネルギー利用については、特に、風力発電や太陽光発電の実用化が進んでいる。しかし、潮流・海流エネルギーは、エネルギー賦存量としては風力エネルギーとほぼ同等であるにも拘わらず、基礎的な研究の段階で実用化まで至っていない。回収可能なエネルギーについて原理的にみても、水の密度は、空気の密度の約800倍であり、流体の速度は、風は潮流の高々7倍から8倍といったところである。したがって、風車及び水車の掃過面積が同じであれば、風力発電より回収可能エネルギーは大きい。本研究では潮流、海流エネルギーを利用した発電システムの実用化を目指して水車の劉流力特性について調査した。

● 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回流水槽(幅1.5m、深さ1m)において行った。昨年は1枚翼と3枚翼の流力特性について実験を行ったが、今年度は、図1のように2枚翼を加えて実験した。翼断面は、翼弦長が0.08mのNACA0018(以後、対称翼)と翼弦長を0.1mとし、円弧キャンバーをつけたもの(以後、円弧翼)の2種類を用いた。実験は、回流水槽の流れの中で電動モーターにより水車を強制回転させ、その時に水車が発生するトルクを計測した。流速は0.5m/secから1.0m/secまで0.1m/sec間隔で変化させた。各流速で水車の回転数 n [rpm]を上げていき、水車の平均トルク Q [N・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。この計測は対称翼、円弧翼ともに水車翼数が1枚、2枚、3枚の場合で行った。

図2は、円弧翼の起動トルクに関する実験結果の例であるが、1枚翼と3枚翼のトルク計測値と1枚翼の計測値を角度を120度および240度ずらして重ねた結果を翼角に対してプロットしたものである。これらの比較から、3枚翼の起動トルクは1枚翼のトルクを重ね合わせることで一定の精度で推定可能であることが分かる。



図1 2枚翼模型

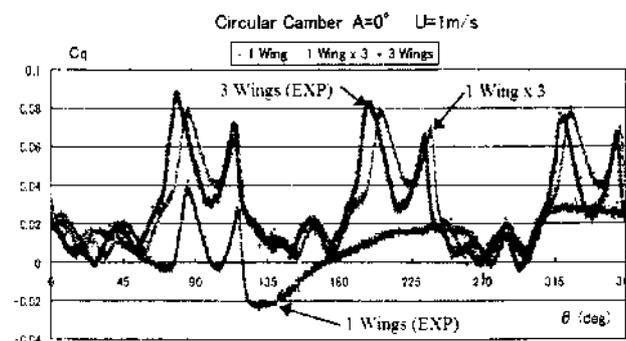


図2 円弧翼の起動トルク (1翼と3翼の比較)

● 実験結果

図3は、横軸に翼の角度、縦軸に水車のトルク係数を取り、周速比による違いを比較した。角度の定義は、流れの最下流が 0° 、最上流が 180° である。3翼なので3周期分の波形となる。波形の変化から λ が大きくなると最大トルク発生角度が大きくなることが分かる。 $\lambda=2$ が一番大きなトルクを発生している。

$\lambda=0$ は起動トルクであり、図2と比較すると翼形による違いが分かる。1翼が、約 30° のところまでゼロあるいは負のトルクとなっているのでこの場合、自己起動には問題があることが分かる。

図4は、円弧翼の取り付け角度によるパワー係数を比較したものである。この結果から、取付け角は 5° が最も良く、最高効率率は $\lambda=2.2$ において40%を超えることが分る。

図5は、取付け角 0° と 5° の円弧翼のパワー係数を、2翼と3翼で比較したものである。この結果、2翼では取付け角は 0° 、3翼では 5° の性能が良いこと、2翼の最高効率率は周速比が2.6で、3翼では2付近であることが分かる。発電機の効率を考えると、水車としては周速比が大きなところで高効率である方が望ましいので、トルクに問題がなければ2枚翼の方が有利であると思われる。

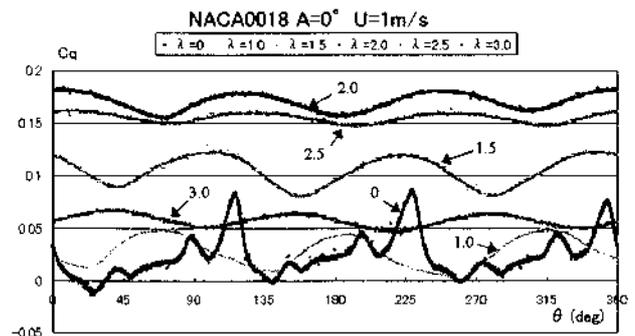


図3 周速比によるトルクの時間波形

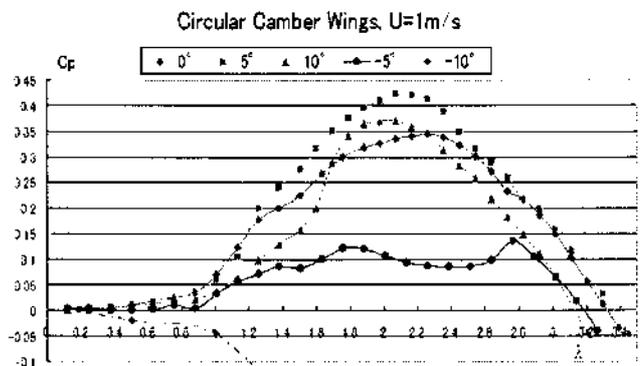


図4 翼取付け角によるパワー係数の比較 (円弧翼)

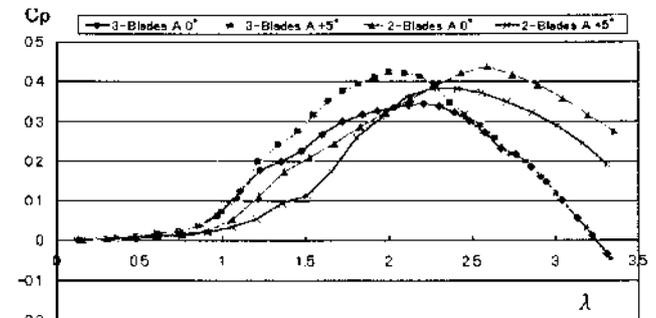


図5 翼数と取付け角による円弧翼のパワー係数

● まとめ

ドリウス形水車は、翼の揚力を利用するがそのメカニズムは複雑で不明なことが多いが、この実験を通して、以下のことが明らかとなった。

- ・複数翼の起動トルクは、1枚翼の結果を使って重ねあわせで推定可能と思われる
- ・水車の翼形は水車効率において重要である
- ・翼の取付け角は、水車性能において重要である。2枚円弧翼では取付け角 0° 、3枚円弧翼では 5° が高性能である。
- ・パワー係数が最大値をとる周速比は、翼数によって異なる。2枚翼では3枚翼よりも周速比は大きくなる。

● 研究組織

経塚雄策 九大・総理工 教授 代表・総括
若濱久敬 九大・総理工 M2 実験解析

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

最近の地球温暖化に伴う海洋環境の変化、乱獲などの複合的な要因から沿岸漁業の恒常的な不振が大きな問題となっている。その原因を解明するための海洋環境調査や水中考古学現場調査等に海中ロボットの利用が注目されている。浅海域における海洋調査向けに、コンパクトで、ホバリング可能な可変ベクトルプロペラを搭載したハイブリッド型海中ロボットの研究・開発を進めた。特に、表層海域での濁度や塩分濃度、水温、クロロフィルなどの環境データを調査できる無線型海中ロボット(無線 ROV: Remotely Operated Vehicle)と自律型海中ロボットの機能を持つハイブリッド型ロボットのハードウェア、ソフトウェア、システム開発を行ない、貴学深海機器力学実験水槽と実海域での実験を行なったので報告する。

2. ハイブリッド型ロボットのシステム構成

ハイブリッド型ロボットは無線操縦用プロポのスイッチで自律型カリモコン型かを切替える方式とした。無線 ROV では直接プロポの信号により操縦を行ない、搭載している GPS、電子コンパス、ソナー、深度データ等は母船へ伝送し、支援船上でモニタしながら操縦する方式としている。図 1 に無線 ROV と複合アンテナを示す。

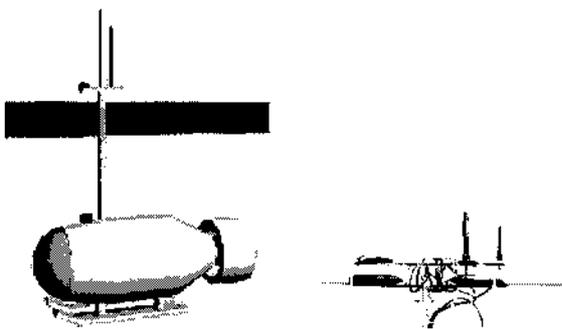


図 1 無線 ROV 図と複合アンテナ

3. 実験方法

無線 ROV のコントローラには、ワンチップマイコン

である PSOC を新たに導入した。GPS、電子コンパス、ソナー、深度データを統合して、効率的なデータ伝送制御を行なう。図 2 に伝送システム図を示す。支援母船上で使用する操縦支援ソフトは GUI (Graphical User Interface) を考慮して開発した。画面の GPS や電子コンパスデータをみて操縦できるように Visual Basic によりプログラムを開発した。

開発したセンサデータ伝送システムの機能と動作確認するために九州大学応用力学研究所深海機器力学実験水槽では造波時での動揺、データ伝送評価実験を行なった。更に、日字川河口部での海洋環境調査実験を行なった。

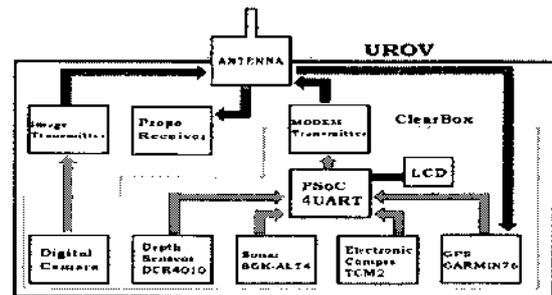


図 2 伝送システムブロック図

4. 実験結果及び考察

(1) 深海機器力学実験水槽での造波動揺実験

造波機により、① 2 cm/秒 ② 4 cm/2 秒 ③ 9 cm/3 秒と3種類の規則波を発生させて、ロボット内の各種センサデータの伝送安定性、ロボットのピッチ、ロールの傾斜角を計測して影響を検討した。



図 3 ピッチ角度

図3にピッチ角、図4にロール角の3種類の波を連続的に変化させた場合の計測結果を示す。ピッチ角では最大8度、ロール角では最大5度傾斜しても安定的に航行、データ伝送に影響はなかった。



図4 ロール角度

造波中に送付されたセンサデータは次のようなフォーマットをしており、先頭から、GPS時刻、方位、ピッチ角、ロール角、温度、北緯、東経、3次元地磁気の磁束、深度を示す。

```
time165821 C341.5 P-1.00 R23.40 T13.0
N3309030 E12944943 W0329 X0332 D-64 fin.
```

(2) 河口表層域での環境計測実験

操縦支援ソフトを開発した後、長崎県佐世保市日宇川河口での、濁度、塩分濃度、水温、クロロフィルの測定実験を行なった。測定には事前にGPSデータを規準にして、測線が決定されており、ロボットの操縦者は支援ソフトの画面を見ながら操縦する。測線上をほぼ忠実に航行した軌跡を図5に示す。

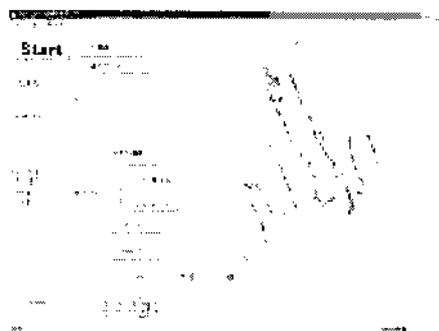


図5 実海域実験映像

GPS単体のログ結果は図6の通りであり、予め定められたコースを20m間隔で航行していることを示す。

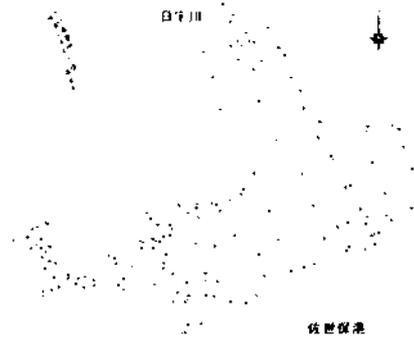


図6 GPS軌跡図

5. 結論

AUVとROVとのハイブリッド化をめざした研究に取り組み、特に表層域の海洋環境計測用の無線ROVについてのシステム開発と深海機器力学実験水槽及び実海域での実験結果を示した。今後はフェールセイル対策やより小型化、コンパクト化をめざす。

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助教授には有益なご助言やご指導を頂きました。更に、深海機器力学実験水槽での実験では稲田勝技術職員にお世話になりました、深く感謝いたします。

6. 研究成果報告

[1] Yutaka Nagashima, Nobuyoshi Taguchi, Takakazu Ishimatsu: Development of a Compact Hybrid Underwater vehicle Using Variable Vector Propeller, Proceedings of The 23rd International Symposium on Automation and Robotics in Construction, PP66-71, 2006.10

[2] 長嶋豊、真部広紀：海中ロボット技術を活かした水中考古学調査—小値賀島前方湾における予備実験—, 水中考古学研究 NO. 2, pp40-45, 2006

7. 研究組織

- ・研究代表者：長嶋豊, 佐世保高専電気電子工学科教授
- ・研究協力者：下尾浩正, 同上電気電子工学科助手
- ・所内世話人：中村昌彦, 九州大応用力学研究所助教授
- ・研究協力者：小寺山亘, 九州大応用力学研究所教授

対馬海峡におけるクロロフィル *a* 濃度の時空間変動

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 200km、平均水深約 100m 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あまり行われていない。そこで本研究では、衛星データや現場観測データを用いて、対馬海峡におけるクロロフィル *a* 濃度の時空間変動を明らかにすることを目的とする。また、物理データとクロロフィル *a* 濃度分布の対応関係を調べ、時空間変動要因を検討する。

2. データ

本研究では、2004–2006 年に独立行政法人水産大学校練習船天鷹丸と耕洋丸で実施された ADCP、CTD、クロロテック観測によって得られた流速、水温、塩分、クロロフィル *a* および CTD 観測時にニスキンボトルで採水し、持ち帰って分析した栄養塩データ（硝酸態窒素、亜硝酸態窒素、リン酸態リン、珪酸態珪素）を使用した。CTD 観測点を図 1 に示す。さらに、クロロフィル *a* 濃度の空間分布を調べるために人工衛星 AQUA に搭載された海色センサー MODIS によって得られた海面クロロフィル *a* 濃度データを使用した。

3. 結果と考察

図 2 に AQUA/MODIS で得られた対馬海峡周辺海域における月平均クロロフィル *a* 濃度を示す。これまで日本海では春と秋の年 2 回植物プランクトンブルームが起こっていることが報告されているが (Yamada et al., 2004), 対馬海峡でも日本海同様、春と秋にブルームが起こっていることが明らかとなり、夏には栄養塩律速、冬には光律速であることが示唆された。図 3 に 2005 年 8 月および 2005 年 11 月の水温、塩分、クロロフィル *a*、硝酸態+亜硝酸態窒素 (以後 DIN) の鉛直断面図を示す。8 月には表層付近で DIN が枯渇しているため、DIN の躍層に対応して亜表層にクロロフィル *a* 濃度の極大がみられる。断面図によると CL04 付近で水温・塩分・DIN の躍層が浅くなり、クロロフィル *a* 亜表層極大濃度が最大となっている。また、11 月に表層混合層が発達する中、CC02 付近で水温・塩分・DIN の躍層が浅くなり、躍層以浅で他の観測点よりクロロフィル *a* 濃度が高くなっている。このような躍層の浅化に対応するクロロフィル *a* 高濃度は夏季と初冬季に他にも数例確認された。

次に躍層の浅化とクロロフィル *a* 高濃度の関係について考察する。ここでは示さないが、2005 年 8 月、11 月の ADCP で得られた流速データによると、両時期ともに躍層が浅くなっていた CL04、CC02 付近を中心とした反時計回りの渦が発生していた。渦中心付近で水平的には密度の極大値をとることから、躍層の浅化は低気圧性渦の存在を示唆していると考えられる。この低気圧性渦によって、栄養塩律速である夏季は栄養塩躍層が浅くなることで亜表層クロロフィル *a* 濃度が高くなり、光律速である初冬季は密度躍層が浅くなることで表層混合層内の光環境が改善され密度躍層以浅でクロロフィル *a* 濃度が高くなったと考えられる。

対馬海峡東水道にできる反時計回りの渦は HF レーダーによっても度々観測されている (吉川ら, 2005)。

丸山ら (2004) はこの反時計回りの渦を傾圧構造下で対馬島陰にできる後流渦と指摘している。本研究で観測された低気圧性渦もこれまでの報告と特徴が一致しており、対馬島陰にできる後流渦であったと考えられる。吉川ら (2005) は反時計回りの渦が6月から11月にかけて多く観測されていることを報告しており、この低気圧性渦は、夏季から初冬季にかけての対馬海峡東水道およびその下流にあたる山陰沿岸の低次生物生産に影響を与えている可能性がある。

4. 今後の課題

本研究によって、対馬海峡におけるクロロフィル *a* 濃度の季節変動や低気圧性渦の関係について明らかになったが、渦の発生から消滅までといった数日スケールの時間変動を捉えることはできていない。HFレーダーのデータや数値モデルを用いて渦の時空間変動とそれに伴う栄養塩・クロロフィル *a* 濃度を含めた低次生態系の変動について明らかにすることが今後の課題である。

5. 研究組織

鬼塚剛 水産大学校 助手 研究代表者：対馬海峡観測，クロロフィル・栄養塩分析
柳哲雄 九州大学応力研 教授 所内世話人：衛星データ解析

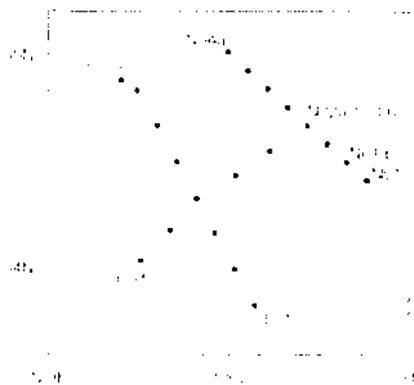


図1 CTD観測点



図2 AQUA/MODISによる対馬海峡クロロフィル *a* 濃度の経月変動

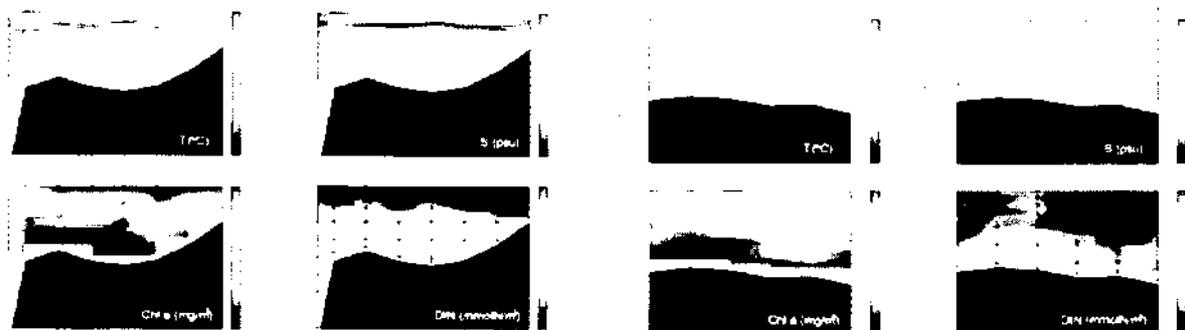


図3 2005年8月(左図; CLライン)と11月(右図; CCライン)における水温, 塩分, クロロフィル *a* 濃度, DIN濃度の鉛直断面図

主翼独立制御型水中グライダーの運動性能評価に関する研究

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供するために、高い運動性能を発揮することのできる「主翼独立制御型水中グライダー」を提案し、その実験機 (Fig.1) を開発した。

従来の水中グライダーには広範囲に亘る長時間の海中調査を目的とした長距離航続型のものが多かったが、本研究で提案する水中グライダーは、比較的狭い海域を細かく探査することを前提としている。本実験機は、人間の操作によるラジコン制御によって、水中での静止や後退、垂直降下、機首揺れ回転、主翼による翼動推進などの高い運動性能

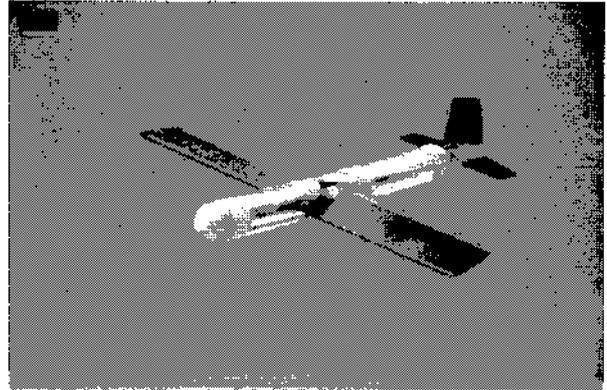


Fig.1 主翼独立制御型水中グライダー実験機

を有することがわかったが、自律制御のための運動制御モデルを構築するためには、深海水槽における基礎データの収集が必要不可欠である。研究代表者らの所属する大阪府立大学の海洋システム大型実験水槽棟・船舶試験水槽 (長さ×幅×深さ: 70m×3m×1.5m) では、水中グライダーの運動性能評価を行うには幅と水深が不十分であり、九州大学・応用力学研究所の深海機器力学実験水槽 (長さ×幅×深さ: 65m×5m×7m) を使用させていただくことが本研究の進展に最も有効であると判断した。同研究所・海洋大気力学部門・海洋流体工学分野は、海中ビークルの運動制御に関する研究において優れた実績があり、また、九州大学大学院工学研究院・山口悟助教授らが水中グライダーの研究をされており、情報交換によって水中グライダーに係る研究の飛躍的な進展が図れると考えたことも共同利用研究の目的のひとつである。

深海機器力学実験水槽における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 グライディング比の計測、④ フィードバック制御のための基礎データの取得、である。

□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. 主翼の取付角度が 0[deg.] (主翼固定型モデル) と 5[deg.], 8[deg.] (主翼独立制御型モデル) の場合について、ラジコンによって可動式ウェイトの位置を微調整しながら、グライディング試験を行い、水深と到達 (着底) 距離からグライディング比を求める。
4. ジャイロセンサーによるフィードバック制御を試み、その実験データを解析して本実験機の運動制御モデルのパラメータを同定し、主翼独立制御型水中グライダーの制御アルゴリズムを確立する。

□実験結果

● 第1回

実施日： 平成18年10月23日（月）～25日（水）

参加者： 有馬 正和, 豊田 篤史, 樋口 耕平

実験内容： 本実験機は、平成18年10月21日（土）に神戸（神戸大学・深江キャンパス）で開催された『水中ロボットフェスティバル』において、初めてマイコンによる自動制御を実現することができた。本実験では、水深の十分にある「深海機器力学実験水槽」において、① 水中グライダー実験機の耐圧試験を行い、② マイコンによる運動制御およびセンサー出力のメモリへの書き込み等が正しく行われることを確認するとともに、③ フィードバック制御に資するためのデータを取得した。

● 第2回

実施日： 平成19年1月16日（火）～18日（木）

参加者： 有馬 正和, 豊田 篤史, 樋口 耕平

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 グライディング比の計測、④ フィードバック制御のための基礎データの取得を行った。深度センサーの校正結果を Fig.2 に示す。

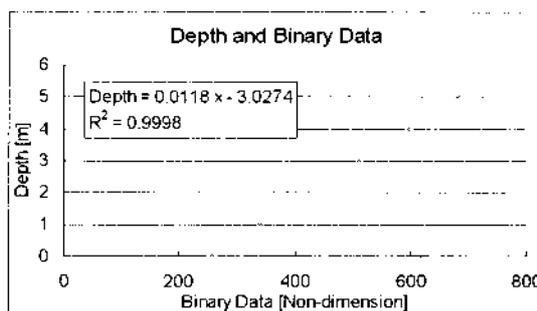


Fig. 2 深度センサーの校正結果

グライディング比は、主翼固定型モデルの場合（主翼

取付角度：0 [deg.] $\gamma = 5.31$,
主翼独立制御型モデルの場合（主翼取付角度：5 [deg.]） $\gamma = 3.78$
という結果が得られた。また、計測した実験データの一例を Fig.3 に示す。

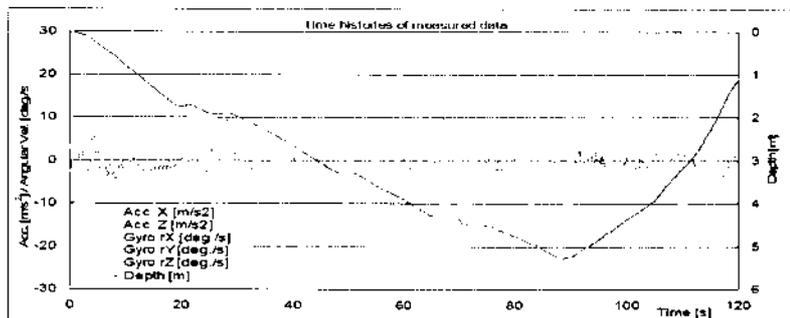


Fig. 3 計測された加速度・角速度・深度の時系列データの一例

□研究成果報告

日本船舶海洋工学会論文集ほか（投稿予定）

□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	講師	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
奥野 武俊	大阪府立大学・大学院工学研究科	教授	評価・海洋環境学
豊田 篤史	大阪府立大学・大学院工学研究科	M1	実験・解析
樋口 耕平	大阪府立大学・工学部	B4	実験・解析
中村 昌彦	九州大学・応用力学研究所	助教授	所内世話人

安心・安全なマイクロ風車の開発研究 (18A0-11)

九州工業大学 工学部 機械知能工学科 西 道 弘 (研究代表者)

目的

近年、環境エネルギー啓発用としてマイクロ風車と太陽電池からなる街路灯（ハイブリッド街灯と呼ばれる）が市街地で認められるようになってきた。同様の風車を住宅地区に設置したいという要望もある。それに応えるために、種々のメーカーが製品開発をして市場に出しているが、安心・安全の視点から捉えるときに万全であるとはいえない現状であると評価される。大型風車では風車の運転状況は常時コンピュータを使って観測されているので、動的な空気力による羽根の疲労寿命に基づき交換時期を予測できるものの、小型化すればする程そのような監視方式は取れないために、風車はいつ破損しても不思議ではない状況で使用されているとみなされる。これに応えるため、研究代表者らはフェイルセーフ機能を羽根自身に持たせることにして、羽根に柔軟性の高い材料（発泡系樹脂）を採用することを構想した。柔らかい羽根とすれば、万一破損しても他に危害を加えることがなく安全であり、安心できる。さらに、このような羽根は風の影響で大きく変形するから、発電機の安全性確保にもつながる、風車出力が定格風速以上になっても変形によって抑えられるというリミットロード特性（ここでは自己制御性と呼ぶ）が期待できる。

本研究は、風の影響を受けて大きく変形する性質の柔軟性の高い材料を風車の羽根として利用する技術の構築、特に高い自己制御性を有する羽根の設計指針を実験的に明らかにすることを目的とする。所内世話人の大屋裕二教授はこの分野の権威であるから、共同研究として実施することで一定の成果が得られると期待できる。

実験方法

供試マイクロ風車（風力発電機）はダウンウインド形とし、実機としての応用に配慮して、表1のように形状・寸法を定めた。気流と大変形の羽根（動翼）との連成問題は未だ実験的にしか解明出来ないため、地球大気動態シミュレーション装置を用いて、性質の分かった気流中で柔軟翼風車の性能を調べる。実験の機会をもとに、本年度においては次の項目に焦点をあて、追究することにした。

・第1段階：羽根固定位置と風力発電機：出力特性（風速範囲：3 m/s～15 m/s）

羽根をハブに固定する方法として、空力中心に相当する弦長の位置(25%)と図心相当の弦長位置(43%)を取り上げて、空力特性と振動特性を調べる。なお、この試験は全て定格負荷（抵抗：15.8 Ω）のもとに実施した。

・第2段階：コーニング角とローター特性（風速範囲：4 m/s～12 m/s）

羽根を後方に傾斜させる角度（コーニング角）が風車ローター単体としての空力特性に及ぼす影響について調べる。

表1：供試風車の仕様（定格負荷：15.8 Ω）

翼型	ローター直径	翼枚数	翼弦長	定格風速	定格出力
NACA0018	1.5 m (内径：0.3 m)	3 枚	0.15 m	8 m/s	80 W (400 rpm)

実験結果と考察

(1) 羽根固定位置と出力特性（風力発電機） ナセルのヨー運動（首振り運動）を許した状態での空力特性を図 1 に示す。発電機出力と回転速度との間には一定の関係があるために、後者を縦軸にとった。風速が増しても出力が抑制される自己制御性は 9 m/s ~13 m/s の範囲で固定法にかかわらず認められた。その領域内にある風速 10 m/s において、出力の時間的変動を見た結果が図 2 である。ダウンウインド形のために、いずれにも風車タワー（円柱）の影響を受けた NZ 成分（ N : 回転速度, Z : 羽根枚数）に基づき変動している。ナセルに取り付けた加速度計によれば図心での固定において特に風速が高い領域の変動振幅が大きくなったので、空力中心の固定のほうが適当と判断している[1]。

(2) コーニング角とローター特性 コーニング角 20 度のローターにおいて、図 3 のトルク特性に示すように低風速で性能がよいという興味深い結果が得られた[2]。図中の発電機特性と各試験結果の交点から発電機出力を予測した結果が図 4 である。予測値と実測値との差については今後究明する必要がある。

成果報告

[1] 吉田ほか 3 名, 安心・安全な水平軸マイクロ風車の開発研究—空力性能および振動特性, 第 28 回風力エネルギーシンポジウム, (2006-11), pp.269-272.

[2] 西ほか 3 名, 柔軟翼水平軸風車の自己制御性に関する実験的研究, 日本機械学会九州支部第 61 期総会講演会, (2007-3) .

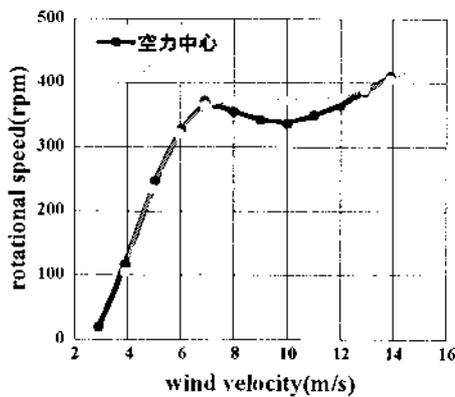


図 1 出力特性

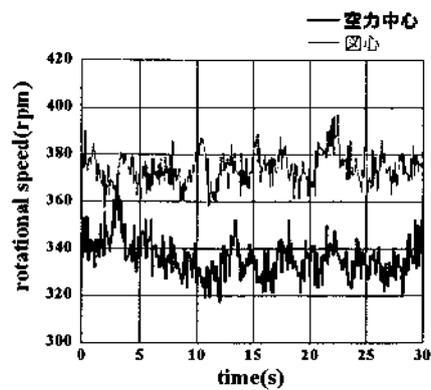


図 2 出力変動（風速：10 m/s）

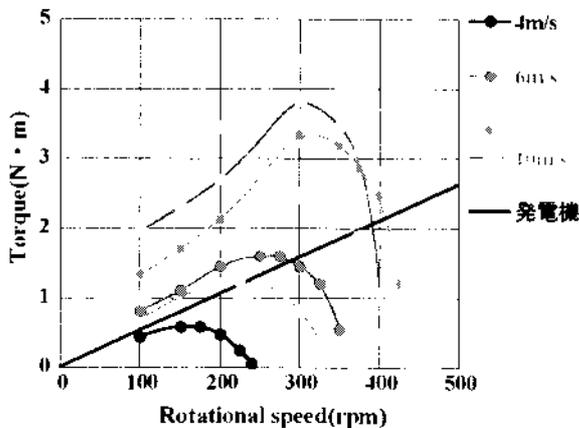


図 3 トルク特性

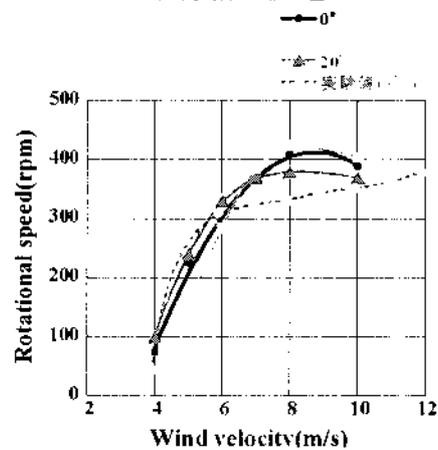


図 4 ローター試験に基づく性能予測

1. 目的

本研究では理論、シミュレーション、観測の各方面に携わるメンバーが集まり、海洋大循環、とくに中深層循環を中心に最新の知見をまとめ、情報を交換し、今後の展望を得ることを目的とする。海洋の中深層循環は本質的に海底地形の影響を強く受け、また、流れが微弱であることから、渦による混合過程も重要である。さらに中層においては大気との接触なしに異種水塊同士で新水塊が形成され得る。これらの効果について調べた。

2. 研究手法

各メンバーが観測結果、概念模型、数値計算等を用いて以下のそれぞれの課題について研究を行った。年2回の海洋学会の他、年1回の研究打合せ集会において討論のための十分な時間をとり、各課題で得られた知見をまとめ、情報交換することによって有効に研究を進めた。

- | | |
|-----------------------------------|--------------------------------------|
| (1) f面上の発散性準地衡乱流の動力学 | 武田英樹・増田 章 (九大応力研) |
| (2) 北太平洋中層塩分極小の形成過程—その2 | —塩分極小は何を意味しているのか?—
蓮沼啓一 (海洋総合研究所) |
| (3) MRI.COMによる計算結果を用いた前線間帯の水の動き | 北村尚士 (海洋総合研究所) |
| (4) 河川プリューム内の循環と層間の干渉効果 | 磯辺篤彦 (九大総理工) |
| (5) free jet と再循環からの波の放射 | —波数空間 EOF 解析を用いて—
水田元太 (北大地球環境) |
| (6) 海流のモード展開と重調和拡散 | 増田 章 (九大応力研) |
| (7) 高解像度モデルによる西岸境界近傍での層厚フラックス—その2 | 石崎 廣 (気象研) |
| (8) 非等方拡散スキームの低解像度全球海洋モデルへの適用 | 平原幹俊 (気象研) |
| (9) WHP再観測で検出された西オーストラリア海盆深層の季節変動 | 金子郁雄 (海洋研究開発機構) |
| (10) 季節変動する中深層循環に及ぼす海底地形の影響 | 中野英之 (気象研) |
| (11) 北太平洋亜寒帯域における海洋循環に及ぼす天皇海山列の影響 | 和川 拓 (九大応力研) |
| (12) HF レーダーと ADCP による表層エクマン螺旋の観測 | 吉川 裕 (九大応力研) |

3. 結果と考察

(1) では、水平発散のある f 面準地衡乱流で、慣性小領域 (二種類) の運動エネルギーに対し、水平発散の大きさに依存しない普遍スペクトル形の存在が示された。この形を基に、自己相似なスペクトル発展の動力学が一般性のある形に定式化され、多くの結果が自然に導かれる。また、 β 効果を含む二次元乱流の発展特性を明らかにするために三波相互作用を再考し、その観点から東西流や順圧流がエネルギーを放出しにくいことを論じた。

(2) と (3) は北太平洋中層の塩分極小形成に関して、塩分極小の本質が上下に重なる2層の水塊 (上層の黒潮水と下層の親潮水) の境界であるという解釈を裏付けたものである。(2) では 144° E 線での観測における、上部黒潮水と下部親潮水の重なりを明確に示す結果が示された。黒潮水から親潮水への急激な遷移により遷移層の下端が塩分極小として見えるが、あくまで2層で構成され中層水と呼ぶべき水は存在しない。(3) ではモデル結果を使って、前線間帯 (黒潮前線と親潮前線の間) に置いた粒子の時間的逆追跡により水塊の起源を求めた (図1)。上層ほど黒潮域起源が多く、下層ほど親潮域起源水が増える。上層では親潮前線が明確で前線以南の水はほぼ黒潮起源であるのに対し、下層では親潮前線が弱くなり黒潮・親潮域起源の水が混在するためである。

(4) から (6) は海洋の力学に関する内容であった。(4) では、東シナ海を春季から夏季にかけて東進する長江希釈水周辺海域で観察される植物プランクトンのブルームに対し、これを支える栄養塩の供給経路が解明された。数値実験では、河口から供給された栄養塩が、光の届かない長江希釈水プリューム下層を移動しながらプリューム縁辺に運ばれ、そこで表出して光を得、河口から遠く離れた位置で基礎生産に供される様子を表現した。表出領域は層間の緩衝効果によって南側に形成される。(5) では運動量輸送に重要な黒潮続流に近似の傾圧的ジェットからのロスビー波の放射特性を平坦な東西流入・流出モデルでの数値実験により調べた。variance ellipse の長軸の向きはジェットからのエネルギーの南北放射を示唆する。擾乱の周波数空間上における EOF 第1成分は約40日より長い周期帯で西向きに伝播し、順圧ロスビー波の分散関係をほぼ満たす。再循環を形成する渦位フラックスにはロスビー波が放射される周期帯からの寄与が大きい。(6) では三次元準地衡流の鉛直態 (モード) 展開を定式化した。離散層模型の鉛直態に対応する固有値の性質を論じ、鉛直態間のエネルギー変換の性質を

調べた。例として、太平洋で観測されている 10~20 年周期の海面気圧・水温の振動及び中層水分布の経年変動を説明する作業仮説を提案した。次に強制定常応答の空間分布を簡単に考察し、密度拡散の効果を加味した重調和拡散問題で、海面点源解の重ね合わせにより熱塩深層循環の空間分布を理解できることが示唆された。

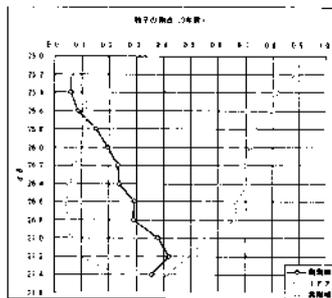


図1 前線間帯に配置した粒子をモデル計算結果(非平均流動場)を用いて3600日目から9年間逆追跡した後の粒子の起源の割合。縦軸は密度、横軸は割合、右線は黒潮起源、中央線は親潮起源、左線は前線間帯起源。

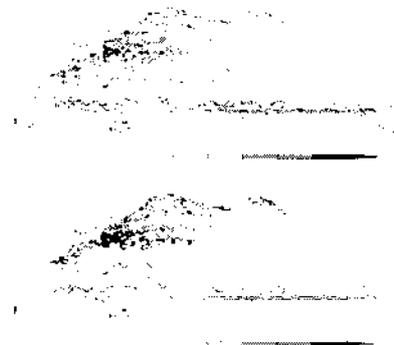


図2 渦許容格子で見積もられる乱流拡散係数 $|K|$ [$m^2 s^{-1}$](上)と変形率 $|D|$ [$10^{-6} s^{-1}$](下)の分布。水深100m。

(7)と(8)は高解像度海洋モデル実験結果を解析したものである。(7)では、黒潮・親潮・アラスカ海流すべてに共通して強流帯主流の右側に逆行する、また左側には順行する層内渦成体積輸送が見られる現象に対し、基本的には流軸変動模型として解釈できるものの、強流帯中心が岸側の体積輸送に支配されるという非対称性は強流体の蛇行を伴う孤立渦の伝播を考慮することにより説明されることを示した。(8)では海洋大循環モデルにおける非等方性拡散スキーム使用の妥当性が考察された。渦許容格子の場合と渦解像格子の場合の比較から前者に対する後者の渦輸送は非等方的であり、そのパラメータ化には、渦許容格子場での変形率の主軸方向を考慮すべきこと、拡散係数の大きさは変形率の大きさに対応させるべきこと(図2)、が示唆された。

(9)から(11)は風による深層循環の構造ないしは変動性を扱ったものである。(9)では BEAGLE ラインの観測結果をモデル結果と比較し、深層での変化の一部は季節変化と解釈できることが示された。特にインド洋東部では、豪州西岸の風によるエクマン収束の変化に伴い、深度3000mにも及ぶ水温偏差が形成され、傾圧波の速度で西に伝播しながら季節スケールで増強、減衰を繰り返す。これに伴い西オーストラリア海盆深層の傾圧場が季節的に逆転し、深層水の流入量の見積もりにも大きく影響することが示唆された。(10)では子午面循環に対する季節変動する風の影響を、数値モデルを用いて調べ、①エクマン輸送、②東岸からの傾圧ロスビー波、③傾圧 Sverdrup 輸送と地形の相互作用、に分類できることを見出した。①はエクマン層の下部以外では傾圧性を持たず、②は種々の深さに傾圧性を持ち、③は海嶺の東側に西岸境界流の形で出現し、海嶺の高さ付近に集中して傾圧性が現れる。測線観測から子午面循環を求め、熱塩循環を抽出する際には、②や③の効果を考慮する必要がある。(11)では、Argo フロートの軌跡データから天皇海山列東側に南下境界流の存在することが分かった。これは、以東の北向きスベルドラップ流量を部分的に補償する西岸境界流とも考えられるが、両者の流量の間に、先行研究で示唆されたような、海山標高と海洋底水深の比に対応する単純な比例関係はなかった。

(12)は対馬海峡東水道中央部で ADCP2 機を表層係留し、海上風データと合わせて吹送流構造の検出を試みた結果である。境界層の底を想定した基準深度を設定し、それ以深の流速を以浅に外挿して差し引き、境界層流の推定値とした。風応力と共変する境界層流のみを取り出すため、両者に主成分解析を行い、また、応答時間に対応する適当なラグを考慮した。結局、基準深度18m、ラグ11-16時間のときに第一主成分の風応力と境界層流は、エクマン螺旋と同様な構造を持ち、風応力及び境界層流から別個に求まるエクマン輸送量もほぼ一致した。

4. まとめと今後の展望

(1, 6)は今後の継続・発展が予定されている。中層塩分極小の形成論(2, 3)に対しては鉛直高解像度のモデル実験が望まれる。(4)では物理場と生物生産の密接な関係が示された。(5)では波数空間 EOF という新たな解析方法が導入され成果をあげた。(7)ではさらに細かい格子の実験結果の解析が、(8)ではパラメータ化スキームを実装した数値実験が望まれる。(9, 11)に対しては今後の観測の集積が期待される。(10)では提起された種々の問題に対応する詳細なモデルデータ解析が望まれる。(12)ではエクマン螺旋の実態が観測から示された。

平成18年度 共同研究報告書
大気海洋分野・一般研究
海生爬虫類の遊泳時の流体力学研究

西 弘嗣¹

¹北海道大学 大学院理学研究院 自然史科学部門 地球惑星システム科学分野



図 1: 長頸竜 *Hydrotherosaurus* の骨格。埋没時の姿勢を示す。図中右側が頭側。Welles (1943) より引用。

1 研究背景および目的

化石として発見される動物の中には、現在の生物や機械には全く見受けられない形態をもつものが知られている。中でも長頸竜類は、前肢と後肢を共に鱗へと変化させ、頸を胴の2倍以上の長さへと伸ばした、極めて不可解な形態をした遊泳性の絶滅爬虫類であるが(図1)、そのアクアバイオメカニクスは不明である。

絶滅した動物の遊泳様式や生態を復元することは、その動物が進化するに至った力学的制約(淘汰圧)を解明することと同義であり、そのためには模型実験や数値実験が必要である。逆に、生物が自身の体をその行動等に十分適応させたものとするならば、機械やロボットを開発する上での最適化手法は、古生物の復元に応用できる可能性がある。しかし、そのような絶滅動物のアクアバイオメカニクスに関する先行研究例は殆どない。

長頸竜類の遊泳形態を想像するに、実験には鱗の羽ばたきや体のしなりなどを考慮する必要があるが精度やコストなどの都合上困難であるが、すくなくとも水中滑翔(グライディング)の状態であれば近似的に求めることが可能と考えられる。本研究では、長頸竜類の行動をシミュレートするために必要な流体力係数を模型実験により収集することを目的とし、同時に復元の妥当性を検討した。

2 実験手法

2.1 外形の設計

生体復元の対象には、長頸竜類 *Hydrotherosaurus alexandrae* を選択し、University of California Museum of Paleontology に所蔵される骨格標本 UCMP 33912 (図1) を用いた。この標本の形状に関する計測値 (Welles, 1943) に基き、生体復元を行った。さらに、化石記録では不明な点などを以下のように簡略化し、模型の設計を行った(図2): 体幹は簡単のため回転体とした; 翼型は翼厚比に従い、NACA0033 とした; 翼平面形はテーパー翼とし、後退角は不明であるため、簡単のため 0° とした; 下反角は、簡単のため 0° とした。

2.2 試験用模型

実験に用いた 1/4 スケールモデルを図3に示す。材質はケミカルウッドで、防水型6分力計を内蔵する(図4)。分力計のモーメント中心は、胴体中心線上、前後の鱗の取り付け軸間中点に一致し、機器を全て取り付けられた状態で中性浮力になるよう調整されている。表面にスタッドは取り付けしていない。

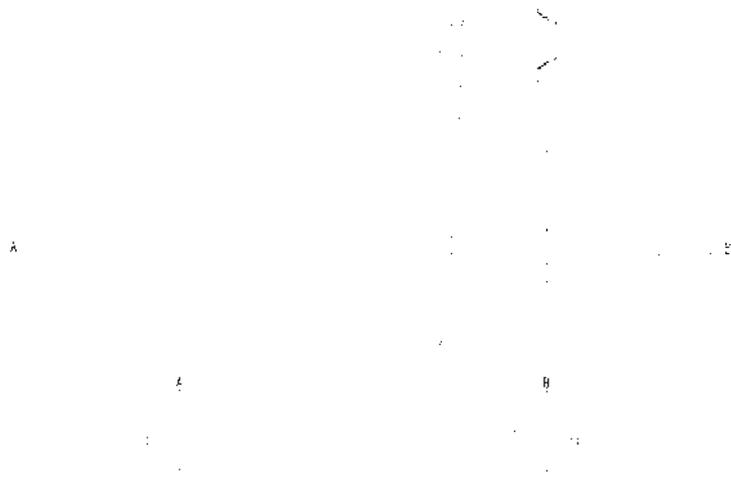


図 2: 外形の設計図.

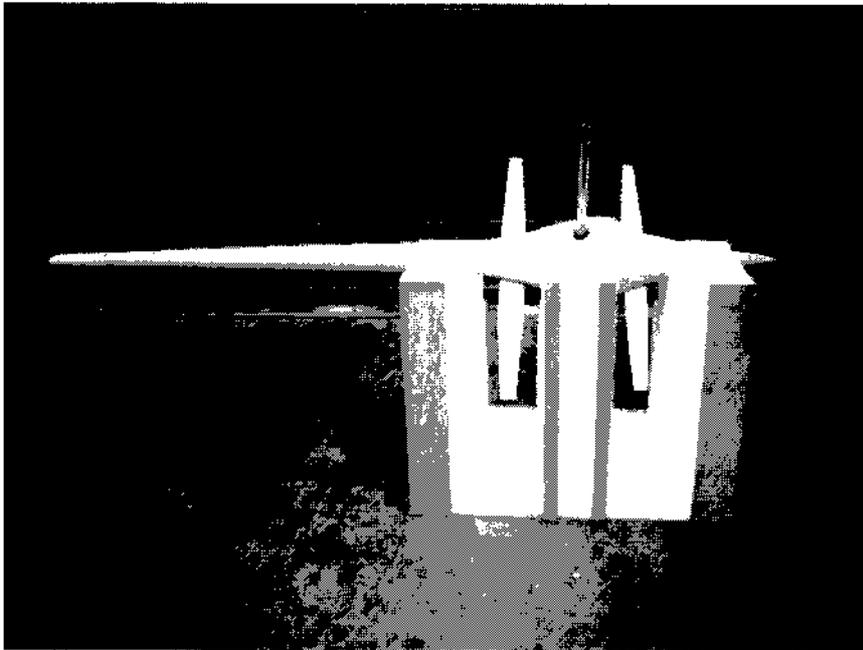


図 3: 試験用模型

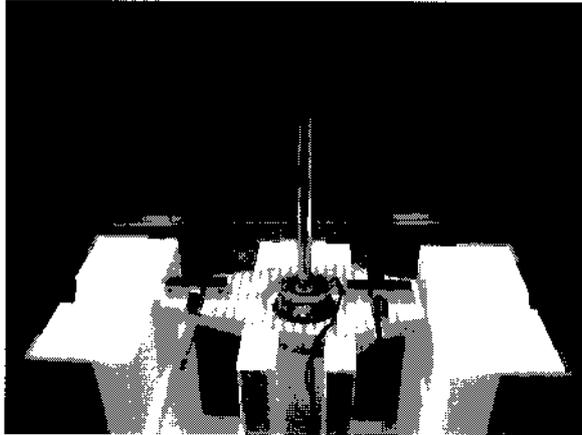


図 4: 模型に内蔵される防水型 6 分力計.

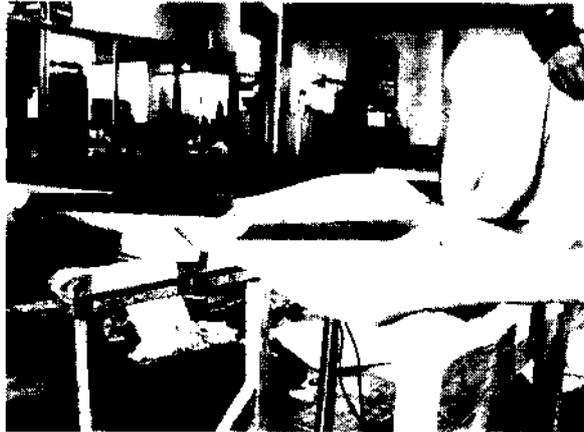


図 5: 鰭の取り付け角変更機構.

左右の鰭は軸で繋ぎ、左右同時に迎角を変更でき、機械的なストッパーによりロックされる (図 5)。軸は、前縁より 1/4 コード長の位置に通している。また各々取り外し可能である (図 4 および 6)。

ストラットの断面形は円形とし、分力計からのコードをストラット内に収納していない。コードを螺旋状に巻くことでカルマン渦の影響を避けている (図 6)。

2.3 実験状態

実験状態を図 7 に示す。座標系の原点は分力計モーメント中心である。模型は造波抵抗の影響を避けるため水面下 0.570 m に位置する。曳航電車に取り付けられた模型は一定速度 (速度誤差は ± 2 mm/s 以下) で曳航され、模型に働く流体力を分力計により計測する。

データは、ローパスフィルタ (カットオフ周波数: 20 Hz) を通し、サンプリング周波数 100 Hz でデジタル化して記録した。データ解析には MATLAB を用いた。

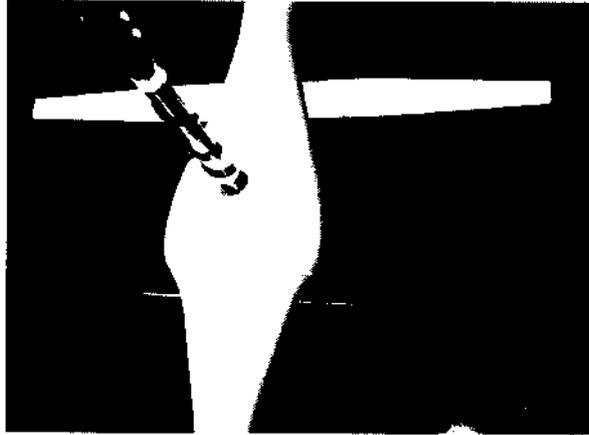


図 6: 後鰭を取り外した状態.

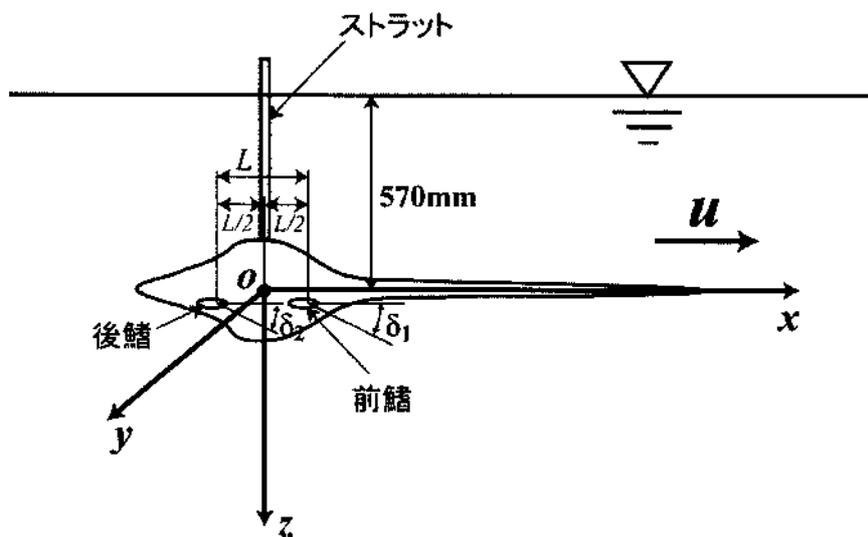


図 7: 実験状態の模式図.

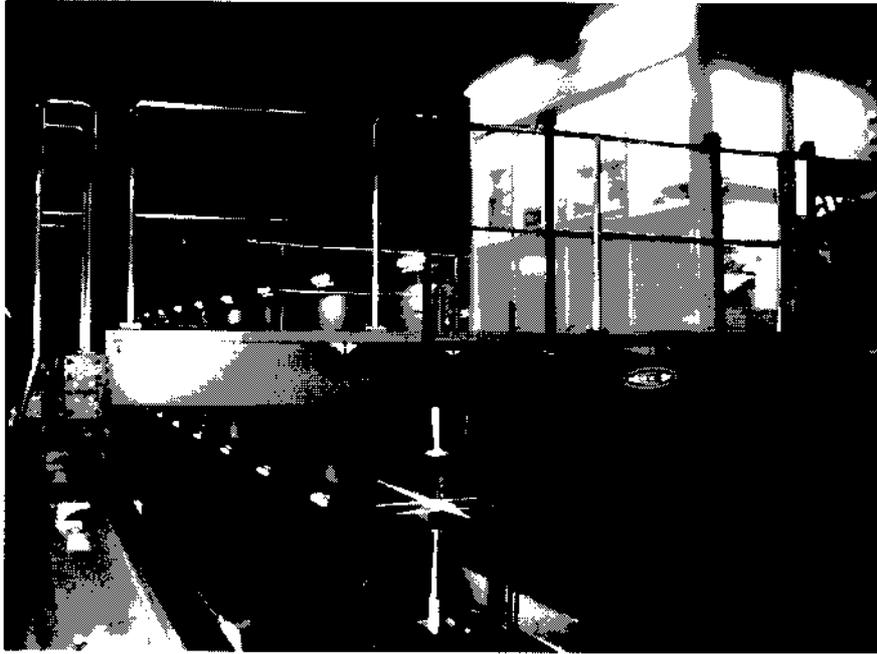


図 8: 曳航電車で、取り付けられた模型.



図 9: 曳航される模型. 左: 前側から; 右: 後側から.

3 結果

3.1 x 軸方向抵抗試験

胴体の迎角および各鰭の迎角を一定 (0°) とし、曳航速度を変化させて u に対する x 軸方向の抵抗を計測した。各実験では曳航速度を一定とし、 $0.1 - 2.0$ m/s の範囲内で 0.1 m/s 間隔で設定した。これは実スケールでは $0.4 - 8$ knots に相当する。

計測結果は図 10 に示す。図は上から抵抗係数 X'_{uu} 、着力点位置 l'_z 、抵抗係数 C_{D_x} であり、それぞれ $\rho u^2 D^2/2$ 、 D 、 $\pi \rho u^2 D^2/8$ (ρ : 水の密度、 D : 胴体の最大直径) により無次元化した量である。

抵抗係数は、速度 0.5 m/s 以上でほぼ一定になる。また着力点は、速度 1.5 m/s 以上で大きく変化するが、この再現性は確認されている。この変動は y 軸 (横軸) まわりのモーメントの変動に影響されている。

速度の変化に対し着力点位置が大きく変動する原因としては、後鰭取り付け位置付近での乱流剥離、ストラットやコード、あるいはその取り付け穴で生じる渦などの影響が考えられる。

3.2 前鰭迎角変更試験

曳航速度を一定 (1 m/s) とし、前鰭の迎角 α_2 を変化させることで前鰭に関する流体力係数を計測した。迎角は $-30 - 30^\circ$ の範囲内で、 3° 間隔で設定した。また、後鰭との干渉の影響を調べるため、後鰭を外した状態でも計測を行った。

計測結果は図 11 と図??に示す。いずれの図も、上から迎角に対する抗力係数、揚力係数、モーメント係数をそれぞれ示し、胴体の最大直径を代表長に無次元化している。

両結果とも、抗力係数が二次曲線となること、揚力係数とモーメント係数が迎角 0° 付近で不連続になることが特徴であり、再現性も確認されている。また揚力係数とモーメント係数の迎角に対する傾きは、不連続点の前後において一定で、失速角は $\pm 9^\circ$ 程度である。

両実験で同様の傾向が見られることから、この傾向が後鰭との干渉ではなく、胴体との干渉によるものであることが示唆される。

3.3 後鰭迎角変更試験

曳航速度を一定 (1 m/s) とし、後鰭の迎角 α_2 を変化させることで後鰭に関する流体力係数を計測した。迎角は前鰭同様 $-30 - 30^\circ$ の範囲内で、 3° 間隔で設定した。

計測結果は、前鰭の試験と同様に図 13 と図??に示す。迎角に対する抗力係数が二次曲線となること、揚力係数とモーメント係数が連続な直線となる点は、一般の翼と同様の傾向であるが、失速角は前鰭同様に $\pm 9^\circ$ 程度と比較的小さい。ただし失速後も $\pm 30^\circ$ の範囲で 0° に至ることはない。

揚力係数とモーメント係数の、 0° 付近での連続性が前鰭と異なることから、この傾向が前後の鰭の取り付け位置の違いによるものであることが示唆される。またいずれの鰭においても失速角が小さい点については翼型に起因しているものと考えられる。

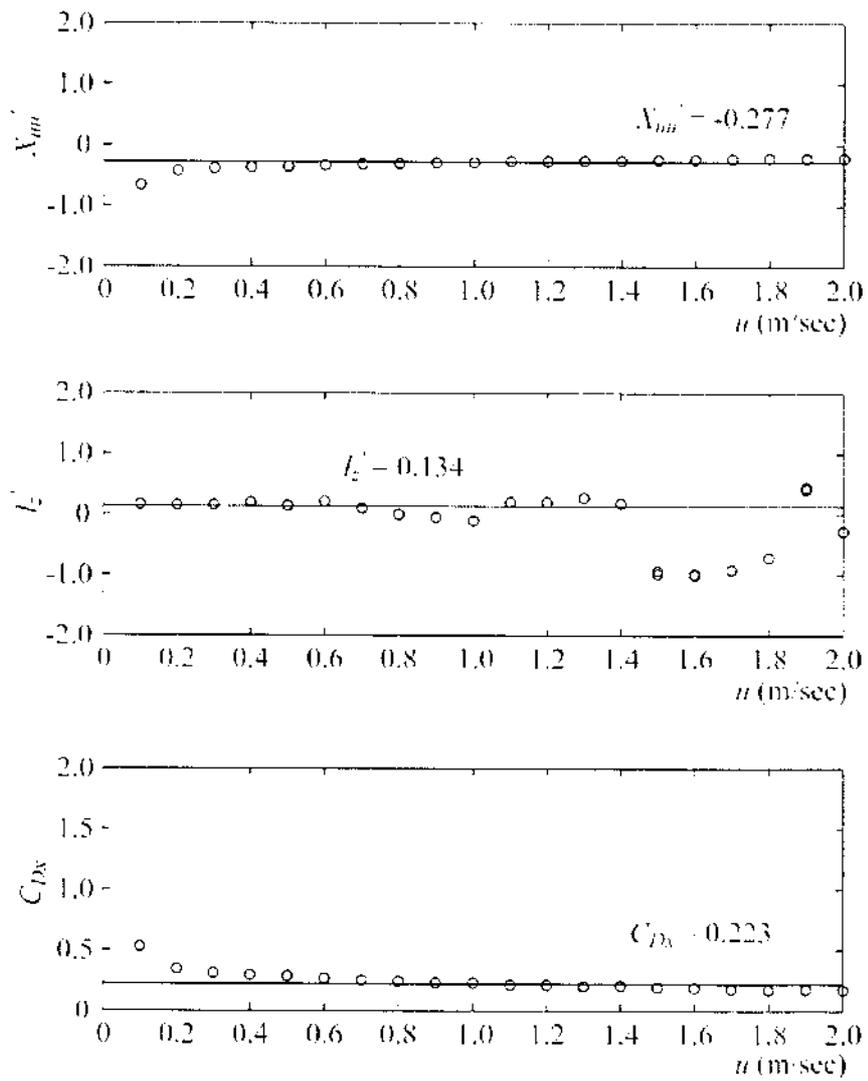


図 10: x 軸抵抗試験結果.

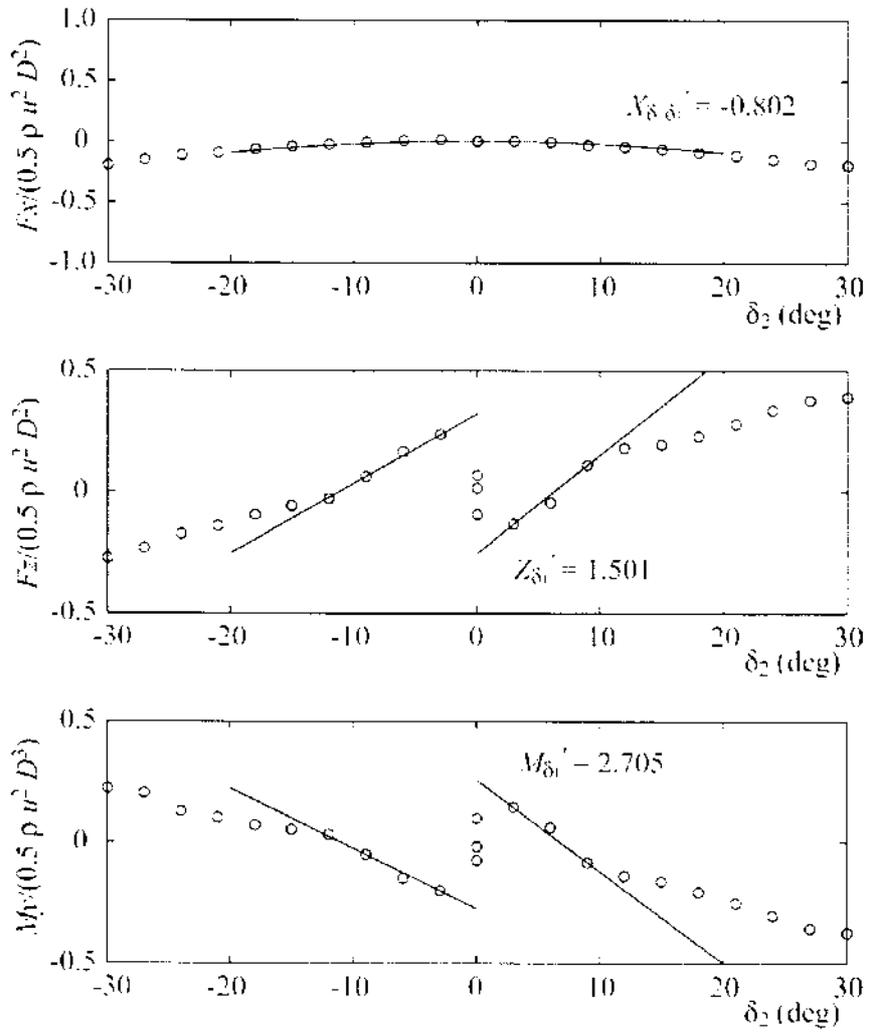


図 11: 前縁迎角変更試験結果 (後縁あり)。

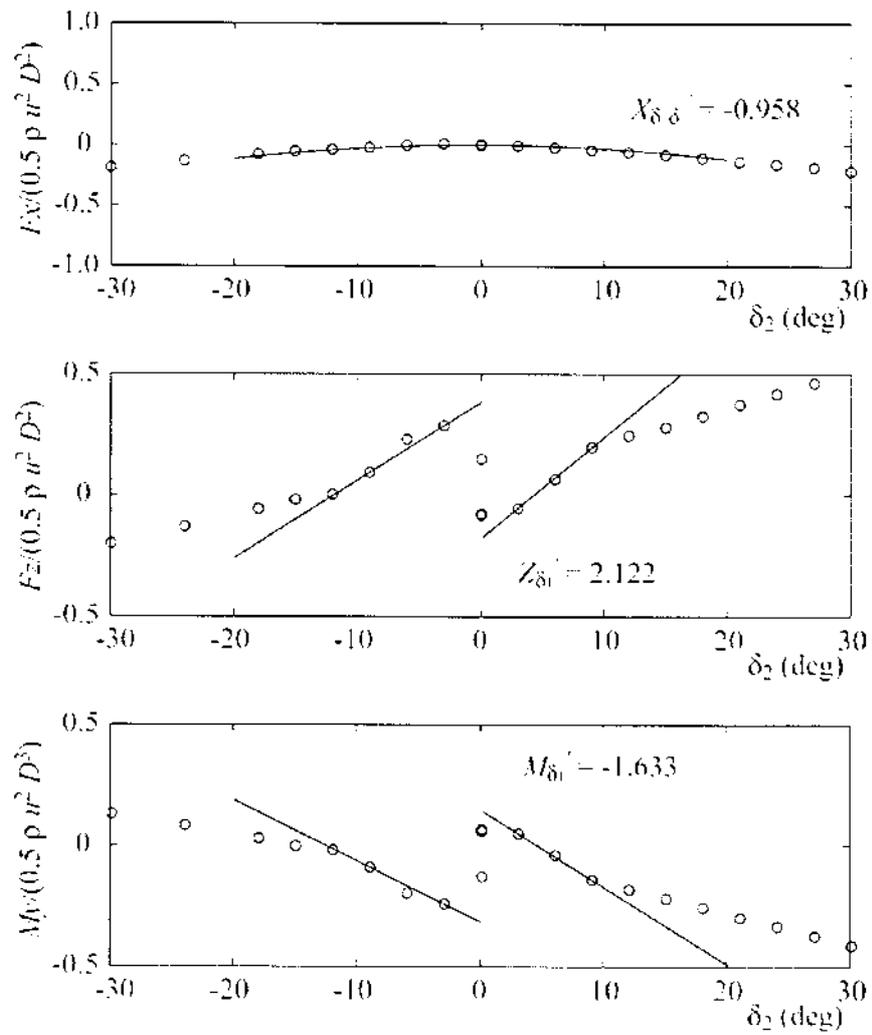


図 12: 前鱗迎角変更試験結果 (後鱗なし).

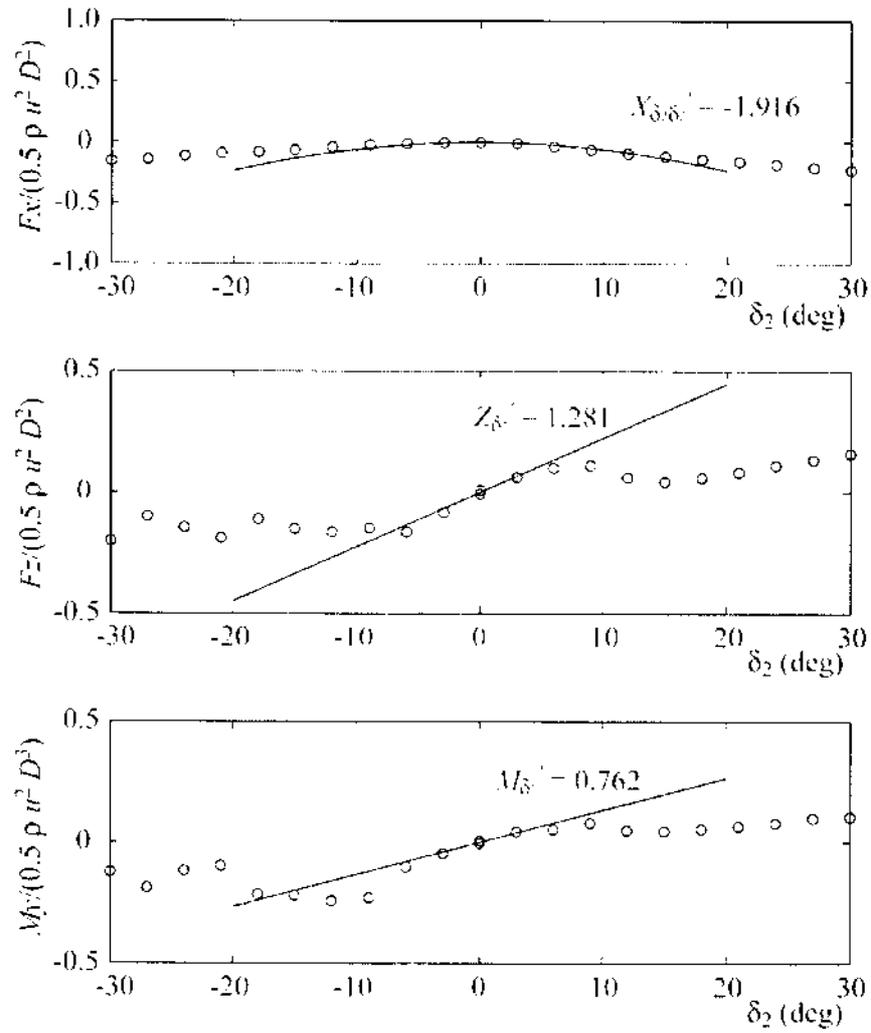


图 13: 後鰭迎角變更試驗結果.

4 考察と今後の課題

速度-着力点位置の関係がある速度以上で変動が大きくなる傾向について、現段階ではストラットの形状による効果を見逃すことができない。研究目的の節でも述べたが、実験の性質上、まずは水中滑翔時の状態を復元することが目的であり、今回得られた係数の他、少なくとも胴体のトリム角に対する諸係数を計測する必要がある。しかしストラットの影響はその実験にも現れることが予想され、解決する優先度が高い。

今回の実験で明らかになった問題として、復元した鰭の特性が、実際的水中ロボットや現生種に比べ非常に悪いことが挙げられる。本研究では、鰭の形状は鰭を構成する骨格の形状に基き、未発見の軟組織は最小となるよう復元した。しかし、実験結果に現れた小さな失速角は、翼厚比が大きすぎるか、あるいは対称翼として復元したことが影響していると考えられる。逆に言うと、長頸竜類の鰭は、化石記録では一切残っていない軟組織が大きく広がっていたことが強く示唆される。また、鰭のキャンバーについては、静止時には対称で、流体力に対し受動的に生じたことが想像されるが、模型実験においてどのように再現するかが問題となる。いずれにせよ、現生種の鰭の形態や種々の最適化手法を用いて再設計、実装し、その流体力係数を計測しなおす必要がある。

また、前鰭の迎角-揚力係数、迎角-モーメント係数の関係にそれぞれ不連続的な傾向があること、特に前鰭は迎角 0° 付近での微小な変化に対し不安定性を強める傾向にあることも明らかになった。これは前鰭と後鰭を明確に使い分けていた可能性を示す。前述の通り翼の復元が不適当であった可能性もあり、今回用いた翼に固有の現象である可能性は否定しきれないが、それは鰭を再復元し比較することで明らかになると考えられる。従来、長頸竜類の前後の鰭は一見すると同様のサイズとシェイプであるため、共に推進器として同様に用いられたと考えられてきた。今回の実験は水中飛翔ではなく水中滑翔の場合を想定したもので一概には言えないが、両者の特性の違いは、一方が専ら安定器として用いられていた可能性を示唆する。どちらが安定器として用いられたかについては、鰭の最適化とその流体力係数の再計測、胴体部分の諸係数の計測を待って評価する必要がある。

5 まとめ

1. 長頸竜類の流体力係数を求めるために模型実験を行った。実験条件は水中滑翔時の状態を近似するものである。
2. 少なくとも実スケール 2 - 6 knots では抵抗係数、着力点位置ともに一定である
3. 前後とも鰭の失速角は小さく ($\pm 9^\circ$)、効率が悪い。これは化石記録に無いの軟組織があったことを強く示唆する。
4. 前鰭と後鰭、後鰭と胴体の干渉は小さく、無視しうる。
5. 前鰭と胴体が干渉し、鰭の迎角-揚力係数、迎角-モーメント係数との関係が不連続的となる。これは前鰭と後鰭の役割が明確に異なった可能性を示唆する。

参考文献

- [1] Welles, S. P., 1943. Elasmosaurid Plesiosaurs with description of new material from California and Colorado. *Memoirs of the University of California* 13(3): 125-254.

沿岸域における観測を目的とした小型水中ロボットシステムの開発

A Small Underwater Robot System for Coastal Observation

研究代表者 九州工業大学 石井和男
Kazuo ISHII Kyushu Institute of Technology

Abstract: Various kinds of robots have been developed parallel with the progress of computers and information processing technology, and the operations in the extreme environments, such as disaster areas, space and ocean, are getting one of the practical solutions for those hazardous missions. The underwater robots are one of the extreme environment robots and expected as one of solutions for underwater activities i.e., maintenance of underwater structures, observations, scientific research, where research area is getting wide and deep and also underwater structures are getting large-scale and deep depth. Their efficiencies have been investigated during recent decades and are proven by ocean experiments. However, the robotic system including the support vessels is still big scale, and not so easy to handle by a few researchers. In this paper, we describe the underwater robot (AquaBox) series developed aiming at handy, small underwater robots which can be operated by a few researchers.

1. はじめに

自律型水中ロボットは近い将来、深海での活動[1]、海洋開発や調査を行う方法のひとつとして期待されている。しかしながらそれらを実現するためには姿勢制御、センサ情報の取得、行動決定、衝突回避行動、自己位置同定等さまざまな解決すべき課題がある。実用的な水中ロボットを目指すには、常に変化する環境中でロボット自身の状態を判断し、最適な行動をとる必要がある。ところが自律型水中ロボットは、自律的にそれらの環境に適応する。我々は、環境に適応できるコントローラ[2][3]、ナビゲーション[4]、そして水中マニピュレータシステムの研究を行っている[5]。

近年、自律型水中ロボットによる海洋調査の報告がなされている。例えば、自律型水中ロボット r2D4 は水深 2000[m] 明神礁の海底火山の観測を行い[6]、自律型水中ロボット Aqua Explorer は、鯨の追跡を行い生態調査に役立っている[7]。

しかしながらそれらのロボットシステムは、支援母船を含めると大規模であり、数人の研究者で簡易に運用できるものではない。そこで我々は、小規模な水中ロボットシステム『AquaBox』の研究を行っている。本稿では、小規模水中ロボットシステム『AquaBox』について述べる。また、新たに開発した『AquaBox III』により参加した 2006 年 8 月に行われた『AUVSI & ONR's 9th International Autonomous Underwater Vehicle Competition』についても紹介する。

2. 水中ロボット『Aqua Box I & II』

『AquaBox』シリーズのコンセプトは以下のとおりである。

(i) 小規模システムで支援母船なしで数人の研究者によって運用できるシステムとする。

(ii) ミッションに応じてセンサ、アクチュエータを変更可能とするためにモジュール構造とする。

本研究に先立ち、水中画像の取得を目的とした小型水中ロボット(AquaBox I)を開発し(Fig. 1)、AquaBox I を使用して実海域における水中画像の取得を行った[8]。しかしながら、AquaBox I は、遠隔操縦型のロボットとして開発したため動作時においてケーブルによる行動制約が生じる。一方 AUV は、制約なしに行動することができる。AUV である AquaBox II(Fig. 2)[9]は、AquaBox I を拡張したものである。内部には高性能な PC を搭載し、画像処理や行動決定などを行うことができ、そしてマイクロコンピュータによりセンサ情報の取得、姿勢制御を行う。AquaBox I および AquaBox II の全長、重

量は、それぞれ 0.6[m], 45[kg], 1.2[m], 60[kg] である。

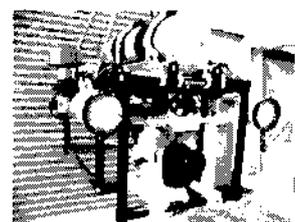


Fig.1 AquaBox I

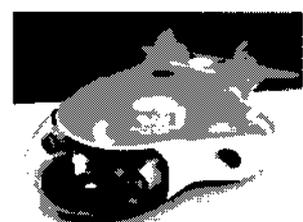


Fig.2 AquaBox II

3. 水中ロボット『Aqua Box III』

3.1 AquaBox III の仕様

新たに開発した AquaBox III の開発コンセプトを以下に示す。

- (i) ソフトウェア開発のテストベッドとしても運用するために高性能なコンピュータを搭載する。
 - (ii) 下位の姿勢制御等は、マイクロコントローラによって行う。
 - (iii) センサ等の拡張性を持たせるためにフレーム構造とする。
- AquaBox III の仕様を Table 1 に示す。

3.2 ハードウェア

Fig. 3 に配置図を示す。AquaBox III はフレームといくつかの耐圧容器から構成されている。マイクロコントローラおよびコンピュータは、耐圧容器(a)、(b)に搭載されている。ロボットには、ハイドロフォン 2 基(c)、スラスト 5 基(i)、全方位カメラ(e)、電磁流速計モジュール(f)、そしてデバラスタを搭載している。

耐圧容器は、以下の式から水深 50[m] まで潜航できるように設計されている[10]。

$$P_k = E[\pi^4/n^4(n^2-1)(r/l)^4 + (n^2-1)/12(1-\nu^2)(t/r)^2](t/r) \quad (1)$$
$$r = R + t/2 \quad (2)$$

P_k は弾性座屈強度、 E はヤング率、 ν はポアソン比、 t は耐圧容器の厚さ、 l は耐圧容器の全長、 R は耐圧容器の半径である。また、耐圧容器の全長は 0.493[m]、直径は 0.172[m]、厚さは 3.0[mm] ($t=2.2$ [mm](上式より))とした。

3.3 センサ

AquaBox III の前部には、2 基のハイドロフォンをロボットのナビゲーションを行うために搭載している。それぞれのハ

イドロフォンは全長 285[mm]、直径 28[mm]の耐圧容器に取り付けられている。またそれらの耐圧容器には、アンプ、バンドパスフィルタ(10[kHz]-100[kHz])が内蔵されている。音源から 2 基のハイドロフォンへの音の到達時間差から dsPIC により計算し音源定位を行う。それらの情報は、シリアル通信を介してメイン PIC へと送られる。

AquaBox III には、2 種類のカメラが搭載されている。自己位置同定を目的とした全方位カメラ (Fig.4)、下部方向に搭載したカメラ (Fig.5) である。

Table 1 Specifications of AquaBox III

Structures	Aluminum Pressure Hulls x 6
	H : 308[mm] W : 600[mm] L : 1700[mm] Weight : 40[kg] 50[m] depth pressure resistant
Actuators	100[W] Thrusters(MPT24V) x 5
Computer system	Laptop PC (Intel Pentium M1.1GHz)
	WindowsXP MicroController(PIC18F8720)
Communications	LAN&WirelessLAN
Sensors	Pressure Sensor(Depth Sensor)
	Hydrophone x 2
	Ultrasonic sensor
	Angular Velocity Sensor x 1
	USB Camera x 2(Omni-lens, Wide-lens)
Batteries	Attitude Sensor x 1
	Electromagnetic Velocity Sensor x 1
Batteries	Lithium-Polymer Battery 29[V],25[V] 8000mAh x 2
others	Marker dropping mechanism



Fig.3 The 3D design of AquaBox III

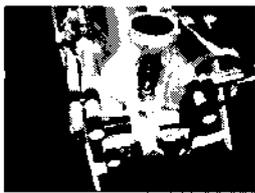


Fig.4 Omni-direction camera

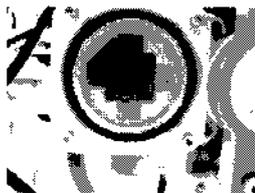


Fig.5 Bottom camera

4. システム

Fig.6 に AquaBox III のシステム図を示す。AquaBox III はソフトウェア開発用のテストベッドとしても運用するため小型高性能なノート PC を搭載している。OS は、Windows Xp でリモートデスクトップを利用することができる。また支援 PC とケーブルで接続すれば JoyStick を利用して操作することも可能である。自律モード時には、カメラ、ハイドロフォン等のセンサ情報によりコントロールする。これらのコ

ントローラは Visual Programming ソフトである“CONNECTU”を使用している。姿勢制御等を行うマイクロコントローラ PIC は、センサ情報等を Ethernet-serial converter を介して Ethernet LAN によりメイン PC へ送信される。また、ロボットが浮上している際には、無線 LAN の利用が可能である。

5. まとめ

開発した AquaBox III は、“AUVSI and ONR's 9th International Autonomous Underwater Vehicle Competition”のレギュレーションにあわせた仕様となっている。今後は、AquaBox III を利用して実海域での実験を行う予定である。

本研究の一部は、九州工業大学 21 世紀 COE プロジェクト「生物とロボットが織りなす脳情報工学の世界」の支援および九州大学応用力学研究所の協力により行っている。

参考文献

- [1] T. Ura, "Free Swimming Vehicle PTEROA for Deep Sea Survey," Proc. of ROV'89, pp. 263-268, (1989)
- [2] Ishii, K., Fujii, T., Ura, T., "An On-line Adaptation Method in a Neural Network Based Control System for AUVs", IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 20 No. 3, pp. 221-228, (1995)
- [3] S. Nishida, K. Ishii, T. Furukawa, "An Adaptive Neural Network Control System using mSOM", CD-ROM Proc. of OCEANS'06 Asia, (2006)
- [4] K. Ishii, S. Nishida, T. Ura, "A Self-Organizing Map Based Navigation System for an Underwater Vehicle", Proc. of ICRA'04, pp. 4466-4471, (2004)
- [5] M. Ishitsuka, S. Sagara, K. Ishii, "Dynamics Analysis and Resolved Acceleration Control of an Autonomous Underwater Vehicle Equipped with a Manipulator", Proc. of UT'04, pp. 277-280, (2004)
- [6] T. Ura, et. al., "Dive into Myojin-sho Underwater Caldera", CD-ROM Proc. of OCEANS'06 Asia, (2006)
- [7] T. Ura, et. al., "Experimental Result of AUV-based Acoustic Tracking System of Sperm Whales", CD-ROM Proc. of OCEANS'06 Asia, (2006)
- [8] H. Sakai, T. Tanaka, S. Ohata, M. Ishitsuka, K. Ishii, T. Ura, "Applicability and Improvement of Underwater Video Mosaic System Using AUV", Proc. Oceans'04, pp. 659-664, (2004)
- [9] Satomi Ohata, Kazuo Ishii, Hiroshi Sakai, Toshinari Tanaka, Tamaki Ura, "Development of an autonomous underwater vehicle for observation of underwater structures", CD-ROM Proc. of Oceans'05, (2005)
- [10] 浦環、高川真一「海中ロボット総覧」成山堂書店 (1994)

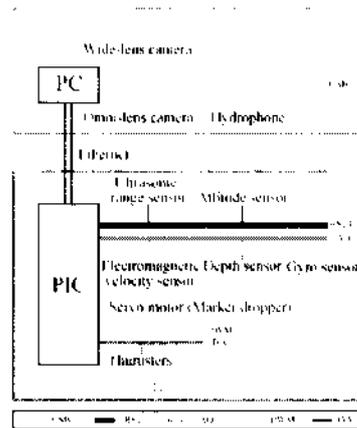


Fig.6 System Architecture

沿岸海域の低次栄養段階をめぐる物質循環

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過程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：2006年12月 5日（火）13：20～ 6日（水）12：30

場所：力学シミュレーション研究センター6階 多目的研究交流会

発表者：橋本俊也（広島大学大学院生物圏科学研究科）

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）

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30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.

応用力学研究所共同研究集会プログラム

沿岸海域の低次栄養段階をめぐる物質循環

研究代表者：橋本俊也（広大大学院生物圏科学研究科）

所内世話人：柳 哲雄

日時：2006年12月5日（火）13：20～2006年12月6日（水）12：30

場所：力学シミュレーション研究センター6階 多目的研究交流会議室

第一日 2006年12月 5日（火）

趣旨説明（13：20～13：30） 研究代表者，所内世話人

1. 江田内湾の漁場再生－生態系モデルによる物質収支解析
橋本俊也・山本民次（広大院生物圏） 13:30-14:05
2. 沖縄・赤土汚染の濁水中の粒子の挙動
多田邦尚（香川大農）・中野義勝（琉球大）・橋本俊也（広大生物圏）・一見和彦（香川大農） 14:05-14:40
3. 植物プランクトン，特に珪藻類の元素組成比と栄養塩の負荷比との関係
樽谷賢治（水産総合研究センター瀬戸内海区水産研究所） 14:40-15:15
4. 沿岸域の低次生産を支える藻場の保全と造成
谷本照己・星加 章（産総研）・小山田久美（JFE 技研） 15:15-15:50
5. 対馬海峡の表層収束・発散場
石井大輔・柳 哲雄・吉川 裕・増田 章（九大応力研） 15:50-16:25

第二日 2006年12月 6日（水）

6. 瀬戸内海における貧酸素水塊の空間・時間変動
柳 哲雄・石井大輔（九大・応力研） 9:30-10:05
7. 瀬戸内海播磨灘における成層・混合海域の環境特性
一見和彦・宇佐見竜也・多田邦尚（香川大農） 10:05-10:40
8. 黄河河口の地下水を含んだ水収支
林 美鶴（神戸大学内海域環境教育研究センター）・柳 哲雄（九大応力研） 10:40-11:15
9. 夏季の伊予灘における残差流構造の経年変動
郭新宇・張弼勳・二村彰・武岡英隆（愛媛大学沿岸環境科学研究センター） 11:15-11:50

総合討論 11：50～12：30

江田内湾の漁場再生－生態系モデルによる物質収支解析

橋本俊也・山本民次（広大院生物圏）

1. はじめに

江田島湾(Fig. 1)では、かき養殖が集約的に行われているため、カキが排泄する糞の堆積などにより底質の悪化が著しく、毎年夏期には貧酸素水塊の発生に悩まされている。底層の貧酸素化は湾内で生産される有機物が分解無機化する際に起こる。閉鎖性内湾で生産される有機物の主体は、通常、植物プランクトンであるが、江田島湾では、これらがカキに摂食され、その糞粒による寄与が大きい。ここでは、貧酸素問題も含め、カキ・ナマコなどの水産資源の持続的生産を可能とする生息環境に改善するためにはどうしたらよいかについて、物質循環を表す数値モデル解析により科学的に提案を行う研究が進行中である。

今回は生態系モデルによる江田島湾の物質収支の現状について報告する。

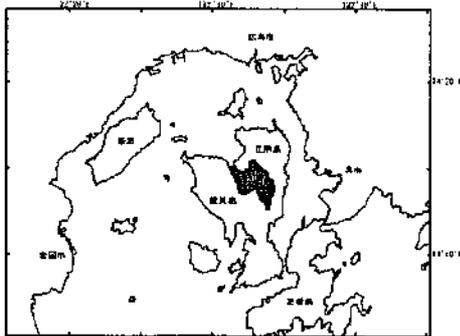


Fig. 1 江田島湾

2. 生態系モデル

江田島湾内にカキ養殖場領域を設定し、その中でカキ養殖が集約的に行われているものとした。鉛直的には上層・下層に分割した。すなわち、江田島湾上層・下層、カキ養殖場上層・下層の4ボックスを計算対象とした。

生態系モデルの概要をFig. 2に示した。生態系モデルは、基本的には満塩ほか(2002)を参考としている。今回は貧酸素水塊が発生し、底質環境が悪化する夏季(5-9

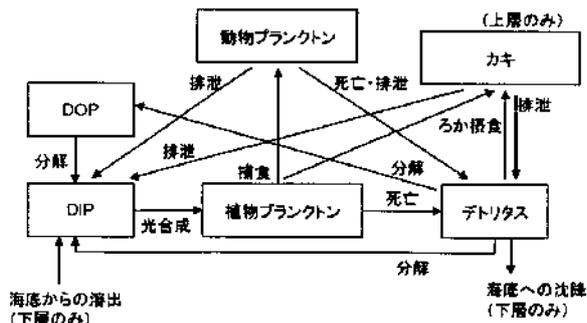


Fig. 2 生態系モデルの概要

月)を計算対象としているため、植物プランクトンは渦鞭毛藻類とし、日周鉛直移動を考慮した。また、満塩ほか(2002)同様、溶存酸素濃度変化に関する過程もモデルに組み込んでいる。

3. 結果

江田島湾上層・下層における各コンパートメントの経時変化(Fig. 3)と8月1日12:00におけるカキ養殖場ボックスのリンフラックス(Fig.4)を示す。その他の結果、考察などは発表時に述べる。

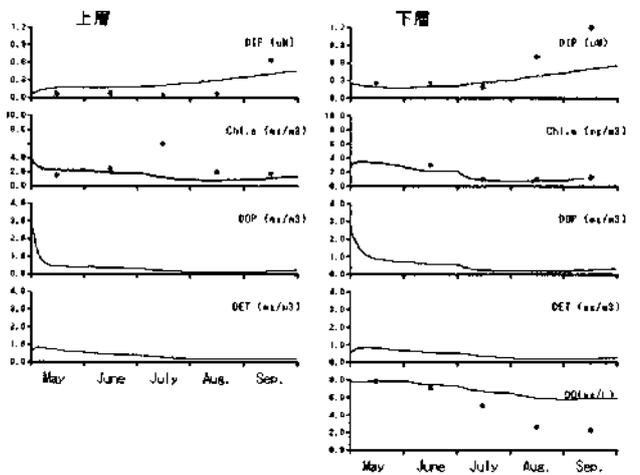
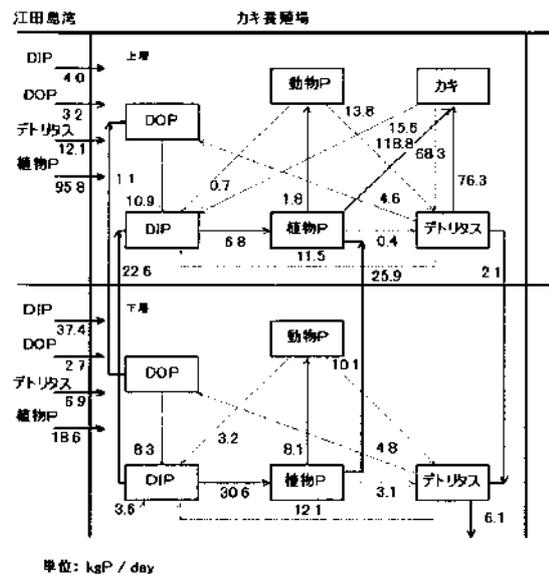


Fig. 3 各コンパートメントの経時変化

●は実測値 (0m, B-1m)



単位: kgP / day

Fig. 4 8月1日12:00におけるリンフラックス (カキ養殖場内)

沖縄・赤土汚染の濁水中の粒子の挙動

多田邦尚*・中野義勝**・橋本俊也***・一見和彦*

*: 香川大学農学部、**: 琉球大学熱帯生物圏研究センター、***: 広島大学大学院生物圏科学研究科

【はじめに】

沖縄地方では、強い雨が降ると開発事業で植物がはぎ取られた裸地や農地などから土砂が流出し、付近の海を濁らせる。この濁水の発生は国頭マージンと呼ばれる赤黄色土が分布する地域で顕著に見られるが、他の土壌も同時に流出し、付近の海域が赤く染まって見える。この濁水流出による環境汚染は「赤土汚染」の名称で広く知られている。土砂の流出時には海底が土壌粒子でおおわれてしまうこともあり、沿岸海域のサンゴ礁生態系を破壊するだけでなく、水産業や観光産業にも悪影響を及ぼしており、今や大きな社会問題となっている(大見謝ら 1995, 大見謝ら 2000, 大見謝 2003)。過去、現地調査(例えば大見謝・池間 1990)や、LANDSAT/TM データを用いた解析(瀬岡・田村 1992)が行われてきたが、濁水中の粒子の挙動についての報告は見当たらない。

そこで、本研究では、大雨の後に見られる赤土汚染の濁水中の微粒子のサイズ分布や平均沈降速度を求めるとともに、X線マイクロアナライザーを用いて微粒子の化学組成の測定も行い、赤土汚染の濁水中の粒子の挙動についての基礎データを得ることを目的とした。

【方法】

東シナ海に面する沖縄本島の国頭郡本部町において、大雨の後に見られた赤土汚染の調査を実施した。2004年10月、2006年3月、および2006年5月の計3回、プラスチックバケツを用いて大雨後の赤色の濁水を採取し研究室に持ち帰った。試料は、その浮遊懸濁物量、粒子のサイズおよびその沈降速度を測定した。さらに、濁水の化学組成についても調べた。

浮遊懸濁物量は重量既知の Whatman GF/F フィルターを用いて一定量の濁水をろ過し、その後、凍結乾燥し SS 量を測定した。また、粒子サイズは孔径の異なる重量既知のフィルターおよびネットを用いて一定量の濁水をろ過し、その後、凍結乾燥し SS 量を測定した。ろ過にはメッシュサイズが 20, 10, 5 μm のネット (Swiss Nylon Plankton Net Cloth HD20, HD10, HD5) 及び孔径 2, 0.4 μm の Nuclepore フィルターを用いた。また、光学顕微鏡下で粒子を実際に観察した。濁水中の粒子の平均沈降速度は、透明アクリル製の円筒にシリコン製チューブを装着した装置を用い、経時的に抱濁度を測定する多田ら (2006) の方法により求めた。濁水中の微粒子の化学組成は、X線マイクロアナライザー (EPMA) を用いて行った。測定には、一定の試水を孔径 0.4 μm の Nuclepore フィルターでろ過し、凍結乾燥した後、日本電子社製 JXA-8900 を使用し、エネルギー分散型 X 線分光器 (EDS) で定性分析を行った。

【結果と考察】

計3回の調査で、得られた濁水中の SS は 6.90 から 285.29 mg/l ($n=8$) の範囲であった。濁水中の粒子の平均沈降速度は 0.32 ~ 1.61 m/d ($n=5$) であった (表1)。また、粒子のサイズ分布に注目すると、20 μm 以下のサイズの粒子が全 SS の 68 ~ 100% を、また、10 μm 以下の粒子が 14 ~ 89% 占めていた (図 1)。粒子を球形の石英と仮定してストークスの式で計算すると、直径が 20 μm 、10 μm の粒子の沈降速度は、それぞれ、5.38 m/d、21.5 m/d となる。実際の平均沈降速度の測定値がストークスの式より計算される沈降速度よりも小さい事は、実際の濁水中の粒子が球形ではなく抵抗を受けやすいためと考えられる。実際に顕微鏡観察では、粒子は球形ではなく、粒径が数十 μm の粒子の塊のようなものが多く観察された (写真)。

赤土の濁水中の粒子の化学組成を X 線マイクロアナライザーで測定したところ、濁水の影響が無いと考えられる海水中の粒子では、各元素を示すピークは検出されなかったが、濁水中の粒子では、陸起源の元素である Al, Si および Fe の明瞭なピークが検出された (図 2)。

以上の結果を総合して考えると、赤土汚染の濁水中の粒子は、その粒子の直径は 20 μm 以下で、植物プランクトンと同程度あるいは、それ以下のサイズであり、その沈降速度は非常に小さく、水塊移動に伴って水平方向へ広く拡散する可能性がある。さらに、淡水に懸濁した赤土は海水に出会うとコロイド化して沈降するとされているが (Sakamoto, 1972)、フラッシュアウトの際は表層を広い範囲に拡散してゆくことが観察されている。その粒子の輸送過程は、X 線マイクロアナライザー等を用いた分析で Al, Si および Fe、特に Fe を指標として追跡できる可能性が考えられる。

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

日本海はアジア大陸と日本列島の間位置する縁辺海であり、対馬海峡、津軽海峡、宗谷海峡、間宮海峡によって、東シナ海、太平洋、オホーツク海との海水交換が行われている。これらの海峡は狭く浅いため日本海は閉鎖性の強い海域であり、これらの海峡での流れ・熱・淡水・栄養塩といった流出入条件は日本海内部の海洋循環・水塊特性・生態系に大きな影響を与えている。本研究集会では、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・波浪情報をもちより、情報交換・議論を行う。

日本海研究は国際共同研究 CEAMS(Circulation Research of the East Asian Marginal Seas) により飛躍的に進歩し、その後も多くの研究者により精力的に研究が行われている。最近の研究では、中国の大河川長江から流出した淡水の多くが対馬海峡を通過し日本海へ流入することが知られており、現在進行中の中国国家プロジェクトである三峽ダム建設や南水北調による東シナ海への淡水流入量の変化が、東シナ海だけでなく日本海の海洋環境を激変させることが懸念されている。また、近年、対馬暖流によって東シナ海から日本海に輸送される大量の大型クラゲによる多大な漁場被害が報告され、大きな社会問題になっている。このように、日本海における海況監視体制(海洋レーダやフェリー ADCP 等)の構築が必要とされている。

こうした背景のもと、九州大学応用力学研究所は平成 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いる。本研究集会は応用力学研究所が進めている日本海の高況監視と予測にむけた事業研究に関連して、海洋観測・現場観測データによるモニタリングに焦点を絞り、内外の研究者に議論の場を提供している。今回は合計 16 題の講演があり、参加者は 40 名となった。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。

講演内容は、各海峡における海洋レーダや ADCP 観測結果に基づく流況とその変動特性、対馬海峡における塩分変動、大型クラゲ分布、東シナ海から日本海南部にかけての二酸化炭素分圧、数値モデルによる対馬海峡の短周期変動、瀬戸内海の高潮シミュレーション、衛星および現場観測データを用いた海面水温データ、日本海沿岸の湾港における固有振動、内湾・沿岸域の海洋構造と非常に幅広いものであった。対馬海峡では海洋レーダとフェリー ADCP、津軽海峡ではフェリー ADCP、宗谷海峡では海洋レーダと係留 ADCP によって、ここ数年間の観測が継続的に行われており、日本海の出入り口であるそれぞれの海峡における海況監視体制は確立しつつある。今回講演はなかったが、現在、津軽海峡における海洋レーダも稼働している。

本研究集会の前日に行われた「海洋レーダに関する研究集会」によると、海洋レーダによる表層海流観測の技術的な問題は解決されつつあり、海洋レーダは海面の流況の時空間変動を観測することのできる強力なツールとなる。今後は、海洋レーダによる海表面流況、ADCP による流れの鉛直構造、船舶観測による物理・化学・生物過程に関する観測結果や数値モデル結果を組み合わせることによって、日本海沿岸域の現象への理解がより深まることが期待される。「内湾域・沿岸域の力学と観測」の講演では、それぞれの機関が所有する海洋レーダ・ADCP・船舶観測を集結し、同一海域を集中的に観測する提案もあげられた。

この研究集会は、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力学シミュレーション研究センター・室内実験分野の諸氏に感謝する。

プログラム

日時：平成18年12月21日(木)～22日(金)

場所：九州大学応用力学研究所力学シミュレーション研究センター棟6階多目的交流室(W601号室)

12月21日(木)

13:30-13:40 趣旨説明

滝川哲太郎(水大校)

13:40-14:10 海底設置 ADCP と海洋レーダを用いた宗谷暖流流量の見積り

深町康(北大低温研)・田中伊織(道中央水試)・大島慶一郎・江淵直人(北大低温研)・
水田元太(北大院地球環境)・吉田英雄(道稚内水試)・若土正暁(北大低温研)

14:10-14:40 宗谷暖流の短周期変動

江淵直人・深町康・大島慶一郎・若土正暁(北大低温研)

14:40-15:10 フェリー搭載 ADCP 計測に基づく津軽海峡の通過流量の見積もりー2000～2001年の結果

伊藤集通・川村英之(原子力機構)・中山智治・島茂樹(海洋財団むつ)・磯田豊・大西光代(北大水産)

15:10-15:40 対馬海峡フェリー航路における航走 ADCP 観測

滝川哲太郎・酒井健一(水大校)・福留研一(九大総理工)・森本昭彦(名大水循環センター)・
鬼塚剛(水大校)・渡邊敦(名大環境学)・尹宗煥(九大応力研)・鎌野忠・秦一浩・富賀見清彦(水大校)

15:40-16:00 休憩

16:00-16:30 海峡水位差を用いた対馬暖流流量推定式の再作成

西村和也(九大総理工)・広瀬直毅(九大応力研)・福留研一(九大総理工)

16:30-17:00 対馬海峡東水道に見られる反時計回り渦の変動特性

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)

17:00-17:30 対馬海峡の塩分変動と Cheju 海峡の傾圧性との関係

千手智晴(九大応力研)

17:30-18:00 表層水温、クロロフィル a、塩分の気候値を用いた東シナ海-日本海陸棚域の pCO₂ 分布推定

渡邊敦(名大環境学)・森本昭彦(名大水循環センター)・滝川哲太郎・鬼塚剛(水大校)・
才野敏郎(名大水循環センター)

12月22日(金)

08:30-09:00 2006年における大型クラゲ分布の特徴

渡邊達郎(日本海区水産研究所)・広瀬直毅(九大応力研)

09:00-09:30 東シナ海における短周期擾乱の日本海への伝播

福留研一(九大総理工)・尹宗煥(九大応力研)

09:30-10:00 FVCOM を使った日本沿岸域における高潮の推算モデル

青木一弘・磯辺篤彦(九大総理工)

10:00-10:30 衛星および現場観測データを用いた全球日別海面水温解析(MGDSST)

石崎士郎・齋藤幸太郎・服部宏之・田口晴夫・山際龍太郎・吉田隆・倉賀野連(気象庁)

10:30-11:00 日本海沿岸の湾と港における固有振動の観測

阿部邦昭(日本歯科大学新潟短期大学)

11:00-11:30 沿岸域の海洋構造

笠井亮秀(京大院農)・増田章(九大応力研)

11:30-12:00 内湾域・沿岸域の力学と観測

増田章(九大応力研)

12:00-12:30 ROFI のパラドクスを解く沿岸海洋モニタリングの可能性

磯辺篤彦(九大総理工)

12:30-13:00 総合討論

参加者

氏名	所属
高津 尚之	(株)川崎造船
藤井 智史	琉球大学・工学部
渡邊 敦	名古屋大学
江淵 直人	北大・低温研
滝川 哲太郎	水産大学校
榎本 剛志	水産大学校
深町 康	北大・低温研
岩松 伸宏	朝日航洋(株)
宮里 琢磨	琉球大学・大学院
久木 幸治	琉球大学・理学部
石崎 士郎	気象庁
阿部 邦昭	日本歯科大学・新潟短大
勝呂 一彦	スリーエスオーシャンネットワーク
寄高 博行	海上保安大学校
伊藤 集通	原子力機構
内村 忍	第7管区海上保安庁
因師 政宏	第8管区海上保安庁
吉川 裕	九大・応用力学研究所
西村 和也	九大・総理工
磯辺 篤彦	九大・総理工
池田 捷夫	沿岸海洋調査(株)
申 弘烈	公州大学
鹿島 基彦	NICT
高山 勝巳	九大・応用力学研究所
中田 聡史	九大・総理工
福留 研一	九大・総理工
渡辺 達郎	日水研
武田 英樹	九大・総理工
宮村 茂	朝日航洋(株)
稲津 大祐	九大・総理工
和川 拓	九大・総理工
増田 章	九大・応用力学研究所
広瀬 直毅	九大・応用力学研究所
灘井 章嗣	NICT
白木 喜章	九大・総理工
千手 智晴	九大・応用力学研究所
石井 大輔	九大・応用力学研究所
和方 吉信	九大・応用力学研究所
丸林 賢次	九大・応用力学研究所
石橋 道芳	九大・応用力学研究所

有明海の海況と環境

石坂 丞二 (長崎大学水産学部)

九州大学応用力学研究所共同研究集会として、2006年12月4日(月)に力学シミュレーション研究センター6階多目的研究交流会議室で「有明海の海況と環境」を開催した。

この集会では、下に示したようなプログラムで、最近行われたHFレーダー、DBFレーダー、ADCP、プイ、船舶による観測や数値モデルなどによって、流動場と一次生産との関連を議論した。

日時：13:30～17:15

13:30 趣旨説明

13:35-14:00 日向博文(国総研)：有明海のHFレーダー観測結果

14:00-14:25 坂井伸一(電中研)・多田彰秀(長崎大学)：有明海におけるDBFレーダー観測結果

14:25-14:50 万田敦昌(長崎大)：有明海におけるADCP観測結果

14:50-15:15 松野 健(九大応力研)・山口創一(九大総理工)：微細構造の計測による乱流混合強度の見積り

15:15-15:40 柳 哲雄・石井大輔(九大・応力研)・屋良由美子(九大・総理工)・日向博文(国総研)・石坂丞二(長崎大・水産)：筑後川河口における低塩分・高chl.a水の挙動

15:40-16:05 石坂丞二¹・守田大志²・山本恵李²・谷村いずみ¹(1.長崎大水産学部・2.長崎大院生産) 大潮・小潮にともなうクロロフィル、懸濁物質、栄養塩の変化

16:05-16:30 堤 裕昭・堤 彩(熊本県立大)：船舶観測結果

16:30-16:55 藤家 亘：有明海奥部における秋季赤潮と物理場の関係

16:55-17:15 討論

核燃焼プラズマ統合コード計画

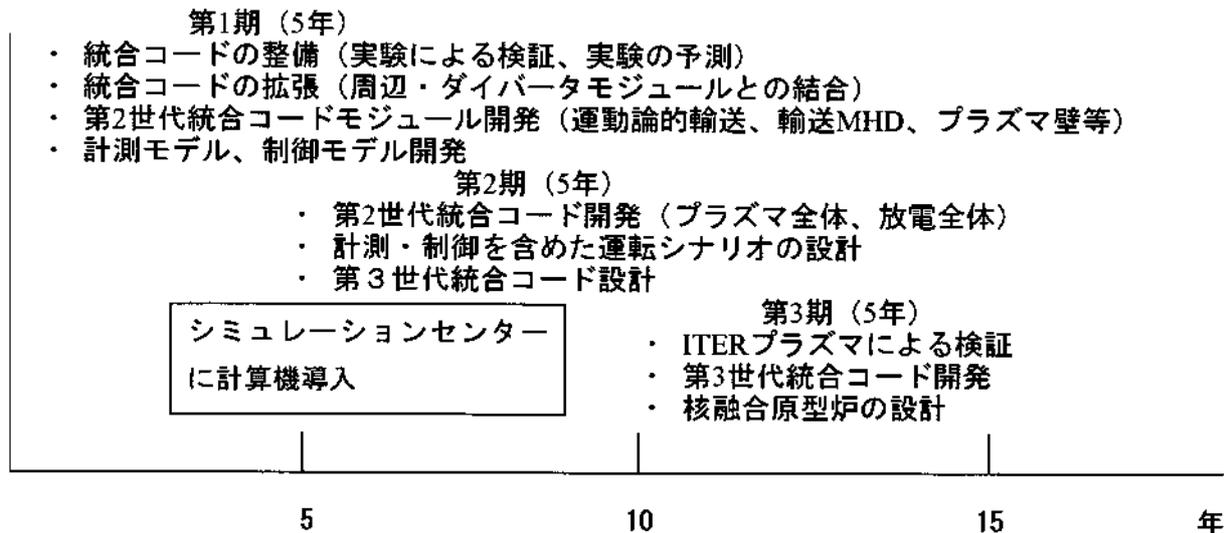
九州大学応用力学研究所

矢木雅敏

はじめに

2006年、ITER(International Thermonuclear Experimental Reactor)協定に関する署名が7極(日、欧、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、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。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://bpsl.nucleng.kyoto-u.ac.jp/bpsl/>)。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 s. Vol. 81, No. 10 (2005) 747-754)をご覧ください。今回、この研究活動を加速させるために九州大学応用力学研究所の特定研究として応募し、この研究成果をもとに大型外部資金に応募できたと考えている。核燃焼プラズマ統合コード構想の活動は、(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・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



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、5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・抑制や突発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ため、共同研究として進めた。研究成果は第 5 回 Burning Plasma Simulation Initiative Annual Meeting (平成 18 年 12 月 21-22 日、九州大学応用力学研究所) で発表された。

研究成果報告

(1) に関しては、磁気流体力学安定性解析コード MARG2D において高 n (n : トロイダルモード数外部モード (ピーリング-バルーニング・モード) 解析を可能とし、それを行う他のコードとして ELITE コードとのベンチマークテストを進め、成長率、固有関数についてよい一致を得、MARG2D コードが低 n から高 n モードまでの安定性が解析可能であることを確認され[1]、トカマク周辺 MHD 安定性に関するプラズマ形状の効果の研究が進展した[2]。

(2) に関しては、並列化された MARG2D コードを PC クラスタ上で実行し、輸送コードをパソコン上で実行して、CPU 時間のバランスを取る計算環境を構築し統合シミュレーションを実現した[4]。さらに、MHD 安定性解析の計算負荷の低減、さらには実時間制御への応用を目指して、MARG2D コードのハード化に着手した[6]。(3) に関しては、回転プラズマにおける強制磁気再結合の非線形シミュレーション研究[3]を進めると共に、完全トーラス配位圧縮性 MHD シミュレーションコードの開発においてはプラズマと外部領域との相互作用を目指して自由境界 MHD シミュレーションモデルの構築を行った[5]。また、拡張 MHD シミュレーションモデルの研究[7, 8] 及び乱流と MHD モードとの他スケール相互作用に関するシミュレーション研究[9]が進展した。

成果リスト

論文

- [1] N. Aiba, S. Tokuda, T. Fujita, T. Ozeki, M. S. Chu, P. B. Snyder, and H. R. Wilson, Numerical Method for the Stability Analysis of Ideal MHD Modes with a Wide Range of Toroidal Mode Number in Tokamaks, accepted for publication in J. Plasma and Fusion Res.
- [2] N. Aiba, S. Tokuda, T. Takizuka, G. Kurita, and T. Ozeki, Effects of 'Sharpness' of the Plasma Cross-Section on the MHD Stability of Tokamak Edge Plasmas, Submitted to Nuclear Fusion.
- [3] 石井康友、安積正史、Andrei Smolyakoc, Nonlinear evolution and deformation of the driven magnetic island in the rotating plasma, Submitted to Nuclear Fusion.

学会発表等

- [4] N. Hayashi, T. Takizuka, T. Ozeki, N. Aiba, N. Oyama, Integrated Simulation of ELM Energy Loss Determined by Pedestal MHD and SOL Transport, 21st IAEA Fusion Energy Conference (Chengdu, China, 2006, Dec) TH/4-2.
- [5] 影井康弘、岸本泰明、三好隆博、有限体積法 full-MHD コードによる自由境界 MHD シミュレーション、第 23 回プラズマ・核融合学会年会（平成 18 年 12 月 1 日、つくば市）
- [6] S. Tokuda, Development of Eigenvalue Solver by MHD Stability Analysis Code MARG2D, 5th Burning Plasma Simulation Initiative Annual Meeting, 平成 18 年 12 月 21 - 22 日、九州大学応用力学研究所
- [7] Y. Todo, Construction of kinetic electromagnetic plasma model via interpolated fluid method, 5th Burning Plasma Simulation Initiative Annual Meeting, 平成 18 年 12 月 21 - 22 日、九州大学応用力学研究所
- [8] H. Naito, Effect of Ion Landau Damping on Vorticity Generation in Internal Kink Mode, 5th Burning Plasma Simulation Initiative Annual Meeting, 平成 18 年 12 月 21 - 22 日、九州大学応用力学研究所
- [9] A. Ishizawa, Interaction between MHD, Micro Turbulence and Zonal Flow, 5th Burning Plasma Simulation Initiative Annual Meeting, 平成 18 年 12 月 21 - 22 日、九州大学応用力学研究所

多スケールプラズマ乱流シミュレーション研究

九州大学応用力学研究所

矢木雅敏

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。しかし、そのようなシミュレーションを第一原理に基づいて行うには計算機のリソースが十分とは言えず、モデル化や方程式の簡約化が必要である。本研究では、核融合プラズマにおける階層シミュレーションの出発点として、MHD とドリフト波乱流の相互作用を考慮したグローバルシミュレーションを加熱項が存在する場合に行い、輸送、MHD、乱流の相互作用を明らかにすることを目的とする。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環境やコードのチューニングも併せて行っていく予定である。

2. グローバル ITG シミュレーションによる内部輸送障壁の生成・崩壊機構の研究

近年、反転磁気シャー配位(RS)を採用し放電において内部輸送障壁が生成され異常輸送が抑制されることが報告されている。異常輸送を生み出すプラズマ乱流の飽和メカニズムは、帯状流による乱流の抑制が重要な役割を果たすことが報告されているが、内部輸送障壁の生成や崩壊のメカニズムに関してはまだ十分理解されていない。これら未解明の非線形現象の解明にはマルチスケールのダイナミクスを取り扱っていく必要がある。本研究においては、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 コードを開発し、内部輸送障壁の生成崩壊機構を研究する。具体的な方法としてはモデルに熱源項を導入し、RS 配位において加熱プロセスのシミュレーションを行った。

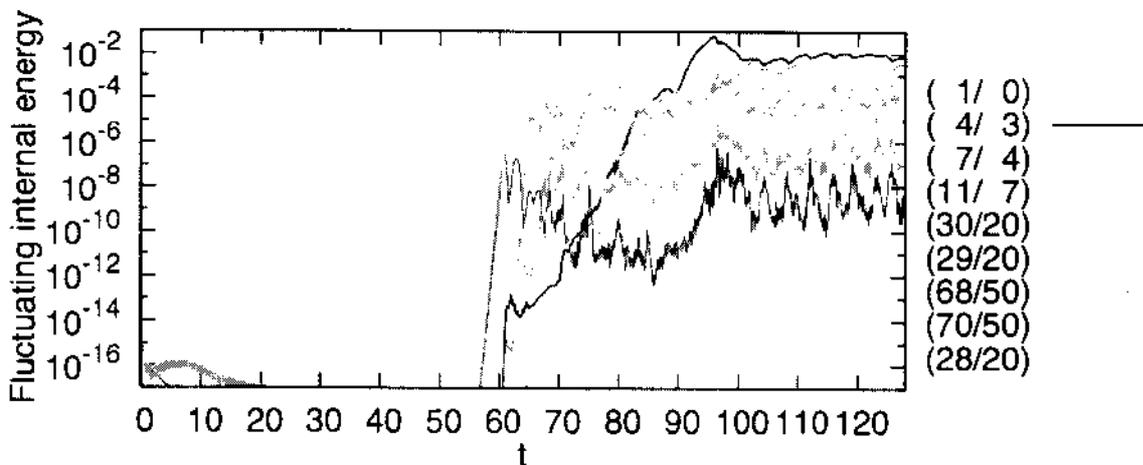


図 1

用いたモデルは文献[M. Ottaviani, et al., Phys. Plasmas 6 3267 (1999)]に与えられる。RS 配位は文献[X. Garbet, et al., Phys. Plasmas 8 2798 (2001)]に与えられるモデルを用いた。図 1 に揺動内部エネルギーの時間発展を示す。 $t < 50$ ではイオン温度分布の形成過程で温度勾配が ITG モードの閾値より低い
ため揺動は発展しない。 $t > 50$ で (30,20),(68,50)等の揺動が $r \sim 0.4$, $r \sim 0.6$ 付近でそれぞれ不安定
化し線形成長を始める。また、非線形相互作用により(7,4), (4,3), (11,7)等の低(m,n)モードが強く励
起され、グローバルな構造の変化をもたらす。図 2 に温度分布の時間発展を示す。

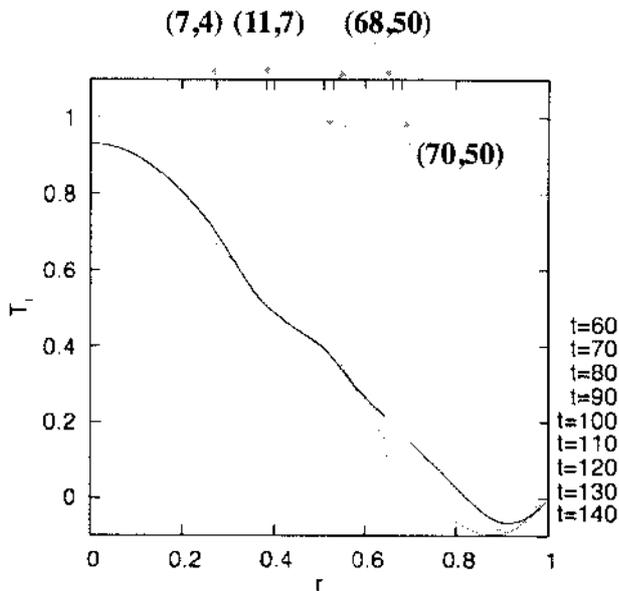


図 2

$t = 60$ ではほぼ拡散方程式に従って分布
が發展しており、揺動の發展が始まると
輸送障壁が $r = 0.6$ 近傍に形成される。
 $t = 90$ を過ぎると障壁は崩壊し、内側の
 $r = 0.3$ と外側の $r = 0.7$ に障壁が形成され
維持されているのがわかる。輸送障壁の
崩壊は(4,3)モードの成長とともに起きて
いる。このモードは(7,4),(11,7)の非線形
結合により励起されるが非共鳴モードで
あり(このケースでは $q_{min} = 1.35$)、グロー
バルなモード構造をもつ。本研究により
非局所的な非線形効果により誘起された
非共鳴モードが輸送障壁の崩壊過程に影

響を与える一例を示すことができた。今後の課題として帯状流の生成と輸送障壁の形成機構の関連
について調べる予定である。

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、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、林高行、濱田大地

参考文献・講演発表

[1] Turbulence spreading in reversed shear plasmas

M Yagi, T Ueda, S-I Itoh, M Azumi, K Itoh, P H Diamond and T S Hahm

Plasma Phys. Control. Fusion Vol.48, No.5A, A409-A418, 2006

[2] Study of Thermal Transport Effects on Drift-Tearing Mode, Reports of Research Institute for Applied Mechanics, N.

Seiya, S.-I. Itoh, M. Yagi, M. Azumi and K. Itoh, Kyushu University No. 131, P.1-12, Sep. 2006

[3] Turbulence spreading in reversed shear plasmas

矢木雅敏、日本地球惑星科学連合 2006 年大会、横浜幕張メッセ、2006 年 5 月

[4] 核融合研究統合コード・現状と展望

矢木雅敏、RIAM フォーラム 2006、九州大学応用力学研究所、2006年6月

[5] ドリフトテアリングモードにおける熱輸送効果

西村征也、伊藤早苗、矢木雅敏、安積正史、RIAM フォーラム 2006、九州大学応用力学研究所、2006年6月

[6] 核燃焼プラズマ統合コードにおける課題

矢木雅敏、第21回トライアム研究会&核融合フォーラムサブクラスター会合同研究会

周辺プラズマ及び PWI 研究の進展ーモデリングとシミュレーション、九州大学応用力学研究所、2006年8月

[7] Nonlinear interaction between drift wave and tearing mode

矢木雅敏、KAIST (国際会議 Japan-Korean workshop) , Daejeon, Korea, 2006年8月

[8] ドリフト-テアリングモードにおける熱輸送効果 (非線形シミュレーション)

西村征也、伊藤早苗、矢木雅敏、安積正史、日本物理学会 2006年秋季大会、千葉大学、2006年9月

[9] 森の射影演算子法を用いた VZSC モデルの解析

濱田大地、伊藤早苗、矢木雅敏、森肇、安積正史、プラズマ・核融合学会第23回年会、筑波大学、2006年11月

[10] テアリングモードと衝突性ドリフト波の相互作用の研究

林高行、伊藤早苗、矢木雅敏、安積正史、プラズマ・核融合学会第23回年会、筑波大学、2006年11月

[11] イオン温度勾配駆動型ドリフト波乱流の非線形シミュレーション研究

徳永晋介、伊藤早苗、矢木雅敏、安積正史、プラズマ・核融合学会第23回年会、筑波大学、2006年11月

[12] イオン温度勾配駆動型ドリフト波乱流の非線形シミュレーション研究

徳永晋介、伊藤早苗、矢木雅敏、安積正史、プラズマ核融合学会 九州・山口・沖縄支部第10回支部大会、九州大学、2006年12月

[13] 森の射影演算子法を用いた VZSC モデルの解析

濱田大地、伊藤早苗、矢木雅敏、森肇、安積正史、プラズマ核融合学会 九州・山口・沖縄支部第10回支部大会、九州大学、2006年12月

[14] テアリングモードと衝突性ドリフト波の相互作用の研究

林高行、伊藤早苗、矢木雅敏、安積正史、プラズマ核融合学会 九州・山口・沖縄支部第10回支部大会、九州大学、2006年12月

[15] はじめに

矢木雅敏、第五回核燃料プラズマ統合コード研究会、九州大学応用力学研究所、2006年12月

[16] ドリフト-テアリングモードにおける輸送の効果

西村征也、第五回核燃料プラズマ統合コード研究会、九州大学応用力学研究所、2006年12月

[17] グローバル ITG 乱流コードを用いた輸送シミュレーション

徳永晋介、第五回核燃料プラズマ統合コード研究会、九州大学応用力学研究所、2006年12月

[18] テアリングモードと衝突性ドリフト波の相互作用の研究

林高行、第五回核燃料プラズマ統合コード研究会、九州大学応用力学研究所、2006年12月

[19] 森の射影演算子法を用いた衝突性ドリフト波カオスの研究

濱田大地、第五回核燃料プラズマ統合コード研究会、九州大学応用力学研究所、2006年12月

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

・研究の経過報告

1) 原子力機構で開発している先進的粒子コード PARASOL[2]を用いて、ELM 崩壊により SOL 領域に突発的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、運動論的效果による熱輸送特性について調べた [16,18]。また 2 次元 PARASOL コードにより、SOL に囲まれた磁場閉じ込め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、規格化半径が大きくなると径方向電場の向きが遷移することを見出した[10]。京大で開発しているジャイロ運動論モデルシミュレーションと粒子シミュレーション結果を比較しつつシース形成に及ぼす磁場の影響を調べた[5]。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、原子力機構の NEUT2D [1, 3, 9]、筑波大では DEGAS [8,15] 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、原子力機構の IMPMC[1,7]、慶応大学では IMPGYRO[6]を用いて研究を進めている。

2) 原子力機構で開発している統合ダイバータコード SONIC[1,7,17]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 コードを用いて JT-60U 中の MARFE の形成についてシミュレーションを行った[11]。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[3,9,12,17]。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[6,19]。SOLPS5.0 は、不純物を含めたプラズマ流体扱う B2 コードと中性粒子輸送をモンテカルロ法で扱う Eirene コードの統合コードである。

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[4,13,21,22]。

4) PARASOL シミュレーションの結果から、これまで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いる。今回の ELM シミュレーションの結果[18]も解析的表現して簡易流体モデル（ポイントモデル）に適用した[14]。

5) 原子力機構において、ELM の熱流を記述できる動的ポイントモデルを開発した。この簡易モデルは、PARASOL シミュレーションやダイバータ流体シミュレーションの結果を良く再現した[14]。慶應大は電中研と協力して簡易 SOL-ダイバータポイントモデルを開発している。0 次元コアプラズマとの結合コードにより、次期トカマク装置の運転領域最適化を行うことができた[6]。

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[23]。SOL プラズマの輸送は(5)に記した動的ポイントモデルを導入している。ELM の動的挙動をこの TOPIC-IB を用いてシミュレーションすることに成功した[24]。

・研究成果報告

- [1] T. Takizuka, K. Shimizu, H. Kawashima, N. Hayashi, M. Hosokawa, "SOL-Divertor Simulation Code System with Fluid Modeling, Monte-Carlo Modeling and PIC Modeling", Japan-Korea WS on Theory and Simulation of Magnetic Fusion Plasmas, Aug 2006, Daejeon, Korea.
- [2] T. Takizuka, M. Hosokawa, "Present Status and Future Plan of PARASOL Simulation", 第 5 回 BPSI 研究会, 2006 年 12 月、九大応力研.
- [3] H. Kawashima, K. Shimizu, T. Takizuka, "Present Status of SOL/Divertor Simulation Study on JT-60U/JT-60SA by SONIC Code", *ibid.*
- [4] Y. Tomita, R. Smirnov, T. Takizuka, D. Tskhakaya, "Detachment Condition of Dust Particle from Plasma-Facing Wall by Scopic Code", *ibid.*
- [5] G. Kawamura, A. Fukuyama, "Gyrokinetic Approach for Magnetic Sheath Formation", *ibid.*
- [6] 畑山明聖, "周辺・ダイバータプラズマのシミュレーションとモデリング", 第 21 回トリアム研究会&核融合フォーラムサブクラスター会合同研究会, 2006 年 8 月, 九大応力研.
- [7] 清水勝宏, "統合ダイバータコード SONIC の開発", *ibid.*
- [8] 中嶋洋輔, "ガンマ 10 における高速カメラを用いた周辺プラズマ計測と中性粒子輸送シミュレーション", *ibid.*
- [9] 川島寿人, "JT-60U における SOL/ダイバータシミュレーション研究の現状", *ibid.*
- [10] T. Takizuka, "PARASOL Simulation of Electrostatic Potential Structure in Core and SOL-Divertor Plasmas", US-Japan WS on Integrated Modeling of Fusion Plasmas, Jan 2007, Oak Ridge, USA.
- [11] K. Shimizu, T. Takizuka, H. Kawashima, "Modeling of Plasma and Impurity Transport in MARFE Plasma", 17th PSI, May 2006, Hefei, China; to be published in J. Nucl. Mater..

- [12] H. Kawashima, K. Shimizu, T. Takizuka, et al., "Simulation of Divertor Pumping in JT-60U with SOLDOR/NEUT2D Code", 17th PSI, May 2006, Hefei, China; to be published in J. Nucl. Mater.
- [13] Y. Tomita et al., "Effect of Truncation of Electron Velocity Distribution on Release of Dust Particle from Plasma-Facing Wall", 17th PSI, May 2006, Hefei, China; to be published in J. Nucl. Mater.
- [14] N. Hayashi, T. Takizuka, M. Hosokawa, "Modeling of Dynamic Response of SOL-Divertor Plasmas to an ELM Crash", 17th PSI, May 2006, Hefei, China; to be published in J. Nucl. Mater.
- [15] Y. Nakashima et al., "Investigation of Neutral Particles Using High Speed Camera and Monte-Carlo Simulation in the GAMMA 10 Central-cell", Open System 2006, July 2006, Tsukuba; to be published in Trans. Fusion Sci. Tech.
- [16] T. Takizuka, M. Hosokawa, "Dynamics of One-dimensional SOL-divertor Plasmas after an ELM Crash in Tokamak H-mode Plasma", Open System 2006, July 2006, Tsukuba; to be published in Trans. Fusion Sci. Tech.
- [17] H. Kawashima, K. Shimizu, T. Takizuka, "Development of Integrated SOL/Divertor Code and Simulation Study of JT-60U/JT-60SA Tokamaks", IEA Large Tokamak WS on Edge Transport in Fusion Plasmas, Sep 2006, Kracow, Poland; to be published Plasma Phys. Control. Fusion.
- [18] T. Takizuka, M. Hosokawa, Contrib. Plasma Phys. 46 (2006) 698.
- [19] K. Hoshino, A. Hatayama, et al., Contrib. Plasma Phys. 46 (2006) 591.
- [20] K. Miyamoto, A. Fukano, A. Hatayama, Contrib. Plasma Phys. 46 (2006) 643.
- [21] Y. Tomita, R. Smirnov, T. Takizuka, D. Tskhakaya, Contrib. Plasma Phys. 46 (2006) 617.
- [22] R. Smirnov, Y. Tomita, D. Tskhakaya, T. Takizuka, Contrib. Plasma Phys. 46 (2006) 623.
- [23] T. Ozeki, N. Aiba, N. Hayashi, T. Takizuka, et al., "Integrated Simulation Code for Burning Plasma Analysis", Fusion Sci. Tech. 50 (2006) 68.
- [24] N. Hayashi, T. Takizuka, et al., "Integrated Simulation of ELM Energy Loss Determined by Pedestal MHD and SOL Transport ", 21st IAEA Fusion Energy Conf., Oct 2006, Chengdu, China; Submitted to Nucl. Fusion.

・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	助教授	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	助教授	ペデスタルモデリング
川島 寿人	原子力機構	研究副主幹	ダイバータシミュレーション
高山 有道	核融合研	助手	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	D2	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って輸送モデルの信頼性を高めるとともに、周辺プラズマ解析コードとの結合を検討する。

研究方法

- 核燃焼プラズマ統合コードに必要なモジュール間連携機能の策定と実装
- 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
- 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
- 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および電子サイクロトロン波電流駆動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

研究結果

1. **モジュール間連携機能**：モジュール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ならびに実行制御用標準インターフェースを定義し、TASK/PL に実装してトカマク統合シミュレーションを行った。この実装に伴って、TASK コードの標準コンパイラをFORTRAN77 から FORTRAN95 に変更した。
2. **輸送解析**：流体型輸送方程式の定式化を行うとともに輸送モジュール TASK/TX を開発し、その妥当性を検証するとともに、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、NBI 入射に伴うトカマクプラズマの密度分布変化を再現できることを示した。
3. **NBI 加熱解析**：JAEA において開発された統合コード TOPICS から切り出された NBI 解析モジュール TOPICS/NBI との連携を可能にし、NBI 加熱を伴う輸送シミュレーションを行った。
4. **波動加熱解析**：速度分布関数の変形を含めた波動伝播解析について、予備的な数値解析を行い、イオンサイクロトロン波少数イオン加熱において加熱領域の幅が広がることが示された。その後、波動伝播モジュール TASK/WM の精度向上のため、計算アルゴリズムの変更（係数評価の差分化、径方向の有限要素法化）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た。TASK/WM への実装を進めている。

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

に要素モジュール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, M. Honda: Integrated Modeling of Tokamak Plasmas by TASK Code, Korea-Japan Workshop on Theory and Simulation of Magnetic Fusion Plasmas (KAIST, Daejeon, Korea, 2006-08-16)
2. A. Fukuyama: Advanced Full Wave Analyses in Tokamak Plasmas, US-Japan Workshop on RF Heating Physics (奈良県新公会堂, 奈良, 2006-09-30)
3. A. Sonoda, A. Fukuyama: Full Wave Analysis of Cyclotron Waves Using an Integral Form of Dielectric Tensor, US-Japan Workshop on RF Heating Physics (奈良県新公会堂, 奈良, 2006-09-30)
4. A. Fukuyama, S. Murakami, A. Sonoda, M. Honda: Integrated Full Wave Analysis of RF Heating and Current Drive in Toroidal Plasmas, IAEA Fusion Energy Conference (Chengdu, China, 2006-10-20) TH/P6-10
5. 福山淳, 本多充, 一桐正志, 安積正史, 矢木雅敏: モジュール間連携機構を用いたトカマク統合シミュレーション, 第23回プラズマ・核融合学会年会(筑波大学大学会館, 2006-11-28) 28pC03
6. 本多充, 福山淳: 回転を伴うトロイダルプラズマの流体型輸送シミュレーション, 第23回プラズマ・核融合学会年会(筑波大学大学会館, 2006-11-28) 29AC26P
7. 園田旭胤, 福山淳: 有限ラーモア半径効果を取り入れた積分形誘電率による2次元波動伝播解析, 第23回プラズマ・核融合学会年会(筑波大学大学会館, 2006-11-28) 29AC27P
8. 福山淳: 統合モデリングコードによる燃焼プラズマシミュレーション, 第23回プラズマ・核融合学会年会(筑波大学大学会館, 2006-11-30) VI-3
9. A. Fukuyama: Present Status and Future Plan of TASK Code, 第5回核燃焼プラズマ統合コード研究会(九州大学応用力学研究所, 2006-12-21)
10. 本多充, 福山淳: 回転を伴うトロイダルプラズマの流体型輸送シミュレーション, 第5回核燃焼プラズマ統合コード研究会(九州大学応用力学研究所, 2006-12-21)
11. A. Fukuyama: Recent Progress in Integrate Code TASK, US-Japan JIFT Workshop on Integrated Modeling on Fusion Plasmas (ORNL, 2007-01-29)
12. M. Honda, A. Fukuyama: Dynamic Transport Simulation code including Plasma Rotation and Radial Electric Field, US-Japan JIFT Workshop on Integrated Modeling on Fusion Plasmas (ORNL, 2007-01-31)
13. 福山淳: TASK コードによるトカマク統合シミュレーション, プラズマ・核融合研究における HPC ワークショップ(核融合科学研究所, 2007-01-24)
14. A. Fukuyama: Recent Progress in Integrated Modeling of Tokamak Plasmas, 3rd International Conference on the Frontiers of Plasma Physics and Technology (Bangkok, Thailand, 2007-03-07)

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
本多 充	京都大学	D3	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

平成18年度応用力学研究所共同研究 特定研究3
「プラズマ輸送理論」成果報告書

代表者 核融合科学研究所 伊藤 公孝

研究目的

核融合燃焼プラズマ実験の実現にむけて計画が進展している現在、トロイダルプラズマの輸送理論を一層進展させ、統合コードなどへ成果を糾合することによって定量的予言力を検証することは世界的な急務と認識されている。

本研究では、トロイダルプラズマの乱流に対し、繰り込み理論に基づく遷移理論を構成し、乱流輸送と構造形成の理論基盤を研究することを目的とする。あわせて、輸送コードに用いられる理論式を最新の理論展開に沿ったものへと高度化することを目的とする。

研究基盤の概観と今年度の成果の要点

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

$$\frac{\partial}{\partial t} f + L^{(0)} f = N(f) \quad (1)$$

と書こう。ここで $L^{(0)}$ は線形演算子、 f は揺動場(例えば $f = (\phi, J, p)^T$)、 $N(f)$ 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。

$$N(f) = -\Lambda f + \check{S} \quad (2)$$

- (2) コヒーレントな効果に着目し、方程式

$$(L^{(0)} + \Lambda) f = 0 \quad (3)$$

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。

带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屍の応用の研究例を紹介する[2]。この例は、上記方法論のレベル(2)を適用したものである。

乱流輸送係数については、ドリフト波が带状流と共存し、エネルギーが带状流との間で分配されることから、裸のドリフト波を考えた場合とは違いが顕著に現れる。带状流

の減衰率に強く影響される。

不安定成長率が低い場合、裸のドリフト波が励起され

$$\chi_i = \frac{\gamma_L}{k_r^2} \quad (4)$$

となる。しかし、帯状流が共存すると、 γ_L が増すとエネルギーの増分は帯状流に渡され、ドリフト波への分配が抑えられる。例えば帯状流の衝突減衰率が大きい場合を考え強い乱流の表式を援用すると

$$\chi_i \sim \sqrt{\frac{v_{\text{damp}}}{\alpha}} \frac{\omega_*}{k_r^2} \quad (5)$$

となる。(v_{damp} は衝突効果による帯状流の減衰率、 ω_* はドリフト周波数である。)

更に γ_L が増した場合や、 v_{damp} が小さい場合には、帯状流の自己非線形機構がエネルギー配分や飽和振幅に重要な働きをする。

$$\chi_{\text{III}} = \frac{Ck_{\theta}^2 \rho_s^2 \omega_*}{2\alpha} \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{4\alpha}{Ck_{\theta}^2 \rho_s^2 \omega_*^2} (\gamma_L - \gamma_{L,c})} \right) \frac{\omega_*}{k_r^2} \quad (6)$$

の表式が得られ、 $\gamma_L \geq \gamma_{L,c}$ となつてはじめて乱流拡散が起きる。Upshiftの境界は

$$\gamma_{L,c} = \frac{2\sqrt{2}}{C} \frac{q_r^2}{k_{\perp}^2} \omega_* \quad (7)$$

と与えられる。

こうした解析的結果を非線形シミュレーションの比較を図1に報告する。イオン温度勾配を種々に変えて成長率を変化させたシミュレーションの結果を点で示す。実線は解析的な理論式である。準定量的な一致が見られる。このように微視的な乱流揺動と準巨視的な帯状流の間のエネルギー配分に関し理解が大いに進んだ。本研究の当初の目的を満たす成果である。

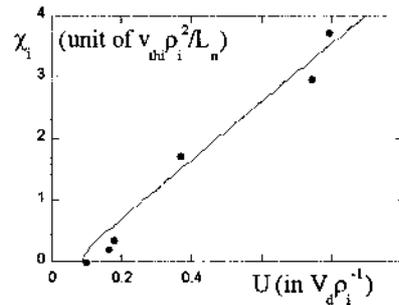


図1 ドリフト揺動と帯状流強さの関係

参考論文

- [1] 伊藤早苗：「乱流プラズマの構造形成と選択則の総合的研究」プラズマ核融合学会誌 83 巻 (2007) 印刷中
- [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

1. はじめに

低放射化フェライト鋼は、オーステナイト鋼に比べ、耐照射特性に優れた特性を持つことがこれまでの研究によって明らかにされており、過酷な中性子負荷が予想される核融合炉ブランケット構造第一壁としての使用が有望視されている。現在も多くの研究機関において、材料試験炉(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。このように取得された照射データを最大限有効に活用し、今後の材料設計や炉運転指針に反映させるためには、核融合炉実環境における材料挙動を予測するための方法論(モデル化)を構築する必要がある。

これまで我々は、マルテンサイト鋼の母材元素である Pure-Fe や Fe-Cr モデル合金に対し、低エネルギーヘリウムを注入し、注入後のヘリウム放出挙動分析を行うことにより、材料中のヘリウム挙動の解析を行ってきた。ヘリウム放出に関する注入量依存性や昇温速度依存性を取得し、分子動力学解析[1]や他の純金属に関するヘリウム放出挙動[2]との比較から、ヘリウム捕獲欠陥の同定や解離エネルギーの導出などを行ってきた。また、特に転位に着目したヘリウム放出挙動分析およびヘリウム注入後の微細組織観察を行い、転位によるヘリウムの捕獲およびヘリウム分散化機能を明らかにしてきた[3]。さらに、相補的に、分子動力学計算手法による理論解析を行い[4]、上述の実験結果を詳細に理解する試みを行ってきた。分子動力学解析から得られる結合エネルギーは、実験から得られる解離温度と直接比較することが可能で、ヘリウムバブルの成長がバブル内のヘリウム圧力に強く依存することが明らかになった。昨年度は、連続体モデルに基づく理論解析を中心に、従来の分子動力学解析結果をマクロスケールへ外挿することの妥当性を確認することができた[5]。

本年度は、これまで主として行ってきたエネルギー論の評価結果を使い、ヘリウムバブル核生成・成長のキネティクスを調べた。マトリクス中の原子空孔濃度に対するヘリウム濃度の比が比較的大きな核融合炉ダイバータ材料の条件と、比較的小さな核融合炉第一壁環境の条件を調べ、これまでの多くの実験結果に矛盾しないモデルの構築を行った。

2. 方法

ヘリウムバブルを半径 R の球と仮定すると、バブルに流入する欠陥 i の正味のフラックスは、Wolferら[6]によれば、 $I_i = I_i^{IN} - I_i^{OUT} = 4\pi RZD_i [C_i(\infty) - C_i(R)]/\Omega$ で与えられる。ここで、 Z は欠陥捕獲効率、 Ω は原子体積、 D_i は拡散係数、 $C_i(r)$ はバブル中心からの距離 r における欠陥濃度である。欠陥 i としては、格子間He、原子空孔、自己格子間原子(SIA)を採用した。この式から、 I_i の正負は、 I_i^{IN} と I_i^{OUT} の大小(もしくは、 $C_i(\infty)$ と $C_i(R)$ の大小)で決まることになる。

ここで簡単のため、系内に原子空孔のみが存在する場合を考える。通常、微小サイズのボイドに対しては、原子空孔の I_V^{IN} は I_V^{OUT} より小さく、したがって、 I_V は負になる。そのため、(I_V^{IN} と I_V^{OUT} を別々ではなく) I_V を扱う従来の反応速度論解析では、微小サイズのボイドが成長しないことになってしまうので、適当な核を仮定する必要がある。そこで本研究では、 I_V^{IN} と I_V^{OUT} を別々に評価し、ボイドに対する原子空孔の流入と流出の確率がそれぞれ I_V^{IN} と I_V^{OUT} に比例すると考えた。実際に空孔が流入するのか流出するのかは、モンテカルロ法を使って(サイコロを振って)決定した。このような手法を用いることにより、確率論的にボイドの核生成を扱うことが可能になる。実際、 $I_V = I_V^{IN} - I_V^{OUT} < 0$ の条件ではなかなかボイドは核生成しないが、ある程度の潜伏期間が過ぎると、原子空孔の流入フラックスの確率的ゆらぎの効果により、ボイドが核生成するようになる。同様に、原子空孔だけでなく、自己格子間原子SIAや格子間Heが系内に存在する場合も考え、ヘリウムバブルの核生成を調べた[7]。

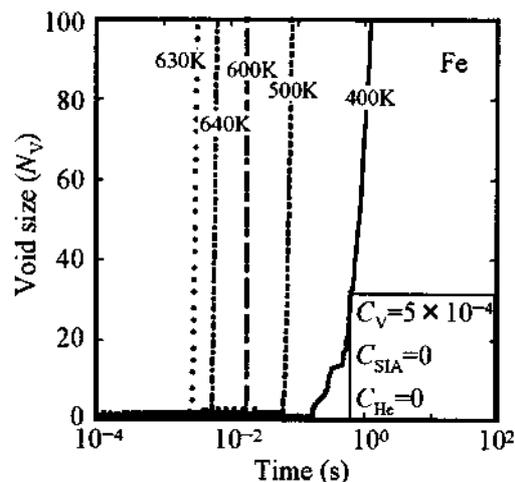


図1 ボイド核生成の温度依存性

3. 結果

図1は、原子空孔のみが存在する系のボイド核生成のシミュレーション結果である。潜伏期間は、温度とともに減少するが、これは、高温になるにつれ原子空孔の移動度が上昇するからである。しかしながら、630K以上になると、逆に、潜伏期間が増大し、650Kにおいては、シミュレーション期間中にボイドが核生成することはなかった。これは、650K付近に回復のステージV温度が存在することに対応する。図1の潜伏期間後のグラフの傾きは、ボイドの成長速度を表し、温度に依存する。このときのアレニウスプロットの傾きは、原子空孔の移動エネルギーに一致した。すなわち、ボイドの核生成・成長は、原子空孔拡散に律速した

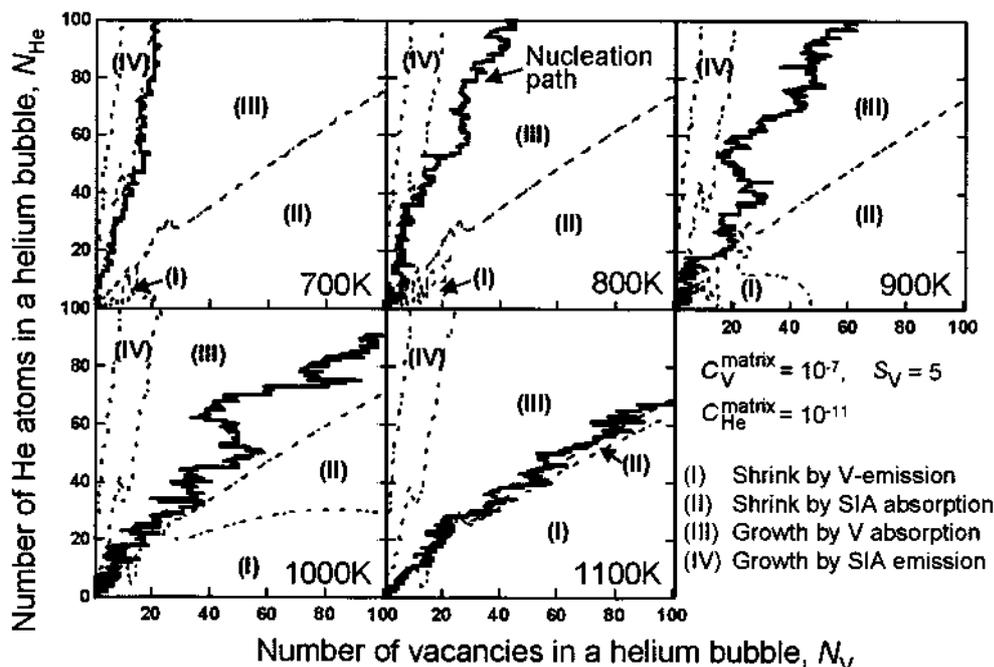


図2 Heバブルの核生成経路の温度依存性

反応であることになる。

次に、系内に、SIA、原子空孔、格子間Heが存在する場合を考える。図2の実線(太線)は、マトリクス中の欠陥濃度 C_V^{matrix} を一定にした場合のバブルの核生成経路の温度依存性を表している。縦軸がバブル中のHe原子数、横軸がバブル中の原子空孔数を表すので、原点から引いた核生成経路の傾きは、そのバブル中のおおよそのHe密度を表

していることになる。つまり、高温ほどHe密度は低くなっている。逆に低温ではバブル中のHe密度は大きく、多くの低温照射実験結果を反映した結果になっていることがわかる。

マトリクス中の欠陥濃度や温度を変化させ、図1に示したようなバブル成長の時間発達を調べ、そこからバブルの成長速度を算出してアレニウスプロットを描いた。その結果、温度が高い場合や、マトリクス中のHe原子濃度が原子空孔濃度に比較して低い場合は、アレニウスプロットの傾きは、上述のポイドの場合と同様、原子空孔の移動エネルギーに一致した。一方、マトリクス中のHe原子濃度が比較的高い場合は、アレニウスプロットの傾きは格子間Heの移動エネルギーに一致した。前者は原子空孔拡散律速であるのに対し、後者はHe拡散律速であることを示す。特に後者の場合は、原子空孔が移動できないような低温であってもバブルが核生成することができる(このときのバブル核生成のメカニズムは、SIA放出機構(ループパンチング機構)である。)これらは、前者が核融合炉第一壁条件の照射で頻繁に観察され、後者が核融合炉ダイバータ材料条件で頻繁に観察される現象を定性的によく表しているといえる。

本年度は、上述の成果のほか、バブル移動[8]、バブルの欠陥捕獲効率(バイアス因子)の評価[9]、および、反応速度論解析[10]を行った。また、昨年度に引き続き、「核融合炉材料中の照射損傷過程のマルチスケールモデリング」検討作業会を実施した。

参考文献

- [1] K. Morishita, R. Sugano *et al.*, Proc. of PRICM4, JIM, p.1383, 2001
- [2] A. van Veen, NATO ASI Series B: Physics Vol.279.41,1991
- [3] R. Sugano, K. Morishita, H. Iwakiri, N. Yoshida, J. Nucl. Mater., 307-311 (2002) 941.
- [4] K. Morishita, R. Sugano, B.D. Wirth, T. Diaz de la Rubia, J. Nucl. Mater., 323 (2003) 243.
- [5] Kazunori Morishita and Ryuichiro Sugano, Journal of Nuclear Materials, 353 (2006) 52.
- [6] W.G. Wolfer and M. Ashkin: J. Appl. Phys., 46 (1975), 547.
- [7] Kazunori Morishita, Philosophical Magazine 87 (2007) 1139.
- [8] Kazunori Morishita and Ryuichiro Sugano, Nuclear Instruments and Methods B 255 (2007) 52.
- [9] Kazunori Morishita, Nuclear Instruments and Methods B 255 (2007) 41.
- [10] Y. Watanabe, H. Iwakiri, N. Yoshida, K. Morishita, A. Kohyama, Nuclear Instruments and Methods B 255 (2007).

研究協力者

渡辺淑之, 香山 晃(京大エネ理工研), 岩切宏友, 吉田直亮(九大応力研), 加藤太治, 室賀健夫(核融合研), 徐虬, 義家敏正(京大原子炉実験所), 金田保則, 陳迎(東大工), 坂口紀史(北大エネマテ), 中村信行(電通大レーザーセンター)

【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としてグラファイトや炭化系セラミックスが考えられていると共に、そのコンディショニングとして炉内の不純物除去およびプラズマ中への不純物混入抑制を目的としたボロニゼーション等が検討・実施されている。昨年度までの共同研究では、これらの材料表面近傍におけるトリチウムの捕捉状態や脱離挙動について解明を行ってきた。しかし、D-T 核融合反応ではヘリウムが生成し、トリチウムと同様にプラズマ対向壁およびボロン化されたプラズマ対向壁に照射されることが考えられる。そこで、本年度の特定研究では照射されたヘリウムイオンがボロン膜中における高エネルギートリチウムの挙動に及ぼす化学的影響の解明について検討した。

【実験】

本研究で使用した試料は高純度ボロン膜および酸素含有ボロン膜である。なお、各ボロン膜は静岡大学においてプラズマ化学気相蒸着 (P-CVD) 装置を用いて調製した。X 線光電子分光(XPS)測定による組成分析の結果、高純度ボロン膜のボロン濃度は95%であり、酸素、炭素等の不純物の濃度は5%であった。酸素含有ボロン膜については、酸素濃度は35%であった。今年度は水素同位体の化学的挙動に及ぼすヘリウムイオン(He^+)照射効果の解明を目的として、九州大学応用力学研究所において9.0 keV 重水素イオン(D_3^+)照射のみ、および4.8 keV He^+ 照射した後 D_3^+ 照射を行った酸素含有ボロン膜に対して、それぞれ①昇温脱離(TDS)実験による重水素の脱離挙動および滞留量の評価、②XPS 測定による試料表面の化学状態分析を行った。また、 He^+ 照射した酸素含有ボロン膜に対して③走査型電子顕微鏡(SEM)による試料表面観察を行った。これらにより得られた実験結果は、昨年度得られた結果および静岡大学にて行った実験結果と比較し、検討した。なお、 D_3^+ 照射および He^+ 照射のエネルギーは打ち込み深さが同じ領域となるよう SRIM コードにより求めた値である。

【結果および考察】

図1に(a) 高純度ボロン膜および(b) 酸素含有ボロン膜に対して、 D_3^+ 照射のみと He^+ 照射した後、 D_3^+ 照射を行った際の D_2 TDS スペクトルを示す。図1(a)において、550 K 付近および700 K 付近の脱離は、それぞれ B-D-B および B-D 結合に捕捉された重水素の脱離、図1(b)における 550 K 付近、700 K 付近および900 K 付近の脱離は、それぞれ B-D-B、B-D および B-O-D 結合に捕捉された重水素の脱離であることをこれまでの研究で明らかにしてきた[1]。また、 He^+ 前照射をすることによって D_3^+ 照射のみの結果より重水素滞留量が増加することがわかる。特に、ボロンによる捕捉、すなわち B-D-B および B-D 結合として捕捉される重水素の量は増加するのに対して、B-O-D 結合として捕捉された重水素の量は若干の減少が見られた。これは He^+ 照射に伴い酸素がスパッタリングを受けたため、酸素による重水素捕捉サイトが減少し、重水素がボロンとより結合しやすくなったためと考えられる。

図2に静岡大学にて行った He^+ 前照射実験における B-1s XPS スペクトルのピークシフトを示す。図より B-B および B-O 結合の両ピークは、加熱処理後と比べて He^+ 前照射することによって大きく低エネルギー側へシフト

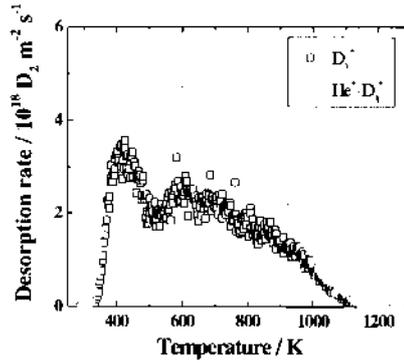
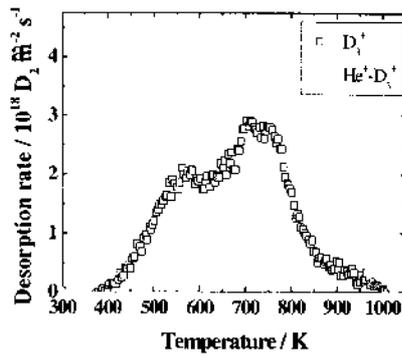


図1 D_3^+ および He^+ 照射した(a)高純度ボロン膜および(b)酸素含有ボロン膜

D_2 -TDS スペクトル

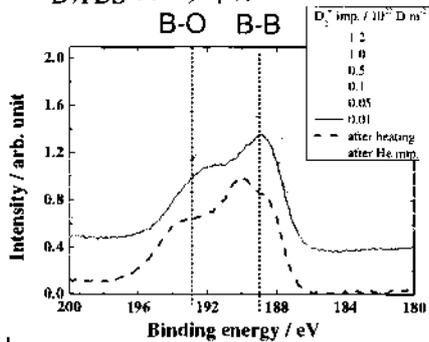


図2 He^+ 前照射実験におけるB 1s XPS スペクトル

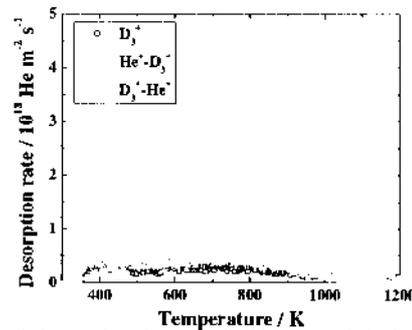


図3 D_3^+ および He^+ 照射した酸素含有ボロン膜からのHe TDS スペクトル

スパッタリングによる照射欠陥が形成され、その欠陥によりボロンによる重水素の捕捉サイトが増加したと考えられる。図3に酸素含有ボロン膜に対して、 D_3^+ 照射のみと He^+ 前照射した際のHe TDS スペクトルを示す。図より、 He^+ 後照射において850 K付近に鋭いピークが観測された。このピークは He^+ 後照射によって表面にブリスタが形成され、そのブリスタからの脱離であると考えられる。しかし、 He^+ 前照射ではブリスタの形成が確認できなかった。これは、 He^+ 照射により形成されたブリスタが D_3^+ 照射により壊されたためと考えられる。

【結論および今後の展望】

ボロン膜中での水素同位体挙動に及ぼす He^+ 照射効果を解明するために、高純度ボロン膜および酸素含有ボロン膜を調製し、 He^+ 前照射による重水素滞留量変化の測定を行った。実験結果より、高純度ボロン膜および酸素含有ボロン膜において、 He^+ 前照射により重水素滞留量が増加し、その増加はB-D-B結合やB-D結合としての重水素捕捉量の増加に起因していることが明らかになった。今後は、ボロン膜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、静岡大学にて調製した酸素や炭素含有ボロン膜に対して D_3^+ 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、酸素含有ボロン膜に照射された水素同位体の動的挙動を総合的に評価する予定である。

参考文献 [1] A. Yoshikawa et al., *J. Nucl. Mater.*, accepted

トしている。このことから、 He^+ 前照射することによってボロン膜中に照射欠陥が形成されることがわかった。また、加熱処理後に見られた高エネルギー側のショルダーが He^+ 照射により大きく減少することが分かる。これは、 He^+ 照射によって酸素がスパッタされ、欠陥構造が導入されたことを示すものであり、TDSの結果とも一致している。さらに、SEMによる試料表面観察からも He^+ 照射することによりボロン膜表面の構造が変化することが示唆された。以上のことから、 He^+ 前照射することによって酸素の

金属の損傷組織に及ぼすヘリウムと水素の影響
—陽電子消滅法によるNi中のヘリウムの測定—

京都大学原子炉実験所 徐 虬 義家敏正
九州大学応用力学研究所 渡辺英雄 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。金属中のヘリウムを検出するには、昇温脱離ガス分析法(TDS)を用いた方法が最も一般的である。しかし、金属中のヘリウムが非常に安定なので、融点に近くまで加熱しないと脱離しない。また、ヘリウムの検出ができて、どこから放出されたのかがTDSだけで分からない。一方、金属中の欠陥の情報を得るために、陽電子の特性を利用した実験が数多く行われてきた。陽電子寿命測定法から原子空孔の大きさや密度などの情報が得られる。ドップラーブロードニングから消滅相手電子の運動量が分かる。もし消滅相手の電子が内殻電子ならば、核の種類即ち元素の特定もできる。従って、本研究では、陽電子寿命測定と同時に同時計測ドップラーブロードニング測定を行うことにより、金属中のヘリウムの定量的な測定及びヘリウムと欠陥との相互作用を調べることを目的とする。

2. 実験方法

試料は5mm×5mmである。加速エネルギー3.3MeVのヘリウムイオンを用いて照射を行った。照射温度は423Kで、照射量は $9.6 \times 10^{14} \text{He}/\text{m}^2$ である。TRIMコードによりヘリウムピークの位置は表面から6 μm で、損傷量とヘリウム量はそれぞれ0.3dpaと300appmである。照射後に50Kおき、一時間の焼鈍を行い、陽電子寿命測定と同時に同時計測ドップラーブロードニング測定を行った。

3. 計算結果と考察

図1にヘリウムイオン照射したNiを、50Kおきに1273Kまで焼鈍した後の陽電子寿命と長寿命成分のIntensityを示している。照射直後にNi長寿命は278.8psで、Intensityは13.6%であった。723Kまで長寿命成分のIntensityはほとんど変わらず、その後に、焼鈍温度の増加と共に減少した。一方、長寿命成分は623Kから823Kまで少し減少したが、873Kから増加した。1123Kに350psに成長した。

図2にヘリウムイオン照射直後Niと1273Kまで焼鈍したNiの未照射Niに対する比率曲線を示している。また、比較のため、核反応によるヘリウムの形成が無視できる低い照射量で中性子照射したNiの比率曲線も示している。イオンと中性子照射後に、低運動量側に比率曲線の値が1より高かった。これは陽電子が照射により形成された原子空孔集合体中の核外電子と消滅したことである。ヘリウム照射したNi、特に、1273Kで焼鈍した後に、 $13.5 \times 10^3 m_0 c$ の付近にピークが現れた。 m_0 と c はそれぞれ電子質量数、真空中の光の速度である。一方、中性子照射したNiの $13.5 \times 10^3 m_0 c$ 付近にピークはなかった。このピークは陽電子とヘリウムの核内電子消滅したものと考えられる。1273Kで焼鈍してもヘリウムがまだ原子空孔集合体に安定にトラップされている。本研究では、SとWというパラメーターを導入した。それぞれは低運動量($|P_L| < 4 \times 10^3 m_0 c$)と高運動量($11.5 \times 10^3 m_0 c < |P_L| < 15.5 \times 10^3 m_0 c$)側のカウント数対全体のカウント数の比である。図3にヘリウム照射後と1273Kまで焼鈍中のS-W相関を示している。423Kから523KまでSとWは増加した。これは423K以上で照射によって形成された原子空孔が動けるため、マイクロボイドが形成・成長したと考えられる。しかし、陽電子寿命測定の結果から423Kから523Kまでの温度範囲ではマイクロボイドの形成・成長が分からなかった。焼鈍温度の増加と共に、Sは減少したが、Wは増加した。陽電子寿命測定結果から、Sの減少は873K以下では原子空孔集合体が格子間原子との再結合、873K以上ではマイクロボイドの密度の減少によるものと思われる。また、1273Kまでの焼鈍では、(S, W)点はほぼ同じ直線に乗っていることから、SとWの変化はマイクロボイドのサイズ変化によるものと考えられる。焼鈍温度の増加と共に、Sは未照射Niに近づき、一方、Wは未照射Niから離れることがマイクロボイドにヘリウムが存在することを示している。ヘリウムを含んでいるマイクロボイドは1273Kにおいても安定である。

4. まとめ

本研究では、最近開発された陽電子消滅分光法の新しい実験手法である同時計測ドップラーブロードニング測定を用いて、Ni中のヘリウムの検出及びヘリウムと欠陥との相互作用を調べた。ヘリウムの濃度が低くても、同時計測ドップラーブロードニング法でヘリウムの検出ができる。また、ヘリウムを含んだマイクロボイドは1273Kにおいても安定である。

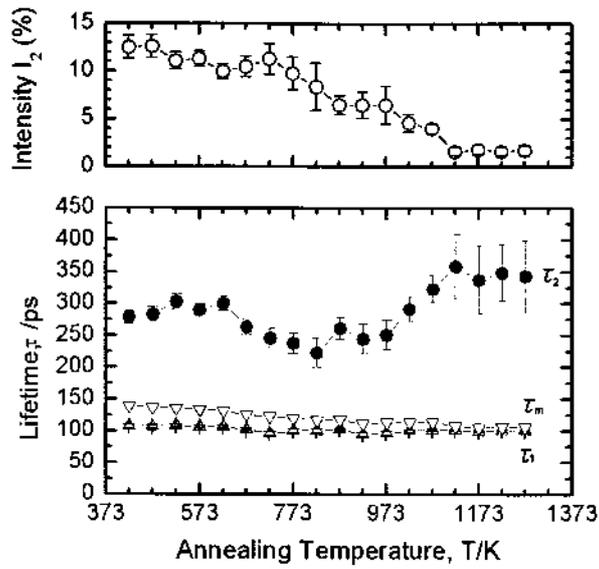


図1 焼鈍中にヘリウムイオン照射したNiの陽電子寿命と長寿命成分のIntensityの変化

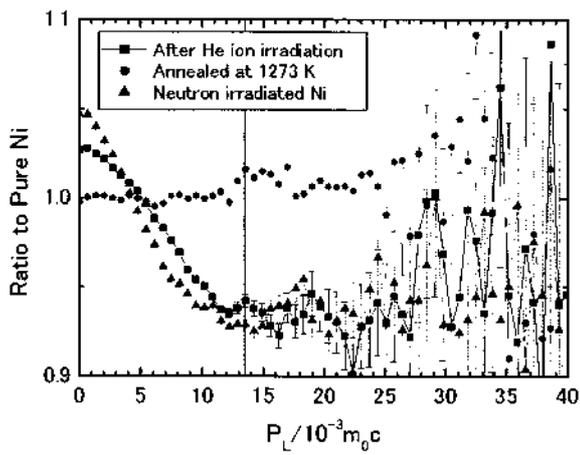


図2 ヘリウムイオン照射直後と1273Kで焼鈍したNiの比率曲線。比較のため、ヘリウムの形成が無視できる中性子照射したNiの比率曲線もしめしている

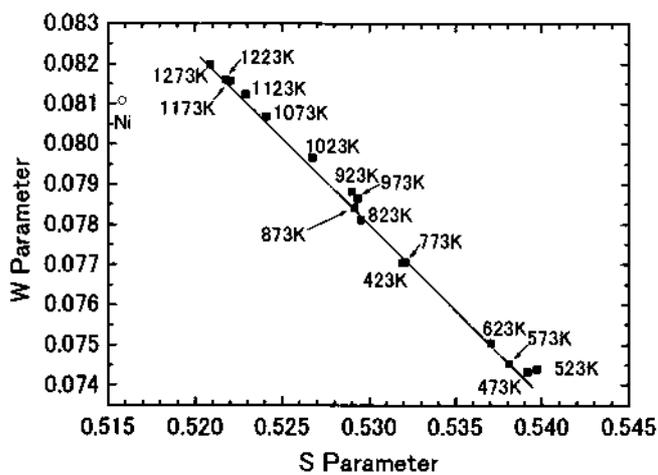


図3 焼鈍中のSとWの相関

1. 目的

金属およびセラミックス中の水素挙動は、材料中に溶解した水素が感受する材料からのポテンシャル場により著しい影響を受けることが知られている。将来の核融合発電および水素エネルギー利用の実現のためには、材料中の欠陥や溶解する不純物(酸素や炭素など)による水素-材料系への影響、および使用環境(水素濃度、温度など)下における材料中の水素挙動を明らかにしていく必要がある。特に水素・酸素溶解による材料の格子膨張は、材料の劣化現象にもつながる重要な問題である。本研究では、微小硬度試験法により Zr(O)の機械的性質に与える水素溶解の影響を調べることを目的とした。

2. 酸素・水素溶解 Zr の機械的性質の評価

Zr 再結晶化圧延平板(4 mm×25 mm×1 mm)を試料として用いた。また、酸素溶解 Zr(O)試料は、Zr 試料を酸素ガス中(973K)で酸化後、高真空中 1073K で 3 週間均一化処理を行うことにより作製し、溶解酸素濃度(~17 at%)は酸化後試料の重量測定により求めた。これらの試料に加えて、Zr(O) 試料にガス吸収法により水素を導入し、773K で 3 日間均一化処理を行った試料を作製した。以後、酸素・水素溶解 Zr(O,H)試料(水素濃度~7 at%)と呼ぶ。

微小押し込み試験は、九州大学応用力学研究所所有の ENT-1100(エリオニクス社製)を用いて、室温、試験荷重 10 mN にて実施した。

図 1 は、Zr(O)試料のヤング率の格子定数・酸素濃度依存性を示している。酸素を溶解したZrの格子定数はX線回折により詳細に調べられており⁽¹⁾、格子定数は本実験で用いた試料の溶解酸素濃度から推定したものである。Northwoodらは片持ち梁法によりZr(O)試料のヤング率を求めており、酸素濃度に依存せずほぼ一定であるとしている⁽²⁾。本実験ではNorthwoodのデータを拡充して広い酸素濃度範囲に亘ってZr(O)のヤング率を測定した。その結果、酸素溶解に伴う格子膨張に伴って緩やかにヤング率が上昇することが分かった。

次にZr(O)試料の押し込み硬さ H_D の酸素濃度依存性を図2に示す。一般的に硬度試験では、試験方法によって硬度の求め方が異なるため、異なった測定により求められた硬度の絶対値の比較は困難である。そこで図中ではZr(O)試料の押し込み硬さ $H_D(Zr(O))$ をZrのそれ $H_D(Zr)$ で除した値 $H_D(Zr(O))/H_D(Zr)$ で整理し、Zr-ZrO₂混合体を焼結し作製したZr(O)試料について微小硬度試験を行ったNakatsukaらのデータ⁽³⁾と比較している。本実験結果の $H_D(Zr(O))/H_D(Zr)$ は、Nakatsukaらのデータに比べて硬度上昇率は低いが、その上昇傾向はほぼ同様である。

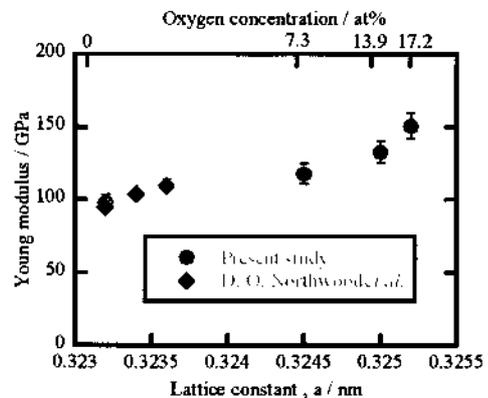


図1 Zr(O)試料のヤング率の格子定数・酸素濃度依存性

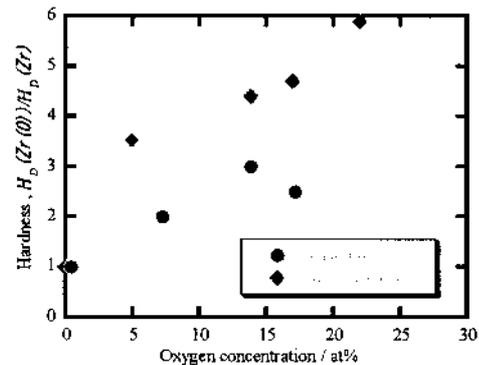


図2 Zr(O)試料の押し込み硬さの酸素濃度依存性

すなわち、5~7 at%の溶解酸素濃度で硬さ増加が著しく、それ以上の酸素濃度領域では押し込み硬さの増加は緩やかであった。図1で示したように、ヤング率は溶解酸素濃度に伴って徐々に増加していることから、弾性および塑性変形の総合的な変形抵抗を表す押し込み硬さが酸素溶解により急激に増加するのは、塑性変形の寄与が増加する事によると考えられる。これは、Zr(O)が $\sim 673\text{K}$ より低温では、必ずしも単一相でなく、8面体位置に侵入した酸素原子の規則相(α'' 相)が析出する⁽⁴⁾ことに起因している可能性がある。つまり、 α'' 相の析出により α 相の塑性変形が妨げられることを示唆するものと考えられる。

図3は、Zr(O,H)試料の押し込み硬さの水素濃度依存性を示している。酸素を溶解しなかったZr試料および17 at%Zr(O)試料については、水素溶解の影響は殆ど見られなかった。しかしながら、7 at%Zr(O)試料については、水素溶解に伴って17 at%Zr(O)試料とほぼ同程度にまで硬さが上昇した。また、ヤング率はほぼ硬さと同様の傾向を示した。これら10 at%程度の酸素濃度であるZr(O)への水素溶解による硬さ・ヤング率への影響には、次の2つが考えられる。すなわち、水素溶解による格子膨張および溶解酸素の規則化(α'' 相析出)促進の寄与である。しかしながら、これらの影響を明確化するには、高温X線回折実験によるZr(O,H)試料の格子定数変化測定および温度を変えて α 単一相領域における微小硬度試験を行う必要がある。

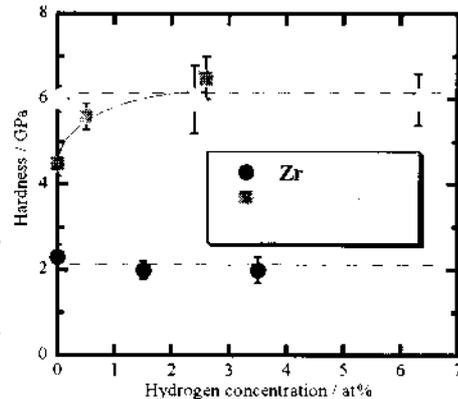


図3 Zr(O,H)試料の押し込み硬さの溶解水素濃度依存性

参考文献

- (1)T. Tanabe *et al.*, Surf. Sci., 187 (1987) 499.
- (2) D. O. Northwood *et al.*, J. Nucl. Mater., 89 (1980) 147.
- (3)M. Nakatsuka *et al.*, J. Sci. Technol., 35 (2005) 344.
- (4)T. Arai *et al.*, J. Less-Common Metals, 44 (1976) 291.

3. 研究成果報告

Tritium diffusion in zirconium –effect of recrystallization, impurity oxygen and hydrogen solution, T. Hirano, Y. Saruwatari, K. Hashizume, T. Otsuka, T. Tanabe, E-MRS, 2006年6月, Nice, France

ナノインデンテーション(NI)法を用いた酸素固溶ジルコニウムの機械的性質の評価, 山崎弘志, 大塚哲平, 橋爪健一, 田辺哲朗, 日本原子力学会九州支部, 2006年11月

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

・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（ブリストリング等も含む）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ブリスト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。

・実験方法・結果

平成 18 年度は、水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、水素の深さ方向の密度分布を SIMS で測定して、ヘリウムイオンの照射が水素の拡散に及ぼす影響を調べることを試みた。しかしながら、SIMS に一部不具合があったため、本測定は来年度以降の課題とする。ここでは、タングステンに水素とヘリウム、および炭素を同時照射した試料に対して生じるブリストリングの特性や水素吸蔵に及ぼす影響を示し、水素の拡散に及ぼすヘリウムの影響について考察する。

図 1 に 1keV の水素ビーム（エネルギー成分、1/3E: ~75%、1/2E: ~5%、E: ~10%）に、炭素を約 0.8% 混入させたイオンビームで、タングステン試料を照射した場合の表面状態の変化を示した。照射イオンフルエンスは $7.5 \times 10^{24} \text{ m}^{-2}$ で、タングステン焼結圧延材（アライドマテリアル製）である。イオンビーム中にヘリウムが混入されていない場合は、どの試料温度においてもブリストリングが顕著に発生している。水素によるブリストリングは、水素が飛程を越えて内部に拡散し、

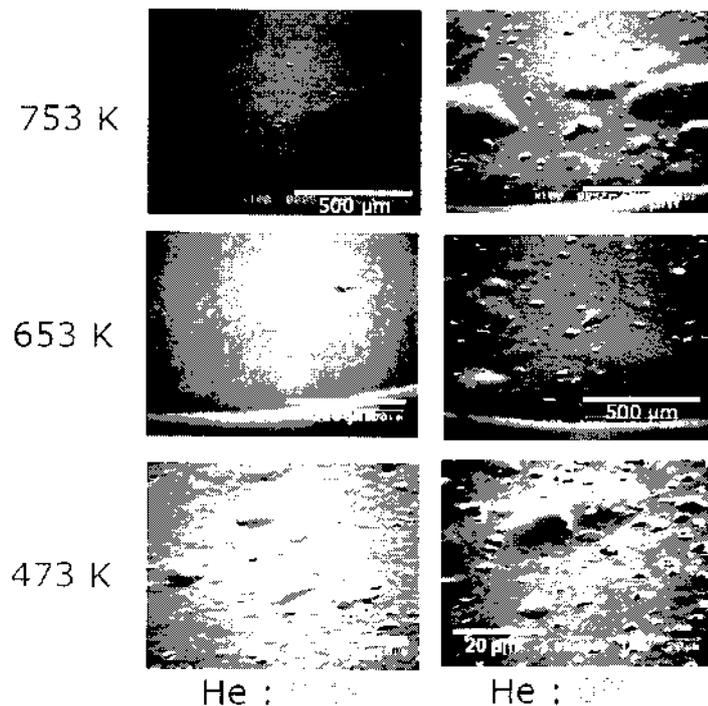


図 1 水素・炭素混合イオンビーム照射による $\#$ のブリストリング

粒界への蓄積によりその結合力を弱め、同時に粒内の転位、点欠陥、点欠陥の集合体などに吸蔵されることで内部応力を生じて、表面がドーム状に盛り上がったたり、結晶粒が逆断層の様に上部にすべり上がったことを示している。

しかしながら、ヘリウムをわずか0.1%加えただけで、表面の状況は一変しプリスタリングが大幅に減少する。先に述べたように、水素が飛程を越えて拡散することがプリスタリングの基本的なメカニズムであるため、ヘリウムを同時入射することにより、水素の内部への拡散が抑制されていることが示唆される。この抑制メカニズムについては、今後研究を進めて解明していく必要があるが、ヘリウムバブルの形成によって、水素の拡散が阻害されることや水素の捕捉サイトが増加して表面付近に吸蔵される水素のリテンションが増加したこと等が考えられる。そこで、ヘリウム同時照射の水素リテンションに対する影響を調べた

結果を図2に示す。図2は、水素イオンビーム（炭素は0.1%以下）をタングステンへ照射した場合の水素の昇温脱離スペクトルを示している。ヘリウムがない場合と比べ、ヘリウム0.1%がイオンビーム中に存在した場合には、水素吸蔵量が約1/2に減少した。このデータより、ヘリウム入射の効果は、単に水素捕捉サイトの増加による影響とは考えられないことを示唆している。今後さらなる研究が必要であるが、本結果はヘリウムイオン照射によるバブルが、水素の内部拡散を抑制しているという可能性を示唆したものであると考えられる。

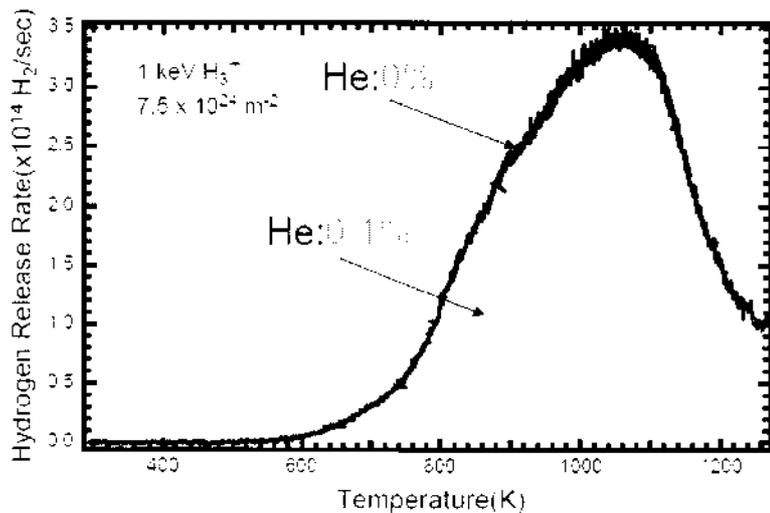


図2 水素イオンビーム照射後のW中の水素吸蔵量

来年度も本特定研究を継続して申請することを予定しているが、その際には水素・ヘリウム同時照射下での表面近傍のヘリウムバブルのTEM観察を行いたいと考えている。

・成果報告

○吉田淳也、福本正勝、養田強平、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23回年会 30pB07P、2006年11月

・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) 助教授
- 栗下裕明 (東北大学) 助教授
- 福本正勝 (大阪大学) D 1
- 吉田淳也 (大阪大学) M 2
- 養田強平 (大阪大学) M 2

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

島根大学総合理工学部 小野興太郎

1. 背景と目的

原子炉および核融合炉の炉内構造材料では、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材料中に蓄積する。ヘリウムは脆化をもたらす、特に溶接補修時には、粒界に蓄積したヘリウムが粒界割れの主要因となる事が指摘されている。その為、適正な溶接補修技術の確立には、ヘリウム共存下での高エネルギーイオン照射による損傷形成過程の十分な理解が求められている。

本研究では、現在使用されている、あるいは今後使用が検討されているオーステナイト鋼やフェライト鋼を試料に用いて、ヘリウム照射下および昇温下での電子顕微鏡その場観察を行い、高温下でのヘリウムバブルの粒界偏析に関する基礎的知見を得ることを目的とした。また、オーステナイト系ステンレス鋼でも、304鋼は316L鋼と比較してヘリウムに起因する割れが起こりにくいといった報告例もあり、各試料におけるヘリウム挙動の比較から、添加元素の効果を明確化し、溶接割れに至るメカニズムについて検討した。

2. 実験方法

SUS316LおよびSUS304を厚さ0.1mmまで機械研磨した後、3mmφに打ち抜き、 10^{-6} Pa程度の高真空中で620℃、24時間の焼鈍を行い試料として用いた。焼鈍後、ツイングジェット研磨および電解研磨を施し、電子顕微鏡観察用薄膜試料とした。イオン照射装置直結型の透過型電子顕微鏡を用いて、試料温度200~800℃で $1 \times 10^{18} \sim 21 \text{ He/m}^2$ の範囲で20keV-He⁺を照射した。照射後、1000℃程度まで昇温し、昇温中のヘリウムの偏析挙動をその場観察した。また、照射および昇温後にFIB加工したバルク試料を用いてヘリウムバブルの深さ分布を調べた。

3. 結果および考察

ヘリウム照射した試料の昇温中のその場観察の結果、SUS316LではSUS304と比較して高密度にヘリウムバブルが粒界に蓄積する様子が観察された。特に、800℃以上の高温照射では、結晶粒界に明瞭な違いが観察され、SUS304ではほとんどのバブルは消滅し観察されないのに対して、SUS316Lでは依然としてバブルが観察された。図1には、両試料に800℃でヘリウム照射したときの粒界付近の微

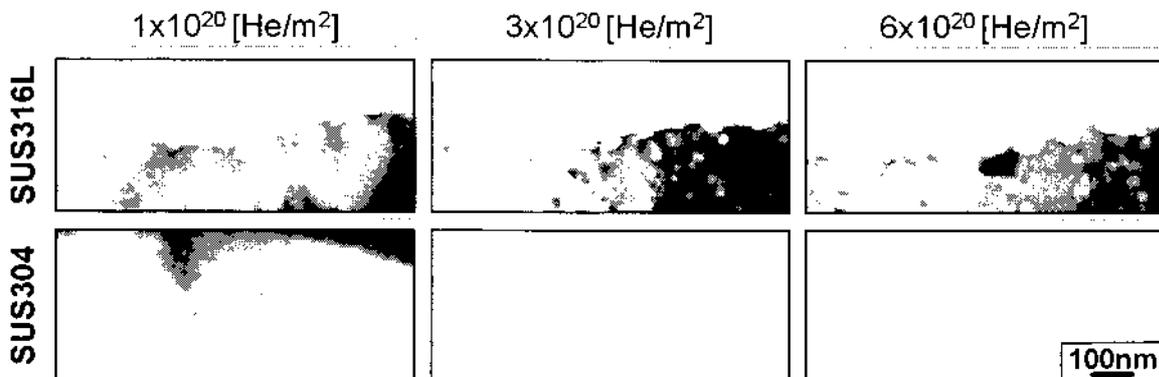


図1 ヘリウム照射後、昇温した際の粒界付近の微細組織(明視野像)。

細組織の照射量依存性を示す。昨年度の共同実験で、SUS316L 中のヘリウムバブルは、SUS304 よりも移動度が低いことを既に明らかにしており、この相異は、316L の添加元素である Mo がヘリウムバブルを強く捕捉することによることに起因すると考えられる。また、このように粒界に偏析したヘリウムバブルは、粒界拡散を経て相当深部にまで分布していることが明らかになった。図 2 には、200℃で 1×10^{20} He/m² 照射後、900℃まで昇温した SUS316L の FIB 加工による断面微細組織を示す。図には、TRIM-code により算出した 20keV-He⁺ の飛程分布も同時に示している。ヘリウムは、飛程 (~100nm) を遙かに超えて、最大 1μm 程度にまで分布していることが確認された。これは、低エネルギーヘリウムの照射であっても、その影響が表面近傍にとどまることなく、バルクとしての特性にも影響を与えることを示している。

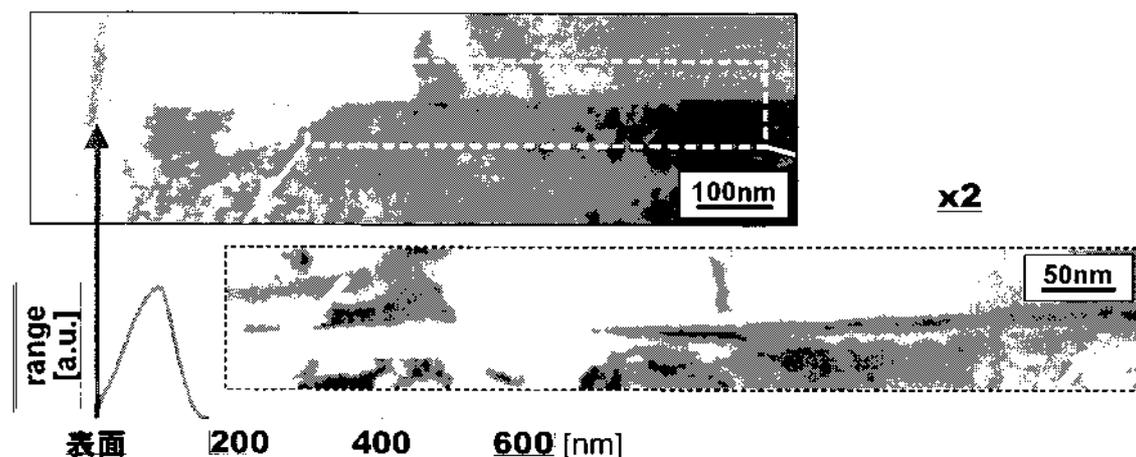


図 2 20keV-He⁺を 200℃で 1×10^{20} He/m² 照射後、900℃まで昇温した SUS316L の断面微細組織(FIB, 明視野像), および, TRIM-code による 20keV-He⁺の飛程。

今後は、ヘリウム共存下での重イオン照射実験や、ヘリウム・重イオンの同時照射実験を行い、中性子照射環境下を模擬した He/dpa レベルでの照射材中の欠陥形成過程を調べる予定である。さらに、フェライト鋼 Fe-Cr-W 等についても照射実験を行い、ヘリウム共存下での応力腐食割れに関連したモデルの構築を目指す予定である。

● 研究成果報告

- ・ 小野興太郎, 「ステンレス鋼中のヘリウムの挙動」平成 18 年度九州大学応用力学研究所研究集会, 福岡, 6 月
- ・ 宮本光貴, 小野興太郎, 「カスケード損傷形成下における He バブルの動的挙動」平成 18 年度九州大学応用力学研究所研究集会, 福岡, 6 月
- ・ 宮本光貴, 小野興太郎, 荒河一渡, 吉田直亮, 「オーステナイトステンレス鋼におけるヘリウムの挙動と粒界偏析」日本金属学会 2006 年秋期大会, 東京, 9 月

● 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, 卜部 洋史 (島根大学総合理工学部)
 渡辺 英雄, 岩切 宏友, 時谷 政行, 隅野 裕也 (九州大学応用力学研究所)

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

核融合装置のプラズマ対向材料として、タングステンが耐熱性、低水素リテンションなどの優れた特性により有望視されている。国際熱核融合実験炉計画(ITER)においても、タングステン材の採用が検討されている。しかし、スパッタリング閾値エネルギー以下のヘリウムイオン照射においても、高融点金属表面にヘリウムバブルが形成されることが実験的に明らかになり、その形成機構の解明、抑制方法の調査が行われてきた。

名古屋大学の直線型ダイバータ・プラズマ模擬試験装置 NAGDIS-II は定常高密度プラズマを生成することが可能であり、核融合装置の条件に近い高粒子束プラズマ照射を行うことができる。これまでに、低エネルギー高粒子束ヘリウム照射による多孔構造の形成が観測されている (Fig. 1)。

本研究ではレーザー照射により熱パルスを重畳することにより、トカマク装置における ELM 等のパル的な熱負荷環境を模擬し、今後磁場閉じ込め核融合、慣性閉じ込め核融合研究にわたり本質的な課題となる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の損耗過程を明らかにすることを目的としている。

Table 1 は慣性核融合研究、磁場閉じ込め核融合研究で現れる典型的なパル的な熱負荷の特性を表している。今回 Ruby レーザーと YAG レーザーを用いて熱パルスを模擬して実験を行った。実験配置を Fig. 2 に示す。

2. 実験結果の概要

ヘリウムプラズマと Nd:YAG レーザー重畳照射

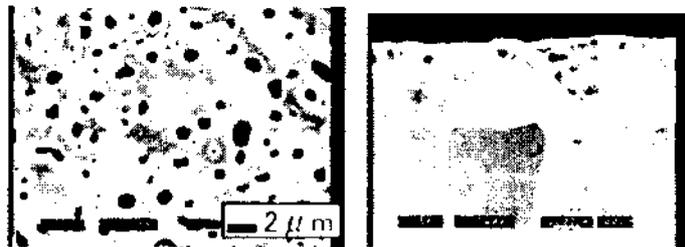


Fig. 1 高密度ヘリウムプラズマ照射によるヘリウムバブル・ホール
の形成(右図:表面, 左図:断面) (J. Nucl. Mater. 313-316(2003))

Table. 1 パル的な熱負荷の特性

	transient heat load	time duration
ITER)		
ELM	~1 MJm ⁻²	0.1-1 ms
disruption	~10 MJm ⁻²	1-10 ms
laser fusion)		
x-ray	~500 Jm ⁻²	~1 ns
burn ion	~10 kJm ⁻²	~several μs

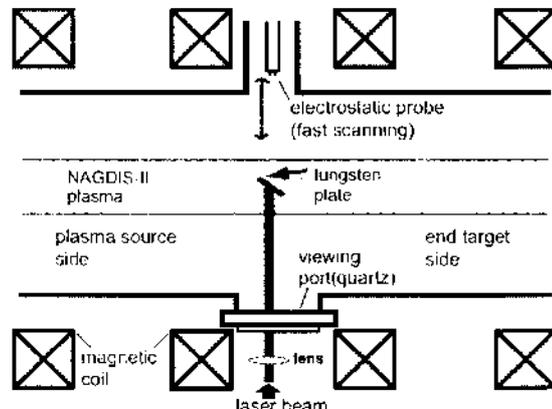


Fig. 2 実験配置

実験結果を Fig. 3 に示す。ヘリウムプラズマ照射のみの場合 (Fig. 3(a)) に比べて、重畳照射により著しくタングステンの損傷が進行していることが分かる (Fig. 3(b))。レーザー照射のみ、及びヘリウムプラズマ照射後にレーザー照射した場合についても実験を行ったが、Fig. 3(b)に見られるような著しい損傷は観測されなかった。これは、ヘリウムバブルの形成に伴い表層の熱伝導が低下した領域の温度が、レーザー照射により高温となりバブル上部が融解し、ホールが形成され、そのホール内にヘリウムプラズマ進入しホール下部面にもバブルが形成され損傷が進行していると考えられる。レーザー照射による高温領域の発生は、ホールの形成を考慮した3次元の熱伝導解析によっても再現されている。

一方 YAG レーザーのパルス幅は 5ns 程度であり、ELM の模擬には適さない。そのため Q スイッチを外した Ruby レーザーを用いてパルス幅約 1ms の熱パルスを模擬した。Fig. 4 より、レーザー強度を上げると、Fig. 3 とは逆にホールの形成が少なくなっていることが分かる。これはパルス幅が長いいため熱伝導により全体がゆっくり加熱されるため、アニーリングの効果によりホールが消失したと考えられる。

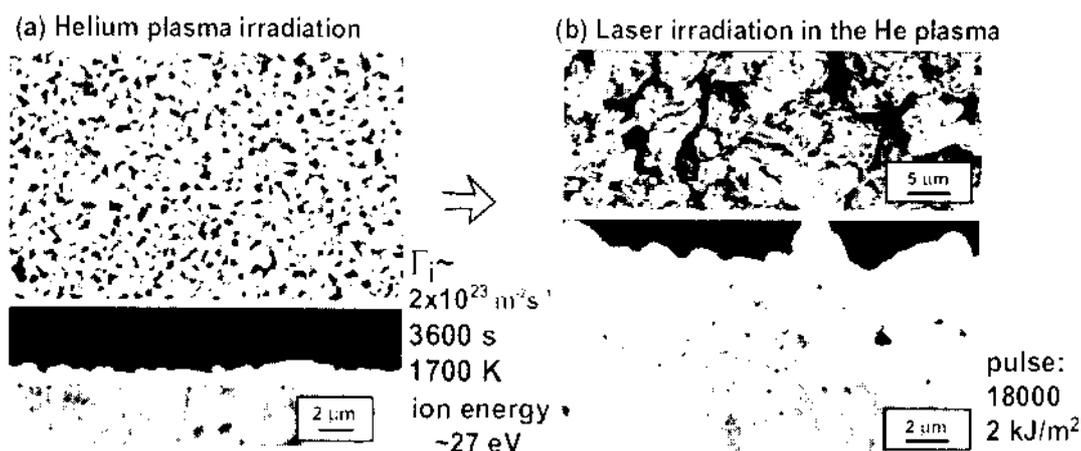


Fig. 3 Nd: YAG レーザー照射とヘリウムプラズマ重畳照射によるタングステン表面構造の変化。(a)ヘリウムプラズマ照射のみ、(b)ヘリウムプラズマとレーザー光同時照射

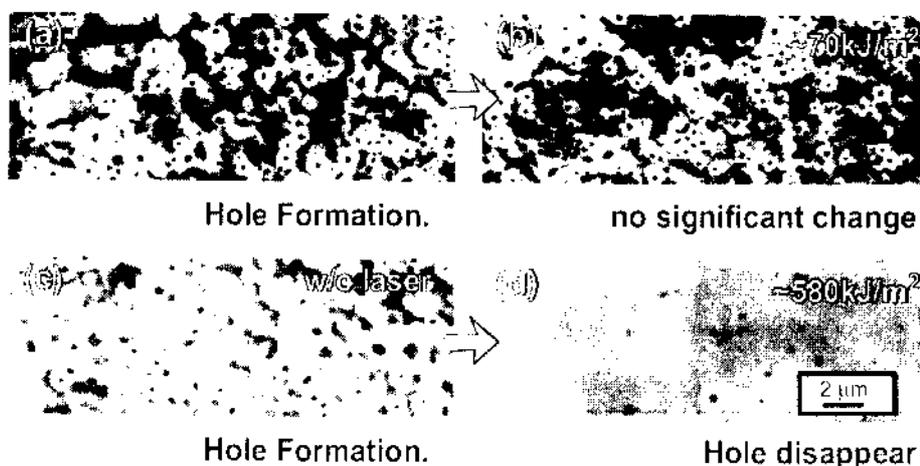


Fig. 4 ルビーレーザーとヘリウムプラズマ重畳照射によるタングステン表面構造の変化

軸対称イオン感受プローブによるイオン温度と流れの測定

横浜国立大学大学院工学研究院 津島 晴

・目的

イオンの温度と流速を同時に計測できる新しいプローブ法の開発し、小型 PWI 実験装置で測定する。

・測定原理とその解析

軸対称イオン感受プローブとは、イオンのラーマー半径が電子のラーマー半径と比べてかなり大きいという性質を利用するイオン感受プローブを発展させたもので、その構造は、図1のように二枚の円盤状の電極が狭い間隔で向き合い、その間から侵入してくるイオンを測定するものである。またその名称の「軸対称」は形状の対称性を意味している。イオンの温度は二枚の電極に与えた電圧と電流の関係から得られ、イオンの流速は二枚の電極に流れる非対称性から得られる。したがって、その特性は図1に示す D 、 L 、 δ 、 σ などによるので、目標となるプラズマに合わせイオン軌道計算をする必要がある。図2はその計算結果の一部で、磁場に対して水平方向の速度と垂直方向の速度に対して、どのような電極へ衝突断面積（捕集効率）があるのか計算したものである。この場合のイオン感受プローブの大きさをイオンの実効的なラーマー半径 $\rho_0 = (mk_B T_i)^{1/2} / (eB)$ で規格化すると $D/\rho_0 = 20$ 、 $L/\rho_0 = 2.0$ 、 $\delta/\rho_0 = 1.0$ 、 $\sigma/\rho_0 = 0.5$ である。また、図中の速度は音速 $(2k_B T_i / m)^{1/2}$ で、等高線の数値として表されている断面積は ρ_0^2 で規格化されたものである。

・実験

予備段階として、横浜国大にある YDPD 装置でのプラズマ ($\sim 10^{11} \text{cm}^{-3}$) を用いた試験でイオン温度 ($\sim 1 \text{eV}$) とプラズマの流速 ($v/c_s < 0.3$) の測定が可能であることを確認した。

・まとめ

軸対称プローブの解析を行い横浜国大で予備実験を行った。小型 PWI 実験装置での測定には至っていないが、今後行う予定である。

・研究組織

代表者	津島晴	横浜国立大学大学院工学研究院 助教授
	庄司多津男	名古屋大学大学院工学研究科 助教授
所内責任者	坂本瑞樹	応用力学研究所 助教授

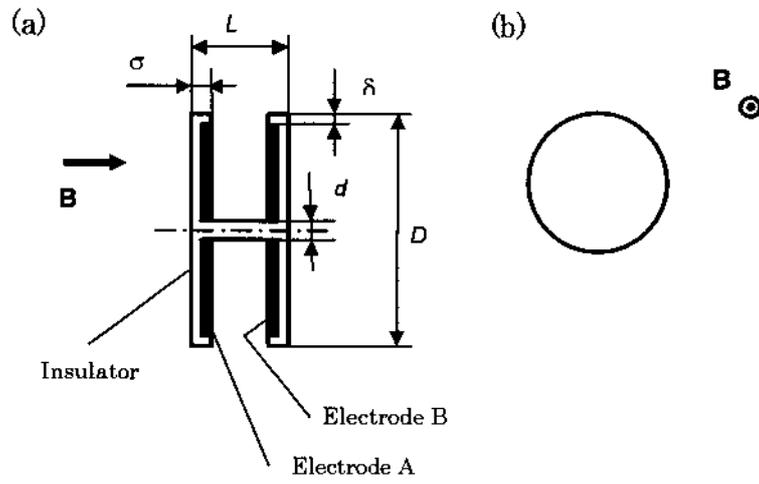


図1 軸対称イオン感受プローブ概略図。

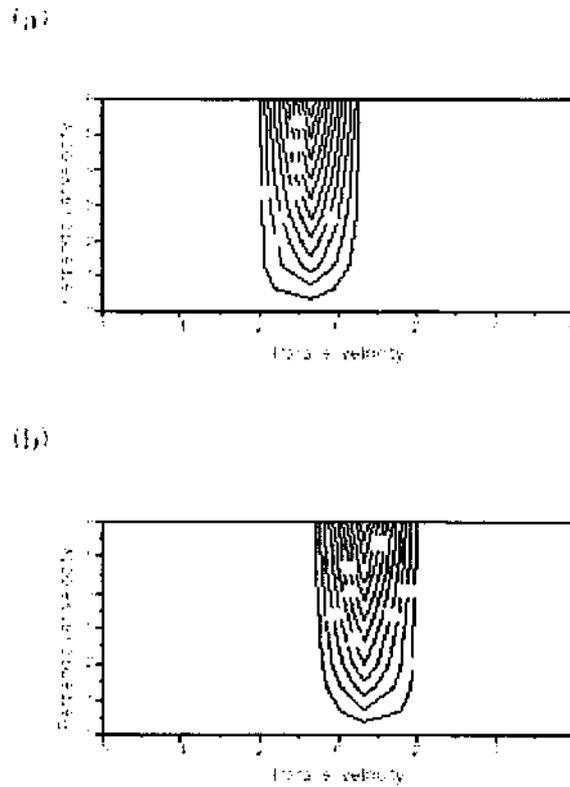


図2 (a) 電極 A、および(b) 電極 B への磁場に対して平行な速度成分と垂直な速度成分に対する衝突断面積。

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。

本研究では、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、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、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いる。

昨年度来、ループを導入した試料を電子顕微鏡内で段階的に加熱—その場観察することで、ループの熱活性化挙動を調べている。その結果の一部は、昨年度の報告書に記載した。一方、純 Fe の超高压電子顕微鏡内での高エネルギー電子照射下では、ループは、熱的には移動しないような温度においても容易に移動し得ることがわかっている。本報告では、Fe-Cr 合金の高エネルギー電子照射下における $1/2\langle 111 \rangle$ 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。また、同時にループの移動の過程を観察・記録した。ここで、電子加速電圧は 1000 kV、照射強度は $1 \times 10^{24} \text{ e}^-/\text{m}^2\text{s}$ 、照射温度は 110–470 K とした。

実験結果および考察

すべての試料において、 $1/2\langle 111 \rangle$ ループは高エネルギー電子照射によって間歇的なジャンプを示した。

ここで、 $1/2\langle 111 \rangle$ ループ一個あたりのジャンプ頻度 (1s 当たりのジャンプ回数) を定量化した。この作業において、ループには Burgers ベクトルの種類において二種類存在することを考慮するために、両種類のループの数密度の比率測定を別途行った。FIG 1 はジャンプ頻度を照射温度に対してプロットしたものである。また、FIG 2 は、全ループ密度が照射温度の関数となっていることを考慮して、ジャンプ頻度を全ループ密度へプロットし直したものである。現在のところ高エネルギー電子照射によるループの移動の詳細な機構はわかっていないが、ループの移動に熱活性化過程が効くと考えても (FIG 1)、あるいはループの密度といった周りの環境が効くのだとしても (FIG 2)、いずれにしても純 Fe 中のループのジャンプ頻度は Fe-Cr 合金のそれよりも高い値を示している。このことは、分散した Cr 原子によるループ移動に対する摩擦抵抗がいずれの合金濃度においても無視できないものであることを示す。

一方、FIG 3 は、ループのジャンプの距離を全ループ密度に対してプロットしたものである。純 Fe において特に顕著に、ジャンプ距離がループ密度にほぼ反比例して減少する関数となっていることがわかる。このことは、ループのジャンプ距離は不純物原子や溶質原子そのものによってではなく周りに存在するループによって制限付けられていることを示

唆する。

今回、 $1/2\langle 111 \rangle$ ループのジャンプ頻度において、純 Fe と Fe-Cr 合金との間で明確な違いが見られた。一方、Fe-Cr 合金の中では、Cr 濃度による顕著な系統的な違いは検出できなかった。ループの移動に対する摩擦抵抗が Cr 濃度によらないのだとするとこれは大変興味深い。このことは、今後、より精確な実験によって検証していく必要があると思われる。

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

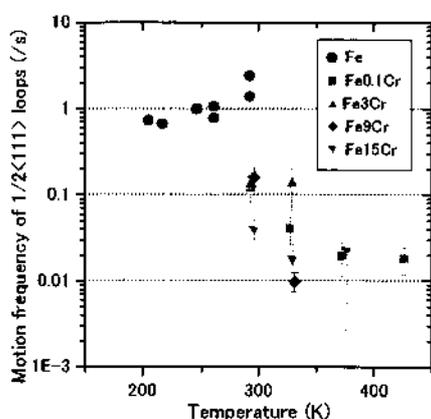


FIG 1. Temperature dependence of jump frequency of $1/2\langle 111 \rangle$ loops upon high-energy electron irradiation. (1000 keV, $1 \times 10^{24} \text{ e}^-/\text{m}^2\text{s}$)

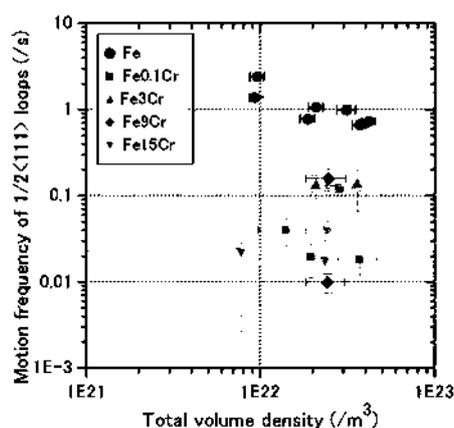


FIG 2. Loop-density dependence of jump frequency of $1/2\langle 111 \rangle$ loops upon high-energy electron irradiation. (1000 keV, $1 \times 10^{24} \text{ e}^-/\text{m}^2\text{s}$)

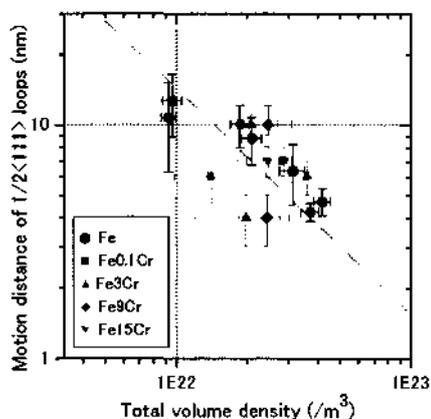


FIG 3. Loop-density dependence of jump distance of $1/2\langle 111 \rangle$ loops upon high-energy electron irradiation. (1000 keV, $1 \times 10^{24} \text{ e}^-/\text{m}^2\text{s}$)

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はブランケット増殖材、冷却材との相互作用により様々な変化を起こす。本研究で対象とする液体リチウムブランケットに関しては、リチウム環境において構造材との間でN, O, C不純物の移動が起こることが知られている。不純物の移行は材料の腐食特性だけでなく強度特性にも影響を与える。本研究の目的は、液体リチウム環境に曝されたバナジウム合金および低放射化フェライト鋼の微細組織、組成の変化を、透過電子顕微鏡等により詳細観察することにより、浸入不純物、腐食生成物の内部組織および強度特性への影響を明らかにすることを目的とする。特に組織変化と硬度、引っ張り特性など強度特性との相関に重点を置く。

2. 実験方法

核融合科学研究所およびオークリッジ国立研究所において、V-4Cr-4Ti合金（NIFS-HEAT2）及び低放射化フェライト鋼（JLF-1）試料を液体リチウムに高温で長時間曝した。これらについて断面方向の硬さ分布、組成分布を硬度計、SEM-EDSによって求めるとともに、応用力学研究所のFIB装置等で薄膜化し透過電子顕微鏡によって組織、組成変化およびその深さ依存性を求めた。

3. 実験結果

図1は、V-4Cr-4Tiを液体リチウムに浸漬したときの浸漬時間とN, O, C不純物量の関係を示す。高温浸漬により、N, Cが増加し、Oが減少することが分かる。

図2は、浸漬による析出の変化を透過電子顕微鏡で調べたものである。標準熱処理を施したV-4Cr-4Ti合金は、C, Nを多く含むTiの粗大析出物（Ti-C-N）とTi-C-Oからなる微細な析出物の2種類が観察される。Li浸漬により、Ti-C-O微細析出が選択的に再溶解することが、図3に示されている。これは、リチウム浸漬によりマトリクス中の酸素が溶出し酸素濃度が低下し、それに伴い酸素との化合物であるTi-C-O微細析出が不安定化したためと考えられる。

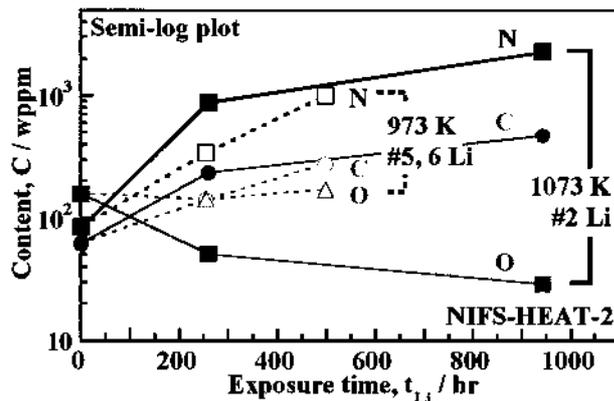


図1 V-4Cr-4Tiの液体リチウム浸漬によるN, O, C不純物濃度の変化。0.25mm厚クーポン試験片を利用

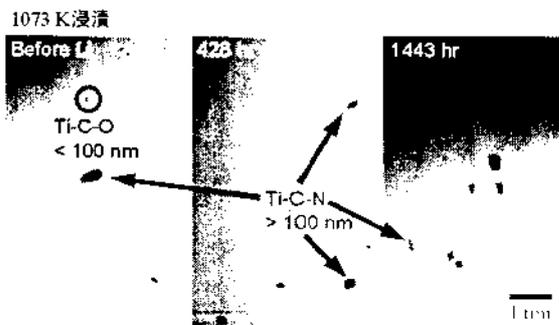


図2 V-4Cr-4Tiのリチウム浸漬による析出分布の変化。0.25mm厚試験片の中心部分を観察した。(1073K浸漬)

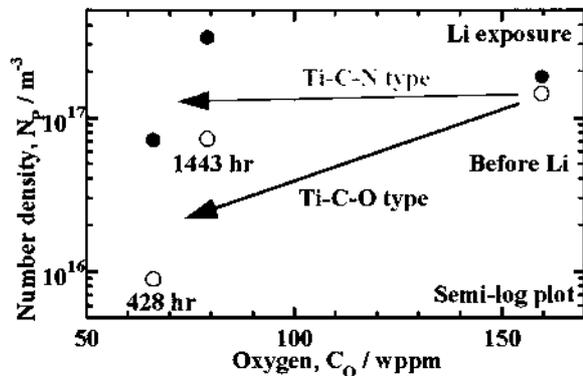


図3 試料酸素濃度と析出密度との関係（1073K浸漬）

これらの浸漬による引っ張り特性変化を図4に示す。図1で示すようにC, Nの大幅な増加が起こったにもかかわらず、硬化は起こらず若干の軟化傾向を見せている。これは、C, Nの増加はTi-C-N粗大析出物が吸収することにより、特性変化に大きな影響を与えないが、Oの減少はTi-C-O析出の分解を引き起こすため、強度低下をも

たらすと考えられる。浸漬による伸びの低下も認められたが、長時間試験後も10%程度の一様伸びを保っている。

図5は低放射化フェライト鋼JLF-1を液体リチウム浸漬した後断面をSEM観察したものである。表面から20 μ mほどまで、マルテンサイト相が失われていることが分かる。分析の結果、JLF-1では、バナジウム合金とは逆にC濃度が低下することが分かった。Cの濃度の低下によりマルテンサイト相がフェライト層に戻ったものと考えられる。左上の写真は表面近傍の透過電子顕微鏡組織を示したもので、明確にフェライト相とマルテンサイト相の分離が観察された。

深さ方向の硬度測定の結果、表面近傍では、ビッカース硬度が250から130程度まで低下していた。この値はFe-Crフェライト相の値に近く、C溶出による相変化に対応して軟化が起こったことが分かる。

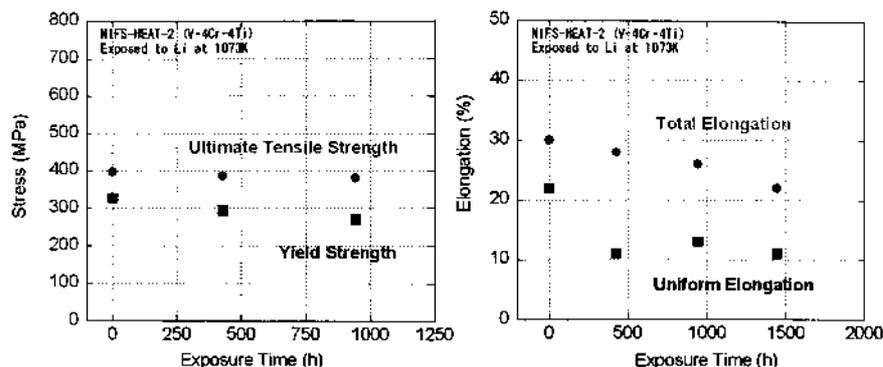


図4 V-4Cr-4Tiのリチウム浸漬後の引っ張り特性 (0.25mm厚試料)

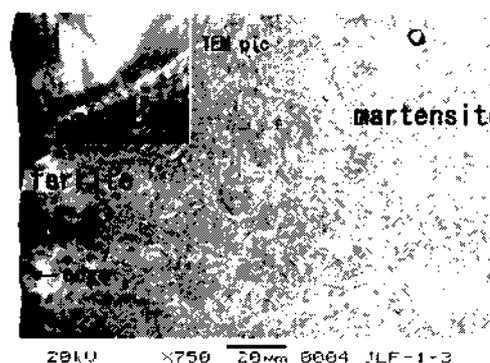


図5 JLF-1のリチウム浸漬後の断面SEM像 (左上は表面近傍のTEM像)

4. まとめ

液体リチウム浸漬によるC, N, Oの移行とその効果は、材料、温度、Liの純度によって大きく異なる。バナジウム合金に関しては、Oの流出により、析出強化機構が失われることが、低放射化フェライト鋼においては、Cの流出により、マルテンサイト強化機構が失われることが課題として明らかになった。

5. 研究組織

室賀健夫、長坂琢也、田中照也
徐 祺
吉田直亮、渡辺英雄

(核融合科学研究所)
(総合研究大学院大学)
(九州大学応用力学研究所)

6. 発表論文

- (1) T. Nagasaka, T. Muroga, K. Fukumoto, H. Watanabe, M. L. Grossbeck and J. Chen "Development of fabrication technology for low activation vanadium alloys as fusion blanket structural materials" Nucl. Fusion 46 No 5 (May 2006) 618-625
- (2) T. Nagasaka, T. Muroga, M. Li, D. T. Hoelzer, S. J. Zinkle, M. L. Grossbeck and H. Matsui "Tensile property of low activation vanadium alloy after liquid lithium exposure" Fusion Engineering and Design, 81 (2006) 307-313
- (3) Q. Xu, T. Nagasaka, T. Muroga "Compatibility of low activation ferritic steels with liquid lithium" 17th Topical Meeting on the Technology of Fusion Energy (November, 2006 Albuquerque)

(財)電力中央研究所 秀 耕一郎、宮原 勇一
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、軽水炉温度で大量の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。この現象は本来SCC感受性を有しない母材部(溶体化材)に生じるため、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]はこれまでに304系ステンレス鋼の溶体化材と熱鋭敏化材についてIASCC感受性の指標となる粒界割れ破面率の中性子照射量依存性を調べてきた。その結果、粒界割れ破面率は、熱鋭敏化材では照射量 $1 \times 10^{20} \text{ n/m}^2$ までは増加するものの、 $3 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ では未照射状態よりも低下すること、一方で溶体化材は $3 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ まで増加すること明らかにし、この鋼種間の違いは、マクロ変形挙動の違いに起因している可能性について報告した。しかしながら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るに至っていない。

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、ナノインデントとEBSPを用い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]から、室温引張を行った試料では①変形が進むと結晶粒内に、粒界と同程度の硬さのピークが現れてくること、②また変形が進むと結晶性の乱れた領域が粒内に現れてくることを確認した。また、重イオン照射材については、③0.6dpa照射材には結晶性の乱れは認められ、6dpa照射材については結晶性の乱れている部分が現れ、④その状態は室温引張の600MPa変形材の状態に近いこと、を報告した。これらの結果を受けて、本報告ではEBSPを用いて材料中の歪の分布を測定することにより、結晶の変形能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

供試材は通常の商用純度材で、C濃度は比較的高めの304ステンレス鋼の熱鋭敏化材とした。化学組成および熱鋭敏化条件を表1に示す。重イオン照射を行う試料は3mmφx200μmのTEMディスクの形状とし、照射面については5%過塩素酸-95%酢酸溶液中で40Vで電解研磨を実施した。

重イオン照射は400°Cで、0.06、0.6、6dpa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 3×10^{23} 、 1×10^{25} 、 $1 \times 10^{26} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$ となる。

2.2 EBSP測定

EBSP測定はTEM観察に不可欠なセクショニング、バックシンニングを実施しない状態で照射面側を行った。これはダメージピーク位置の歪がセクショニングとバックシンニングにより解放される可能性を考慮したためである。測定は各試料の異なる位置を3箇所について実施した。今回測定した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

重イオン照射材の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。はじめに、IPF像をみると、照射量が増加しても結晶性の乱れはほとんどみられない。前報^[5]では照射が進むと粒界と粒内の一部に結晶方位関係が崩れ、像の乱れる部分のあることを報告したが、今回は異なる結果となった。これは今回EBSP装置の菊池線撮影カメラを更新したことにより、解像度が向上し、見た目の違いとなって現れた可能性もあるが、今後さらに検討する必要がある。KAM像については各照射量でほとんど同じであり、IPF像の結果と同じであった。

室温引張変形させた試料のEBSP測定結果を図2に示す。ここで用いた試料は以前の報告^[4]のもので、変形量は中

中性子照射材の0.2%耐力を基に決めており、270MPaは 3×10^{23} n/m² (E>1MeV)、600MPaは 3×10^{25} n/m² (E>1MeV)相当材である。この図では色が濃くなるほど歪による結晶方位差が大きいことを示しており、粒界近傍と粒内の一部に大きな歪の領域が認められた。特に歪の大きな部分は粒界に集中しており、一方で粒内にも不規則に歪の大きな領域が観察され、変形量が大きくなるにつれてその量が増加していた。

図3に照射材(図中の●)と、室温引張材(図中の△)のKAMの結果を示す。なお室温引張材は対応する中性子照射量のdpa換算として、図中に示した。この図で室温引張を行った試料のKAMは耐力(変形量)に応じて直線的に増加していた。一方で照射材のKAMは0.5ではほぼ一定であり、照射量依存性は認められなかった。このことは照射材の歪は材料に等方的に導入され、転位のパイルアップ等に起因する結晶面の傾きが少ないことを示している可能性がある。今回0.06dpa以下のデータはないが、室温引張材の直線と交差する部分に0.06dpaのKAM値が存在することから、0.06dpa以下の照射材は室温引張材の直性に乗ることも考えられる。これについては今後の課題である。

著者らはこれまでに変形させた試料を用いて変形が必ずしも均一に起こらないこと、また変形に伴って粒内に変形に対するバリアが出現し、そのバリアの数は変形が進むにつれて増えていく可能性を指摘した。前報^[5]では結晶性の乱れがミスオリエンテーションに起因すると仮定し、それを「歪」と定義して、応力-歪の関係から「硬さ」と同等に取り扱ってきた。しかしながら今回の結果は、この仮定が必ずしも正しくない可能性を示唆する。応力腐食割れには最終的に変形が関与することから、照射材を変形させた場合の変形能についてあらためて試験を実施する必要がある。

4. まとめ

- 1) 重イオン照射材では照射量が増加しても結晶方位の乱れはほとんどみられなかった。またKAMの照射量依存性も認められなかった。この結果は前報と異なるため今後解明が必要である。
- 2) 室温引張変形材では粒界近傍と粒内の一部に大きな歪の領域が認められた。特に歪の大きな部分は粒界に集中していたが、粒内にも一部歪の大きな領域が観察された。
- 3) KAMの照射量依存性を見た結果、室温引張試料のKAMは耐力(変形量)に応じて直線的に増加する一方で、照射材のKAMは0.5ではほぼ一定であり、照射量依存性は認められなかった。

5. 参考文献

- [1] K. Hide, M. Mayuzumi, K. Tsuji, M. Narui, "Influence of deformation behavior on IASCC susceptibility for neutron irradiated type 304 stainless steels", Proc. of 13th APCCC, 16-21 Nov 2003, Osaka Univ.
- [2] K. Hide, T. Onchi, M. Mayuzumi, S. Dumble, "Correlation of Microchemistry and IGSCC Behavior for Irradiated Thermally-sensitized Type 304 Stainless Steels", 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、「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)に及ぼす粒界特性に関する研究」、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) p159
- [4] 秀耕一郎、太田丈児、渡辺英雄、「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)に及ぼす粒界特性に関する研究 その2」、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) p159
- [5] 秀耕一郎、渡辺英雄、「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)に及ぼす粒界特性に関する研究 その3」、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)

表1 化学組成と熱処理の条件

Element	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	N	Co	Fe
	0.063	0.5	0.98	0.026	0.045	9.99	18.65	0.036	<0.01	bal.

Thermally-sensitized treatment : SA(1100°C x 1hr) + sens.(650°C x 100 min + 750°C x 24 hr)

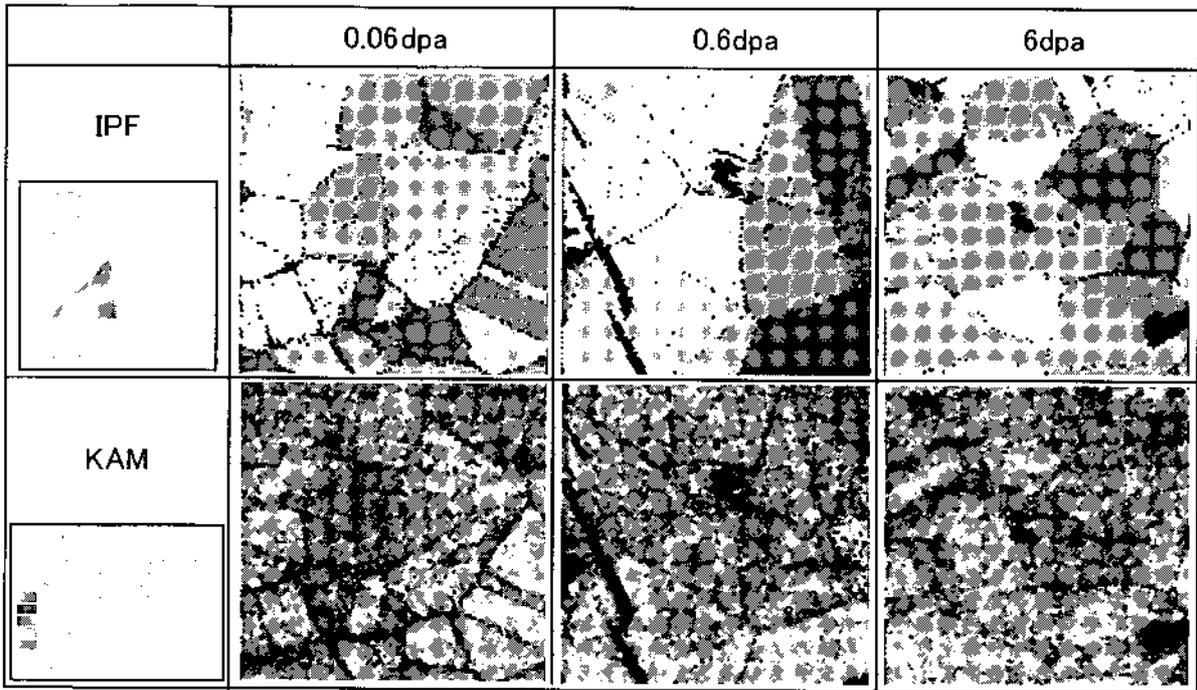


図1 重イオン照射材のKAM像 (Kernel Average Misorientation)

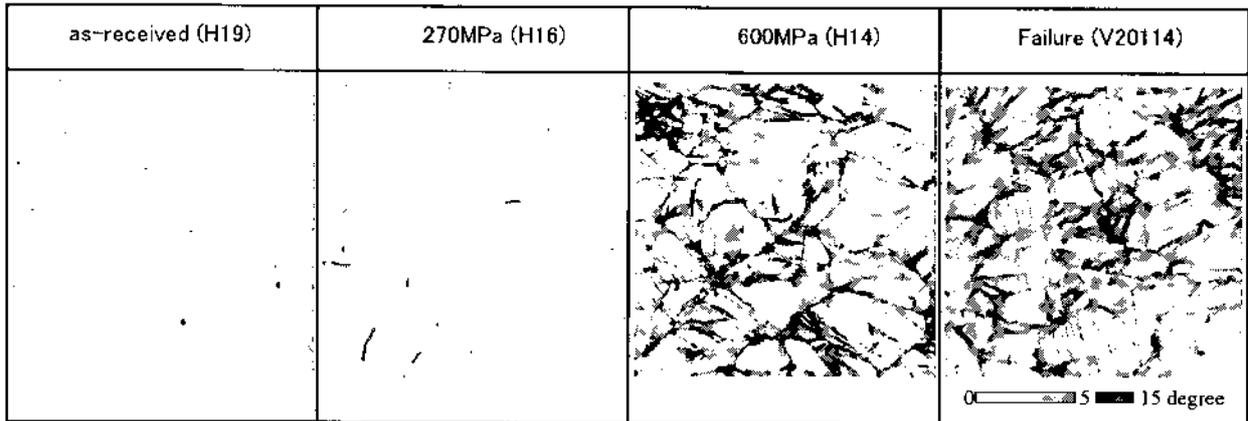


図2 室温引張変形させた試料のKAM像

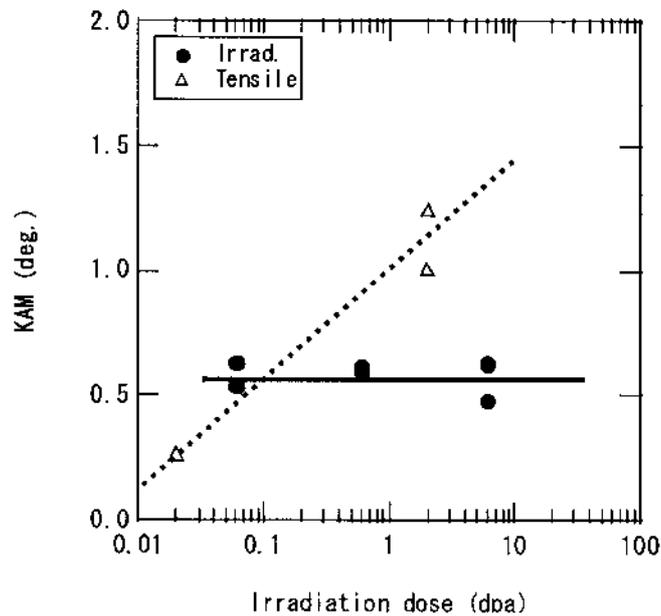


図3 重イオン照射材と室温引張材のKAMの照射量依存性

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。特に長時間・定常状態における中性原子・分子の振る舞いは、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ため、非常に興味深い研究対象である。

本研究は、長時間プラズマにおける中性粒子の挙動を知ることが目的として、中性粒子輸送モンテカルロコードを、長時間プラズマを発生することのできるトカマク TRIAM-1M 装置に適用し、同時に TRIAM-1M プラズマからの H α 線や不純物発光等の測定結果を総合的に比較検討し、その結果から長時間プラズマ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 TRIAM-1M における長時間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、必要な改造を施した DEGAS コード (GDEGAS) を用いて計算を行ってきた。^[2]

GDEGAS 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. TRIAM-1M における中性粒子輸送シミュレーション

TRIAM-1M では、主半径方向及びトロイダル方向の計 14 箇所 H α 線検出器が設置されており、H α 線強度の空間分布測定結果、および上記シミュレーション解析に基づいて中性粒子の挙動研究が行われてきた。これまでの研究から、ポロイダル断面における H α 線強度分布は、モンテカルロシミュレーション結果とほぼ良い一致を見ていたが、トロイダル分布は、密度依存性が中性粒子の平均自由行程から説明出来ないことが明らかになっていた。このことを解明する為に、トロイダル方向の中性粒子の輸送解析を目的として、円筒軸対称メッシュモデルを用いてシミュレーションを行ったところ、実験結果と矛盾のない結果を得た。この結果から、トロイダル方向の H α 線強度プロファイルはスクレイブオフ層の厚みに強く依存していることが明らかになり、真空容器やプラズマの幾何学的形状が中性粒子の挙動に強く影響を与えていることを示唆した。以上の結果を踏まえて、完全3次元メッシュモデルを構築し、3次元中性粒子輸送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。従来のジオメトリをそのままに完全3次元化を図っており、従来の粒子源が軸対称のリング状しか模擬できなかったものが、リミター上のホットスポットからの粒子源や、ガスパフによる局在化した粒子源に対応できるようになっている。直径は 39 cm、長さ 200 cm の材質 Fe の円筒壁を定義し、その中に径方向分割数 13、周方向分割数 24、軸方向分割数 21 のプラズマメッシュを構築している。ガス

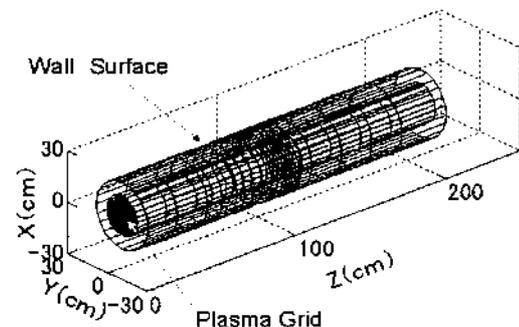


図1 完全3次元化した円筒メッシュモデル

パフを模擬した粒子源は、 $z = 110$ cm の位置にある壁側面部に定義しており、水素ガス分子はコサイン分布で、メッシュ内に入射される。粒子源近傍の中性粒子密度を詳細に調べる為に、その周辺は 3 cm 間隔でメッシュを切っている。円筒の両端部は出口を定義しているが、ガスパフ位置から軸方向へ直径分以上離れているため、影響は無視できる。

図 2 は、上記メッシュモデルを用いて行った解析結果の一例を示す。これは円筒側面からのガスパフを模擬した際の中性水素分子および原子密度のシミュレーション結果である。

下図に示す水素分子密度は、プラズマ半径方向に強く減衰し、軸方向及び周方向についてガスパフ位置直近に局在化しているのに対し、上図の原子密度は比較的、軸方向と周方向に拡散しており、径方向の減衰も小さいことが判る。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。

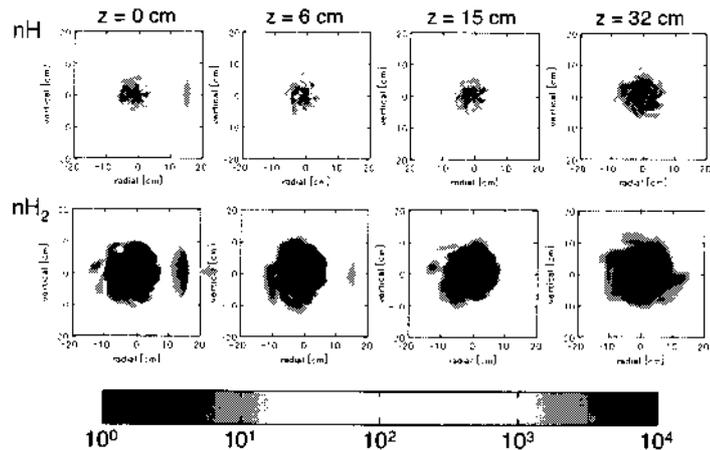


図 2 3次元 DEGAS を用いて得られた中性水素原子分子密度のシミュレーション結果 ($Z = 0$ cm 側面からのガスパフを模擬している。)

4. まとめと今後の展望

定常トカマク実験装置 TRIAM-1M のプラズマを想定した中性粒子輸送解析を、DEGAS 3次元モンテカルロコードを用いて行った。これまでに得られた結果から、円筒モデルにおいても3次元化することにより、詳細な中性粒子輸送解析が出来ることが実証された。今後このような詳細な構造形成の機構について検討を進めてゆき、さらに現実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. Petavic *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

- 東園雄太, 第21回トリアム研究会, 2006年8月, 九大応力研
- 中嶋洋輔, 第21回トリアム研究会, 2006年8月, 九大応力研
- M. Sakamoto, M. Ogawa *et al.*, Proc. of 21st Fusion Energy Conference (Chengdu) EX/P4-25.
- 中嶋洋輔, 第19回トリアム研究会, 2005年4月, 九州大学 FURKU, Report 05-01(82) p.82.
- 中嶋洋輔, 第22回トリアム研究会, 2006年12月, 九大応力研
- Y. Higashizono, Y. Nakashima, *et al.*, to be submitted to 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	助教授
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	助教授
研究協力者	久保田雄介	筑波大学プラズマ研究センター	博士研究員
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4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1年生
研究協力者	坂本瑞樹	九州大学応用力学研究所	助教授

1. 序論

今日、磁気記録の高密度化のために記録単位を構成する磁性粒子の縮小化が進められている。そのため記録の熱安定性の観点から磁気異方性が高い L1₀ 規則構造を有する FePt 合金が新たな磁気記録媒体の候補材として注目されており、ナノスケールの FePt 粒子を非磁性母相に分散させた FePt ナノグラニューラー薄膜に期待が寄せられている。この材料に磁気記録として良好な物性を持たせるためには FePt 粒子のサイズ、形状および方位などを制御する必要がある。これらの制御方法を探るためにイオン照射の効果を明らかにすることを本研究の目的とした。実験ではイオン照射効果が FePt 粒子の 3 次元形状に及ぼす影響を調べるために透過型電子顕微鏡(TEM)による電子線トモグラフィーを用いて、FePt 粒子の形状、分散状態などの定量的な解析を行った。

2. 実験方法

実験に用いた試料は電気磁気材料研究所においてイオンスパッタ法によって作製された非晶質 Al₂O₃ に FePt ナノ粒子が分散した FePt ナノグラニューラー薄膜である。試料の組成は (FePt)₄₁(Al₂O₃)₅₉、(FePt)₄₇(Al₂O₃)₅₃ の 2 種類で、薄膜の厚さは 20 nm である。これらの試料に対して真空中で 650°C 20 分間の熱処理を施した後、九州大学応用力学研究所タンデム加速器による 2.4 MeV Cu²⁺ イオン照射ならびに日本原子力研究開発機構のタンデム加速器による 210 MeV Xe¹⁴⁺ イオン照射を行い、イオン照射に伴う構造変化を TEM を用いて観察した。電子線トモグラフィーでは、九州大学超高压電子顕微鏡室の TECNAI-20(FEI 社製) および JEM-3200FSK(日本電子社製)を用いて、-60°~60°の角度範囲で 2°ステップで明視野像を撮影した。そして、コンピュータ計算処理により 3 次元構築像を得た。構築した像から 3 次元座標を測定し、粒子サイズ、アスペクト比(長軸の長さ/短軸の長さ)および方位を定量的に評価した。

3. 結果および考察

図 1 にイオン照射前(650°C で 20 分間熱処理)の明視野像を示す。明視野像において黒いドット状に観察されるのが FePt 粒子であり、平均粒径は 6.4 nm であった。電子線トモグラフィーを用いて 3 次元像を構築し、アスペクト比を測定したところ、その平均値は 1.4 であった。膜面の法線方位から測定した粒子の長軸方向の角度を θ として、その分布を図 2 に示す。 θ は広く分布しており照射前の FePt 粒の方位はほぼランダムである。この

試料に対して 2.4 MeV Cu イオンを 5.0×10^{19} ions/m² まで照射すると、明視野像では平均粒径が 5.6 nm に減少した他に特に顕著な変化は観察できなかった。しかし、図 3 に示す電子線トモグラフィーによる 3 次元構築像では、FePt 粒子が膜厚方向に伸びていることがわかる。この 3 次元構築像から粒子のアスペクト比を測定したところ平均値として 2.2 が得られ、定量的な解析からも粒子の伸びが確認できた。図 4 には θ 値のヒストグラムを示す。0°付近にピークがあり、強い方位性がある。このような Cu イオン照射による FePt 粒子の伸びがイオン照射方向に依存しているか、あるいは薄膜形状といった他の因子が影響しているかを調べるために Cu イオン照射を同じ照射量でイオン照射方向に対して試料を 46°および 60°傾斜させて照射し、これらの試料に対してもトモグラフィー観察を行った。平均アスペクト比はどちらも 2.1 であり、傾斜して Cu イオン照射を行っても FePt 粒子は伸びることがわかった。それぞれの θ 値のヒストグラムを図 5 および図 6 に示す。46°傾斜試料では 46°付近にピークがあるが、そのピークは低く、分布の幅は広い。一方、60°傾斜試料ではイオン照射方位付近にピークは見られず、0°付近にピークが現れた。このように、2.4 MeV Cu イオン照射によるナノ粒子の変形は、膜面に対するイオン照射方位に強く依存しており、照射イオンと粒子の直接的な相互作用とともに、膜面を介した影響が無視できないことが示唆される。

一方、2.4 MeV Cu イオンより強い電子励起を生ずる 210 MeV Xe イオン照射においては、照射量が 8.0×10^{17} ions/m² までは FePt 粒子の粗大化が進むのみで粒子形状に顕著な変化は見られなかった。図 7 に Xe 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。このとき、FePt 粒子に大きな変化が生じ、粒径の異なる 2 種類の粒子が観察された。この試料の電子線トモグラフィーによる 3 次元構築像を図 8 に示す。薄膜表面付近に大きく粗大化した球形の粒子と、膜の内部に著しく伸びたロッド状の粒子が形成されていることがわかる。210 MeV Xe イオンのような高速重イオンを照射した場合、高密度電子励起によりイオンの通過した領域が瞬間的に局所的な融解が生じ、イオンの軌跡に沿ってコラム状に構造が乱れたイオントラックと呼ばれる領域が形成することが知られている。FePt 粒子は融解し、凝固する際にイオントラックに沿った形状へと変化すると考えられる。しかし、照射量低い間は FePt 粒子の形状に顕著な変化が起こらず、照射量が増加するにつれて粒子形状の変化が観察されることから、粒子形状の変化

にはイオントラックの重畳効果が影響していると考えられる。

4. 結論

(1) FePt ナノグラニューラ薄膜に対して 2.4 MeV Cu イオンを照射すると FePt 粒子は長く伸びた形状へと変化する。

(2) 試料を傾斜させた状態で Cu イオン照射を行っても、粒子は伸びるが、その方向はイオン入射方向と一致しない。

(3) 210 MeV Xe イオンを 10^{18} ions/m² 以上照射すると

FePt 粒子は劇的に変化し、試料表面に球状に成長した粒子と膜厚方向に大きく伸びた粒子の 2 種類の粒子が現れる。

発表論文 : M. Shirai, T. Horiuchi, A. Horiguchi, S. Matsumura, K. Yasuda, M. Watanabe, and T. Masumoto, Mater. Trans. 47 (2006) 52-58.

55. M. Shirai, A. Horiguchi, K. Yasuda, S. Matsumura, M. Watanabe and T. Masumoto, Proc. of 16th Electron Mmicoscopy Congress, (2006)704

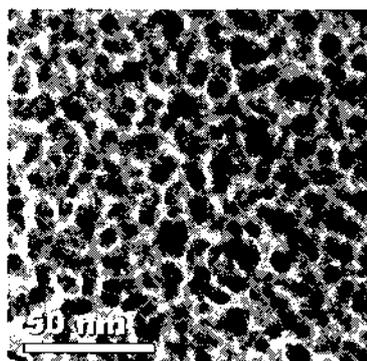


図1 照射前試料(650°C20分間熱処理)の明視野像

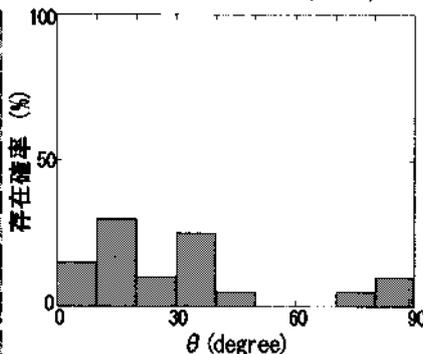


図2 照射前試料(650°C20分間熱処理)のθ値ヒストグラム

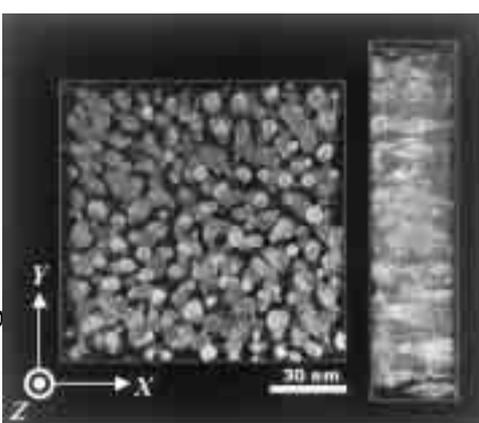


図3 2.4 MeV Cu イオンを照射した試料の3次元構築像

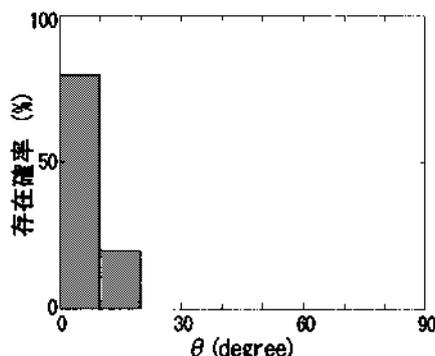


図4 Cu イオン照射試料(傾斜なし)のθ値ヒストグラム

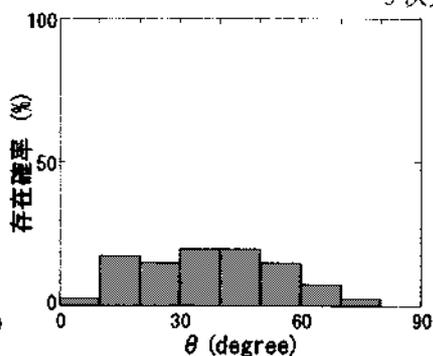


図5 Cu イオン照射試料(46°傾斜)のθ値ヒストグラム

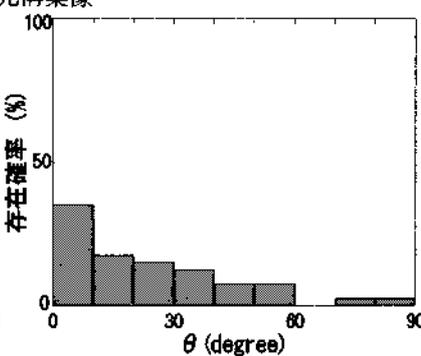


図6 Cu イオン照射試料(60°傾斜)のθ値ヒストグラム

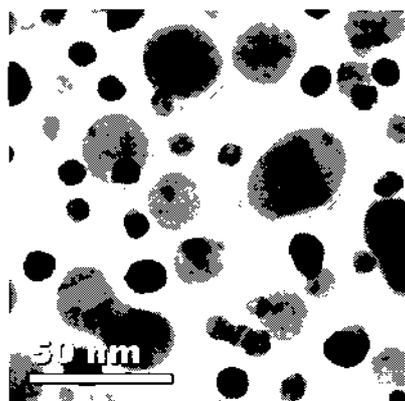


図7 210 MeV Xe イオンを 5×10^{18} ions/m² まで照射した試料の明視野像

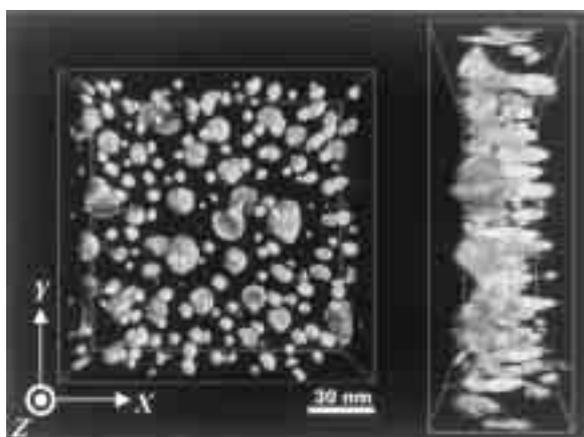


図8 210 MeV Xe イオンを 5×10^{18} ions/m² まで照射した試料の3次元構築像

MgO・Al₂O₃ 中の転位ループ形成過程に及ぼす電場の効果

九大院・工 関 真一郎、山本 知一、安田 和弘、安永 和史、松村 晶

1. 緒言

MgO・Al₂O₃ は、これまでの研究から耐照射損傷性に優れることが報告されており、核分裂炉の次世代燃料や核変換処理用の不活性母材、および核融合炉の電気絶縁材として期待されている。このような放射線環境で使用される材料中には、弾性的なはじき出し損傷に起因する点欠陥が形成され、これらは離合集散過程を経て照射欠陥集合体を形成する。MgO・Al₂O₃ のようなイオン性結晶中に形成される点欠陥は電荷を付随するため、その離合集散過程は外部電場の影響を受けることが予想されるため、電気絶縁材としての使用を考慮した場合には、MgO・Al₂O₃ 中の照射欠陥形成に及ぼす外部電場の影響を明らかにすることは重要である。

本研究では、MgO・Al₂O₃ 中の照射欠陥の形成過程における電場の効果を明らかにすることを目的とし、電場中でイオン照射を受けた MgO・Al₂O₃ 中の転位ループ形成過程を透過電子顕微鏡(TEM)により調べた。

2. 実験方法

試料には、板面(100)の MgO・Al₂O₃ 単結晶(MTI 社製)を用いた。超音波カッターを用いて試料を直径 3 mmφに打ち抜き、回転研磨によって厚さ約 100 μm に加工後に、試料表面に電極としてTiを蒸着した。九州大学応用力学研究所のタンデム型イオン加速器で照射実験を行うために、図 1 に示すファラデーカップおよびフランジを製作した。図 2 に示す電場印加用加熱ホルダー(日本電子株式会社製)に試料を装着し、2.4 MeV Cu²⁺イオンを 300 kV/m の電場中もしくは非電場中で照射した。このときの照射温度は 873 K、照射線量は 4.4 × 10¹⁹ ions/m²とした。照射試料から TEM 観察用断面薄膜試料を製作し、TEM で観察を行った。

3. 結果および考察

図 3 に 300 kV/m の電場中、もしくは非電場中で 2.4 MeV Cu²⁺イオン照射した MgO・Al₂O₃ の断面試料の弱ビーム暗視野像を示す。いずれの試料においても、2.4 MeV Cu²⁺イオンの飛程近傍(1.5 μm)の領域に高密度の欠陥集合体が形成されている。0.5 μm 以下のイオン入射表面近傍の領域においては、電場中で照射した試料にのみ比較的大きな転位ループが低密度で観察される。この領域を拡大した明視野像を図 4 に示す。電場中で照射した試料では、深さ約 0.2 μm において直径約 8 nm の転位ループが形成されているが、非電場中で照射した試料では同程度の深さの領域にほとんど転位ループは形成されていない。以上の結果は、表面付近における欠陥集合体の形成過程は電場の影響を受けていることを示唆している。

4. 結論

- (1) 電場中でイオン照射が可能とするためのホルダー装着フランジおよびファラデーカップを製作した。
- (2) イオン照射した断面観察試料では、300kV/m の電場中で照射した試料にのみ、試料表面付近に大きな転位ループが確認され、格子間原子の離合集散過程に電場が影響していることを示唆する結果を得た。

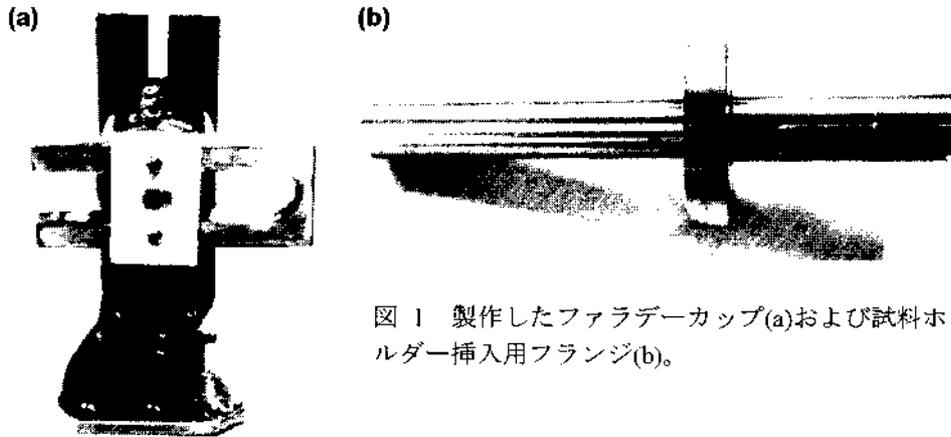


図 1 製作したファラデーカップ(a)および試料ホルダー挿入用フランジ(b)。

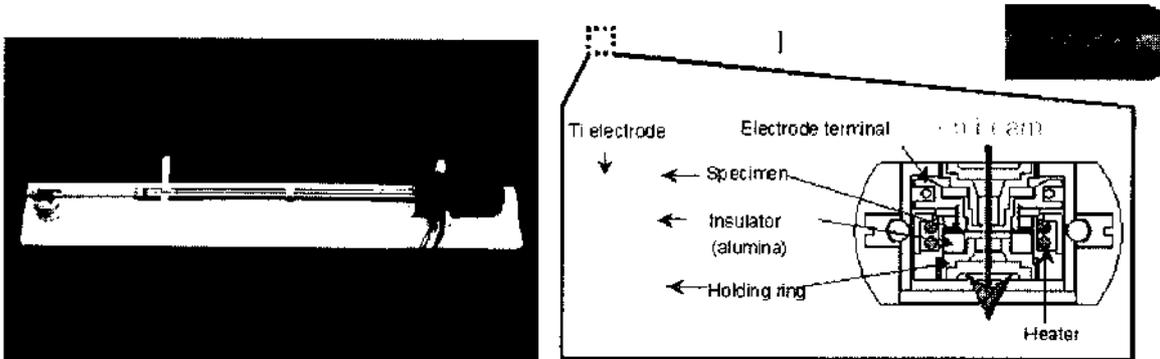


図 2 電場印加用加熱ホルダーの全体図 (左) および概略図 (右)。

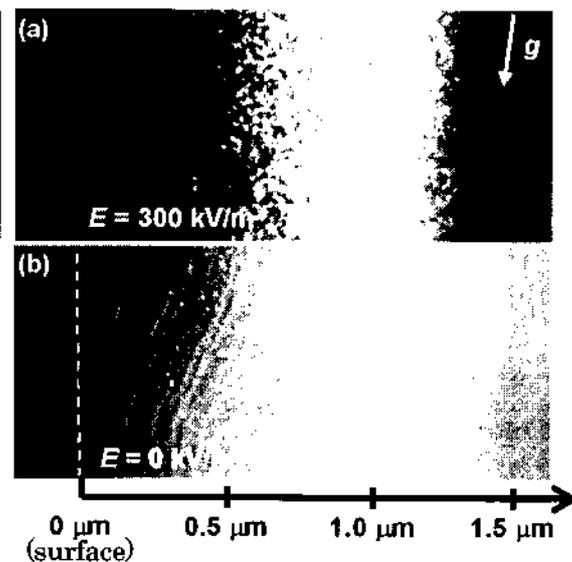


図 3 300 kV/m の電場中(a)および非電場中(b)で 2.4 MeV Cu^{2+} イオン照射した $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ の弱ビーム暗視野像。

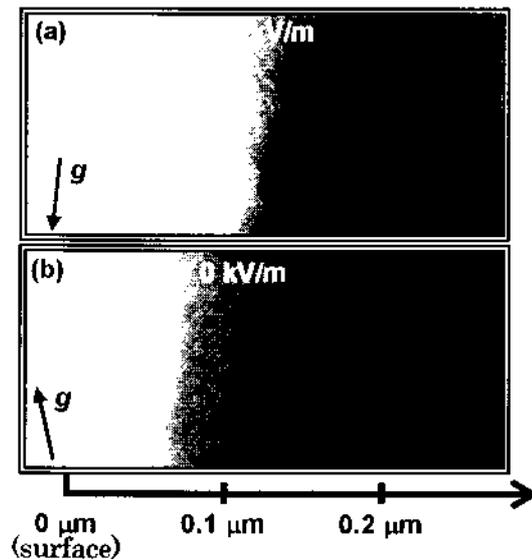


図 4 300 kV/m の電場中(a)および非電場中(b)で 2.4 MeV Cu^{2+} イオン照射した $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ の明視野像。

【目的】

核融合炉壁材料の照射損傷では核分裂炉に比較して一桁以上大きい核融合中性子エネルギー (1.4 MeV) によって 1) 高いPKAエネルギーに伴う原子多重衝突 (カスケード) の発生のほか 2) 原子核反応 (n, α) によるヘリウム原子の発生、および 3) 材料原子の核変換による合金効果などによって生じる材料の組織変化への影響が重要である。従来これらのうち部分的ないくつかの要素機構については多くの研究がなされているが、それらを総合して組織変化の定量的予測に結びつける試みについては、なお現象論的段階を多くは出していない。

以前に我々は1) のカスケードに伴う格子欠陥の発生と、それらの離合集散によって生じる欠陥クラスターの変動過程を、統計的に記述する一般的な方法を提案し、これら変動の効果は、とくに欠陥クラスターの核発生段階で大きく、それを通じて組織変化に及ぼす影響が大きいことを指摘した[1, 2]。しかしこの計算ではクラスター寸法を連続量により近似する方法が採られており、それはとくに微小クラスターに特徴的な整数的特性の取り扱いに問題を残していた。さらに2) のヘリウムの効果についてもこの段階で大きいことが知られている。従って本研究では微小クラスターの整数的特性とともに、これらに及ぼすヘリウム原子の効果をも考慮に入れる方法を発展させる。

【方法】

いま問題における現象の変化速度に着目して、これらをいくつかの段階に分け、各段階について統計的な考察を行う。1) カスケード発生の原子衝突過程。2) 移動速度の大きい点欠陥：格子間原子 (I) および格子間ヘリウム原子 (He)、の拡散過程。3) 移動速度のより小さい点欠陥：原子空孔 (V) および置換型ヘリウム原子 (VH)、の拡散過程。4) 不動クラスター：ポイド型 (V_n)、(V_nH_m) およびループ型 (I_n)、(V_n)、ここにn, m > 1はクラスターに含まれる点欠陥の数、への点欠陥吸収によるクラスターの成長過程の各段階である。

図1に一個の不動欠陥クラスター (r = 0) の周りに発生するカスケードの時間空間的位置、位相空間 (r, τ)、を示す。ここで単純ポイド型クラスターV_nのV吸収による成長について方法を例示する。いま (r', τ') に発生したカスケードから点欠陥 (Vを仮定) が拡散しその先端が (r = 0, τ = τ_μ) に到達してクラスター (ポイドV_nを仮定) への吸収が開始される。

まずVの拡散については近似的に箱型分布 (球形内一様分布) を仮定。Vの吸収によってV_nがV_{n+i}に成長する確率F(n+i, t)の時間的变化は反応速度式により

$$(d/dt) F(n, t) = -K_n F(n, t),$$

$$(d/dt) F(n+i, t) = -K_{n+i} F(n+i, t) + K_{n+i-1} F(n+i-1, t)$$

ここに反応係数K_nは拡散係数D_v、Vの分布密度C_v(t) および形状係数k_nを用いて K_n = k_nD_vC_v(t) と表される。K_{n+i}がK_nに近い場合には $\int_0^{\tau} K_n d\tau = H_n = A$ として F(n+i, τ=0) はポアソン分布 exp(-A) Aⁱ/i! により近似される。なお両者の差が大きいときには正確な積分値を用いて補正する。一般に照射組織は種々の型の欠陥クラスターの平均サイズ分布密度P(n, t)によって表されその確率過程的發展はChapman-Smoluchowskyの式

$$P(n, t) = \sum_m T(n, t; m, t - \Delta t) P(m, t - \Delta t) \quad (1)$$

によって記述される。ここに遷移確率 T は

$$T(n, t; m, t - \Delta t) = \iint (4\pi/3) p r^2 dr dt \sum_i F(m+i, \tau=0)$$

p はカスケードの位相空間 (r, τ) 内発生確率密度であり、 Δt は相関時間であり位相空間 (r, τ) 内の積分 $\iint p(4\pi/3) p r^2 dr d\tau = 1$ の条件より決められる。つぎに (1) 式は相関時間 (Δt) のマルコフ過程として Fokker-Planck の式により近似される。その際輸送係数は際時間間隔 Δt 内のクラスターサイズの増分 $\Delta n = (n - m)$ の平均値および平均分散により表されるがそれらは遷移確率 T を用いて表される [1]。次にヘリウムを発生する照射場ではヘリウムを含む複合欠陥クラスター $V_n H_m$ の変化が問題になる。これには n, m の 2 変数を含む 2 次元の分布関数 $P(n, m, t)$ および確率密度 $F(n+i, m+j, t; n, m, t')$ が必要である。これらについてカスケードに伴う点欠陥 V, I の吸収過程については上述と同様にして取り扱うことができる。しかしカスケード特性に関係の少ない H_e および VH_e の吸収については別の反応過程を考える必要がある。これらを分類してクラスターの成長を論じることができる。

格子間原子クラスターおよび転位網の形成 格子間原子クラスターの形成についてはカスケード形成初期の力学的過程において形成されると推定されている可動性クラスター（クラウドイオン型格子間原子と推定される）の役割が重要である。しかしこの型のクラスターは移動の初期段階で通常型の格子間原子クラスターに転化すると考えられる。したがってこれは残留クラスターの形成としてモデル化される必要がある。さらにこれらクラスターの成長による転位網への発展のモデルをも考慮する必要がある。

[結果および結論]

1) 高エネルギー中性子照射に特徴的なカスケードの発生、それに伴う多数の移動性点欠陥の発生と離合集散によって多種類の不動欠陥集合体が形成され変動的に成長してゆく過程に対し、これらを統計的に記述する理論を発展させ、特に微小クラスターの整数性を考慮に入れる方法を提案した。

2) さらにヘリウムの発生を伴う照射の場合については、ヘリウムを含む複合クラスターの発生成長に対する分析を行い同様の理論を発展させ、これらの過程に及ぼすヘリウムの著しい効果に説明を与えた。

3) 長期照射による組織変化に対する確率化定論的表式が得られ、各種クラスターの核発生および成長の長期的変化に説明を与えると共に、これらは現状では実験できない照射効果に対する定量的な予測手段を与えるものと考えられる。

研究協力者 九州大学応用力学研究所 吉田直亮 岩切宏友

文献

[1] K.Kitajima, J. Nucl. Mater. 133&134(1985) 64.

[2] K.Kitajima, J. Nucl. Mater. 191-194(1992) 1166.

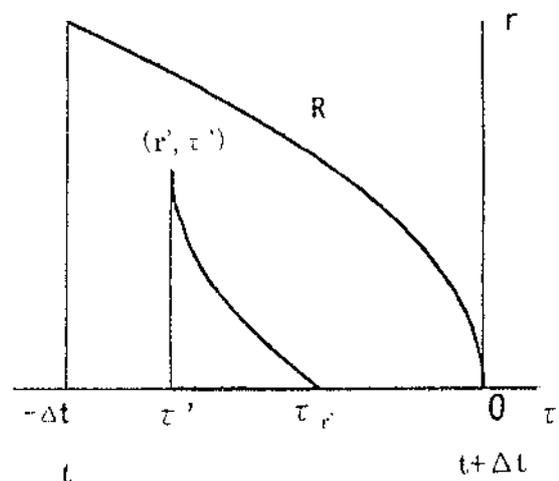


図1 一個の不動欠陥クラスター ($r=0$) の周りに発生するカスケードの時間空間的位置の位相空間

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、今村好男

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イオン照射の影響を究明するとともに、カーボンアロイと銅との接合材などとの比較検討もを行い、高性能プラズマ対向機器の開発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ステンは、アライドマテリアル(株)製の純タングステン応力除去材(純度 99.5%)であり、耐熱性や機械的性質に富み、化学的にも安定な高融点金属材料である。タングステン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 1273K、40 分間保持、小さな接合圧力 (0.014MPa) を加えた条件で、タングステン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、中間材としてニッケル板 (1.0mm) またはモリブデン板 (1.0mm) 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 10mm、横 5mm、厚さ 1mm) 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、5.5nA のイオンビーム電流で、銅イオン (Cu^{2+}) を、タングステンの場合 1.0dpa および 10dpa になるまで、接合界面近傍の表面に照射試験を実施した。その飛程は 350nm である。

機械的的特性の変化は、超微小押し込み硬さ試験機 (DUH-201) により、対稜角 115 度の Berkovich ダイヤモンド圧子を用いて、ダイナミック硬さを測定した。ダイナミック硬さ D_b は、ビッカース硬さに対応しており、次式で定義される。

$$D_b \equiv \alpha L/h^2 \quad (1)$$

ここで、L は試験荷重 (mN)、h は圧子の試料への押し込み深さ (μm)、 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、タングステンと銅との接合材に対する押し込み硬さ試験の結果 (照射温度 573K、Cu イオン照射) を示す。接合界面から離れたタングステン部分 (0mm ~ 2.0mm) では、ダイナミック硬さが未照射から 1.0dpa、10dpa と照射量の増加に伴って、硬さの値がほとんど変化していない。しかし、照射材においては、その硬さのばらつきが大きい。この理由としては、高温において、照射欠陥が結晶粒界に拡散し、欠陥集合体の形成や消滅などが起こり、硬さの測定位置に

より、欠陥集合体や回復部分であったためと考えられる。同様に、接合界面から離れた銅部分(3.0mm～5.0mm)でも、573K の高温照射においては、ダイナミック硬さが照射量の増大に伴って、ほとんど変化しなかった。

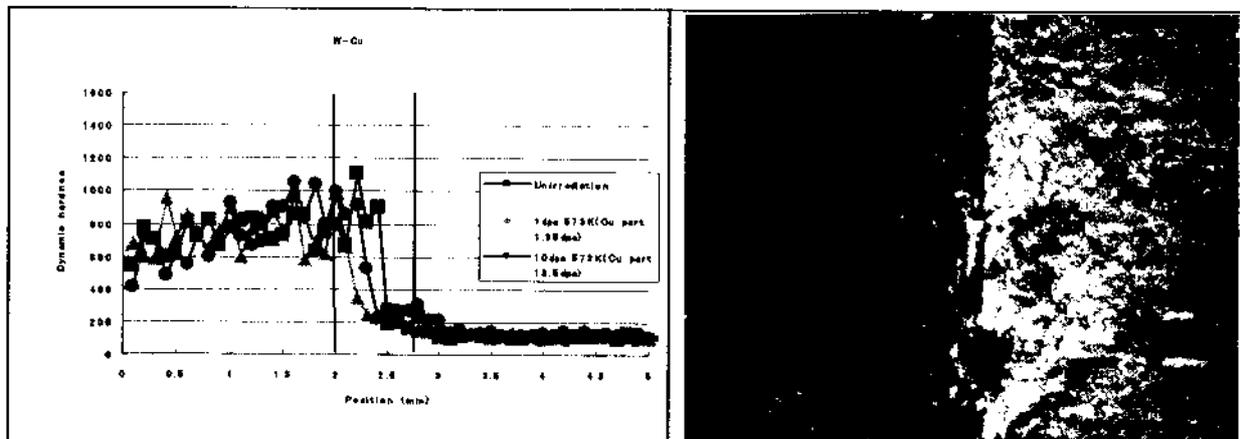


Fig.1 Dynamic hardness after irradiation at 573K. Fig.2 SEM image after 10 dpa irradiation at 573K. $\bar{1}\mu\text{m}$

一方、接合界面(2.0mm～3.0mm)は、未照射材においては、接合領域のタングステン側の接合界面で最大の硬さを示した。硬さの最大値を示した理由は、接合時の残留熱応力のためと考えられる。また、接合層内のダイナミック硬さは、未照射材と比較して 1dpa 照射材では硬さは増加しているが、10dpa 照射材ではダイナミック硬さが未照射材と 1dpa 照射材の中間の値となった。10dpa 照射材では、硬さが増加する最大の照射量を超え、ポイドのような硬さを減少させる欠陥の密度が高くなり、かつそのポイドが接合時の残留熱応力も緩和するため、硬さが最大値から減少傾向に転じたと考えられる。

Fig.2 は、一例として、タングステンとニッケル中間板との接合界面(照射温度 573K、10dpa の Cu イオン照射)の SEM 観察写真を示す。まず、接合界面には、亀裂などがなく、良好な接合が確認できる。本研究における接合方法によれば、タングステンダイバータ機器などの製作が可能になる。また、接合界面およびタングステン部分の表面には $1\mu\text{m}$ 以下の凸凹があり、表面スパッタリング損傷が確認できる。この表面損傷量は、室温照射の場合より明らかに少なく、高温照射では、表面損傷が抑制されることが分かった。

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 No.9, 九州大学応用力学研究所, (2006), 156-157.
- 2) 車田 亮、今村好男、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共同利用研究経過報告書, (2006.7), CD-II-3, 20.
- 3) A.Kurumada, Y.Imamura, T.Oku, K.Sawa, T.Shibara, S.Baba, J.Aihara and S.Hanawa, JAEA-Review 2006-029, JAEA-Tokai TANDEM Annual Report 2005, JAEA, (2006.9), 107-108.
- 4) T.Oku, A.Kurumada, Y.Imamura and M.Ishihara, Effects of Ion Irradiations on the Hardness Properties of Graphites and C/C Composites by Indentation Tests, 7th International Nuclear Graphite Specialists Meeting, Oak Ridge, USA, (2006.9.10-13).
- 5) 外川賢、車田亮、渡辺英雄、吉田直亮、他、日本機械学会関東支部茨城講演会, (2006.9.15), 11-12.
- 6) 車田、今村、渡辺、吉田、他、タンデム領域の重イオン科学研究会、東海, (2006.12.14-15).

5. 研究組織

茨城大学工学部： 車田 亮 (助教授)、今村好男 (講師)

九州大学応用力学研究所： 渡辺英雄 (助教授)、徳永和俊 (助教授)、吉田直亮 (教授)

茨城大学大学院： 外川 賢 (M2)

金属-Al₂O₃ 界面および酸化物-Al₂O₃ 界面におけるイオンビームミキシング

大阪府立大学大学院工学研究科 岩瀬彰宏

1. はじめに： 高エネルギー重イオン照射下においては、材料中の原子系や電子系が高密度励起状態になる。それらの急激な緩和過程に伴い、異なった物質同士の界面では、双方からの原子の拡散によりミキシングが生ずることがある。この現象をイオンビームミキシングと呼んでいる。この現象は、通常の熱平衡下では起こり得ない照射に伴う特徴的なプロセスである。したがって新しい物質相形成への応用が考えられる。しかし、この現象を支配するパラメータは多く、その機構についての十分な理解は未だ得られていない。そこで、金属-酸化物、及び、酸化物-酸化物界面におけるイオンビームミキシングの差を議論して、その基礎過程の理解を得ると共に、物質創製へ向けての基本データを構築することを、本研究の目的とする。
2. 実験： 本実験では、サファイア基板の上にビスマス(Bi)を蒸着した系、および同じくサファイア基板の上にセリア(CeO₂)をコーティングした系を用いた。サファイアとビスマスの融点は大きく異なること、そして、サファイアとセリアの融点はいずれも高温であるため、双方とも通常の温度での熱処理で両者をミキシングさせるのは非常に困難であると考えられる。2種類の試料は、九州大学応用力学研究所タンデトロン加速器においてエネルギー2.4MeVの銅イオンを照射した。照射温度は室温、ビーム電流は15ナノA、ビーム径は約4mmであった。照射した試料は大阪府立大へ持ち帰り、IBA9900加速器を用いてラザフォード後方散乱分光法(RBS法)による測定を行った、用いたヘリウムビームのエネルギーは2.4MeVである。
3. 実験結果と考察： 図1に、ビスマスをコーティングした試料を銅イオンで照射した後RBSピークを測定した結果を、銅イオン照射しない試料のRBSスペクトルと比較したものである。照射によるRBSピークの変化はほとんど見られない。これは、本実験で用いた程度の照射量では、アルミナとビスマスの界面での原子のミキシングは起こらないことを意味するものである。一方、100MeV領域のイオンを照射した酸化物-酸化物界面の場合、照射イオンの高密度電子励起によってターゲット原子にエネルギーが与えられ、その結果、イオンビームミキシングが起こることが見出されている[1]。低エネルギーイオンの場合の酸化物-酸化物海面でのミキシングはどうなるかを見るために2.4MeVの銅イオン照射したCeO₂/Al₂O₃界面でのRBS測定を行うことは大変興味深い。照射実験はすでに終わっており、RBS測定に関して現在準備中である。

参考文献

- [1] W. Bolse, B. Schattat, A. Feyh, T. Renz, Nucl. Instr. Meth. B218(2004) 80-88.

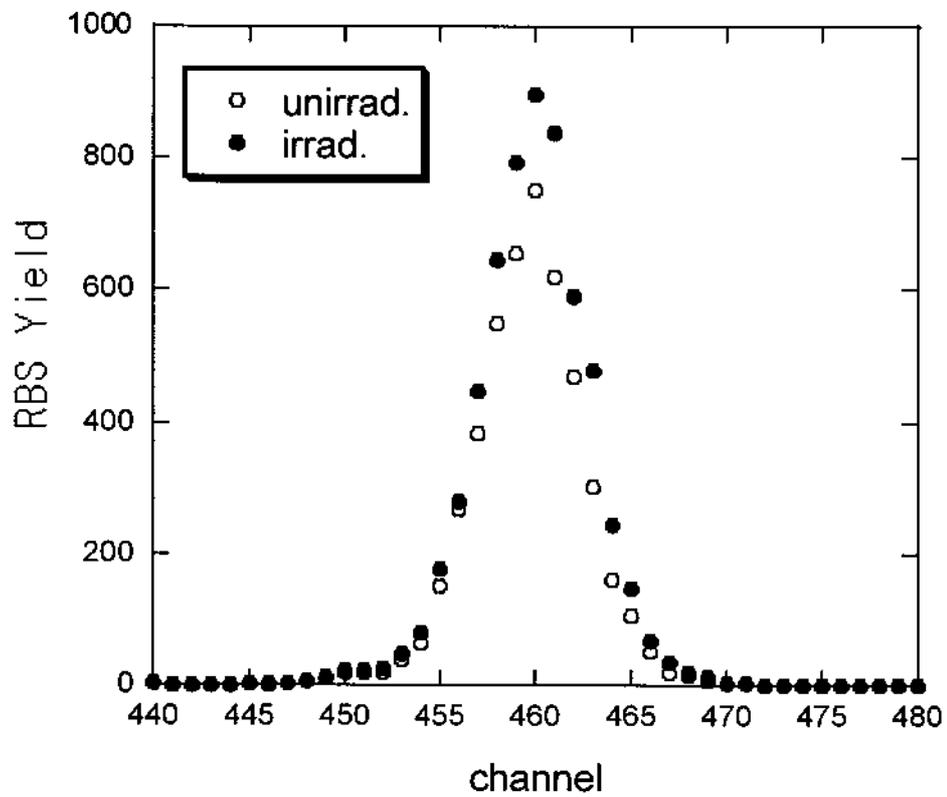


図 1

2.4MeV銅イオンを照射した試料と未照射試料に対するRBSスペクトルの比較。ビスマスに対するピークのみを示す。

TRIAM-1M および小型 PWI 実験装置における高周波波動伝搬および電流駆動の検討

有明工業高等専門学校・一般教育科 竹内伯夫

【研究目的】

核融合プラズマ研究において、定常プラズマを維持するために非誘導電流駆動の開発・研究が必要不可欠である。現在、高周波電磁波動を用いた電流駆動法や中性粒子入射を用いた電流駆動法などが提案され、実験が行われている。TRIAM-1M においても低域混成波、電子サイクロトロン波を用いた電流駆動が行われ、実績を上げてきた。一方、理論計算において九州大学の小型 PWI 実験装置において電子サイクロトロン/パーシュタイン加熱・電流駆動の研究が盛んに行われているが、3次元波動伝搬解析コード「TASK」は核燃焼プラズマ統合コードとして進展しており、各大学・研究機関において統合コード構想への活動が活発に行われている。電流駆動の実験と波動伝搬解析による理論との両面から考察することにより、非誘導電流駆動の研究のさらなる発展が期待できる。そのために、波動伝搬解析モジュール「TASK/WR および WM」を用いて、既存の核融合実験装置や小型 PWI 装置における高周波波動伝搬解析、電流駆動の検討を進めてゆく。

まずは光線追跡のためのコード「TASK/WR」を用いてイオンサイクロトロン周波数帯 (ICRF) の速波を用いた波動伝搬に関して検討する。速波による電流駆動は伝搬特性がプラズマ密度に依存しない特長があり、各大型装置で実験が行われている。平成 18 年度は簡単なトカマクモデルを用いて ICRF 速波に関して光線追跡の解析を進め、TASK/WR の改善点を明らかにした。

【計算方法・原理】

光線の位置ベクトル \vec{r} と波数ベクトル \vec{k} は

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = -\frac{\partial G}{\partial \vec{k}} \bigg/ \frac{\partial G}{\partial \omega}, \quad \frac{d\vec{k}}{dt} = \frac{\partial G}{\partial \vec{r}} \bigg/ \frac{\partial G}{\partial \omega} \quad (1)$$

で表される 2 つの方程式 (ω は波の振動数) の時間発展を解くことによって求めることができる。ここで $G=0$ は波の分散式を示す。磁場方向に z 軸、 z 軸から x 軸の方向に θ ずれた方向に波数ベクトルをとると、熱いプラズマの分散式は

$$G = \begin{vmatrix} K_{xx} - N_z^2 & K_{xy} & K_{xz} + N_x N_z \\ K_{yx} & K_{yy} - N_x^2 - N_z^2 & K_{yz} \\ K_{zx} + N_x N_z & K_{zy} & K_{zz} - N_x^2 \end{vmatrix} = 0 \quad (2)$$

と表すことができる。ICRF 速波においては冷たいプラズマの分散式

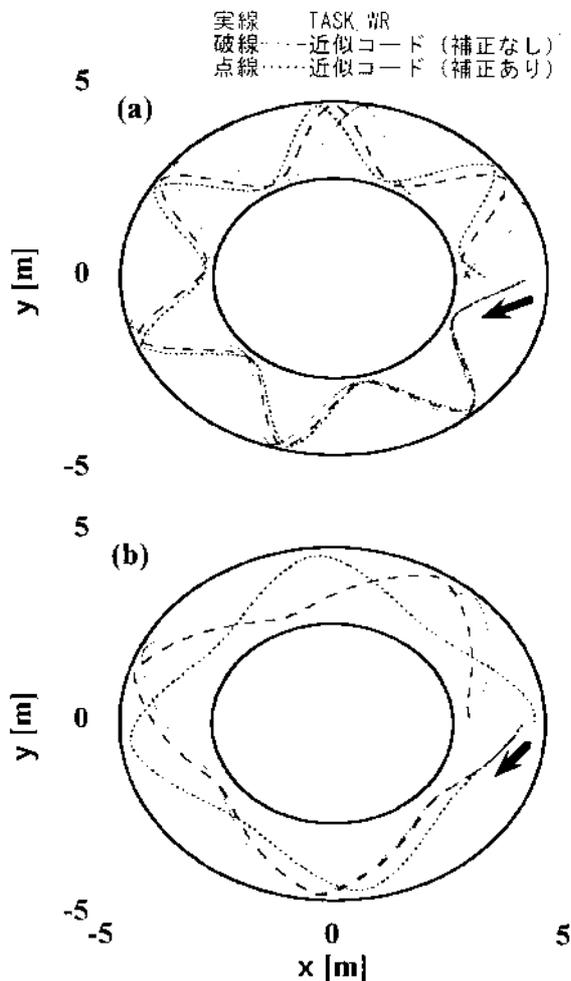
$$G = \text{Re} \left[(K_{xx} - N_z^2)(K_{xx} - N^2) + K_{xy}^2 \right] = (S - N_{||}^2)(S - N^2) - D^2 = 0 \quad (3)$$

と近似することが慣用的に行われている^[1-2]。TASK/WR コードでは (2) 式を用いて光線を追跡しているが、(3) 式を用いた計算コードによる計算結果と比較することで、分散式の近似による光線追跡の影響が確認できる。また、光線追跡法では(1) 式を数値的に解く際に $G=0$ が満たされるように光線を追跡してゆくが、実際の計算では G の値が変動し、0 から大きく外れていることがある。ICRF のように、波長が実験装置に比べて長い周波数帯では WKB 近似が成り立たない可能性があり、理論計算には注意が必要である。

【計算結果】

計算条件として、プラズマ大半径 3.6m、プラズマ小半径 1.0m、ポロイダル磁場が存在しないトカマク

モデルとし、 $x=4.1\text{m}$ 、 $y=0\text{m}$ の地点から水平方向に波を入射させた。ステップの刻み幅は 1.0mm とした（波長に比べて十分に小さい）。2つの場合、すなわち (a) 周波数 38.47MHz 、磁場 1.5T 、磁場に平行方向の屈折率 $N_{\parallel}=6.2$ （大型実験装置 LHD において電子加熱とイオン加熱が競合する条件：実際に行われた ICRF 実験と計算の比較ができるようにこの変数を採用した）と、(b) 周波数 75.0MHz 、磁場 1.5T 、 $N_{\parallel}=8.8$ （LHD において電子加熱および電流駆動が期待できる条件）を適用し、比較した。



2つの異なる N_{\parallel} を計算条件の例としたのは、波がカットオフ層で反射される回数や分散式 G の値の 0 からずれ易さに対する光線軌道の影響を調べるためである。

図は装置の赤道断面に対して計算から得られた光

線軌道を示したものである。実線が TASK/WR による光線の軌道、破線が近似コード（補正なし）による軌道、点線が $G=0$ を満たすように分散式に補正を加えながら追跡した近似コード（補正あり）による軌道である。波はいずれも図の時計回りの方向に伝搬し、一周分のみ示している。

【考察】

2つのそれぞれの図において TASK/WR コードによる軌道と近似コード（補正なし）による軌道とを比較した場合、全体的に見るといずれの条件の場合も2つの軌道が良い一致を示していると解釈できる。軌道の差が見られるのは TASK/WR と近似コードにおいて、適用している分散式が異なるためであると考えられる。次に、近似コード（補正なし）による軌道と近似コード（補正あり）による軌道を比べた場合、同じ分散式を適用しているのに対し、軌道がずれていることが確認できる。近似コード（補正あり）の方が TASK/WR コードによる軌道とのずれが大きくなっており、特に N_{\parallel} の大きい条件 (b) の方では近似コード（補正なし）と比べても大きく軌道が変わっていることが分かる。このことは、分散式の値が 0 からずれてくると、その光線の軌道は $G=0$ を満たす軌道から大きくずれることを示しており、光線追跡長が長くなると TASK/WR コードにも分散式の補正が必要になることを意味している。

今後は、 G の補正を TASK コードに組み込み、本研究の大きな目的である TASK/WM を用いて波動伝搬および電流駆動の検討を進めてゆく。

【参考文献】

- [1] T. H. Stix, "WAVES IN PLASMA", AIP (1992).
- [2] N. Takeuchi, et al., J. Plasma Fusion Res. SERIES 6 (2004).

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) 再結晶タングステン試料の作製：九州大学応用力学研究所においてタングステンの試料片(10 mm×3 mm×0.1 mm)を電解研磨した後、2273 Kで2分間再結晶の熱処理を行った。

(2) プラズマ照射実験：原子力機構において、図1のような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;温度 410 Kである。

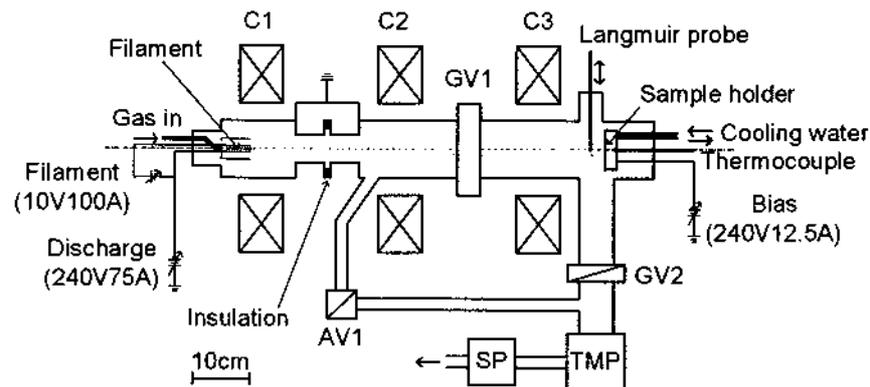
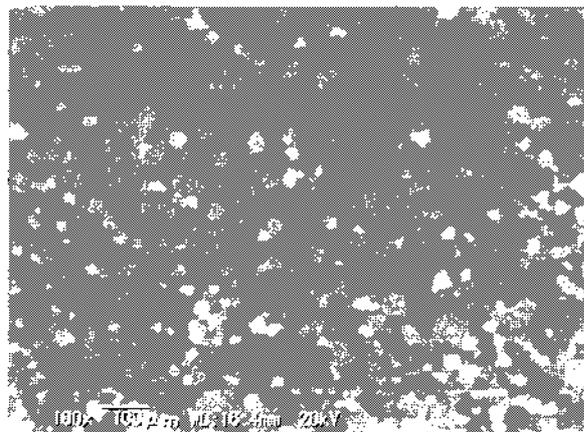


図1 プラズマ照射装置の模式図

(3) SEM観察：原子力機構において、重水素プラズマ照射前後のタングステン表面を観察し、重水素プラズマ照射によるプリスタリングを確認した。また、九州大学応用力学研究所において、昇温に伴うプリスタ爆裂を昇温機構付き走査型電子顕微鏡(SEM)による直接観察を試みた。



3. 実験結果

重水素プラズマ照射前のタングステン表面 SEM 像を図2に示す。再結晶組

図2 重水素照射前の再結晶組織タングステン

織であることを確認した。

重水素プラズマ照射後のタングステン表面 SEM 像を図 3、図 4 に示す。プリスタの形成が確認された。しかし、昇温に伴うプリスタ爆裂を昇温機構付き SEM による直接観察がまだ成功しなかった。

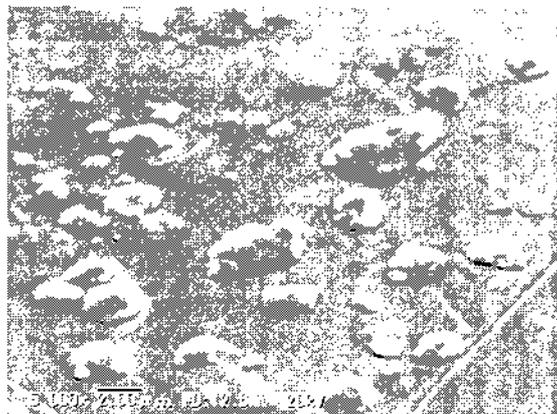


図3 プリスタの SEM 像 (5000 倍)



図4 プリスタの SEM 像 (2500 倍)

4. 考察

形成されたプリスタの特徴は以下のとおりである。

- ① 結晶粒内に多数のプリスタ現れた；
- ② プリスタが多層構造を有している；
- ③ 一部のプリスタに爆裂の跡が見られた。

これらの特徴は、2073 K で再結晶の熱処理を行ったタングステンの重水素照射によるプリスタリング挙動[1-3]とよく一致している。また、プリスタの爆裂に伴い、重水素の爆発的な放出も観測された[1, 3]。プリスタの爆裂と重水素の爆発的な放出は、炉心プラズマへの不純物混入や突発的な水素リサイクリングを引き起こすため、その原因の究明と抑制・制御手法の開発が重要な課題となっている。その研究の一環として、昇温に伴うプリスタ爆裂を昇温機構付き SEM による直接観察が期待される。

5. 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

6. 参考文献

1. *W.M. Shu, E. Wakai and Y. Yamanishi*, "Blister bursting and deuterium bursting release from tungsten exposed to high fluences of high flux and low energy deuterium plasma," **Nucl. Fusion** **47** (2007) 201-209.
2. *W.M. Shu, G.-N. Luo and T. Yamanishi*, "Mechanisms of Retention and Blistering in Near-Surface Region of Tungsten Exposed to High Flux Deuterium Plasmas of Tens of eV," **J. Nucl. Mater.**, (2007) in press.
3. *W.M. Shu, A. Kawasuso, Y. Miwa, E. Wakai, G.-N. Luo and Y. Yamanishi*, "Microstructure dependence of deuterium retention and blistering in the near-surface region of tungsten exposed to high flux deuterium plasmas of 38 eV at 315 K," **Physica Scripta**, (2007) in press.

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はそれほどうまく適用できない³⁾。本研究では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負イオン生成の高効率化を検討した。

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。プラズマグリッド中央に設けた10 μm 単孔より負電流を引出し、磁場偏向型イオン分析器により負イオン電流を測定した。

3. 実験結果および考察

図2にプラズマパラメータの軸方向分布を示す。実験条件は、RF放電電力 $P_{\text{RF}} = 200\text{W}$ 、水素ガス圧 $p(\text{H}_2) = 3\text{ mTorr}$ 、アンテナ直径 $D_a = 12\text{cm}$ 、グリッドバイアス電圧 $V_g = -50\text{V}$ である。グリッドバイアス法の場合には、いずれのメッシュでも T_e は下流側で1 eV程度まで低下し、また n_e は下流側で増加している。特に50メッシュの場合のプラズマ特性は負イオン生成に好都合な空間分布となっている。静電的制御法なのでメッシュ線間隔とデバイ長の関係を無視できないが、幾何学的透過率の高い50メッシュが下流側の高密度プラズマ生成には適している。プラズマ制御に関して、磁気フィルター法の結果を同様に示すが、 T_e はフィルターの前後でほとんど変化せず、下流側でも4~5 eVと高い値を維持している。一方、 n_e は下流側で低下する傾向にあり、負イオン生成を低下させるプラズマ状態となっている。

図3に引出し負イオン電流の放電電力依存性を示す。実験条件は、 $p(\text{H}_2) = 2\sim 3\text{ mTorr}$ 、 $D_a = 15\text{cm}$ 、 $V_g = -50\text{V}$ 、引出し電圧 $V_{\text{EX}} = 1\text{ kV}$ である。エンドプレートの位置 Z_{end} はそれぞれの条件下で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。メッシュによる違いを比較すると、50メッシュでは幾何学的透過率が高いことから n_e も高く、 n_e の増加と連動して負イオン生成量が増えたと考えられる。磁気フィルター法を用いた場合は、図2に示すプラズマ状態からも予測されるように、負イオン生成は少なく、従って引出し負イオン電流も小さい。

磁気フィルター法での負イオン電流はグリッドバイアス法と比較して低くなっており、限られた実験条件下ではあるが、RF放電プラズマ中での負イオン生成高効率化にはグリッドバイアス法が有力であることが確認できた。

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.

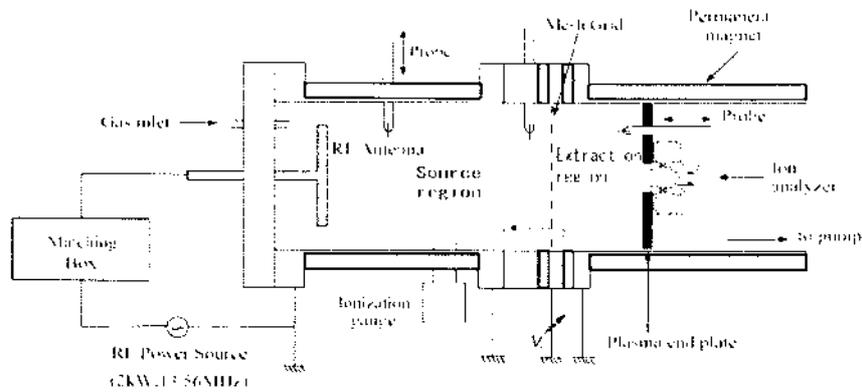


図1 RF負イオン源の概略図

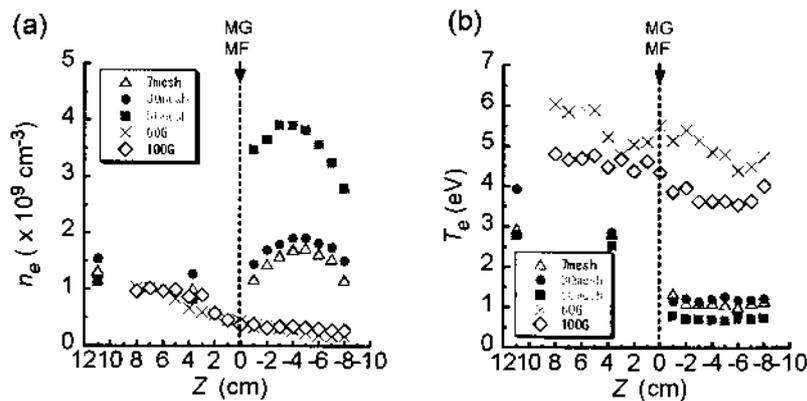


図2 プラズマパラメータの軸方向分布：(a) n_e , (b) T_e .

実験条件： $P_{RF} = 200W$, $p(H_2) = 3 \text{ mTorr}$, $Da = 12cm$, $V_g = -50V$, エンドプレート位置 $Z_{end} = -10.5cm$.

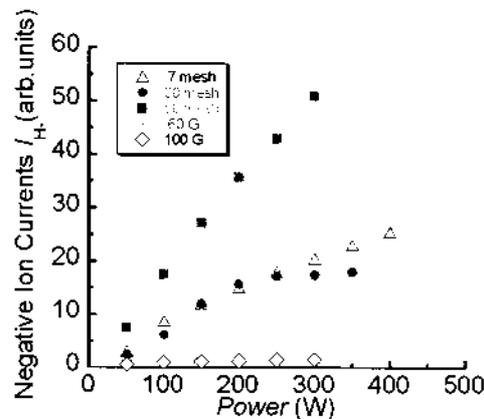


図3 引出し負イオン電流の放電電力依存性

実験条件： $p(H_2) = 3 \text{ mTorr}$ (グリッドバイアス法), 2 mTorr (磁気フィルター法), $Da = 12cm$, $V_g = -50V$, $V_{EX} = 1 \text{ kV}$, $Z_{end} = -4 \sim -6cm$ (グリッドバイアス法), $-4cm$ (磁気フィルター法).

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。しかしながら、CS がなければ初期のプラズマ電流生成が困難なので、実際の ST 実験装置では CS コイルを取り付けておいた方がリスクが小さい。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]垂直磁場と RF 加熱, 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と維持, について調べることを目的としている。本年度は[1] [2]のテーマに関して, 軸方向に長いセンターソレノイド(PF4-2 と PF4-1, PF4-3 を直列接続)と短いセンターソレノイド PF42 の場合について, かつブレークダウンを容易にするためのキャンセルコイルを接続した場合について検討した。

2. キャンセルコイル

キャンセルコイル (CC) 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。(1)プラズマブレー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。(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) 100 kA の定常運転時の平衡に必要な PF2 の起磁力を若干補うことができる。(4) プラズママーキング実験が今までの MAST や UTST 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, ブレークダウン, 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, さらに進んだマーキング実験が期待できる。

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, PF4-3 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は 5 巻きと少なくてもよい。サポートの構造も考えて実際に設置できる箇所においたキャンセルコイルの巻き数とヌル点の位置の計算結果を図 1 に示す。この場合, RF の共鳴点は 0.54m の位置にできるが, トロイダルドリフトによる電場の結果プラズマはトラス外側に (CPD の場合 20cm 程度) 広がるので, 0.68m にヌル点を作ってもプラズマは十分に存在すると考えられる。その結果, キャンセルコイルを 5 巻に選んでおけば, オーミック放電中に CS の漏れ磁場を補正する必要がなくなり制御が楽になる。キャンセルコイルの 3 次元イメージ図を図 2 に示す。

キャンセルコイルの位置は少し異なるが, そのときの放電波形を図 3 に示す。CS の漏れ磁場を打ち消しているため PF4-2-1-3 電流が増加しても, 垂直磁場コイル電流 PF1, PF2 は一定でよい。また, パルス長さは CS の磁束のみによってきまる。キャンセルコイルがない場合は, PF1, PF2 コイル電流を時間とともに増大させる必要があり, それらの最大値でパルス長さは決まる。

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

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, 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くことが未知数の多い EBW 入射実験では重要である。PF4-2 コイルとキャンセルコイル (7 巻) 電流を最初逆極性側にふりブレークダウンを起こし, 電流駆動と PF1 コイルの垂直磁場からの寄与も利用して 100kA まで立ち上げ, その後電流駆動効率 $\eta_{CD}=2.0 \times 10^{18}$ A/W²/m, 加熱駆動パワー 500 kW で, 100 kA 程度のプラズマ電流を維持するシナリオが考えられる。プラズマ電流立ち上げフェーズでは PF2 コイル電流の変化が電源電圧の制約によって小さいことが予想されるので, 変化の速い PF1 コイルでまず

プラズマの位置を制御し、その後 PF2 コイル電流が立ち上がってきたら、PF1 コイル電流を下げて平衡をとることが考えられる。この間 PF1, PF2 コイルによる磁場曲率ではあまり垂直位置安定化が期待できないので、水平磁場コイルによる上下位置制御が重要になると考えられる。このことから水平磁場コイルをキャンセルコイルとして使用することは避けねばならない。また、PF4-1 と PF4-3 コイルの電源電圧が足りないため、他のコイルでダイバータ配位を作った後に、ゆっくりと増大させ最終的な配位に持ってゆく。なお、PF2 コイルのインダクタンスが大きいので、その電源電圧とも絡んでさらに詳細な解析が必要である。その結果によっては電源電圧の増強も視野に入れておく必要があるかもしれない。これらの電源電圧の制約をまだ考慮していない場合の放電波形を図4に示す。

3.3. PF4-1, 3 とキャンセルコイルを用いたマーキング実験

PF4-1, PF4-3 とキャンセルコイルを用いて上下に2つのヌル点を作り、そこにプラズマ電流を誘導して作り、それをダイバータコイルで押して、マーキングさせる。同時に垂直磁場を印加しプラズマ平衡をとりつつ、プラズマ電流を増大させる。キャンセルコイルを5巻にすると図5に示すように共鳴点とヌル点が一致する。ヌル点を0.68mに作るには3巻にする必要があるが、コイルを安価にするためにこれは選択しない。このときの各コイル電流の想定波形を図6に示す。

4. 結果と考察

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、実験初期のブレイクダウン時には大きく貢献し、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、EBW 電流駆動の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、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 の核心部分を占める重要なコイルになると考えられるので、最優先で設置することが望まれる。なお、電源電圧の制約をまだ考慮していないので、早急に考慮した上で運転シナリオを再構築する必要がある。

5. 研究成果報告

6. 研究組織

所内世話人：中村 一男 教授

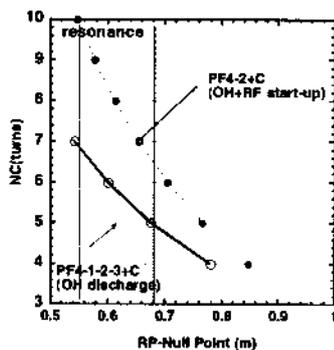


Fig. 1. キャンセルコイルの巻数とヌル点の関係
(コイル中心位置：R=1.7 m, H=1.15 m)

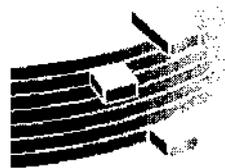


Fig. 2. キャンセルコイルの3次元イメージ

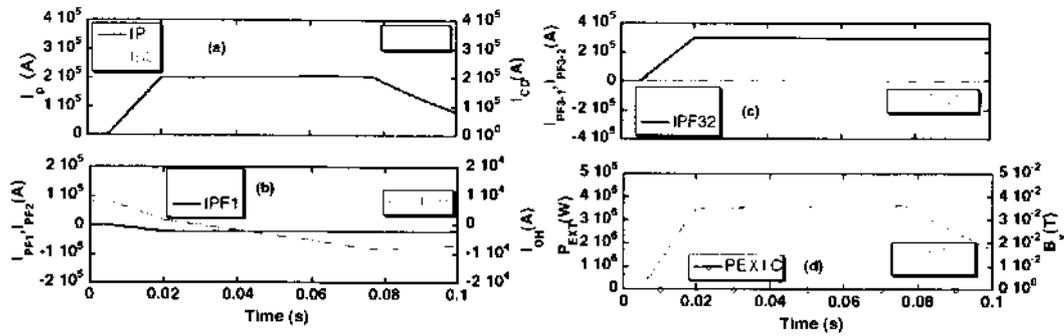


Fig. 3 PF4-2+PF4-1+PF4-3+CC 直列接続CS の場合のオーミック放電波形

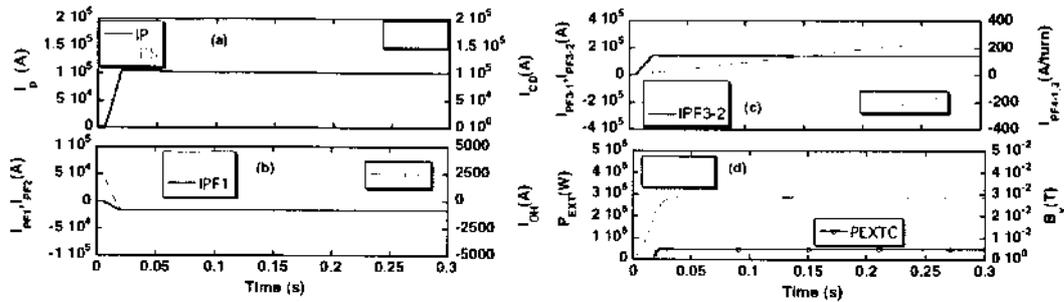


Fig. 4 PF4-2+CC 直列接続CS の場合のオーミック立ち上げによるRF定常維持電流波形

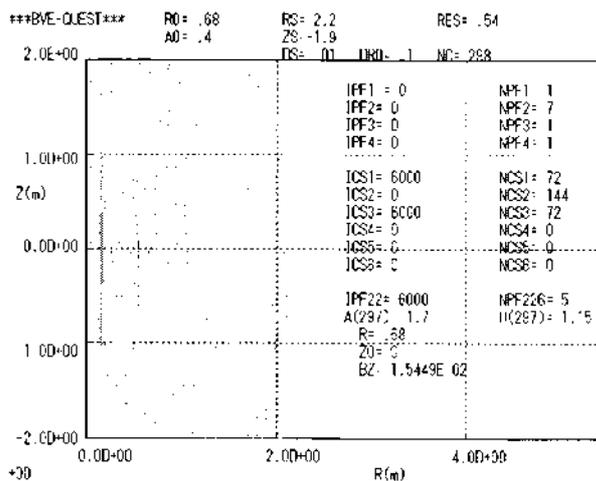


Fig. 5 マージング実験におけるヌル点 (キャンセルコイル5巻のとき共鳴点0.54mにヌル点ができる)

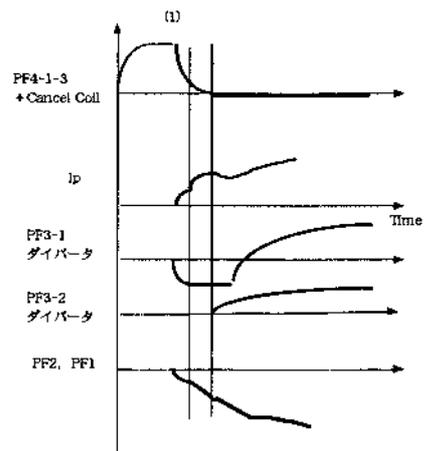


Fig. 6 マージング実験におけるCS-less 立ち上げ運転シナリオの各コイル電流想定波形

重イオン照射された鉄合金の硬さ変化に及ぼす添加元素の影響

(財) 電力中央研究所 土肥謙次、野本明義、西田憲二、曾根田直樹
九州大学応用力学研究所 渡辺英雄

1. 目的

高経年化した軽水炉の圧力容器 (RPV) 鋼や核融合炉の第一壁など高照射を受ける構造材料用フェライト鋼の照射脆化を精度良く評価するには、点欠陥集合体及び固溶元素クラスタの形成メカニズムを明らかにする必要がある。本研究では中性子照射と類似のカスケード損傷を導入する重イオン照射によって鉄合金のクラスタ形成に及ぼす固溶元素、特にシリコン、ニッケル、マンガンの影響を微小硬さ変化に基づき調査し脆化メカニズムに関する基礎的知見を得ることを目的とする。九州大学応用力学研究所に設置された高エネルギーイオン発生装置は鉄イオンが安定して照射できることに加え、独自の透過電子顕微鏡 (TEM) 用試料ホルダーによる即時試料交換及び試料加熱が可能である。本年度は同設備を用いて鉄イオン照射を行った後、電中研に設置の超微小押し込み硬さ試験機による硬さ測定を行って照射に起因する硬さ変化から合金添加元素の影響を検討した。

2. 実験方法

供試材に用いた鉄合金は、Si、Ni、Mn、Cu を添加した Fe-0.6Ni-0.2Si、Fe-0.6Ni-0.7Mn-0.2Si、Fe-0.6Ni-0.7Mn-0.2Si-0.1Cu (元素記号の前の数値は添加量 (wt%) を表す) の三合金である。何れも高純度電解鉄をベースに熔解・調製し、1200°C高温圧延後 900°C x 30 分加熱及び空冷冷却処理を行った。合金は実用 RPV 鋼の転位を模擬するため、圧下率 5%の冷間圧延処理を行い、TEM ディスク (ϕ 3mm、0.2mm²) を試料とし、電解研摩法により表面を鏡面仕上げとした。

重イオン照射は、専用 TEM ホルダーに試料を装着後、高エネルギーイオン発生装置に設置し、2.4MeV の Fe²⁺イオンを、室温及び 288°Cの試料温度に調整後、それぞれ 0.01 及び 0.1dpa の損傷量まで照射を行った。照射後、電中研へ輸送し超微小押し込み硬さ試験機 (エリオニクス社製 ENT-1100a) を用いて、最大荷重 1000mgf にて最大 9 点の硬さ測定を実施した。測定後の硬さ値は、荷重/変位を縦軸、変位を横軸とする測定曲線の試料表面より 50~150nm の範囲の傾きの平均値から算定した。また、このようにして求めた微小硬さ値は、基準片 (純鉄) のピッカース硬さ試験から求めた換算係数からピッカース硬さ値へ換算した。

3. 実験結果

図 1 に室温及び 288°C照射材のピッカース硬さ換算値の損傷量依存性を示す。まず、基準片 (純鉄) のピッカース硬さ (約 80) と比べ、何れの合金も 5%冷間圧延により未照射で硬さが増加しているが、合金間の違いは殆どない。何れの合金種及び照射温度でも損傷量の増加に伴い、明瞭に硬さが上昇することがわかる。

図 2 に室温及び 288°C照射材のピッカース硬さ上昇量 (換算値) の損傷量依存性を示す。室温照射では、0.01dpa まで合金間の硬さ上昇量の違いは認められないが 0.1dpa では Fe-0.6Ni-0.2Si 及び Fe-0.6Ni-0.7Mn-0.2Si 合金の間では有意な差はなく、唯一 Cu を含有する Fe-0.6Ni-0.7Mn-0.2Si-0.1Cu 合金で僅かに硬さ上昇量は小さくなっている。このことから、室温照射では Fe-0.6Ni-0.2Si 合金への

Mn 及び Cu 添加の影響は少なくとも殆ど認められない。一方、288℃照射では、Fe-0.6Ni-0.7Mn-0.2Si-0.1Cu 合金が他の2合金よりも何れの損傷量で硬さ上昇量が大きくなっており、Cu を添加することの効果は明瞭に現れている。また照射温度の影響について、Fe-0.6Ni-0.7Mn-0.2Si-0.1Cu 合金では殆ど効果が現れていないのに対して、他の2合金では高温照射の方が硬さ上昇量は明らかに小さくなっている。このことは、288℃照射では照射欠陥の形成及び熱的回復に起因する欠陥残存率が室温照射に比べ低いものの、Cu 添加合金では Cu を含有する欠陥クラスターが形成されることにより見かけ上照射温度の影響が現れない結果になっているものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、5%冷間圧延した鉄合金への鉄イオン照射による硬さ変化を調べることで、添加元素の影響を調べた。その結果、何れの鉄合金も損傷量の増大により明瞭な増加を示すが、Fe-0.6Ni-0.2Si 及び Fe-0.6Ni-0.7Mn-0.2Si 合金とも合金間の差は殆ど認められず、Cu を含有する Fe-0.6Ni-0.7Mn-0.2Si-0.1Cu 合金では288℃照射において硬さ上昇量が大きくなることがわかった。

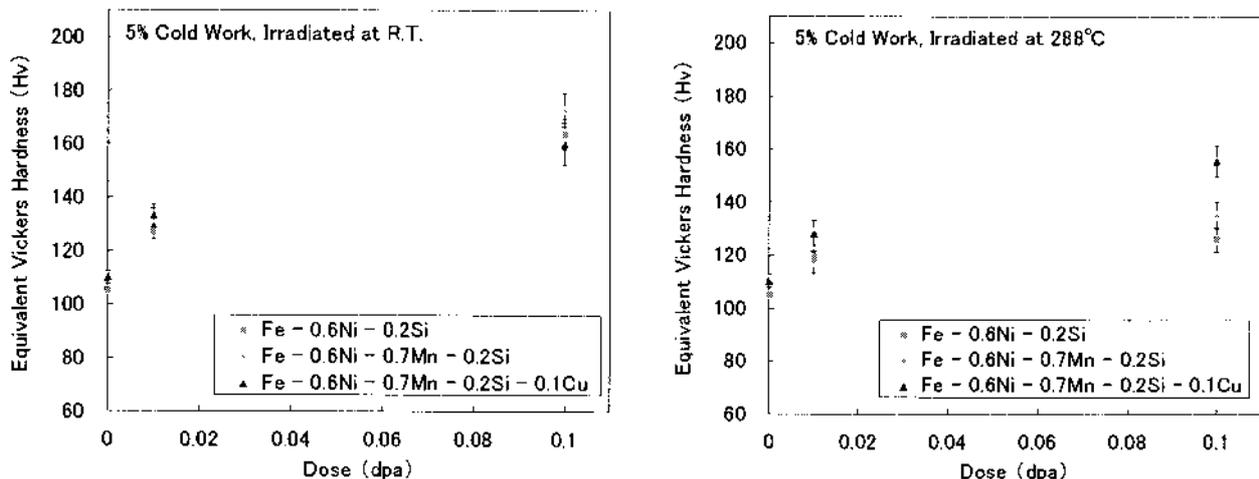


図1. ビッカース硬さ（換算値）の損傷量依存性.

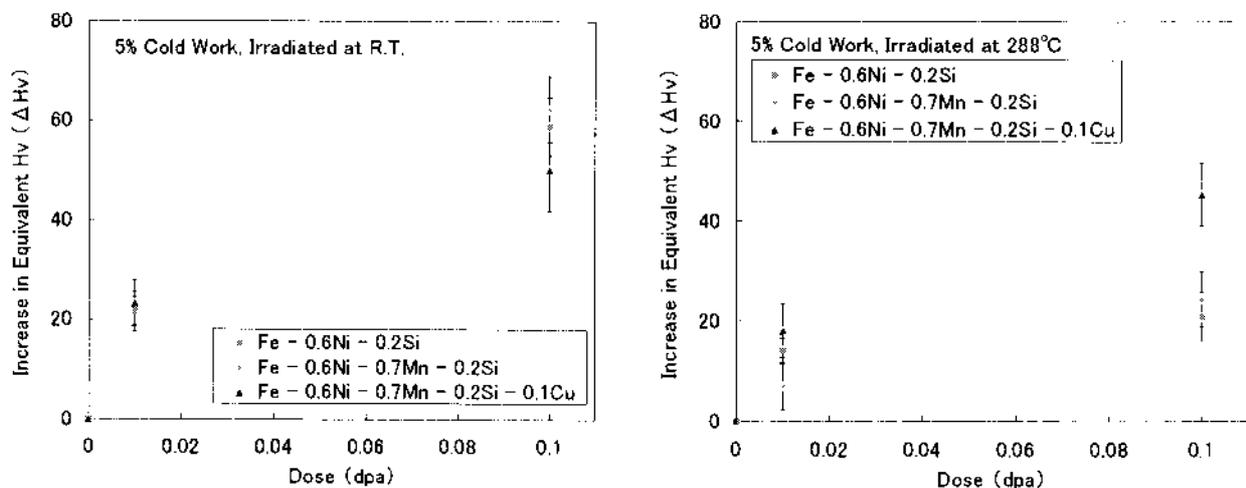


図2 ビッカース硬さ上昇量（換算値）の損傷量依存性.

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

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、プラズマ位置・断面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計算機中で平衡配位を作成し、現状のセンサー数、位置のもとでの CCS 法の精度を検討。
- ②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 法の精度検討

計算機中で平衡配位を作成し、現状のセンサー数、位置のもとでの CCS 法の精度検討を行った。センサーは、図1に示すように磁束ループ計測、磁場計測を用いた。

このセンサーに対して、予め平衡解析コード(ECODE)を用いて正解の位置形状が分かったプラズマの場合の信号を計算しておき、その信号を入力として CCS 計算に与え、得られる形状、磁束分布などを正解と比較することで評価検討を行った。その例を図2に示す。

このように、CCS法の結果は、非常に高精度で小型 ST プラズマを再構築出来ている。両者の誤差は 1%未満である。また、センサーの種類や数を変えた場合でも、同様に精度良く再構築できていることが判る。

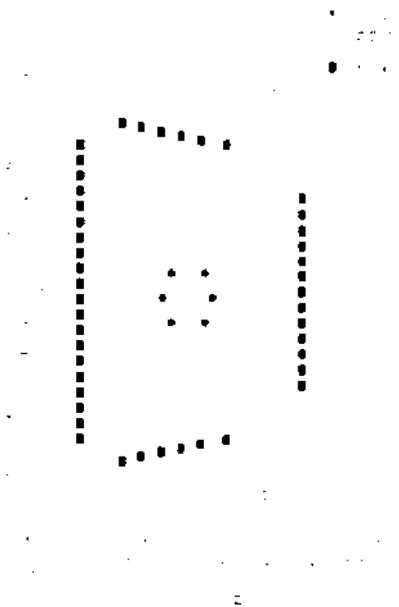


図1 装置体系とセンサー配置例

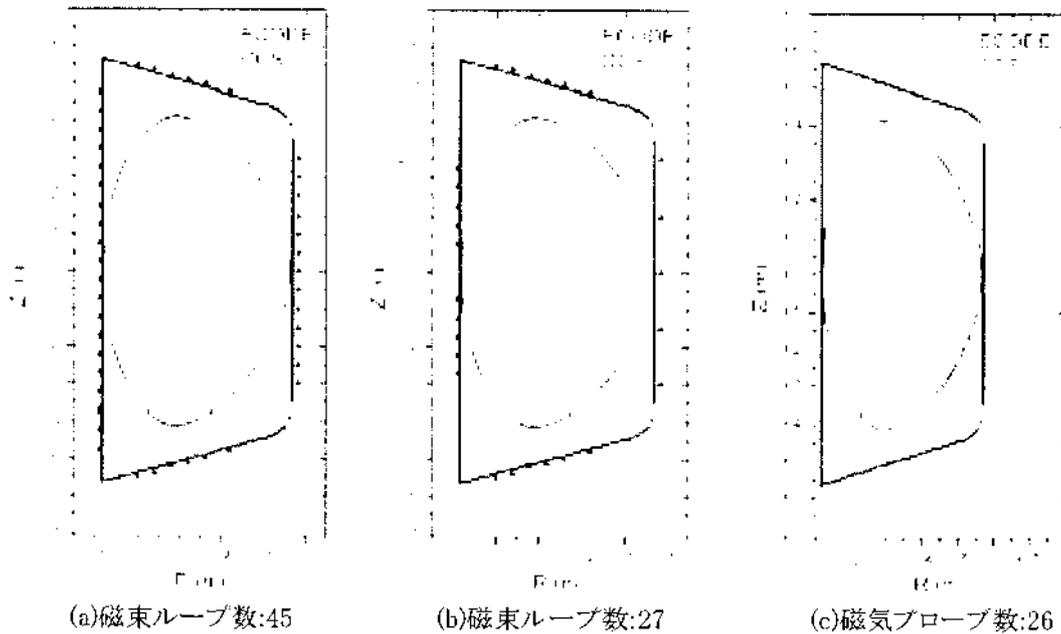


図2 平衡コードと CCS との再構築結果比較

②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

図 3 に現在、JT-60 で稼動中の「実時間プラズマ断面形状再構築動画可視化システム」の構成を示す。CCS 法による演算ロジックを組込んだ PCI バスシステム(6 台)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/PCLVMIC5576, 256KB, 6.2MB/s, VMIC 社製)を用いている。

本システムを九大応力研プラズマ実験装置、新 ST へ適用することを提案する。

Real-Time Plasma Shape Reproduction System(CCS)

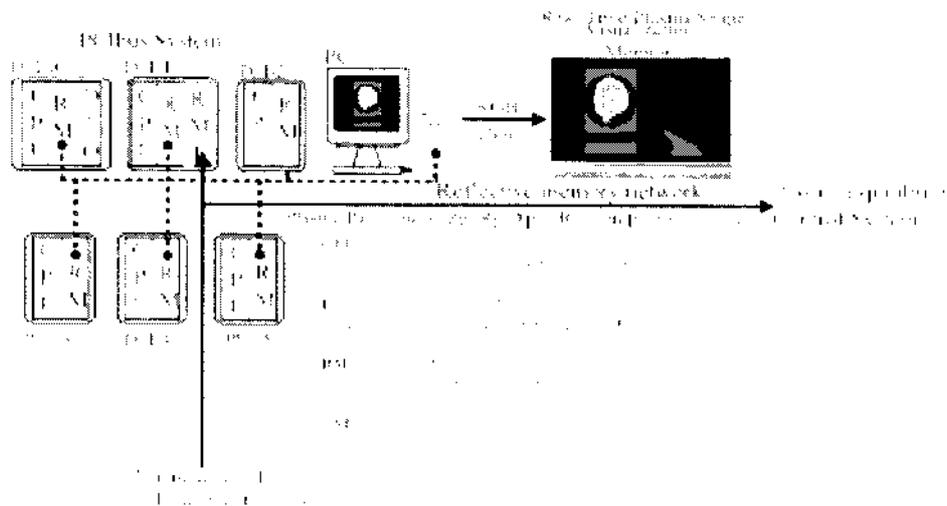


図 3. CCS 法を用いた JT-60 実時間プラズマ断面形状再構築動画可視化システム

1. 研究背景と目的

疲労破壊は安定破壊の範疇に分類されるが、S-N 曲線を用いた寿命評価法には疲労破壊を不安定破壊と考えているという矛盾がある。研究代表者らは、健全部からの疲労き裂発生メカニズムを転位論的考察に基づいて提案し、無欠陥状態部から任意の大きさになるまでのき裂成長曲線を統一的に評価する手法 [1] を確立した。同モデルではき裂発生初期段階を「塑性変形による \rightarrow 剪断モードき裂の出現 \rightarrow き裂開口モードの出現」と考えているが、現時点でこれは仮定に過ぎない。一方、全寿命に及ぼすこの段階の割合は小さくないため、寿命予測精度の向上にはこの段階の定量的予測が不可欠である。そこで、負荷過程中的疲労き裂成長を連続的に直接観察してモデルの妥当性検証を目指した。なお、昨年度までの研究で、提案モデルの一定荷重振幅下における有用性の確認を行ったが、実働構造物・機器に作用する荷重は、通常、変動荷重であるため、提案モデルが変動荷重履歴下においても有用であることを検証することが極めて重要である。応用力学研究所は、本研究の遂行に不可欠な機器である動的疲労観測装置 (SEM 内疲労試験機) を有しており、これを利用して研究を実施した。

2. 観察方法

検討対象材料より切欠 (半径 0.5mm) を一端に導入した試験片を製作し、SEM 内疲労試験機を用いて疲労試験を実施し、切欠底から発生・伝播する疲労き裂を撮影・観測した。板表面の観察によりモデル化の妥当性を検証するためには、出来るだけ板厚を薄くする必要があり、板厚方向に結晶粒が 2~13 個程度しか含まない厚さまで研磨を行い試験片の減厚を行った。供試材は大型溶接鋼構造物での使用頻度が大きい溶接構造用圧延材料 (SM400B) である。

3. き裂成長シミュレーション

実験に先立ち、疲労き裂成長シミュレーションコード FLARP を用いて、実験条件と同様の荷重履歴下におけるき裂成長曲線の推定を行った。作用応力範囲及び推定されたき裂成長曲線を図 1, 図 2 に示す。図 2 には、一定振幅荷重条件下で実測されたき裂成長曲線を黒丸で、FLARP により推定されたき裂成長曲線を破線で示している。図 1 の荷重履歴に対応するき裂成長曲線は実線で示しているが、応力範囲が減少に伴いき裂伝播速度の遅延が生じることが予想される。

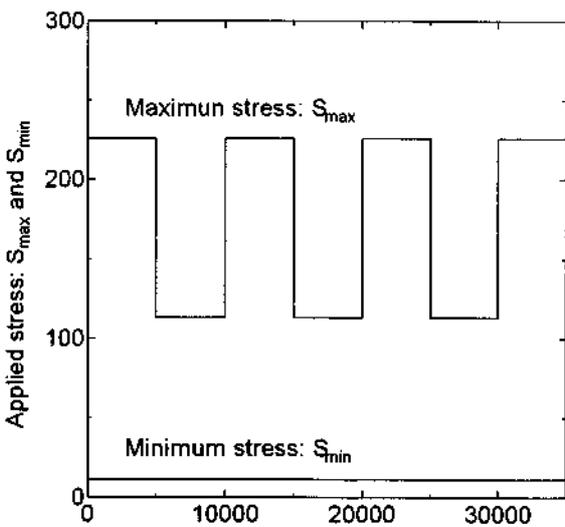


図 1 荷重履歴

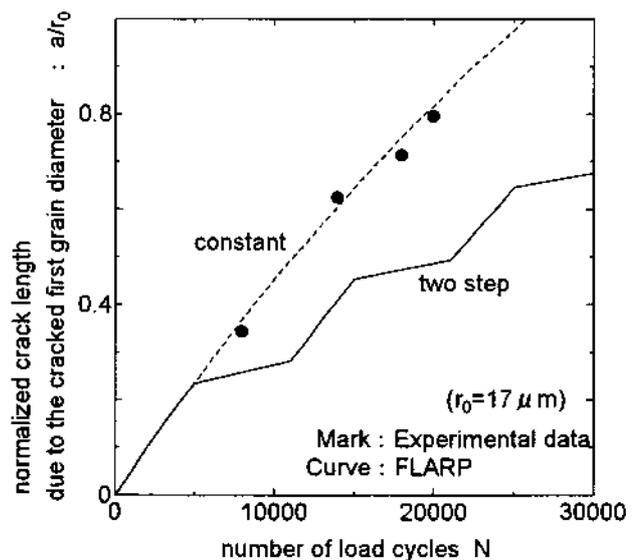


図 2 き裂成長曲線

3. 観察結果

昨年度の観察結果と同様に、切欠底に生じたひびきは荷重軸とほぼ45°方向に生じていた事を確認した。また、通常言われている疲労き裂発生機構と同様の形態でき裂が成長していたこと、Hansonらの提案した刃状転位とひびき線成長に基づく最初の結晶粒内におけるせん断型疲労き裂成長モデル[2]による結果と同様に、結晶方位や初期ひびき線発生角度次第で屈曲型のみ裂成長経路をとりながら疲労き裂が成長していたことが確認された。

しかしながら、今年度の観察では、意図した寸法レベルのみ裂（第一結晶粒内をせん断型で進展するき裂）は観察出来ず、き裂を確認した時点では、既に結晶粒径の数倍のみ裂長さには達していた。

5. 研究成果と今後の課題

動的疲労観測装置(SEM内疲労試験機)を用いて鋼材の疲労き裂発生挙動の直接観察を行い、これまでに提案した疲労き裂成長モデルの妥当性の確認を目指したが、試験装置の不調のために、推定結果との比較を行う事が出来なかった。また、疲労試験機稼働中のSEM分解能の都合上、第一結晶粒内を伝播する疲労き裂を観察する事は容易ではないことも確認出来たので、以下に記述する問題点を克服し、来年度以降に再度実験を行うことを予定している。

- 供試材料の変更：通常の軟鋼は結晶粒径が30 μm 程度のため、板厚方向に複数の結晶が並ぶことを防ぐためには、結晶粒径程度まで板厚を減ずる必要がある。また、粒径が小さいため、第一結晶粒内の伝播き裂を発見するのが容易ではない。そこで、結晶粒径が十分大きい(2mm程度)の一方方向性珪素鋼板から試験片を採取して観察を行うことが有用であると考えられる。
- 応力集中限の限定：これまでに使用してきた試験片では、放電加工により0.5mmの半円状切欠を導入し、これをき裂発生領域としてきたが、これではき裂発生領域が広いとため、き裂を発見したときには、観察を意図している微視き裂の寸法以上になっていることが多かった。この対策としては、切欠半径をより小さくすることが必要である。そのために、集束イオンビーム加工を用いて、十分小さな切欠を導入することを検討する。
- 試験装置の荷重追従性：予備試験を十分行い、試験装置の荷重追従性がより良くなるような加重ゲイン設定を確定させた上で、本試験を行う。(今年度は、板厚を十分薄くした試験片を多数用意出来なかったため、予備試験が十分に実施できなかった。)

6. 研究組織

(研究代表者) 後藤浩二, 九州大学大学院工学研究院海洋システム工学部門助教授
豊貞雅宏, 九州大学大学院工学研究院海洋システム工学部門教授
村上幸治, 九州大学大学院工学府建設システム工学専攻技術職員
堤成一郎, 九州大学大学院工学研究院海洋システム工学部門助手

参考文献

[1] Toyosada, M., Gotoh, K. and Niwa, T., Fatigue Life Assessment for Welded Structures without Initial Defects: An Algorithm for Predicting Fatigue Crack Growth from a Sound Site, International Journal of Fatigue, Vol.26, No.9, 2004, pp.993-1002

[2] Hansson, P. and Melin, S., Dislocation-based modeling of the growth of a microstructurally short crack by single shear due to fatigue loading, International Journal of Fatigue, Vol.27, 2005, pp.347-356

本研究の目的

本研究では小型PWI装置に既設の8.2GHz RF入射システムを用いて、電子バーンシュタイン波(B波)による高密度プラズマの電子サイクロトロン加熱／電流駆動(ECH/ECED)を行なうための最適な電磁波入射条件の検討を行なうことを目的とする。電磁波とB波の間のモード変換効率、モード変換領域の密度勾配と磁場強度、密度変化方向に垂直な屈折率成分の関数として定まる。小型PWI装置で実現され得るプラズマパラメータ領域を探索し、どのような入射条件がB波への高変換効率を得るのに最適かを検討する。

研究の方法

1次元スラブモデルにおいて、電磁波とB波間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行うことで、様々なプラズマの境界パラメータにおいてモード変換過程の特徴を探索できる。この探索結果を用いて、小型PWI装置のプラズマ境界パラメータではどのような電磁波入射条件がB波への高変換効率を得るのに最適化を調べる。

結果

中心磁場 $B_0=0.25\text{T}$, 大半径 $R_0=0.3\text{m}$, 小半径 $a=0.2\text{m}$ のプラズマにおける、8.2GHz RF システム(200kW x 2 系統)をマイクロ波源とした基本共鳴周波数による赤道面付近での波動伝播、加熱を想定する。スラブモデルを適用する必要があるため、パラメータの変化方向を x 軸方向とし、これをほぼ大半径方向とみなす。また、プラズマ境界での磁場方向を z 軸方向とする。ポロイダル磁場が無視できるとすると、これはトロイダル磁場とみなすことができる。密度変化方向に垂直な屈折率成分は、 N_y, N_z となるが、これらの値はスラブモデルでは不変量となり、同じ (N_y, N_z) を持つ EBW と電磁波モードがモード変換を介して結合することとなる。 N_z が磁場に平行方向の屈折率 $N_{//}$ に対応する。図1の横軸と縦軸はそれぞれ、プラズマ遮断における真空中の波長 λ_0 で規格化した密度勾配長： $L_n/\lambda_0 (L_n=n/(dn/dx))$, 電子サイクロトロン周波数 Ω で規格化した波の周波数： ω/Ω , である。モード変換領域の磁場が強く、 $\omega/\Omega=1$ 近傍となる場合以外はこのようにプラズマ遮断におけるパラメータをモード変換の性質を特徴づける指標として用いることができる。ここに $N_z=0$ で N_y のみ最適化して異常波を入射する場合のモード変換効率の数値計算結果を等高線表示する。 $N_z=0$ の場合の異常波の偏波は直線偏波である。等高線分布より、 $N_z=0$ で N_y のみ最適化し異常波を入射する方法が有効なパラメータ領域は、 L_n/λ_0 が小となる密度勾配が急峻な領域(Perp-X 領域)であることがわかる。また磁場強度が大きい程、より密度勾配が急峻な領域でこの方法が有効である。この図においてモード変換効率が10%以下の領域は、 $N_y=0, N_z=N_{//\text{OXB}}=(\Omega/(\omega+\Omega))^{1/2}$ での正常(O)波入射法、いわゆる O-X-B 法が有効な領域(OXB 領域)にほぼ一致する。また、Perp-X 領域と OXB 領域に挟まれたパラメータ領域(g1 領域)では、 N_z, N_y とともにプラズマパラメータごとに最適化し、偏波も O 波と X 波を強度比と相対位相を最適化して混合入射する必要がある。 L_n/λ_0 が小さく非常に密度勾配が急峻な領域(Frosted 領域)では、どのような入射方法をもってしても高変換効率を得られない(文献[1]参照)。小型PWI装置での様々な密度分布形状を仮定し、それぞれの場合にプラズマ遮断でのパラメータ点、 $(L_n/\lambda_0, \omega/\Omega)$ がこの図上のどの領域に位置するかを調べ、最適入射方法を検討した。図1に仮定した密度分布の一例を示す。分布形状はパラボラ分布、 $n_e=n_0(1.0-((x-x_0)/a)^2)$ とした。 x_0 はプラズマ中心の座標($x_0=R_0=0.3\text{m}$)である。 a は小半径に対応するとして、 0.2m とした。磁場は z 軸方向で $B_z=B_0(x_0/x)$, $B_0=0.25\text{T}$ とした。中心密度 n_0 をそれぞれ $2, 4, 6, 8 \cdot (10^{18}\text{m}^{-3})$ とした場合のプラズマ遮断におけるパラメータ点 $(L_n/\lambda_0, \omega/\Omega)$ を図1中にプロットした。中心密度が低い場合は OXB 領域にあるが、高くなると g1 領域に移っていく。すなわち、中心密度が $2\sim 4 \cdot 10^{18}\text{m}^{-3}$ 程度の場合は OXB 法を用いれば良いが、中心密度がさらに高くなり密度勾配が急峻になると、O 波 X 波の最適混合波入射の必要性が生じることがわかる。密度分布形状を $n_e=n_0(1.0-((x-x_0)/a)^p)$ とし、中心密度 n_0 と、係数 p の値を変えた場合についても調べた。図3に密度分布形状を示す。同じ中心密度でも分布形状によって、プラズマ遮断での密度勾配が異なる。図4に $n_0=2.0 \cdot 10^{18}\text{m}^{-3}$ の場合について、それぞれ $p=2, 4, 6, 8$ の

場合のプラズマ遮断でのパラメータを標した。係数 p が大きくなるとパラメータ点は OXB 領域から $g1$ 領域へと移動する。すなわち中心部の平坦領域が広いプラズマが生成されると $n_{e0}=2 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$ でも O 波と X 波の混合入射が必要となる場合があり得ることがわかる。また、中心密度が倍の $n_{e0}=4 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$ になると、より混合波入射の必要性が増すことがわかる。

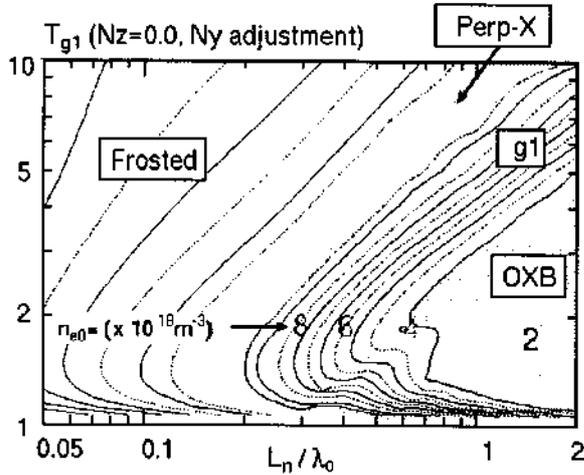


図1: 横軸 L_n/λ_0 、縦軸 ω/Ω としたパラメータ領域図。 $N_z=0, N_y$ 最適化、異常波入射の場合のモード変換効率を等高線表示した。モード変換効率 95%以上の領域を赤、10%以下の領域を緑で示す。図2で示す分布で $n_{e0}=2, 4, 6, 8 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$ の場合のパラメータ点を数字 2,4,6,8 で標す。

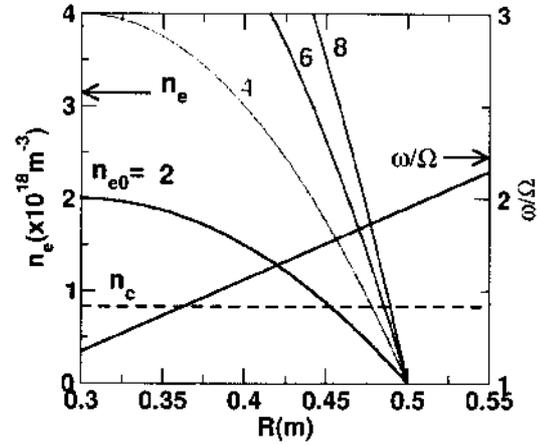


図2: 検討のために仮定した密度分布 $n_e=n_{e0} (1.0 - ((x-x_0)/a)^2)$ と規格化した磁場強度分布。

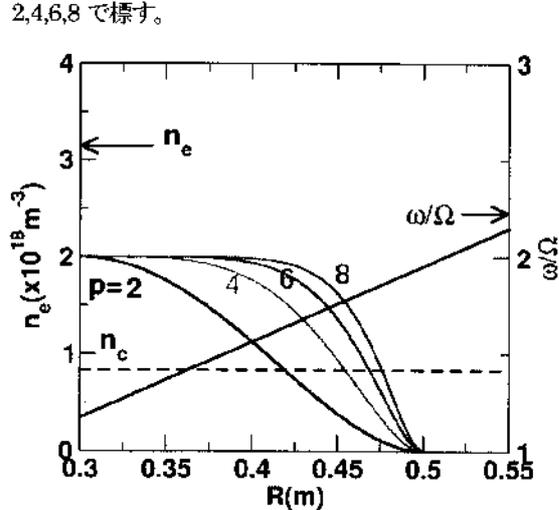


図3: $n_e=n_{e0} (1.0 - ((x-x_0)/a)^2)$ で表される密度分布。 $n_{e0}=2.0 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$ の場合の各分布を示す。規格化した磁場強度分布は図2の場合と同じ。

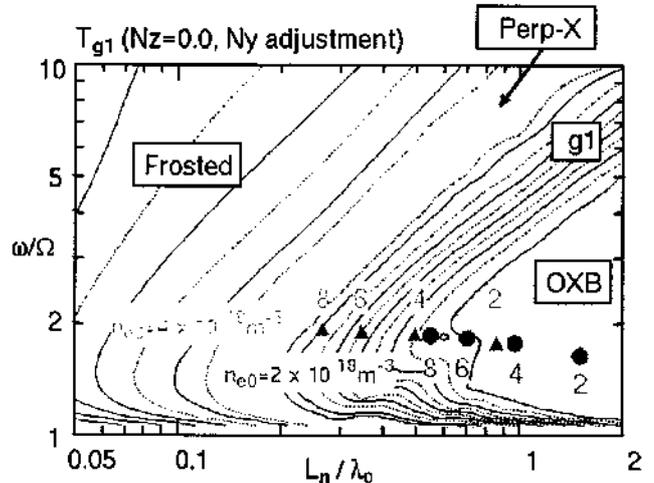


図4: 図1と同様の図、 $n_{e0}=2.0 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$ 、 $p=2,4,6,8$ の場合のパラメータ点を○で、 $n_{e0}=4.0 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$ 、 $p=2,4,6,8$ の場合のパラメータ点を△で標す。

小型PWI装置では、実現されるプラズマの密度分布形状によってはO波とX波を強度比と相対位相を最適化して混合入射することがB波への変換効率を得るために必要となる。任意偏波入射可能、入射角可変領域に幅のある入射系を構築することが望ましい。

文献[1] H.Igami et al., *Plasma Physics and Controlled Fusion* vol48(2006), pp.573-598

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る。そこで、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、更には、イオン温度及びプラズマ速度分布の計測手法として中性粒子ビーム入射が有効と考えられている。

ST 装置への中性粒子ビームの効率的な入射の為には、対象とする ST 装置固有の特色に合わせたビームの開発が必要となるが、実験条件によっては対向壁に当該ビームが照射される可能性が懸念される。プラズマ対向材料研究は応用力学研究所における重要な研究テーマの一つとなっていることなどから、高パワー密度のビームが対向材料などに照射された場合の影響などについて調べることを今年度の研究目的とする。

・実験方法

ビームによる対向材料の影響を調べるために、産総研において開発した中性水素粒子ビーム (NBI) 装置を用いて照射試験を行った。NBI は、カスプ磁場を有したバケット型のイオン源であり、フィラメントとチャンバー間でアーク放電を行いプラズマの生成を行う。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 (ϕ 345 mm) を採用した点が特徴であり、焦点部でのビーム径は約 ϕ 36 mm である。

今回の照射試験では、図 1 に示すように電圧 ~ 22 kV、電流 ~ 40 A のヘリウムイオンビームを用いた。材料照射部でのビーム径が、70 mm 程度 (引き出し電極から 1530 mm の位置) であるので、パワー密度、フラックス、全フラックスは、 $\Gamma = 248$ MW/m²、 6.2×10^{22} m⁻²s⁻¹、 1.9×10^{21} m²/shot とそれぞれ見積もられる。1ショット当たりのビーム照射時間は 30 ms である。

・実験結果

図 2 に産総研で開発したビームシステム及びターゲット設置位置を示す。今回用いた材料は、大きさ 16.6×16.6 mm²、厚さ 3 mm の焼結タングステン (純度 99.9%) であり、無酸素銅

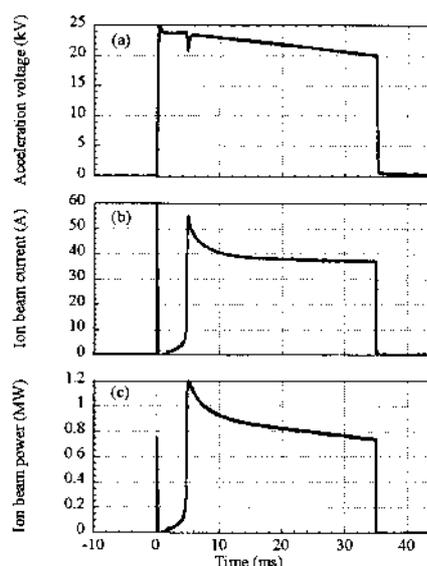


図 1. Time evolutions of (a) acceleration voltage, (b) extracted ion beam current and (c) ion beam power.

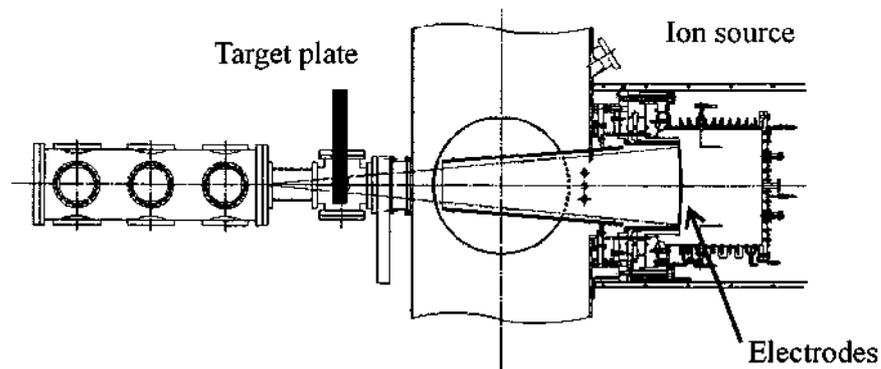


図2. Schematic drawing of ion beam system and a target plate.

のターゲット固定板にタップを切っているタングステンの裏面からボルトで固定し、ビームを照射した。タップを切っている箇所のタングステンの厚さは1 mmである。1ショット当たりのタングステン材料表面の温度は、2689 K程度と見積もられる。

図3に9分間隔で5ショットビームを照射した後のタングステン表面状態を電子顕微鏡（SEM）にて撮影した写真を示す（倍率1,5000）。図3 (a)は、厚さ3 mmの材料にビームを照射した場合の表面の写真である。図に示すように、100 nm以下の大きさの穴があいているのがわかる。図3 (b)は、ビームが照射された材料の厚さ1 mmの箇所の表面の写真である。図に示すように、約200 nmの大きさの穴が多数あいているのがわかる。

以上の結果より、材料の厚みが薄い場合は、熱拡散が制限され局所的に温度が上昇しやすくなる傾向があると考えられる。このため、穴径及び穴数は表面温度に大きく依存すると考えられる。

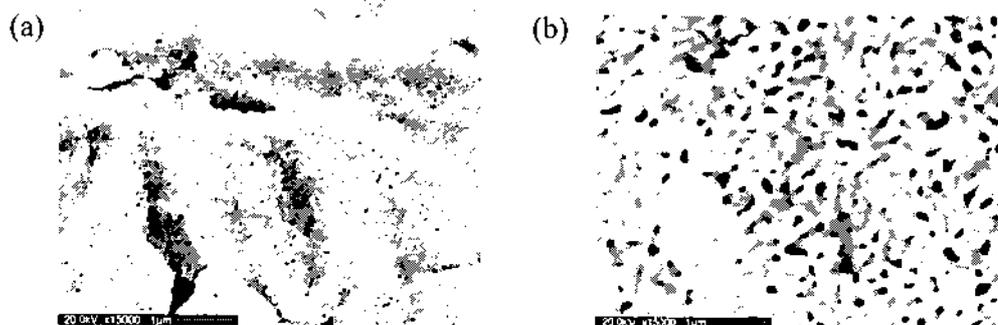


図3. SEM images of the tungsten surface, (a)厚さ3 mmの場合、(b)厚さ1 mmの場合。

・ 成果報告

榊田創他、「高電流密度多種イオンビームを用いた研究展開」、平成18年度逆磁場ピンチ研究会、つくば、2007年3月。

・ 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、平野洋一、小口治久、木山學
九州大学・応用力学研究所：佐藤浩之助、坂本瑞樹

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 高橋 正氣

目的

高度経済成長期以降、次々と建設された社会基盤構造物の経年劣化問題が生じている。今日の経済情勢のもとではこれらの全面的な更新は難しく、いかに安全に長期間使用するかという、いわゆる“保全”技術の役割が重要となる。原子力プラントでは、この種の問題として圧力容器鋼の照射脆化があげられる。脆化進行を正確に予測するためには脆化メカニズムの詳細を解明する必要があり、その上で正確な評価技術の開発と確立が必要である。評価法としては、これまでは炉内に装荷した炉壁と同材質のシャルピー試験片を定期的に取り出して衝撃試験が実施されてきた。しかし、原発の長期利用による監視試験片の不足問題が懸念されており、使用済み衝撃試験の溶接による再利用が検討されている。その代替技術の一つとして磁気的非破壊評価法を提案する。

本研究代表者のグループでは、平成 16 年度より原子力機構・材料試験炉 JMTR を用いた中性子照射実験を開始しており、一方、平成 17 年度より米国・カリフォルニア大サンタバーバラ校 (UCSB)Odette グループが所有する中性子照射済み試験片の磁気計測を本格的に実施し、照射損傷試料の機械特性と磁気特性の相関の解明に取り組んでいる。その中で、脆化の進行に伴い、磁気ヒステリシス・マイナーループ係数が減少することが確認された。脆化と磁気特性のこの負の相関メカニズムを明らかにする上で、損傷組織の詳細な評価が重要となる。しかし、中性子照射実験では照射条件が限定される上、試料の放射化のためホットラボでの実験に限定されるなど、幅広い観点から損傷組織評価を行うことが難しい。これらの問題を解決するために、イオン照射や電子線照射を駆使して照射条件を系統的に変えた試料を作製し、通常の実験環境で扱える高性能・高機能な装置を用いて詳細な損傷組織観察を行う。その上で中性子照射実験の結果と比較しながら、照射損傷組織と磁気特性の関係の詳細を明らかにする。

実験方法

試料として Cu 濃度の異なる 3 種類の原子炉圧力容器鋼 A533B 鋼 (A 材 : 0.05wt.%Cu および B 材 : 0.16wt.%Cu, JRQ 参照材) 及び純鉄を用いた。イオン照射実験では、応用力学研究所のタンデム型加速器を用いて 2.4MeV の鉄イオンを照射した。試料温度を室温から 290°C (商業用原子炉の運転温度) まで変化させ、照射量 0.5~2dpa で照射実験を行った。照射試料を電解研磨した後、透過電子顕微鏡 (TEM) 及び超高压電子顕微鏡 (HVEM) を用いて、損傷部分の組織観察を行った。また超微小押し込み硬さ試験機を用いて、照射前後の試料の硬度測定を行った。並行して、イオン照射実験と同じ試料について、電子線照射による損傷組織の形成過程の連続観察を行った。また、材料試験炉(JMTR)で中性子照射した試料の組織観察も実施した。中性子照射材については、試料周りの励磁・検出コイルをデジタル BH トレーサーに接続しマイナーループを評価した。

結果及び考察

JMTR での中性子照射中その場磁気計測の結果、Cu 濃度の高い A533B 鋼 B 材では照射中期・後期にマイナーループ係数が減少することが明らかにされており、UCSB 照射材でもそれを支持する結果が得られている。磁気パラメータの減少のメカニズムとして、照射欠陥が転位の応力場を緩和する形で転位近傍に生じたと推測した。図 1 に JMTR で中性子照射した B 材の TEM 写真を示す。実際に転位近傍に照射欠陥（転位ループと考えられる）が形成していることがわかり、イオン照射材でも同様の現象が確認された。

圧力容器鋼の照射脆化メカニズムを考えるための基礎実験として、FeCu モデル合金がよく用いられる。図 2 に電子線照射した A533B 鋼 B 材と FeCu モデル合金の TEM 写真を示す。前者では、まず転位近傍に I-型転位ループが形成し、続いてその内側ループが形成して行くのに対し、後者ではマトリクスで比較的均一に I-型転位ループが形成した。即ち、圧力容器鋼とモデル合金で I-型ループ形成のメカニズムが異なることを示している。この原因として圧力容器鋼に含まれるサブサイズ原子が重要な役割を担っていると考えている。

以上をまとめると、A533B 鋼の照射材の磁気特性を考える上で転位近傍での転位ループ形成が重要であること、その形成過程は、圧力容器鋼に特徴的な現象であることがわかった。

成果報告

- (1) H. Watanabe, T. Imamura, N. Yoshida, Y. Kamada, and S. Takahashi.
"The microstructural Evolution in A533B Steels During Fe Ion Irradiation"
The 23rd Symposium on Effects of Radiation on Materials, San Jose, USA, June 13-15, 2006
- (2) 渡辺英雄, 鱒淵俊児, 吉田直亮, 鎌田康寛, 高橋正氣, "A533B 鋼のマトリクス欠陥形成と照射脆化"
第 139 回日本金属学会秋期大会, 2006.9.16-18, 新潟大, 新潟, 概要集 p.123
- (3) 高橋正氣, 鎌田康寛, 菊池弘昭, 小林悟, 荒克之, 海老根典也, 鬼沢邦雄, 鈴木雅秀, 渡辺英雄, 吉田直亮, 中村暢伴, 荻博次 "純鉄および圧力容器鋼の中性子照射中その場磁気計測と照射脆化"
第 139 回日本金属学会秋期大会, 2006.9.16-18, 新潟大, 新潟, 概要集 p.124

研究組織

高橋正氣, 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

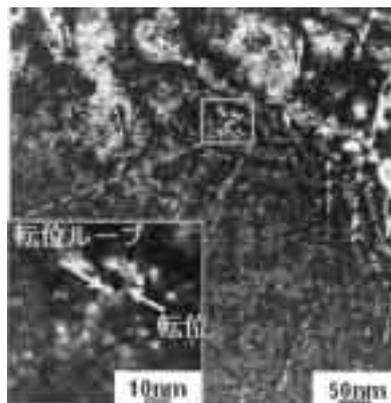


図 1 290°Cで中性子照射した A533B 鋼の TEM 写真
B材, $5 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$

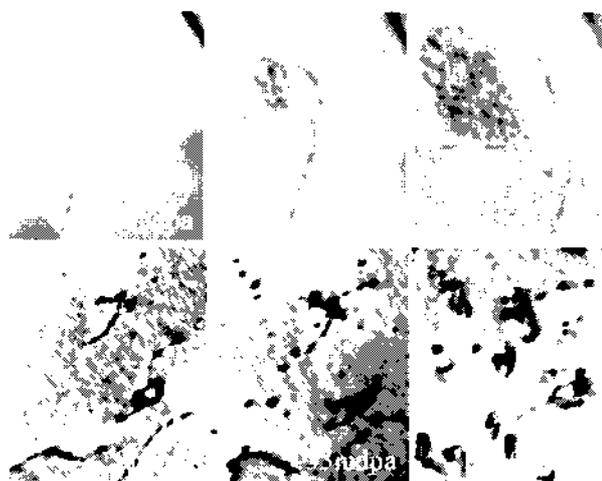


図 2 290°Cで電子線照射した TEM 写真
(a) A533B 鋼 B 材, (b) Fe0.6Cu モデル合金

電界効果型 MOS 水素原子検出器の開発と実時間粒子リサイクリング計測への応用

大阪大学大学院工学研究科 福田 武司

1. 目的

核融合炉定常化の鍵を握るのは高い自発電流成分を持つ核燃焼プラズマにおける圧力と電流密度の分布形状ならびにプラズマ・壁相互作用の能動的制御である。後者は、九州大学応用力学研究所が先駆的な役割を果たして来た核融合研究の重点領域であり、独自に開発を行った超伝導強トロイダル磁場実験装置 (TRIAM-1M) でプラズマの長時間維持に係わる数々の独創的な研究を展開し、顕著な成果を挙げてきた。一方、中性粒子の寄与は近年特に注目されており、優れた閉じ込め性能 (高閉じ込めモード遷移) と高圧力化による高い経済性の実現 (高密度領域における輸送係数の増大) に関しても、プラズマ周辺部における粒子リサイクリングが重要な役割を担うことが知られているが、プラズマ・壁相互作用の物理化学機構は十分に理解されていない点が多く、ITER (国際熱核融合実験装置) の高性能長時間運転の成否も QUEST 装置等を用いた今後の当該分野における基礎研究の進展に依存していると言える。

従来より、レーザー誘起蛍光法などを用いた中性不純物粒子束の計測等に係わる基礎的な実験研究の結果が報告されているが、一般に中性水素原子の挙動を精度よく体系的に評価することは非常に困難である。また、DEGAS 等の中性粒子輸送コードにおいても第一壁におけるリサイクリング率は調節の可能な変数として取り扱われており、実験結果を適用した評価にはなっていない。本研究では、第一壁と燃料水素の相互作用に注目し、電界効果型 MOS 検出器を用いた水素原子検出器の開発を目的とした基礎研究を実施する。これを第一壁の各所に設置することによって、壁リサイクリング率の空間依存性 (トロイダル・ポロイダル方向分布) を測定し、平衡配位や温度・密度分布等のプラズマ物理量に加え、水素原子の H_{α} 線 (656.3nm) 強度分布や壁温度との相関を実時間で計測し、統合的な中性水素原子の挙動解明に資することを目的としている。さらに、将来的には輸送解析コードを発展的に組み合わせることにより、高性能定常核融合プラズマにおける粒子挙動の包括的理解に向けた際立った寄与が期待できる。

2. 電界効果型 MOS (MOSFET) リサイクリング検出器の原理

現在、市販されている代表的な水素検出器は高価である上に、分解能や応答時間の問題で核融合プラズマ実験には適用が困難である。一般に、水素の拡散による Pd (パラジウム) 薄膜の電気抵抗変化を測定するものが主流であるが、検知分解能が 10^3 ppm 程度 (1m^3 のプラズマ実験装置における $1\text{Pa}\text{m}^3$ のガス注入は標準気体の 20°C 体積濃度換算で 10ppm に相当)、応答時間も約 5 秒である。また、分解能が一桁高い表面波検出器 (圧電結晶基板上の楕円電極間を伝搬するパルス超音波の遅延を検出) は応答時間が (20-100) 秒以上である (東北大学山中)。Pd が水素の吸蔵によって膨張することを利用したバイメタルに類似した構造の片持梁型水素検出器が提案 (山形大学奥山) されているが、本研究では Pd 金属の表面に水素ガス (H_2) が吸着すると水素は原子 (H) に解離して Pd 中を拡散する性質を利用して、上図に示すような Pd をゲート電極とした MOSFET の応用を検討した。ゲート電極に吸着した水素分子が解離し、生成した原子 H が Pd 中を透過して SiO_2 (絶縁層) 界面に到達すると、水素原子が双極子モーメントを持つことから界面に双極子層が形成され、電極の誘電率が変化する。これによって実効的にゲート電圧が変化し、ドレイン (D) とソース (S) 間のチャンネル・コンダクタンスが変動することがその動作原理である。核融合実験装置では第一壁材料として炭素 (原子力機構の JT-60U 装置他) やタングステン (独 ASDEX-U 装置他) が用いられているが、本研究ではグラファイト壁を想定して Pd 上に (100-200) nm 程度の炭素薄膜を蒸着によって作製し、第一壁表面を模擬する。10ppm 以下の分解能が期待できるが、数 100ms 以下の時間応答 (第一壁のベーキング温度にも依存すると考えられる) が得られるかどうか为主要課題である。

イーレー・リディール型の (吸着粒子間に相互作用がない単純な) 表面反応を仮定すると、入射粒子 (B) を単位面積あたり N_S 個吸着可能な基板表面上に標的粒子 (A) が N_A 個存在する場合、吸着反応と脱離反応の速度は各々 $v_1 = k_1 p_A (N_S - N_A)$ 、 $v_2 = k_2 N_A$ となる。ここで、 $p_{A,B}$ は入射粒子と標的粒子の気相での分圧、 $k_{1,2}$ は吸着と脱

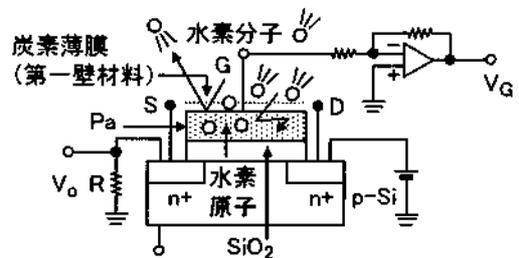


図. 電界効果型 MOS 第一壁水素リサイクル検出器の構造概念図

離の速度定数である。平衡状態では $k_1 p_A (N_S - N_A) = k_2 N_A$ となることから、吸着係数 $K_A = k_1 / k_2$ を用いて吸着率 ($=1$ -リサイクリング率) $\theta_A = N_A / N_S$ は $K_A p_A (1 - \theta_A) = \theta_A$ より $\theta_A = K_A p_A / (1 + K_A p_A)$ と表される。基板表面における B 粒子との反応速度 $r_S = k_S p_B \theta_A$ (k_S : 反応速度定数) は以下のように書ける(ラングミュアの吸着等温式)。

$$r_S = k_S p_B \frac{K_A p_A}{1 + K_A p_A}$$

ここで、 $p_A < 1$ と考えると速度式は $r_S = k_S p_B K_A p_A$ となり、 p_A に比例する。逆に、 p_A が高い場合には $r_S = k_S p_B$ となり、吸着量が p_A によらず一定となる。反応速度の中性粒子圧力依存性を評価するだけでも重要なプラズマ・壁相互作用の実験研究に寄与する斬新で貴重な情報となるが、前者を想定した通常のプラズマ放電では、中性水素圧力に比例する形でゲート電圧が変動することになることから、異なるガス圧条件下における実験結果を組み合わせ吸着係数 K_A を評価することにより、リサイクリング率を「その場」で調べることができる(条件によって $k_S p_B$ に大きな変化がないと仮定)。また、全到達粒子数を評価する焦電素子(光にも応答することが問題になるが)やファラデー・カップを用いた粒子プローブの併用、Pd ゲート電極や蒸着炭素薄膜の厚みが異なる素子を組にしたアレイ配置検出器を用いた実験等、発展的展開を見込んでいる。

2. MOSFET リサイクリング検出器の開発

平成 18 年度はシリコン基板と Pd 薄膜を準備し、成膜設計を行った。成膜に関しては、ULVAC 社製 EBX-2000S 電子ビーム・プラズマ蒸着装置(右写真)を用いて $< 10^{-2}$ Pa の圧力下で、Pd 箔を電子ビームで加熱することで熔融・蒸発させ、加熱した基板上(スパッタ蒸着で形成した SiO_2 絶縁層の上)に堆積させる。電子ビーム印加で熔融・蒸発した原子に 13.56MHz の RF を印加して電離し、基板ホルダ間に印加したバイアス電圧で加速された高エネルギー Pd イオンを基板に衝突させて成膜する。単純な電子ビーム蒸着法に比べて高エネルギーイオンの表面拡散が起こるため、緻密で均質な薄膜を形成することが出来る。一方、高周波放電によってプラズマを生成し、プラズマ中の陽イオンを負電極のスパッタ材方向に加速して衝突させ、その衝撃によってターゲット物質を基板上に堆積させるのがスパッタ法である。一般に、放電ガスにはアルゴンガスを用いる。電子ビーム・プラズマ蒸着法と同様に、硬く緻密な膜が作製可能であり、多元で複雑な組成の標的材料を用いても同一組成の薄膜をほぼ均質に作製できるが、高エネルギーのアルゴンイオンの衝突による薄膜の損傷が懸念される。これらの成膜法が検知器の性能に与える影響を比較検討する必要があるが、実際にはゲート電極の幾何形状が検知応答時間や感度により顕著に影響することから(Sとdを電極の面積と厚みとして $C = eS/d$)、1mm \square と5mm \square に対して各々1mm、5mmの厚みを持つ計4種類の素子を作製(基板温度350 $^{\circ}$ C)するため、マスクの製作を行った。

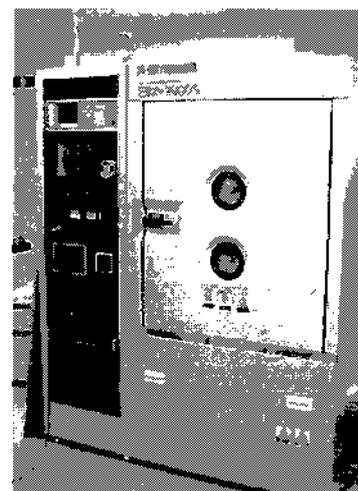


写真. 電子ビーム蒸着装置(右側: 成膜室・下部電子銃・左側 RF 電源)

来る水素化時代を鑑みても、本研究は核融合研究を足場とした産業応用技術に発展する可能性がある。平成 19 年度には、試作した検知素子の特性を幅広いガス圧領域で詳細に調べる予定である。また、上述のゲート電極作製法に加え、検知器の動作温度(ベーク温度)に関してもそれらの寄与を定量的に検証する。動作温度が高いほど吸着水素の拡散運動が活発になることから、応答時間が短縮できると考えられる。必要な基盤データを取得した後は、複数の素子表面に厚みの異なる第一壁材料を成膜したアレイ状デバイス(ワン・チップ化も可能)を製作することにより、到達水素原子数や浸透・リテンションの度合いを高速で「その場」評価するシステムの構築を目指した検討を進め、QUEST 装置における適用性を評価する。また、信号処理に関しては、前置増幅器を経たアナログ電気信号を < 1 kHz 程度のデジタイザで I/O ボード付きの計算機に取り込むのみであることから、容易に拡張(多チャンネル化)出来る。九州大学での試験に際しては、既設の他計測装置との整合を図り、可能な限り既存の設備を有効利用する指針である。大阪大学で駆動電源回路等の周辺機器を含む試作リサイクリング検出器の原理実証と性能評価試験を平成 19 年度に行い、プラズマ実験で素子機能の有効性を確認した後(平成 20 年度以降)に、複数のユニットを製作して真空容器内のトロイダル・ポロイダル方向に異なる複数の位置に検出器を配置することにより、3 次元的な評価を可能にする。さらに、将来的には核融合科学研究所との連携により、粒子輸送コードを組み合わせた解析を発展的に実施して、包括的な粒子輸送評価手法の確立を目指す。

固体水素ペレットのドリフトチューブ中での挙動解析

九州大学総合理工学研究院 横峯健彦

1. 目的

核融合炉内プラズマへの燃料供給技術に関して現在様々な方式が提案されているが、そのひとつにドリフトチューブによる固体ペレット入射法がある。これは燃料である水素を円柱状の固体ペレットにし、これを加速し、高真空状態にした細長い湾曲したチューブを経由しプラズマ周辺に入射する方法である。湾曲したドリフトチューブと私用することにより、空間が非常に制限されている核融合炉の装置設計に自由度を増すことができる。直管を用いた固体ペレット入射に関するこれまでの実験的研究から、ガイドチューブ内を通過し射出された燃料は、チューブの形状によらず入射時に比べて数%との質量減少が生ずることが確認されている。その原因としてチューブ内壁との摩擦、ふく射あるいは固体ペレットの破砕などが指摘されているが、何が決定的となるかは明らかにされていない。また、ドリフトチューブ内を固体ペレットが通過するときの速度は数百 m/s から約 1000m/s と想定されており、この場合解析対象は、総変化(主に昇華)あるいは衝撃による大変形を伴う可能性のある高速の物体の挙動となるが、このような現象解析に用いることのできる計算手法は確立されていない。本研究では、ペレットが壁に衝突一離脱する際に生ずる質量変化に関与する現象をモデル化し、数値予測モデルを開発する。

2. 計算手法

粒子の運動追跡に、MPM(Material-Point Method) [1][2]を用いる。MPM は物体内部の変形を伴った衝突、接触問題を解析対象として開発された手法で、解析対象の物体を粒子点の集まりと考えるために物体の界面を明確に捉えることができる。MPM は物体の運動解析については本研究の目的に適した手法であるが、温度場解析に適用することはできないため、本解析では SPH[3]手法を MPM に応用した。

ペレットが壁に衝突する際の摩擦および熱伝導については以下のように取り扱う。摩擦については固体間において経験的に知られているクーロン-アモントンの法則を用いて格子点に働く摩擦力として考慮し、摩擦力のした仕事が全て熱に変換されると仮定する。ペレットと壁との接触面積をヘルツの接触理論より算出し、その界面を通じて壁からペレットへ伝達される熱量を解析解より求める。さらに、塑性変形を伴う衝突の際に生ずる接触熱伝達に関するモデル [4] を導入した。壁面からのふく射伝熱に関しては実際のチューブとペレットの形状から、二面間のふく射伝熱量を考慮する。

相変化に関しては粒子点温度が昇華点を越えた場合に対応するエネルギー差から相変化量を求め、その変化分を対象となる MPM の粒子点質量を減ずることで評価する。

本解析では簡単のため相変化後の水素については考慮していない。相変化に関しては粒子点温度が昇華点を越えた場合に対応するエネルギー差から相変化量を求め、その変化分を対象となる MPM の粒子点質量を減少させると同時に、気体を発生させる。相変化に伴う一連の過程、すなわち昇華-圧力伝播のプロセスは CIP 法により解析する。

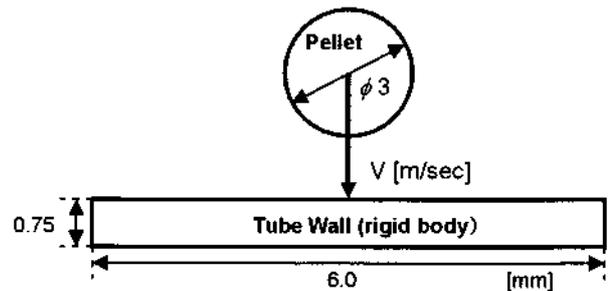


Fig.1 Calculation System

3. 問題設定

固体水素ペレットは円筒形(半径 1.5mm、長さ 3mm)とし、図 1 のように 2 次元問題として取り扱う。ペレットおよびチューブ内壁の初期温度はそれぞれ 4.2K、301K である。ペレットの速度は 1000m/s とし、入射角 $0.5^{\circ} \sim 4^{\circ}$ に対応して垂直方向の速度 V を 9m/s \sim 70m/s に変化させて計算した。

4. 結果及び考察

図 2 に摩擦係数の違いによるペレット質量変化を示す。摩擦係数を 0.1 \sim 0.9 まで変化させた結果、摩擦係数の変化による差は小さく質量減少には摩擦係数は影響しない。これは 1 回の接触時間が数 10 μ sec と短いことによる。図 3 に衝突速度 9m/s (衝突角度 0.5°) と 70m/s (衝突角度 4°) の場合における質量変化を示す。両速度に対し、それぞれ昇華後の気体(水素)の有無による違いを載せている。昇華後気体の存在を考慮しない場合、70m/s の質量減少率は 9m/s のそれのおよそ 4 倍であるのに対し、気体の存在を考慮すると両者に比は 2 倍に減少する。気体の存在の影響を考察するため、図 4 に衝突速度 70m/s

の場合の昇華後のペレット水素の圧力変化を示す。横軸の0は接触中心を示す。昇華直後約1 μ secは接触領域で高い圧力状態を維持する。図5には、最初に衝突してからのペレット重心速度の時間変化を示す。低入射角（低衝突速度）の場合、衝突後溶融したペレット水素が昇華し、昇華ガスからの圧力により重心速度は0近くまで減速し、跳ね返ることができない。その時点で依然昇華ガスが存在するそのため、ペレットはガスの上にいるようになり、計算では気体を介して壁—気体、気体—ペレットの伝熱を考えていないため質量減少はふく射伝熱のみとなる。一方、高入射角（高衝突速度）の場合は、低入射角同様重心速度が減少するが、昇華ガスの圧力に逆らって壁面に衝突し、跳ね返ることができる。計算ではその後3回衝突—離脱を繰り返し、最終的に重心速度が0まで減速する。すなわち、低入射角の場合は昇華ガスによるクッション作用が最初の衝突時から効果的に働くのに対し、高入射角の場合は昇華ガスのクッション作用が衝突—離脱を繰り返した後に効くようになる。この差が昇華ガスの存在による両入射角での質量減少率の違いを顕著にするものと考えられる。この計算では、昇華ガスが衝突に対してのみ作用すると仮定しているが、実際は衝突姿勢によって昇華ガスが飛行姿勢に影響し飛行不安定を生じさせる可能性がある。このことによる質量減少への影響も大きくなることが予想される。

5. 参考文献

- [1] Deborah Sulsky, Z. Chen, Howard L. Schreyer, A particle method for history-dependent materials, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 118 (1994) 179-196.
- [2] Deborah Sulsky, Shi-Jian Zhou, Howard L. Schreyer, Application of a particle-in-cell method to solid mechanics, *Computer Physics Communications*, 87 (1995) 236-252.
- [3] J. J. Monaghan, SMOOTHED PARTICLE HYDRODYNAMICS, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 30 (1992) 543-574.
- [4] F. Ben Ammer et al., *Proc. ASME/JSME Thermal Engineering Conference*, 4 (1991) 461-492.

6. 研究組織

研究代表者 横峯健彦（九州大学総合理工学研究院）

研究協力者 佐藤浩之助（九州大学応用力学研究所）、山下雄一郎（九州大学総合理工学府）

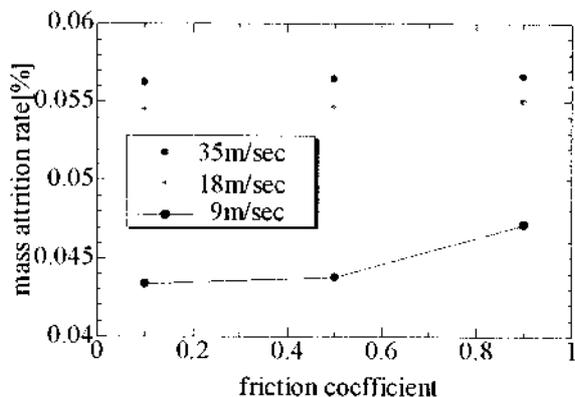


Fig.2 Effect of friction factor on mass attrition rate

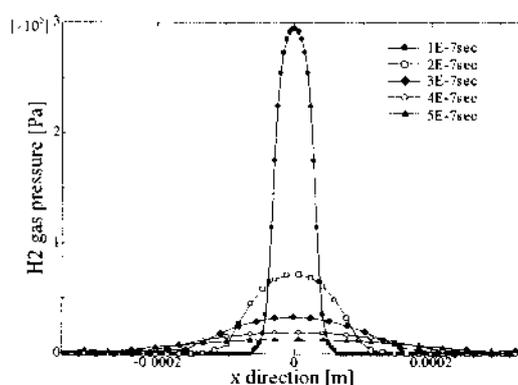


Fig.4 Sublimation pressure profile

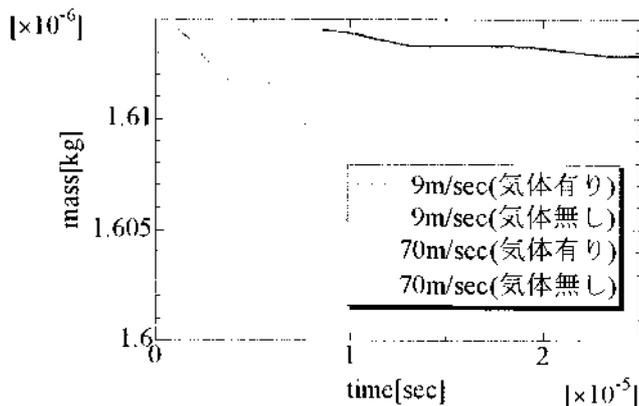


Fig.3 Mass change evolution

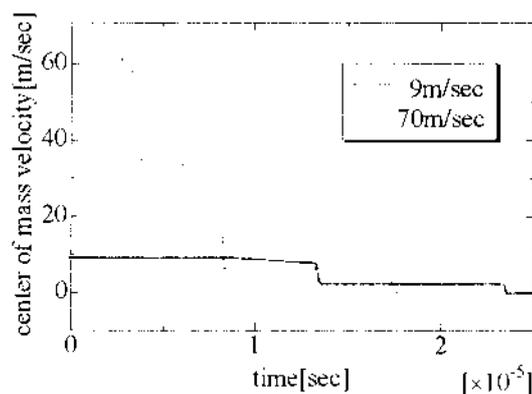


Fig.5 Change of center of mass velocity

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。

本研究では各種ガスを用いたグロー放電によるステンレスへの損耗率が実験的に同定されていることから、それらの値を元にグロー放電中における第一壁損耗率を評価する。またダスト捕集量、材料プローブによる組成比を含む堆積層分布から、真空容器内で損耗された壁材の輸送に関する評価を行なった。

実験方法

LHDでは各種ガスを用いてグロー放電が実施されているため、個々における損耗率を同定した。既にNeグローにおける損耗率をAFM分析によって実験的に求められており、これを元にスパッタ率のガス依存性から水素、ヘリウムにおけるステンレス(SS)への損耗率を求めた。また、運転時間からグロー放電中における第一壁損耗率の評価を行った。またダスト捕集実験、および真空容器内長期設置サンプルへのAESによる分析結果より、組成比を含む堆積層の深さ分布を得、堆積物の評価を行った。

結果および考察

過去3年間の第7,8,9各実験サイクル終了後の大気開放直後に実施されたメンブレンフィルタを用いたダスト捕集では、電子天秤で測定した単位面積当たりの平均捕集量は2.2-7.8 mg/m²である。また、捕集量のポロイダル依存性は小さく、粒子径1 μm以下が主に球形状の炭素、1 μm以上がステンレスに起因する鉄で異形状あることが明らかとなっている。全捕集量に対する体積比は求められており、SSは9割を占める。そのため、例えばLHD真空容器内・横長断面の第一壁(下部)では3.6 - 4.5 mg/m²となった。また、堆積層に関してはAESにより深さ方向の原子組成比が求められており、その結果に対して鉄の比重を用いることで値を得た。先の横長断面下部での出すと採取位置の近い場所でのSS堆積層は22.5 mg/m²でダスト採取よりも多いことが分かる。試料上の堆積物では堆積層とさらにその上のダストとは切り離しを行っておらず、したがって双方の増合算が堆積物として検出されていることになる。よって、このダストと堆積物の存在比は妥当であ

る。ただしグローによる損耗量と比較すると、まだ差が大きい。その理由として新たな堆積場所がある、堆積密度の誤差が大きい、の2つが考えられるが、現在のところ前者を考えている。

まとめ

金属第一壁装置であることを考慮し、ステンレスの損耗とダストを含む再堆積物の量について算出を行った。グロー放電洗浄の運転時間から見積もられたステンレス第一壁の損耗量は g/m^2 オーダーであり、採取されたステンレスに起因する鉄・ダストおよび鉄不純物の堆積層は $1\text{-}10\text{ mg/m}^2$ オーダーである。鉄不純物の堆積物はダストより堆積層中に存在する方が多く、ダスト+堆積層=堆積物という観点から妥当な値であった。また、損耗と堆積物量の差が大きいため、分析された第一壁以外の領域に堆積していると考えられる。現在分析を行っていない箇所であるダイバータ上への堆積を考えた場合、過去に2000年度の実験では水素およびヘリウムによるグロー放電洗浄でダイバータ上へ 0.19 g/m^2 の鉄が堆積しており、この値は今回の鉄堆積物の表面密度よりも多い。現在は、よりスパッタ率の高いNeおよびArグローを併用しているため、少なくとも2000年度の値よりも多いことが想定される。そのため今後これらの分析をさらに進める必要がある。

研究成果報告

芦川直子他「LHDにおける第一壁損耗と発生ダストの関連に関する研究」第23回プラズマ核融合学会年会、招待講演

研究組織

代表者	芦川直子	核融合科学研究所	助手
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	助教授
	増崎 貴	核融合科学研究所	助教授
	坂本隆一	核融合科学研究所	助手
	吉田直亮	九州大学応用力学研究所	(所内世話人)
	徳永和俊	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	

TRIAM-1M での非対称プローブによるイオン温度データの解析と CPD および QUEST での PWI 研究

日本原子力研究開発機構 上原和也（主任研究員）、中央大学 雨宮宏（講師）、上越教育大学 定本嘉郎（助教授）

九大応用力学研究所 坂本瑞樹（助教授）、木村成明（修士課程 2 年）

概要

応用力学研究所の準定常トカマク TRIAM-1M で、プラズマ輸送やプラズマ壁相互作用 (Plasma Wall Interaction, PWI) を考える上で周辺のプラズマのイオン温度は重要なプラズマパラメーターである。我々は TRIAM-1M プラズマに対して改造型の非対称型ダブルプローブを用いてイオン温度を測定してきた。今年度は、TRIAM-1M の特徴的なプラズマである高効率電流駆動プラズマ (Enhanced Current Drive, ECD) 及び高イオン温度プラズマ (Hot Ion Temperature,

HIT) に対し、非対称型ダブルプローブで測定したイオン温度のデータ解析を行った¹⁾。CPD および QUEST での PWI 研究については出来なかったため、ECD と HIT の物理的描像についての考察をまとめた。

非対称プローブによるイオン温度の測定方法と測定ポイント

非対称プローブは、電極長さの違うダブルプローブで、プローブ列を磁力線方向に置きプローブ特性を測定する。 I_1 、 I_2 を長、短電極でのイオン飽和電流値とすると、この比の値 (I_1/I_2) からイオン温度 T_i を測定することができる。通常のダブルプローブでは $I_1=I_2$ となってイオン温度は測定不能である。

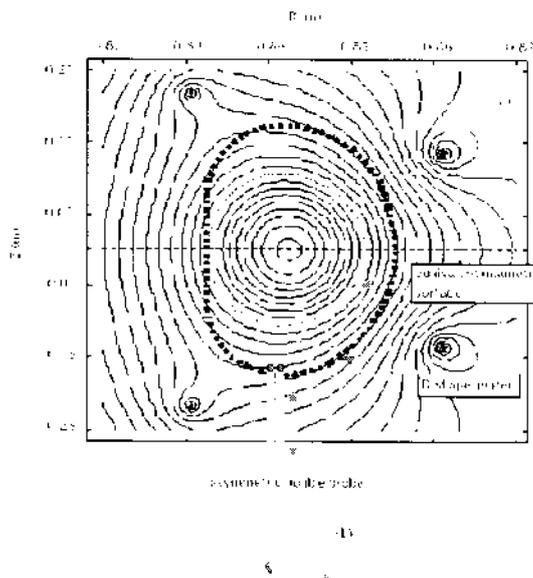


図1 TRIAM-1Mにおける非対称プローブ測定ポイント。(a) TRIAM-1Mのポロイダル断面、等磁気面とリミター位置およびプローブ挿入方向。(b) TRIAM-1Mに取り付けられた非対称ダブルプローブの写真。

TRIAM-1M にとりつけた非対称プローブは強磁場(トロイダル磁場 $B_t = 6\sim 7$ T)用に特別に設計したもので、大きさは低磁場用のものよりも小さい。長電極の長さは 9 mm、短電極の長さは 4.5 mm であり、両電極とも半径は 0.75 mm である。プローブ電極の材質はタングステンである。

図1は TRIAM-1M のポロイダル断面と非対称プローブによる測定ポイントを示している。実

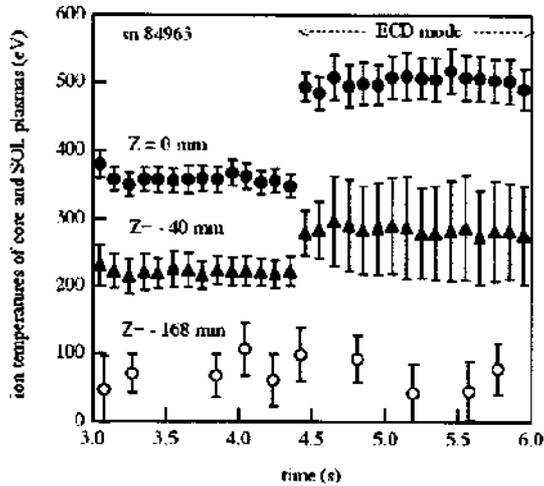


図2 ECDモードに於けるイオン温度の時間変化。放電条件はトロイダル磁場 $B_t = 7\text{ T}$ 、コアの密度は $1 \times 10^{19}\text{ m}^{-3}$ 。Z = 0 mm及びZ = -40 mmの測定はNEAによる。Z = -168 mmでの値が非対称プローブによる測定である。

高いイオン温度プラズマ(Hot Ion Temperature mode, HIT) に関して周辺領域のプラズマ密度 n_e 、イオン温度 T_i 、それに電子温度 T_e を測定し、解析を行った。

(1) ECDに於ける周辺イオン温度

図2は $B_t = 7\text{ T}$ の LHCD($f=8.2\text{ GHz}$, $P_{\text{RF}}=50\text{ kW}$) に於ける ECD モードのプラズマに対して、非対称プローブで測定した、周辺プラズマでの T_i の時間変化である。NEA(Neutral Energy Analyser)で測定されたコアプラズマの T_i も示した。このデータでは、ECD モードに入るとコアの中心領域(Z=0 mm)での T_i は 350 eV から 500 eV と大きく上昇しているが、周辺(Z=-40 mm)に行くに従ってこの上昇度は 220 eV から 280 eV へと小さくなっているのがわかる。そして SOL 領域(Z=-168 mm)では、非対称プローブでの測定は T_i は 50 eV から 100 eV の値で殆ど時間変化はない。詳細なデータの妥当性をチェックする為に、同様の周辺プラズマでの測定である異常ゼーマン効果による分光測定との同時測定を試みているが、詳細なデータ解析はまだである。

(2) HITに於ける周辺イオン温度

図3は $B_t = 6\text{ T}$ の LHCD($f=2.45\text{ GHz}$, $P_{\text{RF}}=8\text{ kW}$) に於ける HIT モードのプラズマに対して、非対称プローブで測定した、周辺プラズマの T_i の時間変化である。NEA で測定されたコアプラズマのイオン温度も同時に示した。HIT モードは $t = 8.5\text{ sec}$, 16 sec 及び 28 sec 付近で起こ

実際のプローブチップの写真も掲げた。プローブ電極は破損を避けるためにサポート(ステンレス製)に取り付くまでT字型のものを一体もので製作している。プローブはトラス下側から垂直上方向に設置され、他のダブルプローブ列(Langmuir probe 類)の一角を占め、上下方向に駆動出来る。

実験結果

TRIAM-1M では、低域混成(LH)波による電流駆動(LHCD)で長時間定常的なプラズマを得ている。そのなかでも、TRIAM-1M の先進的なモードである、高効率電流駆動プラズマ (Enhanced Current Drive mode, ECD) と

っている。このデータでは、HIT に入ると中心領域($Z=0$ mm)での T_i は大きく瞬時的に上昇し

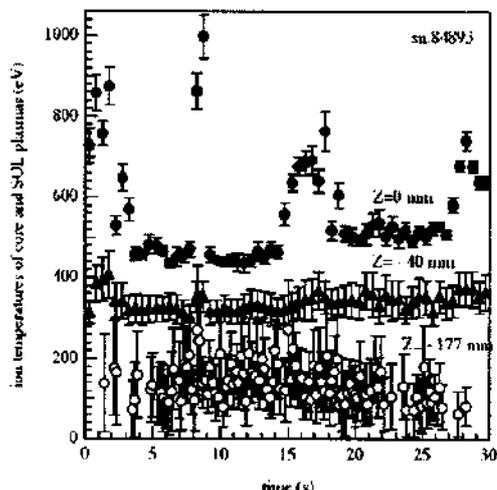


図3 HITモードに於けるイオン温度の時間変化。放電条件はトロイダル磁場 $B_t = 6$ T, コアの密度は $4 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$, LHCDパワー P_{rf} (周波数 $f = 2.45$ GHz)は8 kW, $Z = 0$ mm及び $Z = -40$ mmの測定はNEAによる, $Z = -177$ mmでの値が非対称プローブによる測定である。

されているが、そのメカニズムについては以下のようなことが考えられる。電流駆動では高周波がランダウ減衰で共鳴粒子がトロイダル方向に電場 E_{\parallel} を直流的に感じて、電子が加速され衝突とのバランスで電流が流れる。この電流はポロイダル磁場 B_{θ} をつくとともに、電場 E_{\parallel} との $E_{\parallel} \times B_{\theta}$ ドリフトにより共鳴電子がトーラス内側にフラックスを形成する。つまり、LHCDでは電流が流れてポロイダル磁場を作るだけではなく、加速された電子は内側に向かいフラックスが生じて閉じ込めが改善されるのである。ECDでのプラズマ温度の上昇は通常の拡散係数が内側へのフラックスで減少し、少しのパワー入力でも加熱が得られているのかもしれない²⁾。

LH波による通常の加熱実験では、電流駆動モード(モード変換が起こらない)ではなく電場は磁場に対して垂直方向に向くイオンパーシュタイン波のサイクロトロン減衰を使うので、HITで観測されているような電流駆動モードでのこのようなイオン加熱は起こらないはずである。

参考文献

- 1) Y. Sadamoto et al., submitted to Nucl. Fusion
- 2) K. Uehara, J. Phys. Soc. Jpn. 57, (1988) 4169

研究成果報告

上原和也「TRIAM-1Mでの非対称プローブによる周辺イオン温度データの解析とランダウ減衰による電流駆動の直接描像」第22回トリアム研究会、平成18年12月

ているが、周辺領域($Z=-40$ mm)に行くに従ってこの上昇度は非常に小さくなっているのがわかる。そしてSOL領域($Z=-177$ mm)では非対称プローブでの測定では T_i は50 eVから200 eVの値で、殆ど周辺イオン温度に時間変化はない。この時SOL領域での電子温度は一定(~ 15 eV)であるが、密度は $t=8.5$ secのHITモードの時のみ、ゆるやかに上昇している。

電流駆動時の閉じ込め改善モード(ECDおよびHIT)の考察

TRIAMのECDとHITでは電流駆動プラズマで閉じ込めが改善され、温度が上昇していることが示唆される。LHCDでプラズマの閉じ込めが改善されることは、他のトカマクでも観測

TRIAM-1M 周辺プラズマ中揺動の統計的解析

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

小さなプラズマの塊 (Blob) が磁力線を横切って輸送される非拡散的輸送現象が、核融合の周辺プラズマにおいて重要な研究課題になっている。トカマク周辺プラズマでは、Blob 伝搬を示唆するパースト的な密度揺動が観測されている。しかし、Blob の発生機構および伝搬過程は明確ではなく、詳細な観測および解析が必要とされている。

本共同研究では、プローブアレイによって得られた高時間分解のイオン飽和電流時系列データの解析を行い、TRIAM-1M の周辺領域での揺動の統計的な性質 (歪度、尖度) の空間依存性、密度パーストの速度分布関数の導出、さらにそれらの結果をもとに Blob の伝搬が磁力線を横切る輸送への寄与を明らかにすることを目的としている。

2. 実験および計測について

周辺プラズマの揺動データとしては、TRIAM トカマクの下側ラングミュアプローブアレイで計測されたイオン飽和電流計測データを用いた。下側プローブはリミター内表面に相当する径方向位置に設置されている。プローブへのバイアス電圧は 100V であり、検出抵抗は 100Ω である。また信号のサンプリング時間は、1 μs である。2 台 8.2 GHz の LHCD で維持されている放電を解析の対象とした (# 08294)。これまでの解析においては、大半径方向位置 R=860 mm に位置する 10 番プローブのデータを対象に解析を行ってきたが、今回は大半径方向位置 R=820 mm に位置する 6 番プローブのデータの解析を行い、これまでの結果との比較を行い、位置による密度揺動の統計性に变化について調べた。

3. 解析結果

図 1 は、解析に用いたラングミュアプローブアレイによって計測されたイオン飽和電流の時間発展 $X(t)$ を示している。R=860 mm のプローブデータに比べて、R=820 mm では、多数の正のスパイクが観測される。ある振幅の信号が現れる頻度分布 (確率密度関数: PDF) より、歪度 (Skewness) および尖度 (Kurtosis =

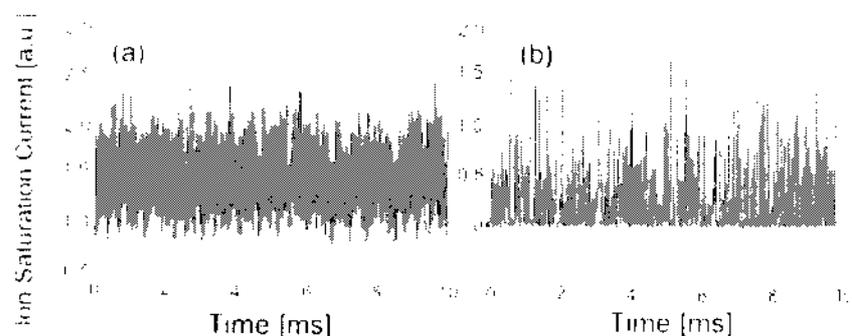


図1 イオン飽和電流の時間発展 (a)10番プローブ(大半径位置 R=860mm), (b)6番プローブ(大半径位置 R=820mm)

Flatness - 3)を求めた。歪度および尖度は、PDFの3次および4次のモーメントであり、それぞれPDFの非対称性と広がりを表す指標である。現象が乱雑であり、PDFがガウス分布となる場合は、歪度は0、尖度は0の値をとる。図1(a)では歪度が0.3、尖度が-0.2とガウス分布に比較的近い値を示したのに対し、図1(b)では歪度が1.4、尖度が1.7と大きな値が得られ、正のバースト的な信号が顕著であることを示している。

図2は、揺動のパワースペクトルを示している。図2(a)、(b)ともコヒーレントな揺動成分は見られない。図2(b)で観測されるような境界領域での間歇的な現象を説明するモデルとして、SOC (Self Organized Criticality) モデルが提唱され、いくつかの核融合装置の周辺プラズマ揺動の解析に用

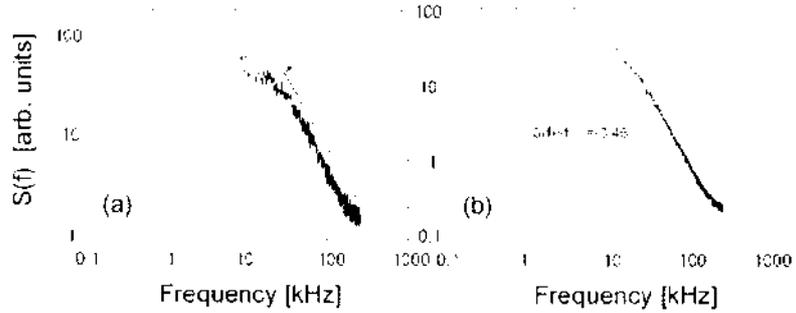


図2 揺動のパワースペクトラム (a) 10番プローブ (大半径位置 R=860mm)、(b) 6番プローブ (大半径位置 R=820mm)

いられている。SOCモデルでは $S(f) \propto f^{-1}$ が予測されているが、図2(b)では $S(f) \propto f^{-3.48}$ となり、SOCモデルによる予測とは異なる結果となった。他のモデルによる検証が必要である。

揺動の時系列データ $X(t)$ に対して時間遅れ l を導入して、 $\delta_l X(t) = X(t+l) - X(t)$ のPDFを用いて解析を行った。例えば系が完全にポアソン過程に従うとすれば、 l によらず $\delta_l X(t)$ のPDFは常にガウス分布となる。昨年度の解析においては、図1(a)の $\delta_l X(t)$ のPDFは、 l によらずほぼガウス分布に近いことが示された。図1(b)に対しても同様の解析をおこなった。図3の左図は、 $\delta_l X(t)$ のPDFの l 依存性を示したものである。図の上から $l=1, 2, 10, 20, 50, 100, 200, 500 \mu\text{s}$ に対応している。時間スケールが $20 \mu\text{sec}$ までは歪度の値は変化していることが分かる。この時間スケールは、一種の粗視化時間 (もしくは現象の記憶時間) と考えることができる。

このように異なる粗視化時間に対して確率密度関数の特性が異なる場合、通常のフラクタル解析では粗視化時間ごとにフラクタル解析を行う必要がある。今回マルチフラクタル解析を行ったところ、マルチフラクタル指数 λ^2 が図1(a)の場合 0.008 (前年度報告) に対して、0.026 と大きな値を示し、強いマルチフラクタル性を有していることが明らかになった。

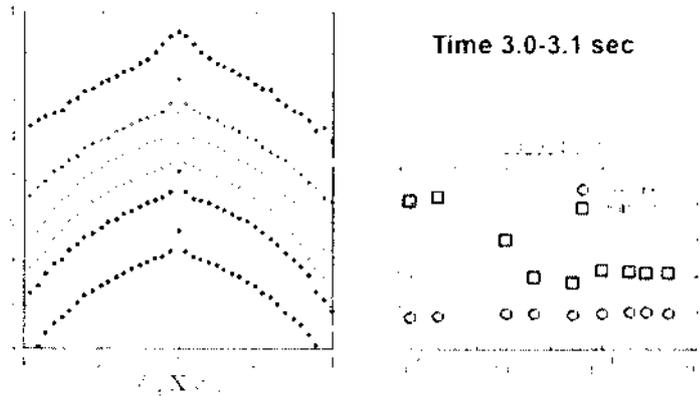


図3 時間遅れ確率密度関数と歪度、尖度の時間遅れ依存性

ニューラルネットワークの TRIAM-1M プラズマ計測への応用

電気通信大学電気通信学部情報工学科 竹田辰興

目的

TRIAM-1M プラズマを念頭に、その物理量を計測データから実時間で解析し、計測量の時系列データから物理量の予測を行い、計測データから物理量の挙動を支配する方程式の未知パラメータを評価すること等へのニューラルネットワークの適用方法について研究開発する。特に、TRIAM-1M が長時間放電実験装置であることを考慮して、計測データ解析が実時間で行われることを重視する。

研究概要

ニューラルネットワークは、入力データの重み付き和とある非線形変換からなる比較的簡単な計算ユニットを結合してネットワークを構成し複雑な計算ができるようにしたシステムである。その構造、データの取り扱い方、応用対象によっていろいろな観点からその働きを分類することができる。今年度の協力研究では、計測データ解析によく用いられる多層ニューラルネットワークについて詳しく調べ数値実験を行い、プラズマ計測データの解析への応用可能性について検討した。

◇ニューラルネットワーク選点法 (NNCM: Neural Network Collocation Method)

通常、多層ニューラルネットワークにおける学習は、出力データと教師データの差の二乗和を目的関数とし、この目的関数が最小値をとるようにネットワークの内部パラメータ（ウェイト）を調整することによって行う。多層ニューラルネットワークの出力は入力変数の連続微分可能な関数であるので、目的関数として微分方程式の残差の二乗和を採用することが可能で種々の最適化アルゴリズムによってこの目的関数を最小化できる。目的関数に使う方程式としては微分方程式のみならず、積分方程式や一般の代数方程式およびそれらの組み合わせを考慮することができる。この際、一般的には、解析対象とするシステムにおける独立変数を離散化して選点集合を作り各選点において残差の二乗等からつぎのような目的関数を構成する（従来、この方法を「残差最小化学習法」と呼んできたが、今回、より適切で一般的な「ニューラルネットワーク選点法 (NNCM)」と呼ぶことにする）。

$$E = \sum_{\text{observation points}} (\bar{y}^{NN} - \bar{y}^{obs})^2 + \gamma \sum_{\text{collocation points}} (L\bar{y}^{NN})^2$$

NNCMにおいては、複数のニューラルネットワークを組み合わせているいろいろな残差の二乗和からなる目的関数を最小化することで学習を行うことができるので測定データをもとにした逆問題解析に有効に利用できる。本研究の目的は、このNNCMを使ってTRIAM-1Mプラズマの計測データ

を解析し、予測及びパラメータ推定を行なうことであるが、本年度はTRIAM-1Mの実データの解析までは行わず、本方法の基本的性質についての数値実験を行ないプラズマ解析への適用可能性を検討した。この方法は、学習のための目的関数によって、色々なタイプの問題に適用できるが、今回はその対象として(1)CT型問題、(2)時系列予測型問題、について検討した。

◇CT型問題

CT(コンピュータトモグラフィ)型問題に関しては、既に、ニューラルネットワークによる一般的な少数データトモグラフィ[1]およびプラズマ中の電子密度分布再構成のためのニューラルネットワークを用いた非対称アーベル逆変換[2]に関して成果を挙げている。これらはいずれも投影データの数が少ないことを特徴としており、特に、後者は投影経路の方向が1方向に限られている問題である。投影経路の方向が1方向の場合、何らかの制約条件を課さない限りその方向の分布を再構成することはできない。この問題を克服するために、等密度面はMHD平衡の磁気面に一致するとして、対象とする磁気面を1パラメータで表現したMHD平衡シリーズの中から自動的に選ぶようなアルゴリズムを採用して解析に成功した。これほど極端ではないがGPS衛星からの電波の位相遅延測定から電離圏プラズマ電子の密度分布を再構成する3次元CT像再構成問題[3]では水平方向の測定経路がほとんどないという困難がある。この解析で特に有効だったのは、GPSからの遅延データ以外に国内4ヶ所で得られるアイオノゾンデ測定データのの一つを使って3次元の解析領域中の一点(アイオノゾンデステーション上空で電子密度が最大になる位置)の座標値とそこでの電子密度を拘束条件として用いることであった。拘束条件として用いなかった残り3ヶ所のデータは検証用に使うことができるが、実際、再構成値の測定値からの誤差はきわめて少ないことが確認された(Fig.1)。NNCM法が少数データトモグラフィに有効である根拠は、ニューラルネットワークによる関数近似が「可変基底関数(Variable basis functions)による関数展開」であることによるものと推定される。この点に注目して電離圏プラズマ密度分布再構成問題についてNNCM法を従来の「固定直交関数(Fixed orthogonal function series)展開法」と比較したものをTable 1に示す[4]。これらの成果に基づいてNNCM法を用いたCT像再構成法を有効に用いるためには以下の点を考慮すべきであることがわかった。(1)投影経路の空間分布の偏りによる情報欠損を補うための何らかの拘束条件を加えること。これは、等高線の形状であっても良いし、他の方法により与えられた正しい値であってもよい。(2)オーバーフィッティングによる不安定性を避けるために解析領域をメッシュ分割し、再構成密度は区分定数値をとるようにする。(3)出力値の範囲が予めわかっている時にはこの条件を利用して学習の安定性を増す工夫をする。プラズマ電子密度分布CTの場合には出力値は必ず正であるからニューラルネットワークの最終層の活性化関数として正值のみを出力するスキマー型関数を用いることで良好な結果を得た。

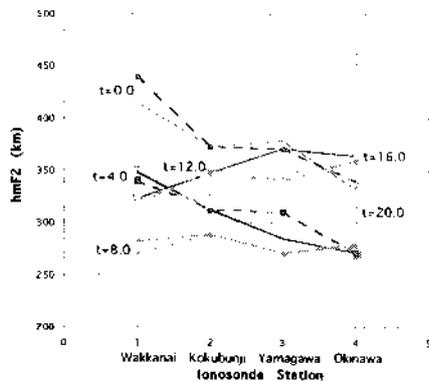


Fig.1 hmF2 at 4 ionosonde stations

Observed(Solid), Reconstructed(Dotted)

Method	Basis function	Problems
AR	Fixed Orthogonal Function Series	Linearity assumption
LPF	Same as AR	Linearity assumption
Ensemble method	Same as AR	Linearity assumption
ML	Variable Basis Function (NNCM)	Model selection, overfitting
NNCM	Variable Basis Function (NNCM)	Model selection, overfitting

Table 1 CT methods, Basis functions, and Problems

◇時系列予測型問題

時系列の自己回帰予測では等時間間隔で得られたデータ (x_1, x_2, \dots) があるとき、連続する n 個のデータ $(x_{i+1}, x_{i+2}, \dots, x_{i+n})$ の線形結合を使って x_{i+n+1} の値を予測する。通常のニューラルネットワーク予測では、線形結合の部分が多層ニューラルネットワークで置き換え、予測値を出力するニューラルネットワークを $F_{NN}(\cdot)$ として、次式を用いる。

$$\hat{x}_{i+n+1} = F_{NN}(x_{i+1}, \dots, x_{i+n})$$

このように非線形時系列予測では、時系列データが次のような連立1階常微分方程式の解であるとしてNNCMによってこの右辺を決定し数値積分によって未来の値を予測することも可能である。

$$\frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{g}(\vec{x})$$

今まで、気象学におけるエルニーニョ南方振動の予測、生態系解析などに際しての遅延微分方程式によって発生した時系列の予測などにNNCM法を適用して満足すべき結果を得た。ディスプレイ予測のように核融合プラズマ研究において重要な課題にも適用可能と考えている。今年度は、時系列が次式のような遅延微分方程式の解である場合についてのNNCM法の適用可能性について数値実験を行ないつつ検討を加えた[5]。

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= G(x(t), x(t-\tau)), \quad 0 \leq t \\ x(t) &= h_0(t), \quad -\tau \leq t \leq 0 \end{aligned}$$

ここで、 $x(t)$ は時刻 t におけるシステムの状態で、 τ は未知の遅延時間、 $h_0(t)$ は任意の初期関数である。時系列が遅延微分方程式の解であるような現象についての研究はまだ十分進んでいるとは言えない。核融合プラズマ研究においては制御過程に関連して重要になるものと考えられる。

NNCM法が遅延微分方程式に当たったNNCM系のシステム構成はFig.2に示す通りである。これまで行なってきたNNCM法の解析と比べて特に注意すべき点は、まず、学習のための最適化に際

して遅延時間 τ と他のパラメータの振る舞いが大幅に異なるために、同時に最適化を行なうことが困難な点である。我々は「強制ランダム探索付き二重ループ最小化法」という概念を提案して良好な学習を達成した。また、NNCM法は選点法であるので、通常は時刻 t の一点だけで方程式を満たすようにすればよいが、遅延微分方程式の場合には時刻 t を扱っている時に時刻 $t-\tau$ の値も考慮しなければならないという技術的困難もある。これは対象領域を大きくして領域分割が必要になった時に重要な課題となる。具体的な問題としては、次式で表されるMackey-Glass方程式を解いてランダムノイズを加えてモデル時系列を作成し、これをNNCM法によって解析した。

$$\dot{x}(t) = \frac{ax(t-\tau)}{1+(x(t-\tau))^c} - bx(t)$$

数値実験では遅延時間を30としたモデル測定データを使い遅延時間及びMackey-Glass方程式の解の再現を行い(Fig. 3)、また、この結果から時系列予測を行い満足すべき結果を得た。

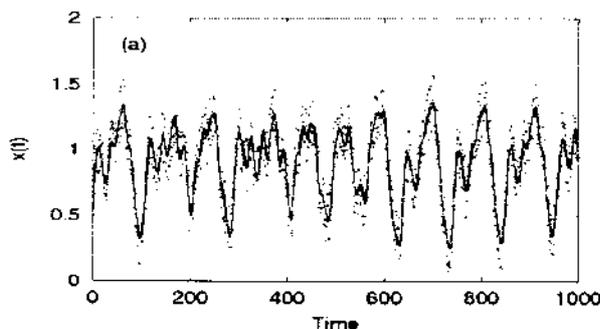
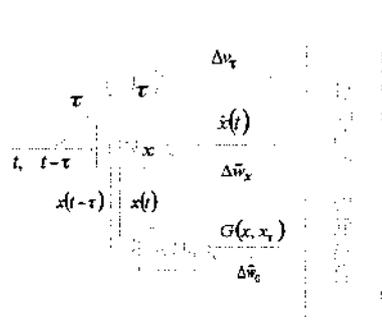


Fig.2 遅延を含む時系列のためのシステム

Fig.3 Mackey-Glass時系列データ再構築

参考文献

- [1] X-F. Ma, M. Fukuhara, T. Takeda, Neural network CT image reconstruction method for small amount of projection data, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A **449** (2000) 366-377.
- [2] X-F. Ma, T. Takeda, Asymmetric Abel inversion by neural network for reconstruction of plasma density distribution, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research **A492** (2002) 178-189.
- [3] X.F. Ma, T. Maruyama, G. Ma, T. Takeda, Three-dimensional ionospheric tomography using observation data of GPS ground receivers and ionosonde by neural network, Journal of Geophysical Research **110** (2005) A05308.
- [4] T. Takeda, X-F. Ma, Ionospheric tomography by neural network collocation method, ITC16 (Toki, 2006).
- [5] 竹田辰興、呉こん、ニューラルネットワークを使ったデータ同化及びパラメータ評価、第19回計算力学講演会(名古屋、2006)。

プラズマ対向材料再堆積層形成に伴う水素同位体及びヘリウム挙動に関する研究

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。また近年、壁材料に水素同位体と同時にヘリウムが照射された場合、ヘリウムが水素同位体挙動に少なからぬ影響を及ぼすことが明らかにされている。したがって、再堆積層形成に伴うヘリウム挙動の把握も必要とされる。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ていることが明らかとなっている。また同様にヘリウムプラズマ照射下においては、ヘリウムが蓄積されることもわかってきた。しかしながら、その蓄積機構の解明には至っていない。本研究では、重水素及びヘリウムプラズマ照射下で形成されたタングステン再堆積層を対象として、昇温脱離(TDS)実験及び微細構造観察を通じて、再堆積層への水素同位体及びヘリウム蓄積機構について考察した。

【実験】 容量結合型 RF プラズマによりタングステン(ニラコ社製)をスパッタリングして、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。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。再堆積量は放電前後の基板質量変化をマイクロ天秤で測定し算出した。さらに再堆積層はタングステン原子のみから構成されると仮定して、再堆積質量からタングステン原子数を算出した。再堆積層作製条件は、Table1 にまとめる。

タングステン基板上に作製した試料を用いて、昇温脱離(TDS)実験を行った。基板は 1cm×0.5cm,厚さ 0.02cm のサイズにカットし、実験装置に設置した。真空排気後、1400°C まで 1°C/s で等速昇温した。

石英基板上に作製した試料を用いて、透過型電子顕微鏡(TEM)観察を行った。なお TEM 観察用薄膜試料は、集束イオンビーム加工(FIB)法により作製した。

【結果及び考察】 RF 電力 50W での重水素プラズマ、及び RF 電力 200W でのヘリウムプラズマにより作製したタングステン再堆積層 0.34mg、及び 0.77mg を用いて、TDS 実験を行った。重水素プラズマにより形成されたタングステン再堆積層からの重水素放出においては、HD(m/e=3),D₂(m/e=4), HDO(m/e=19), D₂O(m/e=20)を観測対象とした。Fig.2 にそれぞれの放出曲線を比較する。放出された重水素原子数に対する各放出化学形の割合は、それぞれ HD:7.2%, D₂:8.2%, HDO:77.3%, D₂O:7.3%であった。なお、加熱開始と同時に多量の H₂O の放出が観測されており、この H₂O と再堆積層表面に達した D との反応により HDO が形成されたと考えられる。本試料からの重水素の放出は低温で始まったことから、D-D あるいは D-H の再結合反応よりも、D-H₂O 間での速やかな同位体交換反応が HDO としての D 放出を促したものと考えられる。以前、RF 電力 200W での重水素プラズマにより作製したタングステン再堆積層からの TDS 実験を行ったが、放出開始温度は 150°C 付近であった。この場合はおよそ 80%が D₂として放出された。これらの結果から放出開始温度により放出化学形が変化することを示唆している。観測した 4 成分の放出量から、捕捉されていた重水素原子数は、 1.12×10^{17} 個と見積もられた。また、再堆積層 0.34mg がすべてタングステンにより構成されると仮定すると、再堆積相中のタングステン原子数は、 1.11×10^{18} 個と算出される。以上より、再堆積層中の原子比 D/W は 0.10 と求まった。これまで、ガスクロマトグラフを用いた不活性ガス雰囲気での水素放出実験を行ってきたが、TDS 実験においてもほぼ同程度の重水素捕捉量を確認できた。この値はタングステンバ

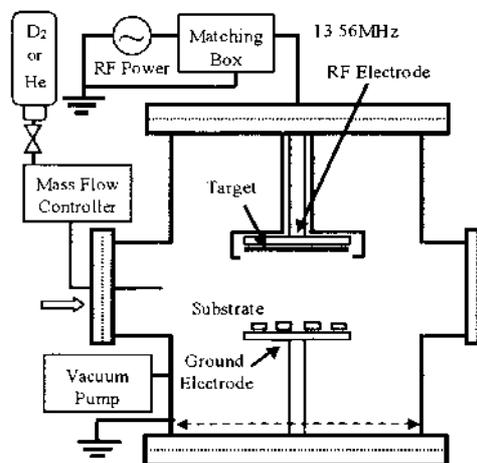


Fig.1 RF プラズマ装置概略図

Table 1 再堆積層作製条件

放電ガス	重水素	ヘリウム
RF 電力 [W]	50	200
圧力 [Pa]	10	
流量 [sccm]	1.2	
放電期間 [hour]	240	120
基板温度 [°C]	46	125
スパッタ面積 [cm ²]	12	
電極間距離[cm]	11	

ルクへの水素吸収量に比べ遥かに大きく、吸収とは明らかに異なる現象により重水素が保持されていると言える。

ヘリウムプラズマにより形成されたタングステン再堆積層からのヘリウム放出曲線を Fig.3 に示す。重水素よりもやや高い 100°C 付近から放出が始まり、300°C 付近にピークを示した。重水素放電よりも放電中の基板温度が高いため、放出開始温度が上昇したと考えられる。このことは、放電中の基板温度をより低温に制御すれば、より多くのヘリウムが保持される可能性を示唆する。放出量より捕捉されていたヘリウム原子数は、 4.43×10^{17} 個と見積もられた。重水素と同様にして、再堆積層中の原子数比 He/W を算出すると、0.18 と求まった。再堆積層へのプラズマガスの多量捕捉現象は、水素特有のものではなく、不活性ガスにおいても生じることが明らかとなった。核融合炉においては水素同位体とヘリウムが同時に存在するため、ある条件下では多量の水素同位体及びヘリウムが同時に捕捉される可能性も否定はできない。

重水素プラズマ及びヘリウムプラズマによるタングステン再堆積層の TEM 画像をそれぞれ Fig.4(a), (b) に示す(明視野像)。白い像はバブルを示しており、重水素形成再堆積層には、2nm 程度のバブルが存在している。一方、ヘリウム形成再堆積層には、2-20nm 程度のバブルの形成されている。図中左下に示すそれぞれの試料の回折図形には強い回折リングが見られ、これは再堆積層がアモルファス構造を持つことを示す。また、ここには示していないが暗視野像中の白い像からはいずれの再堆積層も 2-3nm 程度の非常に微細な結晶粒で構成されていることがわかった。

RF プラズマ装置での基板近傍のおおよそのイオンフラックスは、50W で $\sim 10^{19} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、200W で $\sim 10^{20} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ である。また、ガス圧 10Pa、温度 100°C での基板への分子入射フラックスは $\sim 10^{23} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ である。一方、タングステン原子の堆積フラックスを堆積量と放電時間から算出すると重水素プラズマで $\sim 10^{16} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、ヘリウムプラズマで $\sim 10^{17} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ と見積もられる。すなわち、タングステン原子 1 個が堆積する間にイオンは 10^3 個程度、分子は 10^6 個程度、堆積表面に衝突していることになる。このことから、堆積表面には常に多量の分子が存在していると言える。低頻度で入射するタングステン原子は、基板温度が低いために表面拡散ができず、かつ多量の分子の存在により結晶の形成・成長が妨げられるために、微細な結晶粒が形成されたと考えられる。また、イオンは 10eV 程度の弱いエネルギーではあるが、堆積表面ごく近傍において入射・脱離を頻繁に繰り返す、その一部が結晶粒界に留まり蓄積されていくと思われる。金属中のヘリウムは自ら集合する傾向を持つため、重水素では見られなかった 20nm 程度の成長したバブルが形成されたと考えられる。微細な結晶粒が形成されることは同時に多くの粒界が存在することを意味する。重水素及びヘリウムが結晶粒界にバブルを形成して蓄積されているとすれば、結晶粒の成長が促進される条件下(高温・低圧)では、蓄積量は減少すると推測される。従って、核融合炉内の条件を考慮すると、本実験で得られたようなタングステン再堆積層への多量の蓄積という現象は、炉内水素同位体挙動に関して支配的なものではないと考えられる。しかしながら、炉内には様々な環境が存在し、局所的には起こり得る現象である。トリチウム挙動の理解という観点からは重要な現象であり、今後も各種プラズマ対向壁候補材を対象とした研究を進める必要があると考える。

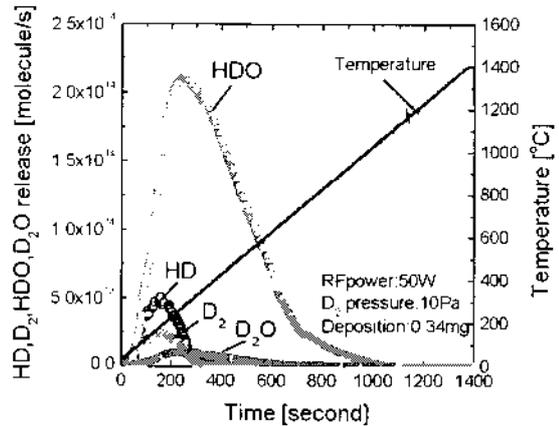


Fig.2 重水素プラズマによるタングステン再堆積層からの重水素放出曲線

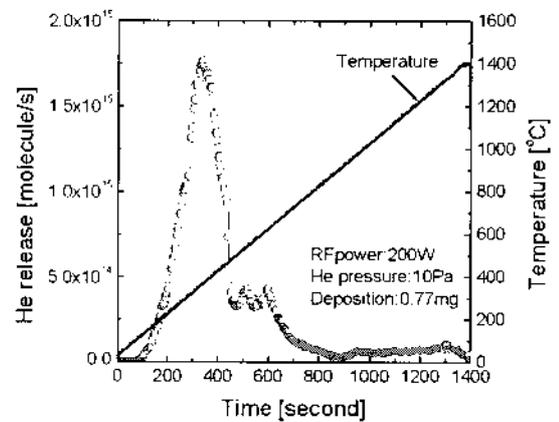


Fig.3 ヘリウムプラズマによるタングステン再堆積層からのヘリウム放出曲線

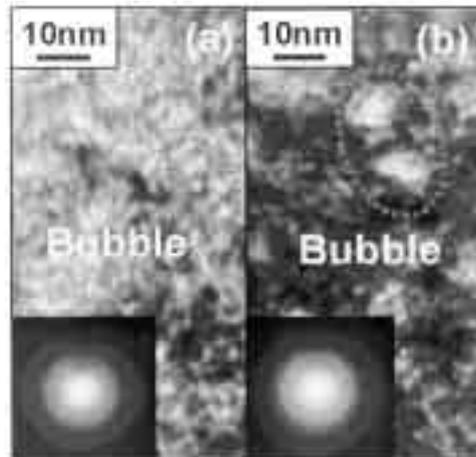


Fig.4 タングステン再堆積層の明視野 TEM 画像 (a)重水素プラズマ、(b)ヘリウムプラズマ

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

研究集会「核燃焼プラズマ統合コード研究会」は、2006年12月21日、22日の2日間にわたり九州大学応用力学研究所で開催された。この研究会は核燃焼プラズマ統合コード構想 BPSI (Burning Plasma Simulation Initiative)の活動の一環として行われたものである (<http://bpsi.nucleng.kyoto-u.ac.jp/bpsi/>)。

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。今年度、特記すべき点は、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・欧間で行われたことである。国内においては ITER-BA に関する議論も始まり、六カ所村に国際シミュレーション研究センターの建設も予定されている。自己点火に向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5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

会議初日は統合モデル、プラズマ周辺モデル、グリッド、乱流、MHD のカテゴリーで、2日目はマルチスケール、その他のカテゴリーで研究成果報告がなされた。発表件数は19件、参加者は23名であった。以下に概略を紹介する。

統合モデル

TASK V1.0 のソースが2006年9月に公開。ソースはF77よりF95に変更。TX、WX等の新しいモジュールが整備されている。TXは1次元の輸送と流れを同時に解いているのでプラズマ回転やL-H遷移などの遷移現象を取り扱うことが可能である。これまでにNBI入射の場合の密度のピーキング現象を再現することに成功している。今後の課題として長時間

シミュレーションのための数値安定性の改良、乱流輸送モデルのテスト等があげられる。現在はまだ単独で動作しているが、3次元配位におけるNBI、ICRF加熱時における高エネルギー分布関数を計算可能なGNETコードの整備も進展している。今後TASKモジュールとして整備されていく予定である。さらにJAEAのTOPICコードより平衡、NBIの部分を取り出し、新しいモジュールとしてTASKへ結合する作業が始まっている。また、並行してヘリカル系における統合コード開発も進んでいる。正味のプラズマ電流を評価するコードが開発されており、このコードの応用としてトカマクにおけるトロイダルリップル損失を考慮したブートストラップ電流の評価が可能となる。今後、MHD安定性、乱流輸送、SOL、ダイバータ輸送等のモジュールとのインタフェース開発を進めていく予定である。

プラズマ周辺モデル

ダイバータによる粒子と熱の制御を行うため、統合モデルによるダイバータシミュレーションコードの開発が必要である。JAEAにおいてはSONICと呼ばれる統合コード開発が進んでいる。さらに流体コードのクロージャを構築するために粒子シミュレーションコードPARASOLも開発されている。PARASOLを用いてHモードプラズマにおけるELM崩壊後のダイバータ板へ到達する増加熱フラックスの問題が調べられ、速い時間スケールと遅い時間スケールの応答に対する特徴的時間における衝突やリサイクリングの効果が明らかにされた。SONICを用いたシミュレーション研究ではJT-60UにおけるX点MARFEでのカーボン輸送解析、壁の飽和条件下でのダイバータポンピングの特性評価、JT-60SAのダイバータ性能評価等の結果が報告された。放射化されたダストの取り扱いが核融合炉の安全性の観点から重要なテーマであり、NIFSではプラズマ壁からのダストの放出条件の評価が行われている。またジャイロ運動論を用いた磁気シース形成の研究も進展しており、解析モデルとPICの結果はよく一致している。

グリッド

JAEAでは原子力グリッド基盤(Atomic Energy Grid Infrastructure: AEGIS)の研究開発を推進している。ここで、AEGISの主要な適用分野の一つとして、核融合研究分野における遠隔協調研究環境の構築を目指した研究開発を行っておりその成果の一部が報告された。

乱流

ETG乱流シミュレーションデータに対し統計解析が行われ次元やPDFが評価された。Weak magnetic shearではnormal shearの場合に比べ次元が低減し、PDFの指数テールも消えることが示された。Zonal FlowとGAMの相互作用と輸送レベルの関係がシミュレーション結果をもとに調べられ、GAMによるzonal flowの減衰率がRosenbluth-Hintonの結果と一致することが確認された。

MHD

電磁場が介在する現象を取り扱える新しいジャイロ運動論モデルが提案された。total characteristic methodが電子に適用された。この手法によりエネルギー保存則が改善され、マーカー粒子数における周波数の収束性も通常の δf より高速となった。MHD安定性コードMARG2DコードをITERのMHD制御に適用するために、FPGAのような専用チップの可能性が検討された。FPGA1枚でおおよそAltix 3700 Bx2(2PE)の約4.5倍の性能向上が期待

されことが示された。ジャイロ簡約化 MHD コードによる運動論的内部キンクモードのシミュレーションが行われ、非線形フェイズにおけるセカンダリー不安定性としての Kelvin Helmholtz 不安定性による渦生成の効果が報告された。

マルチスケール・その他

マルチスケールグローバルシミュレーションによるダブルテアリングモードの運動論的バルーニングモードによる励起に関する研究報告があった。乱流、MHD、メゾスケールの非線形相互作用の重要性が示された。ドリフトテアリングモードの非線形シミュレーションの結果が報告され、MHD における帯状流生成機構に関する考察が示された。グローバル ITG コードを用いた内部輸送障壁の生成、崩壊の輸送シミュレーションが報告され、非局所的な非線形相互作用が崩壊をトリガーすることが示された。モデル粘性を用いた新古典テアリングモード非線形シミュレーション結果が報告され、テアリングモードが衝突性ドリフト波のビート相互作用により加速することが示された。森の射影演算子法を用いた少数自由度カオスモデルの解析結果が報告された。

統合コード活動状況

活動環境

大学、核融合研、原子力機構等による連携

(京大, 九大, 山口大, 東大, 東工大, 慶応大, 筑波大, 核融合研, 原子力機構, 電中研等)

活動形態

科学研究費補助金基盤研究(B)(1)「核燃焼プラズマ統合コードによる構造形成と複合ダイナミクスの解析」(研究代表者 矢木雅敏、研究期間平成16年度-18年度)(今年度で終了)

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)

日米ワークショップ

Integrated Simulation of Fusion Plasmas (2007/1/29-31, ORNL, USA)

日韓ワークショップ

Theory and Simulation of Magnetic Fusion Plasmas (2006/8/16-17, Daejeon, Korea)

九大応力研共同研究 特定研究 (平成18年~19年度)

核融合研共同研究、原子力機構共同研究

中期的サポートが必要

理論・データ解析・コード開発：若手研究者

参考資料

第5回統合コード研究会

5th Burning Plasma Simulation Initiative Annual Meeting

平成18年12月21～22日、九州大学応用力学研究所2階会議室

--- #201, RIAM, Kyushu University, Kasuga, Fukuoka, Japan, 2006/12/21-22 ---

12/21

9:00 矢木雅敏(九大) はじめに

統合モデル

9:10 福山 淳(京大) 統合コードTASKの現状と将来

9:40 本多 充(京大) TASK/TXによるトカマク輸送シミュレーション

10:10 村上 定義(京大) GNET+TASK/WMによるICRF加熱シミュレーション

10:40 休 憩

プラズマ周辺モデル

10:50 滝塚 知典(原子力機構) PARASOL シミュレーションの現状と計画

11:20 川島 寿人(原子力機構) JT-60U/JT-60SAでのSONICコードによるSOL/ダイバータシミュレーション研究の現状

11:50 富田 幸博(核融合研) SCOPICコードによる微粒子の壁からの離脱条件

12:20 昼 食

13:10 事務手続き

13:30 河村 学思(京大) 磁気シース形成におけるジャイロ運動論的アプローチ

グリッド

14:00 山岸 信寛(原子力機構) 核融合分野における遠隔協調研究環境への原子力グリッド基盤(AEGIS)の適用

統合モデル(ヘリカル系)

14:30 中村 祐司(京大) ヘリカル系プラズマにおける電流の時間発展

乱流

15:00 松本 太郎(原子力機構) Characteristics of Turbulent Fluctuations in the Presence of Zonal Flows

15:30 休 憩

15:40 李 継全 (京大) Zonal Flow and GAM Dynamics in Tokamak Plasmas

MHD

16:10 藤堂 泰 (核融合研) 補完流体法による運動論的電磁プラズマモデルの構築

16:40 徳田 伸二(原子力機構) 磁気流体力学安定性解析コードMARG2Dにおける固有値問題ソルバーのハード化

17:00 内藤 裕志(山口大) 内部キンクモードに対するイオンのランダウ減衰と渦生成効果

17:30 議 論

18:00 散 会

19:30 懇親会

12/22

マルチスケール、その他

9:00 石澤 明宏(核融合研) 磁気流体不安定性、微視的乱流および帯状流の相互作用のシミュレーション

9:30 西村 征也 (九大) ドリフト-テアリングモードにおける輸送の効果

10:00 徳永 晋介 (九大) グローバルITG乱流コードを用いた輸送シミュレーション

10:20 休 憩

10:30 林 高行 (九大) テアリングモードと衝突性ドリフト波の相互作用の研究

10:50 濱田 大地 (九大) 森の射影演算子法を用いた衝突性ドリフト波カオスの研究

11:10 議論およびまとめ

11:40 今後の活動予定 (応力研・特定研究の進め方)

12:00 昼 食

13:00 解 散 (科研費報告書に関する議論、科研費分担者のみ)

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

ITERの建設が決まり、核融合研究はいよいよ核燃焼プラズマを対象とする段階に入った。核燃焼環境下で使用する材料中には、D-T反応によって発生したヘリウム(α 粒子)の入射や、中性子の照射による核変換ヘリウムの生成によってヘリウムが混入する。ヘリウムは材料中に固溶せず結晶中を容易に移動する一方で、転位や不純物原子などの先在的な格子欠陥やはじき出し損傷欠陥などと強く相互作用するため、材料の内部組織を大きく変化させ、材料の寸法安定性、機械的性質、伝熱的性質などの劣化、さらには、水素リサイクリングなどにも大きな影響を及ぼすことが懸念されている。

このような背景を踏まえ、標記研究会を平成18年6月6日に九州大学応用力学研究所で開催した。本研究集会では特定研究「照射効果－水素・ヘリウム・不純物元素相互作用」とも連携し、最新の研究成果を持ち寄ることによって、核融合炉材料におけるヘリウム照射損傷、ヘリウム－欠陥相互作用など材料中のヘリウムの挙動について水素との比較も視野に入れた議論を総合的に行い、核融合材料におけるヘリウム挙動に関する研究ネットワーク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、公的研究機関である日本原子力研究開発機構からの参加があり、総勢26名での研究集会が行われた。今回は、今までの研究成果についての情報交換や意見交換を行うとともに、研究開発の進め方等についての総合的な議論もなされた。

まず、九州大学の吉田氏により本年度よりスタートした特定研究「照射効果－水素・ヘリウム・不純物元素相互作用」についての概要の説明があり、その後当該分野に関連する各講演が行われた。レビュー講演として、九州大学の田邊氏は材料中に打ち込まれたヘリウムの再放出挙動についての従来までの国内外の研究成果をまとめたあげた内容での講演を行い、同大学の吉田氏は核融合実験装置(TRIAM/LHD)における照射実験と実験室系の制御実験とを比較し、プラズマ・壁相互作用で重要になるそれぞれの要素過程と問題点の明示を行った。

静岡大学の矢野氏はSiC中の水素同位体挙動に及ぼすヘリウム照射影響についての発表を行い、ヘリウム照射によるSiCの構造変化が重水素の保持特性に影響を与え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重水素・ヘリウム照射効果に関する解析を多角的に行い、照射エネルギー依存性や酸素含有量の影響などに関する講演を行った。

透過型電子顕微鏡を用いてヘリウムバブルの基礎的な挙動を明確にしようとする試みが複数の研究者によって行われた。島根大学の小野氏は鉄中のバブルと不純物元素や粒界との総合作用に関する研究を行い、九州大学の岩切氏はタングステン中におけるヘリウムバブルの照射温度・照射エネルギー依存性、島根大学の宮本氏はバブルとサブカスケードとの直接的な相互作用によるバブルの移動機構という新現象、東北大学の二田氏はTEM内引っ張りその場観察法を用いたバブル(高圧、低圧のものを双方)と転位との相互作用に関する講演をそれぞれ行った。さらに、電子顕微鏡では観察ができないような微細なバブル(ボイドも同様)や、バブル内に存在するヘリウムや水素などのガス原子を陽電子消滅分光法を用いて分析する試みが京都大学の義家氏によって行われた。

ヘリウムバブルに起因する最も顕著な(大きなスケールで生じる)現象である表面形状変化に関しても複数の講演があり、大阪大学の上田氏は水素・炭素混合ガスにヘリウムを添加したビームをタングステンに照射し、プリスタリングに関する新規的な現象とそのメカニズムを明らかにした。名古屋大学の野村氏は10～100eVの極低エネルギーのヘリウム・水素を広範な温度領域で照射し、従来までのプリスタリング研究では得られていないような実験領域における特徴的な表面形状変化を示した。九州大学の徳永氏は、ヘリウム照射後の試料に引っ張り応力を負

荷し、照射後の表面形状のさらなる変化や応力負荷時におけるヘリウムの再放出挙動などの研究を行った。また、名古屋大学の武藤氏はタングステン上に形成されたプリスターの詳細な構造観察をTEMやFEMを用いて行ったほか、プリスターのガス保持特性について有限要素法を組み合わせたモデリングによって解析した。

ヘリウムや水素などの材料中のガス原子を取り扱ったモデル計算に関する講演も複数行われた。核融合科学研究所の加藤氏は第一原理分子動力学計算を行い、原子空孔近傍における水素原子の結合エネルギーや水素原子の存在位置などを原子レベルで示した。京都大学の森下は分子動力学法を用いてヘリウムバブルの核形成過程を明らかにしたほか、キネティックモンテカルロ(event-KMC)計算によりバブル成長における“統計的ゆらぎ”を考慮したシミュレーションを行った。同大学の徐氏は、拡散を考慮した反応速度論を用いて、中性子やヘリウムプラズマが第一壁やダイバータに及ぼす欠陥蓄積過程についての計算を行い、相乗照射効果に関する有意な知見を示した。

そのほか、日本原子力研究開発機構の濱口氏により加速器駆動未臨界システム(ADS)における核破砕中性子源材料の開発課題の概要についての説明があり、固体ターゲット中に発生するヘリウムに関する報告も行われた。さらに、東北大学の長谷川氏は、低放射化フェライト鋼などの核融合炉構造材料中に生成される核変換ヘリウムが機械的特性に及ぼす影響について、引っ張り試験後の破断面観察結果などから重要な知見を示した。また、タングステンの結晶粒を100nm程度の微細な結晶粒に抑えることで、表面損傷を起こす照射量が従来の材料の約10倍以上になることを示した。

今回の研究集会により非常に有意義な情報交換ができたことから、今後もこのような交流の場をもうけることが重要であり、継続すべきであるとの意見で一致し、来年度の共同利用研究も今年度と同規模の開催を申請することが決定した。

平成18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」

日時:2006年6月6日(火)9:30~17:30

場所:福岡県春日市春日公園6-1

九州大学応用力学研究所2F 大会議室

開始	終了	講演者	所属	タイトル
座長 森下和功				
9:30	9:40	吉田直亮	九大 応力研	「特定研究4:照射効果-水素・ヘリウム・不純物元素相互作用」の概要
座長 徐 虬				
9:40	10:00	田辺哲朗	九大 総理工	イオン打ち込みされたヘリウムの再放出
10:00	10:20	大矢恭久	静大理	SiC 材料中におけるヘリウムおよび重水素照射による化学的挙動
10:20	10:40	吉河 朗	静大理	ボロン膜中の重水素挙動に及ぼすヘリウム照射効果
座長 長谷川晃				
10:40	11:00	徐 虬	京大炉	タングステンにおけるヘリウムプラズマと中性子照射の相乗効果
11:00	11:20	森下和功	京大 エネ研	ヘリウムバブルの核生成・成長
11:20	11:40	加藤太治	核融合 研	α 鉄中の原子空孔と水素原子クラスタの第一原理 MD 計算
(昼 食)				
座長 奥野健二				
13:00	13:20	吉田直亮	九大 応力研	核融合実験装置における照射実験 (TRIAM/LHD)
13:20	13:40	大野哲靖	名大エコ トピア研	ヘリウムプラズマ照射によるタングステン及びタングステン被覆黒鉛表面損傷と ELM 模擬熱パルス照射効果
13:40	14:00	宮本光貴	島根大 総理工	カスケード損傷形成下におけるカスケード損傷形成下における He バブルの動的挙動
座長 大野哲靖				
14:00	14:20	義家敏正	京大炉	陽電子消滅分光法を用いた原子空孔集合体内のガス原子の検出
14:20	14:40	武藤俊介	名大工	Structural analysis and formation mechanism of surface blisters on tungsten by TEM and FEM

14:40	15:00	徳永和俊	九大 応力研	低エネルギーヘリウム照射されたプラズマ対向材料の 応力負荷による表面損傷とヘリウム放出挙動
(コーヒーブレイク)				
座長 武藤俊介				
15:20	15:40	長谷川晃	東北大 工	核融合炉候補材料の中性子照射効果に及ぼす核変 換 He の影響
15:40	16:00	二田伸康	東北大 金研	TEM内引張その場観察による He バブルと運動転位 の相互作用に関する研究
16:00	16:20	濱口 大	原子力 機構	核破碎中性子源における材料開発課題
座長 高村秀一				
16:20	16:40	小野興太郎	島根大 総理工	ステンレス鋼中の照射ヘリウムの挙動と不純物効果
16:40	17:00	岩切宏友	九大 応力研	透過型電子顕微鏡によるヘリウムバブルの生成・成長 過程の観察
17:00	17:20	上田良夫	阪大工	プラズマ対向材への水素・ヘリウム同時照射効果
座長 吉田直亮				
17:20	17:40	ディスカッション 本研究会や特定研究の今後の進め方		
17:20	17:40	吉田直亮	九大 応力研	(閉会の辞)

参加者リスト

所 属	氏 名
東北大学	長谷川晃
東北大学	二田伸康
日本原子力研究開発機構	濱口 大
静岡大学	大矢恭久
静岡大学	吉河 朗
核融合科学研究所	加藤太治
名古屋大学	武藤俊介
名古屋大学	大野哲靖
名古屋大学	高村秀一
京都大学	徐 虬
京都大学	森下和功
大阪大学	上田良夫
島根大学	小野興太郎
島根大学	宮本光貴
九州大学	田辺哲朗
九州大学	吉田直亮
九州大学	徳永和俊
九州大学	岩切宏友
九州大学	時谷政行
九州大学	蛭原 綾乃
九州大学	片伯部 陽一
九州大学	東嶋 彬
九州大学	秋吉 亮平
九州大学	大多和 義久
九州大学	八尋 由樹
九州大学	鱒渕 俊児

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
