# 全国共同利用研究成果報告 第9号

# 平成17年度 九州大学応用力学研究所

# 発刊の辞

応用力学研究所が全国共同利用研究所となって,10年近くが過ぎました。毎年 60件以上の共同研究が行われ,多くの成果が生まれています。本報告書に示し ますように,2005年度も,特定研究2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,2006年6月1~2日に開催される「RIAMフォーラ ム2006」でも報告されます。また,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10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。

九州大学が国立大学法人として,文部科学省から独立して2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,その存在基盤の問題点が指摘されていましたが,法人 化後の九州大学においても,応用力学研究所は,「力学に関する学理及びその応 用の研究」を目的とする研究所として附置され,重要な役割を与えられていま す。そして,大学の「中期目標・中期計画」の中で,研究に関する重点事項の 一つとして,応用力学研究所での全国共同利用の推進が掲げられています。

応用力学研究所は,今後も,力学とその応用に関する研究に関し,国際的に高 い水準の研究成果を上げるとともに,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プロジェクト研究 に,主として力学的手法を用いて取り組みます。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,応用力学分野の世界的研究拠点 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。

> 2006年3月 九州大学応用力学研究所 所長 今脇資郎

Ħ	八

平成 17 年度共同研究一覧······i
平成 17 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・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
核融合プラズマ分野共同研究成果報告・・・・・・・・・・・・・・・133

# 平成17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	頁
			協力者数	
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		
17特1-1	荒天下非線形船体運動および抵抗増加に関す	広島大学		
	る研究	岩下英嗣	3名	1
17特1-2	海洋巨大波の実態と生因の解明	海上技術安全研究所		
	_ + <del>,</del>	富田 宏	9名	5
17特1-3	ブ   水波と浮体に関する強非線形問題の数値シミ	海上技術安全研究所		
	了   ュレーション技術の開発	谷澤 克治	5名	11
17特1-4	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	9名	13
17特1-5	水圧荷重下の大規模シェル構造の並列化崩壊	広島大学		
	解析システムの開発	藤久保 昌彦	4名	19
一般研究			1	
17ME-1	金属と高分子基複合材料との界面接着の高強度化	愛媛大学	高雄 善裕	
		黄木 景二	1名	21
17ME-2	カオス・乱流における輸送特性	崇城大学	岡村 誠	
		柴田博史	1名	23
17ME-3	太陽電池用高品質多結晶シリコンの結晶成長に関す	豊田工業大学	柿本浩一	
	る研究	大下 祥雄	1名	25
17ME-4	有限要素法による人工膝関節の応力解析	佐賀大学	東藤 貢	
		萩原世也	2名	29
17ME-5	骨固定用インプラント材料の変形・破壊メカニズム	九州大学	東藤 貢	
	に関する研究	竹之下 康治	2名	31
17ME-6	結晶性高分子固体の延伸破損機構の構造論的解明	金沢大学	新川 和夫	
		新田 晃平	1名	34
17ME-7	人工股関節の力学的挙動の計算力学・実験力学的解	佐賀大学	東藤 貢	
	析	佛淵 孝夫	5名	36
17ME-8	ブリッジマン法による機能性化合物半導体の結晶成	宮崎大学	柿本浩一	
	長と成長時の融液流動解析	吉野 賢二	2名	40
17ME-9	モアレ干渉法による分岐切欠き周辺の変位場測定	豊橋技術科学大学	新川 和夫	
		鈴木 新一	1名	43

大気海洋分野

番号	研究課題	代表者名	所内世話人	頁
			協力者数	
特定研究			•	
	東シナ海における海洋変動、その物理・化学・生物	九州大学	松野健	
	過程	松野 健		77
17特2-1	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	2 名	78
17特2-2	対馬海峡低層における水塊特性	水産大学校		
	<b>サ</b>	滝川 哲太郎	3名	80
17特2-3	Finite Volume Coastal Ocean Model(FVCOM)を用いた黒潮前	九州大学		
	テー 線渦による黒潮フロント横断方向輸送量の定量的評価	磯辺 篤彦	0名	82
17特2-4	マ 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	3名	84
17特2-5	化学的トレーサーを用いた東シナ海の水塊構	富山大学		
	造解析	張勁	3名	85
一般研究				
17A0-1	有明海における物質輸送の数値シミュレーション	熊本県立大学	柳 哲雄	
		藤家 亘	0名	87
17A0-2	物理-生態系結合モデルを用いた日本海低次生態系	水産大学校	柳 哲雄	
	に関する研究	鬼塚 剛	0名	89
17A0-3	総観スケール風速場変動に対する相模湾および黒潮	国土技術政策総合研究所	柳 哲雄	
	内部領域の応答過程	日向博文	0名	91
17A0-4	マニラ湾の物質循環と基礎生産に関する研究	神戸大学	柳 哲雄	
		林 美鶴	0名	93
17A0-5	数値モデルを用いた気圧擾乱に対する日本海の水位	東北大学	広瀬 直毅	
	応答の研究	木津昭一	1名	95
17A0-6	海洋短波レーダーによる日本沿岸海況監視システ	琉球大学	吉川 裕	
	ムの開発	藤井 智史	5 名	97
17A0-7	ジャイロミル式潮流発電装置に関する実験的研究	九州大学	小寺山 亘	
		経塚 雄策	2名	99
17A0-8	可変ベクトルプロペラを用いた自律海中ロボットの	佐世保工業高等専門学校	中村 昌彦	
	運動制御に関する研究	長嶋豊	1名	101
17A0-9	海洋大循環の力学、とくに中深層循環におよぼす海	気象庁	増田 章	
	岸・海底地形の影響に関する研究	石崎廣	11 名	104
17A0-10	風レンズ風車に最適な翼形状の設計に関する研究	九州大学	大屋裕二	
		古川 雅人	1 名	106
17A0-11	次世代海中ビークルの開発研究	海洋研究開発機構	小寺山亘	
		山本 郁夫	10 名	109

# 核融合プラズマ分野

番号	研究課題	代表者名	所内世話人	頁
			協力者数	
一般研究				
17FP-1	重照射を受けたステンレス鋼の照射誘起応力腐食割	電力中央研究所	渡辺英雄	
	れ(IASCC)に及ぼす粒界特性の影響に関する研究	秀耕一郎	0名	133
17FP-2	シリコン単結晶の表面欠陥のX線回折顕微法による	九州産業大学	佃 昇	
	研究	二神光次	2名	135
17FP-3	低放射化バナジウム合金の不純物輸送に伴う組織変	核融合科学研究所	渡辺 英雄	
	化	室賀健夫	3名	137
17FP-4	FePt-Al203グラニュラー薄膜における照射誘起構造	九州大学	渡辺英雄	
	变化	松村 晶	5名	139
17FP-5	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	渡辺英雄	
		安田 和弘	5名	141
17FP-6	水素とヘリウムによる金属の損傷組織及び機械的性	京都大学	吉田 直亮	
	質への影響	義家 敏正	2名	143
17FP-7	長時間プラズマにおける中性粒子の挙動	筑波大学	坂本 瑞樹	
		中嶋 洋輔	4名	145
17FP-8	ジャイロランダウ流体モデルによる銀河クラスター	九州大学	矢木 雅敏	
	の異常電子熱輸送の研究	矢木 雅敏	5 名	148
17FP-9	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	渡辺英雄	
		高橋正氣	5名	150
17FP-10	核融合炉材料のガス不純物挙動に関する研究	京都大学	吉田 直亮	
		森下 和功	7名	152
17FP-11	トカマクとヘリカルにおける高性能定常プラズマで	核融合科学研究所	中村一男	
	の不純物挙動に関する比較研究	中村 幸男	7名	154
17FP-12	タングステンと銅との接合材の組織と特性に及ぼす	茨城大学	吉田直亮	
	イオン照射効果	車田 亮	5名	156
17FP-13	重イオン照射による異種元素ミキシングと物質改質	大阪府立大学	吉田直亮	
		岩瀬 彰宏	4名	158
17FP-14	Zeeman効果を考慮したプラスマ回転計測法	東京大学	図子 秀樹	
		門信一郎	5名	159
17FP-15	トカマクブラズマの電流クエンチフェイズでの電子サ	核融合科学研究所	中村一男	
	イクロトロン波印加による高効率逃走電子電流生成	泉开 机天	3 名	161
17FP-16	応力集中部から発生・伝播する彼労き殺成長挙動の		渡辺英雄	
		豊良雅宏	3 名	165
17FP-17	固体壁近傍のフラズマ流の測定	横浜国立大字	坂本 場樹	( <b>0-</b>
				167
1/FP-18	九大人フェリカルトカマク装置におけるブラズ		中村 一男	400
		御于洗 修 夕士早士兴	し名 ほん	169
1768-19	11( エイルキー・局粒子 宋フラスマ 照射によるフラス		徳永   札俊	
		大野 哲靖	3 名	171

			1	
17FP-20	運動論的MHDシミュレーションコードの並列化によ	山口大学	矢木 雅敏	
	る高速化の研究	内藤裕志	2名	174
17FP-21	TRIAM-1Mの周辺プラズマに於ける非対称プローブに	日本原子力研究所	坂本 瑞樹	
	よるイオン温度の測定とプラズマ輸送の研究	上原和也	2 名	176
17FP-22	プラズマ対向材料の損耗・損傷評価	核融合科学研究所	吉田 直亮	
		芦川 直子	6名	179
17FP-23	NBI用負イオン源プラズマの生成と制御	山口大学	佐藤 浩之助	
		福政修	8 名	181
17FP-24	ニューラルネットワークのTRIAM-1Mプラズマ計測へ	電気通信大学	中村一男	
	の応用	竹田 辰興	0名	184
17FP-25	コーシー条件面法を用いたプラズマ断面位置形状再	日本原子力研究所	中村 一男	
	構築システム (CCS)のST装置への適用検討	栗原 研一	4 名	188
17FP-26	定常運転磁気閉じ込め核融合炉におけるプラズマ -	核融合科学研究所	坂本 瑞樹	
	壁相互作用と粒子バランスに関する研究	廣岡慶彦	4 名	190
17FP-27	オーステナイト系ステンレス鋼照射材中におけるへ	島根大学	吉田 直亮	
	リウム挙動と粒界偏析	小野 興太郎	2名	191
17FP-28	TRIAM-1M周辺プラズマ中揺動の統計的解析	名古屋大学	坂本 瑞樹	
		大野 哲靖	2名	193
17FP-29	トロイダルプラズマの乱流遷移理論	核融合科学研究所	伊藤 早苗	
		伊藤公孝	20 名	196
17FP-30	高速カメラを使用したTRIAM-1Mプラズマのダスト計	広島大学	花田和明	
	測	西野 信博	6 名	198
17FP-31	小型PWI装置における電子バーンシュタイン波によ	核融合科学研究所	出射浩	
	る加熱/電流駆動の検討	伊神 弘恵	6名	200
17FP-32	中性粒子ビームを用いた球状トカマクプラズマの制	産業技術総合研究所	佐藤 浩之助	
	御方式の検討	榊田 創	5 名	204
17FP-33	プラズマと固体水素との相互作用の基礎課程	佐賀大学	佐藤浩之助	
		藤田 寛治	4 名	206
17FP-34	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	佐藤 浩之助	
		横峯 健彦	3名	208
17FP-35	重イオン照射されたフェライト鋼のクラスタ形成に	電力中央研究所	渡辺 英雄	
	及ぼすシリコンの影響に関する研究	土肥 謙次	3名	210
17FP-36	炭化系セラミックス材料中およびボロン薄膜中の水素	静岡大学	吉田 直亮	
	同位体およびヘリウムの滞留・放出挙動に関する研究	奥野 健二	6名	212
17FP-37	水素溶解による金属およびセラミックスの結晶構造	九州大学	佃 昇	
	への影響	田辺 哲朗	3 名	214
17FP-38	金属およびセラミックス中の水素移動・集積挙	九州大学	吉田 直亮	
	動の解明	田辺哲朗	3 名	216
17FP-39	Fe 中の転位ループの動的挙動に対する溶質原	大阪大学	吉田 直亮	
	子の効果	荒河一渡	2名	218

# 平成17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
17ME-S1	人工関節とバイオメカニクス	佐賀大学	東藤 貢	西新プラザ	17年10月	
		佛淵 孝夫	12 件、45 名		15 日	45
17ME-S2	非線形波動および非線形力学系の現	九州大学	及川 正行	応用力学	17年11月	
	象と数理	梶原 健司	44 件、89 名	研究所	9-11 日	49
17ME-S3	乱流研究の異分野融合と新たな創成	名古屋大学	岡村 誠	応用力学	17年 6月	
		辻 義之	22 件、45 名	研究所	16-18 日	56
17ME-S4	地球全体における波動と対流現象の	東京大学	和方 吉信	応用力学	18年 3月	
	力学	新野 宏		研究所	13-14 日	61
17ME-S5	新しい複合材料の研究開発と評価	九州大学	高雄 善裕	応用力学	18年 1月	
		高雄 善裕	22 件、51 名	研究所	10-12 日	67
17ME-S6	水波と浮体の相互干渉に関する力学	大阪大学	柏木 正	応用力学	17年10月	
		高木 健	11 件、20 名	研究所	14-15 日	73

# 大気海洋分野

番号	研	究	課	題	代表者名	所内世話人	開催場所	開催日	頁
						講演・参加者数		(平 成)	
17A0-S1	沿岸海域の	0低次栄	養段階	をめぐる物	広島大学	柳 哲雄	応用力学	17年12月	
	質循環				橋本 俊也	8件、30名	研究所	6-7日	124
17A0-S2	日本海沿岸域における海況モニタリ		名古屋大学	増田 章	応用力学	18年1月			
	ングと波浪	計測に	関する研	<b>形究集会</b>	森本 昭彦	13 件、38 名	研究所	19-20日	128

核融合プラズマ分野

番号	研	究	課	題	代表者名	所内世話人	開催場所	開催日	頁
						講演・参唱数		(平 成)	
17FP-S1	先進機能材	料であ	らるベリ	リウム金属	東京工業大学	吉田 直亮	応用力学	18年3月	
	間化合物の	実用化	に関す	る研究会	三島 良直	4 件、10 名	研究所	2日	220
17FP-S2	核燃焼プラ	ズマ統	合コー	ド研究会	京都大学	矢木 雅敏	応用力学	17年9月	
					福山 淳	27 件、31 名	研究所	13-15 日	221

平成17年度

# 力 学 分 野 共同研究成果報告

#### 荒天下非線形船体運動および抵抗増加に関する研究

広島大学大学院工学研究科 助教授 岩下 英嗣

#### 1. 研究目的

特定研究1課題「水波と浮体の強非線形相互作用に関する研究」に関連する実際の問題として, 荒天 下を航走する船舶の耐航性能に関わる諸問題がある.中でも波浪衝撃荷重,海水打ち込み, スラミング などの非線形現象は,非線形船体運動と直接的に関連しており, 荒天下の船体運動や抵抗増加の推定は これらの問題を扱う際の基礎となる.

本研究では,荒天下の船体運動および抵抗増加に関する実験データの取得,その解析による非線形性 の特性の把握,およびそれらの理論計算による推定を行い,付随する非線形諸問題を扱う際の基礎構築 に資することを目的としている.

#### 2. 研究方法

今回は,一般船と比べて非線形性が顕著に見られる波浪中を高速で航走する多胴船を対象とする.この船型に関し,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波浪中運動計測試験を行い, 船体運動お よび抵抗増加を計測する.
- (2) 同供試模型主船体両サイドにアウトリガーを装着し,多胴化することによる船体運動および抵抗 増加へ及ぼす影響について調査する.
- (3) 取得データを解析し,非線形性の特性についてまとめる.
- (4) 非線形問題を扱える理論推定法として当方の開発した周波数領域境界要素法を適用し,水槽試験に対応した数値計算を実施し,結果を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.
- (5) 一連の研究を総括する.

#### 3. 結果

Fig.4 に示されるトリマランの運動特性および主船体とアウトリガーとの干渉影響を調べるために,曳 航水槽にて運動計測試験を実施した.Fig.1 には静水面中を曳航して得られた抵抗(剰余抵抗係数),シ ンケージ,トリム量の有次元値を示している.アウトリガーを装着してトリマラン化することにより, 剰余抵抗の全般的な増加と,船首上げトリム量の増加が窺える.本来アウトリガーは主船体とアウトリ ガーの造る波を干渉させることにより造波抵抗の低減を目的としていることを考えると,今回の実験に おけるアウトリガーの配置がそうした干渉影響が顕著となるような位置に適切に設置されていないこと 言わざるを得ない.実験では,主船体の造波する波がアウトリガーに当たり大きな干渉波を形成してい ることが観察されており,今後その配置を変えた実験を行なうことにより,適切なアウトリガーの配置 を選定していく必要がある.なお,実際には主船体の波を受けることによりアウトリガーの浸水面積は 停止時と比べて大きく変化しているが,今回の剰余抵抗係数の算出にはその影響は考慮せずに喫水以下 の面積を用いて摩擦抵抗係数を算出し差し引いている.この部分は非線形影響と考えることができるが, そうした場合には剰余抵抗係数の定義自体に再考の必要があると思われる. Fig.2 に正面向い波中で模型を曳航して得られた船体運動, Fig.3 に抵抗増加の結果を示している.ト リマラン状態では,特に heave 運動の同調点近傍が大きな値となり,結果としてその周波数域において 抵抗増加が増加することが分かる.少なくとも今回のアウトリガー配置の下では,主船体単独と比べて 向い波中のトリマランの耐航性能の長所を見出すことはできない.

波浪中船体運動を推定するための理論計算法として周波数領域ランキンパネル法を用い,パイロット 計算として波浪変動圧を計算してみた.Fig.4 にその結果を示している.Fig.5 には同時に計算で得られ た diffraction wave の鳥瞰図と等高線図を示している.船首からの非定常波の造波は少なく,主船体の トランザム船尾からの造波が顕著であることが分かる.非定常問題において,このトランザム船尾の理 論計算上の取扱法に関しては未だ確立された計算モデルが存在しないことから,今後その確立が重要と なってくるものと思われる.実験を通しては,波浪中でもトランザム船尾はドライコンディションであ ることから,たとえば線形理論の枠内で考えれば,船体の造波する非定常波の波振幅と入射波の波振幅 を加えたものがトランザム船尾部においてゼロとなる条件を付加するのが合理的なモデルの一つになる と思われる.

#### 4. まとめ

非線形影響が通常船舶と比べて顕著となると思われる高速船を対象として,主船体にアウトリガーを 配したトリマラン船の波浪中船体運動および抵抗増加の計測を行い,主船体単独と比べてトリマラン船 の耐航性能を調査した.本研究を通じて以下の知見を得ている.

- (1)静水面中の曳航試験において推進性能を調べた結果、トリマランは単胴と比べて、剰余抵抗係数が大きくなることが分かった、今回のアウトリガー配置が適切でなかったことがその要因の主たるものと考えられ、他のアウトリガーの配置についても調べてみる必要がある。
- (2) 波浪中船体運計測試験においては、今回のトリマランは heave 運動が大きく、結果として抵抗増加 も全般に大きくなることが分かった.向い波中の耐航性能上、単胴と比べて優位な点を見出すこ とはできなかった.これについても、他のアウトリガー配置の場合について追試してみる必要が ある.
- (3) 既存の理論推定法を用いてトリマランの波浪変動圧および diffraction wave を計算した.理論計算 上は主船体のトランザム船尾部の流場のモデル化が必要である,今後,実験観察等をベースに合 理的なモデルの提案が必要であることが分かった.

#### 5. 研究成果報告

研究継続中につき,現段階で特になし.

#### 6. 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1年	実験補助
笹重 修平	広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻	修士課程1年	実験補助
沖野 健司	広島大学第四類生産基盤工学課程	4 <b>年</b>	実験補助
黒川 桂介	広島大学第四類生産基盤工学課程	4 <b>年</b>	実験補助
柏木 正	九州大学応用力学研究所	教授	実験指導



Fig.1 Measured steady resistance, sinkage and trim for two hull forms



Fig.2 Measured ship motions in regular head waves for two hull forms



Fig.3 Measured added wave resistance for two hull forms





(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

冨田 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,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「海洋巨大波の実態と生因の解明」という題目及び下 記のような組織で小規模な研究集会を開催する.

#### 研究集会の日時・場所

日時:2006年3月10日(金)・11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10日(金)	
13:00-13:05	開会の挨拶
	及川 正行(九州大・応力研)
13:05-13:50	フリーク波研究の歴史と現状
	冨田 宏(海上技術安全研究所)
13:50-14:50	Freak Wave の発生と非線形干渉の関係について
	森 信人,渡辺 淳也(大阪市大・工)
14:50-15:50	直接数値シミュレーションによる Hasselmann の非線形エネルギー
	輸送の検出
	田中 光宏(岐阜大・工)
16:05-16:50	Simulation of the ocean waves and appearance of Freak waves
	Igor Ten , 冨田 宏 (海上技術安全研究所)
16:50-17:35	ICMS ( エディンバラ ) 主催 Workshop on Rogue Waves 報告
	早稲田 卓爾 ( 東京大・工 )

3月11日(土)

- 9:00-10:00 変調波列における最大波について,水槽実験と弱非線形計算の比較 早稲田 卓爾(東京大・工),木下 健(東京大・生産研) 木下 信(全日空),亀岡 福太郎,栗本 優(東京大・工)
- 10:00-10:45 フリーク波による船体縦曲げ荷重の推定
   中住昭吾,鈴木克幸,石江水(東京大・工)
   木下健(東京大・生産研)
- 11:00-11:45 フリーク波中の船体応答と波浪荷重の推定南 真紀子,谷澤 克治,沢田 博史(海上技術安全研究所)
- 11:45-12:30 風波生成の数値シミュレーション 三冨政秀,川村隆文(東京大・工)
- 13:30-14:15マイクロ波レーダーによる海洋波浪観測林昌奎(東京大・生産研)
- 14:15-15:00 浅水領域における孤立波の二次元相互作用と振幅の増幅について
   辻 英一(九州大・応力研), 丸野 健一(九州大・数理学)
   A.V.Porubov (A.F.Ioffe Physical Technical Institute, Russia)
   及川 正行(九州大・応力研)
- 15:00-15:30 東大・海技研フリーク波研究プロジェクトの中間総括 木下健(東京大・生産研)
- 15:30-15:35 閉会の挨拶 冨田宏(海上技術安全研究所)

## 講演概要

フリーク波研究の歴史と現状

富田 宏:海上技術安全研究所

フリーク波に関する研究の始まりはこの現象を主題とした論文に限っても 1980 年代 に遡る.近年,とくに 21 世紀に入って世界各国の海洋工学関係の研究者の間でフリー ク波に対する興味が高まり,過去数回の国際研究集会も開催されている.ここでは, フリーク波の研究の歴史から説き起こして最近の研究動向,さらに依然として存在す るフリーク波の定義についての意見の相違や問題点等,「フリーク波とは何か?」に ついて概説する.

Freak Wave の発生と非線形干渉の関係について

森 信人,渡辺淳也:大阪市立大学大学院 工学研究科 都市系専攻

現在,海流や地形の影響が無視できる外洋では,3次の非線形干渉の影響が Freak Wave の発生の主要な原因であるとの見方が主流となっている.しかし,その発生頻度について Rayleigh 分布に代表される線形理論との違いについて定量的な評価が為されていない.本研究では,Freak Wave を有義波高の2倍を超える最大波として定

義し, Gauss 過程・Rayleigh 分布からの乖離と3次の非線形干渉の関係について明 らかにする.まず始めに,3次の非線形干渉によって発達する Freak Wave の出現特 性を把握するため,方向スペクトルと水面変位の高次モ-メントの関係について定 式化を行う.ついで,水面変位の高次モ-メントを軸に最大波高分布を求め,Freak Wave の出現とスペクトル形状の関係について明らかにする.

# 直接数値シミュレーションによる Hasselmann の非線形エネルギー輸送の検出 田中光宏:岐阜大学工学部数理デザイン工学科

Janssen (JPO 33(2003), 863–884) は,  $T = O(1/\epsilon^4 \omega_0)$ よりずっと短い時間スケールにおいては,現在大部分の数値波浪推算モデルに採用されている,Hasselmannの4波共鳴相互作用に基づく非線形エネルギー輸送ではなく,共鳴条件を満足しない4波相互作用によるスペクトル変動が重要であると主張している.しかしこれは,線形波の重ねあわせから出発してたった25周期にわたる波動場の時間発展の直接数値シミュレーションから,Hasselmannの4波共鳴相互作用に基づく非線形エネルギー輸送の検出に成功したTanaka (JFM 444(2001),199-221)の結果と明らかに矛盾しているように思われる.今回は異なるスペクトル形も含め再度計算を行い,Tanaka (2001)の正当性を再確認するとともに,断面2次元(1次元伝播)の計算結果から平面2次元のスペクトル変動について推測することの危険性についても言及する.

## Simulation of the ocean waves and appearance of Freak waves Igor Ten, H. Tomita:海上技術安全研究所

Freak wave is one of the natural disasters in the ocean, characterized by an isolated majestic wave, which more than 2 times greater in height than its surrounded waves. In the paper, we study mechanisms of creation of such waves in the ocean by applying numerical wave tank (NWT). NWT is based on Boundary Integral Equation method with mixed Euler-Lagrangian condition to satisfy free surface boundary condition exactly. We consider several mechanisms of creation: focusing waves, Benjamin-Feir instability, algebraic and breather solitons, which are possible different stages of Freak wave generation. Finally, we make fairly long time random simulation of the ocean waves by adopting spectra: Swell, Pierson-Moskowitz spectra.

# ICMS (エディンバラ) 主催 Workshop on Rogue Waves 報告 早稲田卓爾:東京大学大学院工学系研究科環境海洋工学専攻

2005 年 12 月, International Center for Mathematical Sciences で行われた, Rogue Wave Work Shop の報告をする.この WS は, Rogue Wave を数学的な観点から議論 するということが,主たる目的であったが,石油会社や MaxWave プロジェクトを代 表する発表者や,観測,実験など幅広いテーマで3日半,十分時間をかけて議論した.プレゼンテーションは,

http://www.icms.org.uk/meetings/2005/roguewaves/index.html

に掲載されているが,筆者の感想も含めた紹介をする.その際,発表と関連した,最 新の研究動向についても,可能な限りレビューを行いたい.

変調波列における最大波について,水槽実験と弱非線形計算の比較

早稲田卓爾,木下健,木下信,亀岡福太郎,栗本優

早稲田卓爾,亀岡福太郎:東京大学大学院工学系研究科環境海洋工学専攻

木下健:東京大学生産技術研究所

木下信:全日空

栗本優:東京大学工学部システム創成学科

近年海洋波における突発的巨大波浪の発生機構の一つとして,波列の変調不安定が 着目されている.主に弱非線形仮定の枠組みで議論されており,発生した巨大波浪 の強い非線形性に起因する砕波などを議論した研究は決して多くない.本研究では, 東大生産技術研究所海洋工学水槽で行った,水槽実験とDystheによる拡張シュレー ディンガー方程式と,KrasitskiiによるZakharov方程式の数値解とを比較した.ま ず,もっとも単純なケースである,Benjamin-Feir不安定波列について,初期岨度-周 波数バンド幅の広いパラメター空間の中で検証した.得られた,最大波高は,初期 岨度0.1程度より低い場合は初期岨度の関数となるが,ある程度初期岨度が大きく なると,砕波により,波高が抑えられほぼ一定となることが実験との比較でわかっ た.この結果を参考に1次元連続ガウススペクトル波列の発展をZakharov方程式の 解として求め比較した.ガウススペクトルの場合もほぼBF不安定の場合に準じた 結果となるが,そうでない場合もあり,この点はアンサンブルを増やすなど,現在 検証中である.最後に,海洋工学水槽で行った3次元造波について簡単に報告する. TertiaryWaveInteraction、分散性・多方向線形集中波について報告し今後の研究の方 向性を述べる.

フリーク波による船体縦曲げ荷重の推定

中住昭吾,鈴木克幸,石江水,木下健 中住昭吾,鈴木克幸,石江水: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 Wave とは海洋に突然現れる巨大な波浪であり, Freak Wave に遭遇した船舶の 破損・沈没等を防ぐためには, Freak Wave 下での船体運動及び船体への波浪衝撃荷 重を解明することが必要である.本報では FreakWave を想定して行った模型船水槽 実験の結果を報告する.具体的には, FreakWave として規則波に線形集中波を重畳 させた波,及び Benjamin-Feir 変調理論に基づく不安定波を用意し,それらの向波及 び斜め波を弾性模型船に作用させた.計測は船体運動応答及び船体曲げ荷重とし,解 析においては船体構造強度の観点から特に重要となるホイッピングに着目すること とした.また,実験と併せて SRSLAM による数値シミュレーションも行い,両者の 比較検証を行った. フリーク波中の船体応答と波浪荷重の推定

南 真紀子,谷澤 克治,沢田 博史:海上技術安全研究所

Freak Wave とは海洋に突然現れる巨大な波浪であり, Freak Wave に遭遇した船舶の 破損・沈没等を防ぐためには, Freak Wave 下での船体運動及び船体への波浪衝撃荷 重を解明することが必要である.本報では FreakWave を想定して行った模型船水槽 実験の結果を報告する.具体的には, FreakWave として規則波に線形集中波を重畳 させた波,及び Benjamin-Feir 変調理論に基づく不安定波を用意し,それらの向波及 び斜め波を弾性模型船に作用させた.計測は船体運動応答及び船体曲げ荷重とし,解 析においては船体構造強度の観点から特に重要となるホイッピングに着目すること とした.また,実験と併せて SRSLAM による数値シミュレーションも行い,両者の 比較検証を行った.

#### 風波生成の数値シミュレーション

三冨政秀 , 川村隆文 : 東京大学 大学院工学系研究科 環境海洋工学専攻

風波水槽を模した2次元シミュレーションの結果を報告する.初期に平らであった水面に風が吹き始めた状況のシミュレーションでは最初に短い波が発生し,それが指数的に成長し,その後長い波に発達して行く過程が再現された.Kawai(1979)の実験と比較すると,スペクトルの形状,ピーク位置,時間発展においてよく一致した.波長37.5cmの「うねり」の上に風が吹き始めた条件のシミュレーションではうねりの存在によって小スケールのリップルの成長が抑制されることが確認された.

#### マイクロ波レーダーによる海洋波浪観測

林 昌奎:東京大学生産技術研究所

海洋空間利用・開発において,最も重要とされる海洋環境要素の1つは海洋の波浪で ある.海洋波浪,潮汐流及び海流に代表される海面の物理現象の基本は,水粒子の運 動である.海洋波浪は,周期が数秒から十数秒の水粒子の運動現象と言える.マイク ロ波レーダーは後方散乱するマイクロ波を計測する装置で,海面から後方散乱する マイクロ波には,海面形状及び海面付近水粒子の運動特性が含まれる.そのため,海 面から後方散乱するマイクロ波を解析することで,海面の特性を知ることが可能で ある.本研究ではマイクロ波レーダーを用いた最適海洋波浪観測アルゴリズムの開 発のために行っている研究及び今後について述べる.

浅水領域における孤立波の二次元相互作用と振幅の増幅について

辻英一, 丸野健一, A.V.Porubov, 及川正行

辻英一,及川正行:九州大学応用力学研究所

丸野健一:九州大学数理学研究院

A.V.Porubov: A.F. Ioffe Physical Technical Institute (Saint-Petersburg)

多くの研究で Freak Wave は深水波として取扱われているが,ここでは浅水領域において Freak Wave と同様の特徴を持つような大振幅波動の生成に関する研究を報告す

る.具体的には,この系で安定に伝わる孤立波に着目し,それらの二次元的な相互作 用が波の振幅にどのような効果を与えるか,という点を特に調べた.解析には基礎方 程式より近似的に導出される二次元ソリトン方程式— Kadomtsev-Petviashvili(KP) 方程式—を用いる.そして(1)曲がった峰を持つような孤立波の相互作用による 振幅の増幅の数値的な解析(2)多数の孤立波の共鳴的相互作用による非定常パター ンの生成と振幅増幅のソリトン理論による解析を行った結果を示す.

東大・海技研フリーク波研究プロジェクトの中間総括

木下 健:東京大学生産技術研究所

東大・海技研フリーク波研究プロジェクト2年半で成し遂げたことと達成出来ていな いことを整理して,今後数年間でなすべきことを私見を交えて述べる.

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.当初,昨年内の開催 を目指したが,参加者の都合がつかず,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.プログラムを見ると理論, 実験,数値シミュレーション,深水域から浅水域の話題と当初目論んだ通りの多様な講演 を用意できた.この研究集会の目的は国内の主要な研究グループに集まっていただき集中 的に議論し,今後の発展を図ることであるが,一般にも公開し,研究者層の幅を広げる目 的もあり,それらが達成できるものと確信している.

## 研究組織

<b>冨田 宏(海上技術安全研究所)</b>	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
Igor K. Ten (海上技術安全研究所)	研究協力者・海洋流体力学
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
<b>亀岡 福太郎(東京大学工学系研究科)</b>	研究協力者・海事流体力学
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

水波と浮体に関する強非線形問題の数値シミュレーション技術の開発

独立行政法人海上技術安全研究所

実海域性能評価プロジェクト長 谷澤克治

研究の目的

これまで船舶海洋工学の分野ではスラミング,甲板打込,スロッシング等の激しい流体 現象の数値解析が困難であったが,近年では粒子法や CIP 法等のロバストな新しい数値計 算手法が開発され,激しい流体現象についても数値計算が可能になって来ている。本研究 の目的は、これらの新しい数値計算手法を用いて水波と浮体に関する強非線形問題の数値 シミュレーション技術を研究開発し、荒天海域における船舶の耐航性能評価ツールとして 用いるための種々の課題について検討することにある。

応用力学研究所の柏木教授は船舶の耐航性能分野全般におけるエキスパートである。ま た柏木研究室には CIP 法では胡助教授, 粒子法では末吉助手と数値計算の分野で先導的役 割を果たしている人材が揃っている。応力研と共同研究を実施することにより,海技研の 若手研究者の育成と,コードの円滑な開発およびその検証が期待できる。また,互いの計 算結果ならびに過去に実施した互いの水槽実験結果を持ち寄り,比較検討することで,コ ードの精度と信頼性を高める。

数値シミュレーション手法

荒天中をスラミングや甲板冠水を伴って航走する船舶の応答を数値計算する技術を確立 するため,粒子法と CIP 法を用いた数値シミュレーション法を研究開発する。コード開発 は応力研と海技研で独自に行い,数値計算上の共通する問題点の解決に連携して取り組む。

開発状況

1. 粒子法による波浪衝撃解析コードの拡張 東京大学の越塚教授により開発され、公開され ている粒子法コードをベースに、不均一粒子を配 置して局所的に粒子数密度を上げるアルゴリズム

を用いてプログラムを拡張中。これにより、粒子 法コードの計算精度と計算時間の向上を目指して いる。試計算として、タンク内液体のスロッシン



粒子法によるスロッシングの計算例

グ現象を対象にしたシミュレーションを実施した。

#### 2. CIP法による計算コード開発

CIP 法による波浪中船体運動計算コードを試作し、Added-mass, Damping coefficient の 計算を行い妥当性を検証すると共に、Stokes 近似を利用した造波の方法を開発し、波浪中 を航走する船舶のシミュレーション計算を試行した。本コードでは船の形状表現法を 2 次

関数で近似し滑らかな船首、船尾を 造っている。現在、界面捕獲法の精 度向上、Ghost Fluid Methodの利用 検討、船に働く力の計算の精度、船 周辺の流れ場の精度向上方法の検討、 保存系手法への移行を検討中。



#### 考察

粒子法は2次元問題の計算では実

CIP法による波浪中船体運動の計算例

用的な規模の計算が可能であるが、3次元では計算時間と計算機のメモリ容量等の観点か ら実用規模の計算は、まだ困難である。3次元の実用計算法として活用するには、計算ア ルゴリズムの高速化等の研究が今後も不可欠である。また、圧力の計算結果に見られる激 しい振動を抑制する必要があり、船舶の設計ツールとして実用化するには、これらの問題 の解決が必須である。

CIP 法では、造波方法の更なる改良、船体表面での境界条件をより厳密に満足させるため のスキームの導入、界面捕獲法の精度向上、保存系手法への移行等、計算法自体にまだ多 くの課題が残されている。また、これも船舶の設計ツールとして実用化するには、計算時 間の短縮化が必要であり、今後も研究開発を続ける必要がある。

#### 成果報告

T.Yabe, K.Takizawa and T.Tezduyar, HIGHER-ORDER MULTI-PHASE FLOW SOLVER IN MESH-LESS-LIKE SOROBAN SCHEME, 8th US National Congress on Computational Mechanics

K.Takizawa, Computation of Free-Surface Flows and Fluid-Object Interactions with the CIP Method Based on Adaptive Meshless Soroban Grids,講演会集「水波と浮体の相互干渉に関する力学」

滝沢 研二, CIP ソロバン格子による船舶シミュレーション, 287, 第 55 回理論応用力学講演会集 K.Takizawa, Ship Simulation with the Soroban CIP method, 研究集会報告集「移動境界まわりの強非線 形流れ解析」 (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1月27日(金)13:15~17:50 1月28日(土) 9:00~15:20 開催場所:九州大学応用力学研究所西館6階多目的交流室(W601号室)

#### 3.講演プログラムと概要

講演プログラムは末尾に示しているので,ここでは講演の順番に従ってその概要,並びに全体的な雰囲気,参加者からの感想などについて述べておく。なお,目的にも書いたように,この研究集会は既に 国際研究集会として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・柏木教授より,今回の招待講演者(東京大学・ 越塚誠一教授,Alessandro Iafrati博士(INSEAN, Italy))および海外からの参加者(Bin Teng, Dalian University of Technology, China)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。

#### Numerical Analysis and Visual Processing Using a Particle Method 越塚誠一(東京大学工学系研究科システム量子工学専攻)

MPS(Moving Particle Semi-implicit)法は数値拡散がなく,砕波も容易に取り扱えるので,多くの工 学・科学分野で用いられるようになっている。船舶甲板への海水打ち込みを初めとして,臓器内の血液 の流れなど生体流体力学やコンピュータシミュレーションを応用したゲームソフトの開発やアニメー ションの分野まで応用されつつある。それらの現状を紹介し,今後の課題・展望について説明した。

#### 3-D Large Eddy Simulation of Wave Breaking and Its Application

鈴木崇之(港湾空港技術研究所),岡安章夫(東京海洋大学)

海岸へ押し寄せる波が砕ける際に引き起こる種々の現実の現象(例えば砂の巻上げや防波堤への越波など)をシミュレートするために,乱流モデルとして LES を用い,速度場の計算および界面捕捉法として CIP スキー ムを適用した方法,ならびにその計算結果と実験結果との比較について説明した。

#### Free-moving Boundary Problem for Large Deformation Solid Analysis

岡澤重信(広島大学工学研究科社会環境システム専攻)

各種の材料あるいは構造物の弾性・塑性大変形をシミュレーションするために,オイラー格子を用いた数値 "流体"力学的手法の紹介とその応用例について解説した。機械材料の加工や衝撃力による材料の破壊,亀裂 の伝播なども取り扱うことができ,流体・構造の連成問題は今後の重要な研究課題であることを指摘した。

#### Numerical Simulation of Fully Nonlinear Irregular Wave Tank

Bin Teng ( Dalian University of Technology, China )

時間領域での3次元非線形高次境界要素法の開発およびその応用について研究しているが,計算の安定性,精度向上,計算時間短縮のための工夫(例えば側壁の境界条件を解析的に満たすために鏡像の導入と無限級数の収束を早める方法の提案),不規則波中でのシミュレーションの現状・問題点,今後の研究課題について説明した。

# New Approach to Solve Higher-Order Potentials in the Interaction Problem of Low-Freqency Motion and Waves

二瓶泰範(東京大学大学生産技術研究所)

波浪中での浮体に働く長周期変動の流体力(特に Wave Drift Added Mass)を計算するために取り組ん でいる固有関数展開法と低次の解の微分から求解する方法について説明した。これを用いれば,従来の 方法より高速に計算できると思われるが,その検証は今後の研究課題である。

#### Numerical Simulation of 2D Floating Body Motions with Deck Water

末吉 誠(九州大学応用力学研究所)

甲板への海水打ち込みを伴う場合の波浪中での浮体の動揺を MPS 法で計算しているが,その現状・ 問題点などを整理して説明した。2次元水路での実験結果との比較も行っているが,造波機で造られた 波の振幅が進行するにつれて少しずつ減衰するので,数値計算結果は実験値より小さく,また漂流運動 も正しくシミュレートできていない。これらを改善するための方法を検討している。

# A Study of Airfoil Design Suitable for Vertical Axis Wind Turbine and an Application of Wind Collecting Structure for Higher Performance

高橋周平(九州大学工学府航空宇宙工学専攻修士課程) 大屋裕二,烏谷 隆,渡辺公彦(九州大学応用力学研究所)

風レンズと組み合わせた水平軸型風力タービンの開発における流体力学的ノウハウを用いて,垂直軸型(ダリウス型)風力タービンの高効率化に取り組んでいるが,その過程で行った風洞実験と直交格子での差分法を用いた回転翼まわりの DSN 乱流計算の結果について説明した。翼断面および風レンズの形状と風力エネルギー吸収効率の関係について論じた。

# Numerical Investigation of Highly Nonlinear Free Surface Flows through Interface Capturing Methods

Alessandro Iafrati ( INSEAN, Italy )

最初に,INSEANで取り組んでいる高速船まわりの波崩れを伴う流場に関する研究について概説した後,風波(自由表面波)の安定性に関する数値計算法とその結果について詳しく考察を述べた。渦と自由表面との相互干渉や空気ジェットの水面突入問題などについて,流体科学と船舶海洋工学の接点を中

心にして解説した。

#### Model Experiments and Numerical Computations on Tsunami Force

有川太郎(港湾空港技術研究所)

津波による被害におけるメカニズムを理解し,津波防災対策を講じるために,実験的および数値流体 力学的研究を行っている。数値計算は CADMAS-SURF というコード(直交格子を用い,界面捕捉は VOF 法,乱流モデルは*k*-*s*モデル)を用いているが,壁への水波の衝撃を中心とした検証例を示した。ま た大規模スケールの大振幅波の発生に関する実験例をビデオで紹介した。

# Numerical Analysis of Large Geomaterial Deformation Using CIP Method 森口周二(岐阜大学工学部社会基盤工学科)

土石流による被害を予測・解析するために,地盤材料を Bingham 流としてモデル化し,これに対して CIP 法を適用した研究例を紹介した。ダム崩壊問題を使った計算コードの基本的な検証や,実際の地滑 りのシミュレーション,実験室における実験結果との比較などを通して,地盤材料のモデル化や計算手 法の妥当性について論じた。

#### Aerodynamic Analysis of a WIG Flying over the Waves

岩下英嗣,渡部雅晃(広島大学工学研究科社会環境システム専攻)

水面上を飛行する WIG の流体力学的解析と実際の飛行実験のために製作した無線制御(RC)モデル の設計法について説明した。水槽を用いた実験の結果と,時間領域非線形境界要素法による計算結果と の比較によって3次元翼の空力特性を調べた後,RC モデルのための翼配置や設計上考慮した点を述べ た。さらに実際に製作した RC モデルの飛行状況のビデオも紹介した。

#### The Extension of CIP-based CFD Method Combined with Multigrid Technique for 3D Simulation and Its Application to Free-Surface Problems 西 佳樹(九州大学応用力学研究所)

A computational fluid dynamics method is investigated for numerical simulations of strongly nonlinear phenomena involving the large deformation of free surface. The numerical solution method of this study is based on the CIP (Constrained Interpolation Profile) scheme, and the multi grid technique for solving a pressure Poisson's equation with high efficiency and robustness. This paper particularly focuses on the strategy of the code extension from 2D to 3D in the iterative algorithm using the MG technique. The present study has considered the 'plane by plane's weeping schedule of iterative solver. The developed method was applied to the dam breaking, and sloshing in a tank. The numerical computations confirmed that the developed method performs fairly well in 3D simulations.

#### High-Performance CFD-Based Optimization for High-Speed Ship 田原裕介(大阪府立大学工学研究科海洋システム工学分野)

The object of the present research is to develop general formulation high-performance CFD-based global optimization method and overcome the limitations of optimal design tools based on local optimization methods via the development and application of global optimization algorithms. These include the categories: CAD-based hull form modification for high-speed ships, multi-objective genetic algorithm (MOGA) and scaleable message passing interface (MPI), and CFD method which is capable for application to high-speed ships. The resulting optimization software will be applied to the solution for high-speed ship design problems and an

experimental activity will be carried out to assess the success of the optimization process. This research project is based on close interactions with both IIHR (U. Iowa) and Istituto Nazionale per Studi ed Esperienze di Architettura Navale (INSEAN)

#### Ship Simulation with the Soroban CIP Method

滝沢研二 (海上技術安全研究所)

CIP 法に属する計算手法の中でも,モニター関数として使っているある物理量の変化が大きいところ にグリッドを自動的に集中させることができる「そろばん」CIP 法を用いて,波浪中での船体運動のシ ミュレーションを行っているが,その進捗状況について紹介した。既に3次元計算ができるようになっ ているが,計算結果の妥当性については検討の余地がある。

#### **Recent Development of RIAM-CMEN**

胡 長洪(九州大学応用力学研究所界面動力学分野)

応用力学研究所で開発してきている,水波と物体の相互作用に関する強非線形流体力学問題に対する 計算コード(RIAM-CMEN: Computation Method for Extremely Nonlinear Hydrodynamics)の現状について 説明した。特に,界面の鮮明さを向上させるための界面捕捉法としていくつかの方法を検討しているこ と,物体表面での境界条件を正確に満足させるために工夫していることの説明の後,validation として行 った2次元浮体の波浪中動揺に関する実験結果との比較,前進速度を持つ3次元浮体(船舶)の計算例 を示した。

#### The Effect of Freeboard on the Seakeeping Performance of a Ship

小川剛孝,石田茂資(海上技術安全研究所)

シリーズ模型を使った実験と時間領域非線形ストリップ法を用いて,波浪中船体運動に対する乾舷の 量と甲板の反り角度の影響について調べ,構造強度や甲板への海水打ち込みの発生確率などの検討を通 じて,船の安全性の定量的評価を試みた。

#### 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」「MPS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,東京大学の越塚誠一教授,イ タリア INSEAN の Alessandro Iafrati 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つつあることを確信した。

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1月27日(金),28日(土)

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)

#### <u>1月27日(金)</u>

- 13:15~13:20 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)
- 13:20~14:10 招待講演: Numerical Analysis and Visual Processing Using a Particle Method 越塚誠一(東京大学工学系研究科システム量子工学専攻)
- 14:10~14:40 3-D Large Eddy Simulation of Wave Breaking and Its Application
   鈴木崇之(港湾空港技術研究所), 岡安章夫(東京海洋大学)
- 14:40~15:10 Free-moving Boundary Problem for Large Deformation Solid Analysis 岡澤重信(広島大学工学研究科社会環境システム専攻)

#### (休 憩)

- 15:30~16:20 Numerical Simulation of Fully Nonlinear Irregular Wave Tank Bin Teng (Dalian University of Technology, China)
- 16:20~16:50 New Approach to Solve Higher-Order Potentials in the Interaction Problem of Low-Freqency Motion and Waves 二瓶泰範(東京大学大学院生産技術研究所)
- 16:50~17:20 Numerical Simulation of 2D Floating Body Motions with Deck Water 末吉 誠(九州大学応用力学研究所)
- 17:20~17:50 A Study of Airfoil Design Suitable for Vertical Axis Wind Turbine and an Application of Wind Collecting Structure for Higher Performance 高橋周平(九州大学工学府航空宇宙工学専攻修士課程) 大屋裕二,烏谷 隆,渡辺公彦(九州大学応用力学研究所)

#### (懇親会)

#### <u>1月28日(土)</u>

- 9:00~ 9:50 招待講演: Numerical Investigation of Highly Nonlinear Free Surface Flows through Interface Capturing Methods Alessandro lafrati(INSEAN, Italy)
  - 9:50~10:20 Model Experiments and Numerical Computations on Tsunami Force 有川太郎(港湾空港技術研究所)
  - 10:20~10:50 Numerical Analysis of Large Geomaterial Deformation Using CIP Method 森口周二(岐阜大学工学部社会基盤工学科)

#### (休 憩)

- 11:10~11:40 Aerodynamic Analysis of a WIG Flying over the Waves 岩下英嗣(広島大学工学研究科社会環境システム専攻) 渡部雅晃(広島大学工学研究科社会環境システム専攻)
- 11:40~12:10 The Extension of CIP-based CFD Method Combined with Multigrid Technique for 3D Simulation and Its Application to Free-Surface Problems 西 佳樹(九州大学応用力学研究所)

#### (昼 食)

- 13:15~13:45 High-Performance CFD-Based Optimization for High-Speed Ship 田原裕介(大阪府立大学工学研究科海洋システム工学分野)
- 13:45~14:15 Ship Simulation with the Soroban CIP Method 滝沢研二(海上技術安全研究所)
- 14:15~14:45 Recent Development of RIAM-CMEN 胡 長洪(九州大学応用力学研究所)
- 14:45~15:15 The Effect of Freeboard on the Seakeeping Performance of a Ship 小川剛孝,石田茂資(海上技術安全研究所)
- 16:00~16:05 閉会の挨拶 柏木 正(九州大学応用力学研究所)

#### 水圧荷重下の大規模シェル構造の並列化崩壊解析システムの開発

広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻 藤久保昌彦

#### 1.研究背景と目的

構造解析によりその崩壊挙動を的確に評価することは,極限条件下における万が一の事故の際の挙動の把 握や,合理的な構造設計等において必要不可欠である.これまでの精力的な数多くの研究により,部材レベ ルでの崩壊挙動はすでに解明されていると言っても過言ではない.しかしながら,より詳細な実構造全体の 崩壊挙動の解明のためには,部材レベルに留まらない全体構造を扱うような大規模な解析が要求される.構 造物の崩壊解析ツールとしては有限要素法が用いられている.有限要素法は非常に強力なツールであるが, 大型構造物全体の終局的な崩壊解析を扱うことは,今日の計算機能力をもってしても困難である.

以上のような背景において,本研究の目的は,大規模シェル構造の崩壊解析を現実的な計算コストで実行 するための並列化システムを開発することである.将来的に本解析システムに流体解析部分を組み合わせる ことで,波浪衝撃を伴う船体の崩壊挙動などが可能になる.近年では,計算機ハードウェアの性能向上及び 低価格化によるコストパフォーマンスの向上と,それらを取り巻くソフトウェア環境の発達により,個々の 計算ノードが記憶容量を有する分散メモリ型の並列計算機が台頭している.よって本並列化システムを開発 することは,社会のニーズに合致した好機であると言える.

#### 2. 並列シェル有限要素解析コード

構造解析のための並列化システムはこれまでにも数多く存在している.既存の並列化システムで扱う有限 要素は並進変位のみを有する固体要素を用いており,さらに剛性方程式における連立1次方程式の解法は共 役勾配法などに代表される反復法である.一方,本研究で扱うようなシェル有限要素においては並進変位と 回転変位が混在し,これらに対する剛性のオーダーの違いから連立1次方程式の解法として反復法の適用が 困難であることは数多く報告されている.よって大規模シェル構造を対象とした本並列化システムにおいて は,連立1次方程式の解法として直接法の導入が必要不可欠である.

有限要素法での剛性方程式の解法に直接法を用いた場合は,その部分の並列化は不可能であるか極めて困難である.直接法を用いた商用コードが未だに分散メモリ型の並列化システムに対応していないのもそのためである.本システムは剛性方程式の解法として直接法を用いた初の並列化システムである.

#### 3.ボックス・ガーダーの崩壊解析

本システムを大規模なボックス・ガーダーの崩壊解析に適用した.図1は載荷梁をも含めたボックス・ガ ーダーの解析モデルである.パネル板厚は3.2mm,防撓材高さは50mm,防撓材板厚は4.5mmである.このモ デルの両端を単純支持し,矢印の箇所に下向きの強制変位を与えた.要素数32808要素で,約18万自由度と なる.材料定数は材料引張試験より求めた値,ヤング率189930 MPa,ポアソン比0.273,パネル降伏応力231 MPa,防撓材降伏応力314MPa,ひずみ硬化係数950MPaを用いた.

本解析においては,まずは防撓材の横倒れ座屈が発生した後に最終強度後に上部パネルの座屈が発生し, さらに変形の局所化が発生して最終的な崩壊に至った.図2および図3はそれぞれ最終強度時および最終強 度後の変形図である.そして図4は変形の局所化による最終的な崩壊挙動である.なお本解析を商用コード ABAQUSで実行した場合には,解析に数週間の時間を要し現実的な時間では解析が終了しないことを付記する.



図1 ボックス・ガーダーの解析モデル



図3 最終強度後の変形状態

0 YIELDING (%) 100

図2 最終強度時での変形状態



図4 変形局所化による崩壊状態

### 5. 結言

本研究では、大規模シェル構造の並列化崩壊解析システムを開発した.既存の並列化システムが剛性方程 式の解法に反復法を用いているのに対して、本システムでは直接法を採用している.その結果として、回転 自由度を有するシェル構造解析コードの並列化に成功すると共に、通常の解析コードでは困難な大規模なシ ェル構造解析を可能とした.また実験との比較を行い本システムの正当性も確認した.今後は、流体力を扱 えるようにシステムを改良して、構造 流体連成解析へと拡張していくことが課題となる.

#### 愛媛大学工学部 黄木景二

#### 1. 緒言

高分子基複合材料なかでも炭素繊維強化プラスチック(CFRP)は軽量構造部材としてさまざまな分野で使用されているが,金属との接合あるいは接着構造をとることによって自動車や産業機械への用途拡大が期待されている。しかしながら,金属と高分子は融点が大きく異なる上に化学結合を形成しにくいことから,両者を強固に結合する方法の確立が望まれている。

本研究ではCFRPと金属を主に樹脂系接着剤で接合したCFRP/金属接合体の接着界面について,機械的 および電気的な手法により評価を行い,接着強度の高強度化のための基礎的検討を行った。

#### 2.実験方法

まず,CFRP/金属界面強度の検討として,下記の2種類のCFRP/金属接着試験片を作製した。 鉄鋼 (SS400)とCFRPプリプレグ(T700S/#2500,東レ)をコキュアすることによって両者を接着した試験 片, 先にキュアしたCFRP積層板にフィルム接着剤(AF126-2及びAF163-2K,3M)を用いて金属に接 着した試験片について強度特性と破壊挙動を調べた。

試験片 についてはサンドペーパーで表面を研磨したSS400上(300mm x 300mm x 3mm)にCFRPプリ プレグをクロスプライ積層([0/90/90/0])して,コキュア(130 ,5気圧)により板(300mm x 300mm)を作成した。キュア後のCFRP層の厚さは約0.6mmである。次に,この板を切断することにより, 曲げ試験用の短冊形試験片(L150mm x W25mm)を得た。カット後の試験片は熱残留応力により反り変 形を生じている。

試験片 については,サンドペーパーで表面を研磨したSS400と先にキュアさせたCFRP一方向板を フィルム接着剤にて加熱接着して接合板を作成した。各接着剤の加熱加圧条件を表1に示す。これを カットすることにより,引張り試験片,3点曲げ試験片,シングルラップ試験片(せん断試験用)を 作成した。表2に各試験片のサイズ,接着剤の種類を示す。ここで3点曲げ試験におけるスパンは 100mmとし,シングルラップ試験片のラップ部長さは12.5mmとした。なおカット後の試験片に反り変形 は見られない。

#### 3.結果

図1に試験片の曲げ荷重 変位曲線を示す。A点までは線形変形であり、それ以降、Steelの塑性変形により曲線の傾きが減少した。B点までの何段階かで負荷を途中で止めて微視的に観察したところ、 CFRP/Steel界面、CFRP表面ともに顕著な亀裂やはく離などの損傷は認められなかった。B点でCFRP表面の最大引張応力部に繊維破断が生じ、荷重が低下した。さらに負荷を加えると繊維破断部付近の界面ではく離が生じ、荷重が段階的に低下した。図2に試験後の試験片の様子を示す。CFRP表面の最大引張応力部に繊維破断が生じ、その近傍の界面ではく離をしている様子が分かる。このようにコキュ

フィルム接着剤	圧力	温度	時間
AF126-2	50psi(2.45kg/mm²)	250°F(約121.1 )	60分
AF163-2K	35psi(3.5kg/mm²)	235°F(約112.8 )	90分

#### 表1 接着剤の加熱加圧条件

#### 表2 試験片の寸法と接着剤の種類

試験片	全長×幅	CFRPの厚さ	SS400の厚さ	接着剤	接着層厚さ
引張り	210 × 10.7	1.09	1.57	AF126-2	0.19
3 点曲げ	210 × 25.5	1.09	3.00	AF163-2K	0.14
シングルラップ	300 × 25.5	2.14	2.24	AF126-2	0.05





図1 試験片の曲げ荷重 変位曲線





図3 試験片 の曲げ荷重 ひずみ曲線



図4 試験片 の曲げ試験後の様子

ア試験片でもSS400の塑性変形まではCFRPがSS400によく接着していることがわかる。

図3に試験片の曲げ負荷除荷試験における荷重引張ひずみ曲線を示す。SS400の塑性変形後も CFRPの接着は良好であることがわかる。図4に試験片の曲げ試験後の様子を示す。CFRP表面の端部 付近の繊維の破断と縦割れ(スプリッティング破壊)が起こるが,荷重負担能力は維持している。ま たSS400の塑性変形後も接着は極めて良好であり,接着界面に損傷は観察されない。引張り試験におい ても同様に塑性変形後のはく離は生じなかった。またシングルラップ試験の結果からせん断強度は約 20MPaであった。このとき破壊モードは接着剤の凝集破壊であり,界面のはく離モードではなかった。 以上のことから今回のフィルム接着剤によるCFRP/Steel接合構造は実用上の耐久性があると推測され る。ただし,加熱硬化の接着剤では生産性が悪いため実用上は常温硬化タイプを使用する必要がある。 また現在,サンドブラスト処理したSS400とCFRPの接着試験片の作成を行っている。

一方,電気的な接合健全性モニタリング技術にはまだ不明瞭な点が多く,今後の検討課題である。

#### 4. 研究成果報告

[1] 黄木景二,井上宏樹, CFRPのインピーダンス特性と接合材のヘルスモニタリングへの応用,第34 回FRPシンポジウム(2005).

[2] K. Ogi and Y. Takao, "Characterization of piezoresistance behavior of a CFRP unidirectional laminate," Composites Science and Technology, Vol. 65, No. 2 (2005), 231-239.

#### 5.研究組織

研究代表者:黄木景二,所内世話人:高雄善裕,実験補佐:井上宏樹

カオス・乱流における輸送特性

崇城大学工学部総合教育物理 柴田博史 (Shibata, Hiroshi)

#### 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。一般に流体の拡 散係数・粘性係数・熱伝導率は,その流体の運動形態によって変化する。共同研究者達によっ て,レーリー・ベナール対流を行なう流体が,ソフト乱流からハード乱流へ転移する領域で, 粘性係数が発散することが見出された。また,非線形方程式によって記述される流体が,ど のように粘性や熱伝導を産みだしているかが共同研究者達によって研究が進められている。 カオスや乱流状態にある流体において,どのように粘性や熱伝導が産みだされているのかそ のメカニズムを明らかにする。

#### 2. 研究方法

九州大学応用力学研究所の電子計算機や共同研究者各々が持つパソコンやワークステー ションを用い,数値シミュレーションや数値計算を行なった。具体的には,数値計算を行な いながら,そのデータをもとに粘性係数や熱伝導率等の物理量の計算を行なった。また,理 論的に導出した式をもとに,適当なモデルを使い数値計算を行なった。

#### 3. 研究結果

柳田 金子モデルをもとにレーリー・ベナール対流のシミュレーションを行ない,運動 量流れの2時間相関関数を詳しく調べた。特に時間が長い領域でのエルゴード性の破れを示 す温度差領域は,システムサイズを大きくしていくと小さくなることが示された。この発散 領域のシステムサイズ依存性を丁寧に調べることにより,ある相関距離がシステムサイズよ りも長くなった時,粘性係数が発散しているという考え方を見出した。さらに,その相関距 離が上下プレートの温度差にどのように依存しているかを明らかにした。(柴田)

標準写像における異常拡散がサリス統計によって特徴づけられることを,数値的に示した。標準写像の拡散は,ジャンプ幅が有限であるが,ジャンプ間にベキ的な長時間相関があるために異常拡散が発生する。一方,レヴィフライトは,時間相関は指数的減衰するけれどもジャンプ幅は無限大まで許される(逆ベキ分布)の性質を持つ。そこで,標準写像において,同一方向にジャンプしている間の移動距離を表わす新しい変数Xを導入し,その変数Xの分布がサリス・エントロピー最大化原理により導出される分布と良く一致することがわかった。(石崎)

#### 4. 研究成果

論文による発表

- R. Ishizaki, N. Kodama, and M. Inoue, Anomalous Diffusion Induced by Random Walks with Hierarchical Long-Range Memory, J. Phys. Soc. Jpn. 74(9), 2443-2448(2005).
- [2] R. Ishizaki and M. Inoue, Application of Tsallis Nonextensive Statistics to the Anomalous Diffusion of the Standard Map, Prog. Theor. Phys. 114(5), 943-952(2005).
- [3] H. Shibata, Momentum flux in Rayleigh-Bénard convection II, Physica A 345, 448-456(2005).
- [4] H. Shibata, Heat flux in Rayleigh-Bénard convection, Physica A 352, 335-346(2005).
- [5] K. Ueno, H. Sakaguchi, and M. Okamura, Renormalization-group and numerical analysis of a noisy Kuramoto-Sivashinsky equation in 1+1 dimensions, Phys. Rev. E 71, 046138(2005).

会議における主な発表

[1] 岡村 誠,

射影演算子法の大自由度カオスへの適用の有効性,

日本物理学会2005年秋季大会,同志社大学,2005年9月.

[2] 岡村 誠,

Kuramoto-Sivashinsky 方程式における射影演算子法の適用の有効性,

京都大学数理解析研究所研究集会「非線形波動の数理と応用」,2005年10月. [3] 柴田博史,

- レーリー・ベナール対流における熱流れ、
- 日本流体力学会年会2005,工学院大学,2005年9月.
- [4] 柴田博史,

Heat flux in Rayleigh-Bénard convection,

Dynamics Days Europe 2005, Berlin, 25/07/2005.

[5] 石崎龍二,富長広貴,黒木昌一,森 信之,森 肇, ヘノン ハイレス系の時間相関関数とパワースペクトルの構造, 九州大学応用力学研究所研究集会「乱流研究の異分野融合と新たな創成」, 2005年6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) 大下祥雄 豊田工業大学 半導体研究室

#### <u>1.研究目的</u>

世界の太陽電池生産量は、この 10 間で毎年 約20%以上の伸びを示してきた。特に昨年度 の太陽電池市場は 160%を越える大幅な伸び を記録した。その中で、結晶系シリコン太陽 電池の生産量は拡大している市場の 90%以 上を支えている。それゆえ、太陽電池業界の 今後のさらなる発展を目指して、特に欧米に おいて結晶系シリコン太陽電池の高効率化な らびに低コスト化の研究開発が精力的に進め られている。高効率化に関しては、オージェ 再結合を考慮した結晶シリコン太陽電池の最 大理論効率は28.9%であり、その時の最適な 基板厚は 80µm程度であること、また a-Si、 a-SiC など用いたヘテロ接合を利用すること により実用効率として 26%程度が期待でき ることが報告されている。しかし、現在量産 されている多結晶シリコン太陽電池の変換効 率は16%程度であり、さらなる変換効率の向 上が要求されている。多結晶シリコン太陽電 池の高効率化、低コスト化が実現されれば、 50円/W(発電コスト15円/kWh)以下のコ ストダウンも可能であり、多結晶シリコン太 陽電池が 2010 年以降の太陽光発電の広範な 普及を担うことが期待されている。

これまで多結晶シリコン太陽電池の変換効 率を向上させるには、多結晶シリコンの粒径 を大きくすることが最も重要であるとして開 発が進められてきた。また、結晶粒界につい ては、小傾角対称境界、小傾角非対称境界、 大傾角境界などの分類と境界の構造と境界エ ネルギーとの関係をもとに、結晶成長や境界 における欠陥構造に関する議論が行われてき た。その結果、現在では~cm 程度の大きな粒 径を有する多結晶シリコン基板が開発されて いる。しかし、少数キャリアの拡散長(250 µm 程度)と比較し十分に大きな粒径が実現 されたにもかかわらず、その変換効率は必ず しも期待されるほどに向上していない。

その意味で、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 5x10<sup>14</sup> ~ 8x10<sup>16</sup> atoms/cm<sup>3</sup>程 度の鉄、結晶成長時の雰囲気から混入する 10<sup>17</sup> ~ 10<sup>18</sup> atoms/cm<sup>3</sup>程度の酸素ならびに 10<sup>17</sup> ~ 10<sup>18</sup> atoms/cm<sup>3</sup>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と考えられる。

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。多結晶シリコンにおいては、粒界が光の 吸収により生成された少数キャリアの再結合 中心として働く。それゆえ、これまでは多結 晶シリコン太陽電池の変換効率向上のため、 粒径の拡大がはかられてきた。その結果、現 在では、少数キャリアの拡散長を超えた粒径 を有する多結晶シリコンが実現されている。 しかし、多結晶シリコン太陽電池の変換効率 は、期待されるほどの高い値が得られていな いのが現状である。大きな粒径を有する多結 晶シリコン太陽電池の変換効率が依然低い理 由としては次のことが考えられる。一つは、 粒界内部に存在する、多くの結晶欠陥である。

一方、太陽電池用多結晶シリコン中には、 比較的多くの炭素や鉄が残留している。これ ら残留不純物は、それ自体が再結合中心とし て働く他に、結晶欠陥との複合体として電気 的特性を劣化させることが予想される。それ ゆえ、1)結晶粒内に残留する応力や転位の 分布状態を明らかにし、結晶成長時や太陽電 池作製プロセス時における欠陥形成過程を理 解すること、2)代表的な残留不純物である 炭素、酸素、鉄の分布や鉄の電子状態を明ら かにすることは、多結晶シリコンの電気的特 性向上のためには必要不可欠である。さらに は、それら欠陥密度の低減方法や、パッシベ ーションなどの不活性化技術を検討する必要 がある。

そこで、本共同利用研究では、九州大学が

有する結晶成長シミュレーション技術により 得られた結果をもとに、太陽電池特性に悪影 響を与える欠陥や不純部の分布、さらにはそ れら欠陥の構造や鉄の化学状態などを明らか にし、それらをもとに高品質な多結晶シリコ ン成長技術の実現を目指している。以下に、 それら研究成果の一部を紹介する。

### <u>2.多結晶シリコン評価(鉄の分布とその化</u> <u>学状態)</u>

#### 2.1 実験方法

シリコン中の鉄は酸化鉄あるいはシリサイ ドの状態で存在していると考えられる。しか し、結晶内での分布や化学状態は関しては明 らかになっていない。そこで、多結晶シリコ ン中の鉄の分布とその電子状態を SPring-8の 放射光を用いて調べた。使用したビームライ ンはBL37XUである。本ビームラインは、光 源として真空封止アンジュレーターを使用し ており、4.4keV 以上のエネルギーを用い た実験に対応している。今回の実験では鉄の 吸収を測定するため、K殻の吸収に対応する 10keVを使用エネルギーとした。測定系を 図1に示す。X線の吸収により生じた電子・ 正孔対は、蛍光X線の放出やオージェ過程な どを通じて再結合する。その時に放出される 蛍光X線の収量は、X線の吸収量に比例する。 そこで、マイクロサイズに絞った分光した X



図1 XRF、XANES 測定系

線を試料に照射し、X線を吸収した鉄からの 蛍光強度を半導体検出器で測定して、鉄の濃 度分布を求めた(X-ray fluorescence (XRF)測 定)。空間分解は最大1.5µmとした。また、 鉄の電子状態は、吸収端近傍のスペクトルを 測定し、その構造を解析することにより求め た(µ-X-ray absorption near edge structure (XANES)法)。

測定した試料は、JFE においてキャスト法 により成長させた多結晶シリコン(Bドー プ:~10<sup>16</sup>cm<sup>-3</sup>、厚さ:350µm)で あり、1)成長後の多結晶シリコン基板、2) 鉄で汚染させた多結晶シリコン基板、3)鉄 で汚染させた後、ゲッタリング処理を施した 多結晶シリコン基板、の3種類を測定した。 鉄の汚染としては、塩化鉄水溶液中に基板を 漬けた後、熱処理を行った。一方、一度汚染 させた鉄を除去するため、基板裏面にPゲッ ター層を形成した後に熱処理を行った。

#### 2.2 実験結果

結晶成長後に表面のダメージ層を除去した 多結晶シリコン中での鉄分布の一例を図1に 示す。鉄は、特定の粒界にそって均一に存在



図2 鉄の濃度分布

しているのではなく、粒界のある特定の領域 に存在していることが示された(図2)。こ の結果は、粒界のみではなく、粒界と結晶欠 陥が複合した領域に鉄が多く捕獲される可能 性を示唆している。次に、その場所での鉄の 化学的状態を明らかにするため、XANES の スペクトル解析を行った。その結果、そこで の鉄の状態は酸化鉄であることが示された。

多結晶中のどの場所に鉄が存在するかをよ り明らかにするため、鉄で汚染した試料の測 定を行った。得られた結果の一例を図3に示 す。ある特定の粒内、あるいは粒界の特定の 場所に多くの鉄が存在していることが示され た。また、それらの電子状態は、測定した限 りでは酸化鉄であった(図3)。特定の粒内 において多くの鉄が存在する理由は明らかで はない。しかし、これまでの実験から、結晶 粒に依存して炭素濃度が大きく異なることが 明らかとなっている。このことから、欠陥あ るいはボロンがその粒内には多く存在し、そ れらが鉄を捕獲した可能性が考えられる。こ の点に関しては、現在検討中である

一方、その他の場所で鉄が多く存在してい る場所では多くのエッチピットが観察された。 以上の結果から、転位と粒界、あるいは転位 が存在するところに、多くの鉄が捕獲されて いると考えられる。

次に、図3に示した場所と同一箇所におい て、ゲッタリング処理を施した後の鉄の分布



(b)



(a)

を図4に示す。ゲッタリング前に結晶粒内に 存在していた鉄はゲッタリング処理により取 り除かれた。しかし、粒界においてゲッタリ ング前に鉄が存在していた場所の幾つかでは、 ゲッタリング処理後にも鉄が存在した。その 場所での鉄の状態はシリサイドである可能性 が示された(図4)。また、ゲッタリング前 には鉄が存在していなかった領域に、ゲッタ リング処理後に多くの鉄が集まった。ここで の電子状態も鉄シリサイドである可能性が高 い。ゲッタリングプロセスのような熱処理に より、鉄がどのように再分布するかに関して は現在検討中である。鉄シリサイドが形成さ れた領域は、再結合中心として働くことが予 想される。また、接合部分に鉄シリサイドが 存在する場合には、接合特性を劣化させ解放 電圧の低下を招くことが考えられる。



図4 ゲッタリング後の鉄の XANES スペク トル(各番号は図3(b)での測定位置に対応)

#### 3.新多結晶シリコン成長装置

#### <u>3.1 結晶成長炉の開発</u>

高い変換効率を有する太陽電池を実現 するには、多結晶中の欠陥制御や不純物の 低減が重要である。そこで、高品質な多結 晶シリコンの結晶成長技術の実現を目的 として、小型結晶成長炉を開発した。炉内 の構造を図5に示す。半径方向の温度勾配 を制御するため、従来の1ゾーンヒーター
ではなく、るつぼ側面の2ゾーンヒーター に加えて、るつぼ上部及び下部にヒーター を配置した。また、結晶成長時の不純物抑 制及び固液界面制御のため、るつぼは回転 可能とした。本学のクリーンルーム内に設 置した小型結晶成長炉の外観写真を図6 に示す

結晶炉内の温度分布は成長させた多結 晶シリコン中の欠陥形成に大きな影響を 与える。そこで、本小型結晶成長炉内の温 度特性を調べるために、縦方向温度分布を 測定した。その結果、図7に示すように、



結晶成長部(z<0)では約15°C/cmの温度勾配 が得られた。この温度条件を用い、多結晶 シリコンの急速凝固試験を行った。図7に 得られた多結晶シリコンインゴットの外 観写真を示す。今後、結晶成長のシミュレ ーション結果をもとに、結晶成長の方向・ 速度等を変化させて高品質多結晶の得ら れる成長条件を明確にする。



図7 結晶成長炉内の縦方向温度分布

図5 小型結晶成長炉:炉内模式図



図6 小型結晶成長炉:外観写真

## <u>5.まとめ</u>

多結晶シリコン太陽電池の変換効率を向上 させるには、多結晶シリコンの結晶学的な理 解に加え、それらの知見を基にした良質な結 晶を得るための結晶成長技術および欠陥や粒 界のパッシベーション技術の開発が必要であ る。今後、今回九州大学応用力学研究所との 共同利用研究活動を通じて得られた結果をも とに、高効率・低コスト多結晶シリコン太陽 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。

#### 1.緒言

近年の高齢化社会においては,関節疾患を持つ患者が増加傾向にあり,人工関節置換術は日本国内で一般化してきている.しかしながら,現在使用されている多くの人工関節は欧米で開発された経緯から日本人の和式生活に適応していない点や,人工関節装着後に緩みを生じる可能性があるなどの問題点がある.そのため,日本人の和式生活に適応し,また緩みを生じにくい人工関節の開発が課題である.人工関節の最適設計を行うためには骨内部や人工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.このような解析は有限要素法を用いて行うことにより知ることができるが,これらの解析を行うためには関節と人工関節の正確なモデル化などが必要となる.生体関節は複雑な三次元形状をしておりモデル化を行うためには,医療用X線CT画像を利用することが必要である.

本研究では実際の力学的条件に近い三次元での解析を行うため,医療用X線CT画像から膝関節の三次元有限要素モデルを作成し,また人工関節は製品のCADデータから三次元有限要素モデルを作成し有限要素法解析を行うことを目的とする.

#### 2.膝関節の三次元有限要素モデル

医療用 X 線 CT 画像から生体骨の輪郭を抽出する機能を 持つ画像処理ソフトISEC2を用いて,すべてのCT画像にお いて輪郭を抽出することで三次元の表面点群データを作成 することができる.ISEC2でのCT画像と点群データ作成の 様子をFig.1に示す.次にISEC2で作成した三次元の表面点 群データをRapid Form 2004を使用しポリゴンデータを作成 し,その後サーフェイスデータを作成する.Rapid Form 2004 でのサーフェイスデータ作成の様子をFig.2に示す. Rapid Form 2004で作成したサーフェイスデータをFEM解析 ソフトウェアのプリ・ポストプロセッサである MSC.Patran でメッシュ分割をおこない三次元有限要素法解析モデルを 作成した.作成した健康膝関節モデルをFig.3に,人工膝関 節モデルをFig.4に示す.

#### 3.解析結果と考察

解析に用いた材料定数をTable1 に示す.解析には,汎用 有限要素法解析コード MSC.Marcを用いて解析を行った. 本論文では,接触解析を安定的に解析するためポリエチ



Fig.1 ISEC2



Fig.2 Rapid Form 2004

#### 佐賀大学理工学部 萩原世也

レンインサート下面に強制変位を与え解析を行った.ここで、健康膝関節解析モデルと人工膝関節解析モデルの結果 を比較するため、生体骨上面の全反力を同程度の値にしな ければならない.そこではじめに、いくつかの強制変位を 与え各変位で骨上面に発生する全反力を求めた.得られた 結果をFig.5に示す.Fig.5に示す結果から健康膝関節解析 モデルと人工膝関節解析モデルそれぞれについて内挿を行 うことで、生体骨上面の全反力が600Nとなる強制変位が健 康膝関節解析モデルでは1.4099mm,人工膝関節解析モデル では0.4033mmであることがわかる.そして求めた強制変位 1.4099 mm,0.4033mmを各モデルに与え再度解析を行った. このとき各モデルの骨上面に発生した全反力は、健康膝関 節解析モデルで598.3N,人工膝関節解析モデルで598.7Nで あった.



Fig.3 Boundary condition of Normal knee



Fig.4 Boundary condition of Artificial knee Table1 Material properties

	material	young's modulus [MPa]	poisson's ratio [-]
Bone	cancellous bone	2000	0.3
Femoral component	Co-Cr-Mo	115,000	0.3
Polyethylene insert	UHMWPE	550	0.49



(b) Artificial knee Fig.5 Variation of reaction force

健康膝関節解析モデルの解析結果をFig.6に,人工膝関 節解析モデルの生体骨の解析結果をFig.7に,人工膝関節 解析モデルの大腿骨コンポーネントの解析結果をFig.8 に,人工膝関節解析モデルのポリエチレンインサートの 解析結果をFig.9に示す.

大腿骨前部では,人工膝関節装着前後において応力分 布にほとんど変化が見られないが,大腿骨後部と骨切除 面においては,人工膝関節装着後に主応力が増加してい る.この主応力の増加は,生体骨と人工膝関節の接触によ る影響と考えられる.

また,人工膝関節の大腿骨コンポーネントとポリエチ レンインサートでは関節外側が内側に比べ広範囲で高い 応力を発生しているという結果が得られた.

#### 4. 結言

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,医療用X線CT画像から三次元膝関節有限要素法 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.そして,人工膝関節装着後に大腿骨に応力の高 い部分が存在することが分かった.

# 5.研究組織(共同研究者) 九州大学 応用力学研究所 東藤貢 九州大学 応用力学研究所 新川和夫 片井整形外科病院 長嶺隆二 福岡県工業技術センタ 小金丸正明



Fig.6 Distributions of the maximum principal stress in normal knee



Fig.7 Distributions of the maximum principal stress of bone



Fig.8 Distributions of the Mises stress of femoral component



Fig.9 Distributions of the Mises stress of polyethykebe insert

# 骨固定用インプラント材料の変形・破壊メカニズムに関する研究

Study on deformation and fracture mechanism of bone fixation implant materials

竹之下 康治(九州大学大学院歯学研究院) 東藤 貢(応用力学研究所基礎力学部門)

## 1.緒 言

口腔外科では,癌などにより切除した下顎骨を固定するために,チタン合金製のプレートが使用されるが,しばしばこのプレートに関連した人体内での破損事故,たとえばプレートの破断や固定ねじの破壊などが報告されている.プレートは湾曲した下顎骨の曲面にその形状を合わせるため,Fig.1 に示すように手術時に医師の手により強制的な塑性変形が加えられる.本研究では,このような塑性変形がプレートの破損に重要な影響を与えていると考え,プレートの3 次元モデルを用いて弾塑性有限要素解析により,医師の手による塑性変形状態を定量的に再現した.さらに,チタン合金の破壊特性に及ぼす塑性変形の影響を評価し,解析的結果および実験的結果に基づきプレートの破損メカニズムについて考察した.

## 2.解析と実験方法

#### 2.1 有限要素解析

実際に患者の体内で破損した下顎骨固定用プレートの3次元形状を正確に測定し,FEM解析用 プリポストプロセッサ FEMAP によりプレート形状をモデル化した.その後,要素サイズ 0.5mm,要素 数 113900(4 節点四面体要素),総節点数 29337 で要素分割を行い汎用 FEM コードの MARC を 用いて弾塑性解析を行った.解析で設定した境界条件は次の通りである.

(1) a を拘束し,1 に強制変位

- (2) (1)を除去後, b を拘束し, 2 に強制変位
- (3) (2)を除去後, c を拘束し, 3 を強制変位
- (4) (3)を除去後, d を拘束し, 4 に強制変位

ここで, a, b, c, dと1, 2, 3, 4の位置は Fig.2 に示す通りである.また, (1)と(2)の強制変位は - z方向に 10mm, (3)と(4)の強制変位は - z方向に 5mm である.

解析で用いたチタン合金の材料定数を Table 1 に示す.

## 2.2 破壊実験

破壊特性の測定に用いたチタン合金は Ti-6AI-4V であり,厚さ 2mm の板材より 200mm × 10mm の短冊状試験片を切り出した.これらの短冊状試験片の片側にノッチを導入することで SENB 試験 片を機械加工により作製した.油圧サーボ式試験機を用いて負荷速度 1mm/min で SENB 試験片の 3 点曲げ試験を行い,荷重と荷重点変位の時間歴をデジタルレコーダで記録した.得られたデータ から臨界エネルギーUmax を評価し,次式を用いてモード I エネルギー解放率 GImax を求め破壊特性 値とした.

 $G_{Imax} = U_{max} / BW\phi \tag{1}$ 

ここで, B は試験片厚さ, W は試験片幅, はき裂長さ a と W に依存する補正係数である.

また, ノッチ導入前の短冊状試験片を用いて負荷速度 10mm/min, スパン 50mm で荷重点変位が約8mmになるまで3点曲げ試験を行い塑性変形を生じさせた試験片を準備した.これらの試験片の 負荷点に機械加工によりノッチを導入後,上述の方法で試験を行い破壊特性を評価した.

#### 3.結果と考察

#### 3・1 相当塑性ひずみ分布

Fig.3 に各境界条件(1)~(4)での相当塑性ひずみ分布を示す.拘束部とねじ穴間の連結部で応力 集中が生じた結果,塑性変形が生じ,変形が進むにつれ塑性変形領域がプレート全体に広がって いくことがわかる.

Fig.4 に Fig.3(4)に示した 4 箇所での最大相当塑性ひずみの STEP 依存性を示す.a, b, c で最大



Fig.1 Bone fixation material in oral surgery.



Fig.2 Boundary conditions.

Table 1 Material properties.

Material	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	E (GPa)	ν	$\sigma_y$ (MPa)
Ti alloy	4420	113	0.31	900

8%前後,dで7%程度の塑性ひずみが生じていることがわかる.

塑性変形領域は一種の損傷領域と理解でき,損傷の発生は破壊に対する抵抗特性を低下させる. 従って,これらの塑性変形領域の破壊特性は大きく低下していることが予測される.そのため,下顎 骨に固定された骨固定材は,たとえば食事中などに受ける繰り返し負荷により,塑性変形領域すな わちねじ穴の連結部分のいずれかで破損することが想定される.

### 3・2 破壊特性値

Fig.5 に式(1)より求めた2種類の試験片(deformed が試験片に塑性変形を生じさせてから破壊試験をしたもの)の破壊特性値  $G_{Imax}$ を示す. $G_{Imax}$ の塑性変形の影響による低下はより大きく,塑性変形を加えることで  $G_{Imax}$ は 65%程度低下する.このように塑性変形を加えることで破壊に対する抵抗特性は大きく低下することがわかる.

前述のようにチタン合金における塑性変形は材料内部での微視損傷の発生であると考えると,それらの内部欠陥が起点となりボイドやマイクロクラックが発生し,それらの周囲で局所的応力集中が 生じることでノッチ先端部での応力集中がより厳しくなり,破壊靭性が低下するものと思われる.また, ノッチ先端部でのエネルギー散逸機構は塑性変形であるが,すでに塑性変形が生じている試験片 では未変形の試験片に比べノッチ先端部での塑性変形量が限られるため G<sub>Imax</sub> が低下すると考えられる.

## 4.まとめ

人体内で破壊したチタン合金製骨固定用プレートの形状測定を行い 3DFEM モデルを作成した. このモデルを用いて弾塑性有限要素解析を行い,手術時の塑性変形を定量的に評価した.その結 果,ねじ穴の連結部で塑性ひずみが生じ,その最大値は 8%程度であった.また,チタン合金の破 壊特性に対する塑性変形の影響を調べた結果,塑性変形が生じることで破壊に対する抵抗特性 (破壊エネルギー)が大幅に低下することがわかった.



Fig.3 Equivalent plastic strain distributions.



Fig.4 Maximum equivalent plastic strain value.

#### 成果報告

1.高永祐樹,東藤 貢,新川和夫,竹之下康治,チタン合金製骨固定材料の弾塑性変形解 析と破壊挙動,M&M2005材料力学カンファレンス講演論文集,2005,653-654. 2.高永祐樹,東藤 貢,新川和夫,竹之下康治,口腔外科用インプラントの破損に及ぼす 塑性変形の影響,第18回バイオエンジニアリング講演会講演論文集,2006,143-144.

Fig.5 Fracture property, G<sub>Imax</sub>.

金沢大学 新田晃平

1.緒 言

結晶性高分子は現在身の回りの様々な用途で使用されており,今後更なる新規分野への用途拡 大が見込まれている.しかし,その破損挙動に対しては,未だに十分な知見が得られていない. 近赤外スペクトル測定では測定場所やサンプル形状の影響をほぼ受けずに,分子振動の倍音や結 合音などの分子運動に直接関与する情報を得ることが可能である.そこで,我々は代表的な結晶 性高分子であるイソタクチックポリプロピレン(iPP),及び高密度ポリエチレン(HDPE)の延 伸過程中における近赤外スペクトルを測定し,結晶性高分子の破損過程で起こる分子鎖の状態変 化を直接捉えることを試みた.

2.実験

## 2.1.試料

試料として ,iPP( *M*w = 3.8 × 10<sup>5</sup> ,*M*w/*M*n=4.87 )及び ,HDPE( *M*w = 1.0 × 10<sup>5</sup> ,*M*w/*M*n=5.88 ) を用いた. 試料をそれぞれ 230 , 210 で溶融後プレスし,その後 0 で急冷結晶化させることによって測定用シートを作成した.

## 2.2.測定装置

近赤外光学体系に小型引張試験機(アベ製作所製)を組み込むことによって,延伸過程における近赤外スペクトルと応力を同時に測定した.測定装置の概略図を Fig.1 に示す.装置内に組み込まれた小型引張試験機(アベ製作所製)は,近赤外光が当たる延伸部が移動しないように、両袖のチャックが同時に反対方向に定速延伸できるように設計されている.



Fig.1 The experimental setup using this study.

#### 3.結果と考察

Fig.2 に未延伸状態と,900%延伸後の iPP のスペクトルを示す.Fig.2(a)に見られる 1705, 1733nm のピークは共に CH<sub>3</sub>基中の CH 伸縮振動第一倍音,1723,1768nm のピークは CH<sub>2</sub>基 CH 伸縮振動第一倍音と帰属がされている.<sup>1)</sup>また,溶融 iPP スペクトルの結果より,1723nm はヘリックスに由来するピークであり、1768nm は非晶に由来するピークであることが分かって いる.Fig.2より、破断直前の900%延伸後においては、未延伸状態に比べて1723nmのピーク 強度が減少し、1768nmのピーク強度が増加していることが分かる.吸光度は、各バンドに応じ た分子振動等を起こすことのできる分子数に比例している.ひずみ900%が破断直前のひずみ硬 化領域であることを考えると、1723nmのピークの減少は、延伸によって、長いヘリックスが消 失、もしくは、ランダムコイル状態へと変化したものと考えることができる.また、同様に 1768nmでは、結晶が破砕され、非晶に属する鎖の数が増加したことを示唆している.

Fig.3 は未延伸状態と,1700%延伸後(破断直前)の HDPE のスペクトルである.Fig.3(a)に 見られる 1728,1762nm のピークは共に CH2 基中の CH 伸縮振動第一倍音に由来するピークで ある.<sup>2)</sup>未延伸状態と 1700%延伸後のスペクトルを比較すると,1728,1762nm のピーク形状は 見かけ上変化しておらず,そのピーク強度比も延伸前後で変化しない.

一般に iPP や HDPE 等の結晶性高分子では,未延伸状態において球晶構造をとり,延伸において球晶が崩壊し,鎖が配向してフィブリル構造へと高次構造が変化する.Fig.2 と Fig.3 の結果を合わせて考えると,この高次構造が変化する際に,iPP では分子鎖のコンホメーション規則 正しい螺旋構造から,ランダムコイルへと大きく変化するのに対して,HDPE 分子鎖のコンホメ ーションの状態は,変形過程中では見かけ上変化しないことが暗示された.



Fig.2 NIR spectra of (a) undrawn and (b) 900% uniaxially drawn iPP (just before break).

Fig.3 NIR spectra of (a) undrawn and (b) 1700% uniaxially drawn HDPE (just before break).

## **References:**

- 1) T. Furukawa, M. Warari, H. W. Siesler, and Y. Ozaki, J. Appl. Polym. Sci. 87,616 (2003)
- H.Sato, M.Shimoyama, T.Kamiya, T.Amari, S.Sasic, T.Ninomiya, H.W.Siesler, Y.Ozaki, J. Near Infrared Spectrosc. 11,309-321 (2003)

## 人工股関節の力学的挙動の計算力学・実験力学的解析

Analysis of mechanical behavior of artificial hip joint by computational and experimental mechanics

佛淵 孝夫 (佐賀大学医学部整形外科)

東藤 貢(応用力学研究所基礎力学部門)

## 1 緒 言

人工股関節の骨頭には,アルミナやジルコニアのようなセラミックスか金属が多く使用されている.セラミックス骨頭は金属に比べ耐摩耗性に優れるものの,耐衝撃性や破壊靭性の 点で劣り,まれではあるがアルミナ骨頭の人体内での破壊も報告されている.骨頭はステム・ テーパ角との間にわずかな角度差が設けられているため,手術時の骨頭のステム先端部への 嵌合の状態によっても強度が大きく変化することが知られている.したがってセラミックス 骨頭の耐衝撃性を向上させるためには,セラミックス内に存在する欠陥を少なくするだけで なく,内部の応力状態を明確にして機械的な構造についても検討を行う必要がある.

本研究では,アルミナ骨頭の衝撃破壊試験を行い,荷重を測定するとともに,高速度カメ ラを用いて衝撃破壊挙動の可視化を試みた.また,骨頭の内部応力状態を明らかにするため に,軸対称モデルを用いて有限要素法による応力解析を行った.これらの実験結果と解析結 果とを比較することで骨頭衝撃破壊メカニズムについて考察した.

## 2 実験方法と解析方法

#### 2.1 骨頭の衝撃破壊試験

直径 ∲=22mm のアルミナ骨頭に,厚さ 2mm のシリコンゴムを介して高さ 0.4m から 8.75kg のストライカーを落下させる落錘式衝撃破壊試験を行った.骨頭をはめ込むチタン合金製の トラニオン(ステム先端部と同じ形状)にひずみゲージを貼り付け,ひずみの時刻歴を計測 した.衝撃試験と同様の試験片と試験片支持部に静的圧縮荷重を負荷することで,ひずみと 荷重の関係を求めた.また,100 コマ/sec で撮影が可能な高速度カメラで骨頭の衝撃破壊挙 動を撮影した.

#### 2.2 FEM 解析

解析に用いた有限要素モデルを Fig.1 に示す.実際に臨床応用されている人工股関節の CAD データを基に骨頭およびステム先端部から構成される軸対称モデルを作成した.この2次元 モデルを,要素サイズ *lave*=0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 でそれぞれ分割し, Fig.1 に示すようにステム に強制変位を加え境界条件で静的解析を行った.アルミナ骨頭およびチタン合金製ステムは 線形弾性体と仮定した.用いた材料定数を Table 1 に示す.

#### 3 結果と考察

#### 3.1 衝擊破壊試験結果

Fig.2 に衝撃試験から得られた荷重の時刻歴を示す.荷重初期のゆるやかな立ち上がりは, 緩衝材として用いたシリコンゴムの影響によるものである.600µsecを過ぎたあたりで緩衝材 の影響はほぼなくなり,荷重-時間曲線はほぼ直線状になる.このことはアルミナ骨頭の線 形弾性挙動に対応している.最大荷重(9.9kN)に到達後,荷重は急激に減少しているが,こ のことは骨頭の脆性破壊を示している.

骨頭が破壊に至る過程の高速度撮影写真を Fig.3 に示す.撮影開始後 90µs の(a)ではまだ骨 頭に変化はおこっていないが,110µs 後の(b)で骨頭上端部より2箇所でき裂の発生が確認 できる.130µs 後の(c)では全体にわたって縦方向にき裂が発生し,380µs 後の(d)で円周方 向にもき裂が発生後破片が飛散した.この撮影結果より,まず縦方向(負荷方向)にき裂が 発生し,続いて円周方向にもき裂が発生することで骨頭は細かく分断され破片となり飛散す ることが理解できる.なお,衝撃破壊において発生する破片のサイズは,試験片に与えられ た衝撃エネルギーの大きさに影響を受け,エネルギーが大きいほど発生するき裂の数が多く なるため破片はより細かくなることが実験より確認されている.

### 3.2 FEM 解析結果

各要素サイズでの変位 0.5mm 時における,骨頭内部のカーブ上の最大主応力を比較したものを Fig.4 に示す.この結果より,*l<sub>ave</sub>=0.3*,0.4,0.5 では明らかに値にばらつきが大きく,*l<sub>ave</sub>=0.2* でも一部に結果が不安定な箇所が見られるため,精度よい解析を行うためには,特に応力集中が生じる箇所では *l<sub>ave</sub>=0.1* で要素分割する必要があると言える.したがって,*l<sub>ave</sub>=0.1*のモデルを用いて応力状態について検討を行った.

Fig.5 に,ステムにかかる荷重が骨頭破壊時とほぼ等しい荷重 9kN(強制変位 0.6mm)での 最大主応力および円周方向の応力分布を示す.(a)と(b)を比較すると,骨頭内部での応力分布 状態がほぼ等しいため,ステムが押し込まれることによって,円周方向で最大主応力が発生 していることが分かる.このような円周方向応力は応力の方向に対して垂直な方向,すなわ ち負荷方向にき裂を発生させる原因となり,この結果は,衝撃実験で縦方向(負荷方向)に き裂が走る結果となったことと一致する.

なお, Fig.3(b)に示すように,骨頭表面では,き裂は骨頭上端部付近から発生しているよう に見受けられるが, Fig.5 に示す解析結果は,ステム・テーパとの接触部で最大主応力が生じ ており,この接触部におけるき裂発生を示唆している.この原因としては,内部で発生した き裂が上端部の方に伝播したことが考えられる.あるいは,セラミックスの破壊発生の起



Table 1 Material properties for FEM.

Material	E (GPa)	ν	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	400	0.24	3.97
Ti alloy	113	0.29	4.40



Fig.2 Load-time curve obtained from impact test.



Fig.3 Impact fracture behavior of alumina femoral head.

点となるのは内部に存在する微小な欠陥であり,骨頭上端部にき裂発生の起点となった欠陥 が存在したかもしれない.残念ながら,今回,高速度撮影に成功したのは Fig.3 に示した試験 片のみであるため,その詳細は不明である.



Fig.4 Comparison of the maximum principal stress distribution.

# 5 ま と め

衝撃破壊試験の様子を高速度カメラで撮影し,骨頭の衝撃破壊挙動を可視化することに成功した.また,軸対称モデルを用いて FEM 解析を行った結果,ステムと骨頭内部の接触部 で最大主応力が円周方向に生じ,接触部において負荷方向にき裂が発生する可能性があることが示唆された.



(a) The maximum principal stress distribution



(b) z-axial stress distribution

Fig.5 Stress distribution in alumina femoral head.

# 成果報告

1.田中麻美、東藤 貢、新川和夫、佛淵孝夫、人工股関節用アルミナ骨頭の衝撃破壊挙動 に関する研究、M&M2005 材料力学カンファレンス講演論文集、2005、655-656.

2.田中麻美、東藤 貢、馬渡正明、佛淵孝夫、新川和夫、人工股関節用セラミックス骨頭 の衝撃破壊メカニズム、第18回バイオエンジニアリング講演会講演論文集、2006、175-176

### 高王下での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

## 宫崎大学 工学部 電気電子工学科 吉野 賢二、 松尾整、木下綾

## 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、バンド端より高い 光エネルギーに対して吸収係数が大きい。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% [1] という報告もある。AgGaSe₂ は非線形素子として重要な材料であり研 究報告も多いが、太陽電池の材料としての AgGaSe₂ の報告は少ない。AgGaSe₂ は禁制帯幅 1.8 eV を持ち、短波長側の光を吸収ができる。禁制帯幅約 1.5 eV の CuInGaSe₂ とタンデム構造を作るこ とによって、変換効率の向上が期待できる。本研究では、ホットプレス法により AgGaSe₂ 結晶成 長を行った。ホットプレス法は低温、短時間で結晶成長ができ、真空を必要としないなどの利点 がある。これまでに、CuInS₂, AgInS₂ をホットプレス法で作成し、良質なバルク結晶が得られて いる 【2,3】。

## 2. 実験方法

AgGaSe<sub>2</sub> バルク結晶の結晶成長を行うために、粉末二元系材料 Ag<sub>2</sub>Se (99.9%)、Ga<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> (99.9%)を 用いて化学量論的組成比になるように混合して、ホットプレス法を用いて、400~700 ℃、25~ 80 MPa で、AgGaSe<sub>2</sub> バルク結晶を育成させた。

#### $Ag_2Se + Ga_2Se_3 \rightarrow AgGaSe_2$

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 Ag<sub>2</sub>Se と Ga<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>は今回の成長温度 400~700 ℃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触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。

作成した試料をX線回折によって格子定数と粒界サイズを、電子プローブマイクロ分析(EPMA) により組成を、サーモプローブ法より伝導型を測定し、評価を行った。



図1 粒子の焼結過程モデル

3. 結果と考察

図2に、25MPa、400~700 ℃で、ホットプレス法で作成した AgGaSe<sub>2</sub>バルク結晶を示す。表面 状態は、400、500 ℃では粗い状態だが 600、700 ℃の成長温度では滑らかな表面に変化した。400、 500℃で作成した試料はもろく壊れやすかった。さらに原料の Ga<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> と思われる粒が見られた。 600、700℃と高温になるにつれて、結晶性がよくなっていることがわかる。

図3にX線回折の実験結果を示す。AgGaSe<sub>2</sub>とGa<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>、Ag<sub>2</sub>Se の JCPDS データも示す。全ての試料は多結晶であった。400、500 ℃においては、原料のGa<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>の相が大きく出ているが、この相は成長温度の増加とともに減少している。同時にAgGaSe<sub>2</sub>の相は温度の増加とともに増加しており、700℃ではAgGaSe<sub>2</sub>単相が得られている。X線回折の結果を用いて格子定数と粒界サイズの計算を行った。格子定数は温度の増加にともなって JCPDS データに近づき、700 ℃ではほぼ JCPDS データと一致した。粒界サイズは成長温度に比例して大きくなり 700 ℃の時が最大で粒界サイズ 55 nm が得られた。

図4に EPMA の実験結果を示す。実線は化学量論的組成比である。400、500℃においては化学 量論的組成比と大きくずれているが、成長温度が増加するに伴って Ag、Ga、Se の化学量論的組 成比に近づいている。600℃以下では、Ag-poor、Ga-rich、Se-rich であった。X 線回折の結果に おいても、400~600 ℃において Ga<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>のピークが強く観察されているので、Ga、Se が過剰にな っていることがわかる。欠陥は Ag 空孔 (V<sub>Se</sub>)、格子間 Ga (Ga<sub>i</sub>)、格子間 Se (Se<sub>i</sub>)、Ag サイトの Ga (Ga<sub>Ag</sub>)、 Ag サイトの Se (Se<sub>Ag</sub>) などがある。700℃で作成した試料のみ Ag-rich、Ga-poor、Se-poor となっ ている。存在する欠陥として考えられるのは、格子間 Ag (Ag<sub>i</sub>)、Ga 空孔 (V<sub>Ga</sub>)、Se 空孔 (V<sub>Se</sub>)、Ga サイトの Ag (Ag<sub>Ga</sub>)、Se サイトの Ag (Ag<sub>Se</sub>) などがある。サーモプローブ分析により伝導型を測定し たところ、試料はすべて n 型伝導を示した。このことより、700℃で作成した試料の n 型伝導の 原因は、V<sub>Se</sub> や Ag<sub>i</sub> が考えられる。



図2 試料 (25MPa)



図3 XRDスペクトル

図4 EPMA測定結果

## 4. 結論

カルコパイライト型化合物半導体である AgGaSe<sub>2</sub>バルク結晶をホットプレス法により作成した。 成長条件は圧力 25MPa、成長温度 400~700 ℃、成長時間一時間である。X 線回折(XRD)により X 線回折法により構造特性と格子定数、粒界サイズを、電子プローブマイクロ分析(EPMA)により組 成比を、サーモプローブ分析により伝導型を、四探針法により抵抗率を測定した。成長温度 700℃ で AgGaSe<sub>2</sub>の単相が得られた。成長温度 700℃において、格子定数は JCPDS データにほぼ一致し、 組成比は化学量論的組成比に最も近い値を示した。作成した試料はすべて n 型の伝導型を示した。

### 5. 引用文献

- M. A. Contreras, K. Ramanathan, J. Abushama, F. Hasoon, D. L. Young, B. Egaas and R. Noufi, Prog. Photovol. Res. Appl. 13 (2005) 209.
- [2] H. Komaki, K. Yoshino, S. Seto, M. Yoneta, Y. Akaki, T. Ikari, J. Crystal Growth 236 (2002) 253.
- [3] K. Yoshino, H. Komaki, T. Kakeno, Y. Akaki, T. Ikari, J. Phys. and Chem. Sol. 64 (2003) 1839.

# モアレ干渉法による分岐切欠き周辺の変位場測定

豊橋技術科学大学 鈴木新一

1.研究の背景と目的

脆性税労が破壊する際には、数百 m/s から数千 m/s の高速で進展するき裂が発生する。この様な高速 進展き裂は、き裂速度が十分速い場合、進展の途中でき裂先端が 2 つに分岐することが知られている。 き裂先端の分岐は、高速進展き裂の特徴的な挙動のひとつであり、これまで多くの研究者によって理論 と実験の両面から研究されてきた。

動的破壊力学の最終目標のひとつは、高速進展き裂のき裂先端位置を時々刻々予測できるようになる ことである。この目標を達成するには、高速進展き裂が、何時、何処で、どの様な力学的条件化で分岐 するかを明らかにする必要がある。しかし、高速き裂分岐の力学的機構は未だ十分には解明されていな い。

最近、高速度ホログラフィ顕微鏡法が、高速進展き裂の分岐の研究に用いられるようになった。高速 度ホログラフィ顕微鏡法は、高い空間分解能を有しており、高速分岐き裂のき裂開口変位(*COD*)をき 裂に沿って測定することができる。測定の結果、分岐前のき裂のき裂開口変位は、き裂先端からの距離 rの1/2条に比例することが示された。これは、動的破壊力学の理論的研究結果と一致する。また、分 岐後のき裂においては、母き裂の開口変位が、き裂先端からの距離rの1/2条に比例することが示され た。しかし、分岐後のき裂において、母き裂の開口変位がどの様な条件化でrに比例するかは、明ら かになっていない。

この問題を解決するために本研究では、モアレ干渉法を用いて静止分岐切欠の開口変位を測定する。 また、切欠を有する試験片にモアレ干渉法を適用するときの問題点を明らかにする。

2. モアレ干渉法

変位場測定に用いた PMMA 試験片を図 1 に示す。試験片の大きさは 300×300mm であり、板厚は 3mm である。試験片中央には幅 0.3mm の切欠が設けてあり、その先端は、2 つに分岐している。分岐 角は 13.5 度である。この試験片両端に引張り加重を負荷する。

モアレ干渉法による母切欠の開口変位測定を行うために、試験片表面には空間周波数 f<sub>s</sub>=488 本/mmの反射型回折格子を母切欠と平行に貼り付ける。貼り付けの手順は、以下の通りである。

(1) 試験片表面に接着剤を塗布し、アルミニウム蒸着で製作した回折格子を試験片表面に転写する。

(2) 切欠内部に残存する接着剤と回折格子を除去する。

図2はモアレ干渉法の原理を示している。試験片表面の回折格子に平行光線A,Bを入射する。無負荷の場合、レーザー光線Aの-1次回折光Ad,Bの+1次回折光Bdは、いずれも試験片表面に対して垂直 に反射する。そのため、AdとBdによる干渉縞は発生しない。試験片に負荷を加えると回折格子が変形 し、空間周波数はfd+Afに変化する。それにより、回折光AdとBdは互いに平行ではなくなり、干渉縞 が発生する。発生した干渉縞から、y方向の変位uyを次式で求めることが出来る。

 $u_y = m/2f_s$ 

(1)

ここで、 m は干渉縞の縞次数である。

回折格子を試験片に貼り付けるときの手順(2)において、回折格子にはひずみが発生する。そのため、 無負荷時においても試験片表面に干渉縞が発生する。これは、モアレ干渉法による変位計測に混入する 誤差である。この問題を解決するために、本研究では負荷加重を変化させ、それによる干渉縞の縞次数 の変化を測定した。

#### 3. 測定結果

図 3(a), (b), (c), (d) に単一切欠と、分岐長さが 4.5mm, 6.0mm, 12.0mm の分岐切欠の干渉縞写真を 示す。干渉縞は y 方向の等変位線を現しており、その間隔は 1.02µm の変位に相当する。干渉縞は明瞭 であり、モアレ干渉法により切欠周辺の変位場を測定できることを示している。

図 3(e)は、(a), (b), (c), (d) の母切欠の開口変位測定の結果を示している。横軸は切欠先端からの距離 r, 縦軸は開口変位(COD)である。母切欠のCODが、ほぼ rに比例していることが分かる。このこ とは、分岐角が小さく、且つ、分岐き裂の長さが短い場合には、母切欠の開口変位がき裂先端からの距 離の 1/2 条に比例することを示している。

4 . 結論

(1) モアレ干渉法を用い、分岐切欠の開口変位を測定することが出来る。

- (2) 切欠の分岐角が小さく、分岐き裂の長さが短い場合には、母切欠の開口変位はき裂先端からの距離の 1/2 条に比例する。
- 5.成果の公表

日本実験力学会へ投稿準備中

6.研究組織

研究代表者	鈴木新一	豊橋技術科学大学 機構	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的	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的	所 基礎力学部門	破壊力学分野



Fig.1 Specimen and bifurcated notch.



Fig. 2 Principle of moiré interferometry.



Fig. 3 Moare interference fringes around bifurcated notes and COD measurement result.

# 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.はじめに

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

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

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

今回,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.講演プログラム

セッション1	司会	東藤	貢(九州大学応用力学研究所)
(1) 10:	30 - 1	0:40	「人工関節の現状と課題」
			佛淵孝夫(佐賀大学医学部)
(2) 10:	40 - 1	1:00	「人工股関節による機能回復」
			馬渡正明(佐賀大学医学部)
(3) 11:	00-1	1:20	「各種TKAシステムの大腿骨コンポーネントの形状の比較」
			長嶺隆二(片井整形外科病院)
(4) 11:	20-1	1:40	「次世代型ロボット人工関節の研究」
			木口量夫,佐々木誠(佐賀大学理工学部)
(5) 11:	40 - 1	2:00	「人工関節の FEM 解析」
			萩原世也(佐賀大学理工学部)

12:00-13:20 昼食休憩

セッション	2	司会	;使	淵孝夫	(佐賀大学医学部)
特別講演	<b>i</b> 1	3:2	0 -	14:00	「下肢アライメント3次元評価システムと人工関節手術への応用」
					古賀良生(新潟こばり病院整形外科)
(6) 1	4:	00-	14	:30	「人体運動機能の計測とモデル化」
					持丸正明(産業技術総合研究所)

 (7) 14:30-15:00
「Fluoroscope を用いた人工膝関節3次元動態解析法」 山崎隆治,富田哲也,渡邊哲,菅本一臣,佐藤嘉伸 吉川秀樹,田村進一(大阪大学大学院医学系研究科)

15:00-15:20 休憩(20分)

セッション3 司会 萩原世也(佐賀大学理工学部)

(8)	15:20 - 15:35	「人工膝関節の開発の概要」
		高野恭寿(日本メディカルマテリアル(株))
		馬渡正明,佛淵孝夫(佐賀大学医学部)
(9)	15:35 - 16:05	「荷重 - 変位制御装置による膝関節運動の 3 次元的評価」
		郷津勝久,鈴木雅人,末益博志(上智大学理工学部機械工学科)
		須田康文,松本秀男(慶応義塾大学医学部)
(10)	16:05 - 16:25	「画像相関法を用いた大腿骨/骨セメント/人工股関節界面の
		微視的変形挙動解析」
		森田康之,東藤 貢,新川和夫(九州大学応用力学研究所)
		馬渡正明,佛淵孝夫(佐賀大学医学部)
(11)	16:25 - 16:45	「動的有限要素法による人工膝関節の応力解析」
		東藤 貢(九州大学応用力学研究所)
		長嶺隆二(片井整形外科)

17:30 懇親会(西新)

#### 3.講演の概要

(1)「人工関節の現状と課題」佛淵孝夫

我が国における人工関節置換術の現状と問題点について,日本を代表する整形外科医であ る講演者より説明があった.

(2)「人工股関節による機能回復」馬渡正明

人工股関節置換術(THA)の手術ビデオと,患者の術前,術後の歩行状態を供覧し,THA による股関節機能回復の実際が提示された.

(3)「各種 TKA システムの大腿骨コンポーネントの形状の比較」長嶺隆二

数種類の実際の大腿骨コンポーネントを使用し,そのシステムの通常の TKA の手技にて 各コンポーネントを正常膝と同じ形状を持つ sawbone に挿入,その状態で各コンポーネント の形状の比較を行った結果について報告があった.

(4)「次世代型ロボット人工関節の研究」木口量夫

ロボット人工関節の基本的な概念と,その実現に必要な体内埋め込み型の小型アクチュエ ータの開発について報告があった.

(5)「人工関節の FEM 解析」萩原世也

CT 画像データから骨の有限要素モデルを作成し,人工関節は CAD データから有限要素モデルを作成し,有限要素解析を行った結果について報告があった.

特別講演「下肢アライメント3次元評価システムと人工関節手術への応用」古賀良生

術前の荷重状態で大腿骨と脛骨の位置関係を3次元的に把握し,インプラントの設置を3 次元的に計画し,これを手術野において再現することが人工関節のナビゲーションと考え, 術前計画・術中支援法に加え術後設置位置評価等をおこなうために開発した一連のソフトウ ェアならびに器材について説明があった.

(6)「人体運動機能の計測とモデル化」持丸正明

関節中心を正確に決定する運動計測技術,運動を比較し統計処理する技術,さらに筋骨格構造と運動機能の関係をモデル化する技術の最新動向について紹介があった.

(7) 「Fluoroscope を用いた人工膝関節の3次元動態解析法」山崎隆治

X線透視装置より得られる時系列 X線画像を用いて,人工膝関節の位置・姿勢推定及び3次元動態解析法について説明があった.

(8)「人工膝関節の開発の現状」高野恭寿

人工膝関節のデザイン,評価法,問題点,深屈曲,および新型膝関節モデルについて説明 があった.

(9)「荷重-変位制御装置による膝関節運動の三次元的評価」郷津勝久

独自の荷重 - 変位制御装置の開発により,ヒト屍体標本膝関節の三次元的運動を測定し, 非接触三次元デジタイザにより同一試験体の幾何学的情報の測定を行った.同一個体に関し て生体力学的研究を行う基礎データを取得した結果について報告があった.

(10)「デジタル画像相関法を用いた大腿骨/骨セメント/人工股関節界面の微視的変形挙動 解析」森田康之

人工股関節のステム領域/骨セメント/大腿骨の界面周辺の微視的変形挙動を可視化することを目的とし,デジタル画像相関法を応用した結果について報告があった.

(11)「動的有限要素法による人工膝関節の応力解析」東藤 貢

実際に使用されている人工膝関節の CAD データを用いて詳細な3次元有限要素モデルを 構築し,実使用環境化における人工膝関節の動作状態として重要と考えられる接触,回旋, 屈曲を考慮した解析を行い,特に脛骨インサートの応力状態について考察した結果について 報告があった.

各講演の詳細は研究集会資料集「人工関節とバイオメカニクス」を参考にして頂きたい.

#### 4.あとがき

本研究集会は,応用力学研究所共同研究集会としては初めての医学と工学の両分野にまた がる学際的研究集会である.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12件の講演 があった.参加者も講演者を含め大学,公的研究機関,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.本研究集会が異分野の研究者間の交流を 通して,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.

## 5.参加者

講演者	所属・職名
佛淵孝夫	佐賀大学医学部整形外科·教授
馬渡正明	佐賀大学医学部整形外科·助教授
長嶺隆二	片井整形外科病院·院長
木口量夫	理工学部機械システム工学科・教授
萩原世也	理工学部機械システム工学科・助教授
古賀良生	新潟こばり病院・副院長
持丸正明	産業技術総合研究所デジタルヒューマン研究センター・副センター長
山崎隆治	大阪大学大学院医学系研究科·研究員
高野恭寿	日本メディカルマテリアル(株)本社開発部・係責任者
郷津勝久	上智大学理工学部機械工学科·助手
森田康之	九州大学応用力学研究所·助手
東藤 貢	九州大学応用力学研究所、助教授

参加者

伊藤純	佐賀大学医学部
亄畑素樹	佐賀大学医学部

西田圭介	佐賀大学医学部
宮崎真樹	佐賀大学医学部
井手衆哉	佐賀大学医学部
長嶺里美	佐賀大学医学部
古川晃郁	佐賀大学医学部
中村隆弘	佐賀大学医学部
小河賢司	佐賀大学医学部
肥後たかみ	佐賀大学医学部
北島 将	佐賀大学医学部
植木里紀	佐賀大学医学部
張波	佐賀大学理工学部
佐々木誠	佐賀大学理工学部
矢田光徳	佐賀大学理工学部
松本 健	佐賀大学大学院
佐藤 浩二	佐賀大学
小木健一郎	佐賀大学
村上輝夫	九州大学大学院工学研究院
新川和夫	九州大学応用力学研究所
藤野 茂	九州大学大学院総合理工学研究院
細田奈津子	九州大学大学院
田中麻美	九州大学大学院
高永祐樹	九州大学大学院
幸重良平	九州大学大学院
山口勝太	九州大学大学院
徳永政一郎	九州大学大学院
前原克彦	日本メディカルマテリアルズ(株)
石田典之	日本メディカルマテリアルズ(株)
堀武	日本メディカルマテリアルズ(株)
小坂智己	日本メディカルマテリアルズ(株)
久保泰之	九州風雲堂販売(株)
横山良治	九州風雲堂販売(株)

## (研究集会) 非線形波動および非線形力学系の現象と数理

研究代表者 九州大学大学院数理学研究院 梶原 健司

#### 研究集会の目的

非線形波動は非線形物理学を生み出した母体の一つであり,さまざまなスケールの物理現象において 重要な鍵を担うものである.また,非線形波動やそれを生み出す非線形力学系は狭い意味の物理系だけ でなく,最近では化学反応系,交通流,ネットワークフロー,生態系など広い意味での物理系において存 在が確認され,さまざまな解析がなされている.さらに,ソリトン・カオスなどの基本現象の背後には 豊富かつ多様な数理構造が存在し,そのような構造は幾何学や整数論などの純粋数学から数理工学まで 広い範囲にわたって見られることが明らかになっている.このように,非線形波動と非線形力学系の物 理と数理は,実験的研究から数理的研究まで,さまざまなレベルで密接に相互作用をしながら発展して いる.本研究会では,非線形波動と非線形力学系をキーワードとして,工学から数学まで,また現象論 から数理的研究まで,幅広く研究発表を募り,各分野の専門家による多角的・横断的な議論を行う.この ような研究発表・議論による相互作用の中から,広い意味での非線形波動および非線形力学系理論の将 来につながる新しい知見を得ることを第一の目的とする.また,応用面も重視し,非線形波動系および 非線形力学系の新しい社会的需要を掘り起こすことも目論む.さらに,大学院生の参加・発表を奨励し, 次世代の研究者を育成する機会を提供したい.応用力学研究所は流体における非線形現象研究の中心の ーつであり,非線形波動およびソリトンの研究が基礎力学部門の重点的研究対象になっている.従って, 本研究会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41件(内ポスターセッション19件)の計45件の講 演が行われた.本研究集会では2日目にポスターセッションを設けた.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.ポスター セッションを設けた分,口頭発表は特別講演1時間,一般講演30分を確保できた.特別講演は物理・工 学系2件,数学系2件が企画され,前者ではパターン形成および格子上の非線形局在構造の実験に関す る講演が行われた.また後者では非線形波動や力学系の解析で本質的な役割を果たす超幾何函数の理論 と,研究のツールである数式処理の理論と実装に関する最新の話題が提供され,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.大ざっぱに分類すると(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90人近くにのぼり,連日分野を越えて活発な討論と情報交換が行われた.特 に大学院生や学部生の参加と発表が代表者の予想以上に多かったことを注意しておきたい.非線形波動 と非線形力学系の中に新しい物理と数理的構造を見いだし,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.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9日(水)

11:00~11:30 同心回転する渦糸対とその崩壊

佐藤 壮太,干場 英輝,渡辺 慎介(横浜国大・工)

回転する一対の吸い込み口を底面に持つ円筒水槽の中に,安定に回転する渦糸対を励起する.次に吸い込みを続けた場合と吸い込みを途中で止めた場合に,この渦糸対が崩壊する過程を観察した.この観察により,崩壊の過程に違いが見られたので,この分類を行った.

11:30~12:00 強制ダフィン系の過渡カオスを非線形遅延フィードバック法で解消する試み 小柳 慎一郎,河辺 哲次(九州大・芸術工)

力学系の不安定周期軌道を安定化させる遅延フィードバック法における制御外力に対して,非線形部 分を導入する.ただし,この非線形部分は制御目標軌道の安定性に影響を与えないように導入する.こ の非線形部分の役割を数値計算によって調べる.

13:00~14:00 非線形格子中の局在励起の実験的研究(特別講演)

佐藤 政行(金沢大・自然科学)

1980年代の終わりごろに Sievers-Takeno により提唱された非線形格子中の局在励起(Intrinsic Localized Mode, ILM)に関する実験は、1990年代の終わりごろから、固体物質などの自然格子、あるい はジョセフソン接合格子やマイクロエレクトロメカニカル(MEMS)格子、フォトニック格子などの人 工格子についてなされてきた.私が所属していた Sievers 研でも、反強磁性体と MEMS 格子についての 実験が行われた.

反強磁性体中の局在モードは実空間では直接観測できず,分光的手段が用いられた.MEMS 格子で は直接カメラ観測可能で,実験の速度もシミュレーションより速い.しかしながら,試料の均一性の問 題がある.ミュレーションでは均一性の問題はないが,モデルの正当性の吟味が必要である.それぞれ 一長一短があるが,これらのアプローチが相補的に機能していた.

ここでは, MEMS 格子での研究を中心に ILM の生成, 観測, 格子ピニングなどの基本的な ILM の性質から, 不純物モードとの相互作用を利用したレーザーマニピュレーションまで述べる.

14:15~14:45 生体高分子は何故ヘリカルな構造をしているだろうか

武野 正三(長崎総合科学大)

DNA や蛋白高分子はヘリカルな構造をしていることは周知の通りである.1本のヘリカル高分子の モデル方程式は

$$\ddot{\theta}(\vec{n}) = \sum_{\vec{m}(\neq\vec{n})} \{ L_1(\vec{n},\vec{m}) \frac{\lambda}{1+\lambda} \sin[\theta(\vec{m}) - \theta(\vec{n})] + L_3(\vec{n},\vec{m}) \frac{1}{1+\lambda} [\theta(\vec{m}) - \theta(\vec{n})] \}$$

の形をしている.このヘリカル格子は外部環境からの影響に対して robust な非線形局在モード,キンク型非線形モードを固有の非線形モードとして持っている.これらの非線形モードは生体の重要な機能である energy storage や long-range transduction に対応すると考えることが出来るかも知れない.

14:45~15:15 可積分方程式に関連した確率微分方程式の解

矢嶋 徹(宇都宮大・工), 宇治野 秀晃(群馬高専)

可積分方程式のうちのいくつかを取り上げ,それらをコルモゴロフの方程式として解釈することにより,確率過程を構成する.このような確率過程の振る舞いを解析するとともに,応用の可能性についても議論したい.

15:15~15:45 **2 ソリトンの有効相互作用** 

角畠浩,稲葉徹(富山大・工),紺野公明(日本大・理工)

2 ソリトン衝突の場合に各々のソリトンを1 個の粒子のように考えて,2 個のソリトン間に働く有効 相互作用を求めることを試みる.

16:00~16:30 **DKP** 方程式のソリトン解の数理構造

丸野健一(九州大・数理学), 児玉裕治(Ohio State Univ.)

Jimbo-Miwa, Hirota-Ohta による DKP 方程式 (Coupled KP 方程式)の解はパフィアンでかけるこ とが知られているが,パフィアンとそれによって生成されるソリトンの対応関係はこれまできちんと理 解されていなかった.我々は,パフィアン解にパラメータを含ませ,そのパラメータのとり方によって 描かれるソリトンのパターンを分類し,DKP 方程式で起こりうる複雑なソリトン相互作用を数学的に 解析することに成功したので,その詳細を報告する.

16:30~17:00 浅水波のモデル方程式の短波長極限

松野 好雅(山口大・工)

浅水波のモデル方程式である Camassa-Holm(CH) 方程式と Degasperis-Procesi(DP) 方程式の短波長 極限方程式を特異摂動法により導出し,それらの解の性質について議論する.CH,及び DP 方程式のい ずれもソリトン解を有するが,前者,及び後者の短波長極限方程式はカスプソリトン解,及びループソ リトン解を各々有することを示す.

17:00~17:30 Ernst 方程式再訪

増田 哲(神戸大・自然科学)

定常軸対称重力場を記述する Ernst 方程式は,可積分系理論の観点からもたいへん興味深い対象である.本講演では,広田の双線形化法」の枠組で,Ernst 方程式についてどのような問題が残されている

かの概略を述べるとともに,反自己双対 Yang-Mills 方程式との関係を特殊解に関して論じる.

11月10日(木)

9:30~10:00 確率共鳴による微弱信号検出とその応用

石渡 信吾,小泉 一弥(横浜国大・工)

確率共鳴によれば,閾値応答素子の並列化によって,それらの応答の集合平均として,ノイズに埋も れた微弱信号波形を再現できる.まず,電気回路による予備実験でこれを示した.次いで温度計測にお いて実証するため,16chの熱電対温度測定系を構成し,微弱な温度変化の測定を試みた.各chの応答 特性を揃えることによって,確率共鳴による集合平均の効果を確認することができた.

10:00~11:00 真正粘菌変形体の時空パターン形成 — 振動と流動から細胞行動へ — (特別講演) 山田裕康(理研,名古屋大・理)

真正粘菌変形体は多核単細胞生物である.変形体は神経系のような構造も,脳のような統合器官も持っていないが,個体として統制がとれた細胞行動を発現する.その行動は時として「知的」にも見えるほどである.このような変形体のふるまいは,代謝に基づく収縮弛緩振動と,振動によって引き起こされる原形質流動,そして,原形質流路ネットワークの生成消滅によるものと考えられている.この考えの下で提案された数理モデルを大きく三つに分類し,各々のモデルの特色を紹介する.また,数理モデルによる細胞行動の解析について,その方向性を議論する.

11:15~11:45 交通流モデルにおける update rule 依存性

金井政宏(東京大・数理科学),西成活裕(東京大・工),時弘哲治(東京大・数理科学)

交通流モデルのアップデート依存性は、その重要性にも拘らず、ほとんど議論されていない、そこで、 本研究では代表的な方法であるランダムとパラレルを繋ぐアップデートを考案する、それによって交通 流モデルにおけるアップデートの役割を検証し、ランダムなアップデートからパラレルなアップデート に移行する際に流量の変化を見た、特に、我々が提案した確率最適速度モデルにおいては、連続であっ た基本図(密度-流量図)に、アップデート・ルールを変化させることにより不連続点が生じる様子を 捉えることが出来た、これによって、今後の詳細な解析が期待される、

11:45~12:15 q = 0 でのベーテ仮説と周期的箱玉系

国場 敦夫,竹野内 晃(東京大・総合文化)

q = 0 でのベーテ固有値(転送行列の固有値)を計算することにより,周期的箱玉系のある特殊な状態に対して,周期を与える明示公式を提唱する.また周期的箱玉系において,ある保存量を持つ状態の数をカウントする公式についても述べる.

13:30~14:30 数式処理システム Risa/Asir の知られざる機能について(特別講演) 野呂 正行(神戸大・理)

Risa/Asir は、(株) 富士通研究所で開発、公開され、その後神戸大学に所属するメンバーを中心する OpenXM committers により開発が継続中であり、ソースコードも公開されている、フリーな数式処理シ ステムである.

Risa/Asir として公開がスタートしてから 11 年, その前身である未公開システムから数えると 16 年 が経過した. 当初より, Risa/Asir は, 開発チームが興味をもつアルゴリズムを実装するプラットフォー ムとしての役割を果してきた. 結果として, 多項式演算 (基本演算, GCD, 因数分解), グレブナー基底計 算, イデアルの諸演算, 分散計算などに関しては, 特に, 高速性という点からみて, ある程度評価に耐える ものとなったと考えているが, いわゆるユーザインタフェースに関しては全く不満足 (ユーザにとって も, 開発側にとっても) なままである. ここで, ユーザインタフェースといっても, GUI という点では, 所 詮ユーザの好みによる部分が大きいので, 例えば Mathematica の notebook のようなものを作ろうとい うつもりはない. しかし, どのような数式を受け付け, どのような処理ができるか, という点に関しては, Mathematica, Maple などに学ぶべき点は多い. そこで, 本講演では, 次の 2 点について, ユーザの立場 にたった解説を行いたい.

1. 効率的計算のための種々のテクニック

2. 多項式に限らない、さまざまな数式の扱い方

前者に関しては、おもにグレブナー基底計算に関して、ユーザによる設定がいかに効率を左右するか、また有限体上での計算(ショートカット)がいかに有効に働くかについて解説する.得られた解が、全ての 解を尽くしていることを保証することが困難な算法でも、とにかく解を求めたいという要求にマッチする算法はいろいろあり、その幾つかを紹介したい.

後者に関しては、現在実装が進んでいる、パターンマッチング、項書き換え機能について解説する. 実 は、私は、可積分系の研究において重要なのは前者であると勝手に思い込んでいた. しかし、その思い込 みに原因となったある研究者に聞いた所、そのような計算をしているのは自分だけで、大多数の人は、合 成関数の微分をさせたり、変数の置き換えをしたり、サイズは小さいが複雑な成分をもつ行列式を計算し たりという使い方をしている、だから Risa/Asir のユーザが増えないのだ、ということであった. それな らば、この際、そういう機能を実装してしまおう、となった次第である. というわけで、現時点ではごく初歩的な機能しか実現できていない. 講演時までに、より高度な機能を取り揃えておく予定であり、それが タイトルの意味するところである.

14:45~15:15 2次元超離散戸田方程式の局在解の衝突

広田 良吾(早稲田大・名誉教授)

2次元超離散戸田方程式には局在解が存在するが,この局在解の 7 関数を求め,それによって局在解の の衝突を記述する厳密解を求めた.

15:15~15:45 リーマンテータ関数の超離散化とその可積分系への応用

野邊 厚 (大阪大・基礎工)

リーマンテータ関数を超離散化し,各変数について周期性をもつ区分線 形関数を導出する.この超離 散リーマンテータ関数はある恒等式(リー マンのテータ公式の超離散類似)を満たすことを示し,その 特殊化として加法公式を導く.さらに,この加法公式を用いて戸田型セルオートマ トンの周期波解を 構成する.

15:45~16:15 周期箱玉系の基本周期と可解格子模型

間田 潤(東京大・数理科学),時弘 哲治(東京大・数理科学),泉 誠(島根大・教育)

本研究では,周期箱玉系と可解格子模型との対応関係から周期箱玉系の基本周期を導出した.具体的には,周期箱玉系の基本周期が可解格子模型の絶対零度極限での転送行列の固有値から求まることを示し,Bethe 仮説方程式の String 型の解の主係数による絶対零度極限での固有値の具体的な表式を求めた. さらに,周期箱玉系の保存量と Bethe 仮説方程式の String 型の解に関する Conjecture を得た.

16:30~18:00 ポスターセッション

(1)開放境界条件における二種粒子ASEPの相転移

有田 親史 (東京大・理)

様々な条件下で二種粒子の非対称単純排他過程(ASEP)の厳密解が行列積の形で構成できることが知られていたが,ある種の開放境界条件の下で物理量(流れと密度)を計算すると,熱力学極限で境界のパラメータによる相転移が確認できた.

(2) 一次元弾性体の非線形ダイナミクス

塚原 由久,和田 亮太,西成 活裕(東京大・工)

1次元弾性体の非線形運動をソリトン理論を用いてこれまで解析してきたが,この結果を宇宙工学での重要な技術であるデザーに応用し,その非線形ダイナミクスを調べた.特に,テザーの長さが変化する場合や,テザーに電流が流れた場合の挙動などについてのシミュレーション結果を発表する.

(3)回転液滴のダイナミクスと固有振動

榎 祐作 , 西成 活裕 (東京大・工)

浮遊液滴の運動は宇宙環境利用技術において重要な役割を果たしている.今回はその液滴が回転して いる際の扁平度を理論的に計算し,数値計算などの結果と比較した.また液滴の自由振動の回転補正に ついて摂動論を用いて議論した.

(4)群集の集団運動と拡張フロアフィールドモデル

柳澤 大地 , 西成 活裕(東京大・工)

人の集団運動を表すセルオートマトンモデルとして,これまでフロアフィールドモデルを研究してきた.人の集団運動の1つである避難のフロアフィールドモデルは,人が出口に向かおうとする性質をモデル化する「静的フロアフィールド」と,パニック時,人が他人の後を追従する性質をモデル化する「動的フロアフィールド」と,同じように他人を追従する性質をモデル化する「視野モデル」を比較することにより,前者は人の動きを決定的にし人が列を成すようになるのに対し,後者は人が分散して動くようになるという結果が得られた.これらの内容を中心に発表した.

(5)分子モーターの集団運動と衝撃波の解析

金山 侑子 , 西成 活裕 ( 東京大・工 )

分子モーターの新しいCAモデルについて,その衝撃波の形成の様子を理論および数値計算によって 詳細に調べた.数値計算でATP濃度やモータ分子の濃度を変えたときの衝撃波の様子を確認し,その 厚みは有限の値になることが分かった.また,これの結果を利用して衝撃波の位置の見積もりに関して の理論を発表する.

(6) Benney 方程式の定常進行波解の分岐特性

伊藤 裕子 , 加藤 由紀 , 藤村 薫 (鳥取大・工)

周期境界条件の下で Benney 方程式の解を数値的に調べた.時空間発展問題と定常問題を解くことに よって非常に数多くの定常進行波解を得た.得られた解を数種類のパターンに分類し,それぞれ分岐特 性を調べた.その結果,いくつかの解のつながりがわかった.

(7) Sine-Gordon 方程式の Benjamin-Feir 型不安定性と Lamé 方程式の帯構造 II 大宮 眞弓, 大倉 裕史, 岡植 大輔(同志社大・工)

Sine-Gordon 方程式に対する Benjamin-Feir 型不安定性を昨年に続き報告した.まず,同期波解のモジュラスが1より大きい場合には,Lam'e 方程式のスペクトルの帯構造を考察し,不安定帯の実軸に含まれる部分が Benjamin-Feir 不安定域に一致する事を示した.また,モジュラスが1の場合には,無反射型 Schrödinger 作用素のスペクトルの構造と関連して考察し,実軸に含まれるレゾルベント集合を1 だけずらしたものが Benjamin-Feir 不安定域になることを示した.

(8) q - 離散 Nahm 方程式の可積分性

中村 厚 (北里大・理)

Nahm 方程式の解と自己双対ゲージ配位が対応することは,インスタントン解構成法であるいわゆる ADHM 構成法により保障されている.今回は ADHM 構成法に忠実に基づき,自己双対性を保ったま ま Nahm 方程式の乗法的 (q-) 離散化を行ない,その可積分性を検証する.

(9) Lie Symmetry を用いたくりこみの方法

巌佐 正智, 野崎 一洋(名古屋大・理)

特異摂動法としてのくりこみ群の方法と,微分方程式のもつ対称性 (Lie symmetry) を重視した近似 解の構成方法,これら二つの関係を探る研究を行っている.本発表では,非線型常微分方程式を取り上 げ,この関係について具体的に説明する.

(10)多面体オイラー公式のマックスプラス代数への応用

岩尾 昌央 (東京大・数理科学)

区分線形系の解析に用いられるマックスプラス代数における N 変数「多項式」を, N 次元多面体と 対応させ、多面体のオイラー公式をマックスプラス代数に輸入する.さまざまな場面で劇的な効力を発 揮する.

(11)ウェーブレット級数展開に基づく数値シミュレーション

山口 貴史,近藤 弘一(同志社大・工)

ウェーブレット級数展開に基づく数値解析を行なう.いくつかの種類のスキームの比較検討を行なう. (12)非線形格子ハミルトン系における最大リアプノフ数とマクロ変数の周期軌道1本による予言: 周期軌道依存性

後藤 振一郎 (京都大・情報)

ハミルトン系に限らず、カオス的力学系を特徴付ける量としてリアプノフ数が挙げられる.今回は特に 不安定周期軌道1本の線形安定性解析からリアプノフ数が求まるという予想に着目する.これまでの研 究においては、その予想法に対する不安定周期軌道の選び方に対しての議論は殆んどなされていなかっ た.今回はその不安的周期軌道を用いる方法が不安定周期軌道に依存し、予想するリアプノフ数が大きく 変わる事を、ある非線形格子ハミルトン系に対して示す.また、不安定周期軌道を用いてマクロ変数の期 待値を予想できる可能性についても述べる.

(13) Extended KP 方程式の孤立波解の斜め相互作用

辻 英一,及川 正行(九州大・応力研)

ある二層流体中の界面の挙動を表わす Extended KP(EKP) 方程式の孤立波解の二次元的相互作用について調べた. 拡張前の KP 方程式においては,共鳴相互作用などの特徴的な二次元相互作用を表すソリトン解が存在する.また,EKP 方程式の一次元孤立波解では振幅としてとり得る最大値が解析的に求まる. 進行方向の違う二つの一次元孤立波解の相互作用を数値的に調べ,以下の事を明らかにした.

1.拡張された非線形項の効果により,共鳴相互作用による波動の増大は全体的に抑えられる.
2.しかし一次元孤立波解の最大値と比較すると,その最大値を超える振幅を持つ二次元定常進行波が非線形項の係数によっては存在する.

(14) 複素変数の max-plus 変換と偏微分方程式への応用

中島 圭輔 , 浅野 功義 , 矢嶋 徹 (宇都宮大・工)

max-plus 変換は微分方程式を超離散化する手法の1つである.本講演では,max-plus 変換を複素数 上で考え,複素変数のmax 演算を複素変数の線形結合のmax-plus 変換として定義した.複素変数の max-plus 変換が定義されることにより,任意に与えられた微分方程式を超離散化することができる.こ の変換を応用し,超離散方程式の解を求めたので,報告する.

(15) ある2次元セルオートマトンについて

清田 寛之 , 高橋 大輔 ( 早稲田大・理工 )

通常の正方格子上ではなく六角格子上で独自のセルオートマトンルールを採用して得られた実験結果のパターンについて自己複製等,他分野との関連を含め考察する予定です.

(16) Laurent 双直交多項式の持つ組合せ論的側面について

上岡 修平 (京都大・情報)

Laurent 双直交多項式の満たす双直交性に対して、平面路である重み付き Schröder 路を用いた組合せ 論的解釈を与える. その結果、双直交関係にあらわれる量が、ある条件を満たす Schröder 路の重みの総 和となっていることをみる.

(17)アファイン球面の超離散化(へ向けて)

松浦 望(福岡大・理)

アファイン球面はツィツェイカ方程式によって記述されるが,その差分化は1994年にボベンコとシーフによって与えられた.本講演ではアファイン球面の超離散化(の試み)について報告する.

(18) 非自励戸田系のカソラチ行列式解

向平敦史,梶原健司(九州大・数理学)

離散戸田方程式の非自励な拡張である不等間隔離散戸田方程式, R<sub>I</sub> chain などのソリトン解について 議論する.

(19) Generating functions associated with the Hankel determinant formula for solutions of the Toda equation

Nalini Joshi (Univ. of Sydney, Australia), 梶原 健司(九州大・数理学), Marta Mazzocco (Univ. of Manchester, UK)

いくつかのパンルヴェ方程式の有理解に対する Hankel 行列式公式に対して要素の母函数が構成され, それが超幾何型特殊函数の対数微分で表わされることが報告されている.その背後の構造を調べるため に generic な解に対する Hankel 行列式表示を調べたところ,母函数は補助線形問題の解の比であること が示された.さらに考察を加えたところ,この構造は一般的な Toda 方程式に起因することがわかった.

11月11日(金)

9:30 ~ 10:00 変形された G2 型ルート系と Baker-Akhiezer 関数

槙 俊秋(同志社大・工)

多次元のシュレーディンガー方程式の解である Baker-Akhiezer 関数(BA 関数)の存在と,それを特徴付ける有限ベクトル集合が成す超平面の configuration(配位)は, locus configurations として知られ,ある制限において古典的な configurations である root 系が現れる事が分かっている.また,それをある極限で含む形で,より一般的な状況において,root 系となる様な configurations も見出されている. これは non-root 系, deformed root 系と呼ばれている.

本論文では, BA 関数の決定に際し, non-root な configurations の有無を,特別な場合で調べ検討し, その結果,古典的に知られている G2 型ルート系の変形である deformed  $G_2$ -type root 系の存在が確か められ,その具体的ベクトル表現を書き下した.同時に, locus configurations がどの様な場合に, root 系を含むのかという処でその特徴的な依存性を調べ,その context で root 系と non-root 系, deformed root 系の関係を調べた.

10:00~10:30 非スペクトル Darboux 変換の退化条件と楕円関数のある種の変換公式 大宮 眞弓(同志社大・工)

従来得られていたスペクトル型 Darboux 変換に対する退化条件を応用して,非スペクトル Darboux 変換の退化条件を具体的に求めた.それを3次 Lamé 方程式について適用する事により,等非調和型楕 円関数の興味深い変換公式が得られた.また,くり返し Darboux 変換によって KdV 方程式の楕円関数 解を構成して,その時間極限の特異点を考察する事により,楕円関数の加法公式が得られた.

10:45~11:15 **Calogero–Moser** 模型の超可積分な時間離散化

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

Calogero 模型に対する時間離散化の手法を利用して, Calogero-Moser 模型の超可積分性を保つ時間 離散化の手法与える.また Nijhoff らによって与えられた Calogero-Moser 模型の可積分性を保つ時間離 散化の手法との比較を行う.

11:15~11:45 高次元可積分系の周期点の性質

斎藤 革子 (横浜国大・工),斎藤 暁

去年の応力研の研究会で周期可積分系の作る代数多様体の話しをした.今回は,その研究を更に発展 させて,更に多くの可積分系の周期点の性質を見てみたい.特に可積分系の周期点は,保存量を含むあ る関係式が存在すると周期多様体をつくり,そうでないと孤立点の集合となること,更に,周期点のつ くる不変多様体と孤立点の集合とは同時には存在しないことを証明する. 11:45~12:15 2 階可積分差分方程式から生成される3 階可積分差分方程式

松木平 淳太 (龍谷大・理工) 高橋 大輔 (早稲田大・理工)

3 階の可積分差分方程式のあるクラスが, 2 階の可積分差分方程式によって, 生成されていることを示す.

13:30~14:30 私は超幾何函数(特別講演)

吉田 正章 (九州大・数理学)

私は九州大学の吉田です.なのにどうして「私は超幾何関数」なのか.助詞「は」には色々の用法があ りますが,表題で使いましたのは,限定を表すものです.飲み屋で「皆さん麦酒でいいですね」といわれ た時「いや,私は焼酎だ」という風に使われるものです.この研究集会に集まられた皆さんは,Panlevé だとか可積分系だとかそれに離散が付いたやつとかそれに又超が付いたやつとか,賑やかで結構なこと とお喜び申し上げますが,30年前からずっと,私は超幾何関数です,そういう意味です.この集会は 「非線形波動云々」でありますが,私は線形です.じゃあ何故ここで講演をしているのか,私は知りませ ん、世話役さんに訊いて下さい、超幾何関数には色々な一般化があり、それぞれ勝手な名前をつけてい ますが,私のは元祖のそれです.そのような類を古典超越関数と言う人もいますが「古典」とは褒め言 葉で御座いますから私は自分のやっているものを「古超越関数」と言っています.本土では「隠れ切支 丹」と習った禁制前からの切支丹を御当地の五島列島では「古切支丹」と呼んでいます、そんな感じで す、今から見ると古いなんて物でなく、30年前から十分古かったのです。ではそんな物について調べ ることが未だあるのかとお思いでしょう.全部本に書いてあるのではないかと.あなたね,本には分っ ていることしか書いてないのですよ,当たり前ですが.分からないことだらけなので御座いますよ.流 行に乗ってどんどん最先端のことをおやりになる、おやりになれるのも御目出度いことですが、古数学 で遊ぶのもまた乙なもので御座います.現代とは言わず近代数学も一切使わず前々世紀の数学しか使い ません.

超幾何関数とは,超幾何方程式と言われる線形微分方程式

$$x(1-x)u'' + \{c - (a+b+1)x\}u' - abu = 0$$

の解のことです.今日は,超幾何関数の径数,より正確には指数

$$\lambda := 1 - c, \quad \mu := c - a - b, \quad \nu := a - b$$

が純虚数のときの黒写像を調べます.一般に超幾何方程式は

$$u'' + p(x)u = 0, \quad 4p(x) := \frac{1 - \lambda^2}{x^2} + \frac{1 - \mu^2}{(1 - x)^2} + \frac{1 + \nu^2 - \lambda^2 - \mu^2}{x(1 - x)}$$

に射影的に同値であり,指数が純虚数ならこの式の係数はすべて実数であること(百年以上前からよく 知られていた事実)を使います.

14:45~15:15 離散ベルヌーイ多項式と離散ソボレフ不等式の最良定数

永井 敦(日本大・生産工)

グリーン関数(再生核)理論の応用として,あるヒルベルト空間における離散ソボレフ不等式の最良 定数を厳密に計算する.また最良定数を与える関数が離散ベルヌーイ多項式を用いて表すことができる ことを示す.

15:15~15:45 なぞのウィロックス方程式に関する一注意

井ノ口 順一(宇都宮大・教育)ウィロックス氏は結合型 KP 階層の負時間発展を考察することで Tzitzeica 方程式をその特殊な場合とする 1+1 次元可積分方程式を導出した (2005). 本講演ではウィロックス氏の 発見した方程式の微分幾何学的意味について報告する.

15:45~16:15 3 次元空間形内の Kirchhoff 弾性棒

川久保 哲(福岡大・理)

Kirchhoff 弾性棒とはピアノ線のような 1 次元弾性体の数学的モデルの一つである.本講演では,3次元空間形  $R^3$ , $S^3$ , $H^3$ の中の Kirchhoff 弾性棒は,Jacobi の sn 関数及び楕円積分で explicit に表されることを示す.

開催の期間 平成17年11月9日 ~ 平成17年11月11日

参加者 89 名

研究代表者・辻 義之(名古屋大学大学院工学研究科)

## 1 研究集会の開催目的

日常見られる身の回りの多くの流れはもとより、プラズマ、大気・海洋の流れなど多様な現象が乱流というキーワー ドで統一的に括られる.しかし、乱流現象を理解するためには、純粋に数学的な机上の作業から、コンピュータ中の仮 想実験、実際の流体を扱う室内実験、野外観測など多様な方法論がある.いま、乱流研究の新たな展開には、異なる 分野の乱流現象を通訳するメディエーターの存在のみならず、異なる方法論を担う研究者が互いの議論を通して、新 たな概念を自らの方法論へフィードバックすることであろう.国際学会やワークショップを見る限り、欧米に比べて日 本の研究者には、このような機会が少ないのが現状と思われる.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の融合を通じて、各分野での乱流現象に新たな知見を見出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集会として開催するのが最適と考えられる.

# 2 講演内容の概要

#### 局所構造を含む宇宙プラズマ MHD 乱流: 起源と粒子輸送

## 成行泰裕,羽田亨

簡単な流体モデルを用いて,MHD 乱流における局所構造の起源について解析した結果を紹介する.特に,局所構造を波動間の位相相関で特徴付ける議論に重点を置く.同時に,局所構造の粒子輸送への寄与についての研究も紹介する.

## べき乗則変動を作る確率過程とその応用

#### 佐藤彰洋

定常確率密度関数がべき乗則のすそ野を持つような現象は分野を問わず,長距離相互作用やエネルギー散逸率のゆ らぎ,温度ゆらぎを有する系において確認されている.本講演では,このような現象をモデル化するために,乗算と 加算のふたつのノイズを有する確率過程を導入し,この型の確率過程からべき乗則の裾をもつ定常確率密度関数が実 現することを示す.更に,乗算と加算のふたつのノイズを持つ確率過程で表現される動学と,そのべき乗則のすそ野 を持つ定常確率密度関数に対する統計学と,情報理論との関係について考察を行なう.最後に,乗算と加算のふたつ のノイズを有する確率過程のいくつかの応用例を紹介する.

# くりこみ展開と異常スケーリング―速度勾配の4次モーメントのスケーリング― 上之和人,金田行雄

非圧縮乱流において,速度場の微分を含む(エネルギー散逸率)/v,エンストロフィー, $\Delta p/\rho$ のような量のスペクトルは,次元的には全く同じにもかかわらず慣性小領域で違うスケーリングをもつことが知られている.ラグランジュ的スペクトル理論の立場から,これらのスケーリングについて解析した結果を報告する.

## 射影演算子法の乱流に対する有効性

#### 岡村 誠

射影演算子法では,射影演算子によって,不規則な振る舞いをするカオス運動が組織的な運動とランダムな運動に うまいこと分解されることを前提としている.この前提が正しいかをKuramoto-Sivashinsky方程式をモデル方程式と して調べた.長波長モードの振る舞いに関してはこの前提がよく成り立ち,短波長モードに関してもそれほど悪くな いことがわかった.

さらに,平均量などの統計量を評価するときにはマルコフ近似がよく使われるので,これの妥当性も同様にKuramoto-Sivashinsky方程式を使って調べた.長波長モードの場合にはマルコフ近似がよく成立するが,短波長モードの場合に はマルコフ近似は適当でないことがわかった.

## 乱流境界層における圧力スペクトルのスケーリングについて

## 辻 義之

乱流中の圧力変動の計測について,一様等方にちかい噴流中心軸上,円柱後流の計測をおこない,DNSとの比較 をとおして測定制度の検証をおこなった.また,高レイノルズ数乱流境界層における圧力統計量についても報告した.

# ー様等方乱流にたいする非アファイン粘弾性効果

# 堀内 潔,寺岡 恒,高木洋平

高分子添加溶液等の粘弾性流体の DNS に現在主として用いられている構成方程式は,アファイン性を仮定した Oldroyd-B方程式である.本研究では,アファイン性の仮定の検証を一様等方乱流で行い,非アファイン性が最も強い 場合に最大の抵抗削減が得られることを示し,乱流構造形成過程にたいする粘弾性効果を明らかにした.

### 4次元乱流

## 中野 徹,後藤俊幸

物理では次元を変えることにより,注目する物理現象の理解が進むことが多い.乱流の次元を大きくすると,乱流 はシンプルになるかどうかを調べるために,4次元乱流のシミュレーションを行った.同時に,それらの結果を理論的 に説明するために4次元乱流の統計理論を考えた.シミュレーションから得られた結論をまとめると,次の通りであ る(1)4次元乱流でのエネルギー伝達率は3次元に比べて大きい(2)コルモゴロフ定数は4次元の方が小さい. (3)縦速度微分の skewness は4次元の方が大きい(4)4次元乱流の間欠性の程度は,考える物理量により3次元 より強いものもあるし,弱いものもある.散逸率の間欠性は4次元の方が弱いのに対して,縦速度差に関する間欠性 は4次元の方が強い.

## 壁乱流組織構造の生成過程

### 浅井雅人

壁乱流構造の生成・維持に重要な役割を果たす低速ストリークの発生・発達と、その不安定性により縦渦列が生ま れる過程を2つの基礎実験を通して紹介する.一つは、乱流境界層に壁面吸込みを行なったとき、吸込み領域下流の 準層流境界層において残留乱流変動により壁近傍にストリーク構造が生成され、それが不安定性により崩壊する様子 を調べた実験である.もう一つは、周期的な人工低速ストリークを用いたストリーク不安定性の実験であり、これま でほとんど調べられていない分調波数モード(Subharmonic sinuous modes)に注目し、ストリーク不安定によりジグ ザグ上に重なり合った縦渦が生成される段階から壁乱流の特性が現れるまでを追跡している.

# 乱流の量子古典対応 坪田 誠

近年,低温の超流動ヘリウムが作る量子乱流と,古典乱流の対応に関心が持たれている.超流動ヘリウムは量子力 学なボース・アインシュタイン凝縮により実現する系であり,循環が量子化された量子渦によって,全ての回転流れ が担われるという特徴を持つ.このような量子渦を要素として作られる量子乱流(超流動乱流)は,古典乱流よりも 簡単な乱流の雛形を提供できると考えられている.ここでは,ボース凝縮の秩序変数である巨視的波動関数が従う Gross-Pitaevskii 方程式の数値解析を行うことにより,量子乱流のエネルギースペクトルがコルモゴロフ則を示し,古 典乱流との著しい対応があることを示す.

# 渦輪の運動速度とエネルギー・インパルスの関係

## 福本康秀

現実的な太った渦輪の運動との比較に耐えるような速度公式を導出するには、小さなパラータ「渦核半径/リング半 径」について3次まで導出すればよいことが経験的に知られている.Navier-Stokes 方程式を接合漸近展開法によって 解くのが直接的であるが、非線形項の扱いが煩雑で、計算量が膨大である.Lambの方法においては、これを2通り の方法で計算し、片方にNavier-Stokes 方程式を適用すことによって、計算量を大幅の大幅な軽減が図られる.2次の 速度場の大半と3次の速度場を求める手続きなしで、3次まで有効な軸対称渦輪の進行速度を導くことができる.こ うして、非圧縮性流体中の高レイノルズ数渦輪の速度のSaffmanの公式の次の補正項を導出することに成功した.さ らなる手続きの簡略化が可能である.実は、一方のエネルギーの表式は容易に手に入る「体積一定」および「渦度の 分布形を変えない」という拘束条件のもとで、エネルギーのインパルスに関する変分をとるだけで、同じ3次精度の 進行速度公式が導けることを発見した.

# Burgers-Donaldson-Sullivanの軸対称流のクラス―定常解と非定常解の爆発問題― 大木谷 耕司

地球流体力学的に応用を持つ,軸対称 Navier-Stokes 方程式のある解のクラスについて考察する.定常解について の Donaldson-Sullivan らの結果を振り返り,非定常問題を考える.このクラスと反応拡散系の藤田方程式との解の挙 動を比較する.

## 等方乱流に埋もれた周期運動

### 木田重雄,河原源太,Lennaert van Veen

乱流中には,微小撹乱に対して不安定な周期運動が無数に存在する.それらの中には,乱流の特性を表すものとそうでないものとがある.ここでは,高対称性を課した定常な数値乱流における複数個の周期運動を紹介し,それらの中から乱流の特性を表す(乱流に埋もれた)周期運動を特定する方法について述べる.

# 決定論的拡散やカオス力学系としての有向グラフにおける不安定周期軌道の役割 宮崎修次

有向グラフの確率行列表現と区分線形一次元写像のフロベニウス・ペロン演算子の行列表現を対応させることで, 有向グラフの構造を力学系と関連付けることができることを示す.力学量の粗視量の大偏差統計を解明するというカ オス力学系の研究手法をグラフ理論に適用する試みを紹介する.簡単な有向ネットワークを例に取り,統計熱力学形 式により内在するループを個別に取り出したり,ノードから発する矢印の数の揺らぎを捉えることができることを示 す.また,ループ(不安定周期軌道)の周期と密接に関連した再帰時間分布やそれと二時間相関関数やパワースペク トルとの間の関係についても論じる.同様の手法を拡散現象に適用し,弾道的拡散速度の制御変数依存性に悪魔の階 段状の形状が現れることを示す.その平坦部は特定の不安定周期軌道に対応付けられる.

# ある大自由度カオスの,構成の容易な状態アンサンブル 川崎光宏

近年,大自由度カオス系の巨視的性質を軌道アンサンブルを用いて記述する成果が注目を集めている.軌道アンサ ンブルを用いる方法は緩和や応答を記述できる利点がある反面,アンサンブル構成に運動方程式の解析を必要とする 難点がある.もし軌道アンサンブルでなく状態アンサンブルによる記述が可能ならば,この難点を克服し,ひいては, 従来試みられた大自由度カオスの記述につきものであった非線形性と大自由度性の困難を回避することができる.こ の状態アンサンブルによる大自由度カオスの巨視的性質記述の第一歩として,簡単なモデルにおいて,定常状態の巨 視的性質を記述するミクロ状態のアンサンブルを自然測度や時間発展に関する情報を参照すること無く容易に構成す ることができた.

## 渦輪の不安定化現象の弱線形解析

#### 服部裕司,福本康秀

渦輪の不安定化現象について,不安定波の振幅が有限の大きさとなった場合の非線形性の効果を調べるため,弱非 線形解析を行った.曲率不安定性を対象とし,振幅方程式を導出した.具体的に係数の値を求め,モードエネルギー が有限の値で飽和する様子を明らかにした.

# ー様等方性乱流における速度分布の局所平衡相似性 巽 友正,吉村卓弘

Succeeding to the previous papers (Tatsumi 2004, Tatsumi et al. 2004), which dealt with the inertial and dissipative similarities of the one- and two-point velocity distributions of homogeneous isotropic turbulence using the cross-independence closure hypothesis, the local equilibrium similarity of these distributions in the inertial and viscous sub-ranges are worked out systematically. The velocity-sum and velocity-difference distributions are expressed, except for the longitudinal component of the latter, in terms of the inertial normal distributions each associated with the self-energy dissipation rates. These distributions satisfy the coincidence conditions for vanishing distance and the separation conditions for infinite distance. The longitudinal velocity-difference distribution is obtained as a slightly asymmetric and non-normal variation of the inertial normal distribution. The physical significance of the results and the scope for the future developments of the theory to the more complicated turbulent flows are discussed.

#### エネルギー散逸率の大スケール変動

## 毛利英明,高岡正憲

コルモゴロフの乱流理論では、小スケールでの統計は、動粘性係数と平均エネルギー散逸率で一意的に決まるとす る.これに対しランダウは、局所的なエネルギー散逸率がエネルギー保有渦のスケールで変動し、小スケールでの統 計に影響を及ぼすと考えた.私達は、風洞における格子乱流の実験により、局所的な散逸率が大スケールで顕著な変 動を示すことを見い出した.その振幅は、相関長のスケールで、平均散逸率と同程度である.このエネルギー散逸率 の大スケール変動の性質と、小スケールにおける統計への影響について議論した.

## レーリー・ベナール対流における輸送係数の発散

## 柴田博史

レーリー・ベナール対流は,対流,ソフト乱流,転移領域,ハード乱流の4つの相を持つことが知られている.ソフト乱流相と転移領域相において,乱流粘性係数が発散することが見いだされた(H. Shibata, Physica A 333, 71 (2004); Physica A 345,448 (2005)).ここでは熱輸送に関係する熱伝導率について報告する.エネルギー流れの2時間相関関数の時間積分を乱流熱伝導率とみなすと,乱流熱伝導率も対流相とハード乱流相において有限の値をとり,ソフト乱流相と転移領域相において発散する.また,乱流熱伝導率の値は対流相で小さく,ハード乱流相で非常に大きい.さらに,乱流熱伝導率の発散の強さは転移領域相で大きくなることがわかった.

### 動的相関の新しい展開法

#### 藤坂博一

定常なマルコフ的確率過程およびカオス力学系における動的相関(2時間相関関数,大偏差統計特性量)の新しい 展開法を提案する.たとえば,カオス力学系では滑らかな確率密度関数が存在しないために,動的相関を時間発展演 算子の固有値問題の形に定式化するという方法は実際的ではない.代わりに,オリジナルなMoriの射影演算子法を, 考えている力学変数より広い空間への射影へと拡張することにより近似的に用いることができる.近似の程度は,増 やす変数およびその数を変えることによって調整することができる.本稿では,2時間相関関数および大偏差統計量 を導出する新しい方法について述べる.

#### 乱流輸送における流束の二重構造と流束--勾配関係

### 森肇

乱流輸送の研究には,レイノルズ応力の渦粘性モデルや混合距離理論など,100年以上続いてきた線形現象論があ り,航空力学や気象力学など様々の分野で使われてきた.ここでは,統計物理学の観点から,それら乱流輸送の機構 を解明し,流束(運動量流束,熱流束など)と勾配(流束勾配,温度勾配など)と輸送係数との三者間の関係を厳密に定 式化できることを示した.

発達した乱流は、ランダムな小さい渦の集団であり、ランダムな小スケールの運動(特性時間 τ<sub>r</sub>)と、組織的な大スケールの運動(特性時間 τ<sub>M</sub>)とからなっている.したがって、平均流は、この組織的な大スケールの運動からなり、乱流を生成維持している.乱流の揺らぎは、ランダムな小スケールの運動からなり、乱流輸送をもたらすとともに、揺動散逸定理を成立させている.このように、流体乱流は、二つの異質な運動の二重構造になっているのである.

この二重構造に対応して,流束  $J_{\beta}$ は,完全に非線形でランダムな,小スケールの運動部分  $\pi_{\beta}$ と線形で組織的な, 大スケールの運動部分  $J_{\beta}^{s}$ との和  $(J_{\beta} = \pi_{\beta} + J_{\beta}^{s})$ であることを,射影演算子法を使って導出した. $\tau_{r} \ll \tau_{M}$ のときには,この二重構造論から,レイノルズ応力の渦粘性モデルなどの線形現象論を導出できるのである.

#### ヘノン–ハイレス系の時間相関関数とパワースペクトルの構造

#### 石崎龍二, 富永広貴, 黒木昌一, 森信之, 森肇

保存力学系のカオスの典型例としてヘノン-ハイレス系を取り上げ,カオス軌道のランダム化の過程を特徴づける ために,時間相関関数やパワースペクトルの構造と,射影演算子法により導出した非マルコフな線形確率方程式との 関係について考察した.ヘノン-ハイレス系の非線形な微分方程式を射影演算子法によって変換した非マルコフな線 形確率方程式が,実際の時間相関関数を非常によく再現できることを示し,非線形力の時間相関関数を使って,記憶 関数やカオス誘導摩擦係数を数値的に求めた結果について報告した.

## Duffing 振動子系のパワースペクトルとカオス誘導輸送係数

#### 富永広貴,石崎龍二,黒木昌一,森肇,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.

# 3 プログラム

6月16日(木) 印は特別講演

14:00-14:30	成行泰裕,羽田 亨(九大総理工)
	局所構造を含む手面ノフスマ MHD 乱流:起源と粒子輸达
14:30-15:00	佐滕彰洋(京大情報)
	べき乗則変動を作る確率過程とその応用
15:20 - 15:50	上之和人, 金田行雄(名大工)
	くりこみ展開と異常スケーリング—速度勾配の4次モーメントのスケーリング—
15:50 - 16:20	岡村 誠(九大応力研)
	射影演算子法の乱流に対する有効性
16:20 - 16:50	辻 義之 ( 名大工 )
	乱流境界層における圧力スペクトルのスケーリングについて

#### 6月17日(金)

9:00-9:30	堀内 潔,寺岡 恒,高木洋平(東工大理工)
	ー様等方乱流にたいする非アファイン粘弾性効果
9:30 - 10:00	中野 徹(中大理工), 後藤俊幸(名工大理工)
	4 次元乱流
10:20-11:20	浅井 雅人 (首都大システムデザイン)
	壁乱流組織構造の生成過程
13:00-14:00	坪田 誠 (大阪市大理)
	乱流の量子古典対応
14:20-14:50	福本康秀(九大数理)
	渦輪の運動速度とエネルギー・インパルスの関係
14:50-15:20	大木谷 耕司(京大数理研)
	Burgers-Donaldson-Sullivan の軸対称流のクラス―定常解と非定常解の爆発問題―
15:40 - 16:10	木田重雄,河原源太,Lennaert van Veen(京大工)
	等方乱流に埋もれた周期運動
16:10-16:40	宮崎修次(京大情報)
	決定論的拡散やカオス力学系としての有向グラフにおける不安定周期軌道の役割
16:40-17:10	川崎光宏(新潟大工)

#### ある大自由度カオスの,構成の容易な状態アンサンブル

#### 6月18日(土)

9:00-9:30	服部裕司(九工大工),福本康秀(九大数理)
0.30 10.00	渦輪の不安定化現象の弱線形解析 器 友正(国際真笑研)、 吉村貞引(トヨタテクノサービス)
9.30-10.00	一様等方性乱流における速度分布の局所平衡相似性
10:20-10:50	毛利英明(気象研),高岡正憲(同志社大工)
	エネルギー散逸率の大スケール変動
10:50-11:20	柴田博史(崇城大工)
	レーリー・ベナール対流における輸送係数の発散
13:00-14:00	藤坂博一 (京大情報)
	動的相関の新しい展開法
14:20 - 14:50	森肇(九大応力研)
	乱流輸送における流束の二重構造と流束─勾配関係
14:50-15:20	石崎龍二(福岡県立大),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),森肇 (九大応力研)
	ヘノン-ハイレス系の時間相関関数とパワースペクトルの構造
15:20 - 15:50	富永広貴 (佐賀大医), 石崎龍二 (福岡県立大), 黒木昌一 (福岡女子大),
	森肇 (九大心刀研),森 信之 (九州共立大工)

# 4 開催日程,場所

開催日程 2005年6月16日(木)-6月18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 22件 参加者数 45人

## 第7回地球流体力学研究集会 「地球流体における波動と対流現象の力学」

研究集会代表者

東京大学 海洋研究所 新野 宏

#### 研究集会の目的

近年の計算機技術の著しい進歩により、大気や海洋の小規模渦から大規模循環まで、計算機の上で 再現できるようになった。そして、人工衛星による宇宙からの観測は、地球全域での広域情報の入手 を可能にした。今日では、地球科学は再現と検証の手段を得て、先端科学のひとつに変貌しつつある。 そのような状況に於いて、地球流体力学は、数値計算出力や衛星観測の厖大なデータを整理し統一的 な理解を得るのに、重要な役割を担う学問である。本研究集会の目的は、複数の分野の地球流体力学 に関連した研究者が一堂に集まり、相互に最新の情報を交換し、新しい学問の展開を模索するもので ある。九州大学応用力学研究所は、海洋物理、大気物理、流体力学等に関連した数多くの研究者がい る国内でも有数の研究機関であり、そこで集会を持つことは非常に有意義な事である。

#### 成果の概要

主に大気と海洋中の波動と対流現象に焦点を当てた集会とする。特に,詳しい説明が必要な理論的 研究や,室内実験による研究,惑星大気の研究など,特色ある研究発表を行う.プログラムは海洋・ 大気・惑星大気・室内実験などの研究テーマに分けて構成する.各発表は十分な時間を確保し討論を 活発に行う。そして、特に若手研究者に発表の機会を設ける。

#### 講演プログラムと概要

3月13日(月)

13:00-13:10 代表者挨拶

新野 宏(東京大学 海洋研究所)

13:10-13:40 月平均場に見られる PJ パターンの構造と力学

小坂 洋介・中村 尚 (東京大学大学院 理学系研究科)

Pacific-Japan (PJ)パターンは東アジア夏季の天候に影響する主要なテレコネクションの1つであ る。Nitta (1987)などでは、PJパターンは熱帯西太平洋(フィリピン付近)での積雲対流活動の変動に 伴う加熱偏差に励起されたロスビー波列と考えられているが、その詳細な構造や力学は十分に理解さ れていない。本研究ではデータ解析を通して、月平均場に見られるPJパターンの構造を明らかにし、 その形成要因を考察した。

PJパターンに伴う渦度偏差は、対流圏下層では東西に伸びた偏差の南北ダイポール構造を示し、これは先行研究と整合的であるが、鉛直方向には上層ほど北に傾いており、対流圏上層では3極構造を示した。渦度収支および気候場とのエネルギー変換を調べた結果、この構造の形成には気候場の東西非 ー様性が本質的に重要であることがわかった。また、様々な領域で同様の解析を行った結果、PJパタ ーンが西太平洋域に存在する大気の力学モードである可能性が示唆された。 気候場の東西非一様性の重要性は、PJパターンがなぜ夏季の西太平洋域に見られるかを説明するだ

式候場の東西非一様性の重要性は、PJバターノかなせ夏季の西太平洋域に見られるかを説明するだけでなく、モンスーンと亜熱帯高気圧にはさまれた他の領域でも同様のテレコネクションが起こりうることを示唆している。そのような気候場を持つ他の領域についても解析した結果、PJパターンに類似した偏差パターンが確認できた。

13:40-14:10 浅水系における非定常な渦流からの重力波放射ーパラメータ走査実験ー

杉本 憲彦(名古屋大学 工学研究科計算理工学専攻)、

石岡 圭一(京都大学 理学研究科地球惑星科学専攻)

f平面浅水系において、帯状強制のあるジェット(渦流)の非定常運動に伴う重力波放射をロスビー数(Ro),フルード数(Fr)ではられる幅広いパラメータ領域での非線形数値実験により調べた.重力波フラックスのFr依存性では、Roが大きい領域で、古典的な渦からの音波放射理論で予測されるFrのベ

き則が成り立つ一方で,Roの小さい領域でこのべき則は成り立たない.また,Ro依存性では,Roの大きい領域で重力波フラックスは一定であるのに対して,Roの小さい領域で急激に減少した.その一方で,これらのRoの中間の領域では,重力波フラックスは極大値を持った.重力波ソースとその振動数 スペクトルの解析により,得られた結果の定性的説明に成功した。

#### 14:10-14:40 夏季北東アジア乾燥域における降水分布とその経年変動

岩尾 航希(東京大学 気候システム研究センター)

近年北東アジア乾燥域では、深刻な砂漠化が懸念されている他、顕著な温暖化や、1999-2001年における3年連続のゾド(家畜の大量死)など、激しい気候変化にさらされている。この地域における1980年以降の夏季降水量の変化を、定点観測データ、CMAP月平均データを用いて調べた結果、7月降水量が1990年代末期まで、モンゴルの南部から東にかけて顕著に増加していることが分かった。また1999年から2002年にかけては夏季降水量が非常に少ない年が続いており、モンゴル全域で顕著な干魃が起きていた。この干魃は1999-2001年の大規模なゾドに強く影響したことが考えられる。

夏季北東アジア乾燥域の気候場を ECMWF 再解析データを用いて調べたところ、子午面循環の平均場 にモンゴル南部と北部で間接循環が見られた。それに伴い緯度 50N 付近は、下層で収束帯、降水量も 比較的多い領域となっている。夏季降水量の経年変動にはこの収束帯の南北での振動が主要な変動モ ードとして現れ、上記の変化にも寄与していることが分かった。当日はこれらを構成する要因につい て発表する。

14:50-15:20 大気のカルマン渦列の形状に及ぼす渦管の繋がり方の影響

野口 宗宏(九州大学大学院 総合理工学府)

伊賀 啓太 (東京大学 海洋研究所)

冬季、大陸から寒気が流出する際に、孤島の風下にカルマン渦列が二列に並ぶことがある。通常、 このような渦列は互い違いに並ぶが、時折、渦列が対に近い配置で並ぶことがある。このような対の 渦列は、中立層が山より高い時に、両側の渦列の渦管が繋がることによって、生じるのであろうという樋口・酒井(2005)の仮説を検証するために、気象モデルを用いて数値実験を行い、再現された渦列の様子を詳細に調べた。

この渦列の渦度場は鉛直方向に波状の構造をしており、その位相は、山の風下の中心線上とそれからずれた渦の生じている領域とで逆の方向に傾いていた。この性質は波状構造が内部重力波と考えることで説明できる。対に近い渦列と互い違いの渦列は同じ山の高さと中立層の厚さの設定の中で異なる時間に現れた。これは必ずしも中立層が厚い時に対に近い渦列ができるわけではないことを示している。但し、渦度の構造を詳細に見ると、互い違いの渦列では片方の渦列が片方の渦列の渦管は他方の側の下層に潜って弱まっているのに対して、対に近くなった渦列では上空で両側の渦が繋がっており、これは、樋口・酒井(2005)の構造に関する仮説を支持するものである。

15:20-15:50 対流圏上層にみられた渦列の成因について

前島 康光・伊賀 啓太・新野 宏 (東京大学 海洋研究所)

大気中に発生する渦列に関しては、これまでにも多くの観測事例が報告されてきた。しかしながら、 それらの発生メカニズムに関しては、データが十分でないなどの理由でほとんど理解が得られていないのが現状である。

本研究では、2005年7月6日の水蒸気画像で確認された対流圏上層の渦列を事例に取り、RSMデータを 用いて渦列の発生した環境場を解析し、さらに発生メカニズムを線形安定解析によって調べた。

水蒸気画像によると、渦列は7月6日06UTC頃に発生した。渦列発生前の6日00UTCを初期値としたRSMデ ータによると、北緯44度、東経143度付近の200hPa面から400hPa面にかけて、東西方向に強い水平シア ーゾーンが形成されていることがわかった。渦列はこの水平シアーに伴って発生したと考えられる。 そこで、東経143度の南北断面の流速を基本場とした線形安定解析を行った。その結果、成長率の大き な不安定モードの特徴が、水蒸気画像で観測された渦列の特徴と良く一致していた。これらの不安定 モードのエネルギー解析の結果、基本場の運動エネルギーから擾乱の運動エネルギーへの変換が卓越 していた。従って、上層の渦列の発生要因は順圧不安定であると考えられる。

#### 15:50-16:20 中間規模東進波の統計解析

伊ヶ崎 英雄 (九州大学大学院 総合理工学府)

伊賀 啓太 (東京大学 海洋研究所)

中間規模東進波は, Sato et al. (1993)によって発見された中緯度対流圏界面付近で顕著に見られる 波動現象である.その後の研究によって,中間規模東進波は中緯度大気で普遍的に見られる現象であ り,準地衡系の枠組みで説明できる現象であることがわかってきた.本研究では、大気大循環モデル としてCCSR/NIES AGCMバージョン5.4を用いて標準的な実験を行い、中間規模東進波を再現し、一方で ERA40客観解析データを用いた結果と相互比較して、モデルで再現された中間規模東進波の統計的性質 を調べた。本研究により、モデルで再現された中間規模東進波に関して、波の振幅がピークを取る高 度が観測結果に比べてやや低いこと、波の振幅の値が観測値よりも小さいこと、波の振幅が大きい事 例が発現する地域が観測結果とよく一致していること、波の位相構造が南北方向にも鉛直方向にも位 相の傾きが小さく対流圏界面に捕捉されていたことなど,従来から知られている特徴とよく一致して いたことなどが明らかにされた。

16:30-17:00 Charney-Hasegawa-Mima 方程式の asymptotic model の Hamilton 形式

末吉雅和・岩山隆寛(神戸大学大学院 自然科学研究科)

Charney-Hasegawa-Mima (CHM) 方程式のasymptotic model (CHM-AM) は、CHM方程式 (浅水系の準地衡 流渦位方程式) で現象の水平スケールがRossbyの変形半径より大きい場合に相当する。CHM-AMは海洋 や木星大気 (変形半径2000km程度と考えられているが、それが妥当なら)の単純なモデルである。本 研究では、CHM-AMを非正準形式のHamilton形式で表した。CHM-AMはCHM方程式において変形半径が0 の極限をとると得られるが、CHM-AMのHamilton形式は、CHM方程式のHamilton形式 (Weinstein 1983) から直接得られないことを示す。Hamilton形式の利点は、系の擬エネルギー、 擬運動量をつくる手 順が得られることである。講演では、前半で流体のHamilton形式の短いreviewを行い、後半でCHM-AM のHamilton形式について話す。

17:00-17:30 面上の強制2次元乱流における帯状流の東西非対称性のパラメータ依存性 村上真也・岩山隆寛(神戸大学大学院 自然科学研究科)

面上の強制2次元乱流では、東向き流れと西向き流れが南北に交互に並んだ帯状流が卓越することが知られている(Vallis and Maltrud, 1993; Danilov and Gryanik, 2004).また、この帯状流には 東向きの流れの速さが西向きの流れの速さより速く、東向きの流れの幅は西向きの流れの幅より狭い という東西非対称性が現れる.この流れに対応する帯状平均渦度の南北プロファイルは、幅の狭い急 な正の渦度南北勾配と幅の広いなだらかな負の渦度南北勾配を交互に繰り返すノコギリ歯状になる (Danilov and Gryanik, 2004).しかし、この帯状流の東西非対称性の生成メカニズム及びパラメータ 依存性はまだ分かってない.そこで、帯状流の東西非対称性を帯状平均渦度の正の南北勾配と負の 南北勾配の大きさの比rで定義し、パラメータ依存性を数値計算によって調べた.渦度勾配比rは

が小さいうちは に比例して増加するが,ある値を境に に比例して減少した.これは正の渦度勾 配幅が強制の長さスケールで制限されていると考えれば理解できた.

17:30-18:00 回転球面上の浅水系乱流における赤道ジェットとその加速メカニズム

北村 祐二・石岡 圭一(京都大学大学院 理学研究科)

回転球面上の浅水系乱流において,回転の効果により赤道ジェットが現れることがCho and Polvani (1996)によって報告された.彼らは出現する赤道ジェットは常に西向きになると主張しているが,そ の結果が初期値に依存しない性質かどうかはまだ確かめられていない.本研究では系統的なアンサン ブル実験を行うことにより,赤道ジェットの向きと強さが初期値にどの程度依存しうるのかを調べた. その結果,赤道ジェットの強さの分布はロスビー数に依存していた.ロスビー数が小さな場合には赤 道ジェットは常に西向きで,その強度も初期値にあまり依存しないが,ロスビー数が大きくなると, 確率は低いものの東向きのジェットも形成・維持されうることが分かった.さらに赤道ジェットの加 速メカニズムを調べるために,波によって引き起こされる東西平均流の加速を求めた.西向き加速は 主に赤道に向かうロスビー波束によってなされる一方で,基本流が存在する場合には,赤道波が南北 に傾くことで基本流を強化するセンスに角運動量が輸送されうることが明らかとなった.

3月14日(火)

9:30-10:00 衛星海面高度より求めた赤道波の振動数波数スペクトル

和方 吉信(九州大学 応用力学研究所)

Matsuno(1966)は、大気や海洋の赤道域に、赤道近くに捕捉される赤道波が存在することを指摘して いる。従来、海洋では、直接観測による温度場データのラグ相関解析などにより、赤道波はある緯度 帯に沿い西進するロスビー波や東進するケルビン波として知られていたが、Matsuno(1966)の示した捕 捉波としての赤道波の理論分散曲線に、観測から求められた擾乱の波数・振動数がどの程度対応する かを議論した研究は少ない。そこで、衛星海面高度データを用い、変動成分を最小二乗法により南北 モードに展開を行い、次に展開係数を波数・振動数の2次元フーリエ展開し理論分散関係との比較を
行った。第1ロスビー波は理論分散曲線より幾分低い振動数域に大きな振幅があるが、他のモードは 分散曲線近くに集中し大きな振幅があることから、赤道近傍の波は赤道捕捉波の性質を有することが 観測結果から示された。

### 10:00-10:30 局所的な混合によって生ずる海洋循環の非線形力学

三寺 史夫(北海道大学 低温科学研究所)

反時計回りの風成循環が形成されている北部とは異なり、オホーツク海南部では時計回りの循環が 卓越しており、時には10数Svにも達する。ここでは、このような時計回り循環形成のメカニズムとし て、千島列島沿いでの局所的な混合により駆動される熱塩循環を考える。潮流が浅い海峡(すなわち 海嶺上)を越えるときに大振幅の内部波が発生・砕波し、中層に低渦位水が供給されるために循環の 駆動されるのではないか、ということである。このような状況を考察するために、海嶺がある2層モデ ルで、海嶺直上で下層から上層へのエントレインメント(鉛直流速)があるという単純なケースを考 えた。鉛直流速が小さい場合には、海嶺上でスベルドラップ平衡による南下流、その西側でロスビー 波の放射による時計回り循環、という、線形 プルームの解が得られた。一方、混合が比較的強い場 合には海嶺上で強い高気圧性渦が間断なく発生し、西方に伝播して低渦位水を供給する。この場合は 平均場においても密度境界面は海嶺とその西側で大きくくぼみ強い時計回りの循環が生じ、非線形性 の強い解となった。また、これらの二つの解には、初期条件に依存した多重性があることが分かった。

# 10:30-11:00 高緯度海域における対流現象:状態方程式の非線形性に注目して

秋友 和典 (京都大学大学院 理学研究科)

海水の状態方程式は強い非線形性を持つ。それから生じる性質の一つに、海水の熱膨 張率が圧力(水 深)とともに増加するというものがあり、サーモバリシティ (thermobaricity)と呼ばれている。この 性質は水温が低いほど顕著なため、高緯度海域で発生する対流は、低・中緯度海域でのものとは大き く異なる性質を持つようにな る。また、高緯度海域特有の水温、塩分の成層構造がこのような対流を 生じさせるもう 一つの要因である。冷却によって表層混合層はほぼ結氷点まで冷やされるため、水温 は深層の方が高い(不安定成層)。一方、高緯度海域では降水量が蒸発量を上回るため、 混合層の塩分 は深層より低く、通常は、この塩分構造によって安定な密度成層が維持 されている。このような成層 構造のもとで、ひとたび不安定な状態が実現すると、沈 降する低温な混合層水はサーモバリシティに よって周囲の暖かい深層水よりさらに重 くなり、対流はどんどん加速される。これは、表層混合層が 冬季の冷却によって徐々 に厚くなるという中・低緯度での状況とは大きく異なる。南極海域での観測 データを用 いて、このような対流が発生する可能性やその結果生じる影響について考察した。

### 11:10-11:40 琉球海流系の力学

中村 啓彦(鹿児島大学 水産学部)

琉球海流系は,亜熱帯循環の西岸境界流の一分枝として,琉球列島東方の陸棚斜面上にある。この 海流系は,沖縄本島より北側で海底強化されており,南側で順圧的な構造をもつことが近年の観測に より示された。本研究は,このような琉球海流系の形成メカニズムを,数値実験により明らかにする ことである。現実的な海底海岸地形と理想化されたそれでの数値シミュレーションを行ない,各々の 定常場を2層のPlanetary-Geostrophic方程式系から導かれた移流・波動伝播方程式(1階偏微分方程 式)の特性曲線を用いて診断した。その結果,鉛直第1モードの地形性ロスビー波がトカラ海峡での 黒潮の沖側で形成され,琉球列島東方の陸棚斜面上を南方伝播することがわかった。つまり,この波 は琉球列島東岸に沿って主温度躍層を押し下げるため,それが順圧的な西岸境界流に重なると,上層 の北上流は弱化され下層の北上流は強化される。海底強化が沖縄本島より北方でのみ形成される理由 は,地形性ロスビー波の南方伝播が,北太平洋内部領域から西方伝播し琉球列島東方の陸棚斜面に補 足される鉛直第1モードの惑星ロスビー波の伝播によって阻害されるからである。

# 11:40-12:10 日本海 cold-air outbreak に準 10 年周期変動をもたらす大気と縁辺海の相互作用 磯辺 篤彦 (九州大学大学院 総合理工学研究院)

能登半島沖の気象庁ブイで得た1982年から2000年までの風データを、11月から3月までの5ヶ月間の 寒気の吹き出し(cold-air outbreak)時期を選び解析した。寒気の吹き出し周期を含む5~15日の周期 帯を選び、各年のウェーブレット振幅を5ヶ月間で平均して経年変化を調べた。結果から、80年代初頭 と90年代初頭に強い寒気の吹き出しが頻繁に起こっていたことを示す、顕著な準十年周期が検出でき た。ところが、これらの時期は、東アジアの冬季季節風が弱いとされる、北極振動(A0)インデックス の準十年周期変動が正偏差になる時期と良く一致している。JODCが提供する過去100年間の海面水温観 測データと、NCEP/NCAR再解析データから求めた海面気圧分布を用い、東アジア縁辺海における大気海 洋相互作用が、冬季日本海の寒気の吹き出しに経年変動をもたらす可能性について検討する。

### 12:10-12:40 回転系における水平シア流と熱対流との相互作用

古川 祐貴・新野 宏(東京大学 海洋研究所)

回転系における水平シアと熱対流の相互作用について線形論と非線 形数値実験によって調べた。 線型論では、平面クエット流の中でどのような熱対流が卓越するのかを様々なテーラー数 Ta 及びレ イノルズ Re に対して調べた。その結果、ほとんどの場合、クエット流の方向を向いたロール状対流が 卓越することがわかった。0<Ta<Re\*\*2(Ta>Re\*\*2)のときには慣性不安定性(安定性)の効果が加わ って、臨界レイリー数は減少(増加)することが分かった。また、Ta>Re\*\*2でTaが大きいときには、 臨界モードは境界付近に捕捉されたセル状の対流となることが分かった。次に、非線形数値モデルに よる時間発展計算を行なった。クエット流のもとでは、線型論的に最大成長率を持つロール状対流、 ロール状対流がセル状に分かれた状態、北東-南西に傾いたロール状対流(Yoshikawa and Akitomo, 2003)が、周期的に繰り返すことがわかった。

基本場が南北方向にsin型のプロファイルを持つ東西ジェットのもとでは、粘性の存在のもとでは 安定な順圧固有モードが、対流からエネルギーを供給されることにより、時間的に発達し、維持され るという興味深い現象が見つかった。

### 13:30-14:00 無限自由度を持つ現実流体における低次カオスの出現条件

三村 和男 (東海大学 教養学部)

1963 年アメリカ気象学会誌に掲載された E.N.Lorenz による「Deterministic Non periodic Flow」と題する論文によってカオス研究の歴史は始まった。たった3変数のみを持つ彼の微分方程式系は、ベナール対流のモデルから導き出されたが、低次カオス・システム典型としてよく知られたこのローレンツ・システムは典型的ベナール対流の必ずしも正確なモデルではない。むしろ、このローレンツ・システムは閉ループ内熱対流に対してよい対応をもっている。もし、内部流がループに沿った成分のみを持つと仮定しさえすれば、その支配方程式からローレンツ・システムを導出することができる。

我々の室内実験では、現実の内部流はいつもループ管壁に垂直な速度成分を持つことが明らか である。この速度成分は内部流に様々な多様性を与える可能性がある。実際、実験パラメータは 共通でも、ある日の実験ではカオス的反転が見られるのに、別の日の実験では見られないことが ある。

我々は、連続体として無限自由度を持つ現実の流体において、まるで低次システムのカオスの ような振る舞いが実現する条件を探っている。そのために、室内実験・数値実験・理論的考察な ど様々な手法を使って、研究を続けている。この研究は、惑星スケールの流体力学とカオスの関 連性の諸問題に応用可能であると考えている。

# 14:00-14:30 室内実験による半球規模地球対流圏の再現

松島 和宏(東海大学連合大学院 地球環境科学)

三村 和男(東海大学 教養学部)

地球の大気循環は傾圧性による不安定波動の励起と惑星ベータ効果による中立波の伝搬の相互作用 によって作られると解釈できる。これまでの室内実験は単純化の為にそれぞれを分けて行われてきた。 本研究はこの2つの効果を室内実験で同時に取り込む試みである。これがうまくいけば不安定波と中 立波の相互作用を室内実験で見ることができる。

まず装置の作成から始まった。順圧ではないため流体層の半径方向の深さ変化とベータ効果は等価 ではないが幾分の効果があることを期待し、放物面状の底を持ちかつ側面加熱・中心冷却を行える円 筒型水槽を作成した。この装置に温度差をつけて回転させた所、偏西風とその蛇行を見ることができ た。次に、鉛直2層の速度計測と子午面内温度計測が行える測定系の開発を行った。結果、鉛直方向 の速度シアーと半径方向温度差の間に温度風関係と風の回転数依存性が確認できた。実験から力学的 データ解析を行うには速度や温度の時系列データが必要なため、それらが測定できる方法と、効率化 の為の実験時間の短縮化を模索している。

14:30-15:00 鉛直閉ループの対流の可視化

乙部 直人(福岡大学 理学部地球圏科学科)

鉛直に設置した閉じたループ状の水槽の上半分を冷却し、下半分を加熱することで対流を生じさせる。この実験は自由度が低いと思われるが、いろいろな流れ場が出現し、どのような流れ場が生ずるかについてまだ整理されていない。

また、精密な温度設定のために装置を金属で作ることも多く、流れ場について測定した例はさほどあ るわけではない。温度を数点で測定しその結果から平均流の状態を推測することも多い。

そこで、装置全体を透明な素材で作成し、対流の流れ場、および温度場を可視化して流れを直接観測 した。その結果、報告されている流れすべてがみられたわけではなく、特にカオス的な反転は起こさ なかったが、周期的に反転する現象が生じた。主流が振動しながら周期的に反転する現象は見つかっ ているようではあるが、三角関数的に反転する現象は見つかっていなかった。

その反転の様子を詳しく見てみると、主流が確かに存在すること、反転する場合には、乱流的な領域 が形成されていることなどが確認された。また、乱流的な領域は浮力や重力を受けて不安定な領域に とどまっているなど、不思議な現象も確認されたので、写真やムービーを中心にご紹介したい。

15:10-15:40 金星大気大循環モデルの開発とシミュレーション

池田 恒平・高橋 正明(東京大学 気候システム研究センター)

山本勝(九州大学 応用力学研究所)

金星の自転周期は243 日で、地球と比べるとはるかに遅い。しかし雲層では100m/s のスーパーロー テーションとよばれる。自転の60 倍もの速さをもつ高速流が存在する。様々な研究がなされてきたが そのメカニズムはまだよくわかっていない。

これまでVenus-like AGCM による研究がある(Yamamoto and Takahashi2003a,2003b,2004)が、より現 実的なモデルで検証する必要がある.そこで我々は、これまでの金星GCM とは異なり放射伝達方程式 を計算したモデルを開発し数値実験をおこなった。

二酸化炭素、水蒸気の赤外領域の吸収係数はMatsuda and Matsuno(1978)の値をCCSR/NIES AGCM のバ ンドにあわせて用いた。金星は厚い硫酸の雲層に覆われており、入射する太陽光の大部分は吸収され ている。この雲層を成す硫酸エアロゾルの光学的性質はCrisp(1986,1989)を参照した。等温静止大気 から平衡状態に達するまで数万日数値積分した結果、高度70km 付近で35m/s ほどの風が得られたが、 観測されているような100m/sの東風は再現できなかった。

15:40-16:10 タイタンの「対流雲」の諸問題

中島 健介 (九州大学大学院 理学研究院)

土星の衛星タイタンは地球を上回る面密度の大気をもち、メタンの凝結による雲が生じる可能性が 指摘されてきた。近年の観測はメタンの雲が短時間で変動することを示しており、これは雲が対流性 のものである可能性を示唆する。その一方で、大気の温度構造や下層のメタン混合比は、湿潤対流の 可能性を必ずしも支持しない。さらには、雲生成の前提である凝結核としてどの様なものがあるか、 それらがどの程度の効率で働くかも不明である。この発表では、上の諸問題を含めてタイタンのメタ ン雲について概観するとともに、凝結条件として大きな過飽和度を含めた場合を含め、いくつかの数 値実験の結果を議論する。

16:10-16:20 世話人からのお知らせ

(研究集会)

# 新しい複合材料の研究開発と評価

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、実験を行ってきている。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。今年は昨年同様,複合材料の研究開発を取り入れたテーマを設定した。以下に各 講演の概要を示す。

1. 低温硬化·真空成形炭素繊維/エポキシ平織物複合材料の室温·高温における静·疲労強度特性とその実用性評価

下河利行(JAXA)、角田義秋(JAXA)、佐伯大輔(川崎重工)、向後儀鎮(本田技研) 本研究の目的は、新開発の低コスト TRK180M/1053 炭素繊維開繊平織物/低温硬化・真空成形エポキ シ複合材料について、室温および110 までの環境下における静強度と疲労強度を明らかにし、供試材料 の実用性を評価することである。静試験では、平滑試験片と有孔試験片を用いて、引張および圧縮の機械 的特性に及ぼす温度の影響を調べた。疲労試験は、応力比 R=最小応力/最大応力と定義し、有孔試験片 を用いて R=0.1 の引張疲労試験、R=10 の圧縮疲労試験、および R=-1 の引張 - 圧縮疲労試験を室温およ び 110 環境下で実施し、S-N 関係を導いた。同時に、CCD カメラ式顕微鏡とマイクロ X 線 CT を用いて、 損傷の様子を観察した。得られた試験結果により、供試材料は十分な実用性があると評価できた。

2. FRP船体スカーフ補修接合部の実働波浪荷重下での強度について

千秋貞仁、櫻井昭男(海上技術安全研究所) 現行 FRP 船の実働波浪中強度余裕確認の観点から、ミッドシップ船底キール位置における船殻用 FRP 材を対象として強度試験を行った。試験片は短冊型 MR 積層材で、補修接合形態の一例として選んだスカ ーフ接合継手2種類と、強度比較用の母材とした。波浪荷重は船体運動計算による船体中央縦曲げモー メントの応答関数と当所発行の実航行海域の波浪発現頻度テーブルを用いて作成した。試験荷重は計算 値の 20 倍の荷重振幅で、縦曲げモーメントの発生確率密度による個数を順次増加・減少する順に並べて 繰返し作用させた。また、母材と補修基準に準じるスカーフ接合継手材については一定荷重疲労試験も行 った。以上の試験の結果から、小型FRP船体のスカーフ補修接合部の実働波浪荷重下での安全率評価 を行った。

3. Zanchor-CFRPの層間破壊じん性およびは〈離疲労き裂伝ぱ特性

中島亨成(京大・院)、北條正樹(京大・工)、田中基嗣(京大・工)、安達泰治(京大・工)、 日下貴之(立命大・理工)、福岡俊康(三菱重工業)、石橋正康(シキボウ)、 近藤俊作(コルベンシュミット)、曽利田直樹(コルベンシュミット)、柳澤平(広大) プリフォームに特殊な針を突き刺すことで炭素繊維を面外方向にも配向させる新技術(Zanchor)を適用し た Zanchor-CFRP に対して,層間破壊力学特性を評価するためモード およびモード の層間破壊じん 性試験およびはく離疲労き裂伝ば試験を行った.その結果,Zanchor を適用していない CFRP に対して Zanchor を適用した CFRP は,破壊じん性値が大幅に増加し,また,疲労き裂進展の下限界値も大幅に増 加することを明らかにした.微視的破壊機構を検討することにより,その強化機構についても検討した.さら に,インターリーフ・インターレイヤ等の樹脂による層間強化材との静的・疲労特性を比較することで, Zanchorの優れた強化効果を評価した。

4. ファスナー構造健全性に対する自己診断技術開発の概要

肖 毅(JAXA)

本研究では、ジョイント構造の健全性診断を簡易に実施するために、外付けの複雑・高価なセンサシス テムの設置を必要とせず、既設ボルト継手自らが診断機能を持つようなスマート継手設計を提案した。この 仕組みの基本は、面圧損傷の面外変形で生じたボルトの拘束抵抗の力学効果を利用することによって、面 圧損傷を同定することである。今回は、技術検証のために実施した種々試験結果や検知メカニズムの考察 などについて報告する。

5. 短繊維強化プラスチックの電気的機能の応用

黄木景二(愛媛大),井上宏樹(愛媛大院),岡部永年(愛媛大) 短繊維強化プラスチックは連続繊維強化プラスチックと比較して強度・剛性で劣るものの成形性に優れ, コストも低い.したがって高い機械的特性を要求されない民生用品では短繊維を熱可塑性樹脂と混合し, 射出成形やプレス成形で作ったFRPが使用される.このような短繊維強化プラスチックには電気的特性な どの機能を要求されるものもある.ここではリサイクル CFRP 粉砕片とABS樹脂のコンパウンドおよび CFRP 粉砕片またはバージンのCFとPES樹脂のコンパウンドを射出成形により作成し,前者については機械的 特性と電磁波シールド特性を,後者についてはジュール発熱特性を調べた。

# 6. フェノールフォーム複合材をコアとするサンドイッチはりの成形技術及び評価

下相馬充(日大院)、荘司明子(日大)、邊 吾一(日大) 熱硬化性のレゾール型フェノール樹脂は、強化繊維への含浸を十分に行うためには粘度が高く、水を 加えて粘度調整するばかりでなく、成形時に縮合水が生成される.この水分が硬化時に蒸発し、ボイドとな るという問題があり、樹脂の改質や、薄板での引抜成形条件の検討などが行われている.そこで、逆の発 想から母材を発泡させたフェノールフォームとし、ガラス繊維を強化材としたフェノールフォーム複合材料 (以下 PFC)の引抜成形法を確立してきた.加工性としては、木材のように切ったり、釘やネジで接合したり することも可能な新素材である.これらをふまえて、PFC をコア材とし、フェノール GFRP あるいは CFRP を 表板としたサンドイッチはりの成形する手法を開発した。

7. プリフォームを用いた射出成形法によるフェノール複合材の開発と引張特性

丹野寿一(日大院)、邊 吾一(日大)、後藤卒土民(材料プロセス研) 大量の水分を含んだレゾール型の液状フェノール樹脂は成形時に体積の 20%以上の空洞,水分子を 有する.ノボラック型フェノール樹脂の加熱溶融射出成形法では水を用いないが,マトリックスと強化繊維 (主にガラス繊維)と予備混合し同時に射出するため,繊維破損により長繊維の形態による強化機構は望 めない.本研究では,この両者の問題点を解決すべく長繊維強化材を利用した射出成形技術を確立し, 最大の特徴である難燃性を損なわずに,マトリックスの緻密化を実現させて,十分な構造強度を有するフェ ノールガラス繊維複合材料を成形し,その引張特性を求めた結果について報告する。

 Outline of National Project on Advanced Materials & Process Development for Next Generation Aircraft Structures

Y. Yamaguchi R&D Institute of Metals and Composites for Future Industries The research and development project on advanced composite materials & process development for next generation aircraft structures has performed since FY2003 as a 5-year project, sponsored by the Ministry of Economy, Trade and Industry (METI) in Japan. This project aims to develop innovative lightweight materials & process technologies for civil aircraft structures and consists of 3 technical areas, radiation-curing technology of polymer matrix composites (PMC) structures, structural health monitoring (SHM) technology of PMC structures, and advanced magnesium alloy technology. This paper introduces briefly the activities and typical results up to FY2004 of the project.

### 9. イントラハイブリッドFRPのハイブリッド効果

### 加藤智之, 劒持 潔, 鮑 力民(信州大学)

ガラス繊維(GF)とカーボン繊維(CF)の含有割合をいろいろに変えたイントラハイブリッド材と CF の含有 率を厚さ方向で変えた傾斜イントラハイブリッド材を作製し,静的曲げ強度とクリープ試験を行い,ハイブリ ッド効果を明らかにした。その結果,静的曲げ試験においては CF100%層を最外層に積層することにより CFRP に比べて CF の使用量が半分にもかかわらず見かけの曲げヤング率はほぼ等しいこと。また、クリー プ荷重下においては単一強化 FRP よりイントラハイブリッド FRP の方がクリープ寿命が大きいことが分かっ た。この結果より地球環境保全にも大きく貢献するものと考えられる。

10.低コスト複合材構造製造技術の開発

永尾陽典(JAXA 複合材技術開発センター)、岩堀豊(同)、 中村俊哉(JAXA 航空プログラムグループ)、中道二郎(同)、石川隆司(同) 複合材構造の製造コスト削減は、航空機への大幅適用に向けて解決すべき必須な要件である。多くの 複合材製造手法のなかでも RTM(樹脂含浸成形)は材料、製造コストを共に削減できる大きな可能性があ ると考えられている。また、複合材の層間特性の改善は構造の軽量化と共に信頼性を向上させる有効な手 段となるが、層間強度を向上させる手段として Zanchor と称する技術が提案されている。またこの手法は厚 板の樹脂含浸にも有効とも考えられている。そこで、RTM と Zanchor を組み合わせた複合構造の製造研究 と、RTM による航空機構造の実証方法に関する研究が JAXA の国産旅客機開発に関する研究として行な われている。ここではプログラムの概要について報告する。

11. 衝撃損傷を受けた Carbon/Epoxy 複合材料積層板の圧縮疲労破損機構について

河野泰久(九大院),久能和夫,宇田暢秀,小野幸生,永安忠(九大工)

複合材料積層板は面外衝撃荷重を受けると内部に損傷を生じ、圧縮強度や疲労寿命が大きく低下する ため、重要な設計パラメータとなる。損傷の進展メカニズムを解明し、材料の損傷許容性を評価するために、 本研究では衝撃損傷を受けた炭素繊維エポキシ複合材料積層板の準静的圧縮試験及び圧縮疲労試験 結果について述べる。また、衝撃損傷を円孔で模擬した解析モデルについて行った有限要素解析結果と、 実験結果との比較検討を行い、破壊に至るまでの損傷進展機構について考察する。

# 12. PLA/PCL ポリマーブレンドの力学特性に及ぼす添加剤の影響

高山哲生(九大・院), 東藤貢(九大・応力研), 新川和夫(九大・応力研) 互いに非相用である生分解性樹脂 PLA と PCL のブレンドの作製において, 相溶性を改善するためにLTI を添加した.異なる LTI 添加量を有する PLA/PCL ブレンドの力学特性を評価するとともに, 破壊挙動に及 ぼす LTI 添加量の影響について調べた.き裂発生時のJ積分値 Jin と試験片の破断にようする平均的破壊 エネルギーJf は, どちらも LTI を 1wt%添加することによって大幅に増大した.破壊のメカニズムに及ぼす LTI 添加量の影響を調べるために, SEM を用いて破面を観察した.LTI の添加量が増加すると, LTI 添加 による反応生成物の界面活性剤的な効果で球晶 PCL のサイズが小さくなり, PLA と PCL の分子束の絡み 合いが促進される.その結果, 空孔の形成が抑制されるとともに塑性変形が大きくなり, 破壊特性が改善さ れることを確認した。

13. 高速変形下における CFRP 構造部材の力学特性評価

西脇 剛史(株式会社アシックス スポーツ工学研究所) 近年、スポーツ用具の設計に対しても繊維強化プラスティック構造物の設計精度を向上させるために、 動的弾性率や動的強度といった設計因子の重要性が認められつつある。本研究では、CFRP 構造部材の 引張り、圧縮、座屈、および、円筒横圧縮負荷に対する力学評価を split Hopkinson 棒法により行なった。 負荷中に発生する供試体の振動を取り除くため、入射波にはランプ波を用いた。得られた応力-ひずみ線 図より、初期ヤング率と強度のひずみ速度依存性、ならびに、off-axis 試験片に対する形状依存性につい ての検討を行なった。最後に、既存の破壊則の適用に関する考察を行ない、その適用の可能性について の検討を加えた。

### 14. Processing and characterization of graphite nanofiber reinforced aluminum composite

J.H. Jang and K.S. Han (POSTECH) The graphite nanofibers (GNFs) reinforced aluminum metal matrix composites were fabricated successfully through conventional powder metallurgy routes. The mixing conditions were established by microhardness tests and microscopy observations. The high density of composites could be achieved by hot isostatic pressing (HIP). As results of the mechanical tests, which are microhardness and compression tests, the optimal contents of nanofibers were determined. The physical properties of the GNF-Al composites were measured by thermal and electrical transport tests. The results of physical tests indicated that nanofibers give reasonable promise of being successful in functional nanocomposites. This preliminary research may help to propose the design and the fabrication of the functional metal matrix nanocomposites.

### 15. Debonding effect on vibration control of the active constrained layer damping in the shell models

H.S. Seonghyun and H.C. Park (POSTECH) Active constrained layer damping (ACLD) treatments have been widely studied to improve vibration control of structural behavior. The ACLD method consists of the viscoelastic damping material (VEM), the piezoelectric sensors/actuator and host structure. It is assumed that the VEM which is sandwiched between the piezoelectric actuator and a host structure is perfectly bonded onto the surface of the host structure. However, debonding may occur between the VEM and piezoelectric actuator or piezoelectric sensor/actuator and the host structure. It may affect the control efficiency or the energy dissipation of the VEM, which leads to an unstable closed loop control system. Purpose of this study is to investigate the effect of debonding between layers of the structure.

16. Off-axis creep recovery behavior and its modeling for unidirectional CFRP laminates at high temperature M. KAWAI (U. of Tsukuba)

Effects of loading history on the creep strain recovery behavior of unidirectional carbon/epoxy composites under stress-free conditions at high temperature are examined. To observe the creep strain recovery upon complete unloading just after a single off-axis loading of virgin specimens, creep tests are first performed for five hours on plain coupon specimens with various fiber orientations:  $= 10, 15, 30, 45^{\circ}$ . Creep strain recovery responses are clearly observed in all kinds of off-axis fiber orientations tested. The creep strain recovery rate tends to vanish as the axial strain decreases. A part of the axial strain developed by the prior single loading eventually remains, which indicates that a certain amount of inelastic component has been involved by the total strain due to the prior load. Then, to elucidate the effects of loading history on the off-axis creep strain recovery behavior, the cyclic recovery tests with intermittent stressing are performed at the same test conditions. The test results reveal that the amount of the off-axis creep strain recovery of the unidirectional system is governed by the age hardening of the matrix material and it is also affected by a softening due to cyclic loading.

# 17. 宇宙望遠鏡用超高寸法安定性CFRPの開発と評価

### 尾崎毅志(三菱電機)

炭素繊維強化プラスチック(CFRP)に代表される炭素繊維強化複合材料は、軽量で高強度・高剛性かつ 低熱歪みという優れた熱機械特性を有しており、宇宙の分野では早くから人工衛星の構体やアンテナ、太 陽電池パドル等に積極的に適用されてきた。近年、高熱伝導のピッチ系炭素繊維や吸湿の少ないシアネ ート樹脂のようなユニークな特徴を持つ新たな基材が実用化され、宇宙用としてより高いパフォーマンスを 持つ複合材料が実現可能となった。ここでは、光学レベルのきわめて高い寸法安定性を要求される宇宙望 遠鏡構造に対する炭素繊維強化複合材料の適用開発において、0.01ppm/Kレベルの評価精度を有する 熱膨張率評価装置や長期的に安定した測定が可能な吸湿変形評価装置の開発を行った結果について報 告する。 18. グリーンコンポジットの研究開発と力学評価

合田公一(山口大)

強化材に代表的な高強度天然繊維であるラミー麻繊維を,母材に生分解性樹脂をそれぞれ用い,構成 素材のすべてが植物由来材料である,いわゆるグリーンコンポジット(Green Composites1))の創製を行い, さらにこの材料の高靭化について検討した.その結果,ラミー麻繊維を予めマーセル化処理することにより, グリーンコンポシットの大幅な靭性改善効果が,引張特性および衝撃特性において発現されることが判明 した.また,マーセル化されたラミー麻グリーンコンポシットの衝撃エネルギ吸収能はGFRPを上回ることも確 認できたので報告する。

### 19. CFRP 積層板の機械継手の疲労強度とその損傷進展

清家聡(九大院),高雄善裕,汪文学(九大,応研) CFRP 積層板ピンジョイントの疲労に関する過去の研究としては疲労荷重下での損傷進展とボルト締め 付けの関係を調べた報告などがある程度で一般に少ない。そこで本研究では CFRP 積層板のピンジョイン トにおける引張疲労破壊機構の解明を行う。具体的にはピンジョイントの静的試験と疲労試験を行い、両者 の破壊断面解析から両破壊機構の関連を調べる。また疲労サイクル数と損傷進展挙動の関係を明らかに する。静的負荷では負荷点から数プライ離れた繊維キンキング,疲労では接触面の崩壊がそれぞれ起点 となる違いが明らかになった。

### 20. 航空機構造におけるスキン-スティフナ界面の接着は〈離の進展シミュレーション

棚橋洋佑(東北大・院)、岡部朋永(東北大)、関根英樹(東北大) 本研究では,スキン-スティフナ界面に生じる接着は〈離進展を対象にした数値シミュレーション手法を提 案する.本手法では,有限要素解析にもとづき仮想き裂進展法によってエネルギ解放率を算出し,この情 報をもとに接着は〈離の進展を模擬する.特に,は〈離の進展に伴う形状の変化を要素自動分割にて処理 しているため,任意形状の接着は〈離の進展シミュレーションが可能である.本数値シミュレーション手法に 基づき,スキン-ブレード型スティフナ界面に生じる接着は〈離の進展シミュレーションを行い,スティフナ形 状が接着は〈離の進展におよぼす影響について議論する.

# 21. 航空機翼端部を対象とした構造ヘルスモニタリングに関する数値解析

飯笹智久(東北大・院)、岡部朋永(東北大)、関根英樹(東北大) 本研究では、埋め込みFBG センサより得られる反射光スペクトル情報を利用した、航空機翼端部におけ るスキン-ブレード型スティフナ間に生ずる接着は〈離の同定手法を提案する.本手法では、まず、ペナル ティ関数法におけるペナルティ係数を設計変数として利用し、接着は〈離位置の同定を行い、次に、その 位置情報を基に接着は〈離形状の詳細な同定を行った.同定に用いられる、反射光スペクトル情報として は、ピーク波長の変化量および反射光スペクトル形状の2通りを用いている.上記の提案手法により、同定 を行ったところ、十分な精度の同定結果を得ることが出来た.

22. A new cohesive model for simulating delamination propagation in composite laminates under transverse loads

N. Hu, Y.Zemba and H.Fukunaga (Tohoku U.) In this paper, we have proposed a new cohesive model to stably simulate delamination propagation in composite laminates under transverse loads. In this model, we set up a pre-softening zone in front of the original softening zone. In this pre-softening zone, the initial stiffness is gradually reduced as the interface strength decreases. However, the onset displacement for starting the real softening process is not changed in this model. The energy release rate for determining the final displacement of complete decohesion is not changed too. This cohesive model is implemented in the explicit time integration scheme for evaluating the delaminations. Also, a stress-based criterion is employed for judging various in-plane damages, such as matrix cracks, fiber breakage etc. Moreover, two examples are employed to illustrate the validity of the present method. The first example is a square cross-ply GFRP plate with 3 layers under the quasi-static transverse load, and the second one is a square pseudo-isotropic CFRP laminated plate under the low-velocity impact. The experiments are carried out to verify the numerical results of the present model.

# 3.まとめ

複合材料に関する集会は今回で9回目であり、大学、国立研究所、企業から22件の講演発表があり、活 発な討論が行われた。韓国 POSTECH から2件の発表もあった。各研究の詳細は平成18年1月発行の応 用力学研究所研究集会講演論文集17ME - S5「新しい複合材料の研究開発と評価」をご覧いただきたい。 平成18年度は平成19年1月初旬に、強度及び破壊のモデリングという視点の研究集会を開催したいと考 えている。

# 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

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として大別すると、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」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。

昨年度の研究集会の参加者から本年度も同様のテーマでの研究集会開催を望む声が大であったので,本年度 も引き続き応用力学研究所で本研究集会を開催することを企画した。本年度の研究集会では、海外から3名の参加 者があり、国際的な拡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。

# 2. 開催日時,場所

開催日時:平成17年10月14日(金)13:00~18:00 10月15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)

以下には具体的に行われた講演の概要を示す。

# 1. Time-Dependent Linear Wave Scattering for a Circular Shallow Plate

Michael MEYLAN (Auckland University, New Zealand) The time-dependent linear wave problem can in theory be solved by an expansion in eigenfunctions. The eigenfunctions in turn are nothing more than the standard single frequency solutions for which extensive methods of solution have been developed. However, implementing the solutions numerically is complicated and for this reason it is natural to concentrate on the simplest situations. In this talk, I considered the problem of a circular elastic plate floating on shallow water. For this problem the single frequency solution is very straight-forward to compute and can be reduced to solving a four dimensional matrix system. The time-dependent solution is then found by expanding the solution in terms of the single frequency solutions. To calculate the coefficients in the expansion we require a special inner product which in turns is derived from an energy argument. Formally this means that the operator is now self-adjoint and allows us to use Hilbert space theory to write down an expansion. Once the expressions for the time-dependent problem have been written down the numerical calculation of the time-dependent motion is not computationally challenging. We presented some example calculations which showed the effect of an incident plane wave on circular elastic plates of various properties.

# 2. Wave Drift Force in a Two-Layer Fluid of Finite Depth

# 柏木 正(九州大学応用力学研究所界面動力学分野)

Based on the momentum and energy conservation principles, a compact calculation formula is analytically derived for the wave drift force on a 2-D body floating in a two-layer fluid of finite depth. In a two-layer fluid, two different wave modes (the surface-wave mode with longer wavelength and the internal-wave mode with shorter wavelength) exist not only in the incident wave but also in the body-scattered wave, and these wave characteristics are properly incorporated in the obtained formula. It is noted that, unlike the single-layer case, the wave drift force can be negative in the incident wave of surface-wave mode, if the transmitted wave with internal-wave mode is large. Numerical computations are implemented for a Lewis-form body by means of the boundary integral-equation method with Green's function for the two-layer fluid problem. The effects of density ratio, interface position, and body motions on the wave drift force are studied, and some important features are found for two-layer fluids.

# 3. Hydrodynamic forces on a two-dimensional multi-hull structure in waves

### 高木 健(大阪大学大学院工学研究科)

The diffraction and the radiation problem of the two dimensional multi-hull structure is investigated. To obtain this result the scattering matrix theory is applied. The scattering matrix theory is widely used to analyze the wave interaction problem in various scientific fields. The research is focused on the zeros of the wave exciting force and the near resonance, which occurs both in the diffraction problem and the radiation problem. At the zeros of the wave exciting force, the wave exciting force for the overall structure is zero while each demi-hull gets the wave excitation. At the near resonance frequency, the amplitude of traveling wave between adjacent demi-hulls becomes very large and the demi-hulls get very large wave force. A number of simple equations for representing the hydrodynamic properties of the multi-hull structure at the zeros and the near resonance frequency are obtained. The numerical examples show that these simple equations well explain the hydrodynamic forces as well as the wave system among the spaces between the demi-hulls.

### 4. A Strip Method for a Ship Obliquely Moving in Waves

# Faizul Amri Adnan(広島大学大学院工学研究科学生)

Kishev Zdravko(九州大学大学院総合理工学府大学院生)

Lateral drift occurs due to the effects of wind forces and/or wave drifting forces in ships sailing in actual seas. It is important therefore to investigate the influence of lateral drift on seakeeping performance to attain a rational design for ships. The velocity potential is expanded in asymptotic series in power of lateral speed parameter  $\tau$ , defined by eV0/g where  $\omega$ e refers to the frequency of wave encounter, V0 denotes the lateral velocity assumed to be sufficiently small, and g the acceleration gravity. By combining this technique with the strip method, two sets of motion equations of all hydrodynamic force coefficients for ship seakeeping are derived. The first set is for ships without lateral drift which is completely similar to the equations in the New Strip Method, and the second set is for additional motions induced by lateral drift. It is found that all ship motion modes except surge are coupled when the ship drifts laterally in waves.

# 5. Numerical Simulation of Violent Sloshing by CIP Method with Experimental Validation

Evaluation of sloshing loads is a key point in the design of ship liquid cargo tanks since when the tank is excited at

near-resonance frequencies, violent motions of the liquid can occur. This implies large impact pressures and resulting additional forces on the structure, which could possibly lead to structural damage or ship capsize. In this paper a new CFD simulation approach is used to challenge the sloshing problem. The method can treat simultaneously liquid, gas and solid phases. It is essentially a variation of the CIP method with a recently developed CIP-CSL3 scheme for capturing sharply the gasliquid interface. Results by the original CIP method are also presented. Computations for pressure time histories and free-surface profiles in a 2-D rectangular tank are compared to experimental results. Several frequencies and several filling heights are investigated.

### 6. Numerical study on slosh-induced impact pressures on three-dimensional prismatic tanks

Yonghwan Kim (Seoul National University, Korea) Sloshing flows in two- and three-dimensional prismatic tanks are considered in the present paper. A finite difference method is applied for simulating violent sloshing flows and impact occurrence. The computation focuses on the global flow and assumes a single-valued free surface profile. For the simulation of impact occurrence near sloping boundaries, the concept of a buffer zone, previously used for impact simulation on the tank ceiling, is extended to sloping boundaries near the tank ceiling. For validation of the present numerical method, a comparison is made between the computational results for two-dimensional tanks and available experimental data, for which favorable agreement is shown. It is observed that the application of a buffer zone and a time-averaging scheme mitigates the sensitivity to grid resolution and time segment. Impact pressures on sloping boundaries and the tank ceiling for three-dimensional tanks are then compared with the results for two-dimensional tanks, which show higher peak pressures for the case of three-dimensional tanks.

# 7. CFD Simulation of 3-D Water-Entry

# 胡 長洪(九州大学応用力学研究所界面動力学分野)

In this research, we study the dynamics of three-dimensional water entry by means of CFD simulation. Our research interest is the cavity dynamics associated with a complicated 3-D body when penetrating into a free surface. Such water entry problem can be found in some ocean engineering applications, such as accidental dropping of an object from the deck of a platform. In the case, we need to know if such accidentally dropping body can hit the important device installed on the seabed. Our CFD method to challenge this 3D water entry is a CIP based Cartesian Grid Method.

In this presentation, the numerical method is briefly introduced at first. Then an experiment for validation of the numerical code, which is about a cylinder dropped from air with different angles between the cylinder axis and the still free surface, is described. The dropping cylinder event can be divided into 3 phases. The first is the free–fall phase that describes the cylinder moving in air. The second is the water-entry phase that represents the cylinder penetrating the free surface. The third is the submerged phase that means the cylinder fully submerged in the water. The water-entry phase is most complicated hydrodynamic process, which is the target of this research. In this phase, the air cavity formed behind the cylinder and its dynamics are most important phenomena to be predicted. Numerical simulations on the water entry phase for the experimental problem are carried out. Comparison on variation of the air cavity and motion of the cylinder between the computation and the experiment are made.

# 8. A CFD Simulation of Dam Breaking by CCUP Combined with Multigrid Method

# 西 佳樹(九州大学応用力学研究所界面動力学分野)

In order to achieve favorable seakeeping performance, physical phenomena that involve strong impacts due to water clashes with a ship need to be clarified as a multiphase (liquid, gas, and solid) flow field. From this viewpoint, this study concerns a CFD method in which the CIP (Constrained Interpolation Profile) scheme is adapted for calculating advections of momentum, and density, and for capturing a fine structure of free surface. One of focuses of the present work is a solving procedure of a linear system (a simultaneous equation in numerous dimensions). The present work utilizes the multigrid method (MG) as a fast solver, and as a preconditioner in a Krylov subspace method, for solving a linear system derived from a finite-differentiation of a pressure Poisson's equation. This is because computing accurate pressure field is indispensable for estimating hydrodynamic forces acting on a ship, and because a robust solver is necessary especially for solving a

pressure Poisson's equation in a multiphase flow field that contains various values of fluid density (The density of water is about 1'000 times larger than that of air). The developed CFD method is applied to a free surface problem that involves strong water impacts. The result obtained reveals that numerical calculations using the present method can fairly well reproduce free surface variations, and time histories of the measured pressure. The analyzing of iterative operations demonstrates that the MG is able to contribute the improvement of the robustness. Namely, the developed linear system solver is able to converge solutions well even just before, and just after an impact phenomenon.

# 9. Computation of Free-Surface Flows and Fluid-Object Interactions with the CIP Method Based on Adaptive Meshless Soroban Grids

滝沢研二(海上技術安全研究所耐航・復原性能研究グループ)

近年、船舶においても大波高中での CFD の必要性が出てきており、自由海面を含む流体中での流体構剛体連成 問題に対する需要が高まってきている。CIP(Constrained Interpolation Profile/Cubic Interpolated Propagation)法ではこ のような問題に対して直行格子を用いたアプローチを行ってきた。近年複雑形状や複雑海面を効率よく捉えるために ソロバン格子という手法が開発された。この手法は格子間隔を狭くすることで解像度を上げることができる手法の一つ である。しかし通常格子間隔を狭くした場合、それに伴い時間刻みが制限される。そこで格子間隔に時間刻みが制限 されないように、移流項には semi-Lagrangian 法、拡散項にはクランク・ニコルソンを採用した。クランク・ニコルソンは 陰解法で CIP の微分値を利用しない場合、ソロバン格子では一部に線形補間を利用しなければいけなくなる。ところ がここに線形補間を使うだけで解全体が悪くなることがわかった。そこで本手法では一回の繰り返しにおける前の微 分値を利用した preconditionor を使って解を収束させる手法を提案した。これにより、時間刻みの大きなままで CIP を 利用し時間刻みを細かくした陽解法と同程度の精度で計算することができた。また圧力項の陰解法にも同様の手法を 採用しソロバン格子全体を CIP 補間のみで構成することができた。また繰り返し数は3回程度で十分であることがわかった。

# 10. A Simulation of Tidal Current and Ecosystem in Ago bay and its Consideration

正田信治(大阪大学大学院工学研究科学生) 我が国の内湾は特徴ある閉鎖性海域ゆえの静穏から古くから海上交易や漁場として多くの恩恵をもたらし、人々に とって身近な存在であった。英虞湾も代表的な閉鎖性内湾のひとつだが、近年では外海との海水交換があまりされな いために貧酸素水塊や赤潮の発生を引き起こしている。このような背景から本研究では、3次元数値シミュレーション モデルから海水流動・生態系特性について調べた。そして現況特性を把握した上で改善方法として 海水流動の観点から位相差を考慮した海水交換の活性、生態系の観点から上下層海水の入れ替えによる貧酸素水 塊の減少の評価を行い、水環境改善に関する方策を挙げている。

# 11. Experiment of Motions of a 2D Floating Body with Shipping Water

末吉 誠(九州大学応用力学研究所界面動力学分野) 従来型のポテンシャル理論による運動推定計算では挙動の把握に困難が伴う甲板水の打込みを伴う2次元の浮体 運動について数値計算と実験結果の比較を行った.数値計算には粒子法(MPS法)を用い造波機運動のみを与える ことで過渡状態から反射波などの影響も全て取り入れた時間領域計算を行い,その浮体運動計算に対する可用性に ついて検討を行った.その結果,場合によっては実験・計算結果に定性的な一致をみたものの,現状では定量的な 推定,特に漂流力の推定や打込み水挙動について不十分な計算結果となり、より高解像度な計算や流体力の各成 分に関する詳細検討などによる確認作業の必要性が認識された.

以上の講演における討議以外にも懇親会や休憩時間に活発な討議が行われ、少人数(本年度は従来より多少参加人数が増えたが)による集中的、且つ本音での議論を十分に行うことができ、本研究集会の当初の目的を充分に果たすことができた。

平成17年度

# 大 気 海 洋 分 野 共同研究成果報告

九州大学応用力学研究所 松野 健

・目的

東シナ海は、黒潮をはじめ、中国大陸や台湾海峡からの水と物質を受け入れ、豊かな生物相を育んで きた生産性の高い海である。しかし、乱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、東シナ海の海洋環境は変化しつつあり、また近い将来の大きな環境変化 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

<u>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)</u>: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、今年度は長江起源水などの広がり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): 東シナ海と日本海を結ぶ対馬海峡の 海洋構造に注目し、両海域の海水交換過程の一つとして、特に同海峡底層に現れる低温水の挙動を調べ、 同海域底層で比較的古い低温高塩分水と、新しい低温低塩分水が分布することを示した。

<u>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)</u>: FVCOMと、Princeton Ocean Model (POM)を組み合わせた数値モデルを構築して、前線渦を伴う東シナ海黒潮前線の時空間変動を再現し、特に前線渦の発達に伴う前線横断方向の海水輸送量を定量的に評価した。

<u>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)</u>:九大応力研で投入した塩分・水温センサー付の漂流ブイ観測のデータに、同時期の衛星クロロフィル-*a* データ、船舶観測データを組 あわせて、クロロフィル-*a* の挙動と中国沿岸水あるいは黒潮系水の関係を明らかにすることを目的した。 低塩分水の広がっている海域で、クロロフィル-*a* 濃度の上昇が見られた海域の亜表層には硝酸やリンが 豊富に存在し、上層へ供給されていた可能性が示された。

<u>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)</u>: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よる詳細な水塊解析とその変動の解明を 目的とし、東シナ海陸棚域での観測から、長江の旧河口域付近の海底からの湧出水の存在の可能性を 示し、それと長江起源水、黒潮水が混合した水が日本海でも検出できることを示唆した。

・ まとめ

東シナ海の環境に大きな影響を与えている長江起源水の分布は塩分によって把握できるが、その広が り域の中でクロロフィル濃度の高い海域が観測されている。数値モデルでも長江起源水の広がりは概ね 再現できているが、今後、栄養塩供給についても検討が期待される。陸棚上の水と黒潮水との相互作用 は栄養塩の供給を初めとする物質循環に重要な役割を果たしているが、高精度の数値モデルによる両者 の相互作用過程の再現は定量的な評価に繋がるものである。対馬海峡での水塊構造の変動を捉えること は、東シナ海で起こっている現象の出口調査のようなもので、東シナ海の環境変化を監視する意味で重 要な場所である。今後、長江起源水域の生物生産を支える栄養塩の起源、また、長江起源水がどのよう な経路でどの程度対馬海峡にやってくるのか、化学的トレーサーや生物基礎生産の評価などを通して、 物質の動きを追うとともに、数値モデルによる実験によって、陸起源物質の挙動など、東シナ海の海洋 環境変動を支配する要素について定量的な評価がなされることが期待される。

愛媛大学沿岸環境科学研究センター 郭 新宇

研究目的

三峡ダムと長江分水プロジェクトの影響で、東シナ海に流入する長江水が減り、渤海に流入する黄河 水が増えることが考えられる。このような自然改造は、東シナ海、黄海、渤海の海洋環境に大きな影響 を与えるであろう。特に、生物生産性の高いこれらの海域にとって、栄養塩環境がどのような影響を受 けるかは、水産資源の行方を左右する重要な問題である。しかし、この問題に対する中国での環境アセ スメントは、河川域と陸域を中心に行われており、海洋への影響はあまり重視されていなかった。

一方、近年東シナ海における栄養塩起源に関する研究が進み、長江をはじめとする陸起源の栄養塩の 他、黒潮中層や台湾海峡などの外洋を起源とする栄養塩も大量あることがわかってきた。このことは、 これらの海域における栄養塩環境の変動予測に、陸域からの供給量変動のみではなく、淡水供給の変化 による海域の流動変化に起因する外洋起源栄養塩の変化も考慮する必要があると言える。

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。

研究方法

既存の数値モデル(Guo et al., 2003, JPO)は黒潮 の季節変動に着目して設計されたために、河川流量の 影響は塩分を月平均値に緩和させる方法で対応して いる。本研究ではこの部分を改良し、長江と黄河の河 川流量を直接的にモデルに導入し、渤海、黄海と東シ ナ海の塩分の季節変化を再現してみた。モデルの領域 は図1に示す海域である。モデルを駆動する外力とし て月平均の風応力、熱フラックスと海面水温を使用し ている。また、河川流量は月平均値をモデルに入れて いる。外洋との境界では、既存の数値モデルの月平均 結果に加えて、潮汐を新たに入れている。計算は既存 モデルの冬の結果からスタートし、2年間を積分し、2 年目の結果を計算結果として保存し、解析を行った。 計算結果



図2に表層における塩分の水平分布図を示す。4つの河口付近で顕著な低塩分水が出現している。そのうち、長江河口付近では30 psuより低い塩分を有する低塩分水は岸の近くに留まらず、済州島付近や台湾海峡にまで及んでいる。また、この低塩分水の分布は季節によって大きく変化している。冬には 長江河口北部から台湾海峡までの中国沿岸に沿って細長い帯状になっている。春になると、南下が弱まり、低塩分水は長江河口北部に集中している。夏には、低塩分水は北東方向に広がり、済州海峡を通して、対馬海峡にまで達している。秋には、低塩分水は中国沿岸に戻り、長江の北部に留まっている。 図2に示された計算結果は過去の計算結果(Chang and Isobe, 2003, JGR)とよく似ている。これは 数値モデルの基礎になる部分(POM)が同じであることから当然の結果とも言える。また、図 2 の計 算結果は Chang and Isobe (2003)に示された塩分分布の気候値と Zhu et al(2005, http://www.riam.kyushu-u.ac.jp/soshiki/Projects/oa/MEEAMS/top.html)の長江河口付近での観測結 果ともよく似ている。今後、このモデルを利用して、三峡ダムと長江分水プロジェクトの影響を調べる 予定である。



図2.河川水をモデルに導入した場合の2月、5月、8月、11月の表層における塩分分布

# 成果報告

Guo,X., Y. Miyazawa and T. Yamagata (2005): Seasonal variation of Kuroshio onshore flux in the East China Sea, Workshop on the Marine Environment in the East Asian Marginal Seas----- Transport of materials -----, Nov.16-17, Kyushu University, Fukuoka, Japan.

Qiang Wang, Xinyu Guo and Hidetaka Takeoka(2005) : Wind-dependence of Yellow River plume path in the Bohai Sea, Workshop on the Marine Environment in the East Asian Marginal Seas------ Transport of materials -----, Nov.16-17, Kyushu University, Fukuoka, Japan.

# 対馬海峡底層における水塊特性

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構造に大きな影響を与え ている. Isobe et al.(2002JGR) によると、河川から黄海・東シナ海へ流入した淡水の 7 割以上が対馬海峡を通過 し日本海へ流入していることが報告されており、この淡水流入によって、夏季から秋季にかけて、対馬海峡の特に 上層において低塩分化することが知られている.一方,初冬から冬季にかけて、海面冷却の効果によって、表層混 合層が発達し、特に東水道 (最大水深約 100m)では、海底付近まで混合される.

しかしながら,2004年初冬の対馬海峡東水道底層において,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種類の水塊を観測した.本研究では,東シナ海と日本海との海水交換過程の一つとして,この底層 水塊の特性に着目する.

# 2 観測・データ

2004年11月から12月にかけて,水産大学校練習船「天鷹丸」によって,対馬海峡とその周辺海域(図1)における CTD(水温: T,塩分: S,溶存酸素: DO)・クロロテック (クロロフィル a: Chl-a) 観測が行われた. 塩分・クロロフィル a 資料は較正済であるが,溶存酸素資料は較正されていないため,参考資料として用いる.



図 1: 観測点と ADCP によって観測された 10m 深における流速ベクトル.実線と灰色線は海底地形を表し.それ ぞれ 200m と 50m 間隔.

# 3 結果と考察

2004 年 11 月 25 日から 26 日にかけて, CL05 底層に低温 (18°C 以下) 高塩分 (34.6 以上) 低酸素水が観測された (図 2 上段). 顕著ではないが, CL03 底層も同様の傾向であった. これらの水塊は Chl-a 濃度が低く, その上層 には Chl-a 濃度の極大が観測された.

11月30日に,N03底層を中心として,N02-04に低温高塩分低酸素水が広く分布していた(図2中段).また,約5日前のCL測線で観測された底層水塊と比べ,高温低塩であった.

11月30日から12月1日にかけて,CL04底層に低温(18°C以下)高塩分(34.6以上)低酸素水を観測した(図2下段).この水塊は、約5日前のCL測線時よりも約15km南で観測され、底層水塊中心は、より低温低塩分であった.一方、CL06,07底層には、低温低塩分水が分布していた。この水塊の塩分極小は、CL07に観測された(34.0以下).

CL 測線上の表層混合層の水温は,約5日前と比べ,約0.5°C 減少した.また,底層の低温高塩分水は,約5日前 よりも厚く,上層に影響を及ぼしていることが考えられる.その一つとして,CL04上層に Chl-a 濃度 1.4mg/m<sup>3</sup> 以上の極大を観測した.また,航走 ADCP 観測結果から (図1),低気圧性渦が低温高塩分水を伴っていることが 示唆された.

CL, N 測線で観測された底層の低温高塩分水は,北太平洋亜熱帯モード水 (NPSTMW)の水塊特性と一致する. さらに,これらの底層水は DO 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.

一方, CL07 底層の低温低塩分水は, DO 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が混合水として説明できる.ここでは示さないが,密度フロントに沿った低塩分水の下層への供給が,HC 測線上で起こることが考えられる.



図 2: CTD 観測結果 (右図: 水温, 左図: 塩分).

# 4 研究組織

滝川哲太郎(水大校),尹宗焕(九大·応力研),森本昭彦(名大·HyARC),鬼塚剛(水大校)

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.<u>はじめに</u>

ー昨年からウェブ[http://fvcom.smast.umassd.edu/FVCOM/]上で無料配布されている Finite Volume Coastal Ocean Model (FVCOM, Chen *et al.* 2003)と、Princeton Ocean Model (POM)を組 み合わせた一方向入れ子モデルを構築して、前線渦を伴う東シナ海黒潮前線の時空間変動 を再現した。これによって、特に前線渦の発達に伴う前線横断方向の海水輸送量を定量的 に評価した。

# 2 . <u>FVCOM</u>

FVCOM は三角形セルの非構造系格子を用いる三次元の有限体積法数値モデルである。 鉛直方向は 系で分割し、また Mellor-Yamada スキームを使う鉛直粘性項など、POM と連 結しやすい構造を持つ。この利点を生かして、両者を結合させた一方向入れ子モデルを構 築した。このモデルの主なアドバンテージは、POM を大領域の計算に用いることで大規模 な陸棚循環が効率的に計算できること、小領域(FVCOM)の等深線に沿って配置した三角形 セルが、陸棚縁辺部の複雑な海底地形をほぼ完璧に表現すること、両領域の接合部で FVCOM と POM の格子幅を合わせれば、構造系格子同士の入れ子モデルに不可避な変数の 空間補間が不要になることである。

# 3.計算手順

POM を用いた大領域(Fig.1 の Region 1)の結果は、すでに公表している Chang and Isobe (2003)を参照されたい。安定した年変動が現れる 8 年めまで計算を行い、その後の 2 年間 で時々刻々変化する計算結果(流速・水温・塩分・水位)を、FVCOM を用いた小領域(Fig.1 の Region 2)の境界条件とした。Fig.1 に一例を示す FVCOM の三角形セルは、陸棚縁辺で 3km 程度の幅を、POM との接合部は POM と同じ 10km 程度の幅を持つ。FVCOM の海表 面には、大領域と同じ風応力や熱・淡水フラックスを与えている。

# 4. 結果

Fig.2 は、陸棚縁辺の海底地形急変部で発達した前線渦を表す計算結果の一例である。陸 棚方向に伸びた暖水舌が切離し、陸棚上へ黒潮系水を放出している。気象庁の定点観測ブ イで得た水温時系列と、同じ位置でのモデルの水温時系列は、似た周期や振幅を持つ。す なわちモデルは、現実の黒潮前線の時空間変動を良く再現している。

このような渦の発達・崩壊過程に伴う前線横断方向の海水交換過程によって、黒潮域から陸棚上へ運び込まれる海水量をトレーサー実験によって定量評価した。小領域の 200m 等深線に沿って濃度 1.0 のパッシブトレーサーを固定し、FVCOM で求めた流れによって広がるトレーサーの時空間変動を得た。その後、水深 200m 以浅の陸棚上におけるトレーサ ー総量の時間微分をとることで、黒潮域から陸棚域へ運び込まれる海水輸送量 0.85 Sv を得た。

# 5. <u>おわりに</u>

FVCOM は、ここで示した海底地形急変部における渦の生成・崩壊過程への適用以外に も、高潮や潮汐フロントなど、水深分布や海岸形状が重要な多くの沿岸・陸棚域のモデリ ングに有効である。現在、私たちの研究グループが進めているこれらの成果を、今後も順 次公開していきたい。

# 参考文献

Chang, P.-H. and A. Isobe (2003), *J. Geophys. Res.*, *108*(C9), 3299, doi:10.1029/2002JC001749. Chen, C., H. Liu, and R. C. Beardsley (2003), *J. Atmos. and Oceanic Tech.*, *20*, 159-186.



**Fig.1** 大領域(Region 1)と小領域(Region 2)の配置。右図で は、地形の急変部を拡大して、等深線(実線 + トーン)に沿 わせた FVCOM の三角形セル(白線)の配置を例示した。



**Fig.2** 6月22日から24日に相当する計算日における10m 深の等温線分布。上図の矩形範囲を拡大している。太い 破線は100mと200m(陸棚縁)の等深線。

東シナ海の生物生産には、長江河川水の流入や黒潮域で起こる湧昇による栄養塩の供給が関連していると考えられている。本研究では、河川水の影響が最も大きくなる夏季東シナ海北部の陸棚域表層で、2002 年と 2004 年に行われた塩分水温センサー付の漂流ブイ観測のデータと、同時期の衛星クロロフィル a データ、船舶観測データをあわせて利用しクロロフィル a の挙動と中国沿岸水あるいは黒潮系水の関係を明らかにすることを目的とした。

九州大学で放流した漂流ブイの位置情報と海面下約 0.5 m に設置されたセンサーで測定された塩分 と水温の 1 時間間隔のデータを利用した。また、同時期に得られた人工衛星搭載のセンサーSeaWiFS のクロロフィル a データ、センサーAVHRR、MODIS の海面水温データを利用した。さらに、2002 年は 白鳳丸、2004 年は陽光丸で観測された CTD による水温、塩分、クロロフィル蛍光、さらに採水による 栄養塩濃度やクロロフィル a 濃度のデータも利用した。

2002 年 9 月は、衛星クロロフィルaの高い海域(0.5 ~ 5µg<sup>1-1</sup>)が長江河口域から北東の長江海台 へ伸びており、長江海台の北東には 2µg<sup>1-1</sup>以上のクロロフィルaの高い海域が局所的観測された。この とき長江海台では鉛直混合が起こっており、周辺の表層へ栄養塩が供給されていた可能性が考えられた。 また、チェジュ島の北岸では 9 月初旬から下旬にかけてクロロフィルa濃度の増加が見られた。ここで は水温が徐々に低下しており、夏季の成層構造が崩れ下層から上層へ栄養塩が供給されていた可能性が 考えられた。

一方、2004 年 7 月中旬から 8 月初旬では、長江河口域から南東に衛星クロロフィル a 濃度の高い 海域(0.5~5µg l<sup>-1</sup>)が舌状に広がっていた。長江海台から放流された漂流ブイは、このクロロフィ ル a 濃度の高い海域やその周辺を約 3 週間かけて南東へ移動した。その後約 10 日間北上し、対馬海 峡付近で回収された。このクロロフィル a の高い海域には、高温低塩分の長江起源の水が存在し、そ の周辺には低温低塩分で衛星クロロフィル a 濃度が 2µg l<sup>-1</sup>以上の北部沿岸水などが局所的に存在し た。これらの水塊は舌状の海域が南東へ移動し北上する過程で黒潮系水との境界付近へ移動し、そこで はクロロフィル a 濃度が上昇していた。このとき長江起源の水には硝酸がやや残っていたが、リンは ほぼ枯渇していた。一方、クロロフィルa濃度の上昇が見られた海域の亜表層には硝酸やリンが豊富に 存在し、上層へ供給されていた可能性が考えられた。

この2回の観測の結果から、夏季でも長江からの河川水流入量が多い7月から8月と、流入量が少な く、冷却が進んでいる9月とでは、栄養塩供給のしくみが異なっていたと考えられた。

# 化学的トレーサーを用いた東シナ海の水塊構造解析

富山大学理学部 張勁

# 目的

東シナ海は,広大な大陸棚を持つ縁辺海であり,沿岸海洋における物質循環メカニズムや,人為 起源物質による縁辺海洋環境への影響を視野にいれた沿岸 - 外洋間の相互作用等の研究に格好な フィルードである。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やそれらの東シナ 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,係留等時空間的変化を捉える観測にも応用が難しい。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。

# 研究の具体的方法

1. 東シナ海及び日本海の海水試料の採取及び化学分析

a) 東シナ海において海水サンプルの採取を行い, 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

c)長江水の採取を行い,栄養塩・酸素同位体組成及び溶存態希土類元素濃度の測定を行う

2. 東シナ海における詳細な水塊解析とその変動解明

a)化学分析データから,東シナ海の水塊構造と,長江水及び黒潮の混合及び対馬暖流水の水塊特性を考察する

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と組み合わせ,より 詳細な水塊解析とその変動解明を行う

c)得られたデータセットをベースに,数値モデルを構築する

# 結果及び考察

1. CTD と化学トレーサーからみる水塊の特徴

東シナ海の水塊は,(1)黒潮水,(2)北太平洋中層水,(3)沿岸水である。特に,CTD と溶存酸素 濃度から,密度 = 24 or 24.5(水深40-100m)には,溶存酸素の低い水塊が存在し,この水塊の滞 留時間は比較的長いことが推測された。また,この水塊は密度躍層(水深約 20m)以深の東シナ海陸 棚上に存在し,化学トレーサーの栄養塩Nが高いため N/P 比(17)は,周囲の海水(14)よりも高く,ま た酸素同位体比は,他の水深(0~+0.2)ではみられない負の値(-0.2)を示した。そこで,この水塊は, 陸起源水(低塩分)の影響を受けており,酸素が消費された水塊であることがわかった。また,低塩分 特徴を示す水塊の分布を,図1に示した。このことから,この水塊は,長江の旧河口域付近から染み出

した海底からの湧出水(陸起源地下水と海水 が混合した循環水:海底湧水)ではないかと推 測された。

2. 希土類元素濃度からみる低塩分水の起源

東シナ海の水塊の希土類元素パターンを 図 2.に示した。ここでは,陸棚上に存在する水 塊をShelfA水(水深40m以浅)とShelfB水(50m - 90m)とした。図 2.により,ShelfA 水のパター ンは濃度が高く,また右上がりであり,東シナ海 に存在するそのほかの水塊(長江水CJ-River, 黒潮水 KWC,北太平洋中層水 NPIW,降雨



図1.陸棚における低塩分水の分布

Rain)による混合で形成されたと考えるのは困難である。一方,東シナ海陸棚上の堆積物間隙水(Pore



Water)のパターンは ShelfA 水より も濃度が高かった。そこで,この間 隙水と黒潮水,および長江河川水 などの混合により ShelfA 水が形成 されたと考えられる。このことは先 に述べた仮説「低塩・低溶存酸素 水塊の起源が海底からの地下水 湧出の影響を受けている」を示唆し ている。また,ShelfB 水もこの ShelfA 水と黒潮水や長江水の影響 を受けて形成されていると考えられ た。今までの研究(八田ら,2002) により,この ShelfB 水は日本海海 盆へ流入していることが指摘されて

図2. 東シナ海へ流入する水塊の希土類元素パターン比較

# 成果報告

- <u>Zhang</u>, J. (2005) Submarine groundwater discharge and its impact on the marine environment, Advanced Training Workshop on Southeast Asia Regional Carbon and Water Issues, Southeast Asia Regional Committee for START, Taiwan, November.
- <u>Zhang, J.</u>, Hatta, M., Bai, L. and Matsuno, T. (2005) Rare earth elements in the marginal seas: Water characterization by chemical tracers. Abs., Workshop on the Marine Environment in the East Asian Marginal Seas -Transport of materials-, 61-62.
- 3. <u>Zhang, J.</u> (2006) Do We Need a Global SGD Network? The Role of Submarine Groundwater Discharge in Oceanography, OS15B-08, 2006 Ocean Sciences Meeting, Hawaii, December.

おり,日本海へ海底湧水や長江水などの淡水が流入していることが推測された。

# 有明海における物質輸送の数値シミュレーション

熊本県立大学 環境共生学部 藤家 亘

目的

近年、有明海において赤潮・貧酸素水塊発生の大規模化などが問題となっている。これらの原因 は有明海における潮汐振幅の減少に伴って潮流流速が減少することで、海水交換能力が低下し、赤 潮発生件数が増加しているという意見があるが、いまだ実態は明らかではない。この問題を解決す るために、有明海において栄養塩などの物質輸送を明らかにすることは、急務である。

熊本県立大学環境共生学部海洋生態学研究室によって、有明海北部における塩分,水温,クロロフィルaの定点観測が毎月行われており、過去5年間の観測結果において、有明海北部海域で秋季においても高濃度のクロロフィルaが観測されている。本研究では秋季における有明海北部の赤潮発 生原因を究明することを目的とする。

方法

本研究の対象海域は熊本市以北の有明海北部海域である。熊本県立大学環境共生学部海洋生態学研究室によって観測された 2004 年 11 月 6 日と 17 日の両日の塩分・水温場を再現するために、 Princeton Ocean Model (以下 POM)を用いた数値計算を行った。POM には嘉瀬川,六角側,矢部川, 筑後川,菊池側 1 級河川の 2004 年 11 月における河川流量を代入した。六角川と嘉瀬川については 河川流量のデータが決定されておらず、国土交通省武雄河川事務所による暫定データを用いた。

本研究における対象海域内の海上風風速・風向を観測したデータは存在しない。そこで、海上風 風速が陸上風風速の1.5倍程度であるとし、AMeDASによる陸上風風向風速観測データから海上風を 計算した。対象海域周辺には計8ヶ所のAMeDAS観測所が存在する。本研究では山上に観測点があ る場合は除外し、島原,白石,大牟田,岱明における陸上風観測データを用いた。計算した2004年11 月6日および17日の海上風から海面風応力を計算し、POMに代入した。海面熱収支をPOMに与え、 予報モデルとして計算を行った。

計算格子間隔は 500m とした。鉛直方向には 27 層で計算した。これにより、海面下 10m までの最 大層厚は 50cm、10m 以深においては 5m となり、表層を高解像度で計算できる。総計算時間は 3 年 間とした。計算時間間隔は 2 秒である。

結果

熊本県立大学環境共生学部海洋生態学研究室によって 2004 年 11 月 6 日に海面下 2m で約 55.5 μ g/Iの高濃度のクロロフィル a が観測された。しかしながら、2004 年 11 月 17 日の観測結果による と、クロロフィル a 濃度は 10 μg/I に低下した。2004 年 11 月 6 日は表層 2m 以浅に低密度な海水 が存在し、有明海湾奥から有明海北部海域中央部まで広がっている。この低密度水塊と前述の高濃

度のクロロフィルaの存在場所は一致しており、このような水塊構造が高濃度のクロロフィルaが 存在する原因となっていると考えられる。2004年11月17日は鉛直密度構造も暖混合型に移行し、 表層の低密度水塊は消失した。

2004 年 11 月 6 日における密度場の計算結果では、表層 5m 以浅に低密度水が存在し、観測結果と 一致していた。しかしながら、低密度水塊は観測結果よりもさらに南方に広がっていた。この相違 については、海上風がよく再現できておらず、海面応力が現実と異なることなどが考えられる。2004 年 11 月 17 日における計算結果は暖混合型の密度分布を有しており、観測結果をよく再現していた。

海上風の計算結果によると2004年11月17日は風速約1.5m/sのほぼ一様な北風が吹いていた。 残差流の計算結果によると、同日は海面下1mまでは海上風に対応して、南下する残差流が見られた。 海面下1m以深では吹送流の影響は弱く、島原半島に沿って南下する残差流の分布が見られた。 下層においては残差流は有明海湾奥向かって流れていた。これに対して、2004年11月6日は有明 海北部海上において風速約1m/sのほぼ一様な南東風が吹いていた。上層の残差流場において吹送 流は支配的ではなく、海上風風向には対応していなかった。海面下1mにおいて対象海域中央部に は筑後川河口部周辺から長崎県側に至る南西向きの残差流が見られ、海面下3mには北東方向に向 かうの残差流が見られた。

考察

2004 年 11 月 6 日において計算結果と観測結果を比較すると、計算結果に見られた対象海域中央 部の筑後川河口部周辺から長崎県側に至る南西向きの残差流が流れる領域におけるクロロフィル a 濃度は低く、2.5µg/1以下であった。この残差流が流れる領域よりも湾奥側に高濃度のクロロフ ィル a が分布していた。この残差流場が崩れ、暖混合型の海水構造に至った 2004 年 11 月 17 日に おいてはクロロフィル a 濃度は 10µg/1以下となった。これらのことから、前述の残差流場が高濃 度のクロロフィル a 領域を対象海域湾奥部に形成する要因となったことが考えられる。

11 月は海面冷却の効果から基本的には海域は混合型の密度構造にあると考えられる。しかしなが ら、海上風が弱まることによって対象海域中央部に海域を横断するような残差流が支配的となり、 筑後川からの栄養塩が広く輸送され、この残差流と海岸線によって囲まれた奥部領域にクロロフィ ル a が高濃度で分布すると考えられる。

今後は 2004 年 11 月 6 日と 2004 年 11 月 17 日における残差流の計算結果を用いて、それぞれの 日におけるクロロフィル a の分布をボックスモデルにより再現し、有明海における秋季赤潮形成の 解明を行う予定である。

# 物理 - 生態系結合モデルを用いた日本海低次生態系に関する研究

水産大学校水産情報経営学科 鬼塚剛

### 1.目的

日本海においては、九州大学応用力学研究所のグループが高解像・高精度の3次元海洋循環モデル(RIAM Ocean Model) を開発しており、日本海における多くの物理現象の再現に成功している。近年、地球温暖化や中国三峡ダム建設に伴う日 本海への影響が懸念されているが、これまでのところ日本海では観測やモデリングの容易な物理過程の研究が先行してお り、上記懸念に対する物質循環への影響に関する研究は少ない。本研究の目的は、物理-生態系結合モデルによって、日 本海低次生態系をめぐる物質循環過程を明らかにすることである。ここでは、朝鮮半島東岸での湧昇及び対馬海峡からの 物質フラックスの低次生物生産過程への影響について検討する。

### 2.モデル

本研究では、Noh 型の混合層モデル(Noh and Kim, 1999)を組み込んだ RIAM Ocean Model に、窒素循環を考慮したコン パートメント4つのいわゆる NPZD (Nutrient:DIN, Phytoplankton:PHY, Zooplankton:ZOO, Detritus:DET)モデルを結合 させ、物理場と生態系をオンラインで計算している。モデルの水平格子は 1/6°、鉛直方向には 46 層とし、層厚は表層 から 50m までは 5m、50m から 150m までは 10m と表層近くで解像度を上げている。対馬海峡での DIN と PHY は WOD1998 の 気候値から作成し、ZOO と DET は 0nitsuka and Yanagi (2005)を元に PHY の 1/2 とした。計算は、物理モデルのみで 12 年間行った後、結合モデルで4年間行い、擬似定常の結果を得た。さらに、朝鮮半島東岸での湧昇及び対馬海峡からの物 質フラックスの影響について調べるために、図1に示す3つの起源から仮想トレーサーを投入し、12年間計算を行った。

### 3. 結果と考察

対馬海峡における通過流量と窒素輸送量の季節変動を図2に示す。Hirose(2005)によると対馬海峡の海底地形はデータ セットによってかなりのばらつきがあり、対馬海峡の流動構造はそれを反映してしまう。1/6度モデルでは地形データは 解像度の粗い ETOP05を元に作成されていたため、対馬海峡を通過する流量は本来大きいはずの西水道で小さい値となっ ていた。本研究では、海底地形を対馬海峡の地形を修正することで東西水道の流量の比は観測値と近い値となっている。 また、窒素輸送量は流量の大きい秋に最大となるが、流量の季節変動と必ずしも一致しておらず、相対的に流量の大きい 夏季よりも窒素濃度の高い冬季に輸送量が大きくなっている。

仮想トレーサー投入開始から 12 年間の日本海表層 DIN 平均濃度変動を図 3 に示す。投入後数年間は急激に濃度が増加 し、その後期間を通じて徐々に増加している。これは各トレーサー供給源からのトレーサー加入量に対して津軽・宗谷海 峡からの流出量や下層への沈降フラックスが少ないためである。今回計算は 12 年間しか行っていないが、積分期間を延 ばせば 12 年後以降も徐々に濃度は増加していくと考えられる。

次に、トレーサー加入後の時空間変動を確認する(図4)。等値線は、各トレーサー供給源から供給された DIN を使用し た一次生産量の全一次生産量に対する割合60%を示している。この等値線よりも南では、全一次生産量の6割以上が3つ のトレーサー供給源からの栄養塩を消費していることになる。図4によると、日本海南西部は2年後にはほぼ6割以上と なり、4年後には極前線以南の日本海南部海域を占めている。極前線以南の日本海南部海域の物理環境は対馬暖流による 影響を受けているが、その影響は物理環境だけでなく、生物・化学環境にも及ぶと考えられる。また、12年後は4年後 と比べ、日本海東部で若干北に拡がった程度で4年後の結果とあまり変わらない結果となっている。これは、日本海北部 海域では冬季の混合層が発達するため、一次生産に使用される栄養塩は有光層以深からの供給に依存していることが原因

である。以上の結果から、対馬海峡からの物質フラックスに変化が生じた場合、日本海南部海域には数年以内と比較的速 やかに、北部海域には数十年かけて徐々に拡がっていくものと考えられる。

4.今後の課題

対馬海峡からの物質フラックスの重要性について明らかになったが、対馬海峡における生物・化学データが不足してい るため、モデル結果の検証ができていない。今後は、対馬海峡において物質輸送量を推定するための生物・化学観測を行 う必要がある。また、日本海では春と秋の年二回植物プランクトンプルームが発生しており、その時期や規模は経年的に 変化していることが報告されている。この経年変動の要因や、近年注目されてきている大気起源の物質の海洋低次生態系 への影響についても今後明らかにしていきたい。

5.研究組織

鬼塚剛 水産大学校 助手 研究代表者:数値実験,データ解析柳哲雄 九州大学応力研 教授 所内世話人:データ解析



図13つのトレーサー供給源。EK では70m 深の鉛直流速が 上向きのときのみ負荷される。



図 3 日本海 100m 以浅における平均トレーサー濃度の時 間発展。



図2 月平均の対馬海峡における流量と窒素輸送量。



図4 トレーサーによる一次生産量の割合が6割となる領 域の時間発展。等値線より南は6割以上となっている。 国土技術政策総合研究所 沿岸海洋研究部 日向 博文

1.目的

2000-2001年の冬季に相模湾において HF レーダー観測を行った .HF レーダー観測データ,および人工衛星画像 (NOAA/AVHRR)解析の結果,黒潮が B 型流路をとる場合,北日本上空を 10 日程度の周期で通過する低気圧による 風速場変動に対応して黒潮前線が内部変改半径程度のスケールで岸沖方向に離接岸を繰り返し,その結果,相模 湾内の流況も 10 日程度の周期で大きく変化することが明らかとなった.日向ら(2003)や Hinata et al. (2005) は,これらの観測結果から,海上風変動に対応して沿岸湧昇/沈降が伊豆半島沿岸部で発生し,その結果,黒潮 前線が離接岸し相模湾内の流動構造が変化するものと推測した.しかしながら,そのメカニズムの検証について は観測結果だけでは不可能である.さらに,HF レーダーデータや人工衛星画像は海洋のごく表層の限られた情報 であることから,総観スケールの風速場変動に対する黒潮内部領域の応答過程や,相模湾内部の流況変動過程に ついては未解明のままであった.そこで,本共同研究では,これらの観測によって明らかになった課題,即ち, 風による黒潮系暖水流入メカニズムの検証,および総観スケールの風速場変動に対する黒潮海域と相模湾内流況 の応答過程について,数値実験によって明らかにすることを目的としている.

### 2.数值実験概要

数値実験に用いた数値モデルは POM である.計算領域は相模湾を含む東西約270km,南北420kmの範囲であり, 水深は500m メッシュデータ(J-EGG500,JODC)に基づいて作製した.ただし,数値計算の打ち切り誤差を小さくす るために若干のスムージングを施し,また最大水深を1000m としている.水平方向の格子間隔は2.5km であり, 鉛直方向は 座標で21 層に分割した風に対する黒潮前線および湾内流動の応答を調べるために表層付近の解像 度を高くしており,第1層の厚さは最大で2.0m程度となっている.

水温の初期条件は,1999年12月に東経137.5度線に沿って北緯30.0から34.0度の範囲で行われたXBT 観測 データ(JODC)に基づいて作製した.黒潮は東西境界において流入流出条件を与えることによって駆動した.東 西境界における流速の東西成分の分布は水温,塩分(34.7)の初期条件に基づいて,力学計算を行って求めた. 数値計算は100日間行い,90日から100日までの計算結果を解析に使用した.

本数値実験における風応力場は,平均風速場と EOFw1 (風速場変動の EOF 第1モード)に基づいて作製した. まず,各観測地点における平均風速と EOFw1 の固有ベクトルを,観測地点からの距離に反比例する形の関数を用 いた客観補間法によって計算格子点上に空間補間し,さらに,EOFw1 の振幅を正弦関数を用いて周期 10日で規則 的に変化させることによって実際の風速場変動を模擬した.

### 3.主要な結果と今後の課題

POMを用いた数値実験結果に基づいて,期間1に発生した大島西水道からの周期的な暖水流入の 発生メカニズムや風速場変動に伴う黒潮流域や相模湾の内部領域の応答過程について調べた.そ の結果,以下のことが明らかとなった.

HFレーダー観測期間では,黒潮は紀伊半島沖合で離岸し,相模湾の沖合北緯32度付近で急激に その進路を北北西方向に変え,伊豆半島に接近した後,再び流路を東北東へと変化させていた. この間,移動性の低気圧が周期的に北海道上空を通過し,これに対応した形で相模湾周辺では8-11 日の周期で風速場が大きく変動していた.移動性の低気圧が北海道付近に位置している時期,相 模湾周辺では,西北西-西南西の風が支配的であった.石廊崎沖では,この風速場による沖向き の表層エクマン輸送によって黒潮前線が離岸し,その結果,湾内への黒潮系暖水流入は消滅し, 代わりに駿河湾沖合から低温沿岸水が西水道を通じて流入する.一方,低気圧が北海道上空から 遠く離れ大陸性の高気圧が支配的になると,相模湾周辺では北北東-東の風が支配的となる.そ の結果,岸向きのエクマン輸送が生じ黒潮前線は石廊崎に接岸する.そして,高温の黒潮系暖水 が西水道から湾内へ流入し,湾内における循環流も発達する.風速場変動に伴う黒潮前線の離接 岸距離は概ね内部変形半径と同スケール(20km程度)であるが,黒潮流軸はほとんど動かない.

石廊崎沖表層における力学バランスの検討から,風速場変動に対する黒潮前線の応答に対して, 非線形移流項や非地衡流圧力勾配項が大きな働きをしていることが明らかとなった.現時点では 詳細については不明であるが,伊豆半島沖合黒潮前線付近における非地衡流圧力勾配項や非線形 移流項の変動に対して,伊豆半島周辺の複雑な陸岸,海底地形が大きな影響を与えているものと 考えられる.この点については今後の検討課題としたい.

相模湾内亜表層(水深50-300m)の循環流,水温構造について調べた.平均的には,水深100m 以浅では湾中央部に反時計回りの循環流が,それ以深では時計回り循環流が存在し,反時計回り 順還流の中心部では湧昇流が,相模湾北岸部では沈降流が支配的であること(図1),また,水 深100mでは90-92日(湧昇モード風卓越時)にかけて時計回り循環流が,水深200-300mでは,95-97 日(沈降モード風卓越時)にかけて反時計回り循環流が発生することが示唆された.この時計回 り循環流は,湾中央部の低温水塊によって生じる高気圧性循環流であるものと考えられる.

ここで示した気圧配置の変動パターンは冬季においてしばしば見られることから,冬季に黒潮 が伊豆半島に接近する流路をとる場合,上述したメカニズムよって相模湾内への黒潮系暖水流入 が発生/消滅する可能性は高い.ただし,ここで示した海上風変動以外にも,例えば黒潮前線渦 の通過など相模湾内への黒潮系暖水流入メカニズムが存在するものと考えられる.相模湾への黒 潮系暖水流入メカニズムを総合的に理解していくためには,湾内における流況・海洋構造と合わ せて黒潮の継続的なモニタリングが必要となる.



図1 相模湾内における平均流速と水温の水平分布; (a)50m, (b)100m, (c)200m, (d)300m.

# 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。そこで本研究では、マニラ湾の一次生産の制限元素である窒素に ついて、フィリピン大学から提供されたデータを元に、雨期と乾期の循環機構の違いについて、数値 生態系モデルを用いて解析した。

# 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、図2(a)に示す通り日射量が多く、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3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(Kh, Kv)及び水平移流流速(U)はFujiie et al. (2002)を参照し、Kh は 105 cm2 s-1、Kv は乾期に 1.4 cm2 s-1、雨期に 0.7cm2 s-1、U は乾期に 0.23 cm s-1、乾期に 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 6.7×10-5 cm s-1、雨期に 1.6×10-3 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(900×106 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(600×106 moles y-1)を加えた。植物プランクトンとデトライタスの沈降速度は、ボックス全窒素濃度の保存から、それぞれ 6.7×10-6 cm s-1 and 6.7×10-5 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  $\mu$ 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℃と 551,623 cal m-2 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 日目で定常状態が得られた。



# 3. 結果

図 4(a)は乾期の、(b)は雨期の計算結果と観測値である。計算結果は観測値をよく再現している。雨期 のクロロフィル濃度は乾期の 1.3 倍であるが、基礎生産量は 1.6 倍ある。また、雨期の DIN 濃度は乾期 の 1.9 倍である。これらから、雨期の光合成速度は乾期より速いことが伺える。両時期とも、光合成は 水温や光量には制限されず、DIN 濃度に制限されていた。このため、光合成速度は DIN 濃度の高い雨 期に早かったと考えられる。

図 5(a)は5月の、(b)は11月の、各コンパートメントの濃度とコンパートメント間のフラックスであ る。陸からの負荷と移流・拡散は全窒素濃度を示している。図4に示した通り、乾期のデトライタスは 雨期の1.6倍で、このため乾期の沈降フラックスは雨期より大きい。しかし乾期は成層化していないた め、鉛直拡散によって 80%が上層に戻っている。一方、雨期は成層が発達するため鉛直拡散が弱く、沈 降フラックスのうち鉛直拡散で上層に戻るのは8%である。しかしながら、沈降したデトライタスの 130%が、河口循環流によって DIN の形態で上層に戻っている。すなわち、雨期にはデトライタスは下 層で分解されエスチャリー循環で上層に供給されるのに対し、乾期はデトライタスが上下層を往復し、 上層で分解されている。乾期の主たる DIN 供給源は分解で、雨期は下層である。

乾期の窒素の主経路は、DIN→植物プランクトン→動物プランクトン→デトライタス→DIN であり、河 川流量と基礎生産は小さく、エスチャリー循環が弱い。デトライタスは上下層を往復するが、窒素循環 は上層で閉じている。これと対照的に雨期は河川流量、基礎生産とも高い。このため DIN は素早く植 物プランクトンに取り込まれ、動物プランクトンに補食または枯死し、下層へと沈降する。下層で再生 された DIN は、強いエスチャリー循環によって上層へ戻る。窒素循環は上層だけで閉じず、下層も含 まれている。

ところで、図 5 から、雨期は隣接海域へ流出するフラックスも大きい。このため、ボックス内での TN の平均滞留時間(TN 濃度/外部からの TN フラックス)は、乾期が 378 時間であるのに対し、雨期 は88時間と長い。このため窒素が基礎生産に利用される回数は、乾期よりも雨期の方が多く。乾期は 24回、雨期は10回であ

Observation

6.1(8)

4.5(6)

.

NID

る。よって、窒素が同化 される時間は、乾期は15 時間(378/24)、雨期は8.8 時間(88/10)である。言い 換えると、乾期は窒素供 給量が少ないため、ゆっ くりと何回も基礎生産に 使用されるが、雨期は十 分な窒素供給により、基 礎生産に素早く使われる と共に、流れされる量も多い。

# 4. 研究成果報告

· Mitsuru Hayashi and Tetsuo The YANAGI : numerical ecosystem model of The Manila Bay, 4th Workshop on "Material Transport in the Coastal Seas of Southeast Asia", 2005年1月

· Mitsuru Hayashi and Tetsuo YANAGI Comparison of Nitrogen Cycle in Manila Bay between the Dry and the Rainy seasoun, The 2nd Seminar of JSPS Multilateral Core University Program on "Coastal Oceanography", 2005年8月

### 5. 研究組織

代表者	林	美鶴	
	柳	哲雄	

神戸大学 内海域環境教育研究センター 九州大学 応用力学研究所

助教授 生態系モデル解析 教授 モデル評価

2.56

(14)

19(15)

2(33)

5.3(4)

11(9)

1.49

<u>जे</u>0(4)

85(67)

6.8(5)

1.39

57(44)

26(100)

42

(33)

046

76)

1.75

7(13)



77(100)

46

(60)

0.61

118(153) 5.6(7)

1.38

8(24)

1.37

16(21)

3.78

10(11)

24(31)

23(30)

15(23

1.**81** 

**X**16)

8.1(11) 150(195)

81(61

-1.0(1)

Units fluxes : mol s<sup>-1</sup> (%), concentrations :  $\mu$  M

図 5

Observation

# 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

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2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

海面気圧の変動に対する水位の応答は Inverted Barometer (IB)と呼ばれ,これまで気圧の1hPaの上昇(減 少)が水位の1cm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.しかし,面積が総 観規模の高低気圧のスケールに匹敵する半閉鎖的な日本海では,海盆全体への強制力に対して海盆内の水位 が海峡を通した外海との海水のやり取りによって動力学的に応答(non-IB)すると考えられる Lyu et al(2002, Geophysical Research Letters)は,日本海の平均水位が海盆全体への一様な気圧強制力に対して数時間程度遅 れて応答することを示した.また稲津ら(2005,海の研究)は,日本海沿岸の潮位資料解析により,localな 気圧変動に対する水位の遅れ時間が海峡からの距離にほぼ比例することを発見した.昨年度は,この地理的 な応答の差異を明らかにするために,分担者(広瀬)の順圧モデルに理想的な気圧強制力を与え,日本海の 水位応答を調査した.それにより,この地理的な差異が,総観規模の波長をもつ気圧擾乱が東進することに 起因する1次元過程で説明されることを突き止めた.今年度は,現実的な気圧強制力を用い,海峡や陸棚を 含めた領域の水位応答を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,表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°~165°E,17°~63°N の領域の現実的な海底地形を設定し,ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)の再解析値に基づく気圧強制力(水平解像度 1.125°×1.125°,6時間ごと)を与え,駆動された水位を気圧変動に回帰させ,各格子点における応答を統計的 に求めた(図1).その結果,日本海では IB 応答が成り立たず,応答係数は海盆の東側で大きく西側で小さ くなり,応答ラグは海盆の西側で最大となった.図には示さないが,外海の水深が100 mよりも深いところ では対照的にほぼ IB 応答が成立した.昨年度行った理想的な気圧強制力を用いた実験による応答を図2に示 す.応答係数の特徴は理想的な実験による応答と定性的に一致するが,応答ラグは一致しない.対馬,津軽 および宗谷海峡付近では,応答が陸棚波の特徴を示しながら,それぞれ外海の IB 応答領域と接続している.

### ・考察

一般的に,総観規模の気圧擾乱,特に低気圧は日本海上で発達する.昨年度用いた簡単な1次元モデル(図 3)にこの効果を導入すると,最大ラグをとる海域が海盆中央より西偏することがわかった(図4).比較の ため,擾乱の発達を考慮しない昨年度の実験結果を図5に示す.海峡の摩擦により,海盆に平均的に作用す る気圧強制力に対して海盆の平均水位が遅れて応答することがわかる.一方で,気圧変動に対する水位の長 波応答は気圧擾乱の伝播速度に比べてはるかに速く,海盆内での気圧強制力の偏差に対する応答はほぼ静力 学的であると考えられる.すなわち,海盆内の non-IB 成分は空間的に一様であると仮定できる.図6は,擾 乱を発達させた実験における,海盆の西側と東側の各1点における水位および気圧変動の時系列である.気

圧変動に対し水位変動は遅れて応答しており,時刻ごとで non-IB 成分はほぼ一様である.空間的に一様な non-IB 成分は,海盆西側の振幅が小さな擾乱に対して相対的に大きく影響するので,擾乱の振幅が小さい海 盆西側では,振幅が大きい東側に比べて,気圧と水位両者のラグが相対的に大きく検出されると考えられる.

・まとめ

総観規模の気圧擾乱に対する日本海水位の応答は,擾乱が発達しながら東進することに起因する1次元的 な構造をもつことがわかった.場所によって異なる応答を考慮することにより,日本海内部および海峡域を 含めた領域で,潮位や衛星高度計の資料から気圧変動に関係する成分を効率的に除去することができると期 待される.これらの成果は2005年の13th PAMS/JECSS meeting や日本海洋学会秋季大会等で発表された.



図 1: ECMWF データに基づく気圧強制力によって駆動 された水位を気圧変動に回帰させて求めた応答の分布. (a)応答係数.(b)応答ラグ.(a)と(b)がそれぞれ 1.0 cm/hPa,0 hourのとき IB 応答となる.



図 2: 東進する理想的な気圧強制力(東西波長 4000 km, 周期 6 日,振幅 5 hPa)に対する水位の応答.(a)応答 係数,(b)応答ラグ.



図 3: 1 次元モデルで設定した海底 地形.1000 km の幅をもつ海盆の 両側に浅い海峡を付けた.両海峡 の外側にそれぞれ 10000 km の幅 をもつバッファ領域を取り付けて いる(図には示さず).東進する気 圧擾乱を強制力として与えた.



図 4: 1 次元モデルによる,海盆内 で発達する擾乱に対する応答.振 幅は海盆内で2.5 hPaから7.5 hPa まで線形に増加させた.縦の点線 は海峡部を示す(図3参照).(a) 応答係数.(b)応答ラグ.



図 5: 1 次元モデルによる,一定振幅(5 hPa)の擾乱に対する応答.



図 6: 海盆内で発達する気圧擾乱 (×(-1); 実線) および応答する水位(破線)の時系列の例 .(a) 海盆西側 .(b) 海 盆東側 .

琉球大学工学部 藤井 智史

海洋表層流動場や波浪を従来の観測装置に比して高い時空間分解能で計測できる海洋レーダーは、 沿岸域における海洋現象解明やその予測に有効な観測手段といえる。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が、近年さらに港湾関係などの現業部門にも導 入されるようになってきた。沿岸海況監視システムとして海洋短波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昨年度に引き続き開催した。

研究集会は、平成 18 年 1 月 18 日午後(13:00~18:00) 1 月 19 日午前及び午後(9:00~14:30) 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。研究集会では、まず 主に観測技術・解析手法に関する話題、引き続き各観測海域で取得されたデータの解析に関する話題 が提供された。

まず、琉球大学理学部の久木から、昨年に引き続き、一基の海洋レーダーのスペクトルデータから 波浪方向スペクトルを推定する方法の発表があった。沖縄本島東方沖の観測例に関して、モデル計算 との比較を行った。

次に、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 を考慮した海面散乱断面積や視線流速場についてのシミュレーションを行い、一 次散乱ピークの広がりに関する考察を行った。

国際航業の泉による発表では、海洋レーダーの津波監視の可能性について議論された。海洋レーダ ーの二次元流速場の観測から波高を逆推定した際の精度を過去の地震における津波シミュレーション から検証し、津波監視のための観測時間間隔などのレーダーの技術要件などに触れた。

スリーエス・オーシャンネットワークの勝呂からも、CODAR 社の Sea Sonde レーダーのデータか らの津波情報抽出に関する手法についての紹介があった。先の発表と同様に、一昨年のインドネシア 沖地震による大津波発生が契機となり、海表面に関して流速場や波浪が二次元面として観測できる海 洋レーダーの応用の一つとしての津波観測に大きな期待が寄せられており、今後の技術開発が期待さ れる。

北海道大学低温科学研究所の江淵から、宗谷海峡から北海道オホーツク海沿岸にかけて設置された レーダーの観測も3年目に入り、その結果について漂流ブイ、底面設置流速計などとの比較がされ、 流速構造の季節変動が可能になってきたと報告された。ただ、データ取得率が特定の方向で50%を下 回るレーダー局もあるという問題点も指摘された。

朝日航洋の岩松は、北海道大学大学院水産科学研究科との共同で実施された津軽海峡における 42MHz レーダーでの観測について発表した。レーダー局からのセンター局へのデータリンクに無線L ANを使用したり、無人観測のために発電機を導入するという実際の観測現場の実情が報告された。

海上保安大学校の寄高は、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について、アン テナパターンを修正して再計算することにより、ADPCとの比較結果がRMSで 30cm/s から 10cm/s まで改善されたと報告した。また、流速の鉛直プロファイルとの関係についての考察も行われ

た。

海上保安庁海洋情報部の林王は、海上保安庁が大島と荒崎に設置の相模湾観測用レーダーの状況に ついて報告した。船舶搭載ADCPとの比較観測の結果については、相関値が0.7程度のやや悪い値が 見られた。これは、アンテナ設置場所が建造物などの陰になっており、レーダー観測にとって不利な 環境であることが関係していると考えられる。

大阪大学基礎工学部の宮本は、大阪湾における観測に対して河川流出や風の影響について論じた。 河川出水時には、湾奥にて 40cm/s を越える流速を観測され、風の影響も受けることが確認された。ま た、台風の通過・上陸時のデータから二次散乱の明瞭化、SN比の低下による観測距離の低減などの 現象を実際のデータを用いて解説した。

電力中央研究所の坪野は、大阪湾における観測において東西方向の流速場が不連続となる領域が発 生することと、その流速分布が岸に沿って西方向の伝播する様子を詳細に示した。この解析から、ゴ ミ等の浮遊物の集積過程などの解明に役立つと考えられる。

九州大学応用力学研究所の吉川の発表では、対馬海峡部に設置したタイプ(方位データの取得法、 使用周波数)の異なるレーダー間での測定差を検証した。海面係留のADCPとの比較観測により、 特定のレーダー局の精度不良があることが指摘された。

国土技術政策総合研究所の日向は、2005 年 1 月から実施している有明海湾奥を対象とした観測にお いて、ADCPや風向風速データ、河川流量との比較を行った。同様に、2005年秋より有明海に て観測している電力中央研究所の坂井からも速報データが発表された。ともに、現在社会的にも関心 が高い、諫早湾口から有明海奥にかけて観測域となっており、今後の解析により、海洋レーダーの広 域観測生を生かした流動構造や変動パターンの把握、メカニズムの解析などに生かされることが期待 される。

産業総合研究所の長尾は、同所で開発した自由浮上型微細構造測定装置による塩分、温度、垂直シ ェアの観測と情報通信研究機構の24MHzレーダーによる表層流動観測の結果とを総合的に解析し、石 垣島北方海域での表層水塊構造の解明を目指した。これは、石西礁湖におけるサンゴ礁の育成環境に 影響する、外洋からの物質輸送や熱輸送を解明するのに役立つと考えられる。

九州大学大学院総理工研究科の渡慶次は、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 度計から得られる地衡流速との比較を行った。高度計データからの内挿された格子点データとの比較 においては、レーダーから近距離の海域では現象の空間スケールが小さくなることから平滑化の影響 があることがわかった。衛星軌道沿いでの比較からは、海洋レーダーのデータを3日間平均すること により非地衡流成分が除去されるという結果になった。

今回の研究集会は、講演件数が15件と過去最高となった。これは、海洋レーダーの導入が進み、 多くの機関にてデータ利用が行われてきたことに加え、研究そのものが進展し成果として他の研究者 との議論が行える段階に達する内容が多くなったことによると考えられる。しかしながら、まだ沿岸 海洋物理現象の解明の基本的観測データとして利用したり、シミュレーション計算への同化データと いった高度利用に至っているという段階ではなく、今後研究がさらに必要と考えられる。海洋レーダ ーによる海況監視システム構築に向けて、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。
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。日本としては、1990年比で6%のCO<sub>2</sub>削減という目標達成を図る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 カ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。図1は、回流水槽内における写真であり、模型 は直径 0.6m、スパン長 0.6m の3 翼のジャイロミル式水車を用い た。翼断面は図2のように、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]を計測する。回転数を  $\omega$ (rad/s)とするとトルク係数( $C_Q$ )およびパワー係数( $C_P$ )は 次式で与えられる。

$$C_Q = \frac{Q}{0.5 \rho U^2 r A}, \quad C_P = \frac{Q\omega}{0.5 \rho U^3 A}$$

翼の取り付け角を $0^{\circ}$ 、 $\pm 5^{\circ}$ 、 $\pm 10^{\circ}$ とし、 $0^{\circ}$ と $5^{\circ}$ に ついては、回転数を周速比[ $\lambda = R\omega/U$ ]が0、1.0、1.5、2.0、 2.5、3.0となるようにして各周速比でのトルク Q[N・m]の 変動を計測した。この計測は対称翼、円弧翼ともに水車翼数 が1枚と3枚の場合で行った。



図1 実験模型写真



実験結果

図3は、横軸に翼の角度、縦軸に水車のトルクをとり、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。 λ=2が一番大きなトルクを発生している。 λ=0では翼は静止しており、その場合のトルクは起動トルクと呼ばれており、ジャイロミル式水車では 重要な意味を持つ。1 翼が、約 30°のところでゼロあるいは負のトルクとなっているので自己起動には 問題があることが分かる。

図4は、対称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、取り付 け角は 5°が最も良く、最高効率は*λ*=2.3におい て40%を超えることが分る。

図5は、取り付け角5°の円弧翼のパワー係数に ついて、一様流速による影響を比較したもので、 流速とともにパワー係数が大きくなる結果となっ た。つまり、レイノルズ数が大きくなると性能が 上がると考えられる。ただし、水路幅1.5mの回流 水槽において、直径0.6mの水車を高速回転させる ときのブロッケージによる影響も考えられるの で今後の検討が必要である。

● まとめ

ジャイロミル式水車は、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、いくつかのことが明らかと なった。

・周速比によってトルク変動のピークの角度が 異なる。

・対称翼、円弧翼共に取り付け角 5°の時、最大 効率となった。

・最大効率は円弧翼で約43%であった。

・周速比が大きくなるとトルク変動の振幅が小 さくなる。

 ・トルク係数、パワー係数はレイノルズ数に依 存する。

## ● 研究組織

経塚雄策 九大・総理工 教授 代表・総括 尾川協一郎 九大・総理工 M2 実験解析



図3 周速比によるトルクの時間波形





図5 流速変化によるパワー係数(円弧翼、取り付け角5°)

佐世保工業高等専門学校電気電子工学科 長嶋 豊

## 1.目的

本研究は海洋環境計測や水産資源調査,藻場観察等 を日常的に少人数で行えるような,小型,軽量,コン パクトな自律型海中ロボット(Autonomous Underwater Vehicle以下 AUV と略す)の開発を目的としてきた。し かし、ニーズ調査の結果、ミッション中の海中状況を リアルタイムにモニタできることが必須条件で有るこ とが判明した。一方、AUV では情報伝送に超音波しか使 用できず、浅海域での動画像伝送は、処理時間やマル チパスの影響等から困難である。本年度は、AUV の自律 性能向上と並行して、光ファイバを用いた細径ケーブ ル式無人潜水機(Untethered Remotely Operated Vehicle 以下 UROV と略す)とのハイブリッド化につい ても検討した。遠隔制御、AUV 内センサの遠隔モニタリ ング、動画像伝送を実現するシステム作りにも取組ん だ。

## 2 . AUV の制御方式

自律化のための自動制御方式にはPID制御とファ ジィ制御を適用した。PID方式では下記の位置形ア ルゴリズムを差分方程式で近似したモデルを使用した。

 $M = (100 / PB) \{ En + 1 / Ti \sum_{i=0}^{n} Ei \quad T + Td (En - Em) / T \}$ 

但し,M(操作量),PB(比例帯),En(現在の偏差),

Ti(積分時間),Ei(i番目の偏差),Td(微分時間), Em(n-1番目の偏差), T(サンプリング時間)

一方,ファジィ制御では,主観的なあいまいさを定 量化するファジィ理論に基づきアルゴリズム化したも ので、ルール数56個,前件部メンバシップ関数3角 形,後件部シングルトン,ファジィ推論は Min-Max 法 を使用した.ファジィ制御ブロック図を図1に示す。



### 図1 ファジィ制御ブロック図

## 3.AUV システム構成

新たに設計製作した AUV の外形寸法は全長 85(cm), 全幅 33(cm),総重量 60(kg)の円筒太胴型で,最大 潜航深度は 50(m)である.可変翼の取付け角度、翼 アスペクト比の向上、5(mm)のエンドプレートを取り付 けて推力向上を図った.新開発コントローラではマイ クロプロセッサを1個に絞り、コンパクト化を実現し た。図2に自律型海中ロボットと水中撮影用カメラを 格納する耐圧容器を搭載した外観写真を示す。



図2 水中撮影用カメラを搭載した AUV

4 . UROV システム構成

本 UROV では母船と直結せずに、海上のブイと光ファ イバで接続し、ブイと支援母船間は電波を使用して制 御系、映像系、センサデータ系情報を伝送する方式と し、UROV の行動範囲の向上をめざした。図3に制御系 情報伝送ブロック図を示す。



## 5.実験方法

PID制御方式では,可変ベクトルプロペラのモデ ル化が困難であるため,各パラメータは自律航行実験 を通して決定した.ファジィ制御方式ではルールを細 かく工夫し,前回センサデータとの誤差及びその変化 率を改善、プログラム化することで滑らかな航行を目 指した.UROV方式の実海域実験では、UROVで撮影され た映像を見ながら操縦する実験を行なった。

#### 6.実験結果及び考察

(1) PID 制御による深度自律航行

実海域で行った自律航行実験の深度特性を図4に示 す。目標深度に到達する前に次の目標深度に移行して おり、AUVの速度不足や、南西の風5[m]が吹いていた こと、潮流などの自然の要因が作用した為だと考えら れる。



図4 PID 制御方式による深度特性 (2)ファジィ制御による深度自律航行 水槽でのファジィ制御時の深度特性を図5に示す。 外乱もなく目標方位を追随して航行できた。



図5 ファジィ制御による深度特性

#### (3)水中考古学発掘現場での UROV 試験運用

長崎県五島列島小値賀島前方湾、水深12mでの水 中考古学調査現場にUROVを使用したときの写真を図6 に示す。映像のみに頼る操縦だけでは不安があるので、 UROVの方位、深度、ソナーデータ等も同時にモニタで きる機能が重要であることがわかった。



図6 実海域実験映像

#### (4) リモートモニタリング機能

UROV 内の方位データ及びブイ内に搭載した GPS レシ ーバデータをモニタする機能の試作を行なった。受信 側パソコンでは Visual Basic を用いて、図7のように 表示した。一方、映像とセンサ信号は同一光ファイバ で伝送できるようなTDM方式の E/0 コンバータを使 用した。ブイから支援母船への映像無線伝送にはダイ バーシティ方式の受信器を使用することで比較的明瞭 な映像を得ることができた。



# 7 . 結論

自律型海中ロボットの PID 制御とファジィ制御の改 善を行った。水中映像をモニタしながら操縦可能な UROV システムの構築を行なった。AUV と UROV とのハイ ブリッド化をめざした機能についても検討を行なった。 今後の課題としては、新 AUV の性能評価を通して自律 航行用各種パラメータの調整・改善を行い,実海域で の藻場観察や海洋環境計測を通して総合性能評価・改 善を行うことである.

最後に,本研究を推進するにあたり,九州大学応用 力学研究所の小寺山亘教授及び中村昌彦助教授には有 益なご助言やご指導を頂きました,深く感謝いたしま す。

8.研究成果報告

[1]長嶋豊:浅海域調査用コンパクトな自律型海中ロボットの開発、長崎先端技術開発協議会 NO.22 先端技術研究成果報告書、pp.29-35、平成17年7月12日

- [2]長嶋豊:底質調査用多機能水中ロボットの開発、長 崎県知的構造システム技術研究会講演、平成 17 年 7 月 19 日
- [3]Development of a Compact Autonomous Underwater Vehicle for Shallow Water Work, ISARC 2006 へ投稿予定、平成 18 年 2 月 28 日

# 9.研究組織

- ・研究代表者:長嶋 豊,佐世保工業高等専門学校 電気電子工学科教授
- ・所内世話人:中村昌彦,九州大学応用力学研究所 助教授
- ·研究協力者:小寺山亘,九州大学応用力学研所教授

気象研究所 海洋研究部 石崎 廣

## <u>1.目的</u>

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。本年度はこれらの効果について調べた。

## <u>2.研究手法</u>

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)海の流れと地球環境

(2) 全球海洋モデルに見られる南半球高緯度の熱塩振動

(3) 中深層の観測で検出された強い季節変動シグナル

(4)2層モデルで説明する北太平洋塩分極小の形成機構

(5) 混乱水域の水の起源

(6) ROFI の力学 - 慣性不安定によるバルーニングと潮流による安定化 -

(7) プリミティブ方程式系モデルによる西岸境界流の再循環セル、特に南北非対称について

(8) 高解像度モデルの結果を用いた、form drag などの渦の効果の見積もり

(9)高解像度モデルによる西岸境界流近傍での層厚フラックス

(10)流軸変動による層内体積輸送の仕組みとその表現

#### 3.結果と考察

(1)は一般市民向けに行われた講演を基にして、地球環境における海洋の役割、中深層を含む地球規模の海 洋循環の概観、海洋循環の基本力学の概要等について専門家以外に分かり易く説明することの方法論について議 論した。特に、基本力学について、専門家には当然と思われる知識の前提条件に立ち戻って整理し直し、地球流 体現象における基礎的物理要因でありながら直感的に説明しにくいものを如何に分かり易く解釈し説明していく かについての解説が行われた。

(2)と(3)は中深層での周期的な変動性を扱ったものである。(2)は全球海洋モデルに生じる南半球高 緯度での十数年周期の自励的熱塩振動を解析したものである。南北循環が強いとき表層で低緯度から高緯度への 低塩分水輸送が極大となり、成層強化・対流抑制が生じる。その結果、海面冷却が極小となり、南北循環は弱く なる。さらに冷却が続くと成層が不安定化し深い対流が発生する。これによって海面冷却は極大となり深層水が 多く形成され南北循環が再び強くなる。このような熱塩振動の強さは層厚拡散係数に影響されるが、南極周極流 の流量の適切な表現と相まって決められなければならない。現実の現象との対応付けが待たれる。一方、(3) はアルゴフロートの観測により、水温躍層より下に存在する強い水温・塩分の季節変動性を捉えたものである。太 平洋の10°N線に沿った水温偏差の時系列から、1000dbにおいて傾圧第一モードのロスビー波と推察される季 節変動シグナルの西方伝播が示された(図1)。振幅は 0.2 0.5 程度で統計的に有意であり、水塊変動はほと んど伴わない。中深層データの長期変動解析においても季節変動性を考慮すべきことが示唆された。

(4)と(5)は北太平洋中層の塩分極小形成機構に関して、観測とモデル計算の解析から、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。 144°E線での3点における密度-塩分分布図(図2)は、親潮水(左線)黒潮水(右線)及び上部黒潮水と

増田 章(九大応力研)
平原幹俊(気象研)
細田滋毅(JAMSTEC)
蓮沼啓一(海洋総合研究所)
蓮沼啓一(海洋総合研究所)
礒辺篤彦(九大総理工)
桃について
水田元太(北大地球環境)
中野英之(気象研)

石崎 廣(気象研)

增田 章(九大応力研)

下部親潮水の重なり(中央線)を示す。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ことを示す。(5)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)においた粒子の時間的逆追跡により水塊の起源を求めた。前線間帯の 表層水は本州南岸の黒潮の密度躍層から来ているが、親潮水の大部分は親潮前線に沿って東へ流れ去り、前線間 帯に侵入するものはわずかである。こうした結果は、塩分極小が中層水という水塊を意味しないことを示唆する。



(6)から(8)は海洋の力学に関する内容であった。(6)での ROFI とは"Region Of Freshwater Influence" の略であり、海洋に放出された河川水の河口近傍での塊(バルジ)の成長(バルーニング)を数値モデルで扱っ ている。バルジ内で慣性不安定を長く経験した粒子は流速の方向性を失いバルジ内に留まり易くなりバルジが成 長する。一方、これに潮汐効果を加えると、沖方向へのバルジの成長が制限されて境界流の淡水輸送が増加し、 現実的状態となった。(7)は黒潮続流のような東向きの流れの南北に形成される再循環セルの形成機構をプリ ミティブ方程式系モデルで調べた。与えた流れは南北対称であるのに再循環セルは北が強い南北非対称となる(準 地衡流モデルでは生じない)。時間発展を見ると、傾圧不安定によって生じた渦は低気圧性の方が高気圧性のもの より強く、不安定波の砕波によるレイノルズ応力によって北側に強い再循環が形成される。(8)では、海洋で の渦活動の見積もりにおける3次元 Transformed Eulerian Mean の枠組みに用いられる仮定の妥当性を調べる ために高解像度北太平洋モデル結果を解析した。渦位フラックスは必ずしも平均渦位の高い所から低い所へ向か ず、向くという仮定は成立しない。渦の残差流を渦度の形で見積もると、亜寒帯・亜熱帯の密度面の傾きを平ら にしようとし、黒潮続流域では上層減速、下層加速の form drag の効果となる。

(9)と(10)は西岸境界流の強流帯近傍での流軸方向の渦成層厚輸送について、それぞれモデル結果の解 析による実態把握とその理論的解釈を示したものである。(9)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。(10)ではこれを流軸変 動模型として解釈する。すなわち、主流を横切る方向に層厚は単調増加、流速は山形の分布形を持ち、オイラー 的に見た場合、流軸が揺れることによりそれらの相関が生じ、前述のような渦成体積輸送として現れる。さらに 流れの幅が流軸の変動幅に比べて小さい場合と大きい場合に分けて詳細な解析解が求められている。

## <u>4.まとめと今後の展望</u>

(1)は一般講演の方法論として有益であった。(2,3)に対しては今後の観測の集積が期待される。中層 塩分極小の形成論(4,5)は今後も研究が続けられるが、図2の中央線のような重なりをモデルで表現するた めには鉛直高解像度のモデル実験が望まれる。(6)では河川水流入を含む沿岸域のモデリングでは潮汐効果を 含むことの重要性が強調される。(7)では準地衡流方程式系とプリミティブ方程式系の相違が明らかとなった。 (8)では渦による form drag の効果が確認された。form drag の直接計算との対応が望まれる。(9)に対して は(10)で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。

# 風レンズ風車に最適な翼形状の設計に関する研究

(研究代表) 九州大学工学研究院 機械科学部門 古川 雅人

目的

風レンズ風車(つば付きディフューザ風車)の発電性能はその風車翼の空力特性に大きく依存する.選 択した風車翼断面の空力特性(楊力 抗力特性)がすぐれていれば,集風装置としてのつば付きディフュ ーザを取り付けた風レンズ風車は飛躍的に発電性能が向上する.したがって風レンズ風車としてどのよう な翼断面の風車翼を選択するかが重要な問題となる.我々のグループでは過去,NACA 翼、MEL 翼とその空 力性能を試験してきたが,更にすぐれた空力性能を有する翼断面形状を追求したい.そのために簡易理論 に基づく翼設計と,これを基に試作した新翼の風洞試験を行う.

# 1.はじめに

近年,エネルギー・地球環境問題の顕在化に伴っ て ,環境負荷の小さな発電システムとして風力発電 の導入が世界各国で活発化している.九州大学の風 レンズ研究グループによって開発された風レンズ 風車もこの一翼を担うべく、全国各地で 500W 機が すでに運転中である.風レンズ風車は現在,より大 発電量の 1kW 機・3kW 機・10kW 機が製作段階(予 定)に入っており,大型サイズの風車への風レンズ 体の適用が現実化しようとしている.しかし,風レ ンズ風車の大型化は,集風体の構造重量と,集風体 への風荷重の問題から、ロータ径を大きくする毎に、 集風体をよりコンパクトにする必要がある.また, 集風体の形状が変わった風レンズ風車は、その特性 が変化してしまうことも問題である.本研究では, 集風体断面・集風体長さ・鍔高さ・風車負荷の4 つのパラメータに着目し,形状が変わるたびに性能 の変化する風レンズ風車の特性、特にコンパクト風 レンズ風車の特性を解明し、風レンズ風車の最適要 素設計に関する研究を行う.

# 2. 風洞実験模型

集風体長さの異なる集風体モデルを使用し,ロン グタイプ集風体とコンパクト集風体を用いた場合 の風レンズ風車の空力特性の違いを調べる.Fig.1 に集風体モデルの概観図を示す.ロングタイプ集風 体の方は,スロート部直径が D=720(mm)で,コン パクト集風体の方は,スロート部直径が D=1020(mm)である.また,風車翼モデルには,風 車負荷を =0.48~0.70 まで変化させることのでき るロータ径 D=700(mm)の風車翼と,風車負荷を =0.81~1.20 まで変化させることのできるロータ径 D=1000(mm)の風車翼を設計した.Fig.2 に風車翼モ デル概観図を示す.



ロングタイプ (D=720mm,Lt=1.47D) コンパクトタイプ (D=1020mm, Lt=0.100D~0.371D)

Fig.1 集風体モデル概観図



## 3.集風加速率と負荷係数

Fig.3 はロングタイプ集風体(鍔高さ h=0.50D)と, 風車負荷 =0.48~0.70 で風車出力測定を行った結 果である.風車単体では,風車負荷が小さくなるほ ど出力が下がっていくのに対し,風レンズ風車では, 風車負荷が小さくなるほど出力は上がった.Table 1 に出力の最大値を示す.中でも, =0.48 時の風 車単体の出力から風レンズ風車の出力の伸びは実 に6倍である.

Fig.4 は、コンパクト集風体(集風体長さL=0.100D, 鍔高さh=0.10D)と、風車負荷 =0.81~1.20 で風車出 力測定を行った結果である.Fig.4を見ると非常に 興味深い結果を見ることが分かる.風車単体の出力 はFig.3 と同様の傾向であったが、風レンズ風車は Fig.3 と反対の傾向、すなわち、風車負荷が小さく なるほど出力は小さくなった.



Table 1				
	=0.48	=0.58	=0.70	
風車単体の出力	0.229	0.253	0.289	
風レンズ風車の出力	1.381	1.368	1.351	
出力倍増	6.0倍	5.4倍	4.7倍	



Fig.4 コンパクト風レンズ風車の出力曲線 (集風体長さL<sub>t</sub>=0.100D, 鍔高さh=0.1D)

風車入力係数は,

$$C_{p} = \frac{(p_{1} - p_{2})Q}{\frac{1}{2}\rho U_{0}^{3}A} = C_{T}K^{3}$$

で表すことができる.

ただし, C<sub>T</sub>は,風車の前面・後面の圧力差をその場の動圧で正規化したもので,風車負荷係数と呼び, ブレードのに相当する.流体から見ると風車はエネルギーを奪う抵抗体であり,風車負荷係数は,この抵抗の大きさを評価する.

$$C_{T} = \frac{P_{1} - P_{2}}{\frac{1}{2}\rho u_{x1}^{2}}$$

また,Kは,風車を通過する流速を近寄り風速で正 規化したもので,加速率と呼ぶ.加速率は,風車を 通過する流速を評価する.

$$K = \frac{u_{x1}}{U_0}$$

風車入力係数は,風車負荷係数と加速率の3乗の積 で評価することができるが,この2つの係数は相反 する係数である.すなわち,一方の係数を大きくす れば,必ず,もう一方の係数は小さくなってしまう. 風車入力係数,すなわち風車出力を大きくするため には,この2つの係数のうち,どちらを優先させる かが重要である.

集風体長さが長い場合は,風車負荷を小さくし, 集風加速率Kを優先させ,集風体長さが短いときは 集風加速率Kがあまり見込めないため,風車負荷係数CTを優先させる方が良いということがわかった.

# 4.コンパクト風レンズ風車の空力特性

ロングタイプの集風体とコンパクトタイプの集 風体の違いは前節で述べた.本節では,コンパクト タイプの集風体でも,上述のような空力特性の違い が現れるかどうかを検討した.

集風体長さがLt=0.371D( タイプ), Lt=0.221D( タイプ), $L_t=0.137D($ タイプ), $L_t=0.100D(0 タイプ)$ のコンパクト風レンズ風車それぞれの鍔高さ (h=0.05D~0.20D),風車負荷(=0.81~1.20)における 風車出力係数の最大値Cwmaxを比較することで,集 風体長さ・風車負荷・鍔高さの関係を検討する.こ の結果をFig.5 に示す. Fig.5 を見ると, 集風体の長 さが最も長いL=0.371Dでは,鍔高さが低い時は, 風車負荷は小さい方が良く,鍔高さが高くても,風 車負荷は大きすぎない方が良い.集風体の長さが L<sub>t</sub>=0.221Dの鍔高さと風車負荷の関係は非常に興味 深く,鍔高さh=0.05D~0.10Dでは,L<sub>t</sub>=0.371D同様, 風車負荷は小さい方が良いのだが、鍔高さ h=0.15D~0.20Dでは,風車負荷が大きい方が良い. 集風体の長さがLt=0.137Dでは,鍔高さh=0.05Dでは 風車負荷は大きすぎない方がいいものの, 鍔高さ h=0.10D~0.20Dでは,風車負荷は大きい方が良い. 集風体の長さがL=0.100Dにおいては,どの鍔高さ にもよらず,風車負荷は大きい方が良く,図の曲線 の傾向から、風車負荷をさらに上げても出力は伸び ることが予想できる.以上より,コンパクト風レン ズ風車でも,その集風体長さや鍔高さにより,適切 な風車負荷を選択しなければ ,高出力を達成するこ とができないことが分かる.風車負荷によって出力 があまり変化しない場合は、風車の起動特性向上の ために,風車負荷は小さくする方が良い.



Fig.5:集風体長さ・風車負荷・鍔高さの関係

# 5.研究成果

原 和雄,井上雅弘,古川雅人:ミニチャンネル 気体冷却における熱伝達,日本機械学会論文集(B 編)第71巻,第704号,pp.1005-1010(2005) Kazuo HARA, Masato FURUKAWA, Naoki AKIHIRO : Experimental Investigation of Heat Transfer in Square and Circular Minichannel Air Flow Wide Range of Pressure Ratio", Proceedings of the 3rd International Conference on Microchannels and Minichannels, Paper No. ICMM2005-75184

(2005) 長谷川将,大屋裕二,烏谷 隆,渡辺公彦:大型 化を目指した風レンズ風車の開発,流体力学会年 会 CD-ROM集,論文番号 AM05-15-005(2005) 長谷川将,大屋裕二,烏谷 隆,渡辺公彦:超コ ンパクトな集風体を用いた風レンズ風車の開発, 日本航空宇宙学会西部支部講演会講演集, 133-136(2005)

長谷川将,大屋裕二,烏谷 隆,渡辺公彦:風エ ネルギーの集中による風力発電の高出力化-第4 報:超コンパクトな集風体を用いた1kWダウンウ ィンド風レンズ風車の開発-,第27回風力エネル ギー利用シンポジウム講演集,173-176(2005)

## 6.研究組織

代表者:古川 雅人(九州大学工学研究院・機 械科学部門 教授,風車翼の設計に関する研究) 烏谷 隆(九州大学応用力学研究所・大気流体 工学分野 助教授,風車翼の風洞試験) 世話人:大屋 裕二(九州大学応用力学研究 所・大気流体工学分野 教授,風車翼の風洞試 験)

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CO2の収支量や溶存量の観測が重要 となる。このCO2の観測が、全地球規模かつ精度良く行えれば、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 が有効な手段である。

また、海洋資源調査においても、海底資源として炭化水素資源、鉱物資源、 生物資源等が注目されており、高運動性を有する調査用潜水機の重要性が増々 高まっている。

さらに、近年、国民生活の安全確保、防災対策、減災のための予測科学の観 点から、地殻構造調査に資する潜水探査機システム<sup>\*</sup>の開発が必要とされている。

本研究では、海洋環境観測、海洋資源調査等に係る次世代型無人探査機に要求されるニーズを調査し、潜水機開発法のあるべき姿を構築する。構築したあ るべき姿に基づき、潜水機モデルの構築と水槽試験による性能検証を行う。併 せて、実機開発への展開に向けた将来開発指針を得ることを目的とする。

\* 地殻構造調査用潜水探査機システムに関しては、無人探査機以外の数々の 海洋機器を用いたネットワークシステムであるため、別途研究提案することと したい。

2. ニーズ調査

海洋環境観測については、海洋広域観測用探査機のニーズとして、米国を中 心にバーチャルモアリングのコンセプトが提唱されている。これは、図 1 に示 すように、探査機が海洋を移動するエルニーニョの回りを一緒に旋回し、あた かも移動中心に探査機が係留されているかのように航走し(実際にはケーブル 無しの自律型無人探査機) 定域観測を行うコンセプトである。南氷洋定期観測 等にも同じコンセプトが活用できる。このようなバーチャルモアリングのコン セプトを実現するために長距離航走が可能な無人探査機が必要とされる。

日本での海洋環境観測ニーズとして、国内の海洋気象台(長崎、神戸、舞鶴、 函館)を調査した。結果を表1にまとめる。これにより、潜水深度、距離、観 測内容等運用スペックと、海洋機器全般への要望を把握できた。海洋気象台全 体の観測ルートは図2に示すようにかなり長距離に渡っており、ケーブル無し の長距離航走用無人探査機が観測に強く求められている。また、水中グライダー 的要素を取り入れた3次元広域観測を行いたいとの強いニーズもあった。 鉱物資源関係のニーズとしては、(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構、掘 削エンジニアリング会社より、石油掘削用洋上プラットフォーム(図3)の保守 検査、モニタリング、及び、掘削時の海中作業用に、生物運動型潜水機(魚口 ボット)等を開発運用したいとの大きなニーズがあった。



図1 バーチャルモアリングのコンセプト



図2海洋気象台の観測ルート

	表 1	羊気象観測の観点からの潜水機へのニーズのまとめ
--	-----	-------------------------

海洋 気象台	観測領域、観 測の地域	潜水機に関するニーズ・スペック	その他の海洋探査機への要望	備考
長崎	東シナ海 対馬海峡 太平洋(日本 西岸)	魚ロボット(場を乱さない) 浅海用小型潜水機:内海(大村湾、 有明海)より始めて外海へ持っていく 深度: 2000m 以浅(まれに 6000m) 海中の等温線をトレースするロボット 長時間航行(連続測定でないとauv の意味が無い)	海洋ブイ(DSP付、振動翼)が必要 観測船に揺れない船の機構要 ペイロード:アルカリ度計、ペーハ計、採水 装置(最低2 <sup>以</sup> ル) 高位置精度(上下運動型の場合) 常時海底に潜んでいるロボット	訪問調査日: 2005 年 1 月 19 日
神戸	太平洋(赤道 まで) 瀬戸内海	赤道 深度:2000m 以浅(最大 4500m) 地震計、ADCP の設置回収ロボット リアルタイム観測	自走式ドリフティングブイ 5 ㎏の採水器 海中での機器トラブルを観測できる装置	訪問調査日: 2005 年 2 月 3 日
舞鶴	日本海 三陸沖 オホーツク海	日本海固有水の流れの調査 荒天時の調査に潜水機が有効 放射能漏れの海中への広がり調査 深度: 3500m	経済水域(EZ)を守りながら調査できる機能 定置網の中に入った魚を確認できるロボット AUVの緯度経度の精緻化が必要。CTDの 較正の良い方法を構築できないか。	訪問調査日: 2005 年 2 月 4 日
函館	太平洋(日本 東岸) 北海道東南 海域 三陸沖	港から出て港に帰る機能 充電に時間がかからない 回収が簡単であること(観測船のク レーンは1トンまで) 深度:4000m 最大	3 次元広域観測(例:水中グライダー) 氷の厚みを計測 深層流の計測機能(数 cm) 鉛直方向プロファイル計測	訪問調査日 2005 年 3 月 11 日
その他			測定データの精度維持(海洋観測では機器 の精度と同オーダの計測を行うので、較正が 重要)	



図3 石油掘削用洋上プラットフォーム

図 4 に本研究にて構築した潜水機開発法のあるべき姿をまとめる。潜水機実 現に至るまでのプロセスは図 4 の左側のフローに示すように、運用スペックに 基づき、機体形状、アクチュエータ、制御、センサー他の仕様を定め、模型を 作成して水槽試験により性能検証し、検証結果のフィードバックを仕様決めに 対して行う。ここで図 4 の右側に示すシミュレーション設計(図中)とそれ に基づいた模型作成から流体特性試験、運動制御特性試験(図中)が重要で あり、本研究では上記のプロセスに焦点を当てて開発を行う。上記プロセ スにて模型試験まで行えば、改良点を実機建造前の早い段階で発見することが でき、その後の実機基本設計、詳細設計、製作に至るまでのプロセスの遂行が スムーズとなる。特に、実機建造後のやり直し(再製作)や大幅改造のリスク が小さくなり、全体的にリスク最小の開発が実現できる。



図4 潜水機開発法のあるべき姿

4. 次世代無人探査機の重要技術課題と打ち手

長期にわたり航走し、広範な海域の観測を確実に実現させるために以下の技術確立が必要である。

(1) 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

# エネルギー効率最小化

(2) 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

# 損傷許容設計

本課題解決のための打ち手として、上記(1)に対しては、航走時の流体抵抗 と推力減少率低減のための潜水機機体形状の最適化設計、高効率推進器、アク チュエータ、制御系の開発、上記(2)に対しては、故障時のフェールセーフ性 を確保できる制御システム、翼配置法及び補助アクチュエータの開発が重要で ある。

本研究での期間内達成可能な目標として、以下の項目を行うこととする。

- ・航走時の流体抵抗を低減した無人潜水機機体形状・推進器の最適設計法 の確立、アクチュエータ設計及び水槽試験による性能検証
- ・ひとつのアクチュエータが壊れても、他で安定航走をカバーできるアク チュエータ構成の検討、フェールセーフ性を確保できる知能化制御アル ゴリズムの開発と水槽による有効性検証

5. 次世代無人探査機模型の開発

4章の問題を鑑みて、図5に示す機体レイアウト案を作成した。CFD(Computer Fluid Dynamics)による機体形状最適化、及び、図6に示すフェールセーフ性確 保が可能な制御システムをキー技術として開発した。また、図7に示すような、 大上下揚力・横力、高運動性確保、接岸・収納がスムーズ、及び、翼破損時の システムバックアップが容易となる等の特長を有するエックス型ウィング(X 字)を尾翼に採用した。尚、開発した模型では、エックス型ウィングから通常 よく用いられているプラス型ウィング(十字)に配置変更可能なものとし、ど ちらの形でも航走できる。





図7 エックス型ウィングの特長

CFD は Renolds Averaged Navier-Stokes 法により流体形状最適化シミュレーションを行った。図 8 にシミュレーション結果を示す。図中の左側は、通常用いられるシリンダ形状の機体であり、図中右側は、表面圧力分布が均一化(図では同じ色)となるように定めた機体形状である。圧力変動が少ないと流れの乱れが少なくなり、流体抵抗が最小化できる。

シミュレーション結果に基づき製作した模型の外観図を図 9 に、内観図を図 10 に示す。本模型は、長さ 2.6 m、最大幅 0.5 m、最大高さ 0.4 m で、リチウム 電池、バラストタンク、運動検知センサ、制御装置等内蔵で、ケーブル無しで の自律航走が可能である。



図8CFD シミュレーションによる機体形状最適化設計



図 9 模型外観図



図 10 模型内観図

また、本模型製作時の CAD データより航走体をコンピュータグラフィックス (CG)化する手法を開発した。本模型を CG 設計した結果を図 11 に示す。さら に、水中翼を取り付けて最適な揚力を出すように CG 設計した結果を図 12 に示 す。CG データを基に水中翼を設計し、製作した模型を図 13 に示す。従来のシ リンダ型、最適形状の機体(水中翼無し、有り)の運動性能を水槽試験により 検証した結果を図 14 に示す。



図 11 コンピュータグラフィックスによる設計



図 12 コンピュータグラフィックスによる水中翼付探査機設計



図 13 水中翼付探査機模型

図 14 に示すように、次世代型は水中翼によるグライダー効果と船体抵抗の低 減効果により、従来の船型(シリンダー型)に比べ、航続距離が大幅に延伸す ることが水槽試験及び解析にてわかった(図の比較は機体長さ、エネルギー量 一定として評価)。特に、グライダー航走では本体の揚力も利用できるため、航 続距離延伸に有利である。



図 14 次世代型と従来型の航続距離の比較結果

6. 生物運動型潜水機の開発

鉱物資源関係、海洋構造物メンテナンス関係、環境計測関係のニーズに基づ き、生物運動型潜水機(魚ロボット)を開発した。これは、魚等の水中生物の ように「ひれ」を動かして推進する潜水機であり、最新の運動力学システム理論 とメカトロニクス技術の開発によって、魚のしなやかな動きを実現できる弾性 振動翼推進システムの構築を行った。さらに、先進的自律制御ロジックの開発 によって、ケーブルを使用しない3次元自律運動が可能で、本物そっくりに泳 ぐことができる魚ロボットを開発した。開発した潜水機の外観(遊泳図)を図 15、内観を図 16 に示す。

また、潜水機によるエネルギー損失が少ない高効率資源探査と攪拌の無いな めらかな着底・資源収集作業を可能とするため(図 17 にコンセプトを示す)、 フラットタイプ魚ロボットプロト機を開発した。これは、翼を弾性振動翼とし て「はばたきの原理」により水中をなめらかに運動できる潜水機を目指したも のである。図 18 に試作プロト機の内観図、図 19 に外観図を示す。



図15 生物運動型潜水機の遊泳状況



図 16 生物運動型潜水機内観図



図 17 フラットタイプ魚ロボットのコンセプト



図 18 フラットタイプ魚ロボットプロト機内観図



図 19 フラットタイプ魚ロボットプロト機外観図

生物運動型ロボットは今後研究を進めると図 20 に示すような、海洋機器開発 において様々な技術波及効果をもたらすことがわかった。



図 20 生物運動型(魚型)ロボット研究の技術波及

7. まとめ、今後の展開

長距離無人探査機の低抵抗型最適形状設計、高パワー水中翼システム設計、 フェールセール性を有する制御システム設計、及び、水槽試験検証の一連のプ ロセス確立、並びに、生物運動型潜水機の潜水機の開発において、将来ニーズ を見越した先見性と高い独創性を有する研究を遂行できた。 今後の展開についてまとめると次の通りである。

- 次世代無人探査機の一連のあるべき開発手法を確立できたので、今後実
   機設計への応用展開を行っていきたい。
- 生物運動型潜水機の開発は革新的科学技術として世の中の評価を頂いたので、未来の潜水機技術として、さらに研究開発を進めたい。

本研究の延長としての具体的な実施項目は次の通りである。

- リトラクタブル式水中翼付長距離無人探査機の開発:
   次世代無人探査機として製作した航走体の水中翼をリトラクタブル(引き込み)式とし、水中翼の開閉を自動で行うシステムの開発と航走性能 試験を行う。
- 実機運用法を鑑み、航走条件、機体条件の最適化設計を行い、航続距離のさらなる延伸を図る。
- ・ 実ミッション向け生物運動型潜水機の開発:
   狭隘域運動用生物運動型潜水機を開発し、海象外乱下での運動性能試験 を行う。

本研究により、長距離航走実現できる無人探査機実機システムの一連の設計 法構築を完了し、開発した手法は実機製作に向けて広く応用することができる。

また、狭隘域運動用生物運動型潜水機の開発は、狭いエリアを調査、観測で きる高運動性潜水機を提供でき、世界に大きなインパクトを与える革新的な潜 水機の実現に資することができる。

8. おわりに

本研究では、広域長距離航走無人探査機の開発に要求されるニーズを調査し、 構築した「あるべき姿」に基づき設計手法の開発、試験用模型の試作、水槽試 験、性能解析を行うことができた。期間内目標としての、流体抵抗を最小とす る最適化設計法の確立、ひとつのアクチュエータ故障時に他でカバーでき、 フェールセーフ性を有する知能化制御アルゴリズムの開発、将来潜水機として 有望な生物運動型ロボットモデルの開発、及び、それらの水槽試験による有効 性検証を行うことを十二分に達成した。

本研究を発展させることにより、持続可能な海洋開発・利用を実現し、循環 型社会構築に寄与できる探査機システムを生み出す技術基盤を整えることがで きる。 参考文献

- (独)海洋研究開発機構・九州大学:自律型無人潜水機の最適設計技術に 関する基礎的研究、海洋研究開発機構・九州大学共同研究成果報告書、 平成 17 年 3 月
- 2. (社)資源協会: 深海巡航探査機による高精度海底資源調査技術に関する 調査・検討、平成16年度(独)海洋研究開発機構委託調査報告書、 平成17年2月
- 山本:生物運動型水中ロボットの開発、(社)日本深海技術協会会報、2006 年1号(通巻48号)、平成18年1月
- 4. Yamamoto I.: Research on Bio-Maneuvering Type Underwater Vehicle, Proc. UUST05, 2005, 平成 17 年 8 月

# 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:2005年12月 6日(火)13:05~ 7日(水)11:30

場所:力学シミレーション研究センター6階 多目的研究交流会

発表者: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)
林 美鶴(神戸大学内海域環境教育研究センター)
和田彩香(香川大学農学部)
一見和彦(香川大学農学部)
多田邦尚(香川大学農学部)
呉 碩津(三重県産業支援センター)
屋良由美子(九州大学応用力学研究所)
白木善章(九州大学応用力学研究所)

発表プログラムは資料1に掲載した.

3.研究成果

発表要旨の一部を資料2に掲載した.研究集会では,関係者を含めて約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:2005年12月 6日(火) 13:05~ 2005年12月 7日(水) 11:30 場所:力学シミ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 2005年12月 6日(火) 趣旨説明 (13:05~13:10) 研究代表者,所内世話人 1. 瀬戸内海における赤潮指数の変動特性 13:10-13:40 石井大輔・柳 哲雄(九大応力研)・中沢 泉(国土環境) 2. 植物プランクトンのパッチネス構造生成機構 13:40-14:10 柳 哲雄・石井大輔(九大応力研)・日向博文(国総研)・石丸 隆(東京海洋大) 3.マニラ湾の窒素循環 14:10-14:40 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) 4.沿岸海域における懸濁熊無機リン 14:40-15:10 和田彩香・多田邦尚・Loasschan Nattapong・一見和彦(香川大農) 5. 干潟底生微細藻類の増殖特性について 15:10-15:40 一見和彦・釜野孝司・多田邦尚(香川大農) 6. 洞海湾の河口循環流と赤潮形成 15:40-16:10 多田邦尚(香川大農) 総合討論 16:10-17:00 第二日 2005月12月 7日(水) 7.沿岸域における物質循環に対する干潟の機能 9:30-10:00 屋良由美子(九大総理工) 8.日本周辺海域における 2003 年、2005 年のエチゼンクラゲの輸送ルートの違い 10:00-10:30 白木喜章(九大総理工) 総合討論

10:30-11:30

資料2

# 沿岸海域における懸濁態無機リンの挙動

和田彩香・多田邦尚・Loasschan Nattapong・一見和彦 (香川大学農学部)

## 1.はじめに

沿岸海域における物質循環を明らかにするために、あるいは生態系モデルを構築するためには粒状物の化学組成についての情報は非常に重要である。しかし実際には内湾域においてそれらのデータがまだ充分ではないのが現状である。特にPについては有機態リンに対して無機態リンは無視できるほど微量だとされこれまであまり重要視されてこなかった。そこで本研究では沿岸域および河口域の表層水中の粒状物のクロロフィルおよびC,N,P 比について、特に PP(懸濁態全リン)と PIP(懸濁態無機リン)を分別定量し検討した。

## 2. 方法

調査は 2004 年から 2005 年にかけて瀬戸内海の播磨灘、燧灘、吉野川および新川の下流 から海にかけての水域においてそれぞれ行った。試料は GF/F フィルターでろ過し、Chl.a、 SS、POC、PON、PP、PIP をそれぞれ測定した。また、POP(懸濁態有機リン)は PP と PIP の差として見積もった。

## 3. 結果

## 1) 播磨灘・燧灘

PP 中における PIP の割合は燧灘で 11.5~19.3%(平均 14.4%),播磨灘で 17.0~31.7%(平均 20.7%)とやや播磨灘のほうが高いもののほぼ同じ割合であった。

## 2) 吉野川・新川

吉野川では PP 濃度は播磨灘の 2 倍より多かったが(平均 0.38µM), PIP の割合は 18.3 ~ 30.6%(平均 22.5%)と播磨灘よりやや高い割合であった。一方、春日川河口域では 30.6 ~ 50.2%(平均 40.5%)であり、他の海域より PP 濃度および PIP の割合ともに明らかに高かった。

沿岸域では PIP が PP の 1 割から 4 割程度を占めていた。また新川河口干潟域では、 POC:PON:PP =129:16:2.5、一方 POC:PON:POP=129:16:1 であった。これらのことか ら粒状物の化学組成から Chl.a 濃度との相関式を用いてレッドフィールド比を求める際に 用いるリンは、PP から PIP を差し引いた POP を用いる必要がある。

また、いずれの海域でも Chl.a と PIP、POP 濃度それぞれに有意な正の相関が見られた。 これらのことより、今後は PIP 濃度の増減が何によって制御されているのかを調べて行く 必要がある。

## 干潟底生微細藻類の増殖特性について

# 一見和彦·釜野孝司·多田邦尚 (香川大学農学部)

【はじめに】

干潟域において底生微細藻類は基礎生産の主要な担い手であり、干潟における高い生物生産 性を支えていると考えられているが、その生産性に関する定量的な評価はほとんどなされていない。 当研究室では過去底生微細藻類に関する様々な調査・研究が行われてきた。その中で、干潟の底 生微細藻類は極めて高い増殖ポテンシャルを持っていることが明らかになっているが、実際の現場 干潟ではどの程度の速度で増殖しているのか、依然として不明である。そこで本研究では、現場の 干潟域における環境変動が一次生産者の生産量に与える影響を調査し、現場における増殖パタ ーンを明らかにすることを目的とした。

【方法】

高松市の新川·春日川河口干潟に1定点を設置し、干出時、冠水時に以下の実験を行った。

干潟干出時の0時間、3.5時間後にシリンジを用いて3本ずつ表層泥を採取し、できる限り正確 に表層2mmまでを分取した。分取後直ちに90%アセトンでChlaの抽出を行い、乾重量あたりの Chla濃度を測定することで、干出時における干潟表層泥中の植物プランクトン量の変動を調査した。

<実験2>

干潟表層泥(0.5 cm 以浅)を採取し、直ちに 300 µm 目合いのメッシュで大型の粒子および捕食 者を取り除き、調査時に干潟周辺で採取した海水(Whatman GF/F でろ過)を加え、これを堆積物 懸濁試料とした。ポリカーボネイト製ボトルに堆積物懸濁試料を1 L ずつ満たし、これらを現場の海 水中に設置した。一定時間毎に懸濁試料を50 ml 取り出し、Whatman GF/F でろ過した後、90%ア セトンで抽出、Chl a濃度を測定した。

## <実験3>

2005年4月から毎月1回の割合で干潮時に巻き上がり海水を採取し、300µm目合いのメッシュ を通過したものを、ポリカーボネイト製ボトルに満たし、これらを現場の海水中に設置した。一定時間 毎に懸濁試料を50ml取り出し、Whatman GF/Fでろ過した後、90%アセトンで抽出、Chla濃度を 測定することにより増殖速度を求めた。

【結果および考察】

<実験1 > では、表層泥中の Chl a 濃度は、実験開始時に 24.7±1.5 µg/g、3.5 時間後に 27.9±4.9 µg/g であった。よって、干出時における泥中の Chl a 濃度はほとんど増加しなかったと考 えられる。

< 実験2 > では、Chl a 濃度は、実験開始時に 13.8 µg/L、3.5 時間後に 19.8 µg/L であった。このことから、表層泥を人為的に懸濁することにより、植物プランクトン量が増加することがわかった。

また、<実験3>では各水温に対する現場海水の増殖速度は、19 - 28 で 0.5 - 4.1 div/day となり、28 では 4.1 div/day という極めて高い増殖速度を示した。各水温に対して得られた増殖速 度をプロットすると、高い相関が認められた。

以上の結果より、干出時の表層泥中では一次生産者は増殖しておらず、冠水時に海水中に懸 濁された後に増殖していることが示唆された。このことは、干潟の一次生産者の増殖には、潮の干 満による表層泥の巻上げが重要である可能性を示唆している。

# 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

名古屋大学地球水循環研究センター 森本 昭彦

1.目的

日本海は日本列島とサハリンによって北西太平洋から隔離された縁辺海であり、接する海との海水交換は対馬、津軽、宗谷、間宮の4つの海峡を通し行われる。これらの海峡は狭くそして水深が浅いため、 日本海は閉鎖性が非常に高い。それゆえ、海洋汚染が長期間持続しやすく、汚染物質の拡散予測技術を 確立することが急務であり、日本海の海流や波浪の監視体制を構築することが必要である。さらに近年 では、対馬暖流により東シナ海から日本海へ輸送される大量の越前クラゲによる多大な漁業被害が報告 され、大きな社会問題となっている。また、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 リ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峡ダム建設や南 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。日本海研究は国際共同研究 CREAMS(Circulation Research of 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。ま た、観測機器の発達により HF レーダや ADCP を用いたモニタリングが行われるようになり、時空間に 密なデータが得られるようになった。

本研究集会では、観測データをベースとした日本海の研究、日本海および日本周辺海域におけるモニ タリング、海況予測に関係する数値モデル解析を行っている研究者を集め、海況モニタリングという視 点から最新の研究成果を発表していただくと同時に、各研究機関・研究者が行っている海流や波浪に関 する観測情報を持ち寄り、情報交換及び議論の場を提供することを目的としている。

2.内容

本研究集会は平成18年1月19,20日の2日間にわたって実施した。参加者リストを本報告書末尾に 示す。また、プロシーディングは別添資料としている。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。今回は、合計13 題の講演があり、参加者は30名を超えた。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、HF レーダによる対馬、宗谷海峡での観測結果、船舶観測による北海道西岸の流況、 対馬海峡近海の流れ、二酸化炭素分圧、水塊構造に関する研究、数値モデルによる日本海の水位応 答と流れに関する研究、衛星による表層流の研究、日本海以外のモニタリング、数値モデル、デー タ解析結果そして波浪計測と非常に幅広いものであった。講演題目は以下の通りである。

- 1.北海道渡島半島西岸を南下して津軽海峡に流入する流れ(2)
- 2.短波海洋レーダ・沿岸潮位記録・衛星高度計などを用いた宗谷暖流のモニタリング
- 3.HF レーダーで観測された対馬海峡表層流の季節変動
- 4.海底設置型 ADCP を用いた夏季の対馬海峡における流速観測
- 5.対馬海峡東水道底層水の水塊特性

- 6.対馬海峡における 2005 年夏季~冬季の pCO2 観測
- 7.能登半島周辺における急潮の特性
- 8.総観規模の大気擾乱に対する日本海水位のモデル応答
- 9.海面高度計による日本海の海表面流モニタリング
- 10.実習船宮城丸による日本 ハワイ間の表層流速観測 現状と課題 -
- 11.天皇海山列上及び周辺における海洋構造と流れ場
- 1 2 . Behavior of a small pulsed river plume in a strong tidal cross-flow in the Akashi Strait
- 13.純確率過程として見た非線形波浪の波高分布 -異常波浪の出現頻度に関連して-

## 3.研究集会の成果

対馬海峡と宗谷海峡では HF レーダ、ADCP によりここ数年流れのモニタリングが行われており 観測体制はほぼ確立されたように感じられた。両海峡の変動、特に流量変動は必ずしも同じ傾向を 示していないことは非常に興味深い。これまで、両海況の流況を高い時空間分解能で観測されたこ とはなく、本研究集会での議論を元に新たな研究が始まることが期待される。

渡島半島付近の観測結果からは、その内容だけでなく、厳しい海況、スケジュールの中で精力的 な観測が実施されていることに驚いた。各県の水産試験場はほぼ毎月定線観測を行っており、来年 度以降、多くの観測担当者に本研究集会に参加頂き、観測結果を報告いただく場になればと考えて いる。船舶による海洋観測は非常に大事であるが、我々が観測で使える船は限られており、毎月観 測を継続されている水産試験場の方から観測予定、観測項目等に関する情報を得ることは重要であ る。

船舶観測による研究報告では、これまでの集会になかった化学分野の発表が行われたことは非常 に良かったと思う。この集会の参加者は物理を専門にする研究者がほとんどであるため、これまで 今回のような発表がなかったわけであるが、日本海の環境モニタリングという視点からすれば化 学・生物過程をモニターすることは極めて重要であり、来年度以降もこのような分野の発表がます ます増えることを期待する。また、海洋観測を実施するときに、水産試験場の定線観測線やモニタ リング海域を考慮すれば、これまでにない結果が期待できるはずであり、この集会で情報交換を行 い観測計画立案に役立ててほしい。

数値モデル結果は非常に興味深いものであった。特に、ここ数年大きな漁業被害をもたらしてい る富山湾の急潮に関する数値モデルでは、日本海を通過する台風による現象であることが示された。 数値モデルからは力学等が解明されるわけであるが、数値モデルの検証やモデルの設定には観測デ ータが必要であり、観測とモデルは密接な関係にある。この集会に参加しているメンバーとの議論 からモデルの改良が行われると同時にその力学が解明されることを期待する。

瀬戸内海、太平洋でのモニタリング、データ解析結果は、海域こそ異なるものの共通することが 多く、特に水産高校の実習船でのモニタリングは、限られた資源の中で観測を実施しなければなら ない我々にとって、非常に参考になるものであったと同時に、それを実行するにはまだまだ多くの 問題があることがわかった。

波浪計測に関する講演は1題だけであったが、HF レーダによる波浪計測技術も進歩しており来 年度の集会で多くの発表があることを期待したい。 日本海の海況監視と予測のためには、流量、熱量など日本海の流入・流出境界である海峡の情報 を包括的に把握する必要がある。その意味では、対馬海峡、宗谷海峡での HF レーダ観測、漂流ブ イ観測、ADCP 観測によりこの 2 つの海峡の変動特性はある程度解明されてきたと思われる。津軽 海峡での観測結果に関する報告が今回なかったことが残念ではあるが、近いうちに津軽海峡にも HF レーダが設置される見込みであり、日本海の海水の主要な出入り口を同時にモニターできる日 が近いことは非常に楽しみである。今後、日本海の主要な出入り口において同時にモニターできる日 が近いことは非常に楽しみである。今後、日本海の主要な出入り口において同時にモニタリングが 開始されれば、日本海研究は飛躍的に進歩するはずであり、さらに、人工衛星データ処理を発達さ せ、日本海内部もある程度モニターできれば、これらの情報から日本海表層の現象を解明すること ができるはずである。また、モニタリング結果を数値モデルの検証に使うことにより鉛直的な構造 や力学も把握できるはずである。そのためにも、この研究集会では、観測データに基づいたモニタ リングだけでなく、様々な手法により日本海の研究を行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、本研究集会の開催にご尽力いただいた九州大学応用力学研究所力学シミュレーション研 究センターの増田章教授、吉川裕助教授、池末あけみ氏、ならびに関係する職員、学生諸氏に深く 感謝する。

# 日本海沿岸域の海峡モニタリングと波浪計測に関する研究集会

	2	
氏	,名	所属
田中	伊織	北海道・中央水産試験場
江淵	直人	北大・低温研究所
岩松	伸宏	朝日航洋(株)
杉尾	毅	第7管区海上保安本部
内村	忍	第7管区海上保安本部
中林	啓美	第7管区海上保安本部
灘井	章嗣	情報通信研究機構
Jerem	ny Bricker	神戸大学・土木工学
柳尾	茂文	九大総理工
広瀬	直毅	九大・応研
小笠原	〕勇	国際航業
河野	展久	福井県水産試験場
寄高	博行	海上保安大学校
吉川	裕	応力研
滝川	哲太郎	水産大学校
渡辺	敦	名古屋大学
千手	智晴	RIAM
福留	研一	九大総理工
和川	拓	北大・水産
浅	勇輔	九大総理工
増田	申	九大・応研
光易	靣	
久木	幸治	琉球大・理学部
稲津	大祐	東北大・理学部
磯辺	篤彦	九大総理工
中田	聡史	九大総理工
池田	捷夫	沿岸海洋調査
藤井	智史	琉球大・工学部
石井	幸治	九大・応研
石井	大輔	九大・応研
丸林	賢次	九大・応研
石橋	道芳	九大・応研
森本	昭彦	名大・水循環センター
古川	那津恵	九大総理工
木津	昭一	東北大・理学部

参加者一覧

平成17年度

# 核融合プラズマ分野 共同研究成果報告

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

(財)電力中央研究所 秀 耕一郎 九州大学 応用力学研究所 渡辺 英雄

1.目的

原子炉等の炉内構造物材料として用いられるオーステナイト系ステンレス鋼は、軽水炉温度で大量の中性子照射 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<sup>[1,2]</sup>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感受性の中性子照射量依存性を調 べ、SCC感受性の指標となる粒界割れ破面率が、熱鋭敏化材では照射量1x10<sup>20</sup>n/m<sup>2</sup>までは増加するものの、 3x10<sup>25</sup>n/m<sup>2</sup>では未照射状態よりも低下すること、一方で溶体化材は 3x10<sup>25</sup>n/m<sup>2</sup>では増加すること、またこの鋼種間の 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、ナノインデンターと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<sup>[3,4]</sup>では、照射を冷間加工(室温引張)で模擬し、ナノイ ンデンターを用いた微小硬さ測定からは、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、 一方、EBSPを用いた微小領域の結晶性測定からは、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報 告した。今回は、照射模擬の冷間加工材ではなく、重イオン照射材について、結晶粒内の結晶性の乱れについての 検討を実施した。

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ための試料は 3mm x200 µ m 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 で、0.6dpa、6dpaを実施した。それぞれの照射量を中性子照射量に換算すると、約 1x10<sup>25</sup>、 1x10<sup>26</sup> n/m<sup>2</sup>(E>1MeV)となる。

2.2 EBSP 測定

結晶性の乱れは EBSP を用いて測定した。なお測定は 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。なお、結晶中のミスオリエンテーションの同定は TSL 社製の OIM ソフトを用いて実施した。

#### 3.実験結果と考察

## 3.1 EBSP測定

EBSPを用いた方位の測定結果を図1(a)、(b)に示す。0.6dpa照射材は像の乱れも少なく、各結晶の状態が明瞭に区別できる。一方6dpa照射材は、電子銃の不調でデータの得られなかった部分(黒い部分)を除くと、結晶粒内に別色の点が多数存在している。これは粒内に結晶性の乱れた部分が存在していることを示すものであり、前報<sup>(4)</sup>の冷間加工材と比較すると、600MPa変形材の結果に近い。

## 3.2 ミスオリエンテーション測定

方位測定を実施した領域について、図(a)(b)の各ラインについて結晶のミスオリエンテーションを測定した。0.6dpaに ついては結晶粒内の乱れが少ないことから、、比較的広範囲に、一方6dpaについては、結晶粒内に乱れがあるため、 比較的小さな範囲について測定を実施した。測定した結果を(a-1~4)と(b-1~4)に示す。
測定した結晶粒によりばらつきがあるが、ミスオリエンテーションの絶対値は6dpaが大きく、ピークの間隔は0.6dpaの 方が大きかった。各照射量の平均値を比較すると、0.6dpaと6dpaでミスオリエンテーションとピーク間隔は各々約2倍と 約半分であった(表2)。ミスオリエンテーションの平均値とピーク間隔の照射量依存性を図2(a)と図2(b)にそれぞれ示 す。両図面において未照射状態のデータは取得していないが、当然結晶粒の乱れは無いと考えられるため、照射量 ゼロに対してはどちらの数値もゼロとした。その結果、ミスオリエンテーション絶対値は、照射量の増加とともに増加し、 最終的には飽和する傾向を示すのに対し、ピーク間隔は、照射初期には増加し、その後低下する傾向を示めした。

著者らは前報<sup>[4]</sup>で結晶粒の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粒界バリアに匹敵する 強度のバリアが出現し、そのバリアの数は変形が進むにつれて増えていくことを報告した。今回は重イオン照射材で ありナノインデンターを用いた硬さ測定は実施していないものの、結晶性の乱れがミスオリエンテーションに起因して いると仮定すると、これは「歪」を意味しており、応力-歪の関係を通して「硬さ」と同等に取り扱えることを意味する。こ のことは、照射によって粒内に変形バリアが出現し、これが材料の不均一変形に寄与した可能性を示すものである。

### 4.まとめ

- 1) EBSPを用いた方位測定の結果、0.6dpa照射材には結晶性の乱れが認められない一方で、6dpa照射材について は結晶性の乱れている部分が存在し、冷間加工材の600MPa変形材の結果に近いものであった。
- 2) ミスオリエンテーションの絶対値は、照射量の増加とともに増加し、最終的には飽和する傾向があった。一方、ピーク間隔は、照射初期では増加し、その後低下する傾向があることが示された。

今回測定されたミスオリエンテーションが結晶性の乱れに起因しているとすると、これは「歪」であり、応力-歪の関係を 通して「硬さ」と同等に取り扱えることとなる。このことは、照射でも粒内に変形バリアが出現することを示しており、これ が中性子照射材の材料の不均一変形に大きな役割を果たした可能性がある。

### 5.参考文献

- 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

### 謝辞

EBSPの測定に関して電中研の太田上席研究員、渡辺主任研究員に多大なる協力を頂いた。ここに謝意を示します。

Element	С	Si	Mn	Р	S	Ni	Cr	Ν	Co	Fe
	0.063	0.5	0.98	0.026	0.045	9.99	18.65	0.036	<0.01	bal.

表1 化学組成と熱処理の条件

Thermally-sensitized treatment : SA(1100'C x 1hr) + sens.(650'C x 100 min + 750'C x 24 hr)

### 表2 ミスオリエンテーション量とミスオリエンテーションピーク間隔

Irradiation	misorientatio	on (degrees)	Peak interval (µm)		
Dose (dpa)	Ave.	SD	Ave.	SD	
0.6	0.6	0.27	7.0	2.3	
6	1.4	0.69	4.0	1.0	



図1 EBSPによる結晶方位測定結果とミスオリエンテーション測定結果



九州産業大学工学部 二神 光次

目的

X線の全反射臨界角近くの視射角を用いる反射X線トポグラフイは、バルク層からの反射X線の 影響をなくし、結晶表面下の浅い領域(5nm~200nm)の格子歪を観察・評価するのに適した方法であ る。これまでの研究で、薄い酸化膜の膜端では酸化膜の圧縮応力によって格子歪が生じるが、この格 子歪は酸化膜を除去すると消えるため格子面傾斜による弾性歪であることが分かっている。しかし酸 化膜をつけた状態で熱処理を加えるとこの歪が弾性歪から塑性歪に変わることが分かった。そこで本 研究では弾性歪から塑性歪へと変化する温度、時間を見積もり、この塑性歪の評価を行った。更に低 エネルギーの窒素イオン(N+)をSiに注入して生じる格子膨張と熱処理による結晶性の回復過程、 熱処理の段階で新たに生じる注入境界の格子歪(格子の膨張、収縮)の見積もりを行った。

実験方法

実験に用いられるシリコンウェハーは、エピタキシヤル基板結晶等に用いられる結晶であり、 (100) 格子面と(100) 結晶表面とが約2.6°傾いており鏡面研磨されている。このようなウェハー を用いると、CuK<sub>α1</sub>線と4組ある {311} 非対称反射面の中から全反射臨界角( $\theta_{e}=0.225^{\circ}$ )に近い 視射角を選ぶことができる。このようなウェハーに酸化膜を作製し、Ar雰囲気中で500~750°C、45、 90minの等温アニールを行った後、1%フッ酸で酸化膜を除去したものを試料とした。回折実験は視射 角は $\phi=0.2\sim0.25^{\circ}$ で(+、-)平行配置の2結晶法でトポグラフ撮影を行った。

また、同様な試料にイオン注入を低エネルギー(8keV、3keV、ドーズ量1×10<sup>15</sup>/cm<sup>2</sup>)で行い、同様な回折条件でトポグラフを撮った。熱処理はAr雰囲気中で、700℃、30、60、90、120minの等温ア ニールを行った。

実験結果と考察

(1)酸化膜と塑性歪み

Fig. 1は酸化膜を形成し、Ar雰囲気中で700℃、45minで熱処理を施した後、1%のフッ酸で酸化膜 を除去した試料のトポグラフである。半値幅36 "のロッキングカーブの-18 "の角度位置で撮影して いる。酸化膜を除去後にもかかわらず、その膜端に塑性歪が黒と白のコントラストとして現れている。 これは熱処理の過程で格子歪が弾性歪から塑性歪へと変化したためであり、この場合、格子面の傾斜 を示している。しかし500℃、45minのトポグラフでは塑性歪が明瞭ではないため、酸化膜端の格子歪





が弾性歪から塑性歪に変化する最低温度は500℃付近だと考えられる。この関係を明確にした実験が 次のFig. 2である。Fig. 2はフイルムの黒化度をフィルムスキャナーで光の強度に変換してそのプロ ファイルの変化から各時間ごとの熱処理温度との関係を表したものである。熱処理温度が高い方が反 射強度が強いが、500℃付近で酸化膜両端のコントラストは消失する。また、この手法を用いて550℃、 650℃、750℃の熱処理時間90minの試料のトポグラフを5~10″間隔で角度を変えて撮り、塑性歪の強 度を測定しまとめたものがFig.2である。

(2)低窒素イオン注入による格子歪み

Fig. 3はNイオン注入後700°C、90minのアニール後のトポグラフで、中央の部分が注入領域である。Fig. 3 (a)、(b) は半値幅36 "のBragg角からそれぞれ-18 "、+18 "の位置で撮影されたものである。Fig. 3 (a) と (b) ではコントラストの逆転が起こっている。(a)、(b) ともに結晶性の回復のために非注入領域とのコントラストの差は低い。しかし、アニールによって注入一非注入領域の境界に白、黒のコントラストの格子歪が新たに生じているのが分かる。この歪は幅20  $\mu$  m程度で二重になっており、コントラストの付きかたから内側は格子の膨張が、外側は格子の収縮が生じている。この試料のトポグラフを5~10 "秒間隔で角度を変えて撮り、フイルムの黒化度をフィルムスキャナーで光の強度に変換してそのプロファイルの変化から、Fig. 4に示すような強度分布が得られた。このグラフより角度差 $\Delta$   $\theta$  1、 $\theta$  2を読み取り、 $\Delta$  d/d=-cos  $\theta$   $\Delta$   $\theta$  の関係より格子面間隔の変化量 $\Delta$  d/dを求めると境界の内側、外側それぞれ $\Delta$  d/d=+1.8×10<sup>-4</sup>、-1.4×10<sup>-4</sup>の膨張、収縮が起こっていることが分かった。



### まとめ

本実験は研究協力者の宮崎大学工学部福森太一郎助教授、黒木正子助手および院生方々ともに行っ たものである。また、実験の遂行に当たり、所内世話人の佃 昇助教授に多大のご援助を戴いた。ま た、照射実験については研究所の吉田直亮教授および職員、院生の方々に多くのご援助を頂いた。こ こに記して感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) T.Fukumori, K.Futagami, M.Sakamoto and S.Hirooka: JJAP 43,1(2004)pp.385-388
- 2) T.Fukumori, K.Futagami, K.Kuroki: JJAP 43, 12(2004) pp. 8331-8334
- 3) K. Futagami, T. Fukumori, N. Tsukuda K. Kurokii: JJAP 44, 8(2005)pp. 6277-6282

### 核融合科学研究所 室賀健夫

### 1. 目的

バナジウム合金は一般に活性な金属で、環境から酸素、窒素、炭素などの不純物を容易に吸収し、組 織や強度特性が変化する。一方、液体リチウムなどの還元性の強い環境では逆に酸素が流出するという 現象が起こる。核融合ブランケット環境でバナジウムは液体リチウムおよび真空に面して使われると想 定される。また異常時には空気との接触も考えられる。一方、液体リチウムブランケットの MHD 圧力 損失を低減するため、予め酸素をバナジウム合金の表面近傍に導入し、Li にドープした Er と反応させ 絶縁皮膜を形成させる方法(その場被覆)が開発中であり、ここでは、試料中の酸素の保持が必要であ る。バナジウム合金の不純物混入効果は、表面化学分析などの手法により部分的には分ってきたが、透 過電子顕微鏡レベルで微細組織と強度の関係を調べた例は少ない。

本研究の目的は、高温真空、高温酸化環境に曝された低放射化バナジウム合金の微細組織の表面から の変化を、ビッカース硬度測定と透過電子顕微鏡の組み合わせにより詳細に評価することにより、浸入 不純物の組織および強度特性への影響、不純物保持機構を明らかにすることを目的とする。

2. 実験方法

7×7×0.5mm の V-4Cr-4Ti 合金 (NIFS-HEAT-2) と 7×7×1mm の純バナジウムを、核融合科学研究所の 高温質量分析器を用いて、高温 Ar ガスフロー環境に 700 6 時間曝し、Ar ガス中に約 0.1-1ppm 含む 酸素不純物を試料に導入した。その後赤外線加熱炉において、真空中で 700 4 32 時間の熱処理を行 った。試料を樹脂で固定し、マイクロカッターにより縦方向に切断し、切断面のビッカース硬度を測定 した。また、試料を背面から電解研磨し、表面近傍の微細組織を応用力学研究所の透過電子顕微鏡によ って観察した。一部の試料は収束イオンビームにより薄膜化し、深さ方向の組織観察を行った。

3. 実験結果

図1は、V-4Cr-4Ti と純 V (処理なし、700 6時間酸化、 酸化後700 16時間熱処理材) のビッカース硬度の深さ依存性 を比較したものである。

V-4Cr-4Ti では、酸化の後熱 処理を行うと、一定の深さまで ほぼ硬度が一定の領域が形成さ れる。これは酸素を含んだ相が この領域に形成されることを示 している。一方純バナジウムに おいては、酸化によって緩やか な硬度の深さ分布が形成される が、熱処理により殆ど深さ方向 に一定になり、酸素が固溶状態 で試料に均一に拡散したことが わかる。

V-4Cr-4Ti においては、酸化 時間を 0.5 8 時間に変化させ ると、硬度上昇領域が広がるが、 熱処理時間を6 32 時間に変化



図 1 V-4Cr-4Ti と純 V (処理なし、700 6 時間酸化、酸化後 700 16 時間熱処理材)のビッカース高度に深さ依存性

させても、硬度の深さ分布に殆ど変化のないことがわかった。これは酸素を含む相の形成が比較的早期 に起こり、その後は安定であることを示している。



図2 V-4Cr-4Tiの処理なし、酸化、酸化後熱処理試料の表面近傍組織

図2はV-4Cr-4Tiの処理なし、酸化、酸化後熱処理試料の表面近傍組織を示す。処理なしの材料は、 Ti CONの球状析出物が低密度で形成し、酸化後は複雑な酸化物相が形成している。一方、酸化後熱処 理材では、<001>方向に延びた帯状の析出が高密度に形成されている。これらについては、X線光スペ クトル測定により、TiO2の相が形成していることを確かめた。ビッカース硬度が一定な領域はこの相が 一面に形成されているものと考えられる。

4.考察

本研究の酸化、酸化後熱処理条件は、酸素注入材をEr含有Liに浸漬することによりEr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の絶縁皮膜 をその場製作する試験において、最も安定な絶縁皮膜の形成が可能な条件として選ばれたものである。 本研究により高密度網目状TiO<sub>2</sub>析出が被覆形成のための酸素の保持の役目を果たしていることが明ら かになった。

5.研究組織

室賀健夫、長坂琢也、田中照也、姚 振宇 (核融合科学研究所) 吉田直亮、渡辺英雄 (九州大学応用力学研究所)

# 6. 発表論文

T. Nagasaka, T. Muroga, H. Watanabe, K. Yamasaki, N-J. Heo, K. Shinozaki and M. Narui, Materials Transactions 46 (2005) 498-502.

# FePt-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>グラニュラー薄膜におけるイオン照射による形状変化

九州大学大学院工学府: 白井学、堀口篤司 同 工学研究院: 松村晶、安田和弘

# 【緒言】

近年、磁気記録媒体の記録密度は急速に高密度化が進んでいる。高密度化のためには記録単位を構成する磁性粒子の縮小が必要である。しかし、粒子サイズ縮小に伴って磁化の熱揺らぎによって記録が消失するという問題が生じるため、この問題を抑えつつ粒子の縮小を行うには高い磁気異方性を持つ磁性材料が必要である。L10規則構造を有するFePtは高い磁気異方性を持ち、粒子がナノサイズまで縮小しても磁化が安定している。そのためFePt粒子が非磁性母相に分散した FePt グラニュラー薄膜は次世代の高密度磁気記録媒体の候補材として期待されている。製膜直後のFePt粒子は不規則 fcc 構造であるため実用化のためには L10規則構造にしなければならない。高温熱処理によって規則化するということが知られているが、規則化と同時に粒子が粗大化し、高密度化への妨げとなる。本研究グループでは粗大化抑制方法としてイオン照射の可能性について検討を進めている。熱処理したFePt粒子に対して2.4 MeV Cu<sup>2+</sup>イオンを照射したところ原子配列は不規則状態となったが、FePt粒子が薄膜方向に長く伸びた形状へと変化した(図 1)。昨年度はCu<sup>2+</sup>イオンを薄膜に対して垂直に照射したが、本実験ではグラニュラー薄膜に対して角度を変えて Cu<sup>2+</sup>イオン照射を行い、粒子の形状変化のメカニズムを探った。

### 【実験方法】

本実験で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成された非晶質 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を母相とする FePt グラニュラー薄膜である。試料組成は(FePt<sub>55</sub>Pt<sub>45</sub>)<sub>41</sub>(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>59</sub> であり、膜厚は 20 nm である。この試料に対してまず真空 中において 650°Cで 20 分間の熱処理を施した。その後、九州大学応用力学研究所の高エネルギーイオン発生装置(タン デム型加速器)を用いて室温にて 2.4 MeV の Cu<sup>2+</sup>イオンを 5×10<sup>19</sup> ions/m<sup>2</sup> 照射した。照射の際にはイオン入射方向に対し て試料を46°および 60°傾斜させて行った。これらの試料に対して電子線トモグラフィーを用いて FePt 粒子の形状を評価し た。電子線トモグラフィーは九州大学超高圧電子顕微鏡室の Tecnai-20 型 TEM(FEI 社製)を用いて、-60°から+60°の角度 範囲で 2°刻みで傾斜させながら計 61 枚の明視野像を撮影し、そこからコンピュータによる計算で三次元像を構築した。そ して、得られた三次元構築像から角度やアスペクト比などの定量的な解析も行った。方位については x 軸からの偏角  $\varphi$ , z 軸からの偏角を $\theta$ で表すこととする。

### 【実験結果】

図 2 に膜厚方向に垂直(θ=0°)に照射した試料のアスペクト比分布ヒストグラムを示す。平均アスペクト比は 2.19(σ=0.45) であり、定量的な解析からも FePt 粒子が伸びていることが確認できる。図 3 にはこのときの θ 分布ヒストグラムを示す。これ より θ は 0°付近にピークがあり、粒子はイオン入射方向である膜厚方向に伸びていることが示されている。同じ照射量で θ=46°,θ=60°の条件で照射した試料に対してもトモグラフィーによる三次元構築を行った。それぞれの平均アスペクト比は、 それぞれ 2.12(σ=0.56), 2.09(σ=0.48)であり、イオン入射方向に依存せずにほぼ同程度であった。それぞれの粒子の θ 分 布ヒストグラムを図 4 および図 5 に示す。46°傾斜試料では θ は 46°付近にピークがあるが、60°傾斜試料では 60°付近にピークはなく、0°付近にピークがみられる。よって、試料の傾斜角が増加するにつれて粒子が伸びる方向とイオン入射方向 の依存性は弱まるということがわかった。このような粒子の形状変化は、Cu イオン照射されたときにイオン照射の入射方向 への Fe 原子、Pt 原子の優先的なはじき出し効果の影響と、非晶質 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 母相にイオン入射方向に垂直に局所的な圧縮

応力が働くイオンハンマリング効果、すなわち母相への影響の二つの効果によるものであり、それらの寄与はイオンの入 射方位によって変化していることが考えられる。

【研究成果報告】

- [1]白井学他, FePt ナノグラニュラー薄膜の Cu イオン照射効果および電子線トモグラフィーによる三次元構造解析 第47回日本顕微鏡学会九州支部学術講演会 2005.12.3,山口大
- [2]M.Shirai et al, Morphological Change in FePt Nanogranular Thin Films Induced by Irradiation with 2.4 MeV Cu<sup>2+</sup> ions: Electron tomography Observation, Materials Transactions, Vol.47 No.1 (2006)



図1Cuイオン照射試料のトモグラフィー像



図2Cuイオン照射試料(0°傾斜)のアスペクト 比分布ヒストグラム



図 3 Cu イオン照射試料(0°傾斜) の θ 分布ヒストグラム



図4 Cu イオン照射試料(46°傾斜) の θ 分布ヒストグラム



図 5 Cu イオン照射試料(60°傾斜) の θ 分布ヒストグラム

# 蛍石型結晶の欠陥形成に与える電子励起の効果

九大院·工 船元健太、安永和史、安田和弘、松村晶

### 1. 緒言

原子力発電の運転コストや放射性廃棄物の低減を目指して、軽水炉燃料(UO<sub>2</sub>)の高燃焼度化が計画されている。しかし約 55 GWdt 以上の高燃焼度の燃料では、外周部において高密度のバブルの形成および結晶粒の微細化が起こることが報告されており、核分裂生 成物であるXeの放出挙動や燃料の諸物性に変化を与えることが懸念されている。バブルの形成や結晶粒の微細化は、蛍石型酸化物で あるUO<sub>2</sub>中での核分裂生成物や転位などの照射欠陥の蓄積に起因していると考えられる。そこで、同一結晶構造をもつCeO<sub>2</sub>に対して 電子あるいは重イオンを照射し、形成された照射欠陥の性状やその形成条件および成長過程について比較検討することにより、蛍石 型結晶における照射欠陥の蓄積過程に関する知見を得ることを目的とした。

### 2. 実験方法

CeO<sub>2</sub>粉末(純度 99.99%)を130 MPaで一軸加圧することにより10 mm / 2 mmのペレットを作製し、これを97 MPaで冷間静水圧圧縮(CIP)して緻密化した。その後、1873 Kにて8時間大気中で焼結することにより平均粒径約5 µmのバルク試料を得た。これから3 mm / のディスクを超音波カッターで切り出し、透過型電子顕微鏡(TEM)で観察するためにイオン研磨により薄膜化した。電子照射は、九州大学超高圧電子顕微鏡室の超高圧電子顕微鏡(JEM-1000)を用いて行い、照射電子エネルギーは200~1250 keV、照射温度は296~473 Kである。重イオン照射は、九州大学応用力学研究所のタンデム型イオン加速器を用いて行い、照射イオン種およびエネルギーはFe<sup>2+</sup>および2.4 MeV、照射温度は296,773 Kである。

### 3. 結果および考察

図1は、CeO2に対して 296 Kで様々なエネルギーの電子を約3×10<sup>26</sup> e/m<sup>2</sup>まで照射することにより形成された照射欠陥の明視野TEM 像である。これらの照射欠陥は像コントラストの解析により、{111}面上に存在し晶癖面に垂直な<111>のバーガースベクトルをもつ 格子間原子型の転位ループであることが明らかになっている<sup>(1)</sup>。また転位ループの性状は、不定比性で積層不整を伴う 1/2<111>{111} 型であると考えている。これらの転位ループの形成の上限の温度領域は約460 Kであった。電子照射によるCeイオンおよびOイオンの 弾き出し断面積をMcKinley-Feshbachの式<sup>(2)</sup>を用いて評価したところ、200~1250 keVのエネルギーをもつ電子ではCeイオンの弾き出し 損傷をほとんど誘起することができず、Oイオンの選択的な弾き出し損傷であることが判明した。







図1から電子照射により形成された転位ループの成長は、電子エネルギーの低下に伴って促進されていることがわかる。そこで、

各電子エネルギーにおける転位ループの直径D (nm)の照射時間(t)依存性を調べると $D \propto t^{\delta}$ ,( $\delta$ : 冪指数)で表されることが明らかになった。  $\delta$ は図2に示すようにエネルギー依存性を示し、200 keVにおいては約0.85、500 keV以上では約0.33 であった。電子線照射による 格子間原子型の転位ループの成長挙動に関しては、空孔の移動度の違いが成長冪指数 $\delta$ の値の違いとして反映されることが、反応速度論を用いた解析により示されている<sup>(3)</sup>。すなわち、空孔の移動度が十分に高い場合は $\delta$ =1 となり照射時間に対して転位ループは一定速度で成長し、空孔がほとんど移動できない場合は $\delta$ =1/3 となり照射時間とともに転位ループの成長速度が減少する。従ってCeO<sub>2</sub>中の 転位ループの成長挙動の電子エネルギー依存性の結果は、200 keV電子照射下では他のエネルギーと異なりCeO<sub>2</sub>中のOイオン空孔の 移動度が増加していることを示していると解釈される。図3は、CeO<sub>2</sub>中に電子を照射した場合のOイオンによる電子的阻止能(S<sub>0</sub>)の電 子エネルギー依存性を示したものである。電子的阻止能の計算にはBetheの式<sup>(4)</sup>を用いた。S<sub>6</sub>値は500 keV以上のエネルギーではほぼー 定値を示しているのに対し、それ以下のエネルギーではエネルギーの低下に伴って著しく増加することがわかる。MgOにおける理論 計算<sup>50</sup>によると、Oイオン空孔に捕獲されている電子数が減少すると、その移動の活性化エネルギーも顕著に減少することが示されて いる。CeO<sub>2</sub>中の200 keV電子照射下での転位ループの成長挙動は、低エネルギー電子照射による電子励起がOイオン空孔周辺の電子状態を変化することによりその活性化エネルギーを低下させた可能性が指摘される。

図4は2.4 MeV, Fe<sup>2+</sup>イオンを照射したときに形成された照射欠陥の暗視野像である。照射温度は296 Kで、照射量は4×10<sup>18</sup> ions/m<sup>2</sup>で ある。転位ループは約50 nmの大きさまで成長し重なり合った状態で観察されている。回折ベクトルg=220 および020 を励起した場 合に、それぞれの回折ベクトルに直交した転位ループが主に観察されていることから、これらの転位ループの性状は、1/2<110>{110} 型完全転位ループであると判定される。また同一性状の転位ループは、773 Kにおいても形成されることを確認している。SRIMコー ドにより弾性的な弾き出し損傷を評価したところ、2.4 MeV Fe<sup>2+</sup>イオン照射下ではCeイオンおよびOイオンの両イオンが弾き出される ことがわかった。このことから両イオンが弾き出される照射条件では電子照射と異なり定比性の完全転位ループが形成され、熱的安 定性が高いことが明らかになった。



図4 2.4 MeV, Fe<sup>2+</sup>イオンを照射した際に形成された照射欠陥。照射温度は296 Kで、照射量は4×10<sup>18</sup> ions/m<sup>2</sup>である。

### 4. 結論

- (1) 200~1250 keVのエネルギーをもつ電子線照射により、CeO2中に積層不整を伴う不定比性の転位ループが460 K以下の温度領域で形成された。転位ループは電子エネルギーに強く依存した成長挙動を示した。特に200 keV電子照射下における一定速度成長は、Oイオン空孔の移動度が200 keV電子照射により増加したことに起因した現象と解釈された。この原因としては200 keV電子では電子的なエネルギー付与が高く、電子励起効果によりOイオン空孔の移動の活性化エネルギーが減少したことが示唆された。
- (2) Fe<sup>2+</sup>イオン照射により、CeO<sub>2</sub>中に定比性の1/2<110>{110}型完全転位ループが296及び773Kで形成された。この転位ループは、電子線照射で形成された転位ループとは性状が異なり、熱的安定性が高いことが示された。

### 参考文献

- (1) K. Yasunaga, K. Yasuda, S.Matsumura, T.Sonoda, Nucl. Instru. and Meth. B in press
- (2) W.A.McKinley, H.Feshbach, Phys. Rev. 74 (1948) 1759
- (3) M.Kiritani, N.Yoshida, H.Tanaka, Y.Maehara, J. Phys. Soc. Japan 38 (1975) 1677
- (4) H.Bethe, J. Askin, Experimental Physics vol.1 ed. E.Sinre, Willy, New York 166 (1953)
- (5) E.A.Kotomin, A.I.Popov, Nucl. Instrum. and Meth. B 141 (1998) 1

### 学会発表

安永和史、船元健太、安田和弘、松村晶、園田健「電子および重イオン照射によりCeO2に形成された面欠陥の構造」日本金属学会秋季大会 2005年9月

船元健太、安永和史、安田和弘、松村晶、園田健「電子およびイオン照射に伴うCeO2の微細組織変化」原子力学会九州支部第24回研 究発表講演会 2005 年 12 月

京都大学原子炉実験所 義家敏正 徐 虬 九州大学応用力学研究所 渡辺英雄 吉田直亮

1.目的

金属中でのヘリウムは、拡散が非常に速く、また、欠陥との相互作用が大きい。そのため、核融合炉 のプラズマ対向材料の損傷においては、中性子やプラズマ照射による照射損傷による効果よりも、内部 へ拡散したヘリウムとの相乗効果の方が大きい効果を及ぼす可能性がある。即ちわし、高フラックス、 低エネルギーヘリウムプラズマが表面よりもっと深い所に損傷を与える可能性が高い。本研究では、プ ラズマ対向材の候補材料タングステンにおいて、反応速度論を用いて中性子と低エネルギーヘリウムプ ラズマ照射との相乗効果を調べた。

### 2.計算方法

本研究では、格子間原子、原子空孔とヘリウム原子のみが動けると仮定した。また、一つの原子空孔 に入れるヘリウム原子の数は最大6個、一つの原子空孔に3個以上のヘリウム原子が入ると格子間原子 と反応しないと仮定、照射温度は873K、中性子照射の損傷速度は10<sup>-6</sup>dpa/sとした。第一壁およびダイ バータの模擬として、ヘリウム粒子エネルギーが1keV、照射強度が10<sup>18</sup>/m<sup>2</sup>sの場合(高エネルギー・低 照射強度の第一壁条件)と、ヘリウム粒子エネルギーが30eV、照射強度が10<sup>22</sup>/m<sup>2</sup>sの場合(低エネルギ ー・高照射強度のダイバーター条件)について計算を行った。タングステン試料の厚さは電子顕微鏡試 料の厚みに近い0.067mmとした。表1に本研究に使われたパラメーターを示す。

### 3.計算結果と考察

図 1 に 873K で中性子照射がないタングステンのマトリクスに、ヘリウムのエネルギー1keV、照射強 度 10<sup>18</sup>/m<sup>2</sup>s のヘリウムの濃度分布を示す。時間の増加と共に、ヘリウムがマトリクスの奥まで拡散し、 0.07mm に到達するまで 0.1 秒しか掛からなかった。また、マトリクス中のヘリウム濃度は 1 秒までで飽 和になった。この結果から873Kにおけるタングステン中のヘリウムの拡散が非常に速いことが分かる。 これに対して図2に、損傷速度10<sup>-6</sup>dpa/sの中性子照射したタングステンマトリクス中のヘリウムの濃 度分布を示す。図1に示した未照射のタングステンと同じように、照射初期に(0.01sまで)照射時間の 増加と共に、ヘリウムがマトリクスへ拡散する。しかし、さらに照射をすると、ヘリウムの濃度が低く なる。これはマトリクスに導入されたヘリウムが、中性子照射によって形成された欠陥にトラップされ、 深いところへの拡散が阻止されたことを示している。図3に6He-V集合体の濃度分布の照射時間依存性 を示す。表面から 0.05µm 以内に高濃度の 6He-V 集合体が形成され、照射時間の増加と共に、濃度が増 加した。1s 間照射後に、6He-V 集合体の濃度が深さの増加と共に急激に減少した。1keV のヘリウムのみ 照射の効果も調べた。その結果から、表面から 0.05μm 以内における高濃度の 6He-V 集合体の形成が、 主に 1keV のヘリウムによるものであることが分かった。また、もっと深い所に形成された 6He-V 集合 体が、中性子照射によるものを示している。照射時間の増加と共に、表面から深い所に形成された He-V 集合体は材料の力学性質に影響を与える。一方、弾き出し損傷ができないエネルギー30eV、照射強度 10<sup>22</sup>/m<sup>2</sup>sのヘリウムと中性子照射による、6He-V集合体の濃度分布の照射時間依存性を図4に示す。1keV ヘリウム照射と同じように照射時間の増加と共に、6He-V 集合体の濃度が増加した。また、深さの増加 と共に、6He-V 集合体の濃度が減少した。しかし、1keV ヘリウム照射より更に奥まで(表面から 4μm 程度 ) 6He-V 集合体が形成された。6He-V 集合体の形成はヘリウム照射によるものではなく、中性子 照射によるものであった。10⁴s 照射後に、表面付近の 6He-Ⅴ 集合体の濃度が 10⁻²に達したことから、ヘ リウムが全ての中性子照射によって形成された原子空孔にトラップされたことを示している。即ち、ト ラップされていないヘリウムがさらに深い所に拡散し、深い所で 6He-V 集合体が形成されたと理解でき る。

4.まとめ

反応速度論を用いて、タングステンにおける中性子と 1keV 及び 30keV のヘリウムプラズマ照射の相 乗効果を調べ、以下のことが明らかになった。

中性子とヘリウムの同時照射下においては、ヘリウム注入面近傍において照射によって導入された 空孔にヘリウムが捕捉され高密度のヘリウム - 原子空孔集合体が形成される。この反応によってヘ リウムの深部への拡散が制御される。

高エネルギー・低照射強度の第一壁条件においては、ヘリウム照射による表面近傍での原子空孔の 導入が大きいためヘリウム-空孔複合体の形成は表面から 0.05µm 程度に集中する。

これに対して、低エネルギー・高照射強度のダイバーター条件では、中性子照射による欠陥の蓄積 に注入ヘリウムが影響する範囲が 4μm 程度にまで広がる。

# 表 計算に使われたパラメーター

$P(s^{-1})$	10 <sup>-6</sup>
$p_{D-He}(s^{-1})$	$4 \times 10^{-3}$ for 1 keV
$p_{D-He}(s^{-1})$	0 for 30 eV
$p_{\text{He}}(s^{-1})$	$8 \times 10^{-3}$ for 1 keV
$p_{\text{He}}(s^{-1})$	$2.4 \times 10^2$ for 30 eV
$E_m^{I}(eV)$	0.15 eV
$E_{m}^{V}(eV)$	1.4 eV
$E_{m}^{He}\left( eV ight)$	0.3 eV
E <sub>emit</sub> (He-I) (eV)	0.5 eV
Cs	10 <sup>-10</sup>
Z	1
$\nu$ (s <sup>-1</sup> )	10 <sup>13</sup>







図 3 873K タングステン。6He-V 集合体の濃度 分布の照射時間依存。ヘリウムのエネルギー 1keV、 照射強度 10<sup>18</sup>/m<sup>2</sup>s。 中性子照射 10<sup>-6</sup>dpa/s。



図 4 873K タングステン。6He-V 集合体の濃度 分布の照射時間依存。ヘリウムのエネルギー 30eV、照射強度 10<sup>22</sup>/m<sup>2</sup>s。中性子照射 10<sup>-6</sup>dpa/s。

筑波大学プラズマ研究センター 中嶋洋輔

# 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を目的として、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 Hα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。<sup>[1]</sup> 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 される。ここでは、必要な改造を施した DEGAS コード (GDEGAS) を用いて計算を行っている。<sup>[2]</sup>

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、計算が行われてきた。<sup>[2-5]</sup>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適用可能なバージョン (ver.63)<sup>[6]</sup>が利用できる環境が整い、 非軸対称な体系への適用が可能となった。これによって、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、トロイダル方向の計 14 箇所に Hα線検出器を設置しており、Hα線 強度の空間分布測定結果と、中性粒子モンテカルロ輸送コード DEGAS による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なわれている。これまでの実験において、2.45GHz の LHCD に より生成された低密度プラズマ(n<sub>e</sub>~1.4×10<sup>12</sup>cm<sup>-3</sup>)と8.2GHz の LHCD による高密度プラズマ(n<sub>e</sub>~1.4 ×10<sup>12</sup>cm<sup>-3</sup>)の2種類のプラズマにおいて、ポロイダル及びトロイダル方向の Hα線強度分布計測が行 われ、ポロイダル断面の実測値とシミュレーション解析に基づく計算結果が、概ね良い一致を示すこと を確認している。一方、トロイダル方向の実測値では、プラズマパラメータの測定値に基づく中性粒子 の平均自由行程から予想される結果と単純に比較出来ないことがわかった。

水素原子の平均自由行程んは次式で表される。

$$\lambda = \frac{\sqrt{2E_n/m_n}}{N_e \left(\langle \sigma_e v \rangle + \langle \sigma_{CX} v \rangle\right)}$$

ここで *E*<sub>n</sub>、*m*<sub>n</sub>は、各々中性粒子のエネルギーと質量であり、<σ<sub>ex</sub>v>、<σ<sub>ex</sub>v>は電子衝突電離と荷電交 換反応の反応率である。水素原子の入は、低密度プラズマにおける中心のパラメータでは、高密度のそ れより7~8倍長くなる。一方、実測結果は 1.5 倍程度長くなるに過ぎない。この不一致の原因を調べ るために、円筒モデルを用いた DEGAS による中性粒子輸送シミュレーションを行った。

図1は、シミュレーションに用いた円筒メッシュモデルの概略図を示している。このメッシュでは、 X軸方向に 13、Z軸方向に 15 の領域が設定され、Z軸の周りに回転させた周方向に一様な円筒モデ ルとなっている。また、X軸方向は、実際の TRIAM-1M のプラズマ半径に対応している。プラズマへ の中性粒子源は、真空容器壁面の狭 いリング状の領域に設定し、そこか らプラズマへ向かって入射する配位 に設定した。

図2は、DEGAS で得られた結果 に基づいて計算された Ha線強度の 軸方向分布を示している。算出した Ha線強度の減衰長は、低密度プラズ

マで 26.5cm, 高密度プラズマで 18.5cm となった。この結果から、シミュレーション解析においても低密度では高密度の約 1.5 倍の値を示し、測定結果を再現することがわかった。

一方、図3に示すように、プラズマと境界を接するリミターを 模擬したプラズマ直近に粒子源を与えたモデルでは、低密度・高 密度各々において、減衰長は23.5cm、16.5cm と算出され、真 空容器から放出するモデルより、局在化した分布となり、粒子源 の位置によって Hα線強度の減衰長は変化することがわかった。

プラズマ密度が希薄な SOL 領域において、中性粒子は長い平 均自由行程を持ち、Hα線強度の減衰長に大きく影響を及ぼすと 考えられる。図4に SOL のプラズマパラメータを変えた場合の

Hα線強度の軸方向分布の計算結果を 示す。高密度プラズマで、SOL 密度 を変えたとき、 $1 \times 10^{11} \sim 1 \times 10^{12}$  cm<sup>-3</sup> の間で、減衰長は大きく変化する。

(図4(a)) この領域で SOL を流れ る粒子の寄与が顕著になると考えら れる。SOL 幅を変化させても、Hα 線強度の減衰長は変化する。このこ とから、真空容器壁と粒子の反射の 効果も減衰長に影響を与える。

以上より、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と考え られる。

図5は、円筒モデルを用いて DEGAS によって計算された水素原 子・分子密度及び原子温度の空間分布 である。図から、低密度プラズマでは、 原子密度は中心まで値に変化がないが、 高密度では原子密度は減少している。 一方、分子密度は低密度・高密度とも に減少し、中心部ではほとんど存在し ていないことがわかる。原子温度分布



図1 トロイダル分布解析用円筒状 DEGAS メッシュ構造









は、低密度では径方向にほぼ一定値を示し、約 10~20eV 程度である。それに対して、高密度で ま中 心部で大きく上昇する。高密度(イオン温度 250eV)では、低密度(イオン温度 500eV)に比べてイオン 温度が低いにもかかわらず、プラズマ密度が高いため、CX 反応に起因する水素原子が多く存在すると 考えられる。低密度と 高密度プラズマそれぞ れの Hα線減衰長は、 プラズマの密度、およ び幾何学的な形状の他 に、中性粒子が持つエ ネルギーにも依存して いる可能性がある。低 密度では、密度が低い ため原子の温度が低く 抑えられるのに対して、 高密度ではそれが高く なる。これは、平均自 由行程の式からもわか るように、密度に起因 する両者の差を縮める 方向へ働く。



# 4. まとめと今後の

展望

DEGAS を用いて、TRIAM-1M の高密度プラズマ実験時と低密度プラズマ実験時における中性粒子 輸送解析をおこなった。その結果、円筒モデルを用いたトロイダル方向分布解析において、プラズマが 低密度と高密度の場合に DEGAS の計算で得られた Hα線 Z 軸方向分布は、高密度・低密度プラズマ における平均自由行程の差を説明せず、測定結果(1.5 倍)を再現する計算結果を得た。また、円筒モ デル DEGAS のモデルパラメータをさまざまに変化させて、その依存性や中性粒子の密度・温度など を確かめた結果、Hα線分布は中性粒子の放出場所や SOL の密度、プラズマ密度分布形状などにも影 響を受けることがわかった。また、中性粒子の温度の違いが、低密度・高密度プラズマの Hα減衰長の 差を減少させることが示唆された。

# 5. 参考文献

- [1] D. Heifetz, D. Post, M. Petravic et al., J. Comput. Phys. 46 (1982) 309.
- [2] Y. Nakashima, K. Yatsu, K. Tsuchiya, et al., J. Nucl. Mater. 196-198 (1992) 493.
- [3] Y. Nakashima, N. Yamaguchi, K. Yatsu, et al., J. Nucl. Mater. 220-222 (1995) 580.
- [4] 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

M. Sakamoto, et al., 32nd EPS Conference on Plasma Physics, Vol.29C (2004) P5.005. 中嶋洋輔, 第19回トライアム研究会, 2005年4月,九州大学 FURKU, Report 05-01(82) p.82. 東園雄太,他 プラズマ・核融合学会第22回年会,2005年11月,東京29aC04P 高木健太郎,他 プラズマ・核融合学会第22回年会,2005年11月,東京30aA28P

# 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	M.K. Islam	筑波大学プラズマ研究センター	講 師
研究協力者	久保田雄介	筑波大学大学院数理物質科学研究科	博士課程5年生
研究協力者	東園雄太	筑波大学大学院数理物質科学研究科	博士課程3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

# ジャイロランダウ流体モデルによる銀河クラスターの異常電子熱輸送の研究

# 九州大学応用力学研究所 矢木雅敏

### はじめに

冷却流は銀河クラスター近傍の銀河間媒質中で物質のクランプを形成しようと発達する動力学的流れ である。冷却流と呼ばれるゆえんは放射冷却が暖かい低密度の銀河間プラズマから冷たい、高密度クラ ンプの凝縮あるいは凝集をもたらすと考えられるからである。そのような場合、冷たいフロント(熱輸送 障壁)がクランプとそれを取り囲む暖かいプラズマの界面において形成されることが期待される。

本研究は、電子の無衝突散逸効果(ランダウ減衰)や運動論的効果を考慮したジャイロランダウモデルによる銀河クラスターの電磁乱流(アルフヴェン乱流)シミュレーションを行い、magnetic flutter により引き起こされる電子の異常熱輸送を評価することを目的とする。この問題は、高ベータトカマクにおける磁気島の発生における磁力線方向の熱輸送効果とも関連していると考えられ、トカマクプラズマをベースにモデルの構築に関して考察を行ったので今年度は、その結果を報告する.

### 衝突性モデルと無衝突性モデル

衝突頻度の高い極限においてテアリングモードの解析を行う為に、Braginskii の2流体方程式から出発し、磁力線方向のイオンのダイナミクスを無視し、準中性条件を仮定し、cold ion 近似を用いて4場簡約化 MHD 方程式を導出した。このモデルのハミルトニアンは無散逸極限で保存される。 モデル方程式は以下で示される。

$$\frac{D}{Dt}\nabla_{\perp}^{2}\phi = -\nabla_{\parallel}\nabla_{\perp}^{2}A + \mu\nabla_{\perp}^{4}\phi \qquad \qquad \frac{\partial A}{\partial t} = -\nabla_{\parallel}(\phi - \delta p) + \eta_{\parallel}\nabla_{\perp}^{2}A + \alpha_{T}\delta\nabla_{\parallel}T$$

$$\frac{Dn}{Dt} + \beta\frac{Dp}{Dt} = -\beta\delta\nabla_{\parallel}\nabla_{\perp}^{2}A + \eta_{\parallel}\beta\nabla_{\perp}^{2}p \qquad \qquad \frac{3}{2}\frac{DT}{Dt} - \frac{Dn}{Dt} = -\alpha_{T}\delta\beta\nabla_{\parallel}\nabla_{\perp}^{2}A + \varepsilon^{2}\chi_{\parallel}\nabla_{\parallel}^{2}T + \chi_{\perp}\nabla_{\perp}^{2}T$$

ここで { $\phi$ , *A*, *n*, *T*} はそれぞれ静電ポテンシャル、ベクトルポテンシャル、電子密度、電子温度であ り、*p* = *nT* は圧力、 $\mu$ , $\eta_{//}$ , $\eta_{\perp}$ , $\chi_{//}$ , $\chi_{\perp}$ , $\delta$ , $\beta$  はそれぞれイオン粘性、磁力線方向の抵抗値、垂直方向の 抵抗値、磁力線方向の熱拡散係数、垂直方向の熱拡散係数、イオン表皮長、ベータ値、 $\alpha_T$  = 0.71で ある。解析には円柱座標で線形化した方程式を用い、固有値問題として数値的に解いた。その際、 密度と温度の平衡量の径分布は放物型を仮定し、平衡電流は円柱平衡から見積もった。線形化した 磁力線方向の熱輸送項は  $\chi_{\prime\prime}(k_{\prime\prime}^{\ 2}T + k_{\prime\prime}k_{\prime}T_{0}^{\ \prime}A)$ で与えられ、拡散型の項と摂動ベクトルポテンシャル

の関係する項から成る。ここで、 $k_{\perp}$ は磁力線に垂直な方向の波数、 $T'_{0}$ は平衡温度勾配である。解 析において成長率のパラメータ依存性を調べる際、熱輸送項において、(1)2項を含む、(2)摂 動ベクトルポテンシャル項を含まない、(3)熱輸送項を無視、3つの場合を比較した。図1に衝 突モデルにおける(2,1)モードの成長率の $\beta$ 依存性を示す。磁力線方向の熱輸送はテアリングモード を不安定化し、その寄与は摂動ベクトルポテンシャル項に由来する事が分かる。また、 $\beta$ は安定化 に寄与している事が分かる。

次に無衝突モデルについて考察する。スラブ配位における運動論効果を含んだ流体方程式は J.D.Callen によって導出されており、以下のような表式で与えられる[1]。

$$\frac{D}{Dt}\nabla_{\perp}^{2}\phi = -\nabla_{\parallel}\nabla_{\perp}^{2}A \qquad \qquad \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{m_{i}}{m_{e}}\delta^{2}\left(\frac{\partial}{\partial t}j - \varepsilon^{2}\mu_{\parallel}\nabla_{\parallel}^{2}j\right) = -\nabla_{\parallel}\left(\phi - \delta p_{e}\right) - \frac{2}{5}\delta\nabla_{\parallel}T$$

$$\frac{Dn}{Dt} + \beta\frac{Dp}{Dt} = -\beta\delta\nabla_{\parallel}\nabla_{\perp}^{2}A \qquad \qquad \frac{3}{2}\frac{DT}{Dt} - \frac{Dn}{Dt} = \varepsilon^{2}\chi_{\parallel}\nabla_{\parallel}^{2}T + \frac{2}{5}\beta\delta\nabla_{\parallel}\nabla_{\perp}^{2}A$$

ただし $j = -\nabla_{\perp}^2 A$ 。無衝突領域では電子慣性が電気抵抗の役割を担い、テアリングモードを駆動する。また、 $\mu_{||},\chi_{||}$ は電子の逆ランダウ減衰効果を表す。無衝突モデルにおける $\mu_{||},\chi_{||}$ は

$$\mu_{\prime\prime} = \frac{2\sqrt{\pi}}{5} \frac{1}{\varepsilon^2 |k_{\prime\prime}|} \sqrt{\frac{m_i}{m_e} \beta}, \qquad \qquad \chi_{\prime\prime} = \frac{9}{5\sqrt{\pi}} \frac{1}{\varepsilon^2 |k_{\prime\prime}|} \sqrt{\frac{m_i}{m_e} \beta}$$

で与えられる。図2に無衝突モデルにおける(2.1)モードの成長率のβ依存性を示す。この場合も磁 力線方向の熱輸送はテアリングモードを不安定化し、その寄与は主に摂動ベクトルポテンシャル項 に由来している。また、βは不安定化に寄与し、μ<sub>//</sub>を含む項の寄与は非常に小さく無視できる事 が分かった。





図1:衝突モデルにおける成長率のβ依存性

図2:無衝突モデルにおける成長率のβ依存性

無衝突モデルは銀河クラスターの問題にも適用可能と考えられる。すなわちこのモデルは磁場のフ ラッタによる非等方熱伝導を含む、高ベータドリフトアルフベン対流胞乱流を記述する。クラスタ ー内で見つかっている反転温度分布(負の $\eta_e$ )を考慮することにより、ドリフトアルフベンから MHD の極限へなめらかに移行するはずであり、非線形シミュレーションにより検証可能である。 今後の課題としては、冷却流の可能性に対する位相図を $v_p, B_0^2, \langle \tilde{B}^2 \rangle$ (スペクトル、トポロジ等)に関 し定量化とすることである。強い熱輸送から弱い熱輸送の領域への可能な分岐が特に興味の対象となる。 [1] Z.Chang and J.D.Callen, Phys. Fluids B4 1167 (1992).

# 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。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を行い、健全性評価を行ってきた。しかしながら現在、原発の長期利用が計画されており、近い将来に監視試験片の不足問題が発生すると予想される。シャルピー衝撃試験に代わる有力な評価技術として、本研究代表者は磁気的非破壊評価法を提案し研究開発を進めている。平成16年より材料試験炉JMTRを用いて中性子照射実験を開始しており、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み始めている。しかし、中性子照射実験では照射条件が限定される上、放射化した試料の取扱上の制限から、照射後試験がホットラボでの実験に限定される。本研究では、イオン照射を行うことで照射条件を系統的に変えた試料を作製し、通常の研究室環境で扱える高性能・高機能な装置を用いて詳細な照射後実験を行う。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ことを目的としている。

実験方法

試料として Cu 濃度の異なる 2 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) 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 290 (商業用原子炉の運転中の温度)と して照射量 0.5~2dpa で照射実験を行うととも に、損傷機構の解明のため室温での照射実験 を実施した。照射試料を電解研磨した後、透 過電子顕微鏡(TEM)及び超高圧電子顕微鏡 (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、 原子力機構・材料試験炉(JMTR)において中性 子照射実験を実施した。トロイダル状試料に 励磁・検出コイルを巻き、デジタル BH トレー



図 1.290 でイオン照射した A533B 鋼の TEM 写真 (a) A 材、(b) B 材

サーに接続して磁気ヒステリシス・マイナーループを 測定した。

### 結果及び考察

図1に290 で鉄イオンを照射したCu濃度の異な る 2 種類の A533B 鋼の TEM 写真を示す。A 材(Cu 含 有量:0.05wt%)では、マトリクス中において微小な転位 ループが形成されたのに対し、A533B 鋼 B 材(Cu 含 有量:0.16wt%)では、微小な転位ループが転位近傍にの みに形成された。一方、室温でイオン照射すると、B 材についても微小な転位ループがマトリクス中にお いて形成された。図2 に硬度の照射量依存性を示す。 A 材では 290 照射で硬度が増加したが、B 材および 純鉄では変化が無かった。これに対し、室温照射では 全ての材料において硬度上昇が見られた。

図 3 に中性子照射した A533B 鋼 B 材のマイナール ープ係数の照射量依存性を示す。照射初期に増加した 後、照射量ととも減少傾向を示した。この照射量依存 性は2種類の照射効果の存在を示唆する。すなわち、 つは、マトリクス中に生成した Cu 析出物及び転位ルー プによる応力場の増大であり、もう一つは何らかの理由 による応力場の減少効果である。前者はマイナーループ 係数を増加させ、後者は逆に減少させる。後者の応力場 の減少は、転位近傍での Cu の析出や転位ループの生成 により転位近傍の応力場が減少したと考えることで説 図 3. A533B 鋼 B 材のマイナーループ係数の中 明できる。B 材のイオン照射実験の結果(図1(b))は、 そのような現象が起こり得ることを示している。



図 2. イオン照射した A533B 鋼. 純鉄の硬度



性子照射量依存性

### 成果報告

- (1) 今村,渡辺,吉田,鎌田,高橋: "A533B 鋼の損傷組織(3)",日本金属学会秋期(第 137 回)大会. 2005.9.28-30, 広島大.
- (2) 今村,渡辺,吉田,鎌田,高橋; "A533B 鋼の損傷組織(4)",日本金属学会春期(第 138 回)大会, 2006.3.21-23, 早稲田大 予定.

# 研究組織

高橋正氣,鎌田康寬,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

151

京都大学エネルギー理工学研究所 森下和功,渡辺淑之,香山 晃 九州大学応用力学研究所 菅野隆一朗,岩切宏友,吉田直亮 東京大学工学部 金田保則,陳 迎

### 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,熱伝導率や熱応力係数が大きく,熱膨張係数が小さ い.また,耐照射特性に関しても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プ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, 理論解析[1], 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 |解析を行って[4],上述の実験結果を詳細に理解する試みを行ってきた.理論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 ム圧力にかなり依存することが明らかになった.また,BCC 金属の特徴として,マトリクスの原子空孔やボ イドのもつヘリウム結合力は,転位や粒界などよりも強いことが明らかになった.この特徴はFCCとは全く 異なるものであり ( FCC では , マトリクスの原子空孔やボイドのもつヘリウム結合力は , 転位や粒界などの それと同程度もしくはそれよりも弱い.),照射後補修溶接時(すなわち,照射後温度変動下)のヘリウムバ ブル形成に関する FCC/BCC の相違を示唆するものである.さらに昨年度は,理論解析を中心に行い,モデ ル解析に必要な欠陥捕獲率(バイアス因子)の評価を行った.このようなこれまでの実験および理論解析に より得られた欠陥のエネルギー評価に基づき ,今年度は ,ヘリウムバブル形成のキネティックスを検討した . 特に,核融合炉のプラズマ-表面相互作用で問題となる高圧バブルの形成も取り扱えるように,理論体系の 再構築を試みた[5].

### 2. 方法

まず,金属鉄中のヘリウムバブル形成に関わるエネルギー評価を行うために,連続体モデルによるモデル 化を試みた.ヘリウムバブルの形成自由エネルギーは,ヘリウムのバルクエネルギー,表面エネルギー,金 属マトリクスの表面エネルギー,緩和エネルギー,界面エネルギーをそれぞれ定式化することにより得た.

$$G_{\text{bubble}} = G_{\text{He}}^{\text{Bulk}} + G_{\text{He}}^{\text{Surface}} + G_{\text{Metal}}^{\text{Surface}} + G_{\text{He}-\text{Metal}}^{\text{Interface}} + G_{\text{relax}}$$
(1)

このうち,ヘリウムバルクエネルギーについては,実験や理論から得られている複数の状態方程式をその適用可能性に注意しながら結合し,ギブス・デュエムの式に代入することにより評価した.ヘリウム表面エネルギーについては,藤田[6]の考えを踏襲し,表面 He-He ボンドの欠損数を評価することにより得た.金属マトリクスの表面エネルギーについては,平坦面の表面エネルギーをよく再現する原子間ポテンシャルを使って評価し,バブルの曲率による影響も考慮した.緩和エネルギーは,Eshelby[7]の線形弾性論を用いて評価した.さらに,ヘリウムバブルと金属マトリクスの界面エネルギーについては,Trinkaus[8]のモデルと我々の分子動力学解析結果のフィッティングにより評価した.

上記のヘリウムバブル形成自由エネルギーを使って,原子空孔,ヘリウム,自己格子間原子,ヘリウムバ ブルが混在する系の全自由エネルギーを次のように評価した.

$$g = \sum_{j} C_{\text{bubble}}^{j} \mu_{\text{bubble}}^{j} + C_{\text{subHe}}^{\text{matrix}} \mu_{\text{subHe}}^{\text{matrix}} + C_{\text{V}}^{\text{matrix}} \mu_{\text{V}}^{\text{matrix}} + C_{\text{SIA}}^{\text{matrix}} \mu_{\text{SIA}}^{\text{matrix}}$$
(2)

この式から,ヘリウムバブルの点欠陥結合エネルギー,照射中にヘリウムバブルに流出入する点欠陥フラックスなどを導出し,ヘリウムバブルの形成過程に関するメカニズムマップを作成した.

### 3. 結果

図1は,(a)が今回の解析により得られた点欠陥結合エネルギーであり,(b)が以前行った分子動力学法に よる解析結果である.He/V比が極端に大きくない場合には,両者の対応は極めてよいことがわかる.大きな He/V比における両者の食い違いは,今回の解析における線形弾性論の適用限界が現れていると考えられる. この値を使ってヘリウムバブル全結合エネルギー(系内の点欠陥が集合して析出物を作るのに必要な活性

化エネルギー)を求めたところ,図2のようになった.条件は,空孔濃度X<sub>v</sub>=10<sup>-8</sup>, X<sub>He</sub>=10<sup>-10</sup>, X<sub>i</sub>=6x10<sup>-11</sup>である. ヘリウムバブル内のヘリウム数が0の場合は,10eV以上の障壁があるのに対し,ヘリウム数が増えるにした がって,徐々に活性化エネルギーが減少していく様子がわかる.バブル形成に対するヘリウムの効果がはっ きり現れているといえよう.

ヘリウムバブルに流出入する点欠陥フラックスを評価し、ヘリウムバブル形成に関するメカニズムマップ を書いたのが図3である.PSI研究で見られるヘリウムバブルに特有なSIAエミッションの現象が比較的高 圧なバブルにおいて起こることが期待される.また、同じ領域において、ヘリウムの放出も盛んになってい ることがわかる.今後はより現実的な条件におけるヘリウムバブル蓄積過程を検討する予定である.



### 参考文献

[1] K.Morishita, R. Sugano et al., Proc. of PRICM4, JIM. pp.1383-1386,2001

- [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) pp.941.

[4] K. Morishita, R. Sugano, B.D. Wirth, T. Diaz de la Rubia, J. Nucl. Mater., 323 (2003) pp.243.

[5] K. Morishita, R. Sugano, accepted for publication in J. Nucl. Mater.

[6] F.E. Fujita, A theory of medium range order in supercooled liquid and amorphous solid metals, in: S. Steeb, H. Warlimont (Eds.), Rapidly Quenched Metals, Elsevier, Amsterdam, 1985, pp. 585-588.

[7] J.D. Eshelby, The continuum theory of lattice defects, in: F. Seitz, D. Turnbull (Eds.), Solid State Physics, vol. 3, Academic Press, New York, 1956, pp. 79-144.

[8] H. Trinkaus, Radiation Effects 78 (1983) 189-211.

核融合科学研究所 中村幸男

1. はじめに

核融合トーラス装置における高性能プラズマの定常維持に関する研究は将来の次期計画装置 (ITER等)の重要課題の一つである。高性能プラズマ定常維持において重要となる研究課題はコア プラズマの制御と高パワー及び粒子ハンドリングに分けられるが、後者においては、粒子・熱制御 と不純物制御が重要となる。今回は九州大学応用力学研究所と核融合科学研究所の実験において得 られた成果をもとに、特に高性能定常プラズマの不純物混入による放電停止現象をとりあげ、トカ マクとヘリカルの実験結果を比較しながら議論し、その結果をまとめるものとする。

# 2. リミター及びダイバータ配位での長時間放電

1) TRIAM-1M トカマクにおけるリミター配位での長時間放電

TRIAMでは超長時間(数時間)放電時の不純物の振舞いについて様々な観点から調べられている。 金属不純物の分光計測により、中性粒子からの発光であるH<sub>a</sub>の強度が 1000 秒以上の周期で高レベ ルの状態が現れる。この高レベルの状態は 100 秒くらい維持される。このときリミター材料である モリブデン(Mo)の発光強度にも増加が観測されている。この他にも、高電力入射ではモリブデン の入射束の増加によるプラズマ崩壊が多く観測されているようである。これらの現象はLHDにおい ても観測されており、初歩的なしかも技術的な問題点ではあるが、定常放電維持のためには通常の プラズマからの熱・粒子フロー以外の粒子挙動(例えば高エネルギー粒子挙動)による局所的な熱 負荷をなくすことが重要であることが再認識できる。この問題は入射パワーを増大させると共に大 きくクローズアップされるもので、将来の大電力入射あるいは核融合炉での高パワーハンドリング では詳細な検討が要求されるものと考えられる。

2) 大型ヘリカル装置(LHD)におけるダイバータ配位での長時間放電

LHDではICRF加熱を中心とした 50 分以上の長時間放電が達成された。しかし、定常放電の停止は ペレット状の金属不純物(アンテナ、真空容器材料:Fe、ダイバータ板:C)の混入が原因と見ら れ、真空容器内の局所加熱が問題となっている。真空容器内の点検等で原因を明らかにしていく必

要がある。ここでは昨年度達成された高パワーで のダイバータ配位での30分長時間放電について紹 介し、ダイバータ熱負荷分散法を用いることによ る放電時間の延長と不純物量の関係を述べる。図1 が放電波形であり、プラズマ加熱入力は定常加熱 のICHが約 520kW、ECHが 100kW、間欠入射のNBIが 平均 60k₩で入射エネルギーとしては 1.3GJと世界 最高記録を達成した(現在は1.6GJまで記録更新し ている)。プラズマ密度及び入温度は0.7x10<sup>19m-3</sup>及 び 2keVでほぼ一定に保持されている。中心コード の放射損失は軽不純物ではなく、金属不純物ライ ン強度と相関があるようである。最下段のグラフ はダイバータで熱除去されたパワー(約310kW)と ダイバータ板の温度を示したもので、ダイバータ 板は3分程度、熱除去に関しては10分程度で定常 状態に達していることが分かる。また、この放電 では磁気軸の掃引(R=3.67~3.7m)により、ダイバ ータ板への熱負荷をトロイダル方向に実時間で分



図 1. LHDにおける 30 分放電波形

散させ、特定のダイバータ板への熱負荷集中を防いだ。 内側シフトの磁気軸配位(R=3.6m)ではトーラス内側 のダイバータ板へ熱負荷が集中し、外側シフトの磁気 軸配位(R=3.75m)では真空容器の上下のダイバータ 板に熱負荷が集中する。そこで、この中間の磁気軸配 位でダイバータ板の熱負荷分布の最適配位を捜すと 共に放電時間の延長を探索した。その結果、図2に示 すように、内側シフト磁場配位では200秒以下の放電 持続時間が外側シフト磁気軸配位では飛躍的に放電 持続時間が延び、最終的に30分を越える長時間放電 が達成された[1]。また、同じ図に示されているよう に密度で規格化した放射損失は磁気軸を外側にシフ トすると共に減少し、ダイバータ板以外の真空容器内



図2. 放電持続時間及び規格化放射 損失の磁気軸依存性

構造物への熱負荷が減らされているのが分かる。これが以下に述べる金属不純物の混入の頻度を下 げるのに役立ったものと考えている。

# 3. 不純物混入による放電停止

TRIAM および LHD の長時間放電において、放 電を停止している原因の主要因は真空容器内 構造物(プラズマ対向材)の局所加熱による 不純物混入ではないかと考えられる。特に、 プラズマへの入射パワーを増大したときには 不純物の増加あるいは不純物の小片がプラズ マ中に混入し、放射崩壊を起こしているので はないかと考えられる。LHD の例では、図3に 示すように、加熱パワー(ICH)が入射されて いるにもかかわらず、金属不純物(主に Fe) のプラズマ中への混入により、密度の上昇と 放射損失の上昇によってパワーバランスが崩 れて、プラズマの放射崩壊に至っている。金 属不純物の混入のタイミングでは周辺の密度 上昇と電子温度の現象が観測され、100から 200ms くらいで高温プラズマが収縮していく 様子がトムソン散乱計測で確認することが出来た。



図3. 不純物混入による放電停止

4.まとめ

今回は長時間放電における不純物混入による放電停止の振舞いについて、トカマクプラズマのリ ミター放電である TRIAM とヘリカルダイバータ放電である LHD を比較した。高パワーハンドリング を進めていく上で、真空容器内構造物の局所加熱に関するデータベースを様々な磁場配位で蓄積し、 詳細なパワーフローを理解していくと共に、装置の健全性を保持できる運転方法を見出していくこ とが今後の課題であることが再認識された。

# 参考文献

[1] Y. Nakamura et al., to be published in Nuclear Fusion.

# 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、核融合炉の実現に向けて、国際熱核融合実験炉(ITER)をはじめ、核融合の実験炉や実用 炉の研究・開発が進められている。核融合炉において、大きな研究課題の1つに、高性能プラズマ 対向機器の開発がある。特に、プラズマ対向機器の1つであるダイバータは、装置中で最も厳しい 粒子の衝突や繰り返し熱負荷を受けるため、ダイバータのアーマ材には、耐熱性・耐熱衝撃性、高 熱伝導性、低放射化及び良好なプラズマ制御能力等が要求される。また、強制冷却のためにヒート シンク材との接合技術も要求される。このダイバータのアーマ材の候補材の1つとして、タングス テン等の高Z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、タングステン等の高Z 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。

本研究は、今までの応用力学研究所との共同研究において研究してきた C/C コンポジット、カーボンアロイ、炭素系接合材料などの対象材料を、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、その接合材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し、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研摩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)を挿入し、インサート材としてチタン箔(0.05mm)と銅箔(0.05mm)を挟んで、チタ ンと銅との共晶反応を利用して拡散接合した。その後、この接合材の機械的特性に及ぼすイオン照 射の影響を究明するために、接合界面を含んだ試験片(縦 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 3mmの範囲に、5.5nAのイオンビーム電流で、銅イオン(Cu<sup>2+</sup>)を、1.0dpa および 10dpaまでの照射試験を実施した。その飛程は約 300nmである。

機械的特性の変化は、超微小押し込み硬さ試験機(DUH-201)により、対稜角 115 度のBerkovich ダイヤモンド圧子を用いて、ダイナミック硬さを測定した。ダイナミック硬さD<sub>h</sub>は、ビッカース硬 さに対応しており、次式で定義される。

$$D_h$$
 L/h<sup>2</sup>

(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)、 は圧子形状による定数で、 対稜角 115 度の Berkovich 圧子の場合 =3.8584 である。このダイナミック硬さは、圧子を押し込 んで行く過程の荷重と押し込み深さから得られる硬さで、試料の塑性変形だけでなく、弾性変形を も含んだ状態での材料強度特性である。その試験条件は、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。

### 3. 実験結果及び考察

Fig.1 は、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、硬さの値も増加している。しかし、10dpa 照射材においては、硬さのばらつき が他に比べ非常に大きく、タングステンの粒界に照射欠陥などが集合していることが考えられる。 また、10dpa 照射材では、格子欠陥の集合により硬さが増加する一方で、空孔の集合したボイドと いった欠陥も同時に形成されているため、硬さのばらつきがより大きくなったと考えられる。

接合界面から離れた銅部分(3.0mm~5.0mm)では、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は未照射材と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、ボイドのような硬さ を減少させる欠陥の密度が高くなり、硬さが最大値から減少傾向に転じたと考えられる。

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、チタンと銅との共晶合金のためである。また、接合層とタングステンの近傍では、1dpa、10dpa と硬さが増大し、そのばらつきも大きくなった。この理由としては、タングステン材料中へのチタンと銅の拡散が促進され、接合領域と同等の硬さを示す部分が存在するためと考えられる。

ただし、タングステンと銅との接合材について、硬さ試験結果から残留熱応力の影響を確認する ことはできなかった。今後の検討課題の1つである。



W-Cu

Fig. 1 Dynamic hardness for a joining material of W and Cu

# 4. 研究成果報告

1) 車田 亮、今村好男、プラズマ対向材料の組織と特性に及ぼすイオン照射効果、全国共同利用 研究成果報告、第8号、平成16年度、九州大学応用力学研究所、(2005.6), pp.194-196.

2) 車田 亮、今村好男、本橋嘉信、高温ガス炉用材料の組織と特性に及ぼす照射損傷効果、平成 17 年度大洗研究会報告書、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, (2005.8.25-26)

3) A.Kurumada, Y.Imamura, T.Oku, M.Ishihara, T.Shibata, K.Sawa, S.Baba, J.Aihara and T.D.Burchell, Effects of Ion Irradiations on the Electrical Resistivity and Mechanical Properties of Carbon Fibers, 6th International Nuclear Graphite Specialists Meeting, Chamonix, France, (2005.9.19-21), CD-No.12.

4) A.Kurumada, Y.Imamura, T.Oku, M.Ishihara, K.Sawa, T.Shibara, S.Baba and J.Aihara, Annealing Effect on Electric Resistivity of Ion Irradiated Carbon Fibers, JAEA-Review 2005-004, JAERI TANDEM Annual Report 2004, Japan Atomic Energy Agency, (2006.1), pp.101-102.

# 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: 鴫原雅人(M2)、外川 賢(M1)

# Si 単結晶における単原子イオン照射効果とクラスターイオン照射効果

大阪府立大学大学院工学研究科 岩瀬彰宏

1.はじめに: 異種元素ミキシングなど、高エネルギー重イオンの固体への高密度なエネルギー散逸 を利用して物質を改質する研究が多く行われるようになった。そのために、単原子イオンの他、最近で はクラスターイオンも使われるようになってきている。Au クラスターイオン照射に関する我々の研究 からも、同じ速度であればクラスターイオンのほうが照射効果は大きくなることがわかっている[1]。そ れでは、同じ質量の単原子イオンとクラスターイオンでは、照射効果の違いがあるだろうか?そこで、 我々は、ほぼ同質量の 2.5MeV Ni イオン(質量 58)と 2.5MeV Al2 クラスターイオン(質量 54)を 用いた照射実験を行い、その結果の比較を行った。

2.実験:あらかじめ電子顕微鏡観察用に研磨したFZ-Si単結晶(111方位)を原子力機構高崎研において 2.5 MeV Al 2+クラスターイオンを,また九大応力研において 2.5 MeV Ni<sup>2+</sup>照射を行った。照射時の 試料温度は室温、照射量は両イオンとも約 4x10<sup>13</sup>/cm<sup>2</sup>である。電子顕微鏡観察は加速電圧 160 kVにて 暗視野ウィーク・ビーム法で行った.

3.実験結果:下図にAl2クラスターイオン、Ni単原子イオンを照射したSiのTEMイメージを示す。 Al2 クラスターイオンを 4x10<sup>13</sup> /cm<sup>2</sup>照射した試料では欠陥はほとんどみられないが,Niイオンをほぼ 同量照射したものでは,欠陥がはっきり観察される.従って,本実験の結果だけからいえば、同程度の 質量を持つクラスターイオンと単原子イオンを同数照射した場合,照射効果(欠陥を形成する能力)は 単原子イオンの方が高いといえる。今後、より詳細な実験の積み重ねが必要である。

[1] 中谷他、日本物理学会 61 回年次大会(2006 年 3 月、松山)



図a 2.5MeVのAl2 クラスターイオンを 4x10<sup>13/</sup>cm<sup>2</sup>照射したSi単結晶のTEMイメー ジ



図 b 2.5MeV の Ni 単 原 子 イ オ ン を 4x10<sup>13/</sup>cm<sup>2</sup>照射したSi単結晶のTEMイメー

ジ

# Zeeman 効果を考慮したプラズマ回転計測法

東京大学高温プラズマ研究センター 門 信一郎

# 1. 目的

TRIAM-1M トカマクの強磁場特性を利用して新しい空間分布計測法の開発を試みる。中性原子 や不純物イオンの発光線は電荷数に応じてプラズマ温度のある定まった領域に局在することがわ かっている。通常はある仮定のもとで、観測視線上での線積分値から発光密度分布へと変換するが、 強磁場下でのゼーマン効果を利用し、またその磁場が空間的に非一様であることを利用すれば仮定 を持ち込むことなく局所情報が得られる。このことを実験的に確かめるのが目的である。

これまでの研究で、直線偏光子によりゼーマン分裂した発光スペクトルの 成分を除去し、 成 分のスペクトル形状から本研究の原理を実証する初期的結果を得るとともに[1]、測定精度向上のた め素子サイズの小さな背面照射型冷却 CCD を導入し、周辺領域に存在する中性原子に関して、よ り高精度で発光位置の評価を行った。本年度は、中性原子からの発光線のドップラーシフトを利用 した中性原子の流速分布計測を行い、最外殻磁気面とプラズマ対向壁との間のギャップ長の変化に 伴う中性粒子バランスの変化に関して評価を行った[2]。

# 2. 実験方法

実験は、LHW入力パワー 150 kW、プラズマ電流 20~60 kA、線平均電子密度 0.5~1.5×10<sup>19</sup> m<sup>-3</sup>、真空容器下端における中性粒子ガス圧力 0.1 mTorr、プラズマ中心磁場強度 7 Tの8.2 GHz LHCD放電において行った。

測定は、既設の25チャネル放射状ポロイダル方向観測視線及びActon Research社製のツェルニ・ ターナ型可視分光器(焦点距離1m、f/8.7)を用いて行う。25チャネルの観測視線に関して、プラ ズマからの発光を集光する対物レンズ前面に紫外光対応型の直線偏光板を設置することにより、ゼ ーマン分裂した発光の 成分のみを選択的に観測し、発光位置の計測精度を向上させている。検出 器は、素子サイズが小さく量子効率の大きい背面照射型冷却CCDカメラ(Andor社製 DU440-BU2, 2048×512, 13.5×13.5 μm<sup>2</sup> pixel)を用いている。

# 3. 実験結果

ポロイダル方向への 25ch 観測視線を用いた計測により、周辺領域に存在する中性原子の流速分 布が得られている(図 1)。水素放電、及び水素放電にヘリウムガスパフを行った条件下で測定を行 い、周辺領域の水素・ヘリウム原子低温成分に関して、中性粒子圧力勾配に起因する壁から炉心方 向へと向かう内向きの流れが観測されている。

プラズマ対向壁と中性原子流速との関係を調べるため、モリブデン原子発光分布を計測した結果 を図2に示す。モリブデン原子からの発光は、ダイバータ板近傍に局在化しており、真空容器下部 ではダイバータ板とプラズマとの有意な相互作用が起こっていることが分かる。図1に示した流速 分布では、真空容器上部と比較して下部において大きな流速値が観測されており、また、ダイバー タ板を見込む観測視線上での水素原子流速の経時変化から、最外殻磁気面位置とダイバータ板との ギャップ長の変化に同期した原子流速の増減が観測された。これらの結果から、ギャップ長の変化 に伴い、ダイバータ板からのリサイクリングフラックスが変化し、その結果、中性原子圧力勾配が 変化し中性原子流速が変化していることが確認された。



図1. ポロイダル25ch 観測視線により計測し た水素(a)・ヘリウム(b) 原子低温成分の流速 分布。水素・ヘリウム共に、壁から炉心方向 へと向かう内向きの流れが観測される。



図 2. モリブデン原子()及び水素原子 Hα線()の発光強度分布。ダイバータ板 に沿ってモリブデンの発光が観測されて いる。

[1] T. Shikama, S. Kado, H. Zushi, A. Iwamae and S. Tanaka *Phys. Plasmas* 11 (2004) 4701.
[2] T. Shikama, S. Kado, H. Zushi, M. Sakamoto, A. Iwamae and S. Tanaka *submitted to Plasma Phys. Control. Fusion.*

[3] 四竈 泰一,門 信一郎,図子 秀樹,山崎 大輔,坂本 瑞樹,中島 浩太,田中 知「Zeeman 分裂 した水素分子 Fulcher 帯発光スペクトルの観測」日本物理学会年会 2006 年 3 月 (松山大学) 30pUD-4.

# プラズマ電流クエンチフェイズにおける電子サイクロトロン加熱及び電流駆動による ディスラプション制御

核融合科学研究所 東井和夫

1.目的

トカマクプラズマにおける急激なプラズマ崩壊、すなわちプラズマディスラプション現象はトカマ ク研究の初期から問題となりその後多くの研究がなされてきた。プラズマサイズの大型化や非円形断面 プラズマになるとともに、ディスラプションのトカマク装置への影響は益々厳しいものとなってきた。 真空容器への大きな電流の誘起による巨大な電磁力の発生や、ダイバータ中性化板や容器内壁への非常 に大きな熱・粒子束の流入が大きな問題となり、トカマク装置の設計に相当大きな尤度を持たせること が必要となっている。これが装置を高額で複雑なものとしている。ディスラプションは、プラズマから の急激な熱の放出が起こる「熱的クエンチ」、それに引き続いて起こるプラズマ電流の急激な消失、「電 流クエンチ」の特徴的な2つのフェイズに大別される。「熱的クエンチ」は、大型トカマクでもmsの極 短い時間スケールで起こり、電流密度分布の平坦化とこれに伴う大きな負のループ電圧スパイクが発生 する。「電流クエンチ」は放電条件に依存して、プラズマ電流が完全に消失する場合とディスラプショ ン直前のプラズマ電流の2/3~1/2 の電流まで低下しその後はその電流のほぼすべてが逃走電子電流に 置き換わる場合とがある。

これまではニューラルネットワークによるディスラプション予測による回避が試みられてきたが 必ずしも万能ではない。一方、ディスラプションの回避を狙わずその影響を最小限に抑える手法が一応 の成功を収めている。すなわち、アルゴンガスジェットやキラーペレットによりプラズマの磁場及び熱 エネルギーを放射損失に変換し、その影響の極小化を図っている。

これに対し、本研究は、熱的クエンチ及び電流クエンチフェイズに発生する大きな誘導電場を利用 し電子サイクロトロン加熱(ECH)や電流駆動(ECCD)の印加によって効率よく逃走電子電流を発生させプ

ラズマ電流の低下をわずかに抑えるよう制御 しディラプションを回避することを狙うこれ までにない発想の研究である。JET プラズマの ディスラプションについての最近のシミュレ ーションでは、ディスラプション時に生成され る逃走電子がプラズマ中心に集中した分布と なることを予想している(図1)[1]。これは このフェイズで電流密度分布が中心にピーク した電流密度分布になることを予測している。 これは、プラズマ中心部ほどDreicer 電場が低く なり、逃走電子はプラズマ中心部に集中する傾向 になると期待される。このようにプラズマ中心部 に集中した逃走電子電流に置き換えそれを安定 保持し緩やかそのエネルギーを低下させることが



図 1 シミュレーションで得られた JET のディスラプション直後の電流密度分布

できればディスラプションによる電流低減を大幅に改 善できる。これにより高 // プラズマ(//:規格化された内 部インダクタンス)が生成される可能性があり、高閉じ 込めが期待できる。これによりディラプションを回避し つつ閉じ込め性能の劣化も防ぐことができる可能性が ある。このような相対論的電子ビームの存在するプラ ズマは、1970年代に S. Yoshikawa(PPPL)等により 提案された ASTRON Spherator(図2)に近いものであ リ深い磁気井戸を有する。ちなみに ITER ではディスラ プションにより 15MeV 程度の相対論電子ビームが生 成されしかもそれらにより 10 MA を超える電流を担うこ とが予測されている。



図 2 ASTRON Spherator 配位

今年度は、昨年度実施した実験のデータ解析を行った。以下に、実験条件と実験結果を述べる

2. 実験条件

TRIAM-1Mトカマクのオーミック放電において再現性よくディスラプションを誘起し、電流が減少を始めるフェ イズに ECH や ECCD を行った。ECH や ECCD のプラズマ電流の減少率の変化及び逃走電子の生成への効果 を調べることを主要目的とした。実際の実験条件は、(1)トロイダル磁場 Bt=3.19 T, プラズマ電流 Ip~110kA、 及び(2)Bt=6.38 T、Ip~140 kA の2条件である。注目したデータは、プラズマ電流、ループ電圧、プラズマ位置 (水平及び垂直変位)、軟X線放射及び硬X線放射などである。

3.実験結果と考察

2 種類の異なるトロイダル磁場にて実験を行った。(1)の Bt=3.19T では 2 倍高調波 ECH、(2)の Bt=6.38T においては基本波による ECCD をディ

スラプション時に試みた。

(1) Bt=3.19 T でプラズマ電流が Ip~110kA の 放電での実験:

プラズマ位置制御が困難であり、逃走電子の 発生と保持がほとんどできなかった。また、プラズ マの位置がディスラプション時に大きく変動するた め ECR 層もプラズマ中心部になく ECH 効果も観 測されなかった。ディスラプションで低温となった プラズマには2倍高調波電子サイクロトロン波が効 果的に吸収されなかったものと思われる。

(2)Bt=6.38T での基本波 ECCD によるディスラプション制御実験:

この条件ではプラズマ電流は約 140kA に達し、 電流減少フェイズでプラズマを強制的に外側へシ



図 3 Bt=6.38T で ECCD を印加したときのプラズマ電 流及びループ電圧の時間発展

フトしディスラプションを誘発し、それによる負の 大きなループ電圧スパイク及び電流クエンチフ ェイズで発生する正の大きなループ電圧と ECCD により逃走電子が効果的に生成されるか どうかをテストした。図3はその放電波形であり 負のループ電圧スパイクは t=72-75ms で発生し ている。ただ、このループ電圧信号のデータ収 集サンプリングレートが低く負スパイクを正確に 捉らえていない。この実験では、ディスラプショ ンを誘発するためプラズマの水平位置を大きく 外に移動させる必要があった。ただ、ディスラプ ション時に逃走電子が効率よく生成されプラズ マ電流のかなりの部分を担うようになれば位置 制御も改善することが期待された。しかしこの放 電ではプラズマ位置が Rp ~ 830mm 付近で止ま ることなく~900mmまで増加した(図4)。このよう にプラズマ位置が大き(移動するのでECHに 比ベサイクロトロン共鳴条件が比較的ゆるやか な ECCD を試みた。

電流クエンチ時への ECCD の効果をみるた め硬X線の時間発展を計測した。ECCD の印加 と共に硬X線の増加が観測された(図5、図6)。 硬X線信号の hx7 は、電流クエンチより約 10ms 前に印加したECCDパルスとともに増加した。こ れは電流クエンチによる誘導電場と ECCD との 相乗効果というよりは ECCD の効果が主に現れ たといえる。しかもこの硬X線放射はプラズマ中 の逃走電子による制動放射というより、それらが 容器壁に損失されたときのそこからの放射と考 えられる。注目すべき点は図6に示したループ



図4 図3の放電におけるプラズマ水平位置





電圧と硬X線放射の hx6 の時間変化である。hx6 はループ電圧に負のスパイクが現れる時間帯から急速に増加 しており、熱的クエンチによる負の大きな誘導電場と ECCD の相乗効果によると思われる。しかしながら、プラズ マ位置の大きな変位により、このように生成された高速電子も容器壁面で損失されたものと思われる。

### 4.結論

TRIAM-1Mトカマクにおいて、電流ディスラプション時に ECH あるいは ECCD を行うことにより逃走電子電流 を生成しプラズマ電流の減少を最小限に抑え、ディスラプション制御を試みた。ディスラプション・フェイズへの ECCD は硬X線放射の顕著な増加をもたらし、その可能性を示した。しかしながら、本研究の大幅な進展のため には、次の課題の克服が不可欠との結論に達した。 ディスラプション時のプラズマ位置変動が大 きく効果的に ECH/ECCD が行えなかった。

プラズマ小半径が小さく、JET プラズマのシ ミュレーションのように周辺部のみが冷却しコア 部に逃走電子電流を集中させるような条件を設 定することが困難であった。

ECH/ECCD 電力がオーミック加熱電力より 小さく強力な電子加熱や電流駆動が行えなかった。

これらの課題の克服のため、本研究を JT-60U などの大型トカマクで実施することが望ましいと思われる。

参考文献:[1] L.G. Eriksson et al., Phys. Rev. Lett. 92, 205004-1 (2004).



図 6 図 3 の放電における硬 X 線放射の振舞 とループ電圧の関係

\_ . . \_ . \_ . . .

A1. 研究成果報告 なし

\_\_\_\_\_

A2. 研究組織

東井和夫(核融合科学研究所 教授)代表者 出射 浩(九州大学応用力学研究所 助教授) 中村一男(九州大学応用力学研究所 教授) 九州大学大学院工学研究院海洋システム工学部門 豊貞雅宏

### 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「塑性変形による辷り 剪断モードき裂の出現 き 裂開ロモードの出現」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, 負荷過程中の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。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. 観察結果



図1 切欠底から生じた

図2 第一結晶粒内を伝播する疲労き裂



図3 第一結晶粒内のき裂伝播速度

図1は切欠底に生じた辷りの様子の一例を示す。 こりは荷重軸とほぼ 45°方向に生じている。同一面 であった A 面と B 面は, こりによっておよそ1.6µmの段差が生じていることが確認でき,通常言われ ている疲労き裂発生機構と同様の形態を示していた。図2は第一結晶粒内を伝播する疲労き裂とそのの 進展経路の一例である。緑色の矢印がき裂進展方向を表している。これらの写真から,1)切欠底から入 るき裂の初期の方向は引張方向とほぼ 45°方向,2)第一結晶粒内進展中であっても途中でき裂進展方向 が変化する場合もあり得る,ことが確認された。Hansonらの提案した刃状転位とこり線成長に基づく最 初の結晶粒内におけるせん断型疲労き裂成長モデル[2]によれば,結晶方位や初期こり線発生角度次第で 屈曲型のき裂成長経路をとる可能性が指摘されており,図2のようなき裂経路屈折もあり得えることか ら,観察結果は妥当なものであると判断できる。

図3は測定されたき裂長さとき裂伝播速度の関係である。ばらつきはあるものの,結晶粒界に近づく ほどき裂伝播速度が低下する傾向が確認でき,研究代表者らのき裂発生モデルの仮定と一致している。

図4は,測定されたき裂長さ~サイクル数関係と,研究代表者らにより開発された疲労き裂成長シミ ュレーションコード FLARP[1]により第一結晶粒内のき裂成長曲線を推定した結果の例である。計算結 果と測定結果は良く一致しており,提案モデルの妥当性が定量的に確認された。



図4 き裂成長曲線の推定結果と測定結果の比較

### 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,研究代表 者らが構築した,疲労き裂成長モデルの妥当性を確認した。その結果,一定荷重振幅条件では,提案モ デルによりき裂発生挙動を定量的に推定できることが判明した。一方,疲労き裂成長挙動には荷重履歴 が影響する事が知られているため,応力比を変化させた疲労試験や,多段繰返し荷重(最終的にはラン ダム荷重)条件下における疲労試験を実施し,提案モデルの妥当性を検証する事が必要であり,引き続 き研究を進める予定である。

### 6.研究組織

(研究代表者) 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
 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
 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
 杉谷大輔,九州大学大学院工学府建設システム工学専攻修士課程2年

### 参考文献

[1] Toyosada, M., Gotoh, K. and Niwa, T., Fatigue Life Assessment for Welded Structures without Initial Defects: An Algorism 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

横浜国立大学大学院工学研究院 津島 晴

・目的

壁近傍で測定可能な空間分解のよいプラズマ流測定用プローブ 対向電極ダブルプローブ」 を応用力学研究所の トカマク装置 TRAIAM-1M の周辺プラズマで試験的に測定し、プラズマ流 の上流と下流に向いた電極の飽和電流の違いから流速を評価するマッハプローブと比較を行 う

・測定原理

(1) 対向ダブルプローブ [Y. Saitou and A. Tsushima: JJAP <u>40</u> (2001) L1387]

図 1のように電極間の空間に拡散してきたプラズマに対して、向き合った二つの電極間に電位 差を与えて電圧・電流特性を測定する。プラズマの流れは、電極間に拡散してきたプラズマの 非対称性になる。これから電圧・電流(V-I)特性も非対称性で、

 $I = e n c_s S \left[ exp(eV / k_B T_e) - exp(eV_0 / k_B T_e) \right] / \left[ exp(eV / k_B T_e) + 1 \right]$ 

となることが予想される。ここで、浮遊電位 (=0の電圧)V。がプラズマの流速 u と関係し、

$$u = c_s e V_0 / k_B T_e$$

なる式が成り立つ。この関係を使ってプラズマ 流を測定する。ただし、  $c_s$ はイオン音速、 e は 電気素量、  $k_B$ はボルツマン定数、  $T_a$ は電子、 温度 n はプラズマ密度、 S は電極の面積で ある。

(2) マッハプローブ

プラズマ流の上流に向いた電極の飽和電 流は $I_u = e n c_s / (2 - u / c_s)$  であり、下流に 向いた電極の飽和電流は  $I_D = e n c_s / (2 + u / c_s)$  となる。したがって、 これら 2 方向の飽和電流の測定値から、プラ ズマ流ど速度の関係

 $u = 2 c_s (I_U - I_D) / (I_U + I_D)$ 

を使ってプラズマ流を評価する。



図1 対向電極ダブルプローブの概略図。

・平成17年度の経過

 わマク装置 TRAIAM-1M のある放電 #85665)で、トロイダル方向にリミターのほぼ中 央に位置し、ポロイダル断面において下方からリミターに接する磁気面から約 10mm 内 に入った所の対向電極ダブルプローブで得た電圧・電流特性を図2に示す。この特性は、 V<sub>0</sub> = -2 V で T<sub>e</sub> = 17 eV を示しているのでプラズマ流の速度は、

 $u = c_s e V_0 / k_B T_e = -4.7 \times 10^3 m/s$ 

と評価することができる。負の符号は、プラズマ流れの向きが磁場およびプラズマ電流 と逆方向であることを意味している。一方、同様な位置で測定したプラズマ流の上流と 下流を向いた電極の飽和電流の比は Iu/ID=1.1 で、電子温度は Te=23 eV なので、従 来のマッハプローブで得るプラズマ流の速度は、

 $u = 2 c_s (I_U - I_D) / (I_U + I_D) = 4.4 \times 10^3 m/s$ 

となり、二つの方法で得たプラズマ流がほぼ一致することが分かる。尚、二つの方法が 示すプラズマ流の向きは、電流と逆向きで一致している。

・研究組織

代表者

所内責任者

津島 晴 横浜国立大学大学院工学研究院 助教授 齋藤和史 宇都宮大学工学部 助手 坂本瑞樹 応用力学研究所 助教授



図2 対向電極ダブルプローブの電圧・電流特性。
# 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は重要であり,それを主要な課題にしている 九大スフェリカルトカマク装置 QUEST に対する期待は大きい.本共同研究は QUEST(主半径 R=0.6 m, 小半径 a=0.4 m, アスペクト比 A=1.5,トロイダル磁場 B<sub>t</sub>=0.25T,プラズマ電流 I<sub>p</sub>=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]のオーミック放電 について,現状の短いセンターソレノイドと軸方向に長いセンターソレノイドを想定した場合の結果 を比較検討し設計の一助とする.

### 2. 計算方法

プラズマ電流は、ブートストラップ電流、垂直磁場駆動電圧を含む回路方程式を用いて計算した. 同時にエネルギーバランス、粒子バランス方程式も用る.ブートストラップ電流は  $I_{BS}/I_p=0.5\epsilon^{0.5}\beta_p$ の 簡単な式を用いた.内部インダクタンス $\ell_i=0.8$ ,閉じ込め則には外部加熱のないオーミック運転の時 は NSTX においてネオアルカトール則の 1.25 倍程度の閉じ込め時間が得られているのでその値を用い た.プラズマの自己インダクタンスは  $L_p=0.44x10^{-6}$  H である.なお,真空容器電流は考慮していない.

## 3. 計算結果

# 3.1.オーミック放電条件用ヌル点

オーミック放電開始のために CS にバイアス電流を流すが、その時に磁場にヌル点を作るように PF2 コイルに CS コイルと同方向に電流を流す. Fig. 1 と 2 に CS コイルの配置を示す. ここでは外側の 3 層 (R=0. 148m), 4 層 (R=0. 159m) の CS のみを用いる. Fig. 1 の短い CS コイル (Z=±0. 806m) の場合  $I_{CS}$ =+6kA,  $I_{PF2}$ =+30 kA, Fig. 2 の長い CS コイル (Z±1. 20m) の場合  $I_{CS}$ =+9. 5kA,  $I_{PF2}$ =+30 kA とすれば, プラズマ中 心にヌル点ができブレークダウンが起きやすい. ここでは PF2, PF3 コイルの電流範囲を+30 k AT~ -40 k AT と設定した. 長い CS コイルの場合は漏れ磁場が少ないので,同じ PF2 コイル電流に対してヌ ル点を作る CS コイル電流を大きくとれる. その結果長い CS コイルの場合の方が磁束を大きくとれる. プラズマとの相互インダクタンスと漏れ磁場は,短い CS と長い CS の場合,それぞれ ( $M_{pcs}$ =11. 56x10<sup>-6</sup> H/A,  $B_v$ =-1. 794x10<sup>-6</sup> T/A), ( $M_{pcs}$ =13. 07x10<sup>-6</sup> H/A,  $B_v$ =-0. 969x10<sup>-6</sup> T/A) となる. 従って長い CS コイル の場合,相互インダクタンスも大きいのでその分磁束も大きくとれる. このように CS コイル電流は PF2 コイル電流と相互に関連し,それぞれ独立に電流を決定できないので注意が必要である.

#### 3.2.オーミック放電

これらを初期条件として CS コイル電流を逆極性側にふり, どちらの CS コイルの場合も Fig. 3, 4 (c)に示すように 230 kA 程度のプラズマ電流が得られるようにして比較した. また Fig. 3, 4 (e)に示 すように平衡磁場と外部から与えた磁場が一致するようにコイル電流を選んだ. 即ち CS コイルから 漏れる平衡と逆方向の垂直磁場を PF2, PF3 コイルからの垂直磁場で打ち消している. 短い CS コイル の場合プラズマ電流の平坦部は約 33 ms, 長い CS コイルの場合約 80 ms と長くなる. また Fig. 3, 4 (f)に CS コイルの作る磁束を示す. 短い CS コイルの場合, 立ち上げに 0.074 Vs, プラズマ電流立ち下 げ時に 0.14 Vs の磁束となっているが, 長い CS コイルの場合, 立ち上げに同じく 0.074 Vs, プラズマ 電流立ち下げ時には 0.248Vs の磁束となっている.また, プラズマ中心密度を 1x10<sup>19</sup>m<sup>-3</sup>に設定した時, 電子温度は 240 eV 位になる.

#### 4.結果と考察

QUEST 装置のオーミック放電についてその時間発展を数値計算した.その結果,現状の CS を用

いると 230 kA のプラズマ電流が 33 ms 程度,さらに CS を軸方向にのばすと 80 ms 程度のフラットト ップが得られることがわかった. 放電時間を延長するために 1,2 層の内側 CS で磁束をさらに供給す ることも考えられるが, PF2 コイル電流がすでに最大値に達しているので打ち消せる余裕はない. も し余裕があっても 3,4 層の外側 CS コイルで放電を延長するのと同等である. むしろ. 内側 CS は[3] の垂直磁場と RF 加熱によるプラズマ電流立ち上げの際にトーラス内向き力を減し, 放電初期のプラ ズマ位置の安定に重要な役割を果たすと思われる.

## 5. 研究成果報告

## 6. 研究組織



Fig.1. 現状の短いCSの場合, I<sub>0H</sub>=+6.5kA, I<sub>PF2</sub>=+30.0 kAの場合の磁場分布



Fig. 3 現状の短いCS の場合のオーミック放 電波形



Fig. 2. 軸方向に長くした CS の場合, I<sub>0H</sub>=+8.5kA, I<sub>PF2</sub>=+30.0 kA の場合の磁場分布



Fig. 4 軸方向に長くした CS の場合のオー ミック放電波形

# 低エネルギー・高粒子束プラズマ照射によるプラズマ対向材の

# 損傷とガス吸蔵特性に関する研究

研究代表者 名古屋大学エコトピア科学研究所 大野哲靖 名古屋大学工学研究科 高村秀一、西島 大

### 1.はじめに

国際熱核融合実験炉(ITER)においては、放射性物質であるトリチウムを燃料として用いるが炉材料へのトリチウムの蓄積をできるだけ抑制することが放射性物質安全管理上の問題から求められている。タングステン(W)は低スパッタ率・低水素吸蔵率という特性を有するためITERにおいて重要な炉材料候補の一つとなっている。しかし、水素プラズマ照射されたW表面では水疱上のプリスターと呼ばれる損傷が形成されることがこれまでの研究によって明らかとなっており、このプリスター形成によりWの水素吸蔵量が大幅に増加する可能性が指摘されている。

前年度の本共同研究において、Wの表面前処理の違いによりブリスター形成・水素吸蔵特性に変化が生じることを報告した。特に研磨紙で機械研磨したW表面ではブリスター形成が見られず、水素吸蔵量も大幅に低減されることが明らかとなった。しかし、重水素プラズマの照射時間が3時間と短い時間であったため、機械研磨表面でのブリスター・水素吸蔵抑制効果がより長時間の照射でも持続するのかということは不明であった。この問題を実験的に明らかにすべく、機械研磨表面と未研磨表面に50時間の重水素プラズマを照射し、表面変化の有無、水素吸蔵量の違いを調べた。

# 2.実験装置および実験方法

用いたW試料は厚さ0.2 mm、純度 99.95 %の鏡面仕上げ加工粉末 焼結W試料(Nilaco Co.)である。図1に示すように 30x20 mmの未研 磨試料の半分を研磨紙(80 番)で研磨した試料に重水素プラズマを 照射する。名古屋大学所蔵の直線型ダイバータプラズマ模擬装置 NAGDIS-Iを用いて重水素プラズマの照射を行った。実験配置図は 成果報告[1]を参照されたい。試料電位を制御することにより重水素イ オンの入射エネルギーを決定する。イオン粒子束は試料面積とイオン 飽和電流から算出する。重水素プラズマの照射条件は以下のとおり である。イオン粒子束 2.5x10<sup>21</sup> m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>、入射イオンエネルギー 80 eV、照射時間 50 h、照射量 4.5x10<sup>26</sup> m<sup>-2</sup>、照射温度 500 Kである。 プラズマ照射後、走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて未研磨面、研磨 面それぞれの表面変化を調べる。さらに九大応力研吉田研究室の協 力を得て各部分から抽出した試料片に昇温脱離法分析(TDS)を行い 重水素の吸蔵量を評価する。



図 1:照射用タングス テン試料模式図

# 3.実験結果と考察

## 3.1 表面損傷

重水素プラズマ照射後の試料のデジタルカメラ 撮影像を図2に示す。未研磨表面では肉眼で認 識できるほどのブリスターが密に形成されていた。 試料右側は固定器具の影になったため重水素プ ラズマが照射されていない面であるが、照射面と 比較すると変化の度合いがはっきりと認識できる。 研磨面では肉眼では変化は認識できなかった。 図3は未研磨面(a)、研磨面(b)のSEM像である。 (a)の未研磨面では大きいもので直径 500 µm ほ どのブリスターも観測された。前報で報告した3時 間照射のものでは大きいもので 200 µm 程度で あったので、50時間の照射によってブリスター直 径は約2倍以上に成長したことになる。しかし、照 射時間が 17 倍近くであるのに対して、ブリスター の大きさが2倍程度にしか成長していないことから、 ブリスターの成長速度と照射時間は比例関係に あるということはできない。もっと早い段階でブリス ターは 500 µmの大きさに成長し、その後は成長 が抑制されてしまったという可能性も考えられる。 この結果はブリスターが照射初期に急激に成長し、 ある時点からは成長が抑制される可能性を示唆し ている。

一方、研磨面の方では 3 時間照射のものと同 様、図 3(b)に示すようにブリスターの形成は見られ なかった。このことは機械研磨によるブリスター形 成の抑制効果が堅固であることを示している。本 研究で用いたW試料のバルクには圧延製造時に 形成された層状の構造が見られる。層構造がある と層界面が破断しブリスター形成が起こりやすいこ とがこれまでの研究で明らかとなっている。しかし、 本結果は、たとえ層構造があったとしても表面を 機械研磨することによりブリスター形成が抑制され るということを示している。表面に適当な粗さを持 たせることにより、ブリスター形成を容易に抑制で きる可能性がある。



図 2:重水素プラズマ照射後の試料。デジタ ルカメラにて撮影。



図 3:重水素プラズマ照射後の試料 SEM 像。(a)未研磨面、(b)研磨面。

# 3.2 昇温脱離法(TDS)分析

照射後の未研磨、研磨各部分に対して昇温脱離法分析を行った。昇温速度は1 K/secである。 図 4(a)に50時間照射の試料のものを、同図(b)に比較のために前報で示した3時間照射のものをそ れぞれ示す。50時間照射でもブリスターが抑制された研磨表面の重水素吸蔵量は1.6x10<sup>20</sup> D<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> で、3時間照射の研磨試料のそれと比べると約8倍に増加していることがわかる。これは、たとえ、ブリ スター形成がなくとも照射時間の増加に伴い重水素吸蔵量が増加していることを示すものである。一 方、ブリスターが密に形成された50時間照射の未研磨試料の重水素吸蔵量は7.3x10<sup>20</sup> D<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>で あり、3時間照射のそれと比べると1.4倍に増加したにとどまった。本研究では重水素イオンの入射エ ネルギーは80 eVと低いため、はじき出し型の照射欠陥は材料中に形成されない。そのため、プリスタ ー形成等のマクロな表面損傷以外には重水素の捕捉座が形成されることはない。よって、重水素の 吸蔵が10<sup>20</sup>-10<sup>21</sup> D<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>付近で飽和傾向を示しているものと考えられる。



図 4:重水素の昇温脱離スペクトル。(a)50時間照射試料、(b)3時間照射試料(前報)。

# 4.まとめ

機械研磨によるブリスター抑制・重水素吸蔵低減効果が長時間照射においても持続するもので あるかどうかを調べるために実験を行った。その結果、ブリスター抑制に関しては機械研磨の効果は 維持された。重水素吸蔵特性に関しては、長時間照射においても機械研磨試料の吸蔵量が未研 磨試料のものより低かったが、その比は3時間照射の場合は1:25 であったものが50時間照射の場 合は1:5 程度になった。ただ、重水素吸蔵量が10<sup>20</sup>-10<sup>21</sup> D<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>付近で飽和傾向を示しているよう である。

## 研究成果発表

[1] D. Nishijima, H. Iwakiri, K. Amano, M.Y. Ye, N. Ohno, K. Tokunaga, N. Yoshida, S. Takamura, Nuclear Fusion **45** (2005) 669-674.

[2] D. Nishijima, K. Amano, N. Ohno, N. Yoshida, S. Takamura, J. of Plasma Fusion Research **81** No.9 (2005) 703-707.

# 運動論的 MHD シミュレーションコードの並列化による高速化の研究

山口大学工学部 内藤裕志

# 1. 目的

トカマク実験装置の大型化と閉じ込められるプラズマの高温化によって従来の電磁流体力学 (MHD)理論では説明できない現象 (運動論的 MHD 現象)が観測されるようになってきている。 このため MHD 理論の構築に当たって無視されていた効果を取り入れた運動論的 MHD 理論(また は拡張 MHD 理論)の構築が重要になってきている。本研究は、2流体コードの一つであるジャイ ロ簡約 MHD コードおよび粒子コードの一つであるジャイロ運動論的粒子コードを用いたシミュレ ーションにより、運動論的 MHD 現象の線形安定性および非線形発展を解明することを目的として いる。運動論的 MHD シミュレーションは、無衝突磁気再結合で重要な特徴的長さである無衝突ス キン長 (mm のオーダー)と巨視的な長さ (m のオーダー)の両方を含むため、必要とされる計算 機資源に対する要求が超巨大になる。従って、運動論的 MHD シミュレーションではコードの並列 化による高速化が必須である。

# 2. 基礎方程式とシミュレーション手法

2流体(電子流体とイオン流体)のジャイロ簡約 MHD モデルでは、イオンのランダウ減衰の効 果を取り入れるため、3場のジャイロ簡約 MHD モデルを拡張して、5場のジャイロ簡約 MHD モ デルを用いる。3場モデルの基礎方程式は静電ポテンシャルφ(渦方程式)、ベクトルポテンシャル のz方向成分  $A_z$ (磁力線方向のオームの法則)、電子密度  $n_e$  に対する方程式(電子の保存則)から なる。3場モデルでは電子とイオン温度について等温近似を用いている。このため圧力勾配は密度 勾配かける一定温度で表される。3場モデルの電子密度の式に、イオンの磁力線方向の流体的速度  $V_i$ の磁力線方向の勾配の項を含め、 $V_i$ とイオン温度の摂動成分 $\tilde{T}_i$ 対する方程式を加えると5場モデ ルになる。イオン温度の摂動分( $T_i = T_{i0} + \tilde{T}_i$ )は、イオンのランダウ減衰の効果を取り入れるため に必要である(Hammet と Perkins の線形ランダウ closure の定式化)。

ジャイロ運動論的粒子コードでは従来のデルタエフ法の拡張版の組込みを予定している。従来の デルタエフ法では荷電粒子の分布関数を平衡成分と摂動成分(平衡からのずれ)に分解し、摂動成 分をジャイロ運動論的ブラソフ方程式の特性曲線にそった粒子の運動を解くことにより計算してい る。この場合1個の粒子の持つ電荷は摂動分のみになるためシミュレーションにおけるノイズレベ ルは極めて小さくなる。この方法は低ベータ(電子の熱速度<アルベン速度)の場合には有効であ ったが、高ベータ(電子の熱速度>アルベン速度)の場合は電子の運動を解くため時間ステップ幅 を小さくする必要があり、計算でのパラメータ領域は低ベータに限られていた。最近 PPPL の W.W. Lee 博士により新しい手法として、Split-weight Perturbative Particle Simulation Scheme が提案 されている。この場合は荷電粒子の断熱的応答をボルツマンの式で表し、分布関数の断熱的応答か らのずれを粒子的手法により解く。高ベータの場合は特に電子の断熱的応答に加えて、電子のラン ダウ減衰、電子電流の効果が適切に取り入れられることが重要であり、新しい手法はシミュレーシ ョン可能なパラメータ領域を格段に広げる可能性がある。

# 3. 研究成果

ジャイロ簡約 MHD コードによる密度勾配を含む場合の *m* = 1, *n* = 1 の運動論的内部キンクモードシミュレーションの成果は以下に要約される。

- (1)線形シミュレーションの結果: イオンのランダウ減衰を無視した場合は、密度勾配を大きく していくと安定化するが、境界層理論と異なり $\omega_{*e}>2\gamma_0$ で弱い不安定性が残る。イオンの ランダウ減衰を入れると中間的な密度勾配の場合に安定領域が生じる( $2\gamma_0 < \omega_{*e} < \omega_{\rm H}$ ) が、さらに密度勾配を大きくする( $\omega_{*e}>\omega_{\rm H}$ )と不安定になる。イオン温度を上げるほど安 定化の効果は大きくなる。
- (2) 非線形シミュレーションの結果(3場モデル):運動論的内部キンクモードの線形モードパターンは m=1のポロイダルシア流を含む。ポロイダルシア流がある領域でケルビン・ヘルムホルツ的不安定性により多くの渦が形成される。渦の形成により運動論的内部キンクモードは安定化される。渦同士は強い相互作用を示し、密度勾配がある領域全体にわたってより小さい渦が乱流的に相互作用する。密度勾配は渦により少し平坦化する。この乱流的状態により有理面近傍の粘性が強まり(仮説)内部キンクモードを再び不安定化する。ランダウ減衰の効果を非線形シミュレーションに取り入れるのは理論的に困難であるため、ジャイロ運動論的粒子コードでの研究と平衡して研究していく必要がある。なお、非線形計算で電子の無衝突スキン長とプラズマ小半径の比は 0.002 となり現実のプラズマに対してファクター2まで近づいた。
- ジャイロ運動論的粒子コードに関する成果は以下に要約される。
- (1)新しい手法の定式化を完了した。
- (2) 従来のコードを MPI 対応に修正した。新しい手法の組み込みは次年度に行う。

なお、この研究は、平成18年度応用力学研究所特定研究の「多スケール・拡張 MHD の理論シミ ュレーション研究」(代表者:徳田伸二)の一部として続ける予定である。

# 4. 研究組織

研究代表者:山口大学工学部電気電子工学科	内藤裕志
研究協力者:山口大学メディア基盤センター	小林俊満
日本原子力研究所那珂研究所	松本太郎
所内世話人:九州大学応用力学研究所	矢木雅敏

# 学会発表・論文等

- "Nonlinear acceleration of the electron inertia-dominated MHD modes due to electron parallel compressibility", T. Matsumoto, H. Naitou, S. Tokuda, Y. Kishimoto, Physics of Plasma 12, 092505-1-7 (2005).
- "Nonlinear Behaviors of Collisionless Double Tearing Mode induced by Electron Inertia", T. Matsumoto, H. Naitou, S. Tokuda, Y. Kishimoto, Nuclear Fusion 45, 1264-1270 (2005).
- "Nonlinear simulation of tearing mode based on 4-field RMHD model", M. Yagi, S. Yoshida, S.-I. Itoh, H. Naitou, H. Nagahara, J.-N. Leboeuf, K. Itoh, T. Matsumoto, S. Tokuda and M. Azumi, Nuclear Fusion 45, 900-906 (2005).

TRIAM-1Mの周辺プラズマに於ける非対称プローブによるイオン温度の測定とプラズマ 輸送の研究

日本原子力研究所 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1年)

目的

応用力学研究所の準定常トカマク TRIAM-1M で、プラズマ輸送を考える上で周辺 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 度を測定した。今回はイオン温度の測定の妥当性をチェックする為に 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 mode, ECD)に対して周辺のイオン温度の測定を試み、コアの NEA (平行平板型中性粒子エネルギー分析器)や異常ゼ・マン効果による分光測定と の比較を試みた。

# 非対称プローブによるイオン温度の測定原理のサーベイ



非対称プローブはFig.1に示すように、磁力線方向に置かれた長さの違うダブ

Fig. 1 (a) The configuration of the asymmetric double probe against the magnetic field B (b) The  $V_p$ -I<sub>p</sub> characteristics of the asymmetric double probe.

ルプローブで、飽和電流の比(I<sub>1</sub>/I<sub>2</sub>)からイオン温度T<sub>i</sub>を測定する。雨宮によると

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{f(\kappa, L_2) + 2}{f(\kappa, L_1) + 2}$$

(1)

となる<sup>1)</sup>。但し $\kappa=a/r_{L}$ で、イオンラ ・モア半径 $r_{L}$ を通して $I_{1}/I_{2}$ は $T_{i}$ の関 数となる。通常のダブルプローブ は $L_{1}/L_{2}=1$ である。TRIUM-1Mでは  $L_{1}/L_{2}=9/4.5$ 、2a=1.5 mmを採用した。  $\kappa$ ()と $T_{i}$ とを電流比に対し て計算したのがFig. 2 である。 TRIAM-1Mでは電流比は1.1 近辺 なので、イオン温度は $T_{i}=100$  eV 近辺と思われる。

Fig. 3 は今年度使用した
TRIAM-1M 用の非対称プローブチップの写真である。プローブはト・ラス下側から垂直上方向に設置され、外のダブルプローブ列の一角を占めている。



Fig. 2 The vale of  $\kappa$  (kappa) and T<sub>i</sub> in eq.(1)

against the current ratio for TR IUM -1M

# 実験結果

TRIAM-1Mでは、低域混成波による 電流駆動で長時間定常的なプラズマ を得ているがこのプラズマに対して 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 $T_e$ を測定した。Fig. 4 はトロイダル磁場7 Tの電流駆動プ ラズマ(f=8.2GHz,  $P_{rf}$ = 50 kWの高効率 電流駆動プラズマ(Enhanced Current

Drive mode, ECD ) )に対して、非対称プローブで測定した、周辺プラズマの $n_e$ ,  $T_i$ 及び $T_e$ である。プラズマア電流 $I_p$ =30kAでのノーマルな電流駆動モードでは $n_e$ =



Fig. 4 The time behaviour of plasm a current  $I_p$ , plasm a density  $n_e$ , ion temperature  $T_i$  and electrin temperature  $T_e$  for ECD mode

1.3 x  $10^{17}$ m<sup>-3</sup>, T<sub>i</sub>= 200 eV, T<sub>e</sub>=15 eV程 度であるが、ECDモードになると、 n<sub>e</sub>, T<sub>i</sub>及びT<sub>e</sub>及ともにやや上昇てい るのが見られる。コアのNEAによる 測定でもT<sub>i</sub>は上昇しているのが観測 されている。

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・マン効果に よる分光測定との同時測定を試み た。測定点がやや内側の点ではPrf= 80 kWの時のECDモードに入る前に Ti= 20 eV,であったものがECDモー ドに入るとTi= 100 eVトなるのが観 測された。異常ゼ・マン効果による 分光測定データとの比較は現在整 理中であるが、JFT-2Mにおいて同種 のプローブで測定したイオン温度

 $lambda_{e} = 1.3 \times 10^{17} \text{m}^{-3}$ のプラズマ密度で $T_{i} = 100 \text{ eV}$ ,  $T_{e} = 10 \text{ eV}$ 程度である<sup>2)</sup>。

# 参考文献

- 1) 上原和也,核融合プラズマのプローブ計測」プラズマ・核融合学会誌、81 (2005)509
- 2) K. Uehara et al., Nucl. Fusion 38 (1998) 1665

# 研究成果報告

上原和也、坂本瑞樹他、「TRIAM-1M に於ける非対称プローブによる周辺イオン 温度の測定と Globus-M に於けるプラズマガン」第20回トライアム研究会、平 成18年1月

# 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

核融合装置におけるダスト研究は,重水素実験を行なった後の真空容器内残留トリチウム問題 という観点から着目されている.核融合科学研究所・大型ヘリカル装置(LHD)ではダストの堆積 箇所および蓄積量,さらに発生プロセスの観測を目的とした研究を進めており,前者は実験サイク ル終了後の真空容器内にてダスト採取の実施をすることで表面分析を行なっている.後者は時間分 解能 5 msの高速赤外線カメラを使用することでプラズマ実験中のダスト粒子の振る舞いを観測可 能となった.ダイバータ領域を含む CFC 材対向壁領域を視野として設置された赤外線カメラによ って得られた現象は,主に3つに分けることが出来る.第1には ECH 加熱の入射開始に伴うダイ バータレッグ周辺の温度上昇,第2はプラズマ中のダスト粒子の移動,第3はプラズマ崩壊時の広 範囲におけるタイル上の局所的温度上昇現象である.

本共同研究では1,3の現象に着目し,実際に赤外線カメラによって観測されていた領域から 1枚のタイルを取り外し,応用力学研究所・吉田研究室で走査電子顕微鏡(SEM)による表面観 察,及び併設されているエネルギー分散形X線分光(EDS)法による組成分析を行った.

## <u>分析方法</u>

LHDより取り外した対向壁材(約15cm×15cm,CFC材)のSEMによる分析を 行った.事前観察によりダイバータ・プラズマによって生じた損耗領域が含まれているため,それ らのトロイダル分布も解析できるよう測定箇所を定め,それぞれの場所において表面分析を行なっ た.EDS分析時の元素としては,対向壁材であるC,および第一壁材であるSSを構成するFe, Cr,Niに着目して分析を行なった.

使用したタイルは次年度実験でも使用する予定のタイルであったため,非接触・非切断での分 析を行なった.

# <u>結果および考察</u>

最初にSEMによる表面分析結果を図1に示す.(a)に示すようにタイル表面上でのダストは ほとんど観測されず,観測箇所いずれにおいても同様の傾向にあった.また,タイルには多数の開 口部が存在し,これらのうち一部は真空容器内への設置時から存在したと考えられるが,これらの 内部にはCFC材特有の繊維質がみうけられ,(b)に示すようにそこに絡みつくように存在する ダストが確認された.EDXの結果からこれらはカーボンであり,直径1-10µmであった.

存在した数としては大変少ないが,タイル表面上で観測されたダストのうちの一つを図2に示す.このダストの組成はカーボンであり,直径10µm程度である.LHD真空容器の大気開放直後に実施した,フィルタの背面を真空ポンプで挽いて行なう採取法と今回のタイル上で観測された ダストを比較すると,径がダスト採取時よりも大きい傾向にあること,また形状が複雑であり例え ば観測された粒子はカリフラワーのような表面状態であったことが挙げられる.

さらに詳細な表面状態を観測すると,図3に示すように厚み数µm程度の細かなササクレ状態 のカーボンがタイル表面で多数観測された.これらは前述の高速赤外線カメラによるデータでの第 3の現象源として考えられ,今後この厚みに対するプラズマからの熱負荷による温度上昇の計算な どを行い,比較検討を行ないたいと考えている.

# まとめ

実機タイルを用いた表面分析では,大気解放後のダスト採取とは一部異なる状態のダストが観測された.本分析ではカーボン系ダストが観測され,表面よりもCFC材の開口部内部でのダスト 蓄積が観測された.これらの結果より,フィルタを用いたダスト採取・分析と共に, *in situ*の状態 をおさえることの重要性もあわせて確認された.

# <u>6.研究組織</u>

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	<b>F</b> 究所	(所内世話人)
	徳永和俊	九州大学応用力学研	<b>F</b> 究所	
	材料グループ	九州大学応用力学研	<b>F</b> 究所	



図1.SEM による表面分析結果(a)表面状態,(b)開口部内部





図2.タイル表面上で観測されたダスト 図3.表面状態

山口大学工学部 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<sup>1)</sup>。

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<sup>2)</sup>、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<sup>3)</sup>。本研究ではグリッド負バイアス法<sup>4,5)</sup>によ るRFプラズマパラメータ制御を試み、負イオン生成の高効率化の検討を行った<sup>1)</sup>。

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。装置は直径21cm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プラズマ生成領域は長さ21.5cmであり、メッシュグリッドから上流側 13.5cmの位置に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った。本研 究ではアンテナとして直径18cmの銅製円盤を用いて実験を行なった。また、投入する電力の整合をと るために、RF電源から装置に入力するまでの間にマッチング回路を設けている。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今回は 50mesh/inch、30mesh/inch、7mesh/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。表1に用いたメッシュの構造を示す。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 = 9cm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。負イオン電流はプラズマグリッド中央に設けた 10φ単孔より負電流を引 出し、ファラデーカップ型イオン分析器により測定した。

#### 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の比較を示す。実験条件は、RF放電電力 $P_{RF}$ = 300W、水素ガス $E_p(H_2) = 6$  mTorr、アンテナ直径Da = 18cm、グリッドバイアス電EVg = -50Vである。 $n_e$ と $T_e$ を比較すると、50mesh/inchの方が 30mesh/inchに比べて $T_e$ が低く、 $n_e$ が高いことが分かる。これは 50mesh/inchの方が 30mesh/inchに比べて数何学的透過率が高いために高エネルギー電子が通過しやすくなり、高エネルギー電子の増加に伴い電離衝突が増えることにより $n_e$ が増加したものと考えられる。また、高エネルギー電子のエネルギー緩和も促進され $T_e$ もより低下している。

次に、負イオン電流を測定するにあたり、負イオン引き出しの最適位置を決める必要がある。エンド プレートの位置は50mesh/inchと30mesh/inchの場合が-5cm、7mesh/inchの場合が-6cmのときが負イオン生 成量は最大になった。これはメッシュグリッドを透過した高エネルギー電子が電離衝突して拡散プラズ マを生成しているので、メッシュに応じたそれぞれの位置でn<sub>e</sub>の増加および負イオン生成量の最適化に 繋がったものと考えられる。

図3に負イオン電流の放電電力依存性を示す。実験条件は、 $p(H_2) = 6 \text{ mTorr}$ 、Da = 18 cm、Vg = -50 V、 引出し電圧 $V_{\text{EX}} = 1 \text{ kV}$ である。負イオン電流は $P_{\text{RF}}$ の増加に比例して増加していることが分かる。これは  $P_{\text{RF}}$ が増加することによる( $T_c$ は1 eV程度にとどまったままで)拡散プラズマ領域での $n_e$ 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、50mesh/inchでは30mesh/inchに比べて負イオン生成量が増 加している。この理由は図2の議論と同様で、50mesh/inchのメッシュでは幾何学的透過率の高いことか 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。

以上、RF放電プラズマ中での負イオン生成およびその高効率化の可能性が確認できた。しかし、メッシュ線間隔とプラズマ生成領域中のプラズマが作るシースとの関係、特にプラズマ制御に及ぼす影響については今後の検討課題である。

# 参考文献

- 1) Y. Nakao, D. Ito, J. Ono, Y. Tauchi and O. Fukumasa: Proc. 6th Inter. Conf. Reactive Plasmas / 23rd Symp. Plasma Processing (2006), pp. 185-186.
- 2) O. Fukumasa, H. Naitou and S. Sakiyama: Jpn. J. Appl. Phys. 30 (1991) L1063.
- 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

# 表1 使用したメッシュの構造諸元

mesh size (mesh/inch)	diameter of wire (mm)	distance between two wires (mm)	geometric transmittance (%)
7	1.03	2.36	48.5
30	0.25	0.597	49.7
50	0.05	0.458	81.3



図 2 プラズマパラメータの軸方向分布: (a) *n*<sub>e</sub>, (b) *T*<sub>e</sub>. 実験条件: *P*<sub>RF</sub> = 300W, *p*(H<sub>2</sub>)= 6 mTorr, *D*a = 18cm, *V*g = -50V.



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<sub>2</sub>)= 6 mTorr, *D*a = 18cm, *V*g = -50V, *V*<sub>Ex</sub> = 1kV.

# 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

<u>目的</u>

TRIAM-1M プラズマのような長時間放電プラズマを念頭に、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。

#### 研究概要

ニューラルネットワークは、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、更に次元削減問題の観点か らコホネンの自己組織化マップ(SOM)の基本的な性質について予備的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。

残差最小化学習ニューラルネットワーク

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(ウエイト) を調整することによって行う。たとえば、3層ニューラルネットワークの出力値を具体的に書き 下すと次式のようになる。

$$y_{k} = \sum_{j=1}^{J} w_{jk} \sigma \left( \sum_{i=1}^{I} v_{ij} x_{i} + v_{0j} \right) + w_{0k}, \quad (k = 1, ...K)$$

ここで、*x<sub>i</sub>とy<sub>k</sub>*は入力データと出力データを表し、*v<sub>ij</sub>とw<sub>jk</sub>*はウエイトと呼ばれるニューラル ネットワーク内部のパラメータである。また、*σ*はシグモイド型の活性化関数である。この式 からわかるように、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。 したがって、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、勾配法を始め とする種々の最適化アルゴリズムによってこの目的関数の最小化を達成することができる。さら に、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 合わせを考えることができる。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(積分方 程式の場合については省略する)。

$$E = \sum_{\substack{observation \\ points}} (\vec{y}^{NN} - \vec{y}^{obs})^2 + \gamma \sum_{\substack{collocation \\ points}} (L\vec{y}^{NN})^2$$

このような目的関数を使ったニューラルネットワークを「残差最小化学習ニューラルネットワーク(NNRMT: Neural Network with Residual Minimization Training)」と呼ぶことにする。NNRMT 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。我々は、このNNRMTを使ってTRIAM-1Mプラズマの計測データを解析したり予 測及びパラメータ推定に適用することを目指しているが、本年度の研究ではTRIAM-1Mの実データ を使っての解析までは行わず、本方法の基本的性質の研究を他のデータについて行うにとどまっ た。NNRMTの学習のために適切な目的関数を採用することによって種々のタイプの逆問題を実用 的に解くことが可能である。これらは便宜的に、(1)CT型問題、(2)データ同化型問題、(3) パラメータ評価型問題、(4)時系列予測型問題 等にわけて考えることができる。これらのタ イプの問題いずれもが核融合プラズマのデータ解析に適用可能であるが、今回は、NNRMTの応用 対象として(1)および(4)のタイプの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少 数データトモグラフィ[1]および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。このうち後者はプラズマ断面の密度分布をマイクロ波やレーザー光の 干渉計データセットから逆変換して求めるものである。干渉計データセットの測定では、通常、 1方向の測定経路のデータが使われるので、測定経路に沿う方向の密度分布に関する情報は完全 に失われている。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いる。核融合プラズマの干渉計測定ほど極端ではないが、測定経路の方向が 限られている問題に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測定 がある。この場合は、水平に近い方向の測定経路が存在しない。この問題に関しては時間分解能 15分とし、20200km上空のGPS衛星と地上の受信機の間に多数の測定経路を設定し3次元トモグ ラフィに成功した[3]。このトモグラフィ手法は核融合プラズマの計測データ解析にも適用可能 で、そのために必要な条件は次のようなものである。すなわち、 測定経路の偏りによる情報欠 損を補うために、たとえば、密度分布が極大値をとる領域内の1点において、なんらかの別の手 段で測定した正しい数値を導入する。また、 トモグラフィ像を再構成する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。

時系列予測型問題

ニューラルネットワークによる通常の時系列予測は、線形の自己回帰(AR)予測に類似であ

る。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 $(x_{i+1}, x_{i+2}, \dots, x_{i+n})$ を使って $x_{i+n+1}$ の値を次のように予測する。

 $\hat{x}_{i+n+1} = a_1 x_{i+1} + \dots + a_n x_{n+1}$ 

通常のニューラルネットワーク予測では、上式の右辺を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<sub>NN</sub>*(\*) として、次式を用いる(通常法)。

$$\hat{x}_{i+n+1} = F_{NN}(x_{i+1}, \dots, x_{i+n})$$

このように非線形時系列予測では、時系列が(決定論的)力学系に支配されているという立場に 立っているので、時系列データが次のような連立1階常微分方程式で表されるとしてNNRMT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と考えられる。

$$\frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{g}(\vec{x})$$

この方法(NNRMT法)を適用して種々の時系列データの予測方法についての研究を継続している。 具体的には、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である。ディスラプション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。そこで、この方法の解析性能を確認する ために、ローレンツ方程式を数値積分して得たデータを使って人工的な時系列データについて時 系列予測を試みた。許容誤差を一定として通常法とNNRMT法の予測結果を比較するとNNRMT法の方 が2~3倍の長時間にわたって予測が可能であることがわかった。ローレンツ方程式の解はカオ ス的であり、その状態空間軌道はストレンジアトラクター上にあって、真の長期予測は不可能で ある。しかし、NNRMT法で予測した遠い未来の軌道は、数値で見る限り正しい値を示していない のにもかかわらず、ストレンジアトラクターの形は原アトラクターに極めてよく似た形をしてい る(図1)。この形の類似性を定量的に評価するために時系列データから原軌道と予測軌道のフ ラクタル次元を求めてみた。この結果によれば、予測軌道のアトラクターの形が原軌道のアトラ クターの形に似ている時には両者のフラクタル次元は近い値をとることが判明した。したがって、 長時間後の数値を予測できない理由は予測開始時点における初期値の僅かな違いによるもので あって、時系列を生み出すダイナミックスはNNRMTによる学習過程において高精度で抽出されて いることが推定できる。



図1 ローレンツアトラクター 原方程式の解(次元:2.07、次図も括弧内は次元)



図 2 (a) NNRMT法によるアトラクター(2.00)(b)通常法によるアトラクター(1.90) 自己組織化マップの応用

次に、コホネンの自己組織化マップ(SOM)[4]の核融合プラズマの計測データ解析への応用に ついて検討した。SOMは、基本的には、高次元データを低次元データに削減する技術として位置 づけられる。この方法の核融合プラズマの計測データ解析への適用可能性について調べるために、 線電流によって発生した磁場を線電流の回りに置いたn個のプロープによって測定して得られた n個の磁場の値を成分とするn次元ベクトル(特徴ベクトル)を線電流の位置(x,y)を表す2次元 ベクトル(マップ面ベクトル)に対応させるシステムを構成した。マップ面ベクトルに対応する 特徴ベクトルの初期値の設定に十分注意することで満足できる結果が得られることを確認した。 しかし、このn次元から2次元への写像はトポロジカルな写像であるので(x,y)面上の距離の情報 は失われており、例えば、MHD平衡の情報を直ちに得られるものではない。このため、このネッ トワークを核融合プラズマ計測データの解析に応用するためには、更に何らかの工夫をする必要 がある。一般に、核融合プラズマの状態は多くのパラメータの値によって表現されると考えられ るが、例えば、ディスラプションに至る軌道を2~3次元の低次元空間内の軌道に変換し、その プロセス進行の理解を容易にするために用いるような応用が考えられる。

### 参考文献

 Xiao-Feng Ma, Makoto Fukuhara, Tatsuoki 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] Xiao-Feng Ma, Tatsuoki 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] Teuvo Kohonen, Self-Organizing Maps (Springer-Verlag, Berlin, 2001).

# コーシー条件面法を用い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、プラズマ断面位置形状の高精度平衡制御系の構築を目指すものである。そ の手法として日本原子力研究開発機構 JT-60 で現在稼動中である「CCS(コーシー条件面) 法」を用いた実時間プラズマ断面形状再構築動画可視化システムを小型 ST、および新 ST へ応用するための検討、システム設計の提案を行うものである。

#### 研究の具体的方法

研究対象としては、原研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 Mini-ST、Large-STへの適用に於いて、STトカマクへの初めての適用になるこ とから、以下の検討を行う。

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。 以上を踏まえたシステム構築設計を実施する。

#### 結果概要

CCS 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 め平衡解析コードを用いて正 解の位置形状分かったプラズ 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1例を図2に示す。





図 2 平衡コードと CCS との再構築結果比較

このように、誤差の出易い小体積プラズマに対しても高精度で再構築していることが判る。

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VMEバ スシステム(1台)でプラズマ断面形状を実時間動画可視化(約20ms)を行っている。こ の実時間制御におけるデータ通信はRM(リフレクティブメモリ:VME/PCI\_VMIC5576, 256KB, 6.2MB/s, 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。

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

## 平成17年度 応用力学研究所 共同研究 報告書

# 「トライアムに於ける定常プラズマ-壁相互作用の実験と 粒子バランスのモデリング」 代表者:廣岡慶彦(連携研究推進センター)

# 世話人:坂本瑞樹(九大応力研・炉心研究センター)

目的:定常炉内のプラズマ - 壁相互作用、特にエロージョン壁材料とその再付着 現象に起因する燃料粒子の取り込み(codeposition)が、炉全体の粒子バランスに 密接に関わってくることは、前年度までの本共同研究の成果から明らかである。 今年度は、さらにプラズマの熱負荷により壁からの燃料粒子の再放出(degassing) の影響を考慮したモデルを考案し、TRIAM - 1Mのデータ解析を試みることが主 な目的である。

方法: TRAIMに装着された可動式リミターを改造し、先端にガスパフ機構を 装着し、そこから固定式プラズマ対向機器の温度上昇に伴う脱ガス挙動を模擬す るような波形でガス導入を行うことで通常のガスパフに加えて第2フユーエリン グ源が炉内にある場合の模擬を行うことが出来ると考えられる。

結果:上記のリミター改造が本年度中に間に合わなかったため、現行のリミター を周辺プラズマ部で移動させその熱負荷によるガス放出による2次的フユーエリ ング実験をを行った。 得られたデータは、現在、代表者・世話人等が開発した ゼロ次元粒子バランスモデル(次式参照[1])を用いて解析中である。

$$\frac{dN_{core}}{dt} = -\frac{N_{core}}{\tau_{core}} + \alpha_{1} \frac{\langle \sigma v \rangle_{cx1}}{2V_{gas}} N_{gas} N_{SOL} - \alpha_{2} \frac{\langle \sigma v \rangle_{cx2}}{V_{gas}} N_{gas} N_{core} + (\frac{N_{SOL}}{\tau_{SOL}} + \alpha_{1} \frac{\langle \sigma v \rangle_{cx1}}{2V_{gas}} N_{gas} N_{SOL} + \alpha_{2} \frac{\langle \sigma v \rangle_{cx2}}{V_{gas}} N_{gas} N_{core}) (R_{e}^{\ re} f_{core} + R_{ef}^{\ ref} f_{core}) + f_{core} (\Phi_{ext} + \Phi_{int}) \quad (1)$$

$$\frac{dN_{SOL}}{dt} = -\frac{N_{SOL}}{\tau_{SOL}} + \frac{N_{core}}{\tau_{core}} - \alpha_{1} \frac{\langle \sigma v \rangle_{cx1}}{V_{gas}} N_{gas} N_{SOL} + \beta \frac{\langle \sigma v \rangle_{ion}}{V_{SOL}} N_{gas} N_{SOL} + (\frac{N_{SOL}}{\tau_{SOL}} + \alpha_{1} \frac{\langle \sigma v \rangle_{cx1}}{2V_{gas}} N_{gas} N_{SOL} + \alpha_{2} \frac{\langle \sigma v \rangle_{cx2}}{V_{gas}} N_{gas} N_{core}) \{R_{e}^{\ re} f_{SOL} + R_{ef} (1 - r^{ef} f_{core})\} + f_{SOL} (\Phi_{ext} + \Phi_{int}) \quad (2)$$

$$\frac{dN_{gas}}{dt} = -S_{pump} N_{gas} - \beta \frac{\langle \sigma v \rangle_{ion}}{V_{SOL}} N_{gas} N_{SOL} + (\frac{N_{SOL}}{\tau_{SOL}} + \alpha_{1} \frac{\langle \sigma v \rangle_{cx1}}{V_{gas}} N_{gas} N_{SOL} + (\frac{N_{SOL}}{\tau_{SOL}} + \alpha_{1} \frac{\langle \sigma v \rangle_{cx1}}{V_{gas}} N_{gas} N_{SOL} + (\frac{N_{SOL}}{\tau_{SOL}} + \alpha_{1} \frac{\langle \sigma v \rangle_{cx1}}{V_{gas}} N_{gas} N_{SOL} + (\frac{N_{SOL}}{\tau_{SOL}} + \alpha_{1} \frac{\langle \sigma v \rangle_{cx1}}{V_{gas}} N_{gas} N_{SOL} + (\frac{N_{SOL}}{\tau_{SOL}} + \alpha_{2} \frac{\langle \sigma v \rangle_{cx1}}{V_{gas}} N_{gas} N_{SOL} + (1 - r^{ef} f_{core}) - \gamma (Y_{sput} \frac{N_{SOL}}{\tau_{SOL}} + Y_{sput-1} \alpha_{1} \frac{\langle \sigma v \rangle_{cx1}}{2V_{gas}} N_{gas} N_{SOL} + (1 - r^{ef} f_{core}) - \gamma (Y_{sput} \frac{N_{SOL}}{\tau_{SOL}} + Y_{sput-1} \alpha_{1} \frac{\langle \sigma v \rangle_{cx1}}{2V_{gas}} N_{gas} N_{SOL} + (1 - r^{ef} f_{core}) - \gamma (Y_{sput} \frac{N_{SOL}}{\tau_{SOL}} + Y_{sput-1} \alpha_{1} \frac{\langle \sigma v \rangle_{cx1}}{2V_{gas}} N_{gas} N_{core}) + (1 - f_{core} - f_{SOL}) (\Phi_{ext} + \Phi_{int}) \quad (3)$$

$$\frac{dN_{wall}}{dt} = (\frac{N_{SOL}}{\tau_{SOL}} + \alpha_{1} \frac{\langle \sigma v \rangle_{cx1}}{2V_{gas}} N_{gas} N_{SOL} + \alpha_{2} \frac{\langle \sigma v \rangle_{cx2}}{V_{gas}} N_{gas} N_{core}) (1 - R_{e} - R_{ef}) + \gamma (Y_{sput} \frac{N_{SOL}}{\tau_{SOL}} + Y_{sput-1} \alpha_{1} \frac{\langle \sigma v \rangle_{cx1}}{2V_{gas}} N_{gas} N_{SOL} + Y_{sput-2} \alpha_{2} \frac{\langle \sigma v \rangle_{cx2}}{2V_{gas}} N_{gas} N_{core}) - \Phi_{int} \quad (4)$$

ここで、**Ф**<sub>int</sub>が壁からの脱ガスによる第2フュエリング項である。

### 参考文献:

[1] Y. Hirooka, M. Sakamoto, TRIAM-group, J. Nucl. Mater. 313-316(2003)588-594.

# オーステナイト系ステンレス鋼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

原子炉の炉内構造材料としては,耐食性に優れたオーステナイト系ステンレス鋼が主に用いられてい が,近年,経年原子力プラントの炉内構造材料において応力腐食割れ(SCC)の発生が確認されている. その為,中性子照射環境下における照射誘起応力腐食割れに関し,その原因および対策を明らかにする 研究が精力的に実施されている.一方,補修溶接適用時には,核変換で材料中に生じたヘリウムが粒界 に蓄積して粒界割れの主要因となる事が指摘されているが,ヘリウムの高温挙動に関する実証的知見は 依然として少ない.さらに,オーステナイト系ステンレス鋼でもSUS304 鋼ではSUS316L 鋼より,溶 接割れが起こりにくいといった事例もあり,ヘリウムの挙動に関する添加元素の効果を明確化し,溶接 割れに至るメカニズムを理解することは,適正な溶接補修技術の確立のために極めて重要である.

本研究では、2種類のオーステナイト系ステンレス鋼(SUS304, SUS316L)を比較しながら、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、材料中のヘリウムの捕捉機構やヘリウムと材料欠陥との相互作用を調べる目的で、ヘリウム照射材からのヘリウム昇温脱離実験をあわせて行った。

#### 2. 実験方法

SUS316LおよびSUS304 を厚さ 0.1 mmまで機械研磨した後,3 mmφ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,主に 試料温度 200 で 1×10<sup>18~19</sup> He/m<sup>2</sup>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.また高温下におけるヘリウムバブルの軌跡を詳細に解 析し,各試料中におけるヘリウムバブルの拡散過程を定量的に評価した.さらに,10×10 mm<sup>2</sup>のバルク 試料を用いて約 1×10<sup>19</sup> He/m<sup>2</sup>照射後のヘリウム昇温脱離実験を行った.

#### 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



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).

としてバブルが観察され,一部の粒界に亀裂が発生した.図1には,(a)SUS304 および(b)SUS316Lに 200 で 1×10<sup>18</sup> He/m<sup>2</sup>へリウム照射後,800 まで昇温した際の粒界付近の微細組織を示す.

ヘリウムの粒界偏析挙動の相異は,各試料における,ヘリウムバブルの易動度の違いに起因するもの だと考えられた.図2には,各試料における粒内のヘリウムバブル(サイズ~3.5nm,試料温度~800) の軌跡を示した.図に見られるように SUS316L 中のヘリウムバブルの拡散は, SUS304 と比較して極 めて小さく,いずれの温度域においても拡散係数で3倍程度の違いがあることが明らかになった.さら に,材料中のヘリウムの挙動の相異は昇温脱離実験においても観察された(図3).こうした高温下での ヘリウムの挙動の違いには, SUS316Lのみに添加されている Moの寄与が考えられ, バブル表面に偏 析することで,その移動を抑制している可能性が示唆された.

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.



図2 ヘリウムバブルの軌跡



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
研究協力者:	宮本 光貴	島根大学総合理工学部	助手
	下房 大悟	島根大学総合理工学部	M2
所内世話人:	吉田 直亮	九州大学応用力学研究所	教授
	菅野隆一郎	九州大学応用力学研究所	非常勤研究員
	時谷 政行	九州大学総合理工学府	D2

# 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大野哲靖

## 1. はじめに

磁場閉じ込め核融合装置のスクレイプ・オフ層(SOL)において、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の理解が重要な研究課題である。Blobによる非拡散的輸送は、 核融合装置における最外殻磁気面と第一壁間のプラズマ密度分布、第一壁での水素リサイクリングや第 一壁からの不純物発生に大きな影響を与える.

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、マルチフラクタル性)、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. 解析結果

静電プローブを固定してイオン飽和電流の時間変化を計測すると、Plasma Blob が静電プローブを 通過するときに、イオン飽和電流に正のスパイク状波形が現れる.図1に解析に用いたイオン飽和電流 X(t)の時間発展を示す。図2は、揺動のパワースペクトル $S(f) = |X(f)|^2$ を示している。特徴的なピー クは観測されない.系がコルゴモロフ仮説に従うとすると、 $S(f) \sim f^{\gamma}, \gamma = -1$ となる。しかし図2より、 高周波領域では  $\gamma = -1.4$ となり、コルゴモロフ仮説とは大きく異なっている。

図1のような特徴的な周波数ピークがない間欠的な揺動に対しては、確率密度関数(PDF)を用いた統計解析が有力な手段となる. PDF とは、ある振幅の信号が現れる頻度の分布を表したものである。PDF の 1 次および 2 次のモーメントはそれぞれ平均、分散を表す。さらに 3 次および 4 次のモーメントを S kewness, Flatness という. Skewness は PDF の左右非対称性を表す量であり、Flatness は PDF の分布の





広がりを表す量となっている.現象が完全に乱雑 であり,PDF がガウス分布となる場合には, Skewness は 0,Flatness は 3の値を取る.観測さ れた信号に正のスパイク状の信号が観測される 場合,その PDF は左右非対称になり,Skweness は 正の値をとる.したがって,これらの値を調べる ことで,ある揺動が乱雑運動に近いかどうかを判 定することが可能となる。図 3 から Skewness の 値は 0.23 であり,正の値となっており、正のバ ースト的な信号が顕著であることを示している。

一般に波形データから位相空間上の軌道を再構 成し、そのアトラクターの構造の次元解析を行う ことにより、アトラクターのフラクタル特性を 得ることができる。相関次元の場合、位相空間 上の点の二次の相関を用いるが、これを拡張し てq次の相関を用いることにより一般化次元Dq を定義することでできる。アトラクターのフラ クタル性が、単一次元だけで記述できない場合、 そのアトラクターはマルチフラクタル性を持つ といい、一般化次元解析に代表される解析手法 をマルチフラクタル解析という。

周辺プラズマ中の揺動は、間欠的な揺動(構造)に起因する大きなスケールの時-空間構造が 混在しているので、マルチフラクタル解析が有 用であると考えられる。

ここでは揺動の時系列データX(t)に対して 時間スケール*l*を導入し,  $\delta_l X(t) = X(t+l) - X(t)$ の確率密度分布を用い て解析を行う。時間スケール*l*は系の相関時間の 指標となる。もし系が完全にポアソン過程に従 うならば, $\delta_l X(t)$ の確率密度分布はパラメータ *l*に依存しない。

図 4 (a)は、種々の時間スケールlに対する確 率密度関数  $P_l(\delta_l X)$ の変化を表している。また、 図 4 (b)は、 確率密度関数  $P_l(\delta_l X)$ の歪度 (skewness)、尖度(flatness-3)の時間スケール



図4 (a) 時間遅れ確率密度関数, (b)skewnss と flatness の時間遅れ依存性.

l依存性を示している。図4(b)より,時間スケールが40 $\mu$  sec以上では, $\delta_l X(t)$ の確率密度関数は殆ど 変化しないということが分かる。この時間スケールは,一種の粗視化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。しかし,マルチフラクタル解析では,全体をまとめて 解析することが可能である。

系が単一フラクタル性を有する場合は、指数 Hを用いて確率密度関数  $P_{I}(\delta X)$ は、

ー方,系がマルチフラクタル性を有する場合は,q次のモーメントのべき数はqに対して線形ではなく, $\varsigma(q) = qH - \lambda^2 q^2$ と非線形な依存性を持つ。 $\lambda^2$ が0の場合単一フラクタル性と一致するため, $\lambda^2$ はマルチフラクタル性の指標と考えることができる。図1のデータに上記の解析を適用した結果, $\lambda^2 = 0.008$ という小さな値となり,単一フラクタル性を有していることが分かった.

研究代表者 核融合科学研究所 伊藤公孝

プラズマに関する物理学が統計力学や流体力学などの成果をも踏まえつつ現代物理学の 中で牽引力を発揮することが明瞭になっている。九州大学では応用力学研究所や総合理工 学研究院を中心にしてプラズマ物理、統計力学や流体力学などを包括的に考える視野の研 究が進んでおり、こうした展開を踏まえ、プラズマ乱流の理論をはじめ当該領域の研究を 一段と進展させる事を目的として共同研究を遂行した。

# 研究体系の概観

本共同研究に於ける乱流構造形成研究の方法論を概観する。プラズマのダイナミックス を表現する基礎方程式として簡約化方程式を例にとって

$$\frac{\partial}{\partial t} f + \mathcal{L}^{(0)} f = \mathcal{N}(f)$$

- (1) 非線型効果を、着目するモード(運動)にたいしてコヒーレントな効果と 乱雑なノイズとして扱う効果とに区分する。
- $\mathcal{N}(f) = -\Lambda f + \tilde{S}$ (2)
  (2) コヒーレントな効果に着目し、方程式
  (2)

 $\left(\mathcal{L}^{(0)}+\Lambda\right) f=0$ 

(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、この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として、 統計力学における「森の方法」をプラズマ乱流に適用し、従来代表者達によって提案され ていた dressed test mode method[1]の基盤を吟味し、その近似制度を高めることに成功 したこと[2];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、その典型的な例である zonal flow の総合 報告を完成したこと[3];乱流ノイズによる巨視的なモードの直接励起を直接シミュレー ションで実証したこと[4];などがあげられる。ここでは統計物理学の基盤等を紹介する。

## 統計物理学の基礎づけ

統計力学における「森の方法」をプラズマ乱流に適用し、dressed test mode method の基盤を吟味した成果を説明する。

dressed test mode method の方針に沿って、着目する成分(k)の効果を括りだし  $\mathcal{N}_{k_1} = \hat{\mathcal{N}}_{k_1} + M_{k_1,k,q} f_k f_q$ と表記する。ここで $\hat{\mathcal{N}}_{k_1}$ に対し森の射影演算子を適用し

$$\widehat{\mathcal{N}}_{k_1} = i \widehat{\Omega}_{k_1} f_{k_1} + \widehat{\mathcal{R}}_{k_1}(t) - \int_0^t \mathrm{d}s \, \widehat{\Gamma}_{k_1}(s) f_{k_1}(t-s) \tag{4}$$

のように記憶関数、揺動力、および非線型周波数シフトに分離することが可能である。こ の手順を順次繰り返し、(k)成分の式は確率方程式

$$\partial f_{k}/\partial t + \mathcal{L}_{k}^{(0)} f_{k} = \int_{0}^{t} dt' \left\{ \sum' 2M_{k, k_{1}, k_{2}}M_{k_{2}, k, -k_{1}} \hat{g}_{k_{2}}(t, t') C_{k_{1}}(t-t') \right\} f_{k}(t') + \hat{\mathcal{R}}$$
(5)

で与えられる。ここで $\hat{g}_{k_2}$ はグリーン関数、 $\hat{R}$ は揺動力である。(詳細は[2]を参照。)記憶 関数は揺動の相関 $C_k(t-t') = \langle f_k(t) f_{-k}(t') \rangle$ で与えられる。ラプラス変換し連分数表示

$$\bar{\Gamma}_{k}(p) = \sum' \frac{V_{k,1,2}}{p_{2} + \sum' \frac{V_{2,3,4}}{p_{4} + \left(\sum' \frac{V_{4,5,6}}{p_{6} + \cdots}\right)}$$
(6)

が得られた。ここで  $p_n = p + \mathcal{L}_{k_n}^{(0)} \geq V_{k,k_1,k_2} = -2 M_{k,k_1,k_2} M_{k_2,k,-k_1} C_{k_1} (s=0)$  と略記して いる。揺動力の表式では、従来の dressed test mode method の近似の程度を示した。この成 果は、代表者らが提唱していた dressed test mode method について森の射影演算子による基 礎を与えたものである。

### 帯状流を繰り込んだ乱流輸送

帯状流の渦度 $U = \partial V_Z / \partial r$ およびドリフト波のアクションの分布関数 $N_k$ の方程式を解くことにより、有限振幅の帯状流が存在するときに、乱流による帯状流の駆動力を求める事が出来る。その結果帯状流の非線型発展方程式を得た:

$$\frac{\partial}{\partial t}U = \frac{q_r^2 D_r}{1 + \frac{Hk_\theta^2 \rho_s^2 U^2}{\Delta \omega_k^2 + \Gamma^2}} U - \left(\mu_{||} (1 + 2q^2) q_r^2 + \nu_{damp}\right) U$$
(7)

ここで $D_r$ は(準線形理論に基づいた)乱流による帯状流の励起係数、 $\Delta \omega_k$ はドリフト波の非相関率、 $q_r$ は帯状流の径方向波数、Hは数係数、 $\Gamma$ は帯状流のポテンシアル内でのドリフト波パケットの捕捉運動周波数であり、その他の項の詳細は[5]に説明されている。右辺第一項は乱流による帯状流の駆動を示し、右辺第二項は乱流や衝突による帯状流の減衰効果を示している。第一項の分母に、 $U^2$ に比例する項が含まれているこの理論式は、帯状流の振幅を繰り込んだ理論によって初めて得られたものである。右辺第一項と第二項の釣り合いから、帯状流の飽和振幅・乱流揺動や乱流輸送の強度も直ちに得られる。

# おわりに

提案した本計画は大きな成果が上がり、各位の援助に感謝すると共に、今後の共同研究 成果がさらに期待される。

[1] K. Itoh, S.-I. Itoh and A. Fukuyama: *Transport and structural formation in plasmas* (IOP, 1999) A. Yoshizawa, S.-I. Itoh, K. Itoh: *Plasma and Fluid Turbulence* (IOP, England, 2002)

[2] S.-I. Itoh, K. Itoh, H. Mori: J. Phys. Soc. Jpn. 75 No.3 (2006) in press

[3] P. H. Diamond, S.-I. Itoh, K. Itoh and T.S. Hahm: Plasma Phys. Control. Fusion, 47 (2005) R35

[4] M. Yagi, S. Yoshida, S.-I. Itoh, H. Naitou, H. Nagahara, J.-N. Leboeuf, K. Itoh, T. Matsumoto, S. Tokuda, M. Azumi: Nucl. Fusion **45** No.7 (2005) 900

[5] Itoh, K., K. Hallatschek, S.-I. Itoh, P.H. Diamond and S. Toda: Phys. Plasmas 12 (2005) 062303

広島大学大学院工学研究科 西野信博

1.目的 定常トカマクにおけるダイバータや周辺プラズマの計測として、プローブやHa計測などが活用 されているが、高速カメラを利用して2次元的に光情報を利用した例は多くはない。例えば、ダストなどは 従来の分光計測では情報がまったく得られない。ダストの存在は核融合分野でも近年その重要性が認識され つつあり、いくつかの装置で計測され始めた。本研究ではTRIAM-1Mで定常トカマク放電のダイバータ・周辺 プラズマ計測としての高速カメラをダスト計測に適用し、放電中のダスト挙動からプラズマ - 壁相互作用に 関する知見を得ることを目的とする。

2.実験方法と結果

TRIAM-1Mにおける長時間放電を利用して、壁の温度やプラズマフラックスの積分値とダスト量の関係な どの情報を得るために、高速カメラを設置した。In-situ に近い状態で詳細なプラズマ - 壁相互作用の情報 が得たいために、大気側からプラズマ中心部へ1m以上伸ばした管状の真空窓を二つ製作した。二つにした 理由は、ステレオイメージによる3次元情報の再構築を試みるためである。Fig.1にその2本のイメージフ ァイバー用の特殊ポート(九大側で製作)を示す。この管にプラズマとの接触が多いリミター部を測定する ために、視野角の広い魚眼レンズを組み込んだイメージファイバーを窓の大気側から入れた。また、ファイ バー出口側もレンズの組み合わせ+光学フィルターのテレセントリック光学系として、光学フィルターによ る各種線スペクトルの分離を図る試ろうとした。Fig.2には受光学系の概略を示す。そして、プラズマ物理 側だけでなく、炉材料、炉工分野の研究者にも興味あるデータが得られることを期待していた。また、一見 定常に見える放電でもリミター上でのリサイクリングの場所の時間依存性などがもし見つかれば、プラズマ

今回、実験の最初にファイバー取り付け等に時間がかかったので、一本取り付け後に、測定系の光量 等の調整を行うことにした。しかし、リミターに近い位置で低密度放電を行った結果、ファイバーが放 射線による損傷と思われる黒化現象(色中心の発生によるものであろう)がおこり、残念ながら当初予 定していた2本のファイバーのうち、最初に予備実験で使用していたファイバー1本が、使用不能にな った。メーカー側に損傷の度合いの調査を依頼中であるが、2月28日時点で未だに判明していない。 従って、当初予定であった立体的なダスト撮影とダストの3次元運動を再現することが出来なかった。 本年度でTriam-1Mはシャットダウンするため、今後本計測技術を次年度以降に運転する CPD とその 次世代機(QUEST)での使用を考えている。

Fig.3 はそのイメージファイバーのひとつからの撮影結果を示す。ダストがリミターから発生し、その後、飛び出している様子がわかる。従来の研究成果から、ダストの発生は、放電時間が数十秒以上の 長時間放電になると現われ、放電時間が長いほど多くなることがわかっている。また、プラズマ中での ダストのスピードは数 数百 m/s の広い範囲に存在することがわかっており、途中で、加速、減速など があることもわかっている。



Fig.1(a)



Fig.1(c)



# 3.成果発表

第 22 回プラズマ核融合学会 30aA29p:佐々木、他 17thPSI(中国): K.Sasaki, et.al.発表予定





小型 PWI 装置における電子バーンシュタイン波による加熱 / 電流駆動の検討

核融合科学研究所大型ヘリカル研究部高周波加熱プラズマ研究系 伊神弘恵

本研究の目的

球状トカマク(ST)では一般に、プラズマ中心部において電子プラズマ周波数が電子サイク ロトロン共鳴周波数を越える、いわゆるオーバーデンスな状態となるため、電磁波モード では電子サイクロトロン共鳴(ECR)層に接近することができない。オーバーデンスプラズ マにおいて電子サイクロトロン共鳴加熱 / 電流駆動(ECH/ECCD)を行なうには、マイクロ 波を直接 ECR 層に向けて入射するのではなく、パワーを高域混成共鳴(UHR)層に送り込ん で、伝播密度限界のない B 波を励起し、これを ECR 層まで伝播させてサイクロトロン共 鳴吸収させるという方法をとることになる。このため、UHR 層で効率良く電子バーンシュ タイン波(B 波)を励起するようなマイクロ波の入射条件(入射アンテナ設定条件)の検討が必 要である。本研究では小型 PWI 装置において、B 波を用いた ECH/ECCD による ST プラ ズマの非誘導型電流立ち上げと維持を行なうための、最適なマイクロ波入射条件の検討を 行なうことを目的とする。

200

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加熱 を想定する。電磁波と B 波間のモード変換効率を求める数値計算コードを用いて、小型 PWI 装置における ST 配位プラズマにおいて高変換効率が得られるマイクロ波の入射条件(入射 角度、偏波)を調べる。

## 検討の結果

以下に一例を示す。赤道面上でのマイクロ波入射について検討を行なった。大半径 R<sub>0</sub>=0.64m,小半径 a=0.36m,R=R<sub>0</sub>でのトロイダル磁場強度 B<sub>0</sub>=0.3Tとした。ここではポ ロイダル磁場は無視できるほど小さいとした。電子密度n<sub>e</sub>はR=R<sub>0</sub>において、8.2GHzの電 磁波モードの遮断密度の5倍である、4.17 x 10<sup>18</sup>/m<sup>3</sup>であるとし、R= R<sub>0</sub>からの距離をrとす ると、n<sub>e</sub>=(1-(r/a)<sup>2</sup>)<sup>1/2</sup>であるとした。図1に計算に用いた座標系とアンテナの設定角度の定 義を示す。ここではプラズマはx軸方向(大半径方向)にのみ非一様なスラブプラズマである とみなし、トロイダル方向をz軸方向、赤道面の垂直方向をy方向とした。波動の伝播面とz 軸が成す角度をoとした。また、入射波の波数ペクトルのプラズマ表面からの傾き角度を0 とした。図2に縦軸o、横軸を0として、最適偏波を入射した場合のモード変換効率を等高 線プロットしたものを示す。

201



# 図1:プラズマモデルと座標系、入射角度



図 2:入射角度に対する、最適モ ード変換効率の等高線プロット 図2より、今回検討したパラメータのプラズマに対しては、赤道面に設置されたアンテナ を下方に傾けて、トロイダル方向に斜め入射した場合に高変換効率が得られることがわか る。この場合の最適偏波は正常波と異常波の混合波の楕円偏波となる。

## 考察

従来より、密度勾配が急峻な場合には磁場に対して垂直方向に異常波モードを入射する方 法が、密度勾配が緩やかな場合には磁場に対して適切な角度で正常波モードを入射する方 法が、B 波への高変換効率を得るための方法として広く知られている。これらの方法を用 いることを前提として、様々な高密度プラズマ生成装置において B 波による ECH/ECCD のためのマイクロ波入射条件の検討が勧められている。小型 PWI 装置で生成されるプラズ マの密度勾配は、これらいずれの方法でも高変換効率が得られない中間領域の密度勾配と なるが、図2に示したように、適切な入射角度を選択し、正常波と異常波の混合波となる 最適偏波を入射すれば1に近い高変換効率が得られることがわかった。

# 成果報告

"A survey of mode-conversion transparency windows between external electromagnetic waves and electron Bernstein waves for various plasma slab boundaries" Igami H, Tanaka H and Maekawa T, *Plasma Phys. Control. Fusion*, to be published

# 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

核融合プラントの実現のためには、高温プラズマの定常化研究は重要なテーマの一つで ある。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、当該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(NBI)が有効と考えられている。 ST装置へのNBI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。以上に基づき、応用力学研究所のSTプラズマの高ベータ化、高閉 じ込め化、定常化、非誘導電流駆動、計測高度化等を図るために、当該ST装置に対してど のようなNBI装置が設置可能であるかを装置技術的に検討することを目的とする。

# 実験方法

現在、応用力学研究所において検討中である ST 装置において NBI のために使用可能なポ ートの径は、現時点の設計では赤道面ポートで内径 of 150 mm 程度であり比較的小さい。本 ポート径に対して全ビームを入射することが可能な NBI を実現するための装置技術につい て調べるために、産総研が開発したビーム高集束型 NBI 装置のビーム焦点でのビーム径を 詳細に調べる。

## ・実験結果

産総研で開発した NBI 装置を図1に示す。カスプ磁場を有したバケット型のイオン源に おいて、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



図1. 高集束型 NBI 装置及び計測チャンバー
の集束性を良くするために加速・減速・接地用の3枚の凹型電極を採用した点が特徴である。図2に示すとおり、基本ビームスペックは、25 kV、50 A、30 ms であり、フィラメント電源以外は、コンデンサー放電形式を取っている。ピーク値では、90 A の引き出しにも成功しており、そのときの水素イオンビームパワーは約2.1 WW に相当する。

図1に示す計測チャンバーに、挿入型熱電対プローブ及びステンレスのターゲット板(溶 融痕からビーム形状を判断する)等を設置し、ビームプロファイル計測から集束特性を詳 細に調べた。その結果、焦点部でのビーム径は約φ36mm、ビーム発散角度は約±0.8度、焦 点距離は約1400mmと見積もられた。焦点部近傍において、銅ターゲット板にビームを照 射した場合の様相を図3に示す。以上の結果から、凹型電極を用いることにより集束性に 優れた高パワーのビームを引き出すことが可能であることが確かめられた。

#### • 考察

現在検討されている ST 装置のポート径を通して、25 keV 程度の高パワーNBI を入射する 場合、凹型の電極などで強制的にビームを集束させることでより容易となることが見出さ れた。仮に産総研の NBI を当該 ST 装置に適用した場合、ビーム径は焦点近傍で約ф 36 mm であるため、引き出された全ビームがプラズマ中に入射されることがわかった。ただし、 ビーム径がф 150 mm 以下の領域は長さ 900 mm 程度に限られるため、ポート長が 900 mm 以 上の場合、ビームがプラズマ中に入射される効率が落ちることに注意しなければならない。

# ・成果報告

榊田創他、「産業技術総合研究所における中性粒子ビーム装置の開発状況」、平成17年 度逆磁場ピンチ研究会、つくば、2006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、木山學、平野洋一、小口治久、

八木康之

九州大学·応用力学研究所:佐藤浩之助、坂本瑞樹





図3. 焦点近傍でのビーム痕跡

佐賀大学理工学部 藤田寛治

1.はじめに

核融合において、固体水素のペレット入射法は多くのトーラス実験において、炉心プラズマの 密度分布制御や高密度化、閉じ込め改善、或いは計測の目的など、種々の視点から活発に研究が 進められている[1]。しかしながら、固体水素ペレットとプラズマとの相互作用など、固体水素溶 発に関する基礎過程については、未だ解明されていない部分が数多く残されている。また、溶発 した固体水素の荷電交換平衡現象により周辺プラズマの分布が影響される可能性が指摘されて おり、プラズマ基礎的研究として興味深い分野であると言える。その際、プラズマ中で荷電粒子 との固体水素との相互作用が重要な役割を果たすことが予想される。

本研究では、周辺(及び中間領域)プラズマを模擬するために誘導結合型プラズマ(Inductively Coupled Plasma; ICP)をターゲットして、その基礎特性を明らかにすることを目的としている。 今回は、ICPの空間構造について報告する。

# 2. 実験方法

図1に示す様に、ICP 装置は、直径 50cm、長さ 100cm のステンレス製真空容器の中央に、直 径 20 cm リングアンテナを設置した構造である。基礎特性を検討するために、アルゴンガスを 5mTorr 導入した。アンテナに、50~500W の範囲の高周波(RF:13.56MHz)電力を注入しプ ラズマを生成した。プラズマパラメータの計測には、直径 0.1mm、長さ 2mm の円筒プローブを 用いた。材質はタングステンを用いた。高周波電源を用いているので、プラズマ電位の振動が考 えられる。プローブ計測へのプラズマ電位変動の影響を最小限するために、自己補償型LCフィ ルターを用いた。図中のr-z方向に移動させて、アンテナ近傍の空間構造を行った。

3.実験結果及び考察

図2に、アンテナ中心(r=0,z=0cm)におけるプラズマ密度の高周波電力依存性を示す。ここで、プラズマ密度はプローブ特性の電子飽和電流より算定した。高周波電力が5から80Wまでに、 プラズマ密度が7x10<sup>9</sup>から2x10<sup>10</sup>cm<sup>-3</sup>まで急激に増加している。その後、緩やかに増加し、700W で1x10<sup>11</sup>cm<sup>-3</sup>に達している。高周波電力80W以上で、誘導結合型放電モードに達していると考え られる。次に、高周波電力200Wにおいて、アンテナ近傍の電子温度・電子密度の空間分布を計 測した。

図 3 (a)、(b)に、それぞれ、電子温度と電子密度の 2 次元空間分布を示す。ここで、r=10cmの丸 印がアンテナの位置を示す。測定は、0<r<20cm、0<z<20cmの範囲で計測した。電子密度は、r=0cm、 z=0cmで約 4x10<sup>10</sup>cm<sup>-3</sup>程度であり、半径方向に進むに従って、緩やかに減少し、r=20cm、z=0cm では 3x10<sup>10</sup>cm<sup>-3</sup>になっている。更に、アンテナ中心から最も遠いr=20cm、z=0cmでは約 1.3x10<sup>10</sup>cm<sup>-3</sup>になっている。また、r=12cmの位置で、電子密度が減少している。これは、アンテ ナ周囲のシースによるものである。0<r<20cm、0<z<20cmの範囲で、おおよそ 10<sup>10</sup>cm<sup>-3</sup>桁程度で あることが分かる。

一方、電子温度は、0<r<20cm、0<z<20cm の範囲で、空間的に一様であり、その値はほぼ 3eV であることが分かった。r=7.5cm 付近で、電子温度が 4eV 程度になっているのは、アンテナのシースによって加速された高エネルギー電子に起因するものと考えられる。以上より、Ar 圧力 5mTorr、高周波電力 2 0 0 Wの条件では、アンテナ近傍(r=20cm、z=20cm の範囲)で、電子 密度、電子温度とも空間的にほぼ一様なプラズマを生成できることがわかった。このことにより、 ペレット入射実験の模擬装置として有効であると考えられる。

10<sup>1</sup>

10<sup>10</sup>

10<sup>6</sup>

10° [\_\_\_\_\_0

electron density n<sub>e</sub>(cm<sup>-3</sup>)

参考文献

[1]K.N.Sato and H.Sakakita, ICOPS2003, 5B10 (2003)

研究組織

代表者:藤田寛治(佐賀大)

研究協力者:大津康徳、三沢達也、宮川寿雄(佐賀大) 有本英樹(名大) 所内世話人:佐藤浩之助







100 200 300 400 500 600 700

RF power(W)

Ar 5mTorr



図 3(a) 電子温度の空間分布



図 3(b) 電子密度の空間分布

# 固体水素ペレットのドリフトチューブ中での挙動解析

- 相変化カップリングのための動的適合型解析の開発 -

九州大学総合理工学研究院 横峯健彦

1.目的

近年、核融合炉を目指した高温プラズマ閉じ込め実験において、ペレットの入射研究が盛んに行われてい る。本研究で想定している入射方法は、管内を高真空にしたドリフトチューブを用い、固体水素を入射する 方法である。その方法において、近年、プラズマへの入射位置・角度などにバラエティーを持たせることを 目的として、湾曲したドリフトチューブを経由して入射する必要性が指摘されてきている。この課題に関す る実験的研究は九大・応力研において準備中であるが、その特性の予測を理論解析的に行っておくことは、 大変重要である。

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から、ドリフト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%の質量減少が起こることが確認されている。原因としてチューブ内壁との摩擦、輻射、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水素ペレットが通過するときの速度は 100m/s~1000m/s が想定されており、この場合解析対象は、相変化(おもに昇華)あるいは衝撃により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ができる計算手法は確立されていない。

本研究では、これまでに、運動解析に MPM (Material Point Method)法、温度場解析に SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics)法を用いて、ペレットが壁に衝突 離脱する際に生ずる質量変化に着目した 2 次元解析を行い、 課題として相変化(昇華)後の気体の存在の考慮および 3 次元解析への拡張があげられた。前者に関しては、 昇華後の気体がペレットと壁面間に存在すると両者の衝突を緩和する役割を果たす可能性があるという報告 がある。本手法を用いても昇華後の気体をラグランジ的に追跡することが可能であるが、そのためには粒子 数を大幅に増加する必要があり、計算負荷が懸念される。この対策として、本手法でとった温度場を SPH 法 で解析する方法から、MPM の格子を用いて差分法を用いることを提案する。具体的には、固体ペレットの飛 行追跡、構造解析および物質移動現象に関しては MPM で解析し、これを格子で解析する連続体とを PIC 法 で結びつける。連続体解析としては高速相変化現象を取り扱える CIP 法が有力である。そのためには、運動 する粒子の内部・外部両界面近傍の格子の解像度を上げる必要がある。さらに、質量変化や破砕後のペレッ トの形状変化に対応して粒子界面形状も変化する。これらを満たし、さらに計算負荷低減も図る計算手法の 開発を行う。

### 2.計算手法

ウェーブレットを各タイムステップにおいて流れ場に存在する空間スケールの抽出・判定器として用いる ことにより、重要な成分のみを選択的に解像し、高精度かつ高効率な計算を可能とするウェープレット手法 を提案する。離散ウェーブレット正変換により対象とするある関数 f(x) は、次に示すように解像最低レベル でのスケーリング関数 と各解像レベルのウェーブレット関数 の線形結合として表される。

$$f(x) = \sum_{k \in \kappa^0} c_k^0 \phi_k^0(x) + \sum_{j=1}^{+\infty} \sum_{l \in \ell^j}^{+\infty} d_l^j \psi_l^j(x)$$

$$\tag{1}$$

ここで、 $c_k^0$ は解像最低レベルでのスケーリング係数、 $d_l^j$ はウェーブレット係数であり、 *j* は解像レベル、*l* は位置を表す指標である。動的なグリッド適合は、各タイムステップにおいて閾値*ε*により判別された高エネルギー成分のみに選択的に解像度を与えることにより実現される。すなわち、 $\left| d_l^j \right| > \varepsilon$  に含まれるものが、エネルギーの高い成分であり、解像度が必要となる。ウェーブレット係数は、物理空間上のグリッド点と 1 対 1 の関係を持ち、解像が必要ないと判断された $\left| d_l^j \right| < \varepsilon$  となるウェーブレット係数に対応するグリッド点は計算から除外する。

本手法を2次元円柱周り層流問題に適用し、その特徴である動的なグリッド適合性能の検証を行った。 ウェーブレットは、CDF(6,6)双直交ウェーブを用いた。計算は差分法ベースであり直交一様グリッド上で行った。全ての変数は円柱直径と一様入り口速度で無次元化する。計算領域は、[-2,6]×[-4,4]であり、円柱中心は(0,0)に配置する。本手法を用いる場合、時間進行とともにグリッド点分布が動的に変化するため、通常の非圧縮性流体計算のように圧力のポアソン方程式をカップリングすることは容易ではない。本研究では、以下の弱圧縮性Navier-Stokes方程式を適用してこれを回避した。

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{M^2} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j}$$
(2)  
$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial (p u_j)}{\partial x_i} = 0$$
(3)

出口境界条件は流出境界とする。レイノルズ数Reとマッハ数Mはそれぞれ300および0.1である。最大解像度 は*j<sub>max</sub>=*9 とした。これに対応する解像度を512×512である。閾値を1×10<sup>-4</sup>とし、タイムステップは3×10<sup>-4</sup>に 設定する。円柱周りの境界条件はスリップ無しとするが、この導入に関しては前述のMPM法とのカップリン グへの拡張を考えて*immersed-body*型手法を用いた。計算手順として、まず全計算点を流体として解き、その 後、円柱が存在する領域に関して円柱の速度(ここでは0)にフォーシングする。第1段階の解像度において は4次の中心差分で解き、ステンシルが得られない場合は、再帰的に解を再構築する。時間差分に関しては4 次の*Runge-Kutta*法を用いた。また、速度2方向と圧力の計算点はそれぞれの空間分布に従って独立に生成され る。

#### 3.結果及び考察

図1は十分発達した後の速度ベクトルであり、これは最大解像度まで再帰内挿することによって求められる。円柱後方にはよく知られたカルマン渦列が生成されていることが確認できる。図2は主流方向速度成分より選択された図1に対応する瞬時のグリッド分布である。円柱周りの境界層、また主流と後方カルマン渦間のせん断領域にグリッド点が集中している様子がわかる。すなわち、勾配が急峻となる領域へのグリッド点の動的適合に成功した。



#### 4.今後の課題

本研究では弱圧縮 Navier-Stokes 方程式とウェーブレット手法をカップリングさせ、その有効性を明 らかにした。今後は MPM 法の粒子の運動とウェーブレットをリンクさせる方法を開発する必要がある。 さらに、ペレットの形状変化を探知し、運動情報と同時に形状に関する解像度情報をウェーブレットへ 送る手法を開発する必要がある。

#### 5.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) 清水昭比古(九州大学総合理工学研究院) 江原真司 (九州大学総合理工学研究院) 山下雄一郎(九州大学総合理工学府) 宮川寿雄(佐賀大学理工学研究科)

# 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- 鉄イオン照射による試料温度変化の検討 -

(財)電力中央研究所 土肥謙次、野本明義、曽根田直樹 九州大学応用力学研究所 渡辺英雄、総理工 今村武史

#### 1.目的

高経年化した軽水炉の圧力容器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フォ ライト鋼のクラスタ形成に及ぼす固溶元素、特にシリコンの影響を微小硬さ変化及びミクロ組織変化に 基づき調査し脆化メカニズムを明らかにす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。本年度は目標とする鉄イオン 照射条件における試料温度の変化について検討した。

#### 2.実験方法

鉄鋼材(A533B及び純鉄)のTEM試料( 3mm、0.2mm<sup>t</sup>)を供試材として用いた。電解研摩法により試料表面を鏡面仕上げとした。試料を専用TEMホルダーに装着後、高エネルギーイオン発生装置に設置し高真空引きを行った。重イオン照射条件は、2.4MeVのFe<sup>2+</sup>イオンとし、ファラディカップ( 2mm)でイオンビーム電流を 0.5nAに調整後照射を実施した。本イオン照射条件ではTRIMコードによると 1.25x10<sup>-4</sup>dpa/sの損傷速度となる。試料温度は目視及び放射温度計を用いて行った。放射温度計はコニカミノルタ製IR-308(測定温度範囲 250~800 )及びクローズアップレンズを用い、検出有効径は約3mmであった。

#### 3.実験結果

各温度確認方法について結果を下記に示す。

1)目視による温度上昇確認

未照射時点でコントローラの熱電対指示値は 20 であった。イオンビーム電流 1nA として照射を開 始すると徐々に温度が上がり約 10 分後に定常値 30 に達した。それ以後温度変化はなかった。照射を 中止すると、再び温度は下がり約 10 分で 21 に戻った。30 時点での目視観察では試料表面は赤く光 るなどの変化はなかった。また試料温度を 288 に設定して同様の目視観察を実施したが変化は観察さ れなかった。一方、照射を行わず加熱のみで試料表面の赤熱が目視確認できるのは 550 以上であった。 図 1 に試料ホルダー先端部を、また図 2 は試料ホルダーを 600 に加熱した状態 (イオン照射はなし) を示す。このことから室温では照射より 10 以上の温度上昇があるが、288 照射でも試料表面が 600 程度まで高温加熱されている可能性は低いことが考えられる。

# 2) 放射温度計による試料表面温度測定

放射温度計の放射率を校正するため、イオン照射しない状態で試料を 300~700 に加熱し温調器指

示値と放射温度計指示値を比較した。

図1に示すように測定点A、B、Cの三点を対 象にイオン照射中の放射温度測定を行った。A 点 は試料、B 点は試料と真鍮部、C 点は真鍮部に相 当する。またビューポートがイオンビーム照射方 向に45°傾いた位置にあるため、試料面が放射 温度計と垂直な場合及び45°傾いた場合でそれ ぞれ測定した。表1に温度測定結果を示す。この ときの放射率は0.58とした。全温度において試 料ホルダーの熱電対による指示値と放射温度計 測定値は高々10程度で何れも放射温度計の方 が高いことから、放射温度計は正しく校正された。

室温及び288 イオン照射による試料表面温度 の上昇を調べるため、校正された放射温度計によ リイオンビーム有無時の試料温度(A点)を計測 した。その結果、室温では放射温度計指示値は測 定限界の250 以下であった。また288 でも温 度上昇は全く生じなかった。試料面を放射温度計 へ20°程傾けた場合も全く温度変化はなかった。



図 1. 試料ホルダー先端部.



図 2.600 に加熱したホルダーの様子.

4.まとめ

鉄鋼材の鉄イオン照射による試料温度の上昇を検討するため、試料表面温度を目視的手法及び放射温度計により計測を行った。その結果、室温では照射により試料温度は10 以上と僅かに加熱される。この傾向は288 照射でも同様で試料温度の上昇は高々10 程度の範囲と考えられる。

<b>設定温度</b> ( )	<b>温調</b> 指示値 ( )	試料面と放射温度計(*)が垂直			試料面と放射温度計 <sup>(*)</sup> が45。		
		A点()	B点( )	<b>C点</b> ( )	A点( )	<b>B点</b> ( )	<b>C点</b> ( )
300	300	301-302	292-293	249	304-305	280	299
400	400	407-409	397-398	328-329	413	393-397	315-318
500	499	507-508	498-502	398-400	516-517	488-490	362-364
600	598	608-609	580-582	470-473	608-613	572-575	438-440
700	698	709-711	701	501-511	713-720	690-695	497-506

表 1. 鉄イオン照射中の試料表面温度

()放射率0.58に設定

炭化系セラミックス材料中およびボロン薄膜中の水素同位体およびヘリウムの滞留・放出挙動に関する研究

静岡大学 理学部 奥野健二

【目的】

次世代のエネルギー源として、核融合炉の研究開発が行われている。現在最も有望視されている核融合反応 は、重水素およびトリチウムを燃料とした D-T 反応であるが、トリチウムは放射性核種であることから、安全 性の確立のため、核融合炉内での動的挙動の解明が重要な課題である。

現在、プラズマ対向壁材料としてグラファイト等の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が検討されている。その ため、これらの材料表面近傍におけるトリチウムの動的挙動解明が特に重要と考えられる。本年度はこのうち 壁コンディショニングを想定し、酸素を含有したボロン膜中に照射された高エネルギートリチウムの挙動に関 する様々な知見の取得を目的に研究を行った。

【実験】

・試料調製:静岡大学においてプラズマ化学気相蒸着(P-CVD)装置を用いて高純度ボロン膜および酸素含有 ボロン膜の調製を行った。組成分析結果から、高純度ボロン膜のボロン濃度は95%であり、酸素、炭素等の 不純物は5%であった。酸素含有ボロン膜については、ボロン濃度は60%、酸素濃度は36%、その他炭素と の不純物は4%であった。それぞれの試料について以下の実験を行った。

・照射および分析評価: 各ボロン膜に対して表面状態の違いを観察・測定するとともに重水素の捕捉状態を 解明するために以下のような一連の実験を行った。

- 1. X線光電子分光法(XPS)による各試料表面の化学状態分析
- 2. 走査型電子顕微鏡(SEM)および原子間力電子顕微鏡(AFM)による試料の表面観察
- 3. 酸素含有ボロン膜に関してエネルギー分散型 X 線分析(EDX)による元素分析
- 4. D<sub>3</sub>\*および He<sup>+</sup>照射した高純度ボロン膜において昇温脱離法(TDS)による脱離挙動および滞留量の測定

【結果および考察】

XPS の結果から、高純度ボロン膜試料では B-B 結合のみから形成されていることが明らかとなった。しか し、酸素含有ボロン膜試料では B-B だけでなく B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>に相当する結合、および他のボロン酸化物に相当する結 合から形成されていることが示唆された。高純度ボロン膜および酸素含有ボロン膜の SEM 像を図1に示す。 この図より、高純度ボロン膜試料では、ボロンがほぼ均一に蒸着されていることが分かる。しかしながら、酸 素含有ボロン膜においては図1(b)に示すように膜自体に亀裂が生じていることが明らかとなった。次に、図2 に各試料の AFM 像を示す。高純度ボロン膜試料においては、SEM 観察と同様に表面は平滑であったが、酸素 含有ボロン膜試料においては、SEM 像で観察された亀裂の部分が谷として現れていた。また、亀裂の無い部 分でも平滑ではなく、起伏に富む構造になっていることが明らかとなった。この酸素含有ボロン膜に関して EDX による元素マッピングを行った結果、亀裂部分では主にシリコン、他の領域では主にボロンと酸素から 成っていることが明らかとなった。これらの結果のように高純度ボロン膜と酸素含有ボロン膜の膜構造は大き く異なっていることから、膜構造の違いは酸素の有無に起因すると考えられる。白い亀裂に関しては、酸素が 混入することで、ボロン酸化物が形成され、膜の物性が変化したため、調製の際、膜に内部応力がかかり、膜



全体に亀裂が生じ、シリコン 基盤が露出したと考えられ る。

図 3 に D<sub>3</sub><sup>+</sup>および He<sup>+</sup>照射 を行った高純度ボロン膜か らのD<sub>2</sub>TDSスペクトルを示 す。この図から、高純度ボロ ン膜中の重水素滞留量は He<sup>+</sup>照射の影響を受け、He<sup>+</sup> 前照射により膜中の重水素 滞留量が増加し、He<sup>+</sup>後照射 により減少することが分か った。また、これまでの研究 結果から、550K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で ある事が報告されているが、 全重水素滞留量に対する **B-D-B** 結合として捕捉され ている重水素の割合は、He<sup>+</sup> 照射により減少した。この He<sup>+</sup>前照射による重水素滞 留量の増加は、He<sup>+</sup>照射によ る照射欠陥の増加により重

水素の捕捉サイトが増加したためと考えられる。また、He<sup>+</sup>後照射による重水素滞留量の減少は、He<sup>+</sup>照射により、捕捉されていた重水素がはじき出されたためと考えられる。このHe<sup>+</sup>照射による照射欠陥および重水素のはじき出しは、B-D-B 結合に起因する捕捉サイトが大きく影響を受けていると考えられる。He の滞留に関しては、TDS スペクトル解析の結果、前照射、後照射共にほとんど滞留していなかった。図4にHe<sup>+</sup>照射した高純度ボロン膜の SEM 像を示す。He<sup>+</sup>照射による影響は膜表面の色が変化しただけで、それ以外の変化は見られなかった。しかし、TDS の結果から He<sup>+</sup>照射は重水素滞留量に影響を及ぼしていることが分かっているため、He<sup>+</sup>照射による構造変化は SEM 像では見えない程度の大きさであると推察できる。

## 【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、その 重水素滞留量変化の測定および膜表面観察を行った。実験から、酸素を含有することでボロン膜の構造が変化 することおよび He<sup>+</sup>照射により高純度ボロン膜中の重水素滞留量が大きく変化することが明らかになった。今 後、酸素含有ボロン膜に D<sub>3</sub><sup>+</sup>および He<sup>+</sup>照射し、TDS 実験および表面観察を行うことで He<sup>+</sup>照射による重水素 滞留量および膜構造への影響について解明していく必要がある。

#### 水素溶解による金属およびセラミックスの結晶構造への影響

九州大学大学院総合理工学研究院・エネルギー理工学部門 田辺 哲朗

#### 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。将来の水素エネルギー社会では、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、水素雰囲気 X 線回折による結晶構造解析 を行うことを目的としているが、水素利用という性質上、より広範な水素濃度または温度における実験 を安全かつ確実に遂行できるように実験装置体系を構築する必要がある。そこで、本年度は、まず既存 のX線回折装置の試料室内を低真空またはヘリウムガス雰囲気にできるように改良し高温 X 線回折実 験を行った。

### 【Fe-Ni 合金の高温 X 線回折】

Fe-Ni合金は、ステンレスやインバー、パーマロイなど多 岐にわたり工業的に用いられており、本研究代表者らは添加 Ni濃度によるFe中の水素拡散への影響が調べてきた<sup>(1)</sup>。この中 で、原子半径・電子構造はほぼ同じであるがbcc構造であるFe とfcc構造であるNiが存在する合金中の水素挙動について検討 を行った。図1はFe-Ni合金(3.0~50%Ni)中の水素拡散係数の アレニウスプロットである。この試料組成範囲内では、Ni濃度 40%以上ではfcc構造を有するが、それ以下では 500 K(1000/T=1.2)付近でfcc構造からbcc構造への変態が起こる。図 1より、拡散係数は必ずしもNi濃度に応じた系統的な変化をし ているとは言えないが、bcc↔fcc相変態前後で拡散係数の温度 依存性が異なること、つまりNi濃度が低い場合はbcc構造に、 またNi濃度が高い場合にはfcc構造に由来する活性化エネルギ ーを持つことが報告されている。このことは、Fe-Ni合金系に おける水素拡散挙動はbcc↔fcc結晶構造(格子定数)変化に対 応している可能性を示唆するものである。そこで、本研究では



拡散係数測定を行った温度範囲で合金の結晶構造(格子定数)変化を調べ、水素拡散係数変化との相関 を調べることを目的とした。

・ 実験

試料は報告<sup>(1)</sup>にあるのと同じFe-Ni合金(鍛造材, Ni: 3-50%, Fe: balance)を用いた。高温X線回折には リガク・ガイガーフレックス 2013 改良型(60kV, 50mA)を用い、ヘリウムガス雰囲気にて、288K~873K の温度範囲で測定を行った。格子定数の計算は実験により得られた回折結果の各ピーク角度から格子定 数を計算し、外挿法を用いて精密化した。 ・ 結果

図 2 は、Fe-3~50%Ni 合金中水素拡散係数の格子定数依 存性を示している。Fe-20%Ni 試料を除いては、プロット が交差することもなく水素拡散係数と格子定数との間に 良い相関が見られた。しかしながら、Ni 濃度の影響に関 しては未だ不明な点が多く、例えば Fe-6%Ni 合金では格子 定数およびその温度変化が最も小さいが、拡散係数の変化 が大きいことが分かった。これは、前指数因子が格子定数 の 2 乗に比例することから考えると逆のようではあるが、 水素が入ることによっても格子定数が変化することが予 想されるので、今回の研究だけで拡散係数について格子定 数から議論することはできない。本研究結果を踏まえて、 今後は水素雰囲気を換えて同様の実験を行い、水素の影響 を調べる必要がある。

1 ) Hydrogen Permeation and Diffusion through Pure Fe, Pure Ni and Fe-Ni Alloys, Trans. Jpn. Inst. Metals, vol. 24, No. 1 (1983), pp. 49-58



図 2 Fe-Ni 合金中水素拡散係数の格子定数依存性 (a) bcc 構造, (b) fcc 構造

九州大学大学院総合理工学研究院・エネルギー理工学部門 田辺 哲朗

・ 目的

金属およびセラミックス中の水素挙動は古くて新しい問題である。例えば、鉄鋼材料の遅れ割れは極 微量の水素の集積により引き起こされるが、40年以上研究されてきた現在でも未だに機構解明には至っ ていない。また将来の核融合・原子力材料および水素エネルギー材料においては、極限環境下で水 素と材料との積極的な相互作用が考えられるため、材料の物理的・化学的変化が顕在化する可能 性がある。特に、材料中の水素の熱力学ポテンシャルに著しい影響を与える水素濃度および温度 における水素拡散・集積挙動を明確化する必要がある。本研究では、従来から用いられてきた金 属中の水素分布可視化技術であるトリチウムオートラジオグラフィ(TARG)に加えて、最近生 物および電子顕微鏡利用分野で発展が目覚しく、簡便かつ迅速に水素分布を定量的に可視化でき るイメージングプレート(IP)法を金属(Zr, V, Fe, Ni, etc.)・セラミックス(BaIn<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, etc.)に適用 し、低濃度から高濃度、低温から高温における水素拡散・集積機構を解明することを目的として いる。

#### ・ 実験

IPによるイメージングは、ユーロピウム添加バリウムフロロハライド(BaFX:Eu<sup>2+</sup>, X=Cl, Br, I)系輝尽発光物質を塗布したプラスチック製フィルムを試料表面に密着させるだけで水素(ト リチウム)分布を得ることができる。この手法では、トリチウムベータ線入射電子により励起状 態となった輝尽発光物質を専用の読取装置内でレーザー照射し、これが基底状態に戻るときに発 せられる輝尽発光量(PSL)を測定することにより、水素(トリチウム)分布を定量的にイメー ジングすることが可能である。現段階では、輝尽発光物質層厚さ、輝尽発光の広がりなどにより 空間分解能は 50 μmである。

以下に述べる放射性水素同位体トリチウムの利用は、箱崎地区エネルギー科学科 RI 実験室に て行われたものである。金属・セラミックスへのトリチウム含有水素導入は、金属・セラミック スの溶解エンタルピー、溶解濃度および温度を考慮して、ガス吸収法、水溶液中陰極電解法およ びグロー放電法のいずれかの方法により行った。

【Zr 中の水素拡散挙動の可視化】

Zr試料として4mm×25mm×1mmの再結晶化圧延平板を用いた。試料長手方向の端面(4mm×1mm)にのみグロー放電法により水素(トリチウム)を導入した。グロー放電は、予め10<sup>-6</sup>Pa に真空引きした放電管内にトリチウム含有水素ガス(T/H=10<sup>-6</sup>)を20Pa導入し、電極間の電圧3 kVで20分間行った。水素(トリチウム)導入後、真空中で573~773 Kの所定の温度で加熱する ことにより、端面にのみ存在していた水素(トリチウム)をZr中に拡散させた。拡散実験終了後、 試料をIPに密着させて、室温にて24時間露出を行った。得られたIP像の一例を図1(a)に示す。カ ラーは青から赤に近づくほどPSL強度が高くなることを意味しており、本来ならば放射線強度に 基づいたPSL強度を示すものであるが、今回はPSL強度分布を指数関数的に強調しており、絶対 強度を表してはいない。図中において、試料左側端面から右に向かってPSL強度が減少



図 1 (a) Zr 中の水素 (トリチウム)分布 IP 像 (拡散温度:673 K, 拡散時間:10 h) (b) 試料端面からの PSL 強度プロファイル

しており、水素(トリチウム)が拡散している様子が明瞭に観察された。図1(b)は、(a)のPSL強度マップに対応した、試料端面から長手方向への線分析結果である。1次元薄膜拡散源と仮定した初期・境界条件でフィックの第2法則から導いた解析解は、得られた濃度プロファイルと良く一致しており、拡散係数は2.6×10<sup>-10</sup> m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>と求められた。この手法は、簡便かつ迅速に、非破壊で、極めて詳細な拡散濃度プロファイルを得ることができるため、水素濃度・温度または材料中の不純物による水素拡散・集積挙動への影響を解明するのに有用であることが分かった。

# 研究成果報告

Application of imaging plate technique to determine diffusion coefficients of tritium in Zr and Zr alloysK. Hashizume, Y. Saruwatari, T. Hirano, T. Otsuka, T. Tanabe, Y. TsuchiuchiProc. 2005 Water Reactor Fuel Performance Meeting, 2005.10

Diffusional behavior of tritium in V-4Cr-4Ti alloy

K. Hahsizume, J. Masuda, T. Otsuka, T. Tanabe, Y. Hatano, Y. Nakamura, T. Nagasaka, T. Muroga ICFRM-12, 2005.12

イメージングプレートを用いた酸素溶解 Zr 中のトリチウム拡散係数測定 平野智久、猿渡祐輝、大塚哲平、橋爪健一、田辺哲朗、土内義浩 日本金属学会秋期(第137回)大会、2005.9

バナジウム合金中のトリチウム拡散挙動 益田丈輔、橋爪健一、田辺哲朗、波多野雄治、室賀健夫、長坂琢也、中村幸男 日本金属学会秋期(第137回)大会、2005.9

# Fe 中の転位ループの動的挙動に対する溶質原子の効果

大阪大学超高圧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<111> のループと b=<100> 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<111> のループの一次元移動 の頻度は b=<100> 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 99.999 %) 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た。

# 実験方法

大阪大学超高圧電子顕微鏡センターに付随する超高圧電子顕微鏡 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。ここで、電子加速電圧は 1000 kVおよび 2000 kV、 照射強度は 1x10<sup>23</sup> - 1x10<sup>24</sup> e<sup>-</sup>/m<sup>2</sup>s、照射温度は 110 - 290 Kとした。その後、超高真空電子顕微鏡H-9000UHV (Hitachi) 内で温度 290 Kから 900 K程度まで試料を段階的に加熱し、b=1/2<111>のループの熱活性化挙動を電子加速電圧 200 kVで観察した。

# 実験結果

主要な結果は次の通りである。(1) 純Fe中のb=1/2<111>のループの移動 (Fig. 1) は、450 K 程度で頻繁に起こり始めたのに対し、Fe-3Cr, Fe-9Cr, Fe-15Cr では顕著な移動は起こらなか った。Fig. 2 に、純FeとFe-9Crにおける微細組織の加熱に対する応答の比較を示す。純Fe ではループ移動により粗視化が進行するのに対し、Fe-9Crではループの移動がほとんど起 こらないため顕著な粗視化が進行しない。(2) Fe-0.1Crにおいては、670 K 程度以上の温度 では、昇温後しばらくすると止まっているループが動き出し、しばらく動いた後に再び止 まるという現象が見られた。670 Kにて、動いているループにたいして、1/30 s ごとにルー プ位置を追跡することで、その拡散係数Dを評価したところ、直径 6 nm 程度のループに対 して、 $D(Fe-0.1Cr) = 1 \text{ nm}^2/s$  程度の値が得られた。この値は、純Feにおける同程度のサイズ のループの同温度での拡散係数 $D(Fe)=10^3 \text{ nm}^2/s$  より三桁も小さい値である。

### 考察

Fe-0.1Cr中のループの 670 K程度以上における挙動は、Cr雰囲気によるループの固着からの離脱 固溶したCrによる摩擦抵抗および雰囲気のひきずりによる減速されたループ運動

再固着、によるものとして解釈することができる。転位論に基づく解析を行ったところ、 670 K においてD (Fe-0.1Cr) = 1 nm<sup>2</sup>/s 程度の値を持つループは、ほとんと雰囲気の引きず りを伴わないと結論できた。この結果をもとに、ループを構成する転位セグメントとCr原 子との結合エネルギーを 0.45 eV程度と評価できた。この値は、FeとCrの原子容の違いに基 づく弾性相互作用エネルギー0.03eVより極めて大きい値である。よって、固溶したCrによ る摩擦抵抗は、弾性論から予想されるよりもはるかに大きいと言える。 一方、Fe-3Cr, Fe-9Cr, Fe-15Cr におけるループ移動の顕著な抑制は、Cr 雰囲気によるループの固着によるものと考えられる。固着によるループ移動の抑制効果は極めて強い。

# 研究成果報告

[1] "Fe 中の転位ループのダイナミクスに及ぼす置換型溶質原子の効果",日本金属学会 2005 年秋期大会,2005/9/28~9/30,広島大学東広島キャンパス。

[2] "Fe-Cr 合金における転位ループのダイナミクス",日本金属学会 2005 年秋期大会, 2005/9/28~9/30,広島大学東広島キャンパス。

[3] "鉄中の格子間原子型転位ループの移動過程の TEM その場観察 (招待講演)", 照射場材 料制御研究会, 2005/9/29, 広島大学東広島キャンパス。

[4] "One-dimensional motion of interstitial-type dislocation loops in Fe-Cr alloys by in situ transmission electron microscopy (Invited talk)", Towards a multiscale modeling approach of irradiation damage in high-Cr steels: Computer simulation and experimental validation, 21 Feb 2006, SCK-CEN, Mol, Belgium.

[5] "Dynamics of nanometer-sized interstitial-type dislocation loops in iron by in situ transmission electron microscopy (Invited talk)", Seminar, 23 Feb 2006, CEN-Saclay, France.

[6] "Dynamics of nanometer-sized interstitial-type dislocation loops in iron by in situ transmission electron microscopy (Invited talk)", Seminar, 27 Feb 2006, UKAEA, Culham, UK.

# 研究組織

代表者:大阪大学超高圧電子顕微鏡センター 荒河一渡 協力者:大阪大学超高圧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 吉田直亮



FIG. 1. One-dimensional motion of a small interstitial-type dislocation loop with the Burgers vector of 1/2 < 111> in pure Fe at 690 K. This loop makes back-and forth motion along a direction parallel to its Burgers vector.



FIG. 2. Microstructural variation in pure Fe and Fe-9Cr upon heating subsequent to high-energy electron irradiation with a beam flux of  $9x10^{22}$  e<sup>-</sup>/m<sup>2</sup>s to a dose of  $3x 10^{25}$  e<sup>-</sup>/m<sup>2</sup> at 110 K.

# 先進核融合材料としてのベリリウム金属間化合物に関する研究集会

研究代表者 東京工業大学 三島良直

標記研究会を平成18年3月2日に九州大学応用力学研究所で開催した。国内の複数の大学 や公的研究機関である日本原子力開発機構、さらには世界を代表するベリリウムメーカーで ある日本ガイシ(株)からの参加があり、総勢10名での研究集会が行われた。今回は、今年 度までの三年間に及ぶ協力研究成果についての総括的な議論を中心として行われた。また、 数件の新規データに関する話題提供や今後の核融合炉学の展開をも視野に入れた報告及び討 論も活発に行われた。

はじめに、今年度のベリリウム金属間化合物研究に関する様々な活動の報告があった。日本金属学会講演大会、12th International Conference on Fusion Reactor Materials、7th IEA International Workshop on Beryllium Technology for Fusion などへの参加報告に続き、三島から「エコマテリアルハンドブック ベリリウム金属間化合物」及び「金属 2006年7月号金属間化合物の新しい可能性」等について執筆および執筆予定の報告があり、また九大の吉田直亮氏から「工業材料 2006年1月号 21世紀の技術を先導するのはこれだ!工業材料キーワード40 ベリリウム金属間化合物」に関する執筆及び出版の報告が行われた。

次に、新規データに関する話題提供が行われた。秋田大の佐藤芳幸氏はBe-V二元系合金に おける酸化増量の測定及び表面形状観察とEDX分析の結果、Be-Ti二元系合金に類する良好な 対酸化特性と特異な温度依存性(800 の場合が 1000 よりも酸化しやすい)があることを 報告した。九大の岩切宏友氏は重イオン照射しBe<sub>12</sub>Tiにおける微細損傷組織観察結果について 報告し、1.5dpa程度まで照射してもボイドの形成が一切観察されないことを示した。日本ガ イシ(株)の内田宗範氏はITER計画における各種の情報提供を産業界の立場から行った。ま た日本原子力開発機構の土谷邦彦氏からITER計画に関連したブロードアプローチ計画に関す る報告があり、今後十年の研究・開発スケジュール並びに中性子増倍微小球の開発について の情報提供が行われた。

その後、ベリリウム金属間化合物についての各研究テーマのまとめと今後の計画について の総合討論が行われた。特にベリリウム並びにベリリウム金属間化合物の取り扱い上の整備 についての活発な議論が交わされた。内田宗範氏からは、ベリリウムの塵や蒸気に継続的に さらされる環境下でないかぎり、健康に影響を及ぼす危険性は極めて小さいとの説明があり、 通常の試験研究の範疇では全く問題がないことを再確認した。また、周囲の全幅の理解を得 るためには、取り扱い上の整備について一層の協力体制が重要であるという統一見解が得ら れた。

最後に来年度の予定についての議論が行われ、各自の研究成果をまとめて、2006年秋に開催される日本金属学会公募シンポジウム「金属間化合物材料の新たな可能性」に申し込み、 成果報告及び議論を企画することになった。また、Be-V二元系合金についても本格的な協力 研究を行っていくことに決定した。

# 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、2005年9月13日-15日の3 日間にわたり、US-Japan JIFT ワークショップ"Integrated Modeling of Multi-Scale Physics in Fusion Plasmas" organized by A. Fukuyama(Kyoto Univ.) and S. Jardin(Princeton Plasma Physics Laboratory)との共催により、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。ITER のサ イトがフランスカデラッシュに決定し、建設に向けて計画が動き出したことは ITER 計画 を支援してきた大学研究者にとっても喜ばしいことである。このように日欧を中心に ITER 計画が本格的に立ち上がろうとしているこの時期に、第4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 これからの研究協力について議論できたことは意義深い。今後も国際協力を進めつつ、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、ITER に貢献していく必要があると考える。

# 会議内容

参加者は31名、発表件数は27件(内訳:日本18件、アメリカ6件、ヨーロッパ2 件、韓国1件)であった。発表件数に関しては国内、海外の比率がおよそ2対1の割合で あり、バランスのとれたワークショップであったと言える。プログラムは6つのセッショ ン:(I) Integrated Modeling (4件)、(II) Edge-Core Integration (5件)、(III) Computation (2 件)、(IV) Wave and MHD (4件)、(V) Transport Modeling (7件)、(VI) MHD and Transport (5件、うち2件は核融合以外)から構成された。

セッション(I)では Jardin、Becoulet、福山がそれぞれ米国、ヨーロッパ、日本における 核燃焼プラズマのための統合化モデル構想の活動状況や今後の研究計画を報告した。活動 自体は日本が米国、ヨーロッパに先行したが、米国、ヨーロッパではすでにプロジェクト として研究組織が確立し、大型研究予算が正式に承認されており、ボランティア活動とし てプロジェクトを遂行している日本が追い越されるのは時間の問題であると感じた。セッ ション(II)では Park が韓国における活動状況を報告したが、ソウル国立大学、KBSI を拠点 として Core-Edge 統合化モデルプロジェクトが進行しつつある。Kritz がコアー、ペデスタ ル、ELM の動力学的統合モデルによるシミュレーション結果を報告した。小関が原研にお ける核燃焼プラズマに対する取り組みを紹介した。また、Chang が CPES (Center for Plasma Edge Simulation) プロジェクトの概要を報告した。セッション(III)では計算科学に関する報告がされ、実時間での実験データ解析を意識したコード開発(徳田)や新しい粒子シミュレーションスキーム(藤堂)が報告された。セッション(IV)では Bachelor が高エネルギー粒子と MHD の相互作用を統合化するプロジェクト SWIM (Simulation of Wave Interaction of MHD)を紹介した。セッション(V)では Weiland が運動量輸送を輸送コードに取り込み、Dimits shift が流体モデルでも説明できることを示した。鵜沢が外部平均流の帯状流生成に及ぼす効果を報告した。また本多が輸送シミュレーションによる CDBM モデル、GLF23 モデル、Weiland モデルの比較結果を報告した。GLF23 モデルの結果に関してアメリカ側からコメントがあり、ベンチマークに関して今後、情報交換を進めていくことになった。林は ITER における定常オペレーションの輸送シミュレーション結果を報告した。セッション(VI) では草野がさまざまな分野における多スケールシミュレーションのためのInterlocking model(統合モデル)を紹介し地球シミュレータにおける研究事例を報告した。また矢木が BPSI 計画の一部として ITBL (IT based Laboratory)を用いた grid computing の取り組みを紹介した。

全体としてワークショップ前半はプロジェクトの研究計画やフレームワークを中心に 報告がなされ、後半では各論を通じて結果報告された。米国では統合シミュレーションを 目指した2つの新しい SciDAC プロジェクト、CPES と SWIM、が開始され、これまでの 蓄積をベースに意欲的かつ組織的に研究が進められようとしている。日本国内においても、 統合シミュレーションの成果は上がり始めてはいるが、より組織的な将来計画を提案して いくことが必要であろう。また、個人的な印象として、異なるスケールを結合する新しい モデル (例えばサブグリッドモデルの一般化)、数値手法や並列化手法のテーマをもう少し プログラムの中に盛り込んでもよかったのではと思う。来年度のJIFT ワークショップはア メリカ側からオークリッジを開催候補地にしたい旨、提案があった。

最後にこのワークショップを開催するにあたり、九州大学応用力学研究所共同利用研究・集会旅費、浅田榮一研究奨励金、科学研究費補助金(基盤研究(B) 16360459、特別推進研究 16002005)の支援をうけたのでこの場を借りて感謝の意を表したい。

# 参考資料

[1]福山淳、矢木雅敏、US-Japan JIFT ワークショップ"Integrated Modeling of Multi-Scale Physics in Fusion Plasmas" combined with  $4^{th}$  annual meeting of Burning Plasma Simulation Initiative", J. Plasma and Fusion Res. 81 (2005) 830.

[2]US-Japan JIFT workshop on 'Integrated Modeling of Multi-Scale Physics in Fusion Plasmas' combined with 4<sup>th</sup> annual meeting, Reports of RIAM, Kyushu University Supplements S-2 (2006).

# **US-Japan JIFT Workshop on**

# **Integrated Modeling of Multi-Scale Physics in Fusion Plasmas**

# with Participants from EU and Korea

 $combined\ with\ Burning\ Plasma\ Simulation\ Initiative\ annual\ meeting (collaboration\ programe\ between$ 

**RIAM and University**)

**11:30** S. Murakami (Kyoto U), *Integrated Modeling of Plasma Heating and Fast Particles* **12:10** Lunch

# **Transport Modeling**

chaired by A. Kritz

**13:30** J. Weiland (Chamers U), *Recent Progress in Transport Modelling; Momentum Transport and Effects of Varying Correlation Length* 

14:10 K. Uzawa (Kyoto U), Effect of External Mean Flow on Zonal Flow Generation

14:40 J. E. Anderson (Kyoto U), Zonal Flows Generation in Collisionless Trapped Electron Mode

Turbulence

15:10 Coffee break

chaired by J. Weiland

**15:20** M. Honda (Kyoto U), *Comparison of Turbulent Transport Models in Tokamak Transport Simulations* **15:50** N. Hayashi (JAERI), *Simulation of Steady-State Operation in ITER* 

**16:30** A. Fukuyama (Kyoto U), Y. Nakamura (JAERI): Simulation Modeling of Fully Non-Inductive Buildup Scenario in High Bootstrap Current Tokamaks without Center Solenoid

**17:10** O. Mitarai (Kyushu Tokai U), *Plasma Current Start-Up and Ignition in the Component Test Facility* (*CTF*) *Device* 

17:40 End of Session

19:00 Workshop Dinner at "Juttoku-ya Tsukushi-guchi " (Near Hakata Station)

09/15

# **MHD and Transport**

chaired by Y. Todo

9:00 K. Kusano (Earth S), Interlocking Models for Multi-Scale Simulations

**9:40** N. Ohnishi (Tohoku U), *Radiation Hydrodynamics Simulations of Laboratory and Astrophysical Plasmas* 

10:20 Coffee break

chaired by V. Chan

10:30 M. Yagi (Kyushu U), Global Tokamak Simulation with Multi-Scale Interaction, (I) Neoclassical

Tearing Mode (MHD & turbulence interaction)

**11:00** T. Ueda (Kyushu U), *Global Tokamak Simulation with Multi-Scale Interaction, (II) Status of Global ITG Code (transport & turbulence interaction)* 

**11:30** S. Nishimura (Kyushu U), *Global Tokamak Simulation with Multi-Scale Interaction, (III) RMHD* Model Including Transport Effect (transport & MHD interaction)

12:00 Lunch

chaired by M. Yagi

13:30 Summary and Discussion on Future Plan

15:00 Adjourn

# 核燃焼プラズマ統合コード

### 1. はじめに

ITER さらには将来の核融合炉に向けて,自律性の高い核燃焼プラズマの振る舞いを定量的に予測し,それを制御する手法を開発することが重要な課題となってきている.そのためには,炉心・周辺・ダイバータを含めた装置内のプラズマ全体について,立ち上げ・維持・突発事象・立ち下げを含めた放電時間全体にわたって,自己完結的な時間発展シミュレーションを実現することが必要となる.核燃焼プラズマ内で起こる現象は,100GHzから1000sにわたる広い時間スケールと,10mmから10mにわたる広い空間スケールに広がっており,単一のシミュレーションコードで記述することは不可能である.したがって,物理現象に応じて複数のコードを相互に結合させたシミュレーションが必要となる.さらに,核燃焼プラズマの定量的予測や制御手法開発は,ITERにおける実験計画の検討や運転シナリオの作成を進める上で戦略的にも非常に重要であり,利用可能な計算機資源の範囲で,できるだけ早期に実現することが望まれている.このような核燃焼プラズマ 統合シミュレーションの実現に向けて,大学・核融合科学研究所・日本原子力研究開発機構等の研究協力の形で,核燃焼プラズマ統合コード構想の活動が2002年から進められている.ここでは,その成果の一部を報告する.

#### 2. TASK/TR シミュレーション

Current Diffusive Ballooning Mode (CDBM)乱流輸送モデルを非円形度が取り込めるように改良し (CDBM $\kappa$ )、従来のモデルとの比較研究を行った. ベンチマークにおいては, 'ITER Physics Basis: Chapter 2'に基づく放電を選択した. この中には 38 ショットの L-mode 放電, 小さな ELMS を含む 14 ショットの H-mode 放電(HSELM), 大 ELMs を含む 3 ショットの H-mode 放電(HGELM)が含まれ る. シミュレーションは以下の条件で行った.

新古典輸送モデル, NCLASS, 乱流輸送モデル, CDBM/CDBM05, GLF23, Weiland モデル, ITPA 分布 データベースの定常実験分布を用い、密度分布固定のもとで熱輸送方程式を解く. 粒子の輸送係数 は  $S_{NB,Wall}$ から評価した粒子フラックスから計算. 解くべき領域は $\rho \le 0.9$  その他の条件として CDBM: **E**×**B**シェアーリングの安定化は考慮しない. GLF23:トロイダル回転速度は実験より与え る. 評価関数として蓄積エネルギーの増分に対する平均値と標準偏差を以下のように定義する.

$$\left\langle R_{W}\right\rangle = \frac{1}{N} \sum_{i}^{N} R_{Wi}, \ \sigma_{W} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i}^{N} R_{Wi}^{2}}, \ R_{Wi} = \frac{W_{sim,i}^{inc}}{W_{exp,i}^{inc}} - 1, \ W^{inc} = \frac{3}{2} \int_{0}^{0.9} \left[n_{e}(\rho)\tilde{T}_{e}(\rho) + n_{i}(\rho)\tilde{T}_{i}(\rho)\right] V' d\rho,$$

# $\tilde{T}(\rho) = T(\rho) - T(0.9)$

ここで*N*はショット数を表す. 図1にベンチマーク結果を示す. 55 ショットに対し、ベストな結果 は CDBM κを用いた計算結果であることが見て取れる. 図2に DIII-D #78316(L-mode, ECH&ICH 加 熱)の場合における温度分布の比較結果を示す. 分布の再現性においても CDBM, CDBM κモデル が優れていることがわかる.



図1:さまざまなオペレーションモード、装置における3つの輸送モデルの比較



図2: DIII-D #78316の場合における温度分布の比較

それぞれのモデルの特徴をまとめると CDBM: 3つのモデルの中で一番よい結果を与える. しかし、 電子温度は過小評価, GLF23: オペレーションモードに対する依存性は弱い,  $\tau = T_e/T_i > 1$ のショット に対して実験結果を再現しない. Weiland:再現性のよい結果と悪い結果のひらきが大きすぎる.またフ ォローな密度分布では数値不安定性を起こしやすい. 最後に TASKV0.90 がオープンソースとして 公開されたことを付け加えておく http://bpsi.nucleng.kyoto-u.ac.jp/task/

# 九州大学応用力学研究所

〒8 <sup>-</sup>	16-8	580	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	A	話	092-583-7702
F		X	092-583-7701