# 共同利用研究成果報告 第16号

# 平成24年度

九州大学応用力学研究所

### 発刊の辞

応用力学研究所が 1997 年に全国共同利用研究所となって 16 年が経過しまし た。この間,毎年 80~90 件の共同研究が行われ,多くの成果が得られました。 この報告書に示しますように,2012 年度も特定研究 35 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,2013 年 6 月 6 日 – 7 日に開催され る「RIAM フォーラム 2013」でも報告されます。また,この報告書は,応用力学 研究所のホームページ (http://www.riam.kyushu-u.ac.jp) にも掲載されます。 さらに,この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 2012 年度は 11 件行われ,それぞれについてまとめら れています。

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

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

同時に,全国共同利用研究を基にして,全国および世界の研究者と連携し, 力学とその応用の分野における世界的研究拠点となることを目指します。その ため 2011 年度からは国際共同研究も開始しました。

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

> 2013年3月 九州大学応用力学研究所 所長 大屋 裕二

Ħ	次
	~~~

平成 24 年度共同研究一覧 ····································
平成 24 年度研究集会一覧 ····································
地球環境力学分野共同研究成果報告 •••••••••••1
核融合力学分野共同研究成果報告 ••••••••••••••••••••••91
新エネルギー力学分野共同研究成果報告 ・・・・・・・・・・・・213

## 平成24年度共同研究一覧

#### 地球環境力学分野

番号	研究課題	代表者名	所内世話人	頁
			協力者数	
特定研究				
	海況モニタリングによる縁辺海の研究	統括責任者		
		市川 香		1
24特1-1	ブリ・スルメイカの回遊に影響を与える対馬暖	石川県水産総合センター	広瀬 直毅	
	流域の海洋環境	辻 俊宏	3名	3
24特1-2	, 輪島〜舳倉島間の通過流量の季節変動と富山	石川県水産総合センター	千手 智晴	
	サ   湾の流況	大慶則之	2名	5
24特1-3	テ 東シナ海陸棚上における植物プランクトンの	名古屋大学	柳 哲雄	
	マー律速栄養塩変化に関する研究	森本 昭彦	2名	7
24特1-4	対馬海峡横断国際フェリーに搭載したADCPに	韓国海洋大学校	広瀬 直毅	
	よる流況監視体制の強化	李 昊珍	4名	9
24特1-5	対馬海峡から日本海山口県沖にかけての海洋	水産大学校	千手 智晴	
	環境変動	滝川 哲太郎	4名	13
24特1-6	フェリーニューカメリアおよび 肝 レーダーのデータを使	名古屋大学	松野健	
	った対馬海峡の物理変動に対する生物応答の研究	石坂 丞二	7名	15
一般研究			I	
24A0-1	海洋乱流の観測およびモデリング研究	東京大学	吉川 裕	
		日比谷 紀之	13 名	17
24A0-2	海洋窒素循環に関する研究	神戸大学	柳 哲雄	
		林美鶴	2名	19
24A0-3	水中ビークル運用のための装備に関する研究	長崎大学	中村 昌彦	
		兼原 壽生	8名	21
24A0-4	越前沿岸域の表層流に関する研究	福井県立大学	千手 智晴	
		兼田 淳史	2名	23
24A0-5	数値モデル構築に資する植物プランクトンの環境指	福岡女子大学	柳 哲雄	
	標性に関わる研究	山田 真知子	1名	25
24A0-6	海洋大循環の力学、とくに中深層循環に及ぼす海	北海道大学	増田 章	
	岸・海底地形の影響に関する研究	水田 元太	13名	27
24A0-7	日向灘における海況変動機構の解明	宮崎県水産試験場	柳 哲雄	
		渡慶次 力	1名	29
24A0-8	全球気候モデルとアクティブセンサ搭載衛星計測デ	東京大学	岡本 創	
	ータを用いた雲-放射-力学相互作用過程の研究	渡部 雅浩	4名	33
24A0-9	地上ライダーネットワークおよび衛星搭載ライダデー	国立環境研究所	岡本 創	
	タを用いたエアロゾル光学特性の時間空間変動研究	西澤 智明	4名	35

24A0-10	化学・物理海洋学から見る東シナ海の水塊構造	富山大学	松野 健	
		張 勁	2名	37
24A0-11	東アジア域における大気エアロゾルの気候影響に関	富山大学	竹村 俊彦	
	する研究	青木 一真	2名	39
24A0-12	多用途型コンパクト水中ロボットに関する研究	佐世保工業高等専門学校	中村 昌彦	
		長嶋 豊	4名	41
24A0-13	海洋環境モニタリングのためのグライダー型海中ロ	大阪府立大学	中村 昌彦	
	ボットの研究開発	有馬 正和	3名	43
24A0-14	アジア大陸から輸送される反応性窒素酸化物および	大阪府立大学	鵜野 伊津志	
	その構成成分の動態に関する研究	坂東 博	5名	45
24A0-15	大気エアロゾル同化システムとリモートセンシング	気象研究所	鵜野 伊津志	
	データを用いたエアロゾルに関する統合的研究	弓本 桂也	4名	47
24A0-16	流体工学的手法による絶滅遊泳性爬虫類の生体復元	東北大学	中村 昌彦	
		西弘嗣	2名	49
24A0-17	非線形干渉を考慮した表面波・内部波の平面2次元数	鹿児島大学	辻 英一	
	値解析による研究	柿沼 太郎	3名	51
24A0-18	海中ビークルや曳航物の水中挙動に関する研究	海洋研究開発機構	中村 昌彦	
		百留 忠洋	6名	53
24A0-19	水産資源量調査用グライダー型海中ビークルの開発	九州大学	中村 昌彦	
		山口悟	4名	55
24A0-20	瀬戸内海の伊予灘と豊後水道における乱流観測	愛媛大学	松野 健	
		郭 新宇	4名	57

#### 核融合力学分野

番 号		研究課題	代表者名	所内世話人	頁
				協力者数	
特定研究2					
	プラ	ズマ乱流実験の大容量データからの物理情報抽	統括責任者		
	出新	手法の開発	伊藤 早苗		91
24特2-1		二次元イメージデータからのプラズマ乱流解	核融合科学研究所	稲垣 滋	
		析技法の開発	大舘 暁	4名	93
24特2-2		マイクロ波計測器信号からの乱流揺動信号抽	核融合科学研究所	稲垣 滋	
		出法の研究	徳沢 季彦	2名	97
24特2-3		デジタルコリレーションECEの開発	核融合科学研究所	稲垣 滋	
	サブ		土屋 隼人	2名	99
24特2-4	テ	波動伝搬を用いた磁力線構造観測法の開発	核融合科学研究所	稲垣 滋	
			居田 克巳	2名	101
24特2-5	×	プラズマ乱流データ解析研究会	九州大学	伊藤 早苗	
			稻垣 滋	19名	103
24特2-6		シミュレーションデータを用いたプラズマ乱	九州大学	佐々木 真	
		流の時空間構造解析法の研究	糟谷 直宏	6名	105

24特2-7	トーラス装置における乱流計測の為のプロー	京都大学	稲垣 滋	
	ブ開発とそのデータ解析手法の検討	大島 慎介	6名	107
24 特 2-8	磁場閉じ込め高温プラズマ中の電子熱輸送の	核融合科学研究所	稻垣 滋	
	状態評価のための確率論的手法の高度化	田村 直樹	9名	109
24 特 2-9	直線磁化プラズマにおけるストリーマー構造	東京大学	稲垣 滋	
	の解析	山田 琢磨	3名	111
24 特 2-10	バイスペクトル解析による電子温度勾配モー	東北大学	稲垣 滋	
	ドと低周波揺動の非線形結合機構解明	金子 俊郎	6名	113
24 特 2-11	磁場閉じ込めプラズマにおける乱流及び帯状	核融合科学研究所	稲垣 滋	
	流の検出方法の開発	井戸 毅	3名	115
24 特 2-12	高次相関解析の並列処理による高性能化に関	京都大学	佐々木 真	
	する研究	福山 淳	2名	117
特定研究3				
	光・ミリ波・マイクロ波を用いた計測技術・解析モデ	統括責任者		
	ルの開発とその応用に関する研究	出射 浩		119
24 特 3-1	ウィンドプロファイラの鉛直流測定を活用し	京都大学	岡本 創	
	た雲・降水の定量的測定	山本 真之	5名	121
24 特 3-2	リアルタイム画像生成のための合成開口レー	九州大学	出射 浩	
	サ     ダ解析と応用	間瀬 淳	9名	123
24 特 3-3	テ 電磁波の共同散乱計測を用いたプラズマ波動	核融合科学研究所	出射 浩	
	の励起構造・熱化過程の検出	久保 伸	4名	125
24 特 3-4	光・ミリ波・マイクロ波を用いた海表面計測	情報通信研究機構	吉川 裕	
	(研究集会)	灘井 章嗣	3名	127
24 特 3-5	マイクロ波反射計・干渉計によるプラズマ中	東京大学	出射 浩	
	の高周波波動計測	江尻晶	5名	129
24 特 3-6	光・電磁波を用いた計測技術・解析モデルの	九州大学	出射浩	
	開発とその応用に関する研究(研究集会)	出射 浩	23名	131
一般研究		T		Γ
24FP-1	Quest装置におけるVUV分光法によるオーミック放電	核融合科学研究所	図子 秀樹	
	での不純物の振舞いに関する研究	秋田 繁	4名	135
24FP-2	透過フローブを用いた水素リサイクリングモニタ	□ 京山 北一	凶子 秀樹	107
			4名	137
24FP-3	局温構造材料の組織制御による変形抑制の微視的機	核 融合科字研究所      	渡辺 英雄	100
0.455.5		至質 健大	2名	139
24FP-5	LIU第一壁トロイダルアレイ試科による対向材料の	核融合科字研究所	渡辺 英雄	1 4 1
9450 6	損料/ 損湯わよし/小茶川///仲拥捉重分布の評価   技融合プラブーロにわけて熱法主し、原本法主の吐	时台 收仃	<u>3</u> 名 <u> </u> <u> </u>	141
24FP-0	核暦   「	口科乐门加泊税携		140
9450 7	全間的非同所性に関する研究	<sup>                                   </sup>	2名	143
2457-7	金馬州科の元子将性およい電気伝導特性に与える低   エネルボーイナン昭軒の彫郷		假辺 央雄	145
9450 0	エイバレイーイムン 思知の家谷 第一百冊 14倍に トエカンガラニン 中のボラニキの 二本	日本 元貝	4 名	140
2466-8	另一床生計昇によるクマククアン中のカイ兀茶呶勵   キトロが世界の正空			1.47
1	やよし近限の加力	上	1 伯	147

24FP-9	巨視的運動論的MDD現象解析用のトロイダル版ジャイロ運	山口大学	佐々木 真	
	動論的粒子コードの開発	内藤裕志	6名	149
24FP-11	低エネルギーヘリウムイオン照射された絶縁体にお	琉球大学	渡辺 英雄	
	ける光学特性	岩切 宏友	6名	151
24FP-12	環状プラズマ実験装置第一壁の水素透過挙動に	核融合科学研究所	図子 秀樹	
	関する研究	廣岡 慶彦	4名	153
24FP-13	タングステン被覆した低放射化材料の接合界面にお	京都大学	渡辺 英雄	
	ける微細組織と強度特性の相関	木村 晃彦	6名	155
24FP-14	多孔質金属膜における水素・ヘリウム挙動に関する	九州大学	渡辺 英雄	
	研究	片山 一成	3名	157
24FP-15	熱・粒子照射された微結晶粒タングステンの微細構	大阪大学	渡辺 英雄	
	造	上田 良夫	5名	159
24FP-16	応力下における照射組織の発達過程に係る強度特性	日本原子力研究開始機構	渡辺 英雄	
	評価 (その3)	井上 利彦	2名	161
24FP-17	プラズマ輸送理論	核融合科学研究所	稻垣 滋	
		伊藤公孝	20名	163
24FP-18	金属材料へのイオンビームとプラズマ/レーザーの	名古屋大学	渡辺 英雄	
	複合照射効果	大野 哲靖	6名	167
24FP-19	ドリフト波乱流中の渦構造に関する非線形シミュレ	富山大学	佐々木 真	
	ーション研究	成行 泰裕	5名	169
24FP-20	タングステン中の水素同位体保持特性に及ぼす照射	富山大学	渡辺 英雄	
	欠陥の影響	波多野 雄治	6名	171
24FP-21	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	
		鎌田 康寛	4名	173
24FP - 22	タングステン混合堆積層における炭素・ヘリウムと	静岡大学	渡辺 英雄	
	照射欠陥分布と水素同位体滞留挙動の相関関係	大矢 恭久	11名	175
24FP-23	極限環境下におけるタングステンの表面改質と水素	筑波大学	渡辺 英雄	
	吸蔵の基礎研究	坂本 瑞樹	10名	177
24FP-24	耐熱構造機器の接合界面特性に及ぼす照射後熱処理	茨城大学	渡辺 英雄	
	の影響	車田 亮	3名	179
24FP-25	無欠陥接合により作製されたタングステン/銅接合	茨城大学	徳永 和俊	
	材料の熱負荷特性	車田 亮	7名	181
24FP-26	ゾーンプレートを使ったQUESTプラズマ計測	電気通信大学	中村 一男	
		竹田 辰興	4名	183
24FP - 27	磁場閉じ込めプラズマ中の多スケール・多プロセス	日本原子力研究開発機構	佐々木 真	
	現象の理論・シミュレーション研究	石井 康友	12名	185
24FP-28	酸化物・窒化物結晶における照射欠陥形成およびそ	九州大学	渡辺 英雄	
	の安定性	安田 和弘	4名	187
24FP-29	物理的に無矛盾な渦電流計算機能を備えたプラズマ断面位置形状再構築	日本原子力研究開始機構	中村 一男	
	システム (CCS)のSTプラズマ位置形状制御への適用検討 (III)	栗原研一	7名	189
24FP-30	H-C-N反応性低温プラズマ生成による炭素堆積膜成	金沢大学	中村 一男	
	長と水素同位体吸蔵の制御	上杉 喜彦	4名	195
24FP-31	微量イットリウム添加がバナジウム合金のイオン照	核融合科学研究所	渡辺 英雄	
	射硬化挙動に及ぼす影響	長坂 琢也	3名	197

24FP-32	プラズマ照射によって金属材料に注入された水素の	九州大学	徳永 和俊	
	蓄積とその放出機構の解明	大塚 哲平	7名	199
24FP-34	核融合プラズマのマルチスケール・マルチフィジッ	日本原子力研究開発機構	佐々木 真	
	クスシミュレーション研究	矢木 雅敏	3名	203
24FP-35	核融合炉の中性子照射環境に対応した高熱流速機器用	東北大学	徳永 和俊	
	タングステン材料の高熱流束負荷下の挙動	長谷川 晃	6名	205

#### 新エネルギー力学分野・一般研究

番 号	研究課題	代表者名	所内世話人	頁
			協力者数	
特定研究4			1	1
	海洋空間を利用した新エネルギー開発に関する研	帘 統括責任者		
		胡 長洪		213
24 特 4-1	実用に向けた高度な流体・構造物相互作用数	値 東京工業大学	胡長洪	
	解析ツールの開発	肖 鋒	3名	215
24 特 4-2	振動水柱型波力発電装置の波浪中応答試験	佐賀大学	胡 長洪	
	<del>.</del> .	永田 修一	3名	217
24 特 4-3	内部回転振子付き浮体による波浪エネルギ	ー 大阪大学	胡 長洪	
	吸収に関する研究	柏木 正	3名	219
24 特 4-4	テ 洋上風力発電浮体の構造強度の解析法に関	す 山口大学	胡 長洪	
	る研究	陳 献	1名	223
24 特 4-5	~ 海洋エネルギー利用に関するテクノロ	ジ 九州大学	胡長洪	
		経塚 雄策	11 名	225
24 特 4-6	海流発電用新型水車の開発研究	九州大学	胡長洪	
		経塚 雄策	4名	231
24 特 4-7	フラッタ水力発電装置流れレンズの小型化	に 福岡工業大学	胡 長洪	
	関する実験的検討	阿比留 久徳	7名	233
24 特 4-8	垂直軸型発電タービンの性能向上に関する研	F 九州大学	胡 長洪	
	究	岩下 英嗣	4名	235
24 特 4-9	浮体式風車の弾性挙動に関する研究	大阪府立大学	胡 長洪	
		二瓶 泰範	1名	241
24 特 4-10	船舶向け波浪エネルギー回収システムの開発	大阪大学	末吉 誠	
		橋本 博公	3名	243
24 特 4-11	マルチカラム型波力発電浮体の性能評価に関	九州大学	胡長洪	
	する研究	安澤 幸隆	4名	245

24ME-1	機械的伸縮刺激に対する間葉系幹細胞の分化に関す	名古屋大学	東藤 貢	
	る研究	森田 康之	2名	253
24ME-2	種々の回転軸方向まわりに回転するサッカーボール	福岡工業大学	大屋 裕二	
	に加わる空気力の風洞実験	溝田 武人	5名	255
24ME-3	カルコパイライト型化合物半導体太陽電池基板の作	宮崎大学	柿本 浩一	
	製	吉野 賢二	7名	257
24ME-4	風レンズ風車の軽量・高強度化に関する材料開発	漢陽大学	新川 和夫	
		崔 洛三	4名	261
24ME-5	風レンズ風車のブレードの振動原因の究明と実働ひ	鹿島工業等朝野校	烏谷 隆	
	ずみ計測	小田原 悟	3名	263
24ME-6	薬剤徐放機能を有するバイオセラミックス/ポリマ	九州大学	東藤 貢	
	一複合系多孔体の創製と評価	古谷野 潔	6名	267
24ME-7	人工股関節を置換した股関節における骨リモデリン	九州大学	東藤 貢	
	グに関する研究	中島 康晴	2名	269
24ME-8	バイオセラミックス/コラーゲン複合scaffoldを	大阪大学	東藤 貢	
	用いた幹細胞培養と細胞外マトリックス形成挙動	名井 陽	2名	271
24ME-9	生体吸収性高分子材料の高機能化に関する研究	山形大学	東藤 貢	
		高山 哲生	1名	273
24ME-10	分子動力学法によるSiC結晶中の点欠陥の拡散挙動	三重大学	柿本 浩一	
	解析	河村 貴宏	3名	275
24ME-11	大面積ダイヤモンドウエファーを目指した単結	佐賀大学	柿本 浩一	
	晶ダイヤモンドCVD成長の研究	嘉数 誠	3名	277
24ME-12	ポリマー系ナノコンポジットの高温耐久性評価	福岡工業大学	汪 文学	
		朱世杰	2名	279
24ME-13	3次元環境下における細胞の力学エネルギー測定法	北海道大学	東藤 貢	
	の確立	水谷武臣	3名	285
24ME-14	エネルギー効率向上のための船舶の耐航性能に関す	広島大学	胡長洪	
	る研究	岩下 英嗣	6名	287
24ME-15	洋上エネルギープラントへの輸送用航空機に関する	広島大学	大屋裕二	
	研究 オオバト こうりょうかれい 見戸にけばいいっ	岩卜 英嗣	4名	295
24ME-16	エネルギー効率同上のための船舶の風圧抵抗低減に	」 広島大字 山工 世日	大室裕一	0.00
0.4100 1.7	関する研究	石下	4名	303
24ME-17	風レンク風単異の空力設計法の開発		八座 俗	200
9.4ME 1.9	電磁波波波はないの創制しての運体がのなって	白川 雅八	△ 石 江 → 学	309
24ME-18	电燃収恐怖がわり削殺とてり計画法の推工	16川八子		011
		1元 厦府	1 伯	311

### 平成24年度研究集会一覧

地球環境力学分野

番号	研究課題	代表者名	所内世話人 講演・ <i>参</i> 加诸数	開催場所	開催日 (平成)	頁
24A0-S1	里海創生のための沿岸海域の環境保	広島大学	柳 哲雄	応用力学	24年12月	
	全	橋本 俊也	17件、40名	研究所	5-6 日	59
24A0-S2	地形のダイナミクスとパターン及び	大阪電気通信大学	岡村 誠	応用力学	24年10月	
	境界領域	柳田 達雄	8件、18名	研究所	30-31 日	63
24A0-S3	非線形波動研究の最前線	神戸大学	辻 英一	筑紫地区共	24年11月	
	ー構造と現象の多様性―	太田 泰広	32件、66名	通管理棟3F	1-3 日	67
24A0-S4	日本海及び日本周辺海域の海況モニタ	水産大学校	増田 章	応用力学	24年12月	
	リングと波浪計測に関する研究集会	滝川 哲太郎	15 件、40 名	研究所	13-14 日	73
24A0-S5	壁乱流における大規模構造の統計法	名古屋大学	岡村 誠	応用力学	25年2月	
	則と動力学に果たす役割	辻 義之	12件、20名	研究所	22-23 日	79
24A0-S6	海洋レーダを用いた海沢監視システ	琉球大学	吉川 裕	応用力学	24年12月	
	ムの開発と応用	藤井 智史	18件、50名	研究所	12-13 日	83
24A0-S7	東シナ海の循環と混合に関する研究	名古屋大学	松野 健	応用力学	25年2月	
		石坂 丞二	8件、17名	研究所	5日	87

#### 核融合力学分野

番号	研究課題	代表者名	所内世話人 講演・参加诸数	開催場所	開催日 (平成)	頁
24FP-S1	炉内構造物の経年変化に関する研 究集会	京都大学 義家 敏正	渡辺 英雄 17 件、51 名	応用力学 研究所	24年7月 24-25日	207
24FP-52	各種磁場配位での周辺搖動研究	広島大学 西野 信博	図子 秀樹 7件、11名	応用力学 研究所	24年12月 5日	211

新エネルギー力学分野

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・参加诸数		(平成)	
24ME-S1	第5回 九大グラフェン研究会	九州大学	寒川 義裕	伊都キャ	25年1月	
		田中 悟	8件、23名	ンパス	18 日	313
24ME-S2	CT画像を利用したバイオメカニクス・シミュ	横浜市立大学	東藤 貢	東京国際	24年8月	
	レーション法の開発と臨床問題への応用	稲葉 裕	15件、31名	フォーラム	25 日	317

# 平成24年度

# 地球環境力学分野 共同研究成果報告

特定研究1「海況モニタリングによる縁辺海の研究」

研究統括者; 市川香

我々が生活している陸上に近い沿岸・緑辺海は,漁業や海運業から海洋レジャーに至る までの様々な産業や,工業の廃水や漂流性ゴミの漂着などの環境問題などを通じて,人間 活動へ大きな影響を及ぼしている。しかし,水深が浅く擾乱に対しての応答が速く,強い 潮汐の移流や混合の影響を受け,さらに河川水流入の影響なども受ける,複雑な縁辺海の 環境の理解は十分に進んでいない。さらに,活発な漁業活動に伴う観測器の亡失に加え, 領海に関する国際問題も存在するため,縁辺海の海況の理解は容易ではない。本特定研究 課題では,こうした問題を解決するべく,近年急速に発達してきた海況モニタリングや数 値モデリング等を活用して,縁辺海域の海洋環境の調査とその変化の仕組みに関する研究 を行うものである。

応募のあった 7 課題は,期せずして水産や生物と関係しているテーマや応募者が多かった。これは,生物活動が高く水産業が盛んな縁辺海ならではの特徴で,こうした分野で,いかに海洋環境の物理的な理解が絶対的な基礎要素として必要であることを反映している。申請額に対して配分額は充分ではないものの,共同研究ならではの直接的な討議によって,議論が深まった。例えば 24 特 1-7 の国立台湾大学の劉教授の課題では,対馬海峡を横断するフェリー「かめりあ」に実際に乗船して海水のサンプリングを行い,台湾海峡で行っている同種の手法と直接比較を行うことができた。次年度以降も,引き続き本特定研究を継続させ,より具体的・定量的な議論を行っていく予定である。

#### ブリ・スルメイカの回遊に影響を与える対馬暖流域の海洋環境

石川県水産総合センター 辻 俊宏,四方崇文

#### 【目的】

ブリおよびスルメイカは対馬暖流域における重要な水産資源の一つである。両種は東シナ海および日本海 西部海域で発生し、仔稚魚期は流れに、成魚期は水温変化に依存して移送・回遊することが知られている。

そこで本研究では、対馬暖流域を網羅した海洋同化モデルである応用力学研究所のDREAMS\_Mを用いて、 ブリ仔稚魚の移送経路とスルメイカ成魚の回遊と海洋環境との関係をそれぞれ明らかにすることにより、新 たな漁期・漁場予測手法の開発を目的とする。

#### 1. ブリ仔稚魚の移送経路

#### 【方法】

大中型まき網漁獲成績報告書より東シナ海における産卵期(2~6月)の位置別日別ブリ漁獲量を抽出し、 農林漁区(30'格子)および月ごとに集計した。上記によって求められた漁獲データを産卵データとした仮 定に基づく受動トレーサ実験を DREAMS\_M を用いて実施した。卵と見立てた粒子をトレーサとして産卵海 域・時期に投入した。ブリ卵および仔稚魚は表層を漂流・遊泳することから、粒子を強制的に浮上させるよ うにパラメータを与えた。総粒子量を 6.1 日ごとに集計し、全体に対する各海域の割合を配分率として求め た。以上の実験を 2001~2010 年の 10 年間のデータを用いて実施した。

#### 【結果】

産卵期のブリ漁獲量は2,000~8,200トンを推移し、95%以上が3~5月に集中した。地理的には200m等 深線に沿う形で分布しており、時期の経過とともに九州西岸に向かって、その分布は北上していった。年に よる分布の濃淡が多少見られたものの、これらの傾向に大きな相違は見られなかった

7月下旬の海域別粒子配分率の年変動を見ると、日本海配分率で30%(2006年)から80%(2008年)と 大きく変動していた。しかしながら、これらの変動とブリ0歳魚漁獲量の配分率の変動とに一致は見られな かった(図1)。一方、日本海中部海域における7月下旬での日本海全体に対する配分率と同海域(京都府~ 石川県外浦)における7~8月漁獲量の年間漁獲量に対する割合との間に有意な相関(危険率5%)が認めら れた(図2)。



図1 粒子配分率と漁獲量の0 歳魚漁獲量の 日本海配分率の年変動



図27-8月における0歳魚漁獲量の割合と粒 子量の割合の関係

#### 【考察】

産卵親魚の分布に大きな変動がないものの、日本海と太平洋への粒子配分率は年によって大きく変動した。 主産卵場である東シナ海大陸棚縁辺部における僅かの海況の変化が、その後の仔稚魚の移送海域に大きな影響を与えることが示唆された。しかしながら、トレーサ実験結果と実際の0歳魚漁獲量のそれぞれの海域配 分率の年変動は一致しなかった。一方、日本海中部海域における0歳魚の漁期の早遅とは、良い一致を示し、 移送時期に関しては一定の再現性が見られた。今後、実験条件を再検討することにより、ブリ0歳魚の漁獲 予測につながる高い再現性を図っていきたい。

#### 2. スルメイカ成魚の回遊

【方法】

石川県の中型イカ釣り漁船は主に日本海のスルメイカを漁獲対象とし、6~12月の漁期中にはほぼ毎日漁 場探索と操業を続けており、操業位置の水温・塩分は漁場が形成される条件を満たしていると考えられる。 そこで、石川県水産総合センターで収集している県内の中型イカ釣り漁船約10隻の2001~2010年の漁獲成 績報告書の操業位置に最も近い DREAMS\_Mの計算格子点のデータを抽出し、スルメイカの主な分布層にあ たる22・30・39・50・64・81・100mの各計算深度帯の水温と塩分の範囲(上位・下位の各2.5%のデータ を除外した範囲)を月別深度帯別に集計した。そして、全ての深度帯の水温・塩分範囲に合致する海域を推 定漁場とし、2011年の推定漁場と実際の操業位置を比較した。

【結果および考察】

2008~2010年の推定漁場と操業位置を比較した結果、操業位置は推定漁場の範囲に概ね収まっており、 特に推定漁場が複雑に入り組んだ海域(図3a)や推定漁場の縁辺部に操業位置が多く分布していることが分 かった。このような海域はスルメイカの分布に不適な水温・塩分条件の海域との境界付近になるため、回遊 過程でスルメイカが集積・滞留して好漁場が形成されると考えられる。次に、過去の操業位置の水温・塩分 範囲から将来の漁場が予測可能かどうかを評価するため、2001~2010年の水温・塩分範囲に基づいて2011 年の漁場を推定した。その結果、推定漁場と操業位置は概ね一致し、この場合にも推定漁場が複雑に入り組 んだ海域や推定漁場の縁辺部に実際の漁場が位置していることが分かった(図3b~h)。以上の結果から、 DREAMS\_Mの水温・塩分データを用いることで比較的精度の高い漁場予測が可能と考えられる。



図3DREAMS\_Mの水温・塩分データから推定した漁場(灰色部分)と実際の漁船操業位置(×印)

3. 発表等実績.

なし

#### 輪島〜舳倉島間の通過流量の季節変動と富山湾の流況

石川県水産総合センター 大慶則之

#### 目的

富山湾沿岸はブリを始めとする多くの回遊性魚類が来遊することから、全国有数の定置網漁場となっている。これら水産資源の漁況を判断するためには、富山湾周辺の海況変動機構の理解が基本的に 重要である。富山湾は能登半島沿岸を北上する対馬暖流の影響下にあり、沿岸分枝流の季節変動に対 応して、富山湾内に入り込む流れと富山湾口を横断する流れが強弱を繰り返すことが知られている。 本研究では、輪島〜舳倉島間の水位差から求められる能登半島沿岸の対馬暖流沿岸分枝流の時間変動 と富山湾沿岸の定置網漁場に配置された流速観測ブイの連続観測データを解析することで、沿岸分枝 流の季節変動とそれに対応した富山湾の沿岸流の変動を詳細に解析することを目的とする。

#### 観測および観測資料

これまでの研究で、能登半島北端と舳倉島の南西を結ぶ約 48kmの定線観測区間(図1)で収集した ADCP データから推算 した流量と、輪島〜舳倉島間の水位差には、有意な正の相関 が認められ、水位差から輪島〜舳倉島間の通過流量が推定で きることが判明した。しかし、定線観測時のスポット的な ADCP データには、潮汐流や慣性流が含まれている。このため 2012 年は、3,6,9 月にこの区間で 24 時間 50 分の4 往復観測 を実施して、観測潮汐や慣性成分を除いた平均的な流量を検 討した。さらに、2008 年 10 月~2012 年 10 月の定線観測デー タからこの区間の潮汐を含む流量と水位差の関係を求めて、 対馬海流沿岸分枝の勢力指標としての妥当性を評価した。 ADCP データは、石川県調査船「白山丸」に搭載した ADCP (RD 社製 150kHz BB-ADCP)で観測したデータを使用した。ADCP 観測は第 1 層を 19m, 観測層厚を 8mに設定して実施し、パーセ ントグッド 60%以上のデータの占有率がボトムトラック領域



図1 調査海域図 破線は観測定線, 実線は往復反復観測区間を示す。

で85%以上を占める観測データを抽出して解析した。通過流量は、1分間隔で求めた観測線に直交する 方向の各層の平均流速(北東方向を正)に層厚と1分間の観測距離を乗じて得た各層の流量の総和とし て求めた。なお、流量算出に際して、水面から第1層までは第1層の流速値を適用した。水位データ は、九州大学応用力学研究所が舳倉島に設置した水位計と国土地理院輪島験潮場の毎正時のデータを 輪島の海面気圧で補正した値を用いた。輪島-舳倉島間の水位差は、ADCP 観測が行われた時間帯の輪 島と舳倉島の水位偏差の差の平均値と定義した。

#### 結果と考察

3次の往復反復観測で得られた能登半島北端〜舳倉島間の19m層の流れの分布を図2に示す。3月の 観測では1~3回目は西向きの弱い流れがみられたが、4~8回目は全体に流れが強まり流向も大きく 変化した。これは、この時間帯に北東風が8~10m/sに強まり海況が急変したことが要因と考えられる が、データには著しい品質低下が認められなかったことから、そのまま以降の解析に供した。6月及 び9月の観測では、全般に安定した北東向きの流れが観測された。また、6月には測線の両端に強流 域がみられたのに対し、9月には測線の全域で流れが強まり、陸岸寄りに100cm/s前後の流軸が形成 されていた。これらのデータから各観測回の流量とその平均値を求め、対応する水位差を調べた。成 層期である6月と9月の結果を図3aに、非成層期である3月の結果を図3bに示した。各観測次の平 均流量(標準偏差)は3月:-0.20(0.12),6月:0.36(0.03),9月:1.11(0.08)であり、3月は流量のばら つきがやや大きいが、6月と9月は流量の変動幅が小さい結果となった。図3a,3bには、2008年8月 ~2012年10月の定線観測で得られた潮汐成分を含む流量と水位差の関係も併せて示した。図中の回 帰式は定線観測で得られた潮汐成分を含む流量と水位差の関係を求めたものである。相関係数は成層 期(6~10月)で0.972、非成層期(11~5月)で0.948と共に非常に高い値を示している。これらの式 と各調査回次の平均水位差から求めた平均流量と潮汐成分を除いた実測平均流量の差は、3月:0.02, 6月:0.13,9月:0.06といずれも僅かであった。これらのことから、能登半島北端〜舳倉島間には潮 汐流や慣性振動流の寄与の小さい水位差に支配された流れが存在し、これらは陸棚上を流れるとされ る対馬海流沿岸分枝流に該当すると推察された。図中の回帰式を用いて水位差の時系列データから求 めた、能登半島北端〜舳倉島間の日平均通過流量の推移を図4に示した。日平均通過流量の31日移動 平均は、緩やかな季節変動を示し、夏季に通過流量が増加する傾向がうかがわれた。次年度は、水位 差から推定される対馬海流沿岸分枝流の流量変動の特徴を整理するとともに、能登半島東岸の流況変 動に与える影響について検討を加える計画である。



図2 3次の4往復観測で得られた能登半島北端 ~舳倉島間の19m層の流れの分布。



図3 4 往復観測で得られた流量と水位差の関係 a:成層期 b:非成層期 □:6 月の各観測回の値と平均 値(■) △:9 月の各観測回の値と平均値(▲) ○:3 月の 各観測回の値と平均値(●) +:定線観測時のデータか ら求めた値 枠内の式は定線観測時のデータから求め た水位差と流量の関係を表す。



図 4 水位差の時系列データから求めた、能登半島北端〜舳倉島間の日平均通過流量の推移 細線は日平均値,太線は 31 日移動平均値を示す。

#### 東シナ海陸棚上における植物プランクトンの律速栄養塩変化に関する研究

名古屋大学地球水循環研究センター 森本 昭彦

#### 1. 研究の目的

東シナ海では長江河口域から対馬海峡にかけて海洋中の溶存態窒素と溶存態リンの比(N/P 比)が 100 ~10以下と大きく変化する。この変化は、海洋の一次生産者である植物プランクトンの増殖を律速する 栄養塩が東シナ海西部ではリン、東部では窒素と変化していることを示している。近年の中国の急激な 経済成長により東シナ海・日本海の N/P 比が変化していることが報告されているが、このような変化が 当海域の物質循環等にどのような影響を及ぼすかは分かっていない。本研究では、律速栄養塩のこのよ うな変化がどこで起こっているのか、また律速栄養塩の変化により植物・動物プランクトン組成がどの ように変化するのかを理解することを目的とする。上記のことを明らかにするためには生態系モデルに よる研究が有効であるが、モデル構築のための基礎データが不足しているため、今年度は船舶観測によ りモデル構築および検証のためのデータ取得を行う。

#### 2. 参加者

森本	昭彦	(名古屋大学	地球水循環研究センター)
滝川	哲太郎	(水産大学校	海洋生産管理学科)
柳 哲	萨雄	(九州大学 応	5.用力学研究所)

#### 3. 研究成果の概要

#### 3-1. 海洋観測

植物プランクトン増殖律速栄養塩を判断する N/P 比が 16 となると 予想される済州島南部の東シナ海陸棚上において観測を実施した(図 34N 1)。観測はJAMSTEC の淡青丸により 6 月 23, 24 日に、そして水産 大学校の天鷹丸により 10 月 7~11 日に実施した。淡青丸航海では済州 <sup>33N</sup> 島南部の陸棚上の 3 測点で(図 1 の青点)、天鷹丸航海では黒潮域から 山陰沖の陸棚上にかけての 13 測点において(図 1 の赤点)、CTD よる 水温、塩分、蛍光強度等の鉛直分布観測、蛍光強度が最大となる層で <sup>31N</sup> の植物プランクトンのサンプリング、標準層における栄養塩測点のた のの採水を行った。また、1 測点おきに NORPAC ネットによる動物プ ランクトンのサンプリングも行った。



#### 3-2. 淡青丸航海の観測結果

図1. 海洋観測点図

6月の淡青丸航海では悪天候のため図1に示した3測点でしか観測を行うことができなかった。それ ぞれの観測点でのクロロフィルa濃度最大層における水温、塩分、クロロフィルa濃度、栄養塩濃度を 表1に示す。どの測点も表層で塩分が低く、一方下層では高かった。特にKT01の表層塩分は31.43 psu と他の2測点より1psu程度低く長江希釈水の影響を強く受けていた。また、クロロフィルa最大層に おける栄養塩を比較するとKT01ではリンが枯渇していた。また、クロロフィルa最大層におけるN/P 比はTRBMでは31、KT02では18と大きく違っておりこの海域付近で植物プランクトン増殖律速栄養 塩が変化している可能性が示唆された。植物プランクトンの検鏡結果によると、KT01の植物プランク トン細胞密度が最も多く、珪藻類の Pseudonitzschia spp., Nitzschia spp、微小鞭毛藻など小型種が卓越していた。一方、TRBM では大型の珪藻類である Rhizosolenia や Chaeticeros が卓越していた。両 測点間の距離は 80NM 程度であるが、N/P 比が大きくことなり卓越する植物プランクトン種も異なるこ とが分かった。このことは東シナ海から日本海へかけて N/P 比が変化することにより低次生態系を通し ての物質フローが場所によって変わっていることを示唆している。

					•				
測点名	水深(m)	水温(℃)	塩分	クロロフィル	NO3+NO2	NO2	SiO2	PO4	N/P
				(µg/l)	(µM/l)	(µM/l)	(µM/l)	(µM/l)	
TRBM-1	27	22.69	34.02	0.81	1.25	0.22	3.70	0.04	31
KT01-1	28	17.57	33.24	2.07	3.76	0.57	5.56	_	
KT02-1	42	17.95	34.27	0.58	8.02	0.09	10.50	0.44	18

表1. クロロフィル a 濃度最大層での水温、塩分、クロロフィル a 濃度、栄養塩濃度

3-3 天鷹丸航海の観測結果

天鷹丸で観測された黒潮域(ST10)から山陰沖(MT01)の水温、塩分、クロロフィル a 濃度の断面 図を図 2 に示す。水温、塩分とも各測点において水深 50m 付近まで一様であり混合層が発達している ことがわかる。塩分は6月の淡青丸航海とは異なり比較的高く長江希釈水の影響は小さいと考えられる。 クロロフィル a の断面図をみると MT11, MT05~MT02 でパッチ状に濃度が混合層全体で高くなってい た。植物プランクトンの検鏡結果をみると、黒潮域では植物プランクトン細胞密度は小さく、東シナ海 陸棚上、対馬海峡、山陰沖で大きくなっていた。淡青丸航海のような観測点毎での特徴的な種の違いは それほど見られなかった。測定機器の故障のため栄養塩サンプルの分析ができていないがクロロフィル a 濃度の分布と水塊構造の比較から、天鷹丸航海時は海面冷却による鉛直混合により表層に栄養塩が供 給され、植物プランクトンの増殖は栄養塩濃度に律速されていなかったものと考えられる。

#### 4. まとめ

6月の観測では、長江希釈水の張り出しにより東シナ海陸棚上では N/P 比が空間的に大きく変化して いる可能性が示された。また、N/P 比の違いによる植物プランクトン種の変化も観測された。一方、10 月の観測では鉛直混合により長江希釈水をはっきりと観測できなく、植物プランクトン種の空間変化も はっきりとしなかった。このことから、長江希釈水が東シナ海陸棚上に分布する夏季において、東シナ 海から日本海へかけての観測を実施する必要があることが分かった。このような観測が実行できれば、 N/P 比の違いと植物、動物プランクトン種の関係を示すことができ、さらにこの観測データをもとに数 値生態系モデルを構築することにより N/P 比の空間変化が東シナ海から日本海の物質循環にどのよう な意味を持つのか明らかにすることができる。



図 2. 図 1 の ST10~MT01 の水温、塩分、クロロフィル a 濃度の断面図

#### 24 特 1-4

対馬海峡横断国際フェリーに搭載した ADCP による流況監視体制の強化

韓国海洋大学校 李 昊珍

#### 目的

応用力学研究所では、韓国の海洋研究機関との国際協力を基に、15年以上の長期間に渡って対馬海峡 の国際定期フェリーを利用した ADCP 海流観測を継続しており、世界的にも貴重な海流のデータベース が構築されている。本研究では、2011年度から 2012年度にかけて日韓双方で責任者が交代した機会を とらえ、協力体制を再構築し、永続的なモニタリング体制を整えることを目的とする。さらに、博多港・ 釜山港着岸時の無線データ転送を整備することも急務となっている。観測データの利用についても積極 的な推進が求められる。



対馬海峡横断フェリー「ニューかめりあ」

#### 方法

プサン港における無線データ転送を開始し、日韓で観測データの共有化を図る。データ処理の自動ス クリプトも韓国海洋大学校にて実行し、韓国での利用促進を目指す。

新世代の無線通信方法(WiMAX など)を利用して、博多港におけるデータ転送を高速化・安定化する。 さらにフェリーと応力研の PC を直結した双方向通信も試行する。

過去のフェリーADCP データを海洋観測船の ADCP データと比較するなど品質検査を厳しくし、あ る程度の時空間平均をかけて容量を小さくしたデータセットを作成し、公開する。フェリーADCP デー タを縁辺海モデルに同化し、その再現性について解析する。

#### 結果

まず、2011 年度までに得られている ADCP データを応力研と韓国海洋大学校で共有し、両者で同様の 解析ができるよう処理プログラムの共有化も行った。

リアルタイム通信に関しては、従来は PHS 回線(DDI ポケットの Air-H) によってデータ転送を行っ ていたため、転送量が小さく、接続も不安定であった。電波の弱い場所でも DDI ポケットの PHS が使え るようにブリッジに PHS 中継局を導入するなど、データの転送を成功させるのに苦労した経緯がある。 それでも転送が停止して自動で復旧できない事象が頻発することがあり、結果として観測トラブルへの 対応の遅れが生じて、データに欠測期間が発生したこともあった。

今回新たに採用した通信方式は WiMAX (高速、大容量のモバイルブロードバンド通信の方式のひとつ で、Worldwide Interoperability for Microwave Access の略)通信で、通信速度は最大で下り 40Mbps、 上り 15Mbps であり。下り最大 128Kbps であった PHS 方式より大きく高速化できる。工事不要で導入可 能である事に加えて、速度制限・容量制限が無いために、容量の大きい詳細な観測データの送信やリモ ートデスクトップ接続を目的とした今回の用途に適していると判断した。

多数の WiMAX サービスの中で、「WiMAX + 固定 IP + 年間定額」という条件で ASAHI ネット (http://asahi-net.jp/service/mobile/wimax/)と契約した。WiMAX 通信をのせた PC に固定 IP を付与し てリモートマシン(応力研など)からのアクセスを可能にした。

1日1回(フェリーが博多港に接岸している時間帯)のデータ送信はWinSCPというファイルの暗号化 転送が出来るソフトウェアを使用した。テキスト形式で記述された処理を実行するスクリプト機能(バ ッチ処理機能)があるため、データ転送の自動化が可能であった(そのバッチファイルを最後に資料と して示す)。この転送処理はWiMAXが繋がりさえすれば問題なく実行される。

テスト段階において、船体の外郭が鋼鉄製であるため通信状況はあまり良くなく、通信状況の悪い時 には接続・切断を繰り返すが、早朝の時間帯では比較的安定する事が分かった。国際フェリーであるた めに博多港を出航後、沖合や韓国国内では通信が切断されて通信復旧までリトライを繰り返す。通信復 旧のリトライ中の表示のまま復旧しないケースがある一方、圏内に復帰時に自動で再接続するケースも あった。通信が止まってしまい再接続できない原因を探るために1時間毎にメール送信させたり、仮想 的な環境にて様々な通信切断状態を再現させるなどの実験を行ったが、原因は依然として不明である。

結局、船側の ADCP 観測用 PC において、

#### taskkill /f /im wimax.exe

#### start "" "C:\Program Files\wimax\wimax.exe"

このように WiMAX の通信ソフトの停止・再起動を行うバッチファイルを作成してタスクに登録、博多港 に停泊している時間帯に、毎日定時実行することで、安定した通信状況を確保することができた。

結果、従来はデータ送信が難しかった容量の大きい詳細な観測データの送信も可能となり、リアルタ イムに近い状況で迅速なデータ活用(日本海海況予報モデルへの境界条件の提供等)やリモートデスク トップ接続による船のデータ収集 PC の遠隔操作も実現された。観測状況を随時確認できるようになり、 遠隔操作による観測の設定変更や再スタートが可能になり、良質なデータの継続的な取得が見込め、人 的負担も軽減される効果があった。

なお、リモートデスクトップ接続にあたっては、画面タブにおいて

・画面の色:15 ビット

エクスペリエンスタブにおいて、

- ・接続速度に低速ブロードバンドを選択
- ・「ビットマップのキャッシュを保持」以外のチェックを外す

のように、軽めの設定を適用することでフリーズしたり遅延したりを防ぐことが可能となる。

#### 付録

データ転送を自動化したバッチファイルの例:データを収集している外部 PC から応力研のサーバに アクセス、データの同期を行う

"testsynchro.bat"外部 PC で winscp を testexample.txt に従って実行するバッチファイル

"C:¥Program Files (x86)¥WinSCP¥winscp.exe" /console /script=testexample.txt

"testexample.txt" 実行内容のテキストファイル

# バッチモードに設定し、確認/問い合わせを無効にする

option batch on

# ファイル上書きの確認などを無効にする

#### option confirm on

#外部 PC から RIAM のサーバに接続

open userID:password@xxx.riam.kyushu-u.ac.jp

# 外部 PC のディレクトリを変更

#### lcd "C:\U0044WORK\u00e4xxxx\u0044"

# RIAM サーバでのディレクトリを変更

cd /home/userID/yyyy

# 外部 PC と RIAM サーバのディレクトリを同期

synchronize remote AAAA/ BBBB/

# 切断

#### Exit

なお、ここで AAAA はデータのある外部 PC のディレクトリ名、BBBB はデータを同期させたい RIAM サー バのディレクトリ名である。

#### 対馬海峡から日本海山口県沖にかけての海洋環境変動

水産大学校海洋生産管理学科 滝川哲太郎

#### 1. 目的

対馬海峡は東シナ海と日本海をつなぐ唯一の水路であり,対馬暖流は,東シナ海から対馬海峡を経て 日本海に流入する.対馬暖流は,対馬海峡に位置する対馬によって西水道と東水道通過流の2枝に分か れて,日本海へ流入する.多くの研究では,西水道通過流が東韓暖流と沖合分枝流の2つに分かれ,対 馬暖流が日本海南西部で3分枝化することを示している.海洋データ同化の手法を用いた数値モデル研 究では,東水道通過流が,山口県萩市沖の見島によって日本沿岸分枝と沖合分枝の2つの北東流に分か れる結果を得ている(広瀬ら,2009,海と空).このように,現在でも対馬暖流の流路について数多くの 議論がなされており,平均的な対馬暖流流路の描像は未解明な部分を残している.本研究では,見島と その南側対岸の青海島に水位計を設置し,両島間の水位差を測定した.また,萩-見島間のフェリーを 用い,見島以南のフェリー航路上の表層水温を測定した.

また,夏季の対馬海峡には、中国大陸の長江起源の淡水が多量に流入する.本研究では、東シナ海から移流されてくる大陸起源の低塩分水を捉えることを念頭に、対馬海峡東水道における水温・塩分の連 続測定を実施した.

#### 2. 観測

対馬海峡東水道から山陰沿岸の4 観測点(美津島,沖ノ島,蓋井島,青海島通)に水温・塩分計を設置し,1時間間隔で表層の水温と塩分を測定した.水温・塩分計は,ピストン式ワイパーで電気伝導度 センサーを測定毎に自動清掃できるJFEアドバンテック社製のCompact-CTWまたはINFINITY-CTW を使用した.各測点における観測期間は以下の通りである.沖ノ島では,現在(2012年2月末)も観 測を継続中である.

美津島	2012/05/29 14:00 $\sim$	2012/11/13 09:00
蓋井島	2012/05/29 11:00 $\sim$	2012/12/27 12:00
青海島涌	2012/06/11 10:00 ~	2012/12/28 05:00

美津島,蓋井島,青海島通については漁業用定置網に,沖ノ島については海底からブイを立ち上げ,そ れぞれ 4~5 m 深に計測機器を設置した.蓋井島と通の水温・塩分計の回収時に,ピストン式ワイパー が故障しており,伝導度センサーの内外部に多くの生物が付着していた.

萩市浜崎と、その北北西約45km沖合の見島の間を毎日往復する定期旅客船に、水温収録装置を取付け、航路上の表層水温モニタリングを実施した.さらに、青海島通と見島宇津に小型水位計を設置し、水位差から長門-見島間を通過する流量変動の把握を試みた.本報告での水位データ使用期間は、2012/8/27~11/21(青海島通)と8/29~11/22(見島宇津)であり、現在(2012年2月末)も観測を継続している.本報告では、各島における水温・塩分観測結果と、青海島通と見島宇津の水位観測結果について報告する.

#### 3. 結果

美津島,蓋井島,青海島通で得られた水温・塩分の時系列を図1から図3に示す.蓋井島と青海島通では,生物付着防止用ワイパーの故障のため,塩分値は観測期間中に異常値となった.

青海島通と見島宇津で観測された水位と水温の時系列を図4と図5に示す.水位変動は約12時間または約24時間の潮汐周期が卓越しており,約15日周期の大潮・小潮の変動を確認できる.図6に48時間のタイドキラーフィルター(花輪・三寺,1985,沿岸海洋研究ノート)を施した両島の水位とその差を示す.水位差( $\Delta\eta$ )の変動幅は約±4 cm であった.地衡流平衡( $fu = -g\Delta\eta/\Delta y$ )を考えると,見島

以南を通過する東方流速 (u) の変動は±12 cm s<sup>-1</sup>と見積もられた(ここで、 $f = 8.2 \times 10^{-5}$  s<sup>-1</sup>, g = 9.8 m s<sup>-1</sup>,  $\Delta y = 40$  km). 見島以南の平均水深 (h) を 70 m とすると、流量 ( $V = u \cdot h \cdot \Delta y$ ) 変動は、±0.34 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>となる.



名古屋大学地球水循環研究センター 森本 昭彦

フェリーニューカメリアおよび HF レーダーを利用した

対馬海峡の物理変動に対する生物応答の研究

名古屋大学地球水循環研究センター 石坂丞二

目的

対馬海峡は東シナ海と日本海をつなぐ海峡であり、最近東シナ海の環境変化に伴って、 赤潮やエチゼンクラゲなどの問題がすでに起こっており、また長江に三峡ダムが建設され るなど、今後の環境変化も予想される。九州大学応用力学研究所では、博多と釜山間を運 航するフェリーニューカメリアで流速、水温・塩分、クロロフィル蛍光などのモニタリン グを行なっており、すでに数年分のデータが蓄積されている。この中でもクロロフィル蛍 光は、生物海洋学的なデータであり、東シナ海の環境変化の指標となる可能性がある。ま た、海洋レーダーでも周辺海域の表層の流れ場が測定されている。そこで、本研究では、 フェリーニューカメリアで取得されたクロロフィル蛍光データに関して、その変動要因に ついて明らかにするとともに、対馬暖流の変動と漁獲データを比較する。

#### 方法

同フェリーで取得されているクロロフィル蛍光に関して、現場データを用いて、クロロフ ィル a 濃度に変換する。また同フェリーで同時に取得された水温・塩分や、他の船舶およ び人工衛星のより広域なデータと比較を行なうことによって、対馬海峡でのクロロフィル a の変動に関して解析を行なう。また、海洋レーダーによって対馬暖流の位置を調べ筑前海 の漁業データと比較を行う。

結果·考察

2012年5月13日に、応用力学研究所の松野健博士、台湾国立大学の劉倬騰博士他とともに、 博多から釜山までニューカメリアフェリーに乗船した。そして、クロロフィル蛍光のキャ リブレーションのための連続測定の配管からサンプリングを行なった。またフェリーの復 路である14日および15日にも応用力学研究所と台湾国立大学の研究者が乗船し、サンプリ ングを行った。これらのサンプルは、船上で濾過し、このフィルターをジメチルホルムア ミドで抽出した状態で実験室に持ち帰り、Welschmeyer法でキャリブレーション済みの蛍光 高度計でクロロフィルaを測定した。その結果、21サンプルのクロロフィルa濃度は、0.084 から0.696 mg m<sup>-3</sup>の間であった。この時、フェリーで測定されたクロロフィル蛍光からのク ロロフィルa濃度は0.235から1.03 mg m<sup>-3</sup>で、決定係数が0.797、傾きが1.23、切片が0.082 と、一部昼間のデータも含んだ状態として、よい相関を示した。一方、台湾国立大学でも 同様なサンプリンを行い、アセトン抽出、酸添加法(Holm-Hansen法)で測定したが、そち らでは0.053から0.307 mg m<sup>-3</sup>で、決定係数は0.936とよいものの、傾きが0.378、切片が0.016 と、我々の測定と比較するとかなり低めであった。抽出法および測定法は異なるものの、 一般的にはこれらの方法の誤差は小さく、3倍近くの誤差は考えにくく、今後さらに検証が 必要と考えられる。また5月15日および17日には、MODIS/AQUAの画像も取得され、パター ンはフェリーで測定されたクロロフィルとよく対応した。いずれのデータも、日本周辺と 対馬西側、韓国周辺で比較的クロロフィルa濃度が高く、低温である典型的なパターンを示 した。

また、2006年夏にフェリーで観測された台風の影響について、月間海洋に投稿した総説 が印刷になるとともに、日本地球惑星科学連合の国際台風セッションで招待講演を行った。

一方、玄界灘における鯵の漁場の経年変動は、海表面水温分布から対馬海峡に流入する 対馬暖流の方向と関連している可能性が示唆されている。そのため、応用力学研究所のHF レーダーで観測されている同海域の潮汐を除いた流速を調べたところ、玄界灘における対 馬暖流の流路がはっきりと確認された。今後、この流路のパターンと鯵の漁場の経年変動 を比較することによって、両者の関連がはっきりすることが期待される。

#### 研究成果報告

- Joji Ishizaka · Akihiko Morimoto · Eko Siswanto · Keiko Yamada · Takashi Makino, Influence of Typhoon to Primary Production of East China Sea and Sea of Japan, 日 本地球惑星科学連合 2012 年度連合大会,千葉市, 2012.5.25 (Invited)
- 2. 安藤朗彦・中田英昭・石坂丞二 玄界灘における対馬暖流の流動変化がマアジ漁場形成 に及ぼす影響, 2012 年度九州沖縄地区合同シンポジウム、2012.12.7
- 3. 石坂丞二・エコシスワント・山田圭子・牧野高志(2012) 東シナ海・日本海における基礎生産への台風の影響、沿岸海洋研究, 50, 39-44.

#### 研究組織

石坂	丞二	名古屋大学地球水循環研究	センター 教授		代表者	研究全般
森本	昭彦	名古屋大学地球水循環研究	センター 准教授		物理デー	タの解析
Xu Yo	ungjiu	名古屋大学大学院環境学研	究科博士後期課程	3年	Chl.デー	タ解析
安藤	朗彦	福岡県水産海洋技術センタ	一 研究部漁業資活	原課長	漁獲デー	タ解析
市川	香	九州大学応用力学研究所	准教授	世話人	解析に関う	する助言
広瀬	直毅	九州大学応用力学研究所	准教授	フェリー	ーデータ観	測
吉川	裕	九州大学応用力学研究所	准教授	レーダー	一観測	
松野	健	九州大学応用力学研究所	教授	解析に	関する助言	

24 AO-1

#### 海洋乱流の観測およびモデリング研究

東京大学大学院 理学系研究科 教授 日比谷 紀之 九州大学 応用力学研究所 准教授 吉川 裕

地球温暖化や海洋酸性化など、環境変化に果たす海洋の役割は大きい。その役割を正しく 評価し、今後を精度よく予測するために、海洋モデルや大気海洋結合モデルの高精度化が取 り組まれている。しかし、十分な予測信頼性を得るには至っていない。海面境界過程や混合 過程にかかわる海洋乱流現象が十分に解明されていないことが、その原因の一つである。

本研究課題では、海洋乱流の観測やモデリングなどに携わる研究者が集い、互いの知識や 疑問点を共有し、海洋乱流現象の理解を深めるとともに、今後の研究の展開を模索すること を主眼として、2月21日から22日にかけて、東京大学理学部で研究会を開催した。プログ ラムの詳細は最後に掲載するとおりである。

最初の講演では、古市より東シナ海陸棚上における乱流強度の観測に関する話題提供がな された。東シナ海での潮流混合の定量的な把握を行うために行われた乱流強度の観測結果が 紹介され、乱流強度のパラメタリゼーションの提案がなされた。また、海底から離れた中層 における乱流強度の成層強度やシアー強度との関連についての先行研究との比較もなされ た。一方堤は、瀬戸内海の伊予灘で行われた詳細な乱流強度観測に関する話題提供を行った。 海底起伏の激しい場所で抵抗係数が 50 パーセント程度増加すること、そして海底地形が直 上の乱流に及ぼす影響を報告した。次に和方は、潮流楕円の回転方向や長軸の向きなどの鉛 直変化の特性について、まず線形解析によりその特徴と原因を整理し、その後非線形項も含 んだ数値実験(LES)で検証を行い、概ね線形解析で得られた現象の再現に成功した。吉田 は北太平洋西部域での混合過程、とりわけ二重拡散対流の影響に関する話題提供を行った。 乱流計で計測した乱流エネルギー散逸率と、二重拡散対流発生の指標となるターナー角など を解析した結果、二重拡散対流によりエネルギー散逸率が2~3倍大きくなったと予想され る事例や、二重拡散対流により鉛直シアーが強化されうる(鉛直渦粘性係数が負となりうる) 事例の紹介があった。井上は、北太平洋亜熱帯域の生物基礎生産と関連する物理過程に関し て講演した。INBOX(西部北太平洋物理生物観測実験)と名づけられた観測の成果である、 クロロフィルの増加時に鉛直混合が強まる事例や、渦の移動に伴い溶存酸素極大層における 溶存酸素濃度の増加が見られた事例などは、いずれも物理場が海洋低次生態系の変動に強く 関与していることを示す結果であり、今後のさらなる成果が期待される内容であった。

安田は千島列島に位置するブッソル海峡での乱流混合強度の観測と、そのような混合が北 太平洋の海洋構造に及ぼす影響に関して講演した。CTDで計測される密度逆転から乱流エネ ルギー散逸率を推定する手法を改良し、ブッソル海峡を横断する断面での乱流エネルギー散 逸率の分布を求め、その成因として同海峡で卓越する海底捕捉波に伴う乱流混合が重要であ る可能性を強く示唆する結果を得た。次に日比谷は、深海での内部波に関連して生じるエネ ルギー散逸に関する従来のパラメタリゼーション(Gregg 1989)の問題点について指摘し、 その問題点を克服するための最近の取り組みとその考え方について説明を行ったのち、過去 の乱流エネルギー散逸率、成層強度、シアー強度の観測データを用いて、パラメタリゼーシ ョンの妥当性の検証を行った。その結果、最新のGHPパラメタリゼーションは、概ね良い結 果をもたらすことを確認した。遠藤は、東シナ海で行われた観測結果を解析し、夜間対流の エネルギー散逸率との差を求めたところ、残渣が大気研究などから予想されるエネルギー輸送率 と概ね一致することを見出し、海洋における対流境界層のエネルギー収支が大気境界層のそ れと同様であることを指摘した。丹羽は、潮汐エネルギーの内部波へのエネルギー転嫁率に 関する数値実験を行い、エネルギー転嫁率の解像度依存性と、その空間分布およびその要因 について詳細な検討を行った。さらに、潮汐エネルギーの散逸が全球深層循環に果たす役割 を数値実験で検討した結果、生成された内部波エネルギーが遠方に輸送され散逸する効果を 組み込むことで、観測される深層循環を概ね再現するという結果を得た。次に吉川は、海面 加熱時の風成流、風成乱流のスケーリングに関する話題提供を行った。海面加熱時の混合層 深度の外部パラメター依存性を観測データから調べた結果、大気境界層の研究で提案された スケーリングが海洋でも適用可能であることを見出した。さらに数値実験(LES)を行い、 混合層深度を用いて渦粘性・拡散係数や風成流や混合層内成層強度もスケーリング可能であ ることを指摘した。最後に井手は、吹送流に及ぼす熱フラックスの日変化の影響について講 演した。現実的な成層強度や風応力変動、熱フラックス変動を与えた実験を行い、熱フラッ クスの日変化の影響が大きいことを示し、次に日変化する熱フラックスが物質の漂流に対す る影響を検討した。

以上の話題提供とその後に行われた活発な質疑応答や議論は、今後の研究の方向性を考える上で非常に有意義であった。海洋乱流のコミュニティーを形成・維持するためにも、このような集会は有効であり、来年度も継続して進めることも確認された。

----- プログラム -----

- 2月21日
- 13:00 14:00 古市 (環境研)
  - 夏季の東シナ海における乱流強度観測
- 14:00 15:00 堤 (愛媛大)伊予灘における乱流強度の時空間変動特性
- 15:00 16:00 和方(九大) 潮汐乱流のいくつかの特性について
- 16:00 17:00 吉田(東京海洋大)
   西部北太平洋での混合過程の研究
- 17:00 18:00 井上(海洋研究開発機構)亜熱帯の木曽生産と物理過程+その他
- 2月22日
- 10:00 11:00 安田(東大) 密度逆転を利用したブッソル海峡における乱流混合強度の見積もりと海洋構造に対 する影響
- 11:00 12:00 日比谷(東大) マルチスケール・プロファイラを用いた深海乱流のパラメタリゼーションの有効性の 検証
- 13:15 14:15 遠藤(九大) 夜間対流混合層内における乱流運動エネルギー収支の見積もり
- 14:15 15:15 丹羽(東大) 全球数値シミュレーションから求められた内部潮汐波エネルギー転嫁率のグローバ ル分布の水平格子間隔依存性について
- 15:15 16:15 吉川(九大) 安定境界層のスケーリング則:混合層深度の全球分布から見えるもの
- 16:15 17:15 井手(九大) 海面熱フラックスの日変化が表層吹送流に及ぼす効果とその広域海洋への適用

### 海洋窒素循環に関する研究

神戸大学 自然科学系先端融合研究環

内海域環境教育研究センター 林 美鶴

1. 目的

海洋の基礎生産にとって重要な栄養塩として窒素やリンが挙げられる。これらの物質は海洋中で、 プランクトンなどの有機態や、イオン(硝酸やリン酸など)で無機態として存在する。さらに窒素 はリンと異なり、気体としても存在する。これまで海水中の窒素循環過程において、気体としての 窒素は十分に評価されてこなかった。しかし気体の中には地球温暖化ガスの一種である一酸化二窒 素が含まれており、例えば淀川河口の海水中一酸化二窒素濃度は、海底堆積物中の脱窒に加え、海 水中での硝化により生成されて、外洋深層と同程度で高濃度であり、これが直接大気に放出されて いることが明らかになっている。また一酸化二窒素は船舶の排ガス中にも含まれ、貿易立国である 日本の沿岸には多数の船舶が航行し、大量の一酸化二窒素が排出されている。

国際海事機関(IMO; International Maritime Organization)は、船舶排ガスからの窒素・硫黄酸化物排 出規制に続き、温室効果ガス排出規制を検討している。しかし一酸化二窒素は、燃焼後の冷却・減 圧過程で化学変化を起こすため測定手法が構築されておらず、運航船舶で排ガス中濃度を実測した 例はほとんどない。そこで本研究では、運航中の船舶で一酸化二窒素の濃度測定を実施し、測定手 法を構築すると共に、排出量の算定を行う。

#### 2. 方法

観測は神戸大学大学院海事科学研究科付属練習船深江丸で実施した。主機は6気筒4サイクルディ ーゼル機関で、燃料油には動粘度1.963cSt、密度0.8391g/cm<sup>3</sup>(15℃)、硫黄分0.027wt%、窒素分0.01wt% のA重油を使用している。排ガスは高温で、且つ水分や煤塵などが含まれている。このため図の通り、 排ガスエコノマイザーを出た直後の排ガスを急激に冷却して化学変化を抑えると共に、乾燥カラムと フィルターを通して除湿と煤塵除去を行った後、一酸化二窒素濃度測定器で濃度を測定した。また、 に機関の出力を変化させ、それに伴う濃度変動を解析した。

燃料消費率(g/kwh)および単位時間・単位出力あたりの一酸化二窒素(N<sub>2</sub>O)排出量(mg/kwh)は 次式を用いて算出した。

[燃料消費率(g/kwh)]= $\frac{1000 \cdot [燃料消費量(m^3/h)] \cdot [燃料密度(kg/m^3)]}{P(kw)}$ 

 $[N_2O排出量(mg/kwh)] = [排気量(m^3/h)] \cdot [N_2O濃度(ppb)] \cdot \frac{[N_2O\mathcal{O}分子量]}{22.4 \times 10^3} \cdot \frac{60}{P(kw)}$ 

[排気量( $m^3$ )] =  $\alpha \cdot N \cdot (\pi D^2 / 4) \cdot L \cdot n$ 

α=0.5(4 サイクル) N:回転数(rpm) D:ボア径(m) L:行程(m)
 n:シリンダ数(6) [N₂O分子量]=44 P:出力(kw)

負荷変動実験の結果を用いて、今回の観測期間中に深江丸から排出された一酸化二窒素の排出量 を推定した。使用した燃料の量に対しての排出量を求めるために以下の式によって一酸化二窒素排出 係数(mg/kg-Fuel)を算出した。

ГЛ	1 0 排出 係 数	(mg / kg - fuel)] =	[ <i>N</i> <sub>2</sub> <i>O</i> 排出量	(mg / kwh )]	
L			[燃料消費率	(g / kwh )]	
_	[排気量 (m <sup>3</sup>	(h)	∩濃度 (	$[N_2O_2]$	子量].60
	[燃料消費量	(kg)] · [ $N$	20	22.4	$\times 10^{-6}$ · 00

#### 3. 結果

通常航海状態で排出される一酸化二窒素濃度は、他の機関運転状態に比べ最も高いが、単位時間・ 単位出力当たりの質量換算値では最小値である。このとき燃料消費率は最も低くなっており、一酸化 二窒素の排出低減には燃料消費率の向上が有効であると言える。低負荷時は一酸化二窒素排出量が大 きく、不完全燃焼が原因であると思われる。観測期間中の深江丸のからの一酸化二窒素排出量は115kg であり、二酸化炭素換算で34tonである。船舶からの一酸化二窒素排出量は、一酸化二窒素濃度(ppb)、 排気量(m<sup>3</sup>/h)、及び燃料消費量(kg)を測定すれば推定可能である。

#### 4. 研究成果報告

なし

#### 5. 研究組織

代表者	:林美鶴	分担者	:山下栄次	分担者	:柳哲雄
所属	:神戸大学	所属	: 岡山理科大学	所属	:九州大学
			技術科学研究所		応用力学研究所
役職	: 准教授	役職	: 教授	役職	: 教授
担当	:観測	担当	: 観測	担当	: 観測結果評価



図 船舶排ガス中一酸化二窒素濃度測定器システム

#### 水中ビークル運用のための装備に関する研究

長崎大学・水産学部 兼原 壽生

#### 1. はじめに

近年、海洋観測・調査用の海中ビークルは、専 用の母船を必要とする大型の物から、専用の母船 を必要としない小型のものまで数多く作られ、実 用的な段階へと入りつつある。特に、技術者の支 援を必要とせず、海洋物理の研究者が比較的容易 に海洋観測に使用できる、中、小型のビークルは、 専用母船、すなわち専用の母船に装備された投 入・回収装置を持たないため、作業がいっそう困 難なものとなる。長崎大学、長崎丸は応用力学研 究所と共同で長年海洋観測を行っており、応用力 学研究所所有の海中ビークル運用の実績を持つ。 そこで本研究では、ビークルを損傷することなく、 波浪中で、安全にビークルを運用するために必要 な装備について調査・研究を行う。多様な形状の ビークルに対応可な装備は、海洋観測・調査に大 きく貢献するものと考えられる。

本年度は、改良が終了した応用力学研究所円盤 型水中グライダーの海上試験、ビークル投入・回 収装置の改良、JAMSTEC「かいよう」で行われた水 中ビークル試験への参加を行ったので報告する。

2. 円盤型水中グライダーの海上試験

イリジウム通信装置の搭載



Fig.1 改良が終了した円盤型水中グライダー

ビークルの動作テストが 2012 年 10 月長崎港沖 の水深 50m 海域と 100m 海域で実施された。50m 海域では小型のフロートを準備し、安全のためビー クルとフロートを細いロープでつなぎ、かつ、ダイ バーの支援が得られる状態で試験を行った。ビーク ル設計最大深度は 100m であるが、動作不良により ビークルが浮上できなかった場合に備え、第一実験 海域はダイバーによる回収が可能な 50m 水深海域 とした。ビークルの浮上位置を Fig.2 に示す。4 回 目の浮上時にイリジウム通信装置・GPS のアンテ ナが破損したため 5 回目の潜航を開始する前にビ ークルを回収したが、ビークルの潜航・浮上動作に は問題がないことを確認した。

Fig.2 第一実験海域におけるビークル浮上位置

水深 50m 海域での試験が順調に行われ、ビークの 動作にも問題がないことが確認されたので、次に、 水深 100m 海域での試験を安全索無しで実施した。 アンテナが破損しているためビークルの浮上位置 を記録することはできなかったが、3回の連続潜 航・浮上に成功した。

実験中は超音波式位置検出装置により本船から のビークル相対位置を計測し、ビークル浮上予測位 置に本船を移動するように操船を行った。

#### 3. ビークル投入・回収装置の改良

ビークルの改造により、艇体上部にアンテナ等が 突き出すことになり、波が高いとビークル回収時に アンテナと投入・回収装置が接触する危険性が指摘 された(Fig.3)。今回は幸い巧みなクレーン操作に より接触は回避できたが、装置のビークル入り口側 の形状を変更することにした(Fig. 4)。 かさ上げ した部分をケージに固定してしまうと4 t トラッ クに積み込むことができなくなるため、取り外し可 能の構造となっている。改良部分の設計には応用力 学研究所技術室丸林賢次氏の協力を得ました。ここ に深く感謝の意を表します。



Fig. 3 ビークル回収状況



Fig.4 改良されたビークル投入・回収装置

#### 4. JAMSTEC「かいよう」で行われた水中ビーク ル試験への参加

2013年1月に実施された JAMSTEC 所有の水中 グライダー「ツクヨミ」の動作試験に参加し、他船 で実施される水中ビークルの試験実施方法につい て情報を収集した。

試験は研究船「かいよう」で実施された。「かい よう」は半没水型の双胴船で、長崎丸の通常タイプ のクレーンと異なり、船尾にエーフレームを備えて いる。 Fig.5 は出向前に専用岸壁に停泊中の「かいよう」 で実施された事前動作確認の様子である。主として 海水とは比重が異なるため水槽では実施できない ビークルの浮力調整が実施された。これは九州大学 のビークル試験時にも行われる手順であり、浮力調 整容量の小さい水中グライダーでは重要な作業で あることが再認識された。



Fig.5 事前テスト風景

Fig.6 に相模湾で実施された試験終了後のビーク ル回収時の様子を示す。九大ビークルの回収とは異 なり、作業艇の支援を得ての回収作業であった。さ らに大型のビークルではスイマーの支援を得ての 回収となるとのことであった。水中ビークルの運用 では投入・回収作業をいかに簡単にかつ安全に行う かが非常に重要であることがわかった。



Fig. 6 ビークル回収状況

- 5. 研究組織
- ·研究代表者

兼原壽生(長崎大学水産学部教授)

- 114/1140
- ·研究協力者
  - 青島隆、森井康宏、山脇信博(長崎大学水産学 部 准教授)
  - 清水健一、内田淳(長崎大学水産学部 助教)
  - 下田真子(長崎大学水産学部 技術職員)
  - 中村昌彦(九州大学応用力学研究所 准教授、 所内世話人)

稻田勝(九州大学応用力学研究所 技術職員)
# 【研究の目的】

越前海岸の鷹巣(図1参照)では、一時的に流 れが速くなり、地先で行われている定置網では 操業ができなくなるときがある。一時的な強い 流れの発生は漁業者によって経験的に認識され ているものの、その発生過程については十分に 理解されていない。そこで本研究では越前沿岸 域の表層流の基本特性の解明を目的として、定 置網近傍で係留観測を実施して連続データを収 集した。観測は日本海研究を先駆的に展開して いる九州大学応用力学研究所(所内世話人:千 手智晴准教授)と、当海域で観測の経験を持つ 福井県水産試験場(担当:鮎川航太氏)、福井県 立大学の3機関が協力して行った。取得した係 留期間中のデータは7月末から8月頃に流れが



を設置した.

強くなる現象を示していた。本報告では、この時期の流れと沖合の流れの関連性について主に報告する。

### 【データ解析および現地観測】

鷹巣の定置網は、若狭湾湾口から約20km東に位置している。係留観測は福井県水産試験場の調査船「若 潮丸」を用いて、定置網近傍に流速計、水温・塩分計、水温計(10mから40mまで10mおき)を4月23 日~12月13日まで設置した。途中、機器のメンテナンスのため観測機器の交換を実施した。観測機器 の測定間隔は流向・流速計および水温計が10分、水温・塩分計(時系列図は省略した)は60分とした。

# 【結果】

図2には、海面下10mに設置された流速計のデータを示した。鷹巣では岸に沿って北東方向へ向かう流 れが最も卓越しているものの、係留期間中に複雑に変化していた。4月から7月中旬までの流速強くて も20cm/sec程度であったが、7月下旬に50cm/secを超える強い流れが発生し、その強い流れは8月下 旬まで継続した。8月下旬には流向が北東方向から南西方向に急に変わり、流れは10cm/sec程度まで弱 くなった。その後は、10cm/sec程度の北東向きと南西向きの流れが交互に発生し、11月頃になると





図3 鷹巣における 2012 年7月1日-9月30日までの海 面下10mの流速(a)および水温(b)の時系列.



北西方向の流れに変化した。

図3には、7月から9月までの流速ベク トルの時系列と、水温のイソプレットを示 した。北西向きの流速が強くなった7月下 旬頃から、水温構造は急に変化し、暖水層 の厚さが次第に大きくなった。(図3では 24℃の等温線を太く示している。)24℃の海 水は7月下旬頃から現れ始め、7月30日頃 から8月中旬までは水深25m程度に達した。 8月15日頃から再び急に暖水層厚は増加し、 8月の下旬頃には上層が28℃程度、下層で 24程度の水温構造に変化した。7月中旬か ら、8月上旬にかけての沖合の状況は調査 船による観測ではスナップショット的な情 報は得られるものの、沖合の流況過程につ いて理解できない。そこで、九州大学応用

力学研究所が「日本海海況予測システム」 (http://dreams-i.riam.kyushu-u.ac.jp/vwp/)で公開して いる同時期の数値シミュレーションの結果を参考にして考 察した。図4は鷹巣で流れが速くなる前の7月13日の計算 結果と、流れが速くなった8月16日の計算結果を示した。8 月16日は福井県水産試験場の調査船「福井丸」が若狭湾内 の流況を観測していたので(図省略)、その結果と8月16日 の計算結果を比べ、シミュレーションの結果が現実の流動パ ターンを再現していることを確認した。

流れが速くなる前の7月13日は、若狭湾西部に強い流れ は見られるものの、鷹巣の沖合には強い流れはない。一方、 8月16日の計算結果をみると若狭湾の沖に反時計回りの循環 流が形成され、対馬暖流は鷹巣沖では接岸して北東向きの流 れが強くなっていた。観測の結果およびモデルの結果は、対 馬暖流が越前海岸沖で接岸流路をとることにより、鷹巣の流 速は一時的速くなり、水温構造も変化したことを示している と推察される。

最後に、観測にご協力頂いた福井県水産試験場の調査船 「若潮丸」、鷹巣定置組合の皆様に厚くお礼申し上げる。

↑図4 日本海海況予測システムによる鷹巣沖の流況のシミュレーション結果、(上図)7月13日(鷹巣の流れが速くなる前)、(下図)8月16日(鷹巣の流れが速いとき),引用:九州大学応用力学研究所「日本海海況予測システム」(http://dreams-i.riam.kyushu-u.ac.jp/vwp/).

# 数値モデル構築に資する植物プランクトンの環境指標性に関わる研究

福岡女子大学 国際文理学部 環境科学科 山田真知子

# ・目的

長江から海域に流入する河川水の影響が中国沿岸にとどまらず、東シナ海さらには日本海にまで 及ぶことが推定される。そこで、影響を特定できる環境指標として植物プランクトンを選定し、そ の有用性ならびに影響の及ぶ範囲を検討する。

### ・研究方法

共同研究者の九州大学応用力学研究所の柳 哲雄教授、名古屋大学の森本昭彦准教授、および滝 川哲太郎講師により、調査地点が決定され、試料の採取が行われた。各調査定点では Chlorophyll a 濃度が最大値を示す水深の海水が 3~6L 採取され直ちに濃縮・固定された。試料中の植物プランク トンを光学顕微鏡観察によって同定・計数し、組成を明らかにした。なお、固定液は固定液により 植物プランクトンの細胞が破壊されないようルゴール系固定液を用いた。得られた検鏡結果から、 東シナ海、日本海および両海水の混合域に特徴的な出現種の検討を行うとともに、得られた植物プ ランクトン組成をもとにクラスター分析を行い、地点間の類似度をみることによって、東シナ海と 日本海の境界線(混合域)を推測する。

### ·研究結果

図1に示す調査地点で、1回目の調査は2012年6.月23・24日に実施されたが、海の時化が著しかったため、サンプル数は3試料にとどまった。2回目調査は10月7~11日の5日間にわたって行われ、13試料が採取された。

1回目調査の東シナ海寄りの KT101 地点ではハプト藻の1種や微小鞭毛藻(図2)、珪藻類の Pseudonitzschia spp.や Nitzschia spp.、日本海寄りの TRBM 地点では大型の珪藻類 Rhizosolenia や Chaeticeros などが多種出現してボリューム的にも卓越しており、中間に位置する KT102 では植 物プランクトンは最も希薄であったが動物プランクトンの糞の多いことが特徴的であった。

2回目調査で特徴的であったのは、黒潮影響海域である ST10 および ST05 の 2 地点で植物プラ ンクトンが最も希薄で黒潮の特徴を良く反映していた。一方、最も東シナ海寄りの MT11 では珪素 類の Guinardia striata、Rhyzosolenia alata および Rhyzosolenia setigeraga が卓越し(図 3)、組 成が豊富であった。また、MT09 を中心に径 2µm の球形小型藍藻類の卓越が認められた。日本海側 では対馬の日本海側の CL04 を中心に珪藻類の Guinardia striata やLeptocylindrus danicus が卓越 し(図 3)、組成も豊富であった。

このように、東シナ海や日本海に約 40km 以上の間隔で設定された調査地点においては、植物プ ランクトンはバッチ培養されているかの如く各調査地点で組成が異なっていることが確認され、水 塊の特徴を反映するす環境指標として使用できる可能性の高いことが示された。今後も、詳細な解 析を共同研究者と継続して行う計画である。

# ・研究成果の報告

共同研究者の柳 哲雄教授が研究成果を含めて、次の研究集会で報告を行う予定である。 応用力学研究所研究集会

地球温暖化と急激な経済発展が東アジア域の海洋・大気環境に及ぼす影響の解明

2013年3月18日

東シナ海と日本海の低次生態系の相違



126E 127E 128E 129E 130E 131E 132E ハプト藻の1種、鞭毛藻や珪藻類 Nitzschia sp が観察される 図 1 調査地点 ●,7月調査; ●, 10月調査



バー:20µm

いずれも珪藻類

#### 海洋大循環の力学、とくに中深層循環に及ぼす海岸・海底地形の影響に関する研究

北海道大学大学院 地球環境科学研究院 水田元太

#### 1. 目的

海洋中深層の循環は気候の形成に重要な役割を果たすが、そのしくみは十分には理解されていない。 本研究では、数値計算、観測、理論の分野の研究者がそれぞれの立場から最新の知見を持ち寄り、それ らを整理することで、海洋循環のしくみに対する展望を得ることを目的とする。

# 2. 手法

2012年11月に研究会を開き、以下の話題が提供された。各話題について十分な時間を取って発表が行われ、研究者間で活発に議論を行うことにより有効に研究が進められた。

(1) 西 武宏・加古真一郎・磯辺篤彦 (愛媛大 CMES)「東部亜熱帯モード水形成海域における混合層の変 動特性に関する研究」

(2) 岩崎慎介・磯辺篤彦 (愛媛大 CMES)「黄海・東シナ海の沿岸域に見られる双方向の大気海洋相互作用」 (3) 平原幹俊 (気象研)「南大洋における回廊の存在が全球深層循環に与える影響」

(4) 石崎廣 (気象研)「162°E 赤道近傍深層測流結果(1998-2005年)から見えてきたもの-DWBC、平均東 西流システム、赤道 Rossby 波-」

(5) 蓮沼啓一(海洋総合研)「北大西洋深層水の最後」

(6)中野英之(気象研)「1.5層 QG model による Okuno & Masuda (2003)の追試と、パラメーターを変 えた追加実験。--順圧ロスビー波の分散関係として説明されることが多いβ面の二次元乱流スペクトラ ムの dumbbell-shape パターンは、水平発散を考慮した場合にどの程度成立しているようにみえるか?」 (7)増田章(九大応力研)「地球流体で組織だった流れが形成される仕組み – 傾圧不安定ほか –」 (8)水田元太(北大地球環境)「表層に捕捉された波源から作られる深層流」

(9) 西垣肇(大分大教育福祉科学)「再解析データの平均場にみられる親潮海域の流動:鉛直積分流量」 (10) 和川拓(東北水研)「三陸沿岸・沖合域の水質場と海洋循環」

(11) 中村浩昭(九大総理工)・吉川裕(九大応力研)「海山周りに発生する渦成循環に関する数値実験」

#### 3. 結果と議論

(1) 東部亜熱帯モード水の形成域における混合層深度の年々変動を1次元混合層モデルによって調べた。 この海域では、混合層深度に対する初期成層の寄与が大きな年である OR 年と海面熱フラックスの寄与 が大きい AR 年の2 つがほぼ同じ割合で存在した。AR 年では冬季の海面水温(SST)と熱フラックスの間に 正の相関があり、高 SST ほど熱を失い、混合層深度が深くなるという筋書きが成り立つことを示された。

(2)冬季の黄海における海上風と海面水温(SST)の相互作用の有無を大気海洋結合モデルにより調べた。 1ヶ月以下の変動において、SSTと海上風に正の相関が見られ、SSTが高いと大気境界層中の運動量輸送 が増えるというWallaceらの説と整合する結果となった。この特徴はSSTを固定すると見られなかった。

(3) 南極周極流上の偏西風が強化すると北大西洋での沈込みによる子午面循環 (AMOC) が強化する「ドレ

ーク海峡効果」のしくみを理解するために一連の数値実験を行った。ドレーク海峡が開いている場合は、 閉じている場合に比べ、南極域で形成された底層水が北へ広がりにくく AMOC が強まった。さらに、あ る時刻に周極流上に偏西風を与えると、北大西洋高緯度域の海面熱損失が次第に増加し、同時に AMOC が強化した。以上から、ドレーク海峡効果はエクマン流による力学的なものでなく、熱的なものである。

(4) 太平洋の赤道西岸域における深層流の係留観測により、数ヵ月程度以上の周期を持つ東西流の変動 が捉えられた。高解像度数値シミュレーションとの比較から、この変動は東向と西向の流れが南北交互 に4つのセル状に並んだ構造を持った年周期の赤道ロスビー波の伝播によるものであることが示された。 変動の振幅の小さな地点では、縞状に延びた平均東西流構造の一部と見られる流れも観測された。

(5)北大西洋で形成される北大西洋深層水の循環について、海洋の気候値データを元に議論をした。北 大西洋深層水は、南大洋に到達して高塩分で特徴づけられる周極深層水となり、南大洋を時計回りに循 環しながら陸棚起源の水と混合しながら低塩化し、南極底層水へと変質する。最後に太平洋の底層を広 がり北太平洋に到達する。北大西洋深層水の高塩分の起源としては地中海流出水の影響が考えられる。

(6) 海洋中深層に見られる東西流の縞状構造の原因に対する理解を深めるために、水平発散の強度に対 する地衡流乱流の非線形性発展の依存性を調べた。水平発散がない場合は、乱流のスペクトルのピーク は時間とともに、移流効果とロスビー波の伝播が釣り合う臨界波数に近づくのに対し、水平発散がある とこの傾向は弱まる。また Okuno & Masuda (2003)が指摘した様に東西流の縞状構造も見られなくなる。

(7) 傾圧不安定の物理的なしくみを、2 層準地衡流方程式系に基づく正準方程式によって明らかにした。 正準方程式より、順圧モードの擾乱は傾圧モードの擾乱の移流から生じ、傾圧モードの擾乱は順圧モー ドの擾乱による CIPT (baroClInic Pseudo Topographic) β効果から生じること、傾圧不安定はこれら2 つの正のフードバックによることが示される。不安定擾乱による渦層厚輸送速度は、界面形状抵抗や Gent & McWilliams の渦パラメタリゼーションと対応し、その収束発散は平均流の時間変化をもたらす。

(8) 中規模擾乱による平均循環形成のメカニズム調べるため、連続成層モデルの表層に擾乱を模した振動強制を与える数値実験を行った。深層には強制の半分の周期を持つロスビー波によって、Holland & Rhines (1980)が指摘した赤道向きの渦位フラックスと風成循環の再循環と同方向の流れが形成された。

(9)高解像度再解析データを用いて親潮域の循環構造を調べた。亜寒帯循環による流れは、順圧流量で 見ると、千島海溝の東に存在する海膨の斜面に沿って南下した後、東に方向を変え、その南北に再循環 を伴う。これらの特徴は風成循環の西岸境界流および再循環と類似している。一方、千島海溝上では浅 い方を右手に見る流れが卓越し、親潮はその一部である様に見える。

(10) 岩手県沖で得られた高い時空間分解能を持つ水温塩分データの解析を行った。三陸沖では親潮系の 水塊が4月に卓越するのに対し、津軽暖流系の水塊が6月と12月の年2回の卓越することが初めて示 された。2006年にワカメの養殖に被害を与えた親潮水の張り出しも明瞭に確認された。今後、数値シミ ュレーションと組み合わせることで、沿岸と沖合の循環の関係の解明や予測に貢献すると期待される。

(11)初期擾乱を与えた場合に海山上に出来る循環の性質を数値実験により調べた。海山上には、多くの場合、高気圧性の循環が生じるが、その有無は内部変形半径や擾乱の初期速度に依存することが示唆される。また海山の幅や高さが大きく、擾乱が弱い場合には海山を回る流れの速さが2つのピークを持つ。

#### 漁船搭載 ADCP により観測された日向灘の潮流

宮崎県水産試験場 渡慶次 力

### 1.研究の目的

漁業者は操業時の縄や網の状況等を流向・流速で判断し,地方水産行政では魚礁の設計等で流れの情報が必要となるなど,地先の流動場の把握は重要である。しかしながら,これまでの流況観測は,半月程度の定点観測か,月1回程度の頻度で行われる船舶観測など,時空間的に粗な調査であった。日向灘における詳細な海況把握を目的に,宮崎県水産試験場では,平成22年8月より,まき網船に既設されている流速計で取得された流向・流速情報を水試ヘリアルタイムで送信・蓄積するシステムを導入し,まき網船による日向灘流況モニタリングを開始した(渡慶次・福田,2012)。

本研究は、漁船搭載 ADCP により観測された流向・流速記録を用い、日向灘における潮流成分の推定 を試みた。

## 2. 材料と解析方法

解析で使用した流向・流速記録は,まき網船3隻の船底設 **33**<sup>°</sup> 置型 Acoustic Doppler Current Profiler(ADCP)の対地モー ドで計測された 2010 年 8 月~2013 年 1 月までの水深 10m 以浅の 1 層目の計測値である。計測された流向・流速データ は,15 秒間の平均値が 2~3 秒毎に電子データとして出力さ れる。解析では,渡慶次ら (2013)と同様の手法を用いて, クオリティチェックを施した 1 分間の平均値を用いた。

図1の★で示す地点(北緯 32°18′26″, 東経 131°44′ 11″)における 15 昼夜流況観測結果によると,主要4分潮 の潮流楕円の長軸振幅は, M<sub>2</sub>分潮 15.4cm/s, S<sub>2</sub>分潮 5.5cm/s, K<sub>1</sub>分潮 1.6cm/s, O<sub>1</sub>分潮 1.8cm/s であった(宮崎県農政水産 部漁港漁場整備課, 2011)。日周潮の K<sub>1</sub>分潮と O<sub>1</sub>分潮の長 軸振幅は,漁船計測の流速分解能 0.1kt(約 5.1cm/s)より小さ いので検出できない。そこで、本研究では、日向灘において 潮流振幅が大きい半日周潮の M<sub>2</sub>分潮及び S<sub>2</sub>分潮の調和定数 を最小自乗法によって求めることにした。

解析では、漁船で計測された ADCP 記録と 15 昼夜連続観 測によって得られている既知の調和定数を比較した。次に、 緯度・経度 1/12°のポリゴン区画内のデータ個数 3,000 以上



間分布。×はデータ数 3,000 未満を, ○はデータ数 3,000 以上の地点を示す。

存在する地点において調和定数を算出し,日向灘における潮流楕円の空間分布を推定した(図1の〇)。

### 3. 結果

図2は、図1の★で示す地点における15昼夜連続観測による既知の調和定数を用いた潮流楕円(破線) と、漁船計測データを用いて算出したM2及びS2分潮の潮流楕円(実線)をそれぞれ示している。漁船計 測データによる調和定数による潮流楕円は、15昼夜連続観測による結果と比較して、東西成分が小さく 扁平となっており、主軸が反時計回り側に若干ずれているが、潮流の特性である長軸の長さや遅角など はおおよそ対応している。図3で示す日向灘における潮流楕円の空間分布について、最北地点における M<sub>2</sub>分潮の潮流楕円は、調査船 ADCP により推定された潮流楕円(武岡・菊池、1991)と長軸の長さ・向 き等が酷似していた。すなわち、本研究によって算出された潮流の調和定数は、日向灘における潮流の 特性をよく表現していると考えられる。



#### 図 3. M2 分潮(a)及び S2 分潮(b)の潮流楕円の空間分布。潮流楕円の内容は図 2 と同じ。

#### 4. 成果報告

渡慶次 力・萩原快次・岡部久:海況情報提供における広域連携と漁船情報活用の取り組み.平成24年 度水産海洋学会創立 50 周年記念大会シンポジウム.

渡慶次 力:漁船による日向灘海況モニタリング.第66回西日本海洋調査技術連絡会議.

渡慶次 力・福田博文・林田秀一・清水学・市川忠史・柳哲雄:日向灘海況情報提供における漁船情報 活用の取り組み. 九州大学応用力学研究所研究集会「日本海及び日本周辺海域の海況モニタリングと波 浪計測に関する研究集会」.

# 5. 研究組織

研究代表者	宮崎県水産試験場	主任技師	渡慶次	力
所内世話人	九州大学応用力学研究所	教授	柳 哲林	隹

平成24年度 海洋レーダを用いた海況監視システムの開発と応用

	平成24年12月12日~13	参加者名簿	(多目的交流室)
	氏名	所属	職名
1	大島 正資	三菱電機	
2	久木 幸治	琉球大	教授
3	Wen-Son Chiang	TORI	副研究員
4	Shao-Hun Chen	TORI Taiwan	研究員
5	伊藤 浩之	長野日本無線	
6	田中 朗	長野日本無線	
7	藤 良太郎	国総研	交流研究員
8	灘井 章嗣	NICT	
9	吉川 裕	応用力学研究所	准教授
10	西村 一星	海上保安庁	
11	森岡 裕詞	海上保安庁	
12	宮村 茂	(株)マネジメントオフィスMIYA	
13	Saug Ho Lee	Kunsan Univ.	教授
14	吉井 匠	電力中央研究所	
15	川相 隆	三菱電機(株)	
16	森本 昭彦	名古屋大学	准教授
17	山田 寛喜	新潟大学	教授
18	江淵 直人	北大·低温研究所	教授
19	張 偉	北大·低温研究所	院生
20	吴雄斌	武漢大学	教授
21	川村 誠治	NICT	
22	今村 正裕	電力中央研究所	
23	増田 章	応用力学研究所	教授
24	富田 浩之	名古屋大学	研究員

25 杉谷 茂夫	NICT	
26 小沢 直輝	新潟大学	院生
27 藤井 智史	琉球大	教授
28 油布 圭	応用力学研究所	技術職員
29 Cho Teng Liu	NTU	教授
30 並木 正治	海上保安庁	
31 坂井 伸一	電力中央研究所	
32 日向 博文	国総研	
33 勝呂一彦	3Sオーシャンネットワーク	
34 杉尾 毅	第七管区海上保安本部	
35 桑田 浩二	朝日航洋(株)	
36 滝川 哲太郎	水産大学校	講師
37 水野 信二郎	自宅	
38 井手 喜彦	九大·総理工	D2
39 市川 香	九大·応用力学研究所	教授
40 三城 希雄志	九大·総理工	D3
41 金城 早香	水産大学校	院生
42 デシーベリアンティ	九大·総理工	
43 石橋 道芳	九大·応用力学研究所	技術室長
44 福留 研一	日水研	
45 橋本 典明	九大·工学部	教授
46 広瀬 直毅	九大·応用力学研究所	教授
47 Don Barrick	Codar Ocean Sensors	
48 Belinda Lipa	Codar Ocean Sensors	
49 岩部 伸家	朝日航洋(株)	
50 渡部 敏昭	朝日航洋(株)	

# 全球気候モデルと衛星計測データを用いた雲 - 放射 - 力学相互作用過程の研究

東京大学大気海洋研究所 渡部雅浩

### 1. はじめに

地球温暖化などの気候変化予測における最大の不確定要因である雲および雲と放射・力学場の相互作 用は、未解明かつ最先端の課題である。雲の生成消滅に関わる循環場は空間的に連続であり、気候変化 の時間スケールを数値計算で扱うためには、全球気候モデル(GCM)を使う必要がある。しかし、GCM の解像度は O(100km)であり、雲システムの直接計算はできない。そこでパラメタリゼーションと呼ば れる粗視化手法を取り入れるが、これはさまざまな誤差を含むため、各々異なるスキームを用いた複数 の GCM で計算される温暖化時の雲変化およびその放射への作用は大きくばらついている。したがって、 地表の温暖化に対して、下層雲が増加するか減少するかという基本的な問題が未解決で、雲応答のメカ ニズムに関しても統一的な結論が得られていないのが現状である。

この状況を打破する方向性として、最近データが増えつつある人工衛星からの雲プロダクトで GCM の雲の場を検証すること、および気象予報型のモデル数値実験を行うことで気候平均量ではない速い雲 の場の変化を捉えること、などが考えられる。最終的には、GCM の改良とともに大気中 CO<sub>2</sub> 濃度の増 加に対する雲-放射フィードバックのより確かなメカニズムを明らかにすることが目標となる。本年度は、 モデルを用いたメカニズム研究を推進した。

### 2. モデルと実験

本課題で用いる全球気候モデル MIROC5 は、第5次結合モデル相互比較プロジェクト(CMIP5)へ向け て東京大学大気海洋研究所・国立環境研究所・海洋開発研究機構で開発された最新バージョンで、旧版 に比べ気候平均場や自然変動の再現性が向上している(1-3)。標準モデルの解像度は、大気が水平約 1.4 度、鉛直 40 層、海洋が約 0.5×1 度、鉛直 51 層である。雲周辺については、液相・固相それぞれの雲粒 数濃度と混合比を予報変数とし、エアロゾルや積雲、境界層過程と結合して解かれる。

本研究では、雲-短波放射フィードバックのメカニズムの理解に向けて、気候モデル MIROC5 の大気 部分(AGCM)を用いた2種類の実験設定のもとで、海面水温(SST)を一様に上昇させたときの熱帯下層雲 の応答を調べた。一つは Atmospheric Model Intercomparison Project (AMIP)実験と呼ばれる、観測された SST 及び海氷被覆を与えて積分した 30 年間の気候再現実験である。もう一つは Transpose AMIP II (TAMIP)実験と呼ばれる、大気再解析データで初期値化し、10 日間積分した 64 メンバーのアンサンブ ル・ハインドキャスト実験である。SST 昇温に対する雲の応答の時間スケールは短いと考えられるため、 この TAMIP 実験は AMIP 実験における長期平均として得られる平衡応答に向かう過渡応答を捉えるこ とが期待される。どちらの実験設定でも、参照実験とは別に全球 SST を 4K 上昇させて擬似的に温暖化 の状況を作り出した実験 (AMIP+SST および TAMIP+SST 実験と呼ぶ)を行い、参照実験からの差で温 暖化時の応答を定義する。

#### 3. 結果

MIROC5の AMIP+SST 実験では、他の多くの GCM 同様に熱帯下降流域で下層雲が減少し、正の雲-短波放射フィードバックを示すが、TAMIP+SST 実験の 10 日積分でもアンサンブル平均で同様の変化が 現れた。TAMIP+SST 実験結果の解析から、海上境界層(marine boundary layer, MBL)の相対湿度が下がる ことで下層雲が減少していることがわかった。この10日間の間に、SST 昇温に対して MBL が自由大気 より速く昇温することによって逆転層が弱化し、対流活動が活発化することによって MBL の水蒸気が 自由大気に輸送され、相対湿度が低下する。SST 昇温に伴う海面蒸発量の増加は相対湿度を増加させる ように働くが、ウォーカー循環の弱化に伴う海上風速の減少によってこの効果は抑制される。すなわち、 熱帯海上の下降流域における下層雲量変化の符号は、対流活動による MBL の乾燥化と海面蒸発量増加 に伴う乱流混合による湿潤化との競合関係によって決定される。

さらに、MIROC5 AGCM と同一の物理スキームを実装する鉛直 1 次元モデル(SCM)を用いて、GCM における雲の応答メカニズムの検証を行った。標準実験における SST 昇温時の雲の応答が AGCM と定性的に一致することを確認した上で、SCM に与える外部強制や物理パラメタを変えることで、下層雲応答の平均場の逆転層強度や SST 昇温時の海上風速変化に対する感度を調べた。コントロール実験で逆転層が強く、SST 昇温時に海上風速が変化しないか強くなる場合には、積雲対流による MBL の乾燥化が働かず、海面蒸発量の増加によって下層雲が増加することがわかった。この結果は、AGCM の解析から考えられる下層雲の応答メカニズムと整合的であり、これらの要素が GCM 間の下層雲応答のばらつきを説明する上で重要であることが示唆された(4)。

# 4. 今後

モデルで生じる雲の変化するメカニズムが現実に適用可能かどうかは、モデルのシミュレートする雲 生成過程、温度構造などの検証を行うことで判断できる。TAMIP 実験は CloudSAT のような衛星プロダ クトと直接比較できることが利点であり、岡本教授の開発した衛星シミュレータ(5-6)を TAMIP の結果 に適用済みである。今後は、このようなモデル衛星比較をすすめ、モデルの誤差と温暖化時のフィード バックの関連性を明らかにするような研究が望まれる。

# 文献

- Watanabe, M., and Coauthors, 2010: Improved climate simulation by MIROC5: Mean states, variability, and climate sensitivity. J. Climate, 23, 6312-6335.
- Watanabe, M. and Coauthors, 2011: Fast and slow timescales in the tropical low-cloud response to increasing CO2 in two climate models. Clim. Dyn., doi:10.1007/s00382-011-1178-y.
- 3. Watanabe, M. and Coauthors, 2012: Using a multi-physics ensemble for exploring diversity in cloud shortwave feedback in GCMs. J. Climate, 25, 5416-5431.
- 4. Demoto, S., M. Watanabe, and Y. Kamae, 2013: Mechanism of tropical low-cloud response to surface warming using weather and climate simulations. Geophys. Res. Lett., submitted.
- Okamoto, H., and Coauthors, 2007: Vertical cloud structure observed from shipborne radar and lidar: mid-latitude case study during the MR01/K02 cruise of the R/V Mirai, J. Geophys. Res, 112, D08216, doi:10.1029/2006JD007628.
- Okamoto, H., and Coauthors, 2008: Vertical cloud properties in the tropical western Pacific Ocean: Validation of the CCSR/NIES/FRCGC GCM by shipborne radar and lidar, J. Geophys. Res., 113, D24213, doi:10.1029/2008JD009812.

地上ライダーネットワークおよび衛星搭載ライダーデータを用いたエアロゾル光学特性の時 間空間変動研究

(独)国立環境研究所環境計測研究センター 西澤智明

目的

本研究は、船舶観測を含めた地上ライダーから得られる時間的に高分解能な観測データと、 衛星搭載ライダーから得られる全球網羅観測データを複合解析することで、時間・空間的に包 括したエアロゾル光学特性データを取得およびデータセット化し、そのデータからエアロゾル の時・空間変動に関する知見を抽出することを最終的な目標に据える。また、本目標遂行にお いてエアロゾル輸送モデル等の数値モデルのエアロゾル分布データは非常に有用な情報とな る。そこで、数値モデルの再現性やデータ同化技術の向上に資するライダーデータ解析技術の 開発も視野に入れる。

本目標遂行のために、昨年、応用力学研究所大気物理研究室の岡本教授との共同研究(23 特1-6)により衛星ライダーデータからエアロゾル種毎(鉱物ダスト、海塩、大気汚染粒子) の鉛直濃度を抽出するためのアルゴリズム(エアロゾル種分類推定手法)の開発を行い、それ を衛星ライダーデータへ適用し、推定されたエアロゾルデータの時空間変動について考察を行 った。結果は、上記アルゴリズムの有用性を示すと供に、アルゴリズムで利用されているエア ロゾル光学特性モデルの不完全性とライダーデータの品質向上の必要性も示唆した。

そこで、本研究課題において、より信頼性の高い全球エアロゾルデータの抽出を目的として ライダーデータの品質向上および上記アルゴリズムの改良を目指した数値解析手法の開発を 行う。また、これらの開発・改良した解析手法を用いて衛星ライダーデータの全球解析を行い、 エアロゾル種毎の全球時空間変動について考察する。また、地上ライダーデータの解析も行い、 データセットの作成を進める。

#### 実施方法

ライダーデータの品質向上を目指して、ウェーブレット解析を用いたノイズ除去手法の開 発・検討を行う。エアロゾロ種分類推定手法で仮定されているエアロゾル光学モデルを全球解 析に対応できる様に検討を行う。上記の改良・開発した手法を用いた全球解析では、岡本らの 開発した雲・エアロゾルマスク手法を用いて雲のコンタミネーションを除去して、信頼性の高 いエアロゾル種毎の全球分布抽出を行う。また、地上ネットワーク観測および船舶観測データ の解析、そして衛星ライダーの解析を進める。

### 結果

昨年開発したライダーシミュレーター(23 特 1-6)を利用し、ウェーブレット解析を用いた ノイズ除去手法の開発・改良を行った。ウェーブレット解析を多重回繰り返し用いる方法を考 案し、信号雑音比(SN 比)にして2倍以上の改善を図ることに成功した。本手法を地上ライダ ーデータに適用し、エアロゾルや雲の消散係数の推定精度が2倍程度向上させた。また、本手 法を衛星ライダーデータに適用してノイズ除去したデータに、岡本らの開発した雲・エアロゾ ルマスク手法を適用した。導出されたエアロゾルマスクデータは、多波長受動型衛星搭載セン サーMODISから導出されたマスクデータと良く一致し、本手法の有効性が実証された。また、 信号ノイズに対して頑強な数値解法として最尤法を用いた最適化手法の検討を、シミュレーションデータを用いて行い、その有効性を確認した。

ウェーブレット解析を用いてノイズ除去した衛星ライダーデータにエアロゾル種分類手法 を適用した。MODISから導出されたエアロゾル光学的厚さと比較し、結果が改善されたことを 確認した。

エアロゾル光学モデル改良の方策を、文献をベースに検討し、全球規模で展開されている地 上スカイラジオメーターの解析データの統計解析が有効であるという結論に至った。現在デー タセットの作成を進めている。

### 考察

ウェーブレット解析の導入により、エアロゾル種分類手法を適用して推定された光学的厚さ が改善されたことから、信号ノイズがエアロゾル推定に影響を及ぼしていたことを示している。

一方で、陸域では過小評価が今尚目立つことも判明した(海上では、概ね一致)。特に光吸 収性の強い粒子(例えば、バイオマスバーニング起源粒子など)が多い領域(東南アジア)で 過小評価が顕著に見られた。これは、本研究で用いた衛星ライダー(CALIOP)の信号自体の推定 感度の問題もあるが、現在使用しているエアロゾル光学モデルの改善(特にエアロゾルの光吸 収性の考慮)が必要であることも示された。

### 研究成果報告

Nishizawa, T., N. Sugimoto, I. Matsui, and A. Shimizu, Improvement of NIES Lidar Network Observations by Adding Raman Scatter Measurement Function, *SPIE Proc.*, 8526, doi:10.1117/12.977215, 2012

Nishizawa, T., A. Higurashi, N. Sugimoto, and H. Okamoto, Aerosol and cloud retrieval algorithms using ATLID and MSI data of EarthCARE, CALIPSO, CloudSat, EarthCARE Joint Workshop, 18-22, June, 2012, Paris, France.

氏名		所属	職名	役割・担当	メールアドレス
西澤 智	明	国立環境研究所	主任研究員	代表者	nisizawa@nies.go.jp
杉本 俳	夫	国立環境研究所	室長	地上ライダー解 析	nsugimoto@nies.go.jp
松井一	−郎	国立環境研究所	主任研究員	地上ライダー保 守	i-matsui@nies.go.jp
岡本 創	IJ	九州大学応用力 学研究所	教授	衛星ライダー解 析	okamoto@raim.kyushu- u.ac.jp
佐藤可	「織	九州大学応用力 学研究所	助教	衛星ライダー解 析	sato@raim.kyushu-u.a c.jp

研究組織

# 化学・物理海洋学からみる東シナ海の水塊構造

富山大学 大学院理工学研究部 張勁

# 研究目的

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の海洋環境への影響を視野に入れた沿岸-外洋間の相互作用等 の研究に格好のフィールドである。以前より東シナ海における水塊構造の解明に取り組ん でおり、過去10ヶ年の衛星観測や現場観測データを分析し、夏季の外部陸棚域には安定し た黒潮起源の栄養塩供給を示唆する結果を得ている。過去の共同観測による共同研究を通 して、化学海洋学および物理海洋学の異なる視点から理解の共有化を進めることができた が、季節変化に関する問題や鉛直輸送過程の定量的な理解など新たな研究課題も見出され てきている。これらの研究課題は、現象の理解には、様々な観測によって得られる化学デ ータを物理データとリンクさせて解析する必要がある。黒潮中層水の分布や夏季に流入量 が増大する長江由来の淡水とともに、しばしば長江との関連が指摘される低酸素水の季節 変動を捉えるために、平成24年度は夏季および秋季に観測航海を実施した。本研究では、 化学的トレーサーを用いて東シナ海における詳細な水塊構造とその変動を把握し、東シナ 海の環境を支配する栄養塩の供給動態を精査することを目的として、九州大学応用力学研 究所との共同研究を実施した。

# 調査観測・試料採取・データ解析

本年度は,夏季(長崎大学水産 学部付属練習船「長崎丸」)と秋 季(海洋研究開発機構「淡青丸」) の二度にわたり観測を実施した。 図1に「淡青丸」KT-12-25次研 究航海における試料採取地点を (○:採水,□:採泥,△:プランクトン 採取,+:乱流観測)示している。観 測調査の内容を以下に記す。

a). 東シナ海における海洋観測で, 各層海水試料の採取を広域で実施し, 栄養塩等ルーチン分析・酸 素水素同位体組成などの化学分 析データに, 水温・塩分・栄養塩 センサー等の観測に加え, さらに



図 1. 試料採取地点(淡青丸 KT-12-25 次航海)

漂流ブイ観測(夏季)および微細構造プロファイラーTurboMAP による観測(秋季)組み合わせ, 詳細な水塊解析とその変動解明を行った。 b).表層堆積物および間隙水試料と同時に懸濁粒子も採取し、底層海水中栄養塩分布との 関連を明らかにした。

# 結果および考察

# I). 低酸素海水の分布

図1中黒帯部分の溶存酸素(DO)濃度断 面図を図2に示している。東経125.5度付近 において,DO濃度の低い水塊が水深60m (塩分34psu)から底層にかけて観測された。 また,この水塊の上部には蛍光光度が高く,低 い塩分(30psu)が観測され,浅層には長江希 釈水CDWの影響を受け,深層・底層に黒潮



由来の高塩分の水が広がることにより、水塊の成層化が強化され、有機物が沈降し分解され DO が消費されたと考えられた。観測された低 DO 水塊の分布から、観測域西側から移流してきた可能 性を推測した。

# II). 海底堆積物間隙水中の栄養塩分布

海底堆積物間隙水中の N, P, Si の濃度は何れも底層海水に比べて数~数十倍高く, 海底から 底層水へのフラックス(µmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>)を換算したところ, それぞれ N-NO<sub>3</sub>: 3.94 – 49.8, P: 0.61– 5.58、Si: 107 – 176 であった。特に DIN/P 比は 0.84 – 3.35 であり, 長江水の 125 と長江河口域 の 32 に比べて, レッドフィールド比(16)バランスを保つ働きがあると示唆された。

今後,異なる栄養塩類の供給源やそれらの輸送状況の観点から,低 DO 水の時空間的分布と 動態をモニタリングしていきたい。

# 研究成果報告

- 1. Zhang J., Possible origins of nutrients in the bottom water on the outer shelf of East China Sea. 6th PEACE Workshop, 28-30 Nov. 2012, Nagoya
- Jiang K., Zhang J., The relationship between nutrients in pore water and low dissolved oxygen concentration in bottom water in the East China Sea. 6th PEACE Workshop, 28-30 Nov. 2012, Nagoya
- 3. Fujishiro Y., Zhang J., Matsuno T., Ishizaka J., An assessment of dissolved oxygen concentration in the East China Sea. 6th PEACE Workshop, 28-30 Nov. 2012, Nagoya
- 4. 張勁, 藤城義久

亜表層クロロフィル極大層(SCM)の東シナ海全体の基礎生産に対する寄与 応用力学研究所共同利用研究集会;東シナ海の循環と混合に関する研究,2013年2月

5. 藤城義久, 張勁, 松野健, 石坂丞二 最近 10ヶ年の東シナ海現場観測結果からみる Chl.Max 水塊の分布と基礎生産の推定 2012 年度日本地球化学会第 59 回年会, 福岡, 2013 年 9 月

# 東アジア域における大気エアロゾルの気候影響に関する研究

富山大学大学院理工学研究部(理学) 青木 一真

### 1. はじめに

ここ数ヶ月、私たちの生活の中で「PM2.5」という言葉がよく聞かれるようになった。日本 国内から排出される大気汚染物質に加え、中国大陸から越境する大気汚染物質、黄砂粒子、 森林火災など、それらが複合した影響は、風下側に位置する日本に影響を受けている。特に、 大陸から近い九州地方では、東アジア域における化石燃料消費等による人為起源の大気浮遊 微粒子(エアロゾル)の輸送により、健康被害や気象障害など、私たちの生活にも影響して いる。本研究は、2003年から応用力学研究所屋上において太陽光と周辺光の放射輝度を用い たスカイラジオメーターを使って連続観測を行い、「PM2.5」を含んだエアロゾル光学的特性 の解析を行っている。これらの観測データにより、エアロゾルやそれが核となって形成する 雲の気候影響を評価することを目的とする。エアロゾル粒子の輸送は、越境大気汚染として、 次世代の大気化学・気象結合モデルの開発や応用を行うためにも、定量的な地上観測データ の蓄積が重要となる。エアロゾル気候影響を評価する際には、応用力学研究所大気環境モデ リング分野で開発・改良されているエアロゾル気候モデルSPRINTARSを用いて、地上観測や 衛星観測の結果を基にモデルの検証を行う。また、主として九州・沖縄地域の観測地点(福 岡、長崎、福江島、沖縄等)を利用して、大陸から日本へ輸送されてくるエアロゾルをいち 早くモニタリングし、それらを同化データとして組み入れ、モデルの精度向上につなげる。

#### 2. 観測·解析概要

太陽の直達光と周辺光の角度分布を自動測定出来るスカイラジオメーター(プリード社製、 http://skyrad.sci.u-toyama.ac.jp/)は、晴天時の日中に連続観測を行っている。この観測 データから解析されたエアロゾルの光学的厚さ・オングストローム指数(エアロゾル粒径の 指標)・一次散乱アルベド(放射吸収のパラメータ)を用いて、気候変動の指標である放射強 制力を求める。また、これらのデータを地上検証として用いてSPRINTARSを改良し、東アジア 全体の広域的な放射強制力のさらなる精度向上を目指している。

#### 3. 結果及び、考察

Fig.1は、2012年2月から2012年12月までの福岡県春日市(九州大学応用力学研究所)にお ける0.5µmのエアロゾルの光学的厚さとオングストローム指数の月平均値を示している。日本 のエアロゾルの光学的厚さの季節変化は、春に最大となり、秋から冬にかけて最小になる傾 向(Aoki and Fujiyoshi, 2003)となる。概ね、2012年の福岡の傾向も似ているが、初夏に 高く、盛夏に低い傾向が見られた。この結果は、初期結果であるので、さらに検証が必要で はあるが、オングストローム指数が高い値を示している月も多く、越境する大気汚染物質の 影響が観測されている可能性がある。今後も継続した観測を行い、SPRINTARSや衛星観測等と 比較しながら、とりわけ、九州地域を中心に、越境大気汚染やローカルな影響評価を行い気 候影響の解明につなげたい。



Fig. 1 2012年2月から2012年12月までの福岡県春日市(九州大学応用力学研究所)における 0.5umのエアロゾルの光学的厚さとオングストローム指数の月平均値

#### 4. 研究成果

- Campbell, J. R., J. S. Reid, D. L. Westphal, J. Zhang, J. L. Tackett, B. N. Chew, E. J. Welton, A. Shimizu, N. Sugimoto, K. Aoki and D. M. Winker (2013), Characterizing Aerosol Optical Properties and Particle Composition over Southeast Asia and the Maritime Continent: The 2007-2009 View from CALIOP, Atmospheric Research, 122, 520-543.
- Kawamura, K., , K. Matsumoto, E. Tachibana, K. Aoki (2012), Low molecular weight (C1-C10) monocarboxylic acids, dissolved organic carbon and major inorganic ions in alpine snow pit sequence from a high mountain site, central Japan. Atmospheric Environment, 62, 272-280.
- Watanebe, K., D. Nishimoto, S. Ishita, N. Eda, Y. Uehara, G. Takahashi, N. Kunori, T. Kawakami, W. Shimada, K. Aoki and K. Kawada (2012), Formaldehyde and hydrogen peroxide concentrations in the snow cover at Murododaira, Mt. Tateyama, Japan. Bulletin of Glaciological Research, 30, 33-40.

#### 5. 研究組織

代表者	青木 一真	(富山大学大学院理工学研究部(理学))
協力者	竹村 俊彦	(九州大学応用力学研究所、所内世話人)
	河本 和明	(長崎大学環境科学部)

# 24 AO-12

# 多用途型コンパクト水中ロボットに関する研究

# 1. 目 的

近年、水中ロボットの用途は海洋環境調査、災害現 場での行方不明者の捜索、藻場造成地における生物調 査、海岸工事現場での環境影響評価調査、水中洞窟な どの学術分野と一層多岐にわたる要望が増えてきた。

そこで本研究では、様々な用途に対応できるような水 中ロボット(海亀)を開発し、本年度は具体的に以下の 内容について研究を推進した。

(1)4 チャネルソナーによる形状計測システムソフトウ ェア開発と測定実験を深海機器力学実験水槽で行う。

(2)4 スラスタ方式ROVのセミ自律航行向け実験を 深海機器力学実験水槽造波環境下で行う。

(3)小型携帯端末を用いた無線遠隔操縦システムの ハードウェア及びソフトウェア開発を行う。

(4)表層域での環境調査ができる小型携帯端末を用いた無線遠隔操縦実験を深海機器力学実験水槽で行う。 各種開発を行い、深海機器力学実験水槽および実海域での性能評価実験を行ったので報告する。

#### 2. 多用途型水中ロボットシステム構成

多用途型として様々な現場に柔軟な対応ができるよ うに、筐体は透明アクリル製で設計・製作した。外観 写真を図1に主要諸元を表1に示す。 表1主要諸元



全長	670[mm]
高	300 [mm]
幅	440 [mm]
質量	18[kg]

図1 水中ロボット外観写真



図2 ROV/AUV モード操縦時システム構成図

佐世保工業高等専門学校電気電子工学科 長嶋 豊

図2にはROV/AUV時のシステム構成図を示す。一方、 携帯端末による遠隔操縦についても取り組み、タブレ ット型携帯端末に設けた操縦用ボタンにより、ROVに前 進、後進、旋回、潜航・浮上、停止を無線LAN経由で 指令する場合のシステム構成図を図3に示す。



# 3. 実験結果及び考察

(1) 4 チャンネルソナーによる形状計測システムソフトウェア開発と測定実験

実測値と測定平均値の誤差率を 7.8[%]~2.9[%]程度 に押さえられるように制御プログラムの改善及びアン プの増幅度を調整して安定的なソナーによる距離測定 の精度を向上できた。水槽に壁を設けて実験した時の 測距結果を図4に示す。



図4 ソナーによる測距結果

(2) 自律航行実験

(a). 方位制御実験

図5に方位制御実験の結果を示す。図が示す通り外 乱を与えてから約1[sec]程度で誤差±5[deg]程度に収 束でき、制御系の有効性を確認できた。



図5 方位自律制御結果

#### (b). 深度制御実験

図 6 に深度制御実験の結果を示す。図が示す通り目 標値 2[m]に対し、オーバーシュート 0.3[m]、誤差 ±0.15[m]程度で収束でき、FF/FB 制御を実現した。



(3) 小型携帯端末を用いた遠隔操縦実験

深海機器力学実験水槽で行った時の写真を図7に示 す。無線LANに利用するXBee Wi-Fiとルータを経由し て ROV の操縦ができる事を確認できた。



図7 遠隔操縦実験写真

(4) 慣性センサによる移動距離測定実験

慣性センサーIMU-Z Lite を用いて移動体の距離測定 の基本実験を行った。10[m]の直線運動に対し誤差処理 後は約 0.5[m]と処理前より減少して演算処理の有効性 を確認できた。図 8 に X 軸方向の変位結果を示す。



図8 X軸方向変位結果

(5) 実海域調査

本研究では自律化等の研究を進めると同時に、開発中のロボットが具体的に実海域でどの程度有効性を発

揮するか検証するために地域貢献も含めて実験を行っ た。新長崎漁港岸壁工事に伴う環境影響評価の一環と して生物分布調査や、ハウステンボス運河で実施して いる藻場造成現場の水中映像撮影にも取り組んだ。そ れぞれの写真を図9に示す。岸壁の映像を撮る場合、 波や潮流の影響にも関わらず、深度の自律制御により 明瞭な映像が撮影できた。



新長崎漁港 ハウステンボス運河図 9 実海域での性能評価実験

### 4. 結 論

本年度は AUV 実現のために、方位と深度に関して自 律制御を行うプログラム開発を主眼に行った。更に多 用途に利用できるように小型携帯端末を用いた操縦実 験にも取り組み実現可能なことを確認できた。今後は、 水中洞窟探査に向けた慣性センサーとソナーのセンサ ー融合による洞窟内形状把握に向けた研究を進める予 定である。

最後に、本研究を推進するにあたり、九州大学応用 力学研究所中村昌彦准教授には有益なご助言やご指導 を頂きました心より感謝いたします。更に、水槽実験 では稲田勝技術職員及び野田穣士朗技術職員にたいへ んお世話になりました深く感謝いたします。

# 5. 研究組織

- ·研究代表者:長嶋豊,佐世保高専電気電子工学科教授
- •研究協力者:下尾浩正,同校電気電子工学科講師
- ·研究協力者: 眞部広紀, 同校一般科目数学科准教授
- ·同上:三宅飛翔,佐世保高専専攻科1年
- ·同上:白川知秀,佐世保高専電気電子工学科5年
- ·同上:原田明,佐世保高專電気電子工学科5年
- •同上:原崎芳加,佐世保高專電気電子工学科5年
- ·同上:福岡聡紀,佐世保高専電気電子工学科5年
- ·所内世話人:中村昌彦,九州大学応力研准教授

海洋環境モニタリングのためのグライダー型海中ロボットの研究開発

大阪府立大学・大学院工学研究科 有馬 正和

# □研究目的

本研究の目的は、海洋環境のモニタリングを行うためのグライダー型海中ロボットの自律 制御システムを確立することである。研究代表者らは、広範囲の海洋環境モニタリングや 海洋探査に利用するための水中グライダーの実用化を目指して、高い運動性能を発揮する ことのできる「主翼独立制御型水中グライダー」の実験機 ALEX を開発した。ALEX には、 水中での静止や後退、垂直降下、スパイラル回転をしながらの浮上/潜降、主翼による 翼動推進などの高い運動性能のあることが実証されている。

深度 1500 m までの中深層における海洋 環境をモニタリングするために開発を 進めているグライダー型海中ロボット SOARER (Fig.1)には実海域での高度な 自律性が求められるので,その自律制御 システムを確立するためには,深海水槽 における多岐に亘る基礎データの収集・ 解析が必要不可欠である。研究代表者ら の所属する大阪府立大学の船舶試験水槽

(長さ×幅×深さ:70m×3m×1.5m)は, 水中グライダーの性能評価を行うには幅 と水深が不十分であり,九州大学・応用 力学研究所の深海機器力学実験水槽(長 さ×幅×深さ:65m×5m×7m)を使用さ せていただくことが本研究の進展に最も 有効であると判断した。同研究所・海洋 大気力学部門・海洋流体工学分野は, 海中ビークルの運動制御に関する研究に おいて優れた実績があり,中村昌彦 准教授との情報交換によって,本研究の 飛躍的な進展が図れると考えたことも 共同利用研究の目的のひとつである。



Fig.1 主翼独立制御型水中グライダー SOARER



 Fig.2 SOARER のグライディング試験

 (深海機器力学実験水槽にて)

また,搭載できる動力源に制約から運用時間に限界のあった海中ロボットに太陽光発電 システムを導入することによって,実海域での長期間・広範囲の運用を目指す「ソーラー 水中グライダー」の研究開発を進めていて,平成25年度の完成を目指している。 □研究の成果

深海機器力学実験水槽において主翼独立制御型水中グライダーSOARERの潜航試験を実施 した。グライディングの様子を水槽壁面にしたビデオカメラで撮影・記録し,画像解析に よって,重心位置を変化させたときの機体の姿勢角,グライディング角,グライディング 速度を求めることができた。主翼の形状やサイズは,CFD(数値流体力学)シミュレーシ ョンで得られた結果に基づいて設計されているが,SOARER が設計通りのグライディング 性能を有することを確認できた。本水槽試験を経て,12月中旬に鹿児島湾にて実海域試験 を実施して,海洋環境データを取得することができた。

# □研究成果報告

- 藤内裕史,有馬正和:実海域用ソーラー水中グライダーのフィージビリティスタディ, 第 24 回ロボティクス・メカトロニクス講演会(ROBOMEC 2012 in HAMAMATSU), B304 p.506-509, CD-ROM,(2012.05).
- M.Arima, H.Tonai: Feasibility Study of an Ocean-Going Solar-Powered Underwater Glider, Procs. of the twentysecond (2012) International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE-2012), pp.532-537, CD-ROM, (2012.06).
- M.Arima, H.Tonai, Y.Kosuga: Development of Underwater Observatory Systems for Monitoring Ocean Ecosystem, Procs. of ICETET-12, (2012.11).
- M.Arima, H.Tonai, Y.Kosuga: Underwater Glider 'SOARER' for Ocean Environmental Monitoring, Procs. of UT2013, (2013.03). (印刷中)
- H. Tonai, M. Arima: Design of an Ocean-Going Solar-Powered Underwater Glider, Procs. of ISOPE 2013, (2013.06). (投稿中)

氏 名	所 属	職 名	役割・担当分野
有馬 正和	大阪府立大学・ 大学院工学研究科	准教授	代表者・総括,システム計画
藤内 裕史	大阪府立大学・ 大学院工学研究科	学生 M1	研究補助
小菅 雄紀	大阪大学工学部	学生 B4	実験補助
石井 和男	九州工業大学・ 生命体工学研究科	教授	水中ロボットの自律制御
中村 昌彦	九州大学・応用力学研究所	准教授	所内世話人

□研究組織

アジア大陸から輸送される反応性窒素酸化物およびその構成成分の動態に関する研究

大阪府立大学大学院 工学研究科 坂東 博

【はじめに】

近年の中国における経済発展に伴い、中国国内から排出される窒素酸化物量が増大し、日本国内を含む アジア大陸縁辺地域ではバックグラウンドレベルの反応性総窒素化合物 (NO<sub>y</sub>)の濃度増大が今後問題 となってくる可能性がある。このような状況下、研究代表者および研究協力者ら (高見昭憲、清水厚、 定永靖宗、藤原大) は先行研究で NO<sub>y</sub> と全硝酸 (T.NO<sub>3</sub>: ガス状硝酸 HNO<sub>3</sub>(g) と粒子状硝酸 NO<sub>3</sub>(p) の和)の測定装置の開発を行い、現在五島列島福江島、能登半島珠洲および沖縄辺戸岬においてそれらの 連続観測を行っている。また、珠洲においては、NO<sub>y</sub>の構成成分として重要であるペルオキシアシルナ イトレート(PANs)や有機硝酸エステル(ANs)の連続観測も行っている。一方、九州大学応用力学研究所 (所内世話人: 鵜野伊津志) においては WRF/CMAQ 化学物質輸送モデルにより、東アジア地域での汚染 物質濃度などが計算されている。本研究では、上記の定点観測とこのモデルを利用して、日本周辺域に おける NO<sub>y</sub> およびその構成成分の広域分布および広域的な動態把握の解明が最終目標である。平成 24 年度では比較的大陸からの気塊が aging していると考えられる珠洲に着目した。具体的には、珠洲の NO<sub>y</sub>, T.NO<sub>3</sub>濃度の季節変動の要因について、他の観測地点のデータも比較しつつ解析を試みた。本報告 書ではその結果について述べる。また、珠洲における PANs や ANs の観測結果についても述べる。

【観測について】

NO<sub>y</sub>, T.NO<sub>3</sub> の濃度測定には Thermo Fisher Scientific 社製 NO<sub>x</sub> 計を改良した NO<sub>y</sub>, T.NO<sub>3</sub> 計を用いた。こ れらの観測は沖縄辺戸岬では 2008 年 3 月より、五島列島福江島では 2008 年 11 月から、能登半島珠 洲では 2009 年 11 月から継続して行なっている。PANs と ANs に関しては、先行研究で開発した熱 分解/キャビティ減衰位相シフト分光法により測定した。また、後述するが本解析では CO データも用 いている。CO については Thermo Fisher Scientific 社製の CO 濃度計により観測した。

【珠洲の NO<sub>y</sub>, T.NO<sub>3</sub>濃度の季節変動の要因について】

福江と珠洲の NO<sub>y</sub>の月変動を見ると、大陸の影響を強く受けている福江では大陸性の気塊が多い冬季、 春季に濃度が高く、海洋性の気塊が多い夏季に濃度が低くなるという顕著な傾向がある。一方、珠洲の 月別変動は春季、夏季に濃度が高く、冬季に低くなる。その理由として、日本からの気塊の寄与が大き いこと、大陸からの寄与が相対的に小さいことが考えられる。それを評価するために、NO<sub>y</sub>の大気寿命 を観測結果から求め、それと大陸-珠洲間の輸送時間との比較を試みた。

大気寿命の算出には、福江→辺戸の輸送イベントを用いた。珠洲ではなく、辺戸を用いた理由は福江 →辺戸間がほとんど海であり、その間の窒素酸化物の排出による影響が小さいためである。輸送イベン トの抽出方法は以下の通りである。福江と辺戸の2地点における汚染物質 (CO, NO<sub>y</sub>, T.NO<sub>3</sub>)の濃度変動 を比較し、その中で福江から辺戸への気塊の移動が起こっている可能性があるピークの組を探した。ま ずはピーク位置の判別が比較的容易であった CO を用いてピークの組を探した後、その日時での NO<sub>y</sub>, T.NO<sub>3</sub> について調べ、最後に後方流跡線解析で福江方面から辺戸への気塊の移動を確認した。また、2 地点間の対応する CO ピークのずれの時間幅を輸送時間と定義した。

まず、NO<sub>y</sub>濃度が一次で減衰すると仮定し、消失速度定数をkとした。初期条件として、福江における NO<sub>y</sub> 濃度をt=0 における濃度とする。抽出した NO<sub>y</sub> 濃度の辺戸/福江比を $R(NO_y)$  とすると、以

下の関係式が得られる。

# $R(NO_v) = \exp(-kt)$

輸送時間に対して  $R(NO_y)$  の自然対数をプロットし、 回帰直線の傾きから k の値を算出した。その結果を 図 1 に示す。なお、図 1 の白丸は後方流跡線から得ら れた降水量の和が 1 mm 以上の場合であり、kの算出 からは除外した。回帰直線の傾きから、 $k = (1.16 \pm 0.36) \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  と得られ、これから NO<sub>y</sub>の大気寿命は  $\tau_{NOy} = 18 - 35 \text{ h}$  と見積もられた。

得られた大気寿命と大陸-珠洲間の輸送時間の比 較を行った。図2に2011年2月における大陸-珠洲 間の輸送時間の分布を示す。大陸から珠洲に到達する 気塊の少なくとも半分程度が寿命より長い結果にな った。これは12,1月を除いた期間で同様であった。 このことから、大陸から輸送されてくる窒素酸化物は 珠洲に到達するころには寿命を迎えているものが多 く、珠洲の窒素酸化物については大陸からの寄与が相 対的に小さいことを支持していると考えられる。

【PANs, ANs の結果について】

2012 年 11 月に珠洲において PANs と ANs の連続観測 を開始した。また、観測所で以前より行っている NO<sub>y</sub>、 NO<sub>x</sub>、T.NO<sub>3</sub> の濃度観測結果と比較し、観測物質の濃 度変動について調べた。2013 年 1 月 1 日から 14 日の 期間において、NO<sub>y</sub> に対する比をとると PANs は約 20%、ANs は約 10%の割合であった(図 3)。T.NO<sub>3</sub>の存

在割合は 20%程度であり、これと比較する と有機硝酸塩(PANs, ANs)の寄与は大きく、 この時期の NO<sub>y</sub>の輸送においてより重要 な成分といえる。また、各成分の NO<sub>y</sub> に 対する比には規則的な日変動パターンは 見られなかった。一方、観測した NO<sub>y</sub>濃度 と NO<sub>y</sub>成分(NO<sub>x</sub>, T.NO<sub>3</sub>, PANs, ANs)濃度の 総和はほぼ一致しており、この時期の珠洲 においては NO<sub>y</sub> の構成成分が NO<sub>x</sub>, T.NO<sub>3</sub>, PANs, ANs でほぼ説明できることが判った。



図 1. 輸送時間と *R*(NO<sub>y</sub>)の対数との関係。黒丸 は降水量が1mm 未満、白丸は 1mm 以上を示 す。直線は回帰直線を示す。



図 2.2011 年 2 月における大陸-珠洲間の輸送 時間の分布 (積み上げグラフ)。灰色の領域は 図 1 から算出した NO<sub>v</sub>の寿命を示す。



図 3.2013 年 1 月 1 日から 14 日の間での NO<sub>y</sub> 中における各 種構成成分の存在割合の平均日変化。

大気エアロゾル同化システムとリモートセンシングデータを用いたエアロゾルに関する統合的研究

気象庁気象研究所 弓本 桂也

目的

中国北西部を起源とする黄砂は、東アジア春季における支配的なエアロゾルの一つである。大気環境、 健康被害、気候、海洋の生物化学など多岐に渡る影響が示唆されており、長年にわたりそのライフサイ クル(発生・輸送・沈着)が研究されてきた。特に近年においては、数値モデルや衛星・大規模観測ネ ットワークを用いた研究が隆盛し、それらをデータ同化の技術で結びつけた研究も行われるようになっ てきている(例えば, Yumimoto et al., 2008, Ku and Park, 2013)。本研究では、従来は黄砂の発生量 の推定がメインだった同化研究を一歩前進させ、リモートセンシングデータを用いた黄砂の発生量とそ の粒径分布の逆推定を行った。

• 実験方法

エアロゾル同化システムには RAMS/CFORS/4D-Var(RC4; Yumimoto et al., 2008)を用いた。RC4 は 化学輸送モデル RAMS/CFORS(Uno et al., 2004)を基本としており、土地利用データなどの外部データ やメソ気象モデルで計算された土壌水分・摩擦速度を元に黄砂の発生量を計算している。RAMS/CFORS、 RC4 ともに東アジアの黄砂・大気環境の研究に広く用いられている(例えば, Hara et al., 2009)。同化 データには、国立環境研究所が展開する地上ライダー観測ネットワークの観測データを利用した。環境

パルス信号の後方散乱係数および偏光 解消度を測定し、エアロゾルの鉛直プ ロファイルを測定することができる。 本研究では2005年の4月下旬に発生 した大規模な黄砂イベントを対象とし た。モデルの解像度は40kmで、北京、 富山、つくば、仙台、札幌で観測され た消散係数の鉛直プロファイルを同化 に用い、ゴビ砂漠における黄砂発生量 とその粒径分布の逆推定を行った。図 1に本研究の概略図を示す。

研のライダーでは、射出した 532nm の



Figure 1. Schematic diagram of the size-resolved inversion.

結果と考察

まず、本研究で対象とした黄砂イベントについて述べる。2005 年 4 月 25-26 日にかけて、ゴビ砂漠上 空を低気圧とそれに伴う寒冷前線が通過、強く冷たい北西の風をもたらし、大規模なダストストームが 発生した。ダストストームによって舞い上がった土壌粒子が東へと輸送され、28 日には北京、30 日に は日本で黄砂が観測された(詳細は Yumimoto et al., 2007; 杉本ら 2005)。



Figure 2. (a) Horizontal distribution of the emission scaling factor. (b-d) a priori (blue line) and a posteriori (red line) size distributions of dust emission fluxes.

次に、同化によって得られた発生量と粒径分布を図2に示す。同化によって、中国北部からモンゴルに かけての領域で黄砂の発生量が大幅に増加した。領域全体では発生量は13.4Tg から18.9Tg に増加し た。粒径分布は特徴的な分布を示し、西側(領域IとII)では粒径3.19、5.06µmの排出量が大きく増加 しピークの粒径が5.06µm から3.19µm に移ったのに対し、東側の領域では3.19µm 以下の細かい粒 子が増加していることがわかる。特に最も東に位置する領域 IV では0.82-2.01µm の粒子が増加し、 滑らかな粒径分布となった。

最適化された排出量とその粒径分布が輸送される黄砂に与える影響を調べるため、同化前後のオングス トローム指数を比較した。オングストローム指数は波長の異なるエアロゾル光学的厚さの比をとったも ので、大気中のエアロゾルの粒径分布の特徴を表す。同化によって、ダストストームの前線の部分でオ ングストローム指数は増加(粗い粒子の割合が増加を表す)、中心部分でオングストローム指数は減少 (細かい粒子の割合の増加を表す)した。これは、ダストストームの前線部分と中心部分の輸送高度の 違いが関係していると考えられる。

最後に、同化によって得られた黄砂の排出量と粒径分布を衛星などによって観測された地上の状態と比較した。その結果、粒径分布の異なる東と西側では、植生(NDVI)や表層を構成する土壌の種類が異なることがわかった。特に特徴的な分布を見せた領域 IV は、土壌水分が乏しく、乾いた土壌の状態が得られた粒径分布に影響を与えていることが示唆された。

• まとめ

本研究では、大気エアロゾル同化システムとリモートセンシングデータを用い、従来の排出量の推定か らさらに踏み込み、その粒径分布の最適化を行った。今後もデータ同化手法を介し、数値モデルと観測 データを結びつけることによって、排出量や粒径分布、化学反応係数や沈着速度などの逆推定など、統 合的な研究を進めていく予定である。

● 参考分布

Yumimoto, K., I. Uno, N. Sugimoto, A. Shimizu, Y. Hara, and T. Takemura (2012), Size- resolved adjoint inversion of Asian dust, Geophys. Res. Lett., 39, L24807, doi:10.1029/2012GL053890.

# 流体工学的手法による絶滅遊泳性爬虫類の生体復元

東北大学 学術資源研究公開センター 西 弘嗣

### 背景および目的

長頸竜類は中生代末に絶滅した四肢動物で,翼状の四肢を用い羽ばたき運動か滑空により泳いだと考えられる.しかし,長頸竜類は,前後の翼の面積が同程度であることや全身に対する頸や頭が占める割合が大きいことという,他の遊泳性動物には無い形質も備える.そのため,その遊泳性能や行動を現生動物のふるまいに基づき推論することには重大な困難があった.

本研究では、長頸竜類の体形と安定性(運動性)の対応を流体工学的な手法を用いて定量することを目的 とし、それに基づきこれら動物の行動の傾向や生態学的地位を推論してきた.前年度までに、実際の長頸竜 類の典型例である頸部が長い種類(L型)と短い種類(S型)を模した2種の模型を用意し、その曳航試験 により流体力係数を測定して運動方程式を得ている。今年度は、これらの運動方程式を用いた数値実験を行 い、(1)静安定性を維持できる滑空運動の条件と(2)縦運動に関する動安定性を算出し、両者の差異を明確 なものとすることを試みた。

#### 手法

長頸竜類が自身の比重と前後の翼の向きを制御でき,それによって運動状態を変えられるものとしてシミ ュレーションを行った.運動方程式は加速度,前進速度,トリム角(=体軸と速度方向がなす角),前後の翼 の取付け角(=体軸と翼弦がなす角),比重を変量とした.まず,この方程式を加速度ゼロ,前進速度 0.50 m/s ~1.00 m/s,トリム角+0.10 rad~-0.10 rad,比重 0.90~1.10 の領域の値について解くことで,前後の翼の 取付け角の組合せを得た.これと曳航試験により得られた失速の条件を併せることで,定常運動できる条件 を得た.そして,この条件で作用するピッチモーメントのトリム角に関する微係数に基づき静安定性を評価 した.さらに,静安定である状態から速度や加速度がわずかに外れた状態(速度 0.99~1.01 倍,トリム角+0.075 rad~-0.075 rad,ピッチ角速度+0.075 rad/s~-0.075 rad/s)を初期状態とする縦運動の時間発展を計算し, それが定常状態へと収束するか否かに基づき動安定性を評価した.

# 結果

L型およびS型の定常運動について,速度-比重-トリム角条件とトリム角に関する静安定性の関係を図 1 に示す.L型は、トリム角が小さい状態(|α|<0.1 rad)でおよそ静安定であったのに対し、S型ではおよ そ全領域で不安定であった.同条件での滑空比はL型の方がS型より2倍程度大きかった.動安定性の評価 は、静安定な領域が大きいL型についてのみ行った.この一例を図 2に示す.いずれの場場合にも、トリム 角ならびに潜降/浮上角は純減衰し、数分内に定常状態に達した.

#### 考察

L型は,定常運動における滑空比が高く,縦運動に関し動安定な状態領域が広く存在することから,受動 的制御により状態を保って移動する低コストの運動・行動を指向したと考えられる.一方のS型は,定常運 動における滑空比が低く,縦運動に関し不安定(高運動性)であった.このことから,能動的制御により機 敏に動きまわる高コストの運動・行動を指向したと考えられる.これに対し,化石に基づく行動学的性質は 次のとおりである.L型は,遊泳動物だけでなく底生動物(貝類や甲殻類など)を食べており,摂餌と呼吸 のための潜水行動(水面と海底との往復)が欠かせなかった.S型は,遊泳動物を追い回して捕食していた 可能性が高い.この傾向は,本研究で得られた力学的傾向と整合的と言える.

# 研究成果

- 望月 直,中村昌彦,西弘嗣(2012)水中滑空する長頸竜類の縦動安定性.日本古生物学会 2012 年年会講演 予稿集, p. 22.
- 望月 直,中村昌彦,西弘嗣,川谷哲也,植田剛史(2012)絶滅した遊泳性爬虫類の遊泳性能評価. 第23回 海洋工学シンポジウム.OES-088.

# 研究組織

- 西 弘嗣 (研究代表者, 東北大学学術資源研究公開センター)
- 中村 昌彦 (所内世話人,九州大学応用力学研究所)

望月 直 (研究協力者, 東北大学大学院理学研究科/伊藤忠鉱物資源開発株式会社)



図 1 定常状態での,前進速度-トリム角-比重条件とトリム角に関する静安定性.上:L型;下:S型.



図 2 水中滑空するL型(比重1.06,前進速度1.0 m/s) の運動に擾乱を与えた場合の,航跡(上)と,トリム角(中) と潜降角度(下)の時間推移.

# 非線形干渉を考慮した表面波・内部波の平面2次元数値解析による研究

研究代表者 鹿児島大学大学院理工学研究科 柿沼太郎

#### 研究の目的

辻・及川らは、2層流体における弱非線形・弱分散モデルを用いて孤立波の2次元相互作用の数値解析を行ない、初期の孤立波の振幅の4倍を超えるような新しい波の生成が起こり得ることを示した.しかしながら、波の非線形性・分散性が共に強い内部波に対してもそのような結果が得られるかどうか不明である.そこで、柿沼が導出した変分法による方程式系に基づく数値モデルを適用し、内部波の非線形性・分散性を十分に考慮して、表面波及び内部波の2次元的挙動を数値解析的に研究する.強非線形数値モデルのベースを開発してきた柿沼・中山グループと、辻・及川グループとが協力してこの問題の解明にあたろうとするのが、本共同研究の目的である.

過去の共同研究において、まず、平成19年度に、計算手法の検討及び1次元波動を対象とし た数値モデルの開発を行なった.次に、平成20年度に、平面2次元問題を対象とした数値モデ ルを開発した.そして、平成21~22年度において、孤立波解を初期条件として数値モデルに導 入し、1次元場における、潜堤や斜面上を伝播する内部波の数値解析を行なった.更に、平成 23年度において、平面2次元場を対象とし、地形の起伏や浮体の存在といった様々な条件にお ける表面波及び内部波の1次元的、または、2次元的挙動に関して調べた.この昨年度の共同 研究により、2次元平面において、内部ソリトン波の干渉によるstemの発生が数値解析で確認 され、KP理論で示されているような増幅率2以上の内部波が再現された.本年度は、こうした Mach stemの形成といった非線形干渉を伴う表面波及び内部波の2次元的挙動に関して研究を 進める.

### 研究の方法

具体的には,2次元平面を伝播する表面波・内部波を対象とし,次の各事項を目的として研 究を進める.

- (1) 柿沼の方法では,鉛直分布関数を適切に選択する必要があるが,各地形特性に応じて精度 よく効率的に計算を進められるような分布関数を見出す.
- (2) 多方向表面波が干渉する波の場を対象とし、stemの形成といった非線形現象を数値シミュレーションにより再現し、その生成メカニズムを考察する.
- (3) 多方向内部波が干渉する波の場を対象とし, stem の形成といった非線形現象を数値シミュレーションにより再現し, その生成メカニズムを考察する.
- (4) 条件によっては、完全な Euler 方程式の代わりに、高次の非線形項を取り入れた簡単化した 方程式を用いて議論できる可能性がある.この理論的アプローチも試みる.

これらの各段階において,数値解析や理論式に関する仕事を分担し,計画の遂行にあたる. 全メンバが直接会う機会を持ち,議論を行なう.

### 主要な成果

本研究の主要な結論は、次の通りである.

- (1) 平面 2 次元場を対象とした数値解析において,差分格子と平行でない鏡面壁面を扱う必要 がある場合,完全反射の壁面境界で法線方向流束をゼロとする必要がある.本数値モデル において,これを実現する新しい境界条件の与え方を提案した.
- (2) 平面 2 次元場を対象とし,表面孤立波解を初期条件として与え,2 方向ソリトン波の干渉 に関して数値解析を行なった.その結果,平面 2 次元場におけるソリトン波の干渉に伴う stemの発生を確認した.
- (3) 平面 2 次元場を対象とし、3 次オーダの内部孤立波解を初期条件として与え、2 方向内部ソリトン波の干渉に関して数値解析を行なった. その結果、平面 2 次元場における内部ソリトン波の干渉に伴う stem の発生を確認し、KP 理論で示されるような増幅率 2 以上の stem を再現した.
- (4) 薄板状浮体構造物と1層流体の相互干渉問題の解析ができるよう、本数値モデルを拡張し、 浮体波及び水面波の2次元伝播の数値解析を行なった.すなわち、まず、本モデルが、既 存の実験値を比較的高い精度で再現できることを確認した.次に、薄板状浮体構造物であ る海上空港を想定し、飛行機が離着陸するときに生成される浮体波及び水面波の平面2次 元伝播をシミュレートした.

# 研究成果報告

- 中山恵介・柿沼太郎・辻 英一・及川正行: 振幅の違いを考慮したソリトン共鳴による大振幅 ソリトンの解析, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 68, No. 2, pp. 1-5, 2012.
- 山下 啓・柿沼太郎・山元 公・中山恵介: マッハステム形成過程の数値解析, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 68, No. 2, pp. 6-10, 2012.
- Kakinuma, T, Yamashita, K., and Nakayama, K.: Surface and internal waves due to a moving load on a very large floating structure, J. Applied Mathematics, Vol. 2012, Article ID 830530, pp. 1-14, 2012.
- Nakayama, K., Kakinuma, T., Tsuji, H., and Oikawa, M.: Nonlinear oblique interaction of large amplitude internal solitary waves, Proc. 33rd Int. Conf. on Coastal Eng., 2012. (in print)

# 組 織

研究代表者	柿沼太郎	(鹿児島大学大学院理工学研究科 生命環境科学専攻)
研究協力者	中山恵介	(北見工業大学工学部 社会環境工学科)
研究協力者	及川正行	(福岡工業大学工学部 知能機械工学科)
所内世話人	辻 英一	(九州大学応用力学研究所 地球環境力学部門)

海底ケーブル自動敷設システムの開発

独立行政法人海洋研究開発機構

崔 鎭圭

西田 周平

横引 貴史

百留 忠洋

目的:

これまで ROV オペレータによって行われてきた海底ケーブル敷設制御を自動的に 行うシステムの開発を行う。本試験では、自動化のために油圧式から電動式へと入れ 替えたケーブルボビン及び繰り出しシーブ駆動用モーター、それらの回転速度・回転 角度を測るセンサー、対地速度を測るための DVL(Doppler Velocity Log)、またこれ らを統合利用したケーブルの自動展張制御及び自動回収制御の動作確認を行う。

方法:

長さ約3m、幅約2.6m、高さ約1.2m、空中重量約1350kg、水中重量約0kgの海 底ケーブル敷設装置を水槽電車の下に取り付け、水中にてケーブルボビン及び繰り出 しシーブ駆動用モーターの特性、回転速度・回転数を測るセンサーの正確度、DVL との通信等の確認を行った。また、各駆動用モーターの制御パラメーターの調整の後、 水槽電車を走らせ、DVL からの対地速度に合わせてケーブルを自動的に繰り出す制 御及び敷設されたケーブルを回収する回収制御の試験を行い、正しく動作することを 確認した。図1にケーブル敷設制御のイメージを、図2に水槽の底に敷設されたケー ブルを示す。今後、実際の敷設作業への投入に向けて実海域での試験を行う予定であ る。



ケーブル敷設制御イメージ



敷設されたケーブル

水産資源量調査用グライダー型海中ビークルの開発

九州大学大学院工学研究院 山口 悟

### 1. 研究の目的

国土が狭く島国である日本では古くから様々な海洋資源の恩恵を受けてきたが、水産資源においては、 近年、乱獲による魚の個体数の減少や、魚種の絶滅危機などの問題が注目されており、「獲る漁業」か ら「つくり育てる漁業」への移行を目指して、養殖漁業の育成や人工漁礁の設置等による漁場形成が実 施されている。これらの試みにおいて、漁業施設周辺の海洋環境を調査することは不可欠であり、有効 な調査手法の開発が望まれている。

開発中のグライダー型水中ビークルは、プロペラやスラスターといった一般的な推進装置を持たず、 浮力調節により潜降、浮上を繰り返し、海中を滑空して航行するため、省エネルギー性や静粛性に優れ ており、海洋の長時間連続の観測に適していると考えられる。一方で水産資源量調査では調査海域を自 由に航行できる高い運動性能が求められるが、スラスターを持たないグライダー型水中ビークルでは、 機体形状の非対称性や重心の僅かな変動が機体の運動に大きく影響する。そこで、本研究では、ビーク ル投入時における定常滑空状態への速やかな移行を実現するため、水中投入直後の水中重量、トリム・ ヒール角の自動調節およびその後の定常滑空状態への移行についての調査を行い、初期滑空状態におけ る機体の運動制御方法を検討した。

### 2. グライダー型海中ビークルの概要

図1にグライダー型水中ビークルの外観を示す。機体寸法は長さ1m、最大高さ0.3m、幅約0.35mで、 機体縦断面形状はNACA0030 翼形を参考に設計されている。本体内部に複数の浮力調節装置を内蔵し耐 圧構造を構成するために、尾翼や舵を持たない無尾翼型の機体を採用している。また、本体カウルと耐 圧容器は分離可能であり、メインテナンス性や実海域における運用に優れている。表1に機体の主要目 を示す。

本機体の特徴として、図2に示すように、耐圧容器内部に4本の独立した浮力調節装置を持つことが 挙げられる。図3に示すように、浮力調節装置のアクチュエータヘッドの位置を個別に制御することに より、機体全体の重心位置および浮心位置を変化させ、機体の水中重量と姿勢をコントロールすること が可能となる。ここでは、すべての浮力調節装置のアクチュエータヘッドがシリンダーの中央にある状 態を基準状態とし、その位置を各アクチュエータヘッドの基準位置とする。



図1 グライダー型海中ビークル



図2 機体内部構造

表 1 機体主要目

Length (m)	1.000
Breadth (m)	0.356
Height (m)	0.300
Weight (kg-f)	62.6



図3 浮力調節装置構造図

### 3. 機体運動制御系の開発

ビークルが海中に投入されると、機体は水中重量とトリム・ヒール角の自動調整を開始する。その後、 計画された定常滑空状態へと移行することとなるが、海中投入から定常滑空状態までの間は機体前進速 度が小さく、機体運動が不安定となることが懸念される。ここでは、この初期滑空状態における機体の 安定性を確保するため、機体運動の自律制御系を開発し、その有効性について調査した。

制御系設計に用いる機体運動のシミュレーション計算には、機体固定座標系に基づく6自由度の運動 方程式を用いた。また、運動制御にはPID制御方式を採用し、機体深度、ロール角、ピッチ角をフィ ードバックすることで各浮力調節装置のアクチュエータヘッドの制御量を決定した。

### 4. 機体運動のシミュレーション計算

ビークル投入直後の水中重量、機体トリム・ヒールの自動調節に関するシミュレーションとして、基 準状態において機体深度 0.1m、ロール角 2 度、ピッチ角 2 度を初期状態として与え、目標値を水深 1.0m、 ロール角 0 度、ピッチ角 0 度とする計算を実施した。図 4 に右前方浮力調節装置のアクチュエータヘッ ド位置の時刻歴を示す。浮力調節装置の容積変化により、機体深度とロール角、ピッチ角が制御されて いる様子が分かる。また、図 5 にはこのときの機体深度の時刻歴を示す。

図6に水中重量、ヒール・トリム角の自動調節終了後の定常滑空状態への移行の様子を示す。図中の 赤線は本体重心を固定した場合の前進距離を示しているが、ピッチ角の不足により十分な前進速度が得 られていないことが分かる。一方で重心移動装置を設置し、浮力調節装置と共に機体本体の重心を適切 に制御した場合には、青線で示すように安定した初期滑空状態を獲得出来ることが確認された。



#### 5. まとめ

水産資源量調査を目的としたグライダー型水中ビークルの初期滑空状態における安定性を確認する ために、シミュレーション計算を行い、自律運動制御系の開発を実施した。グライダー型水中ビークル を水中に投入した直後の水中重量およびヒール、トリムの自動調節シミュレーション結果より、機体は 速やかに目標姿勢に到達出来ることを確認した。また、自動調節後の機体運動の安定性ついて調査した 結果、機体本体の重心を移動させることにより初期滑空状態の機体安定性が確保出来ることが確認され た。今後は、設計された自律制御システムを機体に実装し、実験によりその有効性を確認する予定であ る。

### 瀬戸内海の伊予灘と豊後水道における乱流観測

研究代表者 愛媛大学沿岸環境科学研究センター 郭新宇

### 目的

瀬戸内海と太平洋とをつなぐ豊後水道では、黒潮起源の暖水塊が沿岸密度流として北上し、海域内の海況 が短時間内に急変する「急潮現象」が発生することが古くから知られている。 特に、豊後水道東岸の宇和島 湾では、急潮に伴う水温上昇が最大で 5 ℃/day にも達し、周辺の養殖業に甚大な被害を与えることが報告 されている。急潮の発生前後には豊後水道底層に外洋起源の冷水が侵入する底入り潮の現象も発生すること が知られている。豊後水道内における顕著な急潮・底入り潮の発生時期は夏季の小潮時に集中しており、そ の顕著な周期性から大潮時に強化される鉛直混合との関連性が指摘されている。一方で速吸瀬戸を通じて豊 後水道に接続する伊予灘では底部冷水塊を伴った潮汐フロントが形成される。伊予灘・豊後水道底部の冷水 中には栄養塩が豊富に含まれることが指摘されており、Takeoka et al. (1993) は各海域の底層冷水中の栄養 塩が有光層に運ばれる経路として、鉛直混合(拡散)によって鉛直的に輸送されるプロセスがある一方で、 強い鉛直混合が発生する速吸瀬戸を介して各海域成層域の亜表層に水平貫入する栄養塩バイパスを提唱して いる。このように海水の鉛直混合は伊予灘および豊後水道における海水、栄養塩の動態を左右する極めて重 要な要因である。しかし、これまでそれらの海域における鉛直混合強度の見積もりは満足に行われておらず、 その時空間分布はおろか、オーダーすらわかっていないのが現状であった。そこで、本研究では伊予灘およ び豊後水道内において乱流直接観測を行い、鉛直混合強度の定量化を行った。

#### 研究方法の詳細

2012年の7月20日(大潮)と8月6日(小潮)に伊予灘を横断する9点(I1~I9)において(図1(a))、また7 月31日(大潮)に宇和海(U1~U4)と豊後水道(B1~B5)を横断する9点において(図1(a))、さらに8 月 20 日(大潮)と 9 月 10 日(小潮),豊後水道内の宇和島市日振島沖の 5 点(S1~S5)(図2(a))で,九州大学 応用力学研究所所有の浅海用乱流計 TurboMAP5 を使用し乱流観測を行った。 鉛直混合強度の指標である鉛 直拡散係数  $K_z$  は、乱流観測から得られたエネルギー散逸率  $\epsilon$  と成層強度 N を Osborn (1980)の式  $K_z = \Gamma$  $\epsilon/N^2$  に代入することにより見積もった。 ここで、混合効率  $\Gamma = 0.2$  とした。

# 結果

伊予灘、豊後水道・宇和海における断面観測から得られたポテンシャル密度と鉛直拡散係数を図1(b)に示 す。密度分布から速吸瀬戸付近(I7~I9, B1)では、期待されるように速い潮流によって水柱は良く混合さ れていた。一方で伊予灘東部(I1~I6)、豊後水道南部(B2~B5)では、密度成層が形成されており、伊予灘 では潮汐フロントを伴った底部冷水塊が、豊後水道では外洋からの冷水塊の底部への侵入という典型的なそ れぞれの海域における海洋構造が見られた。鉛直拡散係数についても、期待されるように海峡部で大きな値 が得られ、そのオーダーは 10<sup>-3</sup>~10<sup>-1</sup> m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup> であった。一方で成層域では K<sub>2</sub> は 10<sup>-6</sup>~10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup> であり海 域によって 1~3 オーダーの隔たりがあることが本観測によって明らかになった。

日振島沖における観測から得られたポテンシャル密度と鉛直拡散係数を図2(b)に示す。大潮時には、小潮時に比べて成層が弱い結果となった。 先行研究ではこのような大潮-小潮に同期した成層強度の変化を鉛直混合強度の違いに起因するものと予想したが、実際、どの観測点においても大潮時には小潮時よりも鉛直拡散係数が大きいことが確認された。 特に日振島に近い測点 S4, S5 においては、大潮時には、で K<sub>2</sub> ~ 10<sup>-2</sup> m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup> に 達する非常に強い鉛直混合が観測された。 観測した 5 点における鉛直拡散係数の平均値は大潮の上げ潮時で K<sub>2</sub> ~ 9.7×10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>, 下げ潮時で ~ 9.6×10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>, また、小潮の上げ潮時で ~ 1.4×10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>, 下げ潮時で ~ 0.5×10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup> であった。この結果により、豊後水道における鉛直拡散係数は大潮時と小潮時でおよそ 1 オーダーの隔たりがあることが本観測により初めて明らかになった。



図1:(a) 観測点(伊予灘:I1~I9,豊後水道:B1~B5,宇和海:U1~U4)。(b) 観測から得られた,各海域 におけるポテンシャル密度(等値線, 0.2 kgm<sup>-3</sup> 間隔)と鉛直拡散係数(shade, ×10 m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup> 間隔)の分布。



図2:(a)観測点(S1 ~ S5)。(b)観測から得られた,各潮時(小潮・大潮時,上げ潮・下げ潮時)におけるポテンシャル密度と鉛直拡散係数の分布。

# 研究組織

郭 新宇(愛媛大学沿岸環境科学研究センター、研究代表者)、松野 健(九州大学応用力学研究所、所内世話 人)、日比谷紀之(東京大学大学院理学系研究科、研究協力者)、永井 平(東京大学大学院理学系研究科、研 究協力者)、堤 英輔(愛媛大学沿岸環境科学研究センター、研究協力者)
#### 里海創生のための沿岸海域の環境保全

広島大学大学院生物圈科学研究科 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.さらに、柳哲雄教授が提唱した「里海」の重要な構成体 として藻場・干潟を含めた沿岸海域は、物質循環機構と生物生産という役割のみならず、 市民の憩いや環境学習などの役割をもっている.このような「里海」としての沿岸海域の 環境保全と再生の重要性を明らかにするため、関係研究者のこれまでの研究成果を発表し てもらい、活発な討論を行うことを目的とした.

#### 2. 研究集会の概要

日時:2012年12月5日(水)12:50~12月6日(木)11:50 場所:九州大学応用力学研究所西棟6階 多目的研究交流室 W601 発表者:田中 剛(九大応力研,博士課程前期1年) 石丸梨香 (愛媛大 CMES, 愛媛大学理学部4年) 郭 新宇 (愛媛大 CMES, 准教授) 中川美和(愛媛大 CMES,, 愛媛大学理学部 4 年) 一見和彦(香川大瀬戸内研セ庵治,准教授) 吉江直樹 (愛媛大 CMES, 講師) 木村桃子(神戸大院海事科学,博士課程前期1年) 古賀竜太郎(神戸大院海事科学,博士課程前期1年) 児玉真史(中央水研,主任研究院) Jin Guangzhe(広大院総合科学研究科,博士課程後期1年) 多田邦尚(香川大学農学部,教授) 山口一岩 (香川大学農学部,助教) 藤井直紀(佐賀大学低平地沿岸海域研究センター、特任助教) 堤 英輔 (愛媛大 CMES, 研究員) 吉川昌志(広大院総合科学研究科,博士課程前期1年) 小野寺真一(広大院総合科学研究科, 准教授) 齋藤光代(愛媛大 CMES, JSPS 研究員)

発表プログラムは資料1に掲載した.

#### 3. 研究成果

発表会の様子(写真)を資料2に,要旨の一部を資料3に掲載した.研究集会では17 題の講演発表があり,関係者を含めて約40名の参加があった.講演発表後の質疑応答や 懇親会において,里海創生のための沿岸海域の環境保全についての問題点や課題について 活発な議論がなされた. 資料 1. 研究集会プログラム

日時:2012年12月 5日(水)12:50~2012年12月 6日(水)11:50 場所:九州大学応用力学研究所西棟6階 多目的研究交流室 W601

	第1日 2012年12月 5日(水)	
趣旨	f説明 (12:50-13:00) 研究代表者,所内世話人	
01.	瀬戸内海のリン・窒素の起源	13:00-13:20
	田中 剛・柳 哲雄(九大応力研)	
02.	大潮と小潮に伴う潮汐フロントと底部冷水の動き:観測結果	13:20-13:40
	石丸梨香・郭 新宇・堤 英輔・吉江直樹・武岡英隆(愛媛大 CMES)	
03.	大潮と小潮に伴う潮汐フロントと底部冷水の動き : モデル結果	13:40-14:00
	郭 新宇・于 暁杰・武岡英隆(愛媛大 CMES)	
04.	潮汐フロント周辺での GPS ラジオゾンデ観測:盛夏と初秋の比較	14:00-14:20
	中川美和・郭 新宇・堤 英輔・眞野 能・吉江直樹・武岡英隆(愛媛大CMES)	
05.	アマモ場海域における窒素・リンの収支	14:20-14:40
	一見和彦(香川大瀬戸内研セ庵治)・上里友子・多田邦尚(香川大農)	
06.	豊後水道における夏季の栄養塩分布と植物群集組成	14:50-15:10
	吉江直樹・坂本航平・中川美和・新田 徹・高部由季・堤 英輔(愛媛大 CMES)	
07.	淀川河口域における植物プランクトン種の変動解析	15:10-15:30
	木村桃子(神戸大院海事科学)・林 美鶴(神戸大内海域環境教育研究センター)	
08.	淀川感潮域における有毒赤潮に関する研究	15:30-15:50
	古賀竜太郎(神戸大院海事科学)ほか	
09.	河口干潟域における環境の変化が二枚貝の炭素・窒素安定同位体比に及ぼす影響	15:50-16:10
	児玉真史(中央水研)ほか	
10.	Estimation of phosphorus retention in coastal area, using comparative methods of mass	
	balance model and sediment core profile data	16:10-16:30
	Jin Guangzhe (Graduate School of Integrated Arts and Sciences, Hiroshima University), et	al.
11.	沿岸海域における珪藻細胞のSi溶出とN・P分解	09:20-09:40
	多田邦尚(香川大字震字部)はか	
12.	播磨灘表層堆積物中の有機物量の現在と過去の比較	09:40-10:00
	山口一岩(香川大字農字部)はか	
13.	19期海における根山クフケ類の表層分布 	10:00-10:20
	滕开  し、  「  「  「  「  「  「  「  「  「  「  「  」  「  」  「  」  「  」  」	
14.	伊丁灘・豊俊水迫における乱流観測	10:20-10:40

 堤 英輔 (愛媛大 CMES) ほか

 15. 海水再循環の栄養塩供給に及ぼす影響ートレーサー収支に基づく推定 10:50-11:10

 吉川昌志 (広大院総合科学研究科) ほか

 16. 大和川感潮域の栄養塩動態
 11:10-11:30

小野寺真一(広大院総合科学研究科)ほか 17. 燧灘南西部における地下水流出と流出成分の年齢分布-現場観測と物理流動 11:30-11:50 齋藤光代(愛媛大 CMES) ほか

### 資料 2. 研究集会の様子



#### 第1日 2012年12月 5日(水)







第2日 2012月12月 6日(木)





資料3.

#### 瀬戸内海のリン・窒素の起源

#### Origins of Phosphorus and Nitrogen in the Seto Inland Sea

田中 剛<sup>1)</sup> · 柳 哲雄<sup>2)</sup>

(<sup>1</sup>:九州大総理工、<sup>2</sup>:九州大応力研) キーワード:栄養塩、リン、窒素、単位応答関数、平均滞留時間

#### 1. はじめに

本州と四国、九州に囲まれた瀬戸内海は日本最大 の閉鎖性水域であり、世界最大の単位面積当たりの 漁獲量を誇る豊かな海として知られていた.しかし、 80年代をピークに漁獲量の減少が続き、現在ではピ ーク時の半分まで減少している.その原因の一つと して、栄養塩の減少が挙げられている.

栄養塩の起源は主に外洋、河川、海底の堆積の三 つである.本研究では栄養塩を管理するために瀬戸 内海における栄養物質の起源ごとの割合を明らかに する.

#### 2. 方法

河川からの栄養物質負荷量と瀬戸内海の栄養物質 濃度の応答関係から推定する単位応答関数法によっ て、起源別の栄養物質濃度を以下の式から算出した.

 $C_{i} = C_{0} + \frac{1}{V}(L_{i} + L_{i-1}e^{-b} + L_{i-2}e^{-2b} + \dots + L_{i-20}e^{-20b}) + \alpha T_{i}$ 

 $C_i(mg/l)$ は瀬戸内海の TP・TN 濃度、 $C_0(mg/l)$ は外洋の TP・TN 濃度、Vは瀬戸内海の容積、 $L_i(kg)$ はある i月の河川からの TP・TN 負荷量、 $b(month^{-1})$ は減少勾配、 $\alpha(mg l^{-1} \circ C^{-1})$ は水温に比例した海底堆積物からの溶出の比例係数、 $T_i(\circ C)$ は底層の水温である.未知数である $C_0, b, \alpha$ は最小二乗法によって決定し、起源別の割合を算出した.

#### 3. 結果·考察

図 1 に示した*C*<sub>0</sub>の観測値と推定値の比較を見て分 かるように、推定した*C*<sub>0</sub>が観測した値と良く一致し ている.図 2 に示したように、外洋起源が TP・TN ともに 58%、海底堆積物起源が TP は 33%で TN は 29%、河川起源が TP は 9%で TN は 14%である.

外洋起源の栄養塩はコントロール不可能なので、 海底堆積物から溶出する栄養塩を管理することが効 果的であることがわかる.







図 2. **TP**・**TN** 濃度の観測値と推定値の比較と 起源別の割合

### 地形のダイナミクスとパターン及び境界領域

研究代表者·柳田達雄(大阪電気通信大学)

#### 1 研究集会の開催目的

多くの地形変化のダイナミクスは流体運動とそれに伴う物質移動からなっている。物質移動は,流体運動を規定している境界条件を変化させ,その変化が流れにフィードバックする極めて非線形性の強い現象である。地形変化の代表的な例は,河川流路変化・河岸変化・砂丘移動・鍾乳石形成・熱収縮割れ目の形成などと多岐にわたり,各分野で異なる対象・異なる方法論で取り扱われてきた。

本研究集会では、これらの現象を流れとそれに伴う物質移動による境界の自発的運動として捉え、異分 野での理論、数値計算、実験・観測など異なる方法論の研究者が最新の知識を共有することにより、新たな 知見や方法論を見出すことを目的としたい.

このような流体の流れ場による固体移動,また,それに起因した流れ場へのフィードバックのダイナミ クス及びパターン形成の研究集会は,応用力学研究所の共同研究集会として開催することが最適と考えられる.

#### 2 プログラム

10月30日(火)

14:00-14:45 浸食,輸送,堆積の物理過程を取り入れた地形形成モデル

岡村 誠(九大応力研),佐伯 亜由美(地圏環境テクノロジー)

14:45-16:00 超水滴法による雲形成・降水の精密シミュレーションとその応用

島 伸一郎(兵庫県立大シミュレーション)

- 16:00-16:15 休憩
- 16:15-17:30 火星科学からみた粉体の面白さ

宫本英昭(東大総合研究博物館)

- 17:30-17:45 休憩
- 17:45-18:30 格子ボルツマン法とセルオートマトンを組み合わせた流体中の土砂輸送のモデル 中本達哉,新屋啓文,粟津暁紀,西森拓(広大理)
- 10月31日(水)
- 9:30-10:15 **重力不安定性の中で形成されるセルパターンの形成** 下川倫子(千葉大先進科学センター),北畑裕之,櫻井建成(千葉大理)
- 10:15-11:30 小惑星分布の縞構造とリウビル演算子のバンド・スペクトル

野場賢一(大阪府立大工)

- 11:30-13:00 昼休み
- 13:00-13:45 砂の供給の有無による横列砂丘の安定性

新屋啓文,粟津暁紀,西森拓(広大理)

13:45-14:30 移動可能粒子が少ない場にできる堆積パターンに関する水路実験

谷口圭輔 (名大環境)

#### 3 講演内容の概要

#### 浸食,輸送,堆積の物理過程を取り入れた地形形成 格子ボルツマン法とセルオートマトンを組み合わせ モデル

#### 岡村 誠, 佐伯 亜由美

土砂, 流体の保存式による地形形成モデルにおいて, 初期値などのパラメーター依存性について考察する. また, 尾根近傍における浅水流方程式の妥当性につ いても議論する.

#### 超水滴法による雲形成・降水の精密シミュレーショ ンとその応用

#### 島 伸一郎

地球の気候システムにおいて雲は極めて重要な役割 を果たしており、日々の気象現象や、気候変動の研究 を進める上で, 雲をどのように予測モデルに取り込 むのかは大きな課題である.我々は超水滴法 (Super-Droplet Method) と言う新しい雲微物理モデルの開発 を行なった. 超水滴法はエアロゾル・雲粒・降水粒子の 運動と変化を,確率的な手法に基づく粒子法を使っ て統一的に計算する方法であり,経験的なパラメタ を使わずに原理的な物理法則に基づいて粒子系の状 態変化を計算することができる. さらに, 雲に限ら ず,一般に確率的に衝突併合を繰り返す離散粒子系 野場賢一 に超水滴法は適用可能であり、例えば噴霧燃焼や惑 太陽系に数多く存在する小惑星の分布には、火星と 星形成のシミュレーションにも応用できるであろう.

本講演では、超水滴法の概要を解説した後、観測 と数値計算の比較結果など,最近の研究成果を紹介 ターンの共存の問題についても触れた.

#### 火星科学からみた粉体の面白さ 宮本英昭

近年の惑星探査で明らかにされた地表面の特徴の中 で、特に粉体の挙動に焦点をあてて紹介した。特に 火星表層にみられる風成地形と、この形成プロセス に関するレビューを,こうした標準的な解釈が持つ 問題点を指摘しつつ紹介した. さらに. こうした地 形が持つ火星科学全体に対する強いインパクトにつ いても議論し, 土星の衛星上における微小重力下で の粉体の挙動と、そこから明らかにされる土星系の 活動史についても言及した.

## た流体中の土砂輸送のモデル

#### 中本達哉, 新屋啓文, 粟津暁紀, 西森 拓

格子ボルツマン法と土砂の運動をモデル化した確率 的セルオートマトンを組み合わせたモデルを用いて. 二次元鉛直断面内における地形について、流体の流 れのパターンと、地形の形成や運動およびその安定 性との関係を考察する.

#### 重力不安定性の中で形成されるセルパターンの形成 下川倫子,北畑裕之,櫻井建成

重力不安定性の実験で二流体溶液間でセルパターン が形成される. セルパターンのサイズ分布を調べた ところ, サイズ分布はベキ則に従うことが実験で分 かった. セルパターンの形成機構を理解するために モデルを提案した. モデルはベキ則を示し, 指数も 実験値と一致する. これはセルの独立的な成長と出 現がセルパターンの形成にとって重要であることを 示す.

#### 小惑星分布の縞構造とリウビル演算子のバンド・ス ペクトル

木星の間のメインベルトにおいて, Kirkwood の隙間 とよばれる小惑星がほとんど存在しない領域がある. その領域は木星と小惑星の公転周期の比が 2:1, 3:1, した.また,雲の Open-cell パターンと Closed-cell パ 5:2 などの共鳴点に位置している.我々は太陽・小惑 星・木星の円制限三体問題における古典的リウビル 演算子の固有値問題を考え,小惑星分布の編構造を その固有値スペクトルに現れるバンド構造として定 量的に解析する.

#### 砂の供給の有無による横列砂丘の安定性 新屋啓文, 粟津暁紀, 西森 拓

一方向流下で形成される横列砂丘は、多くの実験と モデルにより形状の再現がなされている. 今回は, 近 年注目されている横列砂丘の安定性について,砂丘 骨格模型を用い検討した.砂丘骨格模型は,一方向 の流れにおける砂丘形態を高さと位置の二変数で記 述する力学系モデルである. 横列砂丘の安定性は, 上 流からの砂の供給量に強く依存していることが実験. 観測, 数理モデルにより示唆されている. そこで, 供 給が存在する連立系(横列砂丘が前後に連なる)と,

存在しない孤立系の2パターンを想定し、初期の摂 移動可能粒子が少ない場にできる堆積パターンに関 動やシステムサイズの依存性,最終的な形状へ至る する水路実験 までのゆらぎの性質を調べた.その結果,連立系の 谷口圭輔 場合、横列砂丘の最終的な状態は初期の摂動によら ず内部パラメータにより一意的に定まり、システム サイズの増加は横列砂丘を不安定化させた.また,初 期の摂動は横方向の砂の拡散により均一化され、そ の後のゆらぎの成長率は指数的に変化し、その成長 率は内部パラメータで決定した.一方で、砂の供給 が存在しない孤立系の場合、横列砂丘は砂の流出に より時間の経過とともにゆらぎが成長し、最終的に 複数のバルハンが出現する不安定性を示した.

南極などで観測されるスノーバルハンは, バルハン 砂丘の雪のアナログとされてきたが, 形態, 粒子の 移動様式,移動速度を検討した結果,砂丘よりも始 原的な「プロトデューン」のアナログであることが わかった.プロトデューン地形に関する先行研究は 未だすくないため,全く移動可能粒子のない状態か らデューンができるに至る全過程を実験で観察する 必要がある.円筒水路を用いた実験により、その過 程の一部である、縦列型のサンドリボン地形からサ ンドパッチを経て横列型のプロトデューン地形が出 来る過程が再現された.

#### 開催日程,場所 4

開催日程 2012年10月30日(火)-31日(水) 開催場所 九州大学応用力学研究所西棟6階多目的研究交流室(W601号室) 8件 講演数 参加者数 18人

#### 非線形波動研究の最前線 – 構造と現象の多様性 –

研究代表者 神戸大学理学部 太田 泰広

#### 研究集会の目的

非線形波動は、海洋や大気の流れ、物質やエネルギーの輸送などにおいて普遍的に現れる現象であり、 その性質を研究することは、地球環境を理解する上でも重要な役割を果たす。非線形波動現象の研究は 現在まで、理論、実験、数値解析などの各研究分野が活発に相互作用しながら発展してきた。特に、現 象を記述する方程式系の数学的構造に対する理解が深まるにつれて、微分幾何学、数値解析、計算アル ゴリズムなどの諸分野と、思いがけない密接な関係があることが明らかになってきた。このように様々 な研究分野間の交流によって、新しい研究テーマや解析手法が開拓され、基礎応用両面において大きな 潮流を生み出してきている。

本研究集会の目的は、これまでの非線形波動研究の著しい発展を受けて、「最先端の研究に現れる多 様な現象を、様々な分野の立場から多角的に捉え、背後にある構造に注目することによって、現象の理 解や制御に関して新たな展開を目指す」ことである。「非線形波動」をとりまく様々な分野の研究者が互 いの情報を交換し、個々の研究の最前線を理解することで問題意識を共有するとともに、更なる発展や 新しい展開を生み出す場として、本研究集会が企画された。伝統ある共同利用研究拠点の一つである応 用力学研究所において、継続して研究集会を開催することには重要な意義があり、過去に開催された関 連する研究集会に引き続き、本年度も多彩な分野の研究者の参加のもと、異分野の相互作用による研究 の促進を目指して本研究集会が開催されるに至った。

#### 成果の概要

本研究集会は、平成24年11月1日から3日までの3日間にわたって九州大学筑紫地区共通管理棟3 階大会議室において開催され、特別講演4件と一般講演28件(ロ頭発表18件およびポスター発表10件)の講演が行われた。

特別講演においては、流体物理学や力学系に関する話題から、非線形波動の数理的構造に関連して、曲 面の離散化とその応用といった数学的話題に至るまで、一見まったく異なる分野のテーマでありながら、 実は深く関連しあう内容の講演が4件行われた。乱流中の渦と波の相互作用に関する講演では、運動エネ ルギーや粒子の分散についての未解決問題の解説から始まり、Boussinesq 近似のもとで速度場と温度場 の間に調和振動子的な結合が現れることに伴って、エネルギーの乱流カスケードに対して成層がどのよ うな効果を与えるかという問題を考察した。次に、速度場を波動的な運動と渦運動とに分離して捉える ための方法が説明され、数値シミュレーションの結果、成層が強くなるにつれて速度場や渦度場の水平方 向の成分が大きく見えてくる様子が報告された。そこでは特に水平方向の移流によって、渦が時間とと もにウェッジ型の特徴的な構造を形成していく過程が観察され、そのような構造が Kelvin-Helmholtz 渦 へとエネルギーを受渡す役目を果たすことが議論された。エネルギースペクトルなどの数値シミュレー ションによる結果が、豊富な図やグラフとともに紹介され、限られた時間ではあったが成層乱流研究の 最前線の一端に触れることができた。

様々な振動現象を解析する方法に関して、ネットワークで接続する振動子集団のダイナミクスについ ての特別講演が行われた。そこでは、生物集団や生体内で起こる同期現象や、弱く結合した系に見られ る振動現象などの多彩さについて解説があった後、それらのモデルである結合振動子系に関する解析的 数値的な研究について講演がなされた。単純な格子のような結合ではなく、複雑なネットワークによっ て接続された系の場合には、多様な現象が現れる。例えば安定相・不安定相をもつ系において、接続の 本数によって安定相の伝搬が制限される様子が見られたり、またネットワークによっては、振動が同期 したときの周期のゆらぎが全振動子数に依存することが観察される。結合型のFitzHugh-Nagumo方程 式における解析では、全系が大きくなると周期のゆらぎはシステムサイズの -1/2 乗で小さくなるが、 あるサイズでクロスオーバーが起こり、それ以上のサイズでは一定値に近づく。また個々の結合の本数 が増えるに従って、そのクロスオーバーは起こりにくくなる。このように多様な振動現象を解析する方 法として、位相振動子系の考え方が概説され、同期した状態からの摂動について線形化して行列の固有 値問題に帰着させることによって、上記のような現象を説明できることが示された。位相振動子の方法 は、一般に振動的な解をもつ方程式系に対して適用可能な強力な解析手段であり、様々な現象を体系的 に扱えることが理解された。

地球磁場に関して、外核の MHD ダイナモによって自発磁場の発生とその非周期的反転を説明できる かどうかは重要な問題であるが、これに対する数値的研究は、バーチャルリアリティによる可視化につ いての特別講演の中で解説された。数値シミュレーションによれば、外核において同心円上に分布する 円柱状の対流構造が現れ、その円柱に磁力線が巻きつくことによって磁力線の引き延ばしと折り畳みが 起こる。また円柱軸方向の流れによって、赤道付近では磁力線の切り繋ぎも観察される。このような電 磁流体の複雑な運動を視覚化するための方法が、CGを用いたバーチャルリアリティである。CGにお いて曲面を表現するためには離散化を行う必要があるが、それに関する話題がもう一つの特別講演であ る。そこでは、レーザー走査で得られた点データから雑音を除去する Gaussian フィルターの話題や、点 の成す三角形格子からどのように四辺形格子を自動生成するかといった話題に始まり、離散幾何学の最 先端についての理論実践両面にわたる詳細な講演が行われた。初等的なベクトル解析における諸概念の 自然な離散化を考察し、大域的に整合的な格子を生成する方法が紹介された。ここで特筆すべきは、こ のような離散曲面の座標が、非線形波動の一つであるソリトンの時間発展とまったく同じ数学的構造を もつということである。すなわち、非線形波動現象を解析することと離散曲面を構成することが、共通 の方法によって研究されているのである。一見無関係に見える数学的な研究テーマが、実はその背後で 流体における非線形波動と深く関連していることは驚きである。非線形波動の研究における手法や概念 が、様々な分野の最先端の研究に現れることは、「非線形波動」の普遍性を表していると言えよう。

一般講演においても、流体やソリトンに関するものから、数値解法、微分方程式、セルオートマトン、 曲面の幾何学に関するものまで、多種多彩な内容の報告が行われたが、いずれも「非線形波動」という キーワードを通して深く結びついている話題であり、参加者による分野を越えた活発な議論が繰り広げ られた。一例を挙げれば、ファラデー波の数値計算の講演においては、水槽を上下に加振したとき水面 に二次元的な局在構造が現れることに対応して、Hele-Shaw セルを上下に加振すると一次元局在構造が できるかどうかが議論された。実験的には、水面の一部を刺激することによって局在構造が形成される と言われているが、数値計算によって、初期の局在構造は側壁での摩擦抵抗を考慮することによって初 めて局在状態を維持することが報告された。すなわち一次元の場合、局在構造にとって側壁での摩擦の 効果は無視できないことが示された。局在構造は流体に限らず、物性物理などにおける様々な非線形系 にも現れる重要な研究テーマであり、多くの聴衆の興味を引いた。全体を通して、非線形波動研究の裾 野の広さが実感できる研究集会であり、様々な最先端の研究の情報を交換し、異分野間の相互作用を促 進するという当初の目的は、ある程度達成できたと思われる。

本共同利用研究集会を実現させていただいた九州大学応用力学研究所と、研究集会を共催していただいた文部科学省グローバル COE プログラム「マス・フォア・インダストリ教育研究拠点」に対して、参加者を代表して深く感謝申し上げます。

#### 講演プログラムと概要

11月1日(木) 13:00~13:30

#### 弾性波動乱流のスケール依存性と異種乱流の共存について

横山直人(京大工)、〇高岡正憲(同大理工) 弾性薄板の波動に関する実験及び数値計算の先行研究では、様々な巾のエネルギースペ クトルが観測され、弱乱流理論や次元解析から予想されるスペクトルも含め、統一的な 理解は得られていない.我々は系のエネルギーをコントロールしたシミュレーションを することにより、これまでに得られたスペクトルを統一的に理解できることを示した. また、大きいスケールでは次元解析で予想されるスペクトルの巾が小さいスケールでは 弱乱流理論で予想されるスペクトルの巾という2種類の巾則が共存していることを見 出した.これら異種乱流の境目となるスケールを見積もる方法を提案し、系のパラメー タを変えたシミュレーションの結果と比較して、その妥当性について議論する予定であ る.

#### 13:30~14:00 初期波形の離散化による AKNS 線形散乱問題の近似解法とその応用

○藤嶋浩史(キャノン光学研)、矢嶋徹(宇都宮大工) 逆散乱変換によって解くことができる非線形方程式群のうち、AKNS形式に書けるク ラスを考察する。通常この散乱問題を解析的に解くことは困難であるが、最近我々は、 初期波形を多数の矩形区間に分割し、それぞれの区間をつなぐ転送行列を考えること により、この問題の数値的近似解法を見出した。これにより、任意の初期波形から時間 発展をスタートさせた波束の漸近的情報を抽出することができる。本講演では、非線形 シュレディンガー方程式に本解析法を適用する。

#### 14:00~14:30 **非線形波動系に対するシンプレクティック数値解法と運動量保存則** 佐々成正(原研計算セ) ハミルトン系に属する非線形波動方程式に対し、シンプレクティック数値解法の適用を 考える。このとき時間発展に対して保存する形式的ハミルトニアンの存在が知られてい る。このアナロジーとして運動量保存則に対する考察を行う。

#### 14:45~15:45 [特別講演] バーチャルリアリティ技術を利用した科学データの可視化 陰山聡 (神戸大学)

バーチャルリアリティ (VR) 技術の最終目標は、計算機で構成した「人工世界」を、 現実と誤解させることであろう。もちろん、現代の VR 技術はまだそこまで 発達して いないが、少なくとも視覚に関しては、科学研究の道具として十分に「使える」ほど成 熟していると言える。特に、没入型と呼ばれる種類の VR 装置 を使うと、仮想現実世 界の中に文字通り体ごと入り込み、その世界を3次元のまま見ることができるだけで なく、コントローラを通じてその世界と自由にやりとり(3次元物体を切ったり、作り 出したり等)できる。神戸大学統合研究 拠点(神戸市ポートアイランド)に昨年、日 本最大の没入型 VR 装置 " $\pi$ -CAVE"が設置された。(Port Island にあるので、"pi" である。)本講演では、この  $\pi$ -CAVE 装置を使って我々が行っている様々な科学デー タの可視化について紹介する。その対象データは主に流体・磁気流体力学シミュレー ションのデータや、防災・減災(につながることを目指した)データなどである。デー タ空間に入り込んでそのデータを可視化することの有効性と、何よりその楽しさが伝 わるようにお話したい。時間的に余裕があれば、我々が VR 技術をデータ可視化に使 う動機となった磁気流体シミュレーション(地磁気の起源解明を目指した地球ダイナ モシミュレーション)についても紹介したい。

# 16:00~16:30 計算アルゴリズムの確率モデルの解析における recursion と非線形波動 伊藤栄明(統数研名誉教授) 2進探索木等のソーティングアルゴリズムの解析に用いられる recursion の漸近挙動は

Fisher- KPP 方程式の解の漸近挙動と類似している。並列計算における確率モデル(食物連鎖の確率モデルにもあらわれる)より導かれる recursion についてこの類似性をもちいて漸近挙動を議論する。Y. Itoh and P. L. Krapivsky, J. Phys. A. (October 2012).

16:30~17:00 直交多項式の拡張と離散パンルヴェ方程式
 中園信孝(九大数理)
 本講演では、直交多項式の重み函数を q-Pochhammer で拡張することによって得られる規格化因子の保存量と離散パンルヴェ方程式の関係について報告する.

#### 17:00~17:30 有限体と様々な次元における魔方陣

宮川文香(立教大理) 数え上げの分野では可積分系との関係も知られている魔方陣について、幾何学的なア プローチではありますが、その構成法を三次元と四次元の具体例を元に、解説したいと 思っております。

11月2日(金)

#### 9:30~10:00 広田三輪方程式の三角圏構造

弓林司(首都大理工) 物理 数学の様々な場面に於いて双対性

物理、数学の様々な場面に於いて双対性の構造は重要である。最近は、双対性の研究に 圏、特に幾何学的情報については三角圏の構造が重要視されている。そこで、本発表で は可積分系の母方程式とも言うべき広田三輪方程式の三角圏構造について考えたい。

#### 10:00~10:30 **KP 差分方程式系とその解の**構造

広田良吾(早大名誉教授) BKP 差分方程式系の構造は Pfaffian の加法公式を使って簡明にできること示したが、 KP 差分方程式系とその解の構造も同じ Pfaffian の加法公式を使うと簡明に出来ること を示す。

#### 10:30~11:00 **3 次元**等質空間内の曲面と可積分系

井ノロ順一 (山形大理)

3次元定曲率空間内の曲面はサイン・ゴルドン型方程式を構造方程式にもち、種々の構成法が知られている。Dorfmeister氏、小林真平氏との共同研究により、定曲率でない 3次元等質空間内の曲面で、可積分系の構造をもち、ループ群を用いた構成法を許容す るクラスが発見されたことを報告する。

#### 11:10~12:10 [特別講演] Generation of high quality surface and volume meshes

Konrad Polthier (Freie Universität Berlin)

In this overview presentation we introduce novel integrable discretization and meshing schemes for discrete surface and volumetric meshes. We stress their e.ciency in several industrial applications from scienti.c computing, computer aided design, architecture and computer graphics. Meshes arising from 3D scans or other 3D imaging techniques are often not well adjusted to the geometry or topology of the underlying shapes. The generation of good meshes is still an active research area in various disciplines. We discuss novel techniques to generate highly structured surface and volume meshes that are consistent with many geometric and topological features of the underlying shapes. We discuss techniques to .fill a bounded volumetric shape with a consistent cubical voxel structure. Among the optimization goals are alignment of the voxels with the bounding surface as well as simplicity of the voxel grid. Mathematical analysis of the possible singularities is given.

## 13:25~13:55 気泡流の非線形波動方程式の全貌の解明に向けて—KdV・NLS・KZK 方程式と液体の圧縮性に係る検討—

金川哲也(東大工)

多数の球形気泡を含む静止液体中における有限振幅の圧力波(音響波)の弱非線形伝播 を記述する、様々な非線形波動方程式を、気泡流のモデル方程式系(基礎方程式系)か ら、統一的かつ系統的に導出する方法を述べる。KdV 方程式、NLS 方程式、KZK 方 程式の導出に加えて、液体の圧縮性に伴う音響放射減衰によって波の急速な減衰を表現 する方程式をも導く。

#### 14:05~15:05 [特別講演] 安定成層乱流における渦と波の相互作用

木村芳文 (名古屋大学)

成層乱流の運動は流体の運動方程式と密度場(温度場)の方程式がカップルした方程式 系で記述される.成層が安定な場合(すなわち重い流体が下で軽い流体が上にある時) にはそのカップリングは調和振動子の運動と類似になって流体の運動に何らかの振動現 象が伴うことになる.このように成層乱流中では乱流現象に伴う渦と振動現象によって 生じる波が相互作用をして様々な流れの構造を生み出すことが特徴的である.本講演で はこの成層乱流の特徴を渦と波の重ね合わせとして考察し、エネルギースペクトルなど の統計量についての最近の数値解析の結果を報告する.

#### 15:15~16:15 [特別講演] 振動子集団のダイナミクスのネットワーク構造依存性

郡宏(お茶の水女子大学)

振動現象,すなわち自発的に起こる周期的活動は,心拍や生物時計などの生命現象や 化学反応系,さらにはメトロノームといった機械など,様々な対象で重要な役割を担っ ている.特に,振動子集団は、振動子間の相互作用によって、同期現象や時空カオスな どの複雑な秩序化現象を起こす.このような秩序化現象には興味深い問題が山積してお り,非線形・非平衡物理学は応用数学分野において,歴史的にも現在も重要な研究対象 である.この講演では、生命システムにみられる振動子集団のダイナミクスと機能につ いて幅広く紹介した後、近年我々が取り組んできた生命機能と密接に関係する研究につ いて解説する。特に、複雑なネットワークで接続する振動子集団の動的性質を解析的に 取り扱った研究をいくつか紹介する。

11月3日(土)

#### 9:30~10:00 側壁を考慮したファラデー波の数値計算

○高木健太郎 (京大理)、松本剛 (京大理) ファラデー波の直接数値計算では水平方向に周期境界条件を課すことが多いが、側壁の 影響が無視できないと思われる現象が近年の実験では見つかっている。その中でも最 近実験で見つかった局在孤立波 (standing solitary waves) と呼ばれる現象の再現を目指 し、滑り無し条件を側壁に課した数値計算により、側壁の影響を調べる。

#### 10:00~10:30 笹野系の q-類似について

増田哲 (青山大理工)

パンルヴェ微分方程式の高階化について,近年,著しく研究が進展している. それらの q-類似について考察することは自然であろう.本講演では,笹野系と呼ばれる D 型ア フィンワイル群対称性をもつ高階パンルヴェ型微分方程式系に注目し,それらの q-類似 の構成について述べる.

#### 10:45~11:15 超楕円曲線に付随する可解カオス系

野邊厚 (千葉大教育)

超楕円曲線の対称積からピカール群への全射を用いて、その対称積上に加法を定めるこ とができる.この加法から導かれる可解カオス系について議論する.

#### 11:15~11:45 聴覚の非線形モデル

○石渡信吾(横浜国大理工)、神野晋吾(横浜国大理工) 耳の内耳にある蝸牛管は音を周波数分解して聴覚神経に伝える器官である。その仕組み は今もって不明な点が多い。我々はこの周波数分解の機能を確率共鳴の観点からモデル 化し、電気回路の実験を通してその妥当性を検討する。

#### 13:00~13:30 三角型スピン格子上での量子状態転送ついて

○三木啓司(京大情報)、辻本諭(京大情報)、Luc Vinet(モントリオール大学)、Alexei Zhedanov(ドネツク物理工科研究所) 本講演ではある二次元のXX型ハミルトニアンが Rahman 多項式と呼ばれる二変数 Krwatchouk 多項式により対角化できることを示す。得られた結果をもとにして、対応 する二次元格子上での量子状態転送を理論的に観測し、完全状態遷移の有無を調べる。

#### 13:30~14:00 離散凸二次関数の最大値として表される超離散 KdV 方程式の解について

中田庸一(東大数理)

パラメータに依存するある離散凸二次関数の最大値を凸解析の手法を用いて評価することにより、それがソリトン解や周期解を特殊な場合として含む超離散 KdV 方程式の解となることを説明する。

#### 14:00~14:30 **B**型箱玉系のソリトン解

広田良吾 (早大名誉教授)、〇長井秀友 (東海大理) B 型箱玉系 (1+b)f(m-1,n)f(m+1,n+1) = (1-a)f(m,n)f(m,n+1) + af(m-1,n+1)f(m+1,n) + bf(m,n-1)f(m,n+2)を超離散化した方程式には二種のソリトン解がある. 一つは箱玉系のソリトンであり,もう一つは通常のソリトンである. 両者の衝突を表す厳密解が求まった.

#### 14:30~15:00 エレメンタリーセルオートマトンの相互相関行列の解析

○金子勇治(東大数理)、時弘哲治(東大数理)、間田潤(日大生産) ECAの出力パターンの相互相関行列の固有値間隔分布を数値的に調べると、ルール1 50等ではウィグナー分布、ルール170等ではポアソン分布にほぼ一致した。基本周 期とシステムサイズ等の関係も議論したい。

#### ポスターセッション概要

(1) 不動点定理について

○斎藤革子(横国大)、齋藤暁(首都大) 「非可積分写像を特徴付ける Julia 集合は可積分極限でどのように消滅するのか」という問題について、不動点定理という観点から考察する。特に、これまで調べられてこなかった周期点で、可積分極限では不定点に漸近するものについて考察する。

#### (2) あるパターン形成系の構築について

○中谷 友洋(早大)、高橋 大輔(早大) ターゲット、スパイラルパターンを生成する系を、リミットサイクルを有する常差分系 の多次元拡張により得る。また、その連続極限から微分のパターン形成系を得る。この 系は、時間2階の1成分系であること、超離散化可能であることが大きな特徴である。

#### (3) 4 近傍粒子 CA の Euler-Lagrange 変換について

○山本匠(早大)、高橋大輔(早大)

1 の個数が時間的に保存する 2 進 CA を粒子 CA と呼ぶ。3 近傍粒子 CA である BurgersCA の Euler-Lagrange 変換が既に知られているが、これと同様の手続きを 4 近傍粒 子 CA に適用する。また Lagrange モデルにおける初期値問題や確率化についても議論 する。

#### (4) 拡張された Tzitzeica 方程式と中心アフィン曲面

○三谷浩将(立教大)、筧三郎(立教大)、R.Willox(東大) 負時間を含む結合型 KP 階層の簡約から,Tzitzeica 方程式の一つの拡張が得られる (Willox, 2005).本研究では,その方程式の持つ6×6Lax 形式と,中心アフィン曲面 の構造方程式との関係を解析する.

#### (5) 離散戸田方程式の解の組合せ論的な表示とその非自励化

上岡修平(京大)

離散戸田方程式の初期値問題を解くとき、その解は非交叉的な格子路の言葉で組合せ論 的に記述することができる。本発表では非自励離散戸田方程式とその初期値問題を考 え、方程式の非自励化により解の組合せ論的な表示がどのように拡張されるかを観察す る。

#### (6) 特異点"解放"による不変周期点代数多様体の生成

齋藤曉(首都大)、弓林司(首都大)、○脇本佑紀(首都大) 特異点閉じ込めなる現象は見方を変えるとそこから代数多様体達を解放する努力である と見做せてこの視点は可積分系を特徴づける上で重要である。ここでは幾つかの例につ いて生じた困難とその解決方法について報告する。

#### (7) 離散可積分系の観点からの dqds 法の拡張について

○前田一貴(京大), 辻本諭(京大) 行列の標準固有値計算アルゴリズムである dqds 法を, 離散可積分系の観点から拡張す ることを考える.得られたアルゴリズムは行列の一般化固有値を計算するアルゴリズム となっていることを明らかにする.

#### (8) ある拡張型離散戸田方程式の漸近挙動について

○飛田明彦(東京理科大)、福田 亜希子(東京理科大)、石渡 恵美子(東京理科大)、 岩崎 雅史(京都府大)、中村 佳正(京大) 力学系の局所的な解挙動を調べる際,中心多様体理論が有効である.本発表では,離散 戸田方程式を拡張した方程式に対し,中心多様体の存在と平衡点付近での収束性を調べ た結果を報告する.

(9) 振動子ウォーカーの渋滞現象

○江崎貴裕(東大)、西遼佑(東大)、柳澤大地(茨城大)、西成活裕(東大) 車の渋滞で用いられる追従モデルに振動子の要素を含めた新たなモデルを提案する。こ れは自然界の生き物の動きが歩行、羽ばたき等の位相に大きく制約されることを意識し て考案されたもので、通常の最適速度模型とは異なる挙動を示す。同期歩行の安定性や 位相固定(phase locking)現象について紹介する。

(10) 箱とバスケットと玉の系におけるソリトン解
 由良文孝(はこだて未来大)
 Box-basket-ball system における双線形形式およびソリトン解などについて報告する。

**開催の期間** 平成 24 年 11 月 1 日 ~ 平成 24 年 11 月 3 日

参加者 66 名

「日本海及び日本周辺海域の海況モニタリングと

#### 波浪計測に関する研究集会」報告

水產大学校海洋生產管理学科 滝川哲太郎

2012年12月13日から12月14日にかけて、九州大学筑紫キャンパスにおいて、応用力学研究所共 同利用研究集会「日本海及び日本周辺海域の海況モニタリングと波浪計測に関する研究集会」が開催さ れた.本研究集会は、1998年度の「対馬・津軽海峡の海況モニタリングと日本海の波浪計測に関する 研究集会」に始まり、それを引き継ぎ、3回の研究集会名の変更を経て、今年度で15回目を迎えた. 長年、本研究集会の世話人を務められた増田 章 教授が、今年度で退官されることもあり、本報告では、 本研究集会の歴史とその背景について少し振り返りたい.以下に、開催年度・研究集会名・代表者(敬 称略)を示す.

年度	研究集会名	代表者
1998	対馬・津軽海峡の海況モニタリングと日本海の波浪計測に関 する研究集会	力石 國男
1999	対馬・津軽・宗谷海峡の海況モニタリングと日本海の波浪計 測に関する研究集会	力石 國男
2000~2002	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	磯辺 篤彦
$2003 \sim 2005$	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	森本 昭彦
2006~2008	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	滝川 哲太郎
2009~2012	日本海及び日本周辺海域の海況モニタリングと波浪計測に 関する研究集会	滝川 哲太郎

本研究集会の立ち上げ当初には、日本海と外海をつなぐ宗谷・津軽・対馬海峡での重点的な海況モニタ リングが次々に開始された(以下参照).

1997年~対馬海峡フェリーADCP 観測(九州大学応用力学研究所)1999年~津軽海峡フェリーADCP 観測(日本原子力研究開発機構)2002年~対馬海峡 海洋レーダー2003年~宗谷海峡 海洋レーダー(北海道大学低温科学研究所)

現在,対馬海峡横断フェリー「ニューかめりあ」では,表層水温・塩分・クロロフィル・濁度と海面高度もモニターしている.さらに,日本海区水産研究所によって,日本海の漁業に被害をもたらす大型クラゲ(エチゼンクラゲ)の目視も行われ,物理観測のみならず生物や水産に関するモニターも必要とされている.

2002年と2003年には、それぞれ対馬海峡と宗谷海峡において、海洋レーダーによる表層海況監視が 始まり、海洋レーダーの普及が著しく進んだ.そのため、本研究集会で海洋レーダーによる観測結果に ついての講演が増加する傾向にあった.レーダー観測結果のみならずレーダーに関する技術的な講演も 促そうと、2003、2004年度に「海洋短波レーダーによる日本沿岸海況監視システムの開発(代表者:藤 井智史、世話人:吉川 裕)」が共同利用特定研究の課題に採択されたことを契機とし、本研究集会か ら海洋レーダー研究集会が独立することとなった.こうして 2003 年度から現在に至り、この2つの研 究集会を連日で開催している.

本研究集会の利点の第一は,現場観測に携わっている多くの方々に継続してご参加頂いてきたことで ある.第二は,大気や海洋を専門とする研究者が数多く在籍している九州大学応用力学研究所で本研究 集会が開かれることである.現場観測と力学研究が相まち,両者の活発な議論を通じて,研究の新たな 発見や進展を得ることができる.これが大きな意味を持つと感じた.発表内容は,観測結果に関するも のだけでなく,数値シミュレーションを用いた研究発表も多くあり,様々な角度から,日本海や沿岸域 の現象を説明する発表も多い.最近では,大気や気象に関する発表も増加している(プログラム参照). 今後,大気-海洋分野での情報交換や共同研究の発展につながればと感じた.

今年度の研究集会には、大学および試験研究機関を中心に 40 名が参加し、合計 15 題の講演があった (プログラム参照).例年通り、一題あたり質疑応答を含め 30 分の時間を割いたため、非常に活発な議 論が行われ、時には講演時間を超過することもあった。今後とも、日本周辺海域の海況・波浪の研究に 携わる研究者らが議論を行う一つの場として、本研究集会が継続・発展していくことを期待する。最後 に、本研究集会の開催を承諾して頂いた九州大学応用力学研究所、集会を開催するにあたりお世話して 頂いた東アジア海洋大気環境研究センター・海洋力学分野の増田 章 教授をはじめとする諸氏に感謝す る.

#### プログラム

期間:平成24年12月13日(木)~12月14日(金) 場所:九州大学筑紫キャンパス 応用力学研究所 東アジア海洋大気環境研究センター 6階 W601 所内世話人:増田 章 研究代表者:滝川哲太郎(水産大学校)

------ 12/13(木) ------

13:30-13:40 趣旨説明

滝川哲太郎(水大校)

- 13:40-14:10 春季における石狩湾周辺海域の流れと海水交換 西田芳則(道中央水試)
- 14:10-14:40 石川県周辺海域における漁船の操業を利用した ADCP 観測 福留研ー(水研セ日水研),千手智晴(九大応力研),大慶則之(石川水総セ), 中田聡史(京都大),広瀬直毅(九大応力研),渡邊達郎(水研セ日水研)
- 14:40-15:10 能登—佐渡海域で冬期季節風に励起された沿岸捕捉波 井桁庸介,渡邊達郎,柿木康児,奥野 章,加藤 修(水研セ日水研)
- 15:10-15:40 能登半島東岸で観測された近慣性内部波の鉛直構造 山﨑恵市(水研セ日水研/海洋大院),井桁庸介(水研セ日水研),北出裕二郎(海洋大院), 山田東也(水研セ西水研),千手智晴(九大応力研),渡邊達郎(水研セ日水研), 大慶則之(石川水総セ),池田 怜(新潟水海研)

15:40-16:00 休憩

- 16:00-16:30 東シナ海黒潮近傍に発生する積雲対流に関する熱力学的診断 濱野五月,万田敦昌(長崎大院水産・環境)
- 16:30-17:00 冬の黄海・東シナ海における海面水温の経年変動と風の強弱 金城早香,滝川哲太郎(水大校)
- 17:00-17:30 日向灘海況情報提供における漁船情報活用の試み 渡慶次 力,福田博文,林田秀一(宮崎水試),清水 学,市川忠史(水研セ中央水研)・ 柳 哲雄(九大応力研)
- 17:30-18:00 風波と(成長または減衰する)規則波の間の相互作用に関する室内実験研究 水野信二郎

------ 12/14(金) ------

09:00-09:30 萩市見島宇津と長門市青海島通における潮位観測速報 滝川哲太郎(水大校),渡辺俊輝(山口水研セ),千手智晴(九大応力研), 森本昭彦(名大水循環セ)

- 09:30-10:00 船舶曳行式バルーンを用いた空撮と画像解析による沿岸海況モニタリング 宮尾泰幸,磯辺篤彦,加古真一郎(愛媛大沿岸セ)
- 10:00-10:30 沿岸域の海況監視システムの構築に向けて 石崎士郎(気象庁地球環境・海洋部海洋気象課)

10:30-10:45 休憩

- 10:45-11:15 日本海の海面乱流熱フラックスについて 富田裕之(名大水循環セ)
- 11:15-11:45 平成 24 年九州北部豪雨の数値実験 万田敦昌(長崎大院水産・環境), 飯塚 聡(防災科研), 美山 透(JAMSTEC-RIGC), 吉岡真由美(東北大院理), 中村 尚(東京大学)
- 11:45-12:15 2011 年 1 月に観測されたバレンツ海上のポーラーロウの数値実験
   三井 拓(長崎大院水産・環境/JAMSTEC-RIGC), 猪上 淳, 堀 正岳(JAMSTEC-RIGC),
   万田敦昌(長崎大院水産・環境)
- 12:15-12:45 仮題「平衡状態にある高波数側スペクトルの形について」 増田 章(九大応力研)

12:45-13:15 総合討論

参加	扣	者
۲Y)	лΗ	1

	氏 名	所属
1	石崎 士郎	気象庁
2	山崎 恵市	日水研
3	江淵 直人	北大・低温研究所
4	小山 悠人	水産大学校
5	滝川 哲太	水産大学校
6	金城 早香	水産大学校
7	井桁 庸介	日水研
8	福留 研一	日水研
9	竹内 謙介	北大名誉教授
10	西田 芳則	北海道中央水産試験場
11	増田 章	九大・応用力学研究所
12	石橋 道芳	九大・応用力学研究所
13	水野 信二	自宅
14	西村 一星	海上保安庁
15	森岡 裕詞	海上保安庁
16	灘井 章嗣	ΝΙCΤ
17	渡慶次 力	宮崎水産試験場
18	富田 裕之	名古屋大学
19	久木 幸治	琉球大学・理学部
20	広瀬 直毅	九大・応用力学研究所
21	吉川 裕	九大・応用力学研究所
22	宮尾 泰幸	愛媛大学・沿岸センター
23	高山 勝巳	九大・応用力学研究所
24	市川 香	九大・応用力学研究所
25	杉尾 毅	第七管区海上保安庁
26	千手 智晴	九大・応用力学研究所
27	万田 敦昌	長崎大学・水産学部
28	濱野 五月	長崎大学・水産学部
29	三井 拓	長崎大学・水産学部
30	登内 茂樹	海上自衛隊

	氏名	所属
31	三城 希雄	九大・応用力学研究所
32	光易 恒	九大名誉教授
33	藤井 智史	琉球大学・工学部
34	朴 松杰	九大・総理工
35	油布 圭	九大・応用力学研究所
36	張 偉	北大・低温研究所
37	河野 史郎	いであ (株)
38	井手 喜彦	九大・総理工
39	中村 浩昭	九大・総理工
40	窪田 雅也	九大・総理工

#### 壁乱流における大規模構造の統計法則と動力学に果たす役割

研究代表者・辻 義之(名古屋大学)

#### 1 研究集会の開催目的

壁面に沿って発達する流れ(乱流境界層)には,様々な長さスケールを有する渦構造(組織的構造)が存 在することが古くから知られ,境界層中の乱れエネルギーの生成や散逸に重要な役割をはたしている.近 年,直接数値計算(DNS)の結果から,スパン方向へ時空間的に揺らぎながら,流れ方向へ20δ(δは境界 層厚さ)程度の大きさをもつ構造が対数領域から粘性低層に存在することが,豪州の研究グループにより 報告されている.このようなスパン方向への運動を含み,流れ方向へ大きなスケールを持つ構造は,従来 の組織構造の概念を超えるものでSuper Structure (SSと略記する)と名付けられた.SSは乱流境界層中の 平均速度プロファイルのみならず,運動量やエネルギーの輸送にも大きな影響を与えることが予想される. SSと乱流統計量,その動力学は明らかになっておらず,広い分野の研究者らの活発な議論をおこないたい. SSは壁との相互作用から壁面でのせん断応力生成への関与も指摘されている.その過程を明らかにするこ とから,壁面でのせん断応力の低減方法について考察する.壁乱流は,大気海洋などの広範な分野にみら れ,抵抗低減など省エネに関する応用研究へも発展が期待される.応用力学研究所における異分野研究の 相互の利点を生かした研究を実施することは意義あることと考えられる.

### 2 プログラム

2月22日(金)

14:00-14:45	チャネル内遷移流の大規模秩序運動
	塚原隆裕(東京理科大理工)
14:45-15:30	低レイノルズ数ポアズイユ乱流の大規模間欠構造について
	福留功二(名工大),飯田雄章
15:30 - 15:45	休憩
15:45-16:30	ミニマル平面クエット乱流の遷移と解の対称性について
	板野智昭(関大理工),S. C. Generalis, 二宮隆弘, 関 真佐子
16:30-17:15	樹木群を有する開水路乱流の抵抗低減のための大規模渦構造の抑制の試み
	橫嶋 哲(静岡大工),河原 能久
17:15	懇親会
	エ/ - 喜レイノルブ教チャネル刊 法の非笑ちてペクトル
9.00- 9.45	
0.45 10.20	林下伯二(仲アパンパ)ム自報)、石床平、玉山竹雄
9.40-10.00	
10.20 10.45	石床 平 (石八工), 小立床 石樹 休商
10.30 - 10.43 10.45 $11.20$	小窓 フィルター注に上る空間民在構造及び統計性質の抽出
10.40-11.00	ジョルタ ぶにるる王间尚に構造及び私司に負の通山 藤 完美(古十冊) 去村旅紀
11.30-12.15	廠 定義(永八哇), 寸竹 夜礼 フィルター注に上ろ空間号左数値的厳宓解の構成
11.00 12.10	
19.15-13.20	日本の「日本の「日本の」」「日本の「日本の」」「日本の」「日本の」」「日本の」「日本の
12.10-10.00	

13:30-14:15 Attached eddy モデルに基づいた壁面境界条件

水野吉規(同大理工), J. Jimenez

14:15-15:00 高レイノルズ数チャンネル乱流場における大規模構造の寄与

山本義暢(山梨大医工総合), 辻 義之

15:00-15:45 高レイノルズ数におけるチャネル乱流の直接数値計算

清水雅樹(阪大基礎工),河原源太

15:45-16:00 円管乱流中における大規模組織構造の抽出の試み

S. Feng, 藤城敦史, 辻 義之(名大工)

#### 講演内容の概要 3

#### チャネル内遷移流の大規模秩序運動 塚原隆裕

カノニカル壁乱流のチャネル流(平行平板間流れ)に おいて,乱流遷移および逆遷移現象は依然として極 めて複雑な問題であり,円管内流れの亜臨界遷移と 同様,現在でも研究が盛んに行われている.本研究 では, 層流・乱流間遷移レイノルズ数域にあるチャネ ル乱流に焦点を当て, 遷移現象の解明と流動特性の 評価を目的としている.特に、乱れが縞状の空間的 間欠性を示す特異な現象(乱流縞)の解明が主なる 課題である.本講演では、著者が行ってきた大規模 計算領域による直接数値シミュレーション (DNS) お よび可視化実験などの結果を示し、国内外の関連研 究を交えて,現状のチャネル内遷移流に見る秩序に ついて考察した.

#### 低レイノルズ数ポアズイユ乱流の大規模間欠構造に ついて

#### 福留功二,飯田雄章

低レイノルズ数における平行平板間乱流で確認され る大規模間欠構造(乱流-層流パターン)において, その渦構造に着目し、その構造を議論した.また、系 等方性に関する普遍性について検証した結果を報告 に回転を加えた場合、パターンが消滅する過程も議 した. 論した.

#### ミニマル平面クエット乱流の遷移と解の対称性につ いて

#### 板野智昭

た.以上の事実をもとに、遷移の実験において観察 される流れの対称性と、従来より知られてきた厳密 解の対称性について, 議論した.

#### 樹木群を有する開水路乱流の抵抗低減のための大規 模渦構造の抑制の試み

#### 横嶋 哲, 河原 能久

実河川には植生・樹木が繁茂している.樹木群の存 在は河床や側壁の浸食を防ぎ,水棲生物に多様な生 態系を提供するなどの利点を有する反面,流れの抵 抗要素となるため,洪水時には水位を上昇させ,洪 水氾濫の危険性を高める.本講演ではLES(ラージ・ エディ・シミュレーション)に基づく数値実験によっ て、そういった災害リスクを低減可能な樹木群管理 の在り方を探る試みについて報告した.

#### 高レイノルズ数チャネル乱流の非等方スペクトル 森下浩二, 石原 卓, 金田行雄

最大レイノルズ数  $Re_{\tau} = 5120$  のチャネル乱流 DNS に より, 壁乱流中の対数領域における小スケールの非

#### 乱流境界層の乱流・非乱流界面近傍の条件付き統計 解析

#### 石原 卓, 小笠原 浩樹

自然や工学的応用における流れにおいて, 乱流が渦 比較的高いレイノルズ数 (~10000) 程度におけるミ なしの非乱流領域中に局在し、シャープな境界を形 ニマル平面クエット流における不安定な定常進行波 成していることが多い. 乱流・非乱流界面の運動の 解の解析を行った、この解はレイノルズ数の増加と 理解のため、本研究では、乱流境界層の直接数値計 ともに層流解に漸近するとともに、相空間における 算によって得られたデータを用いて、乱流・非乱流界 乱流と層流の遷移境界に存在し続けることがわかっ 面近傍の条件付き統計解析を行った結果について報 告する.

#### フィルター法による空間局在構造及び統計性質の 抽出

#### 藤 定義, 寺村俊紀

チャネル乱流では、乱流遷移では乱流班やパフある いは広範な乱流と層流の共存状態が観測されている. 一方,発達した乱流においては、スケール的に分離 高レイノルズ数壁面乱流場においては、外層におけ を持つと思われる対数則層が存在している.いずれ 乱れ強度が増加することが知られている.本研究で も,空間的に局在した乱流状態とみなすことができ は,チャンネル乱流場を対象とし,外層からのエネ よう.もし,これらの局在性が力学的な独立性に由 ルギ輸送及び4象限解析に基づき,大規模構造の影 来するとすれば、この局在性を記述できる自律的な 響を定量的に評価した.またスーパーコンピュータ ターを基礎方程式に導入し、1)空間的に局在した ても言及した. 定常進行波解を求める,2)内層を強制的に減衰さ せ,外層のみの自律的な乱流状態の抽出とその統計 性質を調べる、ことを試み、その結果について報告 した.

#### フィルター法による空間局在数値的厳密解の構成 寺村俊紀,藤定義

厳密解として抽出するための手法であるフィルター の局在性のモデルとして用いた蔵本-Sivashinsky方程 ても述べた. 式の進行方向に局在した定常進行波解について述べ た. さらに現在試行している同方程式の進行方向局 在周期解,及び2次元平面ポアズイユ流での途中結 果についても進行状況を報告した.

#### Attached eddy モデルに基づいた壁面境界条件 水野吉規, J. Jimenez

な長さスケールは固体壁面からの距離に比例する. 旋回をともなう場合の大規模組織構造の存在につい このスケーリング則を満足するような境界条件を与 えて内層(壁付近の領域)を除いたチャネル乱流の数

値シミュレーションを実施し、このスケーリング則が 対数層の形成に本質的な役割を果たしていることを 示した.

#### 高レイノルズ数チャンネル乱流場における大規模構 造の寄与

#### 山本義暢, 辻 義之

した内層と外層が共存し、その接合領域には普遍性 る大規模構造が存在し、この影響により、主流方向 解の存在が期待される.ここでは、空間的なフィル 京を利用した大規模数値解析による PMS 解析につい

#### 高レイノルズ数におけるチャネル乱流の直接数値 計算

#### 清水雅樹,河原源太

DNSにより、高レイノルズ数チャネル乱流における 大規模構造の時空間構造について述べる.また、従 来のDNSでは壁垂直方向に多項式によるスペクトル 層流-乱流転移において重要な役割を果すと期待され 展開が多く用いられてきたが、チェビシェフ多項式を ている空間局在構造を Navier-Stokes 方程式の一つの 用いた高次数での展開には, 微分演算や線形常微分 方程式を解く際に問題があることがしばしば述べら 法について最近の結果を発表した.stream-wise 方向 れている.講演ではこの問題への改善や限界につい

#### 円管乱流中における大規模組織構造の抽出の試み S. Feng, 藤城敦史, 辻 義之

粒子画像計測法(PIV法)を用いた円管乱流中の大 規模組織構造を抽出する試みについて報告した. 実 験は配管直径に基づく Re 数が 5000 ~ 50000 の範囲 で行い、PIV 法を用いて、時間空間分解能を十分に 固体壁面の近くの乱流場における速度乱れの特徴的保ち,管中心軸を含む断面と垂直断面でおこなった. て考察した.

## 4 開催日程,場所

 開催日程
 2013年2月22日(金)-23日(土)

 開催場所
 九州大学応用力学研究所西棟6階多目的研究交流室(W601号室)

 講演数
 12件

 参加者数
 20人

#### 共同利用研究集会

#### 「海洋レーダを用いた海況監視システムの開発と応用」

琉球大学工学部 藤井 智史

#### 1. 目的と経緯

海洋レーダは、沿岸海域を継続的に時空間分解能の高い広域モニタリングを実施することが可能 である。この利点を生かして、海洋環境の把握や防災への活用、海運水産業への貢献が期待されて いる。

海洋レーダを用いた沿岸域の海況監視システムの構築に向けて、精度向上や効率的運用、信号処理の高度化などのレーダ技術の発展と、観測結果の検証、応用分野や利用範囲の拡大などを議論することを目的として標記研究集会を開催した。この研究集会は、2003年度から応用力学研究所共同利用研究の一環として開始され、国内の海洋レーダに関係する研究者、利用者が一堂に参加する研究集会として継続して実施されてきたものである。

#### 2. 開催概要

開催日時: 2012年12月12日(水)午後(13:00~18:30)

および 13日(木)午前(9:00~12:10)

開催場所: 九州大学応用力学研究所東アジア海洋大気環境研究センターW601 号室 参加者: 50名

今回の研究集会開始 10 回目に当たり、また、ソウルにて 2012 年 5 月にアジア圏内で初めて開 催された海洋レーダの国際集会(Ocean Radar Conference for Asia, 2012/5/17-18)の後を受けて、 本研究集会としても日本国内の発表だけでなく近隣国との連携を深めることを目的に、中国、韓国、 台湾において海洋レーダの研究や推進を中心的に担っている研究者を招き、招待講演を企画した。 また、加えて米国 CODAR 社など外国からの参加者があることも考慮し、1 日目を国際セッション

3. 発表概要

展が期待できる研究集会となった。

1日目の最初は、中国、韓国、台湾でそれぞれ海洋レーダの研究開発の中心を担ってきた研究者 による招待講演3件が行われた。Wuは、Wuhan大にて独自に開発してきたOSMAR海洋レーダ の技術的内容と応用研究を紹介した。中国沿岸に15基以上展開され、海流観測だけでなく浅海で の波浪位相速度の変化から海底地形を推定する方法についても言及した。また、内陸のWuhanで 海洋レーダの開発が行われたのは電離層研究を発端にしているとの逸話は、日本において海洋レー ダの研究開発が最初に行われたのが電離層観測拠点である沖縄電波観測所であることと一致して おり、興味深かった。Kunsan大のLeeは、韓国で25基展開されている海洋レーダの配置と今後の 計画、最近の海洋レーダの観測結果などを紹介した。韓国では行政、大学、研究機関等が連携した

として英語での発表とした。議論も活発に行われ、今後の研究や運用に関して国際的な連携への発

組織 KORF (Korea Ocean Radar Forum)を立ち上げて、海洋レーダの運用や研究などを推進していく 体制つくりを行っていることは、日本でも参考にすべきことである。TORI(Taiwan Ocean Research Institute)の Chiang は、台湾島全周をカバーする 15 基の海洋レーダネットワークを紹介した。これ らはすべて TORI にてデータ収集を行い運用されており、その観測例がいくつか示された。今後の 台湾近海における海洋研究に大いに利用されることが期待できる。

招待講演の後、9件の発表が行われた。名大 HyARC の森本は、NICT の遠距離海洋レーダのデー タを再読み取りした表層流速データセットを構築している。その 2001 年~2008 年のデータを用い て、台湾北東海域での黒潮の変動を解析し、夏冬での流路の季節的変動、上流域での中規模渦によ る1か月程度の変動、台風通過時の影響などについてまとめた。九大応力研の市川は、2012年6 月に TORI と共同で行った黒潮上流域での観測を紹介した。海洋レーダ観測海域に日本と台湾から 観測船を出して CTD と ADCP 観測に加えて乱流計測を行った。今回は、特に漂流ブイの軌跡と海 洋レーダ表層流の相違について言及したのみであった。今後の解析が待たれる。国立台湾大の Liu は、台湾北部の海洋レーダ観測に関して、上記共同観測での台湾側のブイの軌跡、台湾ー中国本土 とのフェリー観測、モデルなどの潮流楕円との比較から、データの有効性を示した。北大の Zhang は、宗谷海峡での吹送流の構造を海洋レーダ、ADCP、潮位差、気象庁再解析データを用いて議論 した。季節風が強く一定である冬季の方が夏に比べて吹送流パラメータの RMS が小さくなること を示した。NICT の灘井は、3 基以上の海洋レーダの視線方向流速から表層流ベクトルを求める際 の誤差評価を論じた。国総研の日向は、紀伊水道和歌山側に設置した海洋レーダで得られた東北太 平洋沖地震での津波の観測例について詳細を示し、津波に対する海洋レーダ応用に関する今後の計 画を述べた。国総研の藤は、海洋レーダでとらえた流動場変動から津波波源を求めるインバージョ ン手法について、レーダ配置などを変化させてシミュレーションした結果をもとに示した。NICT の川村は、与那国島で台湾の海洋レーダ信号を受信しバイスタティック観測に利用できることを、 ソフトウェア無線技術を利用して示した。琉大の久木は、海洋レーダで得られた流速パターンの分 類を、教師なし学習法である自己組織化マップにて行う方法を提案した。

2日目は6件の発表があった。うち、後半4件は日本語での発表であった。CODAR社のLipaは、 津波到来検知に海岸線に沿った流速変化をパラメータ化した方法を解説し、その簡単な数値処理で 津波検知可能なことを示した。同社のBarrickは、海洋レーダ観測海域での津波による流動場変化 をモデル化し、海洋レーダでの津波検知の有効性を示した。新潟大の小沢は、アレイアンテナの開 ロ長や観測時間を約2分の1にしても、同様の分解能を得ることができる可能性がある、Khatri-Rao 積拡張アレー処理の適用法を提案した。海上保安庁の西村は、2012年に新しく導入された相模湾の 24.5MHzレーダについて、漂流ブイとの比較・検証を行い、漂流予測に利用可能なことを報告した。 長野日本無線の伊藤は、リアルタイムで連続して流速データを作成する必要がある津波観測に関し て、その問題点をまとめ、現用レーダでの実現方法を解説した。朝日航洋の桑田は、カキ養殖の種 苗状況の監視のための海洋レーダ応用について報告した。

#### 4. 研究集会プログラム

RIAM Workshop on Oceanographic Radar (12-13 December 2012)

Venue: Room W601 within the Research Institute for Applied Mechanics of Kyushu University, Kasuga, Fukuoka, Japan (http://www.riam.kyushu-u.ac.jp/english/center/access-e.html)

#### Wed, 12 December

#### 13:00-13:10 Introduction and Welcome

Satoshi Fujii (Univ. of Ryukyus)

13:10-13:45 **The HF oceanographic radar development in China** Wu Xiongbin (Wuhan Univ.)

## 13:45-14:20 Oceangraphic radars in Korea

Sang-Ho Lee (Kunsan Univ.)

- 14:20-14:55 **Preliminary progress of ocean surface current mapping system in Taiwan** Wen-Son Chiang, Shao-Hua Chen, Wen-Chang Yang, Jian-Wu Lai, K-I Lin, and En-Yu Liang (TORI)
- 15:55-15:05 Break

#### 15:05-15:30 Variability in Kuroshio axis in the northeast Taiwan

Akihiko Morimoto, Kyohei Asano (Nagoya Univ.), Shigeo Sugitani (NICT), Moeto Kyushima (Nagoya Univ.), Kaoru Ichikawa (Kyushu Univ.), and Daisuke Takahashi (Tohoku Univ.)

#### 15:30-15:40 Japan-Taiwan joint survey on combining ocean radar data in the Kuroshio upstream region

#### Upstream region

Kaoru Ichikawa (Kyushu Univ.), Wen Chang Yang (TORI), Akihiko Morimoto (Nagoya Univ.), Yutaka Yoshikawa (Kyushu Univ.), Shigeo Sugitani (NICT), Wen-Shan Chiang, Jian-Wu Lai, En Yu Liang (TORI), Cho-Teng Liu (NTU), Chang-Wei Lee (TORI), Kei Yufu (Kyushu Univ.), Moeto Kyushima (Nagoya Univ.), Satoshi Fujii (Univ. of Ryukyus), Tomoharu Senju (Kyushu Univ.), and Yoshihiko Ide (Kyushu Univ.)

#### 15:40-16:00 CODAR-observed currents off northern Taiwan

Cho-Teng Liu and Wei-Teng Tsai (NTU), Takeshi Matsuno, Kaoru Ichikawa (Kyushu Univ.), Wen Chang Yang, Chang-Wei Lee (TORI), and Hsien-Wen Chen (CPU)

16:00-16:25 Estimation of wind drift current in the Soya Strait Wei Zhang and Naoto Ebuchi (Hokkaido Univ.)

16:25-16:50 Probability distribution of estimation error on current vector measurement using multiple HF ocean surface radars

Akitsugu Nadai (NICT)

#### 16:50-17:00 Break

17:00-17:25 Velocity fields of propagating tsunami wave and subsequent resonant oscillation revealed by oceanographic radars in the Kii channel, Japan Hirofumi Hinata, Ryotaro Fuji (NILIM), Satoshi Fujii (Univ. of Ryukyus), Tomoya Kataoka (NILIM), Tahahiro Kokai (NJRC), Nobutoshi Kanatsu (Kokusai Kogyo Co.), and Tomoyuki Takahashi (Kanasai Univ.)

#### 17:25-17:50 **Tsunami waveform inversion based on HF oceanographic radar data** Ryotaro Fuji and Hirofumi Hinata (NILIM), and Tomoyuki Takahashi (Kanasai Univ.)

17:50-18:15 Ocean radar bistatic observation in Yonaguni-island Seiji Kawamura, Shigeo Sugitani, Hironori Iwai, Jun Amagai, and Hiroshi Hanado (NICT)

18:15-18:40 Classification of surface currents distribution maps

Yukiharu Hisaki (Univ. of Ryukyus)

#### 19:00- Reception

#### Thu, 13 December

#### 09:00-09:25 HF radar detection of tsunamis

Belinda Lipa, James Isaacson, Bruce Nyden, and Donald Barrick (CODAR Co.)

09:25-09:50 Modeling of tsunami current flows

Donald Barrick, Belinda Lipa, and Chad Whelan (CODAR Co.)

09:50-10:15 Angular/Doppler-frequency resolution improvement using the Khatri-Rao product array processing in ocean surface current radar 海洋レーダにおける Khatri-Rao 積拡張アレー処理を用いた角度・ドップラ周波数

#### 分解能改善に関する検討

Naoteru Ozawa, Hiroyoshi Yamada, Yoshio Yamaguchi (Niigata Univ.), Keizo Hirano, and Hiroyuki Ito (NJRC)

#### 10:15-10:30 Break

10:30-10:55	Renewal of HF ocean radar in Sagami bay and validation of the data
	相模湾海洋短波レーダーの更新とデータ検証について

Issei Nishimura, Hiroshi Morioka, Koshiro Oikawa, and Hiroyuki Yoritaka (JCG)

10:55-11:20 Improved oceanographic radars for tsunami observation 津波観測のための海洋レーダの改良

Hiroyuki Ito (NJRC), Hirofumi Hinata (NILIM), Tomoyuki Takahashi (Kansai Univ.), Satoshi Fujii (Univ. of Ryukyus), Hiroshi Hanado (NICT),

Takashi Kawai (Mitsubishi Elec. Co.), and Isamu Ogasawara (Kokusai Kogyo Co.)

#### 11:20-11:45 Application of VHF-radar for seed oysters (Crassostrea gigas) dispersion 海洋レーダによる種苗発生状況調査の事例紹介

Koji Kuwata, Toshiaki Watanabe, and Takayuki Nakauchi (Aero Asahi Co.)

#### abbr.

- CPU: Central Police Univ. (Taiwan)
- JCG: Japan Coast Guard
- NICT: National Institute of Information and Communications Technology (Japan)
- NILIM: National Institute for Land and Infrastructure Management (Japan)
- NJRC: Nagano Japan Radio Co.
- NTU: National Taiwan Univ.
- TORI: Taiwan Ocean Research Institute

#### 共同利用研究集会

#### 「東シナ海の循環と混合に関する研究」

"Workshop on the vertical processes in the shelf region of the East China Sea"

研究代表者 石坂丞二(名大地球水循環研究センター)

1. 目的と開催経過

東シナ海の生物環境は、長江起源の栄養塩に大きく依存していると同時に、陸棚域の下層に分布する 栄養塩の寄与も小さくないと考えられている。下層に分布する栄養塩は表層で生産された有機物が沈降 して分解されたものの他に、黒潮亜表層以深から輸送されたものも含まれる。これらの栄養塩が東シナ 海の生物生産に大きく寄与していることを考えると、陸棚域の基礎生産を念頭に置いて海水の循環と混 合過程を議論することは、当海域の海洋環境を理解する上で必要不可欠である。

出席者は、名古屋大学2名、富山大学2名、長崎大学4名、愛媛大学1名、九州大学8名であった。 本研究集会では、

1) 東シナ海における栄養塩の循環と混合

2) 基礎生産に関わる栄養塩の供給

の二つにセッションに分け、それぞれ1)で張勁(富山大学)、郭新宇(愛媛大)、梅澤有(長崎大学)、 松野健(九州大学)、2)でLee, Keun-Jong(九州大学)、武田重信(長崎大学)、鋤柄千穂(名古屋大 学)、藤城義久と張勁(富山大学)から話題提供があり、それぞれについて議論を行った。

2.研究集会の概要
 日時:2013年2月5日(火) 10::00~17:30
 場所:九州大学応用力学研究所5F W501

1) 東シナ海における栄養塩の循環と混合

張は、東シナ海大陸棚上への栄養塩供給に関して、過去の文献のレビューを行った。台湾海峡からの 流量および栄養塩フラックスに関しては、文献による違いが大きく、季節によっては流入か流出かもは っきりしないことが指摘された。流量に関しては現在、九州大学が台湾と共同で行っているフェリーに よる流速観測によって、はっきりとする可能性が高い。一方で、栄養塩のフラックスに関しては、測定 自体の問題や、濃度から積算フラックスに変換する手法などの問題があることが議論された。また台湾 東部沿岸でのフラックスに関しても十分な知見がないことが指摘された。さらに、堆積物からのフラッ クスについても、測定手法によって大きくその値が異なること、低層が貧酸素化した場合にリンの供給 源として重要であることが指摘された。

郭は、生態系モデルの感度解析の結果について話題提供した。このモデルは、N・P・Si、大型・小型の植物プランクトン、栄養塩起源として黒潮、台湾暖流、河川、大気、海底を含んでいる。渤海と黄海はまだ定常に達していないので、主に東シナ海に関して議論を行った。栄養塩は長江河口域で高く、夏には鉛直的な違いが大きかった。クロロフィルは長江河口域では懸濁物で生産が少ないために少なく、

5-8月では濁度の減少する周辺域で高かった。PN ラインでは夏には表層栄養塩は枯渇し、亜表層ク ロロフィル極大が顕著であるなど、主な栄養塩、クロロフィルの特徴は再現できていた。しかし、堆積 物や台湾暖流からのフラックスの実測値の不確定性など、張の話題提供と同様の問題点が再度議論され た。また、流量と栄養塩フラックスの季節変動が異なることが指摘された。さらに、栄養塩起源を一つ ずつなくす感度解析結果が示され、植物プランクトン現存量の年平均が、黒潮で 75%、台湾暖流で 20%、 河川で 8%、大気で 5%それぞれ減少することが示され、亜表層クロロフィル極大が主に黒潮と台湾暖 流の栄養塩の供給で維持されていることが指摘された。また、詳細には栄養塩起源を完全になくすこと によって、NP の利用比の変化などの影響も起こることが指摘された。降水による栄養塩の供給の与え 方や、堆積物への有機物の蓄積と栄養塩供給などに関して議論があった。

梅澤からは、アルカリフォスファターゼ活性(APA)と硝酸の窒素同位体比について話題提供があった。これまで台湾北部では湧昇域よりも黒潮側でAPAが高いことが示されているが、今年度の淡青丸では黒潮と長江希釈水の一部、長崎丸では韓国側の一部測点でAPAが高く、無機リン酸塩が枯渇し硝酸のまだあるような海域で有機態リンが利用されている可能性が指摘された。長江希釈水の成層状態との関係やAPAのサイズ分画と植物プランクトンの種類の関係などが議論された。硝酸の窒素同位体に関しては、黒潮域の有光層下部での混合は栄養塩濃度が変わっても同位体比は変わらないこと、長江起源水はやや高めの同位体比を持っていること、植物プランクトンがある同位体比で硝酸を変化させると仮定すれば、ある程度長江と黒潮起源の栄養塩を分けられることが指摘された。鋤柄は懸濁物質の窒素同位体のデータをもっており、これを比較する必要性が議論された。

松野は、今年度淡青丸において長江海台付近で観測された貧酸素水塊と高濁度水の関連と、この貧酸 素水塊が中国沿岸から移流してきたのか、ローカルに形成されたのかの議論を行った。高濁度水と貧酸 素水塊の分布はややずれているので、詳細を検討する必要があることが指摘された。また、底質と巻き 上がりやすさ、酸素消費に関して検討する必要性も議論された。

2) 基礎生産に関わる栄養塩の供給

Lee は、これまでの航海で取得されたデータを整理し、亜表層クロロフィル極大の深さや量と他の観 測パラメータについて、相関や主成分分析を行った結果について紹介した。極大の深さは酸素極大層、 栄養塩躍層や有光層深度などと相関はあったが、密度躍層との相関は弱かった。クロロフィルの積分値 が、栄養塩躍層や有光層深度等と正の変動をする主成分と負の変動となる主成分があることが指摘され た。正の変動をとる時はクロロフィルが存在する層が厚くなることによって積分値が増加した場合、負 の変動をとる時は生物量が多くなることによって有光層が浅くなる可能性などが議論された。クロロフ ィル蛍光を利用するときには、採水分析結果でキャリブレーションするべきであること、ガウス分布で フィットしたりすることが有効であることなども議論された。クロロフィル極大深度と栄養塩勾配や有 光層深度などの差についてもさらに整理する必要性も指摘された。

武田は、亜表層クロロフィル極大と栄養塩の関係について紹介した。亜表層クロロフィル極大の上の 栄養塩勾配とクロロフィル勾配が対応し、N/Chl=4 程度と植物の消費/生産比(N/Chl≂1)と比較すると 大きいことが指摘された。NP 比は希釈水では大きいが、海底近くでは小さく、P の溶出か脱窒が起き ていることなども指摘された。亜表層クロロフィル極大や栄養塩の勾配が急な場合は、下層の海底混合 層で濁度が高いケースである可能性も議論された。また、亜硝酸の顕著なピークがみられるが、生産に よるものか硝化によるものかはわからないことなども議論された。 動柄は、2010年と2011年の長崎丸でのセジメントトラップ実験の結果について紹介した。2010年 は長江希釈水が顕著で、2011年は長江希釈水の多くない大陸棚の水であり、2010年は2011年と比較 して、亜表層クロロフィル極も栄養塩躍層もシャープで、生産が高く、沈降量も多かった。層別の生産、 沈降フラックス、拡散による栄養塩の供給フラックスを比較することで、生産は2010年は2011年の3 倍以上であったが、有光層から沈降するフラックスの量はどちらも20%程度であり、再生産が活発に起 こっていることが指摘された。また、亜表層クロロフィル極大では、2010年には70%程度、2010年で は50%程度が下からの硝酸塩フラックスによる生産で、かつこの硝酸塩フラックスは沈降フラックスと ほぼ釣り合っていた。一方で、有光層中でも亜表層クロロフィル極大の下には硝酸塩が多く、ここでも 盛んに生産がおこなわれていた。生産の採水は密ではないので、クロロフィル蛍光やFRRFのデータと 比較をしてみる必要が議論された。また、有光層への沈降粒子と硝酸塩フラックスの比較で、2010年 は硝酸塩フラックスが大きかったが硝酸塩フラックスの計算方法について再検討する必要があるや、リ ンのフラックスを計算することも議論された。

藤城は、過去に行われた観測のクロロフィルデータに関して、蛍光を測定値でキャリブレーションし 積算値を求めたところ、比較的積算値が一定であることを報告した。場所等で平均をとってしまってい るので、もう少し細分化して他の要因と比較するべきとの議論があった。また、貧酸素水塊と栄養塩の 関係についても報告があった。

最後に張(富山大学)が2013年7月18-28日の長崎丸と同期して7月9-29日に中国海洋大学の航海を行うこと、中国籍の留学生であれば乗船が可能であることが報告された。今後、乗船者を決定するとともに、長崎丸と航海計画の調整が必要である。

本研究集会では、東シナ海における栄養塩の循環と混合、基礎生産に関わる栄養塩の供給の二つの 研究テーマに絞り、さらに1件あたりに1時間近い時間をかけたために、それぞれ集中した議論ができ た。このためお互いに十分理解がすすみ、それぞれについての今後の課題も明確化できた。また、栄養 塩の循環と混合では台湾海峡や堆積物の寄与の問題、基礎生産であれば細かい鉛直的な構造を今後どう 観測するかなど共通の課題が多いことが理解でき、実りの多い研究集会であった。

- 1. 東シナ海における栄養塩の循環と混合
- 10:00-12:00 栄養塩の分布とその起源について
  - 張勁·藤城義久(富山大理工)
  - ・栄養塩の水平・鉛直分布
  - ・栄養塩の起源:黒潮亜表層、台湾海峡、海底
  - ・黒潮亜表層と台湾海峡の栄養塩の相違
  - 郭新宇 (愛媛大 CMES)
  - ・東シナ海の低次生態系モデルによる栄養塩起源に関する感度解析
  - 梅澤有・山口聖・野崎龍(長崎大水産)
  - ・硝酸同位体とアルカリフォスファターゼ活性から見た窒素・リン供給の考察
- 13:30-14:00 KT-12-25 の観測結果
  - 松野 健・Keun-Jong Lee・遠藤貴洋(九大応力研)・張勁(富山大理工)・石坂丞二(名大 HyARC) ・2012 年 9 月に見られた底層低酸素・高濁度水と ε の鉛直分布
- 2. 基礎生産に関わる栄養塩の供給
- 14:30-15:30
  - Keun-Jong Lee・松野健・遠藤貴洋(九大応力研)・石坂丞二(名大 HyARC)
  - ・亜表層クロロフィル極大層とそれに関わる各種要素との関係
  - 武田 重信 (長崎大水産)
  - ・東シナ海の陸棚上における亜表層クロロフィル極大層と栄養塩躍層の関係

16:00-17:00

鋤柄千穂(名大 HyARC)

- ・長江希釈水が下層の生物過程と粒子の沈降に与える影響
- 張勁·藤城義久(富山大理工)
- ・亜表層クロロフィル極大層(SCM)の東シナ海全体の基礎生産に対する寄与

平成24年度

# 核融合力学分野

## 共同研究成果報告

特定研究 2: プラズマ乱流実験の大容量データからの物理情報抽出新手法の開発

応用力学研究所 伊藤 早苗

#### 背景と目的

近年の実験技術の進展により、高精度時間サンプリング・空間多チャンネルでのデータの取 得が普及し、プラズマ乱流実験をはじめ多くの科学技術分野で大容量のデータ処理が一般 化している。これらのビッグデータを網羅的かつ効率的に処理し、知識を獲得する事が必 要である。最も基本となるのは相関を持つ変数を発見する事である。この時、雑音成分の 低減技術、統計精度向上技術、複数のデータ解析手法の統合、等が求められる。本特定研 究では、PANTA 実験等から得られるプラズマ乱流のビッグデータから自明でない新たな物 理情報を抽出する手法の開発を行う。

#### サブテーマ

本特定研究では10のサブテーマが提案されている。またサブテーマリーダーが一堂に会す る研究集会(稲垣)を開催した。

#### 主要な成果

理論モデルをベースにした実験・解析手法の開発が行われた。プラズマ中の波動伝搬を基に した磁力線構造の観測法を開発し、磁力線構造が突発的に遷移する現象の発見につながっ た(居田)。プラズマ乱流構造に関しては、ストリーマ形成時のドリフト波の二次元断面構 造の理論との比較(山田)、電子温度勾配モードと低周波数モードとの非線形結合の観測 (金子)、高速イオン励起 GAM の同定(井戸)が進展した。電子熱輸送の状態評価のための 確率論的手法の導入(田村)も試みられた。新たな計測器の開発に伴う実験・解析手法の開 発も進展した。多チャンネルプローブ及び位相差の瞬時値解析が始まった(大島)。近年 のマイクロ波技術の進歩により、先進反射計(徳沢)及びディジタル相関 ECE(土屋)の開発 が進展し、信号からのプラズマ乱流揺動の抽出が議論された。PANTA において初めて乱流 の高速度カメラ計測が行われた(大館)。このような揺動計測の発展に対応し、シミュレー ションを用いたプラズマ乱流の時空間構造解析計測(糟谷)が進められている。

今後は、サブテーマ間の情報交換を更に活性化し、新たなアイデアの着想を促すとともに プラズマ乱流データ解析手法の検証及び統合を進める。

### 国際的学術拠点の形成報告書 「磁場閉じ込めプラズマ中の乱流、磁気島及び磁力線の研究」

#### 高速度軟 X 線/VUV 光望遠鏡

ヘリオトロンタイプの核融合炉を成立させるためには、MHD 不安定な配位でプラズマを 高ベータ化することが鍵となる。大型ヘリカル装置の磁場配位においては周辺プラズマは 常に磁気丘であり、そこでの圧力駆動型の MHD 不安定性の振る舞いを調べる必要がある。 この目的でプラズマ周辺部からの放射から周辺プラズマの揺動を2次元的に計測する高速 度接線 VUV カメラを開発してきた。本カメラは多層膜反射鏡を使ってプラズマから放射さ れる VUV 光を結像し MCP を使って増倍したのちに高速度カメラで計測するものである。こ れまでの開発で、周波数 2KHz までの揺動計測が可能となったが[1]、プラズマからの放射 強度の不足からそれ以上の高速の計測はできなかった。昨年度より反射鏡の半径を1.5 倍 に大型化し、計測機器のプラズマへの距離も近づけることと合わせて 10kHz までの揺動計 測をめざした改良を行ったが、MCP の故障で LHD の実験期間内で揺動計測を行うことがで きなかった。本報告では本年度に集中的に研究を行った、揺動計測以外の二つの応用例に ついて報告を行う。

#### (1) 炭素ペレットの侵入長推定[2]

大型ヘリカル装置では不純物輸送研究 のために炭素ペレットの入射が行われ ている。炭素の輸送を詳しく調べるため には炭素の初期分布の推定が不可欠で ある。現在は炭素ペレットアブレーショ ンクラウドからの Hαの放射時間と、ペ レットの速度から侵入長が推定されて いる。しかし、ペレットの軌道が曲がる 場合などには推定誤差が大きくなる問 題があり、クロスチェックのための計測 手法の開発が必要とされている。高速度 VUV カメラは炭素の水素様イオンからの 放射を選択的に検出でき、ペレット入射 直後の像から初期分布の推定が可能で ある。現在のLHDの輸送係数からすると、 プラズマの輸送のタイムスケールより



図1 ペレット入射直後の CVI イメージ(G), (H) と侵入長を仮定したモデルイメージ(E), (F)の比較
も炭素原子が水素様まで電離する時間の方 が十分はやいため、炭素様イオンの放射強度 分布を推定できれば、入射した炭素の初期分 布を推定することができる。実際には侵入長 をパラメータとして、電離・輸送のシミュレ ーションを行ったうえで接線像のシミュレ ーションを行い、観測像との比較を行ってい る(図1)。本推定法と、Hα光の放射時間 から推定したものの比較を図2に示すが、誤 差の範囲内でよく一致している。



図 2 炭素ペレットの侵入長の VUV カメラ による推定値と、Hα計測による推定の比較

### (2) 電子温度摂動の2次元分布の推定手法の開発

大型ヘリカル装置では、電子サイクロト ロン加熱のモジュレーションから作られる ヒートパルスの伝搬特性を計測することで、 磁場垂直方向の輸送を推定している。磁場 がストキャスティック化した領域で輸送が 大きくなることを利用して、ストキャステ ィック領域の検出を逆に行うことができる。 接線 VUV カメラは基本的には密度揺動の計 測ではあるが、温度揺動に対しても若干の 感度がある。それは電子温度変化に対して 炭素イオンの電離度が変化するためであり、 図3に示すように、プラズマのほとんどの 領域で電子温度摂動に対して負の相関をも ち、イオン化エネルギーに近い 100eV 付近 では特に感度が良い。イオンの電離時間か ら考えると、数 ms 程度のタイムスケールの 電子温度摂動の検出は十分可能であって、 プラズマ周辺領域の磁場構造の変化を調べ るツールとして使える可能性がある。実験 でも電子温度摂動と逆位相の振動が検出さ れている。実験時に検出された揺動の振幅 とその位相差を図4に示す。振幅が視野下 部で大きくなることは、図3に示すように、



図3 電子温度摂動に対する放射強度の変化を電子 温度の関数で示す。



図4 熱パルス伝搬実験で観測される CVI イメージ (上段)、摂動の振幅(中段)、摂動の位相(下段)を示 す。左列のデータは m/n = 1/1 の磁気島を生成してい た状態で取得した。

100eV 付近で電子温度摂動への感度が大きくなることと矛盾しないが、位相分布は大型へ リカル装置の磁気面形状が複雑であるため、現在はうまく再構成することができていない。 より単純な磁場配位を持つトカマク装置においては2次元位相分布が求められる可能性が ある。また大型へリカル装置で位相情報を再構成できるような視野が可能かどうかを今後 検討していく予定である。

# 論文リスト

[1] Ming, T.F., Ohdachi, S., Sakakibara, S., Suzuki, Y., 2012. "High speed vacuum ultraviolet telescope system for edge fluctuation measurement in the large helical device." Review of Scientific Instruments 83, 10E513–10E513–3.

[2] Ming. T. F. S. Ohdachi. S., Suzuki. Y. LHD Experiment Group "Estimate of the deposition profile of carbon pellet using a high speed VUV imaging system in LHD", Submitted to Plasma Sci. Tech.

[3] DU, X., OHDACHI, S., TOI, K., others, 2012. "Development of an Array System of Soft X-ray Detectors with Large Sensitive Area on the Large Helical Device". Plasma and Fusion Research 7, 2401088.

### マイクロ波計測器信号からの乱流揺動信号抽出法の研究

核融合科学研究所・ヘリカル研究部 徳沢季彦

#### 1. 目的

核融合発電を目指す高温プラズマ閉じ込め研究において、乱流物理研究は現在最重要研究課題である。 これまで、高温プラズマ中の乱流を計測する手段が非常に限られていたが、近年新しい非接触な計測手 法としてマイクロ波を用いた乱流揺動計測法が開発・適用されるようになってきた。計測器システムに 新しい素子技術が活用できるようになったことだけでなく、新しい解析手法が開発されてきたことによ って世界各国の実験に適用されてきている。本研究では、ハードウエアとして新しく開発を進めている 空間多点計測システムの構築と、それによって得られる詳細な空間構造を求めることをまず当初の目標 とし、この計測システムをプラズマ実験へ適用することによって得られる大規模データに対して、開発 が進んできたデジタル信号処理手法を駆使し、乱流信号を抽出する技術開発を行い、プラズマ乱流物理 への知見を得ることを最終目的とする。

#### 2. 計画と実験方法

まず、空間多点を同時に観測し、乱流の構造・物理を知るために、情報通信分野において開発適用が 行われてきている周波数コムを発振源とする新型多チャンネルマイクロ波コム反射計の構築を行う。そ して、この計測システムを核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)プラズマへ設置し密度揺動お よびそのポロイダル回転分布の計測に適用する。また、乱流輸送において、温度揺動に関する知見が得 られると期待されている新しい計測手法である correlation ECE (cECE)システムの構築とそのLHDプ ラズマへの適用による電子温度揺動計測データも取得し、これら大容量データに含まれる雑音成分から 乱流揺動信号を、効率的かつ高精度で抽出する技術手法を確立することを目指した研究を行う。

#### 3. 実験結果

周波数コムを用いた ka-band マイクロ波反射計をLHD装置に設置しプラズマ実験に適用した結果の 一例を図1に示す。この時送受信アンテナの角度を調整することによって、プラズマ周辺部からの波数 約10cm<sup>-1</sup>の密度揺動による後方散乱波を観測している。図はコム発振している各周波数成分のプラズ マからの散乱波スペクトルを表示しているが、密度揺動によるスペクトルの拡がり、およびプラズマ回



図 1.Comb ドップラー反射波の周波数スペクトル(1MHz/div;重ね表示)

転によるドップラーシフトが生じていること が見て取れる。このデータはサンプリングレ ート 20GS/s という非常に高速かつ高帯域な オシロスコープを用いて全散乱波波動を直接 取得した大容量データを処理したものである が、図のように其々の成分毎に問題なく弁別 して処理できることが分かった。これは世界 初の実証結果であり、論文化の準備を進めて いる。一方、フィルタバンクを用いて、周波 数コム毎に個別にデータを収集するシステム も同時に開発して稼働させた。図2に示すの は、各周波数成分毎(すなわち異なる空間位 置を意味する)の密度揺動成分のドップラー シフトの時間変化である。このドップラーシ フト量fbはポロイダル速度 $v_{\perp} \ge f_{D} \approx -k_{\perp}v_{\perp}$ という関係性を持つ。このデータは半径方向 電場を制御することを目的とした実験で取得 したものであるが、時間的にポロイダル速度 の大きさ及びその位置が変動している様子を 観測することに成功した。

また、データ処理に関して、図3に示すよ うに、信号に含まれる密度揺動成分を揺動周 波数成分毎に弁別し、かつそのエンベロープ



 図 3: エンベロープ解析と Conditional averaging の技法を適用した密度揺動の周波
 数成分毎の周波数スペクトル



図2:各周波数成分のドップラーシフト(ポロイダル 速度に比例)の時間変化。

の周波数スペクトルをS/N比を高めて取得するこ とを目指した Conditional averaging 技法の適用な ども実施した。図のように変調した 25Hz の周期を 明確にとらえることが出来た。今後より詳細にこれ らの技法の確立を目指して研究を進める。

### デジタルコリレーションECEの開発

#### 核融合科学研究所 土屋 隼人

1.背景と目的

磁化プラズマ中において乱流は輸送において大きな影響があることは広く認識されているが、乱 流そのものの構造を理論的実験的に理解することは極めて重要な課題である。装置サイズ程度の大 きな構造の研究については実験的に近年報告があるが、イオンラーマー半径の数倍の乱流について の実験研究は構造や輸送を議論できるほどの計測が乏しいために十分でない。小さな乱流構造を捉 えることができる計測を充実させ、ミクロ、メゾ、マクロスケールの乱流の非線形結合の理解を実 験的に行うことが望まれている。

そこで、本研究の目的は、メゾスケール乱流計測に対応しうる高時間分解能かつ高空間分解能を 持つ計測のデジタルコリレーションECEを提案し、その手法の検証とした。

2. デジタルコリレーションECEのコンセプト

磁化プラズマにおいて、マイクロ波計測の一つである電子サイクロトロン放射(ECE)計測はプ ラズマを乱さず電子温度の局所計測ができる有用な計測手法である。しかしながら背景ノイズや機 器に由来するノイズが多いのが難点であり、原理的にも局所的な高周波揺動は感度限界が存在する。 そこで、近年、ノイズ低減の手法として、2点間の温度揺動の相関をとることでプラズマ由来の信 号を取り出すコリレーション ECE (CECE)が広まりつつあるが、従来以上の多チャンネル計測に なりデータ解析の煩雑性が増している。

一方、電子デバイスの進歩によりデータ取集装置の高速化が目覚ましく、ECEの周波数帯(R F:~100GHz)からヘテロダイン検波を行った中間周波数帯(IF:~数GHz)を直接デ ジタイジングすることが可能となった。そこで、従来のマルチチャンネル型のCECEをIFのデ ジタイジングデータで再現する手法を「デジタルコリレーション ECE」(DCECE)として提案す る。この手法の最大の利点は、観測対象の構造の大きさ、周波数、揺動強度に応じて、解析する段 階で計測パラメータを設定できる点にある。従来のCECEでは空間分解能はハードウェアの周波

数フィルターの設定に依存するため、空間 分解能を変更することは容易ではないが、 DCECEでは数値計算で行うため可能であ る。また、図1にDCECEのハードウェア のブロック図を示ように取得データ自体 は単一チャンネルとなるのでハードウェ アが容易になることも利点としてあげら れる。





#### 3. DCECE 解析手法

図2に DCECE の解析フローチャートを示す。図では 100kHz の電子揺動にノイズを加えた模擬 データを例にしている。解析手順はまず、IF 信号 x(t) (図2 (a)) に対してフーリエ解析を行う。 そのパワースペクトルは電子温度に比例する。FFT を時間軸に対して、多数回行い、電子温度発展 を得る (b)。(b) の縦軸の周波数はプラズマ計測としては大半径方向 R に相当する。離散化フー リエ変換の誤差の影響を減らすため、ある幅をもった周波数領域で平均操作を行う必要がある (c)。 この周波数幅が径方向の空間分解能を決めるが、ECE の感度限界と関係するため極端な小さな幅 をとることはできないが、計測対象の現象に応じて任意の空間分解能を選ぶことができる。平均操 作をすることによってマルチチャンネルの電子揺動データを得たので、FFT 操作により各チャンネ ルの電子温度のスペクトルを得る。さらにノイズ低減のために、あるチャンネルを基準点としたク ロススペクトル S<sup>Te</sup>(tw,R,f)を時間領域で平均した<S<sup>Te</sup>(R,f)> (e)を得る。<S<sup>Te</sup>>の位相より伝搬速度や、 <S<sup>Te</sup>>のフーリエ逆変換の行うことでコリレーション C(R,tau)を算出し、相関長などを得ることが できる。



### 4. LHD データ解析

核融合科学研究所(岐阜県)にある大型ヘリカル装置(LHD)において、試験的に77~82 GHzのECE信号を77GHzの局部発振器を用いてダウンコンバートしたIF信号を高速デ

ジタイザー (NI-PXIe 5186, National Instruments 社製, バンド幅 5GHz, サンプリングレート 12.5GHz, デー タ取得時間 40msec) にて取得した。 図3に示すように、IF 信号のスペクト ル解析より6mm 離れた2点間の温度 揺動を再構成することができた。



図3. 実データの電子温度再構成

#### 波動伝搬を用いた磁力線構造観測法の開発

核融合科学研究所 ヘリカル研究部 居田克巳

#### 目的

磁気面のストキャスティック化は周辺プラズマの制御やコアプラズマの閉じ込めに重要な役割を 演じる。プラズマによる磁気面の統計化の発生の原因とプラズマ閉じ込めへの影響を明らかにする ため、磁力線構造の観測手法の開発を行う。本研究を通じて開発された波動伝搬解析手法の応用が、 磁力線の可視化手法として確立されつつある。本手法の更なる高度化には、開いた磁力線構造での 波動伝搬の理解が必要となり、応用力学研究所の直線装置 PANTA を用いた実験研究に応用する事 を目的としている。

#### 実験方法

プラズマ中に熱波動を励起し、その伝搬特性により磁力線構造を推定する方法を提案し、開発を進 める。本手法を更に発展させ、磁力線構造変化のダイナミクスの観測と統計化推定の精度を向上す る。熱波動の wavelet 解析を基盤とし、コンディショナル平均法等を組み合わせる。LHD の実験デ ータや PANTA での開いた磁力線構造におけるプローブデータを用いて解析手法の検証を行い、信 頼性を向上させる。

#### 実験結果

加熱パワーをモジュレーションする ことでプラズマ中に熱波動を伝搬させ た実験を行った。その時の電子温度と モジュレーション振幅の2乗の時間変 化を図1に示す。時刻t=4.3sにおいて 中性粒子ビームの入射方向を等価電流 方向から反等価電流方向に入れ替えた。 周辺部の回転変換角度が減少、中心部 の回転変換角度が増加することで磁気 シアが弱くなる。磁気シアが0.5程度 まで減少した時に電子温度の平坦化が 起こる。この時にモジュレーション振 幅の2乗の時間変化をみると、中心部 で振幅が減少、周辺部で振幅が増加し ている。

図2は磁気シアの変化量を変えたプラ



図1電子温度とモジュレーション振幅の2乗の時間変化

ズマにおける熱波動伝搬の位相の 遅れの空間分布であるが、位相の遅 れの空間分布に2つのパターンが 観測された。磁気シアを速く減少さ せた場合には、山形の位相の遅れの 空間分布が得られ、プラズマ内部に 磁気島ができている事を示してい る。一方の磁気シアを遅く減少させ た場合には、位相の遅れの空間分布 に平坦部が現れ、プラズマ内部にス トキャスティック領域ができてい る事を示している。



### 考察

熱波動伝搬の位相の遅れの空間分 布から、磁場のトポロジーを推定で きる事が実験的に確かめられた。こ

図2 磁気シアの変化量を変えた時の熱波動伝搬の位相の遅れの 空間分布

の「波動伝搬を用いた磁力線構造観測法」は磁力線が閉じているプラズマコア部だけではなく、磁 力線が開いているプラズマ周辺部や、直線磁場装置のプラズマにも応用が可能で、今後の発展が期 待される。

#### 研究成果報告

本研究で開発した手法により磁力線構造を推定し、構造間の分岐現象を発見した。本成果は既に以 下の共著論文として出版した。

K.Ida, S.Inagaki, Y.Suzuki, S.Sakakibara, T.Kobayashi, K.Itoh, H.Tsuchiya, C.Suzuki,

M.Yoshinuma, Y.Narushima, M.Yokoyama, A.Shimizu, S-I.Itoh and the LHD Experiment Group,

"Topology bifurcation of a magnetic flux surface in magnetized plasmas", New Journal of

Physics 15 (2013) 013061

さらに分岐現象に伴いプラズマの流れが変化する事を見出し、以下の学会発表を行った。

居田克巳、永岡賢一、吉沼幹朗「ストキャスティック磁場領域におけるイオンの熱と運動量の輸送」プラズマ・核融合学会第29回年会、クローバープラザ、福岡県春日市、
2012年11月27日(火)~30日(金)

#### 研究組織

- 居田克巳 核融合科学研究所
- 稲垣滋 九州大学応用力学研究所
- 小林達也 九州大学·総合理工学部

#### プラズマ乱流データ解析研究会

#### 応用力学研究所 稲垣 滋

本研究は「特定研究 2: プラズマ乱流実験の大容量データからの物理情報抽出新手法の開発」における個別課題の成果の統合を議論する。

目的と背景

様々なプラズマ乱流データを対象とし、共通な物理機構を抽出する一連の手法の確立を 目指す。特定研究2で議論する手法は、ビッグデータの処理法、偽相関の排除法、変数間 の相関の検出、理論的なモデリング、シミュレーションによる予測、等非常に多岐に渡る。 多方面からの研究者が一堂に会して議論し、個別のアプローチを統合することで、本手法 の開発に新たな展開がもたらされることが期待できる。本特定研究で取り組む課題はプラ ズマ乱流に限らず、多くの先端科学における共通の課題であり、応用力学研究所の共同研 究として遂行し先導する事が必要である。

#### 研究集会の開催

2013 年 1 月 29 日に応用力学研究所 2F 会議室において研究会を開催した。研究会のプログラムを添付する。

#### 予算の執行

予算は研究会参加の旅費に執行した。

研究集会のまとめ

技術論:データ解析を行う際、ノイズによる偽相関には注意する必要がある。バイスペク トル解析等では値の収束を観測する事が慣習となっている。今回はそれに加えてディジタ ル的にノイズを落とす処理である適応ディジタルフィルタについての紹介があった。

統合化:今年度の個別テーマは以下のように3つにカテゴリー分けする事ができる。

1. 理論モデルをベースにした実験・解析手法の開発

・磁力線構造の観測と磁力線構造遷移の理論モデルとの比較

・帯状流理論を基にした帯状流検出法の開発

- ・帯状流及びストリーマ理論を基にした帯状流・ストリーマ検出法の開発
- ・ドリフト波の非線形理論を基にした電子温度勾配モードと低周波数モードとの非線形
   結合の観測
- ・電子熱輸送の状態評価のための確率論的手法の導入
- 2. 新たな計測器の開発に伴う実験・解析手法の開発
  - ·多チャンネルプローブ開発及びそのデータ解析法(Hilvert 変換)
  - ・先進マイクロ波反射計の開発とその信号からのプラズマ乱流揺動信号の抽出
  - ・ディジタル相関 ECE の開発
  - ・高速度カメラ計測データの処理
- 3. シミュレーションとの連携
  - ・プラズマ乱流の過渡応答シミュレーション
  - ・シミュレーションを用いたプラズマ乱流の時空間構造解析

今回は研究課題間の相互理解がはかられた。特にプラズマ乱流解析ではバイスペクトル解 析等共通のツールを使っているが適用する問題によりノウハウが異なる。これらの情報を 交換できた事は大きな成果である。また、近年のマイクロ波技術の進展により、伝統的な の反射計が大きく進化している。これら計測器の進展をふまえ、シミュレーションによる 計測機器の模擬のターゲットとして反射計を選択した。次回からは課題間での交流が深化 する事で統合化に向けた研究が一層進捗すると期待される。

議論:ディジタル相関 ECE の開発に関して、ビッグデータの並列計算について報告された。 通常の時系列解析ツールである FFT では計算時間が膨大になり、実験へのフィードバック が不可能になる。そこで 並列計算の必要性が議論され、更に将来的には FPGA(field programmable gate array)等により、ハードウェア的に計算する事も視野に入れる事が提 案された。

今後の予定

個別課題間の統合を更に進める。ノイズや偽相関の除去に関して、統計の専門家に研究協力者として参加してもらうと共に、FPGAの導入等についても研究協力者を開拓する。

### シミュレーションデータを用いたプラズマ乱流の時空間構造解析法の研究

#### 九州大学応用力学研究所 糟谷直宏

時間的、空間的に分解能の高い揺動計測法が確立してきた現在、大容量のデータを効率的に処理 し、知識を獲得する事が必須である。乱流シミュレーションで得られる3次元時系列データに対し て数値解析を行うことで、実験データ解析に活用できる手法の開発を行うことができる[1]。そこで 本研究では円筒形直線型プラズマにおけるドリフト波乱流の数値シミュレーションを通じて、プラ ズマ乱流の時空間構造解析手法の成熟を図ることを目的とする。シミュレーションで形成される構 造をダイナミクスも含めて数値計測し、その時間的空間的構造がいかに実験で観測され得るかを提 示する。具体的な解析対象は応用力学研究所の直線型装置 PANTA であり、本年度は以下の2つの 課題に取り組んだ。ひとつは抵抗性ドリフト波乱流の長時間データを用いた乱流駆動粒子束等の乱 雑成分の確率統計的振る舞いの解析で、もうひとつは PANTA 装置でのイオン温度勾配(ITG)モード 励起条件の評価である。

まず抵抗性ドリフト波乱流の長時間データを用いた乱流駆動粒子束等の乱雑成分の確率統計的 振る舞いの解析について述べる。乱流状態にあるプラズマでは大自由度のダイナミクスが発達して いる。1つのフーリエ成分は、多数の成分の非線形結合により非線形力を受ける。非線形力は、乱 雑な成分を持ち、その効果を取り入れたプラズマ乱流統計理論が進展を見せている[2]。揺動の乱雑 成分に関する確率密度分布(PDF)の詳細な実験観測も始まっている[3]。そこで、本研究では、乱流 シミュレーションを行い、得られた乱流場データの揺動や乱流駆動粒子束等の高次モーメントにお ける乱雑成分の確率統計的振る舞いを解析した[4]。Numerical Linear Device (NLD) は円筒形直線型 プラズマにおける抵抗性ドリフト波乱流を模擬する計算コードである[5]。定常的な粒子ソース項を 与えたシミュレーションで乱流構造形成を伴う非線形飽和状態を得ている。その3次元乱流場の長 時間データを用い、乱流揺動の統計性を解析した。イオン-中性粒子衝突周波数が小さい場合に帯 状流が形成される。そのような飽和状態においてイオンサイクロトロン周期の60000倍以上、特徴 的ドリフト波周期の 1000 倍以上の時間にわたる時系列データの解析を行った。統計量の収束を得 るためには十分多くのサンプル数が必要となり、今回用いたデータ数で物理量の収束が見られた。 粒子や運動量のダイナミックな釣り合いを評価するために、乱流粒子束やレイノルズ応力の半径方 向分布を計算した。PDF のバルク部で半径位置によって差は小さく、テール部で形状に差がみられ るが、それらが有意なものかは今後の解析が必要である。モデルの釣り合いの式中に複数の非線形

項が含まれる。渦度の釣り合いにおいて、レイノル ズ応力項と磁力線方向非線形項の二項が、同等の大 きさを持つが、渦度の時間変化との相関はレイノル ズ応力とのみ大きいことが分かった。複数の非線形 項の中でも変動のダイナミクスを規定しているも のが存在していることを示す。さらに粒子束と運動 量束の時間的相互関係を見た。粒子束の変化は運動 量束の変化に対して、典型的ドリフト波周期の 0.4 倍の時間先行していた。その時間遅れを考慮してプ ロットした結合 PDF が図1であり、等高線が楕円形 に引き伸ばされた様子が両者の相関関係を表して いる。このように乱流シミュレーションデータを用 いてダイナミックな構造形成機構の検定手法の開 発を進めた。



図 1: 粒子東Γ<sub>r</sub> とレイノルズ応力Πの結合 PDF。

次に直線装置 PANTA での ITG モード励起条件の評価について述べる。イオンエネルギーの異常 輸送を引き起こす ITG 乱流の特性を理解することは核融合炉実現のために重要である[6]。PANTA ではこれまで前述のような抵抗性ドリフト波乱流の研究が精力的になされてきた。Ion Sensitive Probe を用いたイオン温度測定も進展してきたことからイオンの運動性によって生じる不安定性 である ITG モードの観測を計画している。その第一段階として、流体モデルを用いた数値解析に よる ITG モードの線形成長率の評価を行った[7]。ここでは軸方向一定の成分のみを持つ磁場中の 円筒プラズマを取り扱う。解析に用いるモデル流体方程式は、イオンの連続の式と運動量保存の式、 エネルギー保存の式から成る Hamaguchi-Horton 方程式[8]を拡張したもので、衝突の影響を考慮し てイオンと中性粒子の衝突項と粘性項を取り入れている。径方向の境界条件としては円筒プラズマ の中心と端で波の振幅が 0 とする。また背景密度、温度の径方向分布は  $N(r) = N_0 \exp[-(r/L_N)^2], T_i(r)$ =  $T_{i0} \exp[-(r/L_{Ti})^2]$ とする。PANTA ではヘリコン波によるアルゴン放電で高密度プラズマを得てい る。典型的なパラメータは電子温度  $T_e$  = 3eV, イオン温度  $T_i$  = 0.3eV, 密度  $n_{i0}$  = 10 × 19m<sup>-3</sup>, 磁場 B = 0.04T, 装置長 $\lambda$  = 4m, プラズマ半径a = 50mm, 密度勾配長 $L_N$  = 50mm, 温度勾配長 $L_{Ti}$  = 250mm であ る。PANTA プラズマのパラメータ領域で方位角方向と軸方向のモード数(m, n)に対する線形成長率 の依存性を見ると(m, n) = (2, 2)モードが最も不安定となり, モード数が大きい場合または(m, n) = (1, 2)

1)の場合は安定となった。さらにパラメータ(磁場 B, 装置長ん, 勾配長 L<sub>N</sub>, L<sub>Ti</sub>, 温度 T<sub>i</sub>, T<sub>e</sub>) に対する 線形成長率の依存性を調べた。図2は勾配長に対 する線形成長率の依存性を示している。×印は PANTA 実験における典型的なパラメータである。 不安定になる勾配長のパラメータ領域は限定的 で,密度勾配に対する依存性が強いことがわかっ た。また磁場に関する依存性を見ると、 磁場が 弱いときは方位角方向のモード数が小さいモー ド、 磁場が強いときはモード数が大きいモード が不安定化している。このような数値解析の結果、 PANTA の典型的なパラメータで ITG モードが 励起される可能性があることがわかった。今後実 験との比較とともに乱流シミュレーションを行 い、乱流構造形成に果たす役割について研究を進 める。



図 2: 温度勾配長 *L*<sub>Ti</sub>、密度勾配長 *L*<sub>N</sub> に対す る線形成長率の依存性

これら初期的な結果を発展させ、さらに実験結果との比較を行うことで、乱流構造形成のダイナ ミクス検定手法の確立を進める。さらにはこの手法を用いてプラズマ乱流における構造形成機構の 物理的理解につなげる。

参考文献

[1] N. Kasuya, et al., J. Plasma Fusion Res. 88, 322 (2012)

[2] A. Yoshizawa, et al., Plasma and Fluid Turbulence: Thory and Modelling (IoP, Bristol, 2002)

[3] Y. Nagashima, et. al., Phys. Plasmas 18, 070701 (2011)

[4] M. Sasaki, et al., Int. Toki Conf. 22 (2012, Toki, Japan) P2-8

[5] N. Kasuya, et. al., Phys. Plasmas 15, 052302 (2008)

[6] W. Horton, Rev. Mod. Phys. 71, 735 (1999)

[7] Y. Miwa, et al., Int. Toki Conf. 22 (2012, Toki, Japan) P4-23

[8] S. Hamaguchi and W. Horton, Phys. Fluids B 2, 1833 (1990)

### トーラス装置における乱流計測の為のプローブ開発とそのデータ解析手法の検討

#### 京都大学 エネルギー理工学研究所 大島慎介

#### 1. 背景と目的

簡便、安価でありながら高時空間分解能を有する静電プローブ計測器は、プラズマの乱流研究におい て大きな役割を果たしてきた。直線型装置(例えば PANTA 等)では、多点プローブ計測によりプラズ マ乱流の時空間構造の観測に用いられ、乱流による自発的な構造形成の発見などの成功している。一方、 トカマク及びヘリカル等のトーラス型装置においては、設置ポートの制限やプラズマの熱負荷の問題か らプローブ構造の自由度が少なく、乱流の物理描像の解明に必要な諸量を計測する為には、目的に応じ て最適なプローブ設計を進める必要がある。

京都大学のヘリオトロンJ装置においては、周辺の乱流と輸送の関係を明らかにするべく、静電プロ ーブを用いて周辺プラズマの実験的研究が進められてきた。最近、高速イオン励起不安定性が周辺部に 存在する揺動やポテンシャル構造に対して影響を与えていることが見出された。高速イオンとプラズマ の相互作用によって励起される高速イオン励起不安定性は、高速イオン損失によるプラズマ閉じ込め特 性の悪化、或いは壁への損傷を与えるという観点からこれまで研究されてきたが、それに加え乱流やポ テンシャル構造に影響を与えることでバルクのプラズマの閉じ込め特性に影響を与えるという観点を 今後導入し実験的に検証を進めていくことが重要である。

本研究では、プローブ計測に精通した応用力学研究所の研究者らと共同で、トーラス装置であるヘリ オトロンJ装置に適用可能、且つ乱流研究に適したコンパクトなプローブ構造について検討を進める。 また、予期される取得データの解析手法についても検討を進める。これは、プローブ計測器のノウハウ から、大規模データ取得、スペクトル解析といった多方面の研究アプローチを統合することで初めて可 能になるものであり、応用力学研究所の共同研究として遂行することによって、プラズマ乱流研究や核 融合プラズマ研究に新たな展開がもたらされることが期待できる。また、実際に開発したプローブをヘ リオトロンJ装置に適用し、高速イオン励起不安定性の発現時の周辺プラズマの構造、揺動特性、高速 イオン損失について明らかにする。最近導入された Beam Emission Spectroscopy (BES)計測器など のプラズマ内部揺動が検出可能な計測器を併用し、内部と周辺部の構造変化を同時に解明する。

#### 2. 実験と結果

ヘリオトロンJ装置では、現在異なるトロイダルセ クションに四組の周辺計測用静電プローブを有して いる。本研究では、搖動の構造・特性を詳細に調べる 為、径方向アレイプローブ(図1(a)),磁気プローブ 内臓プローブ(図1(b))、ポロイダルアレイプローブ(図 1(c))の三種のプローブを周辺揺動計測に用いた。今回、 径方向アレイプローブを新たに設計・導入している。 プローブのヘッド部は、高温プラズマからの熱負荷に 備えるために熱負荷・熱衝撃性に強いボロンナイトラ イドとカーボンから基本的に構成されているが、新規 導入した径方向アレイプローブに関しては、堅牢化の 為に金属(Mo)で基本的に支持し、熱負荷に耐えるた めカーボン、モリブデン、ボロンナイトライドから構 成している。

実験は、線平均密度1×10<sup>19</sup> m<sup>-3</sup>の比較的低密度の 中性粒子ビーム加熱プラズマをターゲットとして、上 述したプローブを用いて最外殻磁気面周辺の揺動計 測を行った。この時、60-80kHzに高調波を伴う高速



図1. 実験に用いた(a)#8.5 、(b) #14.5、(c) #11.5 セクションの位置に設置されたプローブ ヘッドの写真。

イオン励起不安定性MHDバーストが観測された。このモードは、ヘリオトロンJにおけるNBI加熱プラ



図 2(a)磁気信号で観測されるバースト信号と(b)バーストに同期したポテンシャル応答。(c) 典型的なバースト 時の典型的浮遊電位(Vf)分布変化と(d) 電位の変動成分(δVf)分布図

ズマにおいて観測される高周波を伴う高速イオン励起によるアルヴェン固有モードの一種である。

プローブ計測によってこのバースト現象と同期して周辺プラズマの電位構造が変化する現象が見出 された。電位変動の大きさは、バーストの磁場揺動強度に明らかに比例し、図1(a)と(c)のプローブを用 いた相関計測によってToroidal/Poloidal方向に対称な構造を持っていることがわかっている。径方向ア レイプローブによって得られた周辺部のポテンシャルのレスポンスを図2に示す。LCFS内側で電位は ドロップし、外側で上昇している(図2(a-b))。尚、径方向にレスポンスのディレイは明確には観測さて いない。典型的なポテンシャル分布の変化を図2(c-d)に示す。径方向にポテンシャル変動の大きさが違 うことから、バースト時に電場構造が変化していることを多チャンネルプローブによって確認ができた。 尚、浮遊電位の計測ではあるがトリプルプローブでの電子温度計測から、この変動は空間電位の応答に ほぼ相当している。一方、ECE、およびBES信号にはバースト時の大きな応答は見えていないことから、 密度/温度分布のレスポンスは小さく電場の変化を説明できない。更には、バースト時にはプローブ計測 でのイオン飽和電流のレスポンスにおいて径方向への遅れが確認された。同様のイオン飽和電流の挙動 はCHSでも確認できており、これは高速イオンの径方向輸送であると解釈できる。つまり、バースト時 においてプラズマ内部の高速イオン分布が変動していることを示唆する。

また、BES計測によってバースト時のプラズマ内部の搖動構造の変化を観測した。揺動の径方向の位 相構造を明らかにするため、Hilbert変換を用いた瞬時位相の評価法を考案し、実験結果に適用した。 50-100kHzのバーストに相当する周波数領域の揺動をバンドパスフィルタで取り出し、Hilbert変換によ って瞬時位相と瞬時強度を評価した。MHD現象のような背景乱流に対して強度が強い揺動の場合には、 支配的揺動の強度と位相をこの手法を用いて評価が可能である。さらに何周期かのバースト時の振る舞 いについてConditional average法を使うことで平均的な揺動強度と位相の振る舞いを抽出した。その結 果バーストー周期の間で揺動の空間構造が変化していることが確認した。この不安定性がバースト的で はなく連続的に発生している場合には空間構造の時間的変化は見られなかった。高速イオン励起不安定 性の空間構造が変動していることは、その不安定性を駆動している高速イオンの分布が変化してことを 示唆する。

#### 4. まとめと今後の展望

本研究では、ヘリオトロンJ装置において、コンパクト、且つ多チャンネルを有する径方向プローブ を開発し、実際の揺動計測に適用した。高速イオン励起不安定性時に起因して周辺ポテンシャルおよび 電場構造が変化していること確認した。またイオン飽和電流の応答とBES計測器の結果から、高速イオ ンの径方向輸送に起因するレスポンスを確認できた。高速イオン励起不安定性が、高速イオン輸送過程 を通じて径電場構造に影響を与え得ることを直接実験的に示すことに成功した。

## 磁場閉じ込め高温プラズマ中の電子熱輸送の状態評価のための 確率論的手法の高度化

自然科学研究機構 核融合科学研究所 田村直樹

### 研究の目的

最近になって研究代表者らは、乱流に支配された磁場閉じ込め高温プラズマ中の電子の熱輸送状態に対して確率論的手法を適用し、磁場閉じ込め高温プラズマの閉じ込め状態に関する新しい評価手法を提示した。これにより、例えば、非局所輸送現象と呼ばれるプラズマ周辺部を冷却するとほぼ同時にプラズマ中心部の電子温度が上昇する現象が、従来考えられていたプラズマ中心部において輸送が改善する遷移が発生したためではなく、1)プラズマ周辺部において輸送が改善する遷移が発生し、2)そのプラズマ周辺部が輸送の変化に対して裕度の高い状態になっているプラズマ中心部と相互作用を起こしたためであることを明らかにした。

本研究の目的は、同評価手法で取り扱う測定データに対し雑音成分の低減技術や統計精度向 上技術などを適用して、同評価手法の高度化を目指すとともに、異なるデータ解析手法と組み合 わせることで自明でない新たな物理情報を抽出することである。

### 研究方法

本年度は、磁場閉じ込め高温プラズマ中の電子熱輸送の状態評価のための確率的手法の高度化を目指して、同手法で取り扱っている実験データに対して雑音成分の低減技術の適用を試みた。具体的には、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(Large Helical Device: LHD)で測定された電子サイクロトロン放射(Electron Cyclotron Emission: ECE)信号に対して、適応デジタルフィルタ(Adaptive Digital Filter: ADF)による雑音成分除去を試みた。

### 結果

LHD で測定された ECE 信号の時間発展の一例を図1(a) に示す。ここで示したのは、サンプリン グ周波数 10 kHz で測定されたのち、500 Hz のローパスフィルターを通過した後の信号である。そ の周波数スペクトルを見ると、60 Hz を基本波とし、その3倍、

5倍、7倍高調波が信号に重畳されていることが分かる。これ は明らかに交流電源由来の誘導雑音である。そこで、雑音 の時系列を短時間の逐次学習で推定できる適応デジタルフ ィルタ(ADF)を用いて除去することを試みた。その結果を図 2に示す。図2(b)より、ADF 適用後の信号にも、60Hz の基 本波とその2倍高調波が依然として強く残っているのが分か る。ADF とは、推定すべき信号を参照信号のフィルタ係数に よって重みを付けたフィルタ出力で推定する有限インパルス 応答フィルタである。ADF は、本来、時間平均が0の信号に 対して効果的に働くように設計されている。つまり、適応操作 によりフィルタの残差が0に近づくことでフィルタ係数更新量 が0に近づき、フィルタ係数が安定に収束する。しかし、ここ で取り扱っている ECE 信号の平均は常に0以上である。この ため、ECE 信号に従来の ADF(以下、従来型 ADF と呼ぶ) を適用すると、雑音をフィルタ出力で推定できたとしてもフィ ルタの残差には一定の値が残ることになる。この時、係数更 新量にも同様に一定の値が残り、0に収束しない。その結果、 図2(c, d)が示すようにフィルタ係数の更新は周期的となる。 これらのことから、ECE 信号に対する従来型 ADF の適応推 定能力は低下してしまっていると考えられる。



図1. (a)LHD で測定された ECE 信 号の時間発展の一例。(b)(a)で示し た信号の周波数スペクトル。



図2. (a)従来型 ADF を適用する前後の時間発展。(b)(a)で示した信号それぞれの周波数スペクトル。(c) 振幅及び(d)位相に対するフィルタ係数の時間発展。



図3. (a)差分型 ADF を適用する前後の時間発展。(b)(a)で示した信号それぞれの周波数スペクトル。(c) 振幅及び(d)位相に対するフィルタ係数の時間発展。

均は元の信号に比べて0に近くなる。そこで次に、この時間差分された信号に対して ADF の適用 を試みた(以下、時間差分された信号に対して適用する ADF のことを差分型 ADF と呼ぶ)。その 結果を図3に示す。図3(b)より、従来型 ADF では十分に除去することができなかった 60Hz の基 本波とその2倍高調波も差分型 ADF では良好に除去できていることが分かる。また、図3(c, d)に 示すように、従来型 ADF では周期的に振動していたフィルタ係数も、一部を除いて安定に推移し ている。このように、差分型 ADF を用いることで、従来型 ADF よりも高い除去性能で ECE 信号に 重畳している誘導雑音の除去に成功することができた。ただし、ECE 信号が急激に変化した直後 は、図3(c, d) が示すようにフィルタ係数の適応がうまく機能しておらず、図3(a) が示すように ADF 適用後の信号は元信号から大きく逸脱してしまった。

### 今後の予定

ECE 信号の時間変化が急激な場合においても、ADF による誘導雑音除去性能が劣化しないようにさらなる改善を進める予定である。

### 研究成果報告

なし

### 謝辞

適応デジタルフィルタによる雑音成分除去に関して助力頂いた、寺西大准教授(広島工業大学) 及び岩間尚文特任教授(自然科学研究機構)に対してここに感謝の意を表します。

### 研究組織(合計10名)

研究代表者:田村直樹(核融合科学研究所) 研究協力者:稲垣滋、永島芳彦、藤沢彰英、伊藤早苗(以上、九州大学応用力学研究所)、小林 達哉(九州大学総合理工学府)、土屋隼人、徳沢季彦、居田克巳、伊藤公孝(以上、核融合科学 研究所)

### 直線磁化プラズマにおけるストリーマー構造の解析

東京大学 大学院新領域創成科学研究科 山田 琢磨

#### 目的

低温度で近接性に優れた乱流直線プラズマ実験装置(LMD-U)において、メゾスケール構造の一種で あるストリーマーが世界で初めて発見された[1]。この発見は、120 チャンネルに及ぶ静電プローブデー タの同時計測に加え、二次元フーリエ解析や、二次元バイスペクトル解析という革新的な方法により実 現した。しかしストリーマー構造に関しては、ミクロ構造であるドリフト波乱流との詳細な非線形結合 関係や、ストリーマーを形成する上で重要な役割を果たす媒介波の空間構造など、未だに解明されてい ない事象が多い。そこで LMD-U の実験データをより詳細に解析すること、および数値計算シミュレー ションコード (NLD)を用いて LMD-U の放電条件に近い状態で直線プラズマの乱流をシミュレートす ることで、更なるストリーマー研究の進展を目指す。

#### 実験方法

LMD-U を用いてストリーマー実験を行い、ストリーマー(周方向に揺動が局在した構造)や媒介波の空間構造を解析した。LMD-U は軸方向の長さが 3.74 m、内径 0.45 m の筒状の直線装置である。ソース部に付けられた内径 0.095 m のガラス管にアンテナで 3 kW/7 MHz の RF 波を印加し、ヘリコンプラズマを発生させる。軸方向の磁場は 0.01–0.15 T まで変化させることができるが、0.09 T に設定し、内部に封入したアルゴンの圧力を 2–1.5 mTorr まで下げると、ドリフト波乱流がストリーマー構造を形成する。中心部の密度は 10<sup>19</sup> m<sup>-3</sup>程度、電子温度は平坦で 3±0.5 eV である。軸方向 1.885 m の位置に周方向 64 チャンネル静電プローブ[2]が設置されている。このプローブにより、半径 40 mm の位置での詳細で精度の良い乱流の時空間構造を観測することが出来る。また、軸方向 1.375 m の位置にはプラズマ断面を 2 次元スキャンすることのできる静電プローブが設置されているが、周方向プローブと併用することで、径方向スキャンのみでプラズマ断面全ての情報を得ることが出来る。

次に、NLD を用いた抵抗性ドリフト波シミュレーションについて述べる。NLD コードは 3 場の簡約 流体コードであり、円筒プラズマのドリフト波を模擬するコードである[3]。使用した主なパラメーター は、プラズマ半径 a = 70 mm、装置長  $\lambda = 4$  m、密度  $n_0 = 1 \times 10^{19}$  m<sup>-3</sup>、温度  $T_e = 3$  eV である。中性粒子 とイオンとの衝突周波数を  $v_{in} = 0.03 \Omega_{ci}$  としている。ここで、中性粒子の衝突周波数は不安定性のコン トロールパラメーターとなり、構造分岐をもたらすパラメーターであり、いまストリーマー状態となる 値を用いている。粒子ソース分布は  $S_N(r)$ は、 $S_N(r) = S_0/L_N^{-2} [1 - (r/L_N)^2] \exp[-(r/L_N)^2]$ のように与えられてお り、それぞれのパラメーターを  $S_0 = 0.2$ 、 $L_N = 67$  mm の様に選んでいる。

#### 実験結果

ストリーマーが発生している状態での周方向 64 チャンネルプローブで測定したイオン飽和電流の揺 動(密度揺動)[図1(a)]を2次元フーリエ解析すると、図1(b)に示されるように周方向波数-周波数(*m*,*f*) =(1,-1.2 kHz)のイオン反磁性ドリフト方向に伝播するモード(1)と、(*m*,*f*)=(2,7.8 kHz),(3,6.6 kHz),(1, 9.0 kHz),(4,5.4 kHz)の電子反磁性ドリフト方向に伝播するモード(2-5)が観測された。周方向角・周波数 は電子反磁性方向を正に選んでいる。つまり図1(a)の正に向かう細かい揺動成分がモード(2-5)などから 成り、それらが周方向に自己収束して局在している。局在構造は*m*=1の構造を持ちながらゆっくりと イオン反磁性方向に伝播し、それはモード(1)の周波数(-1.2 kHz)に一致する。局在構造がスペクトル中 のモード(1)として現れるわけではなく、図1(a)下に示すように、局在構造とモード(1)が同時に存在する。 これはモード(1)が(1,2,3),(1,4,2),(1,3,5)の組み合わせのように非線形結合をしているために局在構造 がモード(1)と同じ構造となって現れるためである。次に、これらの組み合わせのバイフェーズを計算し た。バイフェーズは、モード(1)と局在構造の包絡線の位相差を示す。そこで周方向プローブで測定した モード(1)と、径方向プローブで測定したモード(2-5)を用い、各組み合わせのバイフェーズの径方向分布 を計算した(単チャンネル測定なので mの測定はできないが、図 1(b)より周波数のみの測定で充分モー ドが分離できているとみなす)。結果、(1,2,3),(1,4,2),(1,3,5)の全ての組み合わせにおいて、径方向に 平坦なバイフェーズ分布が観測された。これは、局在構造が径方向にほぼ同位相で連なり、径方向に伸 びた構造、つまりストリーマー構造であることを明快に示している。また、図 1(c)はモード(1)の周方向 プローブと径方向プローブ間のクロススペクトルの実部を表し、位相構造を示す。径方向に伸びたスト リーマー構造と異なり、媒介波は r=30 mm あたりに節を持ち、位相が突然飛ぶことが分かった。

NLD を用いた数値シミュレーションでは、支配的なドリフト波のモード数、周波数は( $m, n, \Omega_{m,n}$ ) = (2, 1, 0.007 $\Omega_{ci}$ ), (3, -1, 0.005 $\Omega_{ci}$ )となり、これらの結合により( $m, n, \Omega_{m,n}$ ) = (1, -2, -0.002 $\Omega_{ci}$ )という媒介波を 駆動する。図1の(d)は密度揺動の周方向分布の時間発展(r/a = 0.8)、(e)はその2次元スペクトル、(f)は 媒介波(1, -2)のポロイダル断面のスナップショットを示す。図1(d)より揺動は電子反磁性方向へ伝播し、 揺動の変調はイオン反磁性方向へゆっくり伝播していることが分かる。図1(e)の2次元スペクトル図も 実験と非常に似たものになっている。図1(f)は媒介波の空間構造であるが、これはイオン反磁性方向へ 伝播し、径方向に1つ節を持っている。この媒介波の特徴は、前述の実験結果の空間構造と類似してい る。数値シミュレーションでこのような径方向に節を持つ媒介波構造が観測されたのは初めてである。

#### 参考文献

- [1] T. Yamada et al., Nature Phys. 4, 721 (2008).
- [2] T. Yamada et al., Rev. Sci. Instrum. 78, 123501 (2007).
- [3] N. Kasuya et al., J. Phys. Soc. Jpn. 76, 044501 (2007).



図 1: LMD-U および NLD で観測された(a,d) 揺動の時空間構造、(b,e) その 2 次元スペクトル、(c,f) ストリ ーマー構造の媒介波の位相構造。

# バイスペクトル解析による電子温度勾配モードと低周波揺動 の非線形結合機構解明

東北大学 大学院工学研究科 金子 俊郎

### 1. 目的

電子温度空間勾配を自在に制御できる新たな装置を開発し,核融合プラズマ閉じ込め装置での異 常輸送の新たな要因として注目を集めている「電子温度勾配不安定性(ETG モード)駆動乱流」 の発生メカニズムとそれに伴う輸送現象を解明することを目的とする.特に,電子密度勾配,空間 電位勾配等を重畳することによって励起される低周波揺動との非線形相互作用によって,ETG モ ードが助長されるメカニズムを明らかにすることを目指す.本研究では,MHz 領域の高周波揺動と kHz 領域の低周波揺動との非線形相互作用を調べるために,大容量のデータを取得する必要がある とともに,その解析手法もバイスペクトル解析をはじめとして多岐にわたるため,応用力学研究所 との共同研究として遂行する.

#### 2. 実験方法

本実験は図1に示す東北大学 QT-Upgrade 装置を用いて行う. アルゴン(Ar) を作動ガスとした 電子サイクロトロン共鳴(ECR)放電によって磁気ミラー領域(共鳴磁場強度 2.14 kG)で高電子 温度(3-4 eV)のプラズマを生成し、グリッドを通して実験領域に流入させる.一方、装置右端に 配置したタングステン電極を 2000°C以上に加熱することによって低温の熱電子(約 0.2 eV)を生 成し、半径方向位置に対応してこれらの重畳割合を制御することによって、径方向の電子温度勾配 を形成する.すなわち、電子密度、空間電位の空間勾配が一定の下で、電子温度のみの空間勾配を 制御し、その時のプラズマ中の不安定揺動(ETG モード)に対する影響を調べる.具体的には、 周波数が数 kHz から数 MHz の範囲で、電子温度勾配が存在する領域と存在しない領域で、発生す る不安定揺動の違いがあるかどうかに注目する.また、電子密度勾配および空間電位勾配を変化す

ることでドリフト波 (DW) モードが励起 されることを観測し, それらの ETG モー ドとの非線形相互作用を調べる. このと き,取得した大容量のデータを応用力学 研究所に持ち込み,バイスペクトル解析 を行う.



図 1: 電子温度勾配形成実験装置.

#### 3. 実験結果及び考察

上記の装置を用いて ETG を形成したところ, ETG 強度の増大に伴い, 周波数が約 0.4 MHz の 高周波揺動(ETG モード)と約 7 kHz の低周波揺動(DW モード)の二つの揺動が励起されるこ とが観測された. 図 2 に ETG によって励起された ETG モードよび DW モードの (a) 規格化振幅 強度( $\tilde{I}_{es}/\bar{I}_{es}$ )と (b) バイコヒーレンスの電子温度勾配( $\nabla T_{e}$ )依存性を示す.  $\nabla T_{e}$ が増加すること で ETG モードの強度が大きくなるが,  $\nabla T_{e}$ が 0.7 eV/cm を超えると次第に飽和していくことが分か



図 2: 高・低周波密度揺動における(a)規格化振幅強度と (b)バイコヒーレンスの電子温度勾配(∇*T*a)依存性.

った. 一方, DW モードの場合には,  $\nabla T_e > 0.7 \text{ eV/cm}$  において揺動 強度が増大する傾向を示した. さらに, 図 2(b)より,  $\nabla T_e \sim 0.7 \text{ eV/cm}$ eV/cm 以上で ETG モードと DW モードのバイコヒーレンスが急 激に大きくなることが明らかになった. これらの結果から, DW モ ードは ETG モードとの非線形結合によって増幅されたと考えられ る.

図3に ETG モードの揺動強度に対する DW モードの揺動強度の 依存性を示す. ETG モード強度が 0.4% ( $\nabla T_e \sim 0.7 \text{ eV/cm}$ )を超えた とき, DW モード強度の急激な増大が観測された. この結果より, ETG モードの揺動強度が閾値を超えることで DW モードとの非線 形結合が助長され, エネルギーが移送されることで DW モードが 増幅されたと考えられる.

図4に,急峻な ETG が形成されている $\nabla T_{e} \sim 2 \text{ eV/cm}$ の場合に おける高・低周波密度揺動間のバイコヒーレンスの(a)  $f_{a} = ~0.4$ MHz 及び (b)  $f_{a} = ~7 \text{ kHz}$  に沿ったスライスを示す. 0.4 MHz (ETG モード) と 7 kHz (DW モード)の揺動間で特異的にバイ コヒーレンスが大きくなっていることが観測され, ETG モードが DW モードと選択的に非線形結合していることが明らかになった.



図 3: ETG モードと DW モード との揺動強度の相関性.



図 4: 高・低周波密度揺動にお けるバイコヒーレンスの (a)  $f_{3} = ~0.4 \text{ MHz}$ 及び (b)  $f_{3} = ~7 \text{ kHz}$ に沿ったスライス.

#### 4. 研究組織

金子 俊郎, 畠山 力三, 文 贊鎬 (東北大学), 伊藤 早苗, 稲垣 滋, 小林 達哉 (九州大学)

#### 5. 研究成果報告

- 1) [招待講演] 金子 俊郎, プラズマ・核融合学会 九州・沖縄・山口支部第 16 回支部大会論文集, (2012. 12. 23), pp. 51-52.
- C. Moon, R. Hatakeyama, and T. Kaneko, Abstracts of 11th Asia-Pacific Conference on Plasma Science and Technology and 25th Symposium on Plasma Science for Materials, (2012. 10. 3), p. 374.
- 3) 文 贊鎬, 畠山 力三, 金子 俊郎, 第 29 回 プラズマ・核融合学会年会予稿集, (2012.11.28), p. 28aC03.

「磁場閉じ込めプラズマにおける乱流及び帯状流の検出方法の開発」

核融合科学研究所 ヘリカル研究部

井戸 毅

• 目的

磁場閉じ込めプラズマの物性を理解する上で、プラズマの輸送特性を決定づけていると考 えられる乱流の振舞いを理解することが重要である。近年では局所的な微視的乱流だけで なく、それらの非線形相互作用により形成される大きな空間構造を持つ揺らぎがプラズマ の輸送に大きな影響を及ぼすことが明らかになりつつある。したがって、局所的な微視的 乱流と同時に大規模構造を持つ揺らぎを同時に測定・解析することが、プラズマ物性を実 験的に解明する上で不可欠である。しかしながら、核融合炉を見据えた磁場閉じ込め装置 では乱流に関するデータは計測可能な物理量の種類、計測できる空間点ともに限られてい る。そこで、本共同研究を通じ、応用力学研究所の直線装置 PANTA を用いた実験研究を通 じて開発された揺動解析手法の応用や、理論解析及びシミュレーション結果に基づく効率 的な実験手法と解析手法の開発を進め、限られた乱流計測データからより多くの物理情報 を抽出することを目的として本研究を行う。

実験方法

核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)において高速イオン励起 GAM の計測が 行われており、今年度はこの空間構造及び GAM とイオンとの相互作用を定量的に調べるた めの実験及びその解析を行うこととした。

これまでの実験で GAM 励起時に高速イオン(~170keV)と GAM の相互作用を示すエネル ギースペクトルの変化を観測し、同時に数 keV のバルクプラズマのエネルギー領域におけ るエネルギースペクトルの変化も測定されている。これらの現象を M. Sasaki et al. Plasma Phys. Control. Fusion 53, 085017 (2011)で提案された理論に基づいて定量的に議論するた めに、重イオンビームプローブ (HIBP) を用いて GAM に伴う電位揺動を計測した。

また、GAM の空間構造に関しては M.Sasaki, et al., Plasma Fusion Res. **3**, 009 (2008) に見られるような非対称性の検証も試みる実験を行った。

実験結果

GAM の発生を再現することができ、HIBP による電位揺動データの取得が行えた。その 結果、これまで時間分解能の不足で測定できていなかった GAM の高次高調波に伴う電位揺 動を検出することができた。この高次高調波の発生は電位揺動波形が正弦波から鋸歯状波 形になることに対応していることが明らかとなった。

通常の GAM のように単一周波数モードであれば、その位相速度は単一であるため、エネ ルギーの大きく異なる高エネルギー粒子とバルクプラズマとに同時に相互作用することは 考えにくい。これまでに観測されているイオンのエネルギースペクトルの変化を理解する には、上述の M. Sasaki (2011)の理論に加え、波動一粒子の共鳴条件を説明する物理機構 の検討が必要である。今回観測された高次高調波が発生する物理機構は、波動一粒子共鳴 が発生する物理機構解明の手掛かりとなる可能性がある。

しかしながら、LHD本体のトラブルのため、十分な数のデータを取得することができず、 当初本共同研究で行う予定であった空間構造の同定と理論モデルとの比較や、実験の目的 であった GAM が持つパワーの定量的な評価は行えなかった。結論を得るには至らなかった が、実験条件の絞り込みが進み、また物理機構解明の手掛かりの可能性の一つが得られた ことは、次年度以降の実験立案、共同研究でのデータ解析・議論の進め方の指針になる成 果である。

· 研究成果報告

無し

· 研究組織

井戸 毅(研究代表者)	核融合科学研究所 准教	受
清水昭博	核融合科学研究所 助教	
稲垣 滋(所内世話人)	九州大学応用力学研究所	准教授
佐々木 真	九州大学応用力学研究所	助教

### 高次相関解析の並列処理による高性能化に関する研究

京都大学大学院工学研究科 福山 淳

研究目的:プラズマ・核融合分野では、測定技術の向上に伴い、時間および空間解像度が 大幅に増加し、短時間の間に大量の実験データを取得することが可能になってきている. また、実験の長時間化に伴う蓄積データの増大も著しい.応用力学研究所の PANTA 実験 装置においても、多チャンネル測定装置を用いて得られる実験データが一放電あたり数 10GB 以上に達し、その高次相関解析のデータ処理時間が1日を超える場合も少なくない. 本研究においては、高次相関解析等の実験データ処理を高性能に行うため、複数コアの計 算機による並列処理を導入し、アルゴリズムの検討ならびにコードの実装を行い、高速な 実験データ処理を実現することを目的としている.

研究方法:実験データの高次相関解析においては、時間的あるいは空間的に離れた位置での測定値の相関を計算する必要があり、データ処理の局在性が低くなるため、並列処理にはなじまない面がある.本研究では相関解析と同様な構造をもつ高速フーリエ変換処理(FFT)の並列化を参考にして、相関解析の並列化アルゴリズムを検討する.次に、最終的に導かれた並列化アルゴリズムに基づいて計算コードを実装し、解析解との比較による検証を行う.最後に、PANTA実験装置において測定された乱流データを利用して相関解析を行い、並列処理による高性能化の評価を行う.

### 研究成果:

- 代表的な相関解析である Bispectral analysis の高速化については、FFT の高速化が 本質的であるため、まずその定量化を行った.並列化 FFT ライブラリである FFTW をインストールし、通常版、OpenMP による共有メモリ型並列処理版、MPI による分 散メモリ型並列処理版のそれぞれについて、FFT 処理性能を処理データ量の関数とし て求めるとともに、コンパイラ(Intel Fortran, PGI Fortran, GNU Fortran)の比較 およびコンパイラオプションの比較も行った。
- 2. さらに Wavelet bicoherence analysis についても, FFT による処理の検討を行い, 並 列処理の評価を行った.

**今後の予定**:大規模データ処理に向けて、メモリ割付やファイル入出力の並列化を含めて 高速化の検討を行い、その最適化をはかる.そして具体的にデータ処理コードを作成し、 PANTA 実験装置の測定データを例として処理性能の比較を行う.

### 研究組織:

氏名	所属	職名等	役割・担当分野
福山 淳	京都大学	教授	代表者
稲垣 滋	九大応力研	准教授	実験データ解析
佐々木 真	九大応力研	助教	実験データ解析

# 光・ミリ波・マイクロ波を用いた計測技術・解析モデルの開発と

### その応用に関する研究

九州大学 応用力学研究所 出射浩

研究目的:

光・電磁波を用いた計測は、測定対象に擾乱を与えずに波動・揺動といった局所的な物 理量を対象とでき、測定される局所情報を用いて大域のダイナミックスを理解する重要な 計測手法となっている。雲レーダやライダによる雲やエアロゾルの計測、波浪に伴う海表 面散乱による海上風計測、地表面計測、プラズマでの散乱計測など応用分野は多岐に及ぶ。 計測技術として、反射の不連続面の利用、位相測定による高空間分解能化など、新たな試 みが進められている。また、観測される局所的な反射・散乱射情報をどのように理解する か等の解析モデリングも広く議論されている。本課題では、多岐に渡る応用分野での計測 技術・解析モデルの課題を、分野を横断して議論し、新たな方法論の模索を目指す。先進 的な光・ミリ波・マイクロ波計測の観測的研究、解析理論・モデリング研究に関する研究 集会を持ち、応用力学研究所共同研究の特定研究テーマとして個別に提案されている課題 を総括的に議論することを目的とする。

研究進捗:

応用力学研究所共同研究の特定研究としては、他分野を横断する広範なテーマを立ち上 げる新たな試みである。キーワードとなる現象の一つは「散乱」である。プラズマでの散 乱では、非協同、協同散乱現象があり、本特定研究では主に協同散乱現象が取り上げられ、 散乱断面積の理論的評価と実験結果の比較検討が進められている。本研究課題では、散乱 現象としては、海表面散乱、ライダ計測など対象となっている。別途、個別に採択されて いる「光・ミリ波・マイクロ波を用いた計測技術・解析モデルの開発とその応用に関する 研究(研究集会)では、その観測、解析理論・モデリングに関し、各課題で問題となって いる点を紹介いただき、可能な「他分野を横断する共同研究テーマ」を模索した。特に観 測領域での計測技術では、共通化される問題が多く、各々で行われている計測手法・技術 を、分野を横断して議論した。散乱計測が中心課題である。解析理論・モデリングでも、 同じく問題となっている点に関し、多岐に渡る分野からの視点から、議論された。プラズ マで励起された波動の直接検出や非コヒーレント波の検出にも触れ、これらの計測技術の 新たな適用を模索した。次年度は、個別に採択されている研究課題の進捗に応じて、共通 となる課題を取り上げ、各分野、異なる視野からのアプローチで問題解決を図る予定であ る。

# ウィンドプロファイラの鉛直流測定を活用した雲・降水の定量的測定

京都大学生存圈研究所 山本真之

#### 1. 研究目的

2015 年の打上げが予定されている EarthCARE (EC)衛星は、ミリ波雲レーダ (Cloud Profiling Radar; CPR)・ライダ等を用いた雲・エアロゾルの全地球的な衛星観測から気候変動予測の精度向上に向上する ことを目的としている。EC 衛星に搭載された CPR・ライダ等の複合測定データを用いた雲微物理量リトリー バルアルゴリズムの開発は、九大応力研の主導で開発が進められている。しかし、雲微物理量リトリーバル アルゴリズムの開発に不可欠である、高精度の鉛直流・雲物理量測定データが不足している。特に、EC 衛 星用 CPR で計測するドップラ速度を用いた雲微物理量リトリーバルにおいて、鉛直流は最もリトリーバルさ れた物理量の不確定性を生む要因である。そのため、鉛直流の高精度測定データを用いた雲微物理量リ トリーバルアルゴリズムの開発が必要とされている。

ウィンドプロファイラ(Wind Profiler Radar; WPR)は、鉛直流を数分以下・数100m以下の時間・鉛直分解 能で測定できる特長を備える。特に50MHz帯WPRは、降水・雲の領域においても精度よく鉛直流を測定 できる、他の観測機器にはない特長を持つ。本研究では、地上設置のWPRと降水粒子を観測する気象レ ーダ・CPR等の観測データを活用することで、ECプロジェクトにおける雲微物理量リトリーバルアルゴリズム の開発に寄与できる雲・降水の定量的測定手法を開発する。さらに開発した測定手法を活用することで、 鉛直流・雲物理量・降水物理量の測定データを作成することを目的としている。

### 2. 鉛直流のデータ処理手法開発

#### 2.1 降水領域における 50MHz 帯 WPR の鉛直流推定手法の開発

50MHz 帯 WPR は、屈折率擾乱に起因する晴天乱流エコーと降水粒子からの散乱エコー(降水粒子エ コー)に対する感度が同程度であり、かつ降水粒子落下速度が鉛直流と比較して十分大きいため、晴天乱 流エコーと降水粒子エコーを分離可能である。しかし、晴天乱流エコーと降水粒子エコーを分離し、さらに 晴天乱流エコーのドップラースペクトルから鉛直流計測データを得る上で必要なデータ処理は人手に頼る 部分が多いため、鉛直流のデータセット作成に膨大なデータ処理時間(1日間のデータ処理に数日)を要 していた。そのため、少なくとも半自動で晴天乱流エコーの存在範囲を決定することで、鉛直流計測データ を効率的に得るための手法の開発に取り組んだ。開発した手法の概要は以下の通りである。

- 晴天大気エコーと降水粒子エコーの分離が特に困難であるのは落下速度が1.5 m s<sup>-1</sup>程度と小さい固体相の降水粒子エコー(氷晶・雪片)である。そのため、固体相の降水粒子エコーを想定した検討を実施した。
- 50MHz帯WPRの観測結果をもとに、鉛直流を0.1 m s<sup>-1</sup>の上昇(スペクトル幅0.2 m s<sup>-1</sup>)、降水粒子落 下速度を1.3 m s<sup>-1</sup>(スペクトル幅0.2 m s<sup>-1</sup>)とした。時系列データにカイ2乗分布を持たせることで、鉛 直流及び降水粒子落下速度の統計的揺らぎを表現した。信号対雑音比(SNR)を変化させることで、 鉛直流の計算精度を評価した。
- ・ 晴天エコーの存在範囲を決定するため、以下の工夫を行った。
  - ▶ 晴天乱流エコーのピーク位置検出時に、高度方向における鉛直流の計算結果の連続性を考慮 することで、降水粒子エコーの誤検出を防いだ。
  - ▶ 晴天乱流エコーのピークから下降方向に 1.0 m s<sup>-1</sup>の範囲で受信エコーの極小を検出し、エコーの極小位置より上昇方向のみを晴天乱流エコーの領域とみなすことで、降水粒子エコーの混入による鉛直流の計測誤差を減少させた。

図に、計算機シミュレーションによる鉛直流の測定精度の検討結果を示す。鉛直流のピーク存在範囲 などの最低限の初期パラメータを与えるだけで、鉛直流を精度よく得ることに成功している。開発した手法 が実測定データに適用可能であることを、50MHz帯大気レーダであるMUレーダの測定データを用いて確 認済みである。

#### 2.2 鉛直流の高鉛直分解能観測手法の開発

多周波切替え送信と適応信号処理を組み合わせることで WPR の高レンジ分解能(30-50 m)の高分解 能鉛直流計測を達成するレンジイメージングは、雲頂・雲底・融解層付近などの小鉛直スケールの鉛直流 擾乱を解像する有用な測定手法である。研究代表者が開発したソフトウェア受信機を1.3GHz帯WPRに用 いることで、1.3GHz帯WPR によるレンジイメージング測定を実現した。

1.3GHz帯WPRによるレンジイメージング測定の実現により、50MHz帯WPRでは測定できない大気下層(高度2km)以下における鉛直流の高精度計測が可能となった。

#### 3. 今後の展開

今年度に得られた成果(鉛直流計測データを効率的に得る手法の開発)を活用した、50MHz 帯 WPR・ 気象レーダ・CPR等の観測データセット作成を実施する。引き続き、観測データを用いた雲・降水物理量の 高精度測定手法の開発を行う。観測データセットの作成と雲・降水物理量の測定手法の開発を通じ、EC プロジェクトにおける雲微物理量リトリーバルアルゴリズムの開発に貢献する。加えて、1.3GHz 帯 WPR のレ ンジイメージング観測を活用することではじめて可能となる、大気下層(高度 2 km以下)における鉛直流及 び雲の同時計測を実現するための活動に取り組みたい。

### 4. 研究成果

#### 査読なし論文

山本真之・妻鹿友昭・柴田泰邦・阿保真・橋口浩之・山本衛・山中大学・岡本創,50MHz 帯大気レーダーと偏光ライ ダーによる層状性降水内の鉛直流・降水粒子落下速度・偏光解消度の同時観測,信学技報,査読なし, SANE2012-111,7-10,2012.

#### <u>学会発表</u>

Yamamoto, M. K., M. Abo, Y. Shibata, T. Mega, H. Hashiguchi, N. Nishi, H. Okamoto, K. Sato, T. Shimomai, M. D. Yamanaka M. Yamamoto, and Timbul Manik, Syafrijon, Measurement of vertical air velocity and hydrometeors in stratiform precipitation by the 47–MHz wind profiler radar and 532–nm polarization lidar, SPIE Asia–Pacific Remote Sensing 2012, 29 October–1 November 2012, Kyoto, Japan.

・山本真之・妻鹿友昭・柴田泰邦・阿保真・橋口浩之・山本衛・山中大学・岡本創,50MHz 帯大気レーダーと偏光ラ イダーによる層状性降水内の鉛直流・降水粒子落下速度・偏光解消度の同時観測,電子情報通信学会宇宙・航行 エレクトロニクス研究会(SANE),2012年11月30日,千葉大学.



図:計算機シミュレーションによる鉛直流計測精度の評価結果。太実線は新たに開発した手法における 鉛直流の計測誤差を、細実線は晴天乱流エコーと降水粒子エコーを分離しない場合の鉛直流の計測誤 差をそれぞれ示す。

#### リアルタイム画像生成のための合成開口レーダ解析とその応用

九州大学産学連携センター 間瀬 淳

1. はじめに

マイクロ波イメージングは、磁場閉じ込めプラズマ中の揺動現象の解明に有力な手段として注目され ているが、誘電体媒質中の透過特性を利用した物体内部の可視化、全天候型の車載レーダ、航空機搭載 レーダなど、リモートセンシングの分野でも有用である。

レーザ計測等と比較したマイクロ波計測の問題点に空間分解の悪さがあり、その改善のため種々の工 夫がなされてきた。レンジ方向の空間分解向上に適用されているのが周波数の広帯域化で、FM-CW レ ーダの変調周波数拡大、パルスレーダの短パルス化が主な手法である。一方、アジマス方向に適用され ているのが、アンテナ開口を実効的に大きくとる合成開口処理である。本研究はこれら手法を生体イメ ージング、航空機搭載レーダの分野に適用し、リアルタイム画像生成の実現を図ることを目的とした。

2. マイクロ波生体イメージングの研究

2.1 目的および方法

マイクロ波生体イメージングは、マイクロ波の減衰が比較的小さい胸部の測定(乳がん検出)が中心 となっている。現在、乳がん治癒に重要となる腫瘍の早期発見を目的として、X線マンモグラフィを用 いた検診が行われているが、正常な胸部組織と腫瘍とのコントラストが小さいことに起因する偽陰性、 偽陽性の問題が報告されている。本グループでは、マイクロ波領域では胸部組織と腫瘍との誘電率の差 が比較的大きいことを利用し、マイクロ波帯の超短パルスレーダ(USPR)を使用した乳がん検知のモ デル実験を実施している。

測定システムの概略を図1に示す。パルス幅65 ps、振幅8Vをもつインパルス発生器(PPL社3500D) を使用し、その信号をアンテナに給電する。USPRに適用するアンテナは、特に広帯域特性が要求され、 本実験では周波数2-10 GHzのVivaldiアンテナを使用した。照射されたマイクロ波は誘電体内部を伝搬 し、誘電率の不連続面において散乱・反射される。受信アンテナで検出された反射信号はサンプリング スコープ(Agilent 86100A/B)で収集される。胸部ファントムには、実際の乳房を模擬して作成された CRIS 社製バイオプシー・ファントムを用いた。送受信アンテナは、ステッピングモータ使用の回転ス テージに設置されており、胸部ファントムの周囲を0°から180°まで5°ずつ回転する。反射信号は計 37点の各アンテナ位置で受信、記録され、得られたデータからファントム内部の探査画像を再構成する。

2.2 ファントムを用いた実験結果

マイクロ波生体イメージングの測定で最も大きな課題として、表面反射波成分による SN 比の劣化が ある。本実験では、ファントムを押さえるテンプレート(型枠)を使用することにより、反射波成分の 再現性を維持し、実際の測定から差し引くことを行った。これにより表面反射波成分を約1桁減少させ ることができた。画像再構成には、合成開口イメージング(Confocal Microwave Imaging)を用いた。こ れは、胸部ファントムが微小ピクセルに分割された状態を想定し、測定データからそれぞれのピクセル ごとに強度を決定することで実現する。各アンテナ位置から注目するピクセルまでのパルスの飛行時間 を計算し、各位置での受信信号の飛行時間に対応したデータを重畳する。図2にこのようにして得られ た再構成画像を示した。ファントム表面から20mmの深さにある6mmの異物検出を行うことができた。



図 1. 超短パルスレーダシステムの概略.

図 2. ファントムを用いた画像再構成例.

#### 3. スポットライト方式合成開口レーダの研究

#### 3.1 目的および方法

現在日本で稼働中の航空機等搭載合成開口レーダ(SAR)はLバンド(周波数 1.1-1.7 GHz)およびX バンド(8.2-12.4 GHz)を使用し、空間分解はそれぞれ 300 cm、150 cm である。最近、X バンドで分解 能 50 cm、Ku バンド(12.4-18.0 GHz)で 10 cm が達成された。しかし、両者とも航空機内におけるリア ルタイム画像処理はできず、地上に帰りデータ処理して初めて画像が見られる。また、航空機の進行方 向に対しほぼ垂直方向の画像しか撮れないストリップマップ SAR で、災害時の初動対応や、災害地点 の詳細調査には不向きである。本グループは、任意の方角の SAR 画像を機上でリアルタイムに処理す ることが可能な「スポットライト SAR」("Live SAR"と呼称)の開発製作を平成 21 年度より進めている。

図3にマイクロ波システム、図4に外観図を示す。波形シンセサイザで生成されたチャープ信号は、 Kuバンドに変換され増幅された後、アンテナから地上の設定点(MCP)に照射される。反射波は参照 波信号と混合されデチャープ信号となったのちディジタル回路でサンプリングされ、I/Q データとして 取り込まれ画像化される。スポットライト SAR では、マイクロ波を任意の領域に照射できるようアン テナをジンバルに搭載、慣性センサと GPS も搭載され、飛行に伴う MCP と SAR 本体の相対位置の変化 に対応し常に MCP に照射できるようになっている。また、慣性センサの位置情報を用いて参照波信号 の発生時間が制御され、画像処理に適した信号の生成が可能となるためリアルタイム性が出てくる。

3.2 地上試験

"Live SAR"本体及びソフトウエアはほぼ完成しており、今年度、屋上での試験、車輛を利用した地 上試験を実施している。この試験で得られた結果は、レンジ方向およびクロスレンジ(アジマス)方向 の解像度が、それぞれ 10 cm、25 cm であった。プラットホームの移動距離を増すことができればクロ スレンジ方向の分解を向上させることができると考えている。



図 3. SARマイクロ波システム.





(b) アンテナ・ジンバル系 図 4. "Live SAR"本体の外観写真.

### 4. まとめ

マイクロ波計測の欠点である空間分解の悪さを改善するべく合成開口処理あるいは広帯域の適用を行い、得られた結果について報告した。次年度はリアルタイム性をさらに追究していく。

#### 5. 研究成果報告

[1] S. K. Padhi, A. Mase et al., Proc. Int. Conf. on Electromagnetics in Advanced Appl., Cape Town (2012) 33-1.

[2] 犬竹、山鹿 他: JA2012 国際航空宇宙展出展、ポートメッセなごや/中部国際空港 (2012年10月).

[3] D. Zhang and A. Mase, Proc. Asia-Pacific Microwave Conf. 2012, Kaohsiung (Dec. 2012) pp.271-273.

[4] A. Mase et al., Proc. Asia-Pacific Microwave Conf. 2012, Kaohsiung (Dec. 2012) pp.625-627.

[5] 犬竹、池地、間瀬、近木 他:平成 24 年度通研共同プロジェクト研究発表会 (2013 年 2 月 28 日).

[6] 近木、池地、間瀬、犬竹 他: 2013 電子情報通信学会総合大会、岐阜大学 (2013 年 3 月 19-22 日).

[7] D. Zhang and A. Mase, Biomedical Engineering (in press).

[8] A. Mase, N. Ito, Y. Kogi, H. Ikezi, M. Inutake et al., URSI-EMTS (May 20-24, 2013) 招待講演・発表予定.

6. 研究組織

, , , <u> </u>	•			
間瀬 🏻 🏻	享   九州大学産学連携センター	伊藤	直樹	九州大学産学連携センター
近木祐一郎	8   福岡工業大学工学部	森山	敏文	長崎大学工学部
大竹 正明	1   東北大学電気通信研究所	小田	誠	宮崎県工業技術センター
池地 弘祥	〒  九州大学産学連携センター	徳沢	李彦	核融合科学研究所
王 小育	[]九州大学産学連携センター	出射	浩	[九州大学応用力学研究所]

電磁波の協同散乱計測を用いたプラズマ波動の励起構造・熱化過程の検出

核融合科学研究所 久保 伸

本研究は、一般的なプラズマ波動の励起・減衰過程をそれに伴うプラズマの電子揺動を詳細に 計測することにより、明らかにすることにある。その計測手段として、電磁波の散乱法を取り上 げ、手法を開発するのが最終的な目的である。電子バーンシュタイン波(EBW)により、定常フラ スマの維持を目指している九州大学応用力学研究所の QUEST 装置を例として取り上げ、散乱計 測によって、いかに EBW 波動の直接検出を行い、波動構造を決定し、加熱波動の励起、構造、熱 化過程を明らかにする手法を開発するのが本研究の当面の目標であり、大電力、定常での EBW を 計画し、その直接検出を必要としている装置は、QUEST 以外にはなく、応用力学研究所の共同研 究として実施する意義が大きい。また、本研究は、広い意味での散乱計測を手段として用いた被 散乱媒質の物性解析手法の開発であり、特定研究としての目的に適ったものである.

電磁波の散乱、特に協同散乱は、プラズマ中の波動の周波数、波数および振幅を、測定対象に 擾乱を与えず、空間的、時間的に高分解能で計測する強力な手段として認識されてきた[1]。一方、 波動加熱、とりわけ、電子サイクロトロン共鳴を用いた波動加熱は核融合フラスマの生成、加熱、 制御において有力な手段であり、近年の大電力ミリ波源の進展や伝送、入射手法の高性能、高精 度化も相まって、益々その重要性、有効性が認識されて来ている。しかし、今後必要になると予 想される核融合フラスマの高ヘータ化に際して、電磁波モードとしての電子サイクロトロン波加 熱はその伝搬において遮断密度が存在することから、電磁波のままでは、プラズマ中心部の加熱 ができなくなってしまう。そこで、入射した電磁波をフラスマ中の静電波である電子バーンシュ タイン波(EBW)に変換し、遮断密度を越えた加熱を実現する手法が提案され、実機においても EBW によると考えられる明確なプラズマ加熱の効果が確認された[2]。EBW を用いた加熱手法の 開発においては、電磁波から EBW への変換過程、EBW の伝搬特性、減衰加熱過程を調べ、最適 化を行う必要があり、そのためには、実際の EBW の振る舞いを実験的に計測することが重要であ る。しかし、これまで、理論的、数値的な解析は多くなされているものの、EBW を波動として直 接計測しているのは小型低温プラズマにおいてプローブによって計測された例が報告されている のみである。これまで、プラズマの加熱波動の直接検出と言う意味でも、イオンサイクロトロン 周波数帯でのイオンバーンシュタインモードの遠赤外レーザーを用いた協同散乱計測[3]や CO, レ ーザーを用いた位相コントラスト計測[4]、低域混成波の CO。レーザーを用いた協同散乱計測数少 ない例があるのみである[5]。一方、TEXTOR[6], ASDEXU[7], LHD[8]などの加熱ジャイロトロン を備えた装置において、ジャイロトロンからの大電力ミリ波の協同散乱計測を試み、イオンの熱 揺動に伴って集団的に運動する電子による協同散乱スペクトルの受信に成功し、ジャイロトロン 周波数に対して上下数 GHz での散乱スペクトルの観測を行っている。熱的揺動レベルの小ささに 起因する散乱断面積の小ささを補うために、1MW レベルのプローブビームを使用したことがその 計測が可能になった大きな要因である。数 GHz 帯のイオンの熱揺動に付随した電子密度揺動レベ ルに対して、加熱波動に付随する電子密度揺動レベルは桁違いに大きく、特に静電波である EBW の場合には、伝搬する波動の持つエネルギーが直接密度揺動となって現れるため、プローブビー ムとして適当な周波数を選べば、散乱断面積を大きくすることが可能であると考えられる。

電磁波の散乱計測を適用して、EBW を直接検出し、モード変換、伝搬、減衰過程を調べること ができれば、EBW を用いた加熱、電流駆動の最適化と、広いプラズマパラメータに対する適用性 が期待できる。QUEST においては、電子バーンシュタイン波(EBW による電流立ち上げと定常 維持が計画の基幹となっている。しかしながら、これまで EBW の直接検出が困難であるため波動 の励起、伝搬及び電流駆動の物理機構については理論的な予想、解析はあるが、実験的には必ずし も明確にはなっていない。この EBW の波動伝搬とその空間構造を直接検出し、その物理機構の 検証と解明を行うことにより、電流立ち上げと定常維持を高効率・高性能化するのが本研究の最 終目標である。当面必要な検討課題は、このために必要とされるプローブビームの性能と具体的



図 1. raytrace の一例 中心加熱・電流駆 動に最適と考えられる N || =0.56 で入射 した場合のray 軌道を示す。



図 2. 図 1 に示した ray に沿った波数 ( $k_R, k_{\phi}$ )の変化の様子。170GHz の電磁波が受ける散乱角 (60, 90, 180<sup>°</sup>)に 対応する波数を実直線で示した

な散乱波検出配位、検出器構成を検討することで ある。

図1は、QUEST の赤道面断面図と raytrace コ ードで予想される O-X -B モード変換による 8.2GHz EBW 加熱時の中心加熱・電流駆動が期 待できる N/=0.56 とした場合の軌道を重ねたものである。O-mode で入射した電磁波がプラズ マ遮断層において X -mode に変換され、X -mode として伝搬する過程で高域共鳴層に近づいて 静電 波である EBW に変換される様子が示されている。この時の図1 に示した x 軸方向に沿った 主 半径方向とトロイダル方向の波数の変化を示したのが図 2 である。この図で解るように、 EBW は半径方向に伝搬する過程で半径方向の波数が大きく変化しており、170GHz を散乱計測の プローブビームとして用いた場合に、観測できる散乱角 ( $60\circ$ ,  $90\circ$ ,  $180\circ$ ) に対応する波数を 実線で示した。入射電磁波が EBW に変換され、伝搬する過程の主要部分が 170GHz の散乱計測 によ り計測可能であることが解る。しかしまた、散乱角 180° は、後方散乱を示しており、 170GHz を使用する限りこれよりも高い波数の観測は不可能で、吸収過程を含めての観測はさら に周波 数の高い電磁波の散乱を用いる必要があることも示している。 このように、現在考えられ 計測 ではランチャー前面に近い領域での後方散乱を観測する必要があることが解った。

### 参考文献

- [1] J. Sheffield, "Plasma Scattering of Electromagnetic Radiation" Academic Press.
- [2] H. Laqua, Plasma Phys. Control. Fusion 49 (2007) R1-R42.
- [3] H.Park et al., Rev . Sci. Instrum., 56 (1985) 922.
- [4] C. M. Surko, et al., Phys. Rev . Lett. 43, (1979) 1016.
- [5] E. Nelson-Melby et al., Phys. Rev . Lett., 90 (2003)155004.
- [6] H.Bindslev et al., Phys. Rev . Lett., 97 (2006) 205005.

[7] F Meo et al., Porc. 36th EPS Conference on Plasma Phys. Sofia, June 29 - July 3, 2009 ECA \lambda 1.33E, P-1.155 (2009).

[8] S. Kubo et al., Rev . Sci. Instrum., 81, (2010) 10D535.

光・ミリ波・マイクロ波を用いた海表面計測

Ocean Surface Sensing using Light, Millimeter and Micro-wave

独立行政法人 情報通信研究機構 統合データシステム研究開発室 灘井章嗣

・目的

光・ミリ波・マイクロ波を用いた計測は、測定対象に擾乱を与えずに測定することができるため、 多くの分野で重要な計測手法となっている。最近では物理的に存在する対象を利用するだけでなく、 屈折率の変化による散乱の利用や、位相測定による高空間分解能化など、新たな試みが進められて おり、遠隔計測の分野において主要な技術となっている。

現在、光・ミリ波・マイクロ波を用いた計測対象は、雲やエアロゾルの計測、海洋波浪や海上風 等の海表面の計測、地形や土地被覆分類等の地表面の計測、プラズマでの散乱計測等多岐に及んで いる。一方、これまで計測手法にかかわる情報交換は、海表面の観測分野に限っても、あまり活発 ではなかった。

本研究では、光・ミリ波・マイクロ波を用いた海面計測にかかわる全国の研究者が集い、対象分 野を超えて知識や疑問を共有することにより、光・ミリ波・マイクロ波を用いた計測に関する理解 を深めるとともに、新たな方法論の模索、応用対象の発掘を目指す。

・研究の具体的方法

年に一回程度、光・ミリ波・マイクロ波を用いた海表面計測にかかわる研究者が会し、研究打ち 合わせを開催する。計測対象に関する議論よりも、計測手段について、自由な雰囲気のもと、知識 の共有や、コミュニティの形成に力点を置く。これにより、計測の技術面を土台とした研究者間の つながりが形成できるように努める。

・今年度の活動

今年度は研究者代表者・分担者のスケジュール調整に手間取り、研究会の開催は出来なかったが、 3月12日に研究者代表者・分担者で研究打合せを行う予定である。

参加予定者

灘井章嗣 情報通信研究機構 主任研究員 江淵直人 北海道大学低温科学研究所 教授 林昌奎 東京大学生産技術研究所 教授 吉川裕 九州大学応用力学研究所 准教授 3月11日、12日に開催される「光・ミリ波・マイクロ波を用いた計測技術・解析モデルの開発 とその応用に関する研究集会」で行われる発表のタイトルは以下のとおり。

・(仮題)シュトゥットガルト大学プラズマ研究所でのマイクロ波・ミリ波研究

- ・電磁波の協同散乱計測を用いたプラズマ波動の励起構造・熱化過程の検出
- ・LHD における協同トムソン散乱計測の開発と進展
- ・スポットライトモード SAR"Live SAR"を用いた地表画像取得実験
- ・海面からのマイクロ波後方散乱の時間領域シミュレーションとその応用
- ・ミリ波レーダ・ライダ・ウィンドプロファイラーによる、雲物理特性と鉛直流の研究
- ・マイクロ波パルスドップラーレーダによる海面観測
- ・海面におけるマイクロ波後方散乱過程と海上風観測
- ・LHD におけるマイクロ波反射計を用いた波動計測
- ・LHD における EBW 励起効率計算のためのモデリングと実験との比較
- ・位相配列アンテナによる熱輻射波計測

研究者代表者・分担者以外からも、海面からのマイクロ波後方散乱のシミュレーションなど、海 表面計測に関係するテーマが予定されており、光・ミリ波・マイクロ波を用いた海表面計測手法の 物理的な意味づけ、計測量から物理量への変換の高精度化への貢献が期待されている。

また、海洋との類似性が高い大気科学分野での発表も予定されており、海洋科学分野との強調も 期待される。 マイクロ波反射計・干渉計によるプラズマ中の高周波波動計測

東京大学大学院新領域創成科学研究科 江尻晶

#### 研究の背景と目的

プラズマ中の高周波波動電場は、電子の運動に影響を及ぼし、その結果、電子密度が変動する。一方、マ イクロ波反射計は特定の密度(カットオフ密度)で反射される性質があり、プラズマの密度揺動を測定する 手段として使用されてきた。これらを組み合わせることにより、高周波波動の電場測定が可能となる。これ まで、いくつかの装置で適用されているが、定量的な測定の実績は少ない。一方、プラズマ中の波動電場を 計測する手段は限られており、本手法は波動物理の解明と制御に非常に有用だと考えられる。そこで、本課 題では、マイクロ波反射計を用いた波動測定手法を確立すること目標とした。本年度の具体的な研究目的と して、LHD 装置においてイオン加熱用の高周波波動電場を測定するためのマイクロ波反射計の設計製作設置 と実験を目的とした。

#### マイクロ波反射計

LHD プラズマは複雑な形状を持ち、 送信した反射波が受信できる配位を探 す必要がある。一方、送受信アンテナの 位置は、種々の事情から自由度があまり ない。そこで、鏡の向きをパラメータに して光線追跡を行いながら、想定するプ ラズマの配位群に対して反射波が期待 出来る鏡の配位を決めた。図1に光線追 跡の様子と設計製作後に真空容器内に 設置した送受信アンテナの写真を示す。

真空窓からアンテナまでは、放射パタ ーンがガウシアンビームで近似できる コルゲート導波管を用いるので、ガウシ アンビームの伝送公式を用いて、ハード ウェア上の制約の範囲でスポットサイ ズが比較的小さくなる鏡の位置や曲率 を吟味した。

図2にシステム全体の構成を示す。マ イクロ波部は二つのガン発振器と二つ



図1:LHD プラズマの磁気面と光線の様子(a), (b), (c)。LHD の3.5U ポートの真空側に設置された送受信コルゲート導波管 と鏡の写真(d)。写真中の矢印はマイクロ波の伝搬方向を示す。

のミキサーからなるヘテロダイン方式であり、差周波数は約 900 MHz に設定される。プラズマへは 30.5 GHz のマイクロ波を二つのミラーを経由して正常波モードで入射し、約 1 x 10<sup>19</sup> m<sup>-3</sup>の密度層からの反射を同様に 受信する。ミキシングしたのちの参照信号(プラズマを通らない成分)とプローブ信号(プラズマ中で反射 された成分)を高速オシロスコープでデジタイズする。さらに、計算機上で数値ミキシングを行い、反射マ イクロ波の Cosine 成分と Sine 成分を抽出し、解析に用いる。
### 波動測定結果

マイクロ波反射計で測定される位相はプラ ズマの密度分布の変化を反映している。そこ で、別の測定器(トムソン散乱装置、ミリ波 干渉計)で得られた密度分布から反射計の信 号を予想し比較したところ、比較的よい一致 が得られ、反射計として機能していることが 確かめられた。ただし、反射波の出現条件(出 現時刻)が予想とずれていることが分かった。 これは、屈折の効果により、実効的な反射面 がわずかにずれることが原因であると考えら れる。

LHD プラズマに数百 kW の高周波波動 ICRF
 (周波数 38.47 MHz)を入射した時の信号を以
 下のように解析し高周波波動の電場を求めた。

測定位置近傍のアンテナから数百 kW の高周波波動が放 射されている場合は、反射計で測定した高周波成分

(38.47 MHz)の位相振動は、rms で 0.01 rad.程度であ る。この時、反射波振幅の低周波揺動による変動の影響 を抑制するために、ある程度の時間(約6ms)で平均し た反射波振幅と高周波振動成分の振幅比から高周波位相 振動を求めた。トムソン散乱装置等で求めた密度分布で の反射波の位相を WKB 近似で求めて、位相振動の大き さを密度揺動の相対値に変換する。得られた相対密度揺 動は 0.01 % 程度である。さらに、波動の分散関係等を 用いてアンテナループ方向の高周波電場を評価した。こ の時、高周波波動の平行方向波数として6 m<sup>-1</sup>を仮定し た。図3 にいくつかのプラズマ放電での測定結果を示す。



図2:3.5Uポートに設置したマイクロ波反射計システ

ムの構成。



図3:小半径と高周波電場の関係。

図から測定小半径が増すに従って、高周波電場が大きくなることが分かる(反射計の周波数は単一なので、 密度分布が変化して測定小半径が変わることに注意)。

#### まとめと今後の課題

マイクロ波反射計を組み上げて実験を行い、高周波電場を求めることに成功した。今後、様々な条件での 測定を行うとともに、より多くのデータを取得できるようデータ取得系を改善する必要がある。

#### 発表論文や学会発表

無し

# 24 特 3-6

光・ミリ波・マイクロ波を用いた計測技術・解析モデルの開発と その応用に関する研究(研究集会)

九州大学 応用力学研究所 出射浩

3月に開催した研究集会のプログラムを以下に示す。

- 3月11日(月曜日)
  - 13:00-13:15 ・研究集会開催にあたって(九州大学応用力学研 副所長 花田和明)
  - 13:15-13:30 ・研究集会主旨説明(九州大学応用力学研 出射 浩)
  - 13:30-14:30 ・High-power resonant diplexers: Development, tests and first applications on ASDEX Upgrade. (シュトゥットガルト大学プラズマ研 究所 Walter Kasparek )
  - 14:40-15:25 ・電磁波の協同散乱計測を用いたプラズマ波動の励起構造・ 熱化過程の検出 (核融合科学研究所 久保 伸)
  - 15:25-16:10 ・LHD における協同トムソン散乱計測の開発と進展

(核融合科学研究所 西浦正樹)

16:20-17:05 ・スポットライトモード SAR" Live SAR"を用いた地表画像取得実験

(福岡工業大学 近木裕一郎)

- 17:05-17:50 ・海面からのマイクロ波後方散乱の時間領域シミュレーションとその応用 (東京大学 吉田毅郎)
- 17:50-18:35 ・マイクロ波アクティブセンサを用いた生体計測とその応用

#### (九州大学 間瀬 淳)

3月12日(火曜日)

- 10:00-10:45 ・ミリ波レーダ・ライダ・ウィンドプロファイラー による、雲物理特性と鉛直流の研究(九州大学 岡本 創)
   10:45-11:30 ・マイクロ波パルスドップラーレーダによる海面観測
  - (東京大学林昌奎)
- 11:30-12:15 ・海面におけるマイクロ波後方散乱過程と海上風観測

# (北海道大学 江渕直人)

- 13:30-14:15 ・LHDにおけるマイクロ波反射計を用いた波動計測(東京大学 江尻 晶)
- 14:15-15:00 ・LHD における EBW 励起効率計算のためのモデリングと実験との比較

(核融合科学研 伊神弘恵)

- 15:00-15:45 ・位相配列アンテナによる熱輻射波計測(九州大学 出射 浩)
- 16:00-17:00 · 全体討論
- 17:00-17:30 ・今後の進め方について

講演の主な要旨は以下の通り。

・「電磁波の協同散乱計測を用いたプラズマ波動の励起構造・熱化過程の検出」

(核融合科学研究所 久保 伸)

電磁波のコヒーレントな散乱を用いたプラズマ中の波動の励起・伝搬・吸収を直接検出す る手法を紹介し、QUEST 装置の電子バーシュタイン波動(EBW)を例に議論した。当初、170GHz ジャイロトロンをプローブビームとして検討を開始したが、8.2GHz のレイトレースから予 想される EBW の波数が非常に大きくなるため、後方散乱でも伝搬過程の途中までしか検出 できず、CO2 レーザーでは逆にほとんど前方散乱の領域で吸収が起こり、空間分解ができ なくなることが分かった。今後、検出器システムの周波数応答や出力の得やすさを考慮し て、プローブビームの選択をする必要がある。

・「LHD における協同トムソン散乱計測の開発と進展」(核融合科学研究所 西浦正樹) 核融合プラズマ中の閉じ込められた高エネルギーイオンを計測するために,協同トムソン 散乱計測装置の開発を行っている.メガワット級 77GHzジャイロトロンをプローブビーム とし,その散乱スペクトルからイオン速度分布関数を得ることが可能になる.協同トムソ ン散乱の受信 系のアップグレード,プローブビーム品質の改善,得られたスペクトルの解 析,今年度得られた実験結果について報告した.

「海面からのマイクロ波後方散乱の時間領域シミュレーションとその応用」

(東京大学 吉田毅郎)

マイクロ波レーダを用いた海面観測のために、海面のマイクロ波後方散乱を時 間領域で求めるシミュレーションツールの開発を行った。マイクロ波レーダを用いた水槽 実験と比較することで、本シミュレーションの有効性を確認した。また、シミュレーショ ンの応用として、パルスドップラーレーダを用いたレーダ画像や合成開ロレーダ(SAR) 画像へとシミュレーションを発展させた。今後はSARを用いた海面高度計測における波浪 の影響を評価するためにシミュレーションを活用する予定である。

・「マイクロ波アクティブセンサを用いた生体計測とその応用」(九州大学 間瀬 淳) マイクロ波を用いたアクティブな生体計測について報告した。アクティブな計測法で は、被験体に入射波を照射し、透過波、反射波、あるいは散乱波を測定するが、生体 測定という特性から、反射波の測定を中心として記述した。反射波信号は交流成分と 直流成分に分類され、前者はバイタル信号など生体の動的な活動に基づいた情報を提 供する。バイタル信号の揺らぎは被験者の様々な状態を反映し、健康管理、ストレス 評価などへの適用が期待される。一方、直流成分は、マイクロ波の透過特性を利用し た、生体内部イメージングとして発展し、乳がん検出を目的とした胸部イメージング への実用化が期待されている。

・「ミリ波レーダ・ライダ・ウィンドプロファイラーによる、雲物理特性と鉛直流の研究」 (九州大学 岡本 創) ミリ波レーダとライダの雲観測の歴史、特に初期から現在までの国内外の各研究機関にお ける状況について簡単に振り返った。次ぎに、理論的背景として、レーダ方程式、ライダ 方程式と、そこに現れる雲やエアロゾルの微物理特性との関係について、実験室データや、 航空機による現場観測データを紹介しながら、解説した。地上と船舶におけるミリ波レー ダとライダによる雲同時観測と解析の結果を紹介した。それらを発展させた形で、人工衛 星に搭載されたこれらの測器のそのデータの解析の現状について紹介した。さらに、雲度 プロファイラを、ミリ波レーダによるドップラー速度、ライダ観測との同時観測データと 解析の状況、期待される事などについても述べた。また、解析に必要な電磁波の散乱理論 についても解説を行った。

・「海面におけるマイクロ波後方散乱過程と海上風観測」(北海道大学 江渕直人)

海面からのマイクロ波後方散乱のメカニズムおよび,その応用として,衛星搭載マイク ロ波散乱計によって海上風速・風向を観測する原理について紹介した。海面におけるマイ クロ波の後方散乱については,マックスウェル方程式の近似解と海面形状の統計的性質を 結びつけた概念モデルがいくつか提案されており,室内実験,航空機実験,衛星観測など によって得られた海面からのマイクロ波後方散乱の特性を定性的にはよく説明することが 知られている。しかしながら,観測値を定量的に説明できるモデルはなく,実際の風速・ 風向算出には,経験的手法によって導出されたモデル関数が用いられているのが現状であ る。

・「LHDにおけるマイクロ波反射計を用いた波動計測」(東京大学 江尻 晶)

マイクロ波反射計で高周波波動の誘起する密度振動を測定し、波動電場を求めることがで きる。そのためには、反射計で位相振動を測定するとともに、密度分布、分散関係を精度 よく求める必要がある。LHDにおいて、ICRFアンテナ近傍の計測を行うために30.5 GHz マ イクロ波反射計を設計し、3.5Uに設置し実験を行った。光線追跡、ビーム伝搬設計を行い、 反射計として正常に動作することを確認した。波動由来の密度揺動レベルは0.01%程度で 電場は1 kV/mのオーダーである。反射面が外側に行くほど電場が強くなる傾向があり、 3.5U反射計は7.5-ICRFよりも測定点近傍の3.5-ICRFアンテナのパワーに強く依存する。

・「LHD における EBW 励起効率計算のためのモデリングと実験との比較」

(核融合科学研 伊神弘恵)

電磁波モードの伝播密度限界を越えた高密度プラズマの電子サイクロトロン加熱に、伝播 密度限界の無い磁化プラズマ中の静電波モード(電子バーンシュタイン波:EBW)を用いる ため、EBW と電磁波モード間のモード変換過程を含んだ波動伝播を数値計算するためのモ デリング手法を研究している。大型ヘリカル装置の EBW 加熱実験結果と数値計算による 予測には高モード変換効率が得られる入射角度に関して約4度の乖離があり、その要因の 解明が課題となっている。

・ 「位相配列アンテナによる熱輻射波計測」(九州大学 出射 浩)

プラズマの加熱・電流駆動実験に向け、入射ビームの指向性制御のための位相配列アンテ ナが開発されている。EBW 実験ではモード変換のために有効な入射角度範囲は狭い。プラ ズマからの熱輻射は、加熱・電流駆動のための入射と逆過程を経て、狭い放射角範囲で観 測されるため、EBW 実験でのモード変換機構解明には、熱輻射計測が重要となる。熱輻射 は連続な周波数スペクトラムを持ち、非コヒーレント波であるため、応力研での位相配列 アンテナによる受信例が紹介された。SAT に類似した他の方式による英国の他研究機関で の試みも報告された。

全体討論では、今年度の研究集会を踏まえて、来年度、どのように進めるか議論された。 議論の中では、

1. まだ、十分に話を聞けていないので、同じ形式の研究会を続けてはどうか

2. 共通な課題等を取り上げて、課題を議論するような研究会は設定できないか

3. 設備や実験の様子を知りたいので、九大以外で研究会が持てないか

などといった意見があった。まず、各々の研究課題で、周波数や、モデリング、解析手法、 課題等を表にまとめることから始め、参加者に今回の研究会で興味を持った内容や、話を 聞きたい内容なども含めて意見集約することとした。項目2を考えながら、項目1、3を 進めることとし、共同研究者以外からも講演いただくことを考え、メイルベースで来年度 の研究集会の進め方を模索することとした。

## 24 FP-1

#### QUEST 装置における VUV 分光法によるオーミック放電での不純物の振舞いに関する研究

核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・森田繁

#### 課題番号:24FP-1

研究課題:QUEST 装置における VUV 分光法によるオーミック放電での不純物の振舞いに関する研究
研究期間:H24年4月1日-H25年3月31日
所内世話人:図子秀樹
協力者:4名(図子秀樹, Santanu Banerjee,董春鳳,王二輝)
配分額:研究費(5万円),旅費(10万円)

#### 目的:

磁場閉じ込め装置・QUEST の不純物挙動を VUV 分光計測法を用いて調べる.特に希ガス(ネオン) のリサイクリングについて知見を得ることにより、プラズマ制御に関する知見を与える.

### 実施方法:

QUEST 装置に背面照射型 CCD 検出器付 20cm 直入射真空紫外分光器を設置し,300-3000 Å域に存在する不純物発光線を観測する.計測に支障のない硬 X線の少ない放電を見つけ,ネオンをパフし実施する.

#### 実験結果:

不純物の時間変化を調べるために,硬X線の除去を目的として低プラズマ電流の非誘導プラズマ生成を行った.結果として垂直磁場(Bz)を減少させると比較的エネルギーの高い電子の捕捉軌道が悪くなり,硬X線を発生させる前にプラズマから完全に散逸し,ほぼ完全な形での分光計測が可能となることが分かった.図1にその結果の一例を示す.上図が高Bz磁場(R=0.5m付近で160G),下図が低Bz磁場(10G)放電時のVUVスペクトルを示す.高Bz磁場の場合にはスペクトルが硬X線からのCCD



図1 R=0.5m 付近での Bz 磁場 160G(上)及び 10G(下)での VUV スペクトル比較.

ノイズでほぼ隠れており、時間変化を観測することは不可能であった. Bz を低磁場にすると完全にノ イズを消去することが可能になり、不純物の振舞いを観測できる準備が整った.



図2 ネオンパフ(4.0s)前後でのVUV スペクトル変化(赤:ネオンパフ後).

ネオンを放電途中にパフし, リサイクリングを観測する実験を行った. ネオンは t=4s に数 ms 程度の間パフしており, I<sub>p</sub>=5kA, P<sub>ECH</sub>=40kWx2 であった. ネオンパフの前後でのスペクトルの変化を図2 に示す. これらスペクトル線を解析することにより NeII, III 及び IV のネオンスペクトルと思われる スペクトル波長と遷移を特定した. 残念ながら NeV (Ne<sup>4+</sup>) 以上の価数は観測されなかった. NeIV の

電離エネルギーは 77.5eV であり、これまでに観測している他の 不純物価数から推測して妥当な結果である.また、スペクトル線 の価数分布も Bz の大小によらず大きくは変化しなかった.少な くともバルクの電子温度は Bz に鈍感であることが推測できる.

この種の放電を用いて不純物スペクトルの時間変化を QUEST で始めて計測することができた.結果の一例を図3に示 す.上図は分光器の中心波長を 1600Åに,下図は 800Åに設定 し観測した.水素の振舞いを代表する Ly α線は 4s でのネオンパ フの有無に関わらず全く変化しない.また,炭素,酸素及び鉄等 の不純物もネオンパフと同時に少し増加するが大きな変化では ない.しかしながら,数 ms 間のネオンパフ後,ネオンは放電時 間の経過と共に増加し続け,おおよそパフ後 2-3 秒後に定常値 を取る.しかし,定常に到達した後も減少する気配はない.t=7s 辺りで突然不純物スペクトル強度が増大しているが,現在のとこ ろ原因は定かではなく詳しい解析を必要とする.

#### 今後の課題と予定:

低 Bz 放電を使用して初めて不純物の時間変化を観測することが でき、今後の共同研究に向け大きな進展となった. 次回はヘリウ ム等、異なったガスを用いてリサイクリングの研究を行い、水素 放電との比較を行う予定にしている. 放電の定常維持に向け、プ ラズマ壁相互作用等に関する知見が得られることを期待してい る.



図3 ネオンハン (48) 時の各種 不純物の振舞い(上:#20189, 下:#20201).

#### 透過プローブを用いた水素リサイクリングモニタの開発

京都大学工学研究科・高木郁二

**課題番号**:24FP-1 研究課題:透過プローブを用いた水素リサイクリングモニタの開発 研究期間:H24年4月1日-H25年3月31日 所内世話人:図子秀樹 協力者:5名(古田美憲、図子秀樹, Sanjeev Kumar Sharma, A. Rusinov, 井上雄貴) 配分額:校費(5万円),旅費(15万円)

#### 目的:

QUEST の水素リサイクリングモニタの構築と粒子バランスの局所・定量評価法の確立を目指す。特 に壁粒子吸蔵と放出の遷移条件の背景物理を調べるために、透過束の実測と拡散・再結合方程式の数値 解により、壁への水素束モニターの開発を行う。これまでの Ni, Pd 薄膜での透過計測に加えて、新た に PdCu 合金を用いた水素プローブを試作し、高感度検出器の開発を目指す。

#### 実施方法:

QUEST 装置並びにプラズマのリサイクリングの研究のために高感度プローブを試作する。これまで は固定位置に設置した Ni, Pd メンブレム透過プローブ(直径 16 ¢)を用いて水素束の絶対評価と時間 応答計測を行ってきた。しかし、設置場所が壁より奥まっていたこともあり、通常実験中の中性粒子が 少ない状態では感度が十分ではなかった。本年度は水素ガス純化装置に用いられている PdCu 薄膜を真 空中で使用可能なプローブ(直径 30 ¢、長さ 80mm)として新たに開発し、それを下部ダイバーター板上 のプライベート領域に設置し、透過 probe 部から直径 13mm 長さ 60mm のベローズパイプで放電管外部に 引き出し、長さ約6mの延長パイプ、四重極残留ガス分析器、真空ポンプからなる分析部で分析する。 感度は He 標準リークを用いて校正する。

#### 実験結果:

#### 1) PdCu 透過プローブの試作

真空容器内壁に入射する局所水素原子束を評価するた め図1に示すPdCu薄膜(厚さ22μm 直径30mm 長さ82 mm)のPDP probeを試作した。これは水素ガス純化装 置に用いられるものであり、真空中で利用可能なように 薄膜の内外両面を穴あきステンレス(透過率49% 穴径 1.5mm)で保護している。内部にヒーターを内蔵するが ヒーター線は大気のままベローズパイプで放電管外部 に引き出している。真空トラブルの場合は全体を粗挽き し作動排気が行える構造である。使用温度は放電管が 100度で baking されており、それが下限であり、上限 は 400度である。ヒーター温度は熱電対でモニターし PID 制御により1度以下に保持される。ただし、実験中



図 1 下部ダイバーター板に設置した PdCu 透過プローブ

の PdCu 表面温度はモニターしていない。PdCu 薄膜を透過した H2 ガスは 3/8 パイプにて同じく真空 容器外にベローズパイプで取り出し、バルブ、絶縁管を経てガス分析部に導かれる。この位置に校正用

He 標準リークが置かれている。下流側に約 6m の配管の のち水素透過量を QMA (Quadrupole mass analyzer: 四重極型質量分析計)で測定する。

図2に ECR 放電洗浄プラズマにおける透過東計測結 果(青色曲線)を示す。放電時間は 30 分であり約 100 秒で飽和し、定常状態となる。放電後はほぼ同じ時定数 で減少する。定常状態で観測される上下の揺らぎは放電 中にトロイダル磁場を掃引したことによるプラズマから の Ha 強度の振動に対応している。PdCu は再結合律速の 金蔵であり水素濃度 *C(t)*は上流、下流の再結合係数をそ れぞれ *Ku,Kd*、入射束を *Fin* とすると

$$L\frac{dC}{dt} = F_{in} - (K_u + K_d)C^2$$

の解として与えられる。定常状態では透過束は簡単に

$$F_{pdp} = F_{in} \frac{K_d}{(K_u + K_d)}$$

と与えられる。ここで  $K_u = K_d$ の場合には約半数が透過束 として検出できる。図中の赤線は初期境界条件として再 結合律速を与え拡散方程式を解いた場合の解を示してい る。ここで Ku,D は T=500 度の文献値を用い、Kd は定 常状態の近似解から与えた。

# 2) 定常プラズマにおけるダイバーター部の H 原子透過 計測

QUEST で行っている高周波による電流駆動と定常運転 プラズマにおいて水素原子透過束を計測した。図3にそ の結果とリサイクリングの指標として利用する Ha 強度 の時間発展を示す。この量はガス注入量とリサイクリン グによって決まるが、この放電の場合は約100秒からリ サイクリングが増大し、駆動電流が減少する。100秒ま では、入射束を Ha(t)として1~1.8x10<sup>17</sup> H/m<sup>2</sup>/s を与える と図の赤曲線(0.2 x10<sup>17</sup> H/m<sup>2</sup>/s)のようによく一致した。 しかしながら100秒後は大幅に増大し、パルス終了時に は1.7 x10<sup>17</sup> H/m<sup>2</sup>/s に達した。入射束を Ha とすると



図 2 放電洗浄プラズマにおける PdCu プ ローブの H 透過曲線(青色)。拡散方程式 を再結合律速の初期境界条件で解いた解 (赤色)を同時に示す。*Ku,D* は文献値を 用いた。



図3 3分間プラズマにおける(上) 水 素発光強度の時間変化、(下)水素透過曲 線(青色)および数値計算結果(赤色) 入射フラックスとして水素発光強度の時 間変化を用いている。

5x10<sup>17</sup> H/m<sup>2</sup>/s でもこの値は 0.7 x10<sup>17</sup> H/m<sup>2</sup>/s にしか達しなかった。この理由として1) Ha がダイバー ター部を見ているのではないこと、2) ダイバーター板や PDP プローブ表面温度の上昇が考えられる。 参考文献

[1] S.K.Sharma, I. Takagi: JNM 420 (2012) 83-93[2] 井上雄貴,高木郁二他、P核学会九州支部会 2012 12

高温構造材料の組織制御による変形抑制の微視的機構

核融合科学研究所 室賀健夫

1. 目的

各種原子炉や高温プラントで使用される構造材高温使用限界温度を決めるのは、多くの場合熱クリー プ特性であると考えられている。高温クリープ変形の抑制には強化手段として用いる析出、粒子分散、 加工転位などの変形過程における挙動の理解が不可欠である。申請者のグループではこれまで、Cr-Wフ ェライト鋼、バナジウム合金を中心に研究を進めてきたが、高温強度を上昇させる方法として、析出強 化法とナノ粒子による分散強化法を検討している。本研究では、Cr-Wフェライト鋼、バナジウム合金に おいてナノ粒子分散により強化した材料の高温クリープ変形試験を行い、試験後の透過電子顕微鏡によ る組織観察により、変形過程における分散粒子の発達、結晶や転位構造の変化を求め、強化法の有効性 と一層の特性向上に向けての指針を得ることを目的とする。平成24年度はバナジウム合金について重 点的に研究を進めた。

2. 方法

V, Cr, Ti, Y, TiC, SiC, Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> のそれぞれ粉末を V-4Cr-4Ti-1.5Y-0.3XC となるよう調整し、遊星 ボールミルにより WC/Co ボールを用いメカニカルアロイング(MA)を行った。ボールと材料の重量比は 約5:1 であった。管封入の後、1000℃3時間、アルゴン雰囲気で HIP 処理し、その後1200℃,1時間 の熱処理を施した。試料を九州大学応用力学研究所の透過電子顕微鏡(TEM)により観察するとともに、 SEM, EDS, XRD により塑性・構造評価を行い、さらに高温引張り、クリープ試験を実施した。

3. 結果と考察

図1に V-4Cr-4Ti-1.5Y-0.3TiC の MA の進行による SEM-EDS 組成面分析結果を示す。時間の経過とと もに、Cr の溶解が進みその後 Ti が溶解する様子が分かる。これに対応して格子定数を測定した結果を 図2に示す。V(原子半径: 0.132nm)のマトリックスにおいて、Ti (原子半径: 0.143nm)は格子定数の 増加、Cr (原子半径: 0.125nm) は格子定数の減少をもたらす。図2において格子定数が一旦減少して から増加に転ずるのは、図1で示した元素別の段階的な溶解と対応している。



図 1. V-4Cr-4Ti-1.5Y-0.3TiC の MA の進行による SEM-EDS 組成面分析結果



図 2. V-4Cr-4Ti-1.5Y-0.3TiCの MA の進行に よる格子定数の変化

図3は、各試作合金の硬度を比較した ものである。V-4Cr-4Ti-1.5Y-0.3TiCに ついては、図2で格子定数が増加する 10時間以上において硬度が増加し、Ti の溶解により強化が進んでいることが 分かる。他の添加合金の硬度はこれより も低い値にとどまっている。

図4は、V-4Cr-4Ti-1.5Y-0.3TiCの (a) HIPのみ、(b) HIP後1200℃、1時 間熱処理のTEM 組織の比較を示す。熱処 理により、分散粒子の密度が高まった様 子が分かる。

本研究より、V-4Cr-4Ti-1.5Y-0.3TiC

が有望な組成であること、MAはCrの溶解、Tiの溶解の順に進み、Tiの溶解により強度が増加すること、 HIP後熱処理によりナノ粒子密度を高められることなど、V-4Cr-4TiのMAによる強化の可能性とその機構が明らかになった。高温引張り、クリープ試験については引き続け研究を進める。

#### 4. 研究組織

室賀健夫、長坂琢也(核融合科学研究所)、鄭鵬飛(総合研究大学院大学) 渡辺英雄、荒木邦明(九州大学応用力学研究所)

- 5. 国際会議での発表
- Development of nano-particle dispersion strengthened vanadium alloys Zheng Pengfei, Nagasaka Takuya, Muroga Takeo, Chen Jiming 11th China-Japan Symposium on Materials for Advanced Energy Systems and Fission & Fusion Engineering, Sep 10-14 2012, Chengdu Sichuan, China



図3. 各試作合金の硬度



図 4. V-4Cr-4Ti-1.5Y-0.3TiCの (a) HIP のみ、(b) HIP 後 1200°C、1 時間熱処理の TEM 組織比較

# LHD 第一壁トロイダルアレイ試料による対向材料の損耗/損傷 および水素同位体捕捉量分布の評価

核融合科学研究所 ヘリカル研究部 時谷 政行

#### 【目的】

核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)のプ ラズマ対向壁は、SUS 製第一壁と炭素製ダイバータ タイルで構成されている. LHD は 3 次元ヘリカル構 造であるため、対向壁の構造も複雑であり、それ故、 材料の損耗・再堆積の物理特性も、場所によって大 きく異なることが以前より考えられてきた. 昨年度の 実験では、第一壁上に連続したトロイダルアレイ試料 (SUS と Si)を設置し、表面分析実験を実施したところ、 第一壁損耗の主要因はグロー放電洗浄であり、トー ラス外側第一壁ではそのスパッタリング損耗率が、 Fe、Cを主成分とする不純物元素の堆積率を凌いで いるために、本来の金属表面がほぼ維持され続けて いることが明らかになった.

このような背景の下,2011 年度の LHD 実験終了 後,閉ダイバータドーム下(9-1 セクション)を観察した ところ,多量の堆積層がフレーク状に形成されている ことが確認された.LHD の閉ダイバータ排気システ



図 1 LHD 閉ダイバータ構造 CAD 図 黄色部:ダイバータ受熱板,緑色部:ドーム構造

ムは、図1に示すダイバータ受熱板とドーム構造で構成される.ドーム下にはクライオポンプが設置されダイバ ータ排気を行うこととなっている.9-I構造部には未だクライオポンプが設置されておらず、ドーム下における PWI特性の研究が継続して実施されている.フレーク状堆積物は図1の赤い四角で囲んだ領域で確認さ れた.このような堆積物がクライオポンプの排気口に蓄積され続けると、排気効率の現象をもたらすこ とが考えられる.また、堆積物は剥離し易い構造のため、ダストとなってプラズマ中に混入する可能性 もある.今年度は、昨年度に明らかになった外側第一壁のPWI特性と比較を行うために、ドーム下のフ レーク状堆積物の材料物性を明らかにすることを目的とした.

#### 【実験方法】

堆積物の物理特性を調べる目的で,2011年度 実験サイクル後に、フレーク状堆積層を九州大 学応用力学研究所に運び、その微細構造を集束 イオンビーム加工観察装置(FIB)と透過型電子 顕微鏡(TEM)を用いて観察した.FIBによるナノ 加工と TEM による微細構造観察を組み合わせ ることで、フレーク状堆積層の断面の詳細な構 造解析を行うことができる.表面構造について は、走査型電子顕微鏡(SEM)とそれに付設され ているエネルギー分散型 X 線分析装置(EDX)を 用いて評価した.

## 【結果および考察】

図 2(a), (b)に, 実験サイクル後にドーム下で 確認された堆積物の場所と写真を示す. 図 3(a)



図 2 2011 年度実験サイクル後に 9-I 閉ダイバータ 構造ドーム下に形成されたフレーク状堆積物



図3 図2(b)に示したフレーク状堆積物の写真(a)と、その断面 TEM 像(b)

に、採取したフレークの拡大写真、図 3(b)にその断面 TEM 像を示す.図 3(b)において明るく見える部 分は炭素が主成分、暗く見える部分は Fe が主成分の層であり、組成の異なる堆積層の形成が無数に繰 り返された Mixed-material 構造であることがわかる. Fe を含む Mixed-material 堆積層は機械的に脆い ため、数多くのフレークがこの場所で形成されたと考えられる.ドーム下においてなぜこのような構造 となるのかについては今後のさらなる解析が必要である.図 3(b)を見てわかるように、大部分の層は炭 素を主とした構造である.この場所のダイバータ受熱板が受ける熱/粒子負荷は、閉構造ダイバータ受熱 板の中で最も高く、炭素製受熱板のスパッタリング損耗率が他の受熱板よりも高いことがわかっている. したがって、炭素材料のスパッタリング損耗量を抑制しなければ、堆積物の形成、フレークの発生は抑 えられないことが示唆された.そこで、2012 年度のサイクルでは、図 2(a)赤枠内の 3 枚のダイバータ 受熱板をタングステン被覆炭素タイルに交換し、1 実験サイクル間プラズマ実験に曝露した.その結果、 図 4 に示すように、ドーム下へのフレークの形成を完全に抑えることができた.しかしながら、タング

ステン被覆層は、ダイバータストライクポイント に沿って激しく溶融および損耗しており、下地の 黒鉛基盤まで激しく損耗を受けていた.また、溶 融層の周辺部では幅 0.1mm 以下の緻密なクラッ ク網の形成が確認された.次期実験サイクルはこ のままの状態で使用できないほどの損傷を受け ていたが、黒鉛基盤が見えている程の損耗を受け ていたにもかかわらず、ドーム下への Mixed-material 堆積層(フレーク)の形成は抑制さ れていたことから、ストライクポイント以外の健 全なタングステン被覆層の存在がフレークの抑 制に重要な役割を果たしていると考えられる.今 後は、溶融層の構造解析、タイル表面の堆積層分 布及び捕捉水素量の分布について解析を進める.



図 4 2011 年度実験サイクル後の 9-1 閉ダイバータ 構造ドーム下の状態.

# 24 FP-6

## 核融合プラズマ中における熱流束と渦度流束の時空間的非局所性に関する研究

原子力研究開発機構 徳永晋介

## 1. 目的

核融合プラズマのマージナルな閉じ込め性能を決定する乱流輸送機構は、核融合炉の効率向上を目指 し改善閉じ込めを活用した先進オペレーションシナリオを構築してゆく上で、その理解が求められる最 重要テーマの一つと言える。本研究はプラズマ中に励起されるドリフト波乱流と、それが駆動する(1) 温度分布の緩和および(2)帯状流の励起の"二つ"が、競合しながらそれぞれ別チャネルから乱流にフィー ドバックする点にフォーカスし、プラズマのマージナルな輸送を決定するグローバルな構造に上記三者 の関係が与える影響を調査するものである。

## 2. 方法

1. 渦度流束・熱流束の時間的非局所性

Flux driven のグローバル ITG シミュレーション結果を用いて、渦度流束、熱流束の自己相関に関す る解析を行う。長い相関時間を持つ帯状流や輸送とのマルチスケール相互作用が、乱流輸送に記憶効果 を持ち込み、乱流輸送を質的に変化させる可能性に関して検討を行う。また Collisionality など、帯状 流の減衰や分布緩和の時定数を変化させるパラメータへの依存性を調査する。また、帯状流-乱流もしく は温度分布緩和-乱流の相互作用の一方を人為的に切る数値実験を行い、結果の比較研究を行う。記憶効 果を取り入れた非線形マルコフ過程やマルコフチェインモデルに当てはめた物理モデリングの可能性 を検討する。

2. 渦度流速・熱流束の相互相関と空間的非局所性

渦度流束と熱流束の相互相関、静電ポテンシャル・渦度・温度揺動間の位相差に関する解析を行う。 特に ExB staircase と呼ばれる、中間スケールの多重セル構造の形成が見られる結果を得て、その構造 と渦度流束との関連などについて調査を行う。定常な散逸構造としての ExB staircase と熱・渦度流束 の関係を、potential vorticity の均一化という文脈から議論することで、核融合プラズマ中で帯状流シ アが一部に集中して効率的に形成されるための本質的な条件を模索する。

#### 3. 結果

共同研究採択後の著者の異動により、九州大学応用力学研究所計算機へのリモートアクセスが大幅に 制限される状況(職場からのアクセスが不可能)となったため、共同研究を応募当初の計画に則って進 めることは極めて困難となった。

上記の理由により、グローバル乱流輸送コードおよび解析コードの整理・近代化改修・改良作業まで しか及ばず、期限内に学術的結果を得るに至らなかった。コード修正作業は進捗したものの、前節まで に述べた計算・解析作業は今後の課題として繰り越さざるを得ない。本報告書では主に応力研計算機シ ステムの助力を得て今年度に行うことが出来た乱流輸送コード・解析コード開発の進展の概略について 述べ、物理研究の進捗については現在進行中の作業に言及するにとどめる。

コード開発の進捗、研究の現状

本共同研究では旅費等の採択は無く、また前述した事情により SINET 等の高速回線も利用できなか ったため、一般回線経由で遠隔作業を効率的に行うには計算・解析結果の作図・閲覧に伴う通信を軽量 化する必要があった。従来用いていた Fortran から呼び出すグラフィックライブラリに替えて、Fortran が出力したバイナリデータを読み込んでローカルで処理を行う解析・作図コードを Python で開発した。 また、それに合わせた輸送コード側の出力変更と、Fortran90 化作業も行った。Fortran90 で記述され た輸送コードと Python による解析コードを用いた遠隔での作業手法確立は、今後のコードの保守性と 研究効率を大きく高める結果となった。

これまで主にベクタ計算機である応力研のSX-9F上で並列計算を行って来た乱流輸送コードを、京や IFERC CSC の Helios 等に代表される大規模並列スカラ計算機の時代に合わせてゆくコード改修・最適 化が必要なため、応力研のCray XT4上でのコードチューニング作業に着手した。メモリを共有するノ ード内での OpenMP を用いた並列化を行った。線形計算の結果は良好に得られたが現状ではまだ計算 効率に大きな改善は見られず非線形計算は荷が重い。現在行っている3次元ループの組み換え作業を継 続する必要がある。また流体モデルに基づく現状の乱流輸送コードでは、スペクトル法を用いているた めモード数や並列プロセス数の増加によって通信量が大幅に増大する傾向があり、スケーラビリティに 制限があることも原因と考えられる。擬スペクトル法を採用して通信量の増大を抑制する改良が今後必 要である。

本共同研究の眼目であった熱流束・渦度流束の解析には、冪上則に従う広い周波数帯域の振る舞いを 見るために高い時間解像度かつ長時間の時系列データが必要となるため、その算出とデータ圧縮・出力 を行う輸送コードの修正と解析コードの開発を行った。しかしながら当該データは数ギガバイトの容量 となり現状では転送が困難なため、解析作業の実行には今後こちら側の接続環境の改善を待つ必要があ る。当初の関心事であった熱流束・渦度流束の関係を検討する上で帯状電場と帯状圧力場の変動を結び 付ける Geodesic Acoustic Mode (GAM)の影響を吟味する必要があるが、従来のモデルではエネルギ ー方程式における磁場曲率・勾配ドリフトとの結合項が欠けていることから GAM が強く励起され過ぎ る傾向があったため、コード上でのモデルの入れ替えを行った。

## 4. 研究成果報告

なし

## 金属材料の光学特性および電気伝導特性に与える低エネルギーイオン照射の影響

#### 島根大学大学院総合理工学研究科 宮本光貴

#### 1. はじめに

イオン照射された材料の表面特性変化は,核融合プラズマ対向材料のみならず,プラズマプロセスや 固体物性,真空工学の分野においても重要な課題であり,現象の理解に関する多様な研究がなされてい る.我々は,これまでイオン照射された材料の劣化程度を非破壊で簡便にその場診断する手法の最適化 を最終目的として,照射下での金属ミラー材の光反射率変化を,損傷組織発達程度と比較しながら調べ てきた.本年度の共同研究においては,低エネルギーイオン照射したモリブデン(Mo)ミラー材の光反射 率変化の結晶方位依存性の評価を行った.

#### 2. 実験方法

試料は㈱ニラコ社製の粉末焼結材,および単結晶材(岡山理科大学理学応用物理学科平岡教授より御 試供)の Mo 試料を用いた.単結晶材については,SEM-EBSD により結晶方位を評価した後に,試料 表面の法線方向がそれぞれ<001>,<101>,<111>と一致するように試料を切り出して実験に用いた. 室温で3 keV のヘリウムイオン照射を行い,照射後の表面組織変化と結晶方位の関係を調べるために SEM-EBSD を用いた表面観察,結晶方位解析を行った.また,照射後の光反射率変化を分光エリプソ メトリーにより測定した.

#### 3. 結果および考察

鏡面研磨仕上げした多結晶 Mo 試料に室温で 3keV-He+を 10<sup>22</sup> He/m<sup>2</sup> 照射した結果, 試料 表面には,結晶粒ごとに異なっ た表面形態が観察された. 照射 前の EBSD による結晶評価と の対応から,表面組織には明ら かな方位依存性がある事が明 らかになった. 図1は照射後の 表面損傷組織と結晶方位の関 係を示している. 試料表面の法 線方向が<001>に近い結晶粒で はクレーター状の窪みを含む 激しい凹凸が観察され, <101>, <111>の結晶粒では、比較的滑 らかな表面が維持されていた. ただし、高倍率の SEM 観察結 果では<101>や<111>の結晶粒 においても、 ヘリウムバブルに



図1 室温で 3keV-He+を 10<sup>22</sup> He/m<sup>2</sup> 照射した多結晶 Mo 試料の表 面組織の結晶方位依存性 (SEM 像). 観察した各々の結晶粒 表面の法線方向を逆極点図上に示している.

起因すると考えられる緻密なホールを伴う微細な凹凸が観察されている.さらに、表面スパッタリング による損耗は、激しい凹凸を示す<001>の結晶粒で小さく、スパッタ率の高い結晶粒において滑らかな 表面が維持されることが明らかになった.同様な観察結果は、(001)、(101)、(111)を試料表面にもつ 単結晶試料においても得られた.

一方,光学特性評価においては,表面組織観察から 予想される結果とは逆の結晶方位の依存性がみられ た.図2は,それぞれの単結晶試料に3keV-He<sup>+</sup>,10<sup>22</sup> He/m<sup>2</sup>照射した後の光反射率を示している.光反射率 は,照射前の値で規格化している.(100)の試料と比 較して,(110)及び(111)試料において大きな反射率劣 化が観察される.この結果は,反射率が表面形態だけ でなく表面直下の損傷組織にも強く依存するためだ と考えられる.今後,照射済み単結晶試料のFIBを 用いた断面微細組織観察を行い,内部の損傷組織との 関連を評価する予定である.

本研究結果は、イオン照射下で金属ミラーを用いる 場合、結晶方位制御がミラー材の高寿命化につながる 可能性を示唆するものである.照射試料の電気抵抗率 変化の測定にも着手しており、来年度は、照射による 構造の乱れが、電気伝導特性に与える影響もあわせて 評価していく予定である.



図 2 イオン照射(3keV-He<sup>+</sup>,10<sup>22</sup> He/m<sup>2</sup>, R.T.) した単結晶 Mo 試料の相対光反射率.

## ● 学術論文

1. Y. Sakoi, M. Miyamoto, K. Ono, M. Sakamoto "Helium irradiation effects on deuterium retention in tungsten", Journal of Nuclear Materials, in Press

#### ● 学会発表等

- 1. <u>山本将寛</u>,<u>宮本光貴</u>,吉田直亮,時谷政行,相良明男,波多野雄治「LHD 実機プラズマに曝した 対向材料の光学特性評価」,プラズマ・核融合学会第 29 回年会,福岡,2012 年 11 月
- 2. <u>高岡宏光</u>,<u>宮本光貴</u>,森戸茂一,小野興太郎「ヘリウムイオン照射した Mo ミラー材料の表面損傷 及び反射率変化の結晶方位依存」,プラズマ・核融合学会第 29 回年会,福岡,2012 年 11 月

#### ● 研究組織

研究代表者: 宫本光貴(島根大学大学院総合理工学研究科助教) 所内世話人: 渡辺英雄(九州大学応用力学研究所准教授) 研究協力者: 高岡宏光,山本将寛(島根大学大学院総合理工学研究科博士前期課程)

## 24 FP-8

# 第一原理計算によるタングステン中のガス元素吸蔵および拡散の研究

#### 研究代表者 日本原子力研究開発機構 山口正剛

#### 【研究の背景】

国際熱核融合実験炉(ITER)では激しいプラズマ照射をダイバーターが受ける設計になっている。 また、燃料であるトリチウムは放射同位体であるために炉材料への残留が問題になっている。そこで、特にダイバーターは水素溶解度が低く、耐摩耗性、耐熱特性、に優れたタングステン系の 材料で被覆されることが計画されている。そこでタングステンと水素との相互作用の研究が盛ん に行われるようになった。本研究ではBCC金属空孔に捕獲される水素(水素同位体)のシミュ レーション研究を行ってきた。その結果、BCC構造の遷移金属(V、Nb、Ta、Cr、Mo、W、Fe)は7種 類あるものの、タングステンとモリブデンは水素との相互作用という点では大きく他の金属と異な ることが明らかになった。通常はBCC金属の空孔には水素は6個まで捕獲されると言われてきたが、 タングステンとモリブデンは12個まで捕獲する。さらに、水素の安定な位置は空孔中のOサイト ではなく、捕獲数が多くなるほどTサイト近傍にまで移動することが分ってきた。今年度は特にタ ングステン結晶およびタングステン空孔内部の水素の移動拡散について計算した。特に活性化エ ネルギーを計算した。それをもとに、熱平衡状態を仮定してタングステン中の空孔濃度を計算し た。水素雰囲気下では空孔水素複合体が生成されるが、複合体の方が生成エネルギーが著しく低 いために空孔の超多量生成が起こると言われている。そこで本研究では有限温度における水素濃 度と空孔濃度の関係を計算した。

## 【第一原理計算】

本研究では第一原理計算の汎用コードである Vienna ab-initio simulation package (VASP) を使った。ポテンシャルは一般化勾配近似タイ プ(GGA)のもの、K点の密度は5×5×5、原子 緩和は各原子に働く力のが 0.003 eV/Å以下 になるまで緩和を繰り返した。スーパーセルは BCC格子で原子54個のものを使った。また、水 素の移動に対する活性化エネルギーを計算す るために遷移経路に沿って10個のレプリカを置 いた。そしてnudged elastic band法を使って計 算した。この方法は遷移経路上の最高点(鞍部 点)を計算する方法として優秀である。

#### 【タングステン中の水素の移動エネルギー】

図1(a)のようにタングステンのようなBCC結晶 中の水素はTサイトが安定である。また、図1(b) のように隣のTサイトに移るために必要なエネ ルギーは0.197eVである。多くの実験および計 算でもこの程度の値が得られている。一方、図2 のように空孔中の水素はOサイトが安定である。 空孔に捕獲された水素が隣のOサイトに移動す る際には0.208eV必要である。偶然であるが、 両方の活性化エネルギーはほぼ等しい。さらに、 図3には水素が3個捕獲された場合の例が示し てある。この場合は1つの基底状態から別の基 底状態に移るために必要なエネルギーは 0.213eVだった。空孔中の水素が5個以下の構 造について同様の計算をした。その結果、水素 が結晶内を拡散する、または空孔内で構造を 変化させるための活性化エネルギーはどれも 0.19から0.21eV程度である。この値はタングス テン中の水素の移動を考える場合の特徴的な エネルギーになる。



ところが、空孔に6個以上の水素が捕獲 された場合は事情がかなり違ってくる。た とえば、図4は水素が6個捕獲された状態 である。構造(A)と構造(C)はともに基底状 態で、水素はOサイトから格子定数の 15%程度ずれた位置が安定である。構造 (A)から構造(C)に変化する過程で構造 (B)を経由すると図5のように活性化エネ ルギーは通常の0.2eVと較べて極めて小 さな0.035eVになる。

基底状態の構造(A)と(C)の間は室温程度(300K)の活 性化エネルギーでお互いに行き来できる。このような場 合は1つの状態として数える方が合理的であろうと考え た。タングステン空孔には水素は最高で12個まで捕獲さ れるために、基底状態が何重にも重複しているように見 える場合がある。しかし、本研究では0.05eVに一応の区 切りをつけ、お互いに簡単に遷移できる状態は1つの状 態とみなすことにした。

#### 【熱平衡状態での空孔濃度計算】

熱平衡状態での空孔(空孔水素複合体)濃度を計算する。必要な変数は以下のように定義する。また、空孔の 生成エネルギーなど必要な数値はRef[1-2]を参照のこと。 分配関数は次のようになる。

$$Z = _{N_0+N} C_{N \cdot 6N_0-18N} C_{N_H-M} \frac{N!}{n_0! n_1! \cdots} \omega_0^{n_0} \omega_1^{n_1} \cdots \exp \left( -\frac{\sum K_m}{k_B T} \right)$$
  
N<sub>0</sub>: 全タングステン原子数

N<sub>u</sub>:全水素数

n...:m個の水素を捕獲した空孔数

$$N:$$
全空孔数  $N = \sum_{m=0}^{\infty} n_m$ 

$$M:$$
空孔に捕獲された全水素数  $M = \sum mn_{n}$ 

ω<sub>m</sub>:空孔中の水素m個の状態多重度

E<sub>m</sub>:空孔水素複合体の生成エネルギー

分配関数より自由エネルギーや空孔濃度が計算できる。

$$F = -k_{\rm B}T\ln Z \qquad \partial F / \partial n_m = 0$$



図4:空孔内の水素6個の基底状態(A)と(C)、および準安定状態(B)



図6:有限温度での水素と空孔濃度の関係 (熱平衡)

#### 【空孔濃度の温度および水素濃度依存性】

図6が有限温度での空孔濃度である。水素濃度が低い場合は、温度が高いほど空孔濃度は大きくなる。 これは通常の熱平衡空孔濃度と一致する。一方で、水素濃度が高いほど空孔濃度も上昇する。これは 水素により空孔生成エネルギーが著しく低下することが原因である。いわゆる空孔の超多量生成を反映 している。タングステン空孔に水素は12個まで捕獲される可能性がある。しかしながら、熱平衡を仮定し た場合は6個の水素を捕獲した空孔水素複合体の数が圧倒的に多い。それはE<sub>12</sub>=-4.245eVなのに対し てE<sub>6</sub>=-2.742eVであるから、1つの空孔に12個の水素が集まるよりも、2つの空孔に水素を6個ずつ振り 分けた方が自由エネルギーを低くできるからと考えられる。

#### 【まとめ】

タングステン結晶の拡散に対する活性化エネルギーは0.197eV、空孔中の水素の構造変化に対しても 同じ程度(0.19から0.21eV)であった。熱平衡状態を仮定して空孔(空孔水素複合体)濃度を計算したと ころ、水素濃度が高い場合は空孔の超多量生成が起こる。

#### 参考文献

[1] Reports Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University **143** (2012) 29.[2] Phys. Rev. B 85 (2012) 094102.

-11ys. Rev. B 65 (2012) 094102.

# 巨視的運動論的 MHD 現象解析用の トロイダル版ジャイロ運動論的粒子コードの開発

山口大学大学院理工学研究科 内藤裕志

目的

現在、トカマクプラズマ中の巨視的 MHD 現象では、従来の理想 MHD や抵抗性 MHD モデルでは説 明できない場合が数多く観測されている。このため拡張 MHD(または運動論的 MHD)モデルの重要 性が増している。ただし、MHD 現象を解明するために流体系のモデルを用いる場合には、流体モデ ルの近似の妥当性、高次のモーメントを低次のモーメントで近似するモデルの妥当性(いわゆるク ロージャーの問題)の問題があり、モデルの validation と verification をきちんとする必要があ る。このため、より第一原理に近いモデルであるジャイロ運動論をもとにしたジャイロ運動論的粒 子コードを開発し、拡張 MHD モデルに基づく流体コードとの詳細な比較を行うことが重要である。

報告者等は、巨視的かつ運動論的 MHD 現象の解明を目指してジャイロ運動論的粒子コード Gpic-MHD を開発してきた。現在の版は零次のトロイダル効果に対応した円柱版のコードである。本 研究では、Gpic-MHD のトロイダル版の作成を目的としている。長期的目標としては、ITER 等の高 温・高密度の核燃焼を含むトカマクプラズマの運動論的 MHD 現象の解明、輸送現象と MHD 現象の競 合する物理の解明がある。

シミュレーションモデル

円柱版 Gpic-MHD の概要は以下のとおりである。デルタエフ法を用いたジャイロ運動論的 PIC コード。半径方向は差分法を用い、非一様メッシュに対応している。ポロイダル方向とトロイダル 方向は高速フーリエ変換を用いてモード展開している。擬スペクトル法を用いる。フーリエ空間で 不必要なモードを消去することにより、時間ステップ幅を大きくとることができる。スレッド並列 (自動並列コンパイラまたは OpenMP を使用)とプロセス並列(MPI 使用)を併用したハイブリ ッド並列コードになっている。プロセス並列は、領域分割と粒子分割(場の量のレプリカを用いる) を併用する。

## 研究成果の概要

A. 現在までの研究成果

標準的な Gpic-MHD により、鋸歯状振動の崩壊過程に関連する運動論的内部キンクモードの線 形・非線形のシミュレーションが可能であることを示した. Gpic-MHD は「クロージャー」の問題 がないため、流体コードの結果の正当性・健全性をチェックするためにも有用である。

3次元版 3D-Gpic-MHD は、場の量の計算が増大するため、並列化のため領域分割を利用している。トロイダル方向のみの1次元領域分割の場合、トロイダル方向と半径方向の2次元領域分割の場合に対して良好な並列化スケーリングを得た。

標準的なジャイロ運動論的 PIC コードは、大規模・高ベータのプラズマを取り扱う場合、電流 密度から磁場を求める際に大きな誤差が生じることが知られている(「キャンセレーション」の問 題)。この問題の解決法として split-weight-scheme があるが、我々は場の量の計算に渦方程式と磁 力線方向の一般化オームの法則を用いる先進的アルゴリズムを提唱し、この方法による新しい 2D-Gpic-MHD を作成した。また、新しい 2D-Gpic-MHD を用いて大規模・高ベータの領域でも精 度良く運動論的内部キンクモードがシミュレーション可能であることを実証した。

先進的アルゴリズムに対応するトロイダル版 Gpic-MHD コードの定式化を完成した。これらの 成果を基盤にしてトロイダル版のコードを作成する研究フェィズに入った。

#### B. 本年度の研究成果

円柱版の Gpic-MHD では、非線形計算を行う際、コードが発散する事例がある。これは、磁 気軸近傍での粒子や場の量の取り扱い、半径方向非等間隔メッシュの半径方向密度分布の取り方、 ハイパーレジスティビティの与え方等を適切に選択することにより改善される。これらの方法を併 用しながらより長時間の非線形計算が可能なノウハウを取得した。これらの経験はトロイダル版 Gpic-MHD での非線形計算に適用可能である。

SR16000のアップグレードに伴い、円柱版3次元 Gpic-MHD の並列化性能を再検証した。ア ップグレード前と比較して1.5倍程度の高速化が達成されていることを確認した。合わせて、スレ ッド数やコピー数を変化させた場合の高速化率の論理コア数依存性のスケーリングの検証等を行 い、更なる並列化の最適化のための基礎データを集積した。また並列コンピュータとして HELIOS を用いた場合のスケーリングとの比較を行った。なお HELIOS では32768コアまでの並列化 性能を検証した。

本研究の主目的のトロイダル版の作成については、現在パーツ毎の作成を目指して進行中であ る。今後は、統合されたコードの完成を目指す予定である。

#### 成果報告

## 口頭発表

[1] 内藤裕志、「巨視的運動論的 MHD 現象解析用トロイダル版ジャイロ運動論的粒子コードの開発」、RIAM フ オーラム 2012、2012 年 6 月 5 日、C キューブ筑紫ホール(福岡県春日市)

[2] H. Naitou, K. Itoh, M. Yagi, S. Tokuda, "Foumulation of gyrokinetic MHD model for tokamak simulation", 7<sup>th</sup> Japan-Korea Workshop on Theory and Simulation of Magnetic Fusion Plasmas, 26 July 2012, Nami Island, Chuncheon, Gangwondo, Korea.

[3] 内藤裕志、徳田伸二、矢木雅敏、中島徳嘉、「Gpic-MHD コードの開発と並列化の現状」、プラズマシミ コレータシンポジウム 2012、2012 年 9 月 11 日、核融合科学研究所(岐阜県土岐市)

[4] 松田大、西山達也、田内康、内藤裕志、「Gpic-MHD コードのハイブリッド並列による高速化」、平成 24 年度(第 36 回)電気・情報関連学会中国支部連合大会、2012 年 10 月 20 日、島根大学(島根県松江市) 低エネルギーヘリウムイオン照射された絶縁体における光学特性

琉球大学教育学部 岩切宏友,仲松一星,古堅辰明 九州大学応用力学研究所 渡邊英雄,吉田直亮 京都大学エネルギー理工学研究所 森下和功

### 【研究の目的】

イオンビーム照射法とは、真空中で目的とする粒子をイオン化し、数 keV~数 MeV のエネルギーに加速して固体や薄膜の表層(深さ数 nm~数 µm)に打ち込み、その物性を制御する技術である。 この手法では、溶解度に関わらず非熱平衡状態で原子を注入することができるため、自然界には存 在しない新しい構造や特性をもった物質の形成が可能である。

固体物質中の光学的特性は、物質中の電子状態によって決まっている。イオンビームを固体物質 中に照射すると、物質結晶中に格子欠陥(点欠陥)が形成されるために、物質中の電子状態が大き く変化するので、固体物質中で新たなバンド構造を形成する。その結果、イオンビーム照射された 固体物質の光学的特性が変化し、無色透明だった物質が色味を帯びることが知られている。

本研究では結晶性 SiO<sub>2</sub>を主な対象とした。石英(SiO<sub>2</sub>)は大きく結晶性石英と合成石英に分け られるが、合成石英では照射による光吸収率の変化がほとんど見られない。これは表面領域がアモ ルファス化している事が原因であると考えられる。そこで、本研究では、最表面まで結晶化した SiO<sub>2</sub>(東京電波製)を使用し、可視光の透過率・反射率の測定を行うことで、照射によって形成さ れた格子欠陥が与える光学特性変化を調べた。

#### 【研究方法】

結晶性 SiO<sub>2</sub>に様々な条件下でイオンビームを照射し、紫外可視光領域における光透過及び光反 射スペクトルを測定した。試料のバンドギャップは 9.0keV である。照射実験は軽イオンビーム照 射装置(琉球大学)及び制御イオンビーム照射装置(九州大学応用力学研究所)を用いた。照射イ オン種はHe<sup>+</sup>、照射エネルギーは 7.0keV、照射温度はRT~873K、照射量は1×10<sup>20</sup>~1×10<sup>22</sup>He<sup>+</sup>/m<sup>2</sup> である。また光透過率測定には V-650 型紫外可視光分光光度計(琉球大学)を、光反射率測定には V-670 型紫外可視光分光光度計(九州大学応用力学研究所)を用いた。

#### 【研究結果】

まず、室温下における光透過率の変化を調べるために、 $1 \times 10^{20}$  He<sup>+</sup>/m<sup>2</sup> および  $3 \times 10^{21}$  He<sup>+</sup>/m<sup>2</sup> の照射を行った。 $1 \times 10^{20}$  He<sup>+</sup>/m<sup>2</sup> では 200~360 nm の波長領域において未照射領域より透過率が低下し、360 nm~800 nm では逆に透過率は上昇した。また,照射量  $3 \times 10^{21}$  He<sup>+</sup>/m<sup>2</sup> では測定した全波長領域において透過率が低下しており、波長 360 nm 付近において未照射領域と比べ最大 5.5 ポイントの低下が見られた。さらに,波長 240 nm 以下の短波長側では急激な透過率の減少が確認された。続いて、時効による光学特性変化についての知見を得るため,室温および 473 K で照射された試料を-20℃で冷凍保存した場合と常温保存した場合に分けて光透過率を測定した。照射量は

全て 3×10<sup>21</sup>He<sup>+</sup>/m<sup>2</sup> である。室温照射の場合、冷凍保存された試料は全波長領域で透過率が減少し、 特に低波長側での減少幅が大きかった。また、わずかながら波長 380 nm 付近に吸収ピークも見ら れた。その後常温で保存された試料の光透過率は全波長領域において未照射領域を上回った。473 K の場合、冷凍保存した試料の光透過率は測定した全波長領域で減少し、特に短波長領域でより低下 していた。また,波長350 nm では4.7 ポイントのピーク低下が見られた。一方,常温保存の場合 は驚くべきことに高波長領域では未照射領域より光透過率は上昇し, 短波長領域では光透過率は減 少していた。さらに,波長270 nmより短い波長に関しては光透過率の減少が顕著で,波長200 nm では冷凍保存とほぼ同じ光透過率となった。また、照射によって生じた着色も徐々に消失していっ た。次に照射温度依存性における光透過率を測定した。照射量は3×10<sup>21</sup>He<sup>+</sup>/m<sup>2</sup>に固定し、照射温度 はそれぞれ 473 K, 673 K, 773 K である。473 K と 673 K は全波長領域において未照射領域よりも 透過率が低下しているが、この2つを比較すると波長370nmより短波長側では673Kが、一方で 高波長側では 473 K が透過率は低かった。また、照射温度が 773 K になると他の 2 つと比べ透過 率の顕著な低下は見られなかったが、波長 510 nm より短波長側では未照射領域より透過率は低下 し、高波長側ではそれよりわずかに上昇した。続いて、照射量依存性における光透過率の変化を検 証した。照射温度は 873K であり, 照射量は 3×10<sup>20</sup>,3×10<sup>21</sup>,1×10<sup>22</sup> He+/m<sup>2</sup>である。照射量が大 きくなるほど光透過率の減少が進行していることが確認できた。1×10<sup>22</sup> He+/m<sup>2</sup> では波長 360 nm 付近で 90.0 %から 85.3 %と約 4.7 ポイントの光透過率の低下が起こり, わずかに吸収ピークが見 られた。3×10<sup>20</sup> He<sup>+</sup>/m<sup>2</sup> では波長 430 nm 付近を境にやはり低波長側では透過率が未照射領域より も減少し、高波長側ではそれより上昇した。また、波長 200 nm 付近ではいずれも急激な透過率の 減少を示した。

本研究では光反射率を測定したが、試料の表面反射のみを測定するために裏面をダイヤシートで 研磨する作業を行った。その後、照射前の試料の光反射率における研磨前と研磨後の差異を測定し た。研磨を行うことにより、3ポイント程度(研磨前の試料と比較すると30%程度)反射率が減 少した。また波長 220 nm より短波長側では4~5ポイント程度の反射率の低下が確認された。続 いて照射量 3×10<sup>21</sup> He<sup>+</sup>/m<sup>2</sup> で 473 K に加熱照射後の光反射率を測定した。測定の際には試料の裏 面を研磨してある。波長 200 nm 以下の極低波長側を除いて、反射率が減少した波長とほとんど変 わらない波長が出現した。前者は反射時における光吸収が生じていると考えられる。また後者は波 長 350 nm 付近に確認できた。続いて、照射量1×10<sup>22</sup> He<sup>+</sup>/m<sup>2</sup> で 873 K に加熱照射された光反射 率を測定した結果、こちらも 473 K の場合と同様の結果が得られた。

(成果発表)

● 仲松一星:SiO₂中におけるヘリウム原子の挙動,平成24年度琉球大学教育学部自然環境科 学教育コース 課題研究発表会(2013年2月)

#### 環状プラズマ実験装置第一壁の水素透過挙動に関する研究

核融合科学研究所 廣岡慶彦

課題番号: 24FP-4

研究課題:環状プラズマ実験装置第一壁の水素透過挙動に関する研究 研究期間:H24年4月1日-H25年3月31日 所内世話人:図子秀樹 協力者:5名(芦川直子、周 海山[Zhou Haishan]、図子秀樹,井上雄貴) 配分額:校費(4万円),旅費(5万円)

目的:

高温・高密度水素プラズマの定常放電を行うQUESTのような環状装置では、水素の動的保持量 (ダイナミック・インベントリー)が閉じ込め性能と施設安全性に関連して重要なパラメーターとなる。 ところが、環状装置の真空を保持するための壁(一般に『第一壁』と呼ばれる)は、周辺水素プラズマ に直接曝されるためその運転温度によっては、水素を装置外部に透過させてしまう可能性がある。この ような第一壁の水素透過挙動は、特に、定常プラズマ運転時に第一壁が高温状態になる場合、燃料供給 量の制御及び実験施設の安全上重要な問題となる。本研究では、このような観点からQUEST装置を 用いて鉄系合金(SUS304・F82H等)の水素透過挙動を測定し基礎的知見を得ることを目的と するものである。

#### 実施方法:

QUESTの周辺部分に上記材料を用いて作成した透過試料を組み込んだ透過実験セットアップ を設置し透過膜試料の下流側(プラズマ側を上流として)に質量分析計(QMS)を以て気体水素の分 圧測定から水素の透過量を算定する。定常プラズマとしては、放電洗浄用の低温・低密度のECH水素 プラズマと高温・高密度の閉じ込め実験プラズマとがあるので、これら2種類のプラズマに曝した場合 の透過挙動を測定・解析する。なお、水素透過挙動のモデリングに関しては、DIFFUSE-コード [参考文献-1]を用いる予定である。

#### 実験結果:

#### 1) 可動透過プローブの試作

可動透過プローブを試作し、これを水平ポートに 設置した。将来の核融合炉で問題となる SUS 系、 F82H 壁に及ぼすトリチウム インベントリーの 評価を目的として SUS(厚さ 0.2mm, 直径 16 $\phi$ )お よび H82H(厚さ 0.2mm, 直径 16 $\phi$ )フランジを婦 ローブ先端部に取り付けこれを透過する水素ガ スを計測するシステムを構築した。下流側には QMS と D2 標準リークがありH2ガスの検出と校 正が行える。膜の加熱は配管内にもうけたランプ で行い通常 250 度で計測した。このシステムは図



図1 (上)水平図(QUEST 中心は右側)(下)可動透過プローブ(先端部の ICF34 フランジが透

1に示すように本体ポートに挿入可能であり、 壁から約130mmまで挿入可能である。長時間運 転では膜温度は周辺プラズマ曝露により若干 上昇する傾向がある。

# 2) 定常プラズマにおけるH原子透過計測

鉄系合金 (SUS304, F82H) の定常水素プラズマ 照射による透過挙動を比較するために、核融合 科学研究所に設置された直線型定常プラズマ 装置VIHECLE-1[2]を用いて照射実験 を行った。その結果を図2に示す。厚さは同じく 1mm であり、約220℃で透過挙動を観測したとこ ろ、F82H で  $3x10^{17}H_2/m^2s$ 、SUS304で2  $x10^{16}H_2/m^2s$ の定常透過束を実測した。一般に、定



図2 厚さ 1mm の SUS304 および F82H の透過 曲線(2.45GHz で生成した連続プラズマを直接照 射)温度はプラズマ照射によって昇温している。同 じ厚さでは F82H は 1-2 桁以上透過束が大きい。

常透過束の解析には拡散-拡散(DD)、拡散-再結合(DR)、および再結合(RR)律速モデル等が適用でき、 100V での入射飛程が非常に浅い点(~10nm)を考慮すると、可能性として RD および RR タイプが残る。

前者は拡散係数に比例し厚さに反比例する。今回 の透過東実験データが膜厚に依存することから RD モデルで説明できることを明らかにした[3]。 SUS304 を用いて QUEST の ECRDC プラズマでの透 過を調べた。QUEST の真空容器は SUS316L/304 を 用いており、水素の吸蔵特性の把握のためにはこ の知見は有用である。図3に示すように ECR プラ ズマの放電時間は15分であるが、短パルスでは 応答しないが、定常プラズマでは十分な感度で透 過することがわかった。定常での透過量は厚さを 下げれば増加が期待できる。図2のVIHECL E-1での SUS304 の結果は定常までにおおよそ 10000 秒を要しており、QUEST での壁への入射束 を模擬した実験結果は矛盾しない。放電洗浄時に トロイダル磁場を変化させ共鳴位置を変えてい るが、図3(下)にはその変化をとらえており、



図3 (上) ECRDC プラズマにおける SUS 透過 曲線。透過曲線の単位は 10<sup>-6</sup> Pa 時間は全体で 2000 秒、図中右軸は赤で示した放電パルス幅に対応(下) は 1 shot のみの拡大図 透過曲線の変動はトロイ ダル磁場の変化による PW I 領域の変化に対応

この程度の厚さにおいてもプラズマ・壁相互作用の状況を把握可能なことがわかった。今後 F82H に先端を変えることにより、フェライト系金属での透過物性値、透過特性が得られると思われる。 参考文献

 M. I. Baskes, "DIFFUSE83" Sandia Rep. SAND83-8231. [2] Y. Hirooka et al., J. Nucl. Mater.
 **337-339**(2005)585-589. [3]H. Zhou et al., "Hydrogen plasma-driven permeation through a ferritic alloy F82H", Paper presented at the Joint conf. of 9<sup>th</sup> Int. Conf. Open Magnetic Systems for Plasma Confinement (OS2012) and 3<sup>rd</sup> Int. Wkp on Plasma-Material Interaction Facilities for Fusion (PMIF2012), Tsukuba, Aug. 27<sup>th</sup> -31<sup>st</sup>, 2012. タングステン被覆した低放射化材料の接合界面における微細組織と強度特性の相関

京都大学エネルギー理工学研究所 木村 晃彦

#### 1. 目的

本研究では、低放射化構造材料のW被覆の製作および性能評価試験を実施し、最適な被覆プロセス・条件の探索を行うと共に、被覆・接合のメカニズムを解明し、より優れたW被覆作製のための材料科学的基礎知見を得る事を目的とする。

#### 2. 研究成果の概要

ODS 鋼、V 合金および低放射化フェライト鋼(F82H、JLF-1)に対するW 被覆に関しては、真空プラズ マスプレー(VPS)法および液相拡散接合法(TLPB)が適していることを確認し、それらの技術開発に向 けた研究を実施した。東北大学において開発された高靱性W-TiCと京都大学において開発された高耐熱性フ ェライト系 ODS 鋼との接合技術開発研究を進めた。

#### 真空プラズマスプレー(VPS)法

高密度で高い熱伝導率を示す VPS-W を製作するための VPS 条件の検討を行った。検討した VPS 条件は、 原料粉末の粒度、噴射ノズル・基板間距離、走査速度および基板厚さである。各種 VPS 処理後の特性評価お よび金属組織観察の結果、優れた特性を発現させるためには VPS-W が空隙(ポア)の少ない柱状晶組織で あり、噴出された W 粉末が十分に溶融して連続的な粒成長を通じて凝固することが高性能の W アーマー材 を製作するための必要条件となることが判明した。VPS-W の断面組織において柱状晶の占める面積率が増大 すると、40%までは密度および熱拡散率が上昇するが、それ以上では一定の値であることが報告されている。

また、VPS-Wの熱伝導率はWバルク材 に比べ、かなり低い値を示しているが、 初年度(青)に比べ、今年度作製した VPS-W(赤)では顕著な増大が認められ る。電子線後方散乱回折(EBSD)法を 用いて、VPS-W の結晶粒組織を観察す ると、熱伝導率の大きな VPS-W におい ては、柱状晶が成長し、空隙(ポア)の 小さいことが判明した。VPS-W の性状 は、柱状晶の面積率および空隙(ポア) によって、定性的に評価が可能であるこ とが判った。作製した VPS-W (F82H: 板厚 5mm)の熱負荷実験を実施した結 果、電子ビーム加熱による定常熱負荷実 験(熱負荷: 7.5 MW/m<sup>2</sup>、立ち上げ: 30s、 定常:180s、照射時間:3min)では、 VPS-W 表面および基板である F82H 鋼 の温度がそれぞれ 700℃および 600℃に

表1:液相拡散接合条件および材料

	組成	接合温度	接合圧力	接合時間	真空度
W	Pure tungsten (99.95%) 30×30×2t [mm]				
ODS鋼	Fe-15Cr-2W-0.2Ti–0.35Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 30×30×5t [mm]	1240°C	10MPa	1h	4 × 10⁻³ Pa
インサート 材	Fe–3B–5Si Amorphous 30 × 30 × 0.025t [mm]				



図 1:W/ODSS 液相拡散接合 (TLPB) 後の接合界面近傍組織及び構成元 素の流れ 上昇したが、試験後の VPS-W 表面には全く変化が認められず、熱負荷に伴う表面損傷の形成を確認することができなかった。一方、熱疲労実験(熱負荷: 7.5 MW/m<sup>2</sup>、Beam on: 60s、Beam off: 140s、照射回数: 30cycles)の場合は、微小な亀裂が形成されたものの、大きな表面損傷は認められず、比較的良好な耐熱負荷特性を示した。

#### 2)液相·固相(拡散)接合法

W と ODS 鋼とでは、材料特性が極めて異なるため、困難が予想されていた板材どうしの接合技術開発と して、鉄基アモルファス合金や Ti 合金をインサート材として用いるろう付け法(TLPB)の改良を進めた。 「接合界面強度」を破壊力学的に評価するための試験法として、せん断強度試験法を開発し、異なるサイズ の接合試験片を用いてせん断強度を評価した。接合部の組織観察および化学組成を調べ、接合処理による接 合部構成元素の拡散に関する情報を得た。

熱膨張係数の異なる異種金属接合には、TLPB が優れていることが理論的、実験的に示されていることか ら、インサート材に融点降下元素からなる鉄系のアモルファス合金を採用し、純 W とフェライト系の ODS 鋼の液相拡散接合を表1に示す条件下で実施した。EPMA による接合後の接合界面近傍における元素分析結 果は、接合界面にW、Cr および Fe が高濃度に分布する相互拡散相が存在すること、W が相互拡散層及びイ ンサート材を超えて ODS 鋼側に拡散していることおよびインサート材中の B が相互拡散層及び ODS 鋼に拡 散していることが明らかとなった。B の拡散は、接合時におけるインサート材およびインサート材に接する 相互拡散層及び ODS 鋼の溶融に伴うものであり、B 化合物の形成が懸念される。また、W がインサート材 を透過して ODS 鋼に拡散することが明らかになった。W は鉄中では脆化に寄与するとされている Fe2W-Laves 相を形成するため、この場合も脆化が懸念される。そこで、せん断強度評価試験を実施した。

これまで、せん断強度試験はねじり試験法を採用して実施してきたが、ねじり試験法では、せん断力が試 料断面の中心から表面への半径方向に線形的に変化するため、せん断力を過大評価する可能性がある。そこ で、本研究ではせん断試験治具を用いて、室温においてせん断試験を実施した。図2に応力ひずみ曲線を示

しており、Wと示したデータは、W単体のせ ん断強度試験データである。試験片サイズ効 果を調べるため、接合界面面積が1x1 (mm)、 1.5x1.5 (mm)、3.3x3.3 (mm)の三種類の試験 片に対して試験を実施した結果、試験片の小 型化に伴い、応力ひずみ曲線の傾きが小さく なり、データのばらつきが増大することが判 った。図3は、接合界面が3.3x3.3 (mm)の場 合であり、応力ひずみ曲線の傾きが各試験片 に対してほぼ同一であり、試験片と治具の間 のすべりに伴う曲げモード発生の度合いも少 ないと言える。この結果によると、接合界面 強度は W に比べ、低い傾向を示しているが、 同等の場合も観察されており、現状のW材料 のせん断強度に近い強度を持つ接合界面が得 られたと言える。



図3:W/ODSS 液相拡散接合(TLPB)後の接合界面せん断強度試験 結果(室温)

多孔質金属膜における水素・ヘリウム挙動に関する研究

九州大学大学院総合理工学研究院 片山一成

【目的】

近年クリーンな二次エネルギーとしての水素が注目されており、水素の製造・貯蔵・輸送に関連する技術開発の ため、様々な材料における水素挙動の理解が求められている。白金やタングステンは、他の金属に比べて水素溶解 度がきわめて小さいという特性を有する。しかし申請者らの研究により、水素プラズマスパッタリングを利用して これらの金属から形成される薄膜には、形成過程で多くの水素が捕捉されることがわかっている。また、ヘリウム プラズマを用いた場合は、多くのヘリウムガスが捕捉されることもわかっている。応用力学研究所とのこれまでの 共同研究により、50℃程度の基板温度にて重水素プラズマスパッタリングにより形成されたタングステン薄膜は、 数 nm の微結晶粒から構成され多くの空隙を有することがわかり、捕捉された水素やヘリウムの多くは微結晶粒の 粒界や空隙に捕捉されていると推定される。しかしながら、堆積時の基板温度による水素捕捉量や構造の変化につ いては明らかとなっていない。本研究では、水素・アルゴン混合プラズマを利用して、タングステンをスパッタリ ングし、異なる基板温度にて形成されたタングステン膜中の水素捕捉量及び構造変化を調査した。

【実験方法】

プラズマスパッタ薄膜作製装置の概略図を Fig.1 に示す。内径 10mm、長さ 400mm の石英管内に幅 5mm、長さ 10mm、厚さ 1mm の石英基板を設置し、石英管中央の枝管から直径 3mm,長さ約 30mm のタングステン棒(ニラコ 社製、純度 99.95%)を挿入した。石英管内をロータリーポンプで真空に排気後、モレキュラーシーブを通して水分 を除去した任意の水素濃度の水素・アルゴン混合ガスを、マスフローコントローラーを介して導入した。流量を調 整して所定の圧力に設定した後、コイルに 13.56MHz の高周波電力を印加しプラズマを点火した。プラズマを点火 後、直流電源装置によってターゲットタングステン棒に負の電圧を印加した。この電圧印加によって、スパッタリ ングの促進を図った。石英管の基板設置領域外周にリボンヒーターあるいは冷媒を通したチューブを巻き、設定温度に調節しながら薄膜を形成させた。一定期間放電を継続した後、基板を取り出し質量変化をマイクロ天秤にて測 定した。なお TEM 観察のため、直径 3mm の円盤状タングステン基板上にも同様な手法によってタングステン膜 を形成させた。タングステン膜中に含まれる元素は EDX により分析した。また石英基板とともにタングステン膜 を割り、破断面を SEM 観察することで膜厚みを評価した。マスフローコントローラーの流量は、液膜流量計を用 いて校正した。実験に用いた水素・アルゴン混合ガス中の水素濃度は、2,20,50,80%である。ガス圧は、プラズマ 下流側に設置した隔膜式圧力計にて測定した。純水素プラズマ、純アルゴンプラズマ及び水素・アルゴン混合プラ

(PlasCalc-2000: Mikropack)によって測定した。また、 純水素プラズマ及び純アルゴンプラズマ中のイオン密 度をダブルプローブ法により測定した。純水素プラズ マ及び純アルゴンプラズマについての水素イオン密度 及びアルゴンイオン密度とそれぞれの発光強度の関係 から、水素・アルゴン混合プラズマ中での水素イオン 密度及びアルゴンイオン密度を見積もった。ここで水 素イオンはH<sub>2</sub><sup>+</sup>、アルゴンイオンはAr<sup>+</sup>が支配的である と仮定した。ターゲットに入射する水素イオンフラッ クスは、ターゲットに流れ込む電流値とプラズマ中の 水素イオンとアルゴンイオンの密度比から求めた。

タングステン膜中に捕捉された水素量を定量するため、タングステン膜試料を基板ごと昇温加熱装置内に 設置し Ar 雰囲気で 200℃から 800℃まで 200℃ずつ段 階的に昇温した。各温度とも水素放出が見られなくな るまで測定を続けた。タングステン膜から放出された 水素はガスクロマトグラフを用いて測定した。



Fig.1 プラズマスパッタ薄膜作製装置概略図

#### 【結果及び考察】

EDX による元素分析では、懸念されていた不純物酸素は検 出されなかった。図2に基板温度38℃、300℃、500℃で作製 されたタングステン膜の断面 SEM 像を示す。基板温度・堆積 時間以外の条件は、ガス流量 2.3sccm、ガス圧力 5.4Pa、印加 高周波電力100W、印加直流電圧-200Vである。38℃試料は個々 の柱状組織が確認でき、明瞭な柱状構造を持つことがわかる。 一方 300℃、500℃試料では個々の柱状組織ははっきりとは確 認できない。ただし、300℃試料は縦方向に直線的な組織境界 が見られるため、比較的緻密な柱状構造を有すると考えられ る。これら基板温度による構造の違いは、飛来したタングス テン原子の表面拡散に起因すると考えられる。34℃、500℃の 基板温度にて同様にして作製したタングステン膜の TEM 観 察を行った。作製された膜厚が観察に適した厚みよりも厚か ったため、今後堆積条件を調整し、改めて TEM 観察を行う予 定である。そのため、予備的な TEM 観察結果ではあるが、34℃ と 500℃を比較したところ共に非晶質構造でありナノオーダ ーでの組織の違いは見られなかった。タングステンの融点が 3400℃程度と高いため、500℃の加熱下においても結晶性の向 上が見られなかったと考えられる。

水素・アルゴン混合ガス中の水素濃度の違いにより、堆積 速度や水素捕捉量に違いがみられた。水素濃度が低い場合は 堆積速度が増加し、水素捕捉量は減少した。この堆積速度の 向上は、アルゴンイオン密度の上昇によりスパッタ速度が促 進されるためである。水素捕捉量の減少は、堆積速度すなわ ちタングステンの堆積フラックスが増加する一方で、水素フ ラックスが減少するためと考えられる。そこで、異なる水素 濃度、基板温度で作製したタングステン膜中の水素捕捉量を 水素フラックスとタングステンフラックスの比(H/W フラッ クス比)に対してプロットし Fig.3 に示す。ここでは水素フラ ックスとして、タングステンターゲットから反跳する水素の フラックスを用いた。反跳水素フラックスは、ターゲットに 入射する水素イオンと反射係数を用いて見積もった。基板温 度 58℃から 156℃の低温条件で作製された場合、H/W フラッ クス比依存性が最も大きく、H/W フラックス比の 0.43 乗で水 素捕捉量が増加する。基板温度 300℃では 0.27 乗、500℃では 0.1 乗と整理された。

Fig.4 に各加熱温度においてタングステン膜から放出された 水素量を示す。いずれの試料からも 600℃においては水素放出 が見られ 800℃では水素放出が見られなかったことから、 600℃加熱により堆積層中の水素がほぼ回収できることがわ かった。500℃試料からの水素放出は 400℃から観測されてい るが、これは放電中にプラズマから注入された水素のうち



Fig.2 タングステン膜断面 SEM 像.(a)基板温度 38℃, 堆積時間 21h、(b)基板温度 300℃,堆積時間 24h、(c) 基板温度 500℃,堆積時間 24h.



Fig.3 タングステン膜への水素捕捉量の水素/タング ステンフラックス比依存性



Fig.4 各加熱温度においてタングステン膜から放出 された水素量

#### 【成果報告】

[1] <u>K. Katayama</u>, Y. Ohnishi, T. Honda, K. Uehara, S. Fukada, M. Nishikwa, <u>H. Watanabe</u>, "Deuterium retention in tungsten deposits by deuterium ion exposure", 11<sup>th</sup> China-Japan symposium on materials for advanced energy system and fission & fusion engineering, September 11-14, 2012, Chengdu, China.

400℃で脱離可能な水素が放電停止後の試料温度降下過程で堆積層中に残留したことによると考えられる。

熱・粒子照射された微結晶粒タングステンの微細構造

大阪大学 大学院工学研究科 上田良夫

#### 1. 目的

核融合炉プラズマ対向材料の第一候補材であるタングステンには、プラズマからの粒子負荷(水素同 位体、ヘリウムなど)に加えて、ELM(エルム)と呼ばれる間欠的な熱負荷が加わる。パルス熱負荷が 繰り返し与えられた場合には、表面温度の上昇と共に、高い熱応力が表面近傍に生じ、さらに金属疲労 の影響により、結晶組織や亀裂の発生に影響を及ぼす。

そこで、本研究では、中性子照射影響が純W材料に比べて小さく、低温での靱性を強化した微結晶 粒W(TFRG·W)(東北大学、栗下先生製作)について、大阪大学のプラズマとパルスレーザーを同時 に照射できる装置(Laplex)を利用して、ヘリウムイオンとパルスレーザーを同時照射し、表面近傍の 結晶構造の変化や亀裂の発生、あるいは材料の損耗に関する基礎的な知見を得る。さらに、TEXTOR トカマクの周辺プラズマに異なった表面温度でさらしたTFGR-W材料の分析を行う。これらの材料に 対して、応用力学研究所の複合表面分析装置や水素動態観測装置を活用して、表面近傍の組織観察を行 い、熱・粒子複合照射環境におけるタングステン材料の応答について理解を深める。

#### 2. 実験方法·結果

TFGR-Wでは1.1TiCと3.3TiCを用いた。これらの材料は、東北大学の栗下先生が開発された材料であり、微結晶粒WにTiCやTaCを添加し、超組成加工を施すことにより、粒界を強化したタングステン材料であり、室温近傍でも延性があることが特徴である。結晶粒は1ミクロン程度の大きさであるが、高温で処理することから結晶粒は再結晶化がすすみ粒の結晶方向はランダムである。

TEXTOR プラズマ照射実験では、グラファイトのテストリミターに円形の試料(直径 22 mm)2 個(TiC 添加材と TaC 添加材)をセットし表面温度を 1500℃程度から融点を超える範囲でさらして、表面の損傷・ 溶融挙動について詳しく調べた。表面からの金属不純物(Ti、Ta、W)の放出については、分光的に調 べた。また、TEM 観察については、吉田先生に担当していただいた。

#### 3. 実験結果

TEXTOR プラズマ照射実験では、31 ショット同じ放電にさらして、損耗や表面形状の変化を観察した。 表面温度は最高で 1900℃まで上昇した。分光測定により、約 1600℃を超えると、Ti の放出が顕著になった。一方で、Ta については、もともと信号が少なく、また温度が変化してもその発生量は変化してい

ない。Ti の放出に伴う 材料の組織の変化を調 べるため、断面を FIB で切断し、TEM 観察を 行った(図1、前ペー ジ)。TiC はコントラス トの違いとして明確に 認識できた。表面に露 出している TiC は損耗



図1 TFGR-TiC 表面近傍の組織。(a)と(b)は図2と対応

し、完全に失われたものもあるが、多くは表面に 不純物が堆積して、損耗が抑制されたと考えられ る。また、内部のTiCは変化がなかった。

図2にプラズマ照射後の表面近傍のTiCの様子 を示す。図2(b)では、TiCの一部が損耗し、その 上に堆積物が存在しており、コントラストから TiやCよりも重い元素の可能性がある。W上に堆 積していない理由は、TiCの方が軽い元素のため、 入射イオンが堆積しやすいため、と考えられる。 また、Heによって生じるバブルが観測されるこ とから、プラズマ中にHeの存在が示唆される。 一方、図2(b)ではほぼすべてのTiCが損耗して いることがわかる。

TiCはWに比べて軽いためスパッタリングが起 きやすく、Wより先に損耗することは定性的には 理解できる。しかしながら、1600℃程度以上で損 耗が顕著にみられることを考えると、これは単な る物理スパッタリングではなく、温度によりスパ



図2 プラズマ照射後の表面近傍の TiC 粒の様子

ッタリングが促進される機構があると考えられる。TiCの融点は、3433 Kと非常に高いが、それより低い温度から熱分解が始まることが知られている。しかし、TiCの損耗はプラズマが照射される表面のみの損耗であるため、単なる熱分解とも考えにくい。プラズマ照射により熱分解や昇華が促進される現象ではないかと推察されるが、今後さらに研究が必要である。なお、パルス熱負荷実験によれば、2500℃程度まで温度が上昇すると、内部のTiCも急速に失われ、結晶粒成長が急激に進むことがわかっており、TFGR-TiC は純Wに比べると、高温の安定性は高いが、TiC が失われる温度になると純Wと大きな違いがなくなる。

一方、TaC 添加材については、レーザーの熱負荷実験では、融点近傍まで TaC は失われることがなく、 高温での組織の安定性は、TiC 添加材に比べ格段に高い。TEXTOR プラズマ照射試料についても、初期的 な結果であるが、TiC に比べて高温でも組織は安定しており、耐熱性については TaC 添加材料の方が優 れていると考えられる。TaC 添加材については現在詳細な検討を行っているところであり、今後詳細な 結果を発表していく予定である。

## 4. 研究成果発表

- 1. T. Kawai, Y. Ohtsuka, Y. Ueda, H. Kurishita, N. Yoshida, "Effects of repeated short heat pulses on TFGR tungsten", presented at 27th SOFT (Liege, Belgium) 2012.
- 2. 上田 他、"TFGRタングステンへの短パルス繰り返しレーザー照射実験"、プラズマ・核融合学会 第29回年会、2012年11月、クローバープラザ、福岡県
- 3. Y. Ueda et al., "Surface erosion and modification of Toughened, Fine-Grained, Recrystallized tungsten exposed to TEXTOR edge plasma", to be presented at 14<sup>th</sup> PFMC (Germany), May 2013.

「応力下における照射組織の発達過程に係る強度特性評価(その4)」

日本原子力研究開発機構 大洗研究開発センター 燃料材料試験部 材料試験課

井上 利彦

#### 1. 緒言

日本原子力研究開発機構では、高速炉炉心用材料として耐スエリング性と高温強度に優 れた改良 SUS316 鋼(PNC316 鋼)を開発し高速実験炉「常陽」等で実機燃料ピンとして 実用するとともに、高速中性子による照射挙動を評価している。その結果、材料照射と燃 料ピン照射において両者におけるスエリング挙動の明確な相違が認められている。材料照 射は、材料試験片そのものを照射リグに装荷して照射しており、燃料ピン照射は実機燃料 ピンでの照射を行っている。照射量と照射温度で評価した場合、両者の違いは明らかにさ れておらず、実機燃料ピンの環境効果が要因として推定される。具体的な要因として、温 度勾配と温度変動及び内圧増加による周応力の変動等の照射環境の複合的な作用が考えら れる。

本研究では、材料照射と燃料ピン照射におけるスエリング挙動の相違と要因を明らかに することを目的とする。この複合的な環境効果の作用を評価する第1段階として、炉心用 材料において応力場が組織変化に与える影響を明確にすることを目的とする。

また、機構では、耐スエリング特性に優れた高 Ni 鋼の基礎的な研究開発を行っており、 本研究で得られた知見を踏まえた材料開発を目指している。高照射量及び高照射温度域で も炭窒化物やッソッ"析出物が安定に存在していること及びボイドスエリングの照射温度依 存性等を確認した。今後、耐スエリング特性が高められた高 Ni 鋼を用いて、応力を付加す ることにより更に照射損傷を加速させた照射試験等を試み、耐スエリング特性に及ぼす析 出物の影響評価を行う。

2. 実験方法

九州大学応用力学研究所設置のタンデム型イオン加速器ビームライン上に、荷重制御に よる小型引張試験機を設置されている動的効果観察ステーションを用いて、2.4-3.2 MeV Ni イオンの照射を行った。照射条件は室温から 600℃、負荷荷重は最大 100N とした。照射後 に微細組織観察を行い応力が与える照射欠陥集合体の離合集散状態を応力無負荷の試料と 比較した。供試材はオーステナイト鋼である JPCA2(焼鈍材)を用いた。

高 Ni 鋼(15Cr-43Ni、γ′/γ"弱析出型)を供試材として、タンデム型イオン加速器を用 いた 2.4MeV Cu イオンの照射を行った。照射条件は 700、800℃、200dpa として、応力無 負荷での微細組織観察試料とした。H24 年度は、JAEA 高崎量子応用研究所イオン照射研究施設(TIARA)にてイオン照射した試料に関してFIBを用いて微細組織観察試料に加工し、微細組織観察を行った。

3. 結果

応力無負荷及び応力負荷試料の両者の微細組織を比較した結果を図・1 に示す。図 1 の上 段には応力無負荷試料を示し、下段には 25N で応力を負荷したまま照射温度 400℃、照射 量 5dpa まで照射した試料を示す。応力なしの状態では、損傷ピークの近傍にのみ格子間原 子型の転位ループが形成されるが、照射中に 25N の応力を負荷すると転位ループ密度が少 ない領域においても高密度の転位が形成され、応力負荷の影響が広範囲にまで及ぶことが 示された。





図2 照射した高 Ni 鋼試料断面の 微細組織観察結果(700℃, 200dpa)

応力無負荷における高 Ni 鋼(15Cr-43Ni、γ′/γ"析出型)の 700℃、200dpa における微 細組織観察の結果を図 2 に示す。高温及び高照射量の条件下においてγ′/γ"(Ni<sub>3</sub>(Ti,Al)/ Ni<sub>3</sub>Nb)析出物は安定に存在していた。また、高 Ni 鋼(15Cr-35Ni 鋼:炭窒化物析出型、 15Cr-43Ni 鋼: γ′/γ"析出型)及び相対比較材の PNC316 鋼のボイドスエリングの照射温度 依存性を図 3 に示す。照射下における高 Ni 鋼の基礎的な挙動評価に関する知見を得た。今 後、応力負荷環境における照射試験を行い、損傷形態を比較することによって、耐スエリ ング特性に及ぼす高 Ni 化や析出物の影響評価を行う予定である。



(図中の括弧内は照射量を示す)

平成 24 年度 応用力学研究所 共同研究

「プラズマ輸送理論」成果報告書

#### 代表者 核融合科学研究所 伊藤公孝

研究目的

核融合燃焼プラズマ実験の実現にむけて計画が進展している現在、トロイダルプラズ マの輸送理論を一層進展させ、統合コードなどへ成果を糾合することによって定量的予 言力を検証することは世界的な急務と認識されている。

本研究では、トロイダルプラズマの乱流に対し、繰り込み理論に基づく遷移理論を構成し、乱流輸送と構造形成の理論基盤を研究することを目的とする。あわせて、輸送コードに用いられる理論式を最新の理論展開に沿ったものへと高度化することを目的とする。

## 研究基盤と進展の概観

プラズマの構造形成や乱流状態では、エネルギー等分配則が成り立たない事が知られ ており、従来の統計力学では十分解析できない。本共同研究では、そのようなプラズマ に相応しい、エネルギー分配やダイナミックスを解明するため、非平衡系プラズマの統 計力学を構築する事を目指す[1]。

### 多種の揺動構造の競合の理論

具体的な例として、Inagaki,et al.に報告された長波長揺動[2]の問題を取り上げ、励起 強度の等分配からの逸脱を検討する。Inagaki らによる発見は、乱流揺動シグナルの大 域的な相関を観測する事によって求められたものであり、局所的な熱平衡の破れや輸送 現象での局所クロージャーの破れを議論するための典型的な例となる。

多スケール乱流の理論は近年展開を見せ、ドリフト波―帯状流の系に定式化が行われ た。この系は磁場閉じ込めプラズマの乱流と異常輸送を考察するための基本的な体系で ある。一方、Inagakiらの発見は、(帯状流と異なって)磁気面上で均一ではない巨視的 な揺動が実在する事を示した。この場合、巨視的モードが線形安定である事に変わりは なく、巨視的モードの励起が微視的なドリフト波からエネルギーを取り去る事は共通で ある。しかし、帯状流とは異なり、巨視的なモード自体が揺動輸送を励起する。巨視的 モードの誘起が全体として乱流輸送を増やすのか否か、分析が必要である。更に、巨視 的モードによる輸送流束は、局所的な(拡散的な)輸送現象とは全く異なる輸送現象を もたらす。

ドリフト波とこの巨視的なモードの競合関係を実験で確認した[3]。[2]に示された実験観測データについてドリフト波揺動強度*Id*(*t*)と、長波長モードの振幅*It*(*t*)のリサージュ

図を図1に示す。最少二乗法によるフィットでは

$$\frac{I_d(t)}{\langle I_d \rangle} = 1.068(\pm 0.016) - 0.068(\pm 0.014) \frac{I_l(t)}{\langle I_l \rangle}$$

との結果を得て、負の相関を確認した[3]。ここで 〈*I*<sub>4</sub>〉と〈*I*<sub>1</sub>〉は *I*<sub>4</sub>(*t*) と *I*<sub>1</sub>(*t*) の長時間 平均値である。ドリフト波揺動のエンベロープを観測し、その周波数スペクトルを図2 に示す。低周波揺動の周波数でモジュレーションを受けている事が実証された。



図 1: 巨視的モードとドリフト波揺動振幅 *I*(*t*) *I*<sub>d</sub>(*t*) のリサージュ。点線は平 均値、 実線は最少二乗法によるフィッテイング。

**図2**:周波数スペクトルを図2に示す。 低周波揺動の周波数でモジュレーション を受けている[3]

# 森肇先生記念研究集会「非線形・非平衡系の統計力学」

この共同研究に於いて、森肇先生記念研究集会「非線形・非平衡系の統計力学」を共 催として開催した(於、九州大学応用力学研究所、2012年11月23日(金))。

かねてより森先生が九州大学応用力学研究所での本共同研究に参加下さり、ともに議論をする機会を得た。この共同研究の中から森先生は「記憶関数と相関関数の相似性」の考察を進めた。一方、乱流中の非線形過程で励起される多数の揺動や不安定なモードを解析する「乱流を着たモードの解析」というモデルがある。同方法を森の方法によって基礎づける事により、乱流場への外力の効果を解析し非線形応答が得られた[4]。

この研究会ではプラズマ物理学から非平衡系の統計力学を対象にし、プラズマ輸送理 論に関する大きな進展を得た。発表プログラムを添付する。

## 引用文献

[1] P. H. Diamond, S.-I. Itoh, K. Itoh: *Physical Kinetics of Turbulent Plasmas*, (Cambridge University Press, 2010) 570 pages
[2] S. Inagaki et. al., Phys. Rev. Lett. **107** (2011) 115001

[3] K. Itoh, et al.: Plasma Phys. Control. Fusion **54** (2012) 095016

[4] S. J. Itah and V. Itah. Chin. Dhys. D **21** (2012) 005201

[4] S.-I. Itoh and K. Itoh: Chin. Phys. B 21 (2012) 095201

## 森肇先生記念研究集会 - 非線形・非平衡系の統計力学-

## 九州大学応用力学研究所 2012年11月23日 (金) プログラム

10:00-10:10 開会挨拶

伊藤早苗(九州大学副学長、九州大学応用力学研究所)山田知司(九州工業大学名誉教授)

「森肇先生とのカオス研究」座長:森信之(九州看護福祉大学)

10:10-10:40 保存力学系のカオスと輸送現象

石崎龍二(福岡県立大学人間社会学)

- 10:40-11:10 カオスのフラクタル構造から軌道拡大率の揺らぎ 秦浩起(鹿児島大学大学院理工学研究科)
- 11:10-11:20 休憩
- 11:20-11:50 射影演算子法の大偏差統計関数導出への応用 宮崎修次(京都大学情報学研究科複雑系科学専攻)
- 11:50-12:20 カオス・乱流の時間相関関数

岡村誠(九州大学応用力学研究所)

12:20-14:00 昼食

「非線形・非平衡系の統計力学に関する研究交流」

14:00-15:00 ポスターセッション

## 「森肇先生との研究の交わり」座長:黒木昌一(福岡女子大学)

- 15:10-15:40 パターン・エントロピー時系列法の開発と応用例 井上政義(鹿児島大学名誉教授)
- 15:40-16:10 森理論とプラズマ乱流研究について

伊藤早苗(九州大学副学長、九州大学応用力学研究所)

- 16:10-16:20 休憩
- 16:20-16:50 モード結合理論への道

川崎恭治(九州大学名誉教授)

16:50-17:20 集団同期現象をめぐって

蔵本由紀(京都大学数理解析研究所)

17:20-17:30 閉会挨拶 吉田健(九州大学・福岡工業大学元教員)
# ポスターセッション一覧

- P1.「液晶電気対流系での二重構造」 鳴海孝之(九州大学工学研究院)
- P2. 「低温下の概日リズム」 伊藤浩史(九大芸工),村山依子(早稲田理工),八木田和弘(京都府医)
- P3.「非ガウス性に起因する熱伝導」
   金澤輝代士(京都大学基礎物理学研究所),沙川貴大(京都大学基礎物理学研 究所, 京都大学白眉プロジェクト),早川尚男(京都大学基礎物理学研究所)
- P4. 「両面テープの剥離ダイナミクス」山口哲生(九大工)
- P5. 「森の射影演算子法による相対論的線形流体方程式の導出」 南佑樹(理研),日高義将(理研)
- P6. 「結合振動子系の集合ダイナミクス」 前山聡美(九州大学総合理工学府),坂口英継(九州大学総合理工学府)
- P7. 「Lorentz 対称性がない場合の南部-Goldstone の定理」 日高義将(理研)
- P8.「ネットワーク上の情報熱力学」 伊藤創祐(東大理),沙川貴大(京大白眉センター)
- P9. 「調和振動子における速度時刻相関の波数依存性」August Wierling(University of Rostock (Germany)),沢田功(香川高専)
- P10.「電力網の位相モデルにおけるカスケード故障」 松尾龍磨(九州大学総合理工学府),坂口英継(九州大学総合理工学府)
- P11. 「租視化により隠れるエントロピー生成と非平衡関係式」 川口喬吾(東京大学理学系研究科物理学専攻),中山洋平(東京大学理学系研 究科 物理学専攻)
- P12. 「縮約にともなう物理量の変化と非平衡熱力学第二法則」 中山洋平(東京大学理学系研究科物理学専攻),川口喬吾(東京大学理学系研 究科 物理学専攻)
- P13. 「Duffing 系の記憶関数」富永広貴(佐賀大医)

金属材料へのイオンビームとプラズマ/レーザーの複合照射効果

研究代表者 名古屋大学大学院工学研究科 大野哲靖

1. はじめに

国際熱核融合実験炉(ITER)でのトムソン散乱計測では、パルスレーザー用金属ミラーのレーザー誘起 損傷閾値(LIDT)の調査が重要な課題となっている。高出力パルスレーザー(Nd:YAGレーザー)照射によ って、一旦金属ミラーが損傷を受けると光学特性が著しく劣化してしまうためである。懸念の一つとし て、中性子とレーザーとの複合照射による損傷閾値の劣化が挙げられる。光学的な劣化は極めて少なか ったとしても、繰り返しのパルス的なレーザー照射に耐えうる必要があり、中性子照射により損傷閾値 が下がった場合には、ミラーの寿命を著しく短くしてしまう可能性がある。しかし、これらの特性の調 査例は少なく、中性子照射効果に関しては、データは皆無である。本研究では、特に、九州大学が所有 する重イオンビームを利用し、中性子照射模擬実験を実施し、金属ミラー材料へのレーザー損傷閾値に 与える影響を実験的に調査した。

2. 実験方法

九州大学のタンデム加速器を用いて、純銅ミラーに対して2.4MeVCu<sup>2+</sup>のイオンビームを照射した。純銅ミラー のCu<sup>2+</sup>イオンビームによる損傷量の深さ分布は、SLIM 2012 codeを用いて計算した。ピーク損傷量が5.5 dpaの 試料の損傷量dpaの深さ分布を図1に示す。ピーク損傷量が5.5 dpaの試料のイオン平均飛程は758 nmであり、 損傷ピーク位置は680 nmであった。表面から1100-1200 nm付近までイオンビームよる損傷があると計算された。 Cu<sup>2+</sup>イオンビーム照射純銅ミラーの断面組織写真を図2に示す。試料の断面を観察すると、表面から1100 nm付 近まで損傷を受けていると見受けられ、計算結果と一致していた。



図 1  $Cu^{2+}$ イオンビーム照射純銅ミラーの dpa の深 図2  $Cu^{2+}$ イオンビーム照射純銅断面の写真。 さ分布。

3. 実験結果

イオンビーム照射銅における損傷閾値の計測を実施した。本実験では Nd:YAG レーザーを利用し,集 光した YAG レーザー光を銅ミラーに照射し,反射率の変化から LIDT を評価した(図 3)。イオンビー ム照射銅の LIDT はイオンビーム未照射試料の LIDT より高かった。一般的に、重イオンビーム照射が なされると金属表面の硬度が増すが、この実験においても、重イオンビーム照射により表面硬度が増加 し、LIDT が増加した可能性が示唆される。

レーザー照射時間内の熱拡散距離は $\sqrt{\alpha\tau}$ で見積もられる。( $\alpha$ :熱拡散率, $\tau$ :レーザーパルス幅)銅の熱拡散率は 1.059 cm<sup>2</sup>/s,パルス幅は 5-7 ns であるため,熱拡散距離は 0.8 µm 程度であり,重イオン ビームの平均飛程距離と同等である。より深い領域までイオンビームで損傷を与える実験も重要と思わ れるが,損傷が十分に進行していない領域では、本イオンビームの模擬実験により十分に欠陥の影響が 模擬できていると思われる。本実験から、高パルス領域(10<sup>4</sup>-10<sup>5</sup> pulse の領域)のマルチパルス損傷閾値に 対する中性子負荷の影響は小さいと考えられる。



成果報告(論文,学会発表等)

- (1) 佐藤雅也, 梶田信, 安原亮, 大野哲靖, 時谷政行, 吉田直亮, 田原譲: "トムソン散乱計測用金属ミラ ーのマルチパルスレーザー損傷閾値"第9会核融合エネルギー連合講演会 (29A-34p, 神戸国際会議 場) 2012 年 6 月.
- (2) M.Sato, S. Kajita, R. Yasuhara, N. Ohno, M. Tokitani, N. Yoshida, and Y. Tawara : "Multi pulse laser damage threshold of Cu and Ag mirrors", The 6<sup>th</sup> International Conference on PLAsma NanoTechnology & Science (P-H1, Gero Synergy Center)
- (3) Masaya sato, Shin Kajita, Ryo Yasuhara, Noriyasu Ohno, Masayuki Tokitani, Naoki Yoshida, and Yuzuru Tawara "Assessment of multi-pulse laser-induced damage threshold of metallic mirrors for Thomson scattering system" submitted.

# ドリフト波乱流中の渦構造に関する

# 非線形シミュレーション研究

Nonlinear simulation on vortex structures in drift wave turbulence

# 富山大学・人間発達科学部 成行 泰裕

# 研究目的:

核融合プラズマ中には圧力・密度・温度勾配が普遍的に存在し、それらによってドリフト 波乱流が励起される。このようなドリフト波乱流を記述する基本的な方程式としては、 Hasegawa-Mima 方程式がよく知られている。近年、熱の輸送現象に大きく寄与するドリフト 波のミクロスケールの揺動の「寄り集まり(バンチング)」によって生じる周方向の流れの塊(スト リーマー)が実験室プラズマ中で観測され、さらにこのストリーマー構造が Hasegawa-Mima 方程式から導かれる非線形方程式のソリトン解(渦構造)に対応していることが指摘された。

本研究では、前年度の共同研究を通じて、(1)反磁性ドリフトを考慮した多種イオンプラズマ中の Hasegawa-Mima 方程式からの KdV 方程式の導出およびソリトン解の温度比・イオン組成への依存性の評価、(2)イオン-電子温度比を含む Hasegawa-Wakatani 方程式からの VZSC モデルの導出、を行った。本年度は、導出したイオン-電子温度比を含む VZSC モデルの数値シミュレーションを行う。

# 研究方法:

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

# 研究成果:

本年度は前年度導出した有限温度比を含む小数自由度モデル(modified VZSC モデル)の基本的な性質を議論した[1]。まず初めに、系の平衡点を解析的に求め、温度 比に対する依存性を確認した。次に、4次のルンゲクッタ法を用いて数値的に系の時 間発展を議論した。図1は温度比に関する量(*a*=1+τ、τ:イオン-電子温度比)で規格化 したレイノルズ数(*R'*)に対する分岐図である。赤い線はτ=0、青い線はτ=0.5 をそれ ぞれ表している。図1は4周期に分岐した所から示しているが、*R'*が大きくなるに つれて周期倍分岐を生じカオスへ至っていることが確認できる。赤い線と青い線の比 較では、それぞれ値に違いはあるものの、*R'*に対する分岐の依存性は変わらないこ とが分かる。ただし、この場合の*R'*は実際のレイノルズ数*R*に*a*を掛けた量である ため、温度比(イオン温度)が大きくなるほど小さいレイノルズ数*R*でカオスへの遷 移が生じることになる。すなわち、有限の温度比の効果により、層流状態から乱流状 態へ至るレイノルズ数の閾値が下がることになる。



図1 規格化したレイノルズ数に対する分岐図(詳細は本文参照)

また、VZSC モデルはレイノルズ数をある程度上げていくと解が発散することが知られているが[2]、一部の項に対してのみ温度比の効果を入れることでレイノルズ数を上げても発散しなくなることが分かった。今後は、この操作の物理的意味の解明やフィードバックなどを含む系[3]の解析、および統計的性質の解析[4]などが課題となる。

# 引用文献

[1]福永航平,平成24年度高知工業高等専門学校特別研究論文集(印刷中)(in English)

[2] A. A. Vasil'ev et al, Sov. J. Plasma Phys., 16(10), 1990.

[3] C. F. Figarella et al, Plasma Phys. Control Fusion, 45, 1297-1308, 2003.

[4] D. Hamada, Master's Thesis of Interdisciplinary Graduate school of Engineering Science, Kyushu University, 2007.

# 公表状況:

なし (\*2013年3月15日に下記講演予定) 福永航平、成行泰裕、谷澤俊弘、佐々木真、矢木雅敏、"イオン - 電子温度比を含む ドリフト波乱流モデル",名古屋大学太陽地球環境研究所研究集会「雷・超高層放電の 科学」

# 研究組織:

成行泰裕(富大・人間発達)、福永航平(高知高専・専攻科)、谷澤俊弘(高知高専)、 佐々木真(九大・応力研)、矢木雅敏(原研)、羽田亨(九大・総理工) タングステン中の水素同位体保持特性に及ぼす照射欠陥の影響

富山大学 水素同位体科学研究センター 波多野雄治

1. はじめに

核融合炉プラズマ対向材料としてタングステン(W)が有望視されており、安全性の観点からトリチウ ム保持特性の解明が急務となっている。著者らは日米科学技術協力事業 TITAN 計画のもとで中性子照射 W 中の水素同位体保持特性を調べ、欠陥の捕獲効果により照射前に比べ水素同位体保持量が著しく増大 することを見出し、保持量低減とトリチウム除去法の開発に向けた研究の必要性を提言している[1,2]。 一方、中性子照射は照射条件の制約が大きく、試料の放射化などの問題もあり、実験精度には限界があ る。また、照射キャプセル体積の制限から、試験できる材料種もおのずと限定される。そこで、並行し たイオン照射による広範かつ精緻な実験が不可欠と考え、本共同研究を推進している。今年度は微量の Re 添加が水素同位体保持特性および微細組織に与える影響を調べた。

2. 実験

試料にはアライドマテリアル社製の 4.6 質量%の Re を含む W 板材(以下、W-5Re) および純度 99.99% の純 W 板材を用いた。これらの試料に室温および 600℃で 20 MeV の W イオンを 0.5 dpa (損傷ピーク 深さでの値)まで照射した。そののち、673 K で 1.2 または 100 kPa の D<sub>2</sub>ガスに 10 時間曝露し、D の 深さ方向分布を核反応法(NRA) で分析すると共に、昇温脱離スペクトルを測定した。また、あらかじ め薄膜化した直径 3 mm の W-5Re ディスクに 2.4 MeV の Cu イオンを 0.25~1 dpa 照射したのち、TEM 観 察を行った。

3. 結果及び考察

Wイオン照射した純WおよびW-5Re 試料中のD濃度及びはじき出し損傷の深さ方向分布を図1に示す。 表面から約2µmの領域まで照射損傷が導入されると共に、その領域中でD濃度が著しく高くなっており、照射欠陥にDが捕獲されていることがわかる。はじき出し損傷量が最大となる深さ(約1.4µm)におけるD濃度に及ぼす Re 添加、照射温度、D<sub>2</sub>ガス曝露温度の影響を図2に示す。いずれの試料においても873 K で照射すると室温で照射した場合に比べD濃度が低下している。これは、高温では欠陥の拡散が活発となり、照射中に一部の欠陥が消滅するためと考えられる。興味深いことに、純Wと比べW-5Re中のD濃度は常に低い値となっている。また、図3は873 K で照射した試料からのDの昇温脱離スペクトルであるが、W-5ReからのD脱離開始温度は純Wに比べ約150 K も低い。これらの結果は、水素同位体捕獲サイトとして働く照射欠陥の密度および欠陥からの水素同位体の脱離エネルギーが共に Re を添加することにより低下することを示している。すなわち、Re 添加はトリチウム保持量を低減する効果があると期待される。

照射前および Cu イオンを室温で1 dpa 照射したのちの TEM 像を図4 に示す。照射により、微細な空 孔クラスターが多数形成されており、これら空孔クラスターが主要なD 捕獲サイトとして働いていると 考えらえる。今後、空孔クラスターのサイズ分布等を調べ、上述のような Re 添加や照射温度依存性が 現れたメカニズムを考察する予定である。

なお、本研究の一部はドイツ・マックスプランクプラズマ物理研究所との共同研究としても実施され た。ここに謝意を表する。



図1Wイオンで照射したのちD2ガスに曝露したW(左列)およびW-Re 合金(右列)試料中の Dの深さ方向分布およびはじき出し損傷分布. 照射温度は上段が室温、下段が873K.



- 図 2 損傷ピーク深さでの D 濃度に及ぼす照射温 度、D<sub>2</sub>ガス曝露温度および Re 添加の影響.
- 図 3 873 K で照射損傷を導入した W および W-Re 合金試料からのD 脱離スペクトル.

室温.

1 dpa

10nm



図4 照射前(右)および室温でCuイオンを1dpa 照射したのち(左)のW-5Re 試料のTEM像.

-172-

# 圧力容器鋼の磁気特性に与えるイオン照射効果

#### 岩手大学工学部マテリアル工学科 鎌田康寛

#### 目的

東日本大震災による福島原発事故以後、原子力政策に慎重になる国がある一方、世界では約400 基の商業炉が稼働中であり、さらに新興国での相次ぐ新設など、原子力分野での安全性の重要性は 変わらない。それに関連して、我々のグループでは、照射環境下での圧力容器鋼および炉内構造物 の脆化機構の解明と、それに基づく健全性評価法の確立に関する研究を進めてきた。特に磁気利用 による脆化の非破壊評価の可能性を検討しており、そのためには磁気特性に与える照射欠陥形成の 影響の解明が必要である。しかし、原子炉を使う中性子照射では系統的な実験が難しく、さらに放 射化するため通常の設備で試料を扱えないという問題があった。それらを解決する新しい手法とし てイオン照射と単結晶薄膜試料の組み合わせを提案している(科研費・基盤研究 B、No23360418)。 カスケード損傷が起こるイオン照射では中性子照射と似た損傷組織が得られると同時に、試料が放 射化しない利点を有する。損傷深さが浅いという欠点があるが、試料全体が損傷を受ける薄膜の利 用で照射領域の物性測定が容易になる。さらに単結晶を利用することで複雑な粒界の影響を除くこ とができ、相関機構の解明が容易になる。このような考えに基づき、単結晶鉄クロム薄膜における Fe-20%Cr 二相分離の照射促進現象の可能性をH22-23 年度に報告した。本年度は、磁気特性の照射 量依存性とクロム濃度依存性について検討を行った。

#### 方法

単結晶試料の作製は、MBE 法(到達真空度 2×10<sup>-10</sup> Torr)を用いて行った。MgO(001)単結晶基板上 に Fe-x%Cr (x= 5,10,15,20)を 30 nm 蒸着した。RHEED 観察より、良質な単結晶薄膜の形成を確認し た。イオン照射は、タンデム型加速器(九州大学応用力学研究所)を用いて、475℃で 1h 保持し、 Cu<sup>2+</sup>(2.4 MeV, 1.6×10<sup>-4</sup> dpa/s)を照射した。照射時間は Fe-20%Cr で 5, 15, 45min、Fe-x%Cr (x= 5, 10, 15, 20) は 15min とした。SRIM 計算より、損傷度は 15min 照射で 0.14 dpa と見積もられた。照射した Cu<sup>2+</sup>は薄膜を貫通し基板に達するため、残留イオンの影響は無視できる。磁気特性評価として、VSM を用いて磁化測定(最大磁界 2 kOe)を行った。

#### 結果および考察

Fe-20%Cr 単結晶薄膜の印加磁化方向を変えて磁化測定を行ったところ、純鉄と同様に、 H//[100]<sub>Fe-Cr</sub>、H//[110]<sub>Fe-Cr</sub>がそれぞれ磁化容易、磁化困難方向であることを確認した。図1に照射量 0から0.43 dpa までの磁化曲線を示す。飽和磁化はほとんど変化ないが、保磁力は照射量とともに 増加している。照射による過剰空孔の形成で2相分離が促進し、Crリッチ析出物が形成・成長した ことを反映している可能性がある。図2に保磁力の照射量依存性を過去の実験値(2.3dpa, 2.4×10<sup>-3</sup> dpa/s)とあわせて整理した。保磁力が硬度増加に比例し(バルク Fe-20%Cr の熱時効実験で確認済[参 考文献])、さらに照射量の平方根に比例すると仮定した場合の曲線をプロットした。高照射量(高 フラックス)で曲線から外れており、フラックス効果の可能性もあるが今後検討が必要である。

Fe-x%Cr (x=5, 10, 15, 20)の未照射・照射(0.14dpa) 試料の飽和磁化は、照射前後で変化は見られなかった。一方、保磁力については、5%Cr から 15%Cr 合金では測定誤差の範囲で変化は無かったが、20%Cr 合金では照射により増加した(図 3)。この照射条件では 15%以下では二相分離がほとんど進行していない可能性がある。

今年度は、さらに直線駆動シャッターと専用ヒータ試料台を新しく据え付けることで、コンビナトリ アル型照射実験にも成功した。実験条件を系統的に変え、磁性に与える照射効果を解明したい。

- 参考文献: J. Mohapatra, Y. Kamada, 他 5 名: Effect of Cr-Rich Phase Precipitation on Magnetic and Mechanical Properties of Fe-20%Cr Alloy, IEEE Trans. Mag. 47 (2011) pp.4356-4359.
- 成果報告: Y. Kamada, H. Watanabe, S. Mitani, J. Mohapatra, H. Kikuchi, S. Kobayashi, M. Mizuguchi and K. Takanashi: Ion-Irradiation Enhancement of Materials Degradation in Fe-Cr Single Crystals Detected by Magnetic Techniques, Journal of Nuclear Materials, 2013, *in press* ほか
- 研究組織 : 鎌田康寛, 菊池弘昭, 小林悟, 村上武 : 岩手大学工学部マテリアル工学科 渡辺英雄 : 九州大学応用力学研究所



タングステン混合堆積層における炭素・ヘリウムと照射欠陥分布と水素同位体滞留挙動の相関関係

静岡大学 理学部 大矢恭久

[目的]

D-T 核融合炉におけるプラズマ対向壁として、高融点・低スパッタ率等の特徴を持つタングステンの使用が 考えられている。対向壁にはプラズマから漏えいした高エネルギー水素同位体が照射され、照射欠陥が形成す る。形成した照射欠陥には水素同位体が捕捉され、壁中に滞留することが予想されている。そのため、核融合 炉の運転時間増加に伴い欠陥量およびタングステンの構造が変化し、水素同位体滞留挙動に影響することが考 えられる。また、プラズマ中には不純物として炭素が混入することが考えられ、水素同位体と同時に第一壁に 照射され、欠陥やタングステン炭素混合層を形成することが予想される。それらの構造変化により第一壁中の 水素同位体滞留挙動が変化し、核融合炉における燃料サイクルに影響を及ぼす。核融合炉の定常運転のために は、混合層形成が及ぼす水素同位体滞留挙動への影響の解明は重要な課題である。そこで本年度は、タングス テンに重水素イオンを照射し、TEM 観察および TDS 測定により形成した欠陥状態および重水素滞留挙動の解 明を行った。加えて、照射温度を変化させて炭素照射したタングステンに重水素照射を行い、XPS 測定、TEM 観察および TDS 測定から炭素照射温度変化が及ぼすタングステン炭素混合層の化学状態、表面構造および重 水素滞留挙動への影響を検討し、炭素照射タングステン中の欠陥形成および水素同位体滞留とタングステン炭 素混合層形成との相関を明らかにした。

#### 【実験】

本研究にはアライドマテリアル社製、1173 K 歪み取り処理済みの多結晶タングステンを使用した。試料を3 mm<sup> $\phi$ </sup>×0.1 mm<sup>t</sup>に加工した後、静岡大学にて重水素をエネルギー3 keV D<sub>2</sub><sup>+</sup>、フラックス 1.0×10<sup>18</sup> D<sup>+</sup> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>、フル エンス 1.0×10<sup>23</sup> D<sup>+</sup> m<sup>-2</sup> の条件で照射した。また炭素イオン照射に関しては、照射時の試料温度を室温、673 K と変化させて、イオンエネルギーを 10 keV C<sup>+</sup>、イオンフラックスを 1.0×10<sup>17</sup> C<sup>+</sup> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>、イオンフルエンスを 1.0×10<sup>21</sup> C<sup>+</sup> m<sup>-2</sup> として照射を行った。各イオン照射後、九州大学の透過型電子顕微鏡(TEM)を用いて 1073 K での焼鈍前後における試料中の照射損傷を観察した。

また静岡大学にて、同条件で重水素単独照射および炭素照射後重水素照射したWに昇温脱離法(TDS)による 測定を、昇温速度30K/min、昇温領域R.T-1173Kにて行い重水素の放出挙動を測定した。加えて、炭素照 射タングステンの表面化学状態および深さ方向における化学状態をX線光電子分光法(XPS)にて測定した。各 試料中の重水素深さ方向分布は富山大学にてグロー放電発光分光分析(GD-OES)により測定した。

【結果および考察】

図1にフルエンス1.0×10<sup>23</sup> D<sup>+</sup> m<sup>-2</sup> 照射したW 試料のTDS スペクトルを、これまでに行った1.0×10<sup>22</sup> D<sup>+</sup> m<sup>-2</sup> 照射時の結果と比較したものを示す。 $1.0\times10^{23}$  D<sup>+</sup> m<sup>-2</sup> 照射試料では、400、520、600、700 K に4つの重水素 放出ピークが見られた。低温側の400 K と 520 K の放出はそれぞれ表面吸着および転位ループ<sup>[1]</sup>と原子空孔<sup>[2]</sup> に捕捉された重水素の脱離と帰属した。一方、高温側の脱離ピーク(600 K および 700 K)は、重水素放出量に顕 著な増加が見られた。これは重水素照射量増加による新たな捕捉サイトの形成および重水素のバルクへの拡散 によるものと考えられた。図2に、フルエンス $1.0\times10^{23}$  D<sup>+</sup> m<sup>-2</sup> にて重水素照射した試料の焼鈍後における TEM 観察像を示す。焼鈍によりボイドの集合が観察されたため、照射時にナノボイドが形成していたことが示唆さ れた。また、富山大学にて行った GD-OES の結果より、重水素高フルエンス照射時にはバルク領域での重水 素滞留量が増加した。これらの結果および酸素に捕捉された重水素の脱離温度領域に関する報告から、ピーク

3およびピーク4はそれぞれボイドに捕捉された重水素の脱離およびバルク方向へ拡散し結晶粒界に存在する





図2 1.0×10<sup>23</sup> D<sup>+</sup> m<sup>-2</sup>照射したWに 対する焼鈍後のTEM観察像

酸素に捕捉された重水素の脱離と帰属しされた。

図3に室温および673Kで炭素照射した試料における焼鈍後のTEM像を示す。どちらの試料においてもボ イドの形成が確認されたが、焼鈍後のボイドの大きさは室温照射試料が5nm以下であるのに対し673Kでの 照射試料は約10nmであった。また、静岡大学にて行ったXPS測定より、室温照射時と比較し673K照射試 料では表面炭素量が減少することがわかった。これらの結果より、室温での炭素照射時では673Kでの照射と 比較し、照射により形成した原子空孔が炭素により占有されている割合が高いことが示された。図4に各温度 で炭素照射した後、重水素を1.0×10<sup>22</sup>D<sup>+</sup>m<sup>-2</sup>照射した試料のTDS結果を示す。炭素照射試料においてピーク



1、ピーク2、ピーク3としての重水素放出ピークが見られた。ボイドの形成はどちらの試料でも観察された が、欠陥における重水素滞留量は673Kで照射した試料の方が大きい。これは、原子空孔やボイドを占有して いた炭素が加熱により減少し、各捕捉サイトにおける重水素滞留能が増加したことが原因と考えた。

本研究により、照射した炭素が欠陥に捕捉されることにより欠陥の集合および重水素滞留挙動に影響を及ぼ すことが明らかとなった。

[1] H. Eleveld et al., J. Nucl. Mater. 191 (1992) 433

[2] O.V. Ogorodnikova et al., J. Nucl. Mater. 415 (2010) 661

# 24 FP-23

極限環境下におけるタングステンの表面改質と水素吸蔵の基礎研究

筑波大学数理物質系 坂本瑞樹

#### 1. 研究目的

プラズマ対向壁の表面状態は、照射損傷、再堆積、He バブル形成等の様々なプラズマ・壁相互 作用(PWI)現象に起因して変化する。この表面改質が壁の水素吸蔵・放出特性に与える影響の理 解は、核融合炉のトリチウムインベントリーやプラズマの粒子制御に関連して重要である。本研 究では、低損耗・高融点という特長から国際熱核融合実験炉 ITER においてプラズマ対向材料とし ての使用が計画されているタングステン材料に注目し、小型の直線型プラズマ生成装置を用いた 低エネルギー・高フラックスプラズマのタングステンへの照射及びタンデムミラー型装置 GAMMA10 を用いた高イオン温度プラズマのタングステンへの照射実験を行い、極限環境下におけるタング ステン中の水素吸蔵、材料損傷に関する基礎過程の理解を深めることを目的としている。

#### 2. 実験結果及び考察

#### 2.1 低エネルギー・高フラックスプラズマ照射実験

今回の実験では、2種類のタングステン(アライド マテリアル社製)を用いた。サンプルのサイズは、 ゆ 10mm×t1mmである。ひとつはロッド状に成形された タングステンをカットしたものであり、もう一方は板 状に成形されたタングステン板をカットしたもので ある。これら2つのサンプルの断面写真を図1に示す。 タングステン粒の伸びの方向がプラズマ照射面に対 して、垂直方向(垂直サンプル:図1(a))と平行方向

(平行サンプル:図1(b))に伸びていることが分かる。 粒のサイズは、垂直サンプルで10×2 µm、平行サンプ ルで5×2 µmである。2 つのサンプルの純度は99.99%で ある。サンプルは鏡面研磨後、アセトン、エタノール にて超音波洗浄され、1173K、1×10<sup>-6</sup> torrで1時間焼鈍 された。焼鈍後のサンプルは、小型PWI模擬実験装置 APSEDASにて低エネルギー・高フラックスプラズマ に照射された。サンプルへの入射フラックスは3×10<sup>21</sup> D/m<sup>2</sup>secであり、入射エネルギーは20-30eVである。プ ラズマ照射後にサンプルをTDS装置に移し、300Kから 1470Kまで1K/sの昇温速度で加熱してTDSスペクトル と重水素吸蔵量を測定した。

図2に垂直サンプルと平行サンプルの重水素リテ ンションの照射温度(サンプルの表面温度)依存性を 示す。いずれの照射温度でも、垂直サンプルのリテン ションの方が平行サンプルよりも高くなっているこ とが分かる。また、両サンプルともに照射温度が550K 付近で最大値をとっている。垂直サンプルのリテンシ ョンが高い理由としては、垂直サンプルの材料深さ方 向への実効的な水素拡散係数が平行サンプルに比べ て高いためであると考えられる。



図1 (a)ロッド状に成形されたタン グステン(垂直サンプル)と板状に成 形されたタングステン(平行サンプ ル)の断面 SEM 画像。プラズマ照射 面は横方向。



図 2 垂直サンプル(○)と平行サン プル(□)の重水素リテンションの照 射表面温度依存性。

# 2.2 高イオン温度プラズマ照射実験

水素リサイクリングの理解のためには、PWIに起因する壁の微視的状態変化の把握が重要となる。今回の実験では、W板及び透過型電子顕微鏡(TEM)観察用のステンレス(SS)薄膜とタングステ

ン(W)薄膜を用いて、GAMMA10のセントラル部のプラズマ を照射した。照射時間及び照射時期による損傷、堆積の 依存性を調べるために照射日数を1日、12日、49日(全 実験期間)と変えて実験を行った。それぞれの照射実験 での総照射時間は1日照射で約9秒、12日照射で約80 秒、全実験期間の照射では約370秒である。1日照射実 験時はイオンサイクロトロン周波数帯加熱(ICRF)のみ でプラズマ生成・維持し、12日照射実験時はICRFに加 え、プラグ・バリア部に短時間の電子サイクロトロン加 熱(ECH)を行っている。この2回の照射実験はGAMMA10 セントラル部に今回新たに設置した表面プローブシス テムを用いて行った。全実験期間を通じての照射は、 GAMMA10真空容器内に2箇所設置した長期設置試料を用 いた。

図1に長期設置試料のW薄膜のTEM観察結果を示す。 試料内部に微細な転位ループが形成されていることが 分かる。長期設置試料は、GAMMA10セントラル部の軸方 向中央(センター部)と中央から軸方向東側に1.2m離



図3 GAMMA 10 の(a)セントラル セル中央部と(b)軸方向へ 1.2m 離れ た位置に長期設置されたタングステ ンサンプルの TEM 観測結果。

れた位置(イースト部)に設置されており、中央から離れた試料では転位ループ形成が少なくなっていることが分かる。この損傷はプラズマからの荷電交換中性粒子に起因している。セントラル部のプラズマのイオン温度は数 keV であり、図3に示す転位ループ形成量の違いはセントラル部のイオン温度と密度の軸方向分布を反映していると考えられる。また、試料の断面観察から評価した堆積層の厚さは、センター部の試料では約8nm、イースト部の試料では約1.8nm であった。センター部試料の堆積層は、ナノ結晶の集合体であり、回折リングから鉄の酸化層であることが分かった。

# 3. 研究成果報告

- (1) 坂本瑞樹、吉田直亮 他、「GAMMA10 における長期設置試料と表面プローブを用いたプラ ズマ・壁相互作用研究」、プラズマ・核融合学会第 29 回年会、2012 年 11 月 27 日~30 日、ク ローバープラザ(福岡県) 27E38P.
- (2) A. Rusinov, M. Sakamoto et al., "Deuterium retention in various kinds of tungsten irradiated by low energy and high flux plasma in APSEDAS", Joint Conference of OS2012 and PMIF2012, August 27-31, 2012 (Tsukuba) O/PMIF-21.

#### 4. 研究組織

氏 名	所属	役割・研究分担
坂本 瑞樹	筑波大学·数理物質系	研究統括(代表者)
赤羽 泰央	筑波大学·数理物質科学研究科	プラズマ照射実験・解析
芦川 直子	核融合科学研究所	ダスト解析
時谷 政行	核融合科学研究所	材料解析
大野 哲靖	名古屋大学・工学研究科	ダスト挙動
剣持 貴弘	同志社大学·生命医科学部	ACAT-DIFFUSE解析
宮本 光貴	島根大学・総理工	水素吸蔵解析
吉田 直亮	九州大学・応力研	材料解析
渡辺 英雄	九州大学・応力研	材料解析
徳永 和俊	九州大学・応力研	材料解析
ルシノフ アレキサント゛ル	九州大学・総理工	プラズマ照射実験・解析

# 耐熱構造機器の接合界面特性に及ぼす照射後熱処理の影響

茨城大学工学部 車田 亮

### 1. 研究目的

耐熱構造機器は、アーマ材とヒートシンク材との接合構造を有し、高性能化のために、アーマ材料には耐熱性・耐熱衝撃性に優れ、高い高温強度や熱伝導性を有することが望まれ、ヒートシンク材料には強制冷却のための高熱伝達性を有するとともに、それらの接合技術の確立などが要求されている。一方、最近開発された無欠陥接合法(NDB; Non Defective Bonding)による耐熱構造機器の製作は、従来の熱応力緩和のための中間材(Mo,Niなど)を挿入する必要がなく、その接合界面強度や熱伝達特性が著しく改善され、高性能を有する耐熱構造機器の簡単な製作が可能となっている。ただし、その接合界面の健全性や実用寿命の延長に関する研究が不十分であると言える。そこで、本研究は、今までの九大応力研との共同研究の実績を踏まえて、特に、NDB法による耐熱構造機器の接合界面に注目し、その健全性および実用寿命の延長を目指して、接合界面の微細組織と機械的特性に及ぼす照射後熱処理の影響を究明することを目的とする。

#### 2. 実験方法

本研究では、まず、タングステン(W)と無酸素銅(OFC)を直接接合した NDB (Non Defective Bonding) 接合材料を制作する。タングステン材料は、日本タングステン(株製の純度 99.95[%]の微 細結晶粒純タングステン (JT-01W) および純度 99.99[%]の粗大結晶粒純タングステン(JT-02W)を 使用し、銅材料は、酸素量が 3ppm 以下と高純度材である OFC を使用する。

次いで、タングステンと銅との接合材料に、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、2.4MeV の銅イオン(Cu<sup>2+</sup>)を、573[K]において高温照射する。高温照射では、低照 射損傷 LI (1.8dpa in Cu, 1.0dpa in W)、重照射損傷 HI (18dpa in Cu, 10dpa in W)を実施する。

その後、超微小硬さ試験及び3点曲げ試験による機械的特性評価およびSEMによる微細組織観察 を実施する。本研究におけるダイナミック硬さは、 $D_h = \alpha L/h^2$  で示される。ここで  $\alpha$  は三角錐圧 子の定数( $\alpha$  = 3.8584)、L は試験荷重、h は押し込み深さである。

また、曲げ強度はまた、曲げ強度は、 $\sigma_{b3}=3PL/2wt^2$ で示される。ここで、Pは試験荷重、Lは 外スパンの距離、wは試験片の幅、tは試験片の高さである。

最後に、イオン照射試験前後の機械的性質と微細組織の変化を測定した後、真空電気炉を用いて、 673[K]において100[min]保持の熱処理(HT)を行い、材料特性のアニーリング効果を究明し、実用寿 命の延長について考察する。

#### 3. 実験結果及び考察

Table1は、JT-01W/0FCとJT-02W/0FCについて、照射後高温熱処理によるダイナミック硬さの変化率を示す。また、Fig.1は、照射後高温熱処理による曲げ強度の変化を示す。

Table 1 において、タングステンは軽照射で平均 1.05 倍、重照射で平均 1.09 倍の照射硬化を示した後、照射後高温熱処理により、タングステン部分では軽照射後熱処理で平均 0.95 倍、重照射後熱処理で平均 0.96 倍の硬さを示し、照射硬化の回復が確認できた。一方、銅部分では、再結晶温度(473K)を超えた高温照射では、熱による影響が大きく、再結晶や粒成長を生じ軟化した後、照射後熱処理によりさらに大きく軟化した。

Fig.1において、軽照射では、JT-01W/OFC で 1.22 倍、JT-02W/OFC で 2.56 倍の曲げ強度の増大 を示し、重照射では、JT-01W/OFC で 1.36 倍、JT-02W/OFC で 1.33 倍の曲げ強度の増大を示し、照 射効果による曲げ強度の増大が確認できた。また、軽照射後熱処理では、JT-01W/OFC で照射材の 0.77 倍、JT-02W/OFC で照射材の 0.82 倍の曲げ強度を示し、重照射後熱処理では、JT-01W/OFC で 照射材の 1.11 倍、JT-02W/OFC では照射材の 0.48 倍の曲げ強度を示した。照射後高温熱処理によ る曲げ強度の低下傾向が確認できた。さらに、微細組織を有する JT-01W/OFC の方が、高温照射や 照射後熱処理による曲げ強度の変化率が小さく、耐熱構造機器の材料に適していると考えられた。

Heat treated joint specimen		w		OFC	
	Condition	Outside 0-1[mm]	Inside 1-2[mm]	Inside 2-3[mm]	Outside 3-4[mm]
JT-01W/OFC	Unirradiation [Dh]	1867	1938	239	188
	LI at R.T	×0.95	×1.01	×0.80	×0.60
	HI at R.T	×1.05	×1.01	×0.77	×0.65
	LI at 573K	×0.94	×0.92	×0.57	×0.58
	HI at 573K	×0.98	×0.99	×0.54	×0.51
JT-02W/OFC	Unirradiation [Dh]	1827	1834	203	201
	LI at R.T	×1.20	×1.05	×0.70	×0.70
	HI at R.T	×1.11	×1.19	×0.74	×0.71
	LI at 573K	×0.98	×0.95	×0.75	×0.80
	HI at 573K	×0.91	×0.95	×0.64	×0.66

Table 1 Dynamic hardness of heat treated joint materials after irradiation.



Fig.1 Bending strength of heat treated joint materials after irradiation.

4. まとめ

本研究は、高性能を有する耐熱構造機器の開発を目的に、タングステンと銅との接合界面の機械的性質に及ぼす照射後熱処理の影響を究明した。得られた結果を以下に要約して示す。

- (1) 高温照射後の硬さ試験により、タングステンは照射硬化が確認できたが、銅は熱の影響が大きく軟化した。また、照射後高温熱処理で、タングステン部分は硬さが回復したが、銅部分は 照射温度と熱処理の影響により大きく軟化した。
- (2) 高温照射後の3点曲げ試験により、JT-01W/0FCとJT-02W/0FCの接合強度の増大が確認できた。 照射後高温熱処理により、接合強度の低下が確認できた。その変化率を比較すると、微細組織を 有するJT-01W/0FCは、高温照射や照射後熱処理による変化率が小さく、耐熱構造機器の材料に 適していると考えられた。

# 5. 研究組織

茨城大学工学部:車田 亮 大学院生: 小吹隆之、由比藤峻佑 九州大学応用力学研究所:渡邉英雄

# 6. 研究成果報告

1) 小吹隆之、車田 亮、他、日本機械学会関東支部第 20 回茨城講演会講演論文集、茨城大学、 (2012.8.24), pp.163-166.

小吹、車田、他、日本銅学会第52回講演大会講演概要集、東京工業大学、(2012.11.3-4), p. 85-86.
 車田 亮、小吹隆之、伊藤吾朗、渡邉英雄、松尾 明、銅とタングステンの接合界面強度に及ぼすイオン照射後熱処理の影響、銅と銅合金、第51巻1号, (2012), pp. 153-157.

# 無欠陥接合により作製されたタングステン/銅接合材料の熱負荷特性

茨城大学工学部 車田 亮

1.目的

タングステン(W)材料は、耐熱性・耐熱衝撃性に優れ、高い高温強度や熱伝導率を有するためITERのダイバータ、原型炉の第一壁及びタイバータのアーマ材料等として使用すること計画されている。今後、実用化を目指 すためには、W材料に対する熱負荷特性を究明する必要がある。また、最近、HIP後、鍛造や圧延等を行なわ ないW材が開発され、この材料は従来の粉末焼結タングステン材と組織が大きく異なり、耐熱負荷特性も異なる ことが予想される。さらに、無欠陥接合法(NDB: Non Defective Bonding)により、銅との接合方法が開発され、W 材と銅の接合強度や熱伝達特性が著しく改善されている。そこで、本研究は、この新しく開発されたW材と無欠 陥接合法により作製された銅との接合体について、実際の核融合実験装置において想定される熱負荷を与え、 耐熱負荷特性を評価することを目的とする。

#### 2. 実験方法

(1) 試料製作

NDB 法はタングステン合金と銅との接合方法として開発された接合技術で、ろう材を使用しない直接接合方法である。この接合の理論的な接合メカニズムは充分には解明されてはいないが、CuとWが機械的に接している段階、Cuの溶解によりWとの接触面積が増加する段階、CuとWとの原子間距離がさらに近くなり合金が形成される段階、その後、Cuが冷却され凝固する段階を経て接合体が作製されるものと考えられる。

本研究では、10mm x 10mm x 5mmt の超微細結晶粒 W 材と10mm x 10mm x 5mmt の Cu の接合体を NDB 法により 作製した。使用した超微細結晶粒 W 材は、HIP 法により作 製されたもので、その後、鍛造圧延等されておらず、通常の 粉末焼結 W 材とは、性質も異なることが予想される。図1に NDB 法により作製した W/銅接合体の写真を示した。熱負 荷実験の際の界面の許容温度は接合温度の 1/3 程度と考 えられる。また、Cu 部分の使用可能な温度は純銅で 200℃ 程度から再結晶するため、それ以下にする必要があると考 えられる。従って、W 表面で 1500-1600℃、界面で 300—400℃、Cu 部分で 200℃以下が使用温度と考えられ る。

#### (2)熱負荷実験

熱負荷実験は、九州大学応用力学研究所の電子ビーム熱負荷 実験装置を用いた。接合体はCu製の試料台に5mm φ の孔が開い たW製の押さえ板で機械的に固定した。この接合体を試料台に固 定した写真を図2に示す。接合体には、Cu部側面の接合界面から 2mm下の位置に、直径1mm φ で深さ4mmの孔を開け、この孔に図 2に見られるようにシースタイプの熱電対を装着し、これにより銅部 分の温度測定を行った。また、試料台内部の冷却管に水を流し、 強制水冷却を行っている。接合体のW表面温度は、低温用及び 高温用の2台の二色放射温度計を使用し、ビーム照射部の温度を



図1 NDB法により作製したW/Cu接合体



図2 試料台に装着した接合体

測定した。この二色放射温度計は、2 つの波長における放射エネルギーを計測し、比率から温度を測定するた

め、単色放射温度計より正確に温度測定を行うことができる。

電子ビームの加速電圧は 20kV でビームサイズは約 3mm である。また、試料に 100V の電圧を印加し、電子 ビーム照射により発生する 2 次電子や熱電子の放出を抑えた状態で試料電流を測定し、これにより熱流束を求 めた。熱負荷実験は、2 s のビーム照射を行い、その後、30 sの休止期間をおき、1サイクル 35 s の繰り返しを5 回行った。この際、2 s の電子ビーム照射は、一定の熱流束で、12 MW/m<sup>2</sup>、24 MW/m<sup>2</sup>、37 MW/m<sup>2</sup>、42 MW/m<sup>2</sup>及び 59 MW/m<sup>2</sup>の5つの異なる値について実験を行った。

3. 実験結果及び考察

図3には、熱流束が59 MW/m<sup>2</sup>の場合の試料電流、熱電対の温度の時間変化を示した。照射を開始すると 共に、試料電流が流れ終了と共に、試料電流がOFFとなっていることがわかる。表面温度は、放射温度計の測 定下限温度である450℃には至ってはいない。一方、Cu部分の温度は、照射開始後、上昇し、定常状態に達 する前に照射終了と共に下降していることがわかる。5回の照射においてもその温度変化は変わらず、加熱に より界面部分の剥離等の損傷は発生していないことがわかる。図4には、熱流束を変化させたときのCu部分の 最高温度を示した。熱流束が増加するに従いほぼ直線的に最高温度は増加することがわかる。熱流束が、59 MW/m<sup>2</sup>の場合、Cuの測定部の温度は最高174℃となっているが、繰り返し照射による温度変化には変化はな く、剥離等の損傷による温度変化への影響はないことがわかった。

4. モックアップ接合試験体の作製

上記のように NDB 法により作製した W/Cu 接合体の熱負荷特性を評価した。さらに、試料の大型化及び強 制冷却状態における熱負荷及び熱疲労特性を評価するために、冷却管付のモックアップ接合試験体を作製し た。この際、大型化による熱応力の増加を低下させるために、W 部分を 19.5 mm x 5mm x 5mm の 4 つの部分 に分割し、冷却管付の OFHC に NDB 接合を行った。また、W 材については、超微細結晶粒 W 材に加え、粗 大結晶粒 W 材についても接合を行い、2 種類の異なる W 材について NDB接合を試みた。このモックアップ接 合体の写真を図 5 に示した。接合中及び接合後に亀裂、

剥離など発生せず、良好な接合が実施できた。

5. 研究成果発表

K. Tokunaga, T. Hotta, K. Araki, Y. Miyamoto, T. Fujiwara, M. Hasegawa, K. Nakamura, A. Kurumada, M. Tokitani, S. Masuzaki, K. Ezato, S. Suzuki, M. Enoeda, M. Akiba , Thermomechanical behavior of plasma spray tungsten coated reduced-activation ferritic/martensitic steel, 27<sup>th</sup> Symposium on Fusion Technology (SOFT 2012), September 24–28, 2012, Belgium





図3 試料電流とCu部温度の時間変化



図 5 NDB 法により作製された冷却 管付 W/Cu モックアップ接合試験体

#### ゾーンプレートを使った QUEST プラズマ計測

電気通信大学 竹田辰興

【目的】磁気閉じ込めプラズマの実験的研究においては電磁波計測が有効で、中でも可視光を 中心とする画像計測は重要である。本研究はゾーンプレートによるプラズマ画像計測法の開発 を目的とする。

【研究概要】ゾーンプレートによる画像において特徴的なことは「背景光」と波長依存性がガ ラスレンズと逆向きの「大きな色収差」の存在である。大きな色収差の存在は、場合によって は、積極的に利用する可能性があり、我々も検討課題とした。しかし、背景光は画像のコント ラストを弱めて分解能を低下させるので除去することが望ましい。ゾーンプレートによる画像 は、一般に、1次の回折光によって作られるが、1次以外の回折光は背景光としてダイナミッ クレンジを狭くする(コントラストを弱くする)働きを持つ。これら1次以外の回折光の内0 次の回折光(非回折光、直進光)は特に大きくて、フレネル型ゾーンプレートの場合、1次の 回折光の $\pi^2/4$ 倍に達する。ゾーンプレートによる画像の内1次回折光による部分はゾーン数 を増やすことによって、より鮮明になるが、この背景光の存在のために画像全体は極めて不鮮 明なものとなる。ここでは、背景光の効果を取り除いて、より鮮明な画像を得る方法について 研究すると供にゾーンプレートの磁気閉じ込めプラズマ画像解析への利用について検討をした。 **背景光の除去** 上の記述からわかるように、1次以外の回折光を除去することによって背景光 を取り除くことができる。特に、0次の回折光(直進光)を取り除くことによって背景光の影 響を大幅に減らすことが可能である。このためには、たとえば、次のような方法が考えられる。 第一には、ゾーンプレートを出た光のうち 1 次回折光が収束する位置に凸レンズを置いてそこ に平行光線として到達した0次回折光を収束させ、そこにマスクを置き0次回折光を遮断する。 一方、収束点を過ぎて広がった1次回折光は色消しレンズ系で収束させて目的を達成する。こ のシステムは、L. Koechlin, et al. により衛星搭載望遠鏡のプロトタイプ(焦点距離:約18m、 ゾーン数:696)として成功したことが報告されている[1]。しかし、この方法は、短焦点の 系に応用することは困難と思われる。第2の方法としては、背景光は0次回折光だけに因るも のとして0次回折光による画像は同じ半径のピンホール画像と同じであると考えてゾーンプレ ート画像からピンホール画像の定数倍を差し引き1次回折光の画像だけを撮り出すというアイ デアがある。ゾーン数が 2n+1 であるような正のゾーンプレートの場合、入射した光の内、 n/(2n+1)~1/2 が透明ゾーンの位置に入射する。このことを考慮すれば、同じ被写体を、ゾ ーンプレートと、(そのゾーンプレートと同じ半径の)ピンホールによって撮影(これらを「像 A」および「像 B」とする)して、ピクセルごとに、「像 A-k\*像 B」(k~0.5) の演算をするこ とにより、背景光はほぼ除去される。この演算は、PixelMath [2] や imageJ の PlugIn [3]

を使って容易に行える。 焦点距離 200 mm、 ゾーン数 29 のフレネルゾーンプレートを用いて、 この操作を行った例を図1~3に示す。図1および図2がそれぞれ、像Aおよび像Bを示して おり、図3が「像 A – (1/2)\*像 B」である。図3は背景光がかなり除去されて、図1に比べて 鮮明になっているが必ずしも十分ではない。これは、ゾーン数が少ないことも原因の一つであ るが、この実験は背景光除去のアイデアを簡単な装置で検証することであったので工作精度が 著しく悪いためと考えられる。また、この方法では、同じ時点に同じ位置から2枚の写真を撮 らなければならないので、たとえば、ハーフミラーを使って光を分割するなどの必要性もある ので実際の実験での利用には多くの課題をクリアする必要がある。

プラズマ画像解析への適用性 ゾーンプレートによる点光源の像の解像度自体はゾーン数を多 くすることによって大きくすることができ、何らかの方法で背景光を取り除けば、解像度の高 い写真が得られる。光学素子としての ZP の特徴は、①ガラスレンズと違い光線が通る経路を真 空にできるし1枚の薄い板状材料から作られるので大きな ZP は対応するガラスレンズに比べ て極端に軽い、②焦点距離が光の波長に逆比例するのでガラスレンズに比べて分散がきわめて 大きな素子ができる、③ゾーン数を増やすと解像度が増加し、焦点深度、被写界深度が浅くな る、ということである。このうち、①の特徴は、いろいろな分野で有効利用されつつある。② の特徴に関しては、分散の向きが通常のガラスと逆であることを利用した超高性能色消しレン ズが可視光分野での利用例の一つである。プラズマ計測に関しては①の特徴の利用が今後期待 される他、なるべく浅い被写界深度の光学系を実現して、プラズマの Ηα線による単色光像を 撮影することが期待できる。しかし、現時点では磁気閉じ込めプラズマの可視光計測における ゾーンプレートのガラスレンズに対する優位性は明確とは言えない。

#### 参考文献

- [1] L. Koechlin, et al., First high dynamic range and high resolution images of the sky obtained with a diffractive Fresnel array telescope, Experimental Astronomy (2012) 33, p.129.
- [2] S.L. Tanimoto, An Interdisciplinary Introduction to Image Processing, 2012, The MIT Press, http://pixels.cs.washington.edu/PixelMath/pmdownload/request.php,
- [3] <u>http://rsbweb.nih.gov/ij/</u>、http://rsbweb.nih.gov/ij/plugins/calculator-plus.html



図1

図3

# 磁場閉じ込めプラズマ中の多スケール・多プロセス現象の

# 理論・シミュレーション研究

### 日本原子力研究開発機構 石井康友

目的

磁場閉じ込めプラズマにおいては、時間尺度及び空間尺度の異なる諸現象(MHD、 微視的乱流等)が定性的に異なる空間領域に跨って相互作用し、その結果として 核融合炉の特性が決まる。それを総合的に理解し、予測・制御するためには、外 部情報入力を伴う、輸送、MHD、乱流、高エネルギー粒子の相互作用を考慮したグ ローバルシミュレーションが必要であると認識されつつある。

本研究では(1)プラズマ周辺における非線形 MHD 現象およびそれとコアプラ ズマとの相互作用(2)核融合炉における MHD 不安定性の飽和・抑制や突発現象 を解明するための理論・シミュレーションモデル及び(3)高エネルギー粒子と MHD 現象の相互作用を記述する理論・シミュレーションモデルを改良・開発し、核 融合炉の MHD 特性の総合的な解析を可能にするとともに、核燃焼プラズマの統合 シミュレーションを実現する上で必要なモデルを提供することを目指す。

研究成果

プラズマの安定性にとって重要なプラズマ回転が抵抗性壁モード(RWM)に与 える影響を、日本原子力研究開発機構で開発した MINERVA/RWMaC コードを用い て調べた(N.Aiba、J.Shiraishi)。正磁気シア配位における RWM に対しては、プラ ズマ回転に伴う遠心力により MHD 平衡が変化し、RWM の成長率が減少する事を 明らかにした(J.Shiraishi, IAEA2012)。また、負磁気シアプラズマに於いては、プ ラズマ回転は RWM の安定化のみでなく不安定化を引き起こす可能性が有る事を明 らかにした(N.Aiba, accepted to PPCF)。プラズマ回転によるこのような再不安定 化は、RWM と安定な MHD モードとの相互作用により引き起こされている可能性 が有る。回転により再不安定化した RWM では、静止プラズマにおける RWM に比 べて、プラズマ中心領域においても高振幅のモード構造を持っている。

核燃焼プラズマで重要となる高エネルギー粒子駆動モードに関するシミュレーション研究を行った(A.Bierwage, Y.Todo)。今年度は、プラズマの最外殻磁気面の外を通過してプラズマ中に戻る軌道を持つ粒子の影響を考慮した AE 安定性解析を行った。MEGA コード(NIFS)と粒子軌道追跡コード OFMC(JAEA)を連動させたシミ

ュレーションにより、異なるタイムスケール(波一粒子相互作用~10ms、バンプ オンテイル~10ms、減速時間~1s)の物理によって決定される位相空間の構造形 成の数値解析を行った(A.Bierwage IAEA2012)。

プラズマ中の突発現象に関しては、電子慣性効果を含む拡張型 MHD モデルに於 いて変分原理を定式化し、m=1内部キンクティアリングモードの爆発的成長を解 析的手法に予測する事に成功した(M.Hirota submitted to NF)。トカマクプラズマ で観測される鋸歯状振動現象は、炉心プラズマの高性能化に於いて重要な制御対 象の現象である。この鋸歯状現象はm=1内部キンクティアリングモードに起因す ると考えられているが、その速い成長率を引き起こす物理的機構はまだ解明され ていない。速い成長率を再現するために、電子慣性効果による無衝突磁気再結合 がその原因と考えられている。しかしながら、従来の解析的手法である漸近接続 法は線形領域しか取り扱えず、非線形発展を解析的に取り扱う事は不可能であっ た。また、電子流体効果が重要となる内部領域と、理想MHDで記述できる外部 領域における時間・空間スケールの差により、直接的な非線形シミュレーション も多くの計算資源を必要とし、高性能トカマクプラズマのパラメータ領域でのシ ミュレーションは依然として困難である。本研究では、無衝突プラズマが散逸を 持たない保存系であることに着目し、2流体モデルへの変分原理の拡張と変分原 理を用いた非摂動論的な解析手法により、鋸歯状振動における爆発的成長の理論 解析に成功した。

#### 酸化物・窒化物結晶における照射欠陥形成およびその安定性

九大工、安田 和弘, 高木 聖也(院), 山本知一, 松村 晶

#### 1. 目的

蛍石型酸化物セラミックスは、優れた耐放射線照射損傷性を示すことが多くの研究により報告 されている。そのため、イットリア安定化立方晶ジルコニア(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub>)、セリア(CeO<sub>2</sub>)および類 似の結晶構造を有するパイロクロア酸化物は、長寿命核種核変換や放射性廃棄物処理のための不 活性母相の候補材料となっている。

蛍石型酸化物セラミックスは、金属イオンの質量が酸素イオンに比べて著しく大きく、かつはじき出しエネルギーは金属イオンおよび酸素イオン副格子で異なる値を示し、金属イオン副格子のはじき出しエネルギーは酸素イオン副格子の2倍程度大きい。したがって、放射線照射下における点欠陥形成速度は、酸素イオンの方が著しく大きくなる。例えば、電子照射のように比較的小さい運動エネルギーを格子原子に伝達する照射条件では、酸素イオンにのみ選択的なはじき出し損傷が生じる。さらに、酸素イオン点欠陥の移動度は陽イオンより大きい。以上より、蛍石型酸化物セラミックス中の照射欠陥の形成・成長過程は、酸素イオン点欠陥の挙動に大きく影響を受けることが予想される。実際の核融合炉や原子炉照射環境では、幅広いエネルギースペクトルを持つ一次はじき出しが生成されるため、そのエネルギーに依存して酸素イオン副格子に優先的にはじき出し損傷が誘起されたり、両イオン副格子にはじき出し損傷が誘起される。このような背景に基づいて、核融合炉や原子炉照射環境下での照射欠陥形成・成長過程を明らかにするために、これまで選択的に酸素イオンのはじき出し損傷が誘起される電子照射下において、酸素イオン転位ループの形成・成長過程について調べてきた。本報告では、電子照射により蛍石型構造のCeO2 中に形成される転位ループの挙動、およびその詳細な構造を電子顕微鏡法にて原子レベルで調べた結果について報告する。

#### 2. 実験方法

CeO<sub>2</sub> 焼結体から透過電子顕微鏡用薄膜試料を Ar イオン研磨法により作製した。電子照射下「その場」観察実験は、収差補正器を搭載した高分解能走査透過電子顕微鏡(JEOL JEM ARM200F)および汎用電子顕微鏡(JEOL JEM-2100HC)を用いて行った。電子エネルギーは 80 keV~200 keV,照射強度は 1.5×10<sup>23</sup> e<sup>-</sup>/m<sup>2</sup>s とした。本研究の電子エネルギーでは Ce イオン副格子にはじき出し損傷は生じず、酸素イオン副格子にのみはじき出し損傷が生じる。高分解能走査透過電子顕微鏡観察には、高角度散乱環状暗視野(HAADF-STEM)法、および環状明視野(ABF-STEM)法を用いた。

#### 3. 結果及び考察

図1は、200 keVの電子照射により形成・成長する転位ループの時間変化を観察した結果を示している。照 射温度は300 K で、照射強度1.5×10<sup>23</sup> electrons/m<sup>2</sup>s である。照射開始後170秒で黒色のドット状コントラスト を呈する2~3 nmの欠陥集合体(転位ループ)が形成され、照射時間の経過とともに強い歪み場を伴ったダブ ルアーク型コントラストを呈する転位ループが成長している。図1b-f中に1および2で示した転位ループに着 目すると、照射時間の増加に伴って{111}面上を移動しながら成長していた。また、図1c-e中に3および4で 示した転位ループは、1および2の転位ループと同様に{111}面上を移動しながら成長し、照射開始後920秒 で両者が合体する現象が観察された。

図 2 は、200 keV 電子を照射した CeO2を[011]方向から観察した HAADF-STEM 像である。直径約 5 nm

の転位ループ(図 2 中に矢印で例示)が edge-on 条件で形成されており、周辺に強い歪を誘起していることが わかる。この転位ループを同一の方向から高倍率にて HAADF-STEM で観察した<110>方向から観察した 転位ループを含む領域の HAADF-STEM 像であり、転位ループは edge-on 条件で写真中央に形成し ている。自く見えるコントラストは、Ce イオン原子列を示している。図 2 より、転位ループには余分な Ce イ オン原子列は含まれていないことが分かる。さらに、格子像の解析から、転位ループが存在している箇所 の Ce イオン原子間距離は 4.9Å であり、(111)面の Ce イオン面間距離(3.5Å)に比べて著しく広がっている。 このため、転位ループ周辺の Ce イオン配列に大きな格子歪が誘起されている。以上の結果は、低エネル ギーの電子照射で形成される転位ループが{111}面に板状に集合した酸素イオンに起因する二次欠陥 であるという考察を支持している。



**Figure 1**. Sequential BF images for the nucleation-and-growth process of dislocation loops in CeO<sub>2</sub> under 200 keV electron irradiation at 300 K with an electron flux of  $1.5 \times 10^{23}$  electrons/m<sup>2</sup>s. The micrographs (a)-(f) were taken at an identical region with changing electron irradiation time.



**Figure 2**. HAADF STEM image of dislocation loops in  $CeO_2$  formed under 200 keV electron illumination during the observation at 300 K, showing dislocation loops on {111} planes at edge-on conditions (indicated by arrows).



**Figure 3**. An example of high resolution HAADF STEM image of a dislocation loop in  $CeO_2$  irradiated with 200 keV electrons.

# 物理的に無矛盾な渦電流計算機能を備えたプラズマ断面位置形状 再構築システム(CCS)の ST プラズマ位置形状制御への適用検討(III)

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、武智 学 九州東海大学 御手洗 修 九州大学 薛 二兵、劉 暁龍、浮田天志、中村一男

# 1. 目的

本研究は、九大応力研で平成20年度より既に実験を開始しているプラズマ境界力学実験装置 (QUEST: Q-shu University Experiment with Steady-State Spherical Tokamak, R=0.68m, a=0.40m, Bt=0.25T, 図1参照)における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、原子力機構JT-60におけるプラズマ断面位間形状の高精度平衡特で「コーシー条件面(CCS)法」を用いた面位をしていた面で、QUESTのプラズマ時間形状の間形状をしていたのである。



図 1:QUEST

る。特に、プラズマ変動期の再構築精度に大きな影響を及ぼす真空容器内渦電流の推定法について、物理的に無矛盾なモデルによる実時間計算方法の検討も行う。また昨年度から開始した、

センサー種類が増えた場合の精度向上について の検討、並びにQUEST装置での現制御システムと CCS法搭載制御システムの並列同時稼働手法に関 して、JT-60で実績のあるメモリ共有方式による 入力信号の共有方法の検討も検討時間の確保を 前提に継続する。

#### 2. 研究の具体的方法

研究対象としては、原子力機構JT-60でのCCS 法を用いた実時間プラズマ断面位置形状再構築 システムをプラズマ境界力学実験装置(QUEST) への適用に於いて、図2に示すようなQUESTの幾 何学体系を踏まえ、昨年度に引き続き以下の検 討を行う。①フラックスループ及び磁気プローブ を考慮したCCS法の最適化について検討する。② 幾何学体系を踏まえた実験データから、真空容器 などプラズマ周辺の導体を流れる渦電流の影響 の推定手法を検討する。③プラズマ実時間制御 システムや実時間プラズマ断面形状可視化シス テムの構築に向けた検討を継続する。特に、その 実現には磁気センサーからのデータ転送/共有 が鍵となるが、その有力な方法「メモリ共有方式」



図 2:QUEST のポロイダル断面図

に用いる「リフレクティブ・メモリボード」が、QUEST実時間制御システムを構成するNI(ナショナル・インスツルメンツ社)製のPXIバスシステムに対応可能であることを昨年度確認したことを受けて、実現に向けての技術課題の検討を可能な限り進める。

#### 3. 結果概要

#### 3.1 2種類の磁気センサーを用いたQUESTダイバータ配位プラズマ断面形状再構成

QUEST ( $B_t$  = 0.25 T, R = 0.68 m, a = 0.40 m) では球状トカマクプラズマの定常維持法の一方法として、OHプラズマにて高密度ダイバータ配位プラズマを生成し、EBW電流駆動により定常維持することを計画している。

磁気プローブ8本の増設により、これまでのフラックスループ21本と伴に2種類の磁気センサーを



用いることにより、真空容器渦電流の影響の考慮の精度が向上し、ダイバータプラズマ断面形状の高精度化が可能となった。また、渦電流については、図3の一番右に示すように作年度6種類だった。

たものを、8種類の一様電流に自由度を増 やして配置した。

これら磁気センサー及び渦電流を考慮し てCCS法に基づくQUESTプラズマの高精度 再構築を行った。

PF35-12内外直列ダイバータコイルを用 いて低三角度(キャンディ状)OHダイバータ 配位を形成し、PF35-1内側ダイバータコイ ルを用いて高三角度(D形)OHダイバータ 配位を形成した。ダイバータ配位プラズマは TASK/EQUコードを用いて磁場配位を計画 し、生成されたプラズマ境界の形状は2種類 の磁気センサー(磁束ループ、磁気プロー ブ)からの信号に基づいてCCS(コーシー条 件面)法[1]にて再構成した。その再構成結 果はダブルヌルダイバータ配位を示した(図





4)。また、その再構成結果をEFITコードによるフィッティング結果と比較検討した。

現状の OH プラズマには高エネルギー電子が存在し、非等方的圧力分布を有する可能性がある。その場合、通常の平衡解析は困難となるが、CCS 法は非等方的にもかかわらず、プラズマ形状を正確に再構成することが可能である[2]。

磁東ループに加えて、磁気プローブを真空容器内面に設置したので、CCS を磁気計測面に設置することが可能である。図 5 に、(ケース1)磁東ループ 21ch のみ、(ケース2)磁気プローブ 3ch 追加、(ケース3)EFIT による再構成磁気面を例として示す。センサーの増加は、渦電流の影響も、 求める自由度が上昇したことから精度の向上が図れることが判った。

さらに境界積分方程式を磁気センサー設置面に適用することにより、真空容器に流れる渦電流 および真空容器外に位置する PFC (ポロイダル磁場コイル)は、磁場及び磁束の計測面内での内 挿計算が良好であるという前提の下で、考慮する必要がなくなる。また、高周波電流駆動プラズマ において、閉磁気面外の開磁気面に存在するプラズマ電流の効果を、開磁気面上に仮想導体ま たは仮想 PFC を仮定することにより、計算することが可能となるかどうかについても検討したので次 節で述べる。



(左:磁束ループ21chのみ、中:左に磁気プローブ3ch追加、右:EFITによる再構成磁気面)

#### 3.2 仮想インベッセルコイルを用いたQUESTダイバータプラズマ形状再構成

QUESTでは球状トカマクプラズマの定常維持法のために、OHプラズマにてダイバータ配位を形成し、EBW電流駆動により定常維持することが計画され、PF35-12直列ダイバータコイルを用いたダブルヌル的なダイバータ配位とPF35-1内側ダイバータコイルを用いたD形ダイバータ配位について、2種類の磁気センサー(フラックスループ、磁気プローブ)を用いてダイバータ配位プラズマ断面形状をCCS法にて再構成出来るかどうかを確認することを意図した。

RF立上/維持プラズマに関しては、電流密度分布が閉磁気面より低磁場側にシフトしていることが推定され、一方、EFIT解析では、閉磁気面内に電流密度分布を仮定するため、電流密度分布は閉磁気面内で低磁場側にシフトするとともに、強磁場側に異符号の電流密度領域が現れることが判明した。

そこで、2種類の磁気センサー(FL, MP)信号により拘束条件を増した場合に、仮想インベッセル コイルを配置して、EFIT解析と組み合わせて、磁気面外電流の対処を行った。また、圧力分布の 異方性に依存しないCCS法を適用した場合の再構成を含め検討した。これらの検討結果を以下に まとめる。

(1)閉磁気面外に流れているプラズマ電流を仮想インベッセルコイルにて模擬して、閉磁気面内に 流れているプラズマ電流に関して平衡の式を解き、EFITにて解析した結果、以下が判明。

①仮想インベッセルコイルを仮定すれば、平衡の式を満足する閉磁気面が得られる。

②閉磁気面外に流れている電流を仮定しなければ、横長で、電流密度分布が低磁場側にシフトしたダイバータ配位で、閉磁気面内の強磁場側には異符号の電流密度領域が現れる。

- ③R=1.2m, Z=0mに仮想インベッセルコイルを設置すれば、外側ヌルのダイバータ配位が形成。
- ④EFIT解析においては、仮想インベッセルコイルの周りに閉磁気面プラズマができている。

⑤仮想インベッセルコイルにプラズマ電流の約30%の電流を仮定すれば、強磁場側における異 符号の電流密度領域が消滅す

る。

- (2)以下の方策の検討が重要である。

   閉磁気面外に流れる電流を考慮した電流駆動法を検討する必要がある。例えば、RFの入/切を繰返すことなどで高E電子による電流をバルクに移す必要がある。
  - ②オーム加熱コイルなどによりバル クプラズマを最初に生成する必 要がある。
  - ③高温壁を考慮した解析が必要で ある。また大断面プラズマを生成 する方策が必要である。
  - ④非円形度を上げるならば、不安定 性抑制のため高速応答電源が 必要である。
  - ⑤非円形度を上げなければ、大きな ダイバータコイル電流が必要とな る。
- (3)CCS法を用いる場合のポイントは以 下である。
  - ①CCS法では異方性圧力分布でも 解ける。但し仮想インベッセルコ イルの設置必要。
  - ②磁気センサー以外の計測データ と比較で検証する。軟X線カメラ 像、可視カメラ像、など。
  - ③強磁場側の異符号の電流密度領 域を無くなると期待される。





④正則化にチコノフ条件を課すことで、精度の向上が図れる。図6に結果を示す。内側ダイバー タ配位が再構築することに成功した。

# 3.3 CCS法を用いたQUESTプラズマ断面形状実時間制御用再構築に向けた制御システム構成

プラズマ実時間制御システムの構築に向け、磁気センサーからのデータ共有を「リフレクティブ・メ モリボード」で行うことで、QUEST実時間制御システムを構成することを目指した。しかし、作業時間、 コストなどの制約から今年度は実施しないこととし、別途次年度以降再度検討することとした。

# 4. まとめ ―今後の展開を期待して―

以上の検討結果から以下の成果が得られた。

- 従来のフラックスセンサーに加え、磁気プローブセンサーも加えて、渦電流を考慮したCCS法 によるプラズマ最外殻磁気面の再構成精度が一段と向上した。
- RF駆動によるQUESTプラズマの再構築のために、仮想インベッセルコイルを設置する試みを 行い、チコノフの正則化法による非適切性回避策を講じたCCS法により、内側ダイバータ配位 プラズマの高精度再構成が可能である事を示した。
- 今後は、さらに以上の成果を踏まえて以下の展開が期待される:
- QUEST実時間制御システムに、CCSによるプラズマ断面形状実時間再構築システムを実現 する。

#### 参考文献

- [1] K. Kurihara, "A new shape reproduction method based on the Cauchy-condition surface for real-time tokamak reactor control" Fusion Eng. Des., 51-52 (2002), pp. 1049-1057.
- [2] K. Nakamura, Y. Jiang, X. Liu, O. Mitarai, K. Kurihara, Y. Kawamata, M. Sueoka, M. Hasegawa, et al.: Eddy Current-Adjusted Plasma Shape Reconstruction by Cauchy Condition Surface Method on QUEST, Fusion Engineering and Design, Vol.86 (2011) 1080-1084.

#### 5. 関連文献

#### <今年度(H24年度)分>

- [a] <u>中村一男</u>, 劉 暁龍, 薛 二兵, 夏 凡, 御手洗 修, 栗原 研一, 川俣 陽一, 末岡 通治, 長谷川 真, 徳永 和俊, 図子 秀樹, 花田 和明, 藤澤 彰英, 松岡啓介, 出射 浩, 永島 芳彦, 川崎 昌 二, 中島 寿年, 東島 亜紀, 荒木 邦明, 福山 淳: 2種類の磁気センサーを用いた QUEST ダイ バータ配位プラズマ断面形状再構成, 第9回核融合エネルギー連合講演会、神戸国際会議場 (兵庫県神戸市、2012 年 6 月 28-29 日)、29A-26p。
- [b] <u>K. Nakamura</u>, X.L. Liu, E.B. Xue, F. Xia, O. Mitarai, K. Kurihara, Y. Kawamata, M. Sueoka, M. Hasegawa, K. Tokunaga, H. Zushi, K. Hanada, A. Fujisawa, K. Matsuoka, H. Idei, Y. Nagashima, S. Kawasaki, H. Nakashima, A. Higashijima, K. Araki, A. Fukuyama: Plasma Shape Reproduction with Two Kinds of Magnetic Sensors on QUEST, 27th Symposium on Fusion Technology, Liege, Belgium (Sept. 25, 2012) P2-60.
- [c] <u>中村一男</u>, 劉 暁龍, 薛 二兵, 夏 凡, 御手洗 修, 栗原 研一, 川俣 陽一, 末岡 通治, 長谷川 真, 徳永 和俊, 図子 秀樹, 花田 和明, 藤澤 彰英, 松岡啓介, 出射 浩, 永島 芳彦, 川崎 昌 二, 中島 寿年, 東島 亜紀, 荒木 邦明, 福山 淳: 仮想インベッセルコイルを用いた QUEST ダイ バータプラズマ形状再構成, 第29回プラズマ・核融合学会年会(クローバープラザ福岡県春日市 2012年11月27-30日)、30D40P。
- [d] <u>K. Nakamura</u>, H. Fujita, X.L. Liu, E.B. Xue, F. Xia, O. Mitarai, K. Kurihara, Y. Kawamata, M. Sueoka, M. Hasegawa, K. Tokunaga, H. Zushi, K. Hanada, A. Fujisawa, K. Matsuoka, H. Idei, Y. Nagashima, S. Kawasaki, H. Nakashima, A. Higashijima, K. Araki, A. Fukuyama: QUEST Divertor Plasma Shape Reproduction, Workshop on ST Seoul National Univ. (Jan. 14 16, 2013)

#### <H23年度分>

- K. Nakamura, Y. Jiang, X. Liu, O. Mitarai, K. Kurihara, Y. Kawamata, M. Sueoka, M. Hasegawa, et al.: Eddy Current-Adjusted Plasma Shape Reconstruction by Cauchy Condition Surface Method on QUEST, Fusion Engineering and Design, Vol.86 (2011) 1080-1084.
- K. Nakamura, X.L. Liu, M. Tomoda, T. Yoshisue, O. Mitarai, M. Hasegawa, K. Tokunaga, et al.: Effect of Shell Cut and Diagnostic Port on Stabilizing Characteristics of Vertical Position Instability on QUEST, APFA 2011, Guilin (2011) P1p2-34.
- K. Nakamura, X.L. Liu, T. Yoshisue, O. Mitarai, K. Tokunaga, M. Hasegawa, et al.: Venturini Method and Space Vector Modulation Method in Matrix Converter, ICEE2011, Hongkong (2011) A367.
- ・吉末竜也,中村一男,劉 暁龍,薛 二兵,長谷川 真,徳永 和俊,御手洗 修,他: QUEST プラズ マ制御のためのマトリクスコンバータの検討,電気関係学会九州支部連合大会,佐賀(2011) 01-1A-01.
- X.L. Liu, K. Nakamura, Y. Jiang, T. Yoshisue, O. Mitarai, M. Hasegawa, K. Tokunaga, et al.: Study

of Matrix Converter as a Current-Controlled Power Supply in QUEST Tokamak, Plasma Fusion Res., Vol.6 (2011) 2405137.

- Xue Erbing, Luo Jiarong, Liu Xiaolong, Kazuo Nakamura: Modeling of Vacuum Field in Start-up in EAST, ITC-21, Toki (2011) P1-54.
- K. Nakamura, X.L. Liu, E.B. Xue, O. Mitarai, K. Kurihara, Y. Kawamata, M. Sueoka, M. Hasegawa, K. Tokunaga, et al.: QUEST Shape Reproduction Based on CCS Method with Two Kinds of Magnetic Sensors, Plasma Conference 2011, Kanazawa (2011) 22P132-P.
- X.L. Liu, K. Nakamura, T. Yoshisue, O. Mitarai, M. Hasegawa, K. Tokunaga, et al.: Robust Control Design for Plasma Vertical Instability of QUEST, APFA 2011, Guilin (2011) P1p2-39.

<H22年度以前分>

- ・中村一男,姜 毅,劉 暁龍,御手洗修,栗原研一,川俣陽一,末岡通治,長谷川真,他: CCS法に基 づくQUESTプラズマ断面再構成に及ぼす渦電流の影響,第8回核融合エネルギー連合講演会, Takayama (June 11, 2010) 11B-10p.
- K. Nakamura, Y. Jiang, X. Liu, O. Mitarai, K. Kurihara, Y. Kawamata, M. Sueoka, M. Hasegawa, et al.: Eddy Current-Adjusted Plasma Shape Reconstruction by Cauchy Condition Surface Method on QUEST, 26th Symposium on Fusion Technology, Porto (Sept. 29, 2010) P3-158.
- ・中村一男,姜 毅,劉 暁龍,御手洗修,栗原研一,川俣陽一,末岡通治,長谷川真,他: QUEST における各種電流駆動時のCCS法による断面形状再構成,第27回プラズマ・核融合学会, Sapporo (Dec. 1, 2010) 01P54.
- X.L. Liu, K. Nakamura, Y. Jiang, T. Yoshisue, O. Mitarai, M. Hasegawa, K. Tokunaga, et al.: Study of a Matrix Converter for Plasma Vertical Position Control on QUEST Tokamak, ITC-20, Toki (2010) P2-69.
- ・中村一男,劉 暁龍,吉末竜也,御手洗修,徳永和俊,長谷川真,他:マトリクスコンバータにおけるVenturini法と空間ベクトル法, 電気学会半導体電力変換研究会,Kobe (Jan. 21, 2011) SPC-11-024.
- •K. Nakamura, et al., "Characteristics of SVD in ST Plasma Shape Reconstruction Method Based on CCS" Journal of Plasma and Fusion Research SERIES, Vol.8 (2009), pp. 1048–1051, Sep. 2009.
- •K. Nakamura, et al., "Eddy Current Effect on Plasma Shape Reconstruction Based on CCS Method in CPD and QUEST" Asia Plasma Fusion Association 2009, Festival City AUGA, Aomori, Japan, Oct. 27<sup>th</sup>-30<sup>th</sup>, 2009.
- ・中村一男,他,「CCS法によるSTズマ断面形状再構成における特異値分解の特徴」第25回プラズ マ・核融合学会 年会 予稿集 (2008).
- ・中村一男,他,「CCS法によるSTズマ断面形状再構成における特異値分解」第24回プラズマ・核融 合学会 年会 予稿集 (2007).
- ・姜 毅,他,「渦電流を考慮したCCS法によるQUEST球状プラズマ断面形状の実時間再構成」第13 回プラズマ・核融合学会年会(九州・沖縄・山口支部大会)予稿集 (2009).
- ・松藤伸治,他,「真空容器渦電流分布を考慮したCCS法によるCPDプラズマ断面形状再構成」第12 回プラズマ・核融合学会(九州・沖縄・山口支部大会)年会 予稿集 (2008).
- •F. Wang, K. Nakamura, O. Mitarai, K. Kurihara, Y. Kawamata, M. Sueoka, K. N. Sato, H. Zushi, K. Hanada, M. Sakamoto, H. Idei, M. Hasegawa, et al.: *Engineering Sciences Reports, Kyushu University*, Vol. 29, No. 1 (2007) 7–12.

(以上)

### H-C-N 反応性低温プラズマ牛成による炭素堆積膜成長と水素同位体吸蔵の制御

金沢大学理工研究域 上杉喜彦

1. はじめに

低Z材であるグラファイトは、長い間、核融合実験装置のダイバータ板および第1壁材として 用いられているが、炭素材特有の化学スパッタリングによる損耗や核融合燃料であるトリチウム の炉壁炭素材および炭素再堆積膜への物理・化学的吸蔵が問題視され、ダイバータ板材料として は高融点金属材であるタングステンに取って代わられようとしている.しかしながら、タングステ ン材は、水素・ヘリウム照射によるブリスタリングやバブル形成、高い熱衝撃による溶融・ドロッ プレット・クラックの発生等、将来の核融合炉ダイバータ板材料として使用するには問題点も多 いのが現状である、核融合炉ダイバータ材料開発研究の大半がタングステン材使用に向けて行われ る中で、本研究はグラファイト材の欠点とされるトリチウム吸蔵を制御・抑制する手法の開発を 行い、将来の核融合炉における炭素材使用の可能性を検討すること目的としている、決定的なダイ バータ材料ではないタングステン材の開発研究に加えて、本研究のような補完的材料基礎研究を 行うことは、OUESTにおけるプラズマ-壁相互作用研究に大きく貢献するものである.

#### 直流アーク放電による不純物導入実験

#### 2-1 実験装置

アーク放電により不純物導入実験は、Heliotron-DR 装置において行った.プラズマは定常電力:3. 3 kW, 周波数: 13.56, および 27.12 MHz の高周波により生成した. また, 弱い閉じ込め磁場と してヘリカル磁場 200 G. トロイダル磁場 40 G を印加している. アーク放電には同軸型炭素電極 (内部電極外形:12 mm. 外部電極内径:18 mm)を用いて,電極間に直流電圧(最大電圧 400 V) を印加し約20Aでのアーク放電による炭素不純物供給を行った.

#### 2-2 実験結果

図1に炭素電極を用いたアーク放電時の画像、図2にアーク放電領域の発光スペクトルと水素 / メタンプラズマ放電時にメタンガス導入部の発光スペクトルの比較を示す. アーク放電中には 強い C,の分子線の発光が観測されており,主に炭素粒子として放出されていることがわかる.ま

た、観測されたスペクトルには連続スペクトル成分も含まれていること から、黒体輻射温度を評価したところ約2.900 K となった、実験後にシ リコンサンプル上の堆積膜の膜厚をエリプソメータを用いて測定したと ころ、約10nmの膜ができており、アーク放電による炭素不純物供給で もメタンガス導入時と同等の炭素膜の成長が確認できた。<br />
図2に質量分 析器を用いてアーク放電およびメタンガス導入時の排出ガス分析を行っ た結果を示す.アーク放電時にもエチレン (C,H<sub>4</sub>) 等の炭化水素が観測さ れている.



2-3 今後の予定

Intensity (a.u.)



図1 炭素電極アーク放電

Heliotron-DR 装置を用いた炭素電極アーク放電により水素プラズマ中への炭素不純物導入実験を 行い、炭素堆積膜の成長を確認した.今後、重水素中での同様の実験やタングステンなどの高融 点金属電極を用いたアーク放電により金属不純物導入実験を行う予定である.

### 3. 低温重水素プラズマ中への窒素導入による炭素堆積膜成長抑制

本研究では,同様の装置を用いて核融合炉における壁周辺プラズマでの不純物膜堆積,水素同 位体吸蔵に関する知見を得るため,重水素/メタンプラズマを試料へ照射する.この条件下にお いて窒素添加による炭素膜堆積抑制効果およびダスト生成抑制効果を調べた.

#### 3-1 実験装置

本実験でのプラズマ照射の実験条件は、電力が定常 2.3 kW、ガス流量は重水素が 20 sccm、メタンは 1 sccm とした.動作ガス圧は P<sub>f</sub>~0.64 Pa で、生成したプラズマの電子温度は 7-10 eV、電子密度は (0.5-1.4)×1016 m<sup>-3</sup> である.閉じ込め磁場としてヘリカル磁場 200 G、トロイダル磁場 40 G を印加した.照射台には、外部から温度制御を行うために熱電対とヒーターを取り付けた.試料にはシリコンを用いた.評価方法として、分光観測と四重極型質量分析、またプラズマ照射後の試料に対しては走査型電子顕微鏡とエリプソメータ、触

針式段差膜厚計を用いた.

# 3-2 実験結果

図4に重水素/メタンプラズマおよび重水素/メタ ン/窒素プラズマの質量分析結果を示す.メタンを導 入しているのに mass=15 が増加しないのはメタンの炭 素原子がプラズマ中にある水素に比べて多量にある重 水素と結合して CD<sub>3</sub>や CD<sub>4</sub> などになるからだと考えら れる. 窒素添加後は NH, CN や DCN 分子などの非凝集 性分子が増加している.図5に重水素 / メタン / 窒素プ ラズマの分光観測結果を示す. 揮発性の CN や NH 分子 の強い発光が確認できた. CN, NH 分子などの生成は水 素 / メタン / 窒素プラズマ実験でも観測されており、こ れら非凝集性分子の生成により炭素膜堆積の抑制をもた らすと考えられる.図6に軽水素プラズマ中への窒素導 入時の炭素膜厚と非凝集性分子発光の一例として CN 分 子線発光強度の窒素導入割合依存性を示す.水素ガスに 対して数%の窒素を添加することで強い炭素膜堆積の抑 制効果があることが分かる。また、炭素膜成長に対して 強い温度依存性があることも初期実験で判明しているこ とから今後より詳細な実験を行う予定である。

#### 4 まとめと今後の計画

重水素プラズマ中への窒素導入による炭素膜堆積お よび重水素吸蔵に関する実験の着手した.また、メタン ガスに代わる炭素不純物導入法として、同軸炭素電極 を用いたアーク放電による炭素不純物導入試験を行い、 安定に炭素不純物の導入が行えることを確認した.今 後、タングステン電極等の金属電極を用いたアーク放 電により金属不純物導入試験を行うとともに各種不純 物堆積膜中への重水素吸蔵特性を調べるとともに、窒 素ガス導入による堆積膜中への吸蔵抑制効果と重水素 を含む非凝集性分子の炉外排出特性を明らかにする 予定である.







微量イットリウム添加がバナジウム合金のイオン照射硬化挙動に及ぼす影響

核融合科学研究所 長坂琢也

1. 目的

核融合科学研究所では、低放射化バナジウム合金の高温強度と耐照射脆化特性をさらに 改善するため、微量Y添加をした先進的なバナジウム合金の試作開発を行っている。これ までに、Y添加で酸素不純物による固溶硬化を低減できることが分かっている。酸素は照 射欠陥と相互作用して照射硬化を促進させる元素であるため、これを微量Y添加で制御で きれば照射硬化を軽減できると期待される。一方、Y添加で強度は低下するが、それはCr 量の増量で補うことが可能であることも明らかになってきた。

材料の使用温度下限を定めるのは比較的低温(400~500℃)での中性子照射脆化であり、 上記の新合金についても従来のバナジウム合金と比較するために照射データを取得するの が急務である。中性子照射試験は試験体積が限られ、また照射の機会も少ないために、照 射量や照射温度等の照射条件を系統的に変化させた試験が困難である。一方、九大応力研 の高エネルギーイオン発生装置は、短時間で大きな材料損傷量を与えることができるため に、試験条件を系統的に変化させた照射試験が可能となる。ただし、材料損傷が試料表面 の1µm以下に限られること、短時間に大きな損傷を与えるために照射損傷組織発達が変化 するため、得られた照射データからバルク材の中性子照射特性を予測するには、系統的な 実験とモデリングによって照射損傷メカニズムを理解する必要がある。

本研究では、九大応力研の高エネルギーイオン発生装置を用いて、微量 Y 添加バナジ ウム合金に重イオン照射実験を行い、低温での照射脆化の主因となる照射硬化とそのメカ ニズムを、微小押込みと電子顕微鏡観察による照射損傷組織観察から明らかにする。 2.実験方法

大学共通材料である V-4Cr-4Ti 合金(NIFS-HEAT-2)及び、これを基本組成として微量 Y 添加等により試作した合金試料を用意した。試料組成を表1に示す。今年度は V-4Cr-4Ti-0.0190 (NIFS-HEAT-2)及び V-4Cr-4Ti-0.15Y-0.00900 に対し、九大応力研の高エネルギー

Code	Cr	Ti	Y	С	Ν	0	0濃度
V-4Cr-4Ti-0.019O (NH2)	4.11	4.15	< 0.002	0.025	0.009	0.019	低
V-4Cr-4Ti-0.051O	4.40	4.51	< 0.002	0.014	0.015	0.051	高
V-4Cr-4Ti-0.15Y-0.011O	4.51	4.59	0.09	0.011	0.013	0.011	低
V-4Cr-4Ti-0.15Y-0.00900	4.23	4.17	0.11	0.011	0.009	0.0090	低
V-4Cr-4Ti-0.15Y-0.27O	3.87	3.99	0.06	0.010	0.018	0.27	高
V-6Cr-4Ti-0.15Y-0.0095O	6.21	4.16	0.08	0.013	0.011	0.0095	低
V-6Cr-4Ti-0.15Y-0.089O	6.81	4.10	0.08	0.0080	0.016	0.089	高
V-10Cr-4Ti-0.15Y-0.00980	9.87	3.72	0.18	0.011	0.0050	0.0098	低

表1 V合金の組成

イオン発生装置を用いて 0.1~10 dpa の 3MeV Cu イオン照射を行った。照射 温度は 200℃である。照射後の試料に ついて、核融合研の微小押込み試験機 で表面の照射硬化を測定した。九大応 力研の電解研磨装置で電子顕微鏡試料 を作製し、透過電子顕微鏡で表面の照 射損傷組織の観察を行った。

3. 結果と考察

図1はイオン照射後の表面の押込 硬さを示す。横軸は押込み深さである。 イオン照射試料では、表面の約1µmの 領域のみが照射損傷を受けているため、 押込み深さが大きい場合(押込み深さ 1 µm 以上)には非損傷領域の影響が大 きく、照射による硬さの変化は小さか った。一方、押込み深さ 0.6~0.8 µm 以 下から0.2 µm までは明確な照射硬化が 確認された。1 dpa と 10 dpa での照射硬 化の違いは大きくなかった。Y 添加合 金 (V-4Cr-4Ti-0.15Y-0.00900)の方が 無添加合金(V-4Cr-4Ti-0.019O)より も照射硬化が小さいことが示唆された。 図2に照射損傷組織を示す。数 nm の サイズの高数密度 (~5×10<sup>22</sup> m<sup>-3</sup>程度) の照射欠陥が観察された。Y 添加合金 と無添加合金の間でサイズと数密度の 大きな違いはなく、上記の Y 添加によ る照射硬化の抑制と、微細組織発達の 相関についてはさらに詳細な分析と検 討をすることが今後の課題である。

4. 成果報告

(1) 宮澤健, 長坂琢也, 菱沼良光, 室賀 健夫, 渡邉英雄, "イットリウム添加 バナジウム合金 V-4Cr-4Ti-0.15Y の照 射硬", プラズマ・核融合学会第29回 年会, 2012 年 11 月 27 日~ 30 日, ク ローバープラザ, 福岡県春日市





図 2 200℃、1 dpa 照射後の照射欠陥組織(暗 視野像)

プラズマ照射によって金属材料に注入された水素の蓄積とその放出機構の解明 九州大学・総合理工学研究院 大塚 哲平

【目的】 核融合原型炉の第一壁候補材料である低放射化フェライト・マルテンサイト鋼(F82H)には タングステン(W)を被覆することが検討されている。このため、燃料である放射性水素同位体トリチ ウムがW被覆材およびF82H基板にどのように蓄積されるのかを明らかにすることは安全性確保の観点 から重要である。前年度の研究では、W 被覆 F82H 鋼にトレーサーレベルのトリチウムを含んだ水素を 注入し、その注入された水素の深さ分布をトリチウムイメージングプレート(TIP)法を用いて測定す ることにより、W 被覆層および F82H 基板への水素進入機構を明らかにした。本年度は、W 被覆層およ び F82H 基板中に進入した水素が真空加熱によりどのように放出されるのか、その放出機構を明らかに することを目的とした。

【実験】 大気圧プラズマ溶射 (APS) 法または減圧プラズ マ溶射 (VPS) 法によって、W 粒子を F82H 基板 (2.6 mm 厚さ) 上に 1 mm 厚さになるように積層させたものを試料 (3.6 mm 厚さ) として用いた。以後、APS-W/F82H および VPS-W/F82H と呼ぶ。溶射に用いた平均 W 粒子径は VPS-W の場合 17 µm および APS-W では 50 µm であった。また、作 製された W 被覆層の見かけの空隙率は前者が 0.6 %であり、 後者が 6 %であった。

前年度において、図1に示すように、トリチウムを含んだ 水素(T/H=1.3 x 10<sup>-4</sup>)のDCグロー放電プラズマによって、 試料のW被覆層表面にトリチウムを注入した。注入温度は 453 K または533 K、注入時間は2時間とした。放電は、水 素ガス圧力2.6 mPa、DC電圧400Vで行った。放電終了後、 試料を233 K まで速やかに冷却し、トリチウムのその後の移 動を防いだ。本年度は、放電プラズマ注入と同じガス圧力、 温度でトリチウムを含んだ水素ガスに曝露し、試料中に水素 を吸収させた試料も用意した。つぎに図2に示すように、ト



図 1 DC グロー放電による試料への水 素(トリチウム)注入方法の概略



図 2 TIP 法における試料と TIP との配 置状況の概略

リチウム入射表面に対して垂直断面を切り出し、この断面のトリチウムβ線強度分布を TIP 法により測 定することにより、W 被覆層および F82H 基板中の入射方向へのトリチウム深さ分布を求めた。また、 放電プラズマによりトリチウムを注入した試料を 673 K および 873 K で 10 分間、真空中で加熱し、試 料中のトリチウムを放出させた後で、トリチウム深さ分布を調べた。

【結果・考察】 図3に、プラズマ注入またはガス吸収によって APS-W/F82H 中に蓄積したトリチウムの深さ分布を示す。453 K でプラズマ注入した場合、APS-W 被覆層の表面近傍に極めて高濃度のトリチウムが偏在しており(表面近傍の偏在成分)、これより深い領域では被覆層中にほぼ均一に分布していた(均一分布成分)。また、F82H 基板中ではトリチウム濃度が深さ方向に指数関数的に減衰しており、トリチウムが拡散進入していることが示唆された。573 K でプラズマ注入した場合には、APS-W 被覆層

の表面近傍の偏在成分は見られず、均一分布成分の みが観察された。F82H 基板では、473 K での注入時 に比べて、より深くまでトリチウムが拡散進入して おり、その濃度プロファイルが平坦になっていた。 同じ温度・圧力条件でガス吸収させた場合には、 APS-W 被覆層では均一分布成分しか見られず、その トリチウム濃度はプラズマ注入したものに比べ、約 半分程度であった。

図 4 は 573 K でのプラズマ注入によって VPS-W/F82H に蓄積したトリチウムの深さ分布が真 空焼鈍によってどのように変化したのかを示してい る。図中、673 K で真空焼鈍した場合、VPS-W 被覆 層中のトリチウム濃度分布は変化していないが、 F82H 基板からはほぼ全てのトリチウムが放出され たことがわかった。873 K で真空焼鈍すると、VPS-W 被覆層中のトリチウム濃度はプロファイル形状を保 ったまま、1/3 程度にまで減少した。

図5に、多孔質なW被覆層およびその基板への水 素(トリチウム)進入・蓄積および放出機構の概念 図を示す。図中(a)は、放電プラズマから高いエネル ギーをもったトリチウムがW被覆層表面に入射し た様子を表している。W被覆層の表面近傍の偏在成 分は、高エネルギーをもつ多量の水素(トリチウム) が入射することにより、表面近傍に欠陥が生成し、 そこに水素が捕獲されたことによって生じたと考え



図 3 プラズマ注入法およびガス吸収法によっ て APS-W/F82H 中に蓄積したトリチウム の深さ分布



図4 真空加熱放出による VPS-W/F82H 中のトリ チウム深さ分布の変化



図 5 多孔質タングステン被覆層および F82H 基板への水素(トリチウム)進入・蓄積および放出機構の 概念図

られる。また、均一分布成分はガス吸収のみによっても生じたことから、プラズマ注入された大部分の 水素はガス状となって、W 粒子間の空隙を通って内部に進入し、被覆層全体にほぼ均一に分布し、空隙 表面(W 粒子表面)またはW 粒子内部に捕獲されたものであろう。そうして、ガス状水素はW 被覆層 と F82H 基板との界面に到達し、基板中に原子状となって溶解し、拡散によって深さ方向に進入したと 考えられる(図 5(b)参照)。図 5(c)は、いったんW 被覆層や F82H 基板中に蓄積した水素が、進入・蓄 積機構とは逆の過程を経て放出される様子を表している。本実験結果より、W 被覆層に捕獲された水素 は放出されにくく、なかでも表面近傍に偏在した成分は均一分布成分よりも強く捕獲されており、真空 加熱放出によっても取り除くことが難しいことが示唆された。
核融合プラズマのマルチスケール・マルチフィジックスシミュレーション研究

# 日本原子力研究開発機構 矢木雅敏

目的

核融合プラズマにおいては、時間尺度及び空間尺度の異なる諸現象(MHD、微視的乱流等)が定性 的に異なる空間領域に跨って相互作用し、その結果として炉心の閉じ込め特性が決まる。それを総 合的に理解し、予測・制御するためには、外部情報入力を伴う、輸送、MHD、乱流の相互作用を考 慮したグローバルシミュレーションが必要であると認識されつつある。本研究ではプラズマ周辺に おける非線形 MHD 応答、L/H 遷移現象、非局所輸送、直線装置における乱流現象等、実験で観測さ れているさまざまな複合・非線形現象を解明するためのシミュレーション研究を行う。これらの現 象はマルチスケール・マルチフィジックスであるため、モデリングや数値スキームの開発も同時に 必要となる。これまで九大で開発されてきたシミュレーションコードをもとにモデルの拡張やコー ドの改良を行う。今年度は、非局所輸送のシミュレーション研究に進展が見られたのでその結果に 関して報告する。

# 研究成果

LHD における ECRH 印可実験ではマクロスケールの揺らぎが観測されており、非局所輸送の候補と考 えられている[1]。またペレット入射実験でも非局所輸送が観測されており[2]、その物理機構の解 明は過渡輸送現象を理解する上で重要であると考えられる。解析モデルとして積分型非局所フラッ クスモデルを用いた先行研究[3,4]が存在するが、いづれも1次元モデルとして定式化されている。 本研究では円柱座標系における4場簡約化 MHD モデルを用いた非線形シミュレーションにより、定 常状態に達した抵抗性バルーニング乱流中に周辺密度ソースを印可し、プラズマの応答を観測する。 ある時間帯で周辺密度ソースを切り、その後の密度分布の時間発展を追跡する。これによりペレッ ト入射実験を模擬し、密度発展方程式の対流微分項に起因する非局所輸送を解析する。4 場簡約化 MHD モデルは、渦方程式、オーム則、磁力線方向のイオンの運動方程式、密度の発展方程式から構 成され規格化はポロイダルアルフベン時間 τ<sub>ph</sub>とプラズマの小半径 a を用いている[5]。密度の発展 方程式に以下のようなソース項を導入する。

 $\frac{\partial n}{\partial t} + [\phi, n] = \beta [r \cos \theta, \phi - \delta_e n] + \beta (\delta \nabla_{//} j - \nabla_{//} v) + D \nabla_{\perp}^2 n + S_n$ ここで  $j = -\nabla_{\perp}^2 A, \delta = c / (a \omega_{pi}), \delta_e = \delta / (1 + \tau), \tau = T_i / T_e$ 。 シミュレーションにおいて  $D = 10^{-6}$  を用いた。従って衝突による拡散時間は  $\tau_{coll} = 10^6 \tau_{ph}$  と評価される。ソース項は

 $S_n = S_{AMP} \exp(-(r^2 + r_s^2 + 2rr_s \cos\theta)/2\Delta)$ で与えた $(r_s = 0.8, \Delta = 0.1)$ 。図1に内部エネルギーフーリエ成分の時間発展を示す。支配的な(0/0)モード(それぞれポロイダルモード数/トロイダルモード数)は磁気面平均された密度を表している。(1,0)モードはいわゆる対流胞であり、(11, -3), (12, -3), (13, -3)等は印可ソース近傍の q=4 面で不安定化したバルーニングモードを示し

ている。t=900 において定常乱流状態に達した後、t=980 において密度ソースを印可し、その後 t=1200 においてソースを切った。その後の密度分布の発展を追跡した。図2 に密度分布の時間発展



を示す。シミュレーションにおいては、t=1200で 密度ソースを切ったが、その後しばらくは周辺で 密度が上昇し、t=1250を境に周辺密度は急激に減 少する。t=1350においてr=0.4付近に非局所輸送 が発生しているのがわかる(実線)。t=1350で卓越 しているモードを調べた結果、(m=1, n=0)モード (m:ポロイダルモード数、n:トロイダルモード数) が渦巻き状の揺らぎ構造を形成することが判明し た。図3にt=1350での(1,0)モードのみから構成 される密度揺らぎの等高線(z=0)を示す。(1,0)モ ードが非局所輸送の担い手と考えられ、2次元の 渦巻き構造がプラズマのコア-領域と周辺領域を

連結することを発見した。今後は(1,0)モードの励起機構を解析する予定である。



[1] S. Inagaki, et al., Phys. Rev. Lett. 107 115001(2011), [2] N. Tamura, et al., Phys. Plasmas 12 110705(2005), [3] T. Iwasaki, et al., J. Phys. Soc. Jpn. 68 478(1999), [4] G. Dif-Pradalier, et al., Phy. Rev. E 82 025401(2010), [5] M. Yagi, et al., Nucl. Fusion 45 900(2005).

# 研究組織

矢木雅敏(原子力機構)、西村征也(核融合研)、杉田暁(中部大学)、徳永晋介(RIST)

# 核融合炉の中性子照射環境に対応した高熱流束機器用タングステン材料の 高熱流束負荷下の挙動

東北大学大学院工学研究科 長谷川 晃

# I.目 的

将来の核融合炉では、第一壁・ブランケットやダーバータの冷却管のアーマ材として、熱及びスパッタリング 特性に優れたタングステン(W)を使用する計画が進められている。このタングステ材は、プラズマからの熱・プラ ズマ粒子負荷を受けると共に、核融合反応で発生した中性子の照射を受け、照射損傷による脆化等が発生す る。我々は、中性子照射特性を考慮した高熱流束機器用タングステン合金を開発することを目的として、これま で実験室規模で作製されたW材料を用いて、中性子照射やその後の評価によって得られた成果を基に、核融 合炉の使用環境により適した新しい合金を設計し、さらに耐照射性の向上が予測される熱・機械的処理を行い、 各種の評価用の試料を作製すると共に、作製した試料の評価を進めている。本研究では、高熱流束機器材料 に求められる諸特性の内、高熱負荷特性、熱疲労等の特性を評価し、材料開発のための基礎データを取得す ることを目的とする

# Ⅱ.実験方法

実験には ITER grade W (IG-W(a)) 及びこの再結晶材 (IG-W(b))を使用した。また、1500℃で1時間保持す ることにより再結晶化させた K doped W とW-1wt%La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> についても実験を行い比較した。K doped W は、製造 過程の熱処理により K が揮発しバブルを形成し、これにより分散したバブルが粒界や転位の動きを阻害し高温 強度が向上する。また、W-1wt%La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> は La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粒子を分散させることで、粒界すべりが抑制されると共に組織が 安定し、高温強度が向上している。

本実験では、九州大学応用力学研究所の電子ビーム熱負荷実験装置を使用し、熱源として電子ビームを用 いた。今回用いた試料サイズは 10mm x10 mm x 1mmt で、実験前に電解研磨を行った。試料は Cu 製の強制水 冷却を行っている試験台に 5mm φ の孔が開いた W 製の押さえ板で機械的に固定した。試料の表面温度は、二 色放射温度計を用いて測定した。電子ビームの加速電圧は 20kV でビームサイズの径は約 3mm φ で、2 秒間の 照射で試料表面が 1300℃程度に達するようパワーを調節した。2 秒間のビーム照射の後、冷却時間として 7.5 秒間保持することで、1 サイクル 9.5 秒とした。このようなサイクルを、各試料に対し計 200 回繰り返した。また、損 傷過程を確認するため適宜取り出し、走査型電子顕微鏡 (SEM)を用いて表面観察を行った。

# Ⅲ. 主な結果および考察

ビーム電流を調節することで最高到達温度が約 1300℃の繰り返し熱負荷を与えることができた。表面温度は 照射から2秒後に最高温度に達し、照射終了と共に下降し、表面温度は定常状態になることはなかった。

図1には、それぞれの試料について照射実験後試料を取出し表面観察を行った SEM 像を示した。熱負荷 を 20 回繰り返すと、各試料で変形が生じた。IG-W(a)では転位の移動により生じたすべり線が確認できた。これ は、温度が上昇し降伏応力が低下することにより、熱応力により塑性変形が起こり、これにより表面にすべり線が 発生し粗面化したものと考えられる。熱応力計算では、ビーム照射部分では、加熱中に圧縮応力、冷却中に引 っ張り応力が働くことがわかった。一方、IG-W(b)では IG-W(a)よりも、表面は粗面化しており、結晶粒内は多くの すべり線が見られ、結晶粒界においても凹凸が生じている。これは、IG-W(b)は再結晶材であるため、IG-W(a)と 比較し柔らかいため粒内の表面形状変化が大きいものと考えられる。また、再結晶により粒界が弱くなっており、 このため、粒界における変形も大きいものと考えられる。

K doped W では結晶粒界の損傷は IG-W(b)と同程度見られたが、粒界内のすべり線は少なかった。一方、W-1wt%La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>では、他の試料と同様な損傷が発生しているが、損傷範囲は狭い領域に限られている。

70 サイクル後は、W-1%wtLa<sub>2</sub>O<sub>3</sub>では損傷範囲が拡大し、また、La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の粒子が欠損し、孔となっている個所が 多く発生していた。さらに、すべり線が見られた箇所や La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>が欠損した箇所に亀裂が生じていた。これは W-1%wtLa<sub>2</sub>O<sub>3</sub>では繰り返し熱負荷により La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の粒子が欠損したものと考えられ、さらに繰り返し熱負荷が進み 応力集中などが発生し亀裂が拡大していったものと考えられる。従って、繰り返し熱負荷についての耐性は少な いことも予想される。200 サイクル後では、IG-W(a)、IG-W(b)では損傷が急激に進み、表面の凹凸は激しくなり、 結晶粒内、結晶粒界に亀裂が発生していた。また、W-1wt%La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>では 70 サイクル後に確認された亀裂が進展 し、剥離が発生している箇所が見られた。しかし、K doped W では合計 200 サイクルの熱負荷をかけても亀裂 や剥離などは発生しななかった。



図1 繰り返し熱負荷実験後の試料表面の SEM 像

IV. まとめ

各種W材に対して、電子ビーム熱負荷装置を用いて熱負荷実験を行った。非定常熱負荷の繰り返しによりW 材表面には粗面化等の損傷が進行する。電子ビーム照射中の圧縮応力と照射後の引張応力が繰り返し生じ、 繰返し熱負荷の回数が増加すると熱疲労による損傷が進むものと考えられる。

# 九州大学・応用力学研究所 炉内構造物の経年変化に関する研究集会

研究代表者 京都大学原子炉実験所 義家敏正 研究協力者 九州大学応用力学研究所 渡邉英雄

1. はじめに

加速器を含めて原子力材料の特徴は、放射線場で使われることである。特にエネルギーの高い量子ビ ームの照射は材料に多様な変化を引き起こす。ビームによりエネルギーが付与された領域は、短時間で 局所的にはエネルギー最小の状態になるが、材料全体としては非平衡状態である。原子力材料の構造変 化は、多くの場合原子の弾き出しによって引き起こされる。従って必然的に点欠陥過程を含む。点欠陥 過程は熱活性化過程であるので、照射温度、損傷速度、材料中の既存欠陥、形状等の影響を受ける。原 子炉であれ核融合炉であれ、炉内構造物はこのような状態に長期間曝される。そのための経年変化の解 明は重要である。一昨年の福島原発事故以降、中性子照射脆化による鉄系構造材料の劣化が新聞等で 大きく報道されており、劣化プロセスの社会的な関心も高い。従って本研究集会では、炉内構造物の経 年変化の解明を中心とし、現在までの知見を集約することを目的とした。このような知見は将来の核融 合炉設計にも寄与すると期待される。

中性子照射環境下における材料研究会は、平成 20, 21 年度に応用力学研究所・研究集会とし開催さ れ非常に好評であった。特に平成 21 年 7 月 9-10 日において実施された研究会では、学外 29 名、学内 10 名の参加者を集め開催された。発表論文件数 19 件であり、実験から理論・計算、更に動力炉の現場 での高経年化対策まで幅広い内容で、2 日間に亘り活発な発表と意見交換がなされた。本年度の研究会 はこれを引き継ぐものである。この研究集会で発表・討論された内容は、照射損傷一般に当てはまる現 象であり、原子炉材料だけでなく、核融合炉材料や他の照射効果が問題となる材料、例えば核破砕中性 子源のターゲット材料の開発にも貢献することが期待される。

2. 研究集会概要

今回の研究集会は平成24年7月24日、25日に亘って開催された。参加者は学外15人、学内36人 である。両日で17件の研究発表があり、活発な質疑応答や意見の交換がなされた。理論・計算から実 験、さらに実機の現場での高経年化対策まで幅広い内容であった。大学院生も含めた若い研究者の参加 が多いことが特色であった。また石野栞東京大学名誉教授、小岩昌宏京都大学名誉教授及び井野博満東 京大学名誉教授の参加と発表があった。若い研究者たちが、定年後も引き続いて活発な研究活動をして いるこれら大家の方々と交流する機会を持てたことは、大きな刺激になったと思われる。

# 3. 講演概要

# 3.1 圧力容器照射脆化関連(1)

原子炉圧力容器鋼は原子炉の重要な構造物であり、その脆化が原子炉の事実上の寿命を決定する。こ のセクションでは石野栞東京大学名誉教授の座長で、まず義家敏正京都大学原子炉実験所教授から本研 究集会の申請者として挨拶があった。引き続いて5件の講演があった。最初の講演は渡邉英雄九州大学 准教授で、「玄海原発1号炉照射脆化に関するこれまでの経緯と九大での取り組み」というタイトルで 発表がなされた。最近の九州電力玄海原発1号炉の高経年化を巡る経緯、原子炉内監視試験片のDBT Tの上昇にも関わらず、材料の照射欠陥構造からは上昇を示唆する結果が得られていないという重要な 問題点が指摘された。同准教授は保安院の意見聴取会のメンバーであり、非常にインパクトのある講演 であった。発表の最後に現象の詳細な理解のためのスキームが提示された。次に井野博満東京大学名誉 教授と小岩昌宏京都大学名誉教授により「玄海原発1号炉圧力容器の照射脆化および現行予測式につい ての考察」という講演がなされた。井野教授は玄海原発1号炉の問題点を渡邉准教授とは異なる視点か ら述べた。小岩教授からは予測式が機構論に基づいていないとの厳しい指摘が行われた。引き続いて永 井康介東北大学金属材料研究所教授により「3次元アトムプローブ及び陽電子消滅によるフィンランド Loviisa炉のナノ組織解析」という講演がなされた。国内監視試験片は大学では扱え ないため、外国のフィンランドのVVER-440炉の監視試験片を用いた貴重なデータの紹介があった。 義家敏正京都大学原子炉実験所教授により「照射下における原子炉圧力容器鋼の点欠陥挙動に関する考 察」という講演がなされた。内容のない発表でありあまり興味が持たれなかった。鳴井実東北大学金属 材料研究所研究員により「大学における研究炉を用いた材料照射と今後の予定」という講演がなされた。 東北大学金属材料研究所量子エネルギー材料科学国際研究センターにおける過去の原子炉照射装置改 良の歴史と実績及び今後の開発研究についての講演であった。

# 3.2 機械的特性と照射損傷基礎

INSS福谷耕司研究員の座長で3件の講演がなされた。青野雄太九州大学工学研究院准教授により 「PTS評価におけるき裂深さの影響について」という講演がなされた。脆化による破壊を評価するた めの破壊靱性値と応力拡大係数についての計算と玄海1号炉への応用が話された。材料照射効果の専門 家があまり知らない事柄であり、参加者全員がその重要性を認識した。森下和功京都大学エネルギー理 工学研究所准教により「燃料被覆管材料の酸化プロセスのモデル化」という講演がなされた。燃料被覆 管酸化メカニズムを理解するために、第一原理計算によってZr酸化膜中の酸素拡散過程を理論的に評価 したものであり、原子炉の安全性に関連する重要な内容であった。石野栞東京大学名誉教授により「衝 突カスケードのMD計算における電子的エネルギー損失の影響」という講演がなされた。従来考慮がな されていない電子的エネルギー損失の重要性を提示し、今後のMD計算の方向を示したものである。

# 3.3 照射損傷基礎と圧力容器照射脆化関連(2)

永井康介東北大学金属材料研究所教授の座長で4件の講演がなされた。大澤一人九州大学応用力学研 究所助教により「BCC金属中の水素と空孔濃度の熱力学計算」という講演がなされた。今まで核融合材 料として重要なタングステン空孔に捕獲される水素の個数を第一原理で計算していたが、タングステン 以外のBCC金属も同じような計算をすることで全体像が却って分かるようになったことが示された。岡 弘北大工学研究科大学院生により「重照射した改良SUS316鋼における微細組織と機械強度の相関」 についての講演がなされた。中性子照射データの豊富な改良SUS316鋼(PNC316鋼)を対象に、照射挙動 のモデル化のための微細組織と機械強度のミクローマクロ相関評価を研究したものである。村上健太東 京大学大学院助教により「照射欠陥の移動と集合に対する溶質原子の影響」という講演がなされ、2つ の課題、銅を含まずニッケルとマンガンを含む溶質原子クラスタが、溶質原子のどのような形態の移動 によるものかを明らかにすることと、溶質原子クラスタの発達において、シリコンの効果を明らかにす ることについて発表された。Kai Lu福井大学工学研究科院生により「Prediction of lower bound facture toughness in the transition temperature region by T33-stress」というタイトルで、TSTのための Jcの予想についてFEAを用いた計算結果が講演された

# 3.4 圧力容器照射脆化関連 (3)

義家敏正京都大学原子炉実験所教授が座長として5件の講演がなされた。藤井克彦原子力安全システ ム研究所研究員により「Cu クラスタ形成に対する応力下照射の影響」という講演がなされた。原子炉容 器鋼の照射脆化に対する外部応力の影響とそのメカニズムを解明し、照射脆化予測の高度化に資するた めに、Fe-Cuモデル合金に対して単軸引張応力下でイオン照射を行い、Cuクラスタ形成に対する応力の 影響を3次元アトムプローブでミクロ組織を観察し、クラスタ形成による照射硬化に対する応力影響 の基礎課程を検討したものである。笠田竜太京都大学エネルギー理工学研究所准教授により「イオン照 射材のナノインデンテーション硬さ」という講演がなされた。イオン照射材の強度特性評価にはナノイ ンデンテーション法の適応が重要であるが、イオン照射材のナノインデンテーション硬さが意味すると ころは、正確には(定量的には)理解されていなかった。講演ではナノインデンテーション硬さの押込 み深さ依存性の理解が、相関則の構築のために重要であることが指摘された。鎌田康寛岩手大学工学部 教授により「照射過程での純鉄・ 低合金鋼の磁気特性変化 - 冷間圧延した純鉄の磁性 - 」という講演 がなされた。中性子照射による原子炉圧力容器鋼の磁気特性の変化(磁気ヒステリシス曲線)から照射 脆化の非破壊評価の可能性を探る重要な研究である。荒瀬史朗九州大学総合理工学研究院大学院生によ り「圧力容器鋼における 照射欠陥挙動の Cu 濃度依存性」という講演がなされた。IVAR プログラム(UCSB) で使用された Cu 含有量の異なる3種類の圧力容器鋼に温度を変えて鉄イオン照射を行い、Cu 含有量の 違いが照射量や照射温度にどのような変化を及ぼすのかを検討したものである。

最後に渡邉英雄九州大学応用力学研究所准教授により、今後の予定と連絡があり閉会した。以上今回 の研究集会が非常に実りのあるものであったと総括できる。

# 九州大学・応用力学研究所・研究会プログラム(最終) 炉内構造物の経年変化に関する研究集会

場所 九州大学応用力学研究所 中会議室(2階)

日時 平成24年7月24日(火)13:30 p.m.~7月25日(水)12:05 p.m.

7月24日	圧力容器照	射脆化関連(1)	座長 石野 栞
13:30	13:35 義家敏正	京都大学原子炉実験所	挨 拶
13:35	13:55 渡邉英雄	九州大学応用力学研究所	玄海原発1号炉照射脆化に関するこれまでの経緯と九大での取り組み
13:55	14:35 井野博満	東京大学 名誉教授	玄海原発1号炉圧力容器の照射脆化および現行予測式についての考 察(40分)
	小岩昌宏	京都大学 名誉教授	
14:35	14:55 永井康介	東北大学金属材料研究所	3次元アトムプローブ及び陽電子消滅によるフィンランドLoviisa炉監視 試験片のナノ組織解析
14:55	15:15 義家敏正	京都大学原子炉実験所	照射下における原子炉圧力容器鋼の点欠陥挙動に関する考察
15:15	15:35 鳴井 実	東北大学金属材料研究所	大学における研究炉を用いた材料照射と今後の予定
15:35	15:50		< Coffee Break >
	機械的特性	と照射損傷基礎	座長 福谷耕司
15:50	16:10 青野雄太	九州大学工学研究院	PTS評価におけるき裂深さの影響について
16:10	16:30 森下和功	京都大学エネルギー理工学研 究所	燃料被覆管材料の酸化プロセスのモデル化
16:30	16:55 石野 栞	東京大学 名誉教授	衝突カスケードのMD計算における電子的エネルギー損失の影響(25 分)
16:55	17:25		討論(30分)
18:00	20:00		懇 親 会
			大学より徒歩10分程度
7月25日	照射損傷基	磁と圧力容器照射脆化関連 (2)	) 座長 永井康介
9:00	9:20 大澤一人	九州大学応用力学研究所	BCC金属中の水素と空孔濃度の熱力学計算
9:20	9:40 岡 弘	北大工学院	重照射した改良SUS316鋼における微細組織と機械強度の相関
9:40	10:00 村上健太	東京大学大学院	照射欠陥の移動と集合に対する溶質原子の影響
10:00	10:20 Kai Lu	福井大学工学研究科	Prediction of lower bound facture toughness in the transition temperature region by T33-stress
10:20	10:40		< Coffee Break >
	圧力容器照	射脆化関連(3)	座長 義家敏正
10:40	11:00 藤井克彦	㈱原子力安全システム研究所	Cuクラスタ形成に対する応力下照射の影響
11:00	11:20 笠田竜太	京都大学エネルギー理工学研	イオン照射材のナノインデンテーション硬さ
11:20			
	11:40 鎌田康寛	究所 岩手大学工学部	照射過程での純鉄・低合金鋼の磁気特性変化 -冷間圧延した純鉄 の磁性-
11:40	11:40 鎌田康寛 12:00 荒瀬史朗	<sup>究所</sup> 岩手大学工学部 九州大学総合理工学研究院	照射過程での純鉄・低合金鋼の磁気特性変化 -冷間圧延した純鉄 の磁性- 圧力容器鋼における 照射欠陥挙動のCu濃度依存性

懇親会につきましては、九大大澤さんから別途ご連絡いたします。会費は、当日受付にて徴収させてください。

# 各種磁場配位での周辺揺動研究

# 代表者 広島大学大学院工学研究院 西野信博

目的と特徴

近年、核融合プラズマ実現の上で障害となっているプラズマの乱流状態に関する実験研究、理論研究、 シミュレーションが盛んに行われている。そして、多くの磁場配位で類似の乱流現象が観測されており、 乱流はプラズマと磁場との関連(あるいは、相互作用)において一般的な物理現象と認識されている。

一方、我が国の核融合研究では、種々の磁場配位の装置が稼働しており、現存する装置とその磁場配 位の種類は世界一といってよい。そこで、本研究会の目的は、日本の利点を生かし、上記多種の磁場配 位の装置で実験的に観測されているエネルギー閉じ込め特性(エネルギー・粒子閉じ込め時間)の向上 を阻む周辺プラズマ乱流の計測結果を統一的な視点でとらえようとする試みである。

初年度の本年は、各磁場配位の装置とその計測装置の紹介、また、最新の乱流の計測結果を発表し、 参加者で議論し、乱流現象に対する理解を深めることにある。次年度では、各磁場配位における乱流の 分類(あるいは、範疇わけ)を行いたいと考えている。

# 以下は、本年度開催した研究会の情報である。

 プロシーディングスを含む詳細な資料は、応用力学研究所のHP (http://www.triam.kyushu-u.ac.jp/QUEST\_HP/kenkyushukai241205.html)にパスワード付で掲載している。参加者以外で情報を得たい方は、発表資料の各担当者、もしくは、所内世話人図子秀樹教授に連絡されたい。

研究会日程とプログラム

日時:平成24年12月5日(水)

会場:九州大学応用力学研究所本館2F大会議室

代表者:西野信博(広島大学大学院工学研究院、准教授)

所内世話人: 図子秀樹

トピックス:各装置における周辺乱流計測結果の紹介

プログラム

13:00-13:05 Opening address by Nobuhiro Nishino (Hiroshima Univ.)

Chair: Nobuhiro Nishino (Hiroshima Univ.)

13:05-13:35 Statistical features of coherent structures at the plasma edge in QUEST - investigated with fast visible imaging

Santanu Banerjee (Kyushu University)

13:35-14:05 Study of intermittent features of edge plasma fluctuations after SMBI in Heliotron J Linge Zang (Kyoto University)

14:05-14:35 ヘリオトロン J 装置において観測された高速イオン励起 MHD 不安定性時の周辺 プラ ズマのレスポンス

		Shunsuke Ohshima (Kyoto University)
14:35-	14 : 50	(Coffee Break)
14:50-3	15:20	直線・ヘリカル装置における周辺プラズマ揺動解析
		Hiroshiko Tanaka (NIFS)
15:20-	15:40	ガンマ 10 における揺動計測と高速カメラを用いた周辺プラズマ観測
		Yousuke Nakashima (University of Tsukuba)
15:40-15	5:55	6速カメラを用いた周辺プラズマ観測
		Satoru Kigure (University of Tsukuba)
15:55-1	16 : 25	Progress towards understanding of dynamical interactions between global fields and turbulence
nonlinear	force in	laboratory plasmas
		Yoshihiko Nagashima (Kyushu University)
16:25-	17:00	Closing Address by Nobuhiro Nishino (Hiroshima Univ.)
参加者名	簿	
西野	信博	(広大院・工学研究院・准教授)
中嶋	洋輔	(筑波大・数理物質系・教授)
木暮	諭	(筑波大・数理物質科学研究科・M1)
水内	亨	(京大・エネルギー理工学研究所・教授)
大島	慎介	(京大・エネルギー理工学研究所・助教)
Linge 2	Zang	(京大・エネルギー科学研究科・D3)
笠嶋	慶純	(京大・エネルギー科学研究科・M1)

- 永島 芳彦 (九大・応用力学研究所・准教授)
- 田島 西夜 (九大・応用力学研究所・D3)

Santanu Banerjee (九大・応用力学研究所・D2)

田中 宏彦 (核融合科学研究所・助教)

反省点

今回は、言語を指定しなかったため、日本語でのpptの発表があり、数人の留学生には理解しづらかったことがあげられる。次年度の研究会も申請中であるが、認められれば最低ppt等の資料は英語とする予定である。

平成24年度

# 新エネルギー力学分野 共同研究成果報告

共同研究報告 特定研究

# 海洋空間を利用した新エネルギー開発に関する研究

所内責任者 胡 長洪

標記の特定研究は、本年度(平成24年度)から公募を開始したものであり、改組により「新エネル ギー力学部門」になってから初めての特定研究課題である。本年度は下記の研究集会・共同研究を実施 し、それぞれの研究成果を上げている。次年度は引き続き幅広い内容でテーマを公募し、共同研究を受 け入れていく予定である。

24 特 4-1: 実用に向けた高度な流体・構造物相互作用数値解析ツールの開発 研究代表者:肖 鋒(東京工業大学) 洋上発電用海岸構造物の安全性設計に欠かせない基盤技術である極限海況下での波,海流, 風などの荷重に対する定量評価法として CFD 手法の開発を行っており,今年度は自由界面捕 獲法である THINC 法の改良に関する研究を行った。

24 特 4-2:振動水柱型波力発電装置の波浪中応答試験 研究代表者:永田 修一(佐賀大学) 振動水柱型波力発電装置に関して,波向きによる一次変換効率への影響と,実用化に向けて, 係留方法の違いでの一次変換効率への影響を明らかにするために実験的検討を行った

24 特 4·3: 内部回転振子付き浮体による波浪エネルギー吸収に関する研究 研究代表者:柏木 正(大阪大学) 内部回転振子型波力発電装置に関する基礎的な研究として,3つの運動モードを連成させた連 立運動方程式を立て,浮体と小円柱それぞれの運動を求め,さらに最大波エネルギー吸収効 率を求めた。

24 特 4・4:洋上風力発電浮体の構造強度の解析法に関する研究 研究代表者:陳 献(山口大学) 極限海況における波浪荷重に対して有限要素法による洋上風力発電浮体の構造強度評価法の 開発を目的とし,波浪荷重を CFD、構造動的解析を有限要素法で求める流体・構造弱連成解 析手法の開発を行った。

24 特 4-5:海洋エネルギー利用に関するテクノロジー (研究集会)

研究代表者:経塚 雄策(九州大学)

海流発電、潮汐発電、洋上風力発電、波浪発電など、種々の海洋エネルギー利用方法に関し て、多くの分野から研究者が集まって情報交換を行った。今回は韓国から著名な研究者を招 き、韓国における海洋エネルギー開発現状の紹介が行われた。そのために1日目の講演・議 論を英語で行った。また、大阪大学、大阪府立大学、広島大学、鹿児島大学、沖縄科学技術 大学からの研究発表が行われた。 24 特 4-6:海流発電用新型水車の開発研究

研究代表者:経塚 雄策(九州大学)

潮流発電用水車に最適な形状のブレードの開発を目指して,水槽実験と数値シミュレーションを行い,新型ブレードを使った2種類の3枚翼水車と,従来型ブレードと新型ブレードの2 種類の8枚翼水車を比較して性能を調べた。

24 特 4-7:フラッタ水力発電装置流れレンズの小型化に関する実験的検討 研究代表者:阿比留 久徳(福岡工業大学) 風レンズ風車で実用化されているディフューザを用いて出力を増加する技術を利用し,新し い小規模水力発電技術について実験的検討を行った。

24 特 4-8:垂直軸型発電タービンの性能向上に関する研究

研究代表者:岩下 英嗣(広島大学) OIST(沖縄科学技術大学院大学)と共に、水深 100m より深い海流を利用する浮体式海流発 電システムの開発を目指して,水平軸型タービンに使用するブレードの最適設計、ローター の性能解析を行った。

24 特 4-9: 浮体式風車の弾性挙動に関する研究 研究代表者:二瓶 泰範(大阪府立大学) 風車タワーの曲げ剛性や風車プロペラの曲げ剛性等を考慮したスケール模型を製作して水槽 試験を行い、洋上風力発電の弾性挙動について知見を得ることができた。

24 特 4-10:船舶向け波浪エネルギー回収システムの開発

研究代表者:橋本 博公(大阪大学) 航行中の船舶を動揺させる波浪エネルギーの一部を回収する目的で、船体内に設置した液体 タンクとその両端に置く浮体を基本とするシステムを考案し、その効果・実現性について検 討を行った。

24 特 4-11:マルチカラム型波力発電浮体の性能評価に関する研究

研究代表者:安澤 幸隆(九州大学) マルチカラム型波力発電浮体システム(MC-WEC)では、複数のOWC がデッキ下に並ぶの

で、カラム間の相互干渉を調べる必要がある。本研究では OWC カラム間の相互作用とエネ ルギー変換性能に及ぼす影響について実験により調べた。

船舶海洋工学分野では現在重要な研究課題である「海洋空間を利用した新エネルギー開発」に関する 研究を応用力学研究所の特定研究課題として設定し、積極的に推進する体制を整備して頂きましたこと に対して深謝いたします。 24 特 4-1

# 実用に向けた高度な流体・構造物相互作用数値解析ツールの開発

東京工業大学・大学院総合理工学研究科 肖 鋒

# 目的

九州大学応用力学研究所では,自然エネルギーを利用するための総合的な洋上発電施設の実用化に向けて活発な研究を 展開している。そのうち,洋上発電用海岸構造物の安全性設計に欠かせない基盤技術である極限海況下での波,海流,風 など荷重に対する定量評価法の開発が重要な研究課題としてあげられ,実験と数値解析の両面から研究を行い,多数の研 究成果を成し遂げてきた。一方,代表者の研究グループでは,数値流体力学の基礎研究及び数値モデルの開発研究を行っ ている。本共同利用研究計画は,我々の研究グループで提案した数値流体力学計算手法を適用することで高度な流体・構 造体相互作用の数値解析ツールを開発することを目的とする。本共同利用研究によって九州大学応用力学研究所のこれま での研究結果及び水槽実験を生かし,数値モデルの検証を行い,実用に向けた数値解析ツールの確立を目指す。

研究実施状況及び結果

#### (1) 自由界面捕獲スキームの改良

代表者の研究グループでは、代数型 VOF (volume of fluid) 自由界面捕獲法である THINC 法を提案した。この手法 は、従来の VOF 法と異なり、幾何的な界面再構築は不要であるため、計算手順が大幅に簡素化されている。しかし、既存 の THINC 法は、多次元問題に適用する際に各方向に沿う断面における界面厚さが等しいであることを仮定しているため、 流れ方向と界面法線方向は互いに垂直に近い場合、自由界面に皺のような変形を引き起こす。この問題点を解消するため に、本研究では、再構築関数のジャンプ領域が自由に調整できる利点を利用し、座標軸に沿う断面の界面厚みを変化する ようにした。ジャンプの厚みを界面の向きに従って随時調整する手法を導入した。具体的には、図1に示すように、まず

界面の向き(法線方向 $(n_x, n_y)$ )を求める。本来の界面厚み $\eta$ をxとy方向の断面に射影した場合、それぞれにおける 境界の厚みを次の式で計算する、



Fig.1界面の向きにより、断面における界面の厚みを計算する。

図 2,3 に移動境界計算法の検証によく用い られるベンチマーク問題における改良された THINC 法の計算結果を示す。本手法は従来の VOF 法に必要とされる幾何的再構築を行わなくても

$$\eta_x = \eta / |n_x|, \ \eta_y = \eta / |n_y|.$$

次に,THINC 補間関数の再構築にあたって各方向のジャンプ・スロープ(勾配)を以下のように求める,

$$\beta_x = \frac{1}{\eta_x} \tanh^{-1}(1-2\varepsilon), \ \beta_y = \frac{1}{\eta_y} \tanh^{-1}(1-2\varepsilon).$$

これによって、方向分離計算の際に適切な境界面厚みを考慮することができ、従来のTHINC法で生じる幾何形状の劣化が回避される。



Fig. 2 Zalesak の固体回転テスト問題。

数値拡散・数値振動が生じず、移動境界を捉えている。また、界面の形状について PLIC 再構築に基づく VOF 法に比べて

も遜色がない。本手法は,既存の THINC 法に比べ計算負荷はほぼ同じであり,また,計算手順も単純な移流スキームと同等であるため,非常に使いやすく,実用的な手法である。

# (2)数値モデルの検証

上述改良型の THINC 法をマルチモーメント有限体積法を用いた数値流体計算 モデルに組込み, Kleefsman ら (J. Comput. Phys., 2004) による実験及び数値シミ ュレーション研究をもとに検証テストを行った。Fig.4に示すように,初期にタン クの右側に止めた水が開放され,左へ流す。実験に合わせ,幾つかの検査点で水 面高度の時系列変化を測る。また,構造物に水撃による圧力インパクトを定量的 に評価するために,流路中央に立方体障害物を設置し,その表面に圧力を計測する。



Fig. 3 界面変形テスト問題。





Fig. 4 ダム崩壊実験模型図(Kleefsman etal. 2004, JCP)。



Fig. 5 検査点 H2 での水面時間変化。

ダム崩壊問題において水面が障害物あるいはタンクの壁にぶつ かることによって分離し,複雑な形状に変形する。このような界 面を精確に捉えるのが非常に難しいである。Fig.5に水面高さ検査 点H2における水面変化の時系列を示す。Kleefsmanらによって開 発された数値モデル COMFLOW に比べ,本計算では,障害物及び壁 面に衝突した後(2秒以後)の水面変化はよく実験結果に一致して いる。圧力検査点P3及びP5の圧力時間変化はFig.6に示す。本 モデルは,水波によって発生する圧力負荷を精確に予報できた。 全般的に COMFLOW モデルに比べ,明らかに本数値モデルは高精度 で実験結果を再現できたことが確認できる。



Fig. 6 圧力検査点 P3 (左) と P5(右) における圧力の時間

その他に,自由界面ソリトン波,海底地形変化による砕波現象などにおいても本数値モデルの数値精度,計算効率, また実際問題への適用性について様々な検証を行った。今後,九大応力研の水槽実験及び現地観測結果をもとに,さらに 数値モデルの実証を行い,実用に向けて取り組んでいきたい。

研究組織

役割	氏 名	所属·身分	滞在延べ日数
研究代表者	肖鋒	国立大学法人東京工業大学・准教授	2 日
研究協力者	謝彬	国立大学法人東京工業大学・博士1年生	3 日
研究協力者	孫紫尭	国立大学法人東京工業大学・修士1年生	3 日
所内世話人	胡長洪	国立大学法人九州大学・准教授	

# 24 特 4-2

# 振動水柱型波力発電装置の波浪中応答試験

佐賀大学 海洋エネルギー研究センター 永田修一

#### 1. 序論

波エネルギーから電気エネルギーへ変換する波力発電シ ステムとして、数多くの方法が提案されている.なかでも、 波エネルギーを空気エネルギーへ変換し、空気エネルギー を電気エネルギーへと変換を行う振動水柱型波力発電装置 は大波浪下での安全性も高く、実用化に近い.本研究は振 動水柱型波力発電装置の一種である「後ろ曲げダクトブイ」 (Backward Bend Duct Buoy:以後 BBDB)について研究した ものである.BBDBの特徴として、浮体と水室内の水柱の 共振時に空気圧力が非常に高くなること、装置自体が小型 で浅い海でも使用可能である、波浪中で波の入射方向に微 速前進することが挙げられる.

これまでの研究で全長 2.5m の中型模型での実海域実験 において、有義波高の振幅が等しく、有義波向きが違う場 合、最大発電出力が大きく違うことが分かった. 結果を Fig.1 に示す.

本研究では、波向きによる一次変換効率(波のエネルギー を空気のエネルギーに変換する効率)への影響と、実用化に 向けて、係留方法の違いでの一次変換効率への影響を明ら かにすることを目的に行った。



# 2. 実験方法

実験は九州大学応用力学研究所深海機器力学実験水槽で 実施した. 波周期 $T = 1.044 \sim 1.808$ (sec)の規則波におけ る内部波高,内部圧力,浮体の運動を計測した.実験で用 いた BBDB の供試体を Fig.2 に示す.係留方法の影響を調 べるために Fig.3 のように供試体を 4 点係留したものを normal free,係留を張ったものを normal とした.次に,入 射波の入射角度の影響を調べるために Fig.4 のようにアン カーを時計回りに回転させ,供試体が造波器に対して 10deg になるようにした.この状態を 10deg とした.また,実験 装置と配置を Fig.5 に示す.



Fig. 2 BBDB Model





normal



Fig. 5 Arrangements of Experimental Equipment

BBDBの一次変換効率は次式で求めた.

$$\bar{\eta} = \frac{E}{E_i} \tag{1.1}$$

$$E_i = \frac{1}{2} \rho g \varsigma^2 C g B \qquad [W] \tag{1.2}$$

$$Q(t) = \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \frac{\eta_1(t) + \eta_2(t)}{2} \right\} S \qquad \left[ m^3 / s \right] \qquad (1.3)$$

$$W(t) = p(t) \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \frac{\eta_1(t) + \eta_2(t)}{2} \right\} S \qquad [W] \qquad (1.4)$$

$$E = \frac{1}{T} \int_{0}^{T} W(t) dt$$

$$= \frac{S}{T} \int_{0}^{T} p(t) \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \frac{\eta_{1}(t) + \eta_{2}(t)}{2} \right\} dt \qquad [W]$$
(1.5)

η:--次変換効率 E:1 周期における平均波エネルギー吸収 量 E<sub>i</sub>:入射波の仕事率 ρ:水の密度 ς:入射波の振幅

C<sub>g</sub>:群速度 B:入射波の幅 Q<sub>t</sub>:空気流量 η<sub>1</sub>:空気室内水面 変動(波上) η<sub>2</sub>:空気室内水面変動(波下) S:空気室水線面積 W<sub>t</sub>:空気に与える仕事

#### 3. 実験結果及び考察

Fig. 6~Fig. 13 に normal free, normal, 10deg の一次変換効率, 内部波高の無次元値,内部圧力の無次元値,浮体の Surge, Heave, Sway, Roll, Pitch の無次元値の周波数特性を示す. Fig. 14, Fig. 15 はそれぞれ Surge, Pitch 基準での内部波高の位相 差を示している. 横軸は、入射波の波長を えとし、BBDB の模型長さを L としたときに、それらの比である λ/L と した.

#### 係留方法による影響

係留方法の違いによる影響は, normal free, normalを比較 したらよい. Fig. 6からわかるように最大一次変換効率の値 は, normal freeがnormalより4割ほど落ち,  $\lambda / L = 4.0$ 以外 の周期帯も全体的に効率が悪い. 一次変換効率の値が下がっているので, Fig. 7, Fig. 8からもわかるように, 内部波高, 内部圧力も値が小さい. 運動の違いを見ると, Fig. 9~Fig. 12 からもわかるようにSurge, Heave, Sway, Rollにおいては, 最 大値や極大値を示すなどの傾向が同じであり, 値もさほど 変わらない, しかしPitchにおいては, Fig. 13よりnormalは 極大値を示しているが, normal freeは極大値を示しておらず 増加変化し,  $\lambda/L = 5.0$ において極大値を示す結果となっ た. 位相差はこの違いによりFig. 14,Fig. 15から分かるよう に, 以下のことが言える.

normalの方がnormal freeよりSurge基準ではダクト内部の水 運動と模型の運動が同期され水の運動が加速される. Pitch 基準ではダクト内部の水運動と模型の運動が逆位相となり 水運動と模型の運動がぶつかり合う形となる. これらの運 動が同時に起きるため、ダクト内部に大量の水が出入りし、 内部波高が上昇し、内部圧力が最大値をとり、一次変換効 率が最大となったと考えられる. よって、係留方法はnormal がよいと考えられる.

・入射波の角度による影響

入射波の角度の違いでの影響は, normal, 10deg を比較し たらよい. Fig. 6 からわかるように最大一次変換効率の値は 落ちているが,全体的にはそれほど変わらない. また, Fig. 7~Fig. 13 より,内部波高,内部圧力,Surge, Heave, Pitch もほぼ変わらない. しかし, Sway, Roll の値が normal に対 し 10deg の方が大きい. つまり一次変換効率の低下は,こ の Sway, Roll により,入射波エネルギーが損失したと言え る.







Fig. 14 NORMAL and NORMAL FREE Phase (Base : Surge)

R	1	Inner	wave '	, Fa		<u>م.</u>	normal -	_
ase/	0.5	F	5	<u>^/</u>	/∖^/	noi	mal free -	· ·▲·· ·
й'	-0.5		<b>A</b>	▲¥ ⊾ ]				
	-1	0	2		••4	6	8	

Fig. 15 NORMAL and NORMAL FREE Phase (Base : Pitch)

#### 4. 結論

BBDBの3次元における係留方法の違いと入射波の角度 による一次変換効率への影響を明らかにした.

・normalの係留方式では、Surge基準では水運動と模型の運動が同期され水の運動が加速され、Pitch基準では水運動と 模型の運動が逆位相となり水運動と模型の運動がぶつかり 合う形となる.これらの運動が同時に起きるため、ダクト 内部に大量の水が出入りし、内部波高が上昇し、内部圧力 が最大値をとる。

・入射波の角度の違いによる一次変換効率への影響は、正面から波が入ってこないのでSway, Rollによる影響でエネ ルギー損失があり、最大一次変換効率が低下する.しかし、 全体的には角度を変えていない状態とほぼ変わらない結果 になったため、角度による影響は少ないと言える.

以上より, BBDBを実用化するためには, 係留方法として はnormalの方がいいと言える. しかし, 引っ張りすぎると 模型の動きを妨げてしまう恐れもあるためどのくらいの力 で引っ張ったらよいかは, 今後の課題と言える.

また,設置向きについては多少の入射波向きの変化では, 最大効率は下がるが、全体的にはあまり効率への影響はな いと言える.そのため、複数の波が重なり合い、波向きも 違う実際の海域などの環境では、ある程度の波向き方向に BBDBを向けておくなどの大まかな向きを合わせていれば 良いと言える.

# 内部回転振子付き浮体による波浪エネルギー吸収に関する研究

大阪大学大学院工学研究科 柏 木 正

#### 1. 緒言

波力発電装置に関する研究は、これまで世界各国でさまざまなものが行われてきた。しかし一般に、波 力発電装置の波エネルギー吸収効率は、ある特定の波周波数に対して高い値を示し、その周期を外れると 急激に低下すると言われている。従って、波力発電装置を実用化するためには、広い範囲の波周期におい て高い吸収効率を得ることが重要である。

本研究では,波エネルギー吸収効率の向上を目的として,内部回転振子型波力発電装置に関する基礎的 な検討を行っている。この装置は,浮体の内側面は円筒形状をしており,その円筒面上に沿って小円柱が 滑ることなく回転するとしている。小円柱の中心軸に発電機の軸を取り付けておく。波エネルギーによっ て浮体は横揺れ運動し,さらに内部の小円柱も回転運動をするので,それらの相対運動が大きくなるよう に工夫すればエネルギー吸収効率を高めることができる。

この内部回転振子型浮体についてのこれまでの研究では、浮体の動揺に関して左右揺れと上下揺れを固定し、横揺れ運動のみを考慮した数値計算を行ってきた。しかし実海域では浮体の運動を横揺れ運動のみ に拘束することは難しく、また左右非対称浮体では2次元の場合、左右揺れ、上下揺れ、横揺れの3つの 運動モードがすべて連成する。従ってより現実の運動に近い計算を行って波エネルギー吸収効率に関する 考察を行うためには、3つの運動モードすべてを連成させた数値計算が必要である。本研究では、まず装 置に関して3つの運動モードを連成させた連立運動方程式を立て、浮体と小円柱それぞれの運動を求め、 さらに最大波エネルギー吸収効率を求めている。

# 2. 理論

# 2.1 波エネルギー吸収装置の概要

内部回転振子型波力発電装置の断面図を Fig.1 に示す。以下では2次元理論として考える。内面が半径 R の円筒となっている浮体が水面に浮かんでおり、その内側を半径r の小円柱が滑ることなく回転する場合を考える。小円柱の中心軸に回転振子型発電機の軸を取り付けると、小円柱の回転によって発電機を駆動することができる。この発電機の回転運動を求めるためには、内面が半径 R の円筒となっている浮体の横波中での横揺れ運動と半径r の小円柱の回転運動との連成運動を考えることが必要である。

浮体の左右揺れの変位(左向きを正)をx,上下揺れの変位(鉛直下向きを正)をyとする。また浮体の回転角(時計回りを正方向)を $\phi$ とし、半径Rの円筒中心Oと小円柱の中心Cを結ぶ直線OCが鉛直線となす角(反時計回りを正方向)を $\theta$ とする。浮体の内側円筒表面から小円柱に働く摩擦力をFとすると、作用・反作用の法則によって、-Fの摩擦力が小円柱から浮体の内側円筒に働く。この内力を考慮することによって、浮体の運動と小円柱の運動を分けて考えることができる。



Fig.1 The cross section of a wave-power generator

# 2.2 波エネルギー吸収効率

波エネルギーの変換効率は、入力である規則波の単位長さあたりのパワー P<sub>w</sub>と、出力である小円柱の軸 に取り付けられた発電機を駆動するパワー P<sub>x</sub>を用いて P<sub>x</sub>/P<sub>w</sub> から求められる。

$$\eta \equiv \frac{P_E}{P_W} = 2\beta B_{33} \left( KR \right)^4 \left| \frac{\Phi}{K\zeta_a} + (1-r) \frac{\Theta}{K\zeta_a} \right|^2 = 2\beta B_{33} \left( KR \right)^4 \left| \frac{\Phi + \Theta}{K\zeta_a} - r \frac{\Theta}{K\zeta_a} \right|^2$$

# 3. 数値計算

#### 3.1 数値計算に用いた左右非対称浮体

前節で示した式を用いて、浮体と小円柱の揺れ角や吸収効率に関する数値計算を行った。浮体の断面形 状は波浪発電装置 Salter Duck の形状を参考に、没水円筒に指数関数状の断面を波上側に重ね合わせたもの とした(Fig.2 参照)。



Fig.2 The section shape of floating body

浮体に働く流体力は、ポテンシャル理論に基づいた 2 次元境界要素法を用いて計算した。揺れ角と吸収 効率を求めるため、浮体と小円柱に関する各係数を設定する必要がある。浮体の質量Mと小円柱の質量mの比をM/m = 4.0とした。メタセンタ高さ $\overline{GM}$ 、慣動半径 $\kappa$ 、小円柱の半径rはすべて浮体の内側円筒の半径Rを基準値とした無次元値で $\overline{GM}/R = 0.2, \kappa/R = 0.5, r/R = 0.1$ とした。浮体の喫水DはRを基準値とした無次元値でD/R = 2.0とした。

浮体の慣性モーメント $I_0$ は浮体の質量と慣動半径を用いて $I_0 = M\kappa^2$ とし、小円柱の慣性モーメント $I_c$ は小円柱を一様な円柱と仮定して $I_c = mr^2/2$ とする。発電機の抵抗による減衰力係数に関する係数 $\beta$ は roll の造波減衰力係数の $\beta = 0.70$ とした。

# 3.2 計算結果

数値計算の結果を、Fig.3~Fig.4 に示す。各グラフの横軸は無次元波数  $KR = \omega^2 R/g$  である。Fig.3 は波エ ネルギー吸収効率 $\eta$  である。また、Fig.4 に反射波係数  $C_r$  と透過波係数  $C_R$  を示した。

#### 4. 考察

Fig.3 を見ると,波エネルギー吸収効率はKR = 0.425 で $\eta = 0.671$ , KR = 0.825 で $\eta = 0.993$  の極大値をとって いる。浮体と小円柱それぞれの同調が起こるため吸収効率にも2つのピークがあり、その結果広範囲の波 周波数において高い吸収効率を得ることができると考えられるが、各同調周波数と吸収効率がピークとな る周波数の間には少しのずれが確認できる。

次に反射波係数 $C_r$ ,透過波係数 $C_R$  (Fig.7)と波エネルギー吸収効率 (Fig.4)の関係について考える。 今回計算を行った断面形状は、ある特定の周波数の波に対して透過波が非常に小さくなると考えられて



Fig.3 Energy transmission efficiency



Fig.4 Coefficients of reflected and transmitted waves

いるが、Fig.4 を見ると KR = 0.800 付近で透過波係数が極小値となっており、この傾向が確認できる。また 波エネルギー吸収効率が最大値となる KR = 0.825 において透過波係数と反射波係数が共に 0 に近い値とな っており、入射波のエネルギーをほとんど吸収できているため吸収効率が1 に近い値になっていることも 確認できる。またもうひとつの吸収効率のピーク(KR = 0.425)でも透過波係数と反射波係数が比較的小さく なっていることが確認できるが、どちらも 0 付近まで小さくなっているわけではないため、吸収効率が  $\eta = 0.671$  となっていることも納得できる。この浮体の同調点付近のピークにおいても吸収効率を1 近くま で高めることができれば、より広範囲の周波数で高い波エネルギー吸収効率が得られると考えられる。

# 5. 結言

本研究では、波エネルギーを力学的エネルギーに変換する際の効率を向上させる目的で、浮体の横揺れ によって浮体内部の円筒面を滑ることなく回転する小円柱の中心軸に取り付けた内部回転振子型浮体によ る波エネルギー吸収効率についての検討を行った。これまでの研究では、左右非対称浮体の動揺に関して 左右揺れと上下揺れを固定し、横揺れ運動のみを考慮した数値計算を行ってきた。本論文では、左右揺れ、 上下揺れ、横揺れの3つの運動モードを連成した数値計算を行った。その結果、最大波エネルギー吸収効 率が1となることや、反射波係数と透過波係数がともに小さくなる周波数において最大吸収効率となるこ となどの傾向は、これまでの数値計算と一致するものであった。しかし浮体と小円柱の揺れ角に関しては、 以前の計算結果と比べ2つの同調点がより明らかに確認できる結果となった。従って、今後の課題として は、波力発電装置としてより現実的な計算を行うために、非線形影響を考慮した計算や不規則波中での計 算、さらには3次元問題としての計算も行う必要がある。またこれまでは左右対称浮体の模型実験しか行 ってこなかったが、今後左右非対称浮体の模型実験も行い、数値計算の妥当性を確かめる必要がある。ま た波力発電装置としての実用化のために、装置の構造の詳細を決定し、数値計算と模型実験の両方から吸 収効率を向上させる方法を研究する必要がある。

氏名	所属	職名	役割・担当
柏木 正	大阪大学大学院工学研究科	教授	代表者
酒井克弘	大阪大学大学院工学研究科	修士課程1年	研究補助
西松早紀	大阪大学大学院工学研究科	修士課程2年	研究補助
胡 長洪	九州大学応用力学研究所	准教授	共同研究者

# 研究組織

洋上風力発電浮体の構造強度の解析法に関する研究

山口大学工学部 陳献

• 目的

大規模浮体式洋上風力発電構想の実現には、極力にコストを抑えつつ、台風を含む極 限海況を耐える浮体の安全性確保が不可欠である。洋上における波浪と浮体構造が互いに 及ぼす影響を反映するため、流体構造連成解析が必要となるが、構造解析では有限要素法、 流体解析では差分法の場合、流体と構造解析を完全に連成して行う(いわゆる強連成)こ とは困難である。そこで、本研究では、構造解析と流体解析を独立に行い、反復計算によ って両者の境界面での境界条件を整合させる弱連成解析の実現を目指して、構造解析コー ドの選定及び弱連成解析に適した構造解析アプローチの確立を目的とする。

・構造解析コードの選定

極限海況における波浪負荷による浮体の大変形を考慮するため、非線形有限要素法に 基づく構造解析コードが必要となる。現在非線形有限要素解析汎用ソフトとして、MARC

(MSC software 社)、Abaqus (ダッソー・システムズ)、Ansys (ANSYS, Inc.) などが市 販されている。これらのソフトはそれぞれの長短所はあるが、機能が豊富な反面、ブラッ クボックス的側面が強く、ユーザによる操作の自由度が限られていることは例題を用いた 検討により確認されている。従って、浮体の流体構造連成解析に適した専用の非線形有限 要素解析コードを作成することが必要であると考えられる。

・弱連成に適した構造解析アプローチ



図1 構造解析フローチャート

極限海況における波浪負荷は動的荷重として浮体構造にあたえ、また浮体の大変形に よる非線形性を考慮するため、動的非線形構造解析を行う必要がある。動解析における時 間積分には Newmark 型アルゴリズムを用いる.空間・時間的離散化で得られる非線形連 立方程式の解は Newton-Raphson 法を用いた反復解析によって求められる.図1は構造解 析のアプローチを示す。

また、流体・構造境界面においては整合するメッシュを用いることは望ましいが、流体解析と構造解析の性格上、両者による解析メッシュ密度に対する要請が大きく異なるため、境界面における整合メッシュの使用は計算規模を大幅に増大させることになる。そこで図2に示すように、構造の外郭に仮想的領域を設け、流体解析から得られた負荷を補間することにより構造節点力を求める手法を提案した。



図2 仮想領域法概念図

• 研究組織

氏名	所属	職名	延滞在日数
陳献	山口大学工学部	教授	6 日
胡長洪	九州大学応用力学研究所	准教授	

・成果発表: 無し

(研究集会)

# 海洋エネルギー利用に関するテクノロジー

研究代表者

九州大学総合理工学研究院教授 経塚 雄策

# 1. 目的

近年、CO2 排出による地球温暖化や化石エネルギー資源の枯渇が深刻な問題になっており、日本でも 地球温暖化防止会議(COP3)で決定された CO2 排出削減目標に向けて、さまざまな努力が続けられている。 その中、自然エネルギー利用技術の確立は急務となり、特に海洋エネルギーの利用は重要な位置つけに なっている。

応用力学研究所は、H24 年度に共同利用の特定研究として「海洋空間を利用した新エネルギー開発に 関する研究」を設定しており、多数の共同研究の予想されている。本研究集会では、海上風、潮汐、波浪を 利用した発電技術の開発に関わる水槽実験、理論解析及び数値シミュレーションにより、基礎的・実用的な 研究を行っているこれらの共同研究者を始め、いろいろな分野の研究者が一堂に会し、研究成果の発表、 研究情報の交換を行うことが目的である。

# 2. 研究集会の開催日時,場所

開催日時:平成25年1月25日(金)13:00~18:00 1月26日(土) 9:00~12:00 開催場所:九州大学応用力学研究所本館6階W601室

# 3. 講演プログラムと概要

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

# **Technical Review of Wave Energy Utilization**

Beom-Soo Hyun (Korea Maritime University, Korea) Due to the shortage of energy resources and due to the global warming problems, efforts to secure new renewable energy resources are ever growing. Among various renewable resources wave energy resources are huge but largely unutilized energy resources because of technical barriers involved. But there have been developed many concepts and some of them are closing to the pre-commercial stage. This presentation introduces the general status of wave energy concepts by showing various device types which represent current wave energy converter (WEC) technology. Also this presentation introduces research activities and governmental renewable energy policy, particularly focusing on the work being done in South Korea. Finally this presentation concludes with suggestions of the perspectives of wave energy technologies in general.

# Development of Marine Renewable Energy Generation System based on Seawater Exchange Breakwater

Hee-Su Lee, Jong-Chun Park (Pusan National University, Korea) Yong-Jin Cho (Dong-Eui University, Korea)

Both laboratory experiment and CFD have been carried out for development of marine renewable energy generation system based on seawater exchange breakwater. The CFD simulation is used for understanding the flow field of tidal jet. The experiment is carried for validation of the CFD result. Finally, estimation of the

possibility of development using the proposed tidal jet generator is discussed.

# On-sea Experiment of the Offshore Wind Power Generation by a Floating Platform in Hakata Bay

Yusaku Kyozuka (Kyushu University) 日本における浮体式洋上風力発電の賦存量および現在進行中の2つのプロジェクト(福島沖と長崎・五 島)の紹介と九大が実施中の博多湾海上風力発電浮体の実海域実験結果が報告された。特に、2012 年 9 月の台風 16 号来襲時の浮体運動と係留張力の計測値と、10 月に海中潜水工事で有名な渋谷正信氏が浮 体周辺で撮影された水中ビデオによる浮体表面の状況と環境影響などが紹介された。.

# CFD Simulation of a Floating Wind Turbine Platform in Harsh Sea Condition

Changhong Hu (Kyushu University) Numerical Simulation of a catenary moored floating wind turbine platform in large waves is carried out by using the CFD code RIAM-CMEN. The effect of wind turbine and mooring line is included in the computation. The strongly nonlinear wave-body interaction phenomenon of the platform is studied by the CFD simulation.

# R&D activities for the development of tidal stream energy in Korea

Beom-Soo Hyun (Korea Maritime University, Korea) Korea relies on imported fossil fuels to meet its energy consumption demands. As such, there is a need to investigate alternative energy resources such as renewable energy. In this presentation, the potential of tidal stream energy R&D in Korea is introduced. Tidal energy and tidal current energy are likely to play an important role in meeting the future energy needs of Korea, whereas the potentials of wave energy and ocean thermal energy for the same are relatively low. The level of technical development and the renewable energy market in Korea is currently in an early stage. The government will have to be more aggressive in the promotion of renewable energy to achieve sustainable development in Korea.

# 海潮流発電に関連した九州周辺海域での黒潮と潮流調査

山城 徹(鹿児島大学) 海洋の利用・開発については、九州の島々に存在する豊富な海洋エネルギーに注目し、九州周辺海域 における潮流や黒潮の観測、数値計算、文献調査などを行って、潮の流れで海中のプロペラを回転させる 潮流発電や海流発電の適地を明らかにしています。

# 水平軸型タービンによる海流発電システムの研究

徳永紘平,岩下英嗣(広島大学工学部) この程、沖縄科学技術大学院大学(OIST)が浮体式海流発電システムを提案し、広島大学との共同研究 が開始された。広島大学では主として海流発電タービン用ブレードの設計及びローター性能解析を担当し ている。今回の研究では、今後予定しているローターブレードの風洞試験、水槽曳航試験を念頭に置いて、 最適設計時の入力となる諸条件について種々の検討を行っている。その結果、R=0.73m,V=1.2m/s,λ =4.0,P=610Wの条件でローター性能 CPmax=0.43 のブレード形状が得ら、その性能および最終的には発電 機とのマッチングを考慮した発電性能予測を行っている。試験用ブレードは現在製作中であり、今後広島大 学で風洞実験を、九州大学応用力学研究所で曳航試験を行う予定である。

# Development of an ocean current generator at OIST

Katsutoshi Shirasawa (Okinawa Institute of Science and Technology) 沖縄科学技術大学院大学(通称OIST:オイスト)では、2012年度より黒潮を目的とした海流発電機の開発 を開始した。典型的な風車と同じ3枚ブレードの発電機を,水深100m程度に海底から係留する。波浪の影 響が小さい中層で,安定に流れる黒潮を利用するためである。我々は,最初の取り組みとしてブレード直径 2mの試作機を製作した。発電機の上部にフロート,下部に重りを備えブレードトルクを抑えるのが特徴であ る。海流を模擬した船による曳航試験を沖縄近海で行い,予測通りの発電量,機体の安定性を確認した。

# Performance Characteristics of a Shrouded Tidal Current Turbine

Huihui Sun, Yusaku Kyozuka (Kyushu University) Tidal current power generation is attracting more and more attention these days for its cleanliness, predictability and reliability. A brimmed diffuser from wind-lens technology is tested in this study in order to observe its effect on power generation efficiency in tidal current turbine systems. Validation experiments were carried out in the circulating water channel for the bare turbine and the shrouded turbine, results of which proved that the diffuser improved the performance of the tidal turbine. The computational fluid dynamics (CFD) method and the blade element momentum (BEM) theory were used to evaluate the performance of the bare turbine and the shrouded turbine. For tip speed ratios (TSRs) of 2.5 to 4.0, both CFD and BEM calculations for the bare turbine were well-correlated with the experimental data. For the shrouded turbine, CFD results failed to exactly reproduce the experimental results with the turbulence model and mesh size utilized, but BEM results did succeed with TSRs greater than 3.0. Considering correlation with experimental data and calculation time cost, BEM is a satisfactory method for evaluating the performance of a tidal current turbine.

# 振動水柱型波力発電装置の波浪中応答試験

今井康貴 (佐賀大学海洋エネルギー研究センター)

本研究は振動水柱型波力発電装置の一種である「後ろ曲げダクトブイ」(Backward Bend Duct Buoy: BBDB)について研究した. BBDB の特徴として,浮体と水室内の水柱の共振時に空気圧力が非常に高くなること,装置自体が小型で浅い海でも使用可能である,波浪中で波の入射方向に微速前進することが挙げられる.本研究では,全長2.5m,全幅2.3m,全高1.76m,喫水1.1mの模型に衝動タービンを取り付け、規則波中における発電効率を計測し、発電特性や運動特性を計測した。

# Elastic characteristics of TLP type offshore wind turbines -Tank tests and simplified calculation method

Minori Kozen, Yasunori Nihei (Osaka Prefecture University)

Kazuhiro Iijima(Osaka University)

In this presentation, we will discuss about structural problems affecting TLP type offshore wind turbines under wind and wave conditions. For TLP type offshore windturbines, structural problems haven't been found yet, however when talking about the use of wind turbines on a TLP structure we come to realize certain problems. For example the bending vibration of the tower and the blades, the bending moments and inertia of the upper structure under heavy sea conditions that might affect the mooring lines. Those are pressing issues and it is therefore important to take them into consideration. So, in this study, we will perform some experiments using appropriate "elastic model" of TLP type offshore wind turbines to observe those effects. We have not only measured the loads on tension legs in waves and wind but also the bending stresses acting on the tower and blades. We observed some phenomenon that will be reported later on, in this study.

# 船舶向け波浪エネルギー回収システムの開発

橋本博公 (大阪大学)

近年,船舶分野においても省エネや環境負荷の低減が強く求められている。一航海あたりに長期間を要する海上輸送では,航行中に何らかの手段で自然エネルギーを吸収することが期待されるが,風力や太陽光では,限られた甲板スペースのため発電容量が不足する。本研究では,航行時に巨大な船体を動揺させる 波浪エネルギーを吸収するシステムの開発を目指している。

# 内部回転振子付き浮体による波浪エネルギー吸収に関する研究

柏木 正 (大阪大学) 波力発電装置の波エネルギー吸収効率の向上を目的として,内部回転振子型波力発電装置に関する基 礎的な検討を行ってきた。この装置は,浮体の内側面は円筒形状をしており,その円筒面上に沿って滑るこ となく回転する小円柱の中心軸に発電機の軸を取り付けておく。波エネルギーによって浮体は横揺れ運動 し、さらに内部の小円柱も回転運動をするので、それらの相対運動が大きくなるように工夫すればエネルギ 一吸収効率を高めることができる。この内部回転振子型波力発電装置に関するこれまでの研究で、浮体の 外部形状が左右対称な場合、入射波のエネルギーのうち浮体の左右で反対称な波のエネルギーしか吸収 することができず、波エネルギー吸収効率の最大値は0.5 であることが示された。この吸収効率を0.5 以上と するためには、浮体の外部形状を左右非対称にし、浮体の左右反対称な波だけでなく対称な波も発生させ、 その結果として入射波のエネルギーをすべて吸収するという考え方であり、片側波なし浮体を使えばそれが 可能であることを本論文で示している。

# 4. おわりに

「海洋エネルギー利用に関するテクノロジー」をキーワードに多くの分野から研究者が集まり,海流発電、 潮汐発電、洋上風力発電、波浪発電など、種々の海洋エネルギー利用方法に関して知見を深め,情報交 換を行った。今回は韓国から著名な研究者を招き、韓国における海洋エネルギー開発現状の紹介が行わ れた。そのために一日目の講演・議論を英語で行った。また、大阪大学、大阪府立大学、広島大学、鹿児島 大学、沖縄科学技術大学からの研究発表が行われ、日本の海洋エネルギー開発を行う研究者にとって有 意義な研究集会として認知されていることを確信した。

# プログラム

期 日: 2013 (平成 25) 年1月25日 (金), 26日 (土)

場 所: 九州大学応用力学研究所本館6階W601室

# 1月25日(土)

13:10 - 13:50	Technical Review of Wave Energy Utilization
	Seok Won HONG (Korea Institute of Ocean Science and Technology, Korea)
13:50 - 14:20	Development of Marine Renewable Energy Generation System based on Seawater
	Exchange Breakwater
	Hee-Su Lee, Jong-Chun Park (Pusan National University, Korea)
	Yong-Jin Cho (Dong-Eui University, Korea)
14:20 - 15:50	On-sea Experiment of the Offshore Wind Power Generation by a Floating Platform in
	Hakata Bay
	Yusaku Kyozuka (Kyushu University)
14:50 - 15:10	CFD Simulation of a Floating Wind Turbine Platform in Harsh Sea Condition
	Changhong Hu (Kyushu University)
(休憩)	
(	
15:30 - 16:10	R&D activities for the development of tidal stream energy in Korea
	Beom-Soo Hyun (Korea Maritime University, Korea)
16:10 - 16:40	海潮流発電に関連した九州周辺海域での黒潮と潮流調査
	山城 徹(鹿児島大学)

16:40-17:00 水平軸型タービンによる海流発電システムの研究

徳永紘平, 岩下英嗣 (広島大学工学部)

- 17:00 17:30 Development of an ocean current generator at OIST Katsutoshi Shirasawa (Okinawa Institute of Science and Technology)
- 17:30 18:00 Performance Characteristics of a Shrouded Tidal Current Turbine Huihui Sun, Yusaku Kyozuka (Kyushu University)
- (懇 親 会)

1月26日(土)

- 9:00-9:30 振動水柱型波力発電装置の波浪中応答試験 今井康貴(佐賀大学海洋エネルギー研究センター)
- 9:30 10:00 Elastic characteristics of TLP type offshore wind turbines -Tank tests and simplified calculation method Minori Kozen, Yasunori Nihei (Osaka Prefecture University) Kazuhiro Iijima(Osaka University)
- 10:00 10:30 船舶向け波浪エネルギー回収システムの開発 橋本博公 (大阪大学)
- 10:30-11:00 内部回転振子付き浮体による波浪エネルギー吸収に関する研究 柏木 正 (大阪大学)

11:00-12:00 総合討論

# 海流発電用新型水車の開発研究

九州大学大学院総合理工学研究院 経塚雄策

# 1. はじめに

東日本大震災による原発事故を受け,自然エネルギー に対する関心や期待が高まっている。自然エネルギーに も様々な種類があるが、日本は周囲を海に囲まれた海洋 国家であり、海洋エネルギーを利用しない手はないと考 える。自然エネルギーを利用した発電の多くは天候に左 右されやすいが、潮流エネルギーは周期的で予測可能で あり、安定した稼働が見込めるというメリットがある。 そこで、本研究室では潮流エネルギーに着目し、潮流発 電用水車に関する研究を進めてきた。

潮流発電用水車は風車と原理は同じであり、これまで は風車で使用されるブレードをそのまま用いることが多 かった.(Fig.1)しかし、使用環境や目的が異なる場合、 航空機のプロペラのブレードと船舶のスクリューのブレ ードの形状が異なるように、最適なブレードは異なる形 状になるのではないかと考えられる。例えば、Fig.2は OpenHydroと呼ばれる水車と発電機が一体化した装置で ある。そこで、本研究では潮流発電用水車に最適な形状 のブレードの開発を目指す.



Fig.1 MCT のタービン Fig.2 OpenHydro Fig.3 8 枚翼水車

# 2. 実験

#### 2.1 実験概要

実験は応用力学研究所の深海機器力学実験水槽(幅 5m・長さ65m・水深7m)において行なった.水車模型は 水車直径 φ 300[mm]で、工学府の古川雅人教授を中心に開 発された風レンズ用ブレード(従来型ブレード)と昨年 度作成した翼端を広げた潮流発電用ブレード(新型ブレ ード)の2種類の3枚翼水車と,従来型ブレードと新型 ブレードの2種類の8枚翼水車を使用した.8枚翼水車に は翼端損失の減少,非接触発電の実現を目的として,Fig.3 のように覆いを取り付けた.ソリディティを一定にする ためブレードの幅は3枚翼の3/8とした.また、風レンズ 有無における水車性能を確認するため、ディフューザー 幅 68[mm]、入口径 φ 322[mm]、出口径 φ 410[mm]の風レ ンズ模型も使用した.

実験方法として、水車をモータで回転数制御し特定の 周速比における流力特性を計測した.

# 2.2 実験結果

本研究で用いる無次元数の定義を以下に示す。 ・周速比 $\lambda$   $\lambda = \frac{r\omega}{u}$ 

・パワー係数(水車効率)Cp Cp 
$$= \frac{P}{\frac{1}{r} \rho A U^3} = Ct \times Z$$

ただし、1 回転中の平均トルク T[N・m], 水密度 ρ=1000[kg/m<sup>3</sup>], 水車半径 r=150[mm], 水車投影面積 A[m<sup>2</sup>], 流入速度 U=1[m/s], 水車の回転角速度 ω[rad/s]

Fig.4 にブレード単独時のパワー係数 Cp の比較結果を 示す.ブレード単独時は3枚翼水車よりも8枚翼水車の 方がパワー係数が低くなった.

Fig.5 に風レンズ装着時のパワー係数 Cp の比較結果を 示す.風レンズ装着時も3枚翼水車よりも8枚翼水車の 方がパワー係数が低くなった.また,3枚翼水車では新型 ブレードよりも従来型ブレードの方がパワー係数が高く, 8 枚翼水車では従来型ブレードよりも新型ブレードの方 がパワー係数が高くなった.

風レンズの有無に関わらず,8枚翼水車の方がパワー係 数 Cp が全体的に低い値になった.これは,8枚翼水車は 翼幅が小さく、レイノルズ数が低くなったことで揚力係 数が低下したためと考えられる.また,8枚翼水車では覆 いによる抵抗の増加や,翼枚数が多いことによる流力干 渉の増加が生じたことも要因の一つと考えられる.



#### 3 数值解析

#### 3-1 数值解析概要

汎用の3次元熱流体計算ソフトウェア SCRYU/Tetra for Windows V8を用いた数値計算を行う.SCRYU/Tetra では, 移動境界に固定した回転メッシュとその外側の静止座標 に固定したメッシュをマッチング可能である.解析領域 は,実験水槽の寸法を参考にして幅 5.0[m],深さ 7.0[m], 長さ 3.5[m]とした. 流入条件は,流入速度 1.0[m/s] とし た. 解析手法は,有限体積法(非構造格子)を使用した. 乱 流モデルには, SST k-ωモデル(低レイノルズ乱流モデル) を使用した.

#### 3-2 ブレード設計

数値解析に向けて、NACA0030 翼型を基にキャンバー の違う3 種類のブレードを、NACA9330 翼型を基に厚み 比の違う5 種類のブレードを、NACA9310 翼型を基にテ ーパー比の違う5 種類のブレードを作成した.水車は直 径 φ 300[mm]で、ソリディティが一定となるように設計を 行い、計算時間短縮のため1 枚翼水車とした.Fig.6 にキ ャンバー別の翼型断面図を、Fig.7 に厚み比別の翼型断面 図を、Fig.8 にテーポー翼、Fig.9 に逆テーパー翼を示す.



Fig.6 キャンバー別翼型断面図



Fig.7 厚み比別翼型断面図



Fig.8 テーパー翼 Fig.9 逆テーパー翼

#### 3. 数值解析結果

Fig.10にキャンバー別のパワー係数 Cp の比較結果を示 す.キャンバーを下流側に付けるとパワー係数が向上し, 上流側に付けると低下することが分かる.これは,キャ ンバーにより流入する流れと翼面の間の角が変わり,揚 力が変化したためと考えられる.

Fig.11 に厚み比別のパワー係数 Cp の比較結果を示す. 厚み比を小さくするほどパワー係数が向上することが分 かる.これは、キャンバーと同様に、厚み比を変えたこ とにより流れと翼面の間の角が変化したことが要因と思 われる.

Fig.12 にテーパー比別のパワー係数 Cp の比較結果を示す. パワー係数がテーパー翼では向上し, 逆テーパー翼では低下した. これは, 翼端損失が, 翼幅の狭いテーパ

ー翼では減少し,翼幅の広い逆テーパー翼では増加したからだと考えられる.また,テーパー翼ではテーパ比0.3のブレードよりも0.5のブレードの方がパワー係数の最大値がわずかながら高くなった.これは,テーパー比0.3のブレードはかなり先細りな形状になっているため,流れが外に逃げ,翼端失速を起こしたためと考えられる.

#### 5 結言

実験結果から,8枚翼水車の性能が芳しくないことが分かった. これは,8枚翼水車模型は翼幅が小さく,レイノルズ数が低くなったことが影響していると思われるので,今後、もっと大きな模型によって再実験が望ましい.

数値解析結果から、キャンバーを流れの下流側に付け、 厚み比は小さく、テーパー比は 0.5 付近になるように設計 すると性能が良くなることが分かった.しかし、周速比 の高いところでは 0.3 のブレードの方がパワー係数が高 いため、使用条件によって使い分けるのが良いと思われ る.



研究代表者	経塚雄策
研究協力者	古賀寿和、松本聖馬
所内世話人	胡長洪

# 24 特 4-7

# フラッタ水力発電装置流れレンズの小型化に関する実験的検討

福岡工業大学 工学部 知能機械工学科 阿比留久徳

# 1. 目的

潮流などの流れを利用し,翼にフラッタを生じさせて,その動きによって効率的に発電する新しい小規模水 力発電技術について,これまでに10Wクラスの小型の基礎試験装置を用いた実験で発電効率 32-37%が得られ <sup>1)</sup>,また200-400Wクラスの実験装置で設計通りの発電量が得られることを検証している<sup>2)</sup>.

一方,風レンズ風車で実用化されているディフューザを用いて出力を増加する技術を利用し,23年度に小型の水力発電基礎試験装置を用いて2次元ディフューザ(流れレンズ)による出力性能向上の可能性を調べる 実験を行い,出力が1.5-3.3倍に増加する結果を得た<sup>3)</sup>.本研究では実用化に向けて,23年度の実験で用いた大型流れレンズの小型化について,応用力学研究所の深海機器力学実験水槽を利用して実験的に検討を行う.

# 2. 実験装置及び実験方法

本年度用いた2種類の流れレンズの断面を図1 に示す.流れレンズの流路方向の長さは、レンズ 大が翼弦長100 mmの3倍、レンズ小が2倍の長 さとした.これは、昨年度の流れレンズのそれぞ れ約2/5、3/10の長さに相当する.インレット角、 ディフューザ角は、それぞれ昨年度最適であった 10 deg,20 degとした.組立後の形状を図2に示 す.実験は、レンズ大、レンズ小、レンズ小のつ ばを外した(つばなし)の3パターンで行った. またスロート幅は250 mm ~450 mmの範囲で変化 させた.使用するフラッタ発電装置は昨年と同様 である.曳航台車へ取付けた状況を図3に示す



図2 流れレンズ組立状態







図3 曳航台車への取付け状況

#### 3. 実験結果

流速をパラメータにしてスロート幅と発電量の関係を流れレンズなしの場合も含めて図4に示す.スロート 幅が狭まるにつれて発電量は増加しており,スロート幅250mmでは,流速1.25 m/s で12W強の発電量が 得られた.また同図を流れレンズなしの場合に対する比率にして図5に示す.発電量の増加は,スロート幅が 広い 450 mm において, 流速が遅い 0.75m/s で 2.2 倍, 流速の速い 1.25m/s で 1.5 倍になる.スロート幅が狭い 250 mm においては, 流速 0.75m/s で 3.2 倍, 1.25m/s で 1.9 倍になる.これは大きな流れレンズを用いた 昨年度と同等の効果である.



因4 ハロード幅と光电里(レンハ八)

レンズ小の結果を図6に示す.発電量はスロート幅450 mmでは, 流速0.75m/sで2倍, 1.25m/sで1.5倍 増加する.スロート幅250 mmでは, 流速0.75m/sで3倍, 1.25m/sで2.1倍増加する. これはレンズ大と比 較すると効果はやや劣るものの,実用的にはレンズ小の規模で充分な効果があると言える.

レンズ小(つばなし)の結果を図7に示す.スロート幅450 mmでは,流速0.75m/sで1.8倍,1.25m/sで1.5 倍である.スロート幅250 mmでは,流速0.75m/sで2.4倍,1.25m/sで1.8倍である.これはつばがある場 合の約80%に相当しており,つばが無くてもかなりの効果のあることが確認できた.



#### 4. 結言

翼弦長の2倍の長さの流れレンズで,実用上充分な発電量増加効果のある事が確認できた.

#### 参考文献

(1) 阿比留久徳, et.al,"フラッタ水力発電システムの研究",日本機械学会論文集(B編)75巻758号,2009

(2) (株)技術開発コンサルタント,"農業の6次産業化に資する,超低落差用フラッタ方式マイクロ水力発電システム導入 による農業用水路のエネルギー利用の可能性調査",平成23年度農山漁村6次産業化対策事業緑と水の環境技術革命プロ ジェクト事業報告書,平成24年3月

(3) 阿比留久徳, "2 次元流れレンズによるフラッタ水力発電装置の出力性能向上", 平成 23 年度九州大学応用力学研究所 新エネルギー力学分野共同研究成果報告 23ME-3

# 垂直軸型発電タービンの性能向上に関する研究

広島大学大学院工学研究院 教授 岩下 英嗣

# 1. 研究目的

日本はエネルギー資源に乏しく、石油をはじめとするエネルギー資源の大部分を海外に依存しており 日本のエネルギー自給率は4%と低いものとなっている。片や発展途上国の経済発展により世界のエネ ルギー需要は高まる一方であり、エネルギー資源の枯渇が懸念されている。また、世界の多くの国が化 石燃料を使用しており、化石燃料を燃やすと二酸化炭素、窒素酸化物、硫黄酸化物などを発生する。こ のために地球温暖化や大気汚染による酸性雨など深刻な環境汚染問題の要因となっている。このような エネルギー問題の解決にむけ、風力発電や太陽光発電といった再生可能エネルギーが注目を集めている。

そんな中、海洋発電の一つとしてタービンを用いた発電システムを提案し、研究する目的で本課題を 提出していた。当初、システムとしては垂直軸型タービンを用いることを考えていたが、その後より効率 の高い水平軸型タービンを用いたシステムを採用するに至っている。全体のシステムとしては、OIST(沖 縄科学技術大学院大学)と共に、浮体式海流発電を考えることにしている。この海流発電の特徴である 浮体式は水深 100m より深い海流が安定したところで発電を行うことである。OIST は風力発電タービ ンブレードを転用して試作機を製作し、海で船による曳航試験を行った。試作機は振動や回転すること なく安定して発電を行うことができ浮体式海流発電は可能であることが分かった。

本研究では海流発電における水平軸型タービンに使用するブレードの最適設計、ローターの性能解析を行う。

# 2. 研究方法

- (1) 海流発電タービンブレードを Adkins & Liebeck 理論に従い、最適設計を行う。
- (2) 翼素運動量理論により、ローターの性能解析を行う。
- (3) 供試模型を製作し、風洞実験を行い実験結果を取得する。得られた結果を理論計算値比較して性 能推定法の検証および性能確認を行う。

# 3. 研究組織

本研究は次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院 エネルギー・環境部門	教授	代表者
伊藤 悠真	広島大学大学院工学研究科 輸送・環境システム専攻	修士課程1年	実験補助
小川 恭平	広島大学大学院工学研究科 輸送・環境システム専攻	修士課程1年	実験補助
梶野 恭平	広島大学工学部 第四類 輸送機器工学課程	学部4年	実験補助
高橋 悠	広島大学工学部 第四類 輸送機器工学課程	学部4年	実験補助
徳永 紘平	広島大学工学部 第四類 輸送機器工学課程	学部4年	実験補助
胡 長洪	九州大学応用力学研究所	准教授	実験指導

# 4. 研究結果

# 4.1 ブレードの設計

海流発電タービンブレードは、沖縄近海を流れる定常的な黒潮をターゲットとしているので設計流速 を1.2m/sまでとし、所有している発電機から最低出力 500W を得ることができる最も Span 長が短いブ レードを設計した。スパン長を短くしたのは、性能確認用の風洞試験を行う際に供試模型の重量が重い と危険であるからである。また設計周速比も *λ* = 4.0 とし実験時の安全性を考慮している。

ブレードの設計には翼素運動量理論の一種である Adkins & Liebeck 理論を用いている。この理論に 従い、最適設計を行う際にはブレード翼素の2次元翼性能が必要である。本研究では2次元翼性能解析 ツール"X-foil"を使用して、2次元翼性能を把握している。

最適設計したブレードの主要目を以下に示す。Fig.1 にブレードの Chord 長分布と Pitch 角分布を示 している。横軸 ξ はブレード Span 長の無次元値である。ξ=0 がブレードの根元であり、先端がξ=1 の グラフとなっている。海流発電タービンブレードは、風力タービン用ブレードと比べると、Pitch 角の 捩じりが大きい低回転高トルク型のブレードになっていることが分かる。

Table 1: 主要目						
Diameter (m)	D(=2R)	1.46				
Skew angle (degs.)		0.0				
Rake angle (degs.)		0.0				
Number of blade	$N_B$	3				
Power (W)	P	610				
Design wind speed (m/s)	U	1.2				
Design tip speed ratio	$\lambda$	4.0				
Wing section		NACA 642-415				



Fig.1: Chord 長分布 & Pitch 角分布

# 4.2 ローターの性能解析

翼素運動量理論によりローターの性能解析を行った。性能を比較する際に用いる無次元値 $C_P$ と $C_T$ を定義する。 $C_P$ はパワー係数を表し、 $C_T$ は推力係数を表す。

$$C_P = \frac{P}{1/2\rho SV^3}, \quad C_T = \frac{T}{1/2\rho SV^2}$$
 (1)

Fig.2 に得られた結果を示す。最適設計された海流発電タービンのローター性能は  $\lambda$ =4.0 の時に  $C_{Pmax}$ =0.43 であることが確認される。Fig.3 に P - N 曲線を示す。横軸 N(rpm) はローターの回 転数である。発電機のギア比は 1:3.5 であり、図中の N はロータの回転数を示している。ローターと発 電機の P - N 曲線を重ね合わせ、交点を求めることにより Fig.3 に示す発電機の P-V 曲線を得ること ができる。設計流速 1.2m/s のときに発電機の出力は 507W である。

# 4.3 風洞実験

設計したローターを製作し、広島大学の風洞において性能試験を行った。実験概要図を Fig.4 に示す。 供試模型を2分力風車天秤に取り付け、風洞の吹き出し口には風速計が設置されており、ここで風速


Fig.2: C<sub>P</sub>-λ 曲線 & P-N 曲線



Fig.3: P - N曲線 & P - V曲線

V(m/s) を計測する。また、コントローラーでローターの回転数 N(rps) を制御し、AD 変換ボードを通 じて風速 V(m/s)、回転数 N(rps)、スラスト T(kgf)、トルク Q(kgf m) を PC にデジタルデータとして 得る。データ収録は 100Hz で5 秒間行い、データの平均値を実験解析に使う。パワー P(W) については これらのデータから算出する。

### 4.3.1 供試模型

海流発電タービンブレードの模型を製作した。ブレードの材質は強度計算より、ABS 樹脂とした。ブレード1枚当たりの重量は1940g である。実験の時はローターのボス部分の抵抗を減らすために、発砲 スチロールで作ったボスキャップを取り付けて行った。

# 4.3.2 実験方法

実験方法は比較的単純であり、下記の方法で行っている。

- (1) ボスキャップのみを取り付け、風速を一定で吹かし回転数Nを0~20(rps) まで0.5(rps) ずつ上げ、 スラストT<sub>1</sub>(kgf) とトルクQ<sub>1</sub>(kgf m)を測定する。
- (2) ブレードを取り付け、同じ風速で回転数Nを $C_P$ が0になる回転数まで0.5(rps) ずつ上げていき、 スラスト $T_2(kgf)$ とトルク $Q_2(kgf m)$ を測定する。





Fig.4: 実験概要図

ローター性能の解析においては、ローターを付けた状態の計測量  $T_2, Q_2$  からボス部分のみの計測量  $T_1, Q_1$  を差し引く必要がある。

# 4.3.3 実験結果・考察

実験値と計算値の比較を行ったグラフを Fig. 7 に示す。 $C_P$  curve を比較した場合、設計周速比  $\lambda$ =4.0 の  $C_P$  は計算値と実験値は一致している。 $C_T$  curve を比較した場合、設計周速比  $\lambda$ =4.0 の  $C_T$  は実験値 の方が計算値より 5% 大きくなっている。設計したブレードは chord 長が大きいため、空気の摩擦抗力 が影響していると考えられる。さらに翼素理論は 2 次元翼性能を使っているため 3 次元影響もあると考えられる。

 $C_P$  curve と  $C_T$  curve ともに、周速比  $\lambda$ =4.0 から遠ざかるほど計算値とのずれが大きくなっている。 このローターは設計周速比  $\lambda$ =4.0 の時に最大パワーを発揮するように設計している。つまり、設計周速 比  $\lambda$  = 4.0 の時に最も翼性能が高くなるような Pitch 角を計算している。そのため周速比  $\lambda$  = 4.0 から 遠ざかるほど、ブレードの翼素の流入角が大きくなる。このため 2 次元翼性能データベース範囲以外の 翼素性能が必要となる。翼素性能は迎角が -90~90(degs.) までデータベースとしてストアしておくこと が望ましいが、"X-foil"では不可能である。このような場合の性能解析では 2 次元翼素性能データベー スの最大迎角値もしくは最小迎角値を使用して計算を行った。このために実験値と計算値には  $\lambda$  = 4.0 以外で差がみられる。



Fig.5: ブレードと取り付け治具



Fig.6: ブレード取り付け図



Fig.7:  $C_P$  curve &  $C_T$  curve

# 4. まとめ

本研究では海流発電タービンブレードの最適設計及び性能解析を行った。本研究の成果を以下に記す。

- (1) Adkins & Liebeck 理論により海流発電タービンブレードの最適設計を行った。制約条件について は種々検討した結果、R = 0.73m、V = 1.2m/s、P = 0.61kW、 $\lambda = 4.0$ としている。
- (2) 理論解析によりローターの性能を把握した。今回設計したローター性能は $\lambda = 4.0$ のとき  $C_{Pmax} = 0.43$ である。
- (3) 供試模型を製作し、風洞実験により性能確認を行った。計算値と実験値の比較を行い、両結果が良い一致を示すことを確認している。

## 浮体式風車の弾性挙動に関する研究

大阪府立大学大学院・工学研究科 二瓶 泰範

目的

日本の沖合の排他的経済水域を利用した、洋上風力発電利用に関する研究開発は昨今取り上げられる陸上風力発電の 様々な問題(風車ブレードが作り出す振動音による人体の影響や山間部に設置する際の森林伐採等々)の観点からも喫緊 の課題であると考えられる。沖合は水深が深く、着底式工法には限界があり、浮体式工法により風力発電を実現する必要 がある。洋上では安定した風が吹くことが既に報告されているが、浮体式洋上風力発電においては風車ブレードの回転影 響が係留索や浮体動揺に大きな影響を及ぼすことが懸念される。またタワーの弾性影響は、洋上風車のメンテナンス時に ナセルで作業する作業員の安全性確保という意味で大きな意味を持つと考えられる(実際、陸上では14m/sの風速で作業 は中止される)。

そこで本申請課題研究では、風車タワーの曲げ剛性や風車プロペラの曲げ剛性等を考慮したスケール模型を製作し、応 用力学研究所が所有する水槽を用いて風や波浪という複合環境下での水槽試験を行い、洋上風力発電の弾性挙動について 詳細な知見を得ることを研究目的とする。

#### 研究の具体的方法

[1]模型試験

本研究において浮体は TLP を想定している。TLP は波浪中での動揺に優れ洋上風力発電用の下部構造物としては 優位性があると考えている。スケール模型は、アメリカ国立再生可能エネルギー研究所(NREL)が既にモデル風車と して提示している 5MW 風車の曲げ剛性等のパラメータを用いる。申請者の事前検討において曲げ剛性をそのままス ケールダウンすると製作上適当な材料がないことが分かっている。そこで、曲げ「振動」のパラメータをスケール ダウンすることによりスケール模型を製作することとする。弾性の相似則は風車タワー、風車ブレードに適用する こととする。

[2]水槽試験

水槽試験においてタワー基部や風車ブレードに作用する曲げモーメント、ねじれのみならず、浮体の運動計測、 索張力、ナセル部の加速度等の計測を行う。

結果

#### [1] 模型主要目

本研究では想定実機の 1/50 スケール模型を使用する.模型風車の主要目を Table1 に示す.

Table1 Principal particulars of the scale model of the wind turbine

Items	Unit	Value
Scale ratio	-	50
Number of blades	-	3
Blade diameter	[cm]	232
Height of the hub	[cm]	160
Tower diameter	[cm]	3.2~5.5
Tower thickness	[mm]	1

また Fig.1 に模型風車の外観図を示す.



## Fig.1 Exterior design of the TLP type wind turbine

模型にはタワー基部、ブレード基部、係留索にひずみゲージを取り付けている。

## [2]水槽試験結果

ここではブレードの回転によって誘起されたと考えられるタワー基部に生じる曲げモーメントの結果について示す。風 単独試験及び風・波共存場試験において,波単独試験では観測されなかったタワーのx軸回りの曲げ振動が観測された.こ れよりこの曲げ振動はブレードの回転に起因すると考えられる.そこでこのブレード回転による曲げ振動を BIV(Blade Induced Vibration)と呼ぶこととする.Fig.2 に風単独試験(Wind velocity 1.08[m/s]),波単独試験(Wave period 1.20[sec],Wave height 10[cm])におけるタワー基部のx軸回りに作用する曲げモーメントの時系列データを示す.



around *x*-axis due to constant wind

実験で観測された x 軸回りの曲げモーメントの振幅は,波単独試験における共振時のタワー基部に作用する y 軸回りの 曲げモーメントの値と同等の値であった.さらに Fig.2 からこの x 軸回りの曲げ振動はうねり現象を起こしていることが確 認できる.

# • 成果報告

- i. TLP 型洋上風力発電の弾性応答について, 幸前穂, 二瓶泰範, 飯島一博, 日本船舶海洋工学会春季講演会,2012 年6月
- ELASTIC CHARACTERISTICS OF TLP TYPE OFFSHORE WIND TURBINE, Yasunori Nihei, Minori Kozen, Kazuhiro Iijima, ASME OMAE2012, 2012
- 研究組織

役 割	氏 名	所属·身分	滞在延べ日数
研究代表者	二瓶 泰範	公立大学法人大阪府立大学・助教	2 日
所内世話人	胡 長洪	国立大学法人九州大学・准教授	

# 船舶向け波浪エネルギー回収システムの開発

大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 橋本博公

### 研究目的

近年、化石燃料の枯渇問題や地球温暖化への関心の高まりを受けて、船舶分野においてもグリーンイ ノベーションが強く求められている。一航海に長期間を要する海上輸送では、航行中に何らかの手段で エネルギーを回収することが期待されるが、船舶においては定速航行が航海の大部分を占めるため、自 動車分野などで行われている減速時のエネルギー回生などはほとんど見込めない。また、風力や太陽光 といった自然エネルギー吸収では、限られた甲板スペースのため発電容量が絶対的に不足する。そこで、 巨大な船体を動揺させる波浪に着目し、本来であれば船体運動に与えられて造波エネルギーとなって消 費される波浪エネルギーの一部を吸収するシステムを開発し、その効果・実現性について検討を行う。

## 波浪エネルギー回収システムの概要

波浪によって引き起こされる船体運動としては、縦揺れが最も顕著であり、この運動を介した波浪エ ネルギー吸収システムを目指す。今回検討したシステムは、図1のような液体タンクとその両端に設置 した浮体を基本とするものであり、エネルギー回収の原理は次の通りである。

- 入射波に応じてタンクは船体縦揺れと同じ運動をするが、タンク内の液体は常に水平を保つので、 船体運動に応じてタンクと水面が相対傾斜角を持つ。
- ・ 浮体は水面に追従するので、タンクから見ると浮体が上下動することになる。仮にピッチ角が小さい場合でも、タンクの長さを乗じて得られる両端位置での上下変位量は小さくない。
- ・ 浮体の上下動を利用して、油圧ポンプ、油圧モータを駆動し、発電機を回すことで電気エネルギー を得る。
- ・ 専用タンクの搭載は様々な制約があるので、バラストタンク・バラスト水を利用する。



図1 波浪エネルギー回収原理

## ばら積み貨物船を対象とした試設計

本研究では国内造船所の主力であるばら積み貨物船を対象とした。ばら積み貨物船は空荷が航海の半 分を占めるため、バラストタンク・バラスト水を用いた波浪エネルギー回収システムに最適な船種であ る。タンクはスロッシング防止のためU字型形状とし、固有周期を船体縦揺れ運動が発達し始める出会 い波周期より短く設定することで、ピッチングが発生する全ての出会い波周期に対して発電が可能であ る。垂線間長 190m のハンディマックス型ばら積み貨物船を対象に、そのバラストタンクサイズから設 計した波浪エネルギー回収装置のイメージ図と諸元を図2、表1に示す。



4.3 m

図2 バラストタンクを利用した発電システムの設計案

-++ 1	=+/
- <del></del>	三方一丁
11 1	ゴロノロ

浮体寸法 [m]	$L \times B \times D = 3.0 \times 2.3 \times 2.0$
浮体+ピストン+回転アームの質量 [kg]	6900
浮体の復原力係数 [N/m]	67600
タンクの固有周期 [sec]	6.7
航海速度 [knot]	14 (Fn=0.17)
ピッチングが見込める最小出会い波周期 [sec]	6.9 (λ/L=0.8)

続いて、4 種類の波条件に対する最大トルクの計算結果を表 2 に示す。浮体の上下力に回転軸から浮体ピストンまでの水平距離を乗じて得られるトルクは非常に大きな値となっていることが分かる。

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	
波長船長比	0.8	0.8	1.2	1.2	
波高 [m]	2.0	4.0	2.0	4.0	
ピッチ振幅 [deg]	0.6	1.2	2.0	4.0	
最大上下力 [N]	9700	19400	32000	64000	
最大トルク [Nm]	262000	523000	872000	1740000	

表2 最大トルク

# 今後の課題

今後は入射波に対する船体およびタンク内浮体の上下運動予測モデルの構築を行う。併せて、油圧ポ ンプ、油圧モータ、発電機の選定を行い、発電量シミュレーションに必要な諸係数を決定する。これを 用いて、規則波中でのエネルギー回収量を算出する。さらに、想定航路の波浪頻度表および個別波の発 生確率にもとづき、一航海あたりの総回収エネルギーの期待値を求めることで、本システムの実現性を 検討する予定である。

# マルチカラム型波力発電浮体の性能評価に関する研究

九州大学大学院工学研究院 准教授 安澤 幸隆

# 1. 研究目的

地球温暖化対策や従来の化石エネルギーなどの枯渇の可能性から、近年、世界的に再生可能エネル ギーの利用が注目されている。海洋再生可能エネルギーの一つである波力エネルギーの利用に関する 研究は、日本では1980年代におこなわれたが、当時の社会的な事情や経済性などの理由により実用 化が遅れているが、欧州では次世代の代替エネルギーの有力な選択肢として活発に研究開発が行われ ている。そこで、われわれは、日本における波力発電の早期実用化を目指して、平成20年度より新 型のマルチカラム型波力発電浮体システム(MC-WEC)の研究を開始し、振動水柱(OWC)型発電を 利用した、複数の発電用 OWC カラムおよび浮力用カラムが、広いデッキに連結された波力発電浮体 システムを提案している。

これまで研究において、発電機をノズルに置き換えることで省略し、波エネルギーから空気エネル ギーへの変換性能に主眼を置いて調査してきた。しかし発電システムとしての性能を評価するために は最終的な発電性能を評価する必要がある。そこで本研究ではOWCカラムにタービンと発電機から なる発電ユニットを取り付けて規則波中の水槽実験を行った。

2. 研究方法

(1) OWC カラムを想定したアクリル製円筒カラム、およびそれを取り付けるための上面のプレート、 ノズル部、タービン部などを設計・製作する。

(2) カラム内の水位変動および圧力変動、タービン回転数、出力電力を計測する。また、周辺の波浪およびカラム内の自由表面挙動を録画する。

(3) シミュレーションと実験と比較検討を行う。

3. 研究組織

本研究は次のような組織で行った。

氏名	所属	職名	役割・担当
安澤幸隆	九州大学大学院工学研究院海洋システム工学部門	准教授	代表者
木下順二	頁二 九州大学大学院工学研究院海洋システム工学部門		計測
中尾圭輔 九州大学大学院工学府海洋システム工学専攻		修士2年	実験補助
高松直登	九州大学大学院工学部地球環境工学科	学部4年	実験補助
胡 長洪	九州大学応用力学研究所	准教授	実験指導

# 4. 実験概要

本研究において実験に使用する OWC カラムは先行研究の結果を踏まえて設計したものである。また、タービンについては 16 枚翼と 8 枚翼の 2 つのウエルズタービンを製作し、等価なノズルで置き換えた場合の実験も行った。ここに、タービンの空気通過面積とノズルの面積を等しくすることで発電機をつけた場合とノズルで置き換えた場合を対応させている。表 1 に OWC カラムの寸法、図 1 に実験模型を示す

実験は応用力学研究所の深海機器力学実験水槽にて行った。周波数応答特性を調べるために波周期 を 0.8[sec]~3[sec]まで変化させ、それぞれの波周期に対して、OWC によるエネルギー吸収を調べ るために空気室内圧力とカラム内水位を計測した。水位の計測には超音波式変位センサを用い、圧力 の計測には圧力センサを用いた。また発電性能を調査するためにタービンの回転数を回転検出器によ り計測した。実験モデル及び計測器の水槽配置を図2に示す。これらの計測結果を分析し、OWC 発 電性能の特性を調べた。

表 1 <b>OWC</b> カラムの寸法				
直径(mm)	高さ(mm)	吃水(mm)		
600	300	70		



図1 実験模型



ウェールズタービン(16枚翼と8枚翼)とノズル



図 2 水槽配置

# 5. 実験結果と考察

5.1 タービン回転数の時刻歴応答

図3、図4、図5に代表例として波周期1.8秒、2.4秒、2.8秒のタービン回転数の時刻歴応答を示 す。時刻歴応答の特性として、タービンが全く回転しないものと、入射波を受けて回転数が立ち上が り、その後回転数が一定となる期間があり、その後さらに回転数が上がるものと下がるものに大別さ れる。また16枚翼タービンと8枚翼タービンで挙動がよく一致している。



図 3 時刻歴応答(波周期 1.8 秒)



時刻歴応答(波周期2.8秒)  $\boxtimes 5$ 

5.2 周波数応答特性

図 6 に回転数が立ち上がった後に一定となっている状態での回転数、図 7 に最大回転数の周波数 応答を示す。16枚翼、8枚翼どちらも波周期2.3秒と2.6秒にピークがある。また一定状態、最大値 どちらのグラフも全域で16枚翼のほうが大きくなっている。



図6 回転数(一定状態)

図 7 回転数(最大値)

図 8~12 に圧力振幅、変位振幅、圧力に対する変位の位相遅れの周波数応答を示す。圧力振幅の 値をみると、ほぼ全ての範囲でタービンの時の方がノズルの場合より高くなっている。このことから、 タービンの空気通過面積とノズルの面積を等しくして置き換えをするということが想定どおりにい っていないと考えられる。また位相を見ると、波周期が大きいときは変位が圧力に対して 90 度の位 相差をもつ一次遅れ系となっていることがわかるが、波周期が短くなっていくと波上側変位が圧力の 180 度遅れ、波下側変位が圧力と同位相となるような傾向がみられる。また数値計算と実験結果を比 較すると、波周期の短いところで食い違いが見られる。



図 8 圧力振幅





図 9-12 に波上側変位、波下側変位、位相差を示す。波周期が大きいときは波上と波下の変位の位 相差が無く振幅の差も小さくカラム内の水面が一様に振動しているが、波周期が小さいと水位の振幅 と位相がずれていき、最終的に1次モードのスロッシングがおこっていることがわかる。





図 20,21 に波上変位で計算した場合と波下変位で計算した場合の一次変換効率を示す。一次変換効率は OWC カラムの性能を示す指標となり、入射波エネルギーEw と波吸収エネルギーEa を用いて、 Ea/Ew で表すことができる。ここで一次変換効率は以下の式で表せる。

$$\frac{E_a}{E_w} = \frac{\frac{1}{2} PzA_w \omega \sin \theta}{\frac{\rho_w g^2 a^2}{8\pi} (1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh})(\tanh kh)TB}$$

ここに、P:空気室内圧力、z:空気室内水位、Aw:空気室断面積、θ:水位と圧力の位相差、h: 水深、k:波数、a:波長、ρw:海水密度、B:空気室幅、T:波周期

数値計算と実験結果を比較すると、波周期の大きいところでは概ね整合性が見られるが、波周期が 小さくなると波上変位による計算では数値計算結果より小さい値となり、波下変位による計算結果は 大きくなる。



# 6. 結言

先行研究の結果を踏まえて一次エネルギー変換性能が高くなるように設計した OWC カラムにつ いて実験を行ったところ、OWC 内においてスロッシング現象が発生しエネルギー変換性能に悪影 響を及ぼすことがわかった。また、16 枚翼タービンと 8 枚翼タービンをもちいて発電実験をした結 果、失速する現象が見られた。さらに、発電用モーターの選択が適切でなかったため、発電性能の 計測には失敗した。適切なモーターの選択およびノズルと対応する等価なタービン制作する必要が ある。一次変換効率とタービン回転数のピークは違ったところにあるため、設計時に一次変換と二 次変換の両面を考慮する必要がある。タービンは周期の短い入射波に対しては回転せず、周期の長 い入射波に対しては不安定な挙動を示したが、その時刻歴挙動は 16 枚翼タービンと 8 枚翼タービ ンの間で同様な傾向が見られた。等価ノズルとタービンの圧力振幅と変位振幅の比較から、タービ ンの翼間の開口部を広げることで適切な圧力と水位変動にできる可能性を見出した。

# 機械的伸縮刺激に対する間葉系幹細胞の分化に関する研究

名古屋大学 森田 康之

#### 1. まえがき

生体内の細胞は様々な力学的刺激を受けており、これらの刺激が細胞の機能の調整に重要な役割を果たしうることが近年明らかになっている。特に繰り返し伸縮は、細胞の整列化や、幹細胞を腱・じん帯細胞へ分化させる作用を持つことが報告されている<sup>(1),(2)</sup>.このような伸縮による細胞制御は、難治性である腱障害の再生医療において応用が期待されている。しかしながら、細胞の腱細胞分化において、どのような条件の伸縮が最も有効であるかに関しては、未だ明確に評価されてない。また細胞の分化評価には、PCR 法による遺伝子発現量の解析が主に用いられるが、より直接的に分化細胞の機能を評価できる Western blot 法による細胞内たんぱく質の発現量の変化はあまり報告されていない。そこで本報では、伸縮条件の違いによる幹細胞の配列変化および腱細胞への分化促進効果を遺伝子とたんぱく質の両面から評価し、最適な分化条件について検討した。

#### 2. 実験方法

#### 2. 1. 伸縮実験

実験にはヒト骨髄由来間葉系幹細胞 (BMSCs) を用いた.フィブロネクチンをコーティ ングしたシリコンチャンバーに細胞を接着させ、コンフルエント直前になるまで2日間 培養した.その後、自動伸展装置を用いてチャンバーを引っ張ることで細胞に繰り返し 一軸伸縮刺激を与えた(Fig. 1).伸展装置は温度37℃,CO2濃度5%に設定したインキュ ベータ内で作動させた.伸展率は5%,10%,15%の3種類とし、各伸展率で24h および48hの伸縮を行った.伸縮周波数は全条件において1Hzとした.また、伸縮を与 えず培養した細胞をコントロール群とし、ストレッチ群と比較した.



Fig.1 Cell stretching device.

#### 2.2.解析法

伸縮後の細胞の遺伝子とたんぱく質の発現量変化を解析し, 腱細胞への分化を評価した.本実験では腱細胞への分化を示す因 子として, 腱細胞から分泌される腱の主な構成たんぱく質 Collagen I (Col I)と Collagen III (Col III), 腱やじん帯などの結合組織に 生じる糖たんぱく質 Tenascin-C (TNC), さらに骨格結合組織系の転写因子 Scleraxis (SCX)を用いた.これらの発現量の増加が腱 細胞への分化促進を示す.ストレッチ群,コントロール群共に, Real-time PCR 法により Col I, Col III, TNC, SCX の遺伝子の 発現量を調べ, Western blot 法により Col I と TNC のたんぱく質の発現量を調べた.各因子の発現量は GAPDH の発現量により 標準化した.さらにストレッチ群の遺伝子およびたんぱく質の発現量をコントロール群における発現量で除し,伸縮後の発現量 が非伸縮の場合における発現量に対して何倍に増加したかを解析した.

### 3. 結果および考察

#### 3.1.細胞の整列

各伸縮条件における細胞の変化を, 位相差顕微鏡により観察し, 細胞の 配列を画像処理により解析した. 伸縮開始から 48 h 後の各伸展率におけ る細胞の様子と、各整列角における細胞の割合を Figs. 2,3 にそれぞれ示 す.ここで伸縮方向と細胞の長軸方向がなす角度を整列角と定義した.図 から示されるように、非伸縮の状態では細胞に配向性は見られなかった.伸 展率5% では細胞が垂直向きに変化する傾向を示したが、非伸縮に対して 優位差は見られなかった. 伸展率 10 % では、全細胞の 69 % の細胞が整列 角 60 度以上に位置し、配向性を示した. 伸展率 15% ではより垂直方向に整 列し, 整列角 60 度以上に整列した細胞は全体の 77 %であった. これらの結 果より、細胞が伸展振幅を感知し、異なる伸展率において異なる応答を示したと 言える. この整列は、伸縮による細胞の長軸方向の歪み (軸歪み)を、細胞 が耐えられる限界値である許容限界軸歪み<sup>(3)</sup>以下に低減し,環境に適応し ようとするため生じると考えられる.また、軸歪みは細胞が伸展方向に対 して平行(0度)に位置するとき最大となり、垂直に近づくにつれ減少す る. さらに、同角度に位置しても、より大きな伸展率で伸縮される細胞 ほど大きな軸歪みを受ける. そのため, 高伸展を受ける細胞ほどより垂 直向きに整列したと考えられる.

#### 3. 2. 遺伝子のおよびたんぱく質の発現量の変化

Fig. 4 に各条件における遺伝子発現量の変化を示す. 図に示されるよう に、伸展率 10 % では全ての分化因子が非伸縮時の発現量に比べて増加 した. また、伸縮時間 24 h と 48 h を比べると、SCX は時間の経過によっ て増加したが、Col I, Col III は停滞傾向を示した. 一方、5 % では 24 h での SCX 以外増加は示さなかった. また 15 % では、時間の経過により



Fig.2 Phase contrast micrographs of BMSCs around 48 h stretch.



全因子が大きく減少した. これらの結果は, 伸展 率5%,15% に比して10%のほうが腱細胞への 分化促進効果が高く,特に10%,48h伸縮におい て最も腱細胞への分化が促進されたことを意味す る.

### 3.3.たんぱく質の発現量の変化

Fig.5に各条件におけるたんぱく質の発現量の変 化を示す.遺伝子における結果と同様に, Col I, TNC 共に伸展率 10 % で最大の増加を示し,実際 に腱細胞の働きを有することが分かった.特に TNC の増加量は伸縮時間を延長することでより増 加した.一方,5%では,48hまで伸縮を続けて も発現量は増加しなかった.15%でも因子の発現 量はほぼ増加せず,また48h伸縮を行うことで Col I の発現量がより減少した.これらの結果よ り,伸縮条件10%,48hで伸縮した細胞が,腱 細胞として最も高い機能を持つことが分かった.

#### 3.4. 腱細胞の分化条件

3.2, 3.3 節に示したように, 腱細胞への分化が 最も促進された伸展率は10% であり,5% では 非伸縮と比べほとんど変化がなかった.伸縮時間 で比べると,伸展率10% では24hよりも48h のほうがSCXやTNCの伸びが著しいという結果 となった.また,過去に行われた幹細胞の伸縮刺 激に関する研究において,腱細胞への分化を示す たんぱく質・遺伝子の発現量の急増を示す立ち上 がり時間の存在が示唆されている<sup>(1)</sup>.別の研究で は,10%,48hの伸縮により腱細胞への分化が



Fig.4 Gene expression of Col I, Col III, TNC and SCX after 5 % , 10 % and 15 % stretch. \*P<0.05



Fig.5 Protein expression of Col I and TNC after 5 %, 10 % and 15 % stretch, \*P<0.05

促進されているが、3% では促進されなかったと報告されている<sup>(4)</sup>.本研究の結果は上記の報告を支持する結果となった.つま り、腱細胞への分化は伸展率と伸縮時間の大小によって制御され、その負荷がある閾値以上になると分化促進が始まると示唆さ れる.よって5% においては、伸縮時間48hでも負荷が閾値に達さず、分化促進性が低かったと推測される.しかし、伸縮時 間を延長し細胞への負荷を増大させることにより、分化が促進されると思われる.一方、10% では、伸縮時間24h以下で閾値 に達し、分化が促進されたと考えられる.ただし、細胞の整列に伴い細胞に加わる負荷は小さくなっていくため、整列後に伸縮 を加えて続けても因子の大きな増加は生じないと考えられる.また、15% では、24hから48hの間で因子の発現量の低下が生じた. この原因は、伸展率が大きいため最も早く分化に必要な負荷に達するが、長時間の伸展では負荷が大きすぎ、伸展を続けること で細胞に悪影響が生じたためと考えられる.以上より、伸縮による細胞の分化条件には、分化開始に必要な下限閾値と、細胞に 悪影響が生じ始める上限閾値の存在が示唆される.

#### 4. 結論

ヒト骨髄由来間葉系幹細胞を用い,伸展率(5,10,15%)および伸縮時間(24,48h)の違いが分化に与える影響を検討した.伸展率10%では、腱細胞への分化を示す因子の増加が、遺伝子とたんぱく質の両面から確認された.特に伸縮時間を48hとすることで分化因子の更なる増加が生じた.また伸展率5%では、48hまで伸縮を行っても負荷が不十分であり分化促進性は低かった.一方伸展率15%では、伸縮負荷が大きすぎ、伸縮を続けることで遺伝子・たんぱく質の発現量が減少した.以上より、全条件中最も腱細胞へ分化促進効果が高い条件は伸展率10%かつ伸縮時間48hであることが分かった.また、伸縮は腱細胞への分化に有効であるが、伸縮条件に依存し、分化に必要な下限閾値と上限閾値が存在すると考えられる.

#### 参考文献

- (1) Zhang, L., et al, Effect of uniaxial stretching on rat bone mesenchymal stem cell orientation and expressions of collagen type I and III and tenascin-C, *Cell Biol Int.*, 2008, 32(3), 344-52
- (2) Altman, G.H., et al, Cell differentiation by mechanical stress, FASEB J., 2002, 16(2), 270-72
- (3) Neidlinger-wilke, C., et al, Cell alignment is induced by cyclic changes in cell length: studies of cells grown in cyclically stretched substrates, J Orthop Res., 2001, 19(2), 286-93
- (4) Chen, Y.J., et al, Effect of cyclic mechanical stretching on the mRNA expression of tendon/ligament-related and osteoblastspecific genes in human, *Connect Tissue Res.*, 2008, 49(1), 7-14

# 24 MF-2

種々の回転軸方向まわりに回転するサッカーボールに加わる空気力の風洞実験 福岡工業大学 工学部 知能機械工学科 溝田武人 (平成24年度応用力学研究所一般研究 報告書)

卒業研究発表会(2013.2.15)の前刷りによりご報告させて致します。

### 1. 緒言

近年、ブレ球や無回転シュートなどと呼ばれ揺れな がら飛翔するサッカーボールについてのメカニズムを 解明するため、研究が進められてきた<sup>1)</sup>.しかし、実際 に使われている回転するサッカーボールについてはス ムーズに回転させる機構の実現や、様々な回転軸方向 についての測定が困難であり,精度の高い空力実験デ ータが得られていない.

そこで,本研究ではサッカーボールを滑らかに回転 させ、さらに様々な回転軸の方向について測定できる 機構を開発した。また、大型風洞を使って回転したサ ッカーボールに加わる空気力の測定を行った.

#### 2. 関係する無次元量及び座標系と実験方法

#### 2.1 使用記号及び計算式

回転するサッカーボールに作用する空気力(抗力D, 揚力L, 横力S)は,

- 進行方向と回転軸の方向の関係
- (2) レイノルズ数 Re
- (3) スピンパラメータ Sp
- でまとめられる.

 $C_{D}$ : 抗力係数  $C_L$ : 揚力係数 Cs: 横力係数 ν:動粘性係数[m<sup>2</sup>/s] ρ:空気密度 [kg/m<sup>3</sup>]

- U:流速「m/s]N:ボールの回転数「rps]
- d:ボールの直径 [m] A:ボール直径断面積 [m<sup>2</sup>] より,

$$C_{D} = \frac{2D}{\rho U^{2}A}, \quad C_{L} = \frac{2L}{\rho U^{2}A}, \quad C_{S} = \frac{2S}{\rho U^{2}A}$$

$$Sp = \frac{\pi Nd}{U}, \quad Re = \frac{Ud}{\omega}, \quad \beta^{S} \overline{p} \overline{y} \overline{y} \overline{z} \overline{z}.$$

ピアノ線抗力等は上記Dには入れていない.



Fi tem

#### 2.2 測定方法

った.

風速 10~28[m/s]の範囲を 2[m/s]刻みで行った. ボ ールを 10[rps]まで回転させ、自由回転(120~420[s]) が止まるまで測定を行う. サッカーボールの回転は, 風洞床下から伸ばしたエアーノズルからジェット流を 当てることによりボールに初期回転を与えた. 回転軸の方向 φ を 0°, 30°, 60°, 90°の4 種類で, さらに正回転 (CW), 逆回転 (CCW), 無回転の場合を行

# 3. ボールの回転機構と支持方法 3.1 サッカーボールの回転機構

シャフト位置を決めるために幾何学的な中心位置を 求める.まずベアリングの付いたピンでボールの両端 を固定させて、スクリーンにボールの影を映し、あら かじめスクリーンに映した円との誤差を小さくする. その位置に穴をあけ、ベアリング付きのシャフトを挿 入し実験用ボールを製作した.ボールのバランスはお

もり(0.007[N])を埋め込む ことでとることが出来た.

空気漏れの問題があったが, プロのサッカー選手が蹴った ボールの回転数である約 10[rps]まで回転させても,ボ ールの形状を保ったまま回転 していたので、その問題は 無視できた.



Photo.1 Soccer ball and Bearing

### 3.2 ボールの回転軸方向の変更

ボールの回転軸を X-Z 平面上で $\phi = 0^\circ$ , 30°, 60°, 90°と変更させて測定を行った.

Fig.2 は軸を $\phi = 30^{\circ}$  傾かせているものである.





Fig.2 Change of an axis (Top view)

Photo.2 Change of an axis (Front view)

ボールの周りに一辺 40[cm]の枠をピアノ線 (0.45[mm])で製作することで、装置全体を動かすこと なく回転軸が変更できた. その結果, 直線性は良く他 方向への干渉も少なかった.

## 3.3 ボール支持と空気力検出機構

Fig.3 に実験に使用するために製作したサッカーボ -ルの支持の様子を示す.



Photo.3 Rear view of the device



<sup>7</sup> spring turnbuckle

Fig.3 Rear view of the device

実験に使用する 3 分力ロードセルの許容荷重は 50[N]であり、装置をその範囲以内に抑えるためフレ ームは軽量化しなければならない.そのため、アルミ 角パイプを使用している.本実験でのフレームの重量 は約 28[N]であった.

# 4. 実験結果

### 4.1 風洞実験結果



次に示す各グラフは風速 22[m/s], φ=0°時の回転 減衰(Fig4),抗力(Fig5),揚力(Fig6)の計測結果である.

U=22m/sの結果を見てみると,

- 抗力:CW, CCW 共に同じような結果が得られた.
- 揚力: CW, CCW で  $C_L = 0$ を中心に対照的に測定された. このことよりマグナス力が発生したことがわかる.

揚力の結果が 100[s]付近で測定値がブレだしたの がわかる.これは回転数が減少しブレ球(弱回転)に 似た結果が出たと予想される.

### 4.2. 発射実験と発射実験の軌道解析の比較

風洞実験より得た空気力から求めた飛翔軌道を,屋 外で行った発射実験で得た飛翔軌道と比較した. Photo.4に回転方向がCWでN=6[rps], $U_0=21.6[m/s]$ で発射した時のボールのストロボ画像を示す.

Fig.7の(a)にストロボから求めた軌道, (b)にU=

22 [m/s]時の風洞実験で得られた空気力から求めた軌 道を示す.



Photo.4 Orbital flight of a soccer ball



Fig.7 Comparison of orbital flight

Fig.7 のグラフはどちらも飛翔しているボールを上 から見たものである.

飛翔軌道は,発射装置と同様に風洞実験の飛翔軌道 もカーブした軌道が得られた.

軌道を比較してみると,発射実験で得た軌道が風洞実験の結果を解析した軌道よりあまり曲がっていないことがわかる.これは,発射実験を屋外でやった為,自然風の影響等について充分に考えられていないからである.この日の風速は最大 2.7[m/s]であった.今後屋内での実験が必要である.

#### 6. 結言

- 1)風洞天井と床面にアルミフレームをX型に組み、ピアノ線でボールを吊るすことで、中空のサッカーボールを滑らかに回転させる機構を完成させた.
- 2)大型風洞装置を使用して回転するサッカーボー ルに加わる空気力の測定に成功した.また、回転 軸の方向を変えた実験も成功した.
- 3)発射装置で実際にサッカーボールを発射した時の 軌道と、風洞実験の空気力から求めた軌道を比較 した。

### 7. 今後の課題

- ボールの回転軸を Y 軸方向にも変更させて測定を行う.(θ角を 30°, 60°, 90° 傾ける.)
- 2) 回転する滑面球に加わる空気力の測定を行う.

#### 8. 参考文献

 黒木康平(福岡工大院):2009 年度福岡工業大学工 学研究科知能機械工学専攻 修士研究論文:弱回転 サッカーボールの魔球的変化に関する発生メカニ ズムの空気力学的研究, (2009) pp. 4-94

# カルコパイライト型化合物半導体太陽電池基板の作製

宮崎大学 工学部 電子物理工学科 永岡章、吉野賢二

# 1. はじめに

太陽電池発電は、無尽蔵にある太陽エネルギーを利用し、CO<sub>2</sub> 未排出、発電時の 安全性が高い点等を他の発電機構、現在の我が国の状況を総合的に考慮して、エネ ルギー解決を担うリーダーになると考えられる。現在の太陽電池市場では最高クラ スのパフォーマンスを持つと期待され、Cu(InGa)Se<sub>2</sub> (CIGS) 化合物太陽電池は、光 吸収係数 10<sup>5</sup> cm<sup>-1</sup>を示し、太陽電池の主流である Si の 10<sup>3</sup> cm<sup>-1</sup>と比較して 100 倍の 値を持つ点、In/Ga 比を調整することでバンドギャップが最大変換効率達成理論値の 1.4 eV を持つ点を利用し、現在変換効率 20.3%を達成している。しかし、In や Ga の レアメタルは、透明導電膜産業などでも必要なため、将来相対的な不足という問題 を抱えている。

近年、CIGS と同様の物性値を持ち、レアメタルフリーで、構成元素が豊富にある 環境配慮した Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> (CZTS)、Cu<sub>2</sub>ZnSnSe<sub>4</sub> (CZTSe)、Cu<sub>2</sub>ZnSn(S, Se)<sub>4</sub> (CZTSSe)化 合物が注目を浴び、ここ3年間で着実に研究報告が増加している。「T. K. Todorov, K. B. Reuter and D. B. Mitzi: Adv. Mater. 22, 1 (2010).」の IBM の研究チームから CZTSSe 薄膜太陽電池において変換効率が 9.6%を達成の報告があり、2012 年 8 月には同じ IBM グループから変換効率 11.1%が達成されており、実用化へ向けて着実に進歩し ている。しかし、現在の CZTS 系化合物の問題点は、太陽電池における窓層やバッ ファ層のデバイス構造問題、格子整合の界面問題、固有点欠陥制御も挙げられるが、 一番の問題は、「良質な単結晶を用いた基礎物性値の評価の報告が圧倒的に少ないと いう現状」が考えられる。そのため、半導体の重要物性値であるバンドギャップも CZTS 1.4-1.6 eV、CZTSe 0.9-1.6 eV と正確な値も決定していない。

更なる高効率太陽電池作製を目指すため良質な CZTS 系単結晶作製、および単結 晶を用いた基礎物性の評価が早急さを求められる課題である。しかし、CZTS 系化合 物は、I-III-VI2 族カルコパイライト化合物同様、融点以上において一致融解せず、 包晶反応などの相転移によって CZTS 相となる。これまで I-III-VI2 族カルコパイラ イト化合物の単結晶を移動ヒーター(THM)法によって得られている。本研究では、 良質な単相 CZTS 系化合物単結晶成長を確立し、電気的特性、光学的特性などの基 礎部生評価を行い、CZTS 系太陽電池の変換効率増加へ繋げることを目的とする。

# 2. 実験方法

THM 成長において最も重要な溶媒には、構成元素であり、低融点金属である Sn を 選択し溶質である CZTS、CZTSe の溶解度を求めた。CZTS 多結晶溶質と Sn 溶媒を高真 空下で石英管に封入し 600-1000℃において 3 時間保持した後、CZTS の Sn 溶媒に取 り込まれた量から溶解度を求めた。図1に CZTS の Sn に対する溶解度曲線を示す。 溶解度は 600℃において 0.01 mol%、1000℃において 0.28 mol%であった。この値は、 同じ硫化物系化合物である CuGaS<sub>2</sub>の In 溶媒に対する値と同程度であったため Sn を 溶媒として使用した。 図2に THM 成長原理を示す。CZTS (CZTSe)多結晶 feed と Sn 溶媒をカーボンコートした石英アンプルに真空封入後、温度勾配の付いた炉内を低温側に移動させることで結晶を成長させる。最適な単結晶条件を求めるために CZTS-Sn と CZTSe-Sn の擬二元系状態図を作製した。



# 3. 結果と考察

図3と4に CZTS-Sn 状態図、CZTSe-Sn 状態図を示す。図3より CZTS 溶質が 30 mo1%以下の Sn 溶液においては CZTS 相と Sn 相に相分離し、30~60 mo1%の溶液においては SnS<sub>x</sub>相と CZTS 相に相分離した。60 mo1%以上においては CZTS 溶質が Sn に完全に溶解し相分離は見られない単一相であった。60 mo1%以上の Sn 溶液、成長温度 780~980℃において CZTS 単結晶成長が可能であることを突き止めた。

図4より CZTSe 溶質が40 mol%以下のSn 溶液においてはCZTSe 相とSn 相に相分離し、40~60 mol%の溶液においてはSnSe<sub>x</sub>相とCZTSe 相に相分離した。60 mol%以上においてはCZTSe 溶質がSn に完全に溶解し相分離は見られない単一相であった。60 mol%以上のSn 溶液、成長温度720~900℃においてCZTSe 単結晶成長が可能であることを突き止めた。表1にCZTSとCZTSe の最適条件を示す。

図5に CZTS、CZTSe 単結晶インゴットの断面図を示す。直径 10 mm、長さ 15~20 mm 程度の単結晶が得られた。鏡面研磨を行い、粒界は確認出来ず、クラックフリーの単結晶となっている。図6に(112)面の背面ラウエ回折パターンを示す。3 軸対称の格子像が得られ単結晶であることを確認した。得られた CZTS、CZTSe 単結晶が単相であるかどうかを調べるために XRD、Raman 測定を行った。図7に CZTS、CZTSe の 粉末 XRD 測定結果を示す。CZTS、CZTSe の XRD ピークは、ICDD (The International Centre for Diffraction Data)パターンと一致した。また、異相として考えられる二元系化合物(Cu<sub>2</sub>S、ZnS、SnS、Cu<sub>2</sub>Se、ZnSe、SnSe)のピークは XRD 測定からは観察されなかった。しかしながら、ZnS や Cu<sub>2</sub>Se 化合物の XRD ピークは、CZTS や CZTSe の ピークとほぼ一致するため XRD 測定のみでは単相とは言えないため、構成元素間特有の格子振動を観察する Raman 測定を行った。



表1 CZTS、CZTSeの最適成長条件

	CZTS	CZTSe
Growth temperature	900°C	850°C
Solution X [mol%]	70 [mol%] 80 [mol%	
Growth speed	4~5 mm/day	



図5 CZTS、CZTSe 単結晶インゴット断面図



(112) Back Laue pattern

図6 (112) 面背面ラウエ回折



図8 CZTS、CZTSe Raman スペクトル

図8に CZTS、CZTSeのRaman スペクトルを示す。CZTS において 287、338、371cm<sup>-1</sup> でピークが観察され、これらは報告されている値と一致している。特に IBM が報告 している 9.6%を達成した CZTS 薄膜の Raman スペクトルと比較して 371 cm<sup>-1</sup>ピークは 半値幅も小さく、強度の大きなものが観察されている。Cu<sub>2</sub>S 475cm<sup>-1</sup>、SnS<sub>2</sub> 315cm<sup>-1</sup>、 ZnS 219, 386, 422cm<sup>-1</sup>、Cu<sub>2</sub>SnS<sub>3</sub> 303, 351cm<sup>-1</sup>のような異相ピークは観察されなかっ たため単相の CZTS が得られていると判断した。CZTSe において 170、193、231 cm<sup>-1</sup> でピークが観察され、これらは報告されている値と一致している。Cu<sub>2</sub>Se 263 cm<sup>-1</sup>、 SnSe<sub>2</sub> 186 cm<sup>-1</sup>、ZnSe 205, 251 cm<sup>-1</sup>のような異相ピークは観察されなかった。最終 的に XRD と Raman 測定の二つの測定から単相 CZTS、CZTSe が得られた。

# 4. まとめ

THM によって CZTS および CZTSe 単結晶の作製に成功した。直径 10 mm、長さ 15~20 mm 程度の単結晶が得られた。背面ラウエ回折パターンより、3 軸対称の格子像が得られ単結晶であることを確認した。XRD、ラマン測定により良質な単相 XR 単相 CZTS、CZTSe が得られた。

# Research Development of Lightweight and High-strength Materials for a Wind-lens Turbine

学	尹 祥在	(九大院)	学	陳	丁丁 (九大院)	
	具 滋旭	(漢陽大院)		崔	洛三 (漢陽大)	
正	新川 和	夫 (九大)				

Sang-Jae YOON : Graduate School, Kyushu University, 6-1, Kasuga-Koen, Kasuga, Fukuoka, 816-8580 Dingding CHEN : Graduate School, Kyushu University, 6-1, Kasuga-Koen, Kasuga, Fukuoka, 816-8580 Ja-Uk GU : Graduate School, Hanyang University, 17 Haengdang-dong, Seongdong-gu, Seoul, 133-791, Korea Nak-Sam CHOI : Hanyang University, 1271 Sa3 dong, Sangrok-gu, Ansan-si, Gyeonggi-do, 426-791, Korea Kazuo ARAKAWA : Kyushu University, 6-1, Kasuga-Koen, Kasuga, Fukuoka, 816-8580

#### 1 Introduction

Wind power electric generation has attracted attention as one of the clean and renewable energies to prevent the earth environment from the increase of carbon dioxide. A lot of wind turbines have been installed at towers on flatlands and coasts in most places. The selection of the installation site is extremely important because wind velocity is largely affected by the surface friction caused by geographical features, and wind power is a function of the cube of wind velocity. To minimize the surface friction, offshore wind farms have also been developed in an attempt to increase the use of renewable energy sources. Research Institute for Applied Mechanics in Kyushu University has developed a new type of offshore wind farm with wind-lens turbines installed on a hexagonal shape float in Hakata Bay. For the next field study, it is planed that the research team will place larger wind-lens turbines on a wider float outside of the bay. Hence, it is required the research development of a lightweight and high-strength material such as carbon fiber reinforce plastic (CFRP) for the components of wind-lens turbines to generate higher electric generation.

This study investigated the effect of non-uniformity on property of CFRP fabricated by a vacuum assisted resin transfer molding (VaRTM). Two kinds of tensile specimens were sectioned from an inlet and vent location of the CFPR plate. Acoustic emission (AE) signals were monitored during tensile fracture test. Fracture surfaces were observed after the tensile test. AE signals were analyzed to study the delamination fracture behavior of the CFRP specimens. The fracture behavior was characterized from the amplitudes and first peak frequencies of the AE signals.

### 2 Experimental methods

Laminated composite specimens with single edge notch was fabricated by VaRTM process. The transverse flow VaRTM setup, which is usually employed for fabrication of vary large components, was chosen as shown in Fig. 1. Unidirectional carbon fiber fabric (SAERTEX) were laid up in a one-side mold with sequences of [+30/-30]<sub>6</sub>. Teflon films were inserted as a starter crack in the two edges as shown in Fig.2a. The fabrics were sealed in a vacuum bag, and then the resin (Nagase ChemetX) was impregnated with fiber layers using vacuum pressure. Whole process was performed at room temperature.

To make tensile specimens, ten pieces were sectioned from the inlet and vent location of the plate (See Fig.2a). The test piece has the geometry as shown in Fig. 2b. The piece was packed between two rectangular epoxy plates as shown in Fig. 3. The epoxy plates were used for clamping the specimen to the fixture of a universal tensile testing machine (Zwick250, testXpert). All tensile specimens were tested under a displacement-controlled condition using the tensile machine at a constant crosshead rate of 1mm/min.

The AE signals were monitored during tensile loading in real time. Two-channel AE detection system MSTRAS 2001 (Physical Acoustic Corp.) was used to record the AE data. Two AE sensors, S1 and S2 (Physical Acoustic Corp.), were attached to the epoxy plate surface using vacuum grease and mechanical fixture, and the distance between either of the two sensors and starter crack was  $35\pm1$  mm (See Fig. 3). AE measurement conditions of a pre-amp 40dB, threshold level 40dB and sampling rate 4MHz were applied. To verify fracture mechanism, the fracture surface was observed using scanning electron microscope (SEM) and a CCD camera after the tensile test.

### **3** Experimental results

Figures 4 and 5 show typical tensile load and amplitude of AE signal as function of a time for the inlet and vent specimens, respectively. Although there was data scattering, the average tensile load of the inlet part (348N) was higher than that of the vent part (321N). However, the two specimens showed similar AE characteristics regardless of the inlet and vent location (see Figs.4 and 5).

Two principal AE parameters, the amplitude and frequency of fast Fourier transform (FFT), were investigated at each AE signal. Refers to AE and fracture surface characteristics, the crack propagation behavior can be classified into five stages as shown in Fig. 6: (i) crack initiation (40-45dB, 110-170KHz), (ii) opening over the starter crack (AE signal weaker than threshold value), (iii) slow crack growth (40-60dB, 110-260 KHz), (iv) crack propagation (80-100dB, 110-260KHz), and (v) fast crack propagation (40-80dB, 110-260KHz).

### 4 Reference

 Enhancement of flow in VARTM using localized induction heating , Composite Science and Technology Vol. 63 15, 2201-2215, 2003



Fig. 2 CFRP plate and samples from inlet and vent location



Fig. 3 Specimen geometry for tensile test of CFRP sampled from inlet and vent location



Fig. 4 The load-displacement curve and corresponding AE behavior for CFRP sampled from inlet location



Fig. 5 The load-displacement curve and corresponding AE behavior for CFRP sampled from vent location



Fig. 6 Interlaminar fracture behaviors CFRP manufacture by VaRTM process

### 風レンズ風車のブレードの振動原因の究明と実働ひずみ計測

鹿児島高専 機械工学科 小田原 悟

# 1. 緒言

従来の小型風車に比べ 2~3 倍の発電効率を持つ風レンズ風車が九州大学応用力学研究所のグループを中 心として開発されてきた.しかし,現在の小型風車の設計要件に関する JIS1400-2 には集風体構造の風レン ズ風車のことは明示されていない.風レンズ風車の設計要件を JIS 規格に追加するためには各条件が必要と なってくる.そこで、3kW 級の風レンズ風車のブレードに作用する回転中の実働ひずみを測定し,風速や風 向の変動および集風体の有無がブレードに生じる実働ひずみにどのように影響するかを実験的に解明する.

#### 2. 実験条件および実験方法

九州大学応用力学研究所(春日キャンパス)において、図1に示すように大型風洞装置<sup>2)</sup>に設置した3kW 級 風レンズ風車を用いて実験を行った.今回の実験では、ブレードの根元部に計3枚のひずみゲージを貼りつけた.図2にひずみゲージを貼付けた様子を示す.ブレードの表と裏の半径方向にそれぞれ1枚ずつ、表の45度方向に1枚とした.以下、それぞれのひずみゲージから測定したひずみの値を&(表の半径方向), *e*(裏の半径方向), *e*(表の半径方向)と呼ぶ.これらから、ブレードに作用する遠心力や曲げモーメントを計算することができる.

計測は風速 U=15[m/s], 20[m/s], 25[m/s], 発電機の負荷の有無,角度 0°,15°,30°,集風体の有無の条件を組み合わせて行った.図3に風レンズ風車の構造と風向の定義<sup>1)</sup>を示す.また,集風体の振動を測定するためにレーザー変位計を使用した.





図2 ひずみゲージの翼への貼り付け位置



図3 風レンズ風車の構造と風向の定義<sup>1)</sup>

# 3. 実験結果および考察

### 3.1 ひずみ計測実験

測定したひずみより,遠心力 P および曲げモーメント M を算出した.ここで,ブレードの質量 m,ハブ中 心からブレード重心位置までの距離 r,ブレードの回転角速度 ω とすると遠心力 P,の理論式は次式となる.

 $P_r = mr\omega^2$ 

また、曲げモーメントの理論式は次式である.

$$M_r = \frac{1}{2} \rho U^2 C_D A r$$

ここで、流速 U, 空気密度  $\rho$ , 抵抗係数  $C_D$ , ブレード表面積 A とする.

次に、計測された平均ひずみ $G_F \geq G_F$ を用いて、それぞれの風速 Uでブレードに作用する遠心力  $P_m$ と曲げモーメント  $M_m$ を算出した. 遠心力  $P_m$ は次式である.

$$P_m = \frac{EA_c \left(\varepsilon_f + \varepsilon_r\right)}{2}$$

ここで、Acはブレードのひずみゲージを貼り付けた位置の断面積である.曲げモーメント Mm は次式である.

$$M_m = \frac{EZ(\varepsilon_f - \varepsilon_r)}{2}$$

Eはブレードの縦弾性係数,Zは断面係数である.表1に理論値及び計測値をまとめた.

表 I 退心力と曲けモーメント						
0°	集風体あり			集風体なし		L
速度 U[m/s]	15	20	25	15	20	25
回転数[rpm]	201	270	291	122	153	196
発電量[W]	482	1078	1801	158	343	721
ひずみ ε <sub>f</sub> [με]	141	232	285	56.9	72.8	83.7
ひずみ ε <sub>r</sub> [με]	76.0	137	231	5.09	11.0	29.4
遠心力 P <sub>r</sub> (理論値)[N]	420	758	880	155	243	399
遠心力 P <sub>m</sub> (計測値)[N]	998	1697	2374	285	385	520
曲げモーメント <i>M<sub>r</sub></i> [Nm] (理論値)	7.78	13.8	21.6	7.78	13.8	21.6
曲げモーメント <i>M<sub>m</sub></i> [Nm] (計測値)	7.07	10.3	5.87	5.63	6.72	5.90

表1 遠心力と曲げモーメント

計測値において遠心力 P および曲げモーメント M は集風体有りの場合,同じ風速であれば集風体無しに比べて大きい.これは,集風体による風速の増加に伴う回転数上昇により,ブレードに生じる遠心力が増加したためである.また,曲げモーメントの増加はブレードの表面に生じる風圧によるひずみ増加が原因だと考えられる.理論値と計測値には大きな誤差が見られた.この原因は断面形状が複雑なため長方形断面と仮定した断面積 A<sub>c</sub>や断面係数 Z から理論値を求めたこと,ブレードだけでなく風車全体の振動による影響,測定した風速とブレードが受ける風速の違いなどが挙げられる.

### 3.1.1 角度一定

図4及び表2に風向0[°]一定とした場合の風速とひずみの関係を示す.ブレード表側のひずみ & は風速の 増加に伴い増加している.これは風速の増加に伴う回転数上昇によりブレードに生じる遠心力が増加したた めであると考えられる.またブレードの表面に生じる風圧もひずみ増加の原因であると考えられる.また, これらのことは集風体無しでも同じことが言える.集風体の有無で平均ひずみに差があるが,これは集 風体の増速効果が関係していると考えられる.



表 2 唐	乳速と-	平均ひ	すみ	$\mathcal{O}$	闰份
-------	------	-----	----	---------------	----

風速	平均ひずみ ε <sub>f</sub> [με]		
[m/s]	集風体有	集風体無	
15	141	56.9	
20	232	72.8	
25	285	83.7	

### 3.1.2 風速一定

図 5 及び表 3 に風速 U=15[m/s]一定とした場合の風向とひずみの関係を示す. 0[°], 15[°]に比べ 30[°]は平均 ひずみが減少している.これは、風向の変化によってブレードの表面に生じる風圧が小さくなったことが原 因と考えられる.これにより、風車の回転数が減り遠心力が小さくなった.



図5角度と平均ひずみの関係



#### 3.2 集風体の振動

図7に風速と集風体の変位の関係を示す.風速20[m/s]で集風体の変位は大きくなっている.

#### 4. 結言

風レンズ風車のブレードに作用する実働ひずみを計測し,集風体の有無や風向,風速の違いがブレードに 生じる実働ひずみにどのように影響するかを実験により調査した.

- (1) 遠心力と曲げモーメントの理論値と計測値に誤差が生じた. 断面形状が複雑なため長方形断面と仮定して理論値を求めたことが原因の1つである.
- (2) 風速増加に伴って、ブレードに生じる半径方向の平均ひずみは大きくなった.
- (3) ひずみ振幅は集風体の有無によって明確な違いは見出せなかった.
- (4) 風速の増加に伴い集風体の振動振幅は増加した.また、振動数も増加した.

#### 参考文献

- 1) 小田原 悟・井上 雅弘・福田 孝之:「風レンズ風車ブレードの実働ひずみ計測と疲労強度・寿命測定」, 日本機械学会 2008 年度年次大会講演論文集, (2008).
- 2) 九州大学応用力学研究所新エネルギー力学部門風工学分野, http://www.riam.kyushu-u.ac.jp/windeng/index.php
- 3) 小田原 悟:風レンズ風車の翼振動の原因究明,日本機械学会年次大会講演論文集 CD-ROM, 2011-9-12, 東 京工業大学.
- 4) 小田原 悟:風レンズ風車ブレードの実働ひずみ計測,日本機械学会論文集 C 編, Vol. 76, No. 772, pp. 3336-3342, (2010).

表3 角度と平均ひずみの関係

角度[°]	平均ひずみ ε <sub>f</sub> [με]		
	集風体有	集風体無	
0	141	56.9	
15	144	62.7	
30	90.0	40.0	

# 薬剤徐放機能を有するバイオセラミックス/ポリマー 複合系多孔体の創製と評価

九州大学大学院歯学研究院 古谷野潔

### 1. 緒言

近年、コレステロールを低減させる薬剤であるスタチンが、骨形成能を促進する作用をもつことが明 らかになり、骨再生用薬剤としてのスタチンに関する様々な研究が行われている.しかし、これらの研 究は、そのほとんどがスタチンの効能に着目したものであり、骨再生治療への応用を検討した研究は少 ない.一方、現在臨床応用されている骨再生用の人工骨はバイオセラミックス単体で製造いるために、 有機・無機複合材料である骨に比べると脆性的破壊挙動が問題となっている.したがって、バイオセラ ミックスと生体適合ポリマーを複合化させた新規骨再生用材料の開発が進められている.

そこで本研究では、スタチンを含有した骨再生用有機・無機複合材料の開発を目指し、スタチンを2 種類の生分解性樹脂中に分散させ、臨床応用が進んでいるバイオセラミックスであるハイドロキシアパ タイト多孔体にコーティングした複合系多孔体を開発し、電解放射形走査型電子顕微鏡(FE-SEM)を 用いて微視構造を観察すると共に、圧縮力学特性を測定した.さらに分光光度計を用いて薬剤徐放速度 を測定し薬剤徐放性を評価した.

## 2. 実験方法

塩化メチレン (DCM) を溶媒として,生体適合性に優れる生分解性樹脂のポリ乳酸・グリコール酸共 重合体 (PLGA) あるいはポリカプロラクトン (PCL) の溶液を調整した.次に,フルバスタチン (Fluvastatin, Sodium Salt, 分子式 C<sub>24</sub>H<sub>25</sub>FNNaO<sub>4</sub>, 分子量 433.45) を各溶液に分散させた.ハイドロキシアパタイト (HA) 多孔体はテンプレート法により作製した.ポリウレタンスポンジを HA 微粒子を分散させたポリビニー ルアルコール (PVA) に含浸し余分な HA 分散 PVA 溶液を除去御,電気炉を用いて 1300℃で3時間焼結し 多孔体を作製した.作製した HA 多孔体を上述のスタチン分散 PLGA あるいは PCL 溶液に含浸させ乾燥さ せることで,多孔体の表面にスタチン/PLGA あるいはスタチン/PCL をコーティングしたスタチン含有型 複合系多孔体を作製した.また,スタチンを含まない PLGA と PCL を HA 多孔体にコーティング後,スタ チン水溶液に PLGA/GA あるいは PCL/HA 多孔体を含浸させ乾燥させることで,表面付着型複合系多孔体 を作製した.Table 1 に作製した複合系多孔体の各表記と混合条件を示す.

作製した複合系多孔体の微視構造を FE-SEM を用いて観察した.また,汎用力学試験機を用いて圧縮 力学特性を評価した.次に,多孔体をリン酸緩衝生理食塩水(PBS)に浸漬し,インキュベーターを用 いて一定温度 37℃で保管後,分光光度計を用いて PBS の吸光度を測定することで,薬剤徐放による PBS 中のスタチン濃度の変化を評価した.

### 3. 結果と考察

Fig.1 に HA 多孔体,スタチン含有型多孔体,表面分散型多孔体の微視構造を示す.Fig.1(a)より海綿 骨に類似の多孔質構造が形成されていることがわかる.一方,図(b)において,網目状構造は PLGA,棒 状構造はスタチンであり,網目状 PLGA により十分にスタチンが保持されていることが分かる.なお, PCL/HA 複合系多孔体においても,図1と同様の微視構造が観察された.

図2に圧縮弾性率と圧縮強度の測定結果を示す. 圧縮弾性率はポリマーコーティングにより増加する 傾向にある. また, PLGA コーティング材の方が PCL コーティング材よりも高い弾性率を示すが, これ は PLGA の方が PCL より弾性率が高いことに起因する. また, スタチン含有型の方が表面分散型より 弾性率が高く, スタチンの混合状態が弾性率に影響しているものを思われるが, その詳細なメカニズム は不明である.

図3に薬剤徐放試験の結果を示す.図3より,PLGA/HAはPCL/HAに比べて,スタチンの徐放速度が速いことがわかる.これは,PLGAがPCLよりも生分解速度が速いことに起因すると考えられる.また,表面分散型の方がスタチン含有型よりも早い徐放速度を示している.

Designation	Coating composition [%] (Post-processing [%])
НА	-(-)
HPS1	Statin [1] / PLGA [1] / DCM [98] ( — )
HPS2	Statin [1] / PCL [1] / DCM [98] ( — )
HPS3	PLGA [1] / DCM [99] ( Statin [1] / DW [99] )
HPS4	PCL [1] / DCM [99] ( Statin [1] / DW [99] )

Table 1 Designations of the scaffolds and details of the mixing conditions.



(a) HA scaffold (b) Statin contained type (c) Surface distribution type Fig.1 FE-SEM micrographs of PLGA/HA scaffold with statin.



# 人工股関節を置換した股関節における骨リモデリングに関する研究

九州大学大学院医学研究院 中島康晴

# 1. Introduction

Bone resorption has been recognized as one of the complications after total hip arthroplasty. Due to the implant with higher stiffness than bone tissue, stress shielding causes the bone density around the implant to decrease. Although such resorption is controlled by complicated biological factors under the influence of biomechanical conditions, simplified mechanical approach may be able to express the resorption behavior approximately. Creating bone remodeling models has had considerable amount of research and various algorithms and theoretical patterns using finite element method have been developed [1,2]. However, resorption within an inhomogeneous bone model is yet to be fully understood. In this study, a modified version of Huiskes et al was implemented into Mechanical Finder to see the effects of resorption of bone model with inhomogeneous material properties [3].

## 2. Analytical method

A three-dimensional femur model was constructed from CT data of a 68 year old male. The femoral head was removed and an implant with a ball diameter size of 26mm was fitted into the femur as shown in Fig.1. Contact between the implant and the femur was assumed to be bonded. Muscle forces were also ignored to simplify the simulation.



Fig. 1: Assembly of the model

Fig. 2: Boundary and loading condition and BMD evaluation points

Material properties of the bone were determined from the CT data as analyzed by Carter et al [4]. Material properties of the implant are shown in table 1. The boundary conditions are schematically shown in Fig.2. Loading of 218% BM was determined by averaging load values determined from routine activities by Bergmann et al. It was oriented at a frontal angle of 14-degrees and a transverse angle of 32-degrees. The distal end of the femur was completely fixed. The remodeling algorithm was repeated over a 5 year period, with the final age at 73 years old.

|--|

Property	Ti-6Al-4V	Alumina
Elastic Modulus (GPa)	113.8	370.0
Poisson ratio	0.342	0.220
Critical stress (GPa)	0.880	0.400
Yield Stress (GPa)	0.970	3.00
Density (g/cm <sup>3</sup> )	4.43	3.96

## 3. Results and discussion

Fig. 3 shows a simulated radiograph of the bone from initial age to 5 years. Changes in bone mineral

density (BMD) are compiled in Fig.4 at six points in proximal side of the femur shown in Fig.2. Fig 5 shows the changes in BMD as a percent of the original BMD at initial age after 5 years. It can be seen that both the proximal and distal side experiences bone resorption. It is interesting to see that the density around the greater trochanter appears to decrease significantly despite having almost no relationship with the implant itself. Increase in BMD appears around the tip of the implant, which correlates with clinical studies as the tip has been known to increase stress concentration.







Bone remodeling algorithms have been known to overestimate bone resportion. Furthermore, using a simplified model (absence of muscle forces) also increases the chance of overestimation, as strain concentration around the attached area should result in a conservation effect. In order to realistically model bone resorption, it is necessary to implement muscle forces, as to not overestimate bone resorption, and to preserver bone density in areas that has does not undergo resorption.



Fig. 5: Bone loss

# References

[1] Bitsakos, C. et al. The effect of muscle loading on the simulation of bone remodeling in the proximal femur. Journal of Biomechanics, 38 (2005) 133-139.

[2] Kerner, J. et al. Correlation between pre-operative periprosthetic bone density and post-operative bone loss in THA can be explained by strain-adaptive remodeling. Journal of Biomechanics, 32 (1999) 695-703.

[3] Gesso, H. Bone Density Equation in the Femur. Japan Clinical Biomechanics, Vol. 16, (1995).

[4] Carter, D. et al. The Compressive Behavior of Bone as a Two-Phase Porous Structure. The Journal of Bone and Joint Surgery, 59A No.7 (1977) 954-962.

# バイオセラミックス/コラーゲン複合 scaffold を用いた 幹細胞培養と細胞外マトリックス形成挙動

# 大阪大学未来医療センター 名井 陽

# 1. 緒 言

骨の再生医療の分野では、再生培養骨に関する研究が活発に行われている。再生培養骨としては、多孔質 構造をもつ scaffold を用いて間葉系幹細胞を培養し増殖・分化させ、細胞外基質(ECM)の生成により骨様 組織を形成させたものが検討されている<sup>(1)</sup>.しかし、骨細胞や軟骨細胞等の多種の細胞へ分化する幹細胞の 分化能制御の困難さ、生体外での細胞培養や組織化に時間がかかること、生体材料の力学特性や生体適合性、 生体親和性などが不十分であるといった問題点が指摘されている.また、scaffold としては生体適合性と生体 吸収性が要求されるため、使用可能な材料が限られており、最適な材料の選択が難しいのが現状である.

そこで本研究では、骨再生医療のための新規生体材料創製のための基礎的研究として、骨の成分であるコ ラーゲンと生体親和性に優れる生体活性セラミックス $\beta$ -TCP からなる複合系 scaffold を作製し、ラット骨髄 由来間葉系幹細胞(rMSC)を播種し骨芽細胞へ分化させ、コラーゲン/ $\beta$ -TCP 複合系 scaffold の圧縮力学特 性や生体親和性に及ぼす影響について調べることを目的とした.

# 2. 実験方法

コラーゲン/β-TCP scaffold は凍結乾燥法を用いて作製した.ブタ皮膚由来タイプIコラーゲン溶液のコラ ーゲン量とβ-TCP 粉末の重量比が 90:10 になるように混合させた後,直径 10mm の穴を空けた厚さ 5mm の シリコンゴム板に注入し,-80℃で凍結させ,その後-50℃で凍結乾燥を行った.凍結乾燥した試料は,25%グ ルタルアルデヒド水溶液による飽和蒸気下で架橋し,0.1M グリシン溶液での残存アルデヒド基の化学ブロッ ク処理後,洗浄し,再び凍結乾燥を行った<sup>(2)</sup>.また,コラーゲンのみで作製した scaffold を比較対象とした.

作製した scaffold にラット骨髄由来間葉系幹細胞(KE-400)を 1.0×10<sup>5</sup>cells/scaffold となるように播種し, インキュベータ内で1時間静置させた後,増殖用培地(α-MEM, 10%FBS, 1% penicillin-streptomycin)を添加し,1日間前培養を行った.翌日,培地を骨芽細胞分化サプリメントを増殖用培地に添加した分化誘導培 地と交換し,培養を開始した.細胞培養の一定期間ごとに試料を採取し,圧縮弾性率の測定を行った.また, 試料内の細胞数と ALP 活性をプレートリーダーを用いて測定した.これらは,コントロール群においても同 様の実験を行い,両者を比較検討した.さらに FE-SEM による表面観察を行い,細胞の増殖形態について評 価を行った.

# 3. 結果と考察

コラーゲン/ $\beta$ -TCP scaffold の上面および壁面の SEM 画像を図 1 に示す. 孔径は 50~150 $\mu$ m の範囲に分散 しており、表面には $\beta$ -TCP が付着している. 分散する $\beta$ -TCP により表面の凹凸が増大しているが、このよ うな表面性状の変化が細胞の接着性に何らかの影響を及ぼすことが考えらえる.



(a) Porous structure
 (b) Surface morphology
 Fig.1 FE-SEM micrographs of collagen/β-TCP scaffold.

細胞数と ALP 活性の変化を図 2(a),図 2(b)にそれぞれ示す.細胞数と ALP 活性ともに培養期間経過に伴っ て増加している.細胞数は,培養1日目から28日目にかけて,およそ3.4倍に増加しており,ALP 活性に関 しても2倍に増加している.また,コラーゲン scaffold よりも増加率が高い結果となった.β-TCP が幹細胞の 増殖・分化および活性化に影響を及ぼしたことが推測される.

次に圧縮弾性率の結果を図3に示す. 図中の Cell culture 群は細胞播種した試験片, Control 群は細胞を播種 していない試験片の結果である. コラーゲン scaffold は両群とも, 培養2週間で弾性率は減少し, その後 Cell culture 群では増加, Control 群では一定となった. これは, 細胞増殖・分化の影響によるものと考えられる. ー方, collagen/ $\beta$ -TCP scaffold は,  $\beta$ -TCP を含有させたことで初期圧縮弾性率がコラーゲン scaffold のおよそ 5.2 倍に増大した.また, Control 群に比べるとより高い増加挙動を示しており, 圧縮弾性率が培養 28 日目で およそ 1.6 倍増大した.また, Cell culture 群が Control



Fig.2 Effects of cell culture on cell number and ALP activity.

群よりも高い弾性率を維持していることも分かった.これらの結果より、細胞増殖と ECM 生成によって材料の圧縮力学特性が増加したことが明らかである.細胞増殖とコラーゲン生成や石灰化により材料表面や内部 空間の補間効果が影響していると考えられる.

図4に細胞培養日数7日,14日での scaffold 表面のSEM 画像を示す.培養7日目では,試料表面上に細胞 が接着・増殖している様子が確認できる.また,細胞接着以前の形態である球状の細胞が多数確認された. 培養14日目になると,より細胞は増殖しており,球状細胞は減少し細胞突起とみられる繊維状組織が多数確認された. 認された.

以上の結果より、コラーゲン中にβ-TCP 微粒子を分散させることで、β-TCP の持つ細胞の増殖・分化促 進機能が効果的に働き、細胞数・ALP 活性の増加、基質小胞もしくは石灰化球の多生産性、その結果として 圧縮弾性率の増大をもたらすことが示された.β-TCP の機能としては、カルシウムイオンやリン酸イオンの 放出があり、幹細胞の活性化につながると考えられるが、詳細は今後の検討課題である.









(a) 7 days (b) 14 days Fig.4 FE-SEM micrographs of scaffold surfaces.
生体吸収性高分子材料の高機能化に関する研究

山形大学大学院 理工学研究科 高山哲生

1. 緒言

超高齢化社会の進行に伴い、医療技術の低侵襲化は必要不可欠とされている. 生体吸収性材料 は生体内に埋入後,分解され代謝により流れていくため,例えば骨固定材用の材料として使用す れば,除去手術を必要としなくなり低侵襲化に適した骨固定材の開発が可能となる. 例で挙げた 骨固定剤用の生体吸収性材料としてはポリ(L-乳酸)(PLLA)が使用されているが,初期強度および 弾性率が骨と比べて低いこと,分解速度が遅く骨折治癒後も残存してしまうといった問題点があ る.本研究では骨固定材用としての生体吸収性材料の使用用途の拡大を目的として,吸収速度が PLLAよりも格段に早く,かつPLLAよりも高強度なポリグリコール酸(PGA)繊維を分散させた PGA 繊維強化 PLLA 複合材料に注目した. PGA の融点が約 225℃と PLLA よりも 40℃以上高い ことを利用すると,PLLA の融点以上で PGA の融点以下の温度域で溶融混練することにより, PGA を繊維の状態で分散させることが可能である.本研究では、PGA 繊維を溶融混練法にて PLLA 中に分散させることで PLLA 単体よりも高強度で,かつ分解速度に優れる PGA 繊維強化 複合材料を作製することを試みた.

#### 2. 実験方法

原料は PLLA ペレット(三井化学製)と PGA 繊維(グンゼ製)である. PLLA の重量平均分子量は  $1.38 \times 10^{5}$ [g/mol],ガラス転移温度および融点はそれぞれ 65℃および 176℃である. また PGA の 繊維径,融点およびガラス転移温度は 20µm, 225℃および 55℃である. 混練比は PGA: PLLA =1:99 および 5:95wt%とした. また,比較の為に PLLA 単体も用意した. これらをバッチ式 溶融混練機(井元製作所製)に充填し,190℃,50rpm,5min の条件で溶融混練を行った. 得られ た混合物をホットプレス機にて加熱圧縮成形し,厚さが約 150 および 350µm となるフィルムを 得た. 得られたフィルムを機械加工することで 55×10×0.35mm<sup>3</sup>の Beam 試験片と厚さが 0.15mm となる JIS7 号ダンベル試験片を用意し,万能力学試験機(井元製作所製)を用いて 3 点曲 げ試験および引張試験を行った. 試験温度は 37℃とした. 3 点曲げ試験のスパン間距離は 14mm, 負荷速度は 5mm/min で行い,得られた荷重変位曲線より JIS7171 に基づいて曲げ強さ のおよび 曲げ弾性率 *B*を求めた. 引張試験のチャック間距離は 20mm,負荷速度は 2mm/min で行った. また,繊維の配向方向の影響を検討するために PGA 繊維を 5wt%の割合で一方向に配置してサン ドイッチ成形した試料も作製し,引張試験を上記と同様の条件で行い,比較検討を行った.





Fig.1 Stress-strain curves of PGA fiber reinforced PLLA composites obtained from 3-point bending tests.



3. 結果

3 点曲げ試験より得られた応力ひずみ曲線を Fig.1 に示す. 同図中には比較の為に PLLA 単体の結果も合わせて示す. PLLA に PGA を分散させることで負荷初期の傾きおよび最大応力は向上し、その増加分は PGA の含有量が増加するに従い増加している. 上記の応力ひずみ曲線より評価したのおよび Eの結果を Fig.2 に示す. 同図中には比較の為に PLLA 単体の結果も合わせて示す. PGA 添加量の増加に伴い、のおよび Ecともに増加しており、PGA を 5wt%分散することでのは約 48%、 Ecは約 36%増加する.

引張試験より得られた応力ひずみ曲線を Fig.3 に示す. 同図中には比較の為に PLLA 単体の結 果も合わせて示す. PLLA に PGA を分散させることで破断伸びは大きく低下し,その低下分は PGA の含有量が増加するに従い増加している. また, PGA 繊維を一方向に配列した場合(図中の Orientation), 破断伸びは低下しているが負荷初期の傾きおよび最大応力は向上している.

このことから PGA 繊維分散によって, 溶融混練法では引張特性は改善することはできないが, 曲 げ特性は改善することは可能であり, また PGA 繊維を一方向に配列することで引張特性も改善す ることが可能であることが分かった.

Fig.4 に引張試験にて得られた破面を走査型電子顕微鏡(SEM)にて観察した結果を示す. 溶融混 練にて PGA 繊維を 5wt%分散させた場合(Fig.4), 負荷軸に対して垂直方向に配向した繊維が多く 観察される. これは溶融混練で作製した場合に PGA 繊維がランダムに配向しているからであり, 負荷軸に対して垂直方向に配向した繊維が存在することで比較的小さなひずみ下でその界面から 剥離が生じて,そこから不安定破壊が誘起され結果として,破断伸びの大きな減少につながった と考えられる. 一方,一方向に PGA 繊維を配列した場合,ランダム配向している場合のような繊 維と母相との剥離は観察されず,繊維の破断が観察された. これは一方向に PGA 繊維が配列して いる場合には,負荷軸に対して垂直方向に配向した繊維が存在せず,十分に繊維に負荷が生じて いるため,比較的大きなひずみ下まで耐えることができ,結果として最大応力が向上したものと 考えられる.

# 4. まとめ

本研究では PGA 繊維強化 PLLA 複合材料を作製し, PGA 繊維分散が PLLA の曲げ特性および 引張特性に及ぼす影響について検討した.得られた結果は以下の通りである.

(1) 溶融混練法にて PGA 繊維を分散することで曲げ特性は向上し, PGA 繊維を 5wt%分散することでσt は約 48%, *E*t は約 36% 増加した.

(2) 溶融混練法にて PGA 繊維を分散することで引張特性は改善されず,破断伸びは大きく低下 した. PGA 繊維を一方向に配列することで破断伸びの低下を抑えつつ,最大応力が改善された. (3) PGA 繊維分散による破断伸びの低下は,負荷軸に対して垂直方向に配向した繊維が存在する ことで比較的小さなひずみ下でその界面から剥離が生じ,そこから不安定破壊が誘起されたこと が原因であると考えられた.

5. 研究機関

研究代表者:山形大学大学院 理工学研究科 助教 高山哲生 研究協力者:九州大学応用力学研究所 准教授 東藤貢







Fig.4 SEM micrographs of tensile fracture surface of random oriented PGA fiber reinforced PLLA composites.

# 分子動力学法による SiC 結晶中の点欠陥の拡散挙動解析

三重大学大学院工学研究科 河村貴宏

# 研究背景・目的

SiC はバンドギャップや絶縁破壊電界,熱伝導率等に関して優れた性質を有しており,次 世代のハイパワーデバイス用材料として期待されている.結晶成長中の成長界面やドーピ ング制御のためのイオン注入時に空孔や格子間原子などの点欠陥が生成され,それらが拡 散・凝集することでマクロな欠陥に成長し電気物性などに影響を与えることが知られてい るが,この問題の解決には SiC 結晶中における点欠陥の拡散挙動に関する知見が必要であ る.そこで本研究では欠陥・不純物拡散制御に関する知見を得ることを目的として,古典 分子動力学(MD)シミュレーションによって SiC 結晶中の点欠陥の拡散挙動解析を行った. 計算方法

図1にシミュレーションモデルを示す. 原子数 1024 個で構成される4H-SiC結晶中に格子間原子(Siまた はC原子)を1個配置し,格子間原子の拡散シミュレ ーションを行った. 拡散係数*D*は時間*t*の間に原子が 移動する距離|**r**(to+t)-**t**(to)|を使って次式より求めた.

 $D = \lim_{t \to \infty} \frac{1}{6t} \langle |\mathbf{r}(t_0 + t) - \mathbf{r}(t_0)|^2 \rangle$ 

図 1 点欠陥拡散のシミュレ ーションモデル

格子間原子の拡散は常に同一の原子が移動するわけではなく,結晶を構成する原子との入れ替わりが起きている.そこで実際に計算する際には全原子の平均2 乗変位 |r(to+t)-t(to)|2の総和を用いた.結晶を構成する原子は格子点まわりを振動しており 平均2 乗変位の時間平均はほぼゼロになるため,結果的に拡散原子の寄与のみを 見積もる事が出来る.

SiCのポテンシャル関数としてはBrennerポテンシャル[1-3]とTersoffポテンシャル[4,5] で使用するパラメータが報告されているので、それぞれのポテンシャル関数とパラメータ を用いて得られた結果の比較を行った.

# 結果及び考察

図 2(a)~2(d)に C と Si 原子の拡散係数のアレニウスプロットを示している. 図中の "interstitial"は初期条件として C または S 原子を格子間原子として配置した事を表わし ている. また図のキャプションに各グラフのポテンシャル関数とパラメータの組み合わせ を示している. これらの結果から,ポテンシャル関数とパラメータの組み合わせによって 結果が大きく異なることが分かる. 実験[6]や Gao らの MD 計算の結果[7]では C 原子の拡 散係数の方が Si 原子の値より一桁以上大きい事が報告されており,それらを考慮すると, 図 2(a), 2(c), 2(d)の結果がそれらの報告と同様の傾向を示していると考えられる. このよ うに結果が異なった理由として、古典 MD 計算では基本的に最近接原子間の相互作用のみ を考慮しているため、各文献のパラメータが SiC 結晶の計算に必要な Si-C 結合エネルギー を正確に表現出来ているとしても、格子間原子を計算する際に必要な C-C および Si-Si 結 合エネルギーを正確に表せていなかった可能性が考えられる. 今後実験結果との詳細な比 較を行い、各パラメータの妥当性についての検討が必要である.



図 2 拡散係数の温度依存性: (a) Brenner ポテンシャル[1,2], (b) Brenner ポテンシャル[3], (c) Tersoff ポテンシャル[4], (d) Tersoff ポテンシャル[5]

# 参考文献

[1] Donald W. Brenner, Phys. Rev. B 42 (1990) 9458.

[2] A. J. Dyson and P. V. Smith, Molecular Physics 96 (1999) 1491.

[3] Fei Gao and William J. Weber, Nucl. Instr. and Meth. B 191 (2002) 504.

[4] Lisa J. Porter et al., J. Nucl. Mater. 246 (1997) 53.

[5] J. Tersoff, Phys. Rev. B 39 (1989) 5566.

[6] J. D. Hong, R. F. Davis and D. E. Newbury, J. Mater. Sci. 16 (1981) 2485.

[7] Fei Gao, William J. Weber, M. Posselt and V. Belko, Phys. Rev. B 69 (2004) 245205.

# 研究成果報告

- 分子動力学法による SiC 結晶中の点欠陥の拡散挙動解析,速水義之,河村貴宏,鈴木泰之, 柿本浩一,第 59 回応用物理学関係連合講演会,2012.3., 早稲田大学,東京都.
- SiC 結晶成長の分子動力学シミュレーション,速水義之,河村貴宏,鈴木泰之,寒川義裕, 柿本浩一,第42回結晶成長国内会議,2012.11.,九州大学,福岡県.

# 大面積ダイヤモンドウエファーを目指した 単結晶ダイヤモンド CVD 成長の研究

#### 佐賀大学大学院工学研究科 嘉数 誠

1. 目的

ダイヤモンドは、最高の絶縁破壊電界と熱伝導率をもつワイドギャップ半導体である。ダイヤモンド 半導体の p 型や n 型伝導と大面積ウエファー(基板)ができれば、SiC や窒化物半導体を越える、最も 高効率で大電力のパワーデバイスが実現する。そのデバイスは、電力ネットワークの電力制御回路を劇 的に効率化し、社会全体のエネルギー問題の解決の道を拓くことができる。

しかし、ダイヤモンドは十分な面積をもつ単結晶の成長が困難であるばかりでなく、結晶が内包する 結晶欠陥はデバイスでの電流リークや絶縁破壊の要因となるため、その形成過程を解明し、密度を低減 する必要がある[1]。

そこで本研究では、単結晶 CVD ダイヤモンドの X線トポグラフィー観察を行い、結晶欠陥の構造評価 を行った。

#### 2. 実験方法

観察したダイヤモンド試料は、高温高圧合成(HPHT)法により成長したⅡa型の(001)面方位のバルク 単結晶(寸法、7.3×7.2×0.8 mm<sup>3</sup>)である[2]。

X線トポグラフィー測定は九州シンクトロン光研究センターのビームライン BL09A で行った。X線 エネルギーは 14.5keV(波長 0.8552Å)、裏面から照射する透過配置で測定を行い、強度の強い(220)回折 点をフィルムに撮影した。測定は、白色と単色の両方で行った。

3. 実験結果

図1は少しずつX線エネルギーを変化させて単色光で撮影した5枚の像を合成したものである。この 像で、台形の放射状に延びる黒い影が多数、内から外に向かって広がっているが、これは<111>面の積 層欠陥と思われる。面欠陥は、種結晶から結晶が肥大化する過程で、<111>面に沿って拡張したものと 思われる。

しかし、面欠陥の他に、刃状転位や混合転位は見られ ず、とても結晶の完全性に優れた結晶であることがわか った。

# 4. 歪みに関する測定と考察

つぎに、単色 X 線トポグラフでの入射 X 線エネルギ ーを僅かずつ変えながら、結晶の歪み解析を行った。結 晶上の照射スポットの位置をずらして、試料の X 線エネ ルギーを測定し、測定して得られたエネルギー差から歪



図1:高温高圧合成ダイヤモンド II a結晶のX線トポグラフィー像

が求めることができると考えた。

図2に示すように、単色光のX線を用い、試料の端から像の写る X線のエネルギー(A~H keV)を測定し、そのスポットの位置をずら して、試料全体のエネルギーを測定した。測定して得られたエネル ギー差を式(1)のブラッグの回折式に当てはめることで角度θを求 める。ここでのdはダイヤモンドの格子面間隔である。

$$2d\sin\theta = \frac{12.4}{E[keV]} \qquad (1)$$

これによって、試料の始端及び終端の角度 θ を求める。そ こで求めた、角度の差によって曲率半径が求められ、その 値から試料の形状を解析した。

図3より、試料のエネルギー差は0.010 keV であり、こ の値より同様に角度 θ = 14.3 mdeg と曲率半径 R = 20.0 m が 得られた。図4のように試料と曲率半径の関係図を示すと、 半径 20.0 m、角度 14.3 mdeg で作られる円弧の形状に沿っ たように歪みわずかに湾曲した形状になっていることが分 かった。

5. まとめ、今後の課題

高温高圧合成ダイヤモンド単結晶をシンクロトロン放射 光を用いた X線トポグラフィーで評価を行い、成長セクタ ーの内部に生じた積層欠陥の観察、および内部歪み の評価を行った。

今回、シンクロトロン放射光での X 線トポグラフ ィーが結晶構造評価に有力であることがわかったの で、今後、CVD ダイヤモンドやワイドギャップ半導体 の他材料の単結晶の測定を行っていく。



図2:単色光による試料の歪み測定







また九州大学応用力学研究所の他、結晶評価装置による評価と合わせて、多元的に結晶成長機構を解 明し、さらにデバイス特性との関連性を明らかにしていきたい。

謝辞 本研究で援助、議論いただいた九州大学応用力学研究所、柿本浩一先生、寒川義裕先生、佐賀大 学大学院、石渡洋一先生に感謝いたします。また測定で援助いただいた九州シンクトロン光研究センタ ーの石地耕太朗博士に感謝申し上げます。測定、解析は、佐賀大学、村上竜一君が協力してくれました。 参考論文

[1] 嘉数、日本結晶成長学会誌 39 巻、4 巻、2012 年、38-43 頁。

[2] H. Sumiya, K. Tamasaku, Japanese Journal of Applied Physics 51 (2012) 090102.

# ポリマー系ナノコンポジットの高温耐久性評価

Evaluation of high temperature endurance in polymer matrix nanocomposites

福岡工業大学 朱 世杰

1. 研究の目的

近年の化石燃料の大量消費に伴う CO<sub>2</sub>の急激な増加により,地球温暖化や地球環境の変化が懸念されている. CO<sub>2</sub>排出量の削減の観点から,自動車用部品では,金属材料から軽量な高分子材料への代替が進んでいる. そうした背景から,複合材料の分野にナノテクノロジーの概念を取り入れたポリマー系ナノコンポジットが考案された. その中で,豊田中央研究所にて開発されたナイロン 6 クレイハイブリッド(NCH)が注目を集めている.

NCH は、層状構造を持つモンモリロナイト(粘土鉱物)の層間にナイロン6の原料である ε-カプロ ラクタムを挿入し、ナノメートルオーダーで分散させた複合材料である.従来のナイロン6に比べて、 高強度、高剛性、高耐熱性、高ガスバリア性などの今まで得られなかった特性を実現している.それら の特性を活かし現在は燃料チューブやタイミングベルトカバーに使用されている.しかし、高分子材料 は金属材料と比べて熱や光に対しての耐久性が劣るため、劣化解析を行う必要がある.また、未だに疲 労影響等に関する研究が少なく、設計方法や寿命評価方法が確立されていないのが現状である.

そこで本研究ではエンジンルーム内等の高温環境で使用した場合を想定して熱暴露処理を施し、熱暴 露が NCH の破壊に与える影響について調査を行った.具体的にはクレイ無添加のナイロン 6,及びク レイ含有率 2wt%の NCH-2 の 2 種類の材料をベースとして,比較として温度 80 °C,120 °C,150 °C で 100 時間熱暴露処理を施した試験片を用いて引張試験及び疲労試験を行い,データ解析及び SEM に よる破面観察を行った.

2. 材料と実験方法

ダンベル型形状の引張試験片の寸法を示す.本実験で使用したものは、モノマー重合法によって製造 されたナノコンポジットで、クレイ重量含有率 2wt%の NCH-2 を使用した.比較材料は無添加のナイ ロン 6 を用いた.

熱暴露試験には、定温乾燥機((株) ヤマト科学)を用いた.熱暴露は設定温度 80 ℃,120 ℃,150 ℃ にて行った。本実験では設定温度まで約 30 分で温度を上昇させ、設定温度に達した時間から 100 時間 熱処理を施し、約4時間で冷却を行い、炉内温度が室温になったのを確認して試験片を取り出した.

引張試験は、容量 50kN の油圧疲労試験機((株) 島津製作所製)を用いて、 試験条件は雰囲気制御 で、負荷ひずみ速度 10<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>にて行った. 疲労試験は、引張試験と同じ試験機を用いて、雰囲気制御で、 2 種類の材料すべて応力比 0.1、周波数 0.1Hz の正弦波で行った. 試験片は熱暴露前のものと 80 ℃ で 熱暴露処理を施したものを用いた. 80 ℃ における最大応力は、ナイロン 6 では 58~68MPa, NCH-2 では 75~85MPa にて行った. また、引張試験同様、実験結果の比較のため室温における実験データを 用いた.

引張試験で破断した試験片の亀裂伝播経路および破断面を走査型電子顕微鏡(SEM)と電子顕微鏡に よって観察した. さらに,破断面の破壊形態の観察を行った. 3. 結果と考察

Fig. 1 に引張試験の結果から得られた引張強度と熱暴露温度の関係を示す. 熱暴露温度が上昇するとともに引張強度は低下していることが確認できる. まず, ナイロン6に注目すると, 引張強度は熱暴露前から 120 ℃ まではわずか 4%の減少であるが, 120 ℃ から 150 ℃ では 49%の減少であった. 次に, NCH-2 に注目すると, 引張強さは熱暴露前から 80 ℃ まで, わずか 2%の減少であるが, 80 ℃ から 120 ℃ までは 20%の減少, さらに 120 ℃ から 150 ℃ になると 54%の減少であった.



Fig. 1 Ultimate tensile strength versus thermal exposure temperature at room temperature

Fig. 2 に伸び率と熱暴露温度の関係を示す. 図中の矢印は,油圧試験機の変位稼働範囲(25mm)を 越えても,破断まで至らなかったことを表している. ナイロン6では,熱曝露前と80℃では変位稼働 範囲を越えたため破断まで至っていないが,80℃から150℃では93%減少した. NCH-2では,熱曝 露前から80℃では伸び率が249%増加し,80℃から150℃では95%も減少した.



Fig. 2 Elongation versus thermal exposure temperature at room temperature

これらの結果から、NCH・2 の 80 ℃ から 120 ℃ では引張強度がナイロン 6 と同程度になり,クレイ 強化の減少が起こっていると考えられる.また,120 ℃ から 150 ℃ ではナイロン 6,NCH・2 ともに引 張強度と伸び率が大きく減少しており,試験片の脆化が起きていると考えられる

Fig. 3 に疲労試験の結果から得られた最大応力と破断繰返し数の関係を示す. 試験片は未処理のもの と 80 °C のものを用いた. ナイロン 6 は熱暴露を施すことにより 14%疲労強度が減少したのに対し, NCH-2 では 8%減少とナイロン 6 に比べて熱暴露の影響が少ないことが分かった.

また,引張試験と比較して疲労強度は引張強度よりも減少率が大きく、熱暴露の影響が大きいことが 分かった.なぜこのような結果を示したのかはっきりした理由はわかっておらず,これから検討してい く必要がある.

Fig. 4 に熱暴露前の NCH-2 の引張破断面の写真を示す. Fig. 4 (a)より破断するまでに大きく塑性変形を起こし延性破壊したと考えられる. また, 試験片側面に Fig. 4 (b)に示すような亀裂を多数観察することができ, これらの亀裂が成長することで Fig. 4 (c)に示すような破壊起点となったと考えられる.



Fig. 3 Maximum stress versus number of cycles to failure



Fig. 4 Scanning electron micrographs of tensile fracture surface in NCH-2 as received

Fig. 5 に 80 ℃ で熱暴露処理を施した NCH-2 の引張破断面の写真を示す. 破断面を熱暴露前の試験 片と比較すると小さな塑性変形を起こし延性破壊していることがわかる. また, 周りの滑らかな場所か ら延性破壊特有のせん断縁が確認できる. Fig. 5 (b)には塑性変形を起こした部分に見られた亀裂を示す. また, 試験片中央に存在する楕円の中心には Fig. 5 (c) には試験片内部からも亀裂が発生している様子 を観察することができた.

Fig. 6 に 120 ℃ で熱暴露処理を施した NCH-2 の引張破断面の写真を示す. Fig. 6 (a)より 80 ℃ とは 違い試験片に伸びがほとんどみられず脆性破面となっている. 破断面の凹凸が激しいく, 破壊起点であ る側面から放射線状に一気に亀裂が伝播し破壊に至ったと考えられる. Fig. 6 (b)より脆性破面の特徴で あるリバーパターンを観察できた. また、Fig. 6 (c) より破壊起点付近が劣化していることが観察でき た. 150 ℃ で熱暴露処理を施した NCH-2 の引張破断面は、120 ℃ と比較すると非常に似通った破面と なっており、同じく側面から放射線状に一気に破壊した脆性破面となっている. 破壊起点付近は 120 ℃ と同じように劣化していることが観察できた. 脆性破面の特徴であるリバーパターンを観察できた.



Fig. 5 Scanning electron micrographs of tensile fracture surface in NCH-2 after thermal exposure at 80  $^{\circ}$ C.



Fig. 6 Scanning electron micrographs of tensile fracture surface in NCH-2 after thermal exposure at 120 °C.

Fig. 7 に,熱暴露処理前,最大応力 88MPa にて疲労試験を行った NCH-2 の疲労破断面の写真を示す.破壊に至るまでに小さな伸びを生じ,延性破壊したと考えられる.Fig.7(a)よりせん断縁が観察でき延性領域を観察できた.Fig.7(b)より材料内部に亀裂が発生していることがわかる.また,Fig.7(c)より,側面には微量亀裂が多数見られ,側面と内部両方に破壊起点があることがわかった.

Fig. 8 に, 熱暴露温度 80 °C, 最大応力 88MPa にて疲労試験を行った NCH-2 の疲労破断面の写真を 示す. 熱暴露前と比較して似た破面形態となっていることが分かる. また, Fig. 8 (b)より, 側面には微 小亀裂が成長し破壊起点となった様子を観察することができた. Fig. 8 (c)より材料内部に亀裂が発生し ていることがわかる.

この結果から,熱暴露処理前と 80 °C 熱暴露処理を施した試験片では破面の形態に変化していないこ とがわかった.これは 80 °C の熱暴露処理では結晶化度にあまり変化がないためと思われる. 伸びが ほとんどみられず脆性破壊していることがわかる. 試験片表面に酸化の影響により大きな亀裂が発生し ている様子を観察することができた.劣化した角部から亀裂が発生している様子を観察することができ た.試験片側面を内部から観察より、破面から内部に向かって亀裂が成長している様子を観察すること ができ,試験片両端が変色していることが観察できる.また,試験片内部には表面にみられた大きな亀 裂を観察することができなかった.試験片表面から 100µm ほど変色している様子が観察できた。今後, EPMA により酸化層かどうかの確認をする必要がある.



Fig. 7 Scanning electron micrographs of fatigue fracture surface in NCH-2 at the maximum stress of 88 MPa



Fig. 8 Scanning electron micrographs of fatigue fracture surface in NCH-2 after thermal exposure at 80  $^{\circ}$ C at the maximum stress of 80MPa

熱処理時間の上昇と共に黄変や茶変の原因となる共益系 C=C 結合の増大や C=O 結合の増大するという報告がなされている. これらと同様の現象が熱暴露温度の上昇に伴い起こっているものと思われる. これらの構造変化は色の変化や引張強度の低下をもたらした可能性がある. また, 150 ℃ の表層において亀裂の発生は,表層の結晶や非晶の状態が変化したためだと考えられる.

4. まとめと今後の展開

熱暴露温度の上昇に伴い,全ての材料で引張強度が減少した.熱暴露温度が 120 °C 以上のとき,クレイによる強化が減少することがわかった.疲労強度は引張強度と比較して熱暴露温度の影響を受けやすいことが分かった.引張破断面観察から,NCH-2 は未処理では延性破壊であったが,熱暴露温度の上昇に伴い試験片が脆化した.疲労破断面観察から,熱暴露処理前と 80 °C で熱暴露処理を施した試験 片では似た破面となった.

今後、各試験片の結晶化度及び結晶サイズの測定を行い,具体的に熱暴露が試験片に与える影響の調 査が必要である.

# 5. 成果報告

Y. Kodama, S.J. Zhu, Y. Nakahara, A. Usuki and M. Kato, Fatigue Fracture of Clay Reinforced Nylon Nanocomposites, Materials Science Forum, Vol. 750 (2013) 11-14.

6. 研究組織

研究代表者	福岡工業大学	教授	朱	世杰		
所内世話人	九州大学応用力	J学研究	師	准教授	汪	文学

「3次元環境下における細胞の力学エネルギー測定法の確立」

北海道大学先端生命科学研究院 水谷 武臣

・目的

3次元環境下に存在する細胞の運動機構を明らかにすることは、基礎分野のみならず、医療や生体組 織再構成の応用分野からも重要である。例えば、運動機構を利用して体組織における癌細胞の浸潤を制 御することや、細胞集団の移動を制御することで任意の3次元形状をもつ臓器の再生などを可能にする ことができると考える。細胞の運動にはどのような要素が必要であるか。静止状態の物体が運動状態を 変える際には力が必要である。これは細胞の運動においても同様である。これまでに進められてきた細 胞の力の測定に関する研究は、ガラスやゲル基盤上、マイクロピラーなどの2次元環境における細胞が 発生した力を対象としたものが主であった。しかしながら、3次元環境では、周囲を細胞外基質や組織 内の細胞に囲まれるなど2次元環境とは大きく異なるため、力の発生とそれに伴う細胞の運動について も新たな議論が必要である。

これまでに我々は、細胞が出す力学エネルギーに注目し、研究を進めてきた。細胞は力を発生させる ことで、様々な機能を持った細胞に分化したり、組織・器官を維持するために増殖したり、外部から生 体内への侵入者の元に運動したり、する。これらの活動は、もちろん、3次元環境下でなされている。 本研究では、3次元環境で細胞が出す力や力学エネルギーの空間分布を測定する手法の開発を目指した。 更には、この空間分布の時間変化と、細胞の運動の動態とを対応させることで、生体内における細胞の 機能発現のメカニズムを力学の観点から明らかにすることを試みた。

・実験方法

細胞をコラーゲンゲル中に培養し、力を発生することによって分化・増殖・運動する様子を蛍光顕微鏡 で観察する。実験の主な流れは以下の通りである。

GFP によって蛍光標識した細胞用意する。

② GFP とは別の波長の蛍光ビーズを用意し、コラーゲンゾルと混合する。

③ 細胞と上記コラーゲンゾルを混合し、ゲル化させる。

④ 細胞の動態とそれに伴うビーズの変位を蛍光顕微鏡で観察する。

⑤ ビーズの 3D 変位から歪および力を有限要素法によって数値計算する。

細胞の動態変化と 3D 下での力学量の変化とを対応させることで、3D 下における細胞の機能発現と力 学との関係を明らかにすることを試みた。

· 実験結果

GFPによって標識した細胞を蛍光顕微鏡で撮影することで、細胞の輪郭を取得した。さらに、細胞の 輪郭の情報を元に、細胞を3次元構造体に対するメッシュとして表現することに成功した。加えて、細 胞周辺に位置する蛍光ビーズの変位情報を元に、コラーゲンゲル中に生じた3次元変位情報をプロット することに成功した。変位情報から有限要素解析によって3次元歪分布情報の算出し、さらに、バルク のコラーゲンの弾性率と組み合わせることで、細胞が出す力の分布と歪エネルギーの分布を算出するこ とに成功した(図)。



図 3次元環境下培養細胞が細胞外基質に与える歪エネルギー分布

蛍光標識コラーゲンゲル中に細胞を培養し、3次元ライブイメージング画像を解析することで、細胞の 出す力と歪エネルギーの空間分布を測定することに成功した。白線で囲まれた領域は細胞を濃淡は歪エ ネルギーの大小をそれぞれ表している。

・考察

細胞が基質に与える応力ならびに歪エネルギーを評価することに成功した。細胞の3次元形状と応力 分布を照らし合わせたところ、細胞の形状が突出している箇所に特に大きな歪エネルギーが生じている ことが明らかとなった。一方、細胞の形状でくぼみが生じている箇所では、歪エネルギーはそれほど大 きくなかった。力やエネルギーに関しての分子機構を考えると、細胞骨格タンパク質の貢献が大きいと 考えられる。細胞の形状・力(エネルギー)・細胞骨格の空間分布、今後、これらの対応関係を調べてい く。

-現れてきた問題点と今後の展望-

現時点では、コラーゲンゲルの局所変位から応力分布と歪エネルギーを得ることに成功している。た だし得られた数値の妥当性については、検証が必要である。そこで、現在、磁力を用いた局所応力印加 とそれによる歪との対応をみることで、解析の妥当性を検証する予定である。

·研究成果報告

-学会発表-

①水谷 武臣:

「2次元と3次元環境下での細胞と細胞骨格の力学計測」

M&M2012 材料力学カンファレンス、松山 愛媛大学、9月22日 2012年

②田中良昌、水谷武臣、芳賀永、川端和重:

「細胞骨格に発生した不均一な歪み:ライブセルイメージングと画像解析による力学量測定法の提案」 日本生物物理学会北海道支部例会、旭川 旭川市民文化会館、3月6日 2012年.

·研究組織

水谷	武臣	北大·先端生命	助教 代表者	
吉村	遼	北大・先端生命	修士2年	研究協力者
田中	良昌	北大・先端生命	修士1年	研究協力者
東藤	貢	九州大学応用力学	学研究所 准教授	所内世話人

# エネルギー効率向上のための船舶の耐航性能に関する研究

広島大学大学院工学研究院 教授 岩下 英嗣

# 1. 研究目的

CO2 削減に関連して船舶の波浪中の抵抗増加低減が課題として船型開発等が遂行されている.これまでの研究において,抵抗増加を低減し耐航性能を向上させるためには,船首部のフレアー形状を強くすることが有効な手段となることが分かっている.ただし,この手段はいくつかの特定の船型に対して有効性が確認されたものである.本研究では,その手段の一般性を確認するために,船首部で起こっている物理的な抵抗増加低減のメカニズムを探究することを目的とする.

# 2. 研究方法

船体の供試模型を用いて九州大学応用力学研究所の深海機器力学実験水槽において水槽試験を行い, 船体に作用する流体力や抵抗,船体運動を計測する.実施する試験は強制動揺試験,波強制力試験,運 動計測試験である.同時に船体近傍での非定常波の計測も行う,船体近傍での波形は,地上波高計を用 いて縦切り波形を計測する,いわゆる大楠法により得ることができるが,この方法では抵抗増加への寄 与の大きな船首近傍の波形を取得することができない.そこで,船体表面上のガースに沿って取り付け た容量式波高計を用いて,船首側壁に沿った非定常波を計測する方法を提案する.同様に,喫水面より 下に船体表面上のガースに沿って圧力ゲージを埋め込み,実験的に船首近傍における波形と圧力の計測 を行う.

# 3. 研究組織

本研究は下記のような組織で行った.

氏 名	所属	職名	役割・担当
岩下 英嗣	広島大学大学院工学研究科	教授	代表者
澤田 俊紀	広島大学大学院工学研究科 輸送・環境システム専攻	修士課程2年	実験補助
池田 浩基	広島大学大学院工学研究科 輸送・環境システム専攻	修士課程2年	実験補助
伊藤 悠真	広島大学大学院工学研究科 輸送・環境システム専攻	修士課程1年	実験補助
小川 恭平	広島大学大学院工学研究科 輸送・環境システム専攻	修士課程1年	実験補助
徳永 紘平	広島大学 第四類 輸送機器工学課程	学部4年	実験補助
高橋 悠	広島大学 第四類 輸送機器工学課程	学部4年	実験補助
梶野 恭平	広島大学 第四類 輸送機器工学課程	学部4年	実験補助
胡 長洪	九州大学応用力学研究所	准教授	実験指導

4. 研究結果

#### 4.1 供試模型

実験で使用する供試模型の図とその諸次元を Fig.1, Table1 に示す。実験には PCC 船型と tanker 船 型の供試模型を使用した. PCC 船型は船首部形状の違う3種類の船型を使用する. ベースとなる形状 (M12064), 強いフレアーを有す形状 (M12065), フレアー部に大きめのストライプが入った形状 (M12066) の3種類である.

また今回,新たに船側波形と船体表面圧力を計測する為に,tanker 模型に容量式波高計と圧力ゲージ を埋め込み、直接的に船首近傍での非定常波動場の計測を行う.容量式波高計については模型の ordinate 10.0, 9.75, 9.5, 9.25, 9.0, 8.75の6つの右舷側断面に (Fig.2), 圧力計については ordinate 9.5, 1.5 の2つの左舷側断面に沿って設置した. 圧力ゲージは、喫水面から船底へ垂線を下ろしたときの角度を 0度とし、各15度おきに7点設置する。船尾部には15度と90度を除いた5点に設置した(Fig.3)。



M12063 Tanker mode

供試模型 Fig. 1

		PCC	Tar	ıker
要	E	運動計測試験	強制動揺試験	運動計測試験
			波強制力試験	
$L_{pp}$	(m)	2.5000	2.4000	2.4000
В	(m)	0.4566	0.4000	0.4000
d	(m)	0.1148	0.1280	0.1280
$\nabla$	$(m^{3})$	0.0662	0.0983	0.0983
$C_b$		0.5046	0.8000	0.8000
$Aw = S_0$	$(m^2)$	0.8125	0.8354	0.8354
$x_F$	(m)	-0.1431	-0.0254	-0.0254
$x_f \cdot Aw = S_1$	$(m^{3})$	-0.1163	-0.0212	-0.0212
$x_B(=x_G)$	(m)	0.0955	0.0510	0.0510
$z_B(=KB-d)$	(m)	-0.0515	-0.0618	-0.0618
KB	(m)	0.0633	0.0662	0.0662
$BM_T$	(m)	0.1937	0.1016	0.1016
$BM_L$	(m)	3.9405	3.2135	3.2135
KG	(m)	0.1148	0.1010	0.1080
$k_{yy}/L$	(m)	0.2513	0.2530	0.2500
$z_G(=KG-d)$	(m)	0.0000	-0.0270	-0.0200

Table1 諸次元



Fig. 2 船側容量式波高計



(m)

 $\overline{OP}$ 



-0.0337



圧力計設置図 Fig. 3

# 4.2 水槽試験

試験項目は、PCC 船型に対しては運動計測装置を用いた運動・抵抗増加計測試験および大楠によって 開発された multifold method により非定常波形の計測を行う.実験中は静水中を航走する定常試験、ま た入射波中を航走する非定常試験を行った.解析位置は船体中央から x<sub>G</sub>離れた重心周りである.Tanker 船型に対しては上記に加え,heave,pitch 方向における強制動揺試験と波強制力試験および船側波形, 圧力の計測も行う.Fig.4 に運動計測試験の装置設置図,運動計測試験時のシステム図を Fig.5 に示す. 供試模型と地上波高計との距離は PCC の場合,船体側面から y=100mm,tanker 船型の場合,船体中 央から y=300mm の位置である.強制動揺試験・波強制試験を行う場合,運動計測装置ではなく強制動 揺装置を使用した (Fig.6, Fig.7).





# 4.3 実験条件

実験条件は PCC 船型の場合  $F_n = 0.24 \ \ensuremath{\overline{\alpha}} \lambda/L = 0.3 \sim 3.0$ の範囲で行った. Tanker 船型の場合  $F_n = 0.18$  で計測範囲は PCC 船型同様  $\lambda/L = 0.3 \sim 3.0$  である. 入射波は正面向かい波 ( $\chi = 180$  degs.). 強制 heave 試験の際の動揺振幅は $\overline{\xi}_3=0.01$ m となるが,強制 pitch 試験の際は強制動揺装置のシャフトを 180 度入れ替えることで pitch 運動を可能にしているため、動揺振幅 $\overline{\xi}_5$  をラジアン表記する. したがっ て $\overline{\xi}_5 = \tan^{-1}(0.01/0.42) = 0.0238$ rad. となる. 強制動揺試験の計測点として、他の試験時の実験条件 である  $\lambda/L$  を  $K_eL$  に換算した計測点で計測を行った. 計測範囲は強制動揺装置が再現出来る最大値で  $\lambda/L = 0.453$  に相当する  $K_eL = 38.700$  から、 $\lambda/L = 3.0$  に相当する  $K_eL = 3.328$  までである.

# 4.4 結果・考察

# 4.4.1 流体力計測

Fig.8 に heave 運動, pitch 運動した際の tanker 船型の付加質量および減衰力係数を, Fig.9 に波強制 力を示す. 横軸に波数  $K_e$  の無次元値を, 縦軸に各係数をとっている. 実験との比較に strip 法による理 論計算を載せている. Strip 法に用いた船舶データを Fig.10 に示す. 付加質量および減衰力係数の strip 法による推定と実験値とを比較すると,  $K_eL$  の低い領域において連成項に相違がみられるものの, 概ね 実験値と一致している. 同様に波強制力においても strip 法による推定値と実験値に大きな相違はみら れず, strip 法による流体力の算出が有用であることが確認できた.



Fig. 8 Tanker 模型の付加質量および減衰力係数



Fig. 9 Tanker 模型の波強制力



Fig. 10 理論計算に用いた船舶データ

# 4.4.2 船体運動

船首形状を変更した PCC 船型 M12064 から M12066 の船体運動を Fig.11 に, tanker 船型の船体運動 を Fig.12 に示す. 左から surge, heave, pitch となっており, 全グラフとも横軸には入射波の波長の無 次元値である  $\lambda/L$ ,縦軸には運動振幅を入射波で無次元化したもの,波浪に対する船体の位相を示して いる. Tanker 船型は strip 法による理論計算と,強制動揺・波強制力試験により得られた流体力から線 形運動方程式を解き船体運動を算出したものとの比較をした.

PCC 船型・tanker 船型とも heave, pitch 運動においては  $\lambda/L=1.0$ を超えたあたりで運動の同調点が 存在するのに対して, surge 運動には同調点は存在しない.また, Fig.11の heave, pitch 運動を見ると, 長波長域においてフレアーを強くした船型の方が低い値を示している.Fig.12の strip 法による計算を 見ると, heave, pitch 運動の運動振幅が実験値と良好な一致を示した.surge, heave 運動の位相におい ては短波長域で実験値との相違がみられる.また,流体力から算出した船体運動と実験値とを比較する と, heave の運動振幅において,同調点付近から  $\lambda/L=1.8$ の付近まで実験結果と比べ 10%程度の相違が みられるものの,その他の領域では運動振幅,位相ともに実験値と良好な一致を示しており,実験値が 線形の仮定の枠内で考えて良いことが確認できる.



Fig. 12 Tanker 模型の船体運動

# 4.4.3 非定常波形

Fig.13 に tanker 船が造波した波形を示す.上から強制 heave 試験で計測された波形,強制 pitch 試験 で計測された波形,波強制力試験で計測された波形,運動計測試験で計測された波形,強制動揺・波強 制力試験で計測された波形の重ね合わせ波形 (superposed wave) と運動計測試験で計測された波形の比較となっている.計測は地上波高計 (space-fixed wave probes (SFWP)) と船側波高計 (ship-side wave probes(SSWP))の2ヵ所で行う.計測された波形は sin 成分 (Fig.13;右), cos 成分 (Fig.13;左) に分けて 出力している. 横軸は船体中央を0とし船体中央からの距離 x を半船長 L/2 で割った値を,縦軸は振幅 を無次元化した値をとっている.

Fig.13 をみると、地上波高計で計測された波形と船側波高計で計測された波形、両解析結果とも、重ね合わせ波形に比べ運動計測試験で計測された実際の波形の方が振幅が小さい.また、heave radiation wave, pitch radiation wave, diffraction wave をそれぞれ見てみると、重ね合わせ波形は diffraction wave の影響を強く受けることが分かる.  $\lambda/L$  を変更しても同様の傾向を示している.



Fig. 13 Tanker 模型の船側波形 ( $F_n=0.18$ ,  $\lambda/L=1.2$ ,  $K_eL=10.44$ ,  $\zeta_a=0.01$ m)

#### 4.4.4 船体表面圧力

Fig.14 に λ/L=1.2 における船体表面非定常圧力を示す. ordinate9.5 と 1.5 における断面に沿った圧力を. 振幅と 位相に分けて示している。横軸は喫水面から船底へ垂線 を下ろしたときの角度を0度、喫水面を90度としたとき の角度 θ. 縦軸は振幅の無次元値となっている. 理論計 算との比較のために、strip 法と二重模型流れ近似におけ るランキンパネル法の計算結果も同時に示しておく.こ れを見ると、ordinate9.5の断面における $\theta$ =75、90degs. で、ランキンパネル法による理論計算より小さい値が計 測された.これは船体運動が大きくなるにつれ,水線面 付近に埋め込んだ圧力ゲージが空中に飛び出してしまい、 計測された圧力データが鋸歯状になったことが原因であ ると考えられる. Fig.14 に示す解析結果はこの鋸歯状の データのなかで,正常に計測された圧力を使い,最小二乗 近似を適用し修正を行ったものであるが、完全なデータ の再現は難しいため、水線面付近の圧力が小さくなった.

Strip 法による結果をみると、船首と船尾の圧力にラン



Fig. 14 Tanker 船型の非定常圧力 ( $F_n$ =0.18,  $\lambda/L$ =1.2,  $\zeta_a$ =0.01m)

キンパネル法で算出した結果程の相違は見られず,実験結果と比較してもランキンパネル法による算出 結果がよく一致している.以上から,船体表面圧力の算出には,定常流場の影響や3次元影響を考慮し たランキンパネル法の方が精度の高い推定を行うことができることが分かる.

#### 4.4.5 抵抗增加

Fig.15 に PCC 船型の各船首形状ごとの造波抵抗を比較したグラフを, Fig.16 に tanker 船型の運動計 測試験で得られた波形から算出された造波抵抗と重ね合わせ波形から算出された抵抗, 検力計から得ら れた実際の抵抗の比較を示している. 横軸は入射波の波長の無次元値である λ/L, 縦軸は抵抗の無次元 値とした. 波形から抵抗を算出する場合, 計測された波を波形解析理論を用いて解析することにより, 素成波の振幅や位相を表す Kochin 関数, 及びそれに重みをかけて積分することにより抵抗増加が算出 できる.

Fig.15を見ると、短波長域において、フレアーを強くした船型の造波抵抗が小さいことが確認できる. M12065の船型と M12066の船型を比べると、短波長域においては僅かに M12066 船型の方が抵抗が小

さく,同調点付近では M12065 船型の抵抗が小さいことがわかる.Fig.16 を見ると,短波長域では 3 つの抵抗に大きな相違は見られないが,同調点付近では運動計測試験で計測された波形から算出された抵抗が実際の抵抗と比べ 33%程度低い値となった.これは線形重ね合わせを行った波形から抵抗を算出した場合,実験値との間に大きな相違が見られないことから,運動計測試験で計測された波形が本来船舶が造波する非定常波形より波振幅が小さくなったためと考えられる.



# 5. まとめ

船首形状のフレアーを変更した3種類のPCC船の運動と抵抗,非定常波形を計測比較し,船首形状 の変更による影響について考察を行った.また,tanker船模型に対しても同様の計測を行った.Tanker 船型の場合,上記に加え,強制動揺試験,波強制力試験を実施し,船体に働く流体力を求め理論計算と の比較を行った.加えて,船首近傍の非定常波形,船首尾の非定常圧力の計測を行い,より精緻に物理 現象を調査した.本研究より得られた結論を次のように示す.

- (1) 船体に働く流体力を算出する際に, strip 法による推定により, 精度の高い流体力を算出すること ができることを確認した.
- (2) 船首フレアーを強くすることで長波長域における船体運動が小さくなり, 短波長域から同調点付近の領域において, 造波抵抗を低減する効果を確認した.
- (3)運動計測試験で得られた波形から造波抵抗を算出し、計測された造波抵抗と比較すると、同調点 付近で33%程度低い値となった.これは線形重ね合わせ波形と比べた場合、運動計測試験で計測 された波形の波振幅が小さくなっており、本来船舶が造波する波振幅より小さい波が計測されたこ とに起因していると考えられる。
- (4) 船体断面の非定常圧力を計測し,理論計算との比較を行うことで,船体運動全般に高い推定精度 で算出できる strip 法も,圧力のレベルで見てみると,定常流場や3次元影響の取り入れが不十分 であり,より3次元性を考慮したランキンパネル法による推定が優れていることが確認できた.

# 洋上エネルギープラントへの輸送用航空機に関する研究

広島大学大学院工学研究院 教授 岩下 英嗣

#### 1. 研究目的

現在,洋上風力発電に代表されるように,我が国周辺に広がる広大な洋上にエネルギープラントを建 造し,集中的に高効率で自然エネルギーを生成するプロジェクトが各所で進行中である.将来の建造,運 転を考えた場合,エネルギープラントへの人や物資の輸送手段についても検討を行う必要があり,その 候補として洋上を高速で飛行する地面効果翼機が考えられる.滑走路などのインフラが不要であり,低 空で飛行するため与圧機も不要かつ,揚抗比が通常航空機よりも10~20%もよいことから,主機として プラントで得た電力で駆動するモーターを利用することもできるであろう.本研究では,こうした利点 を有する地面効果翼機に関して,大型 RC 模型の自航を模擬した風洞実験を行い,その空力性能や飛行 安定性を検討することを目的としている.

#### 2. 研究方法

本研究で提案している地面効果翼機は水平尾翼を船首近傍に有するカナード式であり、その空力性 能についてはこれまでの風洞試験や理論解析等により、概略把握できてきている.昨年度は、プロトタ イプ機体の主翼形状に改良を施し、NC切削された主翼模型を用いて風洞試験、または理論解析を行い、 その性能向上を確認している.今年度は洋上エネルギープラント用の輸送機としてペイロードを設定し、 機体全体の設計案を提案すると共に、NC切削により全機模型を製作して空力試験を実施する.空力試 験は推進器を稼働させたパワー付き風洞試験も行う.平行して全機理論解析を行い、実験との比較を通 じてその妥当性を確認した後、理論解析をベースに機体のマイナー改良を行っていく.一連の研究を通 して、機体形状を確定することを最終目的としている.

本実験の内容を以下に示す.風速は全ての実験において 20 m/s で行っており,ブロッケージ影響を低 減させるため,風洞の上面,左右の壁面を 3 枚取り除いて実験を行った.

- (1) 地面効果内の空力を模擬するためには、境界層を極力小さくする必要がある. その厚みを把握するため、境界層厚さの計測を行う.
- (2) 矩形翼を用いて迎角変化,飛行高度変化させた実験を行い,理論計算の妥当性を確認する.
- (3) 全機模型に搭載する,下反角・テーパー付き主翼について,翼端板の有無による空力特性の変化, また,翼端板の長さを変更した時の空力特性の変化を確認する.
- (5) 全機模型において、主翼の吹き上げ、吹き降ろしが前翼、尾翼に与える干渉影響について考察する.
- (6) 全機模型に関して、最適な前翼迎角・尾翼迎角の設定値を見つける.
- (7) 最適な設定迎角において推進器搭載状態での機体迎角変化,飛行高度変化の実験を行う.
- (8) 推進器非搭載状態での機体迎角変化,飛行高度変化の検証を行い,推進器搭載状態との空力と比較する.
- (9) 推進器単独実験を行う.

# 3. 研究組織

本研究は次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院 エネルギー・環境部門	教授	代表者
伊藤 悠真	広島大学大学院工学研究科 輸送・環境システム専攻	修士課程1年	実験補助
池田 浩基	広島大学大学院工学研究科 輸送・環境システム専攻	修士課程2年	実験補助
徳永 紘平	広島大学工学部 第四類 輸送機器工学課程	学部4年	実験補助
梶野 恭平	広島大学工学部 第四類 輸送機器工学課程	学部4年	実験補助
高橋 悠	広島大学工学部 第四類 輸送機器工学課程	学部4年	実験補助
大屋裕二	九州大学応用力学研究所	教授	実験指導

# 4. 研究成果

# 4.1 供試模型

Fig. 1に今回使用した模型とその主要目を示す.いずれも模型の製作精度による誤差を限りなく小さくするため,NC切削による模型としている.主翼 (テーパー・下反角付き翼)については翼端板の脱着が可能となっており,翼端板の間にスペーサーを入れることで,長さの変更も可能になっている.全機 模型については,前翼,尾翼の迎角が変更できる様になっている他,推進器の搭載が可能な様に,バッ テリー等の電装部品を内部に収められる構造としている.主翼,全機模型の迎角はスウォードに取り付けてある迎角調整用のネジで設定し,飛行高度は昇降装置により設定することとしている.

Principal dimensions						
	Main wing Front wing Tail wing Fuselage					
Span (m)	1.34	0.42	0.45	0.19		
chord length (m)	0.56	0.15	0.19	1.80		
Project area (m^2)	0.53	0.06	0.06	0.29		
Airfoil	NACA3409	NACA0012	NACA0009	-		



Fig. 1: NC models and its principal dimensions

# 4.2 境界層対策

WIGの風洞試験は地面近傍の飛行を模擬して行うため、境界層影響ができる限り入らないように低減 方策を検討することが非常に重要である。そこで模型の下にFig. 2の様な新たに板を設け底上げするこ とで、風洞吹き出し口から発達する境界層を板の前縁から新たに再発達させて、模型付近での境界層影 響の低減を図る工夫を行っている。昨年度からの改善点として、境界層板の製作精度を上げるため、前 縁部はNC切削により製作、板部分はアクリル板により製作することとした。この様な非常に製作精度 の高い境界層板を用いて床上4点における風速分布を計測した結果、CFD計算による数値計算結果と非 常によく一致しており、境界層板前縁部 (Point1)ではわずか1 cmの境界層厚さにとどまっていること が確認された。今回使用する模型寸法に比べて境界層厚さは十分に小さく、実験における境界層影響は 小さいと推察される。



Fig. 2: Velocity distribution in vertical direction at several points (U = 20 m/s, L = 3.75 m))

#### 4.3 実験セットアップ図

本実験の実験装置の概略図を Fig. 3 に示す. 検力計は 3 分 力計を用い, x 方向 ( $F_1$ ), z 方向 ( $F_3$ ), y 軸周りのモーメン ト ( $F_5$ )を計測し, x 方向は主翼進行方向を正, z 方向は鉛直上 向きを正, モーメントは頭下げ方向を正とした.

実験の考察に際して,飛行高度は翼後縁の高さ*H*をコード 長*c*で除して無次元化した,*H/c*を用いることとする.また, 主翼単独の圧力中心位置の定義は前縁から後縁までを1とし たときの前縁からの距離とし,全機圧力中心位置は前翼の前縁 から主翼の後縁までを1とした時の,前翼前縁からの距離とし て考察している.



Fig. 3: Experimental setup

#### 4.4 実験結果·考察

#### 4.4.1 下反角・テーパー付き主翼

機体の巡航飛行高度 H/c = 0.350 について、迎角変化を翼端板有り状態、無し状態においてそれぞれ 比較した実験結果を Fig. 4 左に示す、横軸に迎角変化、縦軸に揚力係数  $C_L$ ・抗力係数  $C_D$ ・圧力中心係 数  $C_P$ ・揚抗比  $C_L/C_D$  を取り、境界要素法の数値計算結果と比較している、粘性影響に関する抗力は 2 次元翼型解析ツール"X-foil"の抗力値を修正係数で補正したものとして定義している、実験値と計算結 果は精度よく一致しており、計算結果の妥当性が確認できる.

揚抗比を縦軸にとったグラフから、最も高い揚抗比をとる迎角は3°であることが分かり、翼端板を付けると、約25%もの揚抗比増加が得られることが分かる.この様な揚抗比の増加が見られるのは、翼端板の効果により揚力係数が増加すると共に、抗力係数が減少することにあることが分かり、地面効果内の揚力傾斜は弓なりになるという、非線形な現象も見て取ることができる. 圧力中心位置は、翼端板の 有無で変わらないが、迎角1°の増加により、約2 cm 前縁側に移動することが分かる.

次に、最大揚抗比をとる迎角 3° での飛行高度変化 (Fig. 4) 右について検証する.  $H/c = 0.35 \sim 0.55$  にかけて、揚抗比の上昇がはっきりと見て取れ、H/cが 0.2の増加(模型スケールで約10 cm 上昇)で約25% もの差が出ており、地面効果の影響が確認できる. 飛行高度が高くなるにつれて、翼端板有無での性能差が小さくなることも見て取れ、地面効果内での翼端板の効果の大きさが確認できる.



Fig. 4: Aerodynamics properties of the main wing model with and without end plate

#### 4.4.2 翼端板長さに関する影響

Fig. 5に飛行高度は一定とし, 翼端板の長さを通常から, 6 cm 伸ばしたものと比較したグラフを示 す. 揚抗比を表したグラフで検証すると, 飛行高度が低い場合, 翼端板が長い方が性能は上がることが 分かるが, 飛行高度が高くなるにつれ, 揚抗比の差は小さくなり, *H/c* = 0.7 においては, 翼端板を伸 ばした方が性能は低くなることが分かる. 翼端板を伸ばすことは, 翼の表面積を増やすこととなり, 揚 抗比の低下が懸念される. 実験結果からも, 飛行高度が高い場合においては揚抗比は通常の翼端板の状 態と変わらない値まで低下しており, さらに高い飛行高度では, 翼端板が短いほうが揚抗比が上がると 考えられる. 一方で, 飛行高度が低い場合においては翼端板を伸ばした方が, 揚抗比は高い. このこと から, 飛行高度が低い状態においては, 抗力の増加よりも, 翼下面をより閉じられた空間にすることに よる地面効果の作用の方が大きく働いているということができる.

したがって、地面効果翼機の主翼を設計する際の一つの指標として、より大きな地面効果による性能 向上を受けるために、翼端板長さは抗力増加に関わらずできるだけ長くして設計するべきだと言えるで あろう.



Fig. 5: Aerodynamics properties of the main wing model (Normal type & 6 cm added end plate)

#### 4.4.3 推進器単独性能試験

パワー付き風洞試験を行うに際し、全機に搭載するダクテッドファンの性能試験を行った. 搭載するダクトファンは2機あるため、2機のダクトファンを機体搭載時の間隔で並列させた状態でスウォードに取り付け計測した. 使用するダクテッドファンは内径 90 mm,外形 114 mm,最高回転数が 40000 rpm である. 推進器のファンの回転数を一定に保ち、風速を 0 ~25 m/s の間で 2.5 m/s ごとに変化させ、各風速におけるパワー(W), $F_X$ を計測する. レイノルズ数影響を考慮して、エンジン回転数は 12000 rpm, 15000 rpm, 20000 rpm の 3 通りで行った. Fig. 6 はダクトファン 1 発分の性能曲線であり、左図に前進率 J とスラスト係数 Kt,効率  $\eta$  の関係、および右図にスラスト係数を基に求めた機体の巡航速度 20 m/s におけるファンの回転数 N と推力 T の関係を示す. 今回想定している自航試験用模型については、重量は 7.6 kgf であり、想定巡航速度 70 km/h での揚抗比を 12 とすると、必要推力は 1 機当たり 0.3kgf、即ち、グラフから約 15000 rpm で充分ということになる.



Fig. 6: Aerodynamics properties of the dacted fan (15000 rpm)

#### 4.4.4 パワー付き風洞試験

推進器を稼働させた状態で風洞試験を行い,推進器を搭載していない状態と比較する.機体は定常飛 行状態では,推力と全機の抗力は釣り合っている状態で飛行している.実験で同じ状態を模擬するため に, Eメーターという計測機器により,ダクトファンの回転数を計測しながら実験を行った.計測され る抗力が0になる回転数をコントローラーで合わせることが難しいので,先の推進器単独実験で求めた, 15000 rpm 近傍での空力データを3,4点計測した後,回転数と各空力係数の関係をグラフにし,抗力が 0となる時の回転数,揚力,モーメントを得ることで,推進器搭載時の全機空力特性を求めた.

#### 4.4.4-1 前翼迎角が機体に及ぼす影響

想定している地面効果翼機は離水性能の向上を考慮して,前翼を有するカナード式の地面効果翼機と している.そのため,機体の圧力中心位置を重心位置とするため,全機圧力中心位置は機体の安定性を 考える上で非常に重要となる.全機圧力中心は前翼迎角によって大きく変動するので,前翼迎角 6°と 9°において機体空力に及ぼす影響を把握した.なお,尾翼迎角は0°で固定してある.Fig.7に推進器を 稼働させた状態での機体迎角に対する,揚力係数,全機圧力中心位置をとったグラフを示す.揚力係数 については前翼迎角 6°と 9°により発生する揚力が違うので,機体迎角 0°,前翼迎角 9°において,約 4% 揚力係数が大きくなっている.

続いて、圧力中心位置から、機体の復元性能について考察する.前翼を9°で設定した時は、*C*<sub>P</sub>曲線 は右上がりである.このグラフから、機体が頭上げ状態になった時に、圧力中心は機体重心位置よりも 後退するため、頭下げモーメントを発生させることが分かる.したがって、*C*<sub>P</sub>曲線が右上がりである ほど大きな復元力を発生していると言え、静的安定性が満たされている.さらに、機体迎角が 2.5~3° になったところで、*C*<sub>P</sub>位置がより大きく後方に動くという非線形性も確認できる.これは機体迎角が 大きくなった時に前翼が先に失速角を迎えるためであり、この特性を用いて、機体が高迎角をとった時 に前翼を先に失速させ、機体姿勢を元の状態に戻すといった姿勢制御ができる.前翼迎角 9°では、この 様な特性が把握できるが、前翼迎角 6°の時は、*C*<sub>P</sub>曲線はほぼ横ばいとなっており、十分な復元モーメ ントが発生できていないため、以後の実験では前翼迎角を 9°に設定して行っている.



Fig. 7: Aerodynamics properties of the whole airframe model with thrust  $(H/c = 0.350, \alpha_T = 0.0^\circ)$ 

#### 4.4.4-2 機体迎角・飛行高度変化

前翼迎角は9°に固定し,機体迎角,飛行高度変化を行い,現段階で想定している地面効果翼機の空力 特性を把握する.Fig.8に推進器搭載状態と非搭載状態での実験結果を示す.推進器を搭載した場合, 圧力中心位置が機体迎角0°において約2 cm 後退していることが分かるが *C*<sub>P</sub> 曲線は右上がりになって おり,静的安定性を確保できている.また,揚力係数に関しては,推進器を稼働させることで,約4% の向上が得られる.これは,推進器により主翼上面を流れる流速が増加し,主翼に働く揚力が増えてい るためだと考えられる.

全機空力特性について, 揚抗比は機体迎角 0° において約 12.5 であるが, 最も高い揚抗比が得られる 迎角は 1.5° であることが分かった. 飛行高度変化に関しては, 主翼単独実験と同様に地面効果の影響を 見て取ることができ, 飛行高度  $H/c = 0.35 \sim 0.70$  において実に約 18% もの揚抗比増加が得られる機体 であることが分かった. 全機試験においては実験結果と計算結果が主翼単独実験に比べあまりよく一致していない. 全機模型 に作用する流体力の実験結果と角翼に働く流体力の計算結果から, 胴体にも揚力が作用していることが 分かったが, 数値計算により胴体の流体力が精度よく見積もれていないことが判明した. 揚力体には圧 力の境界条件として, クッタ条件を満足する様に翼後縁に後流面を付けて数値計算を行っているが, 胴 体に関しては, 計算格子の都合上後流面は付けていない. このことが原因で胴体に働く揚力を過小評価 している可能性がある. 今後の課題として, 数値計算により胴体の流体力を精度よく見積もることがで きれば, 実験結果と計算結果がより精度よく一致してくると考えられる.



Fig. 8: Aerodynamics properties of the whole airframe model with and without thrust (H/c = 0.350,  $\alpha_F = 9.0^\circ$ ,  $\alpha_T = 0.0^\circ$ ,  $\alpha_M = 3.0^\circ$ )

# 5. まとめ

本研究により,地面効果翼内での主翼の空力特性に加え,推進器単独性能試験,全機模型を用いたパワー付き風洞試験を行うことで洋上エネルギープラントに用いる輸送用航空機の全機空力特性を把握した.本研究の成果を以下に示す.

- (1) 製作誤差が極めて小さい模型,境界層板を用い,ブロッケージ対策で風洞壁面を取り外す等の対策を講じることで,極めて精緻な実験データを得ることができた.これらのデータは数少ない地面効果内での実験結果の中でも,極めて有用なデータであると考えられる.
- (2) 現主翼形状に翼端板を付けることで、揚抗比は約25%増加する. 翼端板は地面効果内でより大き な効果を発揮する.
- (3) より大きな地面効果を得るには、なるべく長く翼端板を設計するのが良い. 低高度時においては、 表面積増加による摩擦抗力の増加よりも、地面効果の影響の方が顕著に表れると言える.
- (4) 前翼迎角 9°で, 機体の静的安定性が確保され, 推進器により揚力係数は約 4% 向上する.
- (5) 現理論計算の中で胴体に作用する流体力をより精度よく見積もることができれば、全機における 計算精度をより向上させることができる.

# エネルギー効率向上のための船舶の風圧抵抗低減に関する研究

広島大学大学院工学研究院 教授 岩下 英嗣

# 1. 研究目的

近年, CO2の削減は世界的な課題であり,輸送機器関連分野でも取り組みが展開されている.船舶分野の取り組みの一つに,船体の風抵抗の軽減がある.船は無風の場合でも航行速度Vの2乗に比例する抵抗を大気から受ける.空気の密度は海水の1/800程度ではあるが,究極的な抵抗削減を考える際には風抵抗は無視できない.こうした背景を受け,本研究では船首形状,及び居住区・ホールドファンの有無による風抵抗の変化を,供試模型を用いた風洞試験による計測を通じて実験的に調べることを目的としている.

# 2. 研究方法

船体の供試模型を用いて風洞通風型実験棟において風洞試験を行い,船体に対する風抵抗を計測する. L=2.0mの供試模型をターンテーブルにセットし,10度刻みで±30度まで模型を回転させ,それぞれの 角度で風抵抗を計測した.風速は12.0m/sとしている.船体の船首形状と居住区形状を変更,居住区・ ホールドファン有無による風抵抗の調査,及びそれらの組み合わせについて実験を行った.

# 3. 研究組織

本研究は下記のような組織で行った。

氏 名	所属	職名	役割・担当
岩下 英嗣	広島大学大学院工学研究科	教授	代表者
澤田 俊紀	広島大学大学院工学研究科 輸送・環境システム専攻	修士課程2年	実験補助
池田 浩基	広島大学大学院工学研究科 輸送・環境システム専攻	修士課程2年	実験補助
伊藤 悠真	広島大学大学院工学研究科 輸送・環境システム専攻	修士課程1年	実験補助
小川 恭平	広島大学大学院工学研究科 輸送・環境システム専攻	修士課程1年	実験補助
徳永 紘平	広島大学 第四類 輸送機器工学課程	学部4年	実験補助
高橋 悠	広島大学 第四類 輸送機器工学課程	学部4年	実験補助
梶野 恭平	広島大学 第四類 輸送機器工学課程	学部4年	実験補助
大屋裕二	九州大学応用力学研究所	教授	実験指導

# 4. 研究結果

#### 4.1 供試模型

本実験で使用した供試模型は分割模型となっており,船首部形状,を容易に取り替えることができる. 船首形状としては,カウリング(囲い)形状が少しずつ異なる物を種類準備した.Table 1 に船体番号と 実験状態,船首形状を示す.Fig. 1 に本実験で使用した船首形状の異なる模型を模型を示している.



Table 1	船体番号,実験状態及び船首形状			
船体番号	装備	高さ	角度	
001	カウリング	45mm	30 度	
002	カウリング	$45 \mathrm{mm}$	45 度	
003	カウリング	$45 \mathrm{mm}$	60度	
004	カウリング	$15 \mathrm{mm}$	30 度	
005	カウリング	$15 \mathrm{mm}$	45 度	
006	カウリング	$15 \mathrm{mm}$	60度	
007	カウリング	$30 \mathrm{mm}$	30 度	
008	カウリング	$30 \mathrm{mm}$	45 度	
009	カウリング	$30 \mathrm{mm}$	60度	
010	フルカバー	-	30度	
011	フルカバー	-	45度 逆ぞり	
012	フルカバー	-	45 度	
013	フルカバー	-	60度	

Fig. 1 船首形状の異なる供試模型

# 4.2 風洞試験

6分力計を用いて、 $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  及び  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$  を計測する.6分力計は模型の船体中央部下直に 設置している.今回の実験では  $F_x$  において船首方向を正方向、 $F_x$  において鉛直上向きを正方向とする. 模型船体の模式図と主要目を Fig.2 に示す.模型をターンテーブルに設置しており、角度を 10 度刻み で-30 度から 30 度まで変えて実験を行う.船首が風洞の方向に向いている時を 0 度としている.また、 風速は風洞設備の関係上 12.0m/s で行うことにした.Fig.3 は通風型風洞と模型の設置状態を示してい る.風洞の直径は 1.7m であり、上部に設置してある風速計で風速を測っている.



Fig. 2 模型図および模型主要目

# 4.3 実験条件

風速V,風向角 $\psi$ での $F_x$ を無次元化した前後風圧力係数 $C_x$ を、次式のように定義する.

$$C_x(\psi) = \frac{F_x(\psi)}{qS} \tag{1}$$

$$q = \frac{\rho}{2} V^2 \tag{2}$$

ただし、S は船体の正面投影面積、 $\rho$  は空気の密度であり、S=0.102(m<sup>2</sup>)、 $\rho$ =1.230(kg/m<sup>3</sup>) で計算を行っている.

4.4 結果・考察

(1) カウリング装備 45mm

船首形状を変更した船型 001 から 003 の, C<sub>x</sub> の増減率と最大減少率を Table 2 に示す. 何も取り付け ていない船型 Normal の  $C_x$  を基準としている. Fig. 4 は各カウリング切り上げ角度ごとに,船体角度 degs. と $C_x$ の関係を示している.

左右対称である模型船の計測結果に 30 度と-30 度に対称性が見られないのは、風洞の左右で風速が違う ことに起因していると考えられる.また、0度におけるC<sub>x</sub>の絶対値が小さい.これは船首下部の形状が 流線型となっており、抵抗を低減しているためである.カウリングを装備することで、正面の投影面積 Sが増加しているにも関わらず、C<sub>x</sub>を軽減する効果を得られた. この 45mm のカウリング装備では 30 度切り上げた型が Normal 船型と比べ $C_x$  を 8.4% 軽減することが確認された.

Table 2



船首形状変更時のC<sub>x</sub>の風向角に対 Fig. 4 する分布

# 船体番号 $|| C_x$ の増減率 $| C_x$ の最大減少率

船首形状変更時の風圧力係数の増減率

001	-8.4	-15.2% (20 度)
002	-1.6	-13.5% (20 度)
003	+6.3	-3.5% (20 度)

# (2) カウリング装備 15mm

船首形状を変更した船型 004 から 006 の, C<sub>x</sub> の増減率と最大減少率を Table 3 に示す. 何も取り付け ていない船型 Normal の  $C_x$  を基準としている. Fig. 5 は各カウリング切り上げ角度ごとに,船体角度 degs. と $C_x$ の関係を示している.

この 15mm のカウリング装備では 45 度切り上げた型が Normal 船型と比べ C<sub>x</sub> を 4.6% 軽減することが 確認された.



Fig. 5 船首形状変更時の*C<sub>x</sub>*の風向角に対 する分布

Table 3 船首形状変更時の風圧力係数の増減率

-					
	船体番号	$C_x$ の増減率	$C_x$ の最大減少率		
	004	-0.7%	-11.3% (20度)		
	005	-4.6%	-11.3% (20度)		
	006	+5.3%	-2.6% (20 度)		

# (3) カウリング装備 30mm

船首形状を変更した船型 007 から 009 の,  $C_x$  の増減率と最大減少率を Table 4 に示す. 何も取り付け ていない船型 Normal の  $C_x$  を基準としている. Fig. 6 は各カウリング切り上げ角度ごとに, 船体角度 degs. と  $C_x$  の関係を示している.

この 30mm のカウリング装備では 30 度切り上げた型が Normal 船型と比べ *C<sub>x</sub>* を 5.0% 軽減することが 確認された.

Table 4

009



船体番号	$C_x$ の増減率	$C_x$ の最大減少率
007	-5.0%	-10.8% (30 度)
008	-2.6%	-15.0% (20 度)

-1.6%

船首形状変更時の風圧力係数の増減率

-14.9% (20度)

する分布

(4) フルカバー装備

船首形状を変更した船型 010 から 013 の,  $C_x$  の増減率と最大減少率を Table 5 に示す. 何も取り付け ていない船型 Normal の  $C_x$  を基準としている. Fig. 7 は各カウリング切り上げ角度ごとに, 船体角度 degs. と  $C_x$  の関係を示している.

このフルカバー装備では 30 度切り上げた型が Normal 船型と比べ C<sub>x</sub> を 8.1% 軽減することが確認された.



Fig. 7 船首形状変更時の*C<sub>x</sub>*の風向角に対 する分布

Table 5 船首形状変更時の風圧力係数の増減率

船体番号	$C_x$ の増減率	$C_x$ の最大減少率
010	-8.1%	-19.8% (30 度)
011	-2.6%	-13.4% (20度)
012	-6.2%	-16.9% (30 度)
013	-2.1%	-8.9% (30度)

#### (5) カウリング装備とフルカバー装備の比較

 $C_x$ の減少効果が大きかった船型 007 と 008 のカウリング装備と,船型 010 のフルカバー装備の比較 を行うために再度計測を行った.その結果を Fig. 8 に示す.船首形状を変更した船型 007,008,010 の  $C_x$ の増減率と最大減少率を Table 5 に示す.

切り上げ角度 30 度, 高さ 30mm のカウリングを装備することで  $C_x$  を 8%, 切り上げ角度 30 度のフル カバーを装備することで  $C_x$  を 8.8% 軽減する効果を確認した.また, フルカバーを追加した方がカウリ ングを追加するよりも,  $C_x$  を低減できることが分かった.



 Fig. 8
 船首形状変更時の C<sub>x</sub> の風向角に対

 する分布

Table 6 船首形状変更時の風圧力係数の増減率

船体番号	$C_x$ の増減率	$C_x$ の最大減少率
007	-8.0%	-18.0% (20 度)
008	-5.6%	-14.0% (20度)
010	-8.8%	-17.7% (20 度)

# 5. まとめ

風抵抗増減率を船首形状を変更した計13種類の供試模型で計測比較し,船首形状の変更による影響に ついて考察を行った.本研究より得られた結論を次のように示す.

- (1) カウリングやフルカバーを装備することで,正面の投影面積 S が増加しているにも関わらず,風 圧力係数 C<sub>x</sub> を軽減する効果を得られた.
- (2) 0 度において *C<sub>x</sub>* の絶対値が小さい. これは船首下部が流線型の形状であるため,抵抗を低減して いると考えられる.
- (3) 切り上げ角度 30 度, 高さ 30mm のカウリングを装備することで  $C_x$  を 8%, 切り上げ角度 30 度の フルカバーを装備することで  $C_x$  を 8.8% 軽減する効果を確認した.
- (4) フルカバーを追加した方がカウリングを追加するよりも、C<sub>x</sub>を低減できることが分かった.
# 風レンズ風車翼の空力設計法の開発

九州大学 大学院工学研究院機械工学部門 古川雅人

# 1. 諸言

風車による発電量は風速の3乗に比例することから,風 車まわりに風を局所的に集中させることができれば,発電 量は大幅に増加し,年間平均風速の低い日本に適した風力 発電方式の構築が可能となる.このような集風機能を有す る風レンズ風車が九州大学において独自に開発された<sup>(1)</sup>. この風レンズ風車では,図1のとおり,ディフューザとつ ばを組み合わせた「風レンズ」(集風体)を翼車の外周部 に装着することによって,翼車まわりに風を局所的に集中 させる.大型の風レンズを装着することで約5倍の,コン パクト型の風レンズでも約2~3倍の風車出力の向上を 実現することができることから,日本の風況に適した風車 として注目されている.

集風効果, すなわち風レンズ内部へ流入する風量は風レ ンズ風車の空力設計において最も重要なパラメータであ るが, 集風効果が風レンズと翼車の両流れ場の干渉の結果 決まることから, 設計段階で集風効果を定量的に予測する ことは容易でない.また, 風レンズ風車の場合, 図2のと おり, 風レンズ内の内部流れと風レンズまわりの外部流れ が混在すること, 風レンズ後方で流れの剥離が発生するこ と, 集風効果に伴う流入流線の曲率発生によって風レンズ への流入風速に大きな半径方向分布が現れることから, 従 来の風車よりも極めて複雑な流れ場が形成される.

以上のような特徴をもつ風レンズ風車に対して,従来の 風車設計法を適用することには限界があり,高性能な風レ ンズ風車を開発するためには,従来の設計法にとらわれな い斬新な発想に基づく空力設計法の新たな創出が不可欠 である.この観点から本研究では,子午面粘性流れ解析と 翼の三次元逆問題設計とを組み合わせた風レンズ風車用 翼車の三次元空力設計法を創出することを目的として,本 三次元空力設計法を適用した風レンズ風車翼を設計する とともに,試作および風洞試験を実施した.



#### 2. 風レンズ風車用翼車の三次元空力設計法

本翼車設計法は以下に述べる子午面粘性流れ解析と翼 の三次元逆問題設計とを組み合わせた革新的な空力設計 法である.

子午面粘性流れ解析<sup>(2)</sup>においては,子午面(r-z 面)内 の軸対称かつ粘性流れを仮定するが,軸対称流れの仮定の もとで翼作用(翼負荷分布)を考慮するために,翼両面の 圧力差に基づいた翼力(体積力)として翼作用をモデル化 する.設計条件として与えられる風レンズの形状および翼 負荷(角運動量)分布のもとに,翼力を体積力として付加 した軸対称ナビエ・ストークス方程式を数値的に解いて, 風レンズの内部流れと外部流れを連成して解析すること により,風レンズの集風量(風レンズ内部を通過する風量) および流入風速分布を求める.

翼の三次元逆問題設計では、風レンズで囲まれた内部流 れ場において、上述の子午面粘性流れ解析で求まった風レ ンズの集風量と流入風速分布を流入境界条件とし、設計条 件として与えられた翼負荷分布を翼面上の境界条件とす る三次元の逆問題を構成することにより翼の形状を求め る.この逆問題解法<sup>(3)</sup>では、翼のキャンバー面を渦層で近



図3 風レンズ風車用翼車の三次元空力設計法

似し、その束縛渦分布を翼負荷分布(周方向平均角運動量 分布)から定め、渦層が誘起する流速ベクトルが翼面に沿 って流れるという条件から翼の三次元形状を数値計算に より求める.本逆問題解法においては、入口流れの非一様 性および翼後縁から流出する随伴渦を考慮した翼の三次 元設計が行えるという利点を有する.

#### 3. 設計法の適用および試作・性能試験の結果

表1に示す設計仕様の下に前述の三次元空力設計法を 適用して,翼車を設計した.スパン方向の翼負荷分布とし ては,図4に示すとおり,翼根元から75%スパン位置で 最大負荷をかけ,翼根元および翼先端では負荷を極力小さ くした.また,コード方向の翼負荷分布として,図5のよ うに,翼前縁から10%位置で最大負荷を,翼前縁で正の 入射角となるように若干の負荷を,ならびに翼後縁で負荷 なしを与えた.設計された翼車を試作して,応用力学研究 所の大型風洞(地球大気動態シミュレーション装置)によ りその空力性能を計測した.

風車翼	S50
風車半径 R [mm]	500
近寄り風速 V [m/s]	10
回転数 n [rpm]	670
周速比λ [-]	3.5
翼枚数 N [枚]	3
負荷係数 Ψ [-]	0.932
ハブ比λ [-]	0.139
スタッキング位置	50%コード位置
風レンズ体	C-ii type つば高さ 10%









図5 コード方向翼負荷分布



図6は風洞試験により得られた供試風レンズ風車の全体性能を示している.図中の丸シンボルが三次元空力設計法を適用した新モデル風車の性能であり,近寄り風速が6.0 m/s および8.0 m/s の場合の性能をそれぞれ赤および青のシンボルで示している.また,図中の縦軸は,風レンズ体の受風面積を基準とした出力係数である.さらに,図中には,スパン方向の流入速度分布および翼負荷分布を一様として同じ設計仕様で一次元理論に基づいて設計された従来モデル(MT モデル)の風洞試験結果も×シンボルであわせて示している.同図によると,三次元空力設計法を適用した新モデル風車と従来モデルの最高出力係数に大きな差異は認められないが,新モデル風車の方が正の失速特性が大幅に改善されており,その結果,従来モデルと比べて低周速比まで高出力を保持していることがわかる.

## 4. 結言

子午面粘性流れ解析と翼の三次元逆問題設計とを組み 合わせた風レンズ風車用翼車の三次元空力設計法を構築 した上で,その設計法を適用した風レンズ風車翼を設計・ 試作し,その空力性能を風洞試験により検証した.その結 果,本空力設計法は失速特性に優れた風レンズ風車翼の設 計が可能であることが明らかになった.

#### 参考文献

- "Development of a Shrouded Wind Turbine with a Flanged Diffuser", Ohya, Y., 他 4 名, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 96, Issue 6, pp. 524-539, 2008.
- (2) "Axisymmetric Viscous Flow Modeling for Meridional Flow Calculation in Aerodynamic Design of Half-Ducted Blade Rows", Tabata, S., Hiratani, F., Furukawa, M., Memories of the Faculty of Engineering, Kyushu University, Vol.67, No.4, pp.199-208, 2007.
- (3) "A Compressible Three Dimensional Blade Design Method for Radial and Mixed Flow Turbomachinery Blades", Zangeneh, M., Int. J. Numerical Methods in Fluids, Vol. 13, pp. 599-624, 1991.

# 電磁波遮蔽材料の創製とその評価法の確立

信州大学繊維学部 機能機械学課程 倪慶清 九州大学応用力学研究所 汪 文学

1. 目的

カーボン繊維強化樹脂(CFRP)をはじめとする軽量・高強度複合材料は,飛躍的に産業 用途へ展開されている.一例として,CFRPを主翼や胴体にまで利用拡大し,複合材料が 構造重量の50%を占めることになった中型旅客機B787が挙げられる.また,省エネとエコ の観点から,次世代の自動車構造材料にもFRP複合材料は一部利用されている.複合材料 は従来の金属や高分子材料を単純に置換するものではなく,微視的な構成素材から構造ま での種々の階層での「複合化」「機能化」「知能化」を集結できる新しい材料・構造であり, その材料用途の可能性は今後も広く深まっていくものと予想している.現在のフロンティ アとして,スマートコンポジット,グリーンコンポジット,ナノコンポジットなどの分野 での研究が展開されている.

一方,軽量・超高強度複合材料の航空,自動車分野への応用やIT技術の発展による情報 量の増大に伴う高速通信の普及につれて,電磁波がますます重要視されている.高速通信 を実現するために,マイクロ波帯からミリ波帯への高い周波数の利用が望まれている.こ れらの応用にあたり,部品ごとに応じて電磁波の遮蔽と透過がそれぞれ要求され,機器の 誤作動や人体への影響が懸念される.そこで,広範囲の周波数領域にわたる電磁波の遮蔽 や抑制は必要不可欠であり,今後も益々重要視される.本研究では高性能の電磁波遮蔽材 料・構造を開発するとともに,電磁波遮蔽性能の評価方法を確立することを目的とする.

# 2. 実験手法

◆試料作製 カーボン繊維強化樹脂複合材料 (CFRP)は,軽量・高強度部材として,多くの 分野での応用が期待されている.一方,電磁波遮蔽効果の観点から,従来の金属材料と比 べ,著しく小さい.そこで,カーボン繊維強化樹脂材料の構造設計を行い,カーボンブラ ックやカーボンナノチューブなどの充填材との複合化により,よりよい電気的特性,電磁 波遮蔽特性を得られることが期待され,新規材料構造の開発を行った.

◆導電性の評価 試料の導電性の評価のために直流導 電率を測定した. 試料の導電率は電磁波遮蔽特性にお いて重要なパラメータである. 端子の接触抵抗を排除 するために4 端子法を用いた.

◆電磁波遮蔽の評価 試料の電磁波遮蔽特性を評 価するために電磁は遮蔽効果(SE, Shielding Effectiveness)を測定した.SE は材料に入射する電磁波 および伝送後の電磁波の比率で表される.本測定では, 電磁波遮蔽効果の測定はホーンアンテナの前方に誘電 レンズを設置した自由空間法を採用した.装置にはベク



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

トルネットワークアナライザおよび透過減衰量測定装置を用いた.装置の概略図をFig.1 に 示す. 電界の振動方向に対して CFRP の上層の繊維方向が等しいときの角度を0°とした. 電界の振動方向に対して繊維配向角を変化させ,それぞれの条件下での CFRP 電磁波遮蔽 効果を測定した.測定周波数は0.5-18 GHz である.電磁波遮蔽効果 SE は電磁波の入射波 および伝送波の比により定義され、次式により表される.

$$SE = 10\log(P_i / P_o)$$
  
= 20log(E\_i / E\_o) (1)

P<sub>i</sub>およびP<sub>o</sub>は電磁波の入射および伝送電力である. E<sub>i</sub>およびE<sub>o</sub>は電磁波の入射および伝送電界である. 電磁波遮蔽効果の単位はdBである.

# 3. 結果および考察

# 3.1 伝播方向による電磁波遮蔽特性

一方向 CFRP の 45 。および 90 。の時における
SE の測定結果を Fig.2 に示す.45 。の時,層数の
増加に伴い SE は比例的に増加を示した.よって、
SE は CFRP の厚さ増加に対して比例的に増加する
といえる.他の方向に対しても同様の傾向を示した.同じ層数において、45 。の時の方が 90 。の
時より SE は高かった.2CFRP では、45 。において
SE は約 12 dB であり、90 。における SE より約
6 dB 高かった.これは 90 。の時より高い 45 。の
時の導電率が関係していると考えられる.



# 3.2 電磁波遮蔽効果の予測

SE の方向依存曲線についてさらに検証するため, SE は VNA の S パラメータ測定を基に 算出しており,次式のように表される.

$$SE = -10\log T = -10\log |S_{21}|^2$$
<sup>(2)</sup>

*T* は伝送率,そして  $S_{21}$  は順方向伝送する S パラメータである. SE は対数により表示されるため, SE の方向依存性が示す曲線について判断が難しい. そこで,  $|S_{21}|$ の方向依存性より, SE の方向依存曲線を導いた.

$$|S_{21}| = A \sin\left(2\theta - \frac{\pi}{2}\right) + B \qquad 0 \le \theta \le \pi$$
(3)

 $\theta$ (rad)は電界の振動方向に対する一方向 CFRP の繊維方向である. *A* および *B* は振幅および 45 °の時の| $S_{21}$ |である.式(2),(3)より,SE の方向依存性は次式のように表せる.

$$SE = -20\log\left(A\sin\left(2\theta - \frac{\pi}{2}\right) + B\right) \quad 0 \le \theta \le \pi$$
(4)

# 4. まとめ

一方向CFRP 積層板の電磁波遮蔽特性を評価し,明確な電磁波方向依存性を明らかにした. その上,電磁波遮蔽メカニズムを検討し,予測式を提案した.また,CFRPは電磁波遮蔽材 料として有効であることが確認された.

5. 研究組織

研究組織 1. 信州大学繊維学部機能機械学科 倪 慶清(研究代表者)

2. 九州大学応用力学研究所 汪 文学

# 24 ME-S1

# 第5回九大グラフェン研究会

「グラフェンナノ構造の形成と物性」

平成25年1月18日(金) 10:00~16:30 於 九州大学大学院工学研究院 伊都キャンパス・ウエスト2号館921号室

上述の日時、場所において共同研究集会を開催した。研究集会の講演内容を下記に示している。 本研究集会では、グラフェンのラマン分光/格子振動に関する研究発表3件([1]、[2]、[3])、 ARPES (Angle-Resolved PhotoEmisison Spectroscopy;角度分解光電子分光)による電子状態分析に 関する研究発表1件([4])、第一原理計算および Tight-Binding 計算によるグラフェン形成プロセ スに関する研究発表2件([5]、[6])、SiC 熱分解によるグラフェン形成実験に関する研究発表2 件([7]、[8])がなされた。ラマン分光/格子振動に関する研究発表では、特にグラフェンのエ ッジ(端)や欠陥に焦点を当てて、ラマン散乱スペクトルや STM (Scanning Tunneling Miroscopy; 走査トンネル顕微鏡)による解析事例等が詳細に報告された。ARPES による研究成果報告では、 SiC 表面のナノ構造に起因するグラフェンシートの反り(たわみ)や終端構造が材料の電子状態に 与える影響について議論された。第一原理計算および Tight-Binding 計算による理論解析では、初期 のグラフェン核形成プロセスについて原子レベルでの詳細な説明がなされた。特にステップ端にお ける核形成過程に焦点が当てられて議論が展開した。SiC 熱分解によるグラフェン成長実験では、 ステップ端近傍におけるグラフェンの形成過程、表面モフォロジー等に注目して研究が行われてい た。実験環境(雰囲気)や供給原料分子種などがグラフェン成長に与える影響、ステップの傾斜方 向とナノ構造の相関について詳細な議論がなされた。

本研究集会では、理論、評価、実験の専門家が集い、「グラフェンナノ構造の形成と物性」に関 する詳細な議論が行われた。焦点を絞って講演者を選別し、また個々の講演時間を確保したプログ ラム構成としたため、白熱した議論が展開し参加者の十分な理解が得られた。本研究集会を通じて 新たな共同研究、共同プロジェクトが立ち上がることを期待する。

[1] Md. Sherajul Islam、橋本明弘 (福井大学 院工)

[Numerical analysis on phonon properties of defective graphene by forced vibrational method]

[2] Mark A. Bissett、吾郷浩樹 (九州大学 先導研)

Raman spectroscopy of mechanically strained and chemically functionalised graphene

[3] 佐々木健一 (NTT 物性基礎研)

「ラマンDバンドの起源:グラフェンにおける結合性・反結合性軌道」

[4] 小森文夫 (東京大学 物性研)

「SiC 基板に成長したナノグラフェンの電子状態」

[5] 影島博之 (NTT 物性基礎研)

「第一原理計算からみた SiC 上グラフェンの形成と構造」

[6] 井上仁人、寒川義裕(九州大学 院工、応研)

「エピタキシャルグラフェン成長初期のC凝集課程-SiC表面構造とCクラスター構造の相関ー」

[7] 金子忠昭 (関西学院大学) 「超高温 Si 分圧可変環境を用いた熱分解 SiC グラフェン成長制御」

[8] 梶原隆次/栗栖悠輔 (九州大学 院工)

「田中研の最近の話題/グラフェンナノリボンとファセット上グラフェン」

研究代表者:田中 悟(九州大学 院工) 所内世話人:寒川義裕(九州大学 応研)

# 第5回九大グラフェン研究会(主催:応用力学研究所)

~グラフェンナノ構造の形成と物性~

# 平成25年1月18日(金) 10:00~16:30 於 九州大学大学院工学研究院 伊都キャンパス・ウエスト2号館921号室

1. 10:00 - 10:05

はじめに 九大院工 田中 悟

2.  $10:05 \sim 10:35$  (30分)

福井大学院工 Mr. Md. Sherajul Islam, 橋本 明弘 教授

Numerical analysis on phonon properties of defective graphene by forced vibrational method

3. 10:35~11:05 (30分)

九大先導研 Dr. Mark A. Bissett, 吾郷 浩樹 准教授

Raman spectroscopy of mechanically strained and chemically functionalised graphene

4. 11:05~11:55 (50分)

NTT 基礎研 佐々木 健一 氏

「ラマン D バンドの起源:グラフェンにおける結合性・反結合性軌道」

昼食 11:55~13:00

5.13:00~13:50(50分)
東大物性研 小森 文夫 教授
「SiC 基板に成長したナノグラフェンの電子状態」
6.13:50~14:40(50分)
NTT 基礎研 影島 博之 氏
「第一原理計算からみた SiC 上グラフェンの形成と構造」
7.14:40~15:10(30分)
九大院工 井上 仁人氏,寒川 義裕 准教授
「エピタキシャルグラフェン成長初期のC凝集課程-SiC表面構造とCクラスター構造の相関-」

休憩 15:10-15:30

8.15:30~16:20(50分)
関西学院大 金子 忠昭 教授
「超高温 Si 分圧可変環境を用いた熱分解 SiC グラフェン成長制御」
9.16:20~16:50(30分)
九大院工 梶原 隆次/栗栖 悠輔 氏
「田中研の最近の話題/グラフェンナノリボンとファセット上グラフェン」

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

# 参加者名簿

1. アントン ビシコフスキー (九大 院工) 2. 梶原隆次(九大 院工) 萩原良人 (九大 院工) 3. スレイ チェンダー (九大 院工) 4. 5. 栗栖悠輔(九大 院工) 高木勝也(九大 院工) 6. 中森弓弦(九大 院工) 7. 8. 林 真吾 (九大 院工) 木本真一 (九大 院工) 9. 加藤喜峰(九大 院工) 10. 11. 水野清義(九大 総理工) 栃原 浩(福岡大学) 12. 13. 荒木 (旭化成) 14. Md. Sherajul Islam (福井大学) 15. 橋本明弘(福井大学) 16. Mark A. Bissett (九大 先導研) 佐々木健一 (NTT) 17. 18. 小森文夫(東京大学) 19. 影島博之(NTT) 20. 金子忠昭(関西学院) 21. 井上仁人(九大 院工)

- 22. 寒川義裕(九大 応研)
- 23. 田中 悟 (九大 院工)

計23名(学内15名、学外8名)

# CT 画像を利用したバイオメカニクス・シミュレーション法の開発と臨床問題への応用

横浜市立大学医学部 稲葉 裕

1.序言

近年、コンピュータとシミュレーション技術の発展により、CT や MRI 等の医療用生体画像を利用して、実3次元構造を模擬した生体の数値モデルを作成し、有限要素法を用いて生体力学的解析を行うことが可能となってきている。しかし、境界条件をいかに生体内の条件に適合させて設定するか、あるいは、得られた応力状態等の解析結果をいかに医学的考察に反映させるか等の問題が残されている。これらの問題を解決するためには、計算力学や生体力学を専門とする工学者と、臨床において骨を扱う整形外科医や歯科医が共同して研究を進める必要がある。一方、国産の骨解析ソフトウェアであるMechanical Finder ((株)計算力学研究センター)は、骨モデル作成からインプラント等を挿入したモデルへの発展、および応力解析までの一連の作業を1パッケージで行うことができる簡便なソフトウェアであり、最近では、整形外科、歯科および工学の各分野で着実にユーザが広がっている。

そこで,整形外科,歯科,工学の各分野において Mechanical Finder のユーザである者が一堂に会し,研究紹介と議論を通して親交を深め,最終的にはシミュレーション技術を骨関係の臨床問題へ応用することを目的として,本研究集会を企画し開催する運びとなった.

今回,一昨年,昨年に続いて第3回研究集会を開催でき,異なる分野から多くの方にご参加頂いた ことは感銘深いことである.研究集会開催にご協力いただいた諸先生方,ならびに遠方よりご参加い ただいた各先生方に心より深謝申し上げます.

# 2. プログラム

日時:2012年8月25日(土)

- 会場:東京国際フォーラム G 棟会議室 409 号室 東京都千代田区丸の内 3-5-1
- 13:20-13:30 開会の辞 東藤 貢 (九州大学)

 13:30-13:40 講演1「人工股関節インプラント形状が大腿骨に及ぼす影響 -SL-PLUS と SL-PLUS MIA との比較-」 池 裕之(横浜市立大学整形外科)
 13:40-13:50 講演2 「Mechanical Finder を用いた肩腱板修復用 suture anchor の引き抜き 強度予測」 佐野 博高(東北大学整形外科)
 13:50-14:00 講演3「インプラントアンカーを利用した下顎歯列遠心移動の有限要素解析」

- 13.50-14.00 講員3 インノノンドノンルーを利用したド嶺歯列速心移動の有限要素牌が 金井 悠佑(日本工業大学工学部)
- 14:00-14:10講演4「Acetabular retroversion の股関節有限要素解析」田中啓仁(埼玉医科大学整形外科)
- 14:10-14:20 講演5「脊椎固定術における複数椎体と固定ロッドのモデリングと応力解析」 田原 大輔(龍谷大学理工学部)
- 14:20-14:30 講演6「口腔内実測荷重を用いた MECHANICAL FINDER による歯科インプラント 埋入方向の検討」
  - 水戸 武彦(東北大学歯学研究科)
- 14:30-14:40 講演7「腫瘍用人工関節で置換された大腿骨の力学状態と問題点」
  - 荒平 高章(九州大学総合理工学府)
- 14:40-14:50 講演8「変形性股関節症における骨嚢胞の3次元シミュレーションの試み」 月僧 博和(福井医療短期大学)
- 14:50-15:05 休 憩
- 15:05-15:20 デ モ「Mechanical Finder を使った解析モデル作成のテクニック」

15:20-15:30	講演9「腰椎すべり症に対する脊椎後方固定術後の力学的影響について」 小林 奏(昭和大学藤が丘病院整形外科)
15:30-15:40	講演 10「The Finite Element Analysis of the Orthodontic Miniscrews:
	The Effect of the Insertion Direction and Proximity to Tooth Root
	Albogha Hassan(九州大学歯学研究院)
15:40-15:50	講演 11「ステムデザインの違いによる人工股関節手術後の大腿骨近位部
	の応力分布の比較」
	大庭 真俊(横浜市立大学整形外科)
15:50-16:00	講演 12「有限要素解析を用いた前腕骨骨幹部の骨強度評価」
	松浦 祐介 (千葉大学整形外科)
16:00-16:10	講演 13「人工股関節置換が大腿骨の骨リモデリングに及ぼす影響について」
	福岡航世(九州大学総合理工学府)
16:10-16:20	講演 14「インプラント周囲骨における線形解析および非線形解析の結果」
	坂本 太郎 (北海道医療大学)
16:20-16:30	講演 15「腰椎固定術における生体力学的研究 -固定隣接椎間への影響について-」
	塩原 恭介(昭和大学藤が丘病院整形外科)
16:30-16:45	デ モ「Mechanical Finder 最新バージョンリリースのご案内」
16:45-17:00	全体の質疑応答とディスカッションおよび Mechanical Finder へのご要望
17:00-17:10	閉会の辞 稲葉 裕(横浜市立大学整形外科)

# 3. 講演の概要

(1) 講演1「人工股関節インプラント形状が大腿骨に及ぼす影響」

近年、人工股関節全置換術において侵襲を最小限にする MIS 法の概念が導入されている. MIS では皮切りが小さいために、インプラント挿入時に周囲組織が損傷されることがある. SL-PLUS MIA stem は SL-PLUS standard stemを基に、MIS に対応できるように開発されたインプラントであり、ステム近位外側ショルダー部のデザイン等が変更されている. ステムデザイン変更がステム周囲大腿骨の応力分布や回旋固定性、術後の BMD 変化に影響を与える可能性がある. 今回、我々は有限要素法を用いて SL-PLUS MIA stem および SL-PLUS standard stem の大腿骨相当応力を測定した.また、dual-energy X-ray absorptiometry 法を用いて大腿骨 BMD を測定し、これらの関連を検討したので報告する.

(2) 講演2 [Mechanical Finder を用いた肩腱板修復用 suture anchor の引き抜き強度予測]

肩腱板断裂は中高年者における肩痛の代表的な原因疾患であり、手術治療を要することが多い.本 疾患に対する手術術式として、近年 suture anchor と呼ばれるインプラントを用いて、関節鏡視下に 修復する術式が急速に普及してきている.この術式は従来の直視下修復術よりはるかに容易であるが、 反面骨粗鬆症を合併する女性などでは骨内に挿入したアンカーが緩みを来すことがあり、再断裂の原 因になると報告されている.したがって、個々の症例においてアンカーが緩みをきたす荷重を術前に 予測できれば、術後の再断裂を防止するためにきわめて有用であると考えられる.こうした背景に基 づいて、本研究では、実際の腱板断裂手術症例において Mechanical Finder を用いたアンカーの破断 強度の予測方法を確立することを目的とした.

(3) 講演3「インプラントアンカーを利用した下顎歯列遠心移動の有限要素解析」

歯の噛み合わせ異常の一つである下顎前突症の治療法として、歯性の場合には歯科矯正治療を単独 で、骨格性の場合には歯科矯正と共に外科的な顎矯正手術を適用することが多い.しかし、近年にお いては、骨格性下顎前突症の場合であっても、外科的侵襲を避けるために、従来から用いられている ワイヤーとブラケットに矯正用インプラントアンカーを併用し、歯科矯正治療単独で行われる場合が ある.このような矯正治療においては、従来の治療法とはまったく異なった力が作用するものと考え られ、どれくらいの力をどの方向に作用させればよいかを事前に把握しておく必要がある.本研究で は、下顎前突症の歯科矯正治療を想定して、ワイヤーとブラケットおよびインプラントアンカーを併 用して下顎歯列全体を遠心方向に移動する場合について、X線CT 画像から作成した3次元下顎歯列モ デルに不均一材料特性を割り当て、ワイヤーとブラケットをモデル化して有限要素解析した.

(4) 講演4「Acetabular retroversionの股関節有限要素解析」

Closs-over sign を有する acetabular retroversion や global dyplasia は femoroacetabular

inpingement を生じ変形性股関節症の原因となることが近年報告されている.この研究の目的は FAI 例の股関節有限要素解析をおこない、力学的な問題点を明らかにすることである.本研究では、FAI の診断で受診した2例2股および正常股1股を対象とし、この3股を骨構造解析ソフトウェア Mechanical Finder を用いて解析した.その結果より、FAI 例では臼蓋縁にかかる相当応力が大きく、応力集中に偏りがみられた.

(5) 講演5「脊椎固定術における複数椎体と固定ロッドのモデリングと応力解析」

脊椎圧迫骨折の手術として、骨折部位の上下の椎体にスクリューを挿入し、ロッドで固定する方法 が採用されている.しかし、骨のこの方法は、時間経過に伴うスクリューとロッドの緩みや脱転の発 生が多いため、ロッド部分の変位の自由度をより高くするための構造の改良が試みられている.この ため、ロッドの最適な設計には、その構造の変化とスクリューの緩みや脱転現象との関連を明らかに することが必要であり、有限要素モデルを用いた力学的評価が有用となる.本研究では、ロッドの構 造の変化を見かけの剛性の変化と捉え、脊椎圧迫骨折部を有する複数椎体モデルを構築し、力学解析 により、ロッドの剛性の変化が椎体内応力分布に及ぼす影響を検討した.

(6)講演6「ロ腔内実測荷重を用いた MECHANICAL FINDER による歯科インプラント埋入方向の検討」 歯科インプラント埋入計画に際して、CT データ等から骨形状や骨質を取得して歯科インプラント埋 入位置、方向を決定する診断補助ツールが現在広く普及している.しかし、これらはインプラント機 能時の周囲顎骨における荷重状況などは考慮されておらず、生体力学的には改善の余地がある.今回 は、最大かみ締め時に口腔内で歯科インプラントに加わる生体内実測荷重データと、同一被験者にお けるCTデータを基にして顎骨幾何形状を反映したFEモデルを用いて、インプラント埋入方方向の 変化がインプラント周囲骨における応力状態におよぼす影響を生体力学的観点から検証を行った.

(7) 講演7「腫瘍用人工関節で置換された大腿骨の力学状態と問題点」

骨肉腫のような悪性腫瘍の切除によって、大腿骨に大規模な骨欠損が生じた場合、腫瘍用人工膝 関節置換による再建が行われている.しかし、術後の経過において人工関節周囲での骨吸収、人工関 節のルースニング、あるいは大腿骨ステムの折損など懸念される.本研究では、CT 画像を用いて骨密 度分布を考慮した大腿骨から脛骨上部までの詳細な3次元下肢モデルを構築し、腫瘍用人工膝関節を 置換したモデルへと発展させた.次いで、月僧による骨リモデリング理論を導入した Mechanical Finder を用いて、加齢に伴う大腿骨や人工関節周囲骨の骨密度変化やひずみエネルギー密度の変化について 評価を行った.

(8) 講演8「変形性股関節症における骨嚢胞の3次元シミュレーションの試み」

変形性股関節症において、骨頭や骨盤に骨嚢胞が発生する場合がみられる.この骨嚢胞の発生について病理組織学的研究はこれまで多く行われてきたが、コンピュータを使った骨嚢胞の形成シミュレーションについてはあまりおこなわれていない.骨嚢胞の3次元シミュレーションが可能になると、その形成メカニズムがわかるだけでなく、骨嚢胞と関節軟骨との関係、骨嚢胞と筋力との関係を実際的状態で明らかにすることができ、変股症の進展予防にも貢献すると考えられる.そこで、本研究では変股症における骨嚢胞の3次元シミュレーションを実施し、骨嚢胞と関節軟骨や外転筋力との関係について検討を行ったので報告する.

(9) 講演9 「腰椎すべり症に対する脊椎後方固定術後の力学的影響について」

腰椎変性疾患において椎間不安定性を有する症例に対して pedicle screw を併用し cage を用いた PLIF は標準的な手術となっている.しかし術後の骨癒合の得られるまで,または,癒合後の骨や使用 instrument の力学的特性に対する報告は少ない.今回 Mechanical Finder を用いて PLIF 術後の固定椎 および instrument への力学的影響につき検討した.その結果,上位よりも下位 screw への応力が大き い傾向があった.また,骨癒合後は骨や instrument への応力は減少するが,消失することはなかった.

## (1 0)講演 10「The Finite Element Analysis of the Orthodontic Miniscrews:

The Effect of the Insertion Direction and Proximity to Tooth Root

To study the change in stress and strain in bone around mini-implant in response to change in insertion angle of mini-implant and also to change in its proximity to tooth ro ot. Angulation of mini-implants revealed variation in stress and strain distribution around them, which reached highest when the implants touch to the cortical bone at 50. Al so, the mini-implant that interferes with the PDL

showed highest stresses and strain. At least, 0.5mm of cancellous bone around the mini-implant in all directions is required to avoid the cortical and cancellous bone the high stresses and strains. Thus, it could be concluded that mini-implants are stable when they have sufficient cancellous and cortical bones.

(11)講演11「ステムデザインの違いによる人工股関節手術後の大腿骨近位部の応力分布の比較」 セメントレスステムを使用した人工股関節全置換術後,大腿骨近位部の骨密度は低下する.ステム 近位部で stress-shielding が起こることがその原因と言われている.現在,様々なデザインのセメン トレスステムが発売されているのは,適切な初期固定を得るための方法論の違いがデザインに反映さ れているためである.本研究では、2つの異なるコンセプトに基づいたデザインのセメントレスステ ムにおける,術後の大腿骨の応力分布の際を有限要素法の手法を用いて求め,その比較を行う.また, 各々のステムを使用した患者の大腿骨近位部の骨密度変化の観察結果より,近位部での固定を意図さ れたデザインのステムでは,骨密度の低下が抑制されることを証明する.

(12) 講演12「有限要素解析を用いた前腕骨骨幹部の骨強度評価」

前腕骨骨幹部骨折に対して, plate を用いた観血的整復固定術が行われるが, その術後に骨萎縮を来す 症例をしばしば経験する. 我々は, 非侵襲的な手法を用いて生体内の骨強度を測定し, plate 抜去後の 再骨折リスクを判定できないかと考えた. 本研究の目的は前腕骨骨幹部骨折術後患者における骨密度, 骨強度を Mechanical Finder を用いて測定し, 骨萎縮の程度を検討することである.

(13) 講演13「人工股関節置換が大腿骨の骨リモデリングに及ぼす影響について」

Bone resorption has been recognized as one of the complications after total hip arthroplasty. Due to the implant with higher stiffness than bone tissue, stress shielding causes the bone density around the implant to decrease. Although such resorption is controlled by complicated biological factors under the influence of biomechanical conditions, simplified mechanical approach may be able to express the resorption behavior approximately. In this study, a modified version of Huiskes et al was implemented into Mechanical Finder to see the effects of resorption of bone model with inhomogeneous material properties.

(14) 講演14「インプラント周囲骨における線形解析および非線形解析の結果」

我々はメカニカルファインダーを使用して、無歯顎のヒト乾燥頭蓋骨骨体標本のCTデータから解析 モデルを作成し、歯科インプラント治療における応力解析を行ってきた.メカニカルファインダーは、 CT 撮像時に得られた DICOMデータからモデル形状を作成できる.また、CT 値から骨の重量密度を求め、 重量密度からヤング率を算出することで骨の非均質性をモデルに反映することが可能である.骨を近 似的な連続体として応力の挙動を解析しているのだが、この際に非均質材料の解析を行うにあたり線 形解析で行って良いのかについて疑問に感じた.今回は条件を同じくしたモデルに対して線形解析と 非線形解析を行い、双方の比較を試みた.

(15) 講演15「腰椎固定術における生体力学的研究-固定隣接椎間への影響について-」

近年不安定性を有する腰椎変性疾患に対し,pedicle screw を用いた腰椎固定術が普及している.し かし,その強固な固定力ゆえに隣接椎間障害が大きな問題になっている.本研究の目的は有限要素解 析プログラムを用いて腰椎後方椎体間固定術の患者の CT から腰椎3次元モデルを作成し,隣接椎間, 椎体への力学的特性及び隣接椎間障害との関連を調査することである.

## 4. あとがき

本研究集会は、「シミュレーション」と「硬組織」をキーワードとして、医学(特に整形外科)、歯 学、工学において関係する研究者を一堂に会し、将来的な医歯工連携を目指して開催したものである. 整形外科を中心とした医学、歯学、工学および関連する医療機器メーカから多くの方にご参加頂き、 各講演とも活発な議論を展開して頂いた.次年度も引き続き第4回研究集会を開催する予定であり、 本研究集会が、この分野の発展に貴重な役割を果たしたことを信じて止まない.

# 24ME-S2 応用力学研究所研究集会

「CT画像を利用したバイオメカニクス・シミュレーション法の開発と臨床問題への応用」

登録番号	氏 名	所属
1	盧 炳周	筑波大学スポーツ医学専攻
2	金子 雅子	社会保険中央総合病院整形外科
3	村上 憲治	筑波大学大学院人間総合科学研究科
4	大久保 知幸	茨城県立医療大学放射線技術科学科
5	奥山 藍	茨城県立医療大学放射線技術科学科
6	池 裕之	横浜市立大学 附属病院 整形外科
7	稲葉 裕	横浜市立大学 附属病院 整形外科
8	富塚 慶徳	日本工業大学
9	東藤 貢	九州大学応用力学研究所
10	福岡 航世	九州大学大学院総合理工学府
11	荒平 高章	九州大学大学院総合理工学府
12	ALBOGHA Hassan	九州大学大学院歯学研究院
13	北原 亨	九州大学大学院歯学研究院分野
14	田原 大輔	龍谷大学理工学部機械システム工学科
15	水戸 武彦	東北大学歯学部
16	月僧 博和	福井医療短期大学
17	小林 奏	昭和大学藤が丘病院整形外科
18	大庭 真俊	横浜市立大学 附属病院 整形外科
19	松浦 佑介	千葉大学大学院医学研究院整形外科
20	及川	千葉大学大学院医学研究院整形外科
21	稲毛	千葉大学大学院医学研究院整形外科
22	中田	千葉大学大学院医学研究院整形外科
23	及川	千葉大学大学院医学研究院整形外科
24	小林	千葉大学大学院医学研究院整形外科
25	岡本 聖司	千葉大学大学院医学研究院整形外科
26	崇根	千葉大学大学院医学研究院整形外科
27	芝山	千葉大学大学院医学研究院整形外科
28	小川	千葉大学大学院医学研究院整形外科
29	村上 賢一	千葉大学大学院医学研究院整形外科
30	國吉 一樹	千葉大学大学院医学研究院整形外科
31	田中 啓仁	埼玉医科大学整形外科

参加者リスト

# 九州大学応用力学研究所

〒816-8580 福岡県春日市春日公園6丁目1番地 連 絡 先 九州大学応用力学研究所事務室 電 話 092-583-7702 F A X 092-583-7701