共同利用研究成果報告 第 17 号

平成25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 17 年が経過しまし た。この間,毎年 100~110 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,2013 年度も特定研究 33 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,2014 年 6 月 5 日-6 日に開催され る「RIAM フォーラム 2014」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。 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 2013 年度は 10 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。

応用力学研究所は、2010年度4月、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ました。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んでいます。

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。

> 2014年3月 九州大学応用力学研究所 所長 大屋 裕二

Ħ	次
	~~~

平成 25 年度共同研究一覧 ······i
平成 25 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 •••••••••••••••••79
新エネルギー力学分野共同研究成果報告 ・・・・・・・・・・193

# 平成25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1				
	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		
25特1-1	ブリ・スルメイカの回遊に影響を与える対馬暖	石川県水産総合セルター	広瀬 直毅	
	流域の海洋環境	辻 俊宏	2名	1
25特1-2	輪島〜舳倉島間の通過流量の季節変動と富山	石川県水産総合セルター	千手 智晴	
	サ 湾の流況	大慶則之	2名	3
25特1-3	フ 海流微細構造と植物プランクトン動態の関係	瀬戸内海区水産研究所	松野 健	
		鬼塚剛	4名	5
25特1-4	黄海・東シナ海の高精度海面高度計データセッ	名古屋大学	市川 香	
	* トの作成	森本 昭彦	3名	7
25特1-5	高解像度衛星海面Fluxデータを用いた日	名古屋大学	千手 智晴	
	本海の大気海洋相互作用研究	富田裕之	3名	9
25特1-6	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	11
25特1-7	フェリーニューカメリアおよび IFF 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	13
一般研究				
25A0-1	日本海での乱流熱フラックス決定に果たす対馬暖流	東北大学	広瀬 直毅	
	の役割の理解	杉本 周作	2名	15
25A0-2	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	17
25A0-3	海洋乱流の観測およびモデリング研究	東京大学	松野 健	
		日比谷 紀之	13 名	19
25A0-4	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	23
25A0-5	海中ビークルの自航・曳航時の機構挙動に関する研究	海洋研究開発機構	中村 昌彦	
		百留 忠洋	8名	25
25A0-6	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	27
25A0-7	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	29
25A0-8	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	2名	31
25A0-9	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	33

25A0-10	海洋大循環の力学ーエクマン層から中深層循環まで	北海道大学	広瀬 直毅	
		水田 元太	15名	35
25A0-11	水中洞窟系のロボット探査とソナーによる形態計測	佐世保工業高等専門学校	中村 昌彦	
	システムに関する研究	眞部 広紀	6名	37
25A0-12	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	原 由香里	
	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	3名	39
25A0-13	漁船情報を利用した日向灘海況情報提供に関する研	宮崎県水産試験場	広瀬 直毅	
	究	渡慶次 力	4名	41
25A0-14	強非線形・強分散表面波・内部波方程式系による水	鹿児島大学	辻 英一	
	の波の2次元伝播解析	柿沼 太郎	3名	43
25A0-15	化学物理海洋観測から見る東シナ海の水塊構造	富山大学	松野 健	
		張 勁	2名	45
25A0-16	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	2名	47

## 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		79
25特2-1	波動伝搬を用いた磁力	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	81
25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	83
25特2-3	サ 複雑ネットワークの	手法を用いたプラズマ乱	高口業等專門学校	糟谷 直宏	
	ブ 流時系列データの新し	しい解析手法の開発	谷澤 俊弘	2名	85
25特2-4	テ 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	稲垣 滋	
	状態評価のための確率	率論的手法の高度化	田村 直樹	9名	87
25特2-5	マ デジタルコリレーショ	ョンECEの開発	核融合科学研究所	稲垣 滋	
			土屋 隼人	1名	89
25特2-6	プラズマ乱流データ角	解析研究会	九州大学	伊藤 早苗	
			稲垣 滋	23名	91
25特2-7	バイスペクトル解析	による電子温度勾配モー	東北大学	稻垣 滋	
	ドと低周波揺動の非総	泉形結合機構解明	金子俊郎	5名	93
25 特 2-8	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	95
25 特 2-9	高次相関解析の並列処	心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	99
25 特 2-10	トーラス装置におけ	る乱流計測の為のプロー	京都大学	稻垣 滋	
	ブ開発とそのデータ解	解析手法の検討	大島 慎介	6名	101

-				
25 特 2-11	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	103
25 特 2-12	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	5名	105
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		107
25 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	109
25 特 3-2	リアルタイム画像生成のための合成開ロレー	九州大学	出射 浩	
	ダ解析と応用	間瀬 淳	9名	111
25 特 3-3	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	
	マ 開発とその応用に関する研究	出射 浩	21名	113
25 特 3-4	電子サイクロトロン周波数帯静電波の衝突減	核融合科学研究所	出射 浩	
	衰効果のモデリングに関する研究	伊神 弘恵	4名	115
25 特 3-5	電磁波の協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	117
25 特 3-6	テラヘルツ波を用いた高温プラズマ計測法の	核融合科学研究所	出射 浩	
	開発	徳沢 季彦	2名	119
一般研究				
25FP-1	プラズマ物理におけるマルチスケール・マルチフィ	日本原子力研究開始機構	糟谷 直宏	
	ジックスシミュレーション研究	矢木 雅敏	5名	123
25FP-2	プラズマ対向材料中の水素同位体交換に関する研究	日本原子力研究開発機構	大澤一人	
		山口 正剛	1名	125
25FP-3	金属間化合物合金における空孔型欠陥と水素原子の	大阪府立大学	大澤一人	
	相互作用に関する研究	堀 史説	4名	127
25FP-4	高温構造材料の組織制御による変形抑制の微視的機	核融合科学研究所	渡辺 英雄	
	構	室賀 健夫	2名	129
25FP-5	高温プラズマ乱流における不安定性の波数依存性に	核融合科学研究所	糟谷 直宏	
	関する研究	登田 慎一郎	3名	131
25FP-6	高フラックスパルス照射材料の材料表面特性変化	名古屋大学	渡辺 英雄	
		大野 哲靖	5名	133
25FP-7	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	5名	135
25FP-8	Quest装置におけるVUV分光法による粒子・不純物リ	核融合科学研究所	図子 秀樹	
	サイクリングに関する研究	森田 繁	6名	137
25FP-9	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	9名	139
25FP-10	プラズマ輸送理論	核融合科学研究所	稲垣 滋	
		伊藤 公孝	20名	141
25FP-11	有限自由度モデルを用いたプラズマ乱流の統計解析	富山大学	佐々木 真	
		成行 泰裕	2名	143
25FP-12	PdCu透過薄膜を用いた水素原子束プローブの開発	京都大学	図子 秀樹	
		高木 郁二	4名	145

25FP-13	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	147
25FP-14	多孔質金属膜への水素捕捉に関する研究	九州大学	渡辺 英雄	
		片山 一成	4名	149
25FP-15	金属材料の光学特性および電気伝導特性に与える低	島根大学	渡辺 英雄	
	エネルギーイオン照射の影響	宮本 光貴	3名	151
25FP-16	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	4名	153
25FP-17	応力下における照射組織の発達過程に係る強度特性	日本原子力研究開発機構	渡辺 英雄	
	評価(その4)	井上 利彦	2名	155
25FP-18	写真画像解析によるQUESTプラズマの形状再構	電気通信大学	中村 一男	
	成	竹田 辰興	2名	159
25FP-19	酸化物セラミックス中の水素同位体の溶解、拡散、	九州大学	渡辺 英雄	
	放出挙動に関する研究	橋爪 健一	5名	161
25FP-20	LHD長時間放電に曝露された金属材料中のヘリウム	核融合科学研究所	渡辺 英雄	
	粒子の吸蔵・放出挙動	時谷 政行	3名	163
25FP-21	電子ビーム照射による材料表面の高エネルギー密度	応用ながれ研究所	徳永 和俊	
	入射損耗開始閾値の評価	糟谷 紘一	3名	165
25FP-22	多層構造体金属材料の水素同位体拡散・透過挙動に	九州大学	徳永 和俊	
	関する研究	大塚 哲平	3名	167
25FP-23	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	2名	169
25FP-24	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	171
25FP-25	プラズマ中の多スケール・多プロセス現象の理論・	日本原子力研究開始機構	佐々木 真	
	シミュレーション研究	石井 康友	12名	173
25FP-26	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	175
25FP-27	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	5名	177
25FP-28	Si02中におけるヘリウムイオン照射効果	琉球大学	渡辺 英雄	
		岩切 宏友	4名	181
25FP-29	純タングステン焼結体の高温特性	茨城大学	徳永 和俊	
		車田 亮	3名	183
25FP-30	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	4名	185

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	頁
協力者数	
特定研究4	
海洋空間を利用した新エネルギー開発に関する研究 統括責任者	
胡長洪	
25 特 4-1         九州周辺海域における潮流発電の適地調査         鹿児島大学         胡 長洪	
山城 徹 4名	193
25 特 4-2 浮体式洋上風車発電ファームの波浪中動揺特 広島大学 胡 長洪	
サ 性に関する研究 岩下 英嗣 9名	195
25 特 4-3 浜流発電タービンの発電特性に関する研究 淋羅将技術大学大学 胡 長洪	
	207
25 特 4-4 デ 海洋再生可能エネルギーの利用に関する 九州大学 胡 長洪	
テクノロジー 経塚 雄策 11名	211
25 特 4-5 ス 双翼型フラッタ水力発電装置に対する流れレ 福岡工業大学 胡 長洪	
レンズの効果に関する実験的検討 阿比留 久徳 7名	217
25 特 4-6 後ろ曲げダクトブイの規則波中性能向上に関 佐賀大学 胡 長洪	
する研究 1名 1名	219
25 特 4-7 マルチカラム型波力発電浮体の性能評価およ 九州大学 胡 長洪	
び向上に関する研究 安澤 幸隆 4名	229
25 特 4-8 海洋エネルギー総合利用のための数値解析要 東京工業大学 胡 長洪	
素技術の基礎研究 肖 鋒 3名	233
25ME-1 風レンズ風車用に開発された軽量・高強度素材の疲 琉球大学 新川 和夫	
労強度評価	235
25ME-2 風レンズ風車の軽量・高強度化に関すろ材料開発 漢陽大学 新川 和夫	
	237
25ME-3 周ルンズ周車田の農麦繊維強化複合材(CEDD)の運搬 岡山理科大学 新川 和主	201
	243
1011110     1011100       25MF-4     SiC結県表面上でのグラフェン成長過程の公子動力     三重大学	210
	249
25ME-5 風レンズ風車の負荷制御の最適化と集風構造体の振 鹿島丁第等専門校 島谷 隆	210
動との関係に関する研究 小田原 悟 2名	251
25MF-6 非一様力学提を用いた機械的伸縮制態に上る幹細胞 名士民大学 車藤 音	
2311200 9月 1875年初を用いてに成成日月中間時間にによる年前通信 石口座八子 一次旅行 気 の機能発現と力学量の相関性の解明	253
25MF-7 カルコパイライト刑化合物光道休士阻害汕車拓の作 它協士学 枯木 $2-1$	200
	255
	200
	259
2.5ME-9 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 長洲	200

25ME-10	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	2名	269
25ME-11	電磁波遮蔽材料の創製とその評価法の確立	信州大学	汪 文学	
		倪慶清	1名	271
25ME-12	ワイドギャップ半導体単結晶の結晶欠陥と電子	佐賀大学	柿本 浩一	
	物性との関連に関する研究	嘉数 誠	5名	273
25ME-13	人工関節置換術を施した股関節に及ぼす骨リモデリ	横浜市立大学	東藤 貢	
	ングの影響に関する研究	稲葉 裕	1名	275
25ME-14	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	
	ー複合系多孔体の創製と評価	古谷野 潔	4名	279
25ME-15	歯科矯正治療による顎骨の生体力学的環境変化のコ	九州大学	東藤 貢	
	ンピュータ解析	高橋 一郎	4名	281
25ME-16	生体埋込型バイオ燃料電池に関する基礎研究	九州大学	東藤 貢	
		藤野 茂	1名	283
25ME-17	数値損傷力学を用いた人工股関節置換股の骨折解析	九州大学	東藤 貢	
		中島 康晴	2名	285
25ME-18	生体材料と間葉系幹細胞のハイブリッド化による	大阪大学	東藤 貢	
	骨再生研究	名井 陽	3名	287
25ME-19	3次元膝関節モデルを用いた人工膝関節の力学的応	愛媛大学	東藤 貢	
	答性評価	三浦 裕正	2名	289
25ME-21	AlGaN系窒化物半導体の結晶成長における熱力学解	三重大学	寒川 義裕	
	析	三宅 秀人	1名	291
25ME-22	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	2名	293

# 平成25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	開催場所	開催日	頁
			講演・参加诸数		(半成)	
25A0-S1	風送ダストに関する現状と今後の展	名古屋大学	原 由香里	応用力学	26年1月	
	開に関する研究集会	長田 和雄	20件、40名	研究所	9-10 日	49
25A0-S2	非線形波動研究の拡がり	青山学院大学	辻 英一	筑紫ホー	25年10月31	
		増田 哲	21 件、62 名	ル	-11月2日	53
25A0-S3	日本海及び日本周辺海域の海況モニタ	長崎大学	広瀬 直毅	応用力学	25年12月	
	リングと波浪計測に関する研究集会	万田 敦昌	13 件、53 名	研究所	19-20 日	59
25A0-S4	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	26年2月	
	則と動力学に果たす役割		9 件、18 名	研究所	22-23 日	63
25A0-S5	海洋レーダを用いた海況監視システ	琉球大学	市川 香	応用力学	25年12月	
	ムの開発と応用	藤井 智史	10件、75名	研究所	18-19 日	67
25A0-S6	地球流体における波動と対流現象の	東京大学	和方 吉信	応用力学	25年11月	
	力学	新野 宏	11件、19名	研究所	27-28 日	71
25A0-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	26年2月	
		石坂 丞二	10件、25名	研究所	7-8 日	75

### 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
25FP-S1	各種磁場配位での周辺揺動研究	広島大学 西野 信博	図子 秀樹 6件、11名	QUEST 実験 棟	26年1月 7日	187
25FP-S2	第 11 回トロイダルプラズマ統合コ ード研究会	京都大学 福山 淳	糟谷 直宏 24 件、31 名	応用力学 研究所	25年12月 19-20日	189

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 講演・参加诸数	開催場所	開催日 (平成)	頁
25ME-S1	第6回 九大グラフェン研究会	九州大学 田中 悟	寒川 義裕 8 件、28 名	伊都キャ ンパス	26年1月 24日	295

# 平成25年度

# 地球環境力学分野 共同研究成果報告

## 25 特 1-1

#### 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

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。前者では、東シナ海の大陸棚縁辺上の産卵場で発生したブリ 卵稚仔のその後の輸送過程を受動トレーサー実験によって再現した。後者では、近年発生している中型イカ 釣り漁船の漁場北偏化と海水温の関係を調べた。

#### 1. ブリ仔稚魚の移送経路

【方法】 実験は 2001~2010 年の 10 年間を対象とし、それぞれ 8 月までの輸送状況を計算した。東シナ海に おけるブリ親魚漁獲量を産卵量の指標とし、漁獲量に比例した卵稚仔トレーサーをモデル内の各海域に投入 した。投入深度はモデル 1 層目(水深 0~8m)とし、実験期間を通じてトレーサーを強制的に浮上させるよ うパラメータを与え、モデル格子ごとのトレーサー濃度を計算するとともに海域ごとの総トレーサー数とそ の比率を求めた。さらに、トレーサーの初期条件(ブリ親魚漁獲量)を 10 年間の平均値で固定した対照実験 も併せて実施した。実験結果の検証のための観測データとして、東シナ海におけるブリ仔稚魚採集結果(西 海区水産研究所)、日本海におけるモジャコ調査結果(山口水産研究センター)およびブリ 0 歳魚漁獲量を用 いた。

【結果と考察】 東シナ海の大陸棚縁辺部で投入されたトレーサーは、縁辺部に沿って北東方向に輸送された 後、太平洋に輸送されるものと、さらに北上し日本海へと輸送されるものに分かれた。対馬暖流域における 分布の先端は5月には対馬海峡、6月には隠岐諸島、7月には能登半島、8月には男鹿半島周辺に達した。濃 度分布は年によって若干異なるものの、日本海の沿岸域全般に拡大していく傾向は一致していた。これらの 濃度分布は、東シナ海における仔稚魚分布、日本海におけるモジャコの出現時期ともよく一致していた。さ らに、日本海沿岸各地の定置網において概ね同時期(6月後半から8月)に本種0歳魚が漁獲され始める現 象をうまく説明している。



図1.3ケ月後における海域別トレーサー数比率の年変動 縦軸は比率,横軸は再現年を示す



図 2. 日本海比率の年変動の実験間比較 縦軸は比率,横軸は再現年を示す 産卵月(トレーサー投入月)ごとに3ケ月後におけるトレーサー数の海域別比率を求めた。そのうち日本 海比率は、3月産卵39%、4月産卵37%、5月産卵57%(いずれも10年平均)であり、これまで太平洋に 多く輸送されると考えられていた3月産卵を含め多くの卵稚仔が日本海へと輸送されていることが示された。 一方、3月産卵では年変動が比較的小さいものの、4,5月産卵では大きかった(図1)。これらの年変動は流 況と産卵場の双方の変化によってもたらされていることが示された(図2)。

各産卵月合計の比率(10年平均)は、日本海:東シナ海:太平洋=44:15:41であった。一方、同期間の 0歳魚の漁獲量比率は65:4:31であり、実験結果に対して日本海の比率が高かった。これは実験の再現性 や本種の能動的遊泳などに起因するほか、海域における本種の生残率の違いが影響している可能性があり、 今後の重要な検討課題となろう。

#### 2. スルメイカ成魚の回遊

【方法】石川県水産総合センターで収集している中型イカ釣り漁船の操業記録から操業位置の年別月別平均 緯度を求め、これを漁場の北偏の指標とした。DREAMS_Mの2003~2012年の水温について、年別月別深 度別に緯経度1度升目の平均水温を求めた。そして、操業位置の平均緯度と各升目の平均水温の時系列の相 関から漁場の北偏に関係していると考えられる海域や深度を抽出した。

【結果】小木港の冷凍イカ水揚量の急減には 9~11 月期の漁場の北偏が強く関係していることから、同期間 を対象に解析を行った。緯経度 1 度升目の平均水温と操業位置の平均緯度の相関を調べたところ、日本海沖 合の 50m 深水温の低下が漁場の北偏に関係していることが示唆された。そこで、北海道沿岸部を除く北緯 41 度以北の海域を北部沖合域とし、同海域の 50m 深平均水温と操業位置の平均緯度の関係を調べたところ、 両者の間には有意な負の相関(R=-0.77, P<0.01)が認められた。さらに、北海道西日本海の経度方向への 水温勾配と操業位置の平均経度の関係を調べたところ、両者の間には有意ではないものの中位程度の正の相 関(R=0.67)が認められた。一般的に暖水と冷水が交わる潮境には生物が集積・滞留しやすく漁場が形成さ れやすい。従って、北部沖合の水温低下にともなって道西日本海の経度方向への温度勾配が大きくなり、こ のことによって同海域に漁場が形成されやすくなったことが漁場北偏の要因と考えられる。本結果を踏まえ、 今後は温度勾配に着目した漁場予測手法を検討する計画である。



図 3. 小木港の冷凍イカ水揚量と 9~11 月期の中型船操業位置の平均緯度(a)、北部沖合域の 50m 深平均水温と操業 位置の平均緯度の関係(b)、 道西海域の 50m 深水温の経度方向への温度勾配と操業位置の平均経度の関係

#### 3. 発表等実績.

辻 俊宏・広瀬直毅 ブリ卵稚仔の輸送シミュレーション. 2013 年度水産海洋学会研究発表大会, 京都市, 2013.11.23-24.

#### 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海流の影響下にあり、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海流沿岸分枝流の時間変動 と能登半島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

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に示すSt.A~St.B)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、有意な正の相関があり、水位差から 輪島〜舳倉島間の通過流量の推定が可能である。ここでは2013年の水位観測データから通過流量を算

定した。通過流量の算定に際しては、九州大学応用力 学研究所が舳倉島漁港に設置した水位計と、国土地理 院輪島験潮場の毎正時の観測データを輪島特別地域気 象観測所の海面気圧で補正し、両地点の5年平均値

(2008/8/1~2013/7/31)に対する偏差の差を水位差と 定義して、水位差と流量の回帰式から毎正時の流量を 算定した。沿岸の流れのデータは、図1に示す能登半 島北西岸の門前(水深 80m)、能登半島北東岸の小泊(同 60m)及び小浦(同 90m)の10m水深帯に係留した電磁 流速計(JFEアドバンテック製 AEM-RS)で2013年に観 測された毎正時のデータを用いた。流量と流速のデー タは、755時間移動平均を行った長周期成分と生デー タから755時間移動平均値を除いた後、25時間移動平 均を行った短周期成分に別けて相互の関連性を検討し た。また、舳倉島で海上保安庁が観測した風の変動と、 流量・流速変動との関わりを調べた。



#### 結果と考察

舳倉島の風速、輪島〜舳倉島間の通過流量(以下沿岸分枝流量)、門前、小泊、小浦の流速の変動を図2に示した。風速は、石川県の海岸線に平行な北東-南西方向の風速成分、流速は各観測点の流軸方向の流速成分で示した。沿岸分枝流量は、長周期成分が7~9月にかけて増加し8月にピークを示したが、短周期成分には明瞭な周期変動は認められなかった。短周期成分の変動と風測変動を比較すると、低気圧や台風の日本海通過に伴い強い南西風が吹いたケースで北東向きの流量が増加し(図1のA, B, C, D)、逆に台風が本州南岸を通過して、強い北東風が吹いたケースでは流れが南西向きに転じる傾向(同 E, F)がみられた。これは、南西風(北東風)によるエクマン輸送が、輪島の水位を上昇(低下)させて、舳倉島との水位差が変化した結果と考えられる。沿岸分枝流量と流れの長周期成分の変動を比較すると、能登半島北西に位置する門前では夏季に沿岸分枝流量の増加に対応した北北東向き



流速の明瞭な増加が認められた。能登半島北東岸についてみると、小泊では夏季の流速値が長期間欠 測したが、8月下旬から9月上旬に得られた変動傾向からは、夏季に北東向きの流れが強まる様子が うかがわれた。また、小浦では9月から10月に東向きの流れが強まる傾向がみられた。以上のとおり、 能登半島北東岸の測点では、夏季の沿岸分枝流の強まりに対応する明瞭な流れの変動は確認されなか ったが、小泊と小木の双方で、夏季から秋季に陸岸を左に見る流れが強まることが分かった。これら は、富山湾内に形成された時計回りの環流に起因するものと考えられ、沿岸分枝流の変動が富山湾内 の流動に及ぼす影響は今後の検討課題である。次に、沿岸分枝流量と流れの短周期成分の変動を比較 する。前述のとおり、沿岸分枝流量の短周期成分には気象擾乱に対応した変動がみられる。南西風に 対応して北東向きの流量が増加した B, C のケースでは、同時期に門前で北北東向きの流れが強まる一 方、半島東岸の小泊で南西向き、小浦で西向きの流れが生じている。これに対して、北東風に対応し て沿岸分枝流が反流に転じた E, F のケースでは、同時期に門前で南南西の流れが強まり、小泊で北東 向き、小浦で東向きの流れが生じている。これらは、気象擾乱に伴って能登半島沿岸に発生する急潮 に相当し、B, C のケース(E, F のケース)は半島北西岸に形成された沈降域(湧昇域)の伝播と推察

される。8月~10月の沿岸分枝流量と3測点の流れの短周期 成分データを標準化(平均値を引いて標準偏差で除算)して 相互相関を調べた結果を図3に示した。小泊では南西向きの 流速が流量の増大にやや先行して強まる関係が、門前と小浦 では北北東向きと西向きの流速が流量の増大に先行して強ま る一方、逆方向の流速が流量の増大に遅れて強まる関係がう かがわれた。しかし、相関はいずれも低くこれらから相互の 関係を検討することは適切でないと考えられた。以上の通り、 対馬海流沿岸分枝流の長周期変動は能登半島沿岸の流れの変 動に影響を及ぼしていると推察されたが、短周期変動が及ぼ す影響は明確にできなかった。今後は、解析対象海域を県全 域に拡大して、過去の観測データに遡って解析を進めること で、沿岸分枝流と沿岸流の変動の関連性をさらに検討したい。





## 海洋微細構造と植物プランクトン動態の関係

独立行政法人水産総合研究センター 鬼塚 剛

1. 目的

近年,八代海などの九州沿岸域では有害植物プランクトンによる赤潮が頻発しており,漁業被害も生 じている。植物プランクトンは増殖する際に光と栄養塩を利用するため,植物プランクトンの挙動は, その分布深度や栄養塩環境に影響を与える海洋の混合過程と密接な関わりがあることが報告されてい る。本研究では,八代海において,有害植物プランクトンが発生する夏季に微細構造プロファイラー等 を用いた海洋微細構造観測を実施し,植物プランクトンの鉛直分布・増減過程と微細構造の鉛直分布と の対応関係を明らかにすることを目的とした。

2. 観測及びデータ

九州西部に位置する八代海の姫戸沖定点(32°25.5 N, 130°27.7 E, 水深約 27m)において 2013 年 8 月 3 日から 4 日にかけて瀬戸内海 区水産研究所所属の「しらふじ丸」によって 24 時間の昼夜連続観 測を行った(Fig. 1)。観測中は超音波ドップラー流速計(Workhorse ADCP 300 KHz, 1200 KHz, Teledyne RD Instruments)で流速の鉛直 分布を測定するとともに,2 時間ごとに多項目水質計 (AAQ-RINKO, JFE アドバンテック)および微細構造プロファイ ラー(TurboMAP-N9, JFE アドバンテック)を用いて,水温・塩分・ 蛍光強度・光強度・濁度・流速シアーの鉛直分布を測定し,4 時 間ごとに 16 m 深まで2 m 間隔で各層採水を実施した。得られた流 速シアーから乱流エネルギー散逸率εを算出し,εと浮力振動数 N から鉛直拡散係数 K_vを見積もった。採水試料は船上でプランクト ン検鏡を行うとともに,一部を持ち帰りクロロフィル a・栄養 塩(DIN, DIP, DSi)分析を行った。昼夜連続観測前後には周辺 海域で姫戸沖定点を含む鉛直断面観測を実施した。



 Fig. 1
 調査海域図。24
 時間の昼夜連続

 観測は姫戸沖の
 Stn.5
 付近で実施した。

3. 結果と考察

8月3日から4日にかけて実施した24時間の昼夜連続観測結果をFig.2に示す。クロロフィルa濃度の極大層が密度躍層内の7~13 m深に継続して確認された。層厚は2~5 m程度,極大値は高いところで20 mg m³以上に達し,8月3日16時以降は $\sigma_t$ が21.5の等値線に沿って分布していた。船上検鏡によると,この極大層は*Chaetoceros* spp.を主体とする中型の珪藻類で構成されていた。鉛直拡散係数は5 m以浅や15 m以深では概して10⁴ m² s⁻¹を超える比較的高い値であったのに対し,クロロフィル極大層が形成されていた5~15 m深では10⁻⁵~10⁻⁶ m² s⁻¹程度と相対的に値が小さかった。一方,渦鞭毛藻*Ceratium furca* は密度躍層を超えて活発に日周鉛直移動しており,クロロフィル極大と異なる挙動を示した。DIN 濃度は8月3日の観測開始時には表層と6 m 深を除いて1  $\mu$ M を超えていたが,その後低下していき,8月4日には10 m 以浅で1  $\mu$ M 以下となった。1  $\mu$ M の等値線は徐々に深くなっており,クロロフィル極大層の深度変化と対応していた。昼夜連続観測前後も含む8月1日から4日までの姫戸沖定点における

鉛直分布を比較すると、クロロフィル極大は8月1日から4日にかけて10m深付近で急激に発達し、 この間に DIN 濃度は10m以浅で約2μM減少していた(Fig.3)。この数日間で、珪藻類が栄養塩を取 り込み増殖し、相対的に鉛直拡散係数の小さい亜表層に極大を形成したと推察された。

鬼塚	剛	独立行政法人水産総合研究センター	グループ長	研究代表者:現場観測・データ解析
吉川	裕	京都大学大学院理学研究科	准教授	研究協力者:現場観測・データ解析
油布	圭	九州大学応用力学研究所	技術職員	研究協力者:現場観測
石井フ	大輔	九州大学応用力学研究所	技術職員	研究協力者:現場観測
松野	健	九州大学応用力学研究所	教授	所内世話人



Fig. 2 8月3日~4日のクロロフィル a 濃度(クロロフィル a 分析値と蛍光強度の関係式から換算)および 密度  $\sigma_t$  (a), 渦鞭毛藻 *Ceratium furca* 細胞密度 (b), 鉛直拡散係数  $K_v$  (c), DIN 濃度 (d) の鉛直分布時系列



Fig. 3 8月1日~4日のクロロフィル a 濃度(左)および DIN 濃度(右)の鉛直分布(クロロフィル a 濃度は 20 mg m⁻³ずつずらして描画)

#### 黄海・東シナ海の高精度海面高度計データセットの作成

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・黄海では富栄養化や大型クラゲの大発生など様々な環境問題が発生しておりその影響は日本海まで及んでいる。これらの問題に対処するためには、東シナ海・黄海から日本海への物質輸送過程を明らかにする必要がある。しかし、観測データの不足している東シナ海・黄海では物質輸送に大きな影響を与える表層流の変動を調べることは容易ではない。本研究課題では、表層流を観測できる衛星海面高度計データの高精度化を行い、黄海・東シナ海の表層流変動を明らかにするためのデータセットの作成を目的とする。黄海・東シナ海における海面高度計データに含まれるエラーの大部分は潮汐に起因するものである。そこで、日本、韓国、中国の験潮所データと衛星海面高度計データから計算された潮汐調和定数を同化する潮汐同化モデルを開発し、衛星海面高度計データの潮汐補正の精度を向上させる。

#### 2. 参加者

森本 昭彦	(名古屋大学地球水循環研究センター)
伊藤雅	(名古屋大学大学院環境学研究科)
岩清水 徳堂	(名古屋大学大学院環境学研究科)
市川 香	(九州大学 応用力学研究所)

#### 3. 研究成果の概要

3-1. 潮汐同化モデルの開発

本研究の潮汐同化モデルは Princeton Ocean Model (Mellor, 2004)をベースにした水平解像度 1/36°の水平 2 次元モデルであ る。計算領域は図 1 に示す黄海・東シナ海を含む海域とし、開 境界条件として NAO.99Jb (Matsumoto et al., 2000)の調和定数に よる水位変動を与えた。対象とする分潮は M₂, S₂, O₁, K₁, Q₁, P₁, K₂, N₂の 8 分潮であり、それぞれの分潮毎に計算を行 い計算の各種パラメータは分潮毎で最適になるように調節した。 同化データとしては、日本と韓国、中国沿岸の験潮所の潮汐調 和定数、海面高度計 TOPEX/Poseidon (T/P) と Jason-1 (J-1)、 Jason-2 から得られる調和定数を使用した。特に, T/P と J-1 に 関しては Interleaved Tandem Mission のデータも使用し、T/P 単

独の場合に比べて倍の数の海面高度計データを同化した.

本研究で開発した潮汐同化モデルの誤差を調べるため、モデル



図 1. 潮汐同化モデルの計算領域

により計算された各分潮の調和定数と同化しなかった海面高度計から計算された調和定数を比較した。 計算領域全体でNAO.99Jbの8分潮の誤差は17.7cmだったのに対し、本モデルの誤差は8.7cmであった。 海域毎に分けて誤差を見ると, 黄海ではNAO.99Jbが23.5cmなのに対して本モデルは8.7cm, 東シナ海 では18.1cmに対して7.6cmであった(表1)。いずれの海域でも本モデルの誤差はNAO99Jbより小さく なっており、誤差の空間分布を見ると局所的に改善されたのではなく全体的に誤差が小さくなっていた。 ただし、どの分潮も杭州湾から長江河口、江蘇省沖にかけて誤差が大きかった。この大きな誤差はモデ

	分潮	$M_2$	$\mathbf{S}_2$	$O_1$	К1	$Q_1$	$P_1$	<b>K</b> ₂	$N_2$	合計
声い十次	本研究	1.9	0.7	1.5	0.7	0.7	1.2	0.5	0.5	7.6
東シノ海	NAO.99Jb	3.7	1.7	3.1	3.9	0.8	1.2	2.4	1.2	18.1
	本研究	1.6	0.8	1.4	1.8	0.5	0.7	0.8	0.6	8.2
與 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一	NAO,99Jb	5.4	3.9	3.3	3.6	1.3	1.3	3.2	1.5	23.5

表 1. 本モデルと NAO.99Jb との東シナ海と黄海での誤差の比較

3-2. 黄海・東シナ海を対象とした海面高度データセット

潮汐モデルで得られた潮汐情報を用いて黄海・東シナ 海の海面高度計データを処理し絶対表層流速を算出し、 東シナ海における現場観測データと比較、検証した. 観 測データの時間変動成分と海面高度計データの時間変動 成分は非常に似た傾向を示していた。このことより,本 研究で開発した潮汐同化モデルにより海面高度データか ら正しく潮汐が除去できたことが確認できた。

海面高度計データから得られた東シナ海における 1995年から2009年における表層流速場の時間変動成分 と漂流ブイのデータから平均海面流速場を計算し、季節 毎の平均的な表層流動場を計算した(図2)。この結果か ら、Lie et al. (2000)で示されている済州暖流、 Isobe(2008)等で指摘されている台湾暖流の夏期及び冬 期の流速(量)の変動も捉えることが出来た。また、杭 州湾沖の東シナ海中央部に、黄海から対馬海峡へ渦のよう に回り込む季節変化のない流れが見られた。黄海の季節変 化のない流れは現場観測に基づいて議論している Niino and Emery (1931)で示されている流れに近いものであっ た。更に、冬季に台湾北部で黒潮の流れが北方へ広がる傾 向を見ることが出来た。



図 2. 1995 年~2009 年における, 春期 (3 月~5月), 夏期 (6月~8月), 秋期 (9 月~11月), 冬期 (12月~2月)の絶対 表層流速場

#### 4. まとめ

新たな潮汐同化モデルを開発したことで、黄海・東シナ海の海面高度データの高精度化に成功した。 特に、中国沿岸を除けば潮汐誤差は8分潮で5cm程度であり、海面高度計データを使い黄海・東シナ海 の海面流速変動を解析できる精度に達したと思われる。しかしながら、中国沿岸での潮汐誤差は海面高 度変動より大きくさらなるモデルの改良が必要である。 高解像度衛星海面 flux データを用いた日本海の大気海洋相互作用研究

名古屋大学地球水循環研究センター 富田裕之

#### 1. 目的

日本海は日本の気象や気候に大きな影響を与える。それには日本海の海洋循環やそれを駆動する大気 海洋相互作用現象が深く関係している。しかしながら、現場観測が困難なことから、大気海洋相互作用 の実態の理解は十分ではない。そこで、新たに開発された高解像度の衛星海面フラックスデータ (J-OFURO2)の解析を行うことで、これまでに不可能であった日本海全体の海面フラックスの詳細な時 空間変動を観測的かつ統一的な視点で明らかにし、大気海洋相互作用現象の理解を深めるとともに、海 洋循環との関わりを議論することを目的とする。本年度は高解像度版 J-OFURO2 の平均場の特徴や推定 精度の検証を行うために、日本海における現場データとの比較や他のデータセットとの相互比較を行う。

#### 2. 研究結果

最初に冬季の乱流熱フラックスの平均場の特徴を確認するために高解像度の海面フラックスデータ (J-OFURO2)を含む各種のデータセットの比較を行った。例として、顕熱フラックスの1月平均値の空 間分布をそれぞれのデータセットについて示す(図1)。データセットの空間解像度の違いは明らかであ るが、それをふまえても、それぞれのデータセット間の違いはかなり大きいことが分かる。一方で、潜 熱フラックスについては、定性的な分布の特徴はそれほど大きな違いは無かった(図省略)。顕熱フラッ クスについて、J-OFURO2は、日本海中央部にフラックスの極小域があり、沿岸付近では相対的に大き な値があるという、他のデータセットでは確認できない空間分布の特徴を有する。日本側の大きな値は、 対馬暖流による高い海面水温分布、大陸側の大きな値は冬季の寒気の吹き出しに伴う低い気温分布に関 連づけられる。



図 1. 上向き顕熱フラックスの分布:1月平均値,2002~2006年,単位:W/m²

次に現場データを用いた精度検証を行った。現場データは、ICOADS IMMA (Release 2.4)に含まれる 主に船舶による気象観測データの瞬間値から推定された海面フラックスである。ただし現場観測は日本 側の海域にかたよっていることに注意する必要がある。図 2 に、データセット間の差が大きかった顕熱 フラックスについて ICOADS の現場観測値との比較結果を示す。J-OFURO2 は、バイアスや全体的な

ばらつきが小さく、他のデータセットと比べて比較的良い精度で顕熱フラックスの値を推定しているこ とが分かる。



図 2. ICOADS 現場データとの比較: 顕熱フラックス[W/m2] (a) J-OFURO2, (b) HOAPS3, (c) NCEP/NCAR 再解析, (d) NCEP/DOE 再解析

本研究では、さらに沿岸域におけるフラックス推定を行った。これは主に、沿岸付近のデータ処理を 見直した事と、陸域の影響をできるかぎり除く外挿法(Kara et al. 2008)を適用したことによりに行わ れた。図3に1月の平均場を例として示す。ICOADSの沿岸域付近のデータを用いて精度検証により、 再解析の値やCSFを適用しない場合の外挿値と比べて、かなり現実的なフラックスの値であることが確 認された。



図 3. 沿岸域のデータ処理および CSF 適用後の J-OFURO2 上向き乱流熱フラックス。1 月平均値 (2002 から 2006 年) (a)潜熱フラックス, (b) 顕熱フラックス。単位: W/m².

#### 3. 研究成果報告

H. Tomita and M. Kubota, Fine scale features in air-sea turbulent heat flux over the Japan/East Sea, Ocean Science Meeting, February 23-28, 2014, Hawaii Convention Center

#### 4. 研究組織

研究代表者	名古屋大学地球水循環研究センター	富田	裕之	研究員
所内世話人	九州大学応用力学研究所	千手	智晴	准教授
研究協力者	九州大学応用力学研究所	広瀬	直毅	教授
研究協力者	九州大学応用力学研究所	高山	勝己	研究員

## 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.夏季には,対馬暖流は中国大陸の長江起源の淡水を多量に輸送する.対馬海峡は対 馬によって韓国側の西水道と日本側の東水道に分かれる.海洋データ同化の手法を用いた数値モデル研 究では,東水道通過流は,山口県萩市沖の見島によって分岐している(広瀬ら,2009,海と空).

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.また、見島での対馬暖流分枝流の変動を捉えるために、 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.さらに、萩-見島間のフ ェリー「おにようず」(萩海運)を用い、見島から沿岸寄りのフェリー航路上の表層水温を測定した.

#### 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)に生物付着防止機能の付いた水温・塩分計を春から初冬にかけて設置し,1時間間隔で表層の水温と塩分を測定した.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,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4~5m 深に計測機器を設置した.

青海島通と見島宇津に小型水位計(RuggedTROLL100, In-Situ 社)を2012年8月下旬から設置し,10分 間隔で2測点の水位を計測している(図1).東京湾平均海面(TP)は、水位計設置時にDGPSを用い測量した.さらに、萩市浜崎と見島の間を約3往復/1日する定期フェリーに、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.本報告では、1年以上のデータが蓄積された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

青海島通と見島宇津で観測された水位と時系列を図2と図3に示す(2012年8月下旬~2013年10 月下旬).両島ともに、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.沖合 の見島に比べ沿岸寄りの青海島の潮汐変動が大きかった.季節変動に着目すると、両島ともに、2月頃 に最低水位、8月頃に最高水位となった.

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) を施した後, 両島の水 位差 ( $\Delta\eta$ )を求めた (図 4). 2012 年 9 月から 2013 年 6 月までの間, 水位差 ( $\Delta\eta$ )の変動幅は約±4 cm であったが, 2013 年 7 月以降, 変動幅が約±10 cm と大きくなった. 2013 年 7 月に青海島の水位は上 昇傾向にあったが, 見島の水位は殆ど上昇しなかった. 8 月に見島の水位が急激に上昇し, 両島間の水 位差が小さくなった. その後, 両島の水位が急激に低下したが, 水位差変動は, 2013 年 6 月以前と比 べ大きい状態が続いた.

水位差 ( $\Delta\eta$ ) の変動幅が約±10 cm のとき,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±30 cm s⁻¹と見積もられる (ここで, $f = 8.2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ,  $g = 9.8 \text{ m s}^{-1}$ ,  $\Delta y = 40 \text{ km}$ ).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,±0.84 × 10⁶ m³ s⁻¹となる.今後,このような大きな流速・流量変動が実際に起こったかどうか検討する必要が ある.



**図1.** 水位計設置位置(赤丸).



**図3.** 見島の水位(黒線). 赤線は48時間移動平 均を示す.



**図 2.** 青海島の水位(黒線). 赤線は 48 時間移動 平均を示す.



**図 4.** 青海島(赤)と見島(青)の水位(移動平 均). 黒線は両島間の水位差を示す.

# 4. 研究組織

研究代表者	水産大学校	滝川を	昏太郎
所内世話人	九州大学応用力学研究所	千手	智晴
研究協力者	福岡県水産海洋技術センター	内藤	岡山
	山口県水産研究センター	渡辺	俊輝
	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 レーダーのデータを使った 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、 特に衛星表面水温によって推定した対馬暖流の変動とマアジの漁獲データを比較し、海洋 レーダーのデータと合わせて考察した。

方法

水温のデータは、衛星 NOAA の AVHRR 信号を処理し、記録保存した海面水温のデー タを用いた. 玄界灘に流入する対馬暖流の流動パターンを推定するため東西対馬水道と壱 岐水道をとおり韓国沿岸まで達する 4 本の Line A-D と九州北岸から玄界灘の中央部の対馬 北東海域をとおり韓国沿岸に達する 4 本の Line E-H を設定した. 観測時雲が少なく良好な 観測結果を用いて、Line 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 と比較を行った。A-D と Line E-H 各 4 本のライン上の水温を離岸距離 1km 毎に平均し、 さらに各地点の年別月平均水温を算出した後、3 区間の移動平均値を求めた. 漁獲データは、 玄界灘の操業海域を緯度経度 2 分毎のメッシュに区分した区域を漁区として設定し、 2001-2012 年に依頼した中型まき網漁船の日別操業記録を用いた. 各年 5 月のマアジ漁獲 量を集計すると共に各漁区の中央点の緯度経度を漁獲位置として、日別に各漁獲位置の漁 獲量で加重平均した日別加重平均位置を求め、基準線から各日別加重平均位置までの距離 を求めた.

結果·考察

玄界灘中央部を通り対馬北東海域を経て,韓国沿岸に至る Line E-H 上の月平均水温の分 布は,2001~2007 年は離岸距離 100km から沖合へ向けて水温は低下し,約 150km 付近 でやや上昇しているのが見られるが,韓国沿岸域に向けて再び低下していた.これに対し 2008~2012 年は,対馬東岸海域の離岸距離 100km から 150km までの変化は乏しく,約 175km 付近から韓国沿岸域に向けて水温は低下していた. そこで各年離岸距離 50~150km の移動平均の値から最小二乗法により近似直線を求め, 2001~2007年と2008~2012年の切片を比較した結果,これらの傾きに有意な差(P<0.05) があることが分かった.この結果は、2008年を境に、対馬東側から北東の海域に暖水域が 広がっていると考えられた.また全ての年において、離岸距離約 175km 以遠は、韓国沿岸 に向けて水温が著しく低下していることから、対馬暖流と韓国沿岸水の間に水温のフロン トが形成されていることが示唆された.

毎年5月の玄界灘は、水温の昇温期で設定した Line E-H 上の相対的に水温が高い海域は 東シナ海から流入してきた対馬暖流を示し、2008年を境に対馬東側から北東の海域にかけ て暖水域が広がっていたことは、対馬西水道から日本海へ流入する対馬暖流の流況が2008 年を境に変化し、結果として暖水域が広がっていたと考えられた.この変化は、吉川他 (2012)が九州北岸及び対馬沿岸に設置された HF レーダーの観測結果から、2008年以降

対馬東水道に比べ対馬西水道を通る対馬暖流の流速が増加している経年変化の結果と一致 している.

つまり対馬西水道を通る対馬暖流の流量の増加により玄界灘の対馬暖流北端フロントの 北上に伴ってマアジの漁場が形成される海域も北上したことからまき網漁船の漁場が沖合 化したと考えられた.

研究成果報告

1. 安藤朗彦・宝槻孝行 対馬暖流の長期変動とマアジ漁場の沖合化,2013 年度九州沖縄ブ ロック水産海洋地域集会

研究組織

別紙参照

日本海での乱流熱フラックス決定に果たす対馬暖流の役割の理解

東北大学大学院理学研究科 杉本周作

1. 目的

日本海では、冬の間に、海洋から大気に膨大な熱が放出されており、その時間変動も大きいこと が知られている.この熱フラックス変動は、大陸からの乾燥した寒気の吹き出し(冬季季節風)が 主因であると報告されている(松村・謝 1998 等).そして、海上から多くの水蒸気を受け取った季 節風が、日本海側の諸都市に降水をもたらすとされている(Manabe 1957 等).一方で、最近、冬季 の日本海側降水の要因として、対馬暖流流量の重要性が指摘されつつある(Hirose and Fukudome 2006).これは、海面水温こそが熱放出決定の主因になることを示唆するものである.そこで、本 研究では、日本海での熱放出決定(特に潜熱に注目)に果たす海面水温の役割の定量化を試みた. そして、この熱変動が日本の降水量変動に及ぼす影響を調べることで、大気海洋系の新たな知見を 得ることを目的とした.

#### 2. 研究方法

潜熱フラックスは、OAFlux データ(Yu et al. 2008)の変数(海面水温,海上気温,海上比湿,海 上風等)を用い、バルク公式から独自に算出したものを使用した.Watanabe(1990)が提案した monsoon index(MOI)を季節風強度の指標として用いた.また、対馬暖流流量時系列は、対馬海峡 を横断する博多・釜山間のフェリー観測に基づき算出されたものを使用した(Hirose and Fukudome 2006).さらに、AMeDASの降水量データを使用した.本研究の解析期間は、1990年から2010年 までの21年間であり、潜熱放出が多い12月を対象とした.

#### 3. 研究結果

潜熱フラックスは、日本海東部で大きい変 動をもつことがわかった(図 1a).そこで、本 研究では、日本海東部領域(137°-140°E,38°-43°N)に着目した.図 1bは、日本海東部領域 平均潜熱フラックスの時系列を表す.経年変 動が卓越することがわかる.

つづいて,この潜熱フラックス変動の要因 を調べた.ここでは,Sugimoto and Hanawa (2011)で採用された数値実験(生データと 長期平均値を組み合わせてフラックスを計



図 1. (a) 12 月平均潜熱フラックス標準偏差分布図 [W m⁻²]. 黒線枠は日本海東部領域を表す. (b) 日本海東部領域潜熱フ ラックス時系列.

算:表1参照)を行うことで、フラックス決定に果たす各変数(海面水温・海上気温・海上風速)

間の相対的な寄与を調べた.その結果,位相・振幅の再現性の観点で,海面水温が,潜熱フラック ス変動の主因であることがわかった.

そこで、日本海東部領域での海面水温変 動の要因を調べた. Hirose et al. (2009) で 指摘されたように,暖候期の対馬暖流流量 と有意な関係にあることがわかった.また, 大気海洋間熱交換の影響を評価するために, 同海域での海上風速変動との関係を調べた. その結果,海面水温とは無相関の関係にある ことがわかった.一連の解析より、日本海東 部領域の海面水温は、大気強制によるのでは なく,海洋変動(対馬暖流)の結果であると 指摘した.

上記解析により,日本海東部領域での水蒸 気供給量は、海面水温によることがわかった. そこで,この潜熱放出が日本の降水量変動に 及ぼす影響を調べた.その結果、特に、北日 本の降水量に関係することがわかった(図

表1. 潜熱フラックス算出実験時に使用した変数の組み合わせ

	海面水温	海上気温	海上風速
海面水温実験	日別生データ	日別気候値	日別気候値
海上気温実験	日別気候値	日別生データ	日別気候値
海上風速実験	日別気候値	日別気候値	日別生データ



図 2. AMeDAS 降水量と(a) MOI, (b) 日本海東部領域平均潜熱フラ ックスとの相関係数分布図. 白丸(黒丸)は、10%有意水準を満た す正(負)の係数が得られた観測点を表す.また,灰色丸は,有意 でない観測点である.

2b). また,興味深いことに,この領域の降水量は、冬季季節風に影響されない場所であった(図 2a). すなわち、日本海東部領域の海洋場は、日本の気候形成に重要な役割を果たすことを示して いる.以上、本年度得られた研究成果は、日本海の大気海洋相互作用系の実態解明に資するもので あり、日本の気候系の理解に貢献するものである.

- 4. 研究成果
- Sugimoto, S., and N. Hirose, 2014: Variations in latent heat flux over the eastern Japan Sea in December. SOLA, 10, 1-4.
- 杉本周作、広瀬直毅:12月の日本海東部潜熱フラックス変動に果たす海面水温の役割 ~北日 本降水量変動への影響へ.日本気象学会 2013 年秋季大会, P161, 仙台, 仙台国際センター, 2013 年11月19日. ポスター発表.

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 SOARER を開発した。また、長期間・ 広範囲に亘る海洋生態系モニタリングを実現するための実海域用ソーラー水中グライダー Tonai60 (Twilight Ocean-zonal Natural-resources and Animals Investigator)を研究 開発している。Tonai60 には、サンゴ礁の蛍光撮影や被度のマッピングを行うための高感度

ネットワークカメラと海棲哺乳類の音響 観測を行うための水中音響データロガー, 多項目海洋環境データロガーを搭載して いる。Fig.1 に示す Tonai60 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: $65m \times 5m \times 7m$ )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



Fig.1 実海域用ソーラー水中グライダー Tonai60



**Fig.2** Tonai60 のグライディング試験 (深海機器力学実験水槽にて)

の目的のひとつである。また,将来的には,潜航深度 1,500m の SOARER との協調制御 などによって,群知能水中グライダーシステムを構築して,長期間・広範囲に亘る海洋 環境・生態系モニタリングの実現を目指したいと考えている。

#### □研究の成果

深海機器力学実験水槽において実海域用ソーラー水中グライダーTonai60の潜航試験を 実施した。浮心・重心などを調整した後,Tonai60のグライディング性能を水槽壁面に設置 したビデオカメラで撮影・記録して,画像解析によって重心位置や水中重量を変化させた ときの機体の姿勢角およびグライディング角,グライディング速度を推定することが できた。そして,Tonai60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充放電システムに関する研究開発,第25回ロボティクス・メカトロニクス講演会(ROBOMEC 2012 in TSUKUBA) 論文集, 2A2-O04, pp.1-4, CD-ROM,(2013.05).
- H. Tonai, M. Arima: Design of an Ocean-Going Solar-Powered Underwater Glider, Procs. of the twentythird (2013) International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE-2013), Vol.1, pp.345-349, (2013.06).
- 有馬正和,藤内裕史:サンゴ礁モニタリングのための水中グライダーの研究開発,第 16回日本サンゴ礁学会講演要旨集,P1, p.53, (2013.12).
- M.Arima, K.Yoshida, H.Tonai: Development of a coral monitoring system for the use of underwater vehicle, Procs. of OCEANS' 14 MTS/IEEE Taipei, (2014.04).
- M.Arima, H.Tonai, K.Yoshida: Development of an ocean-going solar-powered underwater glider, Procs. the twentyfourth (2014) International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE-2014), (2014.06).

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
吉田 桂奈	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

# 25 AO-3

#### 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 教授 松野 健 京都大学大学院 理学研究科 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、3月6日から7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、堤より、伊予灘南部から豊予海峡に向かう測線上において、TurboMAP による乱流観測の結果が報告された。水深が深くなる付近に見られるサンドウェーブ上にお いて乱流強度が大きくなることが、非成層期においても見られること、壁法則を用いて海底 の Drug coefficient Cd を求めると、サンドウェーブ上で Cd が大きくなることを示した。 なお、小潮期にエラーバーが大きくなるのは、成層によって境界層の厚さが薄くなるためと 説明した。次に遠藤は、東シナ海陸棚上での乱流微細構造観測時に得られた、5 ビーム ADCP の計測データに分散法を適用して、レイノルズ応力の見積もりを試みた結果について紹介し た。計測データに直接分散法を適用するとノイズが多いものの、単位時間あたりのピン発信 数を増やし、かつ計測データから上方とコヒーレントな流速変動をフィルターで除去すると、 この海域で卓越している半日周潮に伴う、レイノルズ応力の周期的な変動が得られることを 示した。和方は、東シナ海陸棚上の海底混合層内で観測された乱流微細構造のシミュレーシ ョン(LES)結果を紹介した。乱流微細構造プロファイラーで観測した乱流運動エネルギー 散逸率は、混合層下部で1/4日周期、上部で日周期の時間変動が卓越していたが、後者を再 現するためには、背景塩分場の水平勾配、もしくは、非慣用コリオリカによる乱流発達の異 方性を考慮する必要性のあることが示された。松野は、日本海底層水の一様性と長期的水温 上昇の物理過程を理解するために行った、VMP5500を用いた深層乱流の直接計測の結果と1 次元モデルを用いた実験による結果の解釈について紹介した。計測された深層での乱流強度 は小さかったが、地殻熱流量を評価したモデルによって、観測される深層構造と水温上昇が うまく説明できることが紹介された。なお、モデルで仮定されている水温の水平勾配はデー タから持ってくることができるのではないかという質問があったが、平均的な値に対して変 動が大きいので難しいという回答があった。古市は、浅海域の海洋モデルの高精度化に不可 欠な、乱流混合過程のパラメタリゼーションの有効性を調査した。東シナ海や東京湾での乱 流微細構造の現場観測との比較を通じて LES の有効性を確認し、またその LES との比較を通 じて、Furuichi et al. (2012)で提案された乱流混合パラメタリゼーションスキームが海底 境界層でも妥当であることを確認した。一方吉川は、海洋表層混合過程の鍵となる現象の一 つである、ラングミュア循環の現場観測に関する取り組みの報告を行った。八代海で水平流 速の水平構造の観測を行い、水平構造の風向依存性や風や波、熱フラックスとの関係から、 シアー乱流、夜間対流、ラングミュア循環に対応すると考えられる短周期変動が見られたこ とが報告された。

秋友は、海面加熱時の潮流が作る海底乱流に着目し、海底境界層の厚さのパラメター依存 性を数値実験を通じて調べた。潮流速度と潮流振動数に加えて、混合道上部の密度成層強度 に依存するスケーリング則と、海面での浮力加速度フラックスと水深に依存するスケーリン グ則の二つが海底境界層の混合層厚さのスケーリングとして考えられることを見出し、数値 実験でその妥当性を確認した。程は赤道を横断する南北断面での微細構造の観測やソープス ケールを用いた推定により、乱流エネルギー散逸率の空間分布を報告した。赤道からやや離 れた領域で散逸率が大きいことや、散逸率が内部波の砕波により生じたと仮定した場合の散 逸率の緯度依存性に関する議論を行った。勝又は、北太平洋の支午面循環を維持するのに必 要な乱流エネルギーの見積もりを報告した。最新の観測値に基づくと支午面循環を維持する のに必要な乱流エネルギーの注入量は 600GW であること、またそのうち潮汐が 400GW 程度を 担っていることを報告した。また、残りの 200GW については、風成乱流、境界層乱流、対流、 生物乱流などのおよその値を評価し、それらの可能性について議論した。長井は黒潮続流域 での内部波の生成と散逸に関する数値実験結果と観測結果の報告を行い、黒潮の自励的な傾 圧不安定および付随する前線形成過程が内部波を生成すること、数値実験結果は観測された 内部波とその散逸をおおむね説明すること、内部波の散逸には水平流の鉛直シアーとコンフ ルーエントが重要であることなどを示した。また低塩分水の潜り込みに伴いソルトフィンガ 一型の二重拡散対流が発生している可能性があることも報告した。日比谷は起伏のある海底 上を流れる潮流が生成する内部波とその散逸についての報告を行った。内部波の散逸効率や 減衰特性距離は水平波数に依存すること、その依存性は内部波のレジームによって異なるこ とを数値実験により示し、その依存性を内部波の鉛直方向の郡速度を用いて説明した。

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 ------

3月6日

- 13:00 13:45 堤 (愛媛大)・他3名
  - 伊予灘サンドウェーブ上における成層期と非成層期の乱流観測結果の比較について
- 13:45 14:30 遠藤 (九大)・他4名

東シナ海陸棚上の海底混合層内におけるレイノルズ応力の計測

- 14:30 15:15 和方 (九大) 東シナ海の潮汐乱流の数値シミュレーション
- 15:15 15:30 休憩
- 15:30 16:15 松野(九大)・他2名
   日本海海底一様層の維持と水温上昇に関わる地殻熱流量の役割
- 16:15 17:00 古市 (環境研) LES に基づく海底混合層における乱流パラメタリゼーションの性能評価
- 17:00 17:45 吉川 (京大)・他4名海洋表層境界層における水平流動構造観測の試み

3月7日

- 09:30 10:15 秋友 (京大)・衣川 海面加熱時の潮流海底境界層のスケーリングについて
- 10:15 11:00 程 (海洋大) Turbulent dissipation in the equatorial region inferred through the internal wave field
- 11:00 11:45 勝又 (JAMSTEC)・丹羽 太平洋の子午面循環のエネルギー収支
- 11:45 12:00 休憩
- 12:00 12:45 長井(海洋大)・他6名 黒潮流軸直下の乱流混合と近慣性シアの準ラグランジュ流観測
- 12:45 13:00 日比谷 (東大)・高木
   深海底上で潮流により励起された内部波エネルギーの散逸過程に関する数値的研究
   海底境界混合のパラメタリゼーションに向けて-
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、応用力学研究所円盤型水中グライダ ーの回収作業について報告する。

#### 2. 円盤型水中グライダーの海上試験

円盤型水中グライダーの動作テスト・海洋観測が 2013年3月長崎港沖の水深100m海域で実施された。ビークルの浮上位置をFig.1に示す。ビークル の浮上位置を示す白色のバルーンがバーチャルモ アリング目標位置周辺にまとまっている。 実験時 の潮流速度は北西に0.11m/sec、北西の風1.25mで あった。



Fig. 1 ビークル浮上位置

Fig.2はイリジウム通信で送られてきた CTD 観測 結果である。水温分布は長崎丸の XBT による計測 と非常によく一致している。



Fig.3はイリジウム通信で送られてきたADCP観 測結果である。点線が南北方向流速分布、実線が東 西方向流速分布、一点鎖線がパーセントグッドを示 している。流速は北への流れ,東への流れをプラス で表示している。計測は1秒間隔で60ピンの計測 を70秒ごとに繰り返している。Fig.3には水深19m における流向流速をベクトル表示で長崎丸の気象 ログと比較した結果も同時に示されている。わずか 60秒間の平均と、海洋観測においては瞬時値に近 い値の比較であること、ビークルに搭載したADCP はまだ磁方位修正がなされていないことを考える と、流向流速ともによく一致していると言える。



Fig.1 において浮上位置を示すバルーンの数が少ないのはビークルが 3 回目の潜航中に動作を停止してしまったためである。

### 3. 円盤型水中グライダーの捜索・回収

長崎丸、鶴洋丸によって実施されたビークル捜 索・回収作業は次に示すとおりである。

- (2013年3月5日)
- ・緊急浮上装置作動開始(16:55)

・ビークル浮上せず、超音波式位置検によるビーク ル深度 99m (17:45)

・長崎丸位置を移動し、3か所でビークルの位置を 測定 32 度 42.11986 分、129 度 34.83403 分(18:00 ~ 18:37)

・日没により、浮上したとしてもビークルの視認が できないので実験海域離脱

(2013年3月6日)

・長崎丸 錨泊場所から前日のビークル実験海域に 向け航行開始(7:50)

・長崎丸搭載の計量魚群探知機((株)KAIJO
 KFC-3000N型)を使用し、前日計測したビークル
 位置付近を捜索(9:04~9:34)

・ビークル実験海域より約5マイル程度南下しなが ら、ビークルが浮上していないか目視で捜索 (9:35~)

・約 10 マイル程度北上しながら、ビークルが浮上 していないか目視で捜索(10:00 ごろ~)

・ビークル実験海域へ約5マイル程度南下しながら、 ビークルが浮上していないか目視で捜索 (11:00 ごろ~)

・ビークル発見できず長崎丸航行性能試験実施のためビークル実験海域離脱(11:45)

(2013年3月9,12,17日)

・鶴洋丸搭載の精密海底地形探査装置 HS-600F、計 量魚群探知機 FQ-80 により実験海域付近を捜索

・17 日にビークルが発見されたが (32 度 42.3375 分、129 度 35.0109 分)、5 日に超音波式位置検で 計測した位置と異なっている。

(2013年4月8日)

・長崎丸 ビークル回収作業のため出港(14:45)
 ・超音波式位置検によりビークル位置を特定 32 度

42.1215 分、129 度 34.8315 分( 16:23 )

・3 月実験終了時の超音波式位置検によるビークル 着底位置とほぼ同じなので、この位置を目標に回収 作業を行うことに決定

・一回目トロール網による回収作業(網入れ)開始
 (16:35 ~)

・トロール網巻き取り終了、ビークル回収できず

( 17:25 )

- ・二回目トロール網による回収作業(網入れ)開始 (18:05 ~)
- ・トロール網巻き取り終了、ビークル回収できず (19:00 ごろ)

・ビークル着底位置にもどり、再度位置検でビーク ル位置計測 ビークル位置に変化なし(19:10~ 19:15)

(2013年4月9日)

・位置検でビークル位置計測 ビークル位置に変化 なし(6:30)

・三回目トロール網による回収作業(網入れ)開始
 (6:47~)

・トロール網巻き取り終了、ビークル回収成功
 (7:36)





Fig. 4 トロール網によるビークルの回収

## 4.研究組織

·研究代表者

兼原壽生(長崎大学水産学部教授)

・研究協力者

青島隆、森井康宏、山脇信博、清水健一 (長崎大学水産学部 准教授)

内田淳、下田真子(長崎大学水産学部 助教) 中村昌彦(九州大学応用力学研究所 准教授、 所内世話人)

稻田勝、野田 穣士朗 (九州大学応用力学研究所 技術職員)

## シャトル型水中ビークル「ツクヨミ」のピッチ角制御実験

独立行政法人海洋研究開発機構 海洋工学センター

長期観測技術グループ

浅川 賢一

渡 健介

【研究目的】

海洋環境変動予測のためには、鍵となる海域で長期的な連続観測を行うことが必要である。現在、 長期間の定点観測は主にブイシステムによって行なわれている。しかし、その設置と保守には大型 船を必要とするなど、多大な労力と費用が必要となる上、観測点の変更も容易でない。そこで、こ のような課題を克服する手段として、海洋研究開発機構では、長期に渡って一定海域に留まり、海 底から海面までの海洋観測を行う水中グライダーの構想を提案し、プロトタイプの開発を進めてい る。すでに、亡失対策用の細径ロープ付きであるが、水深500m までの潜水実験を実施している。 今回、その縦方向の運動制御システム開発の一環として、九州大学の深海機器力学実験水槽を利用 して、縦方向運動制御実験を行う。

【実験方法】

海洋研究開発機構で開発した長さ約 2.5m、幅約 1.2m 高さ約 0.6m、空中重量約 150kg の水中グ ライダー「ツクヨミ」(図 1)に使用して、下記 2 種類の実験を行った。

- 水中にテグスで吊り下げ、ピッチ角一定制御の実験を行い、安定した制御ができる制御係数範囲を確認した。
- ② テグスをリリースして滑走状態でのピッチ角制御実験を行った。この際、水中重量、ピッチ角の組み合わせをパラメーターとし、約 0.2m/sの低速状態から約 0.5m/sの水槽内で実施可能な高速状態までの制御係数範囲を確認した。(図2)

Pitching (deg)



図1 水中グライダーツクヨミ



【成果報告】

海洋工学シンポジウム 2014

タイトル:長期定域観測用水中グライダーの水槽試験

## 地上ライダーネットワークおよび衛星搭載ライダデータを用いた 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

エアロゾルの気候・環境への影響を評価するためには、エアロゾル光学特性の時間・空間的 に密なデータを取 エアロゾルの気候・環境への影響を評価するためには、エアロゾル光学特 性の時間・空間的に密なデータを取得し、それらを複合的に解析する必要がある。本研究では、 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 することを目標に据えた観測研究を推進する。全球・領域規模でのエアロゾルの気候・環境影 響評価には、エアロゾル輸送モデル等の数値モデルによる評価が不可欠となる。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およびデー タセットの作成も本研究は視野に入れる。

本目標遂行のために、昨昨年、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)で、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ルックアップテーブル法を用いたアルゴリズム(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た。結果は、上記アルゴリズム の有用性を示すと供に、ライダーデータ自体の品質向上の必要性とアルゴリズムで利用されて いるエアロゾル光学モデルの不完全性を示唆した。これを改良すべく昨年度(24A0-9)、ウェ ーブレット解析を用いたノイズ除去手法を開発・改良した。それを地上や衛星ライダーデータ へ適用し、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。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行い、その有効性を確認 した。また、エアロゾル光学モデル改良の方策を検討し、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を統計解析することにした。現在データセットの作成を進めて いる。

以上の経緯を踏まえ、本研究では、数値解法およびエアロゾル光学モデルの高度化によりア ルゴリズムを強化し、より信頼性の高い全球エアロゾルデータの抽出を目指す。改良したアル ゴリズムを用いて衛星および地上ライダーデータの解析を行い、エアロゾル種毎の全球時空間 変動およびデータセットの作成を推進する。

実施方法

最適化手法の検討・開発を進め、アルゴリズムに導入し、より信号ノイズに頑強な解析手法 を実現する。また、地上スカイラジオメーターの解析データのデータセット化を推進し、それ の統計解析を実施し、エアロゾル光学モデルの改良を図る。統計解析の手法としては、クラス ター解析を実施する。

結果

地上でネットワーク展開しているミー・ラマンライダー解析用に最尤法とガウスニュートン

法を組み合わせた最適化手法を用いたアルゴリズムの開発を行った。上記ライダーからは4つ の測定値(波長532nmでの消散係数、後方散乱係数、偏光解消度、および波長1064nmでの後 方散乱係数)が得られ、その測定値に上記アルゴリズムを適用することで、鉱物ダスト、海塩 粒子、ブラックカーボン、ブラックカーボンを除く大気汚染粒子の4種エアロゾルの波長 532nm での消散係数を導出する。黄砂飛来時等のいくつかのイベントデータへの適用を行い、 対流圏下部での黄砂やブラックカーボンの浮遊層や、境界層内での海塩粒子や大気汚染粒子を 捉えた。

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にFuzzy c-means 法を用 いたクラスター解析による統計解析を行った。全球では6個程度のクラスター(グループ)に データが安定して分類されることが判明した。分類されたデータの特徴(光学特性)やその地 域から、6個のクラスターは、海洋性粒子、バイオマス燃焼起源粒子、鉱物ダスト粒子、大気 汚染粒子、そしてそれらの混合(鉱物ダスト+大気汚染、バイオマス燃焼+大気汚染)を表し ていると示唆される。

## 考察

最尤法とガウスニュートン法を用いた最適化法を導入した。誤差解析や観測データへの適用 例が十分ではなく、今後推進する。本手法は汎用性も高く有用な手法といえる。他のアルゴリ ズム(ライダーと受動型センサーの複合等)への応用も検討する。

全球データへのクラスター解析を実施し、6つのタイプへの分類が可能であることが分かった。より詳細にエアロゾルの特徴をみるには、地域毎(例えば、アジア、ヨーロッパ、アフリカ等)にクラスター解析を行うことが有用と考えられる。よって、今後地域毎のクラスター解析を実施していく予定である。

## 研究成果報告

- Nishizawa, T., N. Sugimoto, I. Matsui, A. Shimizu, Introduction of raman scatter measurement function to NIES lidar network observation, International, Symposium on Remote Sensing 2013, Chiba, May, 2013 (Oral)
- 及川栄治、西澤智明、中島映至、クラスタリングを用いた AERONET データのエアロゾルタイプ 分類、気象学会秋季大会、仙台、2013 年 11 月(Oral)

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	伸夫	国立環境研究所	室長	地上ライダ解析	nsugimoto@nies.go.jp
松井	一郎	国立環境研究所	主任研究員	地上ライダ保守	i-matsui@nies.go.jp
岡本	創	九州大学応用力 学研究所	教授	衛星ライダ解析	okamoto@raim.kyushu- u.ac.jp
佐藤	可織	九州大学応用力 学研究所	助教	衛星ライダ解析	sato@riam.kyushu-u.a c.jp

研究組織

25 AO-7

## 【研究の目的】

日本海中部沿岸域では一時的に強い流れが発生することが知られ ている。その流れは急潮と呼ばれ、周期の有無や発生要因によっ て「気象擾乱の通過に伴う突発的な流れ」、「周期変動する強流」、 「気象擾乱と無関係に発生する強い流れ」の3つに分類されるこ とがわかってきた(千手,2009)。これらのうち3つ目は対馬暖流 の接岸に伴うものと推察されているが、その実態や発生要因につ いて不明な点が多く、予測がつきにくい急潮とされている。若狭 湾の東部海域(図1)は、上記の3つ目の特徴をもつ急潮が発生 することが明らかになりつつある。この海域の流動変動の特徴を 理解することを目的として、越前岬から北東20km程度に位置する 鷹巣(たかす)の定置網近傍で流向・流速計を用いた観測を実施 し、既得データも含めて解析を行った。



図1 若狭湾および観測を実施した鷹巣の位置

#### 【観測および解析】

当海域の鷹巣(図1)の定置網近傍で多層流向流速計(Nortek Aquadopp profiler, 600kHz)と水温計 (Hobo Water temp Prov2)を用いて係留観測を実施した。鷹巣での係留観測は福井県立大学、福井 県水産試験場、九州大学が所有する観測機器を利用して実施し、係留系の設置作業は福井県水産試験場 の調査船「若潮丸」用いた。2013年5月上旬から10月末まで30分ごとに測定した流向・流速データと 10分ごとに測定した水温データを解析した。また、沖合の情報として九州大学応用力学研究所がwebサ イトで公開している日本海高解像度沿岸モデルの計算結果(DREAMS_C)を利用した。

#### 【結果および考察】

2013年5月から7月にかけて鷹巣では20-30cm程度の北東向きの流れが卓越し、2℃程度の水温成層が 発達していた(図省略)。7月になると上り潮(のぼりしお)と呼ばれる西向きの流れの流れが頻繁に発 生していたが、8月に上旬になると上り潮は見られなくなり、特に8月上旬には30cm/secを超える東向 きの強い流れが発生した(図2a)。東向きの流れは全層で発生し、30cm/secを超える流れは海面から 20mの層厚で生じていた。同時期に26-27℃の高温水が見られるようになり、東向きの流れが発生した 時期にその厚さは増加した(図2b)。8月下旬頃から9月中旬頃にかけて流れはやや弱くなったものの 東向きの流れは継続し、表層では28-30℃程度、下層26℃程度の水温構造を維持していた。また、8月 上旬にみられた強流時の原因を把握するため、高解像度沿岸モデルを解析した。結果の一例として、図 3には8月10日の高解像度沿岸モデルの計算結果を示した。若狭湾口から越前海岸にかけて岸に沿う ように対馬暖流分枝流が存在し鷹巣付近の流れも強化していたことから、対馬暖流が越前海岸付近で接 岸流路をとることにより、この急流が生じたと推察された。

この海域では流れが急変する観測事例が少ないことから、さらにデータを蓄積することが望まれる。 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2:鷹巣での流速(東向きが正)(a)および水温の時系列(b) (2013年7月1日から9月30日まで)



図3: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、2013 年 8 月 10 日、九州大学応用力学研究所「日本海海況予 測システム」より

http://dreams-i.riam.kyushu-u.ac.jp/vwp

## 【研究成果報告】

越前岬周辺の短期流動変動特性、兼田淳史、都築純、 鮎川航太、千手智晴、渡邊達郎、日本海洋学会秋季大 会、(2013年9月)

## 【研究組織】

#### 研究代表者

福井県立大学海洋生物資源学部 兼田淳史 研究協力者

福井県水試 漁場環境研究グループ 鮎川航太 所内世話人

九州大学応用力学研究所 千手智晴

#### 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

混合域と成層域が共存する瀬戸内海では、鉛直拡散と水平移流による物質輸送のプロセスが海域の栄養塩 動態や生物生産にとって重要である。しかしこれらの二つのプロセスそれぞれについての定量的な評価は未だ なされていない。その原因の一つとして鉛直拡散の定量的な見積もりがなされていないことが挙げられる。本研 究では瀬戸内海西部に位置する伊予灘において実測による鉛直拡散係数の見積もりを行うことを目的とする。 また、伊予灘の海底には水平波長が500メートル前後、波高が約10メートルの顕著なサンドウェーブが存在す る海域があり、その上を流れる潮流との相互作用によって非常に強い乱流混合が存在することが示されている が、その詳細な力学過程については明らかでない。これらの点について、乱流観測専用の機器が整備され近 年精力的に海洋乱流の研究が行われている応用力学研究所との共同研究によって、上記の瀬戸内海の混合 域と成層域における鉛直拡散係数の把握および鉛直拡散に対する潮汐や海底地形や影響を明らかにする。

#### 研究方法の詳細

2013 年の4月18日(小潮)と4月23日(大潮)に伊予灘を横断する9点(S1~S9)において(図1)、九州大 学応用力学研究所所有の浅海用乱流計 TurboMAP-5 を使用し、愛媛大学沿岸環境科学研究センター調査 研究線「いさな」にて乱流観測を行った。乱流の計測と同時に TurboMAP 搭載の CTD センサーによって水温、 塩分を、いさな搭載の WorkHorse ADCP (BB300kHz) によって水平流速の鉛直分布を得た。鉛直混合強度の 指標である鉛直拡散係数 *Kz* は、TurboMAP で測定された乱流運動エネルギー散逸率  $\varepsilon$  と浮力振動数  $N^2$ から Osborn(1980) の式 *Kz*=0.2 $\varepsilon N^2$  を使って見積もった。

## <u>結果</u>

2回の観測ともに水柱は概ね混合していたが、大潮の方が期待されたように密度成層は弱かった(図 2)。一 般流の水平流速は小潮期で 0.1~0.2 ms⁻¹、大潮時で 0.4~0.6 ms⁻¹ と大潮時の概ね 3 倍程度大きかった。それ に対応するように鉛直拡散係数も小潮期よりも大潮期の方が概して約 1 オーダー大きかった。Kz が最も大きく 鉛直混合が強いと考えられるのは測点 S5 から S7 周辺の海域であり、サンドウェーブが発達する地点であった。 サンドウェーブの鉛直混合への寄与は、その形状抵抗による乱流シア応力によって説明されると考えられる。本 研究によって伊予灘における鉛直混合に対する海底地形の効果や潮汐による変化が示された。

#### 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)、堤 英輔(愛媛大学沿岸環境科学研究センター、研究協力者)



図1:瀬戸内海伊予灘における観測点(S1-S9)。



図2: 観測から得られた,各潮時(左列:小潮、右列:大潮)における流速ベクトルVの絶対値、水温T、塩分S、鉛 直拡散係数Kz(上段-下段)の空間分布。縦軸は深度[m]、横軸は水平距離[km]、黒い影は海底地形を示す。

## 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

昨年(2013年)から急に「PM2.5」という言葉が騒がれるようになっているが、日本国内から排出される大気汚染物質や中国大陸から越境する大気汚染物質、黄砂粒子、森林火災などは、今にはじまったことではない。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、私たちの生活に対する懸念材料が多い。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っている。

「PM2.5」を含んだ人為起源と自然起源エアロゾルの光学的特性の長期モニタリングとして、 観測及び解析を行っている。本研究は、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、地球観測衛星の検証のためにも、定量的な地上観測データの蓄積が重要とな っている。エアロゾル気候影響を評価する場合、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ことが有効とされている。特に、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測定 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がることを目的としてい る。

#### 2. 観測·解析概要

波長別の太陽直達光と周辺光の角度分布の放射輝度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/)を利用して、九大応力研の屋上を はじめ、様々な場所において、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、2013年1月から2013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た。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 et al. 2013, Aoki and Fujiyoshi, 2003) にあるが、春に最大、次に8月に高くなる 傾向が見られた。また、オングストローム指数を見てみると、春に光学的厚さが最大となる 理由として、オングストローム指数が低いため、黄砂粒子を中心とした大粒子の影響が示さ れ、8月の光学的厚さが高くなる理由として、オングストローム指数が高いため、微小粒子、 すなわち、人為起源のエアロゾルの影響が観測されていることがわかった。PM2.5が騒がれは じめた1月は、オングストローム指数が比較的高く、人為起源エアロゾルなど越境する大気汚 染物質の影響がプラスされたのではないかと思われる。今後も継続した観測を行うことによ り、SPRINTARSや衛星観測等と比較しながら、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ていきたいと考える。



Fig. 1 2013年1月から2013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

#### 4. 研究成果

- Osada, K., Ura, S., Kagawa, M., Mikami, M., Tanaka, T. Y., Matoba, S., Aoki, K., Shinoda, M., Kurosaki, Y., Hayashi, M., Shimizu, A., and Uematsu, M.: Wet and dry deposition of mineral dust particles in Japan: factors related to temporal variation and spatial distribution, Atmos. Chem. Phys. Discuss., 13, 21801-21835, doi:10.5194/acpd-13-21801-2013, 2013.
- Aoki. K., T. Takemura, K. Kawamoto, and T. Hayasaka (2013), Aerosol climatology over Japan site measured by ground-based sky radiometer, AIP Conf. Proc. 1531, 284 (2013); doi: 10.1063/1.4804762.

#### 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)

#### 海洋大循環の力学 ---エクマン層から中深層循環まで

北海道大学大学院 地球環境科学研究院 水田元太

#### 1. 目的

海洋の大循環のしくみを理解することは、気候変動や海況の予測をする上での重要な基礎となる。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、海洋大循環のしくみに対する大局的な展望を得ることを目的とする。

## 2. 手法

2013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) 親潮海域の平均場の力学:順圧成分・傾圧成分による理解:西垣肇(大分大教育福祉科学)

(2)「南極中層水」を中心とした南極海の鉛直循環系に関して: 蓮沼啓一(海洋総合研)

(3) 海洋再解析アンサンブルによる北太平洋混合層の経年 -- 十年規模変動の研究:豊田隆寛(気象研)

(4) Influence of the Coriolis Force on the Formation of a Seasonal Thermocline: Noh Yign (Yonsei University)

(5) 日本海沿岸で発生する急潮のシミュレーション: 広瀬直毅(九大応力研)

(6) 深層測流結果にみられる赤道ロスビー波のシグナル:石崎廣(気象研)

(7) 海洋深層における中規模スケールの変動: 宮本雅俊(東大大気海洋研)

(8) 日本海溝斜面およびその東方の大洋底における深層流の変動特性: 柳本大吾(東大大気海洋研)

(9) バルーン搭載の可視・赤外カメラが捉えた沿岸表層の微細な物理構造について: 宮尾泰幸、岩中祐 --(愛媛大 CMES)

(10) 振動強制による南北渦位輸送の分布:水田元太(北大地球環境)

(11) 1.5 層 QG model による Okuno and Masuda (2003) の追試と、パラメーターを変えた追加実験 2
- アンサンブル実験: 中野英之(気象研)

(12) 回廊における傾圧不安定と南北熱輸送:平原幹俊(気象研)

(13)不規則な渦から組織だった秩序ある平均流が発生してくる仕組み…問題と考察: 増田章(九大応力研)

#### 3. 結果と議論

(1) 再解析データに鉛直モード展開を適用し、親潮域の循環のしくみを考察した。千島海溝沖には海膨 が存在するため、傾圧、順圧モードともそれよりも西側では東側とは力学的に独立な循環が生じる。順 圧モードでは千島海溝に捕捉された浅い方を右手に見る流れが卓越し、傾圧モードでは海膨上を低気圧 方向に回る循環が卓越する。親潮など亜寒帯域の主な循環はこれらの重ね合わせで表現される。

(2) 太平洋の底層から中層までの水塊の鉛直構造を歴史的観測資料に基づき議論した。底層には南極大陸起源の水塊、深層には北大西洋起源の水塊がそれぞれ存在する一方で、中層には塩分極小層が存在する。津軽暖流域との比較から、塩分極小層は亜寒帯、亜熱帯起源の水の境界と解釈される。

(3) 様々な同化手法を用いた再解析データを統合することで、長期間にわたる混合層深度データセット を構築した。異なるモデルを組み合わせることでバイアスが相殺され、Pacific Decadal Oscillation に伴う中央モード水や東部亜熱帯モード水形成域での混合層深の十年規模変動などが明瞭に見られた。

(4) 理想化された条件での数値実験と観測データの解析によって海洋が過熱される夏季の混合層形成機構を調べた。中高緯度域では、コリオリカが働くことによってある特定の深さのみで成層が発達し、明瞭な混合層と季節躍層が形成される。混合層の深さはエクマン層の厚さの1/2乗に比例する傾向がある。

(5) 若狭湾に発生する急潮を分解能 1.5 km の数値モデルによって再現した。急潮現象は対馬暖流の接岸 や台風による擾乱によって生じた渦が湾内部を陸棚波的に伝播することに対応する。この渦は、丹後半 島の陸岸地形によって物体後流の剥離渦に対応する渦が発生したものであることが強く示唆される。

(6) 赤道太平洋深層で係留系によって南北に4セルの構造を持つ年周期の擾乱の伝播が観測された。数値シミュレーションとの比較から、4セル構造は第1から第5モードの赤道ロスビー波の重ね合わせさったものであることが示された。モードの位相関係によってセルの南北幅は変動し得る。

(7) 北太平洋深層における深層流の擾乱に関するレビューを行った。黒潮から十分離れた海底の比較的 平坦な海域では順圧ロスビー波によく対応する擾乱が観測されている。今後、数値シミュレーション結 果の解析と新たな係留観測を組み合わせ、擾乱の詳しい性質やメカニズムを考察する予定である。

(8) 北太平洋での5年間にわたる深層係留観測によって、数10から100日程度の周期を持った擾乱が観 測された。擾乱は海底に捕捉されており、流れの主軸は海底地形に沿う傾向がある。海底捕捉波のカッ トオフ周期より短い周期ではその様な傾向は見られない。

(9) 気球からの空撮によるブイ追跡と漂流物の集積の観測が、沿岸河口域の微細な流れの構造の把握に 有効であることが示された。河口フロントによる収束帯は数値シミュレーションでも見られ、今後、観 測と詳しい比較を行うことで、フロントのスケール等を決めるメカニズムが明らかになると期待される。

(10) 与えられた外部強制によって生じるロスビー波の渦位輸送分布を解析的に求めた。渦位輸送の分布の南北スケールは強制に共鳴する波の波長から決まり、強制のスケールには依存しないことが示された。

(11) 水平発散を含む地衡流乱流のスペクトルの時間発展を、アンサンブル実験を行うことによって高精度で数値的に求めた。外力がなく乱流が自由減衰する場合、長時間経つと東西波数が1、移流の時間スケールとロスビー波の時間スケールの比が約1/3の所にエネルギーの極大が見られることが示された。

(12) 東西に周期的な水路モデル中に与えられた傾圧流の時間発展を数値的に調べた。傾圧流から生じる 不安定擾乱からは順圧的な東西流が形成される。惑星ベータ効果は擾乱の水平スケールとエネルギーを 小さく抑える働きがある。このとき擾乱によって生じる東西流の南北スケールも小さくなる。

(13) 線型ロスビー波の三波相互作用に基づいた地衡流乱流の理論模型を提唱した。それによって初期に 高波数の擾乱を与えた場合の、発達初期段階におけるエネルギースペクトルのピーク位置が解析的に計 算され、数値実験でも確認された。不規則な流れによって海底地形に沿った流れが生じるしくみとの関 連性についても議論を行った。

# 25 AO-11

## 水中洞窟系のロボット探査とソナーによる形態計測システムに関する研究

佐世保工業高等専門学校一般科目 眞部 広紀

#### 1. 目的

浅海域表層や海底の構造物・生態系・遺跡など、多様 な対象の計測・調査に少人数で対応できる小型水中ロボ ットの需要が高まっている。本研究グループは、国内研究 機関では唯一、水中洞窟系探査に対応できるロボットシス テムの研究開発を行ってきた。水中洞窟系は複雑な形状 の未知環境であるため、自己位置推定可能でケーブル の拘束がない自律型ロボット(AUV)が適している。平成 25年度は、PID制御による自律航行システムと、水中洞窟 内における自己位置推定用の3D環境地図作成を研究目 的とした。

#### 2. 水中ロボットシステム

テストベッド用の水中ロボット(ROV)は、全長670mm、 高さ300mm、幅440mm、重量18kgと小型軽量コンパクトで 少人数の運用に適している(図1)。多様なミッション に対応可能なPSoC3をシステムの基盤とし、自律化に向け た操縦支援・姿勢方位計測・4方向ソナー測距等の各シス テムを搭載している(図2)。また、PCのロボットコン トローラー画面で自律航行の操縦モードやPIDの制御定 数を変更できる。

本年度は、水中洞窟の3D環境地図作成を、①②の2つの プロセスに分けて実現した(図3):

④ 4方向ソナー・深度センサー・電子コンパスにより上下左右方向の距離・水深・方位・姿勢を計測
 ②計測データとケーブル長をもとに上下左右の4線を配置・補間してサーフェスモデルを作成



図1 ロボット外観



図2システム構成



図3 4方向ソナー計測と3D概形モデル化

#### 3.実験結果及び考察

自律航行システムの実験は応用力学研究所の深海機 器力学実験水槽で実施した。PID 制御定数や実験水槽の 人工波浪条件を切り替えながら、水中ロボットの方位 直進・方位保持・深度保持の各モードで自律航行を行 った。深度保持については良好な結果であるが、方位 保持の後半は鋭さが低下した(図4,5)。これはケ ーブルの張力によりロボットの姿勢変更に抵抗が生じ たことに起因している。





図5 深度グラフ



図6 実験現場の岩戸洞洞外湧泉(外観と水中)



洞窟概形計測システムの実験は熊本県球磨村の岩戸 洞洞外湧泉で行った。実験現場は湧泉奥の緩い U 字管型 水中洞窟で、計測対象を水面直下から最深部手前までの通 路状区間に設定した(図6)。①の形状計測は(1)-(3)を反 復した:

(1) ケーブル長 1m 間隔で記録して一時停止

計測作業全体の時間が大幅に増えていた。

(2) 水中ロボットの姿勢を水平に保時、深度を保持
 (3) 上下左右方向の4距離・水深・方位・姿勢を計測
 3Dモデル化の計算設定を簡易化するために(2)を手順に
 含めたが、現場の水中洞窟では水流による攪乱で水中ロボットの姿勢・深度が安定保持するまでに時間がかかり、

②の3D概形モデルは計測データを後処理することで作成 した。対象とした通路状区間の形状トレンドを概ね表現する ことができた。

#### 4.結論

本年度は、水中ロボットのPID制御により、設定した方 位・深度を時不変定数として保持した自律航行が可能な ことを実証した。また、水中洞窟3D環境地図作成を、ソナ ー・センサー類による洞窟の形状データ計測と3D概形モ デル作成の2プロセスに分けて実現し、水中洞窟探査への 有用性を確認した。

今後の課題としては、安定保持に時間のかかる計測手 順(2)の省略、方位・深度の与えられた時系列データに追 従する自律航行、3D概形モデルの精密化、チェンバー・ ホール・屈曲部・分岐の表現、①②を統合した反復プロ セスによる3D概形モデルのリアルタイム生成が挙げられ る。

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。 水槽実験では稲田勝技術職員と野田穣士朗技術職員には 大変お世話になりました。深く感謝申し上げます。

図7 岩戸洞水中洞窟3D概形モデル(正面と側面)

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

九州大学応用力学研究所 原 由香里

● 目的

春季東アジアは、中国内陸部を起源とする黄砂にしばし覆われ、その主要な構成物質である土壌性粒 子による大気環境・健康・気候など多岐にわたる影響が示唆されている。こういった黄砂の影響を調べ るためには、発生・輸送・沈着といった一連の過程を理解することが必要であり、観測や数値モデルを 用いた研究が行われてきた。われわれの研究グループでは、データ同化技術を応用し、観測データと数 値モデルをより密接に結びつけることにより、黄砂の発生量の逆推定を行うとともにモデルの予報精度 の向上などの取り組みを行ってきた(例えば、Yumimoto et al., 2012; Yumimoto and Takemura, 2013)。本研究では、同化モデルで予報された沈着量を地上沈着量データ(DRy And wEt deposition MOnitoring Network; DRAEMON; Osada et al., 2014)と比較、同化モデルによる黄砂沈着量の再現 性について検証・考察を行った。

● 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。環境研のライダーでは、射出した 532nm の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 2010 年 3 月に発生した大 規模な黄砂イベントを対象とした。DRAEMON は黄砂の乾性・湿性沈着量を計測するプロジェクトで 2009-2010 年にかけて全国 6 地点で観測が行われた。

● 結果と考察

図1(上段)に福江、松江、富山に設置されたライダーで観測されたダスト消散係数の時間—高度断面 を示す。2010年3月は13-17日(以後、E1と呼ぶ)に比較的中規模な、18-22日に大規模な黄砂(E2と 呼ぶ)が日本に到来した。地上ライダーはこの二つの黄砂イベントを明確に捉えている。E2は黄砂濃度 も非常に濃く、消散係数で1.0 km⁻¹を、エアロゾル光学的厚さで1.0を超えている。黄砂層の厚さは 2-3km であり、濃い黄砂が地上付近を輸送されている。

図1の中段にライダーとモデルの光学的厚さの比較を示す。モデル(同化前)は黄砂の到来時期を正確 に捉えているものの、特に E2 でその量を大幅に過小評価(観測に比べ、30-40%程度)している。一方で、 観測データを同化し、発生量を最適化したモデル計算は定量的にもライダー観測と非常によく一致して いる。松江や富山では E2 の期間に観測された小規模な黄砂イベントも同化によって定量的に再現する



**Figure 1.** Time-height cross section of dust extinction coefficient [1/km] measured by NIES Lidar (upper panels), time series of dust aerosol optical thickness (AOT) from NIES Lidar (closed circles) and model results (blue line: without assimilation, red lines: assimilated results) (middle panels), and dust deposition fluxes [mg/m²] (lower panels) at Fukue, Matsue, and Toyama.

ことに成功している。

図1の下段には、日積算黄砂沈着量(mg/m²/day)の比較を示す(福江は近隣の福岡での値)。赤線は乾 性沈着の量を表している。モデルは観測された乾性沈着を概ね再現し、データ同化によって定量的にも 再現性が向上した。しかし、地点によってはデータ同化後でも若干の過大・過小評価が見られる。特に 福江では、モデルは光学的厚さに対して過大、沈着量は過小という結果になった(ただし、光学的厚さ を計測した福江と沈着量を計量した福岡では180km ほどの距離がある)。乾性沈着は地表面付近の黄砂 濃度、地上付近の気象(乱流など)が大きく影響する。黄砂濃度に加え、比較的小さなスケールの現象 の再現性、乾性沈着過程のより正確なモデル化(パラメタリゼーション)が、乾性沈着量の評価の改善に 必要であると考える。

一方、湿性沈着はデータ同化後であっても、どの地点でも大幅な過小評価であった。図示しないが、 黄砂輸送モデルを駆動する気象モデルによって計算された降水をみてみると、観測に比べて過小評価で あり、気象モデルの降水の再現性の改善が急務であることがわかった。

● まとめ

本研究では、大気エアロゾル同化システムでリモートセンシングデータを同化し、モデルで予報された 黄砂沈着量と地上沈着量測定ネットワークによる観測値の比較を行った。観測データの同化により、モ デルの光学的厚さ・乾性沈着量の改善が見られたが、湿性沈着量に関しては大幅に過小評価だった。黄 砂の予報精度に加え、気象モデルによる降水分布・強度・タイミングの再現性が湿性沈着量の再現に重 要である。今後もさまざまな観測データとデータ同化結果を比較し、モデル・同化システム両者の評価・ 改良を進めていく予定である。

参考文献

Yumimoto, K. and Takemura T.: The SPRINTARS/4D-Var Data Assimilation System: Development and Inversion Experiments Based on the Observing System Simulation Experiment Framework, Geosci. Model Dev., 6, 2005-2022, doi:10.5194/gmd-6-2005-2013.

Osada, K. et al.: Wet and dry deposition of mineral dust particles in Japan: factors related to temporal variation and spatial distribution, Atmos. Chem. Phys., 14, 1107-1121, doi:10.5194/acp-14-1107-2014, 2014.

Yumimoto, K., Uno, I., Sugimoto, N., Shimizu, A., Liu, Z., and Winker D.M.: Adjoint inversion modeling of Asian dust emission using lidar observations, Atmos. Chem. Phys., 8, 2869-2884, 2008.

#### 曳縄船搭載 ADCP による日向灘の表層流況観測

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・流速で判断しており、広域・高頻度の流況情報の提供を希望している。しかしながら、これまでの流況観測と情報提供は、表層型浮魚礁の定点観測か、月1回程度の船舶観測など、時空間的に粗な調査によるものであった。これらの課題を解決すべく、宮崎県水産試験場(以下、宮崎水試)では、2010年8月よりまき網船による日向灘の流況モニタリングを開始した(渡慶次・福田、2012)。しかし、まき網船の操業海域の特徴により、漁場となっている南北方向に連なるフロント構造を捉えるための東西方向の流況データが不足していた(渡慶次ら、2013)。そこで、宮崎水試では、2013年12月に沖合域に設置されている表層型浮魚礁を1日でピストン操業する曳縄船に潮流計を設置して、流況モニタリングの体制を強化した。本報では曳縄船による流況観測結果を紹介する。

## 2. 使用したデータ

流向・流速記録は日南市漁協所属の曳縄漁 船の船底設置型 ADCP(フルノ製潮流計 CI-88)の海流演算モードで計測した 2013 年^{32°} 12月16日と24日の3層(海面下2m, 35m, 75m)の計測値である。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^{31°} ェックを施した1分間の時間平均値を用い た。

流況観測と同日に,海面下 1m の水温連続 観測(村山電機製作所製 DS-2NR)と航路上 の5地点(図1 ●)で CTD (JFE アドバン³³ テック製 Rinko-Profiler ASTD152)による 水温鉛直観測を実施した。

流況観測を実施した海域の海面水温は, 2013年12月15日から23日にかけて,都 井岬沖の黒潮離岸に伴って,高温から低温へ と変化していた(図2)。

## 3. 結果

図 3 a で示す 2013 年 12 月 16 日の水深 2m 及び 35m 層の流速ベクトルは、全域で 北上流となっており、Sta.1~2 の沿岸側で



図 1. 曳縄船の航跡(細実線)と水温の鉛直観測地点 (●)。★Umi5 は表層型浮魚

礁うみさち5号の設置位置を、▲は15昼夜の流況調査地点をそれぞれ示す。



3 2. 2013/12/15 (a) と 2013/12/23(b)に Terra/AQUA 衛星の MODIS センサーにより 観測された海面水温。太実線は MIRC の黒潮流軸位置を,空白域は雲によるデータ 欠測海域を示し,細実線と●は図1と同じ。

流速 1kt 以上と速く、沖合側で遅くな っている。70m 層の流速ベクトルは, 2m と 35m 層に比べて流速が遅く, Sta.1とSta.3付近で2つのピークが見 られる。この時の水温の鉛直断面分布 は、等温線が下に凸となっており、暖 水渦の存在が伺える。特に Sta.1~3 に おける水温の水平勾配は大きく,海面 から計測水深まで及んでいた。Sta.1 と ほぼ同水深に位置する図1の▲におい て潮流振幅が最も大きかった M2 分潮 の長軸振幅は 0.2kt 程度である (宮崎県 農政水産部漁村振興課, 2013)。したが って, 曳縄船が観測した北上流は, 潮 流成分より大きく, 地衡流であったと 考えられる。

一方,図3bで示す2013年12月24
日の3層の流速ベクトルは,前回の観
測から8日しか経過していないにもか



図 3. 2013 年 12 月 16 日 (a) と 2013 年 12 月 24 日 (b) に曳縄船により観測された 3 層の流速ベクトル,水温の鉛直断面分布図。

かわらず,全域で1kt程度の南下流となっている。この時の水温の鉛直断面分布は等温線が上に凸となっており,黒潮離岸に伴う黒潮内側域の冷水渦(黒潮小蛇行)の一部を捉えていたと考えられる(図2b)。

以上の結果から,両観測日に観測された日向灘南部の表層流動場は,主に地衡流で,黒潮離接岸に伴 う黒潮内側域の水温構造を反映して変動していたことが明らかになった。今後も流況モニタリングを続 けていき,日向灘における流況変動の特性を明らかにするとともに,得られた流況情報を宮崎水試が提 供する海況図に反映させていきたい。

#### 4. 成果報告

渡慶次力・林田秀一・福田博文・清水学・市川忠史・柳哲雄(2013):漁船情報を利用した日向灘海 況日報の作成と情報提供の試み,水産海洋研究,77(4),299-306.

渡慶次力・福田博文・林田秀一・柳哲雄(2013):まき網漁船によりリアルタイム計測された流向・ 流速データの特徴と有効性、水産工学,50(1),51-58.

中西健二・渡慶次力(2013): 宮崎県における浮魚礁の現状,水産工学,49(3),211-213.

#### 5. 研究組織

研究代表者	宮崎県水産試験場	3.	主任技師	渡慶次	: 力
所内世話人	九州大学応用力学	<b>²研究所</b>	教授	広瀬 正	直毅
研究協力者	九州大学応用力学	2研究所	准教授	千手 肴	智晴
研究協力者	中央水産研究所	海洋・生態系研究センター	生態系モデルグループ長	清水	学
研究協力者	中央水産研究所	海洋・生態系研究センター	モニタリンググループ長	市川 系	忠史

## 強非線形・強分散表面波・内部波方程式系による水の波の2次元伝播解析

研究代表者 鹿児島大学大学院理工学研究科 柿沼太郎

#### 研究の目的

辻・及川らは、2層流体における有限小振幅モデルを用いて孤立波の2次元相互作用の数値 解析的研究を行ない、初期の孤立波の振幅の4倍を超えるような新しい波の生成が起こり得る ことを示した.しかしながら、非線形性・分散性が共に強い表面波及び内部波の相互作用の場 合に対してそのような結果が得られるかどうか不明である.そこで、柿沼が開発した、変分法 に基づく手法を適用し、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挙 動を数値解析的に研究する.柿沼・中山グループと辻・及川グループで協力して、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.

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、水の波が、曲率 を有するような壁面において反射するような場合や、緩やかな勾配上を進行する場合も含めて、 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,速度ポテンシャルの展開項の鉛直分布関数を適切に選択する必要がある が,初期条件・境界条件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) 水の波が,曲率を有するような壁面において反射するような場合の stem の形成過程を調べる.

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.

・上記の研究の目的の(1)に関して,強非線形・強分散表面波・内部波方程式系の定常進行孤立波の数値解を得る手法を開発することに成功した.本手法は, Boussinesq 型方程式系とい

った,他の表面波や内部波のための波動方程式系の定常孤立波解を得るためにも適用可能な, 汎用的な手法である.これにより,安定して進行する孤立波形の入射波を与えることが可能 となった.そして,内部孤立波解に関して,既存の3次元数値解析結果との比較により,本 研究で用いている基礎方程式系の解が,精度の高いものであることが確認された.

- ・研究の目的の(2) に関して,平面2次元場を対象とし,表面孤立波を初期条件として与え, これが鉛直壁に入射し,その壁面で反射する場合の波の干渉問題の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が発生した.そして,このstem の増幅率が,従来求められている増幅率と調和的であった.
- ・研究の目的の(3)に関して、平面2次元場を対象とし、内部孤立波を初期条件として与え、これが鉛直壁に入射し、その壁面で反射する場合の波の干渉問題の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が発生した。しかしながら、弱非線形理論による解との比較ができたものの、高精度な他の解が実験や数値計算で得られていないため、本研究で得られた解の精度を検証するには、至らなかった。
- ・表面孤立波が、緩やかな勾配の斜面上を進行する際の波の増幅に関して、1次元伝播の数値 解析を実施した.この実現象としては、緩やかな勾配の海浜に、津波が来襲する場合を挙げ ることができる.その結果、入射した表面孤立波は、浅水変形により、先鋭で、大きく増幅 した波に変形した.ただし、この増幅率は、従来知られている値よりも大きいため、今後、 増幅のメカニズムを考察し、分散が正確に再現されているかといった計算精度を検討する必 要がある.
- ・研究の目的の(4)に関して、水の波が、曲率を有する壁面において反射する場合の壁境界の 条件を考察し、数値モデルに組み込むことができた.任意形状の壁面に対する、本手法の精 度検証ができなかったが、平面の壁面に対しては、精度の向上が確認された.

#### 研究成果報告

- 佐藤之信・吉江裕人・中山恵介・柿沼太郎・駒井克昭:河川津波の進行・発達と河道内における変形に関する解析,土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 69, No. 2, pp. 161-165, 2013.
- 山下 啓・柿沼太郎: 非線形波動方程式系に基づく表面孤立波及び内部孤立波の数値解, 土木学 会論文集 B2(海岸工学), Vol. 69, No. 2, pp. 6-10, 2013.
- 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., waves. 19, 6 pages, 2013.
- Yamashita, K., Kakinuma, T., and Nakayama, K.: Shoaling of nonlinear internal waves on a uniformly sloping beach, Proc. 33rd Int. Conf. on Coastal Eng., waves. 72, 13 pages, 2013.

#### 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)

## 化学物理海洋観測から見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

目的

これまで東シナ海北東海域における水塊構造の解明を目的とする調査観測が何度も行わ れてきており、季節変化や鉛直輸送過程の定量等新たな研究課題が見出されている。これ らの課題の解明には、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。本研究は、化学及び物理観測によって東シナ海における詳細な水塊解析 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。

#### 観測調査

平成25年度は夏季に,長崎大学 付属練習船「長崎丸」を用いて観測 航海を実施し,下記の内容を行った。 a).東シナ海陸棚域において各層海 水試料の採取を広域で実施し,栄養 塩等のルーチン分析・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,さらに漂流ブイ観測および 微細構造プロファイラーによる水塊 混合強度とその変動解析を行った。



図 1. 試料採取地点(長崎丸 NN376 次航海)

b).表層堆積物・間隙水試料と同時に懸濁粒子の採取を試み,海水中栄養塩分布との関連を 明らかにした。また,中国海洋大学研究船「東方紅」2号を利用し,中国側との同時期連 携観測に成功した。クロスステーションを設け,各々の観測船で物理・化学・生物の観測 データを収集し,それらの比較・同化を試みた。

#### 結果・考察と今後の展望

試料採取地点を図1(○:採水, +: 乱流観測, ・: PRR, ☆: 採泥, 灰 色部: 韓国 EEZ)に, また, 観測海 域西端(図1の黒帯部分)の溶存酸 素濃度の断面を図2に示している。

図2の北緯32.2度付近水深40m から底層にかけて溶存酸素濃度が 20%低い水塊が観測された。この水



塊の塩分は31 PSU前後であり、長江希釈水であると考えられる。この低い酸素濃度は上層 に存在するクロロフィルによって生産された有機物が、沈降・分解される過程で酸素が消 費されて形成されたと考えられる。今後、異なる栄養塩類の供給源および輸送状況に合わ せ、低酸素水の時空間的分布と動態をモニタリングする予定である。

上述のように、本航海では韓国の排他的経済水域内において中国海洋大学の研究観測船 「東方紅」2号との連携観測を実施した。この観測では、漂流ブイの追跡観測を24時間連 携して行い、同じ水塊に対する2隻でのCTD観測及び採水に成功している。連携観測の結 果として、双方のセンサー値の比較および校正を行うことができ、今後は中国側のデータ と併せて広域・総括的な調査観測が期待できる。

さらに,2003 年・2004 年の陸棚縁 辺の観測結果と2009~2011 年の東シ ナ海外部陸棚域北部の観測結果を使 用し,クロロフィル極大層の分布につ いて検証・解析を行った。その結果, 各航海においてクロロフィル極大層 は水深10mから40mに分布し,クロロ フィル極大層の分布はリン酸,硝酸や 亜硝酸等の栄養塩の躍層に対応して いることから,東シナ海における夏季

32°N 31°N 30°N 

の植物プランクトンの分布は栄養塩 に支配されていることが確認された。

図 3. クロロフィル積算値(mg/m2)の水平分布

観測毎に単位面積あたりのクロロフィル鉛直積算値を算出・比較したところ,①対象海域 全域においてクロロフィル総量の変動は約1割程度となった。また,2003年・2004年の陸 棚縁辺部を含む観測では,②陸棚斜面域に対して陸棚上の積算値が2割程度大きい,③黒 潮域においても陸棚上の8割程度のクロロフィル量が存在していることが分かった。以上 のことから,夏季の本海域におけるクロロフィル極大層の形成に寄与する栄養塩供給が安 定していることが示唆された。今後は,水塊解析を進め,区分ごとにおける栄養塩供給状 況や動態の把握,鉛直フラックスの精査などを進める。

## 研究実績

K. Jiang, J. Zhang, Nutrient flux at the sediment - water interface in the northern East China Sea and its impact on the marine environment. The ¹⁷th PAMS Meeting, 23-25 Apr. 2013, Hangzhou, China

Y. Fujishiro, J. Zhang, T. Matsuno, J. Ishizaka, Primary productivity and distribution of nutrients concentration in last 10 years in the northern East China Sea. The ¹⁷th PAMS Meeting, 23-25 Apr. 2013, Hangzhou, China

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

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、浮上することで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、 海洋の長時間連続観測に適していると考えられる。魚類の個体数計測等の水産資源量調査ではビークル に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の場合、特に滑空速 度の遅い初期の状態において、機体形状の非対称性や重心の僅かな変動が機体の運動性能に大きな影響 を与える。そこで、本研究では、ビークルの投入から定常状態に至る初期滑空状態における機体の運動 制御方法について調査した。

## 2. グライダー型海中ビークルの概要

水産資源量調査を目的として開発中の海中ビークルの写真を図1に示す。全長は1.04m、最大高さは 0.3m、幅0.356mであり、機体断面形状はNACA0030の翼型を参考に製作している。機体は箱形の耐圧 容器と翼型の外殻で構成され、耐圧容器内部に滑空推進のための水中重量調節機構が装備されている。 表1に機体の主要目を示す。

本機体の特徴として、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。浮力調 節装置の写真を図2に示す。図3に示すように浮力調節装置はリニアアクチュエータと筒状のジャバラ、 アクチュエータヘッドにより構成されている。アクチュエータヘッドの位置をリニアアクチュエータに より駆動してジャバラ内部の容積を調節することで、機体全体の重心位置と浮心位置を変化させ、機体 の水中重量と姿勢を制御することが可能となる。



図1 グライダー型海中ビークル



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2 機体内部構造



図3 浮力調節装置構造図

#### 3. 機体運動制御系

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の前進 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に自律制御系を開発し、その有効性について調査した。

浮力調節装置を用いた機体の水中重量と姿勢の制御には、PD 制御方式を採用した。各浮力調節装置 のアクチュエータヘッドの制御量を、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決定 する。

#### 4. 初期滑空状態のシミュレーション計算

開発された制御系に基づき、機体が水中に投入されてから定常滑空状態に移行するまでの初期滑空状態について数値シミュレーション計算を実施した。計算開始時には、すべての浮力調節装置のアクチュ エータヘッドが基準位置にあるものとし、トリム 3.0 度、ヒール 3.0 度を初期条件として与える。水中 重量を中性浮量、ヒール、トリム角を 0 度とするために、機体深度の目標値として 0.5m を与え、ロー ル角とピッチ角の目標値は共に 0 度とする。次に、これらの自動調節終了後、定常滑空状態へ移行する までの機体運動を計算した。ここでは、計算開始から 50 秒後に潜降を開始し、100 秒後に浮上に移行 するため深度目標値として 12.0mと 0.5mをそれぞれの時刻に与えている。この時の機体ピッチ角の時 刻歴を図 4 に示す。計算開始後 50 秒で潜降を開始しピッチ角は約 4 度の機種下げとなる。計算開始後 100 秒からは浮上に移行しピッチ角の最大値は約 3 度の機首上げとなる。図 5 には機体深度の時刻歴を 示す。本計算条件においては 50 秒間で約 7m潜降し、その後 50 秒間で約 4m 安定に浮上することが確 認された。



図4 ピッチ角の時刻歴



#### 5. 水槽試験

開発された初期滑空状態用運動制御系の有効性を検討するために、水槽試験を実施した。ここでは、 運動計測用センサーの調整とその記録システムの試験を行い、グライダー型海中ビークルの運動計測方 法について検討した。

#### 6. まとめ

グライダー型水中ビークルの初期滑空状態における機体運動の安定性の確保と定常滑空状態への速 やかな移行を目的として、運動制御系を開発しその有効性を数値シミュレーションにより調査した。そ の結果、設計された制御系により機体投入後約 50 秒で水中重量と姿勢が安定することを確認した。さ らに、自動調節後の定常滑空状態への移行についても調査し、設計された制御系に目標深度を適宜与え ることにより安定した滑空運動が得られることを確認した。また、今後実施予定の運動性能試験のため に、グライダー型海中ビークルの運動計測手法について調査を実施した。

## 風送ダストに関する現状と今後の展開に関する研究集会

名古屋大学 長田 和雄

## 1. 目的

応用力学研究所の黄砂研究グループは、世界的に見てもアクテイブに研究を進める研 究グループの一つであり、モデル研究と平行して、3波長のレーザーレーダーを導入して 黄砂と大気汚染粒子の同時計測を開始している。福岡は特にアジア起源の黄砂・大気汚染 の影響が深刻な地域であり、応力研グループによる数値モデルと観測データを統合した解 析や、多波長データ同化による黄砂の粒径分布の推定は、今だ十分に明らかにされていな い大気中黄砂の物理特性に関する科学的ブレークスルーをもたらすとして、国内外から大 きく期待されている.その他、黄砂の発生フラックスの現地観測・ライダー観測・沈着観 測・化学分析・黄砂全球モデリングなど、応力研以外の研究グループにより推し進められ ている最前線の知見を、黄砂研究のコミュニティで共有すると共に、各分野がリンクし新 たなブレークスルーを生む機会を設けることは、黄砂研究の推進や黄砂モデルの精緻化に とって非常に重要である.

## 2. 研究集会の概要

日 時: 平成 26 年 1 月 9 日(木)~10 日(金)
場 所: 九州大学応用力学研究所 9日:6階セミナー室 W601 10日:2階会議室

## 3. 研究成果

研究集会では黄砂研究の第一人者から若手の研究者まで幅広い専門家が数多く集ま り,20題の講演発表があった.関係者を含めると40名程度の参加があった. 資料1 に研究集 会プログラム,資料2に研究会の様子(写真)を掲載する.各方面の専門家の立場から黄砂研究 の最前線と今後の研究課題が示され,講演発表後の質疑応答や懇親会にて現状の黄砂研究 の問題点やコミュニティ内でのリンクの可能性などについて活発な議論がなされた. 資料1

# 九州大学応用力学研究所 共同研究集会 風送ダストに関する現状と今後の展開に関する研究集会

日 時: 平成 26 年 1 月 9 日 (木) ~10 日 (金) * 9 日の夜懇親会を行います
場 所: 九州大学応用刀学研究所 9日:6階セミナー室 W601 10日:2階会議室 研究代表者:長田和雄(名古屋大学) 所内世話人:原由香里
プログラム
1月9日(木)
13:00-13:10 けじめに
13:10-13:28 原 由香里 (九大・応力研) ダストイベント毎の粒径分布の差異に関する研究
13:28-13:46 長田 和雄(名大・環境) 沈着ダストの粒径分布
13:46-14:04 弓本 桂也(気象研) 粒径分布を考慮した発生量逆推定
14:04-14:22 青木 一真(富山大・理工)太陽放射観測から得られる風送ダストの光学的特性
14:22-14:40 神慶孝 (名大院環境) 衛星ライダーを用いたダストの光学特性の推定に及ぼす
芸一エアロアル設刊別の影響 14:40-14:58 植松 光キ(甫大・海洋研・甫理大) 北大亚洋上に飛车した苦砂
14:58-15:15 休憩
15:15-15:33 福島 聡(能本県大・環境共生) 能本県天草で採取された黄砂粒子とすす粒子の
混合状態の観察
15:33-15:51 井上 淳(大阪市大・理) 球状炭化粒子の元素組成による発生域推定
15:51-16:09 宮本 知治(九大・理) 北部九州脊振山頂にて採取された降下風送塵の化学組成
~その季節変化と経年変化~
16:09-16:27 長島 佳菜 (JAMSTEC) 個別石英粒子のカソードルミネッセンス分析に基づく ダスト供給酒堆完
16:27-16:45 清水 厚(国環研) ライダーで見た黄砂イベントと PM2.5 全国分布との関係
16:45-17:001日目の総合討論
1月10日(金)
現状と課題
09:18-09:36 石塚 正秀 (香川大) 風送ダスト発生メカニズムの機構解明に関する観測的研究
09:36-09:54 黒崎 泰典(鳥大乾地研) モンゴル・ツォクトオボーにおける砂塵観測
09:54-10:12 村田 浩太郎(熊県大・環境共生) 熊本における黄砂時と非黄砂時の空気中浮遊
細菌の観測
10:12-10:30 休憩
10:30-10:48 J.Y. Kang, T.Y. Tanaka〇, M. Mikami (気象研) 残留した枯れ草がダスト発生
に及ぼす影響の数値実験
10:48-11:06 小林 拓(山梨大・生命環境) 組成別エアロゾルモニターとしての偏光 OPC の
評価 11:06-11:94 杉木伷土(国彊研)
11.00 11.24 杉本仲人(国境切) 偏九010 と 2 彼氏「 偏九 7 4 グ による黄砂と八気(7 朱子) アロゾルの内部混合の推定
11:24-11:42 鵜野 伊津志(九大・応力研) 九大応力研鵜野研究室での PM2.5 とダスト研究の
最前線の紹介
11:42-12:00 西川 雅高(東理大) 北京の PM2.5-温故知新的紹介-

12:00-12:30 総合討論とまとめ



# 非線形波動研究の拡がり

研究代表者 青山学院大学理工学部 增田 哲

#### 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うえ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、数値解析などの各分野が相互に密接に関連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、セル・オートマトン系、微分幾何学、 数値計算アルゴリズムなど思いがけない分野との密接な関係が明らかになり、更には、そうした分野で の成果が諸現象の解析にフィードバックされてきた.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、応用の両面において大きな潮流を産み出し続けている. 本研究集会の目的は、これまでの非線形波動研究の進展を受け、「最先端の研究に現れる多様な非線形現 象を様々な分野の立場から捉え直すことで、現象の理解や制御に関して新たな展開を目指す」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やその拡がりを 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 会は企画された.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25年10月31日から11月2日までの3日間にわたり九州大学筑紫地区筑紫ホールにおいて開催され、特別講演3件と一般講演25件(口頭発表15件およびポスター発表10件)が行われた。特別講演では、3名の講演者を選定して依頼を行った。まず、流体現象からの話題として、

回転球面上の2次元 Navier-Stokes 流の分岐構造

という講演が行われ、帯状流の分岐構造や、高レイノルズ数流れと不安定解の関係について最新の知見 が紹介された.また、反応拡散モデルの話題として、

• Theta logistic モデルを伴った Fisher 方程式の解の分岐について

という講演が行われた. 生物種の分布を表す Fisher 方程式の遺伝子選択部分に Theta logistic モデルを 適用した場合の解の分岐について,詳細な解説があった. さらに,カオス力学系に関する話題から,

非双曲力学系の不安定周期軌道解析

という講演が行われた.これらの内容は、非線形現象およびそれを記述する数学モデルに関して、今後 の研究の指針となるべき興味深い内容であった.ポスターセッションを含む一般講演においては、ソリ トンとその相互作用に関するものから、反応拡散系やパターン形成、種々のセル・オートマトン系に関 する興味深い性質、交通流や生産ラインにおける組み立てプロセスといった工学的な話題、離散曲線の 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.総じて水準の高い講演がなされ、それら をもとに、分野を越えた活発な議論が繰り広げられた.本研究集会は、数学や物理学の理論的な話題か ら工学的な応用に至るまで多彩なテーマを扱いつつ、講演が公募されて自由に発表できることが大きな 特色である.全体を通して、非線形波動およびその関連分野の有機的なつながりが実感できる研究集会 であり、「最先端の研究に現れる多様な非線形現象を様々な分野の立場から捉え直すことで、現象の理解 や制御に関して新たな展開を目指す」という当初の目的は、ある程度達成できたと思われる.非線形波 動研究のような、様々なテーマが密接に関連しあう分野では、本研究集会のような場の存在が極めて重 要である.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に対して、参加者を代 表して深く感謝申し上げたい.

#### 講演プログラムと概要

11月1日(木)

#### 13:30~14:00 空間離散曲線の等周変形と離散 K 曲面

井ノロ順一(山形大理),梶原健司(九大 IMI),〇松浦望(福岡大理),太田泰広(神 戸大理) 離散曲線の離散時間発展について最近分かったことを報告する。とくに定捩率な空間離 散曲線を、離散 mKdV 方程式あるいは離散 sine-Gordon 方程式をもちいて等周変形す ることにより、離散的な負の定曲率曲面が構成できることを述べる。

# 14:00~14:30 変形 KdV 階層による平面曲線の運動と戸田階層 ○筧三郎(立教大理),梶原健司(九大 IMI) 井ノロらは、変形 KdV 方程式による平面曲線の運動に関する明示公式を与えた。本講 演では、Goldstein-Petrich が導入した、変形 KdV 階層の高次方程式による運動も含め た明示公式を与え、リー代数的意味も議論する。

14:45~15:45 回転球面上の2次元 Navier-Stokes 流の分岐構造 佐々木英一(京大情報) 惑星大気には東西方向の強いジェット流が存在し,帯状流と呼ばれる.回転球面上の2 次元 Navier-Stokes 流は惑星大気の最も単純なモデルの一つとして注目を集めてきた. 本講演ではこのモデルにおける帯状流の分岐構造,並びに高レイノルズ数流れと不安定 解の関係について議論する.なお本研究は京都大学数理解析研究所の竹広真一氏,山田 道夫氏との共同研究である.

#### 16:00~16:30 非可換インスタントンの ADHM 構成法

○浜中真志(名古屋大多元),中津了勇(摂南大理工) 非可換空間上のインスタントンの ADHM 構成法について議論する。厳密解構成とモ ジュライ空間の特異点解消を説明したのち、この文脈で要となる公式を用いて非可換イ ンスタントン数(特に U(1)の場合)の起源を明らかにする。

#### 16:30~17:00 超離散 sine-Gordon 方程式におけるソリトンの相互作用

○ Ralph Willox (東大数理), Basil Grammaticos (パリ第7大学), Alfred Ramani (エ コル・ポリテクニク)

超離散 sine-Gordon (sG) 方程式には、ソリトンの分裂と融合のような現象が存在することは約15年前から知られているが、超離散極限等の普段に用いられている数学的手法では、厳密解がうまく構成できず、ソリトン現象の分析は困難である.本講演では、離散 sG 方程式と離散 KdV 方程式を結ぶ Miura 変換に基づき、超離散 sG 方程式のソリトン相互作用を完全に記述するための手法を紹介する.

## 17:00~17:30 **賃量を交換しながら相互作用する2粒子** 角畠浩(富山大工) ソリトン相互作用と類似した質量交換を伴う2粒子系を考察する。

11月2日(金)

## 10:00~10:30 離散 Gray-Scott モデルの解の収束について

松家敬介(東大数理)

Gray-Scott モデルは、解に様々な時空パターンを与える2変数反応拡散系として知られている。村田実貴生氏との共同研究により、時空パターンを保存した離散化及び超離散化が得られた。本講演では、連続系と離散系の解の対応を見るために、離散 Gray-Scottモデルの解の収束について議論する。

#### 10:30~11:00 超離散反応拡散方程式における多次元進行波

村田実貴生(農工大工) 反応拡散方程式に正値性を保つ離散化と超離散化を適用することで,系統的に超離散方 程式を構成することが可能である.今講演では,その手法で得られた超離散反応拡散方 程式に見られる多次元進行波について報告する.

#### 11:10~12:10 **Theta logistic モデルを伴った Fisher 方程式の解の分岐について** 野原勉(東京都市大知識工)

R. A. Fisher はある種の生息地が海岸線のようにまっすぐ延び、一様分布している種の 人口分布モデルをつぎのように考えた.もし、どこかの場所で交配の結果優勢遺伝子を 持つ種が突然変異で起きたとする.この優勢遺伝子種は対立劣勢遺伝子種の生息地を犠 牲にしてその個体数を増加させることが予想される.優勢遺伝子種は突然変異の起きた 近くでまず最初にその個体数を増加させるが. 近接する周りの領域へ徐々に広がりつつ 増加していく.優勢遺伝子をもつ子孫の生息場所の領域が両親の生息場所との距離より 大きくなったと仮定すると、優勢遺伝子群の増加は海岸線を伝搬する波のようになる. この進行波を考えるとき最も簡単な条件を課すと「遺伝子選択モデル」を得る. このモ デルにおいては、優勢遺伝子の発生頻度が0でない限り時間極限においてそれは1に 収束する. すなわち, 遺伝子選択モデルは対立劣勢遺伝子を排除してしまう. そこで Fisher は遺伝子選択 モデルと拡散モデルを合成した反応拡散モデル (Fisher 方程式あ るいは KPP 方程式)を考えた. このモデルにおいては, 優勢遺伝子の存在確率は時間 定常解として0にも1にもなり得る. 以後おおくの研究者がこのモデルを解析した が、Kolmogorov らは特に進行波解についてどのような初期条件が進行波解を形成する のかあるいは、その速度はいくらになるのかという問題に取り組んだ、本稿においては Fisher 方程式の遺伝子選択部分に Theta logistic モデルを適用し、その解の分岐現象に ついて解説する.

参考文献:応用微分方程式講義,野原勉,東京大学出版会,2013

#### 13:30~14:00 R_{II} 格子と非自励離散 mKdV 方程式

○前田一貴(京大情報),辻本諭(京大情報)

モニック対称  $R_{II}$  多項式のスペクトル変換の両立条件として,非自励離散 mKdV 方程式 が導出されることを示す.このことを用いて,モニック型  $R_{II}$  格子と非自励離散 mKdV 方程式の間の Miura 変換を与える.さらに、半無限格子境界条件の場合の解(分子解) も Hankel 行列式を用いて与える.

## 14:00~14:30 ローラン双直交多項式とアステカダイヤモンド定理

上岡修平(京大情報) アステカダイヤモンドのドミノタイリングに関する Elkies, Kuperberg, Larsen, Propp (1992)の定理に対して Laurent 双直交多項式を用いた新しい証明を与える.

## 14:50~15:20 *B* 型箱玉系の混合解について 長井秀友(東海大理)

本発表では超離散 KdV 方程式のソリトン解と超離散戸田タイプのソリトン解を持つ B 型の超離散ソリトン方程式について,これら2種のソリトン解が混在した厳密解につい て紹介する.

#### 15:20~15:50 有限体上における箱玉系と類似したソリトン方程式について

由良文孝(はこだて未来大) 「デジタル化」された可積分系として、箱玉系は活発に研究されてきた. 超離散化を通 して得られた知見をもとに、箱玉系の類似を有限体上で考察して得られたソリトン系と その解について調べる.

#### 11月3日(土)

#### 10:00~10:30 符号付き超離散第六パンルヴェ方程式

竹村剛一(中央大理工) q差分第六パンルヴェ方程式を基にして符号付き超離散第六パンルヴェ方程式を導出する。解の様子についても解説する。本講演は筒井栄光(2012年度修士)との共同研究による。

#### 10:30~11:00 線形波動方程式の超離散極限と幾何音響学の高周波近似に関する考察

儀保伸吾(九大芸術工) 幾何音響学では音波を高周波近似で扱うため,音波を粒子のように扱う(音線).一方, 音波の伝播を記述する線形波動方程式を超離散化すると,超離散戸田格子方程式になり, その解は粒子的に振る舞う.本講演では,高周波近似と超離散極限との類似性から両者 の対応を考察する.

#### 11:10~12:10 非双曲力学系の不安定周期軌道解析

斉木吉隆 (一橋大商)

カオス力学系には一般に無限個の不安定周期軌道が埋め込まれている.しかし,不安 定周期軌道はその不安定性ゆえに数値的にも検出に困難を伴うため,これまでに十分調 べられているとは言えない.また,双曲性の破れた力学系に関する研究も発展段階であ る.本講演では,まず,カオス力学系の不安定周期軌道に関するいくつかの基本的性質 を紹介する.その後,系のパラメタ変化に伴う非双曲構造(安定多様体と不安定多様体 のTangency)の発生と不安定周期軌道の関連をリアプノフ解析を用いて議論する.ま た,非双曲力学系が生み出すカオス軌道統計量を不安定周期軌道の不安定性ならびに双 曲性の度合いを用いて特徴づける試みを紹介したい.

#### 13:30~14:00 楕円・超楕円関数に対するソリトン理論的アプローチ

○松島正知(同社生命医),岡本沙紀(同社生命医),大宮眞弓(同社生命医) 楕円関数に対するWeierstrass標準形を定常KdV方程式の包合的な第一積分を用い て複素解析を用いずに代数的に構成する方法,および,この類推として,種数が2の超 楕円関数に対する標準形を高階定常KdV方程式の第一積分を用いて同様に構成する方 法について報告する.

#### 14:00~14:30 特異点閉じ込めと三角圏の射影分解

○弓林司(首都大理工),齋藤暁(首都大理工),脇本佑紀(首都大理工) 我々は以前広田三輪方程式に八面体構造を見出した。本発表ではこれを押し進め、広田 三輪方程式の三角圏構造をより厳密に扱い、更にそれの局所化(~写像化)を扱った。 特に、この局所化と特異点閉じ込めを通して、τ函数の不定点集合が射影分解され不変 周期点多様体の列と同一視される事を見出した。最終的には本研究を通して圏論的な可 積分性についても言及したい。

#### ポスターセッション概要

## (1) 周期離散戸田格子の幾何学的実現とトロピカル化

野邊厚(千葉大) 周期離散戸田格子の時間発展を超楕円曲線と他の平面曲線との交叉を用いて幾何学的に 実現する.また,それらをトロピカル化することで,周期箱玉系の時間発展を幾何学的 に実現する.

## (2) 超離散 KP 階層(の簡単な場合)の解およびその簡約について

中田庸一(東大)

離散 KP 階層 (の簡単な場合) の超離散類似について解の再帰的表示を提出した。また 表示の起点となる解のクラスを提出し、ある超離散ソリトン方程式の両立条件について 議論を行った。

#### (3) 箱に番号が付いた新しい箱玉系について

○柿崎苑美(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),山 本有作(神戸大),岩崎雅史(京都府大),中村佳正(京大) 箱玉系の拡張の1つとして,箱に番号が付いた箱玉系を報告する。この新しい箱玉系 を,既知の箱玉系と対応付けるためのベックルント変換を導出する。また,ベックルン ト変換を利用して,新しい箱玉系の保存量を明らかにする。

# (4) パターン生成 CA の方程式と解について 新田真奈美(早稲田大),高橋大輔(早稲田大)

セルオートマトン (CA) には、特徴的なパターンを示す解を持つものが数多く存在する。max-plus 系あるいは束の演算を用いて、その生成メカニズムを方程式の解の視点から議論し、どのようなパターン生成 CA が存在するかを検証する。

#### (5) 4 つの確率変数を含む統合確率粒子系

○木村俊之(早稲田大),高橋大輔(早稲田大) 複数の粒子が確率規則に従って一次元的に移動する系は、ASEPや交通流モデルなど理 論・応用の両面で興味深い研究の対象となっている。本ポスターでは、以前に報告され た4つの可解な確率粒子系を統合したモデルとその解析結果を発表する。

- (6) セルオートマトンを用いた信号機のある交通流の解析 〇伊藤秀剛(東大),西成活裕(東大) 現在、信号機は定性的かつ経験的な知識に頼り制御されている。本研究では、セルオートマトンの近似的な解や、シミュレーション結果を用いることで、信号機の青の最適な 長さの定量的評価を行った。
- (7) 粒子排他過程としての組立プロセス
   ○江崎貴裕(東大),西成活裕(東大)
   生産ラインにおける組立のプロセスをある確率過程によって排他粒子の流れとしてモデル化した。このモデルにより、在庫の分布が自発的に非対称になる等の興味深い現象を発見した。
- (8) 群集中の退出経路の形成について 〇石川晴基(東大),江崎貴裕(東大),柳澤大地(茨城大),西成活裕(東大) 本研究では、群集の一定の割合が部屋に留まり残りが退出する現象を解析した。初期密 度と残留割合を変化させてフロアフィールドモデルを用いてシミュレーションを行い、 退出経路のパーコレーションによって、退出時間および群集の分布に特徴的なパターン を見た。

(9) ドメイン壁境界条件下での対称性付き6頂点模型の分配関数とタウ関数 ○渡邊拓弥(立教大), 筧三郎(立教大) Foda, 高崎らにより、ドメイン壁境界条件下での6頂点模型に対する分配関数は、KP 階層のタウ関数の構造が隠れていることが指摘されている。今回は、対称性を加えた場 合においても、同様のことが成り立つかを考察する。

# (10) 6 角形領域における菱形タイリングの分配関数とタウ関数 〇田村律(立教大), 筧三郎(立教大) 6 角形領域における菱形タイリングの分配関数は、Hahn アンサンブルに対する行列積 分で表されることが、Johanson によって示されている。その分配関数と離散戸田方程

開催の期間 平成 25 年 10 月 31 日 ~ 平成 25 年 11 月 2 日

式のタウ関数との関係について議論する。

**参加者** 62 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

研究代表者:万田敦昌(長崎大学)

1 '

2013 年 12 月 19 日から 20 日にかけて、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において、「日本海及び日本周辺海域の海況モニタリングと波 浪計測に関する研究集会」が開催された。今回は、大学および試験研究機関を中心に 53 名 が参加し、合計 13 台の講演があった(講演内容はプログラム参照)。一題あたり、質疑応 答含む 25 分という十分な時間を割いたため、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。

例年に違わず、日本海及び日本周辺海域に関する最新のモニタリング結果と数多くの斬 新な研究成果が発表され、講演者だけでなく参加者全員にとって有意義な会合となった。 それに加え今回は、海況モニタリングに関する講演だけでなく、数値シミュレーションや データ同化といった、モニタリング結果を活用する側の講演も行われたことにより、デー タの相互比較やデータの有効利用といった観点からも非常に活発な議論が交わされ、参加 者の情報交換・交流といった観点からも実り多い会合となった。

今後とも、観測データに基づいたモニタリングやモニタリング結果を活用した様々な手 法により、日本周辺海域の海況・波浪の研究に携わる研究者・関係者が一堂に会する集会 になることを期待する。最後に、本研究集会の開催を承諾して頂いた九州大学応用力学研 究所、集会を開催するにあたりお世話いただいた東アジア海洋大気環境研究センターの広 瀬直毅教授をはじめとする関係各位に深甚なる謝意を表する。 プログラム

期間:平成25年12月19日(木)-20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

http://www.kyushu-u.ac.jp/access/map/chikushi/chikushi.html

------ 12/19(木) ------

13:30-13:40 趣旨説明

13:40-14:05

4 次元変分法を用いた北西太平洋海洋データ同化システムについて 石崎士郎(気象庁)

14:05-14:30

複数の海洋データ同化モデルから推定した主要海峡通過流の季節変化 韓修妍(九大総理工)、広瀬直毅(九大応力研)

14:30-14:55

山口県北西沖海域における水温の長期変化 渡辺俊輝(山口水研セ)、千手智晴(九大応力研)、種子田雄(西水研)

14:55-15:20 日本海の海面水温が冬季の気候に及ぼす影響

カ石國男(ノースアジア大学総合研究所)

15:20-15:35

休憩

15:35-16:00

風波と規則波を加えたケースの、波と流れの相互作用について 水野信二郎

16:00-16:25

能登半島周辺海域における流れの季節変動特性

福留研一(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)・井桁庸介・(水研セ日水研)・渡邊達郎(水研セ日 水研)

#### 16:25-16:50

佐渡島周辺における沿岸捕捉波の南北風との共鳴による増幅 井桁庸介・山崎恵市・渡邊達郎(水研セ日水研)

#### 16:50-17:15

山陰~京都府沿岸において台風 1216 号通過後に発生した急潮に伴う流速変動 山崎恵市・北出裕二郎(海洋大院)・井桁庸介・渡邊達郎(水研セ日 水研)・太田太郎(鳥取水試)・熊木豊(京都海洋セ)

#### 12/19 講演終了後 懇親会

------ 12/20(金) ------

09:00-09:25

気象庁海洋観測定線東シナ海 PN 線の長期変化 村上 潔 (気象庁海洋気象課)

09:25-09:50 海面気圧変動に対する黄海*東シナ海の順圧応答 姜 分順(九大応力研)、広瀬 直毅 (九大応力研)

09:50-10:15 東シナ海の黒潮が大気に及ぼす影響 万田敦昌(長崎大学院水産・環境)

10:15-10:30 休憩

10:30-10:55

海洋表層境界層における流動場の水平構造の観測

吉川裕(京大理)、油布圭(九大応力研)、鬼塚剛(中水研)、紫加田知幸(中 水研)、木元克則(西水研)

10:55-11:20

発表タイトル: 短波放射の日周変動に対する大気・海洋結合境界層の応答 窪田雅也(九大応力研)、吉川 裕(京大理)

.

11:20-11:50 総合討論

# 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(土)

13:00-13:45 乱流遷移領域に見られる大規模間欠構造について

福留功二(立命館大理工),刺刀一匡,大上芳文 13:45-14:30 超音速境界層の遷移初期段階における流入攪乱スペクトルの影響

渡辺大輔 (富山大理工)

- 14:45-15:30 壁面進行波状プレデターミンド制御による乱流摩擦抵抗低減及び再層流化現象 守裕也(東京農工大), 岩本 薫, 村田 章
- 15:30-16:15 乱れのダイナミクスにおける大規模構造の役割

水野吉規(同志社大理工)

16:30-17:15 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影響と寄与 山本義暢(山梨大医工総合), 辻 義之

2月23日(日)

- 9:00-9:45 機能性塗料を用いた抵抗低減効果
- 高木洋平(阪大基礎工),中本真義,山本功 9:45-10:30 高レイノルズ数実流試験設備と管摩擦係数

古市紀之 (産総研), 寺尾吉哉

10:45-11:30 乱流のラテラルコンタミネーションの臨界条件について

稲澤 歩(首都大),淺井雅人

11:30-12:15 一様剪断乱流における自己維持過程とバースト現象

関本 敦 (マドリード工科大),Siwei Dong, Javier Jimenez

12:15-12:30 総合討論

# 3 講演内容の概要

乱流遷移領域に見られる大規模間欠構造について 福留功二,刺刀一匡,大上芳文

乱流遷移域に見られる大規模間欠構造についてその 構造とダイナミクスを議論する.特に,レイノルズ 数効果と大規模間欠構造の角度の影響を述べる.ま た,実験における結果も報告する.

超音速境界層の遷移初期段階における流入攪乱スペ クトルの影響

#### 渡辺大輔

M2.5の超音速境界層において,主流乱れの影響を非 定常空間発展DNSの実行により調べた.上流で与え る攪乱の振幅およびエネルギースペクトルの分布が ストリーク構造形成に及ぼす影響についての研究結 果を紹介する.

# 壁面進行波状プレデターミンド制御による乱流摩擦 抵抗低減及び再層流化現象

#### 守 裕也, 岩本 薫, 村田 章

乱流摩擦抵抗は層流に比べ著しく増大することが知 られており、これを低減する手法の開発は工学的に は輸送コストの削減などに大きな貢献ができると期 待されている.本研究では抵抗低減制御の一つであ る壁面進行波状制御について注目する.この制御は センサを必要としないプレデターミンド制御手法の 一つであり、大きな摩擦抵抗低減効果を有する.近 年では摩擦抵抗低減のみならず乱流を層流化させる ことも報告されており、本講演では制御効果及びそ の流れ場の詳細について述べる.

#### 乱れのダイナミクスにおける大規模構造の役割 水野吉規

壁乱流において流れ方向に長大な乱れの構造が現れ ることは非常によく知られている.これら大規模構 造の時間・空間スケールは,乱れの活発なスケールか らかけ離れており,レイノルズ応力への寄与はほと んどない.しかしながら,これらの大規模構造は,レ イノルズ応力を担う乱れを誘起するせん断場を与え る背景場の役割を持っており,乱れのダイナミクスに おける役割は必ずしも無視できるものではないと考 えられる.本研究では,同時に実行される2つのチャ ネル乱流の数値計算に対して,一方の一部の情報を 他方に定期的にコピーするデータ同化を行うことで、 大規模構造の動的な役割を検証する試みを行った.

#### 高レイノルズ数チャンネル乱流場における大規模構 造の影響と寄与

#### 山本義暢, 辻 義之

高レイノルズ数チャンネル乱流場の DNS 結果に基づ き,大規模構造の影響を調べた.これまで報告されて いるレイノルズ数域を上回る条件下における,PMS 及び2点間相関係数とその可視化結果を示す.また, DNS データベースを用いてフィルタを施し,4象限 解析における大規模構造の役割を検討するとともに, LES における再現性,スマゴリン係数のレイノルズ 数効果について言及する.

#### 機能性塗料を用いた抵抗低減効果 高木洋平,中本真義,山本 功

従来防汚性を重視していた船底塗料に新たな機能を 付加し,粘性摩擦抵抗を減らす省エネルギー技術が 注目されている.しかし,その抵抗低減メカニズム については未解明な部分が多く,最適な材料及び塗 装技術は求められていない.本講演では機能性塗料 による摩擦抵抗低減効果を解明するために行った壁 乱流の直接数値計算結果を中心に議論を行う.

#### 高レイノルズ数実流試験設備と管摩擦係数 古市紀之, 寺尾吉哉

産業技術総合研究所における高レイノルズ数実流試 験設備を用い,10の7乗を超えるレイノルズ数域に おいて,高精度な管摩擦係数の実測試験を実施した. 設備を紹介するとともに,その実験結果を発表する.

乱流のラテラルコンタミネーションの臨界条件につ いて

稲澤 歩,淺井雅人

平板境界層における乱流くさびの拡がり(ラテラル コンタミネーション)の開始の条件について風洞実 験により調べた結果を発表する.

関本 敦, Siwei Dong, Javier Jimenez 一様剪断乱流のシミュレーションを長時間行うと、発 究では、ニュートン法を用いて求めた不安定周期解 達した乱流場は計算領域の拘束を受けているものの、を詳しく調べ、一様剪断乱流の自己維持課程やバー 壁乱流と同様に準周期的なバースト現象が観測でき、スト現象との関連性について議論する. その統計量は壁乱流の対数領域のものとよく一致す

一様剪断乱流における自己維持過程とバースト現象 る. この乱流は大スケール運動が計算領域による拘 束を受けるという意味でミニマル乱流である.本研

# 4 開催日程. 場所

開催日程 2014年2月22日(土)-23日(日) 開催場所 九州大学応用力学研究所西棟6階多目的研究交流室(W601号室) 講演数 9件 参加者数 18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18日(水)午後(13:30~17:30) および 19日(木)午前(10:00~12:00)
- 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: 18日 38名、19日 37名

今回の研究集会では 10 題の発表があり、観測システムから観測結果の解析や今後の観測計画な ど広い分野での議論が2日に渡って活発に行われた。

3. 発表概要

1日目は、前半が観測システムに関する話題、後半が観測結果に関するわだいについて発表が行われた。

CODAR 社の Whelan は、SeaSonde システムの最新の特徴を解説するとともに、新しいアンテ ナパターン計測法を示した。最新の SeaSonde システムは非常に低電力で小型のシステムになって いることが示された。また、従来はトランスポンダを使って測定してきたアンテナパターン計測を、 船舶からの反射エコーを使い AIS 情報を活用することで、トランスポンダなどの送信器材なしに連 続的にアンテナパターンを計測できる技術は、経済的にも継時的変化への対応の点でも有効である と考えられる。新潟大学の小沢らは、アレイアンテナで構成される海洋レーダシステムにおいて、 アンテナ本数を減らしても角度分解能を保つことができる Khatli-Rao 積拡張アレイ処理を適用し た場合について、計算機シミュレーションの結果からその有効性を示した。今後は、より海面流速 場に近いシミュレーションや実際の観測値を用いた結果への発展が望まれる。長野日本無線の平野 らは、海洋レーダの流速読み取りの際に影響を与えるドップラスペクトル上でのノイズの同定に関 して、疑似ノイズを受信機の信号処理段階に挿入した場合にドップラスペクトル上にどのようなパ ターンが現れるか見ることできるシステムの構築方法を示した。実用的な応用には、定量的な評価 への進展が期待される。三菱電機の西岡らは、短波帯電波の海上伝搬モデルから減衰量を見積もる とともに、実際のレーダ信号強度を海上と陸上で測定した値と比較することで、その妥当性につい て評価し、その差が 3dB 程度であることを示した。

1 日目後半では、まず、国土技術政策総合研究所の藤らから、海洋レーダの視線方向流速測定か ら津波波源を逆推定する際のレーダパラメータが推定精度へ与える影響について発表した。特に、 観測時間(流速計算のための積分時間)とレーダ設置位置と波源との位置関係に着目して比較した。 シミュレーションからは、観測時間を1分程度に短くとれば十分な推定ができること、沿岸到達エ ネルギーの大きいところとやや離れたとこへ設置することで推定精度が向上するという結果を得 た。これは、海洋レーダを津波観測に応用しようとした場合の配置方法に、定量的な指標を与える ことができることを示した点で有用であろう。北海道大学の張らは、宗谷海峡に展開している海洋 レーダを用いて、吹走流の見積もりを海底設置 ADCP と潮位データとともに解析し、季節変動を 明らかにした。琉球大学の久木らは、石垣島と西表島に設置した 24.5MHz レーダから得られた流 速マップを自己組織化マップを用いて分類し、日平均流速ベクトルのパターンについて論じるとと もに風、海面水温、モデル計算と比較することで、石垣島北方海域での流動パターンの特徴を示し た。

2日目は、観測計画について3つの話題があった。NICTの杉谷らは名古屋大学の森本らを中心 としたグループで実施している対馬海峡北方での対馬海流構造の観測計画についての進捗状況が 紹介された。大がかりな施設設置を伴う計画の苦労が良く現れていた。JAMSTECの渡邉らからは、 津軽海峡で計画されている観測網の紹介があった。2007年以降新規開設が止まっていた以来初め ての新局免許であるとともに、新たな定常観測海域であることから、そのいち早い稼働が期待され る。愛媛大の磯辺は、沿岸域を海洋レーダと高解像度衛星海面高度計、沿岸アルゴシステムを用い た詳細観測とモデルとの結合により100m格子の同化プロダクトを提供しようという計画を解説し た。これは、日本海洋学会からマスタープランとして提案された内容であり、沿岸海洋学のブレー クスルーとなるものであり海洋学の社会貢献に大きく寄与すると期待されるが、その実効性につい てのフィージビリティスタディが求められているという課題も述べられた。

最後に、現在の海洋レーダを取りまく状況と研究集会での議論のまとめを行い終了した。

- 4. 研究集会プログラム
- 九州大学応用力学研究所 共同研究集会
- 「海洋レーダを用いた海況監視システムの開発と応用」

(代表者:藤井智史、九大応力研世話人:市川香)

- 開催日: 平成 25 年 12 月 18 日(水)~19 日(木)
- 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

12月18日(水)

13:30-13:40 あいさつ・趣旨説明

藤井 智史(琉球大)

13:40-14:10 New SeaSonde Features for Remote Operations: Low Power Systems and Automated Antenna Patterns from AIS Vessels

Chad Whelan, Donald Barrick, and Laura Pederson(CODAR)

14:10-14:40 Khatri-Rao 積拡張アレー処理を用いた海洋レーダの計算機シミュレーションによる特性 評価

小沢 直輝、山田 寛喜、山口 芳雄(新潟大)、平野 圭蔵、伊藤 浩之(長野日本無線) 14:40-15:10 海洋レーダ装置とノイズに関する一検討

平野 圭蔵、伊藤 浩之、藤田 裕一、小海 尊宏(長野日本無線)

15:10-15:40 MF 帯/HF 帯地上波伝搬特性の予測と実測

西岡 泰弘、小林 立範、中西 孝行、稲沢 良夫、宮下 裕章(三菱電機)、高橋 智幸(関 西大)、藤井 智史(琉球大)、花土 弘(NICT)、日向 博文(国総研)

15:40-16:00 休憩

16:00-16:30 海洋レーダを利用した津波波源逆推定に対するレーダ観測時間の影響

藤 良太郎、日向 博文(国総研)、藤井 智史(琉球大)、高橋 智幸(関西大)

16:30-17:00 Estimation of Wind Drift Current in the Soya Strait

張 偉、江淵 直人、深町 康(北大低温研)

17:00-17:30 石垣・西表島北方沖の海洋レーダ観測(その2)

久木 幸治(琉球大)、鹿島 基彦(神戸学院大)、児島 正一郎(NICT)

18:00- 懇親会

12月19日(木)

10:00-10:30 遠距離海洋レーダによる対馬暖流分岐流の観測計画

杉谷 茂夫、岩井 宏徳、雨谷 純(NICT 沖縄)、森本 昭彦(名大 HyARC)、藤井 智史(琉 球大)、滝川 哲太郎(水産大学校)、市川 香(九大応力研)、久島 萌人(名大 HyARC)、川 村 誠治、花土 弘(NICT)

10:30-11:00 津軽海峡東口のおける海洋レーダー観測

渡邉 修一、吉川 泰司、佐々木 建一(JAMSTEC むつ研)

11:00-11:30 海洋レーダを活用した沿岸海洋科学の重点化構想

磯辺 篤彦(愛媛大沿岸センター)、日本海洋学会

11:30-12:00 総合討論 -課題と展望-

#### 地球流体における波動と対流現象の力学

研究代表者 新野 宏(東京大学 大気海洋研究所)

#### 研究集会の目的

近年の計算機技術の著しい進歩により,地球・惑星大気や海洋の小規模渦から大規模循環まで, 計算機の上で再現できるようになった.そして,人工衛星による宇宙からの観測は,地球・惑星 全域での広域情報の入手を可能にした.今日では,地球科学は再現と検証の手段を得て,先端科 学のひとつに変貌しつつある.そのような状況に於いて,地球流体力学は数値計算の結果や衛星 観測の厖大なデータを整理し統一的な理解を得るのに,重要な役割を担う学問である.本研究集 会の目的は,複数の分野の地球流体力学に関連した研究者が一堂に会し,相互に最新の情報を交 換し,新しい学問の展開を模索するものである.

#### 研究集会の日時・場所

日 時: 2013年11月27日(水)~11月28日(木) 会 場:九州大学筑紫キャンパス 応用力学研究所 本館3階 講義室

講演プログラム 11月27日(水)

13:00-13:10 代表者挨拶 新野 宏(東京大学 大気海洋研究所)

13:10-13:50 伊藤 久徳(九大院理),林 未知也(東大理)

対流を伴う熱帯不安定擾乱の東進メカニズム:Madden-Julian 振動における遅い 位相速度に関わって

赤道β面線形方程式系に正のみの加熱を与えた数値モデルにおいて,遅い東進 性擾乱(SED) が現れた。SEDはこれまで知られているものとは異なる東進性擾乱で あり,その本質は非断熱加 熱が断熱冷却を上回ることによる対流域での実効静的 不安定である。SEDの東進は以下のように 説明できる:対流域下層における惑星 渦度ストレッチングによる赤道を挟んだ低気圧性渦度対 の生成→赤道域での西風 傾向と対流域東側での下層収束傾向→対流域の東進。

13:50-14:30 尾堂 深南, 伊藤 久徳(九大院理) 渦と渦の相互作用 - 2次元乱流における upward cascade の物理的実体-

2つの渦の相互作用は相対渦度の輸送という概 念で考えることができ、2つの 渦がつくる初 期の渦度分布によって merge/separate が 決まる。本研究では2次 元乱流における upward cascade を、渦と 渦の相互作用という観点から直感的・ 物理的に説明することを目的とし、非 発散スペクトルモデルを用いた数値実験を 行った。複数の渦を 並べた実験において、2つの渦 の場合と同様に初期の渦度 分布の違いによる相互作用の違いが確認でき、渦と渦の相互作用の 考え方が適用 できることがわかった。また、β 効果を考慮した実験を行い、渦と渦の相互作用 に基づく Rhines ス ケールの検証を行った。 14:30-15:10 中島 健介(九大),高橋 芳行(CPS/神戸大),大淵 済(JAMSTEC),石渡 正樹(北大)、 林 祥介(CPS/神戸大) 国際水惑星大循環モデル比較実験 APE

APE は国内外の15グループが参加して行なわれた水惑星設定でのAGCM比較実験であり、海陸分 布などの外的要因を排除したことにより、各モデルの個性が赤裸々に現われ得る「最も過酷なテ スト」と言える。ここでは、東西一様海水温での赤道域擾乱の構造、および、海水温異常への応 答を中心に、その結果の概要を提示するとともに、今後の同様の比較実験に向けた「教訓」を述 べる。

15:10-15:30 Break

15:30-16:10 河谷 芳雄(JAMSTEC), Kevin Hamilton (IPRC, Univ. Hawaii), Jae Lee (NASA Goddard Space Flight Center) 熱帯成層圏における水蒸気の年々変動

熱帯圏界面を通過して成層圏へ入ってくる水蒸気量は、圏界面温度で決定される。10年に亘るMLS 衛星観測を用いて成層圏水蒸気の年々変動を調べた。年々変動成分は、高度10hPa以下では上方 輸送、高度10hPa以上では下方輸送されている事が新たに分かった。気候モデルを用いて検証し たところ、これらの変動にはそれぞれQB0による圏界面温度の変調と、QB0による二次的な鉛直循 環が関連している事が判明した。

16:10-16:50 本田 匠(九大院・理), 川野 哲也(九大院・理) スーパーセルに伴う竜巻発生過程の数値実験

スーパーセルと呼ばれる特殊な積乱雲に伴う竜巻発生過程を数値実験によって調べた.強い鉛直 シアーを持つ水平一様な基本場内に暖気塊を設置して数値実験を行ったところ,典型的なスーパ ーセルの構造を持つ積乱雲が再現された.この親雲に伴って,計算開始から約50分後に地表付 近において0.4 s⁻¹を超える非常に強い鉛直渦(竜巻)が形成されていた.この地表渦の強化過 程について,流跡線解析や循環解析を用いて調査した結果を報告する.

16:50-17:30 辻 宏樹, 伊藤 久徳(九大院理) 台風 like な渦の大きさの変化メカニズム

風速15 m/s以上の領域の半径(R15)で定義される台風(熱帯低気圧)の大きさは、台風を特徴づける重要な要素の一つである。しかし、台風の大きさの変化メカニズムの解明は十分ではない。 本研究では、熱帯低気圧を簡略化した渦に積乱雲を想定した加熱強制を与え、強制を与える位置 が渦の大きさに与える影響を調べる数値実験を行った。その結果、強制が誘起する二次循環が初 期渦のR15の外に達するか否か、および渦の外のどこまで達するかが渦の大きさに影響すること が示された。

17:30-18:10 水野 信二郎(元九大応研)
 正弦波と流れの相互作用による Langmuir 循環流
 一海洋混合層の数値実験と室内水槽実験の比較—

海洋の乱流運動をLES数値モデルでsimulateした数値実験(McWilliams 1997)では,正弦波の Stokes wave driftと渦度の相互作用によるLangmuir 乱流が通常のShear乱流よりも支配的で、 最近の海洋混合層の乱流研究では海洋波の存在が注目されている。他方、造波機で正弦波を風向 きに加えると、風波で発生したLangmuir循環流をむしろ減衰させる効果があり、波の効果は数値 実験とは全く逆向きに作用する。この違いは、水面を伝播する正弦波が風によって空間的に成長 するか否かによって説明できる事が最近判明した。波と流れの相互作用によるLangmuir循環流の 発生・減衰機構は波令(波速と風速の比)の大小に強く依存する事を発表で指摘する。

#### 18:10- **懇親会**

#### 11月28日(木)

9:30-10:10 伊賀 啓太(東大大気海洋研究所)円筒水槽内の回転する底面上の軸対称流に伴う境界層と角運動量輸送

円筒水槽に水を入れて底面を高速に回転させる実験では、多角形渦・対称渦と非対称渦の間の遷移の際の履歴現象・揺動現象など、さまざまな興味深い現象が起こるが、その解析の基礎となる 軸対称流を決定するには、境界層の構造を詳細に調べておく必要がある。底面・側面・内部の遷 移層にできる各境界層の構造を境界層理論を用いて解析的に求め、その結果を用いて、水槽内全 体に形成される軸

対称流の循環の様子を定量的に評価した。

#### 10:10-10:50 三村 和男(東海大学教養学部) 半球規模の傾圧不安定回転水槽実験に現れるロスビー波

曲率をもたせた底面により地球のコリオリパラメータの緯度変化を模した回転水槽内で発生するロスビー波の挙動を、PIV法による解析により詳細に調べた。水槽の回転数の増減により特性の異なる波動の出現を確認し、理論解との比較等を行った。

- 10:50-11:10 Break
- 11:10-11:50 岩山 隆寛(神戸大理), 渡邊 威(名工大工) 減衰性2次元乱流の普遍的赤外領域スペクトル

いくつかの地球流体力学的2次元流体系を統一的に記述できる一般化された2次元流体系の減衰 性乱流において,エンストロフィースペクトルの低波数領域(赤外領域)に形成されるスペクトル を議論する.赤外領域のエンストロフィースペクトルの波数の冪則は、系に含まれるパラメター alphaに依存せず普遍的であることを,完結理論と数値実験により示す.

11:50-12:30 松田 佳久(東京学芸大学・自然科学系),高木 征弘(京都産業大学・理) 金星のスーパーローテーションのメカニズムについて

熱潮汐波メカニズムとギーラッシュメカニズムについて、それぞれどのような平均東西流が維持 されるか調べた。その結果、熱潮汐波メカニズムでは赤道ジェット型、ギーラッシュメカニズム では高緯度ジェット型、両者の組み合わせでは低~中緯度で等速度型の平均東西流が維持される ことがわかった。雲層付近の金星大気スーパーローテーションの形成には、両メカニズムの寄与 が強く示唆される。

最後に

各発表は十分な時間を確保し討論を活発に行うことができた.若手研究者の発表や参加も数多 くあり,本研究集会が将来を担う若手研究者育成の一助になればと考える.また,本研究集会は, 毎年中心となるトピックを選びながら、九州大学・応用力学研究所と東京大学・大気海洋研究所 の間で、原則として交互に1年交代で開催している.

開催の期間 平成25年11月27日(水)~28日(木) 代表者 組織名 新野宏 東京大学・大気海洋研究所 参加者 19名

参加者

野田暁(JAMSTEC),水野信二郎(元九大応研)、辻宏樹(九大理)、本田匠(九大理)、尾堂深南 (九大理)、伊藤久徳(九大理)、河谷芳雄(JAMSTEC)、山本勝(九大応研)、三村和男(東海 大学)、中島健介(九大理)、宮原三郎(九大理)、辻英一(九大応研)、松田佳久(東京学芸)、 新野宏(東大大気海洋研)、岩山隆寛(神戸大理)、廣岡俊彦(九大理)、伊賀啓太(東大大気 海洋研)、王喜風(九大応研)、和方吉信(九大応研)

#### 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

東シナ海の生物生産には、東シナ海の流動や混合による栄養塩の流入や供給が欠かせない。応用力学 研究所では、東シナ海の陸棚域および黒潮域とその周辺海域の循環に関する研究を数年以上にわたって 継続的に実施しており、国内外研究機関との共同研究も多方面から進めている。その研究内容は、名古 屋大学で進めている生物環境との関連も深く、様々な研究プロジェクトを通して、多くの分野を包含し た研究者コミュニティも形成されてきている。研究成果の共通理解を更に深めるため、継続的に開催で きる研究集会の場を持つことが今後の共同研究の進展に大きく寄与すると思われる。ここでは、流動や 混合などの物理環境と、生物生産との関係を明らかにすることに焦点を当てた研究集会を開催した。ま た、これまでに蓄積してきた共同観測によって得られたデータのアーカイブについても検討することを 目的とした。

出席者は、名古屋大学4名、長崎大学5名、富山大学1名、愛媛大学3名、福岡女子大2名、京都大学1名、九州大学9名であった。本研究集会では、

石坂丞二(名古屋大学)、山口聖(長崎大学)、鋤柄千穂(名古屋大学)、Lee, Keun-Jong(九州大学)、 郭新宇(愛媛大)、松野健(九州大学)、山田真知子(福岡女子大)、森本昭彦(名古屋大学)、武田重信 (長崎大学)、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:2014年2月7日(金) 10::00~17:00、2月8日(土) 09::30~12:30 場所:九州大学応用力学研究所 6F W601

7 日 10::00~12:00

石坂は 2013 年夏季におけるエチゼンクラゲの黄海・東シナ海における出現状況について報告した。 また、黄海南部および済州島南方海域で観測されたエチゼンクラゲの分布を元に、JCOPE-II を用いた バックトレース実験により、特に黄海で観察されたクラゲについては、起源が長江からその北側沿岸で 水温が 15℃になる時期前後に浮遊期になることを推測する結果を示した。またその移動には、風が大き な影響を及ぼしていること、長江希釈水の塩分がモデルと現場値で食い違ったことも示された。

つぎに山口は、東シナ海における植物プランクトンの種組成とリン要求性について、特に無機リンが 不足しているときに、有機態リンの加水分解酵素アルカリフォスファターゼ(AP)を発現させ、その活性 によって溶存有機リンを利用する形態が盛んになることを紹介した。実際に N/P の高い長江希釈水域で、 AP 活性が高いことが示された。また、栄養塩の組成の変化によって植物プランクトンの組成も異なっ てくることが示され、栄養塩の取り込み比が水塊や種によって異なっているのではないかということが 示唆された。

7 日 13:30~17:00

動柄は新たに分析された 2012 年および 2013 年の観測時の栄養塩データを加えて、2010 年からの 5 航海における栄養塩の分布を示した。硝酸塩躍層は概ね水温躍層に一致しており、層厚は年によって異 なり、2010 年と 2013 年では水温躍層の層厚が比較的薄かったのに対し、2011 年では層厚は厚かった。 また、長江希釈水中のクロロフィル濃度は高く、希釈水のないところでは亜表層(水温躍層の下部)に クロロフィル極大(SCM)が見られることを示した。

Lee は亜表層クロロフィル極大に供給される栄養塩の起源について、栄養塩の鉛直拡散フラックスに 注目し、栄養塩躍層付近で N/P の小さい場合、すなわち下層起源の栄養塩と考えられる場合には鉛直フ ラックスが大きく、逆に N/P の大きい長江起源の栄養塩の影響が大きいことを示すところでは鉛直フラ ックスが小さいことを示した。また、SCM と栄養塩躍層との相対的な深さについても、N/P によって 微妙な相違があることを示唆した。

郭は東シナ海の低次生態系モデリングの問題点として、栄養塩に対する sediment からの影響、すな わち海底との間の窒素のやりとり、および基礎生産に対する懸濁物の影響を採り上げた。様々な要素を 除いたモデル実験結果を、基準モデルの結果と比較し、それぞれの要素の寄与について検討した結果を 示した。

松野は、済州島南方海域を中心に 2007 年から実施してきた共同観測の概要をまとめるとともに、得 られたデータの整理と共有化について、検討すべき点を呈示した。また、観測毎に異なる SCM の深さ と成層構造および鉛直拡散の強さについて、今までの例を紹介した。海底混合層内の懸濁物が光を制限 し、その上端に SCM が形成されていたケースなど、浅海域における海底混合と基礎生産の関連性につ いて議論した。

8 日 09::30~12:30

2013 年7月の観測航海によって得られた植物プランクトン試料の分析結果を山田が紹介した。済州島 の南を境に植物プランクトンの組成が大きく異なっており、長江希釈水の影響の有無によって、プラン クトンの組成が異なることが示された。クラスター分析によって、済州島南西海域でも2通りのグルー プがあることが示唆され、長江起源水の影響下においても、その程度によって、特徴の異なる分布を示 すことが示唆された。

森本は、同じ観測時における栄養塩組成の特徴と動物プランクトンの計測結果について報告した。大陸よりの海域で、夜光虫の赤潮が見られたほかに、クラスター分析により、大きく3つのグループに分かれることが示された。また、栄養塩は塩分の低い長江希釈水域でN/Pの小さい特徴がいくつかの点で見られ、一般にN/Pの高いと言われる長江希釈水とは異なる特徴を持っていることが示された。

武田は 2012 年と 2013 年の航海時における表層のナノレベルの溶存態窒素、リンの分布について紹介 し、126°以東では窒素、リンともにナノモルレベルで、特にリンは南側の測線で 10nM 以下とほぼ枯渇 していることが示された。また、特定の海域に限定してみると、硝酸と亜硝酸は、ナノモルレベルでも 塩分と逆相関があることが示され、低塩分ほど栄養塩濃度が高いことが示された。

話題提供終了後、これまでに得られたデータのアーカイブと共有の方法について議論がなされた。計 測項目は多岐に亘っており、それらを統一的にまとめることは困難であることから、基礎データのみを 共有することをまず考えればよく、詳細については各航海のクルーズレポートに記載されているので、 それをまとめておけばよい、ということになったが、そういう情報が一目でわかるデータセットが有用 であろうということから、データ項目リストを一覧するための書式を作って、各共同研究者がそれに入 力することになった。また、具体的なデータについては web を利用する案も出された。

# プログラム

# 東シナ海の循環と混合に関する研究

日時:2014年2月7日10:00~17:00、8日9:30~12:30 場所:九州大学応用力学研究所W601 (6階)

#### 7日

#### 10:00-12:00

石坂丞二・Xu Youngjiu (名大 HyARC)

2013年のエチゼンクラゲの分布と輸送

山口聖・梅澤有(長崎大水産・環境)

東シナ海大陸棚上における長江希釈水とアルカリフォスファターゼ活性の関係

#### 13:30-15:00

鋤柄千穂(名大 HyARC)

陸棚域における栄養塩分布

Lee K-J・松野健(九大応力研)

Relationship between nutrient supply and N/P ratio around subsurface chlorophyll maximum in the East China Sea

#### 15:30-17:00

郭新宇(愛媛大 CMES)
 東シナ海の低次生態系モデリングの問題点
 松野健(九大応力研)
 2008年以降の東シナ海陸棚域における共同観測

#### 8 日

09:30-11:00

山田真知子(福岡女子大)・森本昭彦(名大 HyARC)

2013年7月長崎丸航海における植物プランクトン

森本昭彦(名大 HyARC)

2013年7月長崎丸航海における動物プランクトン・栄養塩

武田重信·江藤祐輔(長崎大水産·環境)

2012~13年の東部東シナ海表層における栄養塩のナノモルレベル変動について

#### 11:00-12:30

東シナ海陸棚域の観測航海データの整理とデータの共有について

# 平成25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 得が普及している。例えば九州大学の PANTA 装置の乱流ドックでは 1TB/day 以上のデータ が生成される。このような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。パターン認識は乱流の時空間構造を観測する最も基本的な手法である。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

プラズマリモートセンシングと高速データサンプリング技術の進展により、多くのビッグ データのサンプルが取得できている。これらビッグデータの解析が行われた。マイクロ波 周波数コム反射計(徳沢)開発が進展し、信号からのプラズマ乱流揺動の抽出に成功した。 LHD では長時間放電において微小揺動成分の観測に成功した(土屋)。PANTA ではストリーマ プラズマの高速度カメラ計測が初めて行われた(大館)。新たな解析法として、プラズマ中 の波動伝搬の瞬時位相により突発的磁力線構造遷移の観測を行った(居田)。同様に多チャ ンネルプローブの位相差の瞬時値解析が進展した(大島)。プラズマ乱流構造に関しては、 バイアス実験時の乱流構造(山田)、電子温度勾配モードと結合する第3のモードの観測 (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 確率論的手法が確立した(田村)。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)が進展した。

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。

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ストキャスティック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開発し てきた。今年度は、波動伝搬を用いて磁力線構造を明らかにした上で、磁力線構造の電子

の熱輸送、イオンの熱輸送、さらに 運動量輸送に与える影響を調べる研 究へと発展させた。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

LHD において中性粒子ビームの 入射方向を切り替えた時のトロイダ ル回転速度、運動量、回転変換角度、 磁気シアの時間変化を図1に示す。 時刻 t=5.3s 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1.3から0.5に減少するのが観測さ れた。磁気シアが 0.5 程度まで減少 した後に突然トロイダル回転速度が 減衰する現象が見られされた。この 時、プラズマ中に励起された熱波動 の伝搬特性により磁力線構造の推定 を行った。プラズマにおける熱波動 伝搬の位相の遅れの空間分布に、3 つのパターンが観測された。時刻



図1 中性粒子ビームの入射方向を切り替えた時の(a)トロイダル回転速度、(b)運動量、(c)回転変換角度、(d)磁気シアの時間変化

5.45s で観測されている位相遅れの単調増加の空間分布は入れ子状(nested)の磁気面を示している。トロイダル回転速度が減少する前後で磁力線構造が変化しているのがわかった。 一方、時刻 5.45s で観測されている位相遅れ分布の平坦化は、磁気面がストキャスティック状態になっている事を示し

ている。さらに放電の後半で見 られる山形の位相の遅れの空 間分布は、プラズマ内部に磁気 島ができている事を示してい る。

ストキャスティック化の前 後(5.64s と 6.44s)のトロイ ダル回転速度、イオン温度、電 子温度の空間分布を図2示す。 ストキャスティック化に伴い、 空間分布の平坦化が見られる が、その度合いには違いがある。 イオン温度の平坦化に比べ電 子温度の平坦化の度合いが大 きい。運動量と(イオンの)熱 輸送を比べると、運動量に与え る影響の方が大きい事がわか る。これらの影響を熱拡散係数、 または粘性係数で評価すると、



図2 ストキャスティック化の前後(5.64sと6.44s)の(a) トロイダル回転速度、(b)イオン温度、(c)電子温度の 空間分布

電子拡散係数の増加は 20 倍以上、イオン拡散係数の増加は 2 倍、粘性係数の増加は 5 倍 であった。またストキャスティック化前には 1 近くであったプラントル数がストキャステ ィック化後には 4 程度に増加しており、ストキャスティック化の粘性への影響が定量的に 評価された。

#### 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、熱輸送、運動量輸送との関連が明らかになった。この「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、さらにはLHD以外のトロイダル磁場閉じ 込め装置にも応用が可能で、今後の発展が期待される。特に、将来の核融合装置では周辺 局在モードという MHD 不安定性を抑制する為に、プラズマ周辺部に摂動磁場を加えるこ とが計画されている。摂動磁場を加えた時に磁場がストキャスティック状態になっている かどうかを実験的に調べる手段として、波動伝搬を用いた磁力線構造観測法は極めて有効 な手法と考えられ、この手法の開発は大いに期待されている。

#### 研究組織

居田克巳	核融合科学研究所
稻垣滋	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

# 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。特に、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 いる空間同時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

本研究による周波数コムを用いた ka-band マイクロ波ドップラー反射計の開発を行い、 平成24年度にLHDプラズマ実験に初めて 適用し、ドップラーシフトを生じた散乱信号 が得られることが確認できた。空間多点から の散乱信号を同時に効率よく入手する方法と して、2つの手法がある。一つはフィルタバ ンク方式と呼ばれる複数の異なる周波数特性



図1:デジタルオシロスコープで収集した信号のうち 50µs 分の時間データから求めた周波数スペクトル。 周波数コムの各成分が得られている。

を持つバンドパスフィルタによって、信号を弁 別処理する方法で、これにはチャンネル数分の 処理システムが必要である。もう一つは、デー タを広帯域なまま直接収集し、計算機によるデ ジタル処理によって弁別する方法である。これ まで、このデジタル処理を行うのに十分な帯域 を持つデータ収集手法がなかったが、最近の高 速 ADC 技術の進展によって、可能となってき た。今回、サンプリングレート最大 80GS/s (帯 域 20GHz) 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散乱波信号を直接取得し、 得られた大容量データの処理を試みた結果につ いて以下に説明する。

図1は、得られたデータから50µs分を切り 出しFFT処理した周波数スペクトルである。周 波数コムの各成分に対応する多数の中間周波数 (IF)成分のピークが観測できている。次に、こ れらの各ピーク成分を弁別する。図2に20GS/s で収集した100Mポイントのデータを基にして



図2:中間周波数2.31GHz成分をデジタル処理に より抽出した例。密度揺動のドップラーシフトによ る周波数スペクトルの変化がみえる。

で収集した 100M ポイントのデータを基にして、周波数解析処理した中間周波数 2.31GHz の周波数成 分のスペクトルを示す。図のように其々の成分毎に問題なく弁別して抽出し処理できることが分かった。



図 3: 多点ドップラー反射計により求めたポロ イダル速度分布(赤点)と参考のための CXRS 計 測結果(緑点).

同時多点計測することにより、周波数成分毎(す なわち異なる空間位置)の密度揺動成分のドップラ ーシフト量を求めることができる。このドップラー シフト量方はポロイダル速度 $v_{\perp} \ge f_D \approx -k_{\perp}v_{\perp} \ge v_{\perp}$ いう関係性を持つ。図 2 の赤線のようにガウシアン 分布で周波数スペクトルにフィッティングを施し、 各空間点でのドップラーシフト量を算出し、これと ビームトレースコード(LHDGAUSS code)を用いて 求めた波数  $k_{\perp}$ を用いて、ポロイダル速度分布を求 めることが出来た(図 3)。参考として、荷電交換 分光法(CXRS)により測定されたポロイダル速度分 布も併せて表示しているが、誤差の範囲でよく合っ ていると考えられる。

この全散乱信号を直接収集し、デジタル処理によ る周波数弁別を行うという手法は世界初の実証結果 であり、論文発表を予定している。今後時間応答を 求められるように解析手法の開発をすすめていく。

# 複雑ネットワークの手法を用いた プラズマ乱流時系列データの新しい解析手法の開発

高知工業高等専門学校電気情報工学科 谷澤俊弘

# 1 研究目的

超高温の磁場閉じ込めプラズマ中には圧力・密度・温度勾配が普遍的に存在し,それによってドリフト波乱 流が形成される。安定したプラズマ閉じ込めのためには,この乱流の物理的性質を詳細に理解することが必要 不可欠である。乱流は,プラズマ流体の圧力,密度,温度,電位等の物理諸量の時系列データ中における一見 したところランダムな振動として観測される。近年,本研究課題代表者(谷澤俊弘)および研究協力者(中村 知道・兵庫県立大学)によって,時系列データで表現されるダイナミクスを複雑ネットワークの手法を用いて 視覚化し直観的に理解する新しい手法が開発された。本研究は,この手法を磁場閉じ込めプラズマ中のドリフ ト波乱流の大容量時系列データの解析に応用し,そこから物理的情報を抽出する全く新しい手法を開発するこ とを目的とする。

## 2 基本的アイデア

時系列解析では,時刻 t における時系列データ x(t) をその時刻以前のいくつかのデータ x(t-1), x(t-2), ...とランダムノイズ  $\varepsilon(t)$  を用いて

$$x(t) = a_0 + a_1 x(t - l_1) + a_2 x(t - l_2) + \ldots + a_w x(t - l_w) + \varepsilon(t)$$
(1)

と表わす線形モデルの手法が広く用いられている。ここで、パラメータ $a_0, a_1, \ldots, a_w$  は実際に観測された時 系列データと線形モデルによって生成されるデータ間の誤差の二乗平均を最小にするように決められる。この 線形モデルの一種である Reduced Auto-Regressive Model (RAR) は、モデルの最適化基準として、さらに情 報量基準 (information criterion) を用いることにより、いくつかの時間遅れ項 $x(t-l_1), x(t-l_2), \ldots, x(t-l_w)$ から最適な部分集合を選び出すものである。

2012年、研究代表者(谷澤)と研究協力者(中村)は、RARモデルによって式(1)の形に表わされた時系列 データは、各項 $x(t), x(t-l_1), x(t-l_2), \dots, x(t-l_w)$ をノードと解釈し、各時間遅れ項から時刻tの項x(t)へ向う連結線を引くことにより、有向ネットワークとして表現できることを指摘した。また、谷澤・中村は、 その手法を地震データ等に適用し、振動の定性的な違いがネットワークトポロジーの違いとして明確に表現さ れることも見出した [1, 2, 3]。(図1参照。)RARモデリングは多変数の時系列データにも用いることができ、 このネットワークを用いた可視化法は多次元の時系列データ解析にも有効であることがわかっている[4]。

時系列モデリングに基づくデータ解析は、実際に観測されたデータを用いて行うことができ、そのデータを 生み出す微視的メカニズムを知る必要がない。この点で、時系列モデルをネットワークとして表現し解析する この手法は、プラズマ乱流のように微視的メカニズムが複雑で第一原理からの計算が困難な系を理解するため の有効な手段になり得ると考えられる。



図1 1982年3月の浦河沖地震での振動データを5つの区間に分け、区間1、区間3、区間5を谷澤・中村の手法によりネットワークとして視覚化したもの。振動の定性的な性質の違いがネットワークトポロジーの違いとして明確に表現されている。

# 3 今後の研究の方向について

円筒形直線型プラズマ内ドリフト波乱流の各位置での物理量は多次元時系列データとして表現される。さま ざまな状況下におけるドリフト波乱流の数値シミュレーションデータを、谷澤・中村の手法により複雑ネット ワークとして視覚化し、データが表現する物理とネットワークトポロジーとの対応関係を解析していく。主な 解析対象は抵抗性ドリフト波乱流コード Numerical Linear Device を用いてシミュレートされる直線装置プ ラズマにおける乱流データである。また、合わせて実測データの解析により、プラズマ乱流の非局所的相関関 係の解明も行いたい。

# 4 研究成果発表

現在のところなし。

# 参考文献

- Tomomichi Nakamura and Toshihiro Tanizawa: "Networks with time structure from time series," Physica A, Vol. 391, pp.4704-4710 (2012).
- [2] Toshihiro Tanizawa and Tomomichi Nakamura: "Complex network from time series," the Proceedings of 2011 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2011), Kobe, Japan, Sep 4-7, 2011, pp.690–692 (2011).
- [3]「時系列データの持つ構造の推定方法及び装置,記録媒体ならびにプログラム」,発明者:中村知道,谷澤 俊弘,桜田一洋,特許出願番号:2011-144894 (2011).
- [4] David M. Walker, Antoinette Tordesillas, Tomomichi Nakamura, and Toshihiro Tanizawa: "Directed network topologies of smart grain sensors," Physical Review E, Vol. 87, 032203 (2013).

# 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

核融合科学研究所 ヘリカル研究部 田村直樹

#### 研究の目的

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することで、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 評価手法を提示することに成功している。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

本研究で行っている確率論的手法による磁場閉じ込め高温プラズマ中の電子熱輸送の状態評価では、その過程で「時間」に関する情報が失われてしまう。しかしながら、熱輸送の状態の、特に安定性を議論しようとした時、その状態を決定づけている時間スケールを知ることは非常に重要である。また、最近の磁場閉じ込め高温プラズマに関する研究において、一つの事象に対して複数の時間スケールが観測されている例があり、事象に対して特徴的な時間スケールは自明ではない可能性がある。これらのことを踏まえて、電子熱輸送の状態評価で取り扱っている実験データ中に現れる特徴的な時間スケールの抽出を試み、それが確率論的手法によって評価された電子熱輸送状態とどのような関係性を持っているのか考察した。

#### 研究結果

核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)で測定された電子サイクロトロン放射信号から評 価された電子温度勾配の空間分布の時間発展と電子熱流束の空間分布の時間発展を図1に示 す。図1の横軸(時間軸)は、LHD プラズマの周辺部を冷却するために LHD プラズマに入射され たトレーサー内蔵固体ペレット(TESPEL)のプラズマ侵入時刻を t = 0 としている。図1(a)より、 TESPEL がプラズマに侵入した直後、プラズマ周辺部の広い領域(ρ > 0.62)で電子温度勾配が 瞬間的に増加していることが分かる。これは、TESPEL 入射に伴う同空間領域の電子温度の瞬間 的減少が原因と考えられる。これを発端として、プラズマ中心部にまで電子温度勾配の変化フロ ントが伝播している(図1(a)中の赤斜破線)ことも分かる。ここで注意すべきことは、図1(b)より、こ の時非常に広い領域(p < 0.62)における電子熱流束が既に変化を開始している点である。この 非常に広い領域における電子熱流束の変化は、既に同プラズマにおいて発見されている長い相 関長を持つ揺動との非局所相互作用によるものと考えられる。したがって、図1(a)で示されている 電子温度勾配の変化フロントの伝搬は、非局所輸送現象の直接的原因ではなく副次的なものと 考えられる。一方、電子温度勾配の変化フロントが弾道的にプラズマ中心部まで伝搬した後、広 い領域(p < 0.4)で電子温度勾配は時間遅れなく変化していることが分かる。つまり、非局所輸送 現象が発現した後の電子温度勾配の変化に二つの時間スケールが存在していることが明らかと なった。



図1. LHD においてトレーサー内蔵固体ペレット(TESPEL)入射によって非局所輸送現象が発現した場合における(a)電子温度勾配の変化分の空間分布の時間発展と(b)電子熱流束の変化分の空間分布の時間発展。

# 考察

確率論的手法による磁場閉じ込め高温プラズマ中の電子熱輸送の状態評価だけでは、各空間 位置の電子熱輸送がどのような時間スケールで相互作用しているのかまでは分からなかった。し かし、今回の解析により、非局所輸送現象が発現した後には二つの時間スケールが存在すること が明らかとなった。いずれの時間スケールも、輸送の非局所性との関係が強いと考えられる。

# 研究成果報告

ここで示したような解析結果を以下の学会で発表した。

N. Tamura, K. Ida, S. Inagaki, T. Tokuzawa, K. Itoh, K. Tanaka, H. Tsuchiya, T. Shimozuma, S. Kubo, Y. Nagayama, S. Sudo, H. Yamada and LHD Experiment Group, "*A short-lived metastable state of electron heat transport in edge-perturbed LHD plasmas*", 14th International Workshop on H-mode Physics and Transport Barriers (October 2-4, 2013, Kyushu Univ., Fukuoka, Japan)

# 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) 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

プラズマ研究の中でも乱流構造に関する実験研究においては要求される計測には、 高いレベルの時間分解能と空間分解能を同時に満たすことが望まれる。微細構造を計測する には非接触型の計測が必須であるが、磁化プラズマにおいては電子温度計測となる電子サイ クロトロン放射(ECE)計測はその候補となりうる。しかし、ECE計測は背景ノイズや機器 に由来する熱ノイズが多いことが難点である。近年、ノイズ提言の手法としてコリレーショ ン ECE が広まりつつあるが、従来以上の多チャンネル計測となることや、狭帯域のマイクロ 波計測となる等ハードウェア的な煩雑さが増す割には解析の柔軟性が乏しい。そこで、単一 チャンネルかつノイズを数値的に除去できるデジタルコリレーション ECE 計測を提案し、一 昨年度より共同研究にて解析手法の開発を行った。そこで、本年度は実データの取得とその 解析を試みた。

#### 2. デジタルコリレーションECEの概要

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(RF:~100GHz)からヘテロダイン検波を行った中間周波数帯(IF:~数GH z)を直接デジタイジングすることが可能となった。そこで、IFデジタイジングされたデジ タルデータで数値解析的に コリレーション解析を行う手法を本研究で「デジタルコリレーシ ョンECE」(DCECE)として提案している。図1に従来型のマルチチャンネル型 ECE 計

測とDCECEのシステ ム図を示す。従来型の マルチチャンネル部分 の素チャンネル部分 とデタイザーで置るの で数なたいできるの 彼数特性なるの用 くくなった F データ収集には向いて



# 3. LHD プラズマデータ取得

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、134-150GHzのECE信号を132GHz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(LabMaster 10-36Zi, teledyne lecroy 社製, バンド幅36GHz, サ ンプリングレート 80GHz, データ取得時間 6.4msec) にて取得することができた。同時に、 従来型のマルチチャンネル型のラジオメーターでも同 ECE 信号を観測し、比較ができた。観 測したプラズマは ECH および NBI で加熱された電子温度 4 keV 程度のプラズマであり、観 測領域はトーラス外側の規格化小半径 ρ=0.2-0.5 である。図2(a)に IF 信号と示し、図2(b) にそのスペクトラムを示す。図2(b)の横軸0GHzは $\rho \sim 0.5$ の ECE132GHz に相当する。 ECEをIFにダウンコンバートするために使用したミキサーの有効周波数特性が18GHz未 満に表れている。電子温度を絶対値較正する場合には周波数特性を考慮する必要があるが、 狭帯域の温度揺動に着眼している場合には、平均温度で規格化するために周波数特性は問題 にならない。図2(c)には従来型ラジオメーターによる電子温度揺動(赤線)と図2(b)の6 -7kHzのパワースペクトラムの時間変化から得られる電子温度揺動(黒線)が示される。 IF スペクトラムの時間幅の取り方と平滑化変数にもよるが、図に示すように、従来型より早 いサンプリングレートの温度揺動を取得することができる。その温度揺動の平滑化されたス ペクトラムを図2(d)に示す。100kHz 以上のいくつかパワーピークを見ことができたが、こ れらの揺動について引き続き注意深く解析を行う。



図 2 (a)IF 信号、(b)単一 IF スペクトラムと平滑化された IF スペクトラム、(c)IF スペクトラム の時間変化より得られる電子温度揺動と従来型ラジオメーターによる電子温度揺動、(d) 電子温 度揺動スペクトラム

#### 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

2014 年 3 月 3 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

今回は、従来の報告に加え、実際に取得済みのビッグデータをハンドリングしながらその 解析法を議論するための作業会を兼ねた。

技術論:高速ディジタルオシロスコープや高速カメラにより、1 秒程度のプラズマ放電実験において、1-10GBのデータが取得されるようになった。自由度の高い小型装置の実験では 100 回程度の放電を行い、乱流の統計的性質を求める。このため解析対象となる乱流デ ータは 1TB となる。このような巨大データに対しては近代的なコンピューティング技術が 必要となる。今回の作業会では最近のデータ処理技術について使用するプログラミング言 語や数値アルゴリズムを検討する。

統合化:本カテゴリーにおける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. シミュレーションと連携した乱流物理の構築
  - ·プラズマ乱流の過渡応答シミュレーション(乱流長距離相関の観測)
  - ・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
  - ・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
  - ・電子温度勾配モードと低周波数モードとの共存と競合
  - ・イオン温度勾配モードの同定
- 2. 新たなリモートセンシング技術の開発
  - ・先進マイクロ波周波数コム反射計の開発
  - ・レーザー誘起蛍光法によるプラズマ乱流の観測
  - ・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. ビッグデータからのパターン抽出
  - ·熱パルス伝搬の瞬時位相と瞬時位相の検出(Hilvert 変換)
  - ·cineMRI 法を応用した、乱流パターン抽出法の開発

今回は巨大データが取得·蓄積された事による研究課題の鮮明化をはかる。プラズマリモー トセンシング技術の進化によりプラズマを乱さずに高速、高精度で実験データを取得する 事が可能になってきた。この実験データの高精度化はシミュレーションにも更なる解像度 を要求する。このように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 る事を期待する。

議論:使用するツールへの影響を議論する。ウェーブレット解析やバイスペクトル解析は、 解析結果のデータが元データよりも大きくなる。このような手法の適用のノウハウについ て議論を行う。

今後の予定

個別課題間の統合を更に進める。新たなリモートセンシング技術について、レーザーの波 面検出に注目し、研究協力者を開拓する。

# 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℃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,さらに径方向電場 による E×B シアの形成と,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.これらの ETG モード及びドリフト波モードに対する  $E \times B$  シアの効果を調べる ため,電子源電位  $V_{eel}$ を変化させて垂直方向電場(*E*)を形成・制御し,それに起因する  $E \times B$  シ
アを制御しながら実験を行った.

図 2 に電子温度勾配が (a) 弱い場合 ( $\nabla T_e \sim 1.0 \text{ eV/cm}$ ) と (b) 強い場合 ( $\nabla T_e \sim 2.4 \text{ eV/cm}$ )の  $E_r$  に対する ETG モ ード及びドリフト波モードの $\tilde{I}_{er}/\tilde{I}_{er}$ の依存性を示す. ETG が小さい場合, ETG モードの揺動強度は電場の符号によら ず,ある閾値を超えると ( $|E_r| > \sim 1 \text{ V/cm}$ )抑制され,理論 的な予測と一致することが明らかとなった. 一方, ETG が 大きい場合は, ETG モードの揺動強度が -0.6 V/cm <  $E_r$  < 0 V/cm (比較的弱い電場)の領域で抑制され, ETG が小さ い場合と異なる傾向が観測された.

図3にETGを変化させた場合の Eに対する高・低周波 密度揺動間のバイコヒーレンス  $\hat{b}^2$ の依存性を示す. Eを 変化させ  $E \times B$ シアを制御したところ, ETG が小さい場合 は非線形結合度の変化はなく, ETG が大きい場合のみ負の Eの強度が強くなることに従って, ETG モードとドリフト 波モードとの非線形結合度が強くなることを観測した. こ の結果から, -0.6 V/cm <  $E_r$  < 0 V/cm の領域では,  $E \times B$ シアによって ETG モードとドリフト波モードの非線形結 合度が強まり, ETG モードからのエネルギー移送が増加す ることで ETG モードの揺動強度が減少したと考えられる. すなわち,  $E \times B$ シアが ETG モードの抑制のみではなくド リフト波モードとの非線形結合度にも影響を与えること を初めて観測した.



図2: ETGが (a) 小さい場合と (b) 大 きい場合の *E*₆に対する高・低周波密度 揺動の規格化振幅強度の依存性.



図 3: ETG を変化させた場合の *E*に対 する高・低周波密度揺動間のバイコヒー レンスの依存性.

## 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] "Plasma structure control and new-concept plasma process for novel nano-bio materials", T. Kaneko, The 12th Asia Pacific Physics Conference (APPC12), Makuhari Messe, Chiba, Japan, 2013 年 7 月 14~19 日.
- 2) [招待講演] "電子温度勾配モードとドリフト波モードのマルチスケール非線形結合機構解明",金子俊郎,文贊鎬,畠山力三,応用力学研究所 RIAM フォーラム 2013,九州大学応用力学研究所, 福岡, 2013 年 6 月 6 日.
- 3) [招待講演] "直線磁化プラズマにおける電子温度勾配揺動の観測", 文贊鎬, 畠山力三, 金子俊郎, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 徳島大学, 徳島, 2013 年 9 月 25~28 日.
- 4) "Dynamics of Nonlinear Coupling between Electron-Temperature-Gradient Mode and Drift-Wave Mode in Linear Magnetized Plasmas", C. Moon, T. Kaneko, and R. Hatakeyama, Physical Review Letters, Vol.111, No. 11, pp.115001-1-4. 2013.

二次元イメージデータからのプラズマ乱流解析技法の開発

核融合科学研究所 ヘリカル研究部 大舘暁

目的

プラズマの揺動の情報を含んだ放射イメージの解析からプラズマの揺動の性質を調べるのが 本共同研究の目的であり、PANTA プラズマからの可視光の放射を高速度カメラで計測したデータ を解析対象とする。本報告では2014年2月13日に行った実験の初期解析結果を主に報告する。

#### 実験結果

図1に示すように、PANTA 装置の放電部の対向面に高速度カメラを設置し、軸に平行な方向か ら高速度カメラによる測定を行った。図2に測定データの一例を示す。64 ピン静電プローブア レイが影として映っているのがわかる。像のまわりに黄色で示したフレームは測定周波数に対応 した測定可能範囲であり、像の明るい部分をほぼカバーし、揺動の典型的な周波数よりも十分速 い 50kHz のフレームのデータの解析を行った。



図1 PANTA装置と高速度カメラの配置

プローブアレイによるイオン飽和電流の揺動のスペクトルを図3に示す。大部分のパワーは 10kHz以下、ポロイダルモード数3以下に集中していることがわかる。この時の高速度カメラの 動画像を特異値分解法で分解した結果を図4に示す。高速度カメラの画像の強度はArI、IIが主 成分で主として密度揺動を反映した情報と考えられる。

特異値の減少分布からはコンポーネントの7番程度までは意味がある。それより小さいコンポ

ーネントはノイズの影響を強く受けている可能性がある。特異値分解によりデータは相互に直行 する m = 1[~]3 のモードに分解された。コンポーネント 1,2の周波数は2.4kHz であり、図3に comp1,2 と示した低周波のピークに対応する情報が観測されている。また、コンポーネント5,6 はポロイダルモード数3であで、周波数は6-8kHz であり、図3のコンポーネント5,6 と示した ピークに対応するものと考えられる。m=1, m=2に関連した複数のモード(コンポーネント3,4,7) も同時に検出されている。特異値分解法では、観測時間内での空間的・時間的な相関から、相互 に直行するモード構造に分解しているため、観測時間内にモード間結合があるような場合に単純 な空間構造を持つモードに分解できなかったものと考えられる。



図2 高速カメラの測定周波数と測定可能エ リア。図中緑の枠は図4で示す計測結果の表示 域を示す。



図3 イオン飽和電流の周波数・ポロイダル
 モードスペクトル。Comp1,2 と Comp5,6 は
 図4の空間的特異ベクトルに対応する。

前年度の横の窓からの測定に比べると、軸上の測にはモード構造を分離しやすいようにおもわ れる。プラズマ光の強度分布を使って位置を調整し軸上での測定を行ったつもりだったが、デー タを見るとやや斜めからの観測であった可能性があり、今後アライメントの精度を向上させる必 要がある。それにより磁力線上に広がっている揺動の磁力線垂直方向の動きを測定できる。



図4 高速度カメラの動画像の特異値分解法による分解結果。特異値の分布と(図上)、時間的固 有値、空間的固有値を0番目の成分から9番目の成分まで示した。イメージの表示範囲は図2の 緑枠で示した位置に対応する。

## 今後の解析手法の開発

これまで、モードの空間構造の検出は可動式の静電プローブによる時空間相関解析より求めら れていた。軸上からの高速度カメラの測定により、空間構造の同定をより簡便に行うことができ ることを示すことができた。各点での計測結果が同時計測であることは、時空間相関解析より優 れた点であり、モード間の相互作用についてさらに解析を進めることができるものと考えられる。 現在は解析用のコンピュータの制約で全動画像データを実メモリ中に保持することができてい ないため、bi スペクトル解析などを行うことができていない。大容量メモリを搭載した解析用 のコンピュータを NIFS に準備しているので、静電プローブデータと動画像データの双方を用い て、径方向の情報を含んだ相関解析を今後行っていきたいと考えている。

## 今年度に出版された論文

[1] S. Ohdachi, et. al., "Spatial Mode Structure of Magnetohydrodynamic Instabilities Observed by a Tangentially Viewing Soft X-ray Camera in LHD" accepted by IEEE transactions on plasma science

[2] T. F. Ming, S. Ohdachi et. al., "Estimate of the deposition of carbon pellets using a high-speed VUV imaging system in the LHD", Plasma Science and Technology, Vol. 15, No. 12, (2013) p1178-1183.

## 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:

- 1. 昨年度に引き続き、代表的な相関解析である Bispectral analysis について、並列化 FFT ライブラリの利用により、処理の高速化を図った. 通常の逐次処理、OpenMP に よる共有メモリ型並列処理、MPI による分散メモリ型並列処理のそれぞれについて、 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(gcc, icc) 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 による処理を行い, 並列処理 の評価を開始した.

**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

# 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

背景・目的

静電プローブは、簡便、安価でありながら高時空間分解能を有する計測器であり、プラ ズマの乱流研究において強力なツールである。直線型装置 PANTA において、マルチチャン ネルプローブはプラズマ乱流の時空間構造観測に用いられ、乱流の自発的構造形成の物理 の解明に大きく寄与してきた。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ためには最適なプローブ設計を進める必要が 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 ス装置に適用可能、且つ乱流研究に適したプローブを開発する。また、得られたデータの 解析手法についても検討を行う。上述した観点から、周辺乱流揺動の可視化を目指し、可 視化用のプローブの開発とそれを用いた可視化手法の検討を行う。揺動構造を可視化する ことによって、様々なプラズマのパラメータに依存して乱流を特徴づける指標がどのよう に変化するか視覚的に示すことが期待できる。今年度は、可視化手法として、解析信号を 用いることで信号間の強度、および位相差を高い時間分解能にて評価する手法を考案した。 この手法の誤差評価の検討を行うと同時に、条件付平均法を用いることでその誤差を低減 できることを示した。更に実際にビーム放射分光計測器のデータに手法を適用することで、 揺動の二次元構造を示すことに成功した。本手法は開発を進めている二次元プローブを含 め広く適用可能である。

#### 2. 解析信号を用いた揺動の可視化手法

フーリエ変換を用いたスペクトル解析においては、時間・周波数の不確定性原理 (Δt·Δω~1/2)によって時間および空間分解能の両立は困難である。例えば、時間的に振幅、

および周波数が変わる信号 x(t) =  $A(t) \cdot \exp(2\pi i \cdot f(t)t)$ を考え、この 信号に短時間フーリエ変換を用 いると、元の信号x(t)はある時間 に振幅と周波数を定義できるに も関わらず、時間・周波数空間 双方に広がったスペクトログラ ムを得ることになる。この原因 は、ある任意波形を異なる周波 数の波の和で構成されるという 考え方を基としており、時間分 解能に優れると一般にいわれる ウェーブレット変換等において も同様である。乱流のような多 くの周波数成分からなるような 場合においては、この考え方は 自然であるが、時間的にその振 幅や周波数を変化するような単





ー周波数のコヒーレントなモード、例えば非線形的な挙動を示す MHD 不安定性、を記述することに対しては適していない。

ここで解析信号を用いた解析手法に注目する。解析信号は、複素数であり Z(t) = r(t)·exp (i $\theta(t)$ )とあらわすことができ、元信号 x(t)のヒルベルト変換によって簡単に得ることができる。r(t), $\theta(t)$ はある時間での強度、位相であり瞬時強度・位相と呼ばれる。また、この瞬時位相の時間微分 d/dt( $\theta(t)$ )=  $\omega(t)$ は瞬時周波数と呼ばれる。瞬時強度に関しては揺動のエンヴェロープを評価する際に一般によく使われている。このように、時間的にその振幅や周波数を変化するような単一周波数の信号に対しては、解析信号によって表現することで直観的にその特徴を把握することができる。ここで、さらに瞬時位相の差である瞬時位相差という考え方を導入することで、2 つの信号の位相差の時間変化を評価することができる。2 つの解析信号  $Z_{1,2}(t) = |Z_{1,2}(t)| \exp(i\theta_{1,2}(t))$ の内積をとると、 $Z_{1}^{*}(t) \cdot Z_{2}(t) = |Z_{1}^{*}(t)| \cdot |Z_{2}(t)| \exp(i\varphi(t))$ であり、ここで $\varphi(t) = \theta_{2}(t) - \theta_{1}(t)$ となり、ある時間の両信号の位相差を評価することができる。

瞬時位相差を評価した例を図1に示す。まず、非線形挙動を示すバースト的な MHD 不安 定性を考え、時間的に変動する強度と周波数を有する $x(t) = A(t) \exp(2\pi i \cdot f(t)t)$ と表記可能な信 号を作成した(図1左上)。ここで、揺動は 6ms ごとに繰り返し現れ、周波数は 90kHz から 30kHz まで変化するとした。この信号に、ガウシアンホワイトノイズを重畳した波形が、図 1 左下に示されており、この両者の位相差を評価した結果が図1右の上下に示される波形で ある。二つの信号間の時間ラグがない場合( $\tau=0\mu s$ )、バースト的 MHD を模擬した信号の 強度が十分強い時間帯において位相差がゼロとなっており、位相差が正しく評価されてい ることがわかる。さらに、時間のラグが存在する場合( $\tau=10\mu s$ )には周波数が時間的に変 化していることに起因して位相差が時間的に変化していることがわかる。

3. ビーム放射分光計測の結果への本手法の適用例

ここで考案した手法を実際にビーム放射分光計測による密度揺動の計測結果に適用した 結果を図2に示す。このときプラズマは中性粒子ビーム単独で維持されており、およそ0.5 msの短い周期で再帰的に高速イオン励起不安定性が発生している。ビーム放射分光法で計 測した密度揺動の強度およびチャンネル間の位相差を評価し、さらに条件付平均法を用い ることで平均的な揺動構造を再現した。揺らぎの強度と計方向の位相構造は時間的に変化 し、らせん状の構造が形成され、そして消失していく。高速イオンとプラズマの非線形的 な相互作用の結果として、実空間、あるいは速度空間の高速イオン分布の変化によって、 このような構造発展が起こっていると考えられる。



図 2 ビーム放射分光計測によって計測したあるプラズマ断面の密度の揺らぎの二次元構造。不安定 性の典型的な平均的な(-0.1, 0, +0.1ms),不安定性が発生するたびに、らせん状構造が形成され、 また消失していく。

## 直線磁化プラズマにおけるストリーマー構造の解析

九州大学 基幹教育院 山田 琢磨

## 目的

直線磁化プラズマは低温度で近接性に優れ、乱流計測に有意である。九州大学応用力学研究所の直線 プラズマ実験装置 PANTA の前身 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、その発生のメカニズムや制御方法、乱流輸送に与える影響など、未だに解明さ れていない研究課題が多い。そこでストリーマーが発生している PANTA 実験装置のエンドプレートに バイアス電圧をかける実験を行い、ストリーマー構造の変化を観測することで、ストリーマーのコント ロールや構造の発生機構の解明など、更なるストリーマー研究の進展を目指す。

#### 実験方法

PANTA を用いてストリーマー実験を行い、エンドプレートバイアス実験によってストリーマー(周 方向に揺動が局在した構造)の空間構造がどのように変化するかを観測した。PANTA は軸方向の長さ が z = 4 m、内径 r = 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 95 mm 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 0.8 mTorr に調整す 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 10¹⁹ m⁻³程度、電子温度は平坦 で 3±0.5 eV である。軸方向 z = 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 r = 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 z = 1.625 m もしくは 3.625 m の位置には径方向 5 チャンネル静電プローブが 設置されており、プラズマの電子密度や浮遊電位分布を測定する事ができる。エンドプレートの近傍の z = 3.95 mの位置に、プラズマの直径のほぼ半分となる直径 50 mmの電極があり、50 V までの電圧をか けることができる。



図 1. エンドプレートに 50 V のバイアスをかけた時の(a)バイアス電流と(b) r = 10, 30 および 50 mm での 電子密度揺動。バイアス電流が低い状態を B1 モード、高い状態を B2 モードと呼ぶ。(c)ストリーマー、 B1 モード、B2 モードの時の電子密度・揺動分布。

#### 実験結果

ストリーマーが発生している状態(実験条件:磁場0.09 T、圧力0.8 mTorr)のエンドプレートにバイ アス電圧を最大50 Vまで印加した[3]。電圧20 V程度までは、バイアス電流は線形に増加し、5.5 Aに 達すると増加しなくなった。電子密度はバイアス電極の内側(r=10,20 mm)では徐々に大きくなり、 外側(r=30,40,50 mm)では小さくなり、やはり20 V以上では変化が止まった。揺動レベルも各径方 向位置で20 Vまでは徐々に減少していった。ところが50 Vになると、突然バイアス電流が2 つの値を 取るようになり、バイアス中に2 状態間で遷移を繰り返した。図1は0.3-0.45 sの間バイアスをかけた 時のバイアス電流と各径方向位置での電子密度・揺動である。バイアス電流が20 Vの時とほぼ変わら ない5.5 Aの状態をB1モード、8.5 Aに増加した状態をB2モードと呼ぶことにする。図1ではバイア ス中 B2モードからB1モードへ一度だけ遷移している。バイアス中、密度はバイアス電極の内側である r=10,20 mmでは増加し、外側のr=30,40,50 mmでは減少し、全体としてはピーキングする形となり、 B2モードの方がB1モードより変化が顕著である。密度揺動レベルはストリーマー、B1モード、B2モ ードの順に徐々に減少している。

次に、周方向 64 チャンネルプローブによって測定した r = 40 mm の位置でのイオン飽和電流の時空間 構造の変化を示したのが図 2[(a)はストリーマー状態、(b)は B1 モード、(c)は B2 モード]である。ストリ ーマー状態では、周方向に揺動が局在した構造が塊となって下方向にゆっくりと伝播しているのが分か るが、B1 モード、B2 モードと変化するにつれて、局在構造が消失し、周期的な孤立波状態へと遷移し ているのが分かる。このようにバイアス実験中にストリーマー構造が破壊され、密度揺動が抑制される 現象が確認されたが、その原因を探るために径方向 5 チャンネルプローブによって浮遊電位構造を調べ た。バイアス中も電子温度分布が平坦だと仮定すると、浮遊電位の勾配から径方向電場が推定できる。 実験では z = 1.625 m の位置ではバイアス中に径電場の変化は見られなかった。ところがエンドプレート に近い z = 3.625 m の位置では、バイアス中に径電場が-100 V/m から-200 V/m と大きく変化する事が確 認された。このことからこの現象は、エンドプレート付近で生じた径電場の変化によってプラズマ全体 の乱流構造の大きな変化が引き起こされたことが分かった。

## 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] T. Yamada et al., Nucl. Fusion 54, in press (2014).



図 2. 周方向 64 チャンネルプローブにより観測した(a)ストリーマー状態、(b)B1 モード、(c)B2 モードの 時のイオン飽和電流の時空間構造。各図の下に周方向角度 0 の位置の波形を載せている。

「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。

特に今年度は、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)において観測されている 高速イオン励起 GAM 発生時にバルクイオンのエネルギースペクトルが変化する現象の物 理機構の解明のために、GAM に伴う電位揺動とその空間構造を直接的に計測することを目 的として本研究を進めた。

実験方法

高速イオン励起 GAM からイオンへのエネルギーの流れに関しては、M. Sasaki et al. Plasma Phys. Control. Fusion 53, 085017 (2011)により理論的にその可能性が示されてい るが、本実験条件下においてイオンのエネルギースペクトルの変化を定量的に説明できる のか、共鳴条件が満たされているのか、などが明らかになっていない。GAM に伴う電位揺 動は重イオンビームプローブ (HIBP) を用いて測定するが、GAM の電位揺動の振幅が大 きく、HIBP のダイナミックレンジを超えるため、昨年度までは絶対値の正確な計測が出来 なかった。そこで今年度はダイナミックレンジを上げるため、プローブビームとして通常 用いる金イオン(Au⁺)ではなく、銅イオン(Cu⁺)を用いるためにイオン源の改造を行った。ま た、共鳴条件が満たされるための物理機構の候補の一つとして考えられるポロイダル断面 における非一様性を測定するために、HIBP のビームライン制御系の改良を行った。

実験結果

GAM の発生とバルクイオンのエネルギースペクトルの変化を再現し、その際の電位揺動

の計測を行うことが出来た。電位揺動の振幅は 7kV であり、これから GAM のエネルギー 密度は 1.7 J/m³ と見積もられた。FORTEC-3D コードを用いた GAM の減衰率は 2000(1/s) であり、これによるバルクイオン温度の上昇率は 35 keV/s と見積もられた。中性粒子分析 器(NPA)によるイオン温度計測により測定されたバルクイオン温度の上昇率は 30keV/s で あり、定量的に GAM によるバルクイオンの加熱と考えても矛盾が無い結果となった。ただ し、ここで用いた減衰率は、バルクプラズマの温度で決まる周波数を持つ GAM が、バルク イオンによって吸収される場合の減衰率であり、高速イオンによって励起される高周波数 の GAM の減衰率として用いるのは不適当である可能性がある。今後、正しい減衰率の評価 法の検討が必要である。

また、高エネルギーイオンとの共鳴により発生した GAM が低エネルギーのバルクイオン と共鳴することは直接的には困難である。共鳴条件を満たす可能性として高波数の電位揺 動の励起が考えられる。そのような揺動が励起されているかどうかを調べるために、ポロ イダル断面をスキャンできるように HIBP のビームライン制御系の改良を行った。ハード ウェアの整備は完了し、2次元電位分布の計測は行えたが、GAM の計測はマシンタイムが 無く行えなかった。これに関しては次年度以降の課題として残った。

· 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	准教授	х Х
清水昭博	核融合科学研究所	助教	
稻垣 滋(所内世話人)	九州大学応用力学硕	F究所	准教授
佐々木 真	九州大学応用力学硕	肝究所	助教

# 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。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、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。研究集会後も引き続き議論を深め、フ ェーズアレイ、アダプティブアレイアンテナを用いた計測・解析が一つの課題と考えられ た。データストリーミング法や Capon (DCMP) 法を用いた適応信号解析が共通の課題とし て上げられ、具体的な共同研究課題として進めることとした。大気乱流の3次元構造の解 像では、乱流構造の高さ方向分解で異なる周波数を用いた散乱計測が行われている。プラ ズマ密度分布計測でも、異なる周波数を用いた反射計測が行われている。両者ともフェー ズアレイ、アダプティブアレイアンテナを用いた計測・解析で、同一の解析手法が適用で きる。共同研究の成果は、6月に開催される国際会議(20th Topical Conference on High-Temperature Plasma Diagnostics) で発表するよう、投稿した。プラズマの輻射計測にお いても、単一周波数ながら同様の適応信号解析が適用可能であり、併せて同国際会議で発 表するよう、投稿した。プラズマ計測で併せてデータストリーミング法を取り入れた計測 システムを立ち上げており、新たな実験・計測の展開が期待される。

# 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、ミリ波雲レーダー(Cloud Profiling Radar; CPR)・ライダー等を用いた雲・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・ライダー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。EC 衛星用 CPR で計測するドップラー速度を用いた雲微物理量リトリーバルにおいて、鉛直流はリトリーバルされた物理量の不確定性を生む最も高い要因である。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とその評価が必要である。

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 ーダー・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、 高精度の鉛直流・雲物理量・降水物理量の観測データセットを作成する。

#### 2. 研究成果

#### 2.1 鉛直流計測データの処理手法の開発

WPR は、屈折率擾乱に起因するエコー(乱流エコー)のドップラースペクトルから鉛直流及び乱流強度 を計測する。近年のレーダーイメージング技術の発展に伴う高分解能化により、WPR の取得データ量は最 大で数 100GB/日に及ぶ。そのため、計算機実験により、高速かつ高精度でドップラースペクトルのパラメ ータ(受信強度・ドップラー速度・スペクトル幅;以下、スペクトルパラメータ)を計算する手法を開発した。さ らに、スペクトルパラメータの計測誤差を定量的に評価する方法を確立した。開発成果を学会で発表すると ともに、査読付き論文に投稿した。

50MHz 帯 WPR は、乱流エコーと降水粒子エコーを分離して受信可能であるため、降水領域中の鉛直 流を高い時間・鉛直流で計測できる唯一の測器である。しかし、降水領域内の鉛直流測定における降水粒 子の影響を定量的に評価し、さらに降水粒子の影響を極小としつつ鉛直流を得る手法は確立していない。 昨年度に引き続き、降水領域内の鉛直流を精度よく得る手法の開発に取り組んだ。計算機実験により、乱 流エコーを検出するエコー強度範囲に制約を加えてドップラー速度(鉛直流)を推定することで、鉛直流計 測に置いて降水粒子の影響を極小化できることを示した。さらに、エコー強度範囲に制約を加えて得た受 信強度とスペクトル幅に補正を加えることで、これらの計測精度を向上させる手法を開発した。開発成果を EC 衛星検証グループの研究成果発表会で報告した。現在、研究成果を査読付き論文に投稿する準備と ともに、50MHz 帯 WPR 等の観測データセットの作成を進めている。

### 2.2 1.3GHz 帯レンジイメージング WPR の開発

レンジイメージングは、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 の高鉛直分解 能(30-50 m)計測を可能とする。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。昨年度に、1.3GHz帯WPR にレンジイメージング機能を実 装することで、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 を実現した。今年度は、1.3GHz帯レンジイメージング WPR で取得した大気境界層の鉛直流計測データの 解析を進めることで、大気境界層内のサーマル、下層雲、及び大気重力波に伴う鉛直流変動の詳細を示 すことに成功した。研究成果を学会で発表するとともに、査読付き論文に投稿する準備を進めた。

## 2.3 WPR 用デジタル受信機の開発

WPR の計測精度劣化の要因となる地面からの不要信号(クラッタ)のアダプティブな抑圧には、多チャンネルかつ安価な受信機が必要である。また、50MHz 帯 WPR の計測高度向上には、オーバーサンプル付きレンジイメージング測定機能の付加が望ましい。多チャンネル受信や 50MHz 帯 WPR の性能向上を目的とした、WPR 用デジタル受信機の開発を進めている。開発中のデジタル受信機は汎用ソフトウェア無線機である Ettus Research 社製の USRP を用いるために低コストである。さらに、リアルタイム信号処理をパソコンで実施するため、柔軟な信号処理の実装が可能である。今年度は、50MHz 帯 WPR へのデジタル受信機の付加に必要な諸検討を実施した。さらに、特定研究の研究集会において、WPR のデジタル受信機のシステム紹介を実施した。

## 3. 今後の展開

現在作成中の50MHz帯WPR・気象レーダー・CPR等の観測データセットを用いた雲・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。デジタル受信機などの計測シス テムの開発にも取り組む。特定研究の他課題との情報交換を進めることで、特定研究の発展可能性を探っ ていきたい。

## 4. 研究成果

## 論文及びプロシーディング

- ・ Gan, T., M. K. Yamamoto, H. Hashiguchi, H. Okamoto, and M. Yamamoto, Error estimation of spectral parameters for high-resolution wind and turbulence measurements by wind profiler radars, *Radio Sci.*, 投稿中, 査 読有り.
- ・ 橋口浩之,山本真之, T. Gan, Noor Hafizah Binti Abdul Aziz,山本衛,中城智之,岡本創,1.3GHz 帯レンジイメ ージング大気レーダーによる大気境界層内の高分解能観測,第7回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウ ム(第233回生存圏シンポジウム)プロシーディング,京都府宇治市,2013年9月,査読なし.

## <u>学会発表</u>

- Yamamoto, M. K., Y. Shibata, M. Abo, T. Mega, H. Hashiguchi, N. Nishi, H. Okamoto, T. Shimomai, M. D. Yamanaka, M. Yamamoto, Timbul Manik, and Syafrijon, Measurement of vertical air velocity and hydrometeors in stratiform precipitation by 47-MHz wind profiler radar and 532-nm polarization lidar, 36th Conference on Radar Meteorology, 2A.5, Breckenridge, Colorado, USA, 16-20 September 2013.
- Gan, T., M. K. Yamamoto, H. Hashiguchi, M. Yamamoto, and H. Okamoto, Accuracy assessment of spectral parameters of range-imaging wind profiler radars, 第7回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム(第233回生存圏シンポジウム),京都府宇治市,2013年9月.
- ・ 橋口浩之,山本真之, T. Gan, Noor Hafizah Binti Abdul Aziz,山本衛,中城智之,岡本創,1.3GHz 帯レンジイメ ージング大気レーダーによる大気境界層内の高分解能観測,第7回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウ ム(第 233 回生存圏シンポジウム),京都府宇治市,2013 年9月.
- Gan, T., M. K. Yamamoto, H. Hashiguchi, M. Yamamoto, H. Okamoto, Accuracy assessment of spectral parameters for RIM WPRs, International Symposium on Earth-Science Challenges (ISEC) 2013, P03, 京都府宇治市, 2013 年 10 月.
- ・ 山本真之, T. Gan, 岡本 創, 大野 裕一, 橋口 浩之, 山本 衛, ウィンドプロファイラーによる鉛直流計測を活用 した EarthCARE 衛星雲プロダクトの検証提案, 日本気象学会 2013 年度秋季大会, A366, 宮城県仙台市, 2013 年 11 月.
- Gan, T., M. K. Yamamoto, H. Hashiguchi, M. Yamamoto, H. Okamoto, Accuracy assessment of spectral parameters of range-imaging wind profiler radars, 日本気象学会 2013 年度秋季大会, D211, 宮城県仙台市, 2013 年 11 月.
- Yamamoto, M. K., T. Gan, and H. Okamoto, Validation of EarthCARE product using vertical wind measurement by wind profiler radars, Joint PI Workshop of Global Environment Observation Mission 2013, 東京都千代田区, 2014 年 1 月.
- ・ 山本真之, ウィンドプロファイラーレーダーによる大気の流れ・乱れの計測, 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, 福岡県春日市, 2014年1月.

#### リアルタイム画像生成のための合成開ロ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 レーダ等、リモートセンシングの分野でも有用である。我々も平成 19 年度よりスポットライト方式マ イクロ波合成開口レーダ(Synthetic Aperture Radar: SAR)の研究を進め、平成 24 年度までに周波数 15.5 ±0.8 GHz のシステムを製作、平成 24-25 年度ヘリコプター搭載による画像取得試験を実施した。

マイクロ波 SAR では電波法により周波数帯域が制限されるため、十分な空間分解を実現することが 困難という問題があった。代表者等は、この問題をクリアするシステムとして、マイクロ波で振幅変調 された近赤外レーザレーダを用い、合成開口処理により被測定対象の二次元、三次元イメージングを実 現することを提案してきた。レーザの変調周波数は電波法の規制に該当しないため、1-18 GHz の超広帯 域変調が可能であり、反射光信号の解析を復調マイクロ波領域で行うことにより、マイクロ波 SAR で は実現不可能な空間分解 1-10 cm が期待される。

本システムは、光無線融合を利用した計測開発ということができる。空間に放射されるのは、安全性 に優れた赤外光であり、マイクロ波は空間に発射されないことに加えて以下の特長を有している。 i)従来型パルスレーザレーダでは反射レーザ光の強度だけが測定され、位相データを測定することは できない。本開発システムでは、通常のマイクロ波 SAR と同様に、振幅・位相両成分を測定できる。 ii)合成開ロレーダにおける信号処理において、しばしば SN 比低下の原因となるスペックル雑音につ いては、マイクロ波を光源とする場合大きな問題となるが、本研究のようにレーザを光源とする場合は 問題とならない。一方、レーザを使用する際課題となるコヒーレント長については、本研究のように復 調したマイクロ波領域で信号処理を行うため殆ど影響してこないことになる

2. マイクロ波変調レーザ応用合成開口レーダ

「超広帯域マイクロ波変調レーザ」、「スポットライト方式合成開口レーダ」、および「画像処理・制御システム」を組み合わせた全システムのブロック図を図1に示す。平成24-25年度青色の装置の導入を 進め、平成25年度研究の基礎となるマイクロ波変調レーザレーダの検証実験を進めた。赤色部分は、 平成26年度の導入を目標としている。黒色部分は、マイクロ波合成開口レーダで製作してきたものと 同様で、併用可能である。

システムは、外部マイクロ波発振器信号により変調された赤外レーザ(波長 1.55 µm)を発生する光 送信機、光伝送のための光ファイバー、ファイバーカップラおよび光学系、光出力を被測定対象に照射 したのち反射波を受信および検知し、マイクロ波信号成分を復調する光受信機、および、復調マイクロ 波信号と参照波の干渉のためのマイクロ波ミキサから構成される。マイクロ波信号は、マイクロ波発振 器から分離された参照波成分とミキサで混合され中間周波数成分が得られることになる。

周波数掃引(FM)レーダでは、反射波の 全光路と参照波光路の間の差をL、光送信機 に入力する電圧制御マイクロ波発振器の掃 引周波数幅を Δf、掃引時間を Δt とすると、 反射波と参照波の干渉により得られる中間 周波数成分は次式で表される。

$$f_{IF} = \frac{L}{c} \times \frac{\Delta f}{\Delta t} = \frac{L_r}{c} \times \frac{\Delta f}{\Delta t} + \frac{\Delta L}{c} \times \frac{\Delta f}{\Delta t}$$
(1)

ただし、 $L = L_r + \Delta L$ 、 $L_r$ は送受信機内の実効 光路、接続する光ファイバー、光デバイスを含 む全光路から参照波光路を差し引いた値、 $\Delta L$ はレーザ光学系からは対象物までの距離、cは 光速である。



図 1. マイクロ波変調レーザ応用 SAR の構成.

#### 3. レーザレーダの原理的検証実験

図 2 (a) は、掃引周波数幅を変化させたときの中間周波数の変化を示す。掃引時間は $\Delta t = 18 \text{ ms}$ 、Lは 一定である。図 2 (b) は、掃引時間を変化させたときの中間周波数の変化を示す。掃引周波数幅  $\Delta f = 4 \text{GHz}$ およびLは一定である。中間周波数は掃引周波数幅および掃引時間の逆数に対して線形関係にあり、(1) 式が良く満足されている。上記テストを行った後、対象物体(ミラー)の位置に対する遅延時間(位相 遅延)を求めるレーダとしての原理検証実験を行った。その結果を図 3 に示す。中間周波数は対象物体 の位置に比例しており、上式は満足されている。この結果からレンジ方向の空間分解は ±(1-2) cm と評 価された。周波数帯域を広くとり線形性をさらに向上させれば、空間分解は改善することが期待される。



図 2. (a) 中間周波数 vs. 掃引周波数幅、(b) 中間周波中間周波数 vs. 掃引時間の逆数.



#### 4. まとめ

レーザレーダ装置としての原理的検証結果が得られた。測定の誤差評価から、レンジ方向の空間分解 ±(1-2) cm と推定された。電圧制御発振器の周波数掃引の線形性をさらに向上させればこの値は改善する ことが期待される。平成 26 年度は実験室内での画像生成試験(SAR の検証)に進む予定である。

## 5. 研究成果報告

[1] A. Mase, N. Ito, Y. Kogi, H. Ikezi, M. Inutake X. Wang, D. Kuwahara, Y. Nagayama *et al.*, Proc. Int. Symp. Electromagnetic Theory (URSI Commission B) (May 2013) pp. 242-245 (招待講演).

[2] X. Wang, I. Sakagami, and A. Mase, J. Electromagnetic Waves and Applications 27, 6, 758-771 (June 2013).

[3] 王、間瀬、池地、近木、犬竹、内野: 電気関係学会九州支部連合大会、熊本 (2013年9月24日).

[4] Y. Kogi, H. Ikezi, A. Mase, N. Ito, M. Sato, A. Suzuki, F. Sakai, S. Mizukami, K. Kameari, and M. Inutake, Proc. Asia-pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, Tsukuba (Sept. 2013) pp. 73.

[5] X. Wang, I. Sakagami, and A. Mase, Microw. Optical Technol. Letts., 56, 2, 301-304 (Feb. 2014).

[6] 間瀬、王、池地、近木、犬竹:平成 25 年度通研共同プロジェクト研究発表会 (2014 年 3 月 5 日).

6. 研究組織	
---------	--

間瀬	淳	九州大学産学連携センター	伊藤	直樹	宇部工業高等専門学校
近木衲	右一郎	福岡工業大学電子情報工学科	森山	敏文	長崎大学工学部
犬竹	正明	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	弘行		徳沢	李彦	核融合科学研究所
Ŧ	小龍	筑波大学プラズマ研究センター	出射	浩	九州大学応用力学研究所

# 25 特 3-3

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

1月に開催した研究集会のプログラムを以下に示す。

- 日 時: 平成26年1月28日(火), 29日(水)
- 場 所: 九州大学応用力学研究所本館中会議室
- 1月28日 (火曜日)

13:00-13:30	・研究集会主旨説明
	(九州大学応用力学研 出射 浩)
13:30-14:30	・高温高密度プラズマ中の加熱波動や揺動波動による
	協同散乱計測 (核融合科学研究所 久保 伸)
14:40-15:25	・LHD におけるミリ波加熱性能向上のための課題
	(核融合科学研究所 伊神 弘恵)
15:25-16:10	・完全ストークス変数による偏波面発展の記述
	(九州大学応用力学研 出射 浩)
16:20-17:05	・L-バンドマイクロ波放射計による海面塩分の全球観測
	(北大低温研 江淵直人・阿部泰人)
17:05-17:50	・テラヘルツ波を用いた高温プラズマ計測法の開発
	(核融合科学研究所 徳沢季彦)
17:50-18:35	・超広帯域マイクロ波変調レーザレーダシステムの開発
	(九州大学 間瀬 淳)

1月29日(水曜日)

- 9:00-9:45・ LHD におけるマイクロ波反射計を用いた波動計測<br/>(東京大学 江尻 晶)
- 9:45-10:30 ・QUEST における輻射計計測
  - (九州大学応用力学研究所 出射 浩)
- 10:30-11:15 ・ウィンドプロライラーレーダによる大気の流れ・乱れの計測
   (京都大学生存圏研究所 山本真之)

11:25-12:25 · 全体討論

12:25-12:40 ・ 今後の進め方について

講演の要旨は以下の通り。

・「高温高密度プラズマ中の加熱波動や揺動波動による協同散乱計測」

(核融合科学研究所 久保 伸)

協同散乱についての一般的なレビューをした後、LHD での加熱用 77GHz/1MW 出力のジャ イロトロンを用いた協同トムソン散乱計測した結果を紹介し、LHD において背景輻射とし ての電子サイクロトロン放射が大きいため、入射ビームの振幅変調を用いて散乱成分を分 離して、協同散乱スペクトルの取得に成功したこと、しかし、多重反射の影響と考えられ る背景散乱信号も受信される場合があることも明らかになった。また、この協同散乱計測 を用いて QUEST 装置での電子バーンシュタイン加熱波動の直接検出の可能性についての予 備的検討を報告し、議論を行った。

・ 「LHD におけるミリ波加熱性能向上のための課題」

(核融合科学研究所 伊神弘恵/講演 久保 伸)

磁場閉じ込め型のプラズマ実験装置である大型ヘリカル装置(LHD)では、プラズマの電 子サイクロトロン共鳴加熱のために、ミリ波帯(77GHz, 154GHz)の電磁波を真空中の準光 学アンテナからプラズマに照射している。照射された電磁波は高温高密度のプラズマが閉 じ込められている閉磁気面内領域に達する前に、エルゴディック層と呼ばれる低密度の領 域を通過する。従来、閉磁気面外の低密度領域では波動とプラズマの相互作用は弱く無視 できるとされていた。しかし最近のミリ波入射実験では、エルゴディック層において磁気 シアに起因するモード結合の効果により電磁波偏波が変化し、閉磁気面内の電子サイクロ トロン共鳴層で強吸収される電磁波モードへの結合効率が変化していることを示唆する結 果が得られている。エルゴディック層でのモード結合効果を考慮した入射偏波の最適化が、 ミリ波加熱性能の向上には必要であり、実験的/理論的に最適偏波を調べるための手法の 開発を進める必要がある。

・ 「完全ストークス変数による偏波面発展の記述」

(九州大学応用力学研究所 出射 浩)

入射電磁波のプラズマ中の偏波面変化を考える際、複屈折性と二色性がある。媒質中の 偏波面変化は、古くから光の分野で調べられ、いくつかの偏光板は必要なものの、強度測 定のみで偏波面を決定できるストークス変数を用いて、入射電磁波のプラズマ中の偏波面 変化を考察した。入射電磁波の吸収がある場合は、光の分野で通常、用いられる簡易スト ークス変数(3変数)を用いることができず、完全ストークス変数(4変数)を用いる必 要がある。複屈折性に起因する2つの固有モード展開で考える場合、固有モードは簡易ス トークス変数で表されるストークス球面で対向するベクトルで表現され、その直交性が担 保されるが、吸収を考える場合その直交性が崩れる。実際の電子サイクロトロン共鳴吸収 が起こる場合の固有モードの完全ストークス変数標記、モード展開、偏波面発展を表す方 程式が示され、実験解析への適用が紹介された。 電子サイクロトロン周波数帯静電波の衝突減衰効果のモデリングに関する研究 核融合科学研究所 プラズマ加熱物理研究系 伊神 弘恵

本研究の目的

本研究では主に衝突減衰効果によるパワー損失も考慮にいれた電磁波と電子バーンシュタイン波 (EBW)のモード変換領域付近の波動場の描像を、数値計算で得るための計算コードの開発を行うこと を目的としている。

電磁波の伝播モードの一つである異常波モードは、高域混成共鳴層において静電波的性質を持つ ようになるため、磁場のあるプラズマ中を伝播する静電波の一つである電子バーンシュタイン波 (EBW)とモード結合する。この結合過程の描像は1方向にのみプラズマのパラメータが変化する系で の平面波伝播(スラブモデル)を仮定した線形理論によって与えられてきた。しかし、衝突減衰や非 線形過程であるパラメトリック崩壊波の励起が無視できない場合、これらの効果による波動のパワ 一損失も考慮する必要がある。また、波動加熱/計測実験に用いられるアンテナの放射パタンは平面 波とは異なり、波動電場は有限の非一様な強度分布を持つため、波動場の広がりの範囲内で磁場や 密度が2次元的あるいは3次元的に変化する場合、スラブモデルでの線形理論を適用したモード変 換に関する解析は不正確となる。

EBW による高密度プラズマの加熱/電流駆動、ならびに EBW に由来する放射電磁波の計測は、QUEST 装置における重要な研究課題である。波動場の広がりや衝突減衰の効果を考慮してなお十分な EBW 加熱効率/EBW 由来波の受信信号強度が期待できるかを数値的に検討することは、重要である。

研究の方法

以下に述べる二つの方法での数値解析を行い、結果を比較する。また、高密度プラズマでの EBW 加熱/EBW に由来する放射電磁波計測を行い、理論予測結果と比較する。

・有限幅のビームを考慮したマルチレイ光線追跡計算を行い、各レイについてモード変換領域に再 近接した点でのプラズマと波動パラメータを用いて、スラブモデルでの線形理論より与えられるモ ード変換効率を計算し、再近接点での密度勾配方向に沿ったエヴァネセント層の高密度側の点 で光線追跡計算を再開させことで、エヴァネセント層を挟んだ領域での有限幅ビームの波 動伝播描像を得る。また衝突減衰効果を分散式に加え、高域混成共鳴層付近での減衰効果 を求める。

・Maxwell 方程式を境界値問題として解く TASK/WF2D コードを用いて、モード変換が起こ るエヴァネセント領域近傍の波動伝播の描像を、衝突項の寄与も含めて得られるようにす る。マルチレイの光線追跡計算を用いて、エヴァネセント近傍点での有限幅をもつ波動電 場の屈折率の空間分布を与え、これを境界値とする。

経緯と結果

図1に大型ヘリカル装置(LHD)のパラメータを用いて計算した、ビーム照準点に対するモード変換 効率の等高線プロットを示す。マルチレイ光線追跡計算を行い、ビームの広がりが考慮されている。 衝突減衰効果はまだ考慮されていない。また、モード変換領域での密度揺動が変換効率を低減させ るとの理論的予測があるが、その効果は考慮されていない。50%以上の変換効率が期待される照準点 にむけた入射でも実験的に見積もられた加熱効率は 10%程度であり、数値計算による予測精度が現 状では十分でない。予測精度を挙げるには、衝突減衰効果や密度揺動効果を考慮するとともに、実



図. 1:入射ビームの照準位置(Tf,Zf)に対して予 測された 0-X モード変換効率の等高線図。マル チレイ光線追跡を用いて計算したのでビームの 広がりが考慮されている。実験で入射した照準 位置に印をつけた。

験での分布を精度良く再現した磁場と密度 分布を与える必要がある。

TASK/WF2D コードを適用するには、2次元メ ッシュ空間において、磁場・密度・温度の 分布と境界条件を与える必要がある。図 2 に示すように計算に用いる座標系を定 義し、2次元的にパラメータが変化する 計算領域を各メッシュ点で与えること ができるようにした。座標系の原点は、 ビーム中心のレイに関する光線追跡計 算を行って、磁場に対して垂直方向の 屈折率が一定値を下回った点としてい る。現在マルチレイ計算で各レイが図1

の x=0 平面に達した際の波数ベクトルをそれぞれ求め、x=0 のメッシュ点上での波数ベクトル各成分の分布を補間して求めることができるように、計算コードを整備中である。ま



# 図 2: TASK/WF2D コードでの計算に用いる座標系の 定義

た、誘電率テンソルに衝突の効果を追加 するための TASK/WF2D コードの改良を行 っている。

## 研究発表

H. Igami et al. "Electron Bernstein wave heating and emission measurement through the very narrow O-X-B mode conversion window in the LHD" 20th Topical Conference on Radio Frequency Power in Plasmas 25th - 28th June, Sorrento, Italy 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

## 目的と概要

QUEST においては、電子バーンシュタイン波(EBW)による電流立ち上げと定常維持が計画 の基幹となっている。しかしながら、これまで EBW の直接検出が困難であるため波動の励起、 伝搬及び電流駆動の物理機構については理論的な予想、解析はあるが、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・高性能化することが本研究課 題の目的である。これまでの検討の結果、波動の直接検出にはミリ波からサブミリ波の散乱計 測が有効であり、散乱断面積の小ささから大電力のプローブビームと高感度の受信システムを 用意する必要がある。応用力学研究所においては 170 GHz 大電力ジャイロトロンおよび伝送入 射システムを有効利用できる可能性があり、これを第一候補として検討を行ったが、予想され る励起 EBW 波動の波長が伝搬とともに短くなり、170 GHz では、最も短波長の計測が可能な 後方散乱(180 度散乱)条件でもモード変換直後の伝搬領域での測定に限られてしまうことが判 明した。このため、より周波数の高いプローブビームと受信システムの検討を行うこととした。

## 研究の具体的方法

予想される EBW のパラメータに対してミリ波からサブミリ波をプローブビームとして使用することを想定して波動の直接計測の可能性を検討する。このために、

- 1. 予想される 8.2GHz の入射アンテナから励起される EBW 動による密度揺動強度及び波数の評価をおこなう。
- 2. 直接計測可能な EBW 動の波数範囲と電力密度を評価し、いくつかの可能性のあるミリ波 からサブミリ波領域での最適かつ現実的な散乱計測のプローブビーム及び受信系配置を 検討する。
- 3. 受信散乱波強度を評価して、必要な受信系の構成、受信素子の選択を行う。
- 2. 定常プラズマの特性を生かした、波動の位相検出を含めた伝搬構造の詳細計測の可能性 を検討する。

を順次進め、この計測の実現可能性、有効性を見極めた上で、実際の計測準備を行う。

## raytrace から予想される EBW の振舞と散乱計測

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  $N_{\parallel}$ =0.56 とした場合、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 に変換されることが ray trace コードで予想されている。この場合、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入射電磁波が EBW に変換され、伝搬、吸収される。この EBW に変換された後の伝搬、吸収の過程において、伝搬波動の半径方向の波数が伝搬に従って大きくなり、吸収される吸収され段階では 2 × 10⁴ m⁻¹ 程度になることが予想される。この大きな波数を散乱観測によっ

て計測するためには、当初考えていた170GHz で周波数の高い470 GHz 以上電磁波を用いる必要があることが解った。このサブミリ波領域の周波数においては考えられる発振源および、受信システムの組み合わせの選択肢は限られており、慎重に周波数を選択する必要がある。

## EBW に伴う伝送電力と密度揺動と散乱効率の関係

密度揺動 $\tilde{n}$ が存在する場合のプローブビームと散乱波の散乱効率 $P_s/P_i$ は、有効散乱体積V中に一様に密度揺動 $\tilde{n}(\mathbf{k},\omega)$ が存在する場合、 $r_0$ を古典電子半径、散乱体積中心から観測点までの距離をRとすると

$$P_{s}/P_{i} = 4\pi \frac{r_{0}^{2}}{R^{2}} [\tilde{n}(\boldsymbol{k},\omega)]^{2} V^{2}$$
(1)

と表せる。したがって、プローブビームの周波数の選択は、直接散乱効率には影響せず、空間 分解能を決定するビームサイズや散乱角によって決まる散乱体積 V を介して依存することにな る。加熱波動の伝搬電力 P_H と振動電場の関係は

$$P_{\rm H} = \omega \epsilon_0 \frac{\tilde{E_{\rm H}}^2}{2} \tag{2}$$

と表されることがわかる。一方で、密度の揺動成分  $\tilde{n}$  と加熱波動の振動電界の関係は、電荷の 保存則  $\frac{\partial(\tilde{e}\tilde{n})}{\partial t}$  +  $\nabla \cdot \boldsymbol{j} = 0$  から

$$\tilde{n}(\boldsymbol{k},\omega) = \frac{\boldsymbol{k}}{\omega e} \cdot \tilde{\boldsymbol{j}}$$

$$= -i\frac{\epsilon_0}{e}\boldsymbol{k} \cdot \left(\overleftarrow{\boldsymbol{\epsilon}} - \overleftarrow{\boldsymbol{I}}\right) \cdot \tilde{\boldsymbol{E}}$$
(3)
(4)

と表現され、したがって、EBW の場合、

$$[\tilde{n}(\boldsymbol{k},\omega)]^2 = \frac{2\epsilon_0 k_D^4}{\omega e^2 k^2} \left\{ 1 - \Lambda_0(\beta) - \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\omega}{\omega - n\Omega} \left[ 1 - W \left( \frac{\omega - n\Omega}{|\boldsymbol{k}_{\parallel}| (T/m)^{1/2}} \right) \right] \Lambda_n(\beta) \right\}^2 P_{\mathrm{H}}$$
(5)

これを式(1)に代入すると最終的に散乱効率は、

$$P_s/P_i = 8\pi \frac{r_0^2}{R^2} V^2 \left(\frac{e^2 n_e^2}{\epsilon_0 \omega k^2 T^2}\right) \left\{ 1 - \Lambda_0(\beta) - \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\omega}{\omega - n\Omega} \left[ 1 - W \left(\frac{\omega - n\Omega}{|k_{\parallel}|(T/m)^{1/2}}\right) \right] \Lambda_n(\beta) \right\}^2 P_{\rm H}$$
(6)

と表される。ここで、 $k_D$ はデバイ波数、 $W や \Lambda_n, \beta$ は、参考文献 [1] の表式を用いた。したがっ て、プローブビームとして選択する周波数は、実際に測定が必要な励起波動が引き起こす密度 揺動レベルとその波数によって最適値が求められることが解った。ただし、この選択は、入手 可能なプローブビームの発振源とその帯域での検出システムの構成に大きな影響を及ぼす。具 体的な配位、プラズマパラメータ等を用いた検討は今後の課題である。

## 参考文献

[1] S. Ichimaru, "Basic Principles of Plasma Physics" Addison-Wesley Publishing Co. Inc. 1980.

# テラヘルツ波を用いた高温プラズマ計測法の開発

核融合科学研究所・ヘリカル研究部 徳沢季彦

#### 1. 目的

高温プラズマの生成による核融合発電を目指した研究において、閉じ込め性能の向上に伴い、高温高 密度化が進んでいる。そのため従来マイクロ波帯の電磁波を用いていた反射法などのプラズマ計測手法 へのテラヘルツ波帯への拡張が必要となってきている。例えば、核融合科学研究所で検討を行ってい るヘリカル型原型炉(FFHR-d1)で想定しているプラズマ内部の特性周波数の半径方向分布は図1の ようになり、特性周波数はマイクロ波からテラヘルツ波(0.1-10THz)領域に拡がっており、この空間 および周波数領域を全てカバーする計測システムの構築が期待されている。しかしながら、プラズ

マ計測に適した光源がこれまで非常に限ら れていたことから、この分野の計測手法は 開発がまだあまり進んでいない。そこで、 近年新しく開発がなされてきたテラヘルツ 波光源を用いた高温プラズマ計測法の早急 な確立が期待されている。

本研究では、これまでに実績のあるマイ クロ波計測法のテラヘルツ波領域への拡張 を行うことを目指してその基盤を確立する ための開発研究を行う。本研究の測定対象 物体は、従来のテラヘルツ波計測では全く 事例のない、メートル級の大型高温プラズ マであるため、これへの適用を目的とした ミラーやアンテナ等の伝送光学系や信号処 理等の回路系を含めたシステムの設計およ び開発を行う。

#### B₀=5.09T, n₀=3x10²⁰m⁻³ 300 T_e=0ke∨ 250 Upper X-mode frequency [GHz] 200 =10keV 150 100 Lower X-mode 50 0 0.2 0.4 0.6 0.8 1 0 ρ

#### 2. 計画と実験方法

LHD装置には種々のマイクロ波帯の反 射計、散乱計などを適用しプラズマ計測を 行ってきた実績があるが、本研究では、100 図1:ヘリカル型核融合炉(FFHR-d1)の炉心プラ ズマにおいて想定される特性周波数の半径方向分 布。正常波カットオフ(O-mode)、異常波カットオ フ(X-mode)およびサイクロトロン周波数を示して いる。また想定される電子温度(10keV)における 相対論効果による周波数変化を点線で示している。

~1000GHzの周波数帯で2つの種類の光源を用いた新しい計測システムの開発を行う。一つはマイク ロ波帯発振器出力を逓倍する方法、もう一つは時間領域分光法で用いられるテラへルツ波パルスを活用 する方法である。前者は周波数掃引を行うことで電子密度の空間分布情報を求めるためのシステム開発 をW-bandを対象として行う。後者はパルスの持つ広帯域性を活用した計測を行うが、mm~cmサイ ズの物体の物性研究には実績があるが、大型の物体の研究に用いられた例は無いため、そのための開発 研究を行う。本報告書では、この後者のテラへルツ波パルス計測システムについて、以下に述べる。

## 3. テラヘルツ波パルス計測システム

テラヘルツ波パルスをプラズマに入射し、プ ラズマ自身あるいは対向壁面から戻ってくる反 射波を受光し、その飛行時間 tpeを計測すると、 次式のようになる。

$$\tau_{pe} = \frac{2}{c} \int_{-a}^{a} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\omega_{pe}^{2}(x)}{\omega_{0}^{2}}}} - 1 \, dx \qquad (1)$$



図 2 : 核融合プラズマ原型炉(中心電子密度~ 1x10²¹m⁻³) における入射テラヘルツ波のプラズマ 中の伝搬に伴う遅れ時間

それぞれ求められることになり、非常に効率的かつ有意義な計測手法となり得る。

このようなテラヘルツ波パルス計測の試験開発を行うために、テラヘルツ波時間領域分光法(THz-TDS) システムを構築中である(図3)。本システムは、光伝導アンテナからのテラヘルツ波発振を利用したシ ステムで、フェムト秒ファイバーレーザー(Menlo社 T-Light 780)を励起光源としている。このレー



図3:テラヘルツ時間領域分光テストシステム。写 真は透過型光学系のシステム例。赤線が励起フェム ト秒レーザー光経路。緑線がテラヘルツ波経路。

ザーからの波長 780nm (パルス長 120fs, 出力 70mW)の出力光を、プラズマ計測に適した周 波数領域(~1THz)のテラヘルツ波を選択的に発 生させるため、低温成長 GaAs 基盤ボウタイ型 光伝導アンテナに入射し、テラヘルツ波パルス を発振させている。また、プラズマ計測への適 用に必須な開発要素である信号検出系の高速化 を達成するため、光サンプリング検出を行うた めのディレイステージを高速に駆動することを 目指し、毎秒1000mmでの移動が可能なリニ アモーターステージを採用したシステムを構築 した。本システムにおいて、現在、50MHz 繰 り返しでの0.1~2THzの周波数スペクトルをも つテラヘルツ波発生を確認できた。今後、プラ ズマ計測へ適用するための開発試験を進めてい く。

・「L-バンドマイクロ波放射計による海面塩分の全球観測」

(北大低温研 江淵 直人・阿部 泰人)

NASA が開発した塩分観測センサ Aquarius を搭載したアルゼンチンの地球観測衛星 SAC-D が 2011 年 6 月 10 日に打ち上げられ,同年 8 月 25 日から現在まで観測が続いて いる. Aquarius は,海面塩分によって海面の誘電率が変化し,射出されるマイクロ波の放 射輝度が変化する特性を利用して海面塩分を計測するものである.当初の目標精度として は,150 km,1ヶ月平均で 0.2 psu を掲げている. Aquarius によって観測された最新の 海面塩分を,Argo フロートや係留ブイの現場観測データ,および客観解析データや海洋デ ータ同化システム出力と比較して精度評価を行った結果と,観測データを用いた研究の展 望について紹介する.現時点での最大の問題点は,銀河からのマイクロ波放射の反射の補 正が不十分なため,主に南大洋で,ascending 軌道と descending 軌道の間で有意なバイ アスを持つ点である.最新のアルゴリズムでは,水温 5degC 以上,風速 15 m/s 以下の 条件で,緯度経度 1 度,月平均の比較で残差の標準偏差は 0.22 psu の一致を示しており, 目標精度達成まであと少しと言える.

「テラヘルツ波を用いた高温プラズマ計測法の開発」

(核融合科学研究所 徳沢季彦)

将来の核融合炉などへの実装を視野において、テラヘルツ波を用いたプラズマ計測器の 開発を行っている。CWテラヘルツ波を用いた干渉・偏光計による電子密度、磁場観測の 要素開発の状況、パルステラヘルツ波を用いた電子密度モニター計測システムの原理実証 試験の現況に関して紹介した。

・ 「超広帯域マイクロ波変調レーザレーダシステムの開発」

(九州大学 間瀬 淳)

広帯域マイクロ波で変調されたレーザレーダについて報告された。特長としては、

- 波長 1.55 mm という目に優しいレーザを用い、既存のレーザレーダのように高強度 レーザを使用しないため安全性に優れている
- ② マイクロ波レーダでは、電波法の規制から掃引周波数幅を~2 GHz 以上にすること が難しく、10 cm 以下の空間分解を得ることが困難であるのに対し、本システムで は帯域幅 10-15 GHz を実現できるため、さらに優れた空間分解が期待される、など である。

現在までに、レーダ装置としての試験を行い、送信・受信光学系が一体化したモノスタ ティック方式、独立したバイスタティック方式、いずれの場合においてもレンジ方向の空 間分解 ±2 cm が検証されていること、合成開口レーダとしての実証試験を実験室で行った 後、地上実験へと進める予定であることが報告された。

・「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・核融合科学研究所 徳沢季彦)

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2012年度から実験を行った。波動由来の密度揺動は0.01%程度で電場は1 kV/mのオーダーであり、密度振動振幅の位置、少数イオン比、パワー依存性が見られた。波動電場と密度揺動は線形の関係にあり、入射パワーの平方根と密度揺動振幅には線形の関係があると予想されるが、測定結果では、予想と異なる依存性を示す場合があった。この原因は不明である。線形性を仮定した場合の波動振幅の減衰長はある条件で4m程度であった。また、この手法による少数イオン比の計測の可能性について紹介した。

・ 「<u>QUESTにおける輻射計計測</u>」

(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。昨年 度報告されたノイズソースを放射源に用いた実験室での低電力試験の解析に加え、QUEST 装置内の実験結果が紹介された。QUEST 装置内に異なる位置でノイズソースを設置し、 ビームフォーミング法で、輻射源の位置同定を行った。

・「<u>ウィンドプロライラ-レーダによる大気の流れ・乱れの計測」</u>

(京都大学生存圈研究所 山本真之)

最初に、大気の屈折率擾乱を利用して風速や乱流を計測するウィンドプロファイ ラーの観測原理を述べた。次に、気象庁が運用するウィンドプロファイラー観測 網を紹介するとともに、雲・降水現象の解明におけるウィンドプロファイラー観 測の有用性を示した。最後に、レーダーイメージング技術を活用した大気乱流の 高解像観測の原理と観測結果を発表した。

全体討論・今後の進め方では、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。平成26年度核融合科学研究所の(研究会)一般共同研究「マイクロ波、 ミリ波、テラヘルツ波の技術とそのプラズマ加熱・計測への応用」へ申請した旨、紹介さ れた。本研究会では、天文観測を含めた研究紹介があり、本申請研究集会との連携開催で 有意義な議論・展開が図れるか議論された。研究集会はあくまでも個別に行うが、連続開 催で多くの参加者で議論することを考えることとした。 25 FP-1

プラズマ物理におけるマルチスケール・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

プラズマ物理においては、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 なる空間領域またがって相互作用し、その結果としてプラズマエネルギー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、外部加熱を伴う、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、ディスラプション、直線装置における乱流現象等、プラズマ実験で観測されて 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。

#### 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。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、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が存在するが、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。モデルとして4場簡約化 MHD モデルを用いる[1]。前回の報告では円柱ソースの場合の結果について報告したが[2]、今回は球状 のソースの結果を報告する。ソースは $S_n = S_{AMP} \exp(-(r^2 + r_s^2 + 2rr_s \cos\theta + \zeta^2 / \varepsilon^2)/2\Delta)$ で与えた  $(r_s = 0.8, \Delta = 0.1, \varepsilon = 1/3)$ 。ソースはT = 948で印加し、T = 1800で切る。図1の内部エネルギーの 時間発展を示す。球状のソースを印加することで様々なモードヘエネルギーが移送されている。前 回報告した円柱状の場合はn=0モード(n:hprodefine(n)トロイダルモード数)へのみエネルギーが移送されており、 非局所輸送はソースを切った後の過渡応答として観測されている。図2に磁気面平均された全密度分布 の時間発展を示す。ソースを印加している期間に非局所輸送がr=0.4付近に出現している。解析の結果、 今回の場合も非局所輸送の担い手は(1,0)モードであることが判明した。図3にT=1500 における(1,0)モ ードのみで構成された密度揺動のポロイダル断面における等高線  $p(r, \theta, \zeta = 0)$ を示す。円柱ソースの場 合に観測されたスパイラル構造が同様に形成されている。図4に(1,0)モードのフーリエ係数の実部の径分 布 Re(p_{1.0}(r))の時間発展を合わせて示す。図4より(1,0)モードはソース印加とともにグローバルに変化し ているため GAM 振動ではないと考えられる。今後、シンクの場合についても考察する予定である。



図1 内部エネルギーの時間発展



図2 磁気面平均された全密度分布の時間発展



図3 T=1500 における(1,0)モードのみで構成された 密度揺動のポロイダル断面における等高線図



図4 (1,0)モードのフーリエ係数の実部の径 分布の時間発展

## 参考文献

[1] 矢木雅敏、平成 24 年度共同利用報告書 24FP-34

[2] M. Yagi et al., "Simulation study of nonlocal transport from edge to core in tokamak plasmas," to appear in Contrib. Plasma Phys.

## 研究組織

矢木雅敏(原子力機構)、西村征也(核融合研)、松山顕之(原子力機構)、廣田真(東北大学)、 糟谷直宏(九大応力研)、佐々木真(九大応力研)

#### プラズマ対向材料中の水素同位体交換に関する研究 研究代表者 日本原子力研究開発機構 山口正剛 所内世話人

大澤一人

## 【研究の背景】

国際熱核融合実験炉(ITER)ではダイバーターで激しいプラズマ粒子の照射を受ける設計になっ ている。ダイバーターは水素(水素同位体)をほとんど固溶しないタングステン(W)で被覆し保護 する設計になるが、それでも水素が内部に侵入し貯蔵されることが問題になっている。特に、ト リチウム(T)は放射同位体であるためにその残留量の上限が規制されている。そこで、タングステ ンと水素との相互作用や吸蔵、拡散移動に関する研究は盛んに行われている。その中で一旦は吸 蔵されたトリチウムを材料から離脱し回収する方法の研究も行われている。その中の1つが同位 体交換法である。水素同位体は化学的性質は同じであるが、原子核の質量が違うために零点振動 エネルギーに違いがある。そのため空孔型欠陥との結合エネルギーに差ができ、その違いを利用 して水素または重水素雰囲気中でトリチウムを材料内部から追い出すのが同位体交換法である。 この方法は低温でのトリチウムの放出が起きることが期待されている。実際に同位体交換が起き ていることを示唆する実験結果もあり、実験と理論計算の両面で研究の進展が見込まれている研 究課題である。

## 【同位体交換法の原理】

図1には同位体交換法の原理を示す。タング ステンでは水素が結晶格子中にある場合はエネ ルギー準位が高く不安定である。また、そこは 狭い空間なので零点振動エネルギーも大きい。 従って、トリチウムとその他の同位体との零点 振動エネルギーの差も大きくなる。

$$\omega_{\rm T} = \sqrt{\frac{m_{\rm H}}{m_{\rm T}}}\omega_{\rm H}$$

この式はトリチウムと水素原子の零点振動数と それぞれの質量の関係式である。ただし水素同 位体は平衡点の周りを調和振動することを仮定 している。空孔に水素同位体が捕獲された場合 はエネルギー準位は低く安定である。また水素 には十分広い空間なので振動数は小さくなる。 その結果同位体間の振動エネルギーの差も小さ くなる。そこで図1で示すようにトリチウムが 空孔内に捕獲されている時はそれよりも軽い同 位体と交換した方が総エネルギーは低くなる。

図2は同位体交換を観察した実験である。こ の場合は水素(H)と重水素(D)で観察した。重水 素をタングステンに注入した試料(■)を用意した。 それを真空中で400℃10時間加熱した試料(○)と 水素ガス中で同様に処理した試料(●)を比較した。 すると水素と一緒に処理した試料の方が重水素 の残留量が著しく減ることを示している。

ただし、図2のような実験を説明するために 別のメカニズムも提案されており今後の検討が 必要である。

## 【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/A以下になるまで緩和を繰り返した。スーパーセルはBCC格子の格 子点が54個のものを使った。また、水素同位体の零点振動エネルギーを計算するために安定位置 の周辺で仮想的に水素の位置をずらし、そのエネルギーの上昇を計算した。変位と復元力が比例す る調和振動近似を仮定して振動数を計算した。



図1:同位体交換法の模式図。零点振動エネル ギーを考慮するとTとHは交換した方が安定。



図2: (■)重水素に暴露したタングステン試料の 重水素の深さ分布。(〇)真空中で加熱処理。 (●)水素と共に加熱処理。[1]

## 【タングステン空孔中の水素の構造と振動状態】

BCC金属の空孔には通常水素はO-site近傍が安定 である。また、空孔内部にはO-siteが6個存在するので、金属 図3(a)で示すように6個まで水素が捕獲されると考えら れてきた。しかし、タングステン空孔は特殊で図3(b)で 示すようにO-siteから格子定数の約18%もずれた位置 が安定である。さらに、最高で12個まで水素原子は捕 獲されることが計算上予測されている。[2-3]

水素の零点振動エネルギーを計算する場合正しい水 素の基底状態を知っておくことは重要である。基底状 態の水素とは模式図の図4(a)で示すように、平衡状態 からどのような微小なずれに対しても復元力がはたらく。 そのため振動が起こる。一方で平衡状態でも図4(b)で 示すような不安定な構造では振動は起こらない。タン グステン空孔中の水素は図3(a)の構造が不安定構造 に対応している。しかしながら、多くの研究論文でこの 構造が採用されており正しく零点振動エネルギーが計 算されているか疑問がある。

#### 【タングステン空孔と水素同位体の結合エネルギー】

図5はタングステン空孔と水素(H)およびトリチウム (T)の結合エネルギー(*E_{hind}*)である。ただし、

$$\boldsymbol{E}_{bind} = \boldsymbol{E} \big[ \boldsymbol{W}_{n-1} \boldsymbol{V} \big] - \boldsymbol{E} \big[ \boldsymbol{W}_{n-1} \boldsymbol{V} \boldsymbol{H}_{k} \big] + \boldsymbol{k} \big( \boldsymbol{E} \big[ \boldsymbol{W}_{n} \boldsymbol{H}^{\mathsf{T}} \big] - \boldsymbol{E} \big[ \boldsymbol{W}_{n} \big] \big]$$

ここで、Eはスーパーセルの凝集エネルギー、Vは空孔、 H^Tは固溶している水素同位体、n=54で格子点の個数、 kは水素同位体の個数。つまり上の式は、固溶している

水素が空孔に捕獲された時の利得を表す。 図5によるとトリチウムより水素の方が空孔 と強く結合している。有限温度の効果を考 慮すると6個の水素同位体を捕獲した空孔 水素複合体が広い温度と水素分圧の領域 で圧倒的に多くなることが予測された。[4]そ こで図5では特に空孔水素複合体VH₆と VT₆についてその値を記した。水素の方が 約0.20eVほど空孔との結合エネルギーが 大きくなる。

## 【考察とまとめ】

タングステン空孔中の水素の正しい構造 を第一原理計算に基づいて行った。そして、 空孔と水素およびトリチウムの結合エネル ギーを計算したところ図5で示すように軽い 水素の方が結合エネルギーが大きい。従っ て、同位体交換法によってトリチウムをタン グステンから解離し回収できる可能性があ る。また、この計算結果は図2の実験結果 を支持するものである。

#### 参考文献

- [1] Y. Hatano et al., J. Nucl. Mater., 438(2013) S114.
- [2] K. Ohsawa et al., Phys. Rev. B 82 (2010) 184117.
- [3] K. Ohsawa et al., Phys. Rev. B 85 (2012) 094102.

[4] K. Ohsawa, Reports Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University 143 (2012) 29.



(a)安定構造 (b)不安定構造 図4:水素の構造が平衡状態からずれた時の 模式図。(a)基底状態(b)不安定な状態。



図5:タングステン空孔と水素同位体の結合エネルギーと 空孔に捕獲された水素同位体の個数(k)との関係。

## 金属間化合物における空孔型欠陥と水素原子の相互作用に関する研究 研究代表者 大阪府立大学 堀史説

# 所内世話人 大澤一人

## 【研究の背景】

国際熱核融合実験炉(ITER)はダイバーターに強いプラズマの照射を受ける設計になっている。 そこで、ダイバーターには水素溶解度が低く耐摩耗性と耐熱特性に優れたタングステン系合金で 被覆されることが計画されている。そこでタングステン系合金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。タングステンは水素溶解度が最も低い金属なので結晶中に水素が貯留 されることはない。しかし、空孔型の欠陥には相当な量の水素(水素同位体)が貯留されること が予想されている。特に、燃料のトリチウムは放射同位体であるために炉材料への残留量が問題 になっている。さらに第一原理計算によるとタングステン(およびモリブデン)中の空孔に捕獲 された水素は他のBCC金属では見られない特異な構造を持つことが明らかになっている。通常の BCC金属の空孔では水素はO-siteと呼ばれる点の近傍が安定で、最高で6個まで捕獲される。。 るが、第一原理計算によるとタングステン空孔では複雑な水素の構造が予測されている。このよ うな計算上予測される水素の特異な構造が実際に実現されるか、という疑問は残るが実験的に検 証されていない。その原因の1つはタングステンは元々水素をほとんど溶解しないために、水素 を吸収した試料を作ることが困難なためである。ところが、B2型と呼ばれる金属間化合物の中に は水素をよく吸蔵するものがあり試料作製が比較的容易である。本年度の研究ではタングステン と幾何学的に同じ水素の構造になる金属間化合物がみつかったので報告する。

## 【BCC格子とB2格子】

図1に(a)BCC格子と(b)B2格子を示す。BCC格子 (対心立方格子)は1種類の原子で構成されている。 一方でB2格子は2種類の原子で構成されている。 その2種類の原子を同一視すればB2格子はBCC 格子と一致する。

## 【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 総凝集エネルギーがほとんど変化しなくなるまで格 子緩和を繰り返した。(0.01eV以下)計算に使った スーパーセルは金属格子54個で構成されている。 また水素の基底状態は図2のような手順で計算した。 まず、水素の初期配置は乱数を使って空孔内表面 に適当に分布させてから格子緩和を行った。このよ うな方法では計算が計画時間内に収束しない、また は準安定状態に到達する可能性もある。しかし想定 外の基底状態があった場合でもその構造を見逃す 可能性を小さくできる。また、準安定状態は水素が 移動拡散する際の通り道(saddle point)になる可 能性もあり、その情報を得ることができる。

## 【計算した金属間化合物】

B2型金属間化合物ではNi-Al、Co-Al、Fe-Alの3 種類の空孔について計算した。Ni-Alは原子数比を 1:1の化学量論的比率からずらすことで最高で8% 程度の大量の空孔を含んだ試料が作成できるので 期待していた。しかしながら、結論から言うと空孔中 の水素のエネルギー準位は高く不安定である。この ため水素を保持する見通しはなく、他の2つの金属 間化合物についても計算することになった。Ni、Co、 Feは周期表でも隣り合った哑族の遷移金属であり よく似た特徴を持つ。



図1:(a)BCC格子と(b)B2格子。および結晶中の T-siteとO-site。



## 【空孔中の水素の構造】

温度まで考慮した熱力学的モデルで計算すると空孔には 6個の水素が捕獲される確率が圧倒的に大きい。そこで空 孔中の6個の水素の構造について詳しく述べる。BCC格子 の場合、空孔中の水素は図3(a)で示すようにO-siteの近傍 が安定である。O-siteは空孔内に6個存在するので水素は 正八面体構造をすると考えられてきた。しかし、タングステ ン(およびモリブデン)空孔中では(b)の特異な構造になり、 水素はO-siteから格子定数の18%程度もずれる。このよう な金属空孔には絶対0度では最大で12個もの水素が捕獲 される可能性がある。

## 【金属間化合物中の水素のエネルギー準位】

図4にNi-Al空孔中の水素のエネルギー準位を示す。空孔 (Ni空孔)はNiとAlの組成比を1:1から変えるだけで簡単に 導入できる。しかし、空孔中の水素は真空中の水素よりも 不安定であり高圧など特別な条件でもない限り水素の保持 は難しいことがわかった。

図5にはFe-Al空孔(Al空孔)中の水素についての結果を 示す。こちらは水素との結合力が強く複数個の水素でも捕 獲することがわかった。また、水素は図3の(b)で示したよう にタングステン空孔と対称性が同じ特異な構造になった。さ らにFe-Al空孔にも最高で12個までの水素の捕獲が可能で ありこの点もタングステン空孔と同じ結果になった。

Fe-AlのFe空孔についても計算した。Al空孔よりも水素との結合力は弱く、空孔内の水素の構造は図3(a)で示すようなO-site近傍が安定な通常の構造であった。ところが、こちらも変わった構造が見られた。通常は金属中の水素は電荷を帯びるので水素間にはある程度斥力が働く。そのため空孔内部に2個の水素が捕獲された場合は図6(a)で示すようになるべく距離をとる位置関係になる。しかしながら、Fe-AlのFe空孔中では(b)で示すような接近したO-siteを水素が占める方が安定になる。同様の結果はCo-Alの空孔にも見られた。

## 【まとめ】

タングステン空孔中の水素は特異な構造をとることが計 算から予測されている。それと同じ対称性の構造がFe-Al空 孔中でもみられることがわかった。こちらの方は水素を吸蔵 しやすく容易に試料の作成が可能である。今後は陽電子寿 命計算など実証に必要な計算機シミュレーションを行い、空 孔内の水素の構造について検証してゆく予定である。また、 タングステンとモリブデン以外の空孔でも特異な水素の構 造が見つかったことは重要である。この水素の構造は従来 考えられていたよりも多くの金属や合金中にみられる特徴 である可能性がある。

## 参考文献

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



図3:(a)通常の空孔中の水素の構造と (b)特異な構造。



図4:Ni-Al空孔(Ni空孔)中の水素。



図5:Fe-Al空孔(Al空孔)中の水素。



図6:空孔中の2個の水素の構造。 (a)斥力が働く場合と(b)引力が働く 場合。

#### 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の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。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フェライト鋼及 び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。本年度は、ナノ粒子分散により強化した Cr-W 鉄鋼材料(ODS 鋼) の組織観察と高温クリープ変形試験を行った。特に、ほぼ同じプロセスによって製作した 9Cr-ODS 鋼と 12Cr-ODS 鋼を比較することにより、Cr 量の効果を明らかにすることに重点を置いた。

2. 方法

図1に、9Cr-及び12Cr-ODS 鋼の製作プロセスを示す。アルゴンガスアトマイズ法により微粒化した 合金粒子にY₂O₃ナノ粒子を添加し、MA 処理ののち高温押し出し、高温鍛造により製作した。両者の微細 組織を応用力学研究所の透過電子顕微鏡により観察した。クリープ強度試験を核融合科学研究所の超高 真空高温クリープ試験装置によって行い、微細組織と高温クリープ特性の関連を明らかにした。

#### 3. 結果と考察

図2に9Cr-ODS 鋼と12Cr-ODS 鋼の微細組織を比較して示す。9Cr-ODS 鋼は比較的小さな結晶粒を 有する焼き戻しマルテンサイト相を示し、12Cr-ODS 鋼は比較的大きな結晶粒を有するフェライト単相 を示す。12Cr-ODS 鋼では、弱い歪と低密度の転位が一面に残っており(図3)、これは、加工熱処理 によって再結晶が起こらなかったことを示唆している。両者とも高密度のナノ粒子が一面に分散してい る。ナノ粒子のサイズは約3nm、密度は約1x10²³/m³で、両合金に有意な差は認められなかった。



図1. 9Cr- 及び 12Cr-0DS 鋼の製作プロセス




9Cr-ODS

12Cr-ODS

図3. 12Cr-ODS 鋼の粒界と転位

図 2.9Cr-、12Cr-ODS 鋼の微細組織

図4は、973K における 9Cr-及び 12Cr-ODS 鋼の高 温クリープ変形を示す。200MPaの荷重では、9Cr-ODS 鋼のほうがクリープ破断時間が長いが、 175-180MPa に荷重を下げると逆転する。

図5は、クリープ破断強度を比較したもので、破 断時間が短いと9Cr-ODSのほうがクリープ強度が高 いが、破断時間が長いと逆転し、その境界が20-40時 間にあることがわかる。

構造部材の想定クリープ寿命は10万時間程度であ り、従ってその条件でのクリープ強度は12Cr-ODS鋼 の方が高いことが予想される。12Cr-ODS鋼は、結晶 粒が大きいため、特に低荷重領域で顕著になる粒界す べりによるクリープ変形が抑制されたものと考えら れる。

### 4. 研究組織

室賀健夫、長坂琢也、菱沼良光(核融合科学研究所)、 渡辺英雄、荒木邦明(九州大学応用力学研究所)

### 5. 発表論文

T. Muroga, T. Nagasaka, P.F. Zheng, Y.F. Li, H. Watanabe, "Dislocation evolution during thermal creep deformation in V–4Cr–4Ti with various thermal and mechanical treatments", Journal of Nuclear Materials, 442-S1 (2013) S354-359.

### 6. 国際会議での発表

T. Muroga, T. Nagasaka, Y. Li, H. Abe, S. Ukai, A. Kimura and T. Okuda, "Fabrication and Characterization of Reference 9Cr and 12Cr-ODS Low Activation Ferritic/Martensitic Steels", ISFNT-11 (Sept. 16-20, 2013, Barcelona)



図4.9Cr-、12Cr-ODS 鋼のクリープ変形



図 5.9Cr-、12Cr-0DS 鋼の 973K にお けるクリープ破断強度

高温プラズマ乱流における不安定性の波数依存性に関する研究

核融合科学研究所 登田慎一郎

乱流輸送は磁気核融合装置におけるプラズマ閉じ込めに最も重要な課題の一つであ る。なぜならトロイダルプラズマにおいて、乱流輸送は大量の粒子、熱損失を引き起こす からである。プラズマ性能改善には、プラズマ乱流輸送に関するさらなる研究が必要であ る。1次元(径方向の)輸送コードである,統合輸送コードTASK3Dでは,熱拡散係数にジャイ ロボームスケーリングがLarge Helical Device (LHD)において使われている。イオン温度 勾配乱流の場合,式 $\chi_i \sim \rho_i^2 v_{if}(\gamma, \hat{s}, \tau_{TE})/R$ がイオン熱拡散係数に使われる。ここでfは $\gamma$ ,  $\hat{s}$ と τ_πの関数である。 y はモードエネルギーの成長率, ŝ は磁気シアパラメータであり, τ_π はいわゆる帯状流の崩壊時間である。輸送コードで乱流輸送係数にどのモデルを用いるか 決めるために、どの安定性モードが、不安定化しているかを研究する必要がある。GKV-X コードはヘリカルプラズマにおいて乱流輸送に対するイオン温度勾配不安定性と帯状流の 影響を調べるコードである。研究の最初として、GKV-Xは非線形解析ができるにもかかわ らず、LHDの高イオン温度放電#88343での線形ジャイロ運動論解析を行った。なぜならGKV-X コードによる線形解析におけるシミュレーションコストはその非線形解析と比べて非常に 少ないからである。乱流拡散係数はおおまかにはジャイロ運動論解析から求められた線形 成長率と波数から決められる。時間発展を追う輸送コードを解析する際に、ジャイロ運動 論コードにより時間ステップごとに成長率を求める計算を行うことは困難である。時間発 展を追う輸送コードで利用できるような、プラズマ不安定性に重要な物理パラメータに関 するイオン熱拡散係数のモデリングが必要である。本研究では、イオン温度勾配不安定性

における重要なパラメータは $L_{Ti}(=-T_i/T_i)$ であると考えられる。他のパラメータ $L_n(=-n/n')$ や安全係数は径方向の点で固定する。関数fに対する帯状流の崩壊時間 $\tau_{TF}$ の依存性は $\chi_i$ のモデリングの際はここでは無視する。イオン熱拡散係数 $\chi_i$ のモデリングを行った。このモデリングした式は、輸送コードの中で使われ、LHD実験結果のイオン温度分布と、シミュレーション結果が比較される。

はじめに、GKV-Xコードを使った線形解析のシミュ レーションを行った。ショットナンバー88343のLHDにおけ る高イオン温度モードでのイオン温度勾配不安定性を考 察した。このシミュレーションは大半径が3.75mの時の3 次元磁場平衡配位のときに行われる。ここでは電子温度と イオン温度は等しいとした。静電ポテンシャル揺動の線形 成長率に対する飽和レベルを計算した。イオン熱拡散係数  $\chi_i / \chi_{GB}$ の値は混合長概算により、 $\chi_i / \chi_{GB} = C \sum_{k_i} \gamma / k_v^2$ で評価 される。ここで $\chi_{GR}(=\rho_{ij}^2 v_{ij}/R)$ はジャイロボーム拡散係数, k,はポロイダル波数で、yはイオン温度勾配モードの線形 成長率である。実験結果とシミュレーションの結果を合わ せるために,数値因子Cを用い,ここではC=1とする。イオ ン温度勾配モードが不安定になるイオン温度勾配を求め るために, χ_i/χ_{ce}の規格化されたイオン温度勾配に対する 依存性を調べた。温度勾配以外のすべてのプラズマパラメ ーターを固定し、(密度や安全係数のプロファイルを固定 し,)50点の径方向の点で, χ_i/χ_{GB}のR/L_{Ti}に対する依存



図1 モデル化されたイオ ン熱拡散係数における(a) イオン温度勾配モードが不 安定になるイオン温度勾配 R/L_{Tc} と(b) 傾き a(p)の径方 向依存性 性を調べた。イオン温度勾配不安定性モードでは、 $L_{Ti}$ が重要な物理パラメーターであると 考え、 $\chi_i/\chi_{GB} \epsilon \chi_i/\chi_{GB} = a(\rho)(R/L_{Ti} - R/L_{Tc})$ のようにモデル化した。ここで $L_{Tc}$ は規格化した、 イオン温度勾配モードが不安定化するイオン温度勾配であり、 $\rho = r/a$ である。径方向の点 で変わる、規格化した密度勾配や安全係数の値に傾き $a(\rho)$ は依存する。図1はイオン温度 勾配モードが不安定になるイオン温度勾配R/L_{Tc}とR/L_{Ti}に関する傾き $a(\rho)$ を示す。図1のグ ラフにおけるR/L_{Tc}と傾き $a(\rho)$ の値を用いて、イオン熱拡散係数 $\chi_i/\chi_{GB}$ のモデリングを行っ た。

次に、これまでにモデル化したイオン乱流熱拡散係数を用いて、輸送コードを実行 した時に、輸送ダイナミクスを考察した。低ベータ近似でのDGN/LHDデータベースから新 古典輸送拡散係数を求めた。電場の径方向の分布は両極性条件から得られる。径方向の領 域0.25<p<0.80で両極性条件を満たす電場の三根が存在する。その三根から正の電場を選 ぶ。イオン温度を除くプラズマの径方向の分布、密度、電子温度、径電場や安全係数の分 布は時間的に固定している。LHDにおけるショットナンバー#88343である放電で、時刻 t=2.230sの実験結果を、密度、電子温度、安全係数の分布について使う。イオン温度の径方 向の分布について、モデル化したイオン温度乱流係数を用いて、シミュレーションを行っ た。実験結果における電子温度分布が時間発展を追う輸送シミュレーションにおける初期 値として使われる。イオン温度の時間発展のシミュレーションを行う際に、電子とイオン の間の熱交換を取り入れている。また加熱入力分布については、FIT3Dというコードで計 算したものを用いている。図2(a)の実線で、シミュレーション結果として得られたイオン 温度分布の定常状態を示す。破線はLHDにおけるショットナンバー#88343である放電で、 時刻t=2.230sでのイオン温度の実験結果を示す。シミュレーション結果から得られた径方向 のイオン温度分布はLHDの実験結果とある程度の一致を示す。乱流、新古典輸送拡散係数 の、定常の径方向分布を示したものが図2(b)である。イオン温度勾配モードは二つの径方 向の領域, 0.0 < p < 0.25 と 0.8 < p < 0.92 で安定化されている。 実線と破線はイオンの乱流と 新古典輸送拡散係数と対応している。イオン乱流輸送は正電場が選ばれている領域では, 新古典輸送と比べて優位である。

本研究では、特にLHDの高イオン放電(#88343)の場合について、輸送コードにイオン 温度勾配乱流を導入するために、イオン温度勾配の特性長に関して、イオン熱拡散係数の

モデル化を行った。時間発展を追う輸送コードを用いて, モデル化したイオン熱拡散係数を使って得られたシミュレ ーション結果とLHDの高イオン放電(#88343)のときの実験 結果との比較を行った。今後,線形ジャイロ運動論解析に よるシミュレーション結果と,非線形解析による結果との 比較を行う。さらに帯状流の輸送に対する影響を調べる必 要がある。その後,モデル化したイオン熱拡散係数を統合輸 送コード(TASK3D-p)へ導入したい。また他の放電や,不安 定性を考察した場合に,熱拡散係数のモデリングを行いた い。

### 学会発表

S. Toda et al., "Modelling of Heat Diffusivity for Ion Temperature Gradient Turbulence in Helical Plasmas", 14th International Workshop on H-mode, Physics and Transport Barriers, P01-10, Oct. 2-4, 2013, Kyushu University, Fukuoka, Japan



高フラックスパルス照射材料の材料表面特性変化

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

核融合炉においては、レーザー計測に金属ミラーが用いられることが検討されている。金属ミラーは繰り 返しのレーザーの負荷に耐える必要があり、金属ミラー材料に対するマルチパルスのレーザー誘起損傷閾値 (LIDT)を明らかにする必要がある。パルス数が上昇するにつれてマルチパルスLIDTは一般的に減少傾向を示 すが、その現象のメカニズムは十分にわかっておらず、データも不十分な現状がある。また、ダイバータ材 料は、ELM等に伴い、繰り返しのパルス的熱負荷にさらされることが分かっており、その結果、クラック等が 形成されることがこれまでに分かっている。しかし、その初期的な材料表面の損傷のメカニズムは十分には 理解されていない。本研究では、高いフラックス照射がされた金属材料の材料表面損傷メカニズムを解明す ることを目的とし、名古屋大学での材料照射実験を実施した後、九州大学にて表面分析を実施した。

#### 2. 実験方法

名古屋大学において、マルチパルスレーザー照射実験を実施し、銅材料のマルチパルスLIDTを評価した。 具体的には、Nd:YAGレーザー(波長:1064 nm、パルス幅5 ns)のレーザーを用いて、銅材料に繰り返しレー ザー照射を行い、その試料からの反射レーザー強度を計測し、その減衰量を利用して、マルチパルスLIDTを 評価した。まず大気中でLIDT計測を実施した後、真空中でのLIDT計測を実施した。大気中でレーザーを照射 した試料を、九州大学の集束イオンビーム装置(FIB)で100 nm程度の厚みに切り出し、透過型電子顕微鏡(TEM) を利用し断面観察を実施した。表面の結晶構造や、結晶粒界において起こった変化を観察した。

#### 3. 実験結果

図1(a)に、レーザーパルス照射後の試料 の走査型電子顕微鏡(SEM)写真を示す。 表面にリップルが形成されているのが確 認できる。図1(b),(c)はTEMによる断面 観察結果である。レーザーパルス照射前は 表面が平坦であったが,照射後には,表面 の荒さは約0.5-1 µmとなった。表面近く の4-5 µmまでの結晶サイズは,照射前に 比べて著しく小さくなった。強い応力が発 生し,結晶が小型化したものと考えられる。 レーザーパルスに応答して温度上昇が起 こり,表面に応力が発生し,その結果,結 晶の大きさ及び表面荒さを変化させたと 考えられる。興味深いことは,突起部の下 部にスリップが形成されていることが観



 $\boxtimes$  1: (a) A SEM micrograph of sample (ii) after the irradiation with laser pulses. (b) and (c) cross sectional views of the TEM micrographs of the sample. (b) corresponds to the central part the laser beam and (c) edge part of the laser beam.

察された点である。スリップ線に沿って、結晶のサイズは小さくなり,スリップ線は深い領域にまで到 達し,表面から 4-5 μm の深さまですべり変形が発生したことが明らかになった。

図2は、大気と真空状態でのOFHC-Cuに対するマルチパルス LIDT である。真空中でのマルチパル ス LIDT は大気中より高くなることが分かる。両対数スケールプロットにおける傾きは直線的となり, パルス数の増加に伴って LIDT は指数関数的に減少していく。TEM 観察より,大気中では酸化が起こ っていることが分かったが²⁰,一旦酸化が起こり始めると吸収率が著しく増加しダメージに至ることに なる。真空中では酸化が起こらないため,大気中での LIDT に比べて高い値を示したのではないかと思 われる。ここでは,LIDT とパルス数との関係は,指数関数的に表現できるとして,ITER での条件, すなわち 10⁸ -10⁹パルスにおける LIDT を外挿して評価する。図 2 のデータから,大気中では(3.76± 0.32) $N^{(0.083\pm0.015)}$ ,真空中では(3.73±0.97) $N^{(0.049\pm0.025)}$ と得られた。シングルショットでの外挿値は, 互いに一致しており,別途計測した値と一致した¹⁰。ここから,例えば 10⁹パルスのときの予想される LIDT は 1.35(+1.50, -0.75) J となった。今後,この値を使って,ITER や DEMO 等におけるトムソン 散乱用のレーザー伝送用ミラーの設計を実施していく必要がある。



☑ 2: Multi-pulse LIDT for OFHC Cu mirrors in the air and vacuum conditions.

成果報告(論文,学会発表等)

- 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", Optics Express, Vol. 21 (2013) pp.9333-9342.
- (2) Shin Kajita, Ryo Yasuhara, Masaya Sato, Noriyasu Ohno, Masayuki Tokitani, and Naoaki Yoshida, "Enhancement of multi-pulse laser induced damage threshold on Cu mirror under vacuum condition", Optics Express, Vol. 21 (2013) pp. 17275-17284.

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 によりW中の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。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。Wが中性子照射を受けると欠陥のみならず Re 等の核変換元素も形成されること から、欠陥と Re の相乗効果を理解するため、昨年度より微量の Re 添加がWの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ており、これまでに Re 添加によりガス曝露下での重水素(D)保持量が 減少することを見出している。今年度は、高フラックスプラズマ曝露下でのD保持特性を調べた。

#### 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 Goodfellow 社製の純 W 板材(純度 99.95%)を用いた。これらの試料に室温で 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、フラックス  $10^{22}$  D m⁻²s⁻¹ の D プラズマに 443~743 K で  $3 \times 10^{25}$  D m⁻² まで曝露し、D の深さ方向分布を核反応法(NRA) で分析した。また、あらかじめ薄膜化 した直径 3 mm のディスクに 2.4 MeV の Cu イオンを室温で 2 dpa 照射したのち、微細組織を透過電子顕 微鏡(TEM) で観察した。

#### 3. 結果および考察

Wイオン照射した試料中の D 濃度およびはじき出し損傷の深さ方向分布を、W-5Re の場合を例として 図 1 に示す。表面から約 2 µm 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。純 W についても、同様の D 分布が得ら れた。はじき出し損傷量が最大となる深さ(約 1.4 µm)における D 濃度のプラズマ曝露温度依存性を 図 2 に示す。試料温度が低い場合には純 W と W-5Re の間で顕著な差は見られないが、543 K 以上の温度 では明らかに W-5Re 中の D 濃度が純 W に比べ低くなっている。TEM 観察においては、図 3 および図 4 に 示すように、どちらの試料についても転位ループとボイドの形成が見られ、これらの欠陥が水素同位体 の捕獲サイトとして働いたことがわかる。低温領域における純 W と W-5Re 中の D 濃度に差がなかったこ とから、W イオン照射で両試料中に形成された捕獲サイトの密度は同程度と考えられる。温度の上昇に 伴い一方の試料中の D 濃度が他方と比べ大きく低下する原因として、一般的には、(1)欠陥の回復が速 い、(2) 照射欠陥による D 捕獲エネルギーが小さい(捕獲力が弱い)、などの原因が考えられる。先述 のように、ガス曝露法で得た平衡状態における D 濃度も W-5Re の方が低い値を示していたので、この違 いが表面状態に起因するものでないことは明らかである。W および W-Re 合金中の照射欠陥が 543 K にお いて顕著に回復することはないので、Re 添加により照射欠陥の D 捕獲エネルギーが低下したと考えるの が自然ではあるが、詳細の解明にはさらなる研究が必要である。 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(W イオン照射および NRA)ならびに幅広いアプローチ研究(プラズマ曝露)としても実施された。謝意を表する。



図1 Wイオンで照射したのちDプラズマに曝露したW-5Re試料中のDの深さ方向分布(左縦軸) およびはじき出し損傷分布(右縦軸). *T*_{exp}はプラズマ曝露温度.



図2 損傷ピーク(深さ1.4mm)におけるWおよびW-Re中のD濃度のプラズマ曝露温度依存性.





図 3 室温において 2.4 MeV の Cu イオンを 2 dpa まで照射した W 薄膜試料の TEM 写真. 左:転位ループ像、右:ボイド像.





### QUEST 装置における VUV 分光法による粒子・不純物リサイクリングに関する研究

核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・森田繁

#### 課題番号:25FP-8

研究課題:QUEST 装置における VUV 分光法による粒子・不純物リサイクリングに関する研究
研究期間:H25年4月1日-H26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, 大石鉄太郎, 董春鳳, 王二輝, 黄賢礼)
配分額:研究費(3万円),旅費(10万円)

### 目的:

磁場閉じ込め装置・QUEST の粒子リサイクリング・不純物挙動を VUV 分光計測法にて調べる. He ガス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. He ガスパフ後の粒子・不純物の振舞いを観測する. また,垂直磁場を掃引することにより,スラブプラズマと磁気面プラズマとの比較を行う.

#### 実験結果:

He ガスパフ実験を行うため、まず分光器の波長設定を最適化した.中心波長を 760Åに設定する ことで、短波長側に He+イオンスペクトル、長波長側に中性 H スペクトルが観測でき、その間に中性 He や炭素・酸素イオンスペクトルが位置する.垂直磁場を印加しないスラブプラズマ配位で観測した 代表的なスペクトルを図1に示す.He ガスパフを行っているので通常放電では観測できない He スペ クトルが現れている(図中赤字で示す).QUESTの通常放電で不純物イオンの最大荷数は炭素では C³⁺ であるが、波長が 1550Åと離れているためここでは議論しない.図1に示したスペクトル波長を固定 して、以下に述べる実験を行った.



図1 He パフ実験用に波長調整した VUV スペクトル (分光器中心波長:760Å).

スラブプラズマで He パフを行い不純物の時間変化を観測 した.Heパフを4秒までと7秒まで間欠的に行った例を図1に 示す.4秒でHeパフを停止しするとプラズマの温度が上昇し、 より荷数の高い不純物イオンスペクトル線強度が増加する(5 秒以降の振舞いに注目). HeI はガスパフにより増大するが、パ ルス状のガスパフに対して非常に時定数の長い増大を示し、ま た、一度増大すると15秒の放電時間内には減衰しない.真空排 気や壁の実効排気速度が He に対して小さいことが理由として 挙げられる.異なった価数間の強度比の一例を(g)に示すが、強 度比の増加は大雑把には電子温度の上昇を意味する. そこでこ の強度比を中性 He 原子スペクトル強度に対して整理した結果 を図2に示す. 図中、黄色ハッチで示した領域が、4sに Heパ フを停止した放電(赤点で示す)の温度回復期における強度比 を示す. 温度回復期の強度比も(黒で示す)温度低下時の強度 比も He 中性原子量に対して同じ振舞いを示すことが分かった. つまり、プラズマの状態(温度)を決定しているのは He 分圧で



図2. 不純物時間変化と強度比 (Heパフ:黒(t≤7s)赤(t≤4s)

あり,同じHe分圧では異なった温度領域を形成できないことが分かる(磁気面がないので当然かもしれないが).





同様に不純物の強度比を Bzの関数として解析した.結果を図4に示す.He強度比は(HeIが中性

なので)単純に温度の関数として記述でき,Bzの上昇(Ipの 増大)と共に温度が上昇していることが示唆される.しかしな がら,炭素イオン強度比はBzの増大と共に減少していく様子 が観測され,Heの振舞いとは異なっている.磁気面の形成に伴 って ECH プラズマの温度が上昇し,プラズマ内に正電場が形 成され,それにより不純物イオンの遮蔽効果が表れているのか もしれない(CIIIはCIIよりもよりプラズマの内部に存在する はずなので).磁気面形状が完ぺきではない可能性もあり,磁力 線に沿った方向の不純物輸送が結果として不純物遮蔽を誘起し ている可能性もある.



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

静岡大学大学院理学研究科 大矢恭久

### 【目的】

D-T 核融合炉においてプラズマ対向材として使用されるタングステン(W)はプラズマに曝され、高エネルギーのトリチウム、ヘリウムや不純物粒子による照射損傷を受け、安定な水素同位体捕捉サイトとなる欠陥が材料中に導入される。そのため、核融合炉の運転と伴に欠陥量の増加および構造変化が生じ、水素同位体滞留挙動に影響する。また、プラズマ中には不純物として炭素(C)が混入し、水素同位体と同時に第一壁に照射され、欠陥や W-C 混合層を形成することが予想される。こ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リサイクリングに影響をおよぼす。核融合炉の定常運転のためには、混合層中の欠陥形成量が及ぼす水素同位体滞留挙動への影響評価が重要である。そこで各フルエンスで鉄(Fe²⁺)イオン照射したWに重水素イオンを照射し、透過型電子顕微鏡(TEM)観察および昇温脱離(TDS)測定により形成した欠陥状態と重水素滞留挙動相関を明らかにすることとした。また、炭素照射Wに重水素の構成とした際の重水素滞留挙動相関を明らかにすることとした。また、炭素照射Wに重水素の相関を明らかにすることとした。

### 【実験】

本研究には 1173 K にて歪取り処理を行ったアライドマテリアル社製の多結晶 W を使用した。試料を 3  $mm^{9}\times0.1 mm^{1}$ に加工した後、日本原子力研究開発機構高崎量子応用研究所のイオン照射設備にて 6 MeV の Fe²⁺ を照射した。照射損傷量を  $3.0\times10^{4}$  dpa から 1.0 dpa まで変化させて、室温にて照射を行った。その後、九州大 学の TEM 装置を用いて試料中の照射損傷を観察した。また同様に照射損傷を導入した W に、静岡大学にてフ ラックス  $1.0\times10^{18}$  D⁺ m⁻² s⁻¹、フルエンス  $1.0\times10^{22}$  D⁺ m⁻²、エネルギーを 1.0 keV D₂⁺として室温にて重水素照射 を行った後、昇温速度 30 K / min、昇温領域 R. T. – 1173 K にて昇温脱離(TDS)実験を行い、重水素の放出挙動 を測定した。また、炭素(C+)照射はエネルギーを 10 keV とし、フラックス  $1.0\times10^{17}$  C⁺ m⁻² s⁻¹、フルエンス(1.0-5.0)× $10^{17}$  C⁺ m⁻² として行った。これらの試料に対し重水素を Fe²⁺照射試料と同条件で照射し、TDS 実験を行った。

【結果および考察】

図1に、各照射損傷量までFe²⁺照射したW試料 からのD₂放出スペクトルを示す。重水素の放出は Stage 1(400 K付近)、Stage 2(600 K付近)およびStage 3(700 K付近)の3つの脱離ステージから構成され ていた。Stage 1の重水素放出は、文献より表面吸 着[1]または転移ループ[2]に捕捉された重水素の放 出であると帰属した。また、照射損傷を導入した 試料では導入していない試料と比較し、Stage 1の 放出量が増加したが、照射損傷量増加に伴う放出 量変化は見られなかった。このことから、重水素 打ち込み深さ領域における転移ループは照射損傷



図1 各照射損傷量まで Fe²⁺照射した W 試料
 における D₂ 放出スペクトル

の導入により増加するが、 $3.0 \times 10^{-4}$  dpa までの照射損傷量において飽和することが示唆された。Stage 2 における重水素放出量は照射損傷量の増加に伴って増加し、放出温度領域も高温側へシフトした。これより、原子空孔形成量の増加により重水素捕捉サイトが増加したと考えられる。1 つの原子空孔に入る水素数が多いと欠陥の水素に対する捕捉エネルギーが減少する[3]ことから、照射損傷量の少ない試料において、欠陥あたりの水素捕捉数が高くなり、欠陥数の多い試料と比較して低温で重水素が放出したと考えられる。一方、照射損傷量の多い試料では、欠陥が多数存在しており、重水素が捕捉-脱捕捉効果を受けることや、微小な欠陥集合体が形成するなどの複合的な要因で重水素放出温度が高温側にシフトしたと考えられる。さらに、照射損傷量が  $3.0 \times 10^{-2}$  dpa 以上の試料においては Stage 3 での重水素放出が見られ、高密度の欠陥が導入されたことによる新たな捕捉サイトの形成が示唆された。図 2 に各照射損傷量まで Fe²⁺照射した後 1073 K で焼鈍した試料の TEM 像を示す。照射損傷量の多い試料ではボイドの形成が見られ、照射損傷量の増加に伴いボイドサイズも増加していることがわかる。また、これまでの研究で重水素を 3 keV D₂+にて  $1.0 \times 10^{-2}$  D m⁻² のフルエンスまで照射し



図2各 dpa まで Fe²+照射した Wの TEM 観察像

たWにはボイドが形成し、捕捉された重水素は700K 付近で放出することがわかっており、Stage 3 での重 水素放出は照射損傷量増加により形成したボイドに 捕捉された重水素の放出だと考えた。

図3に、各フルエンスにてC⁺照射したWからの重 水素放出挙動を示す。各スペクトルはPeak1(400K付 近)、Peak2(520K付近)、Peak3(600K付近)の3つの ピークに分けられた。Peak1およびPeak2はFe²⁺照 射試料と同様にそれぞれ表面吸着または転位ループ に捕捉された重水素の放出および原子空孔に捕捉さ れた重水素の放出と帰属した。Peak3について、C⁺ 照射Wでは低フルエンス照射時において約30 dpaの 欠陥が導入されており、TEM 観察でもボイドが確認





できることから、Stage 3 と同様にボイドからの重水素放出と考えられる。また高フルエンス照射では Peak 3 として重水素放出が増加することから、照射誘起拡散による欠陥の集合、ボイドサイズの増加が生じたことが と考えられる。しかし、その放出温度は、Fe²⁺照射試料と比較して 100 K 以上低かった低温側にシフトしていた。これは W-C 混合層において、炭素も重水素と同様に欠陥中に存在するためと考えられ、これにより欠陥 中の重水素がエネルギー的に不安定な状態となり、低温で重水素が放出したと考えられる。

- [1] H. Eleveld et al., J. Nucl. Mater. 191 (1992) 433
- [2] O.V. Ogorodnikova et al., J. Nucl. Mater. 415 (2010) 661
- [3] Zhu Shungyun et al., J. Nucl. Mater. 343 (2005) 330

平成 25 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。そして、非平衡系プラズマの統計力学を構築する事を目指す[1]。

#### 実験観測の進展

「遠非平衡」という概念がしばしば用いられる。最近では Inagaki, et al.によって長波 長揺動が発見される等[2]の研究進展が目覚ましい。非平衡性を特徴づけるには、励起 強度の等分配からの逸脱とともに、スケールの分離不可能性も本質である。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。

時間空間におけるスケール混合のなかで代表的な現象としては L-H 遷移があげられる。その問題について、遠非平衡系の物理の視点から研究した。そこでは、巨視的な径電場と急峻な勾配、メゾスケール揺動の帯状流(GAMs を含む)、ミクロ揺動としてのドリフト波、等が共存している。遠非平衡系の物理の視点から解析を行った[3]。多種の電場について、(1)巨視的な径電場と急峻な勾配:H-modeでは半値半幅約7mm;(2)メ ゾスケール揺動の帯状流(GAMsを含む):L-modeで観測された GAMs は波長約10cm; (3)ミクロ揺動としてのドリフト波:L-modeでは相関長1-2cm;という結果を得た。更に、

高周波ミクロ揺動 の(低周波)振幅 変動が内部編伝播 する現象が発見さ れ、その伝播長は 10cm 程度に及ぶ 事も確認された。

成果に立脚し、 同様な L-H 遷移時 の自律振動現象に 関するアセスメン トを取りまとめ (右表)レビュー

Device	Ref (year)	loca- tion	LCO freq.	Diag- nos.	mean Er	zonal flows	phase rela- tion in LCO
JFT-2M	[12] (91)	edge	0.5 kHz		perhaps	not measured	CCW
ASDEX-U	[33] (94)	edge	~ 1.5kHz		perhaps	not measured	CCW
NSTX	[23] (10)	edge SoL	~ 3 kHz	GPI	?	?	SoL density - Vp: anti corre- lation CCW?
ASDEX-U	[35] (11)	edge	~2.5kHz	DBS	Y	GAM	
EAST	[36] (11)	edge	4 kHz	Probe		ZF: energy balance	anti- correlation
DIIID	[37] (12)	edge	~ 2kHz	DBS	Y	ZF: radial wave number	CW and variations
DIIID	[38] (13)	edge	~2.5 kHz	Probe	maybe	ZF: energy balance	CW
HL-2A	[39] (13)	edge	2~3kHz	Probe	Y	perhaps No	CCW and CW
JFT-2M	[41](13)	edge	4.5 kHz	HIBP	Y	No	CCW
TJ-II	[43] (10)	r/a < 0.8	~ 2kHz	DBS	_	maybe	CW
CHS	[42](98)	r/a ~ 0.4	~ 0.5kHz	HIBP	leading bifurcation	not measured	
снѕ	[49] (06)	r/a ~ 0.4	low freq.	HIBP	leading bifurcation	zonal flow	ZF-turb.: anti-corr.

を発表した[4]。

さらに、Inagaki らは、時間変動する熱源 に対し、プラズマの温度勾配や熱流が動的 に変動する現象を観測し、温度勾配 grad *T* と熱流 *q* とが

### $q/n = -\chi$ grad *T*



のような一意の関数(拡散的関係)を示すのではなく、ヒステリシスを持つ事を発見した[5]。(nはプラズマ密度。)右上図に実験結果を引用する。従来、輸送関係がL-H遷移のような特異の場合[6]を除き一意の関係にあると信じられて来た。そして、その仮説のもと、輸送関係がどのようなものか探索されて来た。右上図で、実線は、Inagakiらの実測によるヒステリシスを含む輸送関係である。点線や一点鎖線は、一意関数としての当てはめを二つの方法で試みたものである。両者がかけ離れている事は何十年来の謎であった。しかしながら、Inagakiらの発見は、輸送の応答が更に高い次元に埋め込まれたものである事を明示し、こうした従来の謎を解消している[7]。従来の研究が本質的な問題を見逃していた事を示した。

#### 新しい熱力学変数

この Inagaki らの発見は、温度勾配や密度勾配等の、従来考えられていた熱力学変数の他に、輸送を司る新しい熱力学変数がある事を示している。

理論的にこの問題に取り組み、プラズマの位相空間まで乱流輸送の問題を拡張した。 そして「分布関数を変形する力」に着目する事で、プラズマの加熱入力が直接に熱流を 変化させる可能性を指摘した[8,9]。従来の解析は、分布関数の変化(マックスウエル分 布からのずれ)を考察することはあったが、「分布関数を変形する力」に着目する事は 無かった。分布関数を変形する力は、加熱入力が加わった時点で効果を持つが、分布関 数の変化は変化に必要な時間遅れを持って起きるので、時間差が出て来る。Inagaki ら の観測は、分布関数のマックスウエル分布からの顕著なずれを伴わずに上記のヒステリ ススがうまれる事を示唆しており、新たな熱力学的な力の必要性を支持している。

プラズマの乱流輸送の問題にはいくつかの大きな謎が残されており、この成果は、大 きな謎を解決する為の今後の研究の方向を示している。

#### 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] T. Kobayashi, et al.: Phys. Rev. Lett. 111, 035002 (2013)
- [4] K. Itoh, et al.: Plasma and Fusion Research 8 (2913) 1102168 (review)
- [5] S. Inagaki, et al.: Nucl. Fus. 53 (2013) 113006
- [6] S.-I. Itoh and K. Itoh, Phys. Rev. Lett. 60, 2276 (1988).
- [7] S. Inagaki, et al.: Plasma and Fusion Research 8 (2913) 1202172
- [8] Itoh, S.-I. and Itoh, K.: Sci. Rep. 2 (2012) 860
- [9] Sanae-I. Itoh, Kimitaka Itoh: Nucl. Fusion 53 (2013) 073035

# 有限自由度モデルを用いたプラズマ乱流の統計解析

Statistical analysis of plasma turbulence by a few degrees of freedom models

## 富山大学·人間発達科学部 成行 泰裕

### 研究目的:

プラズマ中に圧力・密度・温度勾配やビーム成分などが存在する時、それらを緩和する過程 でドリフト波乱流などが励起される。プラズマが層流状態から乱流状態へ遷移する過程にお いては、乱流中の不安定モードは少数であると考えられるため、系から少数の不安定モード を抜き出した少数自由度モデルを用いた解析が可能である。ただし、小数自由度モデルに おいても個々のモードの時間発展はカオスになるため、統計的な性質の理解が不可欠であ る。本研究では、森の射影演算子法を用いたドリフト波乱流の小数自由度モデル(VZSC モ デル)の研究を発展させ、これまでの共同研究で議論してきた拡張 VZSC モデルやパラメト リック不安定性の小数自由度モデルの統計的性質の議論を行う。

### 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:

(1)射影演算子法を用いた周期成分の同定(VZSC モデル)

VZSCモデルの時系列データを用いて、射影演算子法から導かれる時間相関スペクトルと記憶スペクトルの関係式[2]を用いて周期振動を同定する手法[3]の議論を行った。時系列データの時間相関関数を指数減衰する正弦波の重ね合わせで近似した式を用いて、記憶スペクトルに含まれる周期振動を求めた(図 1 右)。その結果、(1) 各モードの振幅を調整することで直接数値計算から求められる時系列のパワースペクトルのピークに大まかに対応した周期解が得られること、(2)求まった周期解が時系列と整合するものか否かは記憶スペクトルの実部(減衰率または成長率)の大きさによって判定できること、が明らかになった。また、1 周期解の場合(図 1 左)には時間相関スペクトルから記憶スペクトルが一意的に求まることを確認した。

### (2)有限温度比を含む VZSC モデルの拡張

反磁性ドリフトの対流項への寄与が前年度議論した有限温度比を含む VZSC モ デルヘ与える影響を議論した。その結果、温度比を用いて規格化したパラメータ(*R*') に対しては解の分岐は変化しないことが分かった。



図1 (左)周期解(R=1.869)、(右)カオス解(R=1.873)の場合の記憶スペクトルの実部。 直線と曲線の交点が周期解を表す。丸を付けた個所がパワースペクトルのピー クに対応する解である。

(3)その他の小数自由度モデルの数値解析

簡約化 MHD モデルから導出された 5 変数のローレンツモデル[4]、およびアルヴェン波カオスの小数自由度モデル[5]の直接数値計算データを用いて、間欠性などが見られるパラメータの場合の時間相関関数を求めた。

引用文献: [1] A. A. Vasil'ev et al, Sov. J. Plasma Phys., 16(10), 1990. [2]H. Mori and M. Okamura, Phys. Rev. E, 80, 051124 (2009). [3] D. Hamada, Master's Thesis of Interdisciplinary Graduate school of Engineering Science, Kyushu University, 2007. [4]T. Aoyagi et al, J. Phys. Soc. J., 66(9), 2689 (1997). [5] T. Hada et al, Phys. Fluids B 2(11), 2581 (1990); A. C. –L. Chian et al, J. Geophys. Res., 11, A07S03 (2006).

### 公表状況:

なし

### 研究組織:

成行泰裕(富大・人間発達)、佐々木真(九大・応力研)、羽田亨(九大・総理工)

### 謝辞:

有益なコメントを頂いた九大応力研の糟谷先生に謝意を表します。

PdCu 透過薄膜を用いた水素原子束プローブの開発

#### 課題番号:25FP-12

研究課題: PdCu 透過薄膜を用いた水素原子束プローブの開発

**研究期間**:H25年4月1日-H26年3月31日 **所内世話人**:図子秀樹

協力者: 4名 (渡辺久之、南本敏宏、図子秀樹, S.K.Sharma)

配分額:研究費(4万円),旅費(9万円)

#### 目的:

真空中での水素分子モニターは各種の電離真空計が多数存在するが、水素原子モニター機器は実用に耐 える形では十分には確立していない。金属中に水素は分子としては存在せず、原子あるいは陽子として存在 していると考えられている。本研究では水素原子束の実時間観測プローブを開発し、四重極ガス分析器と組 み合わすことで金属中あるいは金属を透過する水素の定量評価装置の確立をめざす。このプローブシステム を複数個制作し QUEST 内の複数の位置に設置し、透過量を観測することで、壁への入射水素束の世界で初め ての多点実時間計測をめざす。

QUEST 実験装置での定常プラズマや様々なプラズマ配位において、本システムで水素原子束を観測し、数値計算を用いて、壁への入射原子束を実時間で推定することを目指す。これにより1)プラズマ実験において正確な壁入射フルエンスの実測、2)局所壁吸蔵率とglobal 吸蔵率との関係を明らかにする。

#### 実施方法:

PdCu を薄膜状(22μm)にし、真空に耐えうるように両面を透過率 50%、厚さ1ミリのステンレス構造で 支持する原子束計測プローブ(長さ約 80mm,直径 30mm)を開発した。H24 年にこのプローブを QUEST 内の下側 ダイバーター部に設置し、水素原子束モニタープローブ(検出下限 1E15 H2/m²s)としての性能を 100-400 度 の温度範囲で満たすことを確認した。H25 年度はこのプローブをさらに2個制作し、上下のダイバーター部、 水平壁部に設置し、多点位置に置いての局所吸蔵率の推定が可能になる。この数値と gas balance(ガス注 入量と排気量のバランス)法で決定する装置全体の global 吸蔵率との比較を行う。可能であれば、ダイバ ータ部に強い磁場の下で使用可能な真空ゲージを設置し、水素分子並びに原子の挙動解明を行う。

実験結果:申請者らは、平成21年から23年にかけてQUESTに直径16mmφの透過プローブ(Ni,SUS,W,Pd 薄膜)を設置し、水素透過の実測を行ってきた。これにより、数1000ショットに及ぶ期間でもプローブ が安定して動作すること、同一プラズマ条件での透過量の再現性が極めて優れていること、プローブは水素 原子に対して感度が高いこと、約3桁の範囲にわたって透過量が測定できることなどを確認し、数値計算を 援用して、Ni中の物性値(拡散係数の温度依存性等)を実測するなど、プローブとしての基本的な特性を明 らかにした(発表論文:Takagi,JNM 2011(S692-695), Sharma,JNM2012(83-93), Sharma,FED 2012(77-86) 等)。H24年度には新たにPdCu薄膜を用いたプローブを作成設置し、その性能と計測領域を飛躍的に向上さ せることに成功した。H25年度には3か所にプローブを設置し、最新の成果を2013年のトリチウム関係の国 際学会にて発表した。 新しいプローブは図1に示すように、上 下の平板ダイバーター、および外側壁状に設 置した。プローブへの入射束はこのプローブ に垂直方向のみに限定しているので、いずれ も磁力線を横切るイオン束、ならびに中性粒 子束を検出している。

### ガス摂動に関する壁排気の応答

ECR 加熱により水素プラズマを生成し、パ フ入射を粒子摂動源とした時の透過束の応答 を調べ、プラズマ一壁システムの粒子循環を 調べた。図2に外側 probe の結果をしめす。 真空排気の時定数が3秒程度なのでパフ 周期を5sから40sに変化させると、系内 の圧力がさがる。それに伴い、観測透過束 は減少するが、摂動振幅は明瞭に観測され る。図3には摂動成分をガスパフに対する 時刻を基準に平均化処理を施したもので ある。4秒ほどの時間遅れで信号が現れる が、それは膜厚20µのPdCuを拡散するに 要する時間でこれより拡散係数信号は1 5秒で減少に転じており、壁排気がこの時 刻以降は減少することを示している。



H2 ガス puff 周期を 5s-40s と変えることにより、摂 動振幅と平均信号レベルの変化を取得している。

$$\frac{dP}{dt} = -\frac{P}{\tau_{pump}} + q_{gas}(t) + q_{th}(t, T_{wall}) + q_{ret}(t, P_H, \Gamma_{wall}) + q_{rel}(t, P_H, \Gamma_{wall})$$

$$P_{pdp}(t) = \int (q_{gas}(t - \tau)\eta_{pdp}(\tau)d\tau, => retention$$

上記の方式は壁排気・壁放出過程を含む粒子循 環モデル方程式である。ガスパフを単位 impulse としてそう応答関数を pdp に関し て求める。比較を図3に示すが、定性的な よい一致が得られる。ここで用いたモデル

応答関数は $\eta_{pdp} = t^2 exp(-t/3\tau_d)$  と表

すことができた。 $\tau d$ はほぼ排気時定数 であり、約3倍の成分と $t^2$ の早い成分 の重ね合わせである。



図 3a) 透過束の摂動成分の条件平均 5秒周期はこの図の縦軸スケールでは見えない。(b) 応答関数を 求め、観測を再現した結果。

# 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 ~電子および重イオンの重畳照射に伴う微細組織変化~

九大工 川波 隼己(院),桑原 健人(院),山本 知一,吉岡 聰,安田 和弘,松村 晶

#### 1. 目的

酸化セリウム(CeO₂)は、軽水炉燃料として使用実績のある酸化ウラン(UO₂)と同一の蛍石型構造を呈し ており、融点や熱伝導度などの物性もUO₂に近い値を示す。このため、軽水炉燃料の模擬材料に適する と考えられ、これまでに様々な照射効果に関する研究が行われてきた。また、蛍石型酸化物セラミックス は、優れた耐照射損傷性を有することが報告されており、使用済み核燃料中に生成する長寿命核種の 核変換処理や、余剰プルトニウムの削減を目的とした不活性母相の候補材料としても注目されている。こ れまでの研究により、CeO₂へ電子および重イオンを照射すると、CeイオンとOイオンの質量差に起因して O イオン副格子の選択的、または優先的なはじき出し損傷が起こることが報告されている。しかしながら、 電子および重イオンを重畳して照射した場合の微細組織変化については十分な知見が得られていな い。

本研究では、CeO2 を対象として透過型電子顕微鏡(TEM)を用いた電子照射およびイオン加速器を用いた重イオン照射を行った。電子照射後に重イオン照射を行い、酸素イオン副格子のはじき出し損傷に由来する欠陥が、両イオン副格子のはじき出し損傷を誘起する重イオン照射に及ぼす影響について明らかにすることを目的とした。また、重イオン照射後に電子照射を行い、両イオン副格子のはじき出し損傷に由来する欠陥が、酸素イオン副格子の選択的なはじき出し損傷を誘起する電子照射に及ぼす影響について知見を得ることを目的とした。

#### 2. 実験方法

本研究で用いた試料は、レアメタリック社製の純度 99.99%の CeO₂ 多結晶粉末から作製した焼結体である。焼結体から直径 3 mm の板状試料を打ち抜き、研磨・ディンプル加工を施した後、Ar イオンミリングにより TEM による観察に適する薄膜試料を作製した。

電子照射実験は超高圧電子顕微鏡室の日本電子(JEOL)社製 JEM-2100HC を用いて行い、電子照 射下において照射欠陥が形成、成長していく過程を「その場」観察した。電子線の入射方向は B=<011>、 加速電圧は 200 kV とし、照射および観察は全て室温で行った。また、電子線東密度は 1.7×10²³ e/m²s とした。

重イオン照射実験は九大応用力学研究所のタンデム型イオン加速器を用いて行った。照射は室温で行い、照射量 $5\times10^{17}$ および $1\times10^{18}$ ions/m²とした。電子顕微鏡観察は電子線の入射方向B=<011>から、回折ベクトルg=<111>を用いてg/3gの二波励起の条件を用い、明視野法および軸上暗視野法により行った。

#### 結果および考察

CeO₂試料に対して照射強度 1.7×10²³ e/m²s にて 200 keV 電子を照射しながら、微細組織変化の「その場」観察を行った。200 keV 電子の照射下では O イオンのみにはじき出し損傷が誘起され、最大照射時間でのはじき出し損傷量は 0.42 dpa と評価された。図 1(a)に電子照射開始から 420 s 後の明視野像を示す。このときの O イオンのはじき出し損傷量は 0.1 dpa である。照射時間の経過に伴い、照射欠陥集合体の核形成・成長が確認された。この照射欠陥は、これまでの報告から酸素イオンのみにより構成される {111}面に晶壁面を持つ転位ループであると考えられる。電子照射下において、これらの転位ループは可動性を示し、移動や合体、表面での消滅などが観察された。次に、2.4 MeV Cu²⁺イオンを CeO₂試料に

対して室温で照射を行った。図 1(b)は照射量  $1 \times 10^{18}$  ions/m² まで照射した際に形成された転位ループ の明視野像である。このときの O イオンおよび Ce イオンのはじき出し損傷量は 0.1 dpa である。これまでの 研究から、この転位ループは定比組成を保つ完全転位ループと考えられ、電子照射により形成された転 位ループとは性状が異なるものである。また、電子照射により形成された転位ループと比較すると、大きさ には顕著な差が見られないのに対し、密度は Cu²⁺イオン照射による転位ループのほうが高くなっているこ とがわかる。

Cu²⁺イオン照射により欠陥が導入された試料に対して照射強度 1.7×10²³ e⁻/m²s で 200 keV の電子照 射を行った。図 2 はイオン照射後に行った電子照射の時間経過に伴う欠陥集合体の形成、成長を示す 明視野像である。追加の電子照射により新たな欠陥集合体が形成され、これらは照射時間に伴って成長 および移動することが観察された。一方、重イオン照射により形成された転位ループは、電子照射を行っ ても成長・移動をしなかった。Cu²⁺イオン照射に電子照射後を行った試料では、電子照射のみを行った 試料に比較して高密度の転位ループが形成されることもわかった。このことは、重イオン照射により導入さ れた微小な"見えない"欠陥集合体が電子照射下での転位ループの核形成を助長していることを示唆し ている。



図1 (a)電子照射、(b)重イオン照射により形成された転位 ループの明視野像



図2 2.4 MeV Cu²⁺イオン照射試料へ200 keV 電子 照射を行ったときの欠陥集合体の形成・成長を表す 明視野像,時間は電子照射時間を表す,電子線束 密度は1.7×10²³ e⁻/m²s.

多孔質金属膜への水素捕捉に関する研究

九州大学大学院総合理工学研究院 片山一成

#### 【目的】

環境負荷の小さな水素は、近年クリーンな二次エネルギーとして注目されており、水素の製造・貯蔵・輸送に関 連する技術向上のため、高機能材料開発及び様々な材料における水素挙動の理解が求められている。ジルコニウム やパラジウムが優れた水素吸蔵能を有するのに対して、白金やタングステンはほとんど水素を吸蔵しないことが知 られている。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 薄膜は、高い水素保持特性を有することが明らかとなっている。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。 堆積条件と水素捕捉量の関係をより詳しく調査するため、昨年度、誘導結合プラズマを利用した小型のスパッタリ ング装置を作製し、水素・アルゴン混合プラズマによる金属膜の作製を開始した。本装置では、導入ガス中の水素 /アルゴン比を変えることで、広い範囲の水素フラックスでの実験が可能である。また小型であるため、リボンヒ ーター等によって容易に 500℃程度までの加熱が可能である。本年度はタングステンを試料とし、より実験条件範 囲を広げて、水素フラックス及び堆積温度と水素捕捉量との関係を明らかにすることを目的とする。

#### 【実験方法】

Fig.1 にプラズマスパッタ薄膜作製装置の概略図を示す。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)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水素及びアルゴンガスをそれぞれマスフローコントローラーで流量制御し導入した。流量比により任意の水素濃度及 び圧力に調整した後、石英管上流のサンプリングポートからガスを採取して、ガスクロマトグラフ(GC8A: SHIMAZU Co.)により水素濃度を測定した。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金属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。金属膜中に含まれる元素は、九州大学中央分析センターの EDX により分析した。石英基板とともに金属膜を破断し、その破断面を 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。放電ガス圧は、プラズマ下流側に設置した隔膜式圧力計(Baratron 626B, MKS Ltd.)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・アルゴン混合プラズマからの発光 強度をプラズマプロセスモニター (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 H₂⁺、アルゴンイオンは Ar⁺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。

タングステン膜に捕捉された水素量はアルゴ



Fig.1 プラズマスパッタ薄膜作製装置概略図

ンガス中での昇温脱離により求めた。金属膜試料を基板ごと 昇温加熱装置内に設置し Ar 雰囲気で室温から 800℃まで 100℃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。

#### 【結果及び考察】

水素濃度 20%、50%、80%の放電ガスを用いて比較的低温 (34℃、38℃、45℃)で作製されたタングステン堆積層から の水素放出結果を加熱温度に対する水素残留量としてFig.2に 示す。700℃では水素放出は検出限界以下であり、600℃まで にほとんどの水素が放出されることがわかった。水素捕捉量 は、放電ガス中の水素濃度に比例して増加しているものでは ないことがわかる。Fig.3に水素濃度80%の放電ガスを用いて、 基板温度 45℃、300℃、500℃での水素放出結果を加熱温度に 対する水素残留量として Fig.3 に示す。水素捕捉量は、堆積時 の基板温度が低いほど大きいことがわかる。また、堆積過程 での基板加熱と堆積後の基板加熱では、同じ温度でも水素捕 捉量が異なることがわかる。例えば、基板温度300℃で比較す ると、45℃で堆積しその後 300℃に加熱した場合 0.047 H/W の 水素が残留するが、300℃で堆積させた場合の水素捕捉量は、 0.017 H/W と約 1/3 である。これは、堆積時の基板温度が高い ほど、飛来するタングステン原子の表面拡散が促進され、堆 積層の不規則構造が緩和されることにより堆積層中の水素ト ラップ密度が減少するためと考えられる。Fig.4 に堆積層成長 表面に衝突する水素フラックスとタングステンフラックスの 比に対する水素捕捉量を示す。水素フラックスには、ターゲ ットに入射する水素イオンフラックスと反射係数から求まる 反跳水素フラックスを用いた。タングステンフラックスは、 堆積速度から求めた。基板温度 307-429K では、全実験範囲に おいて、フラックス比の増加に伴って捕捉量が増加している。 573K では、フラックス比 2.8 から 10 では捕捉量の増加が見ら れるが、それ以上のフラックス比では0.01でほぼ一定である。 773K では、全実験範囲において捕捉量は 0.003 でほぼ一定で ある。これら結果から、堆積過程での基板温度に依存して飽 和捕捉量が決まり、水素/タングステンフラックス比が小さい と飽和値よりも小さな捕捉量になると言える。基板温度が 160℃程度より低い場合については、本実験条件範囲にて飽和 値が得られておらず、その定量にはさらに水素/タングステン フラックス比の高い条件での実験が必要である。

#### 【結論】

タングステン堆積過程での水素捕捉量の飽和値は、573K で 0.01 H/W、773K で 0.003K である。

【成果報告】



Fig.2 堆積後の基板加熱温度に対するタングステン 堆積層中の水素残留量(水素濃度依存性)



Fig.3 堆積後の基板加熱温度に対するタングステン 堆積層中の水素残留量(堆積時基板温度依存性)





- K. Katayama, Y. Ohnishi, T. Honda, et al, "Hydrogen incorporation into metal deposits forming from tungsten or stainless steel by sputtering under mixed hydrogen and argon plasma at elevated temperature", J. Nucl. Mater., 438 (2013) 1010-1013.
- [2] 上原敬一朗、<u>片山一成</u>、本田拓也ら、"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堆積層 における水素透過挙動"、日本原子力学会 2013 年秋の大会、平成 25 年 9 月 3 日-5 日、八戸工業大学

### 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 宫本光貴

#### 1. はじめに

イオン照射された材料の表面特性変化の理解は,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る.我々はこれまでイオン照射された金属 材料の劣化程度を非破壊で診断する手法の提案を目的として,照射下での金属ミラー材の光反射率変化 を調べてきた.その結果,昨年度の共同研究において,ヘリウムイオン照射したモリブデン(Mo)の表面 組織および光反射率に強い結晶方位依存性が認められた[1].本年度はそのメカニズム解明のために方位 の異なる3種類の単結晶試料を用いて微細組織やガス保持特性の方位依存性を調べた.

#### 2. 実験方法

試料は㈱ニラコ社製の単結晶 Mo 試料(岡山理科大学理 学応用物理学科平岡教授より御試供)を用いた. SEM-EBSD により結晶方位を評価した後に,試料表面が それぞれ(001),(101),(111)面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3keV-He+イオン照射 を行い,照射後の表面組織を SEM,表面直下の内部損傷 組織を FIB-TEM により観察した.さらに,各試料におい て照射後の昇温脱離実験を合わせて行った.

#### 3. 結果および考察

昨年度の光反射率測定の結果,(001),(101),(111) を試料表面にもつ単結晶試料の3keV-He+イオン照射後 の光反射率は,(110),(111)試料において,(100)試料と比 較して大きな反射率劣化が観察されている[1].これらの 試料において SEM による表面組織観察を行ったところ, (100)試料においてのみ表面の剥離に起因すると思われる クレーター状の窪みを伴った顕著な表面損傷が観察され た(図1).一方,(110),(111)試料では,マイクロスケ ールの表面凹凸は観察されず,10nm以下の緻密なホール の形成が確認された.(100)試料においては,表面の剥離 により,局所的に損傷の少ない滑らかな表面が出現するの に対し,(110),(111)試料では表面直下に高密度のヘリウ ムバブルによる損傷組織が一様に形成しており,これが光 反射率の低下をもたらしたと考えられた.

このような顕著な結晶方位依存性は,照射後試料の昇温 脱離実験からも確認された.図2には,各単結晶試料に3 keV-He+イオンを 1x10²² He/m² 照射した後の昇温脱離ス



図1 室温で 3keV-He⁺を 10²² He/m² 照射した単結晶 Mo 試料の表面組 織 (SEM 像).

ペクトルを示す. (100)試料においては,900 K 以下の温度域に比較的小さな放出ピークのみが現れるの に対し,(110)や(111)試料では同温度域に大きな放出ピークが出現し,特に(110)試料においては1400K を超える高温域まで続くヘリウム放出ピークが確認された.この結果,(110)試料は,(100)と比較して3 倍程度大きいヘリウム総放出量を示した.したがって(110)試料には,ヘリウムの捕捉サイトとして機能 する多量の損傷が形成していると考えられる.

光反射率やヘリウム保持特性の顕著な違いについて調べるために,(100),および(110)試料の FIB 加 工を行い,TEM による表面近傍の断面微細組織観察を実施した.図3に示すTEM 像から,両試料に おいてヘリウムバブルが表面直下から数10nmの深さまで高密度に形成していることが確認できる.光 反射率測定で用いた光のモリブデンに対する侵入長は10nm 程度と見積もられることから,光反射率に これらの損傷組織が大きく影響していると考えられる.また,両試料においては期待されたほどではな いが,損傷組織に違いが確認された.(110)試料において,より大きなバブルの密度が高くなっている. 高温下におけるヘリウムバブルの移動度はその直径の・4 乗に比例するため[2],こうした大きなバブルが 昇温脱離実験の高温まで続くヘリウム放出をもたらしたと考えられる.一方,(100)試料では,局所的な 表面剥離の原因となるバブル間の破断が観察された.このバブル間の破断はヘリウムの容易な拡散経路 として機能するため,剥離を生じることで照射中のヘリウム放出を促進し,結果的に低いヘリウム捕捉 量を示したと考えられた.



図2 3keV-He+照射した各単結晶
 Mo 試料からのヘリウム昇温脱
 離スペクトル.



図 3 3keV-He+照射した単結晶 Mo 試料の断面微細 組織観察(TEM 像).

[1] 宮本光貴 平成 24 年度九州大学応用力学研究所共同研究成果報告書 [2] E.E. Gruber, J. Appl. Phys. 38 (1967) 243

#### ● 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准教授) 所内世話人: 渡辺英雄(九州大学応用力学研究所准教授) 研究協力者: 山本将寬,飯島信行(島根大学大学院総合理工学研究科博士前期課程) W ダイバータ構造体の健全性評価基準の策定および検証 Standardization and Verification of Lifetime Evaluation Method of W-Divertor Structural Component 韓 文妥¹、奥西良成²、谷口修一²、能登裕之²、橋富興宣¹、大村高正¹、木村晃彦¹

1京都大学エネルギー理工学研究所、2京都大学エネルギー科学研究科

背景と目的:ITER のダイバータ冷却ユニットとして、タングステン(W)プラズマ対向材料(PFM)を モノブロック(MB)型要素体として銅合金冷却管に組み込み、加圧水にて冷却する方式を適用するこ とが検討されている。一方、原型炉仕様としては、W-MBの冷却ユニットのプラズマ照射下健全性や銅 合金の耐中性子照射特性に問題が生じるとの懸念が示されているが、その限界についての詳細な検討が なされていない(図1)。また、ダイバータの健全な運転のためには、ダイバータ冷却ユニットの製造 時における冷却管の接合状態(接合部の健全性)や運転中にW-MBに発生するき裂や溶融等の損傷の重 篤さの評価技術開発が不可欠である。冷却ユニットの健全性評価に関しては、原型炉のダイバータにお いてもITERと同様な手法がとられると考えられるが、ITERにおいても製造時の検査方法や運転後の交 換時期を定める評価方法、すなわち、健全性評価基準は定められていない。

本研究では、W-MBユニットの製造時における合格基準や運転中に損傷を受けたW-MBの交換時期を 定めるための健全性評価基準を策定するため、W-MB製造に関する情報収集および検証試験を行い、そ れに基づいた健全性評価法の検討を行う。これらを基に、ITERおよび原型炉対応型ダイバータユニッ トへの健全性評価法の適用可能性について検討し、核融合炉ダイバータの設計および開発に寄与する ことを目的とする。

結果と考察: 熱負荷試験(20MW/m²で1000 サイクル)終了後のITER用Wモノブロック冷却要素体 (Wモノブロック(30 mm×30 mm×12 mm)をクロムジルコニウム銅(CuCrZr)製の冷却管(15 mmφ×1.5 mm t)に無酸素銅で接合したもの)を入手し、損傷の状況を把握するとともに、き裂導入経路を含め、組 織観察及び硬さ測定を実施した。組織観察は 0.25 µm の砥粒でバフ研磨した後、腐食液(K3[Fe(CN)6]:2 g, NaOH: 2 g, H2O: 20 ml)を用いてエッチングを行ったものを走査型電子顕微鏡(SEM)により実施し た。また、熱負荷に伴う組織変化が硬さに与える影響を調べるため、マイクロビッカース硬さ試験機を用 いて硬さを測定した。

#### 1) Wモノブロック冷却要素体

Wモノブロックは2種類であり、加熱表面から冷却管までの距離がそれ ぞれ3および6mmである。前者(A:図1)は溶融は生じておらず、表面 状態は良好であったが、Wにき裂が認められた。一方、後者(B:図2)で はW表面が溶融していたが、Wにき裂は観察されなかった。

#### 2) 熱負荷による組織変化

Aブロックにて観察されたき裂は、粒界に沿っており、再結晶 W に特有 の粒界脆化によると考えられる。熱負荷試験終了時の冷却の過程において、 表面近傍が先に冷却し、熱収縮が生じた際に、表面近傍に引っ張り応力が 負荷された結果、き裂が生じたと推測できる。Bブロックにおいて、亀裂 が発生しなかったのは、1) A においては表面と冷却管の距離が長く、温度 勾配が Bに比べ、小さかったことと、2) B では表面が溶融しており、冷却 初期時において表面において引張応力が負荷されなかったことが原因とし てあげられる。Bモノブロックの断面(冷却管の長手方向に垂直)におけ る結晶粒径を及び硬さを測定した結果、断面は溶融部、再結晶部、回復部 の3層に分類され、それぞれ、結晶粒径は、約300、20、3µmであり、硬 さは、375、389、465 MPa であった。A モノブロックにおいては、結晶粒 径は最大でも約20μmであり、W冷却は適切に行われたことを示唆してい る。加熱面に最も近い部分は深さ 1.5 mm の部分まで平均結晶粒径が 300 μm、中間層は深さ 2.0 mm で粒径 20 μm、最も冷却管に近い部分は粒径 3 µm であった。ただし、図3の加熱面近傍の濃いグレーは、粗粒部を意味し ており、銅管上部の W の厚さにより、粗大粒の領域が変化する。



図1:W-モノブロック(A)



図 2: W-モノブロック(B)

九州大学施設利用に係る報告書

「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 福島燃料材料試験部 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、PNC316 鋼と同じオーステナイト鋼であり耐スエリング特性に優れた 高 Ni 鋼の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開発を目指している。 高 Ni 化や高温域でも安定な析出物の均一化等により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を行い、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。

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。

また、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、 今回は応力無負荷での微細組織観察試料とした。挙動評価の比較材として、Self イオンで あるNiイオンを、照射温度500、600、700℃、照射量100dpaで照射した高Ni鋼(15Cr-35Ni、 炭窒化物析出型) 試料も観察試料とした。観察試料の作製にあたっては、九州大学応用力 学研究所設置の収束イオンビーム加工観察装置を用いた。

### 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1 照射試料断面の微細組織観察結果(400℃, ^{mm}5dpa)

応力無負荷における高Ni鋼(15Cr-43Ni、γ¹γ"弱析出型)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γ¹γ" (Ni₃(Ti,Al)/Ni₃Nb)析出物は安定に存在していた。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2 照射した高 Ni 鋼試料断面の微細組織観察結果(700℃, 200dpa)

また、応力無負荷における高 Ni 鋼(15Cr-35Ni、15Cr-43Ni)の 500~600℃、100dpa におけるスエリング挙動の結果を図-3 に示す。高 Ni 鋼のスエリングピーク温度は、600℃ 近傍であり、微細組織の観察結果からボイドが形成されていることを確認した。今後は、 析出物分布状況の詳細を評価するとともに、冷間加工等を加えて更なる耐スエリング特性 を改良した高 Ni 鋼材の損傷挙動を評価する。



図3 照射した高Ni鋼のスエリング抑制の照射温度依存性(図中の括弧内は照射量を示す)

#### 写真画像解析による QUEST プラズマの形状再構成

電気通信大学 竹田辰興

【目的】トカマクプラズマを安定に維持する上でプラズマの位置および形状を精度よく計測す ることが必要である。今回は水平方向から撮影して得られた画像に適切な逆変換を行いポロイ ダル断面内のプラズマ形状を決定する方法を研究する。

【研究概要】目的の項に記したように、トカマクプラズマを安定に長時間維持する為にはプラ ズマの位置・形状を精度よく測定する事が重要である。従来は電磁気計測の結果を用いてきた が、原理的に、十分期待される結果は得られない。光学的測定ならば、ノイズも少なく直接的 に位置・形状を知る事ができるが、2次元平面上に撮影された画像はそのままではプラズマの 位置・形状を表していない。トカマクプラズマは基本的に軸対称であるので、このことを利用 すれば、撮影された画像を3次元空間のプラズマの位置・形状に変換する事が可能である。我々 は、G. Hommen, et al. の方法に基づき、このような方法が現在の目的のために利用可能かど うか検討した。まず、下記変換式を実行する為のR-プログラム ITOpt j. R を作成した。次に、検 討の為のテストデータとしては合肥トカマク EAST のムービー映像から1コマを切り出して PlotDigitizer により見かけのプラズマ表面位置を読み取る。これに入力してポロイダル断面 内のプラズマ位置・形状を求めた。

**変換式** 変換式の詳細についてここに記すには紙面が足りないので要点だけ記す。対象とする プラズマ等の幾何学的な情報は図1に示す通りである。この方法の要点は、カメラからプラズ マを見た時の視線がプラズマ表面の接線となる時その視線が作る像点が周囲より明るくなると いう事である。図1において、カメラの位置 C ( $u_c$ , $v_c$ , $w_c$ )を与えて、PlotDigitizer で得ら れた像点 E (Projected Edge Point)座標 ( $u_E$ , $v_E$ , $w_E$ )を入力して、プラズマ表面の位置 T (Point of Tangency)座標 ( $u_T$ , $v_T$ , $w_T$ )を求める事が当面の目的となる。異なる E 点に対応する T 点 は、もちろん、同一ポロイダル面状にはないがプラズマが軸対称であるので、これら T 点を集 めることによってポロイダル面内のプラズマ位置・形状が決定する。この変換を行う際には像 面上の像点の描く曲線について数値微分 (du/dv)を計算する事を注意しなければならない。

入力データの準備 まず、ムービーの中からプラズマ表面が比較的はっきりと移っている数コ マの写真を PlotDigitizer で数値化する。代表的な1コマを図2に示す。このようにして求め た数値を、第1図のw=0面上の(u,v)座標に変換する為には、この面上にあって位置の特定 できる点が3点以上写真に写っている必要がある。テスト計算では平面図(図3)および立面 図(省略)から3点を決定し像点の位置を較正した。

**変換計算** 上記データを ITOpt j. R に入力して、ポロイダル断面内でのプラズマの位置・形状を 求める。計算結果の一例(出力データ:黒いシンボル)を図4に示す。 **まとめと今後の課題** Hommen et al. の再構成法はおおむね満足できる結果を与えたが、いく つかの課題や注意すべき点も判明した。(1) プラズマの状態によって入力データとなる E 点の 軌跡が常に明確に得られる訳ではない。特に必要性の高い X 点近傍は背景光が強くてこのまま ではデータを得る事が困難なので対策が必要である。(2) 適切な画像処理によって E 点の軌跡 をある程度明確にする可能性はある。RGB チャンネル分解して R チャンネル像を除いたり、トー ンカーブを工夫するだけでも効果はあるが、一般的な対処法は不明である (3) 入力データ較 正にあたって像面上に位置がはっきりした点が 3 点以上写っている事が極めて重要である。 (4) 今後、オンラインでこの解析を行いフィードバック制御等に用いるときには画像処理ソ フトと解析ソフトが滑らかにつながるシステムを使う必要がある。有望なのは JAVA ベースの Processing と C++ベースの openFrameworks であると考えられるので現在 Processing について 検討中である。また、OpenCV を Python で使うのも有望と考えられる。



推定基準点

ボート上端 v.w)=(2616,470,

(1546.0.0

内壁中心面/ (1426.0.0)









図1

研究課題名:酸化物セラミックス中の水素同位体の溶解、拡散、放出挙動に関する研究

九州大学大学院総合理工学研究院 エネルギー理工学部門

#### 橋爪 健一

1. 目的

核融合システムにおいて生成するトリチウムを含むガスの濃度測定は、トリチウムの回収、漏洩評価の上 で非常に重要である。トリチウムは多くの場合、軽水素や重水素あるいは他のガスとの混合ガスとなること が想定される。このような混合ガスからプロトン導電性酸化物を水素ポンプとして使用し、ガス中のトリチ ウムを濃縮することによってトリチウム濃度の測定精度を向上させる方法が考案され、その効果が期待され ている。この方法は、ガスを高温のまま処理でき、メモリー効果などは小さいと期待されるが、使用される プロトン導電体酸化物は粉末焼結により作製されるため欠陥を多く含み、溶解したトリチウムが粒界、気孔、 析出物などへトリチウムがトラップされる可能性がある。水素同位体のトラップは非常に重要であるにもか かわらず、これまでほとんど研究が進められていない。本研究では、上記水素トラップの影響解明を目指し て、重水素あるいは重水を用い水素同位体の溶解・放出挙動に関する実験・解析を行う。

具体的には、プロトン導電体セラミックスとして、セレート系(例えば、BaCeO₃)、ジルコネート系(CaZrO₃)、 インデート系(BaInO_{2.5})などの材料の水素同位体の溶解、拡散、放出挙動を調べる。また、プロトン導電性セ ラミックスばかりでなく、水素難溶解性のセラミックス(例えばジルコニア)などについても比較実験を行 う。本研究では、これらの試料に高温でのガス吸収法にて重水を均一に溶解させた試料を準備し、応用力学 研究所の昇温脱離ガス分析装置(TDS)を用いて、真空雰囲気で昇温し、水素同位体放出挙動を観測する。それ ぞれの試料の水素放出挙動に、添加元素、結晶粒径、析出相の存在がどのような変化を与えるのかを明らか にすることを目的とした。

#### 2. 実験方法

10%Y 添加 BaCeO₃(原料粉末を(株) TYK より購入)について粉末焼成法(1873K, 20h)により試料を 準備した。各焼結体試料を 0.4x2x8mm³に加工後、重水蒸気曝露(773K, 873, 973K、3h, 22Torr)を行 い、その試料からの重水素の TDS スペクトル(昇温速度 1K/sec)を測定した。

3. 実験結果と考察

773K、873K および 973K で重水蒸気曝露した Y 添加 BaCeO₃の重水の TDS スペクトルを図1に示す。放 出ピーク温度は重水蒸気曝露温度ごとに異なっており、放出量は曝露(吸収)温度の上昇とともに低下 し、また、放出温度も上昇していることが分かった。この結果から、重水の放出が試料中の重水の拡散 に律速されるモデルで、見かけの拡散の活性化エネルギーを評価した結果、表1に示すように拡散の活 性化エネルギーが増加した。すなわち、重水素吸収量が低下すると、相対的にトラップされる水素の割 合が増え結果として活性化エネルギーが増加していることを意味し、BaCeO₃中の水素のトラップサイト の存在を示唆する結果となった。また、放出重水量が水素溶解量に相当するものとして、単純なトラッ プモデルを用いて溶解水素量とトラップ(捕獲)水素量を評価した結果を図2に示す。いずれの曝露条 件においても20%程度の水素がトラップされているという結果を得た。



表1 拡散律速モデルによって評価された活性化エネルギー

D2O 曝露(吸収)温度 /K	773	873	973
見かけの拡散係数の	1.4	1.6	1.9
活性化エネルギー /eV			

4. まとめ

本年度行った TDS 実験の結果は、酸化物プロトン導電体中の水素吸収・放出挙動が内在するトラップのために水蒸気吸収条件によって大きく異なる可能性があることを示した。今後、最適試料調製条件の 探索を含め、よりトラップの影響の少ない酸化物プロトン導電体探索のために、TDS 等の共同利用、共同研究を進めたい。

5. 研究組織

九大総理工:橋爪健一、大塚哲平 大学院生:伊藤篤史、松田浩輝、山下健太 学部生:山口諒真 九大応力研:渡辺英雄

6. 研究成果

・「酸化物材料の水素の吸収、放出挙動」橋爪健一、松田浩輝、波多野雄治、相良明男、日本原子力学会 2013 春の年会(2013.3 ロ頭発表)

• <u>K. Hashizume</u>, K. Ogata, S. Akamaru, Y. Hatano "Solubility of hydrogen isotopes in zirconia ceramics", J. Plasma Fusion Res. Series, 10 (2013) 33-35.

# LHD 長時間放電に曝露された金属材料中のヘリウム粒子の吸蔵・放出挙動

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(95%の面積率)と炭素 製ダイバータタイル(5%の面積率)で構成されている.近年の定常放電では、~1MW の加熱入力で線平均電子 密度 1×10¹⁹ m⁻³のヘリウムプラズマを 47 分間にわたって維持することに成功しており、長時間放電に伴うプ ラズマ壁相互作用(PWI)の研究が加速してきている.しかしながら、典型的な放電では、放電開始後 10 分を経 過するとこれまで壁に吸蔵されていた、つまり壁排気されていたヘリウム粒子が放出側に変化することで密度 制御が困難となることが観測されている.また、対向壁表面から突如として炭素を主とする鉄を含む不純物の 混入が発生し、プラズマ崩壊に至る現象が確認されている.これらの現象はプラズマ放電開始後 10 分というあ る程度の時間が経過しないと発現しないものであり、対向材料の照射やスパッタリング損耗・再堆積が時々 刻々と変化を遂げていることを示唆するものである.そこで、本研究では、大面積を占める第一壁材料表面に おいて、放電時間経過とともにどのような表面変質が発現し、ヘリウム粒子の捕捉特性が変化していくのかを 捉えることを目的として、SUS 試料を~1000s、~3000s、~10000s と長時間放電に曝露する時間を変化させ、 表面変質と粒子捕捉量を時間の関数としてとらえることを目的とした。

#### 【実験方法】

図1に示すように、試料駆動装置を用いて、鏡面研磨および 1050℃で真空焼鈍した新品の SUS 試料を LHD 第一壁位置ま で挿入し、~1MW の加熱入力で線平均電子密度 1×10¹⁹ m⁻³の ヘリウムプラズマ放電に 1000s、3389s、9980s それぞれ曝露した. 取り出した試料を九州大学応用力学研究所に持参し、透過型電子 顕微鏡(TEM)による微細構造解析、昇温脱離ガス分析実験(TDS) を行った.

#### 【結果および考察】

図2に,1000s,3389s,9980s 曝露後のSUS 試料のTEM 像を 示す.上段は主にバブル像であり,白く球場に見えるコントラストが ヘリウムバブルである.全ての照射時間のディフラクションパター ンでデバイリングが確認できる.過去の研究からこれらは炭素と鉄 が混合した Mixed-material 堆積層であることがわかっている.下 段は主に転位ループ像であり,黒色のコントラストが転位ループで ある.1000s の試料ではステンレス基盤へのバブルと転位ループ のサイズが小さく密度も希薄なため、表面の堆積層が邪魔をして



バブルのコントラストをはっきりととらえることができないが、断面 TEM 観察により SUS 基板へのバブルの形成 をはっきりと確認している. デバイリングのコントラストから、照射時間が 3389s になると 1000s と比較して明ら かに厚い Mixed-material 堆積層が形成されているにもかかわらず、よりはっきりとしたバブルと転位ループの コントラストを捉えることができる. 9980s になるとバブルのサイズと密度にさほど変化は見られないが、転位ル ープの密度とサイズはさらに増加していることがわかる. 断面の TEM 観察から、9980s の試料は 3380s(15nm)よりもさらに厚い約 55nm の Mixed-material 堆積層が形成されていることがわかっている. LHD の長時間放電では数 keV 程度のエネルギーのヘリウムが第一壁表面に入射してきていることが示されている ため、第一壁に入射してくるヘリウムの大部分は 55nm の Mixed-material 堆積層中を通過する間にエネルギ ーを失い、捕獲あるいは拡散後に放出されることが考えられる.

図3に,各照射時間曝露後の試料におけるヘリウムのTDSスペクトルと,その積分値(総捕捉量)を示す.全てのスペクトルにおいて1000~1400Kにかけて放出のピークが存在する.これは,SUS基板に形成



図2 各放電時間後の SUS 試料の TEM 像.上段:主にバブル像で,小さなフレームはディフラクション パターン.下段:主に転位ループ像

されているヘリウムバブルからの放出である. また, 室温~600K にハッチをかけている領域では, 各試料とも 急激な放出率(ピーク)が見られるが, 照射量時間(量)が増加するにつれて, その絶対値(放出率)が劇的に増 加していることがわかる. これまで実施されてきた基礎研究の結果と比較して, この放出ピークは 2 種類の捕 捉機構に起因していると考えらえる. 一つは SUS 基板内部のヘリウムバブル周辺の歪場に弱く捕捉されたヘ リウム, もう一つは炭素メインの Mixed-material 堆積層に弱く捕捉されたヘリウムである. どちらがどのくらいこ の放出ピークに寄与しているのかを定量的に把握することは極めて難しいが, 3389s の時点で 15nm の厚さま で成長した Mixed-material 堆積層によって, それ以降入射する大部分ヘリウム粒子は SUS 基板に到達するこ とが困難な状態であったと考えられる. それにもかかわらず, 9980s 照射したものでは一桁以上の放出率の増 加がみられることから, 大部分が Mixed-material 堆積層に弱く捕捉されたヘリウムの放出であると考える方が 自然である. 本結果は, Mixed-material が形成され続ける限り, 室温から急激に放出されるヘリウムが壁表面 に滞留し続けることを裏付けるものである. このようなヘリウム捕捉機構がLHD 第一壁全体に存在することは, 予期しないわずかな壁温上昇が定常長時間放電の密度制御に影響を及ぼす可能性を示唆するものである. これを抑制するには, 対向材料から炭素材料を排除するなどの工夫が今後求められる.





電子ビーム照射による材料表面の高エネルギー密度入射損耗開始閾値の評価

応用ながれ研究所、レーザー技術総合研究所 糟谷 紘一

目的

応用力学研究所の電子ビーム熱負荷発生装置を用いて、諸材料表面を照射し、電子天秤を含む計測装置等 により、表面損耗量(喪失総質量)を測定する。同時に、レーザー変位計等を用いて、3次元表面損耗状態 を観測する。例えば、熱負荷量(X座標)の関数として、損耗深さの最大値や、喪失総質量を(Y座標)表示 し、データフィッティング線を描く。この線を座標原点方向に内挿することにより、熱負荷量の損耗開始閾 値を評価する。粗さの影響が小さい、十分大きな変数量側から、粗さ程度の変数量に向かってデータ内挿を 行うことにより、初期粗さ等が損耗閾値評価結果に及ぼす悪影響を除くことができる。種々のサンプル材料 を照射して、閾値等の比較により、高熱負荷下における諸材料の表面強度(損耗耐力)を定量的に評価する。 異なる入射強度の電子ビームによる評価結果や、各種のレーザービーム照射による評価結果を、既に多く蓄 積しているので、これらと、本共同研究結果の比較を行う。

#### 実験方法

電子ビーム照射ができるような SiC サンプル (5mm 厚 x20mm 角)を複数枚、外注により、大きな寸 法の元板より切り出した。また、照射時サンプルの温度変化を測定するために、この内の1枚に、1mm 径の 熱電対挿入用穴を、外注加工した。これらの用意ができた時点で、電子ビーム照射のためのマシンタイム設 定をお願いしたが、電子ビーム装置排気装置(ターボポンプ制御部)の故障や、受け入れ教官の長期外国出 張等が重なり、年度内に電子ビーム照射が不可能になった。そこで、以下では、本年度に並行して進めた、 パルス繰り返しレーザー照射による予備実験の結果を述べる。

予備実験結果:レーザー照射による構造壁材料の耐力測定

各種の構造材料として有力なものはWとSiCであ るので、最近我々が開発した材料表面耐力測定法に より、レーザー照射・高強度熱入力下での両材料の 耐力を測定した。図1に照射後の両サンプル表面状 態撮影例を、左右に並べて示す.参考のために、物 差しが下部に添えてある。照射条件は、ArFレーザ ー(波長193nm)で,パルス幅10ns,パルス繰り返し 10Hz,ビーム寸法がWの場合0.40x1.5mm²,SiCの場 合0.44x1.35mm²,ビーム中心部でのフルエンスが Wの場合14J/cm²,SiCの場合8.6J/cm²であった。各 サンプル表面上におけるレーザー照射スポットとス ポット毎の多重総照射回数(照射条件)を、図2と 図3に示す。両サンプルの多重照射後の表面上のク レーターを、レーザー変位計により測定すると、2



図1 WとSiCのレーザー照射後表面状態比較




図4 クレーター最大深さによる表面耐力評価

図2 Wの照射位置と位置毎の多重総照射回数



Series No.	Pulse overlaps
1	200
2	20
3	50
4	100
5	500
6	800
$\bigcirc$	1000
8	2000
9	5000

図3 SiCの照射位置と多重総照射回数

次元、3次元形状が得られた。これらの結果を用い て、深さの最大値を多重照射回数の関数として表示 すると図4が得られた。

# 考察

図4を見る限りWとSiCの表面照射耐力に差は、 ほとんどない.但し、レーザー照射強度がWの場合 は、SiCの場合の約2倍弱になっているから、これ から、WがSiCの約2倍弱の耐力を持つことがわか る.次年度には、引き続き、当初目標の電子ビーム 照射を実施し、表面耐力の評価と比較を行いたい。

#### 謝辞

本研究の一部は、大阪大学レーザーエネルギー学 研究センター、核融合科学研究所、九州大学応用力 学研究所、ポーランド・オプトエレクトロニクス研 究所、(株)キーエンス、(株)東海高熱工業 など の支援を受けて行われた。

#### 発表資料

[1] 糟谷紘一ほか、異方性燃料ペレット入射法の改 良と関連壁材料耐力の測定、レーザー学会第456回 研究会「大エネルギー高出力レーザーを利用した科 学研究」報告集、2014年1月8日、大阪大学レーザー エネルギー学研究センター(2014).

[2]K.Kasuya et al., Alternative Schemes to Realize Fast Ignition Inertial Fusions with Modifications of Target Injection Methods and Reactor Chamber Configurations, IAEA-TM on Physics and Technology of IFE Targets and Chambers, Nara, Japan, September 12, 2013, Book of Abstract, IAEA/F1-TM-43826, 23 (2013).

# 多層構造材中の水素同位体拡散・透過挙動に関する研究 (酸化物分散強化型 F82H 鋼中の水素拡散挙動)

九州大学・総合理工学研究院 大塚 哲平

【目的】 核融合実証 (DEMO) 炉ではプラズマ対向材としてタングステンを溶射した低放射化フェライト・ マルテンサイト鋼 (F82H) を利用することが検討されている。その基板材料である F82H 鋼では、高強度化 のために内部に微小な酸化物を分散させた F82H 鋼が開発されている。鋼内部の酸化物は、鋼中の水素の蓄 積および移行挙動に影響を及ぼす可能性がある。本研究では、酸化物分散強化型 (ODS-) F82H 鋼にトリチ ウムを含んだ水素を 298K~473K の一定温度で内部深さ方向に拡散させ、その水素の深さ分布をトリチウムイ

メージングプレート(TIP)法を用いて測定した。また、得 られた水素深さ分布に拡散方程式の解をフィッティングす ることにより水素拡散係数を決定するとともに、鋼内部の 水素蓄積および移行挙動について考察した。

【実験】 試料として ODS-F82H 鋼の角柱試料 (6 mm² x 6 mm) を用いた。鋼内部には、Y₂O₃粒子 (0.3 nm) が密度 5×10²² m⁻³で含まれている。比較として、F82H 鋼 (参照材) および表面に酸化膜 (膜厚約 1 µm) を形成させた F82H 鋼 (以後 Ox-F82H 鋼と呼ぶ) を用いた。すべての試料表面を鏡面仕上げとした。図 1 に示す直流グロー放電(DCGD) プラズマ注入装置内で、トレーサーレベルのトリチウムを含んだ水素を注入した。この際、モリブデン製のマスクに空いた 5 mm φの穴から試料の一端面に 373 K~673 K の一定温度で、15 分~1 時間注入した。DCGD については、62 Pa のガス圧で 400 V のバイアス電圧を負荷することにより行った。

水素注入後、トリチウムイメージングプレート(TIP) 法により、室温で1時間かけて注入面の水素分布を測定 した。つぎに、試料を注入面に垂直に等分することによ り、断面を切り出し、鏡面仕上げとした後に、TIP 法に より水素の移動を防ぐため203 K で24時間かけて断面の 水素分布を測定した。

【結果および考察】 図2に試料の注入面および断面の 水素分布を示す。図中、青色、緑色、黄色から赤色に近 づくほど水素濃度が高いことを意味しており、注入表面 では水素がφ5mmの注入領域に分布していることが示 されている。参照材に比べ、Ox-F82H鋼およびODS-F82H 鋼では、水素が均一に分布していた。断面では水素が内



図1DCGD 法による水素注入実験の概念図



図 2 プラズマ注入面の水素分布 (a) F82H, (b) Ox-F82H and (c) ODS-F82H.

部に進入していたことがわかる。表面から深さ方向に水 素濃度を数値化し、1次元の水素深さ分布としたものを 図3に示す。図より、水素は、参照材では4mm深さま で、Ox-F82H鋼では2mm深さ、ODS-F82H鋼では0.8mm 深さまで侵入していたことがわかった。

プラズマ注入中に水素が表面水素濃度一定の条件で 内部に拡散したと仮定し、フィックの拡散方程式の解析 解を水素深さ分布にフィッティングすることにより各 種 F82H 鋼中の見かけの水素拡散係数を決定した。

図 5 に、ODS-F82H 鋼および、比較として F82H 鋼中 の水素拡散係数の温度依存性を示す。F82H 鋼中の水素 拡散係数については、573 K 以上の高温度領域で得られ たデータを低温度領域に外挿した値に良く一致してい た。一方、ODS-F82H 鋼の水素拡散係数は、473 K 近傍 では F82H 鋼とほぼ同程度であったが、298 K では F82H 鋼に比べ 2 桁程度小さくなることがわかった。本研究に よって、F82H 鋼中および ODS-F82H 鋼中の(見かけの) 水素拡散係数は、298 K~573 K の温度範囲内で、 F82H 鋼:  $D[m^2 s^{-1}]=1.1 x 10^{-7} exp(-16[kJ mol^{-1}]/RT)$ ODS-F82H 鋼:  $D[m^2 s^{-1}]=2.2 x 10^{-7} exp(-30[kJ mol^{-1}]/RT)$ と求められた。

本研究では、プラズマによって水素を注入すると、表 面酸化膜および表面近傍に高濃度の水素が偏在すること がわかった。また、この表面偏在水素とは別に、拡散性 水素はさらに深い領域にまで拡散侵入していた。F82H 鋼 では、多量に注入された水素が鋼中に溶解し、格子間拡 散により進入することがわかった。表面酸化膜のバリア 効果や、内部の酸化物粒子による水素捕獲効果により、 水素の侵入が抑制されることがわかった。



図 3 F82H 鋼, Ox-F82H 鋼 and ODS-F82H 鋼 に 373 K で 1 h 注入した水素の深さ分布



図 4 F82H 鋼(参照材) および ODS-F82H 鋼中の 水素拡散係数

# 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導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、その健全性評価および実用寿命の延長を目指して、接合界面の機械的特性と微細組織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) 接合材料を制作した。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 以下と高純度材で高熱伝導性を有する OFC を使用し た。

次いで、上記の W-Cu 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(Cu²⁺)を、573[K]において高温照射した。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)を実施した。また、比較 材としてアルミ合金の室温における銅イオン照射も実施した。

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 を実施した。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/2wt² 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。さらに、光学顕微鏡を用いて、破面や微細組織の観察を行った。

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、機械的特性と微細組織に及ぼすアニーリング効 果を究明し、耐熱構造機器の健全性評価および実用寿命の延長について考察した。

#### 3. 実験結果及び考察

Fig.1は、照射後熱処理材の曲げ試験後の写真を示す。JT-01W/OFC 材および JT-02W/OFC は、共に接合界面での破断は観察されず、銅部分の著しい塑性変形を示している。この結果から、タン グステンと銅との NDB 接合材料は、その接合界面強度に優れ、耐熱構造機器への応用が有効であ ることが分かった。

Fig.2は、未照射材、低照射後熱処理材および高照射後熱処理材の銅部分の微細組織を示す。その結果、銅の平均粒径は、照射後熱処理により、母材の約3.5倍に粒成長した。この熱処理による粒成長が、銅部分の軟化の原因であることが明らかとなった。

#### 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 械的特性と微細組織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。
- (3) 接合材の組織観察により、照射後熱処理材においても接合界面の破断は観察されず、十分な接 合強度を有していることが分かった。また、銅部分の微細組織は照射後熱処理により、その平均 粒径が約3.5倍に粒成長し、銅部分の軟化の原因であることが明らかとなった



(1) JT-01W/OFC (2) JT-02W/OFC Fig. 1 Bending deformation of heat treated joint materials after irradiation.



(1)Un-irradiation
 (2) HT specimen after LI
 (3) HT specimen after HI
 Fig. 2 Microstructures of heat treated OFC after irradiation.

# 5. 研究組織

茨城大学工学部:車田 亮 大学院生: 大和田祐輝 九州大学応用力学研究所:渡邉英雄

## 6. 研究成果報告

1) 大和田祐輝、車田 亮、他、日本機械学会関東支部第 21 回茨城講演会講演論文集、茨城大学、(2013.9.6), pp.81-82.

2) 車田 亮、伊藤吾朗、杉田政道、佐久間隆昭、日本銅学会第53回講演大会講演概要集、関西大学, (2013.11.16-17), pp.75-76.

# 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

Fe-Cr 合金は,機械特性,耐熱性,腐食特性に優れており,発電プラントなどの高温機器構造物 として利用されている。しかし,高温域でのシグマ相形成による脆化や、350-500℃の温度域での 二相分離による熱脆化などの,熱環境下での劣化に注意が必要とされる。原子力・核融合分野では さらに照射との複合効果が問題となり,その機構解明と非破壊評価法の検討が求められている。そ の基礎研究として我々は、①重イオン照射:中性子照射と似たカスケード損傷が生じる一方、放射 化せず試料が扱い易い、②単結晶薄膜:試料全体が損傷し解析が容易、③磁気計測:非破壊評価へ の応用の可能性、の3つを組み合わせた研究を進めている。Fe-Cr 合金の脆化挙動は,Cr 濃度によ り異なると予想され,Cr 濃度依存性を詳しく調べる必要がある。そのため、一度に多種類の試料を 作製して特性評価を行う、コンビナトリアル型研究を提案している(科研費・基盤研究 B、 No23360418)。濃度が異なり非照射・照射領域を含む試料を一度に作製して、特性評価を一度に実 施することで効率良く研究を進めることができる。このような考えに基づき、Cr 濃度勾配を持つ単 結晶 Fe-Cr 薄膜を作製してその一部を重イオン照射し、磁化過程に与える照射効果を調べた。

## 方法

図1に本研究で行った、コンビナトリアル型実験の模式図を示す。超高真空中で電子ビーム蒸着 により試料を作製した。Feと Fe-13%Cr の2種類のターゲット材からの蒸着と直線駆動シャッター を組み合わせ、熱処理することで、MgO(001)基板上に Cr 濃度に勾配をつけた Fe-Cr(001)単結晶薄 膜を成長させた(膜厚 30nm、幅 3.5mm で Cr 濃度 0~13%の勾配)。その後、九大・応力研のタン デム型加速器を用いて、475℃で 2.4MeV の Cu²⁺イオンを照射した(照射量:9.5×10¹⁸個/m²)。その 際、穴の開いたメタルマスクを試料上に設置することで、非照射領域中に円形状(直径 0.15mm) の照射域を作った。磁化過程を調べるために、磁気光学カー効果顕微鏡を用いて磁区観察を行った。

#### 結果および考察

図2にCr濃度が3%の領域の磁区観察の結果を示す。点線で囲んだ円内部が照射領域で、その外部が非照射領域である。ここで図2の左右方向が磁化容易方向の<100>Fe-Crとなっており、その方向に磁場を印加した。まず左方向に磁場を印加した単磁区状態(図2(a))から、磁場を徐々に減少して反転すると磁場9Oeで逆磁区が発生して多磁区構造となった(図2(b))。さらに磁場を印加し観察したところ右方向の磁区が成長し(図2(c))、12Oeでは非照射・照射領域の境界でスパイク状の上向き磁区が残っていたが(図2(d))、12.5Oeではすべての磁化が右方向の単磁区となった(図2(e))。ここで、単磁区から多磁区になる臨界磁場をH₁、多磁区から単磁区になる臨界磁場をH₂と定義し、それらのCr濃度依存性を詳しく調べた。

測定された正負の臨界磁場の絶対値の平均値を、薄膜上の基準位置からの距離に対して整理した 結果を図3に示す。Cr 濃度が約9%以上では、臨界磁場を H₂が大きくなっており、より強いピン止 め効果が確認された。Fe-Cr2元合金の低温での固溶限について論争されており、最近、8-9%付近に 固溶限があり、それ以上の Cr 濃度で二相分離が生じるという報告がなされている(参考文献)。本 研究で得られた臨界磁場の Cr 濃度依存性の傾向と一致しており、イオン照射による二相分離の促 進現象を磁気的に捉えた可能性が考えられる。

参考文献: G.Bonny, et al, Scripta Materilialia 59, (2008) pp.1193-1196.

- **成果報告**:鎌田康寛, 兜森達彦, 小林悟, 菊池弘昭, 渡辺英雄, "Fe-Cr 合金の照射損傷と磁性のコンビナトリアル型研究", 日本 AEM 学会誌, (2014) *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



図3 固溶限と臨界磁場のCr濃度依存性

### 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 先進プラズマ研究開発ユニット プラズマ理論シミュレーショングループ 研究主幹 石井康友

磁場に閉じ込められたプラズマに外部から磁場摂動が加わると摂動磁場に対応する共鳴面で強制磁場再結合が 生じ、磁気島が形成され、閉じ込め磁場構造の変化を通じて、プラズマ閉じ込めに大きな影響を与える。この磁場 再結合過程についてはMHD理論研究の対象としてこれまで多くの研究者によって調べられてきた。その多くは、 再結合過程の基礎過程に関するもので、多くはスラブ形状、ないしは、円柱形状での現象を対象としている。核融 合で対象とするプラズマはトロイダル形状であり、外部摂動が単一ヘリカルモードであったとしても、プラズマ中 では、トロイダルモード間結合によって、多くのサイドバンド・モードが生成され、磁場構造の乱れに影響を与え る。本研究では、軸対称トカマク・プラズマに対する外部摂動磁場の影響を数値シミュレーションによって調べた 結果について報告する。

図1は、アスペクト比4の円形低ベータ・トカマク・プラズマにm/n=5/1の摂動をプラズマ境界で与えた時のプラズマ中の磁気島の時間変化を示したもので、安全係数は軸上で2.01、プラズマ境界で6.11としている。プラズマはテアリング的に安定な配位で、プラズマ抵抗は10~6で、問題を簡単にするため、プラズマ中で均一としている。この配位では、m/n=5/1,4/1,3/1のモードが対象となる。摂動は次の三角形状として(0<t<500の間だけに与えている:

 $psi(5/1)=10^{-4} t/250: 0 < t < 250$ 

 $=10^{-4} (500-t)/250 : 250 < t < 500$ 

=0: 500 < t

図が示す様に、m/n=5/1磁気島の外辺は与えた摂動の時間変化に準じて変化している一方、内辺は、外部摂動が減 少過程に入っても緩やかに増加しつづけ、その後、減少に転じている。これは、外部摂動増加時の、共鳴面での磁 場の圧縮過程と外部摂動減少時の磁場の緩和過程の物理機構の差によるもので、一種の磁場エネルギーのポンプ効 果を示している。さらに、外部摂動がゼロになった後も、さらに時定数の長い時間スケールで磁気島が残っている。 トロイダルプラズマでは、5/1磁気島とともに4/1,3/1の磁気島も生成されるが、生成過程も緩和過程も5/1磁気島 よりもさらにゆっくりした時間スケールになっている。特に、外部摂動が消えた後の緩和過程は、プラズマ電気抵 抗の低下とともに長時間にわたっており、このことは、外部摂動が消えても、その影響は長時間にわたりプラズマ 閉じ込めに影響を与える事を示している。

次に外部搖動(5/1)を連続パルス的に印加したところ、プラズマ中の電気抵抗値が低下する(高温プラズマになる)とともに、トロイダル結合により励起される磁気島(4/1,3/1)の振動数と印加された外部搖動の振動数・振幅の差異が拡大する事が分かった。その結果、トロイダル結合により励起される磁気島は、振動せず単調に成長するように見える事が分かった。これは、ELMや制御用磁場で強制的に励起される磁気島の性質が、ELMや制御用磁場の時間変動特性とは全く異なった成長特性を持つ可能性を示している。



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 位体など)を受ける。特に ITER のダイバータは、非常に高い粒子負荷(フラックス 10²⁴/m²s 程度)を受 け、タングステン中に侵入する水素同位体の密度が高くなることにより、応力が発生し、タングステン 表面の結晶構造に影響を与えることが予想される。

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、ダイバータ環境を模擬した重水素の照射を、 オランダ基礎エネルギー研究所(FOM・DIFFER)所有の線形プラズマ装置 Pilot-PSI を用いて行った。 照射後の TFGR W 試料について、応用力学研究所の透過型電子顕微鏡(TEM)を活用して、表面近傍の 組織観察を行い、高フラックス照射環境下でのタングステン材料中の水素同位体の挙動と、材料の応答 について理解を深める。

## 2. 実験方法·結果

本研究で使用した2種類のTFGR Wには、添加物として1.1wt%TiCと3.3wt%TiCが加えられている (以下、W-TiCとW-TaCと呼ぶ)。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、TFGR 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 µm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。

Pilot-PSI 照射実験では、重水素プラズマを、フラックス 10²⁴ D/m²s で約 100 s 間照射した。表面温 度は、最高で 400 ℃に達した

### 3. 実験結果

重水素照射後の TFGR W 試料について重水素吸蔵量を測定した結果、表面近傍(100 nm まで)で非常 に高い密度で重水素が吸蔵されていることが分かり、また、SEM 観察すると、1 μm 程度のブリスタが 多数発生していることが分かっている。表面付近での材料組織の変化を調べるために断面を FIB で切断

し、TEM 観察を行った。以下にその結果を述べる。

図1に示したのは、プラ ズマ照射後の表面近傍の W-TiC 試料である。試料表 面に薄い(10 nm 程度)の 膜状の構造が観察された。 膜とタングステンの表面 の境界をはっきりと観察



図1 高フラックス照射後のW-TiC試料

することができ、下地のタングステンが成長したものではなく、照射中に降り積もって形成されたもの だと考えられる。また、空洞やクラックが観察され、複雑な形状をしていることが分かった。しかし、 ブリスタの発生に起因するようなバブルやボイドは観察されず、重水素はタングステン中をバブルの形 で滞留している訳ではないことを示唆していると思われる。重水素は膜中に共堆積というプロセスで吸 蔵されている可能性が考えられるため、今後、元素分析等を行うことで、試料表面に存在する膜につい て詳しく調べる予定である。

図2に示したのは、プラ ズマ照射後の表面近傍の W-TaC 試料である。(a)は ブリスタの無い箇所での 表面近傍の結晶構造を、(b) はブリスタの有る箇所で の結晶構造をそれぞれ示 している。図 2(a)では、図 1のW-TiCと同様に、表 面に堆積膜を観察するこ とができたが、その構造は 異なっており、層状構造な どは見られない。また、空 洞やクラックの存在が確 認される。図 2(b)では、試 料表面から深さ~200 nm の所に、粒界に沿った亀裂 が確認された。この画像で は、亀裂の上部にブリスタ のような突起は観察され



図2 高フラックス照射後のW-TaC試料

ないが、このほかに多数観察されることから、これに起因してブリスタが発生しているものと考えられる。この亀裂は、重水素照射中のW-TaCでは過飽和状態の溶解重水素がタングステン結晶に応力を及ぼし、それが緩和されるときにブリスタが発生したことの証拠である。重水素蓄積によって生成されるバブルやボイドの存在は確認されなかった。

今後の課題として、①堆積層の元素分析を行いその由来を探ること、②材料(W-TiC と W-TaC)による 結晶構造の違いがなぜ発生したのかを、材料強度などの観点から明らかにしていく予定である。

## 4. 研究成果発表

1. 大宅他、"高フラックス照射環境下でのTFGRタングステン中の水素同位体挙動とその表面変化"。 日本原子力学会 2014年春の年会、2014年3月、東京都市大学、東京都

#### H-C-N反応性低温プラズマ生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

核融合装置の壁材料はプラズマとの相互作用により装置内で再堆積層およびダストを形成する。核融 合燃料であるトリチウム(放射性物質)の堆積物への取り込みは放射性物質の炉内残留をもたらすばか りか、ダスト粒子飛散による放射性物質拡散の可能性があるため、安全面で大きな問題となっている。 壁候補材の一つである炭素材料は低Z材で耐熱衝撃性に優れるため、核融合装置のプラズマ対向壁とし てこれまで広く使用されてきたが、核融合燃料である水素同位体による損耗率が高いため多量の再堆積 層およびダストが生成されること、またこれらの炭素系堆積物に多くの水素同位体が取り込まれること が問題視されている。一方で、次期プラズマ対向材として有力なタングステンも、水素・ヘリウム照射 によるブリスタリングやバブル形成、高熱負荷時の破壊・溶融など多くの問題を有しており、すべてを 満足する材料がないのが現状である。このような背景の下、本研究では SOL 領域を模擬した低温水素プ ラズマにおいて、壁との相互作用(炭素を含んだ壁材料を想定)によって生成されるダスト・再堆積膜 生成の抑制とそのメカニズムの解明を目的としている。

#### 実験装置と方法

#### 2.1. Heliotron-DR 装置

図1はHeliotron-DR 装置の写真と断面の概略図である。 Helioron-DR では 0.5 Pa 以下の低ガス圧でのプラズマ生 成が可能である。トロイダル方向で異なるセクションに 挿入された3つのアンテナから2.3-3 kWのRF電力を供 給する。ヘリカル磁場は200G、トロイダル磁場は40G である。サンプルへの膜堆積実験で用いるガス種はH2、 CH4、N2 であり、流量はそれぞれ 20、1、1 sccm である。 ここで、CH4 は炭素不純物源として添加している。図1 に示す照射台は温度制御可能であり、サンプルは Si で ある。また、Heliotron-DR 壁への堆積物評価実験には上 記ガス種に加えて Ar 16.8 sccm, He 37.7 sccm を用いる。 生成されるプラズマは OMS、分光計測によって評価し た。また、Heliotron-DR を用いて照射されるプラズマの 電子温度および電子密度を静電プローブで測定した結 果、それぞれ 5-10 eV、(2.0-2.2)×1016 m-3 であった。次 節から、今回報告する2つの実験方法について述べる。

# 3. 実験結果および考察

# 3.1. 試料表面の水素化炭素膜堆積に対する窒素導入 の効果

図2にSiサンプルへの水素/メタンおよび水素/メタン /窒素プラズマ照射を行った際の炭素膜厚の表面温度依 存性を示す。水素/メタンプラズマへの窒素添加により、 400 K 以上の温度領域では膜堆積抑制効果がみられる。 しかし、350 K 以下では窒素添加により膜堆積が促進さ





図2Si サンプルの堆積膜の表面温度依存性

図1Heliotron-DR 装置(写真と断面概略図)

れている。図3には水晶振動式膜厚計 (QCM) による プラズマ照射中の膜厚測定結果を示す。OCM は水冷さ れており、その水温から表面温度は約300K程度と見 積もられる。水素/メタンプラズマに窒素が添加されて いる場合は照射時間の経過とともに膜厚が増加してい く傾向がみられ、低温領域(Ts < 350 K)における Si サンプルへの膜堆積特性と一致する。また、水素/メタ ン/窒素プラズマ照射後(Ts = 320 K)の堆積膜の XPS 分析を行った。この結果を図4に示す。入射X線には ビーム径 400 µmの Al K a 線を用いている。このサン プルから得られた C 1s ナロースペクトルは、C-C/C=C 結合 (284.4 eV)、C-N 結合 (285.5 eV) に対応する 2 つのピークに分離することができる。XPS 分析結果か ら、比較的低温下(Ts~320 K)において水素/メタン/ 窒素プラズマ照射によって堆積する膜は C-C (C=C) また C-N 結合を含んでいることがわかった。

プラズマの質量分析の結果、水素/メタンプラズマへの 窒素添加によって N2 (m/z = 28) だけでなく、NH3 (m/z = 17)、HCN (m/z = 27) などのイオン電流値の増加が みられた。また、分光計測の結果、窒素を添加するこ とで CN (388 nm) や NH (336 nm) といった N 系粒子 からの発光強度が増加した。

図5に、水素プラズマへメタン、窒素ガスを順次添加 していった際の分圧時間変化を示す。図5では、メタ ン導入時に比べて窒素導入時の分圧値変化が非常に遅 いことがわかる。この遅い変化はガス状態の場合には みられず、プラズマ状態でのみみられるため、プラズ マと壁の相互作用が影響していると考えられる。プラ ズマへの窒素導入時における N2 (m/z = 28) などの N 系粒子にかかわる時定数は、ガス状態のそれに比べて 10 倍近く大きい。また、図6には水素/メタンプラズマ へ窒素を導入した際の発光強度変化を示す。窒素導入 によって CH(431.3 nm)の発光強度は変化しないが、 CN (358.2 nm) や NH、N2 (391.4 nm) は分圧値変化 と同様ゆっくりとした発光強度の増加がみられる。 H-C-N 系においては C≡N の三重結合がもっとも結合 エネルギーが高く、一度 HCN が生成されると揮発性分 子としてそのまま排気されやすい。また、図7に膜堆 積/抑制の概念図を示す。窒素があり堆積温度が低い場



窒素導入時の分圧時間変化

合(Ts < 350 K)には、活性な CN ラジカルが表面で生成されず、膜中に窒素原子を取り込んで膜が堆積していくものと思われる。一方、堆積温度が高い場合(Ts > 400 K)には表面で HCN 分子が生成しやすく、C 原子を取り去るため炭化水素膜が堆積しにくいと考えている。図 5-6 に示される、窒素導入に

よる遅い分圧値および分光の時間変化は、CN, NHx 系粒子の壁への付着、堆積物内部への侵入を示していると思われる。

3.2. Ar, He 放電による堆積物の評価および除去

Heliotron-DR 内壁を水素/メタンまたは水素/メタン/窒 素プラズマでコーティングした後、Ar または He 放電に よる壁の堆積物脱離実験を行った。このときの実験条件 を表2にまとめた。表には堆積フェーズでの窒素の有無、 ベーキングの有無、また脱離プラズマの種類、そして脱 離プラズマ放電中に検出された H2 分圧の積分値(Ar ま たは He 放電開始より 100 分間)を示している。ここでは、 Ar、He 放電中に検出される各分圧の積分値を、壁の堆積 物への吸蔵量とみなす。Heliotron-DR の壁温は、ベーキン グ無で~310 K、ベーキング有で~335 K となる。この値は Heliotron-DR 外壁 6 か所での温度測定結果を平均したも のである。Ar 放電、また He 開始時には各分圧値の上昇 がみられた。これらは水素/メタンプラズマで堆積してい た炭化水素膜がアルゴンプラズマのスパッタリングによ って放出されたものである。

図8にHe放電中におけるH2分圧値の変化を示す。A-C のどの条件においても、時間の経過とともにH2分圧値は 減少していき約100分でほぼ飽和した。AとBを比較す ると、AのほうがH2分圧が大きく、窒素添加による水素 吸蔵抑制効果がみられる。Cの条件がもっともH2分圧が 小さくなっており、窒素有で壁温が高い場合に、より水 素吸蔵が抑制される傾向がみられる。



0.0 0 50 100 Time[min]

図 8 He 放電中の H₂分圧値変化

# 4. まとめ

本研究では SOL 領域を模擬した低温水素プラズマにお

いて、壁との相互作用(炭素を含んだ壁材料を想定)によって生成される再堆積膜生成の抑制とそのメ カニズムの解明を目的として Heliotron-DR 装置を用いた①試料表面への膜堆積実験、②Ar または He 放 電による脱離実験を行った。以下にそれぞれの結果についてまとめた。

- ① Si サンプルへの膜堆積に対する窒素導入の効果はサンプルの表面温度に強く依存する。堆積温度が~400 K 以上の場合には窒素導入による膜堆積抑制効果が得られた。一方,堆積温度が~320 K の場合には窒素導入によって膜堆積が促進された。このサンプルを XPS 分析した結果, C-C や C-N 結合を含んだ膜が生成されていることがわかった。窒素導入による N 系粒子に関わる粒子の分圧値および分光の遅い時間変化は、NHx 系粒子の壁への付着、堆積物内部への侵入を示していると思われる。
- ② 水素/メタンおよび水素/メタン/窒素放電後のAr、He放電において脱離する水素量は窒素有のほう が少なく、窒素添加による水素吸蔵抑制効果がみられた。堆積フェーズに窒素を添加することで、 揮発性のHCN、NH分子が生成され、膜中への水素残留を抑制すると考えられる。

# SiO₂中におけるヘリウムイオン照射効果

琉球大学教育学部 岩切宏友,村吉範彦,狩俣佑妃

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】

アモルファス SiO₂(石英ガラス)は、その汎用性や機能性などから、物理、化学、物質科学、 地球科学を始めとする科学技術の諸分野において極めて重要な物質である。また、物質中における ヘリウムの挙動は、核融合研究や、地殻・マントルや海水などの地球物質の循環を探る上で重要で ある。特に核融合炉で使用する材料とヘリウムとの相互作用については研究が進んでおり、結晶中 における振る舞いについてはよく理解されるようになってきたが、アモルファス材料中におけるへ リウムの挙動については未知の部分が多い。平成 24 年度までの応用力学研究所共同利用研究によ り、結晶性 SiO₂にヘリウムを照射すると照射領域がアモルファス化し、その領域においてヘリウ ムバブルの形成が行われないという結果が得られている。金属や炭素、無機化合物における従来の 研究では、ある程度のエネルギーを有したヘリウムを照射すると、材料中には必ずヘリウムバブル が形成される傾向にあるため、SiO₂中におけるヘリウムの挙動は独特であり興味深い。

そこで、本研究では分子動力学法を中心としたコンピュータシミュレーションにより、アモルフ アス SiO₂ 中におけるヘリウムの基礎的な挙動を解明することを目的とする。

# 【研究方法】

分子動力学法は2体(あるいはそれ以上)の原子間ポテンシャル関数の下に,古典力学における 運動方程式を解いて,系の静的,動的安定構造や,動的過程を解析する手法である。固体物質が熱 平衡状態(安定して実現している状態)にある場合には,ヘルムホルツの自由エネルギーが最小に なる。適切な条件を設定して分子動力学計算を行うと,ヘルムホルツの自由エネルギーが最小とな る条件(原子配置)を導出することができる。本研究ではNTV アンサンブル法(粒子数,温度, 体積が一定)および NTP アンサンブル法(粒子数,温度,圧力が一定)を用いることで最適な構 造を求めた。

本研究ではアモルファスおよび結晶性の SiO₂ 中におけるヘリウムの挙動についての分子動力学 計算を行った。Si-Si 間および O-O 間,Si-O 間については Muneto (2007)による改良された Tersoff 型の多体ポテンシャルを, He-O 間および He-Si 間については Lennard-Jones の 2 体ポテンシャル を用いた。

# 【研究結果】

まず,結晶数 576 個のクリストバライト SiO₂結晶を NTV アンサンブル法の下で 5000 K まで 加熱し,液体の SiO2 を作成した。その後 2000K まで冷却し,今度は 1atm(大気圧)の条件を用い た NTP アンサンブル法により 10ps 程度保持し,アモルファス SiO₂ を作成した。その後 300K ま で冷却し、安定したアモルファス相が形成されていることを確認した(2体相関関数とボロノイ多 面体解析による)。作成したアモルファス SiO₂およびクリストバライト結晶を図1に示す。

次に、この構造中に He 原子を 1 個加え、1.0 fs (1.0×10⁻¹⁵ sec) 間隔で 500 万ステップの計算 を行い、He 原子の軌跡および平均二乗変位を得た。同様の計算をその他の結晶性 SiO₂ (クリスト バライト、low-quartz、スティショバイト) についても行った。その結果、結晶性を有するクリス トバライト中では一般的な結晶材料と類似した拡散挙動を示すが、アモルファス SiO₂ 中では通常 の結晶性材料と大きく異なる「偏在的な」拡散挙動を示すことが明らかになった。このような特殊 な拡散挙動がヘリウムバブルの形成を阻害している可能性がある。また low-quartz (密度 2.65g/cm³) においては Z 軸方向に優先的な拡散が行われ、X 軸および Y 軸方向への拡散はまれで あった。その際、実験温度の上昇(1000~2400K)にともないジャンプ頻度はしだいに高くなってい った。一方、スティショバイトにおいては、きわめて高い温度(7000K)下においてもヘリウム原 子の拡散は見られなかった。これはスティショバイトが高圧下で形成される結晶のため、密度が高 く(4.51g/cm³)、格子間に空間的余裕がないためだと考えられる。このように、SiO₂においては結 晶構造によってヘリウムの挙動が大きく異なり、ヘリウム照射効果の研究対象として興味深い材料 である。



図 1 クリストバライトと、本研究で計算したアモルファス SiO2の結晶構造

(成果発表)

- 岩切宏友, 仲盛令, 吉田直亮, 加藤太治, 「ヘリウムイオン照射された CaF₂ 単結晶における光吸収特性」, 2013 年 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会
- H. Iwakiri, M. Tani, Y. Watanabe, N. Yoshida, "Radiation damage and deuterium trapping in deuterium-ion-irradiated Fe-9Cr alloy", J. Nucl. Mater., 444 (2014) 138-141

# 25 FP-29

純タングステン焼結体の高温特性

#### 茨城大学工学部 車田 亮

【目的】 タングステン(W)は周期律表VIA族に属し、他の材料の追随を許さない多くの優れた特性 を有する。例えば、金属で最も高い融点(3410℃)、最も低い熱膨張率や蒸気圧、純鉄の3倍もの高熱 伝導率、優れた粒子耐損耗性、極めて低い水素インベントリー等である。しかしながら、W材料は、熱 負荷に晒されると容易に再結晶・粒成長を生じて著しく脆化する(再結晶脆化)。合金元素や分散粒子 を含まず、加工組織をもつ純W板材の再結晶温度は 1200~1300℃と低く、Wの融点の1/3程度にすぎ ない。したがって、純W板材は再結晶が生じる 1200℃以上では使用できず、Wのもつ多くの優れた高温 特性がほとんど活用されていない。また、純W板材は、通常、素材形状と素材サイズに制約を受ける。 小さな円柱やブロック等の小型単純形状品は、その製法上比較的容易に製作が可能である。しかし、大 型品になると製造上使用する焼結や鍛造等の設備に限界があるため、大型素材の製作が難しく、また複 雑形状品では、難削材である純W材を円柱やブロックから加工しなければならず、膨大な加工コストが 必要となってしまう。そのため、実質的に純W材においては大型複雑形状品の製作は困難である。そこ で、これらの問題を解決するために、粉末冶金技術を結集し、焼結後、熱間等方圧加圧法(HIP)を使用す ることによる新たな製法による純W新材料(純タングステン(W)焼結体)が開発された。この製法によ れば、従来の製法に比べて大型で複雑形状品の製作が可能で、また、圧延鍛造を行っていないため、再 結晶のドライビングフォースとなるひずみも少ないと予想されるため、再結晶による脆化も少ないこと が期待される。本研究では、この純W焼結体の材料評価の一環として、特に、高温特性を評価すること を目的として、熱負荷実験を行った。

【実験】 本年度は、熱間等方圧加圧法(HIP)を使用することにより作製した2種類の純タングステン (W)焼結体を無欠陥接合法(NDB: Non Defective Bonding)により内径 7mm φ の冷却管付の無酸素銅 (OFHC) に接合することによりテスト用のモックアップ試験体を作製し、熱負荷実験を行った。この 接合法で作製した接合材は、従来の冶金接合法で作製したものと比較し、W と銅の接合強度や熱伝達特 性が著しく改善されていることが明らかになっている、また、接合界面におけるイオン照射による界面 組織変化等が調べられている。使用した純タングステン(W)焼結体は、微細粒純 W 材(ST-01)及び粗大粒 純 W 材(ST-02)の2種類を用いた。5 mm x 5 mm x 19 mm の棒材を4本、冷却管付の無酸素銅の表面に NDB 法により接合した。この W/OFHC 接合試験体を強制水冷却の下で電子ビーム照射加熱による熱負 荷を与え、熱応答実験を行うと共に、繰り返し熱負荷実験を行った。加熱は、立ち上げ 20s、定常 40s、 立ち下げ 0s、休止状態 40 s で行った。冷却水の流速は 18.8 m/s、入り口温度 23 ℃、 圧力 0.7 MPa で ある。照射中、表面温度を放射温度計で測定すると共に、W 材と OFHC の界面部から 1.5 mmの OFHC 側の深さ 7mm の部分の温度を熱電対で測定した。また、熱流束は、試験体にバイアス電圧を印加する ことにより、2次電子及び熱電子の放出を抑えた状態で電流測定することにから評価した。図1 に試作 した試験体を示した。

【結果】 図 2 には、W(ST-01)/OFHC に対して熱流束を変化させた時のビーム電流、表面及び OFHC の温度の時間変化を示した。20 s の熱負荷に対して表面及び OFHC の温度は定常状態に達していること がわかる。図 3(a)及び(b)に W(ST-01)/OFHC 及び W(ST-02)/OFHC の表面及び OFHC の温度の熱流束依存 性を示した。立ち上げ 20s、定常 40s の加熱で、温度は定常となり、一定の定常時の温度を示している。 表面及び無酸素銅の温度は、熱流束が大きくなるにつれて直線的に増加することがわかる。また、

W(ST-01)/OFHC の表面温度は低熱流束側で直線より大きな温度となっているが、これは、表面の凹凸に よりポットスポットが発生し、この影響によるものと考えられる。また、これまでの熱負荷実験の結果 と比較して、W(ST-01)/OFHC は温度上昇が低く、W 材の特性及び接合が極めて良好であることがわか る。一方、W(ST-01)/OFHC の場合は、W(ST-01)/OFHC と比較して、同じ熱流束でも無酸素銅の温度が 高くなっているが、これは、非等方的な温度分布となっているためであると考えられる。図 4 には、 W(ST-01)/OFHC の試験体について、14.6 MW/m²の熱流束で、50 回の繰り返し熱負荷を行った際のビー ム電流、表面及び OFHC の温度の時間変化を示した。繰り返し熱負荷中の最高到達温度等の温度変化は なく、健全性が保たれることがわかった。

【まとめ】 熱間等方圧加圧法(HIP)を使用することにより作製した2種類の純タングステン(W)焼結体 を無欠陥接合法(NDB: Non Defective Bonding)により無酸素銅(OFHC)に接合することによりテスト用 の試験体を作製し、熱負荷実験を行った。純タングステン(W)焼結体の内、微細粒純W材(ST-01)は、熱 負荷による温度上昇が少なく、また、繰り返し熱負荷実験による熱疲労にも健全性が保たれており、優 れた熱特性を持つことが明らかとなった。また、純タングステン(W)焼結体の内、粗大粒純W材(ST-02) に関しては、表面温度上昇が大きく、素材及び界面の接合状態を含め、今後検討する必要があった。



図1 W試験体







図 2 W(ST-01)/OFHC の熱応答 (a)試料電流、(b)表面及び OFHC の温度



図 4 W(ST-01)/OFHC の繰り返し熱負 荷実験中の熱応答 (a)試料電流、(b)表面 及び OFHC の温度

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。

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-0.019O (NIFS-HEAT-2)及び、これに微量 Y 添加した V-4Cr-4Ti-0.15Y-0.0090Oに対し、九大応力研の高エネルギーイオン発生装置を用いて0.76 ~7.6 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。有限要素法解析(FEM) により、微小押込み試験を模擬し、中性子照射試験で得られた照射硬化データを入力して、 イオン照射による硬化を模擬することを試みた。中性子照射はベルギーの BR-II で行った。 照射温度は 60℃、照射量は 9×10²³ n/m² (E>1 MeV)であり、これは 0.18 dpa にあたる。 3. 結果と考察

図1に、イオン照射後の押込硬さの押込み深さ依存性から推定した、バルク相当硬さを 示す。Y 添加にかかわらず、照射量とともに照射硬化が大きくなり、やがて飽和する傾向 を示した。照射硬化量に違いは見られず、200℃のCuイオン照射では、Y 添加効果が無い ことが明らかになった。一方、図2には60℃での中性子照射後の引張曲線を示す。照射に Y 添加の有無にかかわらず、一様伸びが著しく減少し、ここでもY 添加の効果は確認され なかった。これまで、400℃中性子照射において、Y 添加による照射硬化の軽減と、延性の 改善が報告されていたが、より低温域である 200℃以下ではその効果が無いことが明らか となった。

中性子照射硬化のデータを用いて照射後の真応力ー真歪曲線を推定し FEM 解析に組み

入れて、イオン照射後の押し込み試験における荷重-深さ曲線を模擬した結果を図3に示 す。計算結果は実験結果より小さく、すなわち同じ照射損傷量ではイオン照射の方が照射 硬化が大きいことを意味する。イオン照射では損傷速度が大きいため、照射欠陥(転移ル ープ)の核生成が促進されるためと理解することもできるが、FEM 解析に組み入れた真応 カー真歪曲線の妥当性、イオン照射と中性子照射では照射温度が異なること等に問題があ り、今後さらに照射実験データを充実させる、例えば中性子照射後の押し込み試験や圧縮 試験を行って真応カー真歪曲線を正確に求めること、そして FEM 解析の改良が必要である。 4. 成果報告

(1) Takeshi Miyazawa, Takuya Nagasaka, Ryuta Kasada, Yoshimitsu Hishinuma, Takeo Muroga, Hideo Watanabe, Takuya Yamamoto, Shuhei Nogami and Masahiko Hatakeyama, *Evaluation of irradiation hardening of ion-irradiated V-4Cr-4Ti-0.15Y alloys by nano-indentation techniques*, Journal of Nuclear Materials, 投稿済み査読中



図 2 60℃、0.18 dpa 中性子照射後の引張曲線(左:Y 無添加合金、右:Y 添加合金)



図3 有限要素法による押し込み荷重-深さ曲線の模擬結果(Y無添加合金)

# 研究会「各種磁場配位での周辺揺動研究」

広島大学大学院工学研究院 西野信博

1. 本研究集会の目的と概要

コストパフォーマンスの高い核融合炉を実現するうえで、高閉じ込め性能を有するプラズマを作る ことは必要不可欠である。これを達成するためには、閉じ込め性能を決めている周辺乱流を抑制、 制御することが必須である。約15年前に発見された、所謂、Blob(形状からは Filament)と呼ばれ る周辺乱流が閉じ込め性能を決める支配的要因であることは、現在、常識となっている。従来から 周辺乱流研究は多くの実験装置で精力的に研究されてはいるが、装置毎の磁場配位の相違などから、 物理的な特徴などを共通の土俵で議論する機会は多くはない。

幸い日本には、Tokamak 以外の種々の磁場配位を持つ装置がまだ活動を続けている。応用力学研究 所のQUEST もその一つで、ST 磁場配位(アスペクト比が小さい Tokamak 装置であるが、これを Tokamak と認識する研究者と、そうでない研究者が存在するため、あえて、Tokamak 以外と上述した)の有 数の装置である。この意味において、日本は世界有数の核融合研究大国である。そこで、研究会と して"準公式"に今回のような周辺揺動という物理をテーマとして装置間比較を行う研究会を定期 的に開催することは、今後の核融合研究の幅を広げる機会を与えるものに成り得る。当初は少人数 での開催が予想されることと、QUEST 装置での活動が活発であることなどを踏まえ、昨年度から、 九州大学応用力学研究所の小研究会開催の機会を得て、2 年続けて、各種磁場配位の研究成果を発 表していただき、それぞれの磁場配位における乱流研究、実験結果の共通点、相違点を明らかにし て、乱流と磁場配位の関係を考える機会を得ることができている。

2. 日程とプログラム

日時:平成26年1月7日(火) 会場:九州大学QUEST実験棟2F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 (Program)

Chair: Nobuhiro Nishino (Hiroshima University)

13:30-13:35 Opening address

Nobuhiro Nishino (Hiroshima University)

13:35-14:00 Characteristics of filamentary structures in Heliotron J edge

plasma observed with a fast camera

Keijun Kasajima (Kyoto University)

13:00-14:25 Investigation of the edge turbulence with the combination of a camera and a Langmuir probe cluster in Heliotron J

Linge Zang (Kyoto University)

- 14:25-14:50 Fluctuation study using Langmuir probes and Beam emission spectroscopy in Heliotron J Shunsuke Ohshima (Kyoto University)
- 14 : 50-15 : 20 (Coffee Break)
- 15:20-15:45 大型ヘリカル装置 LHD における多点静電揺動計測 Hiroshiko Tanaka (NIFS)
- 15:45-16:00 PANTA におけるトモグラフィーを目指した多チャンネル分光計測の開発
   藤野君(Kyushu University)
- 16:00-16:25 カメラ及びプローブを用いたプラズマ揺動計測(仮)

Nobuhiro Nishino (Hiroshima University) (代理)

16:25-17:00 Closing Address

Nobuhiro Nishino (Hiroshima University)

- 3. 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)(都合により、西野代理、別日程で打ち合わせ)
  - 木暮 諭 (筑波大・数理物質科学研究科・M1)(都合により、西野代理、別日程で打ち合わせ)
  - 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 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)
  - 田中 宏彦 (核融合科学研究所・助教)
  - 恩地 拓己 (九大・応用力学研究所・助教)
  - 藤野 博充 (九大・応用力学研究所・助教)

以下に、発表の概要を示す。

# 共同利用研究集会

# 第11回トロイダルプラズマ統合コード研究会

# 11th Burning Plasma Simulation Initiative (BPSI) Meeting

# 研究代表者 京都大学 福山淳

# 所内世話人 糟谷直宏

# 1. 研究集会の開催目的

応用力学研究所においては、これまで京都大学との共同研究により核燃焼プラズマ統合 コード構想を発足させ、活動を行ってきた (プロジェクトの詳細は http://p-grp.nucleng.kyoto-u.ac.jp/bpsi/)。このプロジェクトは、科研費「核燃焼プラズマ統合 コードによる構造形成と複合ダイナミクスの解析」(2004~2006)、「統合コードによる ITER プラズマのマルチスケール物理に関する総合的研究」(2007~2010)、「トロイダルプラズマ の運動論的統合シミュレーションコードの開発」(2008~2012)等によって部分的に支援され てきた。各年度の活動状況および次年度の活動計画を含めて成果報告会を毎年開催してい る。今回で第11回目となるが、そのうち、第2回~第8回までは応用力学研究所の共同研 究集会として開催してきた実績がある。今回はトロイダルプラズマに対象を拡大し、炉心 プラズマと周辺プラズマ、MHD現象と輸送現象、高エネルギー粒子と乱流輸送、加熱・電 流駆動と長時間運転等の複合現象の統合モデリングおよびそのシミュレーションについて、 包括的なアプローチとして議論しようとするものである。

## 2. 開催日時

開催日程: 2013 年 12 月 19 日 (木) - 20 日 (金) 開催場所: 九州大学応用力学研究所 2 階大会議室 講演数: 24 件、参加者数: 31 名

## 3. 研究集会の内容

トロイダルプラズマにおける複合現象の統合モデリングおよびそのシミュレーションの 進展について議論するため研究集会を2日間にわたって開催した。講演24件を内容別に分 類するとトカマク10件(うち統合コード6件、MHD1件、乱流3件)、ヘリカル8件(う ち統合コード6件、MHD1件、乱流1件)、ITER/BA2件、基礎4件であった。どれも質 の高い研究成果報告であった。ヘリカルに関する講演数がトカマクのものに匹敵してきた ことが、大型ヘリカル装置LHDにおける統合コード開発の進展を示している。また、若手 研究者による講演が10件以上あり、当該分野の若手育成も進んでいることをうかがわせた。 以下に講演内容を抜粋して説明する。

研究会の冒頭に若狭より統合輸送シミュレーションコードTASK およびTASK3Dの開発 経過のレビューを含む講演がなされた。そして新古典輸送データベースを用いた熱輸送シ ミュレーションで LHD における実験結果を再現できることが報告された。LHD をはじめ とするヘリカルプラズマの輸送シミュレーションは数多くなされており、村上からは高イ オン温度放電における NBI 加熱と複数種イオンの役割が報告された。また、横山からは実 験解析のためのコードセットの開発状況が報告された。ペレットをはじめとする粒子供給 や加熱のシミュレーションも盛んになされており、林からは JT-60U および ITER における ペレット入射条件について報告された。本多からは統合コード TOPICS に新古典トロイダ ル粘性を計算するドリフト運動論コードを組み合わせてトロイダル回転を評価する取り組 みの進展について報告がなされた。滝塚からは MHD モードによる非軸対称的な変形が、 トカマクハイブリッドシナリオにおける電流分布を説明できる可能性が示された。藤堂か らは高速粒子のダイナミクスと MHD を組み合わせるハイブリッドシミュレーションによ ってアルフベン固有モード出現時の振る舞いの実験との比較が報告された。宮戸、矢木、 糟谷からはトカマクおよびヘリカルプラズマにおいて流体モデルを用いた、揺動がもたら す非局所輸送現象のシミュレーション結果が報告された。小菅からはプラズマ端で生成さ れる hole と blob がコア領域の輸送にもたらす新たな役割について提言がなされた。Lesur からは位相空間乱流のための各種シミュレーションにおける保存則について議論がなされ た。基礎研究も進展をしている。大澤からは壁材料の水素吸蔵についての第一原理シミュ レーション結果が報告された。佐々木からは基礎実験装置においても多様な乱流構造が形 成され、核融合プラズマの構造形成と関連付けた研究が行えることが示された。福山から は ITER 統合モデリングのためのフレームワークと EU の取り組みについて、小関からは遠 隔実験センターの概要について紹介があり、ITER 時代が近づいていることを感じさせた。 来年度も第12回研究会を九州大学で開催するべく、応用力学研究所共同研究に応募する ことを決定し、閉会した。

# 4. 研究集会プログラム

(20 min talk+5 min discuss or 15min talk+5min discuss)

- 12月19日(木)
- 9:00-9:10 はじめに 福山 (京大)
- (座長:福山)
- 9:10-9:35 講演 1-1 若狭 (RIST)

Heat Transport Simulation in LHD Plasmas Using the TASK3D code

- 9:35-10:00 講演 1-2 本多 (原子力機構) JT-60U における新古典トロイダル粘性の影響
- 10:00-10:25 講演 1-3 宮戸 (原子力機構)

トカマクプラズマにおけるITG乱流とコールドパルスのシミュレーション

- 10:25-10:40 休憩
- (座長:宮戸)
- 10:40-11:05 講演 1-4 矢木 (原子力機構)

Simulation study of nonlocal transport from edge to core in tokamak plasmas

- 11:05 11:30 講演 1-5 村上 (京大) LHD における高 Ti プラズマの統合シミュレーション
- 11:30-11:55 講演 1-6 登田 (核融合研) ヘリカルプラズマでのイオン温度勾配乱流における熱拡散係数のモデリング

- いた数値解析 12:15 - 13:15昼休み (座長:糟谷) 13:15 - 13:40講演 2-1 林 (原子力機構) ペレットによる ELM 制御の統合シミュレーション 13:40 - 14:05講演 2-2 松山 (原子力機構) ペレット入射プラズモイドのドリフト機構のモデリングと実験との比較 河野 (九工大) 講演 2-3 14:05 - 14:30イオンサイクロトロン加熱におけるプラズマ波と RF シースの相互作用 14:30 - 14:50講演 2-4 羽田 (京大) One-Dimensional Transport Analysis of ECRH Assisted Plasma Start-up in JT-60SA 14:50 - 15:05休憩 (座長:林) 滝塚 (阪大) 15:05 - 15:30 講演 2-5 Enhanced neo-classical resistivity due to the m/n = 1/1 MHD-mode deformation for tokamak hybrid scenario 15:30 - 15:55 講演 2-6 佐藤 (核融合研) 陰的時間積分法を用いた MHD コードの開発 15:55-16:15 講演 2-7 糟谷 (九大) 乱流計測シミュレータを用いた非拡散輸送過程の数値診断 16:15 - 16:35 講演 2-8 佐々木 (九大) 直線型装置における乱流構造形成シミュレーション 休憩 16:35 - 16:50 (座長:滝塚) 16:50 - 17:10 講演 2-9 小菅 (九大) 炉心ー周辺結合領域における輸送モデリング 17:10 - 17:30 講演 2-10 大澤 (九大) タングステン空孔中の水素の特異構造とその材料への応用 東 (京大) 17:30 - 17:50講演 2-11 PARASOL コードによるトカマク周辺プラズマの粒子シミュレーション 17:50 散会 19:30 - 22:00懇親会 12月20日(金) 9:00 - 9:05 事務連絡 (座長: 矢木)
  - 9:05 9:30 講演 3-1 福山 (京大) ITER 統合モデリング活動の進展

講演 1-7

11:55 - 12:15

西岡 (京大)

ヘリオトロンJのNBIプラズマにおける新古典イオンフローのモーメント法を用

9:30-9:55 講演 3-2 横山 (核融合研)

統合輸送解析スイート TASK3D (a,p) 開発と LHD 実験適用の進展

9:55-10:15 講演 3-3 金森 (京大)

TASK/TX によるトカマク粒子輸送シミュレーション

- 10:15-10:30 休憩
- (座長:横山)
- 10:30-10:55 講演 3-4 藤堂 (核融合研)

DIII-D におけるアルフベン固有モードと高速イオン輸送のシミュレーション 10:55 – 11:20 講演 3-5 Lesur (九大)

Scheme-independent error in entropy conservation in turbulent kinetic simulations

- 11:20 11:45講演 3-6小関 (原子力機構)ITER 遠隔実験センター
- 11:45-12:00 まとめ 矢木
- 12:00-13:00 昼休み
- 13:00-17:00 核融合エネルギーフォーラムサブクラスター会合
- 17:00 散会

# 5. 参加者リスト

氏名	所属	氏名	所属
井手俊介	原子力機構	登田慎一郎	核融合研
小関隆久	原子力機構	横山雅之	核融合研
林伸彦	原子力機構	滝塚知典	阪大工
本多充	原子力機構	成田絵美	阪大工
松山顕之	原子力機構	河野晴彦	九州工業大学
宮戸直亮	原子力機構	大澤一人	九大応力研
矢木雅敏	原子力機構	糟谷直宏	九大応力研
若狭有光	RIST	佐々木真	九大応力研
東 修平	京大工	渡邉理	九大応力研
金森涼介	京大工	小菅佑輔	九大高等研
福山 淳	京大工	Maxime Lesur	九大伊藤セ
村上定義	京大工	小林達哉	九大総理工
西岡賢二	京大エネ	服部元隆	九大総理工
羽田和慶	京大エネ	福永航平	九大総理工
佐藤雅彦	核融合研	三輪祐大	九大総理工
藤堂 泰	核融合研		

平成25年度

# 新エネルギー力学分野 共同研究成果報告

# 九州周辺海域における潮流発電の適地調査

鹿児島大学大学院理工学研究科 山城 徹

## 1. 目的

九州西岸域には多くの海峡や瀬戸が存在し潮流の強い 海域が多い. ところが, 五島列島周辺海域を除くと, 潮 流発電の適地に関する具体的な調査報告はほとんどない. 九州における潮流発電の技術開発研究を促進するための 一環として、本研究では鹿児島県奄美大島の大島海峡(図 -1) における潮流エネルギーポテンシャルを調査するこ とにした.

#### 2. 研究内容

大島海峡の流速の時空間変動を知るために、2010年5 月12日~6月22日に第十管区海上保安庁本部が実施した ADCP定置観測および2013年9月6~7日に鹿児島大学が実 施したADCP曳航観測から得られた流速データを用いた

(図-1).現場観測値だけでは高解像度で広範囲・長期間 の流速データを得ることは難しいことから,数値モデル を用いて大島海峡における流速場を再現し、エネルギー ポテンシャルを見積もることを試みた.本研究で用いた 数値モデルは, Finite Volume Coastal Ocean Model (FVCOM; Chen et al., 2004) である. 海底地形データとし ては、日本水路協会から提供されているデータを与えた. 但し、大島海峡においては、2013年11月23~24日の現場 観測によって得られた高解像度の水深データを適用した. 開境界には、海洋潮汐予測モデル (NAO.99b; Matsumoto et al., 2000) を用いて計算した主要4分潮の潮位振幅を与 えた. また, スポンジレイヤーを適用することで, 境界 での流速が常に0になるように設定している. モデル海域 を図-2に示す.

2013年9月6~7日のADCP曳航観測によって得られた水 深4mにおける絶対流速の分布をモデルで再現されたも のと比較して図-3に示す.これら2つの空間分布は定量的 には若干違っているが、定性的にはよく似ている.2010 年5月12日~6月22日のADCP定置観測地点の流速と潮流 パワー (W/m²) をモデルの計算結果と比較してみると (図 -4,5),数値計算結果の方が観測結果よりも過小評価とな った. 例えば、最大流速については約1.0m/s、潮流パワー の15昼夜平均値については約500kW/m²の差が生じてい



図-1. 大島海峡の位置.赤丸は ADCP 定置観測 地点, 青のハッチは ADCP 曳航観測海域を示 す.







図-3.2013 年9月6日17:00 における水深4m での絶対流速の空間分布(a)観測,(b)モデル

る. そこで、ADCP定置観測地点の数値計算結果を観測結果 で補正を施し[図-5(b)],この補正式を大島海峡全体に適用 することによって大島海峡の15昼夜平均潮流パワーを見積 もると、大島海峡東側海域において潮流パワーが大きい海域 が存在することが示された「図-6(a)]. この海域の最強流帯 [図-6(b)の黒線]での15昼夜平均のエネルギーポテンシャル

(W) (15昼夜での断面平均潮流パワー×断面積: 図-6(b)の 黒線)は約2,400MWに達することがわかった.

#### 3. 結論

現地観測と数値計算から, 鹿児島県奄美大島の大島海峡に おける潮流のエネルギーポテンシャルを推算した. その結果, 海峡東部において 15 昼夜平均のエネルギーポテンシャルが



図-4. 2010年の定点観測地における観測と モデルから得られた流速との比較

約2,400MWに達する海域が存在することを示した.これは、一般家庭約8,500世帯(奄美大島全世帯数 の約3割)の1ヶ月分の電力量を賄うことができるエネルギーポテンシャルであることが分かった.

謝辞:大島海峡での ADCP 定置観測データを快く提供して頂いた第十管区海上保安庁本部に深く感謝申 し上げます.



大島海峡全体,(b)大島海峡東側海域

# 浮体式洋上風力発電ファームの波浪中動揺特性に関する研究

広島大学大学院工学研究科 教授 岩下 英嗣

## 1. 研究目的

現在,九州大学,大阪大学,広島大学および民間企業からなる組織にて,浮体式洋上風力ファームに 関する共同研究が遂行中である.大屋教授の開発した 350kW 型風レンズ風車を3基搭載し,デッキ上 に敷設する太陽光発電を加えて1.1MW の発電を可能とする浮体式プラントであり,浮体式プラントは セミサブ型に近い形状をしている.本研究では,この浮体式プラントの実現に向け,係留,波,風の影 響を考慮した波浪中でのプラントの動揺特性を明らかにすることを目的としている.

また,洋上風力発電は風の強い場所に設置するため,通常の海洋構造物とは設計法が異なり,風向・ 風速から定常変位を導出し,流体力を計算した後に波漂流力を考慮するといった流れである.そのため, 本研究でもその流れに沿って計算を行う.

#### 2. 研究方法

浮体式プラントの波浪中動揺特性解析は、当該分野で広く用いられている境界要素法を用いて行う. 解 析に際しては、係留、波、風の影響を考慮した定式化を行い、数値計算を実施する.特に設計上で重要 となる係留の安全性について評価すること、また風車の風抵抗が動揺特性に及ぼす影響を明確にするこ とが重要である.

また, 浮体に作用する定常力による定常変位を数値計算により導出し, その変位を考慮した形状に対して計算を行う. 初期の形状と変位を考慮した浮体形状の計算結果を比較し, 考察を行う.

### 3. 研究組織

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2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2年	実験補助
徳永 紘平	広島大学大学院工学研究科輸送・環境システム専攻	修士1年	実験補助
梶野 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1年	実験補助
高橋 悠	広島大学大学院工学研究科輸送・環境システム専攻	修士1年	実験補助
柏木 正	大阪大学大学院工学研究科船舶海洋工学部門	教授	実験解析
石上 恭平	大阪大学大学院工学研究科船舶海洋工学専攻	修士1年	実験補助
石上 雄貴	大阪大学大学院工学研究科船舶海洋工学専攻	修士1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

本研究は下記のような組織で行った.

#### 4. 係留系

想定されている相島近辺の平常時・異常時の海象条件を考慮して,係留系が決定した.相島の海象条件を Fig. 1 に示す.

平常時・異常時の海象条件に対して安全率が2倍以上になるように係留索が選定され、呼び径120 mm, 水中重量 274.4 kgf/m となった.係留系の概略図を Fig. 2 に示す.係留索の索長は 350 m,シンカーか



Fig.1: 相島

ら係留点までの水平距離は 324 m となっている. 左図のように浮体のフーティング部から 2 箇所, 60 degs. 離して設置されたフェアリーダーを係留点としている. また係留点は水面下 7 m にあり, 鉛直方向と 30 degs. をなす形で取り付けられる.



Fig.2: 係留概略図

選定された係留索の係留特性を Fig. 3 に示す. グラフの縦軸は張力と展張角を示している. 水平距離 が変化するにつれて, 張力にも大きな変化が現れていることを確認した.



Fig.3: 係留特性

5. 計算結果

提案されているセミサブ型浮体の計算格子を Fig. 4 に示し、主要目を Table 1 に示す.本計算では、 波向き角  $\chi$ ,風向き角  $\beta$  を Fig.4 のように定義している.計算は実機ベースで行っており、海水を想定 して密度  $\rho$ =1025 kg/m³ としている.なお、環動半径は各部材の重量と重心位置から概算した値を使用 している.本計算では水深を 70 m として計算を行っている.



Fig.4: 計算格子

Table	1:	王要目	

$\nabla$ (m ³ )	2221.4	$y_B$ (m)	0.0	$x_f$ (m)	0.00	GMT (m)	15.19
L (m)	77.94	$z_B$ (m)	-7.2	$y_f$ (m)	0.00	GML (m)	15.19
B (m)	90.0	$x_G$ (m)	0.0	$S_0 ({ m m}^2)$	59.15	$\kappa_T/B$	0.302
<i>d</i> (m)	10.0	$y_G$ (m)	0.0	$S_{11} ({\rm m}^4)$	64286	$\kappa_L/L$	0.310
$x_B$ (m)	0.0	$z_G$ (m)	6.6	$S_{22} \ ({\rm m}^4)$	64286	$\kappa_H/B$	0.391

#### 5.1 定常変位

運動方程式において、左辺から速度、加速度に関する項を除き、右辺を定常力に置換することで浮体 に作用する定常力による定常変位量 $X_j^{(0)}$ を計算できる。風車による定常抗力 $F_i^{(T0)}$ 、波漂流力 $\overline{F}_i^{(2)}$ が作 用している場合の平衡方程式は

$$\sum_{j=1}^{6} \{C_{ij} + \beta_{ij}\} X_j^{(0)} = F_i^{(T0)} + \overline{F}_i^{(2)} \quad (i = 1 \sim 6)$$
(1)

で表される.ここで $\beta_{ij}$ は線形バネ定数マトリックス, $C_{ij}$ は復原力マトリックスである.セミサブ型浮体の場合,風車抗力の影響が支配的であるので,波漂流力を無視して求める.浮体の諸次元 Table 1を用いて $C_{ij}$ を計算する.定常変位量は微小として, $C_{ij}$ は同一のマトリックスを使用している.浮体は左右対称物体であり,浮心と重心が鉛直線上に存在する.また,座標原点が浮面心にあるので, $C_{33}, C_{44}, C_{55}$ のみ値を持つ.

しかしこの平衡方程式を解いて得られる定常変位量は、係留点の移動による線形バネ定数の変化を考慮していないものであり、定常変位が微小と仮定したときの近似値となる。そこで得られた近似値を考慮すると、風車投影面積、係留端点位置、風車抗力の着力点が変化し、それに伴い作用する力とモーメントが変化する。こうして現時点で得られている変位量に対して係留力による定常復原力 *F*_i^(ML0) と風

車による定常抗力 F_i^(T0) が再計算されるので、これらを用いて平衡方程式

$$\sum_{j=1}^{6} C_{ij} X_j^{(0)} = F_i^{(ML0)}(X_j^{(0)}) + F_i^{(T0)}(X_j^{(0)}) \quad (i = 1 \sim 6)$$
⁽²⁾

を解き、新しい変位量  $X_i^{(0)}$  を得る。この手続きを繰り返し、変位量を収束計算により求める。収束計算の判定としては

$$||(X_j^{(0)})_k - (X_j^{(0)})_{k-1}||_{\infty} \le \varepsilon \cdot ||(X_j^{(0)})_k||_{\infty}$$
(3)

を用いている.

Fig. 5 に、風速を 0 ~ 60 m/s で変化させた風向角  $\beta=0$  degs. のときの線形計算による定常変位、非線形計算による定常変位を示す。風速 20 m/s 時の値を比較してみると、線形計算の結果は



Fig.5: 風向角 β=0 degs. のときの定常変位 (左:線形計算結果,右:非線形計算結果)

$$X_{1}^{(0)} = 5.67 \text{ (m)} \\ X_{5}^{(0)} = 0.31 \text{ (degs.)}$$

$$(4)$$

となる. その他の  $X_i^{(0)}$  はゼロとなる. (4) をみると,風車の定常抗力により浮体はおよそ 5.7 m ドリフトするのに対し,トリム角はわずか 0.3 degs. である. これは係留索の surge 方向と pitch 方向の連成成分  $\beta_{15}, \beta_{51}$  によりトリム角が微小に押さえ込まれているからである.

線形計算結果に対して、係留点の変位を考慮した非線形計算結果は

$$\left.\begin{array}{l}X_{1}^{(0)} = 4.81 \ (m) \\X_{3}^{(0)} = -0.05 \ (m) \\X_{5}^{(0)} = 1.58 \ (degs.)\end{array}\right\}$$
(5)

となる.その他の数値的に  $X_i^{(0)}$  はゼロとみなせる値である.およそ 4.8 m ドリフトし, 1.6 degs.トリムした状態が本来の平衡状態である.線形計算結果と比較すると surge 方向の変位は 15% 減少, pitch 方向の変位は約5倍となっている.また,線形計算の結果では見られなかった heave 方向への変位が確認された.これは定常変位を考慮することにより,線形バネ定数に連成項が現れたためであると考えられる.

実際に線形バネ定数マトリックスを比較していく.初期状態での線形バネ定数マトリックスを(6)に示す.単位は $i, j = 1 \sim 3$ の場合は $kgf/m, i = 1 \sim 3, j = 4 \sim 6$ および $i = 4 \sim 6, j = 1 \sim 3$ の場合は

kgf,  $i, j = 4 \sim 6$ の場合は kgfm である.

$$\beta_{ij} = \begin{pmatrix} 0.516E + 04 & 0.000E + 00 & 0.000E + 00 & 0.000E + 00 & 0.118E + 06 & 0.000E + 00 \\ 0.000E + 00 & 0.516E + 04 & 0.000E + 00 & -0.118E + 06 & 0.000E + 00 & -0.614E + 00 \\ 0.000E + 00 & 0.000E + 00 & 0.531E + 04 & 0.000E + 00 & 0.000E + 00 & 0.000E + 00 \\ 0.000E + 00 & -0.118E + 06 & 0.000E + 00 & 0.707E + 07 & 0.000E + 00 & 0.220E + 02 \\ 0.118E + 06 & 0.000E + 00 & 0.000E + 00 & 0.000E + 00 & 0.707E + 07 & 0.000E + 00 \\ 0.000E + 00 & -0.614E + 00 & 0.000E + 00 & 0.220E + 02 & 0.000E + 00 & 0.697E + 07 \end{pmatrix}$$
(6)

(6) をみてみると, surge 方向と heave 方向の連成項がゼロである. これは初期の釣り合い状態では均一 に張られた係留索に対して, surge 方向に微小変位しても heave 方向に作用する係留力は, 各係留索間 に作用する力のキャンセルにより系全体としてゼロとなることを示している. 風速 20 m/s, 風向角 β=0 degs. の変位後の線形バネ定数マトリックスは

$$\beta_{ij} = \begin{pmatrix} 0.603E + 04 & -0.396E - 03 & 0.139E + 04 & 0.272E - 01 & 0.103E + 06 & -0.376E - 01 \\ -0.396E - 03 & 0.555E + 04 & -0.937E - 05 & -0.142E + 06 & 0.204E - 01 & 0.405E + 05 \\ 0.139E + 04 & -0.937E - 05 & 0.541E + 04 & 0.294E - 02 & -0.278E + 04 & -0.477E - 01 \\ 0.272E - 01 & -0.142E + 06 & 0.294E - 02 & 0.786E + 07 & -0.117E + 00 & -0.170E + 07 \\ 0.103E + 06 & 0.204E - 01 & -0.278E + 04 & -0.117E + 00 & 0.643E + 07 & 0.220E - 01 \\ -0.376E - 01 & 0.405E + 05 & -0.477E - 01 & -0.170E + 07 & 0.220E - 01 & 0.808E + 07 \end{pmatrix}$$
(7)

となる. 実際にドリフトした位置を平衡位置として考えて  $\beta_{ij}$  を計算しているため, 連成項の出現を確認できた.

これらのことから、浮体は定常力を受けると、単独時よりも沈下した状態で平衡位置周りに周期的に 動揺することになる、浮体の設計はこのことを考慮して、十分な乾舷を有するように設計されなくては ならない.

# 5.2 計算結果比較

先ほど求まった定常変位を考慮して計算を行い,初期状態の計算結果と比較を行っていく.風速 20 m/s,風向角 0 degs.で変位した浮体形状の側面図・正面図と主要目を Fig. 6, Table 2 に示す.



Fig.6: 変位後の計算格子 (風速 20 m/s, 風向角  $\beta=0$  degs.)

$\nabla$ (m ³ )	2225.1	$y_B$ (m)	0.0	$x_f$ (m)	-0.11	GMT (m)	15.19
<i>L</i> (m)	77.94	$z_B$ (m)	-7.2	$y_f$ (m)	0.00	GML (m)	14.94
B (m)	90.0	$x_G$ (m)	0.2	$S_0 ({\rm m}^2)$	59.18	$\kappa_T/B$	0.302
<i>d</i> (m)	10.0	$y_G$ (m)	0.0	$S_{11} ({\rm m}^4)$	64624	$\kappa_L/L$	0.310
$x_B$ (m)	0.6	$z_G$ (m)	6.5	$S_{22}$ (m ⁴ )	64044	$\kappa_H/B$	0.391

Table 2: 変位後の主要目(風速 20 m/s, 風向角  $\beta=0$  degs.)

# 5.2.1 流体力計算

セミサブ型浮体に働く流体力を計算した. Fig. 7,8は縦,横運動による付加質量および減衰力係数を 示す. 横軸には波数を無次元化した *KL* をとっている. 高周波域まで計算してみたところ,流体力の振 動が確認された. この振動の原因としてはコラム,ブレースの干渉影響が考えられる. 風向角0 degs. の ものと比較しており,若干の相違を確認できた. 変位を考慮したことにより水面下の形状が変化したの で,コラム,ブレースの干渉影響も変化したためである. roll, pitch 運動の付加質量に対して,減衰力 係数に大きな相違が現れているように見えるが,付加質量に対して減衰力係数の値が小さいためである.

Fig. 9, 10 に風向角 0 degs., 波向角 0 degs., 90 degs. における波浪強制力を示す. における波浪強制力を示している. 横軸には波長を無次元化した  $\lambda/L$  をとっている. 波浪強制力においてもラディエーション流体力と同様に短波長域(高周波域に相当)において振動が見られ, 波なし点の存在も確認できる. 結果を比較すると先ほどの付加質量・減衰力係数と同様に,若干の相違が短波長域において見られた.


Fig.7: 付加質量および減衰力係数 (縦モード系)



Fig.8: 付加質量および減衰力係数 (横モード系)



Fig.9: 波浪強制力:  $\chi$ = 0degs.,  $\beta$  = 0degs.



Fig.10: 波浪強制力:  $\chi$ = 90degs.,  $\beta$  = 0degs.

#### 5.2.2 波浪中動摇特性

浮体の波浪中動揺特性を把握するために,粘性抵抗,係留系,浮体に搭載する風力タービンに作用す る風抵抗を考慮した運動を実施した.

粘性においては、粘性抵抗を入れて運動方程式を繰り返し法で解くことにより考慮している。粘性減 衰力マトリックス N_{ii} は以下を使用した。

$$N_{ij} = \begin{pmatrix} 0.223E + 06 & 0.000E + 00 & 0.000E + 00 & 0.000E + 00 & -0.372E + 08 & 0.000E + 00 \\ 0.000E + 00 & 0.225E + 06 & 0.000E + 00 & 0.367E + 08 & 0.000E + 00 & 0.000E + 00 \\ -0.123E + 02 & 0.000E + 00 & 0.359E + 06 & 0.000E + 00 & -0.109E + 09 & 0.000E + 00 \\ 0.000E + 00 & 0.168E + 07 & 0.000E + 00 & 0.161E + 11 & 0.000E + 00 & -0.104E + 01 \\ -0.167E + 07 & 0.000E + 00 & 0.000E + 00 & 0.000E + 00 & 0.156E + 11 & 0.000E + 00 \\ 0.000E + 00 & 0.521E + 04 & 0.000E + 00 & -0.209E + 09 & 0.000E + 00 & 0.177E + 11 \end{pmatrix}$$

なお、繰り返し計算の収束をチェックする指標としては以下を用いている.

$$\xi \equiv \sum_{j=1}^{6} \frac{|X'_j - X_j|}{|X'_j|} \tag{8}$$

係留系においては、前節で得られた線形バネ定数マトリックス β_{ij} を運動方程式に入れ込むことで、考 慮している.ただし、排水量については、浮体は初期張力によって沈み込むことになるため、鉛直方向 の初期張力と浮力のつり合いから、浮体が沈み込むことによって増加する排水量を算出し、その排水量 を喫水 10 m の排水量から差し引いた値を使用している.

風抵抗においては,提供された 350 kW 風車のパラメータから,浮体が動揺したときの非定常な風抵 抗を算出し,粘性抗力,係留系を考慮した上で,風抵抗の影響を含めた運動計算を行った.波は,その 場所の風によって起こる「風浪」と遠い場所から伝播する「うねり」がある.風浪は風と同一方向から 作用するが,うねりは異なることが多い.低気圧が速い速度で移動してしまった時,波は吹走距離と吹 続時間が必要なため,すぐには変化せず,波向と風向が一致しないことがある.波向角と風向角の方向 が異なっていても計算できるようにプログラムを作成している.風速 20 m/s,風向角 0 degs.における 変位前後の風抵抗マトリックス γ_{ij}を以下に示す.

初期状態の風抵抗マトリックス

$$\gamma_{ij} = \begin{pmatrix} 0.298E + 04 & 0.000E + 00 & 0.000E + 00 & 0.000E + 00 & 0.894E + 05 & 0.000E + 00 \\ 0.000E + 00 & 0.000E + 00 \\ 0.000E + 00 & 0.000E + 00 \\ 0.000E + 00 & 0.000E + 00 \\ 0.894E + 05 & 0.000E + 00 & 0.000E + 00 & 0.000E + 00 & 0.268E + 06 & 0.000E + 00 \\ 0.000E + 00 & 0.000E + 00 & 0.000E + 00 & 0.000E + 00 & 0.402E + 07 \end{pmatrix}$$

変位後の風抵抗マトリックス

$$\gamma_{ij} = \begin{pmatrix} 0.298E + 04 & 0.000E + 00 & 0.000E + 00 & 0.000E + 00 & 0.892E + 05 & 0.000E + 00 \\ 0.000E + 00 & 0.000E + 00 \\ 0.000E + 00 & 0.000E + 00 \\ 0.000E + 00 & 0.000E + 00 \\ 0.892E + 05 & 0.000E + 00 & 0.000E + 00 & 0.000E + 00 & 0.267E + 06 & 0.000E + 00 \\ 0.000E + 00 & 0.000E + 00 & 0.000E + 00 & 0.000E + 00 & 0.402E + 07 \end{pmatrix}$$

Fig. 11, 12 に風向角 0 degs., 波向角 0 degs., 90 degs. の運動を示す.

回転運動において定常変位の影響が現れていることを確認した.波振幅 1m の波条件で計算した場合, 風向角 0 degs.,波向角 0 degs.の時には,同頂点において,pitch の最大傾斜角が初期状態で 1.38 degs., 変位を考慮した状態で 1.36 degs.であった.しかし,浮体は元々pitch 方向に 1.58 degs.傾いているので 実際には 2.94 degs.傾くことになり,浮体の最大傾斜角を確認することができた.

また,波向角 90 degs.の時に定常変位の影響が yaw 運動に顕著に現れている.これは浮体が定常変位 により線形バネ定数が変化し,連成項が現れたためである.風向角 0 degs.の変位後の浮体は左右対称 物体であるため,縦運動と横運動の連成は存在しない.そのため sway, roll 方向と yaw 方向の連成項で あると考えられる.

これらの結果から,流体力には若干の相違しか現れていないにも関わらず,波浪中動揺には大きな相 違が現れている.このことから,係留力の変化が浮体の動揺に影響を及ぼしていることを確認した.



Fig.12: 運動:  $\chi = 90$ degs.,  $\beta = 0$ degs.

## 6まとめ

本研究では海象条件に沿った風向・風速から定常変位を導出し,その変位を考慮した浮体形状に対し て数値計算を行うことで,実際のシミュレーションに適した流れを実現した.上記,本研究より得られ た結論を以下に示す.

- (1) 浮体に作用する定常力による影響を把握するために、数値計算により定常変位を求めた.
- (2) 浮体の波浪中動揺特性を把握するために、粘性、係留、風抵抗を考慮した運動計算のアルゴリズ ムを構築し、計算プログラムを作成した.また初期状態と定常変位を考慮した状態で計算し、比 較を行った.
- (3) 係留力は浮体の変位によって大きく変化し、それが定常変位にも影響を及ぼすことを確認した.計算結果を見てみると、浮体は定常力を受けると、単独時よりも沈下した状態で平衡位置周りに周期的に動揺することになる。浮体の設計はこのことを考慮して、十分な乾舷を有するように設計されなくてはならない。
- (4) 流体力計算において、初期状態と定常変位を考慮した状態で比較を行うと、高周波域にて若干の 相違が確認できた.エネルギー関係式の満足度的にも計算の精度に問題は無い.
- (5) 運動計算において、回転運動において定常変位の影響が現れていることを確認した。定常変位を 考慮することにより、浮体の最大傾斜角を確認することができた。流体力には若干の相違しか現 れていないにも関わらず、波浪中動揺には大きな相違が現れていることから、係留力の変化が浮 体の動揺に影響を及ぼしていることを確認した。

## 海流発電タービンの発電特性に関する研究

沖縄科学技術大学院大学 量子波光学顕微鏡ユニット 白澤克年

## 目的

2011年3月に発生した福島第1の原発事故以降,再生可能エネルギーの必要性が急速に高まっ ている。太陽光,風力,地熱など様々な自然エネルギーが脚光を集めており,海洋エネルギーもそ の1つである。欧米諸国を中心に海洋エネルギーを活用するための発電技術に関して,活発な技術 開発が行なわれている。海洋エネルギーの1つである海流に着目すると,日本は世界2大海流の1 つである黒潮が近海を流れているなど,非常に恵まれた環境にある。これまでは、コスト、メンテ ナンス,送電などの問題で海流からエネルギーを取り出す技術が実用化されることは無かった。沖 縄科学技術大学院大学(OIST)では,沖縄トラフを流れる黒潮と海洋へのアクセスに恵まれていると いう地理的環境を生かして,海流発電技術の研究開発を開始した。黒潮は海面より深さ約500 m, 幅約100 km にわたって流れており、その流速は1~1.5 m/s程度である。この黒潮の中にプロ ペラを持つ発電機を設置して発電を行う。海面付近は波浪の影響が強いため、深さ100 m程度の 水深で安定に流れる海流をつかまえ、プロペラを回転させる。波浪の影響は海面ほど強く、深くな るに従って指数関数的に減少する。発電機は、海底に沈めた重りから伸びるチェーンにて係留され、 浮力を調整する事により最適な水深で運転する。発電機の上部にフロートと下部に重りを備え、そ の浮力と重力を復元力とすることで水中にて海流をとらえ水平軸型ブレードにより安定に発電す る。この原理は、試験機による海洋実験で既に実証されている。

## 実験方法

海流での発電を目的として、新規に設計・製作したブレードのパラメータを表1に示す。設計パ

ラメータはOISTが海洋実験で使用した発電機を 含む浮体, 曳航水槽での実験を考慮して決定され た。完成したブレードは, 広島大学の風洞, 九州 大学応用力学研究所(RIAM)の曳航水槽にて性能 評価実験を行った。本報告書では, 曳航試験につ いてのみ報告する。図1に製作したブレードを装 着した海流発電試験機の写真を示す。上部に浮力 を得るためのフロート, 下部に重りが設置されて おり, この2つの力が復元力となって働き, ブレ

ローター直径	1.46 m
設計流速 (水)	1.2 m/s
周速比	4.0
ブレード枚数	3 枚
最大パワー効率	0.43
材質	ABS 樹脂

表1,ブレードの主要パラメータ。

ードが回り発電するときの機体を安定させる。曳航試験では,曳航電車に翼型の曳航装置を取付け, 水深 2m の位置から牽引した。曳航ロープの途中に,荷重計を設置し,牽引力も測定した。発電機の出力は3相交流であり,ケーブルにより曳航電車の上まで運ばれ,整流後,負荷抵抗に接続した。 負荷抵抗の電流と両端電圧を測定することにより,ブレードの出 力を測定した。以上の実験セットアップで,曳航スピードを変更 しながら,パワーと抵抗力を測定した。

## 実験結果・考察

研究組織

曳航試験により得られた各流速に対するブレードの出力を図2 (a),周速比とパワー効率の関係を図2(b)に示す。両者とも,測定 結果と設計値は良い一致を見せた。先行して行った広島大学の風 洞実験でも,理論値と測定値はよく合っており,矛盾のない結果 が得られた。また,曳航試験中の発電機の姿勢は安定であり,負 荷抵抗にて測定された電流,電圧波形も非常に安定であった。沖 縄科学技術大学院大学と広島大学では引き続き各種の要素開発を 行い,スケールアップや実証実験などを行っていく予定である。



図 1, 新規開発したブレー ドと海流発電機。



図 2, 曳航試験にて測定されたブレード出力。左側のグラフ(a)が曳航スピードとブレード出力,右側のグラフ(b)が周速比とパワー効率を示す。

氏名	所属	職名	役割担当
白澤克年	沖縄科学技術大学院大学	研究員	代表者
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	実験解析
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2年	実験補助
徳永紘平	広島大学大学院工学研究科 輸送・環境システム専攻	修士1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

# 研究成果報告

「浮体式による海流発電機の開発」

白澤克年,新竹積,徳永紘平,岩下英嗣,日本船舶海洋工学会平成25年春季講演会

「海流発電タービンの発電特性に関する研究」

徳永紘平, 岩下英嗣, 白澤克年, 新竹積, 日本船舶海洋工学会平成 25 年春季講演会

# 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。 その中で、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づけ 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、今年度は 2 年目である。本研究集会は、海上風、潮流、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26年1月10日(金)13:00~18:00 1月11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。

## R&D Activities in China on Utilization of Tidal Current Energy and Offshore Wind Energy

Liang Zhang (Harbin Engineering University, China) The state of the art of the research and development activities in China on utilization of tidal current energy and offshore wind energy is first outlined. Some major research projects are introduced. Then researches which are carried out in Harbin Engineering University are described in details. A series of analysis methods have been developed in the past 30 years on predicting the performance of turbine, floating body and mooring system. Three on-sea experiments on floating tidal current energy converter have been successfully carried out.

## Observation and Simulation of Tidal Current at Goto Islands, Japan

Huihui Sun, Yusaku Kyozuka (九州大学) FVCOM was employed for estimating spatial and temporal variation of tidal current in the sea area of Goto islands with the open boundary condition based on Matsumoto ocean tide model (NAO. 99Jb model), submarine topography generated according to the corresponding water depth from actual measurement and public database of JODC. Modeled results using FVCOM were validated against measured results in the aspects of tidal level and current. Characteristics of tidal current in the main straits of Goto Islands during flood and ebb were analyzed and concluded. Sea areas with high current velocity were confirmed.

## Wave-Energy Absorption by an Electric-power Generator Installed in an Asymmetric Floating Body

## 柏木 正, 酒井克弘(大阪大学)

In the present wave-absorption model, an electric-power generator is supposed to be set at the center of a smaller cylinder which rotates without sliding on the interior circular surface with larger radius of an asymmetric floating body. The floating body responds in roll to the action of incident wave, and due to coupling effects between the floating body and smaller cylinder inside, the smaller cylinder rotates and then the electric-power generator installed in the smaller cylinder generates electricity. When only the roll motion is allowed for the floating body, the conditions for maximizing the wave-energy absorption efficiency can be derived analytically. It is also shown analytically that if an asymmetric floating body has a special feature that no wave generates on the lee side of the floating body, the maximum wave-energy absorption efficiency becomes 1.0 only with a single mode of roll motion. It is also shown by numerical computations that the wave-energy absorption efficiency becomes higher around the two resonant frequencies in the swing motion of smaller cylinder and in the roll motion of floating body, and that the total wave power absorbed can be large by tuning the geometric parameters of the device and the damping coefficient of an electric-power generator.

#### Fundamental Study on WEC as a Floating Platform Motion Suppression System

Kangping Liao (九州大学)

Although floating offshore wind turbine (FOWT) can extract large amount of wind energy in deep water region, it often suffers from large amplitude motion in heavy sea states. The large amplitude motion will reduce aerodynamic performance of wind turbine and result in additional structural loads. Therefore, suppression of floating body motion in waves is an important task in designing a floating wind turbine system. Since the energy to drive the floating body motion mainly comes from the incident waves from the incident waves, a natural consideration is that if a wave energy converter (WEC) can be used to absorb part of the energy from the incident waves. In this presentation a new WEC concept that can be installed in a semi-submersible type floating wind turbine system to suppress the floating body motion is introduced with a series of fundamental studies.

## Ocean Tidal Energy Development in Ocean University of China

Shujie Wang (Ocean University of China, China) Recent research and development activities in Ocean University of China on marine energy conversion technologies are introduced. Important results of fundamental research and practical application on wave and marine current (tidal stream) energy converters, vertical axis wind turbines, micro wind turbines, electromechanical integration equipment and apparatus are presented.

## マルチカラム型波力発電浮体システムの開発に関する研究

安澤 幸隆 (九州大学) 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新型のマルチカラム型波力発電浮体システム(MC-WEC)を提案した。これまでの研究では固定された円筒形 OWC 単体の性能について調べほぼ性能を評価することができるようになりつつある。本研究では、複数の OWC がデッキ下に並ぶ MC-WEC について、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。

## 海流発電用ローターブレードの性能解析

徳永紘平, 岩下英嗣 (広島大学工学部) 浮体式海流発電タービンを沖縄科学技術大学院大学が提案した。広島大学は海流発電タービンブレー ドの設計と性能解析を担当している。タービンブレードは Adkins&Liebeck 理論を用いて、風洞試験と水中 曳航試験に最適な設計条件で設計した。性能解析は翼素運動量理論と3 次元時間領域境界要素法を用 いて行った。風洞試験を実施し、理論計算値と実験値が良い一致を示すことを確認した。今回設計と性能 解析に用いた理論が海流発電タービンの設計・性能解析に有効であることを確認した。

## OIST における海流発電機の開発

## 白澤克年(沖縄科学技術大学院大学)

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。今年度は新開発のブレードについて水槽実験を行い、発電特性を計測した。

## 後ろ曲げダクトブイの規則波中性能向上に関する研究

今井康貴 (佐賀大学海洋エネルギー研究センター) 浮体式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 Bent Duct Buoy)の Wave farm に対応する実験を九州大学応用力学研究所深海機器実験水槽にて実施した。装置が横一列に無限 個並べられたと仮定し、模型間の干渉が一次変換効率に及ぼす影響を計測した。h 入射波の波高は 5cm 一定、周期T=1.0~1.8秒とした。その結果、模型幅を同じ間隔の場合、単一の場合と比較して、最大効率を とる周波数が長波長側になり、特に長波長側の効率が増加することを明らかにした。

## 数値モデルを用いた奄美大島における潮流シミュレーション

國里立紀,加古真一郎,山城 徹(鹿児島大学) 奄美大島における「潮流発電の適地マップ」の作成および発電に有効な潮流パワーの大きい海域を推定 するために、潮流シミュレーションを行った。計算結果を観測値と比較により数値モデルの精度を評価した。 潮流の空間分布はよく再現されているが、計算した潮流パワーは過小評価傾向が示された。数値シミュレー ションの結果から、大島海峡の東側において潮流発電適地として有望である海域があることが分かった。

## 唐津市北方海域における潮流シミュレーションについて

石 静,経塚雄策 (九州大学)

In this study, we have used FVCOM (Finite Volume Coastal Ocean Model) to simulate the tidal current in the sea area near Kakara Island and checked whether the simulation could reflect the real tidal current or not. We simulated the velocity distribution and the simulated flood-tide and ebb-tide could almost reflect the real phenomenon from filed observation. In a word, this simulation by FVCOM can help us to understand and characterize the tidal current and select a proper place for tidal current generation.

# Robust and Accurate Unstructured-Grid CFD Model for Multi-Phase Flows Including Free Interface and Moving Body

Bin Xie, Feng Xiao (東京工業大学)

In this study we have derived an accurate and robust scheme on unstructured mesh for incompressible fluid. The numerical test shows this method is more accurate and less mesh dependency compared with traditional FVM method. The present method provides a practical formulation for real-case applications that well-balances solution quality and computational cost. The present scheme has been applied into multi-fluid flow. The numerical tests show good agreement with referred data and strong ability to deal with various problem.

## **Recent Progress on CFD Development for Simulation of Floating Wind Turbine**

Chen Liu, Changhong Hu (九州大学) New improvements are presented on development of CFD model for simulation of a floating offshore wind turbine (FOWT) platform in large waves and strong winds. The CFD model is a Cartesian grid method for multi-phase free surface flows which contains a CIP based free surface flow solver, a wind turbine model and a mooring line model. A comparison computation against an experiment with a semi-submersible type FOWT model has been performed for validation of the CFD model. Reasonably good agreement between the numerical simulation and the experiment has been obtained on floating body motions in large waves.

## 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。今回は中国から著名な研究者を招き、中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、東京工業大学、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: 2014(平成 26)年1月10日(金),11日(土) 場 所: 九州大学応用力学研究所本館6階W601室

#### 1月10日(金)

- 13:00-13:10 趣旨説明 経塚 雄策 (九州大学)
- 13:10 14:00 R&D Activities in China on Utilization of Tidal Current Energy and Offshore Wind Energy Liang Zhang (Harbin Engineering University, China)
- 14:00 14:30 Observation and Simulation of Tidal Current at Goto Islands, Japan Huihui Sun, Yusaku Kyozuka (九州大学)
- 14:30 15:00 Wave-Energy Absorption by an Electric-power Generator Installed in an Asymmetric Floating Body 柏木 正, 酒井克弘 (大阪大学)
- 15:00 15:30 Fundamental Study on WEC as a Floating Platform Motion Suppression System Kangping Liao (九州大学)
- 15:30 15:40 休憩
- 15:40 16:30 Ocean Tidal Energy Development in Ocean University of China Shujie Wang (Ocean University of China, China)
- 16:30 17:00 マルチカラム型波力発電浮体システムの開発に関する研究 安澤 幸隆 (九州大学)
- 17:00 17:30 海流発電用ローターブレードの性能解析 徳永紘平, 岩下英嗣 (広島大学工学部)
- 17:30 18:00
   OIST における海流発電機の開発

   白澤克年(沖縄科学技術大学院大学)
- (懇 親 会)

<u>1月11日(土)</u>

- 9:00-9:30 後ろ曲げダクトブイの規則波中性能向上に関する研究 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 数値モデルを用いた奄美大島における潮流シミュレーション 國里立紀,加古真一郎,山城 徹(鹿児島大学)

- 10:00 10:30 唐津市北方海域における潮流シミュレーションについて 石 静,経塚雄策 (九州大学)
- 10:30 11:00 Robust and Accurate Unstructured-Grid CFD Model for Multi-Phase Flows Including Free Interface and Moving Body Bin Xie, Feng Xiao (東京工業大学)
- 11:00 11:30 Recent Progress on CFD Development for Simulation of Floating Wind Turbine Chen Liu, Changhong Hu (九州大学)
- 11:30-12:00 総合討論

## 25 特 4-5

## 双翼型フラッタ水力発電装置に対する流れレンズの効果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 力発電技術の開発に取り組んでいる.^{1),2)}その一環として、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の応用を検討している.平成23,24年度に、応用力学研究所の深海機器力学実験水 槽において小型基礎試験装置を用いて2次元ディフューザ(流れレンズ)の規模と出力増加の関係を調べる実 験を行い、翼弦長の2倍の長さの流れレンズで出力が1.5-3倍に増加する結果を得た.³⁾

本研究では、実用化に向けて別途開発中の2枚の翼が逆位相で振動する幅の広い双翼型フラッタ発電装置に 対する流れレンズの効果について、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.インレット角,ディフ ューザ角は,それぞれ一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.またスロート幅は600 mm ~1550 mm の範囲で変化させた.双翼型フラッタ発電装 置,流れレンズを深海機器力学実験水槽の曳 航台車への取付け冶具に設置した状況を図3 に示す.



図2 流れレンズ組立状態



図1 流れレンズ断面



図3 双翼型フラッタ発電装置及び流れレンズ

#### 3. 実験結果

レンズ大について, 流速をパラメータにしてスロート幅と発電量の関係を装置単独の場合も含めて図4に示す.スロート幅が狭まるにつれて発電量は増加し,スロート幅650mmでは,流速 1.0 m/s で約19Wの発電

量が得られた.また同図を装置単独の場合に対する比率にして図5に示す.スロート幅が翼弦長(100mm)の10倍以上でも装置単独と比べて発電量は増加しており,スロート幅の縮小とともに増加比率は増大する. スロート幅が狭い600mmにおいては,流速が遅い0.75m/sで2.2倍,流速の速い1.0m/sで2.5倍が得られ



図4 スロート幅と発電量(レンズ大)



レンズ小の結果を図 6, 図 7 に示す. 発電量はスロート幅 600 mm の場合, 流速 0.75m/s で 1.8 倍, 1.0m/s で 2.2 倍に増加する. 以上の増加比率は, 昨年度スロート幅をより狭くできる単独翼発電装置で得られたレンズ大の 3.2 倍, レンズ小の 2.9 倍に比べるとかなり小さいが,装置単独の 2 倍程度の発電量が得られることが 確認できた.



図6 スロート幅と発電量(レンズ小)

図7 スロート幅と発電量増加率(レンズ小)

#### 4. 結言

流れレンズはスロート幅を狭くできない双翼型フラッタ発電装置に対しても有効であることが確認できた.

#### 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,"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",平成24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24特4-7

## 多数配置された浮体式波力発電装置の一次変換効率に関する研究

(共同研究採択課題名:後ろ曲げダクトブイの規則波中性能向上に関する研究)

佐賀大学海洋エネルギー研究センター

永田修一, 今井康貴, 村上天元

## 1 緒言

本研究では,浮体式振動水柱型発電装置の一種である後ろ曲げダクトブイ(Backward Bend Duct Buoy; BBDB)と呼ばれる装置に注目している(Fig.1).理由としてBBDBは浮体と水室内の水柱の 共鳴時に空気圧力が非常に高くなるため,他の振動水柱型発電装置より一次変換効率(波エネルギ ーから空気エネルギーへの変換)が高い利点がある.また一次変換効率が最大となる波の波長は浮 体長さの4倍程度となるため,浮体の長さを短くすることで小型化し製作費を抑えることができる. さらに入射波の特定の周波数帯において波上側へ微速前進する.この波上側への微速前進は多数の 周波数帯の波が混在する実海域では,波下方向に働く波漂流力を低減できるため,係留費を低減さ せ課題を達成するために有効である.よってBBDBに着目し研究を進めている.

本年度は,BBDB が横一列に配置された Wave Farm を想定し,一次変換効率,運動に及ぼす流体の相互干渉を計測した.



Fig. 1 Concept of Backward Bend Duct Buoy (BBDB)

## 2 実験方法

実験に使用した BBDB 模型を Fig.2 に示す.静止時,L字型のダクトの喫水線以下の部分には水が入っており,喫水線より上の部分が空気室となっている.空気室には発電タービンの設置を想定したオリフィスの穴を設けた.運動計測は MVTec 社製画像解析プログラム HALCON を用いた.



Fig. 2 Specification of BBDB

実験は九州大学応用力学研究所の深海機器力学実験水槽にて実施した.使用した水槽は長さ65m, 幅 5m,水深 7m である.実験では、2個の BBDB を使用した.模型 A, B の前部はワイヤーで2点 係留し、後部はテグスで緩係留した. Fig.3,4 に BBDB の配置を示す.



Fig. 3 Configuration of experiment apparatus(twin800mm, twin1600mm)



Fig. 4 Configuration of experiment apparatus(single, single weak)

入射波は波高 50mm, 周期 1.044~1.808 秒の規則波を用いた.入射波の周期 λ と模型全長 L の比 はλ/L =2.0~6.0 に相当する.造波機で波を作り,入射波高,反射波高,空気室内部波高,空気室内 部圧力,浮体運動を計測し,一次変換効率を計測した. BBDBによる波浪エネルギーの一次変換効率は次式で定義される.

$$\eta_1 = \frac{E}{E_i} \tag{1}$$

ここでEは空気に与えられる仕事率, $E_i$ は入射波の仕事率である.振幅 $\zeta_i$ の規則的な入射波が幅 B(m)で伝播する場合のエネルギーフラックスは次式で表される.

$$E_i = \frac{1}{2} \rho g \varsigma_i^2 C_g B \qquad [W]$$
⁽²⁾

一方、空気室内水面変動が空気に与えるエネルギーは以下のように表すことができる.空気室内水面変位を $\eta_1$ (波上側), $\eta_2$ (波下側)とすると、オリフィスを通過する空気流量Q(t)は $\eta_1\eta_2$ および空気室断面積*S*を用いて次式で表される.

$$Q(t) = \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \frac{\eta_1(t) + \eta_2(t)}{2} \right\} S \qquad \left[ m^3 / s \right]$$
(3)

空気に与える仕事W(t)は次式で与えられる.

$$W(t) = p(t)\frac{\partial}{\partial t} \left\{ \frac{\eta_1(t) + \eta_2(t)}{2} \right\} S \qquad [W]$$
(4)

1周期における平均波エネルギー吸収量Eは次式で表される.

$$E = \frac{1}{T} \int_{o}^{T} W(t) dt = \frac{S}{T} \int_{o}^{T} p(t) \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \frac{\eta_{1}(t) + \eta_{2}(t)}{2} \right\} dt \qquad [W]$$
(5)

## 3 実験結果及び考察

Fig.5~Fig.7に模型間の離隔距離800mm, 1600mm, single(模型単独設置,後部係留強), single weak (模型単独設置,後部係留弱)の一次変換効率,内部波高振幅の無次元値,内部圧力の無次元値を 示す.また、Fig.8~Fig.10に浮体のSurge, Heave, Pitchの無次元振幅を示す.Twinの場合,一次変換 効率,内部波高,内部圧力は2模型の平均値である.横軸は,λ/Lである.

Fig. 11,12 に模型中央における入射波を基準とした位相差を表す.縦軸は上から(a)入射波高,(b) 一次変換効率,(c)内部波高(波上,波下),(d)内部圧力,(e)内部波高(右舷,左舷),(f)浮体運動である.横軸はλ/Lとした.位相差は一πからπであるが,πで割って-1から1の範囲とした.



Fig.5 Primarv conversion efficiency



Fig. 6 Amplitude of inner wave height



Fig. 7 Amplitude of pressure

 $\zeta/\zeta_i$ 

 $P/\rho g \zeta_i$ 



Fig. 8 Amplitude of motion(Surge)



Fig. 9 Amplitude of motion(Heave)



Fig. 10 Amplitude of motion(Pitch)

Surge/ζ_i

Heave/ζ_i



Fig. 11 Phase (twin800mm : Incident wave )



Fig. 12 Phase (twin 1600mm : Incident wave )

- 次変換効率η₁は,模型単独の場合λ/L=3.5 において,2模型並列配置の場合λ/L=4.0 において最 大値を示した.複数配置により一次変換が最大となる周波数が長波長側に移動した。また,2模型 設置の場合,離隔距離 800mm での一次変換効率の最大値は模型 A が 0.68,模型 B が 0.71 であり, 模型間の離隔距離 1600mm では模型 A が 0.84,模型 B が 0.86 であった.模型 A, B の距離を 800mm から 1600mm に広くすることで,両方の模型の一次変換効率が上昇した.

一次変換効率が最大となる周波数において、単独配置、複数配置どちらも Surge, Heave 振幅が最 大値をとる.また内部波高も最大であるため内部圧力も最大をとる.また、その周波数において、 2 模型並列配置の場合、Surge 基準では、内部波高、Heave が逆位相となり、Pitch は同位相である. これを図示すると Fig.13~15 になる。



Fig.13 Surge motion and Water



Fig. 14 Heave motion and Water



Fig.15 Pitch motion and Water

つまり,Heave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上下振動が大きくなった.Surge,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った.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.

## 4 結論

BBDB の並列配置が一次変換効率に与える影響を水槽実験で計測した. 模型を並列配置した場合, 一次変換効率が最大となる周波数が,単独配置の場合より長波長側に移動した. このため,設置海 域と代表波長が決まれば,装置を並列配置することで装置サイズを小さくできるメリットがあるこ とが確認された.

## 5 謝辞

本研究は九州大学応用力学研究所の共同利用研究として実施された.ここに記して感謝する.

# 平成25年度応用力学研究所特定研究報告 マルチカラム型波力発電浮体の性能評価および向上に関する研究

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。

著者らの研究では、これまで、タービン部をノズルに置き換えることで単純化し、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。昨年度は、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が、その実験結果は予想とは大きく異なるため、その原因究明が必要となった。そこで昨年度実験によって得られた現象の解明と2次変換を調べるための装置の開発を研究の目的とした。

2. 研究方法

昨年度の結果から得られた現象を理解するために数値解析プログラムの改良と、エネルギーの2 次変換部の性能を調べることができる装置の開発を行った。

(1) 一次変換性能を評価推定するプログラムにおいて、OWC カラム内の水面形状分布を計算できる よう改良を施し、昨年度の実験結果で得られた OWC 内水位変動計測結果と比較する。

(2) 二次変換性能、即ち、OWC によって引き起こされる空気エネルギーから、タービンの回転、発 電機を通して得られる発電性能を評価できる実験装置を設計・製作し、発電性能を評価する。

3. 研究組織

本研究は次のような組織で行った。

Table 1	研究組織
Table L	

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	九州大学大学院工学研究院海洋システム工学部門	技術職員	実験装置製作
高松直登	九州大学大学院工学部地球環境工学科	修士1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. 研究概要

0.1

о 🛱

0.8

4.1 OWC 内水面変動分布を計算できるプログラムによる数値計算結果

水面変動の分布を考慮した数値計算結果と実験との比較を示す。ノズルのみの OWC カラムでは、 波下側と波上側の水位差を計算できるようになった。しかし、タービン付きでは、現在の解析プログ ラムでは評価できていない (Fig.1)。

見かけ上有効ノズル比を小さくすることにより、圧力、変位、吸収エネルギー、一次変換効率を計算して実験結果と比較したが、タービン付きモデルの応答を数値計算で表現できなかった。(Fig.2)





(b)波下変位振幅



Fig.1 OWC 内水位変動振幅の周波数応答関数



Fig.2 ノズル比の変化が、各応答に及ぼす影響

Fig.3 は波周期 0.8sec における水面計状の計算結果である。



Fig.3 水面形状の計算結果

4.2 二次変換性能評価用試験装置の設計製作

水槽実験で様々な条件下で、二次変換を含むエネルギー変換性能評価を行うことが好ましいが、発 電機、タービンなどの最適化が実現していない現状では、二次変換性能を別途評価できる試験装置が 必要である。そこで、機械的に OWC を模擬できるピストンによる空気流発生機構を有する二次変換 性能評価用試験装置を設計製作した。(Fig.4, Photo 1)



Fig.4 二次変換性能評価用試験装置



(a) 装置全体







(c) タービン部

(d) ピストン部



(d) アクチュエータ部

Photo 1 二次変換性能評価用試験装置の各部

5. 結言

OWC 内水面変動分布形状を計算できるプログラムを開発した。しかし、タービン部の取扱いおよび二次変換性能については、まだ、計算で十分な推定を行うことができないため、今回、製作した装置を使って今後研究する予定である。

#### 海洋エネルギー総合利用ための数値解析要素技術の基礎研究

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を目指 している。洋上構造物及び発電施設の設計にあたって、数値シミュレーション支援ツールの活用は不可欠で ある。洋上構造物が複雑な幾何形状を有するため、それを精確に表現できる非構造格子が適している。一方、 構造物と空気及び海水間の力学的相互作用を計算するため、大変形が伴う移動境界の捕獲を含む多層流体を 直接計算できる数値モデルの構築が必要である。本研究は、複雑幾何形状を持つ構造物と自由界面が混在す る現象の数値シミュレーションに向けた非構造格子における自由界面多層流計算モデルの構築を目的とする。

• 研究実施状況及び結果

(1) 非構造格子における高性能流体ソルバーの開発

本研究グループでは、マルチモーメントを用いた高性能な有限体積法を提唱している。非構造格子にお

いて従来の有限体積法での計算変数である体積分平均値(volume integrated average: VIA)に加え、各メ ッシュセル頂点の点値(point values: PV)も計算変数とする。具体的には、物理量 $\phi$ に対し、メッシ ュセル $\Omega$ ,において以下のように VIA と PV を定義する。

$$\begin{cases} \overline{\phi_i}(t) = \frac{1}{|\Omega_i|} \int_{\Omega_i} \phi(x, y, z) d\Omega \\ \phi_{ij} = \phi(x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}, t), \quad j = 1, 2, \cdots J \end{cases}$$
(1)

ただし、*J*は各メッシュセルの頂点の数である。メッシュセルの形状によって自由度が変わるので、VIA及び PV による再構築は使用する格子系に従って変化する。再構築補間関数は、一般的に下記の不完全多項式によって記述される。

 $\Phi_{i}(\xi,\eta,\zeta) = \int_{j=1}^{J} \phi_{ij}\psi_{j} \quad \overline{\phi_{i}}\overline{\psi} \quad \int_{\alpha}^{\xi,\eta,\zeta} \phi_{\alpha i}\psi_{\alpha} + \sum_{\alpha}^{\xi,\eta,\zeta} \delta\phi_{\alpha^{2}i}\psi_{\alpha^{2}}$ (2)

ここで、 $\delta$ はメッシュ形状に従って0か1の値をとり、 $\psi_i, \overline{\psi}, \psi_{\alpha}, \psi_{\alpha^2}$ は基底関数である。微分値 $\phi_{\alpha i}$ と $\phi_{\alpha^2 i}$ 

は周囲セルの VIA と PV から求める。本研 究では,四面体,五面体(ピラミッド及び プリズム),六面体に対応する再構築関数を 提案し,非圧縮性流体の数値計算モデルを 開発した。

計算精度について, テーラー渦ベンチマ ーク問題における検証を行った。図1に示 すように,従来型の有限体積法に比べ,数 値誤差及び収束率が大幅に改善された。



Fig.1 The numerical errors and convergence rate in velocity (left) and pressure (right) for Taylor vortex test problem.



(c) Horizontal velocity profiles

Fig.2 The numerical solutions to a half-circular lid-driven cavity flow on unstructured grids of triangular elements (left) and quadrilateral elements (right).



Fig.3 THINC reconstructions with quadratic surface on Cartesian (left) and unstructured (right) grids.

図2には、粘性流(Re=1000)半円形キャビ ティフローの計算結果を示す。二種類の格子に おいて良好な結果が得られた。

## (2) 非構造格子の自由界面捕獲スキーム

これまで直交格子系で開発した代数型 VOF (volume of fluid)自由界面捕獲法である THINC 法を一般的な非構造格子に拡張し,上記の非構 造格子系における自由界面捕獲数値解法を開発 した。まず,セルごとに流体の体積率から多次 元の双曲線正接関数

H_i(x,y,z) = ¹/₂(1+tanh(β(P(x,y,z)+d))) を構築する。ここで, βは界面厚みを調整する パラメター, P(x,y,z)は界面の形状関数で線形 (平面)ないし二次(曲面)多項式である。未 知数d は双曲線正接関数の体積分が該当セルに おける体積率になるような制約条件によって決 定する。本手法では,界面を二次曲面で近似す ることができ,従来の VOF 法のほとんどは平面 で近似する現状に比べ,大きな前進となる。一 例として、図3に2 次曲面による THINC 再構築し



Fig.4 A deformed moving interface test by unstructured THINC scheme.

た境界面を示す。図4には、非構格子による変形

した自由界面の計算結果を表す。従来の幾何再構築による VOF 法に遜色のない精度を示している。現在は、 上述の要素解法をもとに構造物を含む非構造格子自由界面多層流数値モデルの構築及び検証をお行っている。

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2年生	2 日
研究協力者	孫紫尭	国立大学法人東京工業大学・修士2年生	2 日
研究協力者	鄧 希	国立大学法人東京工業大学・修士1年生	2 日
所内世話人	胡長洪	国立大学法人九州大学・准教授	

研究組織

#### 風レンズ風車用に開発された軽量・高強度素材の疲労強度評価

琉球大学 工学部 真壁朝敏

#### ・目的

風レンズ風車を軽量化する目的で,新川ら⁽¹⁾が開発した炭素繊維系の複合材料の疲労特性と強度について検討した. また,その複合材料の風レンズ風車への適応に際しては,分割して製作した構成部材を接合する必要がある.そのため, 本研究においては,機械加工が可能であり,締結用要素のために開発された東洋炭素(株)製のC/Cコンポジットの強 度特性との比較を行った.まず,これまでに実験結果を報告してきた,東洋炭素(株)製のC/Cコンポジット⁽²⁾につ いて検討した結果を紹介する.次に,風レンズ風車用の素材の検討結果を示す.風レンズ風車は,洋上で使用する計画が あり,軽量化と塩害による劣化の両方を考慮して材料や締結手法を基本的な面からも検討する必要がある.本報告では, 特に上記の材料の性能の優劣を評価する計画はなく,今年度の取り組みでは,開発された材料と締結用の市販材料の特性 が製造手法や使用目的等によって異なることを紹介したい.そして,今後,炭素繊維系の複合材料の締結について検討す る計画であるが,その検討の際の参考資料にしたいと思っている.

#### ・材料および実験方法

素材の一つは東洋炭素(株)製の機械加工が可能な C/C コンポジット CX-31 である. この材料はフェノール樹脂を炭 素繊維で編んだ布にしみこませ,布の方向を揃えて何枚も重ね高温圧縮し板に成形したものである. 炭素繊維の方向は互 いに直交するように編まれたものである. 他の素材は,新川ら⁽¹⁾によって開発されたものであり,一方向に揃えた炭素 繊維にエポキシをしみ込ませたものである. 前者の場合は,板材の制作にあたって,炉の中で高温圧縮成型している. そ れに対し,後者の場合は,真空中で繊維素材の間にエポキシをしみ込ませながら板材を成型したものである. それらの製 造方法等によって,強度特性や破壊特性に差異が生じる.

図1にフェノール樹脂を用いた C/C コンポジットの場合の試験片形状を示す.この場合は、スリットや穴等を有する 試験片について検討を行い、製作の過程における板厚さ(*年*3.2mm と 5.1mm)の影響について主に検討した.図2にエ ポキシを用いた炭素繊維の複合材料の場合の試験片形状を示す.この場合は、本報告の段階では破壊過程について検討し、 一方向繊維素材における破壊過程をスリット試験片の観点から検討してみた.

C/C コンポジット試験片においては、まずスリット試験を用いて、応 力振幅を徐々に増加させていく荷重漸増法(Step Load Test)と一般的 な一定応力振幅での疲労試験における疲労限度の評価に関して考察し ている.そして、両者を比較した結果にもとづき、荷重漸増法による実 験結果を整理している.

エポキシを用いた新川らが開発した複合材料においては、本報告では 破壊過程の観察を主に行った、そして、荷重漸増法による疲労強度の検 討も行った.いずれの実験においても、引張・圧縮方式の疲労試験を行 っている.応力比 *R*は主に-1 であり、周波数は 10Hz を基本とした.き 裂はマイクロスコープを用いて直接観察した.



#### ・C/C コンポジット板材について

荷重漸増法によって本研究では仮に疲労限度σwを求めた.その方法では応力を ある一定繰り返し毎増やし破断した時点の一つ前の応力を疲労限度とみなした.前 報⁽²⁾の範囲では、その手法による仮の疲労限度は複数の試験片を用いて従来の手法 で求めた 10⁷回の繰り返しで判断した疲労限度とほぼ一致した.本報告では、簡便 のために、荷重漸増法によって疲労限度σwを求めている(*R*=-1の結果を示した).

板厚によって疲労限度 σwが変化するのかどうかを検討した. その結果を図3に 示す. スリット試験片について板厚の影響を比較すると,板厚が3.2mmの場合に





∂a ↑ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓

t=10mm - 14.5mm, 2W=30mmFig.2 Geometry of epoxy base carbon composite specimen (b=3.1mm)

比べて 5.1mm の場合,  $\sigma_w$ が明らかに高くなっている. また, 3.2mm の場合には, スリットの長さが長くなると  $\sigma_w$  が低下していくが, 5.1mm の場合には,  $\sigma_w$ がほぼ一定になっている.

破壊した試験片の様相を観察した例を図4に示す.これらの破断面 は、いずれも板表面部では荷重軸にほぼ垂直で、板厚方向に傾斜して いた.その様相から平面応力形のすべりによってせん断と引張りの混 合モードで母材の中でき裂が進展したことが推察される.そして、母 材のすべり変形が炭素繊維と試験片全体の破壊モードに影響したこ とが考察された.

板厚の違いによる疲労限度の差異を考察するため 素材の断面における空洞の状況を調べた.樹脂を繊 繊維に含侵させるために, C/C コンポジットでは何 度も高圧・高温度で作業する.その含侵の積み重ね で,素材の空洞が減少していく.





図 5 は空洞の状況を調べた場合の例であり、ポイントカウン ト法で空洞の体積率 fを測定した.その結果、空洞体積率は板 厚 t が 3.1mm の場合が 32%、 t が 5.1mm の場合が 18%、 t が 10mm の場合が 6.7%であった.この結果から、板厚が疲労 限度に影響を及ぼす理由は空洞体積率の差異が起因している と考察される.

#### ・エポキシを用いた炭素繊維複合材料について

図6に荷重漸増法で測定した疲労限度 σwを示す.現在の 段階ではその値が正確かどうか検討する余地があるが,一つ の繊維束の強度は新川らが開発した素材の方が前報で使用し た C/C コンポジットより高くなっていることが期待される. この試験片ではリガメントを 1mm 幅にするために,スリットを深く 切込んでいる.図6はこのようにして強制的に疲労き裂の進展方向を 荷重軸に垂直方向に導いた場合の結果である.

図7はき裂の進展状況を観察した例である.スリットが短い場合, 炭素繊維の方向に沿って,き裂は荷重軸方向に母材と繊維間に生じるせん断力によって一方向に進展する.それに対して,スリットが長くリガ メントが狭い場合(幅1mm)にはリガメントのCrack1と繊維方向の Crack2が発生し,試験片はCrack1によって破断する.その方法は検 討する余地があるが,炭素繊維素材の強度評価手法の一つになると考え ている.



Fig.3 Effect of thickess t on fatigue limit  $\sigma_w$ 



Fig.5 Void fraction f (Left; t=3.2mm, f=32%, Right; t=5.1mm, f=18%



Fig..6 Fatigue limit (t=14.5mm, 2(W-t)=1mm)



以上の結果から素材の製作手法により炭素繊維素材の破壊特性や強 Fig.7 Examples of crack growth behavior 度が異なるので、構造物の素材として使用する場合にはそのようなことに注意する必要があると考えている.

•**文献** 省略
Int J Fract DOI 10.1007/s10704-013-9912-6

© Springer Science+Business Media Dordrecht 2013

LETTERS IN FRACTURE AND MICROMECHANICS

# INTERLAMINAR FRACTURE TESTING METHOD FOR CFRP USING TENSILE LOADING WITH ACOUSTIC EMISSION ANALYSIS

Sang-Jae Yoon

Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University Kasuga-koen 6-1, kasuga, Fukuoka 816-8580, Japan e-mail: ar-s-yoon@mms.kyushu-u.ac.jp

Dingding Chen

Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University Kasuga-koen 6-1, kasuga, Fukuoka 816-8580, Japan

Ja-Uk Gu, Nak-Sam Choi Department of Mechanical Engineering, Hanyang University Seongdong, Seoul 133-791, Korea

Kazuo Arakawa Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University Kasuga-koen 6-1, kasuga, Fukuoka 816-8580, Japan

**Abstract.** A method is described to characterize the uniformity of interlaminar fracture toughness of laminated carbon-fiber-reinforced polymer (CFRP) composites fabricated by the modified vacuum assisted resin transfer molding process. To prepare specimens for Mode I fracture toughness tests, pieces were sectioned from the inlet and vent regions of a CFRP plate ([+30/-30]₆), with a starter crack inserted. The specimens were packed between two rectangular epoxy plates to apply a load using a universal testing machine. Acoustic energy signals were monitored using two sensors attached to the epoxy plates during tensile loading. The difference between the material properties of specimens from the inlet and vent regions of the CFRP plate were statistically compared using one-way analysis of variance (ANOVA); we show that the specimens showed no statistically significant differences in the interlaminar fracture characteristics depending on the part of the mold from which they were taken.

# Keywords: Interlaminar fracture test, Laminated CFRP, VARTM process, Acoustic Emission analysis.

**1. Introduction.** Laminated composite materials are particularly prone to damage from delamination due to poor interlaminar fracture toughness. Hence, the interlaminar fracture behavior should be investigated to improve the material properties of the composite. We used the double cantilever beam (DCB) method to investigate Mode I toughness, and test procedures were standardized for the measurement of the critical strain.

Several studies of interlaminar material properties have used the DCB method to characterize the interlayer bonding strength in composite materials (Arai (2008)). However,

Published online: 21 November 2013

the DCB does not account for intraply cracking or cracks jumping between neighboring interfaces (de Morais (2010)), and a large bending moment may occur during the test. In addition, since typical specimens for the DCB test typically have a length-to-width ratio of 5:1 (ASTM D 5528-94a (1994)), these long specimens can result in excessive wastage of materials in preparing specimens and, furthermore, if acoustic emission (AE) measurements are used, the sensor should be placed some distance from the crack propagation path because, if the specimen is placed near the crack propagation path, it may be subject to a large bending moment. If the distance between the sensor and crack path is large, the signals are attenuated when they reach the sensor.

Some studies have suggested the use of a modified DCB test, and have reported interlaminar fracture testing methods that were suitable for types or shapes of materials (Chen (2001)). In this study, a DCB testing method is described for investigating the interlaminar fracture behavior of composite materials, and applied to composites fabricated using vacuum assisted resin transfer molding (VARTM). The VARTM method is a composite fabricating process where thermoset resins are injected into a mold through inlet ports, and coring materials contained in the mold are saturated with the resin by the vacuum. Hence, non-uniformities may frequently occur between the inlet and vent parts due to incomplete resin filling. To address these problems, we applied an additional treatment to VARTM process.

The purpose of this study was to apply the new interlaminar fracture testing method to investigate the mechanical uniformity of laminated CFRP composite fabricated by the modified VARTM technique. Specimens for Mode I fracture toughness tests were prepared using a single-notched CFRP composite and epoxy plate. Tensile loading was applied to the specimens, and fracture behavior was monitored by AE analysis in real time. The uniformity of the test results was statistically compared.

**2. Material and methods** *Fabrication of CFRP plate*: Laminated composite specimens with a single edge notch were fabricated using a modified VARTM process. Fig. 1a shows the transverse flow of the VARTM setup; additional treatments were used to the typical VARTM technique: a rigid covering of the mold for compaction and smoother surface was applied. Carbon fiber fabrics [SAERTEX] were laid in a one-side mold with a  $[+30/-30]_6$  sequence. Teflon film was inserted to create a starter crack in the two edges of the plate, as shown in Fig. 1b. The fabrics were sealed in a vacuum bag, and then the resin [Nagase ChemetX] was impregnated with fiber layers using a vacuum. The whole process was performed at room temperature.

*Preparation of the Mode I fracture test specimen*: Samples were sectioned from the inlet and vent parts of the CFRP plate as shown in Fig. 1c to form Mode I fracture test specimens. To make the 5-mm-long starter crack, the following procedure was used: (i) we removed a section from the edge of the CFRP plate using a diamond wheel cutter along an orthogonal

direction of the longitudinal Teflon film; (ii) we opened the starter crack in the separated plate using a razor blade, and measured the length of the Teflon film; (iii) a cutting-plane line was marked on the surface of the main CFRP plate, considering the location of the Teflon film. The pieces were packed between two rectangular epoxy plates to clamp the specimen to a universal tensile testing machine (Zwick 250, testXpert), as shown in Fig. 1c (Arakawa (2010)). The epoxy plates were attached to the CFRP piece using the same resin used for the VARTM process. The resin was carefully applied to the interface between CFRP and epoxy plate to prevent permeation into the CFRP layers. The resin was allowed to harden for 24 hours at room temperature, and the two plates were directionally aligned using two frames to prevent dislocation of the specimen shape. After the resin hardened, the frames were removed. Using the above procedure, a relatively small amount of CFRP was required, compared with the typical DCB method.



*Figure 1.* Specimen preparation procedure. (a) Schematic diagram showing the VARTM process for specimen fabrication. (b) The location of specimens taken from the CFRP plate. (c) Illustration of the specimen for Mode I fracture testing with AE monitoring.

*Tensile test & AE analysis*: All tensile specimens were characterized under displacementcontrolled conditions using the universal tensile testing machine, with a constant crosshead rate of 1 mm/min. The AE signals were monitored during tensile loading in real time. The two-channel AE detection system MSTRAS 2001 (Physical Acoustic Corp.) was used for recording the AE data from two AE sensors, S1 and S2 (Physical Acoustic Corp.), which were attached to the epoxy plate surface using vacuum grease and mechanical fixtures, and the distance between either of the two sensors and the starter crack was  $35 \pm 1$  mm (see Fig. 1c). The AE measurement used a 40-dB pre-amp, with a threshold level of 40-dB and sampling rate of 4 MHz. To determine the fracture mechanism, the fracture surface was observed using an optical microscope and a scanning electron microscope (SEM) after the test was carried out.

Statistical analysis: One-way analysis of variance (ANOVA) was used to analyze the differences between group means, and Tukey's post hoc tests (p = 0.05) were used to

Deringer

determine the statistical differences,  $K_I$ , and cumulative AE energies of specimens taken from the inlet and vent regions. Here, the null hypothesis of the one-way ANOVA was that "there is no difference between the means of variables", and the significance probability value (p-value) was the probability that the null hypothesis is true. For example, a *p*-value less than the predetermined significance level (0.05 in this study) means that the null hypothesis can be rejected with 95% confidence.

**3. Results and discussion** *Tensile fracture test and AE analysis*: Figures 2a and 2b show typical tensile load and amplitude distributions of the AE signal as function of time for the inlet and vent specimens, respectively. The specimens showed similar tensile load and AE amplitude characteristics regardless of whether the samples were from the inlet or vent regions. Table 1 lists the average cumulative energy of the AE signal for inlet and vent specimens. Here, energy is the integral of the rectified voltage over the duration of the AE signal. Although the mean value of the cumulative energy for samples from the inlet was around 13% lower than those from the vent, there was no statistically significant difference between the two groups (p = 0.158). This indicates that a similar amount of fracture energy was released during crack propagation from both sets of samples. R.J. Johnson (2003) suggested that mold filling during VARTM is the most important step in the process, and that defects often arise in a region of local low permeability, and may depend on the distance to an exit vent. However, the CFRP fabricated using VARTM in this study resulted in specimens where the material properties did not depend on the position within the mold.



*Figure 2.* Load-displacement curves and the corresponding AE behaviors for the specimens taken from (a) the inlet and (b) the vent.

Stress intensity factor: The stress intensity factor of the specimen,  $K_I$ , was obtained from

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \ F(a/W) \tag{1}$$

 $\textcircled{}{}$  Springer

where  $\sigma$  is the tensile strength, *a* is the crack length, and *W* is the width of a specimen. Expressing  $a/W = \xi$ , we can write the stress intensity factor at the crack tip as

$$F(\xi) = 1.12 - 0.231\xi + 10.55\xi^2 - 21.72\xi^3 + 30.39\xi^4 \tag{2}$$

Table 1 lists the average  $K_I$  values for the inlet and vent specimens; there was no significant difference in the stress intensity factors (p = 0.695). Since  $K_I$  is related to the crack shape, we can conclude that the compacting method used here provided a uniform resin flow, resulting in uniform material properties across the whole of the CFRP plate.

Specimen type	Cumulative energy (N)	K		
Inlet	2192(237)	31.6(7.02)		
Vent	2479(266)	31.4(2.56)		

Table 1. Mean cumulative energy and  $K_I$  for specimens from the inlet and vent regions of the CFRP plate.

Numbers in parenthesis are standard deviation.

*Fractography*: Figures 3a and 3b show typical fracture surfaces for specimens from the inlet and the vent regions, respectively. They exhibited a similar fracture surface, and rough fracture surfaces were observed after the starter crack area due to very rapid crack propagation. Resin matrix cracking, fiber-matrix debonding and fiber pull-out were observed.



Figure 3. Optical microscopy of fracture surfaces of specimens taken from (a) the inlet and (b) the vent.

#### 4. Conclusions

We have experimentally studied a new interlaminar fracture testing method for Mode I fractures. We fabricated single-notched CFRP specimens combined with the epoxy plates, which requires less material for testing than the DCB method, and allows for a shorter distance between the crack propagation path and the AE sensors. Tensile testing and AE analysis were carried out to investigate the uniformity of the mechanics of VARTM material. The results can be summarized as follows: The inlet and vent specimens showed similar load-displacement curves and AE analytic characteristics, and there were no significant differences in the cumulative AE energy (p = 0.158) or in  $K_I$  (p = 0.948). The inlet and vent specimens exhibited similar fracture surfaces, and three typical phenomena were observed: resin cracking, fiber-matrix debonding and fiber-pull out.

### 5. Acknowledgments

This work was partly supported by a research grant from the Japan Society for Promotion of Science (#23656605), and by the Collaborative Research Program of Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University.

#### References

- Arai, M. (2008). Mode I and mode II interlaminar fracture toughness of CFRP laminates toughened by carbon nanofiber interlayer. Composite Science Technology, 68, 516-25.
- de, Morais, A.B. (2010). Double cantilever beam testing of multidirectional laminates. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **34**, 1135-1142.
- ASTM D 5528 94a (1994). Standard test method for mode I interlaminar fracture toughness of unidirectional fiberreinforced polymer matrix composites.
- Chen, L., Ifju, P.G., Sankar, B.V. (2001). A Novel Double Cantilever Beam Test for Stitched Composite Laminates. *Journal of Composite Materials*, **35**, 1137-1149.
- Arakawa, K., Kato, M., Mada, T. (2010). Tensile fracture testing and energy evaluation of a light-cured composite resin. *Polymer Testing*, 29, 1-6.
- Johnson, R., Pitchumani, R. (2003). Enhancement of flow in VARTM using localized induction heating. *Composite Science Technology*, **63**, 2201-2215.

# 直交積層カーボン/エポキシ複合材の 板厚方向の衝撃圧縮特性

岡山理科大学 〇中井 賢治,横山 隆 九州大学 陳 丁丁,新川 和夫

High Strain-Rate Compressive Characteristics of Cross-ply Carbon/Epoxy Laminated Composites in Through-Thickness Direction

Kenji NAKAI^{*}, Takashi YOKOYAMA^{*}, Dingding CHEN^{**} and Kazuo ARAKAWA^{***}

Abstract: The effect of strain rate up to nearly  $\dot{\varepsilon} = 10^3$ /s on the compressive stress-strain properties of a cross-ply carbon/epoxy laminated composite in the through-thickness direction is investigated. Small solid cylindrical specimens are machined such that the direction of the compression loading was perpendicular to the fiber direction of the laminates. The high strain-rate compressive stress-strain curves are determined using the standard split Hopkinson pressure bar (SHPB). The low and intermediate strain-rate compressive stress-strain relations are measured on an Instron 5500R testing machine. It is shown that the ultimate compressive strength and absorbed energy up to failure increase significantly, while the ultimate compressive strain decrease slightly with increasing strain rate.

Keywords: Compressive properties, Cross-ply carbon/epoxy laminated composites, Hopkinson bar, Strain rate, Through-thickness impact loading

# 1. 緒 言

複合材料は、金属材料と比較して比強度、比剛性が高いだけでなく、疲労寿命や耐食性・耐摩耗 性にも優れているため、航空機体、自動車部品、各種スポーツ用具などの分野で広範に使用されて いる.これらの複合材構造物は稼働(使用)中に衝撃荷重を受ける場合が多いため、設計上複合材 の衝撃特性データが不可欠である.種々の積層複合材(一方向強化材、直交積層材、織物強化材な ど)の衝撃荷重下における積層面内の圧縮、引張り、せん断特性などが主としてホプキンソン棒法 ^[1]により測定されてきた.本分野における近年の研究展望、講座、文献調査例については、著者の 1人による解説^[2]に詳しく述べられている.板厚方向の衝撃圧縮特性については、面内方向のそれ に比べて少数^{3,4}を除いてあまり研究されていない.

本研究の目的は、真空樹脂含浸製造法(以下, VaRTM 法と略す)により成形した直交積層カーボ ン/エポキシ複合材の板厚方向の衝撃圧縮応カーひずみ特性を評価することである.まず、標準的 な圧縮型ホプキンソン棒装置を用いて、直交積層カーボン/エポキシ複合材から板厚方向に切出し た薄い円柱状試験片について、高ひずみ速度での破壊までの圧縮応カーひずみ関係を測定した.こ の圧縮応カーひずみ関係から、極限圧縮強度、極限圧縮ひずみ、極限圧縮ひずみ値までの吸収エネ ルギを決定した.次に、インストロン試験機により低・中ひずみ速度での圧縮応カーひずみ関係を 測定した.両試験結果の比較に基づき、直交積層カーボン/エポキシ複合材の圧縮特性に及ぼすひ ずみ速度の影響を詳細に調べた.さらに、VaRTM 成形法とオートクレーブ法により成形した直交積

^{*} Department of Mechanical Engineering, Okayama University of Science, Okayama

^{**} Interdisciplinary Graduate School of Engineering Science, Kyushu University, Fukuoka

^{****} Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Fukuoka

層カーボン/エポキシ複合材の両圧縮特性値を比較することにより、圧縮特性に及ぼす成形条件の 影響を調べた.

#### 2. 積層板と圧縮試験片の形状寸法

供試材として、VaRTM 法により成形された厚さ約 3.5 mm (12 プライ)の直交対称積層 ( $[0/90/0/90/90]_s$ )カーボン/エポキシ複合材を使用した.この積層複合材の強化繊維材およびマ トリックス樹脂の種類、繊維体積含有率を、Table 1 に示す.機械加工により、積層複合材の板厚方 向に沿って円柱状圧縮試験片を採取した.円柱状試験片の適正な細長比(厚さh/直径d)の制約上、 以下のように形状寸法を決定した.静的圧縮試験片形状について、ASTM E9-89a^[5]規格では細長比h/ $d=1.5\sim2.0$ が推奨されている.本積層複合材の板厚( $\Rightarrow3.5$  mm)が薄いため、この細長比を満足 するように直径を小さく機械加工することは困難である.そのため、やむを得ず試験片を接着剤に より3枚重ねて、細長比h/d=1.3となるように、直径の寸法(d=8 mm)を決定した.一方、衝 撃圧縮試験片形状については、圧縮型ホプキンソン棒試験における適正な試験片細長比の範囲(0.5  $\leq h/d \leq 1.0$ )^[6]に入るように、直径の寸法(d=8 mm)を決定した.

Table 1 Types of reinforcing fiber and matrix resin used in cross-ply carbon/epoxy laminated composite

	Cross-ply carbon/epoxy laminated composite
Fiber	HTS40 F13 12K (Toho Tenax)
Matrix	Epoxy XNR/H 6815
Fiber volume ratio $V_{\rm f}$	0.56

### 3. 試験方法と手順

#### 3・1 静的圧縮試験

インストロン試験機(モデル 5500R)を用いて、室温にて静的・中間ひずみ速度で圧縮試験を行なった.静的試験片を試験機の上下圧縮治具間に挟み、一定クロスヘッド速度1,50 mm/min で試験 片が破壊するまで圧縮負荷を行なった.圧縮治具部等の弾性変形のためにクロスヘッドの移動変位 からは試験片の正確な圧縮変位が計測できないため、伸び計を使用した.試験片の両端面と上下圧 縮治具間での摩擦拘束による樽形変形の影響を極力少なくするために、固体潤滑剤工業用ワセリン を試験片の両端面に塗布した.

#### 3・2 ホプキンソン棒法による衝撃圧縮試験

衝撃試験に使用した圧縮型ホプキンソン棒装置の概略図を、Fig. 1 に示す.本装置は、主として 入出力棒 (JIS SUJ2,直径 16 mm,長さ 1500 mm)と打出し棒 (JIS SK5,直径 15.9 mm,長さ 350 mm) から構成されている.打出し棒の速度測定装置を含む測定系は省略している.Fig.1 に示すように、 衝撃試験片を入力棒と出力棒の間に挟み込んで取り付ける.試験片の両端面には摩擦の影響を軽減 するために、固体潤滑剤(工業用ワセリン)を塗布している.試験手順の詳細は、著者の文献⁴¹を 参照されたい.入出力棒上のひずみゲージにより測定した入射、反射、透過ひずみパルス( $\varepsilon_i$ , $\varepsilon_r$ ,  $\varepsilon_i$ )から一次元弾性波伝ば理論に基づいて、試験片の公称ひずみ $\varepsilon(t)$ 、公称ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}(t)$ 、公称 応力 $\sigma(t)$ は、次式から決定できる^[7].

$$\varepsilon(t) = \frac{u_1(t) - u_2(t)}{h} = \frac{2c_o}{h} \int_0^t \left\{ \varepsilon_i(t') - \varepsilon_i(t') \right\} \mathrm{d}t' \tag{1}$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{\dot{u}_1(t) - \dot{u}_2(t)}{h} = \frac{2c_o}{h} \left\{ \varepsilon_i(t) - \varepsilon_i(t) \right\}$$
⁽²⁾

$$\sigma(t) = \frac{P_2(t)}{A_s} = \frac{AE}{A_s} \varepsilon_t(t)$$
(3)

ただし、試験片内の動的応力のつり合い条件( $\sigma_i(t) = \sigma_2(t)$ ; t:時間)を仮定している.ここで、P と u はそれぞれ入出力棒の端面(入力棒の右端面を 1、出力棒の左端面を 2 の下添字で表す)に作 用する衝撃圧縮荷重と対応する軸変位を表す.  $A, E, c_o$ はそれぞれ入出力棒の断面積、ヤング率、縦 ひずみパルスの伝ば速度 (= 5193 m/s)である.  $h, A_s$ は、それぞれ試験片の変形前の長さ( $\Rightarrow$  3.5 mm) と断面積である.



Fig. 1 Schematic diagram of standard split Hopkinson pressure bar apparatus

#### 4. 試験結果および考察

ホプキンソン棒法による衝撃圧縮試験から得られた入出力棒上のひずみゲージ出力の代表的なオ シロスコープ記録例を, Fig.2 に示す. この上部トレースが入力棒上のひずみゲージ No.1 からの出 力波形を、下部トレースが出力棒上のひずみゲージ No. 2 からの出力波形を示している. 各トレー スの基準時間軸より下(上)向きの出力が、圧縮(引張り)ひずみに対応している. このひずみパ ルスから試験片の両端面に作用する圧縮応力の時間的変化を求めると、Fig. 3 のようになる. この 図より両応力はよく一致していて、試験片内の動的応力のつり合い条件の仮定が成立することが証 明された. Fig. 2の入射ひずみパルス &, 透過ひずみパルス & Eqs. (1)~(3) に代入し,時間 t を消 去して決定した衝撃圧縮応力--ひずみ速度--ひずみ関係を, Fig. 4 に示す. この関係から, 変形中 の試験片内のひずみ速度は一定ではなく、最大圧縮応力 ( $\alpha_c = 562 \text{ MPa}$ ) で試験片が圧壊し始める と急激に変形抵抗が小さくなり、ひずみ速度が急速に上昇に転ずることがわかる.  $\epsilon=0$  から極限圧 縮ひずみ& (=圧壊ひずみ0.072) に至るまでのひずみ速度を数値積分し,その値を& で除して平均 ひずみ速度を求めると、 ÷ =790/s となった.以下に示す衝撃圧縮応力--ひずみ関係において表示し たひずみ速度は、全てこのようにして算出した極限圧縮ひずみまでの平均ひずみ速度を示している。 静的および衝撃圧縮応力--ひずみ関係を, Fig. 5 に示す. 実線が衝撃試験, 一点鎖線が中ひずみ速 度試験,破線が低ひずみ速度試験の結果を示している.この図より,ひずみ速度の上昇と共に極限 圧縮強度とそれに対応するひずみは増加していることがわかる.ひずみ速度が圧縮特性に及ぼす影 響を調べるために、極限圧縮強度の、極限圧縮ひずみの、極限圧縮ひずみまでの吸収エネルギ Uc を破壊時のひずみ速度( $\dot{\epsilon}_{f} = \epsilon_{c} / t_{f}$ ;  $t_{f}$ は圧壊開始時刻)に対してプロットした結果を, Fig. 6~8 に示す. これらの図より, 極限圧縮強度, 極限圧縮ひずみまでの吸収エネルギは, 破壊時のひずみ 速度が上昇するにつれて増加していることがわかる. これは、母材であるエポキシ樹脂に固有の粘 弾性特性によるものである.



Fig. 2 Oscilloscope traces from SHPB test on cross-ply carbon/epoxy laminated composite ( $V_{\rm S} = 8.1$  m/s)



Fig. 3 Axial compressive stress histories at front and back ends of specimen



Fig. 4 Dynamic compressive stress-strain and strain rate-strain relations for cross-ply carbon/epoxy laminated composite in through-thickness direction



Fig. 5 Through-thickness compressive stress-strain curves for cross-ply carbon/epoxy laminated composite at three different strain rates



Fig. 6 Effect of strain rate at failure on ultimate compressive strength for cross-ply carbon/epoxy laminated composite in through-thickness direction



Fig. 7 Effect of strain rate at failure on ultimate compressive strain for cross-ply carbon/epoxy laminated composite in through-thickness direction



Fig. 8 Effect of strain rate at failure on absorbed energy for cross-ply carbon/epoxy laminated composite in through-thickness direction

# 5. 結 言

直交積層カーボン/エポキシ複合材の板厚方向の低・高ひずみ速度(*ε*≒10³~10³/s)での圧縮応 カーひずみ特性を,標準型ホプキンソン棒法及びインストロン試験機を使用して評価した. 圧縮特 性に及ぼすひずみ速度の影響について調べた結果,ひずみ速度が上昇するにつれて,極限圧縮強度 及び極限圧縮ひずみまでの吸収エネルギは増加するが,極限圧縮ひずみはわずかに減少する.

# 謝 辞

本研究は、九州大学応用力学研究所の共同利用研究として行われた.ここに記して、感謝の意を 表する.

# 参考文献

[1] H. Kolsky: Proceedings of the Physical Society, B62 (1949), 676-700.

[2] T. Yokoyama: Journal of the Japanese Society for Experimental Mechanics, 6 (2006), 105-114.

[3] M.V. Hosur, J. Alexander, U.K. Vaidya and S. Jeelani: Composite Structures, 52 (2001), 405-417.

[4] T. Yokoyama: Journal of the Society of Materials Science, Japan, 53 (2004), 272-277.

[5] ASTM E9-89a: *Annual Book of ASTM Standards*, Vol.03.01, American Society for Testing and Materials, Philadelphia (1995), 98-105.

[6] GT. Gray III: *ASM Handbook, Vol.8, Mechanical Testing and Evaluation*, ASM International, Materials Park, OH (2000), 462-476.

[7] U.S. Lindholm: Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 12 (1964), 317-335.

# SiC 結晶表面上でのグラフェン成長過程の分子動力学シミュレーション

三重大学大学院工学研究科 河村貴宏

#### 研究背景・目的

グラフェン(graphene)は蜂の巣のような六員環構造を持つ炭素で構成されたシート状の 物質である. グラフェンの電子状態は質量ゼロの相対論的粒子の分散の形をとっており, 欠陥がなければ最大で 200,000 cm²/Vs を超える極めて高い電子移動度を持つ[1]. さらに ,炭素材料であるため高融点・高熱伝導率を有していることから,次世代半導体材料とし て期待されている. 高品質かつ大面積なグラフェンを作製する手法として SiC 表面分解法 が注目されている. この方法では,SiC 結晶を真空中または不活性ガス中で加熱すること により Si 原子のみが選択的に昇華し,残存した C 原子が自己組織的にグラフェンを形成 する. しかしながら,グラフェン中の欠陥や SiC 基板との界面の状態の制御が難しく,グ ラフェンの理想的な電子移動度は得られていない[2]. そのため,高品質グラフェンの作製 にはその成長機構を理解する必要がある. そこで本研究では,古典分子動力学法を用いて SiC 表面分解法によるグラフェン成長シミュレーションを行い,成長過程の原子スケール での観察を行った.

#### 計算方法

図1に計算モデルを示す. 基板はSi原子と C原子それぞれ1632個からなる6H-SiC完全 結晶とした. セルの大きさは,52.37 × 42.69 × 35.0 Å³の直方体とし,基板上部の空間は真 空とした.a軸[11-20]方向および m軸[1-100] 方向を周期境界とし,基板の最下層バイレイ ヤー中のSi原子およびC原子は固定した.基 板表面は清浄表面であり,(0001)面はSi原子 終端,(000-1)面はC原子終端である.



図1 計算モデル

計算方法として, 基板表面からバイレイヤー3 層の Si 原子を強制的に除外していくこと で表面分解法を再現した. Si 原子除外後に結晶表面に残った C 原子がグラフェンを形成す ることになる. ポテンシャル関数には Brenner ポテンシャル[3,4]を用いた. C-C 原子間 には炭化水素分子の計算が可能なパラメータ(potential II)を使用し, Si-Si および Si-C 原 子間には 3C-SiC 結晶の計算が可能なパラメータを使用した[5]. 数値解法には Gear 法を 用い,時間刻みは 0.1 fs とした. また, Nosé-Hoover 法を用いてアニーリング温度を 1500 K から 3000 K まで温度制御を行った.

#### 結果及び考察

図2にSiCバイレイヤー3層のSi原子を取り除いた後に6H-SiC(0001)基板上に形成さ れたグラフェンを示す.安定構造である六員環と準安定構造である五員環,七員環の形成 が確認された.アニーリング温度が低温の場合は,C原子の拡散が十分行われなかったた め3次元アモルファスカーボンを形成した.アニーリング温度が高温の場合は,グラフェ ン被覆率が高く,結晶性が良くなった.このため,余剰C原子のグラフェン化には表面拡 散のために十分な熱エネルギーが必要であることが示唆された.また,C面はSi面よりも 不安定であるため,グラフェン成長にはSi面の方が適していることが示された(結果は未 表示).C原子クラスターの周囲がグラフェンやSiCステップなどで拘束されていた場合は, C原子の拡散が抑制され構造緩和が進まず,C原子が一様に分散しなかった.そのため, C原子が不足する場合はボイドを形成し,逆に過剰な場合は3次元的なアモルファスカー ボンを形成する様子が見られた.



図2 グラフェン成長シミュレーションの結果(2500 K)

#### 参考文献

- [1] S. V. Morozov, K. S. Novoselov, M. I. Katsnelson, F. Schedin, D. C. Elias, J. A. Jaszczak, A.
- K. Geim, Phys. Rev. Lett. 100 (2008) 016602.
- [2] K. V. Emtsev et al., Nat. Mater. 8 (2009) 203.
- [3] D. W. Brenner, Phys. Rev. B 42 (1990) 9458.
- [4] D. W. Brenner, Phys. Rev. B 46 (1992) 1948.
- [5] F. Gao, W. J. Weber, Nucl. Instr. and Meth. B 191 (2002) 504.

#### 研究成果報告

 "SiC表面分解法によるグラフェン成長の分子動力学シミュレーション",井口綾佑, 河村貴宏,鈴木泰之,井上仁人,寒川義裕,柿本浩一,第74回応用物理学会秋季学術 講演会,2013.9.,同志社大学,京都府.

#### 平成 25 年度 九州大学応用力学研究所共同研究 研究報告書 25ME-5

研究実施者 鹿児島高専 機械工学科 小田原 悟 所内世話人 九州大学応用力学研究所 烏谷 隆

題目:風レンズ風車の負荷制御の最適化と集風構造体の振動との関係に関する研究

#### 研究目的:

3kW 風レンズ風車の負荷制御の最適化と構造体の振動との関係について計測実験および解析の両面 からの解明を目指す.風レンズ風車の発電効率の向上は重要な課題である.低風速低回転域では発電機 の負荷を小さくしてローターの回転を促して慣性力を生み出すことが求められる.高回転域になると 徐々に負荷を大きくして高い発電量が得られるように自動制御する.ところが,負荷制御の応答速度に よっては発電機や風車本体に著しい振動を生じさせることがある.この振動は騒音や翼・集風構造体支 持部の疲労破損を招く恐れがある.そこで,機器の振動を抑制しなおかつ高い発電量を得られるよう最 適な応答速度で制御できるような負荷制御システムの構築を目指す.

#### 研究の具体的方法:

3kW 風レンズ風車を風洞に固定し集風体の振動挙動と負荷の応答性との関係を得るために各種計測 機器を利用して実験を行う.風速の変動に伴う振動挙動は加速度センサーおよびレーザー変位センサー を用いて計測する.一方,PID 制御回路のプログラム変更を随時行い,負荷応答速度を調整して最も風 車の振動が小さくなる条件を見出す.制御パラメータとしては比例ゲイン *K*_p,積分時間 *T*_l,微分時間 *T*_D を微調整して機器に適合した方法を探る.ジーグラ・ニコルスの方法ではステップ応答における行き過 ぎ量が 25%になるようにパラメータを定めている.風レンズ風車 3kW においてもこの方法が適用出来 るかどうかを検証する.

#### 進捗状況

平成24年度補正予算により鹿児島高専の校内に再生可能エネルギー発電設備として3kWレンズ風車が導入 された.本年度はこの機器の制御システムの構築が主な研究活動であった.したがって、本年度は上記計画 に示すような風洞を用いた実験を実施しなかった.そこで、制御工学の基本である PID 制御の基礎研究につ いて簡単な機構を用いて予備的実験の準備を実施した.サーボ機構を PIC で制御する実験キットを用いてス ロッシングの液面揺動の抑制の実験的研究に向けた準備を行った.

なお,九州大学応用力学研究所の大型境界層風洞実験設備を用いた 3kW レンズ風車の振動応答に関する実験的研究は平成 26 年度共同研究として継続して実施する.すでに,共同研究の申請書を当局に提出済みである.

# 25 ME-6

#### 非一様力学場を用いた機械的伸縮刺激による幹細胞の機能発現と力学量の相関性の解明

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機能の調整に重要な役割を果たし得ることが近年明らかになっている。特に繰り返し伸縮は、細胞を特定の向きに整列させる作用や、特定の伸展率・伸縮時間において幹細胞を筋、腱、あるいは骨系列の細胞へと分化させる作用をもつことが報告されている^{(1),(2)}. そのため、伸縮をはじめとする力学的刺激が細胞に与える影響を調べることで、細胞の機能解明や再生医療への応用に貢献することが期待される. 力学的刺激による細胞のバイオメカニクスや分化に関する研究は数多く行われているが、無数の条件を一つ一つ評価するにとどまっており、力学的刺激と細胞応答の定量的かつ系統的な関係性の評価は未だ十分に行われていない. そこで本研究では、低伸展から高伸展までの連続的ひずみ分布をもつ伸縮場を細胞に負荷することで、一つの実験環境下において無数の伸展率における細胞応答を調べた. そして伸展率の違いが幹細胞に与える影響を、配列変化の観点から定量的に検討した.

#### 2. 実験方法

#### 2. 1. 伸縮実験

フィブロネクチンをコーティングしたシリコン容器底面(32×32 mm²)にヒト骨髄由来間葉系幹細胞を接着させ、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容器を引張り、細胞に繰り返し伸縮刺激を負荷した.伸 展装置は、温度37°C、CO2濃度5%に設定したインキュベータ内で作動させた.このとき、シリコン容器の下端のみを伸展装置 に固定し、容器が台形状に変形させることで低伸展率から高伸展率に連続的に変化するひずみ勾配を実現した.一方でシリコン 容器の四隅を固定し、領域全体を伸展率5%、10%で一様に伸縮したものをポジティブコントロールとして比較した.また伸縮 を与えず培養した細胞をネガティブコントロールとした.伸縮時間は、ひずみ勾配を有した伸縮が3,6,12,18,24,48 h、コント ロール群が24,48 hとし、伸縮周波数は1Hzとした(Table 1).各条件とも、5回ずつ実験を行った.

#### 2.2.デジタル画像相関法による伸展率の測定

シリコン容器底面における正確な伸展率はデジタル画像相関法を用いて解析した.その結果を Fig. 1 に示す.容器中央部が伸展率 1.89~15.8% で滑らかに変化するため,容器中央部を解析範囲とした.さらに,容器側壁部のエッジの影響を排除するため,容器側面から 2 mm の部分は解析領域から除外し, Fig. 1 の白破線内 (28 × 5 mm², 2~15%) を解析領域 (ROI) として観察した.

#### 2. 3. 配列角解析

伸縮後の解析範囲内の細胞を,位相差顕微鏡により観察し,細胞の配列角を画像処理により解析した.ImageJ (NIH)を用い て撮像した細胞を楕円近似し,楕円の長軸を定めた.そして,伸縮方向と細胞の長軸のなす角を配列角んとした.その後,Fig.1 で求めたひずみ量と細胞の位置を照合し,細胞の受けた伸展率と配列角を各細胞で対応させた.さらに,伸展率 2~15%におい て,0.5%ごとに細胞分布を正規化し,その配列角分布を調べた.また,ポジティブコントロール,ネガティブコントロールにつ いて同様に配列角を求め,正規化した.

#### 3. 結果および考察

配列角および伸展率に対する細胞の頻度を表した 3D ヒストグラムを Fig. 2 に示す. ここでは例として,伸縮時間 0,24,48 h の三つの結果 を示す. 横軸が配列角,縦軸が容器の伸展率であり,色相変化が伸展率 0.5%ごとに正規化した細胞の頻度に対応する. Fig. 2(a)は伸縮時間 0 h,すなわち無伸縮の状態を示す. したがって,当初,細胞頻度は一様に分布すると考えられた. しかしながら,結果を見ると,若干の分布 が現れている. この分布が,細胞固有のばらつきであり,その標準偏差は±2.1%であった.

Fig. 2(b), (c)の結果から示されるように, 24, 48 h ともに, 伸展率約 5%以下では細胞頻度の分布に特徴が見られず, 配向が生じなかった. それ以上の伸展率では, 60°~70°をピークとして細胞が配向したことを示している. 特に高伸展になるにつれ, そ

Table 1	Experimental conditions.			
	Stretch ratio	Duration	Frequency	
	(%)	(h)	(Hz)	
Non-nuiform stretch A	2.15	24	1	
Non-nuiform stretch B	2-15	48	1	
Uniform stretch A	5	24	1	
Uniform stretch B	5	48	1	
Uniform stretch C	10	24	1	
Uniform stretch D	10	48	1	



Fig. 1 The maximum normal strain distribution of the substrate in the *x*-direction calculated by DIC method.

のピーク値が高くなった.一方,24,48hを比較すると, 48hの方がよりピーク値が高く,伸縮が進むにつれて高伸 展の細胞の配列が顕著化していく様子が確認できた.特に 伸展率 10%以上では 60°~70°におけるピークが高くなっ ていることと、細胞がほぼ存在しない領域(紫色の領域) が広がっていることがわかる.このように、高伸展を受け るものほど細胞が特定の角度に配列し,低伸展では配列挙 動を示さない理由として、許容限界軸ひずみの影響⁽³⁾によ るものと考えられる.ここで、Wang らの理論式(4)を使用 し、本研究における許容限界軸ひずみEa limit を求めた. そ の際, 3D ヒストグラムにおいて細胞頻度が 0%となる頻度 曲線が必要になるが、上述のように細胞固有のばらつきを 考慮して,標準偏差の2.1%とした(Fig. 2(c)の破線).細 胞頻度 2.1%に, Wang らの理論式を用い, 最小二乗法によ り近似曲線を引いた. そのときの $\varepsilon_{a \ limit}$ の値が, 5.1%であ った. Neidlinger-Wilke らは、我々と異なる実験手法によ り各種細胞の $\varepsilon_{a \ limit}$ について検討している. その値は, 6.4% (骨芽細胞),4.2%(線維芽細胞)である.本研究で得ら れた値は、上記の値と非常に近い値となっており、本実験 および考察の妥当性を示している. ただし, Neidlinger-Wilke らの行った実験に比べて、本実験手法は 簡便で、かつ得られる $\varepsilon_{a \ limit}$ は高精度で信頼性が高いこと は特記に値する.



(c)

Fig. 2 3D histogram of mean of the normalized cell frequency with respect to the alignment angle of each cell and the normal strain of the substrate. (a) Stretching for 0 h; (b) stretching for 24 h; (c) stretching for 48 h.

最後に、ひずみ勾配自体が細胞へ与える影響を検討する. すなわち、一様伸縮における結果と比較して、妥当な結果

が得られているかを確認した.グラフは省略するが、いずれの実験手法においても、同一の伸展率では同様の傾向が全結果で確認できた.これは、本実験手法がひずみ勾配の影響はなく、あらゆる伸展率における細胞の影響を調べることが可能であり、ひずみ勾配をもつ伸縮による解析の妥当性を示している.

#### 4. まとめ

間葉系幹細胞に、約2~15%の間で連続的にひずみが変化する伸縮刺激を負荷した.そしてひずみ量の違いが幹細胞に与える影響を、細胞の配列の観点から検討した.その結果、特定の伸展率において、細胞の配向に対して明確な違いが現れることが分かった.本結果を用いて、許容限界軸ひずみを精度良く求め、5.1%であることを明らかにした.また、ひずみ勾配を有する伸縮での各伸展率における細胞の応答は、一様な伸展率の実験結果と整合性のとれるものであった.

#### 参考文献

- (1) Zhang, L., Kahn, CJF., Chen, HQ., Tran, N., and Wang, X.: Effect of uniaxial stretching on rat bone mesenchymal stem cell: Orientation and expressions of collagen types I and III and tenascin-C, Cell Biol. Int., 32-3 (2008), 344-352.
- (2) Chen, YJ., Huang, CH., Lee, IC., Lee, YT., Chen, MH., and Young TH.: Effects of cyclic mechanical stretching on the mRNA expression of tendon/ligament-related and osteoblast-specific genes in human mesenchymal stem cells, Connect. Tissue Res., 49-1 (2008), 7-14.
- (3) Neidlinger-Wilke, C., Grood, ES., Wang, JHC., Brand, RA., and Claes, L.: Cell alignment is induced by cyclic changes in cell length: studies of cells grown in cyclically stretched substrates, J. Orthop. Res., 19-2 (2001), 286-293.
- (4) Wang, HC., Ip, W., Boissy, R., and Grood, ES.: Cell orientation response to cyclically deformed substrates: Experimental validation of a cell model, J. Biomech., 28-12 (1995), 1543-1552.

#### 研究成果

Y. Morita, S. Watanabe, Y. Ju and S. Yamamoto, "In vitro experimental study for the determination of cellular axial strain threshold and preferential axial strain from cell orientation behavior in a non-uniform deformation field," Cell Biochemistry and Biophysics, Vol.67, No.3, 1249-1259, (2013).

#### 研究組織

研究代表者	森田康之	(名古屋大学・工学研究科)
研究協力者	山本周平	(名古屋大学・工学研究科)
所内世話人	東藤貢	(九州大学・応用力学研究所)

# 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

近年、四元系材料である Cu₂ZnSnS₄ (CZTS)、Cu₂ZnSnSe₄ (CZTSe)、混晶である Cu₂ZnSn(S, Se)₄ (CZTSSe)は、構成元素が地殻中に豊富にあり、S/Se 比をコントロー ルする事でバンドギャップも 0.9~1.5 eV と制御できるため、現在高い変換効率 20.3 %¹⁾を達成している Cu(In, Ga)Se₂ (CIGS)の低毒素、低コスト新規代替材料として 注目を集めている。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 CZTS、CZTSe、CZTSSe 化合物が注目を浴び、5 年程度の短い期間で 着実に研究報告が増加している。例を挙げると、ヒドラジン溶液を用いた非真空プ ロセスで CZTSSe 薄膜太陽電池において 11.1 %の変換効率が報告されている²⁾。Shin 等は、真空プロセスを用いた蒸着法によって CZTS 太陽電池において変換効率 8.4% を達成している³⁾。Repins 等も同様に蒸着法を用いることで CZTSe 太陽電池におい て 9.2 %の変換効率を達成している⁴⁾。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⁵⁾。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上昇へ繋げることを目的とする。

#### 2. 実験方法

CZTS-Sn 擬二元系状態図は、目視法を用いて液相線の確認を行った。相の同定は、 各 mol 濃度における液相点から急冷後、粉末 X 線回折(XRD)、電子線プローブマイ クロ分析(EPMA)により解析を行った。全ての CZTS 単結晶は、THM 法を用いて 作製した。Feed となる CZTS 多結晶は、Cu (5N)、Zn (6N)、Sn (6N)、S (5N)のショッ ト原料を用いてカーボンコートした石英アンプルに 10⁻⁶ Torr の条件下で真空封入後、 1100°C で融液成長した。XRD と Raman 分光法から相評価、背面ラウエ回折と X 線 ロッキングカーブ(XRC)測定から単結晶の結晶性評価を行った。ホール効果温度変化 測定は、測定温度 20~300 K、磁場 0.55T の条件下で Van der Pauw 法を用いて行われ た。サンプルサイズは、5 mm×5mm×0.5 mm とし、表面は粗さ 0.01 µm の Al₂O₃粉末 で研磨した。直径 1 mm、厚さ 200 nm の Au 電極をサンプルの四角に真空蒸着法を 用いて作製した。Au 電極はオーミック特性を示し、各電極間の抵抗値は磁場と電流 を反転させ均一であることを確認している。



Fig. 1 CZTS-Sn 擬二元系状態図

1 2 3 4

Fig. 2 CZTS 単結晶インゴット

Fig. 3 (112) 面背面ラウエ回折

# 3. 結果と考察

CZTS-Sn 擬二元系状態図を Fig. 1 に示す。mol 濃度 X は式(1)を用いて算出した。

 $X[\text{mol}\%] = \frac{\text{CZTS}[\text{mol}]}{\text{CZTS}[\text{mol}] + \text{Sn}[\text{mol}]} \times 100 \qquad (1)$ 

CZTS が 30 mol%以下の Sn 溶液においては CZTS 相と二液相に相分離し、30~60 mol%の溶液においては SnS_x相と CZTS 相に相分離した。60 mol%以上においては単純に CZTS が Sn に溶け相分離は見られなかった。結果として、60 mol%以上の Sn 溶液, 成長温度 780~980°C において CZTS 単結晶成長が可能であることを突き止めた。 CZTS において 60 mol%以下の Sn 溶液において相分離をし、Sn 相と SnS 相は CZTS や CZTSe よりも比重が大きいため底部に溜まり結晶成長の妨げになる。70 mol%溶液, 成長温度 900°C において CZTS 単結晶が得られ最適な結晶成長条件とした。 CZTS 単結晶インゴットを Fig. 2 に示す。背面ラウエ回折の結果を Fig. 3 に示す。正 方晶の(112)面における 3 軸対称を確認した。

CZTS 単結晶の粉末 XRD パターンを Fig. 4 に示す。(112)面 = 28.53°、(220)面 = 47.33°、(312)面 = 56.18°で主要なピークを観察でき、ICDD パターン(00-026-0575)と 一致した。各ピークから算出した格子定数は、a 軸 = 5.455 Å、c 軸 = 10.880 Å であ り、これは報告されている a 軸 = 5.430 Å、c 軸 = 10.850 Å と良い一致を示した⁵⁾。 Figure 5 に CZTS 単結晶の Raman スペクトルを示す。異相 (ZnS) のピークと CZTS ピークはほとんど位置が同じため Raman 測定を行った。287、338、371 cm⁻¹ にピー クを観察し、これは文献と一致している⁹。Cu-S 化合物、Zn-S 化合物、Sn-S 化合物 のピークは観察されなかった。したがって、XRD と Raman 分光測定から CZTS 単相 単結晶が得られていると判断した。Figure 6 に(112)面 XRC 測定結果を示す。全半値 幅は、125 arcsec でありこれは、CIGS 単結晶の値 100~200 arcsec と同等の値であり 結晶性の良さを示した。CZTS 単結晶の EPMA 組成分析は、結晶成長方向に沿って 先端から 5 mm 間隔でウエハー状にカットし、測定を行った。インゴット全体にわ たり組成は均一であったがわずかに Cu-poor、Zn-rich 組成である(Fig. 7)。



Fig. 8 に CZTS 単結晶の伝導率温度変化を示す。低温 100 K を基準にして、2 つの 異なる傾きの領域を観察したことから 2 つの伝導プロセスが起因していると考え、 式(2)に示すように欠陥準位間のホッピング伝導と一般的なアレニウスプロットで表 現出来るバンド伝導を導入した。

$$\sigma(T) = \sigma_H exp\left(\left(-\frac{T_0}{T}\right)^{\frac{1}{4}}\right) + \sigma_B exp\left(-\frac{E_A}{k_b T}\right) \quad (2)$$

 $\sigma_H$ 、 $\sigma_B$ はプレファクター、 $T_0$ は、Mott characteristic 温度、 $E_A$ は熱活性化伝導プロセスに関連する活性化エネルギー、 $k_b$ はボルツマン定数である。式(1)の第一項は、欠陥中の Mott バリヤブルレンジホッピング(M-VRH)伝導、第二項は典型的な熱活性によるバンド伝導である。T > 100 K の範囲においては、典型的なバンド伝導が支配的であり、アレニウスプロットから全てのサンプルにおいて活性化エネルギー $E_A = 132 \pm 5$  meV となった。本研究で実験的に得られた熱活性化エネルギー $E_A$ は第一原理計算より求められた Cu_{Zn}欠陥の欠陥準位 120 meV と非常に良い一致を示している⁷。

ホッピング伝導を説明するうえで、 式(3)の関係が求められる。

$$a_{B}^{*}N_{A,crit}^{1/3} \approx 0.25 \qquad (3)$$
$$a_{B}^{*} = \frac{4 \pi \varepsilon_{S} \varepsilon_{0} \hbar^{2}}{m^{*} e^{2}}$$

 $a_{B}^{*}$ は有効ボーア半径,  $\varepsilon_{s}$ は比誘電率,、 $\varepsilon_{0}$ は誘電率、 $\hbar = h/2\pi$ はプランク定数,  $m^{*}$ は有効質量、 $N_{A,crit}$ は臨界アクセプタ濃 度である。理論計算と実験報告から $\varepsilon_{s} = 6.7^{8}$ とし、有効質量は理論計算の結果 を用いて $m^{*} \approx (m^{2}_{\perp}m_{1})^{1/3}$ から $m^{*}=0.47m$ と した⁸⁾。上記のパラメータを用いて $a_{B}^{*}$ とN_{A,crit}はそれぞれ7.5 Å と3.7×10¹⁹ cm⁻³ とした。アクセプタバンド幅Wは $W = k_{b}$ ( $T^{3}_{M}T_{0}$ )^{1/4}で与えられ、 $W = 40\pm 1$  meVと



Fig. 8 CZTS 単結晶の伝導率温度変化

した。ここで現在報告されている伝導率温度変化から求めたCZTS薄膜多結晶の活性 化エネルギーと本研究結果を比較する。CZTS薄膜多結晶の活性化エネルギーは、20-40 meVの範囲にあり、臨界アクセプタ濃度以上の $N_A = 2.04 \times 10^{20}$  cm⁻³と高い補償度K= 0.98を持つ^{9,10}。臨界アクセプタ濃度 $N_{A,crit} = 3.7 \times 10^{19}$  cm⁻³と以上になると、アクセ プタバンドは価電子帯の頂上と重なり合い、移動度端 $E_V$ が生じ、結果としてフェル ミ準位 $E_F$ と $E_V$ の差が活性化エネルギーとなりより小さくなると考える。この状態で は、アクセプタ状態密度は局在化しており、より金属的な性質となる。

# 4. まとめ

本研究は、良質な CZTS 単結晶成長技術を確立し、得られた単結晶を用いて、ま だまだ未知の部分が多い CZTS の基礎物性を明らかにすることを目的としている。 CZTS-Sn 擬二元系状態図を作製し、70 mol%の Sn 溶液、成長温度 900°C において THM 法を用いて良質な CZTS 単結晶成長に成功した。CZTS 単結晶中の伝導メカニ ズムは、二つのファクターを持ち、100 K 以下の低温において欠陥パスによる M-VRH 伝導が支配的であり、100 K 以上においては典型的なバンド伝導が支配的であ ることを示した。アクセプタバンドの準位は、価電子帯の頂上から 132 meV の位置 で、バンド幅は 40 meV とした。本研究で得られた結果は CZTS 薄膜多結晶を理解す るうえで重要なリファレンスになると考えている

引用文献

- 1) P. Jackson et al., Prog. Photovoltaics 19 894 (2011).
- 2) T. K. Todorov et al., Adv. Energy Mater. 3 34 (2013).
- 3) B. Shin et al., Prog. Photovolt: Res. Appl. 21 72 (2013).
- 4) I. Repins et al., Sol. Energy Mater. Sol. Cells 101 154 (2012).
- 5) I. D. Olekseyuk et al., J. Alloys Compd. 368 135 (2004).
- 6) K. Wang et al., Appl. Phys. Lett. 97 143508 (2010).
- 7) S. Chen et al., Phys. Rev. B 81 245204 (2010).
- 8) C. Persson, J. Appl. Phys. 107 053710 (2010).
- 9) V. Kosyak et al., Appl. Phys. Lett. 100, 263903 (2012).
- 10) J. P. Leitão et al., Phys. Rev. B 84 024120 (2011).

# 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エネルギー・環境部門 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.韓国においては50人乗りの 実機が製造されているが,未だ定期運航には至っておらず,日本の様な波高の高い海象を持つ国におい ては地面効果内といった特殊な飛行状況下における安全航行が保障されていない.地面効果内,特に波 面を取り扱った研究については未だ成熟していない状況にある.本研究では,地面効果翼機が静水面上 を飛行したときに翼周り圧力場が形成する波面形状と波面が空力に与える干渉影響,また地面効果内を 飛行した時の後流影響について理論計算と実験により調査する.

#### 2. 対象主翼と機体形状

本研究で対象としている機体形状と主翼形状を Fig. 1 に示す.主翼の翼型は NACA3409 であり,コード長 0.7 m,スパン長 1.65 m,8°の下反角と 4°の後退角がついている.翼端部には地面効果を促進させるため,NACA0012の翼厚を半分にした翼端板を装着している.また,全機については 2.5 m サイズの自航試験用 RC モデルを対象としている.機体形状は,久保・秋元らによって提案された離水性能を向上させた前翼式形状を提案しており [1],主翼迎角を最大揚抗比を取る 3°で固定し,対称翼を用いた前翼と水平尾翼に関しては,風洞試験と理論計算結果を基に,機体の縦の静安定性が確保されるよう,それぞれ 9°と 0°に設定している.飛行高度は水面から後縁までの高さをコード長で除した h/cとして定義し,翼端板が水面につかない最も低い飛行高度である h/c = 0.35 を巡航飛行高度に設定し,飛行速度は 20 m/s で解析を行っている.



Fig. 1: Main wing with end-plates and whole airframe model.

#### 3. 自由表面干涉影響

空気場,水中場共に非圧縮,非粘性,非回転の 理想流体と仮定し,空気場を一定速度U (m/s)で 進む翼を考える. Fig. 2 に物体固定座標系を示す.  $S_H$  は物体表面, $S_W$  は後流面, $S_F$  は自由表面を示 している.法線ベクトルn は流体内向きとし,自由 表面は剛体壁,後流面は主流に沿って平行に流れる と仮定する.ラプラス方程式に支配された空気の速 度ポテンシャルを $\Phi(x,y,z) = U[-x + \phi(x,y,z)]$ と表し,次の境界条件を満足させる.



Fig. 2: Body fixed coordinate system.

$$[L] \quad \nabla^2 \phi(x, y, z) = 0 \tag{1}$$

$$[H] \quad \frac{\partial \phi(x, y, z)}{\partial n} = n_x \quad \text{on } S_H \tag{2}$$

$$[F] \quad \frac{\partial \phi(x, y, z)}{\partial n} = 0 \qquad \text{on } S_F \quad (z = 0) \tag{3}$$

$$[K] \quad p^{+} - p^{-} = 0 \qquad \text{on } S_{W} \tag{4}$$

流体領域に Green の第2 定理を適用すると、次の積分方程式が得られる.

$$\frac{\phi(P)}{2} - \iint_{S_H+S_F} \frac{\partial G_0(P,Q)}{\partial n_Q} \phi(Q) \, dS - \iint_{S_W} [\phi(Q_T^+) - \phi(Q_T^-)] \frac{\partial G_0(P,Q)}{\partial n_Q} \, dS$$
$$= -\iint_{S_H+S_F} \frac{\partial \phi(Q)}{\partial n_Q} G_0(P,Q) \, dS, \quad P \in S_H + S_F(z=0)$$
$$G_0(P,Q) = \frac{1}{4 + |PQ|}, \quad |PQ| = \sqrt{(x-x') + (y-y') + (z-z')}$$
(5)

ただし,

$$P = (x, y, z), \quad Q = (x', y', z')$$

また、 $\phi(Q_T^+) \ge \phi(Q_T^-)$ は後縁上下面での速度ポテンシャルを表している.  $S_H \ge S_F$ 上で速度ポテンシャルが求まれば、自由表面上の圧力分布と波面を鏡面の剛体壁としたときの空力を求めることができる.

次に、自由表面場について考える.水中場についても非圧縮、非粘性、非回転の理想流体を考え水中 場の速度ポテンシャル  $\Phi_w(x, y, z)$  を  $\Phi_w = U[-x + \phi_w]$  と定義する.運動学的条件と力学的条件を満足 させ、z = 0 における線形自由表面条件式と隆起量を求める式が得られる.

$$\frac{\partial^2 \phi_w}{\partial x^2} + K_0 \frac{\partial \phi_w}{\partial z} = \frac{1}{2} \left( \frac{\rho_a}{\rho_w} \right) \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{p - p_0}{\rho_a U^2 / 2} \right), \quad \zeta = \frac{1}{K_0} \left\{ \frac{\partial \phi_w}{\partial x} - \frac{1}{2} \left( \frac{\rho_a}{\rho_w} \right) \left( \frac{p - p_0}{\rho_a U^2 / 2} \right) \right\} \quad \text{on } z = 0 \tag{6}$$

ここで、波数は  $K_0 = g/U^2$  であり、 $\rho_w$  は水の密度である。ランキンパネル法によって $\phi_w$  に関する境界 値問題を解くことによって、波の隆起量  $\zeta$ を求めることができる。波面との干渉影響を調べるため、(3) の境界条件を新たな境界条件である  $\partial \phi / \partial n = n_x$  ( $z = \zeta$ )に変更する。こうして再度計算された空力 と、最初に計算された鏡面の剛体壁として得られた空力とを比較することによって、自由表面干渉影響 について考察している。

飛行速度  $F_n = 7.6$  (20 m/s) で飛行したときの, 翼端位置での自由表面の x 断面隆起量とその鳥瞰図 を Fig. 4 に示す. 隆起量  $\zeta$  (m) と後縁基準で計測した飛行高度 h (m) はコード長で無次元化しており, 低空飛行時の h/c = 0.35 における計算結果である.

全機と主翼いずれにおいても翼端部分の負圧部により生じる顕著な波の隆起が翼後方で観察すること ができるが、全機の場合、胴体等の干渉影響により翼中央部での隆起は非常に小さくなっている. したがって、2.5 mの RC 模型が時速 72 km で飛行したときに生じる波の隆起は 2 mm 程度であり、 非常に小さいことが分かった.その結果, Fig. 5 に示すように、自由表面が空力に及ぼす干渉影響は非 常に小さい.このことから、実機が定常飛行しているとき、翼端から波の飛沫が上がる程度であると考 えられ、大きな造波は起こらないと考えられる.また、自由表面は鏡面として仮定して問題なく、自由 表面を排除して計算を行えば、大幅な計算時間の短縮が可能になる.

#### 4. 後流影響

ただ

本研究では,翼が飛行しているときの後流変形 による影響も調査するため,境界要素法による時 間領域解法を適用した.Fig.3に解析に使用した 空間固定座標系を示す.自由表面は剛体壁として 扱う.解析手法として,初期状態t = 0 (s)の解 析では定常問題を解く.したがって,境界条件は (1)~(4)を用いて境界値問題を解くが,この時の 後流は主流に沿って平行に流出させている.自由 表面干渉影響の結果を受け,自由表面パネルは除 外している.したがって,グリーン関数はこれま



Fig. 3: Space fixed coordinate system.

で定義してきた  $G_0(P,Q)$  から鏡像項を考慮した (12) で表されるグリーン関数 G(P,Q) に置き換えている. t = 0 (s) 以降は時間刻み  $\Delta t$  に従って時々刻々,長さ  $U\Delta t$  の後流面を追加しながら一定速度 U で前進させる. 空気の速度ポテンシャル  $\Phi(x, y, z; t)$  は各時間ステップにおいて次の境界条件を満足する.

$$[L] \quad \nabla^2 \Phi\left(x, y, z; t\right) = 0 \tag{7}$$

$$[H] \quad \frac{\partial \Phi(x, y, z; t)}{\partial n} = U n_x \qquad \text{on } S_H \tag{8}$$

$$[F] \quad \frac{\partial \Phi(x, y, z; t)}{\partial n} = 0 \qquad \qquad \text{on } S_F \quad (z = 0) \tag{9}$$

$$[K] \quad p^+(x, y, z; t) - p^-(x, y, z; t) = 0 \quad \text{on } S_W \tag{10}$$

空気の速度ポテンシャル  $\Phi(x, y, z; t)$  に関する積分方程式は次の様になる.

$$\frac{\Phi(P;t)}{2} - \iint_{S_H(t)} \frac{\partial G(P,Q)}{\partial n_Q} \Phi(Q;t) \, dS = - \iint_{S_H(t)} \frac{\partial \Phi(Q;t)}{\partial n_Q} G(P,Q) \, dS + \int_0^t \left\{ \iint_{S_W(t)} [\Phi(Q_T^+;\tau) - \Phi(Q_T^-;\tau)] \frac{\partial G(P,Q)}{\partial n_Q} \, dS \right\} d\tau \,, \, P \in S_H$$
(11)

$$C, \qquad G(P,Q) = \frac{1}{4\pi} \left( \frac{1}{r} + \frac{1}{r'} \right), \quad \frac{r}{r'} = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z \mp z')^2}$$
(12)

各時間ステップにおいて積分方程式を解き,物体表面上での速度ポテンシャルΦが求められると,後流 面上での流速場を求めることができる.即ち,(11)の両辺に∇を取って,

$$\nabla \Phi(P;t) = -\iint_{S_H(t)} \left\{ \frac{\partial \Phi(Q;t)}{\partial n_Q} \nabla G(P,Q) - \nabla \frac{\partial G(P,Q)}{\partial n_Q} \Phi(Q;t) \right\} dS + \int_0^t \left\{ \iint_{S_W(t)} [\Phi(Q_T^+;\tau) - \Phi(Q_T^-;\tau)] \nabla \frac{\partial G(P,Q)}{\partial n_Q} dS \right\} d\tau , P \in S_W$$
(13)

この手法により,すべての後流面グリッドの流速を計算し,時間変化 Δt を乗ずることで,後流を移動 させる.この様な時間領域手法を適用することによって,後流形状の変化と空力に及ぼす影響を解析し ている. Fig. 6 に飛行高度 h/c = 0.35 における翼端板付き主翼の後流変形を示す.主翼,前翼,水平尾翼全ての端部から翼端渦による roll-up が発生しており,主翼についてみると,2つの翼端渦が翼端と翼端板下面から発生しており,翼端部で生じる渦が支配的であることが分かる.また,尾翼については主翼からの吹き降ろし影響を受けるため,下向き揚力が発生しすることによる roll-down が生じている.さらに,前翼から発生した後流が主翼の後流を巻きこむといった干渉も観察することができる.この様な後流の変形が空力に与える影響について調べるため,Fig.7に主翼単独の翼中央と翼端部での圧力分布と揚抗比の時系列データを固定後流と比較した結果を示す.圧力といった局所量では翼端後縁位置において差異が見られるが,揚抗比といった積分値では後流の違いによる差異は1%未満であることが分かった.複雑な後流変形が起きても空力には変化を及ぼさず,計算においては後流は主流に沿って平行に流出させて問題ないと言えよう.

# 5. 結言

本研究で、地面効果翼機が水面上を定常飛行しているときに発生する造波と干渉影響、また後流影響について調査した. $F_n = 7.6$ で翼が水面上を飛行した時に大きな造波は起きず、それによる干渉影響も非常に小さいことが分かった。また、地面効果内では主翼、全機共に後流は大きく変形するが、空力に及ぼす影響は非常に小さく、自由表面は鏡面としてた剛体壁、後流は主流に沿って平行に流出させて問題ないことが分かった。

### 6. 研究組織

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2年	研究補助
梶野 恭平	広島大学工学部第四類 輸送機器環境工学課程	修士課程1年	研究補助
高橋 悠	広島大学工学部第四類 輸送機器環境工学課程	修士課程1年	研究補助
大屋裕二	九州大学応用力学研究所	教授	実験指導

# REFERENCE

1) 秋元博路,久保昇三,川上真秀,田中幹樹: 3.6 m 長自航模型試験による前翼型表面効果翼船の特 性評価,日本船舶海洋工学会論文集 第3号, pp.97 - 102 (2006)



Fig. 4: 2-D and 3-D wave elevation of main wing and whole airframe model (h/c = 0.35, U = 20.0 m/s,  $\alpha_{wing} = 3.0$  degs.,  $\alpha_{body} = 0.0$  degs.).



Fig. 5: Aerodynamic properties of the whole airframe.



Fig. 6: Perspective views of wake deformation of whole airframe (  $\alpha_B = 0.0$  degs., h/c = 0.35,  $\Delta t = 0.001$  (s), Time step = 56 ).



Fig. 7: 2-D pressure distribution and time history of lift to drag ratio of main wing with end-plate ( h/c = 0.35,  $\alpha = 3.0$  degs.,  $\Delta t = 0.001$  (s), Time step = 85 ).

# 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科 教授 岩下 英嗣

#### 1. 研究目的

近年,船型開発において CO₂ 削減が重要な要素になっている.これまでの研究では波浪中抵抗増加低減のために船首部の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が,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

供試模型として長さ2.5mの模型を用い、船首部形状を容易に取り替えることができるようにする。船 首形状としては、フレアーの強弱、チャインラインの高さの異なる4種を準備し、各船首部を装着した 模型の規則波中曳航試験によって船体運動および波浪中抵抗増加と船体周りの非定常波を計測する。抵 抗増加は非定常波からも算定できることから、力の計測により得られた抵抗増加と波形から得られた抵 抗増加の二つの視点から、船首部形状の相違による抵抗増加の低減量を比較検討する。加えて船首部、 船体中央部、船尾部の圧力の計測、船側波形の計測も行い、波形と絡めて抵抗増加低減のメカニズムの 解明を行う。 供試模型は広島大学にて製作し、波形計測および解析は応用力学研究所深海機器力学実 験水槽において研究所所有の装置、解析ツールを用いて行う。また、波形抵抗増加の算出については広 島大学・大阪大学で開発された解析ソフトを用いて行う。

#### 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
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2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2年	実験補助
梶野 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
高橋 悠	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
小頭 康孝	広島大学第四類輸送機器環境工学プログラム	4年	実験補助

# 4. 研究結果

# 4.1 供試模型

実験で使用した供試模型の図とその諸次元を Fig.1, Table.1 に示す. 実験には PCC 船型の供試模型 を使用した. PCC 模型は M13066 をオリジナル線形とし,フレアーの強弱,チャインラインの高さの異 なる船首部形状の違う 4 種類の模型を使用する.

		Tai	ole.1 南	皆次兀
				PCC
M13066	M13067		要目	運動計測試験
		$L_{pp}$	(m)	2.5000
		B	(m)	0.4566
		d	(m)	0.1148
26	26	$\nabla$	$(m^3)$	0.0662
		$C_b$		0.5046
and the second s	And a state of the	$Aw = S_0$	$(m^2)$	0.8125
1		$x_F$	(m)	-0.1431
		$x_f \cdot Aw = S_1$	$(m^{3})$	-0.1163
		$x_B(=x_G)$	(m)	0.0955
M13068	M13069	$z_B(=KB-d)$	(m)	-0.0515
		KB	(m)	0.0633
		$BM_T$	(m)	0.1937
		$BM_L$	(m)	3.9405
		KG	(m)	0.1148
And and a second se	Concession of the second	$k_{yy}/L$	(m)	0.2513
		$z_G(=KG-d)$	(m)	0.0000

Fig. 1 PCC 模型

# 4.2 試験内容

### 水槽試験

試験項目は、PCC 模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実施した。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*_G離れた重心周りである。 Fig. 2 に運動計測試験の装置設置図を,Fig. 3 に運動計測試験時のシステム図を示す。供試模型と地上 波高計との距離は PCC 模型の船体側面から *y*=100mm の位置である。



### Fig. 3 運動計測試験システム図

#### 4.3 実験条件

PCC 模型のフルード数は  $F_n$ =0.24 で実験を行った.入射波は  $\lambda/L$ =0.3~3.0 の正面向かい波 ( $\chi$  = 180degs.) で計測を行った.入射波の波高に関しては  $\lambda/L$  によって変化させ,波岨度が  $H/\lambda$ =17/623~2/229 となっている.

#### 4.4 結果·考察

#### 船体運動

PCC 模型の船首形状を4種類変更し、運動計測を行い左から surge, heave, pitch の船体運動を Fig. 4に示す.上段は横軸に入射波の波長を船長で除した無次元値 $\lambda/L$ をとり、縦軸に運動振幅を入射波の振幅で除した無次元値で表している。下段は横軸に $\lambda/L$ をとり、縦軸に入射波に対する船体の位相をとっている。PCC 模型の heave 運動の同調点は $\lambda/L=1.2$ 付近に存在し、pitch 運動の同調点は $\lambda/L=1.5$ 付近に存在している。surge 運動には同調点は存在しない。長波長域にかけてはチャインラインのないほうが船体運動は小さくなっている。



Fig. 4 PCC 模型の船体運動

#### 波浪中抵抗增加

PCC 船型の船首形状の違いによる波浪中抵抗増加の比較を Fig. 5 に示す. 横軸に λ/L をとり, 縦軸 に抵抗値の無次元値をとっている. 左側のグラフは抵抗増加の無次元値を, 右側のグラフは抵抗増加の 生値となっている. Fig. 5 より同調点では船首形状の違いによる抵抗値に差は見られない. しかし短波 長域および長波長域に関してはチャインラインの入った船型の抵抗増加が小さな値となっている. 特に,



長波長域では M13068 が他の船首形状に比べ抵抗値が小さいことがわかる. この M13068 は4 種類の船 首形状のなかで最もフレアーが強い形状である.

### 5.まとめ

船首形状の違う4種類のPCC船型に対して運動,抵抗及び非定常波形を計測し,船首形状の違いによる影響を考察した.本研究の結論を以下に示す.

- (1) 船首形状の違いによる船体運動の変化はほとんどなかった.
- (2) 船首形状の違いによる造波抵抗の違いを確認した.長波長域ではフレアーが強いほど造波抵抗低減となる.
- (3) 抵抗増加の結果より、最も優れていたのはフレアーの最も強い船型である M13068 であった.

「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

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。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、3次元 コラーゲンゲル内を細胞や空洞がくりぬかれたメッシュとして表現することに成功した。加えて、コラ ーゲン繊維の変位情報を元に、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。

・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。



図 2次元と3次元培養環境での細胞が発する歪エネルギーの違い

蛍光標識コラーゲンゲル上(2 次元; 2D)もしくはゲル中(3 次元; 3D)に細胞を培養し、細胞の力を無くす 薬剤を投与した。試薬投与前後においてコラーゲン繊維の変形を撮影し、画像相関法によって繊維の変 位分布を解析した。さらに、変位分布から歪分布を解析し、コラーゲンの物性値を組み入れることで、 応力と歪エネルギーを解析した。2 次元環境と 3 次元環境で培養された細胞を比較した場合、2 次元上 で培養された細胞の方が歪エネルギーを多く出す傾向がみられている。

-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

-論文投稿-

①Modulation of extracellular conditions prevents the multilayering of the simple epithelium.Mizutani T, Takeda K, Haga H, Todo M, Kawabata K., Histochemistry and Cell Biology, (in press).

-発表-

①水谷 武臣:

「細胞の力学コミュニケーション」

大阪府立母子保健総合医療センター研究所、11月6日 2013年

·研究組織

水谷	武臣	北大·先端生命	助教	代表者	
田中	良昌	北大・先端生命	修士2年	F	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

#### 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

カーボン繊維強化ポリマー(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される.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、マイクロ波帯域からミリ波帯域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 CFRP はプリプレグ(グラノックプリプレグ, E6026C-12S)を用い, エポキシ 樹脂を含浸させた炭素繊維により構成される. グラノックプリプレグに用いられる炭素繊 維はピッチ系であり,高い弾性率を持ち,軽量および高剛性という特徴を有している. Cu メッシュは, 200, 100 および 50 メッシュ(1 inch 間のメッシュの数)の3 種類を用いた.

また、プリプレグの繊維配向を同一方向で Cu メッシュを挟んで積層したものおよび繊維 配向を 90°変化させて Cu メッシュを挟んで積層したものを各メッシュの粗さで作製した. 作製した試料は、CFRP で 200 メッシュの Cu メッシュを挟んだものをそれぞれ、Cu200 0/0 および Cu200 0/90 とし、200 メッシュの Cu メッシュで CFRP を挟んだものを CFRP 200 と する. 同様に 100 メッシュおよび 50 メッシュもそれぞれ、Cu100 0/0、Cu100 0/90、CFRP 100、 Cu50 0/0、Cu50 0/90 および CFRP 50 とする.

◆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. 本測定装置の概略図を Fig.1 に示す.測定周波数は 0.5-18 GHz である.また,電波遮蔽特性は材料の導 電性,誘電特性と強い相関があると考えられ,作成 した材料の導電性,誘電特性の測定も行った.各試 料の比誘電率,比透磁率および誘電正接の測定は,上



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

記の同軸管に治具を取り付けることによって測定した.また,誘電正接は式(1)から求めた.

$$\tan \delta = \epsilon_r / \epsilon_r'$$

#### 3. 結果および考察

◆Cu200 における実験結果 Fig.2 に Cu200 における EMI SE の測定結果を示 す. Fig.2 より、繊維配向を 90°変化させ た場合、変化させなかった場合より、10 dB 程度 EMI SE の値が高くなっているこ とがわかる.また、CFRP200 は右肩下が りに変化しているにもかかわらず、Cu200 0/0 および



Fig.2 EMI SE for Cu100

Cu200 0/90 は右肩上がりで変化していることがわかる.

Fig.3(a)に Cu200 0/0 および Cu200 0/90 の Fig.3(b)に比透磁率(µr'およびµr'')および Fig.3(c) にそれぞれの誘電正接(tan *d*)を示す.この結果から、繊維配向を変えても同じ電気的性質が得られ、Cu200 0/90 はより良い EMI SE を有する材料であることがわかる.



Fig.3(a) Relative permeability of Cu200

Fig.3(b) Dielectric tangent of Cu200

◆全体における考察 本研究ではメッシュの粗さにおける EMI SE の変化は少なく,繊維 配向は 90°変化させた場合の方が高い EMI SE 値をとることが分かった.これは,メッシュ が粗くなるにつれて接着性がよくなり,繊維配向を変化させることで Cu メッシュの隙間を 抜けてきた電磁波も遮蔽できたと考えられる.

#### 4. まとめ

CFRP/Cu メッシュ複合材料における周波数の変化による電磁波遮蔽挙動を示すことができた. 0.5 GHz~18 GHz の周波数域において、どの粗さの複合材料も平均的な EMI SE 値を示し、CFRP で Cu を挟んだ場合は高周波の方が高く、Cu で CFRP を挟んだ場合は低周波の方が高くなることが分かった. また、CFRP の繊維配向を 90°変化させると EMI SE 値も大きくなり、透磁率および誘電正接に影響しないことが分かった.

#### 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	
# ワイドギャップ半導体結晶の結晶欠陥と電子物性との関連に関する研究

### 佐賀大学大学院工学研究科 嘉数 誠

1. **目的** 

ダイヤモンド等のワイドギャップ半導体は、絶縁破壊電界が高く、大面積ウエファー(基板)とp型やn型伝導が可能になれば、Siを越える、最も高効率で大電力のパワーデバイスが実現し、電力ネットワークを格段に高効率化できる。

本研究では、ダイヤモンド等のワイドギャップ半導体結晶で、電子物性と結晶欠陥との関連性を明ら かにすることを目標とし、今年度は結晶欠陥の導入メカニズムを明らかにするためにシンクロトロン光 を用いたX線トポグラフィー観察を行った。これまでTamasakuらはHPHT成長 IIaタイプ単結晶試料で、 Kato らは CVD 成長単結晶試料の報告を行っている^[1,2]。

2. 実験方法

観察したダイヤモンドの試料は高圧高温(HPHT)法により成長した高純度タイプIIa 単結晶(不純物 <0.1 ppm. 5.4×5.3×0.7 mm³(001)面方位)(HPHT 単結晶)および CVD で成長した(001)面方位の単結 晶(CVD 単結晶)である。HPHT 単結晶の中には、(001)成長セクターに、ほとんど結晶欠陥の見られな いものが得られているが^[3]、本研究ではこのセクター内に結晶欠陥が観察される結晶を用いた。X 線ト ポグラフィー観察は九州シンクロトロン光研究センター(SAGA-LS)のビームライン BLO9A で行った。本 研究では、透過配置で、X 線エネルギー14.6 keV (波長 0.85 Å)で、[±2±20]の等価の 4 つの回折 面で観察を行った。単色 X 線による透過配置での X 線トポグラフィー観察装置を図1に示す。

# 3. 実験結果

図2はHPHT単結晶の[-220]回折のX線トポグラフィー像である。各々独立した転位を観察すること ができる。転位密度は~100 cm⁻²であり、ダイヤモンドとして大変低い水準にある。また、図3は転位 の拡大写真であるが、X線入射面からX線出射側に向けて、転位は干渉縞(フリンジ)が観察された。 このフリンジは均一性の高い結晶中をX線が多重反射して起こる現象である。また、[220]等価の4つ の回折面のX線トポグラフィー像を比較し、バーガーズベクトルbとgベクトルでb・g=0のとき像が

ーガーズベクトルは b=a/2<110>、
b=a/2<-110>、 b=a/2<1-10>、
b=a/2<-1-10>の4種類に分類できた。
さらにバーガーズベクトル b と転位
線の方向 t の関係を用い、観察された転位は全て刃状転位と同定した。

消滅する原理を用いると、転位のバ



図1:X線トポグラフィー観察装置(透過配置)



X線入射面 X線出射面 ↓ ↓

図3:転位の拡大写真

図2:HPHT結晶[-220]回折のX線トポグラフィー像

図4に CVD 単結晶の [-220] 回折の白色 X 線トポグラフ ィー像を示す。測定した試料には転位欠陥が観察された。 転位は束のようになっており、鳥の足跡のように見える。 これは CVD 単結晶の転位の特徴である。この転位は CVD 成長の際に基板結晶と成長結晶の界面の歪により発生し たと思われる。これらの転位を消滅則を用いて解析した 結果、転位は主に混合転位とわかった。



図4: CVD ダイヤモンド単結晶の X 線 トポグラフィー像(白色 X 線、反射配置)

### 4. 結論と今後の課題

次世代のパワー半導体として注目される高純度タイプIIaのHPHT 合成ダイヤモンド単結晶および CVD ダイヤモンド単結晶をシンクロトロン放射光を用いて X線トポグラフィー観察した。HPHT 合成結晶では 転位が刃状転位と同定した。また CVD 単結晶では混合転位と同定した。この違いは、HPHT と CVD の成長 様式の違いによると思われる。今後、九州大学応用力学研究所の他の結晶評価装置による評価と合わせ て、多面的に結晶成長機構、欠陥生成機構を解明し、デバイス特性との関連性を明らかにしていく予定 である。

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、寒川義裕先生に感謝 いたします。また測定および貴重なコメントを頂いた九州シンクトロン光研究センターの川戸清爾博士、 石地耕太朗博士に感謝申し上げます。

# 参考論文

- [1] K. Tamasaku, *et al.*, J. Phys **D38**, A61 (2005).
- [2] Y. Kato, et al., Japanese Journal of Applied Physics 51, 090103 (2012).
- [3] H. Sumiya, et al., Japanese Journal of Applied Physics 51, 090102 (2012).

# 人工関節置換術を施した股関節に及ぼす骨リモデリングの 影響に関する研究

# 横浜市立大学医学部 稲葉 裕

# 1. 諸 言

古典的なバイオメカニクス理論では、1800年代にすでに、骨梁構造と主応力の分布状態の関係性が 論じられており、Von Meyer と Culmann は、大腿骨断面の主応力分布状態を Fig.1(a)のように描いてい る.この結果に触発された Wolff はさらに理論を発展させて、負荷状態が変化すると、その荷重の影響 を最小とするように骨梁構造が変化するという、世界で初めて骨のリモデリングを力学的に説明した いわゆる Wolff's Law を提案した.このようにバイオメカニクスの分野において、骨梁構造と主応力分 布の間には、密接な関係性があることが示唆されてきた.しかし、3 次元的に複雑な構造を有する大腿 骨に対して、計算力学的手法を用いてその妥当性を示した研究は少ない.さらに、人工股関節置換術 を行った後には、主応力分布状態は大幅に変化することが予想されるが、人工関節置換後の主応力分 布状態については、詳細に調べられてはいない.そこで、本研究では、CT 画像より大腿骨モデルを構 築し、適当な境界条件のもとで応力解析を行い、主応力分布状態について調べた.次いで、全人工股 関節置換術(THA)と表面置換型人工股関節置換術(HRA)を施したモデルを構築し、同じ境界条件 で応力解析を行い、主応力分布について比較検討した.さらに、ひずみエネルギー密度を制御パラメ ータとした骨リモデリングモデルを導入した解析を行い、骨リモデリングが主応力分布状態に及ぼす 影響について検討した.



Fig.1 Principal stress projections on femur by classical theories.

# 2. 解析方法

54歳の男性患者の下肢 CT 画像より, Mechanical Finder 6.1を用いて3次元大腿骨モデルを構築した. ヤング率分布は, Keyak の方法を用いて, CT 画像上の HU 値を骨密度に変換し, 骨密度からヤング率 を推定した. Fig.2 に境界条件を示す. 荷重条件として, 骨頭に作用する分布荷重と筋力を, Heller ら のモデルを参考にして決定した. 筋力の作用状態については, Heller らのモデルよりも, より現実的な 分布状態を仮定している. また, 拘束条件として, 膝関節顆部面の一部を完全拘束した.

次に、作成した大腿骨モデルに、表面置換型人工股関節置換術(Hip Resurfacing Arthroplasty; HRA) と全置換型人工股関節置換術(Total Hip Arthroplasty; THA)を施し、Fig.3 に示すモデルをそれぞれ作 成した. HRA モデルでは、カップと骨頭の間に骨セメントを挿入しており、Co-Cr-Mo 合金製のカップ と骨セメント間、および骨セメントと骨間はそれぞれ接触条件を適用している. 一方、THA モデルで は、ステムは Ti-6Al-4V 合金製とし、HA コーティングが施してある部分は、接着状態を仮定し、コー ティングがない先端部分は、接触条件を適用した. また、骨頭ボールはアルミナセラミックスを仮定 している. コバルトクロム合金、チタン合金、アルミナ、骨セメントのヤング率は、それぞれ 230 GPa, 114 GPa、370 GPa, 2.65 GPa とした.

HRA や THA と骨リモデリングの関係性を調べるために、月僧により提案されたひずみエネルギー 密度(SED)を制御パラメータとする骨リモデリングモデルを用いて解析を行った.骨のヤング率分 布は各要素の SED 値に基づいて変化し、低 SED ではヤング率の減少(骨密度の低下に対応)、高 SED

ではヤング率の増加(骨密度の増加に対応)が生じる.各モデルの骨リモデリング解析は、ヤング率の分布状態が定常状態に達するまで行った.





Fig.3 Femoral models with implants

# 3. 結果と考察

大腿骨モデルにおける断面での主応力分布と Von Meyer と Wolff の主応力線図,および実際の大腿骨 の X 線図および骨梁構造をまとめて Fig.4 に示す. 左上の解析結果は,引張り応力である最大主応力(青 表示) と圧縮応力である最小主応力(赤表示)を示したものであり, von Meyer や Wolff が提案した主 応力分布状態に類似している.下図に示した実際の骨梁構造と主応力分布もよい一致を示しており, 骨梁構造が主応力と良い対応を示し, 骨梁の形成がマクロ的(あるいは連続体力学的)には主応力に 対応して形成されることを示唆している.

Fig.5 に大腿骨モデル, HRA モデル, THA モデルにおける主応力分布状態(青が最大主応力,赤が 最小主応力)を示す. HRA モデルでは骨頭が保存されているために,力学的には大腿骨モデルと類似 の主応力分布を示す.しかし,骨頭は高弾性率のコバルトクロム合金で覆われているために変形が拘 束され,主応力の低下がみられる.一方,THA モデルでは,骨梁の大部分が取り除かれているために, 主応力の分布状態は大腿骨とは全く異なったものとなっており,特に外側では主応力の高密度化が生 じている.



Fig. 4, Comparison of principal stress distributions and trabeculae structure

HRA モデルと THA モデルでの骨リモデリング解析の結果を, Fig.6 と Fig.7 にそれぞれ示す. 骨リモ デリングによりヤング率の低下(すなわち骨密度の低下)が生じた結果,主応力の分布密度が低下し ている. HRA モデルでは,ステム周囲および大転子部において骨密度の低下が著しい. 一方, THA モ デルでも大転子部において骨密度が低下しており,外側の皮質骨においても低下がみられる. THA の デザインが骨リモデリングに与える影響をみるために,骨頭ボールの直径を 34 mm から 48 mm に増加 させた Large ball モデルと,ステム長さを 50%程度に減少させた Short stem モデルの2種類を作成し, 骨リモデリング解析を行った. なお, Large ball モデルでは,骨頭ボール表面において分布荷重の作用 する範囲がより大きくなっているのが特徴である. 得られた結果を Fig.8 に示す. 部分的に骨密度の低 下がみられるが,骨密度が増加している部分もあり,全体的に骨リモデリングの影響が小さく,骨頭 ボールのサイズアップやショートステムが大腿骨における生体力学的環境に対して好ましいことが予 想される. なお,骨頭ボールのサイズアップについては,臼蓋側に設置するカップやライナーとの関 係もあるので,容易ではない.ショートステムについては,最近,その有効性が注目を集めているが, 生体力学的観点からの研究は未だ少ないのが現状である.



Fig.5 Principal stress distributions in femoral, HRA and THA models. distribution.



Fig.6 Effect of bone remodeling on principal stress distribution in HRA model.



Fig.7 Effect of bone remodeling on principal stress distribution in THA model.



Fig.8 Effects of bone remodeling on principal Stress distribution in large and short stem models.

# 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

大規模な骨欠損では、自家骨を用いて骨再生治療を行うことが多いが、量的制限や健常骨除去後 の痛み等の問題が指摘されている、そこで、近年では組織工学に基づいた新しい治療法として、連 通多孔質構造を有する骨再生用 scaffold と細胞を組み合わせた再生培養骨の利用が検討されており、 機能性 scaffold の開発が進められている. Scaffold に付与する機能性の中でも、薬剤徐放機能は有効 性が期待でき、薬剤の種類を変えることで、様々な効果を生み出すことが可能となる.

そこで本研究では、骨再生用 scaffold への応用を目指し、骨形成促進作用を持つ汎用のコレステ ロール低減薬剤である statin,および対悪性腫瘍治療への応用を意図した汎用抗悪性腫瘍剤の cisplatin をポリマー相に分散させたポリマー/ハイドロキシアパタイト(HA) 複合系 scaffold を開発 し、微視構造観察、圧縮試験、薬剤徐放試験による基本的特性の評価を行った.

#### 2. 実験方法

本研究で用いた薬剤は、骨形成促進用薬剤の Fluvastatin Sodium Salt (F601250, Tronto Research Chemicals Inc.),および抗悪性腫瘍剤の cisplatin (033-20091, Wako Pure Chemical Industries, Ltd.)の 2種類である. 複合系 scaffold の作製方法は以下の通りである. HA 粉末とポリビニルアルコールの 1:1 混合溶液にポリウレタンスポンジを含浸・乾燥後, 1300℃で4時間焼結して HA scaffold を作製 した.次に、ポリ乳酸・グリコール酸共重合体 (PLGA) またはポリカプロラクトン (PCL) の塩化 メチレン溶液に薬剤を分散させ、HA scaffold を浸漬・乾燥させて statin (cisplatin) 含有型 HA/polymer scaffold を作製した.また, HA scaffold にポリマー層をコーティングした後,蒸留水を用いて薬剤 を表面に凝着させた statin (cisplatin) 表面凝着型 HA/polymer scaffold も作製した. なお本研究では, statin (cisplatin) 含有型 HA/PLGA scaffold と HA/PCL scaffold をそれぞれ HLGS-C (HLGC-C) と HCLS-C (HCLC-C), statin (cisplatin) 表面凝着型 HA/PLGA scaffold と HA/PCL scaffold をそれぞれ HLGS-A (HLGC-A) と HCLS-A (HCLC-A) と称す.

微視構造観察には、電界放射形走査型電子顕微鏡(FE-SEM)を用いた. 圧縮試験は、小型材料 試験機を用いて行い,圧縮弾性率,強度,および臨界点までのひずみエネルギー密度を評価した. 薬剤徐放試験は, 一定温度 37℃のインキュベーター内で scaffold を 5ml のリン酸緩衝生理食塩水

(PBS) に浸して行い, PBS 中の statin 濃度を紫外可視分光光度計により測定した吸光度から算出し た. また, FE-SEM を用いて徐放 試験前後の scaffold の微視構造の 変化を観察した.

# 結果および考察

図1に、生体吸収性ポリマーと して PLGA を用いた scaffold の FE-SEM 画像を示す. 図1(a), (d) より、海綿骨に類似した多孔質構 造が形成されていることが分かる. また,図1(b),(e)に示す含有型 scaffold では,ポリマーにより薬剤



Fig.1 FE-SEM micrographs of (a), (b):HLGS-C, (c): HLGS-A,

```
(d), (e): HLGC-C and (f) HLGC-A.
```

が十分に保持されているのに対し,図1(c),(f)に示す表面凝着型 scaffold では,ポリマー表面に薬 剤が凝着している様子が観察された. なお,全ての scaffold において,図1(a),(d)と同様の微視構 造が観察された.また,PCLを用いた scaffold についても,図1と同様の微視構造が観察された. 圧縮試験では,生体吸収性ポリマーコーティングを施した scaffold は,コーティングを施してい ない HA scaffold と比較して,圧縮弾性率,圧縮強度,および臨界点までのひずみエネルギー密度が 飛躍的に向上した.なお、薬剤は scaffold の圧縮力学特性にあまり影響をもたらさなかった.

図2に薬剤徐放試験結果を示す. statin および cisplatin いずれを用いた場合においても,生体吸収 性ポリマーとして PLGA を用いた scaffold は PCL を用いた scaffold に比べて,薬剤の徐放速度が速 いことが分かる. これは, PLGA が PCL よりも分解速度が速いことに起因すると考えられる. また, 表面凝着型は含有型に比べて,薬剤の徐放速度が速いことが分かる. これは,各 scaffold における 薬剤の保持状態に起因すると考えられる.

図3に、薬剤徐放試験後のFE-SEM 画像を示す.各 scaffoldにおいて、ポリマーの分解により保持されていた statin が徐放されていることが分かる.また、図3(a),(b) を比較すると、PLGA は PCL よりも分解が進行している ことが分かる.一方、図3(a),(c)を比較すると、statin の徐放により、含有型ではクレータ状損傷が生じていの に対し、表面凝着型では表面粗さが増加していることが 分かる.

# 4. 結言

本研究では、骨再生用 scaffold への応用を目指し、薬 剤徐放機能を有する HA/生体吸収性ポリマー複合系 scaffold を作製した.ポリマーコーティングにより圧縮力 学特性が向上した.また、薬剤の保持形態と分解速度が 異なるポリマー相を導入することで、薬剤徐放速度が制 御できることを確認した.

# 成果発表

1) M. Todo, N. Yamada, T. Arahira, Y. Ayukawa and K. Koyano, Development and characterization of bioceramic/polymer composite scaffold with drug release function for bone tissue engineering, ICBME2013, 4-7 December 2013, Singapore.

2) 山田, 東藤, 荒平, 鮎川, 古谷野, 薬剤徐放機能を有

するポリマー・バイオセラミック 複合系 scaffold の創製, 第 24 回バ イオフロンティア講演会, 2013/11/1-2, 京都.

東藤,山田,荒平,鮎川,古谷
 野,薬剤徐放機能を有する骨再生
 用有機・無機複合系多孔質足場材







Fig.3 FE-SEM micrographs of (a): HLGS-C, (b): HCLS-C, and (c): HLGS-A after the drug release test.

料の創製と評価,第13回日本再生医療学会総会,2014/3/4-6,京都.

# 25 ME-15

歯科矯正治療における顎骨の生体力学的環境変化のコンピュータ解析

九州大学大学院歯学研究院 高橋一郎

# Introduction

Orthodontic mini-implants are widely used to provide absolute anchorage without affecting teeth which should not be moved in the treatment plan. A common problem with temporary anchorage devices is a loss of stability and failure especially during the first 4-5 months after placement.

# Aim

This retrospective study aimed to evaluate applied orthodontic mini-implants in order to investigate possible mechanical factors affecting their survival.

# Materials and methods

Twenty-two successful implants and 6 failed implants from selected were included in the study. Each patient had two CT images taken; firstly before the placement of the mini-implant and the second with the mini-implant in place. The first CT image was used to generate geometries of the model and acquire bone properties, while the second CT image was used to define the position of mini-implant. A novel finite element analysis was applied to mini-implants. The detail of the modeling procedure is shown in Fig.1.

# Results

Some of the important results are shown in Fig.2. A regression analysis showed a significant relationship between mini-implant failure and high levels of tensile and compressive strains. More specifically, the tensile strain in bone at a distance of 0.5 - 1 mm from the mini-implant surface was significantly able to determine failure and success. The possible parameters that can explain the high values of tensile strain were the maximum elastic modulus (cortical bone quality) and proximity to adjacent teeth. The regression analysis showed that the interaction between these two parameters was significant.

# Conclusion

Maximum tensile strain is a good indicator of orthodontic mini-implant failure. The effect of root proximity on failure depends on the quality of cortical bone and in circumstances of close or actual root contact, mini-implant failure is expected only if cortical bone is of low quality.



Fig.1 Detail of the modeling procedure.



Fig.2 Strain distribution and probability of failure.

# 生体埋入型バイオ燃料電池に関する基礎研究

# 九州大学産学連携センター 藤野 茂

### 1. 緒言

近年,グルコースの分解時に放出される電子を利用したバイオ燃料電池が注目を集めており,様々な 研究が行われている.バイオ燃料電池は一般的な燃料電池と異なり,糖類を燃料とし,触媒には生体触 媒を用いるため,安全かつ循環型社会に相応しい発電デバイスであるといえる.またセパレータを必要 としないため構造が単純で小型化しやすい点も魅力である.このような理由から,バイオ燃料電池は生 体内埋め込み型電源として人工心臓などの医療デバイスへの利用が検討されている.しかし,現状のバ イオ燃料電池では発電出力は一般的な燃料電池と比べて非常に小さい.さらに,現在一般的な酵素電極 では耐久性に大きな課題を抱えており,それゆえ発電効率かつ耐久性に優れる高機能な電極材料の作製 が必要とされている.

本研究では、広範囲な表面積が得られる連通多孔質構造と、優れた導電特性と比表面積をもつカーボ ンナノチューブ(CNT)に着目し、メディエータを必要としない電極材料として CNT を分散させた collagen 多孔体を作製した. FE-SEM による微視構造観察を行い、多孔質構造や CNT の分散状態につい て検討した. また、基本的なバイオ燃料電池を作製し発電性能を測定し、多孔体の電極としての可能性 について検討した.

### 2. 実験方法

CNT/collagen 多孔体は凍結乾燥法で作製した. ブタ皮膚製コラーゲン(Type I, 日本ハム株式会社)に CNT(MWNT-7, 保土谷化学工業)を2,3,4wt%加え攪拌することでCNT/collagen 溶液を調整した.次 に,酵素としてアノードにはグルコースオキシターゼ(Glucose Oxidase, Wako)とカタラーゼ(Catalase, from Bovine Liver, Wako),カソードにはラッカーゼ(Laccase M120,天野エンザイム)をそれぞれ5mg, 10mgと同じ分量でCNT/collagen 溶液に加えた.これをシリコン製の型に注入し凍結乾燥を行い,多孔 体を作製した.collagen多孔体は水溶性のため,架橋を行ったものを別途作製した.37℃に設定した恒 温機内で気化したグルタルアルデヒドを多孔体に4時間浸透させることで架橋を行い,架橋反応を停止 させるため,グリシンに24時間浸積した.グルタルアルデヒドには殺菌効果があるため,多孔体の作製 段階では酵素を加えず,架橋後の多孔体に酵素を溶解させたPBSをスポイトで添加し,再び凍結乾燥を 行い多孔体に酵素を凝着させた.また,酵素の緩衝液への流出を防ぐために,多孔体の表面をセルロー スフィルムで覆った.

FE-SEM による多孔体表面の観察を行い,多孔体の微視構造について評価を行った.また,簡単 な燃料電池を作製し,発電特性について評価した.緩衝液にはグルコースを 0.05mol/l 溶解した PBS を 用い,液温を酵素が活発に活動する 37℃に設定し,電極間電圧に及ぼす CNT 含有量および酵素量の影響を評価した.

### 3. 結果および考察

collagen のみの多孔体の微視構造を Fig.1(a)に, 2wt%CNT, 3wt%CNT を Fig.1(b), (c)に示す. 2wt%CNT の場合, 気孔の構造は collagen 多孔体によく似た性質を持っており, 気孔壁の表面の状態も collagen の 影響が大きく, collagen の気孔壁の中に CNT が分散している. しかし, 3wt%CNT では, CNT の体積含 有率の増加による凝集のために, collagen 単体の気孔サイズよりも大きな気孔を形成している. 気孔壁 の表面には微細な collagen 繊維構造が観察され, CNT を連結することで構造安定性が得られていること が期待できる.



(a) Collagen only.
 (b) 2wt% CNT.
 (c) 3wt% CNT.
 Fig.1 FE-SEM micrographs of distributed CNTs.

発電性能の測定結果を Fig.2 に示す. CNT/collagen 電極は最大で 0.18V 程度の電圧を発生する.また, 酵素量が増加するとグルコースの分解が活発に行われるため,電圧が大きくなる.しかし,時間の経過 による電圧降下が著しく,最大電圧付近で 30 分ほどしか電圧が維持できない. collagen 多孔体は水溶性 で熱に弱い性質を持つため,電極を緩衝液に浸すと,構造が非常に不安定になる.電極の CNT 同士を繋 ぐ collagen が水分を多く含むことで,CNT 同士の接触が弱くなり,電極抵抗が増加したと考えられる. また,時間の経過と共に徐々に collagen が溶解し,酵素が溶液中に流出するため,電極に含まれる酵素 が減少し,電池寿命が短くなったと考えられる.そのため,気孔サイズの小さい 2wt%CNT のほうが, 酵素が流出しにくいため電圧維持時間が長い.CNT/collagen 電極は,最大電圧は大きい値を示すものの, 測定後の電極は水分を多く含んでゼラチン状となり崩れやすいため,耐久性の面から電極として好まし くない.そこで collagen 多孔体の水溶性という弱点を補うために架橋を行った.

架橋後に同量の酵素を凝着させた CNT/cross-linked collagen 電極は, セルロースフィルムの作用で多孔 体に緩衝液が浸透するまでに時間がかかるため, 電圧の急上昇は見られなかった.また, 多孔体の作成 後,酵素をスポイトで添加する凝着方法では,酵素は気孔壁に埋め込まれず気孔壁表面に付着するため, CNT との接触面積が小さく,未架橋の場合に比べて発電量が非常に小さい.また,酵素を含む PBS を多 孔体の吸収性によって浸透させるため,全ての酵素を多孔体の中心まで均等に拡散することが難しく, 多孔体表面に偏ったこともひとつの要因と考えられる.また,CNT 含有率が大きいほうが電極自体の電 気抵抗率が小さいため,発電量が大きい.最大電圧は 3wt%CNT/10mg で 0.10V 程度と CNT/collagen 電極 の半分程度であるが,寿命が長く, 0.08-0.10V 程度の電圧を 48 時間以上維持した個体も確認された.

4. 結言



Fig.2 Effects of the enzyme and CNT contents on the voltage.

本研究では,酵素とCNT を分散させた collagen 多孔体を作製し,それらを電極として用いたバイオ燃料電池の基本的発電特性を評価した.未架橋の CNT/collagen 多孔体は大きな電圧が確認されたものの,構造的に非常に不安定であり,燃料電池用電極としては問題があった.一方,CNT/cross-linked collagen 多孔体は,発電量は小さいが構造的に安定であり電池寿命も長い.酵素量や配分を改善することで発電量の向上が期待される.

# 数値損傷力学を用いた人工股関節置換股の骨折解析

九州大学大学院医学研究院 中島康晴

# 1. 緒 言

人工股関節全置換術 (THA) は、末期状態の変形性股関節症に対する最終的な治療法として広く行われている. THA を施すことで、鋭い痛みや過度の変形で歩行もままならなかった状態が大幅に改善され、軽度の運動も可能 となる.一方、骨頭壊死等骨頭の一部に患部が限定される場合や、比較的若年層の変形性股関節症の場合は、骨 温存型である表面置換型人工股関節置換術 (RHA) が施術されることもある.しかし、THA や RHA 後に転倒等 により過度の負荷が股関節に作用した場合、まれに骨折が生じることが知られている.この原因としては、高剛 性の金属製インプラントと骨の力学的不適合性による応力・ひずみ集中、および骨粗鬆症等による骨密度低下に よる骨強度の低下等が考えられるが、そのメカニズムは未だ不明な点が多い.

本研究では、CT 画像を用いた大腿骨の数値モデル化、CT 値による骨密度およびヤング率分布の推定、応力基準とひずみ基準による骨損傷モデルの導入と有限要素法を組み合わせて THA と RHA の転倒状態での応力解析を行い、骨折のメカニズムを明らかにすることを目的とした.

# 2. 数值解析方法

医療機関より提供を受けた 54 歳男性患者の CT 画像データより, Mechanical Finder (RCCM 社)を用いて大腿 骨モデルを構築した.このとき, Keyak のモデルを用いて CT 値より骨密度, ヤング率, 圧縮降伏強度を推定し た⁽³⁾.次に, 大腿骨骨頭部に対してコンピュータ上で骨切りを行い,全置換型人工関節と表面置換型人工関節の CAD データと組み合わせて THA と RHA モデルをそれぞれ構築した.大腿骨, THA, RHA モデルをそれぞれ Fig.1 に示す.境界条件としては,転倒時に大転子部に荷重がかかること想定し, Fig.2 に示すように大転子部に直接 10kN の荷重を作用させた.また, THA, RHA モデルともに Fig.2 に示すようにカップ表面と大腿骨遠位部 (膝 関節部)の表面を完全に固定した.損傷モデルとしては,各要素の応力またはひずみが臨界値に達すると,その 要素の剛性がゼロとなるモデルを採用した.引張り損傷については,最大主応力を評価基準として用いており, 圧縮降伏強度の 0.8 倍を臨界値として設定した.一方, 圧縮損傷については,最小主ひずみを評価基準とし,3000µε を臨界値として設定した.



Fig.1 Femoral, THA and RHA models.

Fig.2 Boundary conditions.

#### 3. 結果と考察

Fig.3 に荷重レベルが 5kN での最大主応力分布図と最小主ひずみ分布図を示す. RHA の場合,最大主応力は主に 骨頭部に生じており,特にカップ・エッジと骨との界面部で生じていることがわかる.また,THAでは,荷重を 作用させた大転子部と骨幹の小転子下方に最大主応力は集中している.一方,最小主ひずみについては,RHA で は主に,大転子部,ステム端周辺部,カップ・エッジ周辺部で集中している.また,THA の場合は,大転子部に 主に集中していることがわかる.

Fig.4に損傷解析結果を示す. RHA では損傷発生は主に骨頭内部と大転子部に集中していることがわかる. また, 骨頭内部の小転子側では主に圧縮損傷が支配的であるのに対し,大転子側では引張り損傷が生じている. この引 張り損傷については Fig. 3(a)に示した最大主応力分布に対応している. 特に,微視損傷はカップ・エッジと骨と の界面部(頚部)に集中している. また,大転子部では主に圧縮損傷が生じており負荷形態に対応している. さ

らに、ステム先端や周辺部にも損傷が集中していることがわかる.これらの結果より、RHA では、頚部骨折や大 転子部骨折の危険性が示唆された.また、ステムのルースニングも予想される.一方、THA については、引張り 損傷, 圧縮損傷ともに大転子部に集中しており, 大転子骨折の危険性が予測される結果となった.



(a) Maximum principal stress (b) Minimum principal stress Fig.3 Distribution patterns of max principal stress and min principal strain.

Fig.5に破壊荷重を比較した図を示す.ここで破壊荷重とは微視損傷の蓄積により骨が形状を維持できなくなった 状態を判定して評価した荷重値であり、体重に対する比として表している.また、階段昇降での立位状態を想定 して、骨頭に対して鉛直下方に 10kN の荷重を負荷させた場合の結果も示してある. この結果より、立位を想定 した場合よりも転倒を想定した場合の方が、明らかに骨折の危険性が高いことがわかる.また、立位では骨のみ の状態よりTHAやRHAの方が骨折の危険性が低く,さらにRHAの方がTHAより骨折し易い結果となっている. 一方,転倒を模擬した状態では,骨のみより THA や RHA の方が骨折の危険性が高く,また THA の方が RHA よ り骨折の危険性が高い結果となった.



Fig.5 Comparison of fracture loading.

# 4. まとめ

(1) 表面置換型人工股関節では、微視損傷は骨頭頚部に集中しており、頚部骨折の可能性が示唆された.また、 大転子部に負荷が作用する場合は大転子部骨折も予測される結果となった.

(2) 全置換型人工股関節では、微視損傷は主に大転子部に集中しており、大転子部の骨折が示唆される結果とな った.

(3) CT 画像を用いて骨密度分布をヤング率分布に反映させた骨モデルを構築し,損傷モデルを導入した有限要 素解析を行うことで、人工関節置換股に対して過度の負荷が作用する場合の骨折の危険性とそのメカニズムを評 価することが可能であることが示された.

# 生体材料と間葉系幹細胞のハイブリッド化による骨再生研究

# 大阪大学未来医療センター 名井 陽

### 1. 緒言

骨肉腫のような悪性腫瘍を除去した場合,大規模な骨欠損部が生じるため骨再生治療が必要となる.通常 は,腰骨等の自家骨が使われることが多いが,量的な制限,骨を採取した部位の痛み等の問題がある.そこ で,生体活性セラミックス製の人工骨が使用されるようになってきているが,生体骨に比べると骨形成能に 劣ることが問題となっている.そこで,人工材料を足場材料(scaffold)とし細胞と組み合わせて培養再生骨 組織を作る組織工学的手法を用いた新しい治療法が検討されている.骨は主に炭酸アパタイトとI型コラー ゲンの複合材料であるために,scaffoldとしては,リン酸カルシウム系セラミックスとコラーゲンあるいは生 体吸収性合成ポリマーとの複合材料が検討されている.しかし,高機能性 scaffold の開発や細胞とのハイブ リッド化,培養骨組織の形成技術の確立等課題は多く,いまだ研究段階にあるのが現状である.

本研究では、リン酸カルシウム系β-TCPとI型コラーゲンを2種類の方法で複合化し、多孔質構造と基本的な圧縮力学特性を比較した.さらにラット間葉系幹細胞を各 scaffold に播種し、最長28日間培養して、圧縮弾性率、細胞数、ALP 活性、骨分化マーカ等の変化を調べ、骨再生用 scaffold としての有用性を検討した.

### 2. 実験方法

間葉系幹細胞を培養するための scaffold として,連通多孔質構造を有する材料を 2 種類作製した.用いた 原料は,β-TCP 粉末(太平化学産業)とブタ皮膚由来 I 型コラーゲン溶液(日本ハム)である.2 種類のβ-TCP とコラーゲンの複合系多孔体は,β-TCP 粒子をコラーゲンマトリックス中に分散させた多孔体と,焼成した β-TCP 多孔質骨格構造内にコラーゲン多孔体を導入した 2 相系の多孔体である.β-TCP 粒子分散コラーゲン (以下,分散型と呼ぶ)は、コラーゲン水溶液にβ-TCP 粉末を分散させ、-80℃で予備凍結後、-50℃で凍結 乾燥を行うことで作製した.一方、β-TCP/コラーゲン 2 相型(以下、2 相型と呼ぶ)は、テンプレート法を 用いてβ-TCP の連通多孔体を焼成後、コラーゲン溶液に浸漬して凍結乾燥により作製した.多孔質構造と複 合構造の評価のために、FE-SEM を用いた微視構造観察を行った.次に、作製した scaffold にラット間葉系 幹細胞(rMSC,KE-400)を 1.0×10⁵ 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、 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.一定期間ごと に試料を採取し、細胞数、ALP 活性、骨分化マーカの測定、および FE-SEM による表面観察を行った.

### 3. 結果と考察

多孔質構造と表面形態の FE-SEM 画像を図1に示す.図1(a)に示すように,分散型は良好な連通多孔質構 造を形成しており,β-TCP 微粒子がコラーゲンマトリックス中に密に分散していることがわかる.一方,図 1(b)に示すように,2相型では,β-TCP の骨格構造内にコラーゲンの多孔質構造が形成されている.また,多 孔質構造を形成するβ-TCP の柱構造は,小図に示すように,β-TCP 粒子の結合体として構築されており,粒 子間の空隙にはコラーゲンが充填されていることがわかる.





(b)  $\beta$ -TCP/collagen 2-phase

Fig.1 FE-SEM images of porous microstructure and surface morphology.

scaffold 内での rMSC の培養に伴う圧縮弾性率の変化を図 2 に示す. 図 2(b)は、2 種類の複合系 scaffold の 細胞を播種した場合と未播種のまま培地に浸漬した場合の圧縮弾性率の変化率を示している. ここで、変化 率は、培養開始(あるいは培地浸漬)直後の弾性率を基準としている. 図 2(a)より、2 相型の弾性率は、分 散型(初期弾性率は約 9 kPa)よりもはるかに大きく 20 倍程度の違いがある. 2 相型は、焼成したβ-TCPの 骨格構造が圧縮変形に抵抗するのに対し、分散型では、β-TCP 粒子による強化効果があるものの、コラーゲ ンがマトリックスであるために、弾性率の差は大きくなっている. 図 2(b)より、分散型では、rMSC の培養 により弾性率が大きく増加する. 細胞を播種しない scaffold のみの場合も弾性率は増加する傾向にあるが、 この原因としては、培地が多孔質構造内に充填されることによる硬化効果によると思われるが、その詳細は 明らかではない. 一方、2 相型では、細胞が未播種の場合は弾性率の変化は小さい. 細胞を播種すると 14 日 目までは弾性率は減少する傾向にあるが、この原因として、rMSC の存在がβ-TCP 骨格の分解を促進してい る可能性が考えられる.しかし、14 日目以降、rMSC の増殖、分化とそれに伴う細胞外基質の形成(主に、I 型コラーゲンと炭酸アパタイトの形成)により、構造が強化され、弾性率は上昇する.なお、2 相型の圧縮 強度は、培養7日目で少し減少した後、28日目まで増加する傾向を示しており、細胞外基質の形成が強度の 上昇に大きく寄与していることが示唆された.



Fig.2 Variation of compressive modulus and rate of change.

細胞数, ALP 活性およびオステオカルシンの変化を図3に示す.ここで, ALP 活性は、リン酸エステル化合物を分解する酵素であり、骨芽細胞において活発に分泌される.また、オステオカルシンは、非コラーゲン 性タンパク質であり、骨芽細胞において活発に生成される.図3(a)より、細胞数は、14日目以降に逆転し、 2相型の方が優れた増殖挙動を示しているが、これは、2相構造のために細胞増殖のための足場がより広い面 積で確保されているためだと考えられる.一方、ALP 活性は、28日目を除いて終始分散型の方が高い.また、 オステオカルシンについても分散型の方が高く、その差は大きい.分散型には、未焼成のβ-TCP 粒子が多く 含まれており、β-TCP はカルシウムイオンとリン酸イオンに分解する.これらのイオンは、rMSC の骨芽細 胞への分化を促進すると共に、細胞外基質の形成をも促進することが考えらえる.一方、2相型の焼成した β-TCP では、イオン分解が抑制されており、rMSC の活性化の度合いが小さいことが考えられる.

以上の結果より,β-TCP/コラーゲン2相型は,β-TCP 粒子分散コラーゲンよりも高い圧縮弾性率を示して おり,移植後の周辺部の骨組織との力学的適合性という観点からは,分散型よりも優れていることが考えら れる.一方,rMSC の骨芽細胞への分化とそれに伴う細胞外基質の形成に関しては,分散型の方が優れてい ることが分かった.



Fig.3 Variations of cell viability, ALP activity and osteocalcin.

# 3次元膝関節モデルを用いた人工膝関節の力学的応答性評価

愛媛大学大学院医学系研究科 三浦裕正

### 1. Introduction

Mobile bearing TKA has been designed to facilitate high conformity at tibiofemoral articulations without compromising the need of natural knee kinematics associated with the range of motion (ROM) and tibial rotation. Existance of second articulation at insert-tray interfaces has reduced cross-shear at PE insert, hence decrease wear and delamination and at same time reduce constraint forces at implant-bone interfaces. However, previous studies reveal the wear damage has taken place at these mobile bearing interfaces. Wear damage at mobile bearing surface was reported as severe as tibiofemoral articular surface in a few recent investigations. Engh et al. analyzed tibial inserts from TKA revision and found that higher Wear Score was gained from backside surface of mobile insert. They claimed that appearance of mobile bearing articular surfaces of whereas almost similar total damage scores were achieved by both upper and lower articular surfaces of mobile insert. Both studies are consistent in suggesting that wear damage at mobile bearing articular surfaces of third body debris trapped between mobile insert and tibial component of TKA. Therefore, this study attempts to investigate the effect of surface friction at insert-tray interfaces due to third body debris to the shear stress distribution at post of mobile bearing TKA during deep bending motion.

### 2. Method & Analysis

Finite element model of mobile bearing TKA consists of 123468 elements was constructed from 3D CAD model as shown in Figure 1. The dynamic model was developed in LS-DYNA environment. The mobile insert was assumed to be elastic-plastic material and the friction coefficients of 0.04, 0.10 and 0.15 were employed to represent normal and mobile bearing interfaces with appearance of wear particles [6,7]. The action of ligaments around the knee was represented by a couple of nonlinear springs which positioned at anterior and posterior sides of knee joint. The implant was modeled to perform dynamic motion  $0^{\circ}$  to 135° of flexion angle with  $0^{\circ}$ ,  $10^{\circ}$  and  $15^{\circ}$  of tibial rotation and subjected with load of deep squatting which have been obtained using 2 dimensional model of human knee in previous research.

### 3. Results

Figure 2 shows the peak value of maximum shear stress for coefficients of friction of 0.04, 0.10 and 0.15 respectively. It can be noted that the peak value of maximum shear stress increases with increase of tibial rotation and coefficient of friction. At 10° tibial rotation, peak value of maximum shear stress with 0.04 of friction coefficient is 32 MPa rises to 36.6 MPa with 0.15 of friction coefficient. Similar tendency can be observed for  $15^{\circ}$  of tibial rotation where peak value of maximum shear stress rises from 35.3 MPa with 0.04 of friction coefficient to 40.6 MPa with 0.15 of friction coefficient.

Figure 3 depicts the dependence of maximum shear stress on flexion angle from  $0^{\circ}$  to 135°. It clearly shows that the maximum shear stress is most sensitive towards tibial rotation with 0.15, followed by 0.10 and 0.04 of friction coefficient.



Figure 1 (a) CAD model (b) FE model of mobile bearing TKA



Figure 2 Peak shear stress at the post of tibial insert at 0°, 10° and 15° tibial rotation with 0.04, 0.10 and 0.15 friction coefficient respectively.



Figure 3 History of maximum shear stress from 0° to 135° of flexion angle for (a) 0.04 (b) 0.10 (c) 0.15 of friction coefficient respectively.

# 4. Discussions & Conclusions

The results show that surface friction at insert-tray articular surfaces give significant effect on the shear stress state at tibial post during deep bending motion. When the surface friction increases, the frictional torque increases, which in turn leads to increase of force transmission between implant and bone. During tibial rotation and post-cam engagement, femoral cam induces torsional and bending moment from the transmitted force which results in high shear stress at tibial post. High conformity at tibiofemoral articular surfaces in mobile bearing TKA to lower the contact stress, however, will increase the level of cross-shear during knee motion. This condition attributes to higher wear damage at articular surface of mobile insert. Retrieval study by Engh et al. reported that total Wear Score of mobile insert articular surface was greater than Wear Score of fixed insert articular surface.

# 25 ME-21

# AlGaN 系窒化物半導体の結晶成長における熱力学解析

代表: 三宅秀人(三重大学大学院 工学研究科) 所内世話人: 寒川義裕(九州大学 応用力学研究所)

# <u>背景</u>

窒化物半導体は紫外から赤外域の LED (Light Emitting Diode) 用材料やパワーデバイス用材料と して期待されている。中でも AIN、GaN およびその混晶は、深紫外光源としての応用のみならず次 世代パワーデバイス用材料としても応用可能であり、電力の高効率利用、変換効率の低減に資する 材料である。本研究では、AIN 及び GaN を含む AlGaN 混晶を研究対象に,有機金属気相エピタキ シャル成長法 (MOVPE 法) およびハイドライド気相エピタキシャル成長法 (HVPE 法) による気 相成長の理解,混晶半導体の組成制御と転位密度の低減を目的として、AIN 成長条件の熱力学的解 析、AlGaN 組成制御,転位密度低減の効果を明らかにする。特に,AlGaN 混晶成長における気相と 表面の拡散の影響を理解し,明らかにする。

# 研究方法

本研究では、AlGaN 混晶の高品質化・組成制御を最終目的としている。最終目的の達成に向けて、 本共同利用研究では先ず AlN 単結晶の高品質化を目指す。HVPE 法を用いて AlN テンプレート上に AlN 成長のシミュレーションを行った。成長条件は圧力 5kPa,成長温度 1500 °C である。各パラメータ (HCl 及び H₂、NH₃及び H₂)を変化させ AlN 基板上での成長速度の変化、気体の流れ、温度分布を表示さ せた。HCl 及び H₂の流量を変化させるときの他のパラメータは分離ガスを H₂にし、流量を 5slm,NH₃ 及び H₂の流量は 1slm、1slm とする。NH₃及び H₂の流量を変化させるときの他のパラメータは、HCl 及び H₂の流量を 0.05slm、5slm とし、分離ガスを H₂にし、流量を 5slm とする。

また、三重大学において MOVPE 法によりサファイア基板上に AIN 膜を堆積し、九州大学におい て固体ソース溶液成長(Solid Source Solution Growth; 3SG)法により AIN 厚膜上に AIN ホモエピタ キシャル成長を行う。3SG-AIN(0001)成長では、成長中に転位がバンドル構造を形成し、その密度 が低減することが報告されている。

### 研究結果および進捗状況

図1、図2は装置の位置(ノズルの先端の位置は 565mm である)と成長レートの関係図である。HCl とそのキャリアガスである H₂の流量が多いほどデポ位置が基板に近づき、基板上での成長レートも増 加する結果が得られた。この結果が得られたのは、流量を増やしたことにより流速が増加し、ノズル先 端から遠くの距離まで反応ガスが供給されたためだと考えられる。また、NH₃とそのキャリアガスであ る H₂の流量が少ないほどデポ位置が基板に近づいたが、基板上での成長レートに大きな変化はみられ





量と成長レートのグラフ

図2.NH₃とそのキャリアガスのH₂の流量と 成長レートのグラフ

さらに、三重大学において MOVPE 法によりサファイア上 AIN テンプレートの作製を行った。図 3に作製した AIN/サファイア(0001)テンプレートの光学写真を示す。堆積した AIN の膜厚は 1μm

である。原子間力顕微鏡(Atomic Force Microscopy; AFM)による 5x5µm²範囲の表面観察では、AlN 表面 の凹凸は~0.26nmであった。XRC(X-ray Rocking Curve) プロファイルから、(002)反射の半値幅(Full Width at Half Maximum; FWHM)は 108 arcsec、(102)反射の FWHM は 665 arcsec であった。谷保ら[1]により、 XRC-FWHM と転位密度の相関は以下の式で記述され ている。



図3 AlN/サファイアテンプレートの 光学写真。

$$N_{\rm S} = \frac{\alpha_{tilt}^2}{4.35|\boldsymbol{b}_{\rm C}|^2} , N_{\rm E} = \frac{\alpha_{twist}^2}{4.35|\boldsymbol{b}_{\rm A}|^2}$$
(1)

ここで、 $N_{\rm S}$ 、 $N_{\rm E}$ はそれぞれらせん転位、刃状転位の貫通転位密度である。 $\alpha_{\rm tilt}$ および $\alpha_{\rm twist}$ はそれぞ れチルト角、ツイスト角である。 $b_{\rm C}$ 、 $b_{\rm A}$ はそれぞれ[0001]および 1/3 [11-20]バーガースベクトルで ある。式(1)により、本実験により作製した AlN/サファイア(0001)テンプレートの貫通転位密度は、  $N_{\rm S} = \sim 10^7 \, {\rm cm}^2$ 、 $N_{\rm E} = \sim 10^9 \, {\rm cm}^2$ と見積もられた。現在、この AlN/サファイア(0001)テンプレート上に 3SG-AlN ホモエピタキシャル成長を行い、貫通転位密度の低減メカニズムを解析している。

今後も共同利用研究を継続し、最終目標である AlGaN 混晶の高品質化・組成制御の技術開発を 遂行する。

# 参考文献

[1] Y. Taniyasu, M. Kasu, and T. Makimoto: J. Cryst. Growth 298 (2007) 310.

# 25 ME-22

# サッカーボールの空力特性を求める風洞実験と発射実験

福岡工業大学 工学部 知能機械工学科 溝田武人

### 1. 緒言

サッカーの試合で放たれるシュートには主に2種類があ る. ブレ球と呼ばれる, 揺れながら飛翔するサッカーボール のメカニズムについては解明できた¹⁾.一方,回転飛翔する サッカーボールのメカニズムは風洞内でボールを滑らかに 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,精度の高い成果は得られていない.

そこで、サッカーボールを風洞気流中で滑らかに回転させ、 さらに様々な回転軸の方向について空気力を測定できる機 構を開発した^{2)~4)}.それにより回転するサッカーボールに加 わる空気力の測定実験の再現性を確かめた.さらに、選手が 蹴った飛翔データを解析し、風洞実験での実験手順に適用し た.

#### 2. 座標系と関係する無次元量



( $\phi$ :Yawing angle ,  $\theta$ :Pitching angle) Fig.1 Coordinate system

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)と進行方向および回転軸の方向の関係を図.1 に定義する.また,抗力係数 $C_p$ , 揚力係数 $C_i$ , 横力係数 $C_s$ は 下記のように定義され, これらはレイノルズ数 Re およびス ピンパラメータ Sp でまとめられる.なお, ボール直径は d=0.215[m]および, ボール質量は m=0.437[kg]である.



#### 3. 空気力検出機構と実験の手順

#### 3.1 空気力検出機構

風洞内でボールをセットするときの支持機構を図.2,図.3 に示す.この支持機構でのキャリブレーション結果によると, 出力電圧の直線性が得られており,他方向への干渉も少な かった.固有振動数は17[Hz]程度であった.

ボールを吊っているピアノ線(図.2)の太さを 0.45[mm]から 0.55[mm]に変更し,強度を強くした.さらに,一辺 400[mm] のピアノ線の枠を一辺 450[mm]の枠に変更して,回転軸の方 向を正確にセットするための補助治具を挿入できるように した.図4.図5.に様々な回転軸の方向を正確にセットするた めに新たに製作した補助治具を示す.



Fig.2 Set-up system (Back view)

Fig.3 Set-up system in wind tunnel (Back view)





ig.4 Apparatus for changing the axis of rotation (Back view)

Fig.5 Photo of this apparatus (Back view)

#### 3.2 おもり付加による回転バランスの改良

昨年度使用した実験用サッカーボールは静バランスをと るためにボールの回転軸に垂直な赤道円周上の1ヶ所におも りを埋め込んでいた.しかし静バランスがとれていなかった ので,回転軸に垂直な赤道円周上の3ヶ所(120° おき)におも り(合計1.7g)を調整しながら埋め込み,静バランスの問題を 解消した.なお,この回転系は無風時に10[rps]から0[rps] まで10分間程度の時間で安定にゆっくりと回転減衰した.

#### 3.3 風洞実験の手順

風速 U(0.5~30[m/s])を設定する.サッカーボールに ジェット流を当てることにより初期回転(C.W., C.C.W.)を与 える.ジェット流は風洞床下からエアーノズルを伸ばし噴射 する.後述の表.1のデータを参考にボールを 10[rps]まで回 転させ,回転減衰時の3分力の測定を行う.

ボールの回転軸を( $\phi$ ,  $\theta$ )=(0°,0°),( $\phi$ ,  $\theta$ )=(90°,0°),( $\phi$ ,  $\theta$ )=(0°,90°)と変更させて測定を行った.

### 4. 実験結果

#### 4.1 選手が蹴ったボールの飛翔データ

選手が蹴ったボールの測定値を表.1に示す.キッカーは東 海大学付属第五高等学校サッカー部(全国大会出場レベル) の10名で,1人15球ずつ計150球の測定を行った.これらの 結果,ボール速度は最大 30[m/s],ボール回転数は最大 9.7[rps],合成飛距離は最大60.6[m]であることがわかった.

#### Table.1 Kicked by high school players

	Ball speed [m/s]	Ball spin rate [rps]	Distance[m]
	(Range)	(Range)	(Range)
Corner kick	22.4	5.5	40.3
	(18.9~26.9)	(3.2~7.5)	(30.0~49.3)
Free kick	26.0	5.1	24.4
	(19.2~30.0)	(1.2~9.7)	(24~25.1)
Side change kick	24.3	5.6	49.3
	(19.7~27.8)	(3.1~7.9)	(39.9~60.6)

#### 4.2 風洞実験結果

次の各グラフは風速 20[m/s],  $\phi = 0^{\circ} \theta = 0^{\circ}$ 時の昨年度の 回転減衰(図.6),本年度の回転減衰(図.7)の計測結果である. また,図.8 は本年度の測定結果を Sp によってまとめたもの である. ノイズが少ない精度のよい C_{D,}C_L,C_s-Sp の測定結果が 得られた.



Fig.6 Rotational speed – Time ('12)



Fig.7 Rotational speed—Time ('13)



Fig.8 Aerodynamics characteristics with change of Sp

#### 4.3 風洞実験の軌道計算と発射実験の軌道解析の比較

風洞実験の空気力から求めた飛翔軌道を、屋内で行った発 射実験で得た飛翔軌道と比較した.回転方向が C.C.W. で N= 6 [rps],  $U_0=22.8$  [m/s] で発射した時のボールのストロ ボ画像を図.9 に示す.

図.10の(a)にストロボ画像から求めた軌道, (b)にU =22.5 [m/s]時の風洞実験で得られた空気力から求めた軌道 のTop viewを示す.



Fig.9 Orbital flight of a soccer ball



Fig.10 Comparison of orbital flight

発射装置から発射したボールの画像解析により求めた飛 翔軌道と風洞実験の空気力から求めた飛翔軌道では同様の カーブした軌道が得られた.

#### 5. 結言

- 1)回転するサッカーボールに加わる空気力の測定の精度改 善に成功した.
- 2)回転軸の方向を正確にセットし風洞実験を行うことができた.
- 3)発射装置で発射した時の軌道と,風洞実験の空気力から求 めた軌道は両者ほぼ一致した.

#### 6. 謝辞

本研究の遂行に際し、ご協力を頂きました大屋裕二先生(九大 応力研所長),渡辺公彦先生(九大)に感謝致します.

#### 参考文献

- 1)Taketo Mizota, Kouhei Kurogi, Yuji Ohya, Atsushi Okajima, Takeshi Naruo & Yoshiyuki Kawamura "The strange flight behavior of slowly spinning soccer balls", Nature, Scientific Reports, Volume: 3, Article number: 1871, 2013, DOI: doi : 10.1038/srep01871
- 2)趙凌波, "風洞実験と数値シミュレーションによるサッ カーボールの空気力学", 平成 24 年度修士論文, 福岡工業 大学
- 3)吉田晴信,中村啓佑, "風洞気流中で回転するサッカーボー ルに加わる空気力の測定(軌道解析と発射実験)", 平成 24 年度卒業論文,福岡工業大学
- 4)福田尚輝,朝倉孝文,"回転飛翔するサッカーボールの空力 測定システムの開発(回転軸方向の変化と風洞実験)",第 91期日本機械学会流体工学部門講演会論文集,九州大学

#### 7. あとがき

本年度をもって、申請者は福岡工業大学を定年退職する。 サッカーボールの空気力学的な研究は応用力学研究所の 大気動態風洞による実験的な研究でした行えない.参考文 献 1)に記した研究成果が生み出せたことを大きな喜びと したい.測定装置一式は、同志社大学平田勝哉教授に譲渡 したので、今後回転するサッカーボールの研究成果が生ま れることを期待している. 25 ME-S1

# 第6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26年1月24日(金) 13:00~17:00 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す。

1.13:00~13:05
 はじめに 九大院工 田中 悟

2. 13:05~13:35 (30分)

福井大学院工 橋本 明弘 氏

「グラフェン上窒化物半導体単結晶成長の現状」

最近, Pulsed Sputtering Deposition (PSD)法や RF-MBE 法によるグラフェン上の窒化物半導体 薄膜のエピタキシャル成長の研究が進展し始めており,エピタキシャル成長技術の発展の観点から は、2次元結晶系上への3次元結晶系のエピタキシャル成長という,従来とは質的に異なる観点か らの新たな界面制御法の導入という点で興味深い.本講演では、これまでのグラフェン上の窒化物 半導体薄膜のエピタキシャル成長の研究状況と最近の我々の研究について紹介する.

3.  $13:35 \sim 14:05$  (30分)

宇部高専 碇 智徳 氏

「準安定原子誘起電子分光法によるSi/6H-SiC(0001)表面構造変化に伴う最表面電子状態抽出」 Siを吸着した6H-SiC(0001)基板を加熱すると基板温度に伴い複数の表面構造をとる.ここでは、最 表面電子状態抽出に非常に有効な手段である準安定原子誘起電子分光法を用いて、(3×3)やグラフ ェン等の構造変化に伴う電子状態の観測結果を報告する.

4. 14:05~14:35 (30分)

NTT 基礎研 佐々木 健一 氏

「グラフェンにおけるプラズモン伝搬のシミュレーション」

ゲート電極がついたグラフェンにおけるプラズモン伝搬をRLC等価回路を用いてシュミレーション した結果,および実験結果との比較について報告する.プラズモン伝搬に対する抵抗の効果を回路 の連続体近似を用いて解析し,伝搬速度を決めるメカニズムを説明する.

5. 14:50~16:20 (30分)

AIST/富士通研究所 林 賢二郎 氏

「Cu表面におけるグラフェンの形成過程と面配向依存性」

本研究では、グラフェンの成長機構に及ぼす Cu 表面の面指数やモフォロジーの影響について調べている.当日は、Cu表面におけるグラフェンの初期形成過程と、面配向に依存するグラフェン島の形状、および、ドメイン構造について議論する.

 $6. \ 1 \ 6 : \ 2 \ 0 \ \sim \ 1 \ 6 : \ 5 \ 0 \ (\ 3 \ 0 \ \%)$ 

NTT 基礎研 日比野 浩樹 氏

「グラフェン/BN ヘテロ構造の作製と評価」

ヘテロエピタキシャル金属薄膜上に化学気相成長したBNと、その上にグラフェンを転写することにより作製したグラフェン/BNヘテロ構造を、LEEMによって構造解析した結果について報告する.

7. 16:50~17:20 (30分)

名大院工 乗松 航 氏

「透過型電子顕微鏡によるSiC表面上グラフェンの結晶学的研究」

SiCの熱分解により、その表面にはグラフェンが自発的に成長する.本講演では、透過型電子顕微 鏡を用いてSiC上グラフェンの結晶学的特徴を原子レベルで明らかにした結果について報告する. また最近の成果として、グラフェン成長の分子動力学計算の結果や他の炭化物からのエピタキシャ ルグラフェン成長についても報告する.

8.  $17:20 \sim 17:50$  (30 $\beta$ )

東大物性研 小森 文夫 氏

「SiC 上のグラフェンナノリボンのバンドギャップ形成」

SiC上に形成したグラフェンナノリボン列の電子状態をARPESで調べた. 水吸着に よるドーピング を行うことで $\pi$ *バンドを観察し,幅10nmのナノリボンのバンド ギャップは0.6eV以上となること を確認した.

9. 17:50~18:10 (20分)

九大院工 木本 真一/田中 悟

「田中研の最近の話題/グラフェンナノリボン, Si インターカレーション」

SiC 上に成長したグラフェンナノリボンのエッジ状態制御の可能性やバッファー層/SiC 界面への Si インターカレーションによって変調されたグラフェンの電子状態などについて紹介する.

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6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26年1月24日(金) 13:00~17:00 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. 13:00~13:05 はじめに 九大院工 田中 悟

13:05~13:35(30分)
 福井大学院工 橋本 明弘 氏
 「グラフェン上窒化物半導体単結晶成長の現状」

3.13:35~14:05(30分)
 宇部高専 碇 智徳 氏
 「準安定原子誘起電子分光法によるSi/6H-SiC(0001)表面構造変化に伴う最表面電子状態抽出」

4.14:05~14:35(30分)
NTT 基礎研 佐々木 健一 氏
「グラフェンにおけるプラズモン伝搬のシミュレーション」

一 休憩 一

5.14:50~16:20(30分)
 AIST/富士通研究所 林 賢二郎 氏
 「Cu表面におけるグラフェンの形成過程と面配向依存性」

6.16:20~16:50(30分)
 NTT 基礎研 日比野 浩樹 氏
 「グラフェン/BN ヘテロ構造の作製と評価」

7.16:50~17:20(30分)
 名大院工 乗松 航 氏
 「透過型電子顕微鏡によるSiC表面上グラフェンの結晶学的研究」

8.17:20~17:50(30分) 東大物性研 小森 文夫 氏 「SiC 上のグラフェンナノリボンのバンドギャップ形成」

9.17:50~18:10(20分) 九大院工 木本 真一/田中 悟 「田中研の最近の話題/グラフェンナノリボン, Si インターカレーション」

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)