

# **共同利用研究成果報告**

**第 18 号**

**平成26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 18 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、2014 年度も特定研究 39 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、2015 年 6 月 4 日～5 日に開催される「RIAM フォーラム 2015」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 2014 年度は 9 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。

2015 年 3 月  
九州大学応用力学研究所  
所長 大屋 裕二



## 目 次

平成 26 年度共同研究一覧 .....	i
平成 26 年度研究集会一覧 .....	vii
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 .....	89
新エネルギー力学分野共同研究成果報告 .....	215



## 平成26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 協力者数	頁
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		
26特1-1	サブ テ ー マ	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	広瀬 直毅 3名 1
26 特 1-2		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	千手 智晴 2名 3
26 特 1-3		海洋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 鬼塚 剛	松野 健 3名 5
26 特 1-4		対馬暖流第一分枝流と第二分枝流の観測	名古屋大学 森本 昭彦	市川 香 1名 7
26 特 1-5		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 富田 裕之	千手 智晴 3名 9
26 特 1-6		対馬海峡から日本海山口県沖にかけての海洋 環境モニタリング	水産大学校 滝川 哲太郎	千手 智晴 4名 11
26 特 1-7		東シナ海・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 石坂 丞二	松野 健 6名 13
一般研究				
26A0-1	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 有馬 正和	中村 昌彦 3名	17
26A0-2	PM2.5エアロゾル濃度変動に関わるNH <sub>3</sub> /NH <sub>4</sub> の動態 解明に関する研究	名古屋大学 長田 和雄	鶴野 伊津志 2名	25
26A0-3	洋上および海中を航走するビークルに働く流体力解 析・機体挙動に関する研究	海洋研究開発機構 百留 忠洋	中村 昌彦 4名	27
26A0-4	越前沿岸域の表層流に関する研究	福井県立大学 兼田 淳史	千手 智晴 2名	29
26A0-5	漁船情報を利用した日向灘海況情報提供に関する研 究	宮崎県水産試験場 渡慶次 力	広瀬 直毅 4名	31
26A0-6	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 水田 元太	広瀬 直毅 14名	33
26A0-7	海洋乱流の観測およびモデリング研究	京都大学 吉川 裕	松野 健 15名	35
26A0-8	海洋表層境界層における乱流混合の観測	京都大学 吉川 裕	松野 健 3名	37
26A0-9	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 山口 悟	中村 昌彦 3名	39

26A0-10	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	気象研究所 弓本 桂也	鶴野 伊津志 3名	41
26A0-11	複合雲解析アルゴリズムのための衛星赤外サウンダを使った水蒸気プロファイル解析手法の開発	気象研究所 石元 裕史	岡本 創 2名	45
26A0-12	水中ビークル運用のための装備に関する研究	長崎大学 兼原 壽生	中村 昌彦 8名	47
26A0-13	東アジア域における大気エアロゾルの気候影響に関する研究	富山大学 青木 一真	竹村 俊彦 2名	49
26A0-14	地上ライダーネットワークおよび衛星搭載ライダーデータを用いたエアロゾル光学特性の時間空間変動研究	国立環境研究所 西澤 智明	岡本 創 4名	51
26A0-15	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 郭 新宇	松野 健 2名	53
26A0-16	有明海における潮流と成層構造に関する観測的研究	愛媛大学 堤 英輔	松野 健 1名	55
26A0-17	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 眞部 広紀	中村 昌彦 2名	57
26A0-18	強非線形・強分散内部波の相互干渉	鹿児島大学 柿沼 太郎	辻 英一 3名	59
26A0-19	東シナ海陸棚域における海底境界層の栄養塩輸送過程	富山大学 張 勁	松野 健 3名	61
26A0-20	対馬暖流の長期変動と回遊性魚類の漁場変化	福岡県水産海洋技術センター 安藤 朗彦	広瀬 直毅 2名	63

核融合力学分野

番号	研究課題	代表者名	所内世話人 協力者数	頁	
特定研究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	統括責任者 伊藤 早苗		89	
26特2-1	サ ブ テ ー マ	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 居田 克巳	稲垣 滋 1名	91
26特2-2		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 徳沢 季彦	稲垣 滋 2名	93
26特2-3		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	高崎工業高等専門学校 谷澤 俊弘	糟谷 直宏 2名	95
26特2-4		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 田村 直樹	稲垣 滋 9名	97
26特2-5		デジタルコリレーションECEの開発とプラズマ実験への適応	核融合科学研究所 土屋 隼人	稲垣 滋 1名	99
26特2-6		プラズマ乱流データ解析研究会	九州大学 稲垣 滋	伊藤 早苗 22名	101

26特2-7		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 金子 俊郎	稲垣 滋 4名	103
26特2-8		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 大館 暁	稲垣 滋 4名	105
26特2-9		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 福山 淳	佐々木 真 2名	107
26特2-10		トラス装置における乱流計測の為にプローブ開発とそのデータ解析手法の検討	京都大学 大島 慎介	稲垣 滋 6名	109
26特2-11		直線磁化プラズマにおけるストリーマー構造の解析	東京大学 山田 琢磨	稲垣 滋 3名	111
26特2-12		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 井戸 毅	稲垣 滋 3名	113
26特2-13		レーザー光波面の乱れを利用したプラズマの乱流計測手法とデータ処理方法の開発	核融合科学研究所 秋山 毅志	稲垣 滋 2名	115
特定研究3					
		光・ミリ波・マイクロ波を用いた計測技術・解析モデルの開発とその応用に関する研究	統括責任者 出射 浩		117
26特3-1	サブ テ ー マ	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 山本 真之	岡本 創 4名	119
26特3-2		リアルタイム画像生成のための合成開口レーダ解析と応用	九州大学 間瀬 淳	出射 浩 8名	121
26特3-3		光・電磁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 出射 浩	出射 浩 21名	123
26特3-4		高域混成共鳴層近傍における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 伊神 弘恵	出射 浩 4名	127
26特3-5		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	出射 浩 4名	129
26特3-6		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	出射 浩 2名	131
一般研究					
26FP-1		高エネルギーイオン照射によるタンゲステン中の照射欠陥回復温度依存性と水素同位体滞留ダイナミクス	静岡大学 大矢 恭久	渡辺 英雄 6名	133
26FP-2		真空プラズマ溶射法で作製したタンゲステンの特性評価	京都大学 木村 晃彦	渡辺 英雄 4名	135
26FP-3		カスケード損傷下における空孔型欠陥のクラスター形成に及ぼす共存水素同位体の影響	富山大学 波多野 雄治	渡辺 英雄 4名	139
26FP-4		ヘリウムイオン/プラズマ照射したタンゲステンにおけるヘリウムバブル形成挙動の系統的観察	島根大学 宮本 光貴	渡辺 英雄 4名	143
26FP-5		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 山口 正剛	大澤 一人 1名	145
26FP-6		金属間化合物合金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	大阪府立大学 堀 史説	大澤 一人 2名	147

26FP-7	圧力容器鋼の磁気特性に与えるイオン照射効果	岩手大学 鎌田 康寛	渡辺 英雄 4名	149
26FP-8	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 糟谷 紘一	徳永 和俊 2名	151
26FP-9	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 時谷 政行	渡辺 英雄 2名	153
26FP-10	タングステンの水素吸蔵に対する表面改質効果に関する研究	筑波大学 坂本 瑞樹	渡辺 英雄 9名	155
26FP-11	輸送コードに導入するためのジャイロ運動論解析を用いた熱拡散係数のモデリング	核融合科学研究所 登田 慎一郎	糟谷 直宏 3名	157
26FP-12	乱流計測シミュレータによるジャイロ運動論的シミュレーション・データの数值乱流計測	核融合科学研究所 沼波 政倫	糟谷 直宏 3名	159
26FP-13	SiO <sub>2</sub> 中におけるヘリウムイオン照射効果	琉球大学 岩切 宏友	渡辺 英雄 4名	161
26FP-14	タングステンの力学特性に及ぼすヘリウムまたは水素の影響	京都大学 徐 虬	徳永 和俊 2名	163
26FP-15	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 成行 泰裕	佐々木 真 2名	165
26FP-16	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	糟谷 直宏 4名	167
26FP-17	高温構造材料の重イオン照射による組織変化初期過程と中性子照射との相関	核融合科学研究所 室賀 健夫	渡辺 英雄 3名	169
26FP-18	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 高木 郁二	凶子 秀樹 3名	171
26FP-19	QUESTスクレイプオフ層における原子密度・速度局所計測のための近赤外干渉分光器の開発	京都大学 四竈 泰一	凶子 秀樹 3名	173
26FP-20	高温プラズマ曝露炉内機器の表面変質と損傷に関する総合的研究	九州大学 吉田 直亮	渡辺 英雄 5名	175
26FP-21	構造材料中の水素挙動に及ぼす照射損傷の影響	茨城大学 車田 亮	渡辺 英雄 3名	179
26FP-22	タングステン材料の高熱流束負荷下における損傷変化と熱応力評価	茨城大学 車田 亮	徳永 和俊 4名	181
26FP-23	多孔質金属膜における水素捕捉・放出挙動に関する研究	九州大学 片山 一成	渡辺 英雄 4名	183
26FP-24	ヘリウム照射によるタングステンの損傷組織形成に及ぼす照射温度の影響	核融合科学研究所 坂本 隆一	花田 和明 3名	185
26FP-25	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5)	日本原子力研究開発機構 井上 利彦	渡辺 英雄 2名	187
26FP-26	VUV分光法を用いたQuest装置におけるECHプラズマでの希ガス不純物の振舞いに関する研究	核融合科学研究所 森田 繁	凶子 秀樹 5名	191
26FP-27	プラズマ輸送理論	核融合科学研究所 伊藤 公孝	稲垣 滋 22名	193
26FP-28	先端電子顕微鏡を用いた粒界破壊の動的観察実験	東北大学 松川 義孝	渡辺 英雄 1名	197

26FP-29	D-C-N反応性低温プラズマによる炭素堆積膜中への水素同位体吸蔵制御	金沢大学 上杉 喜彦	中村 一男 4名	199
26FP-30	燃料電池用水素吸収・貯蔵リチウムセラミックス材料中の水素の熱放出特性	名城大学 土屋 文	徳永 和俊 1名	201
26FP-31	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 橋爪 健一	渡辺 英雄 5名	203
26FP-32	酸化物・窒化物結晶における照射欠陥形成およびその安定性	九州大学 安田 和弘	渡辺 英雄 4名	205

#### 新エネルギー力学分野

番号	研究課題	代表者名	所内世話人協力者数	頁
特定研究4				
	創エネ・省エネに資する先端材料開発に関する研究	統括責任者 寒川 義裕		
26特4-1	AlN系窒化物半導体の基板作製と結晶成長の熱力学解析	三重大学 三宅 秀人	寒川 義裕 1名	215
26特4-2	AlGaN系窒化物半導体結晶成長研究会	東北大学 福山 博之	寒川 義裕 3名	217
26特4-3	SiC表面における酸化膜形成過程の解明	宇部工業高等専門学校 碓 智徳	寒川 義裕 1名	221
26特4-4	SiC結晶中におけるらせん転位周りの圧力分布解析	三重大学 河村 貴宏	柿本 浩一 3名	223

番号	研究課題	代表者名	所内世話人協力者数	頁
特定研究5				
	海洋エネルギー取得のための新型海洋構造物に関する研究	統括責任者 胡 長洪		
26特5-1	洋上複合エネルギーファームの開発	広島大学 岩下 英嗣	胡 長洪 11名	225
26特5-2	洋上風車用大型三角形セミサブ浮体構造の構造強度に関する研究	九州大学 安澤 幸隆	胡 長洪 5名	231
26特5-3	荒天下にて浮体式洋上風力発電プラットフォームの係留索に働く最大張力の推定	神戸大学 橋本 博公	末吉 誠 3名	235
26特5-4	自由界面と移動構造物を含む高性能多相流体数値モデルの開発	東京工業大学 肖 鋒	胡 長洪 3名	237
26特5-5	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 永田 修一	胡 長洪 3名	239

26 特 5-6		海流発電タービンの発電特性に関する研究	沖縄学術大学院大学 白澤 克年	胡 長洪 4名	241
26 特 5-7		日本南岸での黒潮を利用した海流発電の適地選定に関する研究	鹿児島大学 山城 徹	胡 長洪 4名	243
26 特 5-8		波浪中浮体の流体力と波動場の高精度計測技術に関する研究	広島大学 岩下 英嗣	胡 長洪 8名	245
26 特 5-9		海流発電用レンズ水車のブレードに関する開発研究	九州大学 経塚 雄策	胡 長洪 4名	255
一般研究					
26ME-1		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 真壁 朝敏	新川 和夫 4名	257
26ME-2		レンズ風車の負荷制御の最適化と集風構造体の振動特性との関係	鹿児島工業高等専門学校 小田原 悟	烏谷 隆 2名	259
26ME-3		風レンズ風車用の炭素繊維強化複合材(CFRP)の衝撃特性評価	岡山理科大学 横山 隆	新川 和夫 3名	261
26ME-4		カルコパイライト型化合物半導体太陽電池基板の作製と電気物性評価	宮崎大学 吉野 賢二	柿本 浩一 2名	265
26ME-5		電磁波遮蔽材料の創製とその評価法の確立	信州大学 倪 慶清	汪 文学 1名	269
26ME-6		洋上エネルギープラントへの輸送用航空機の流力に関する研究	広島大学 岩下 英嗣	胡 長洪 4名	271
26ME-7		CT-FEMを用いた臼蓋形成不全及び臼蓋後捻のバイオメカニクスの検討	九州大学 中島 康晴	東藤 貢 3名	281
26ME-8		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 古谷野 潔	東藤 貢 4名	283
26ME-9		複合系scaffoldと間葉系幹細胞のハイブリッド化による骨・軟骨再生研究	大阪大学 名井 陽	東藤 貢 3名	285
26ME-10		突発性大腿骨頭壊死症のバイオメカニクスの検討	横浜市立大学 稲葉 裕	東藤 貢 3名	287
26ME-11		CT-FEMを用いた骨粗鬆化脊椎に生じる圧迫骨折のメカニズムに関する研究	順天堂大学 米澤 郁穂	東藤 貢 3名	289
26ME-12		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 三浦 裕正	東藤 貢 2名	291
26ME-13		ワイドギャップ半導体ダイヤモンド単結晶の面積化に向けた結晶成長と結晶構造評価に関する研究	佐賀大学 嘉数 誠	柿本 浩一 6名	293
26ME-14		翼負荷分布および風レンズ形状が最適化されたレンズ風車の空力性能	九州大学 古川 雅人	大屋 裕二 3名	295
26ME-15		LESモデルRiam-Compactとメソ気象モデルWRFによる複雑地形上の局地風解析とその精度検証	東京農工大 辰己 賢一	内田 孝紀 2名	301
26ME-16		地熱・風力ハイブリッド発電システムの開発	九州大学 糸井 龍一	大屋 裕二 3名	303

## 平成26年度研究集会一覧

### 地球環境力学分野

番号	研究課題	代表者名	所内世話人 講演・参加者数	開催場所	開催日 (平成)	頁
26A0-S1	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	原 由香里 19件、60名	筑紫キャンパスG棟	26年12月 11-12日	65
26A0-S2	非線形波動研究の現状-課題と展望を探る-	青山学院大学 増田 哲	辻 英一 30件、70名	C-Cube 筑紫ホール	26年10月30- 11月1日	69
26A0-S3	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	長崎大学 万田 敦昌	広瀬 直毅 13件、53名	応用力学 研究所	26年12月 11-12日	75
26A0-S4	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 藤井 智史	市川 香 14件、93名	応用力学 研究所	26年12月 10-11日	81
26A0-S5	東シナ海の循環と混合に関する研究	名古屋大学 石坂 丞二	松野 健 7件、14名	応用力学 研究所	27年2月2日	85

### 核融合力学分野

番号	研究課題	代表者名	所内世話人 講演・参加者数	開催場所	開催日 (平成)	頁
26FP-S1	各種磁場配位での周辺揺動研究	広島大学 西野 信博	関子 秀樹 5件、7名	QUEST 棟 会議室	27年2月13日	207
26FP-S2	第12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 23件、29名	応用力学 研究所	26年12月 11-12日	209
26FP-S3	第4回アジア輸送ワーキンググループ国際会議	九州大学 稲垣 滋	伊藤 早苗 96件、59名	C-Cube 筑紫ホール	26年6月 10-13日	213

### 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・参加者数	開催場所	開催日 (平成)	頁
26ME-S1	第7回 九大グラフエン研究会	九州大学 田中 悟	寒川 義裕 9件、20名	応用力学 研究所	27年2月10日	305



平成26年度

地球環境力学分野  
共同研究成果報告



## 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

## 1. 目的

ブリは、主に3～6月に東シナ海および日本海西部海域で発生し、対馬暖流に乗って日本海沿岸各地に回遊する。石川県では、その年生まれたブリ幼魚（以下0歳魚という。）は7月には定置網で漁獲されるようになり、10月になると体重1kg前後のサイズにまで成長し高値で取引される。このようにブリ0歳魚は石川県において季節を代表する重要な魚種銘柄の1つであり、その豊凶は、漁獲金額に大きな影響を与えることから、その予測に関しては漁業者の関心が高い。

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0歳魚の漁獲量と水温との関係を調べ、相関する海域・水深・季節を明らかにすることにより、石川県における0歳魚漁獲量の予測を試みた。

## 2. 方法

1995～2013年の各月1日における水深4m, 50m, 100m, 200mのメッシュ水温値をDREAMS\_Mから抽出した。次に同年の石川県主要10港定置網におけるブリ0歳魚の漁獲量を2ヶ月単位で集計した。これらの水温と漁獲量の相関関係をそれぞれメッシュごとに求めたうえマッピングすることにより、漁獲量と関係が深いと考えられる海域や深度を抽出した。その結果から抽出された海域・深度の平均水温と漁獲量との回帰式から2014年漁期のブリ0歳魚漁獲量を予測した。

## 3. 結果および考察

10～11月漁獲量と10月1日における水深200m水温との相関係数の分布（図1a）を見ると、特に富山湾から佐渡島までの海域において有意（危険率5%）な正相関が認められた。一方、他の漁獲時期における漁獲量と各月および各水深の水温との相関係数の分布を確認したものの、能登半周辺海域に有意な相関係数は認められなかった。そこで、漁獲量の集計期間を10～3月に延ばして、10月1日における水深200m水温との相関係数の分布を見たところ、富山湾周辺に有意な相関係数の分布が認められた（図1b）。これらの結果から、東経137度30分以西、北緯37度30分以南の富山湾を漁獲量と関係のある海域と設定し、当該海域の平均水温を年ごとに求めた。その平均水温と10～3月漁獲量とを線形回帰分析したところ、以下の回帰式が得られた。

$$\text{Catch} = 136 \times \text{Temp} + 147$$

Catch：石川県主要10港定置網における10～3月ブリ0歳魚漁獲量（トン）

Temp：DREAMS\_Mにおける富山湾海域に10月1日水深200m水温の平均値（℃）

上記式にDREAMS\_Mによって得られた、2014年10月1日200m予測水温の富山湾平均値6.40℃を代入した結果、2014年10月～翌年3月のブリ0歳魚予測漁獲量として723トンが見積もられた。この予測結果を、同年9月30日に石川県水産総合センター「石川県漁海況情報」によって発表した。

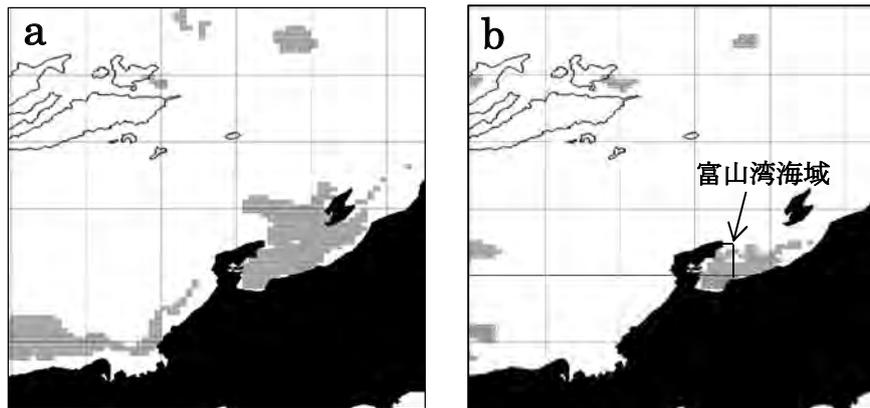


図1. ブリ0歳魚漁獲量と10月1日200M水温とに有意な正の相関係数が見られた海域（灰色）  
a：10～11月漁獲量，b：10～3月漁獲量

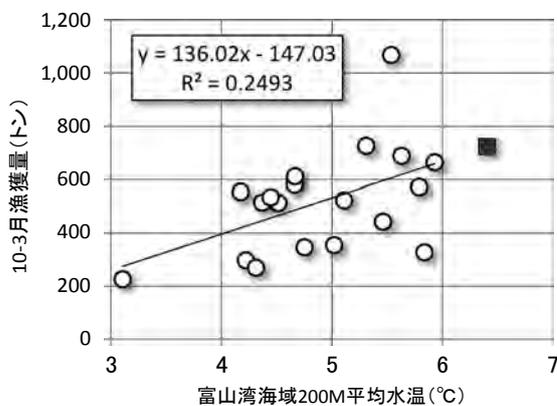


図2. 富山湾海域の平均水温と10～3月漁獲量との関係  
○：1995～2013年実績値，■：2014年予測値

#### 4. 発表等実績.

辻 俊宏 対馬暖流域におけるブリ卵・仔稚魚の輸送シミュレーション. RIAM フォーラム 2014 講演集, 2014.53-57.

辻 俊宏 平成26年度のブリ漁況予測と今後の見通しについて. 第54回ブリ予報技術連絡会議, 2014.10.6-7, 敦賀市

石川県水産総合センター フクラギの漁況見通し(予測期間:10月から来年3月). 石川県漁海況情報, 2014.

#### 5. 研究組織

研究代表者	石川県水産総合センター	辻 俊宏	研究主幹
所内世話人	九州大学応用力学研究所	広瀬 直毅	教授
研究協力者	石川県水産総合センター	石山 尚樹	技師
研究協力者	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	高山 勝己	研究員

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周辺の定置網漁場に配置された係留系の流れ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（以下沿岸分枝流量）と、輪島～舳倉島間の水位差には、有意な正の相関があり、水位差から沿岸分枝流量の推定が可能である。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、これらの 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値を算定した。沿岸の流れのデータは、図 1 に示す石川県西岸から富山湾沿岸の 12 ヶ所の観測点（水深 24～91m）の 10m 水深帯に係留した電磁流速計（JFE アドバンテック AEM-RS/C-EM）で観測された毎正時のデータを用いた。解析期間は 2010 年から 2013 年である。

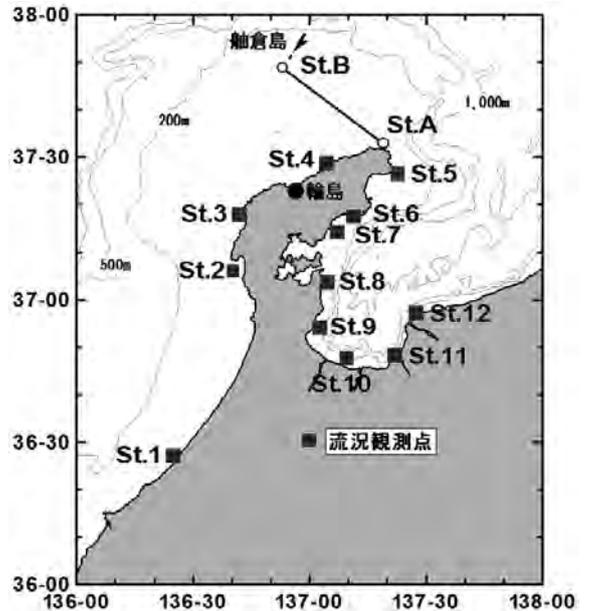


図 1 調査海域図 実線は流量計算区間を示す。

結果と考察

沿岸分枝流量と各測点における卓越流向成分の経月変動を図 2 に示す。沿岸分枝流量の変動と卓越流向成分の変動を比較すると、能登半島西岸の St. 2～St. 4 では、夏季の沿岸分枝流量の強化に対応して、陸岸を右に見る方向の流れが強まる傾向がみられた。一方で、St. 4 と St. 2 では、春季にも大きな流速値が現れたほか、県西岸南部の St. 1 では、夏季に陸岸を左にみる弱い流れが現れるなど、流量変動と直接的に対応しない流れの変動もみられた。半島東岸から富山湾の St. 5～12 では、半島西岸と比較して全般に流速が小さい値を示した。季節的にみると St. 5～11 では冬季に岸を左に見る方向の流れが強まる傾向がみられ、この傾向は半島東岸北部の観測点（St. 5）に強く現れた。また、富山湾沿岸の St. 8～11 では、夏季に陸岸を右に見る方向の弱い流れがみられた。これに対して、富山湾東端の St. 12 では、周年にわたり陸岸を右に見る流れが卓越した。夏季（6 月）と冬季（12 月）のベクトル平均流速の分布を図 3 に示した。半島東岸から富山湾沿岸では、冬季に時計回り、夏季に反時計回りの環流が形成されていることがうかがわれる。半島東岸から富山湾にみられる夏季の反時計回りの環流は、沿岸分枝流の岸に沿った流入で説明できる。一方、冬季の時計回りの環流は、夏季の沿岸分枝流の流路が離岸して沖合いから湾内に流入することが原因となっている可能性が推察される。今後は、

既存のCTD観測データから力学計算によって能登半島東岸から富山湾域の地衡流の流動パターンを求めて、沿岸流や沿岸分枝流の変動との関連性を検討する予定である。

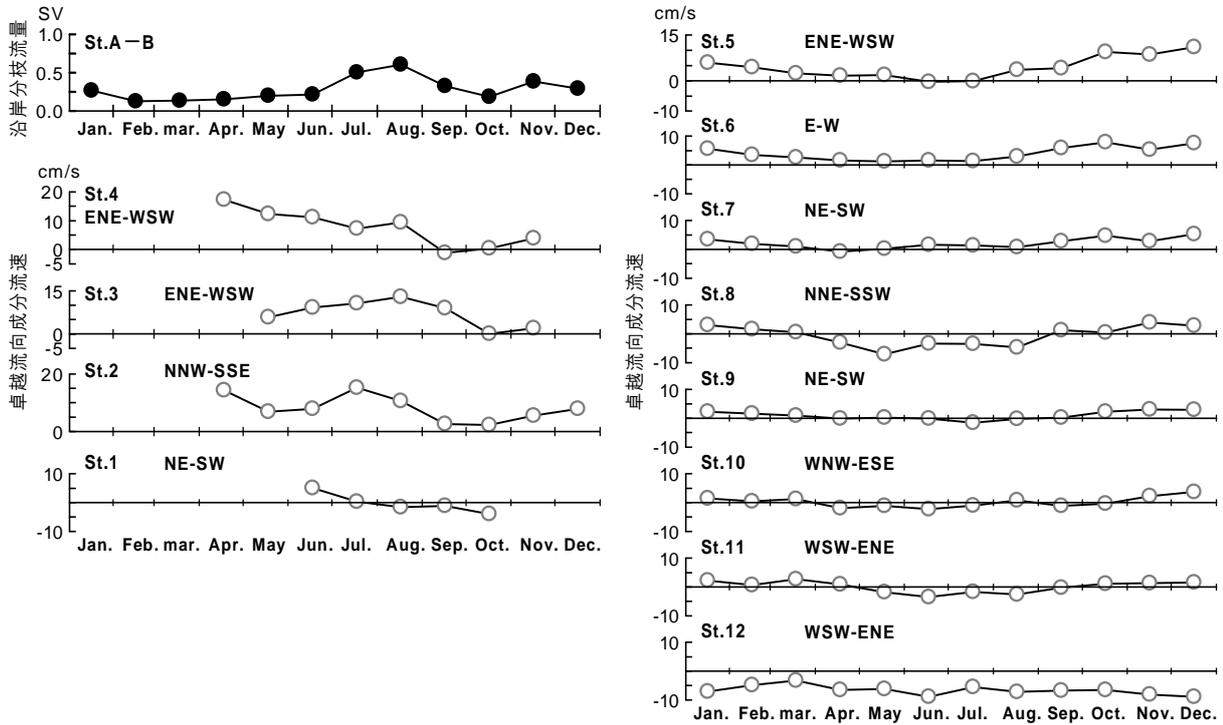


図 2 卓越流向成分と能登半島北西沖の対馬海流沿岸分枝流量の季節変動

卓越流向成分は St.1~4 (西岸) では陸岸を右 (左) に見る方向を正值 (負値)、St.5~13 (東岸) では陸岸を左 (右) に見る方向を正值 (負値) で示す、沿岸分枝流量は北東方向の流量を正值で示す

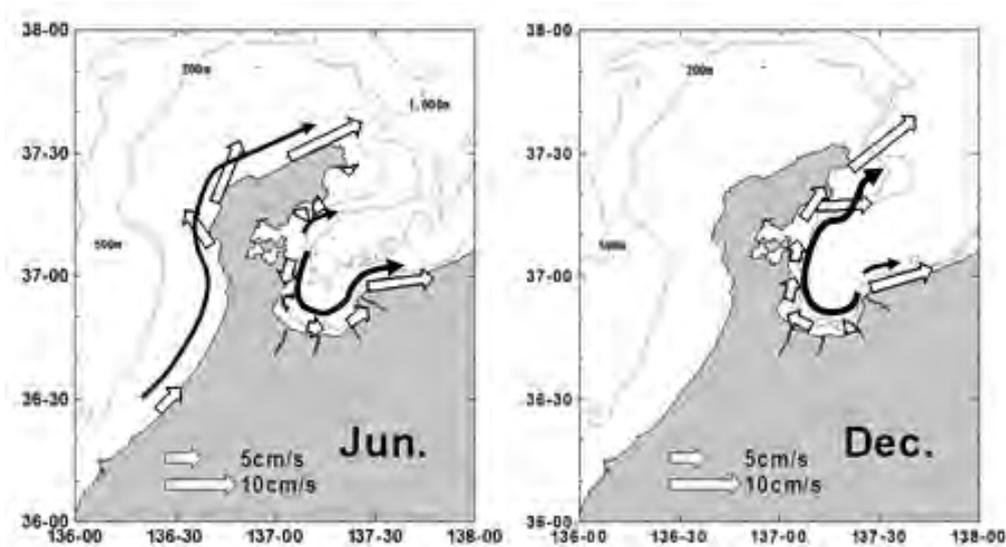


図 3 夏季 (左図) と冬季 (右図) のベクトル平均流速の比較

実線の矢印は流軸を模式的に示したもの

## 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な植物プランクトンによる赤潮が頻発しており、漁業被害も報告されている。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、その挙動は、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知られている。本研究では、九州西部海域を対象として、有害プランクトンが発生する夏季に海洋微細構造プロファイラー等を用いた観測を実施し、有害種を含む各種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 Stn. A (32°21.3'N, 130°16.4'E, 水深約 37 m) において、2014 年 7 月 30 日 10 時から 8 月 1 日 8 時にかけて、瀬戸内海区水産研究所所属の「しらふじ丸」による 46 時間の昼夜連続観測を行った (Fig. 1)。観測中は、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・流速シアアの鉛直分布を測定し、得られた流速シアアから乱流エネルギー散逸率  $\varepsilon$  を算出した。また、2 時間もしくは 4 時間ごとに海底上 1 m まで 1~5 m 間隔で各層採水を実施した。採水試料は、船上で 10  $\mu\text{m}$  目合いのふるいを用いた濃縮検鏡によって有害プランクトン細胞密度を計数するとともに、一部を持ち帰り栄養塩分析を行った。

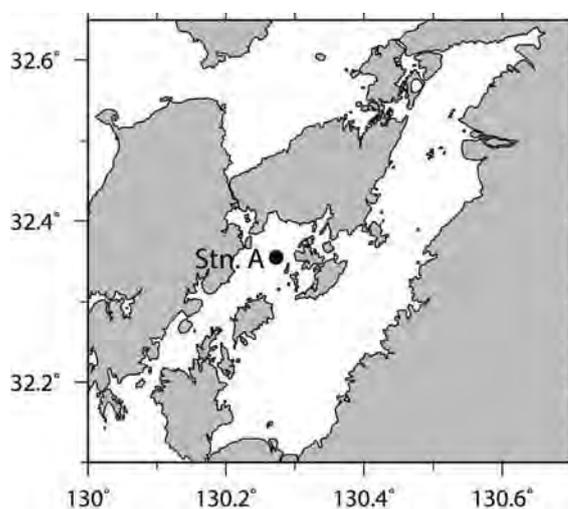


Fig. 1 観測実施点 (Stn. A)

## 3. 結果と考察

46 時間の昼夜連続観測結果を Fig. 2 に示す。観測期間を通して 10 m 以浅に密度躍層が形成され、半日周期で数 m 上下動していた。乱流エネルギー散逸率  $\varepsilon$  は概して密度躍層以浅や海底近傍で高く、 $10^{-5} \sim 10^{-7} \text{ W kg}^{-1}$  であった。また、7 月 31 日および 8 月 1 日の 4 時に海面から 10 m 深付近まで、海底近傍では下げ潮時に 20 m 深付近まで、それぞれ  $\varepsilon$  は高い値を示した。植物プランクトンの指標となる蛍光強度の極大層は 8 月 1 日 0 時まで、 $\varepsilon$  が比較的小さい密度躍層下部で確認され、躍層の上下動とも対応していた。一方、優占種ではなかったものの有害な鞭毛藻 (鞭毛による遊泳能を備えた植物プランクトン) の一種である *Cochlodinium polykrikoides* が観測期間中に低密度で確認された。本種の極大層は、蛍光強度の極大層とは一致せず、昼間に表層付近、夜間に 20~30 m 深に分布していたことから、本種が昼夜の日周鉛直移動をしていたと推察された。夜間の分布深度である 20 m 以深は表層に比べて DIN 濃度が高く、鉛直移動によって下層の栄養塩を利用できたと考えられる。極大層深度の時間変化を基に算出された上昇・下降速度は  $3 \sim 6 \text{ m h}^{-1}$  程度となり、遊泳能力を持つ他の鞭毛藻類と比して大きいことが

判明した。本種の鉛直分布には躍層深度や乱流エネルギー散逸率  $\varepsilon$  との明瞭な対応関係は認められず、その理由として高い遊泳能力が考えられた。

#### 4. 研究組織

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
松野 健	九州大学応用力学研究所	教授	所内世話人

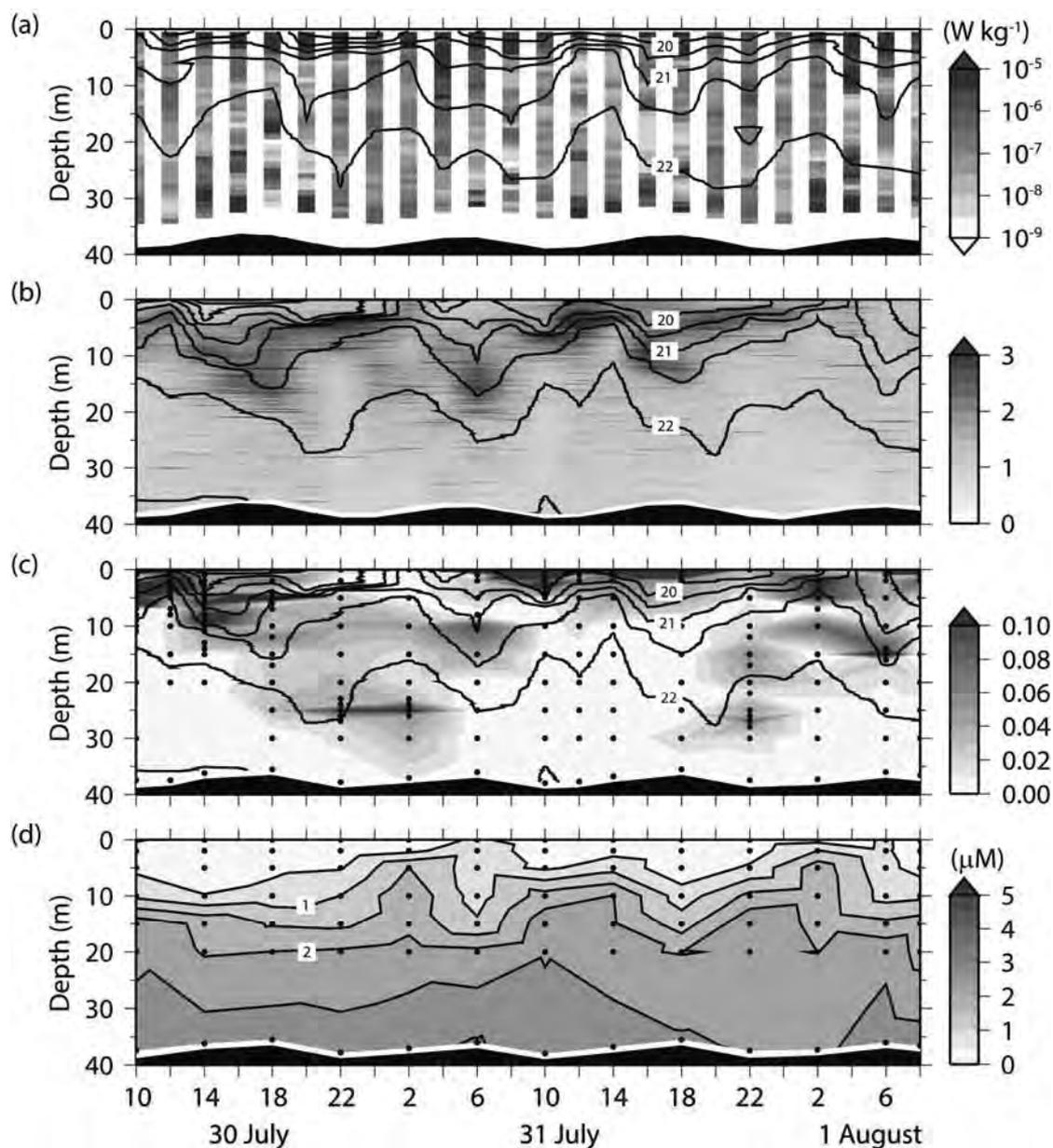


Fig. 2 2014年7月30日10時から8月1日8時にかけての (a) 乱流エネルギー散逸率  $\varepsilon$ , (b) 蛍光強度, (c) *Cochlodinium polykrikoides* の水柱における存在割合 (細胞密度/鉛直積算密度), (d) DIN 濃度, の鉛直分布時系列。(a) ~ (c) の等値線は海水密度  $\sigma_t$  を表す。

## 対馬暖流第一分枝流と第二分枝流の観測

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

対馬海峡から流入し日本海を北上する対馬暖流は、対馬海峡通過後2つもしくは3つの分枝流に分かれるとされている。対馬暖流の流路については諸説あり、未だ決定的な結論を得て無く、近年においても様々な流路が提唱されている。これは対馬暖流の時空間変動が大きいことと、その変動を捉える観測が実施できないためである。本研究では、レーダサイトから約200 kmの範囲の海面流速を高い時空間分解能で観測できる遠距離海洋レーダにより、対馬暖流が分岐するとされる海域の表層流の連続観測と、遠距離海洋レーダ観測海域での流速計の係留観測により、対馬暖流の分枝流の季節・季節内変化を明らかにすることを目的とする。遠距離海洋レーダサイトの構築は終了したが、測定システムの開発を現在も行っていることから、本報告では、係留系およびGPS漂流ブイで得られた流速データと、遠距離海洋レーダにより測定された海面流速を比較し、遠距離海洋レーダの精度検証を行った結果について述べる。

## 2. 参加者

森本 昭彦 (名古屋大学地球水循環研究センター)  
市川 香 (九州大学応用力学研究所)

## 3. 研究成果の概要

## 3-1. 遠距離海洋レーダの概要

本研究で使用する遠距離海洋レーダは、情報通信研究機構が開発し、2001年から約10年間台湾北東海域の黒潮を観測したレーダである。本レーダの送信周波数は9.2 MHz、出力は1 kWであり、3エレ八木アンテナを送信に、2エレ八木アンテナを受信アレイとして利用したシステムである。2つのレーダを、長崎県対馬の北端と山口県萩市沖の相島に設置した。本レーダの観測範囲はレーダサイトから約200km、海面流速を空間分解能約7km、時間分解能30分で観測できる。それぞれのレーダサイトでは、ビーム方向(視線方向)の流速のみが観測され、両局のビームが交差する範囲において流速ベクトルを計算できる。対馬、相島両局から送受信するモノスタティックモードと、対馬から送信、対馬と相島で受信するバイスタティックモードの2つの方法による測定ができる。今回は、2014年6月11日～9月8日までに行われたモノスタティックモードのデータを使用し解析する。

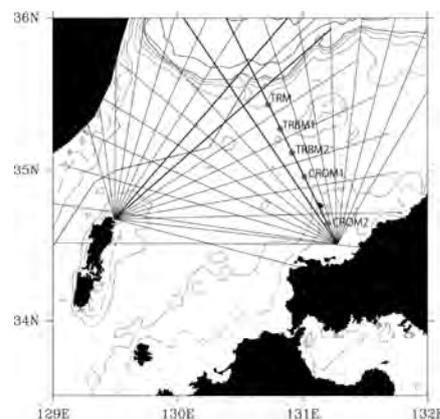


図1. 対馬レーダと相島レーダのビーム配置(青線)と、海底設置式流速計の係留場所(赤点)。

## 3-2. 係留系およびGPS漂流ブイ観測

遠距離海洋レーダにより測定される海面流速の精度検証を行うため、2014年6月15日～7月24日まで海底設置式流速計5台を遠距離海洋レーダ観測海域に係留した(図1)。海底設置式架台TRBM, TRM, CROMに超音波流速計ADCPを内蔵し係留した。ADCPの測定間隔は10分、鉛直に4m毎のデータが得られ

ている。GPS 漂流ブイ観測は、新青丸 KS-14-9 次航海 (2014 年 6 月 13–22 日) と、KS-14-12 次航海 (2014 年 7 月 21–28 日) において実施した。KS-14-9 次航海ではブイに抵抗体は取り付けず漂流させ、一方、KS-14-12 次航海では、抵抗体が海面下 1m に位置するように取り付け漂流させた。位置データは 1 分毎に記録され、遠距離海洋レーダデータと比較できるように 30 分の平均流速とした。

### 3-3. 遠距離海洋レーダデータの精度検証結果

対馬レーダの視線方向流速データと、30 分平均した GPS 漂流ブイデータとの比較を行った (図 2)。両者の比較においては、遠距離レーダの視線方向流速データを GPS 漂流ブイデータの観測位置へ補間し行った。両者の相関係数は 0.3, RMS は 36.6 cm/s であった。この値は、過去に他の海域で行われた海洋レーダ観測の結果に比べかなり悪い値であった。特に、GPS 漂流ブイ観測では大きな流速となっているにもかかわらず、遠距離レーダでは強い流れがほとんど観測されていなかった。

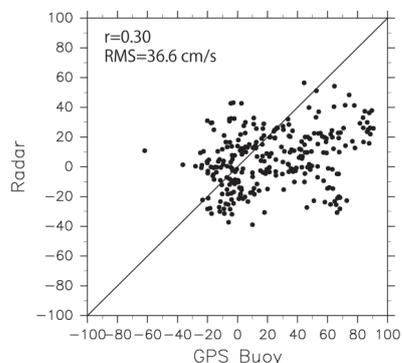


図 2. GPS 漂流ブイと対馬レーダの視線方向流速の比較。

GPS 漂流ブイとの比較では、漂流ブイの観測方法にも問題がある可能性があると考え、海底設置した ADCP データと対馬レーダの視線方向流速の比較を行った (図 3)。ここで、ADCP データは海面付近のデータが取得できないため、海面下 10m のデータを使用した。また、海面下 10m では海面付近の吹送流を捉えることが難しいため、主に潮流との比較を目的に、ADCP データは 25 時間移動平均値からの偏差とした。相関係数は GPS 漂流ブイに比べ高く、RMS も小さく、遠距離海洋レーダはそれなりに海面流速を測定していると考えられた。場所的な違いをみると、対馬レーダの正面に位置する測点 TRM, TRBM1 では相関係数は高かったが、対馬レーダの正面から南に位置する測点 TRBM2, CROM1 では相関係数が低くなっていた。ADCP との比較を行った海域での潮流の空間変化はそれほど大きくないことから、場所による違いは遠距離海洋レーダのデータ処理に問題があることを示唆している。

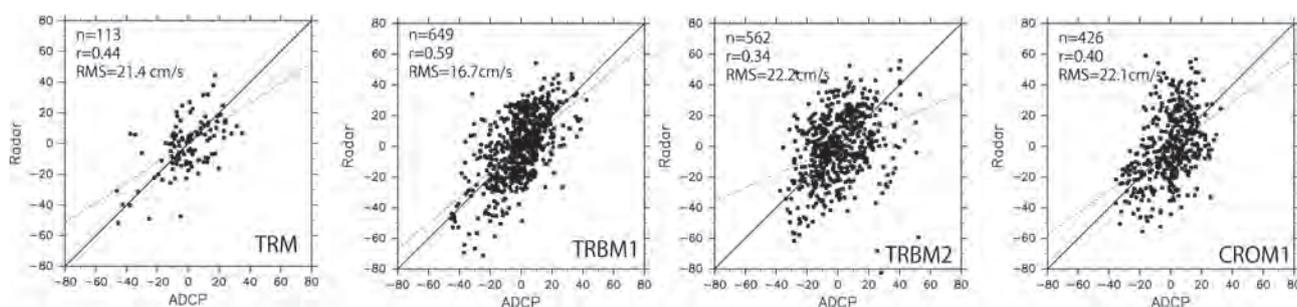


図 3. 海底設置した ADCP の海面下 10m の流速の 25 時間移動平均からの偏差と対馬レーダの視線方向流速の比較。

## 4. まとめ

対馬と相島に設置した遠距離海洋レーダにより測定された海面流速データと、海洋レーダ観測海域において係留系、GPS 漂流ブイにより観測された流速データの比較を行った。両者の比較から、遠距離海洋レーダの海面流速データは全体的な流動パターンを捉えることができるデータであることが分かった。しかし、データ処理部分の問題に起因して大きな誤差がある可能性が示唆された。この問題は、おそらくレーダのビームフォーミングに関わる部分と思われることから、今後データ処理を改良していく予定である。

## 26 特 1-5

### 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

高解像度の衛星海面 flux データセット (J-OFURO2, 0.25 度格子, 2002~2008 年, 日平均値) を解析することで日本海における海面 flux の変動特性について研究する。昨年度までに、日本海における J-OFURO2 データについて、陸域付近のデータ処理などの追加処理を行い、現場データや大気数値モデル出力を用いた検証を実施した。また日本海の海洋循環に深く関係すると考えられる沿岸付近の海面 flux の分布について時空間変動を調べた。本年度は、J-OFURO2 に見られた特徴的な海面 flux の時空間変動特性について詳しく解析を行う。

#### 2. 研究結果概要

最初に顕熱 flux の冬季平均の空間分布を示す (図 1)。J-OFURO2 の顕熱 flux の分布は他のデータセットによる顕熱 flux の分布と比較すると空間解像度が高く、陸域近くに特化したデータ処理手法 (CSF) により沿岸域付近に値が含まれることから顕熱 flux の分布は他のデータセットと特徴が異なる (昨年度の報告書も参照)。J-OFURO2 では沿岸域で値が大きく、日本海中央部で値が小さい分布を示す。図 2 は、北緯 41 度における顕熱 flux の東西変化を J-OFURO2 と、大気再解析データである NCEP 再解析 (NRA) と衛星 flux プロダクトである HOAPS3 について示したものである。NCEP 再解析は、大陸側でやや大きな値を示すものの、J-OFURO2 と比べるとかなり小さく、全体としてもほぼ一樣な顕熱 flux の分布であることが分かる。また J-OFURO2 と同様に衛星プロダクトである HOAPS3 では、全体としての値が小さく、東西変化の様子も他のデータとはかなり異なる。

J-OFURO2 CSF 2.0, Sensible Heat Flux ( $\text{w/m}^2$ )

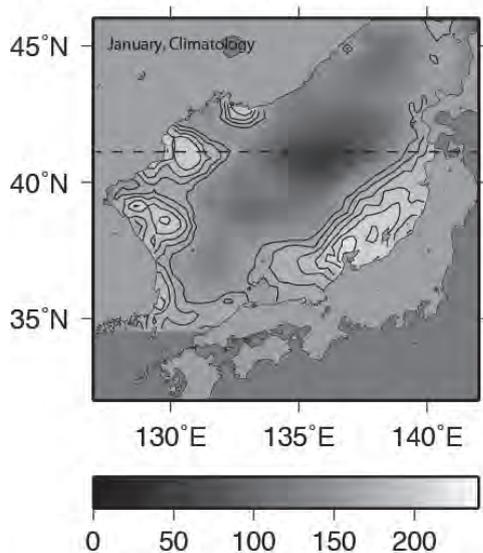


図 1. J-OFURO2 顕熱 flux ( $\text{w/m}^2$ )  
冬季 (1 月) 気候学的月平均値。

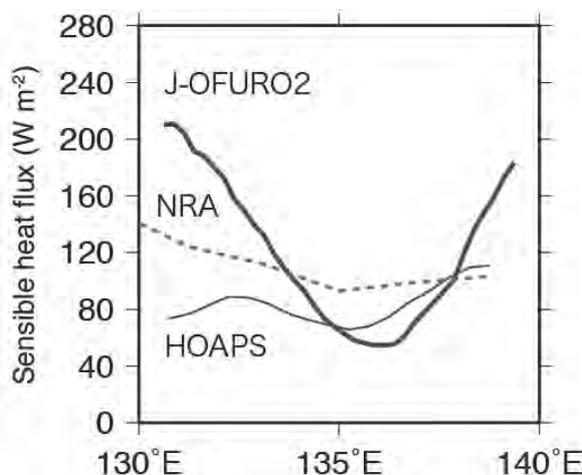


図 2. 北緯 41 度 (図 1 破線参照) における顕熱 flux の比較

この様な顕熱 flux の分布特徴のデータセット間の違いは大きな問題である。特に、大陸側の海面 flux の分布は日本海の深層を含めた海洋循環の駆動要因となっている可能性が高く、海面 flux の分布の特徴が現実的であるかは重要である。現場観測データの比較結果から観測データの豊富な日本付近の検証は可能であり、それらの比較結果から J-OFURO2 の精度が良好であることは示したが（昨年度の報告書参照）、大陸側での現場データが得られないことや、分布の全体的な特徴を検証することは現場データとの比較だけでは難しい。しかしながら、各データの海面 flux の変動特性を決める要因を把握し物理的な解釈を行うことである程度の検証を行うことは可能である。そこで、日本海における顕熱 flux の分布の特徴と、他のデータセットとの差異についてさらに詳しく検討した。図 3 は、北緯 41 度における顕熱 flux の平均値からの偏差を J-OFURO2 のデータについて示したものである。各破線は、顕熱 flux 偏差を説明する要因について調べるために、主要な規定要素である海面水温、海上気温、海上風の顕熱 flux 偏差への寄与を示す。この図より、J-OFURO2 の北緯 41 度における顕熱 flux 偏差を決める要因は、主に海面水温と気温の両方にあることが分かる。また、それらの寄与の割合は西部、中央部、東部で異なることが分かる。中央部では気温と水温が同程度の割合で海面 flux に寄与しているが、西部では気温が主要な要因であり、一方で、東部では気温の寄与は小さく、むしろ水温の寄与が大きい。一方、海上風の寄与は全体を通してあまり大きくは無かった。データセット間の違いは、主に海面水温の分布の違いによることが多かった（図省略）。例えば、NCEP などの大気再解析データでは、データの空間解像度が小さく、日本海の海面水温の分布を正しく表現できていないとは言えない。特に中央部に存在する水温フロントの存在や、大陸近くの水温分布を再現するかが重要であることが分かった。また、HOAPS では、海面水温については解像度の高く J-OFURO と似た分布を示すが、気温の推定に大きな問題があることも分かった。

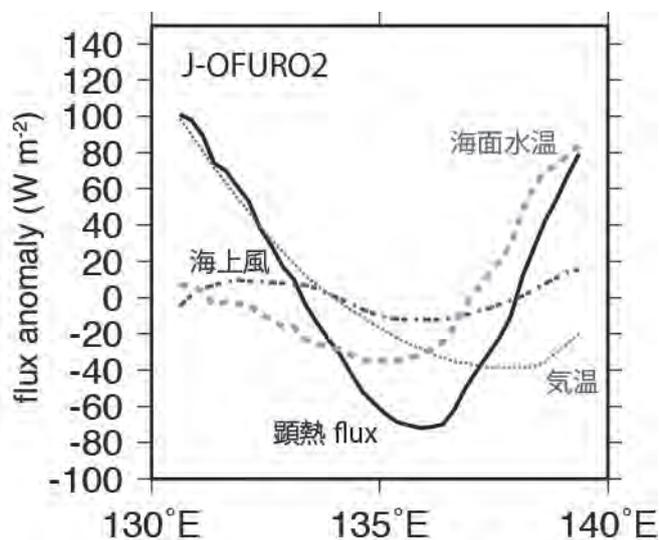


図 3. 北緯 41 度 (図 1 破線参照) における顕熱 flux 偏差とその変動要因。破線は、顕熱 flux 偏差を規定する海面水温、海上気温、海上風による顕熱 flux 偏差への寄与を示す。それぞれの変数の寄与は顕熱 flux を計算するバルク式を線型化することで海面 flux への主要な寄与を示したものである。

### 3. 研究体制

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  
 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 九州大学応用力学研究所 広瀬 直毅, 高山 勝巳

# 対馬海峡から日本海山口県沖にかけての海洋環境モニタリング

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。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（Rugged TROLL100, 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）。水位計設置時にDGPSを用い、東京湾平均海面（TP）を測量した。さらに、萩市浜崎（図1）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、青海島・見島の水位とフェリーによる水温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に、48時間のタイドカラーフィルター（花輪・三寺, 1985, 沿岸海洋研究ノート）を施し、潮汐成分を除去した。図2に、潮汐成分除去後の青海島と見島の水位と水位差を示す（2012年8月下旬~2014年10月下旬）。平成25年度報告でも指摘したとおり、2013年7月から10月の4か月間、水位差の変動幅は約20cmであり、通常の変動幅8cmと比べ2.5倍程度大きかった。他の測流結果（海底設置型ADCP, 観測期間：2013年6月8日~7月1日）を用いると、この大きな水位差変動（幅20cm）は、約 $57\text{ cm s}^{-1}$ の流速変動に相当すると見積もられた。

2013年1月から2014年10月までのフェリー航路上の水温を図3に示す。2014年と比べ2013年の夏季は高温であった。2013年夏季の水温の南北勾配も2014年に比べ大きい。今後、これらの水温変動と大きな流速（水位差）変動との関係について検討する必要がある。

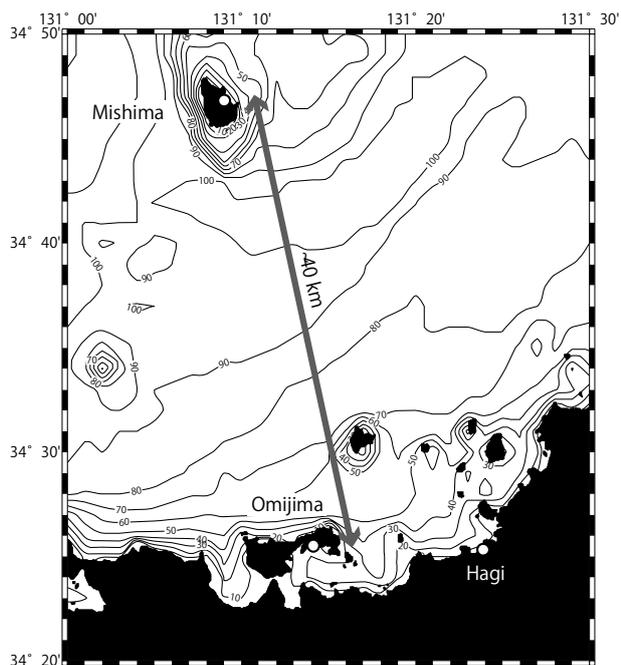


図 1. 観測海域.

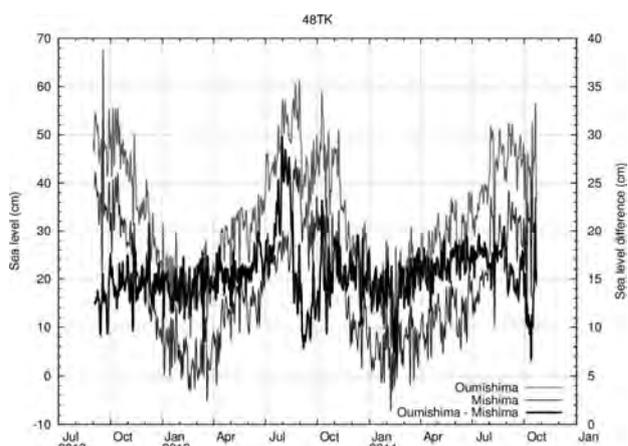


図 2. 青海島（赤）と見島（青）の水位（移動平均）. 黒線は両島間の水位差を示す.

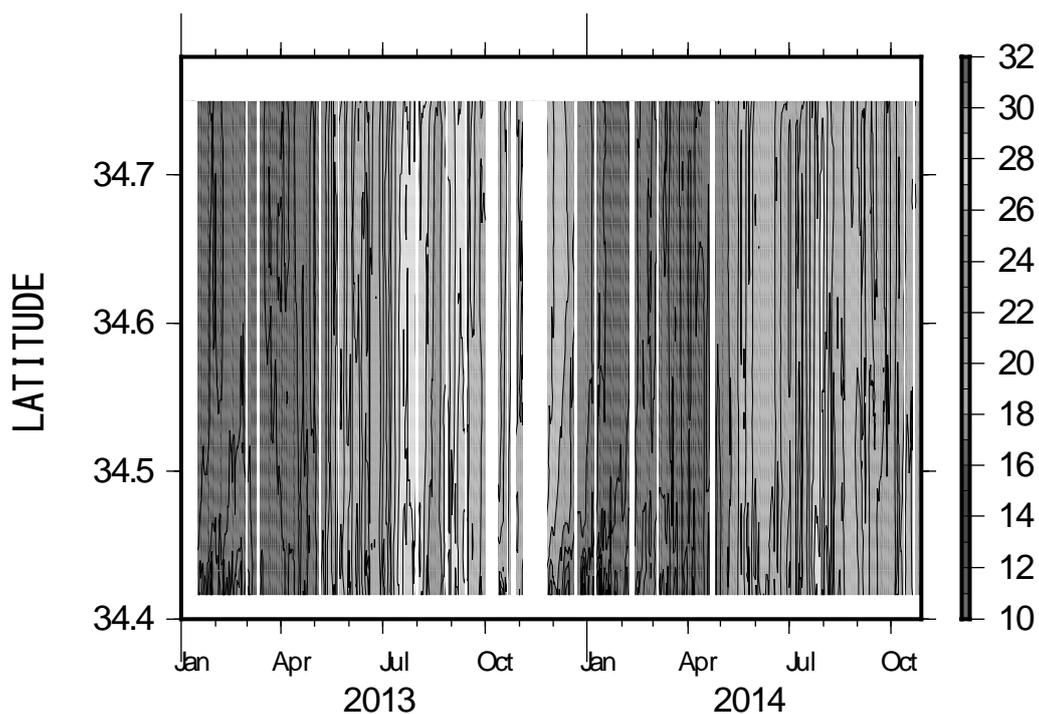


図 3. 萩ー見島間フェリー航路上の水温の緯度時間断面図.

#### 4. 研究組織

研究代表者	水産大学校	滝川 哲太郎
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 剛
	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

## 東シナ海・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

最近東シナ海的环境変化に伴って、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。また、対馬海峡は東シナ海と日本海をつなぐ海峡である。九州大学応用力学研究所では、東シナ海の海洋観測を行ってきており、また博多と釜山間を運航するフェリーニューカメラアで流速、水温・塩分、クロロフィル蛍光など、海洋レーダーでも周辺海域の表層の流れ場がモニタリングされており、すでに数年分のデータが蓄積されている。そこで、本研究では、東シナ海および対馬海峡での、生物データの変動要因について物理データと比較しながら明らかにする。今回は特に、東シナ海と対馬海峡の植物プランクトンの群集構造に関して、特に着目して解析した。

## 方法

2011年および2012年の7月に、長崎大学水産学部附属練習船長崎丸を利用して、九州大学応用力学研究所と共同で行った調査で採取した植物プランクトン色素分析用サンプルを、高速液体クロマトグラフィによって分析した。その色素組成からクロロフィル a を構成する植物プランクトンの割合を計算する CHEMTAX プログラムで解析した。

## 結果・考察

2011年には九州西岸から対馬海峡までを、2012年には九州西岸から済州島南西までの東シナ海を観測した(図1・2)。2011年には、九州西岸域では高温・高塩分の黒潮系の水の性質を示し、対馬海峡では比較的低温で塩分も少し低かったが、長江希積水は存在しなかった。一方、2012年には、九州西部で高温・高塩分の黒潮系の水が見られ、東シナ海の西側で低塩分の長江希積水の張り出しが確認された。2012年の対馬海峡から九州西岸にかけては、N:P比はほとんどの海域で Redfield 比(16)よりも低かった。2011年では、長江希積水海域で100を越し、長江からの栄養塩、特に窒素の過剰供給を示した。クロロフィル a は、黒潮系水では  $0.25 \text{ mg m}^{-3}$  と低い、対馬海峡ではやや高く、長江希積水では  $2 \text{ mg m}^{-3}$  を超えるほど高かった。

植物プランクトン群集組成も、黒潮系水と長江希積水、そして対馬海峡域で大きく異なっていた。黒潮系水ではプリムネシオ藻と藍藻類が多く、特に黒潮の影響が強いと考えられる九州西岸の南では原始緑藻類が優占した。対馬海峡の特に日本の沿岸では珪藻が多く、長江希積水では珪藻とクリプト藻が多かった。夏季の鉛直成層によって、表層では長江希積

水以外では栄養塩は枯渇していた。亜表層クロロフィル極大は黒潮以外のすべての海域で観測され、東シナ海の亜表層クロロフィル極大では異なった種類がパッチ状に分布した。一方で 2012 年では表層と比較的似た組成であった。

このように、東シナ海と対馬海峡の植物プランクトン群集の分布ははっきりと異なり、水塊構造がその要因と考えられた。特に、長江からの栄養塩の流入は、東シナ海で高い N:P 比を作り出し、東シナ海と対馬海峡の植物プランクトン群集組成の違いを招いている可能性を示している。

研究成果報告

特になし。

研究組織

別紙の通り。

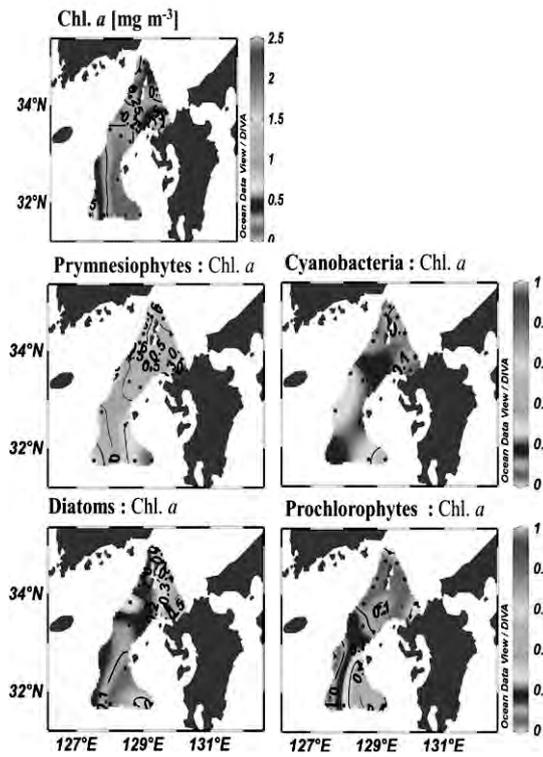


図1 2011年7月の観測によるクロロフィルa濃度 (Chl a) と植物プランクトン群集。

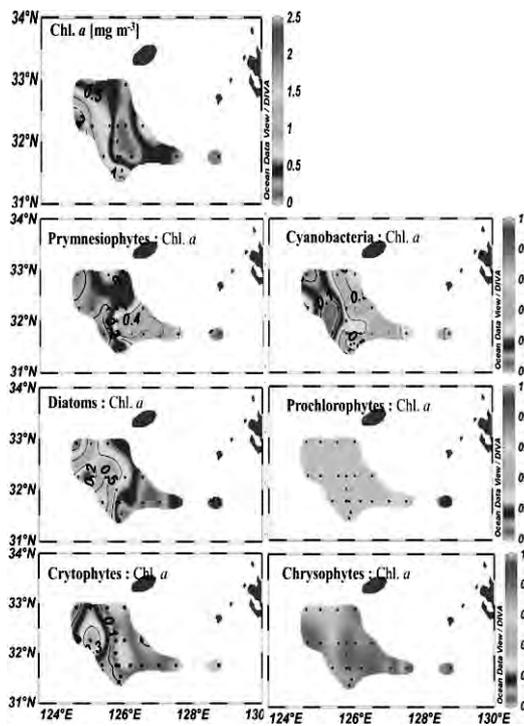


図2 図1と同じ。2012年7月。



## 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)

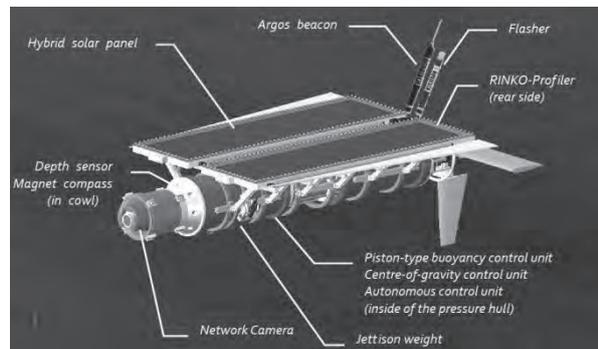


Fig.1 実海域用ソーラー水中グライダー Tonai60

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

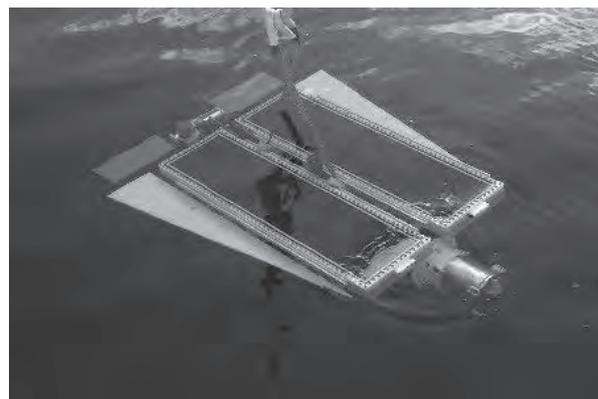


Fig.2 Tonai60 の実海域試験(鹿児島湾)

□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求めることができた。そして、12月に鹿児島湾で実施した実海域試験では、SSBL位置検出装置を用いてグライディング性能を計測したが、水槽試験と同じグライディング性能を有することを確認できた。

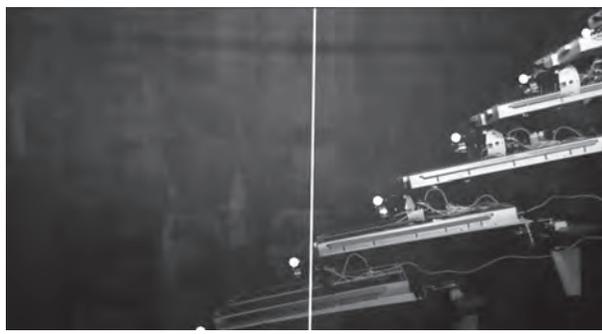


Fig.2 Tonai60の潜航試験（深海機器力学実験水槽にて）

□研究成果報告

- M.Arima: Development of Underwater Gliders at Osaka Prefecture University, [Oral Presentation] Pusan National University and Osaka Prefecture University Joint Seminar, (2014.06).
- 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), Vol.2, pp.444-448, (2014.06).
- 宮本雅之, 有馬正和: 実海域用ソーラー水中グライダーの制御系の構築, 第27回ロボティクス・メカトロニクス講演会 (ROBOMECH 2015 in KYOTO) 論文集, (2015.05).  
〔投稿中〕

□研究組織

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
宮本 雅之	大阪府立大学工学部	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

## Development of an Ocean-Going Solar-Powered Underwater Glider

Masakazu Arima, Hirofumi Tonai, Kana Yoshida  
Department of Marine System Engineering, Osaka Prefecture University,  
Sakai, Osaka, Japan

### ABSTRACT

The purpose of this research is to develop an ocean-going solar-powered underwater glider, named Tonai60, for a long-term and wide-range monitoring of ocean environment and ecosystem. The maximum operation depth is 60 metre in the twilight ocean zone. The Tonai60 glider is equipped with a multi-parameter data logging profiler for monitoring ocean environment, a network camera for coral reef monitoring, and an acoustic data logger for monitoring marine mammals. This paper deals with the design of the Tonai60 glider and gliding performance obtained from tank test and sea trials.

**KEY WORDS:** Ocean-going solar-powered underwater glider; Tonai60; piston-type buoyancy control unit; ocean-environment monitoring; RINKO-Profiler; underwater acoustic data logger.

### INTRODUCTION

Ocean covers over 70% of the Earth's surface, and it is estimated to have about 97% of water volume on the Earth. From a period of great antiquity, humans have lived on various kinds of blessing from diverse organisms and ecosystems of the ocean. It is essential to promote the conservation and sustainable use of marine biodiversity, for the survival of human beings with such blessings from the ocean. It is also important to recognise marine biodiversity and realise a wide-range and long-term monitoring of sound ocean ecosystems. Japanese Ministry of the Environment has formulated the 'Marine Biodiversity Conservation Strategy' in March 2011 (Japanese Ministry of the Environment, 2011). Characteristics of marine ecosystems were given in this Conservation Strategy as follows:

*Important in consideration on the marine environment and the ecosystems there is the existence of an extensive water body. In the ocean, there are layers with different water flow at different depths, and organisms and ecosystems distribute three-dimensionally. Plants with photosynthesis as primary producers occur in photic zones down to about 200m from the water surface, and on sea bottoms of the shallow coastal water. There occur completely different ecosystems in the deep sea.*

It is widely-known that the effects of the climate change become a serious problem of the ocean ecosystems:

*Coral reefs are suggested to be vulnerable to the climate change, and their large-scale bleaching by the increased seawater temperature has been observed frequently in recent years around the world. Furthermore, increasing ambient concentrations of carbon dioxide will lead to more carbon dioxide dissolved into seawater and subsequent aggravation of its acidification. Acidification of seawater will then suppress calcification to produce calcium carbonate for the skeleton of corals and the shell of plankton. Some species may not be able to form its skeleton or shell, and balance of the ecosystem may be lost due to changes in the species composition.*

And the Strategy also stated about improvement of scientific information and knowledge:

*To implement the measures necessary for marine biodiversity such as conservation, to check the effects of those measures and to react adaptively, changes in marine ecosystems must be observed, and monitoring must be encouraged. Through survey programs such as Monitoring Sites 1000, data on the natural environment such as data on biota of shallow water ecosystems (seaweed beds, tidal flats, coral reefs, etc.) will be improved continuously. At the same time, data on sea turtles, sea birds, marine mammals and so on will be collected and organized. In addition, the marine environment will be continually monitored to evaluate the state of marine pollution. Furthermore, if information that has not been collected continuously turns out to be important in detecting changes in marine biodiversity, a method to monitor such information will be examined, and efforts will be made to accumulate it.*

Recently underwater robotic vehicles such as ROV (remotely operated vehicle) and AUV (autonomous underwater vehicle) have been involved in scientific researches in the ocean, and they achieved magnificent results (Maki, 2013). Underwater glider is one of the most useful AUVs, for reasons of greater efficiency in energy use, low-cost manufacturing and maintenance of the vehicle (Rudnick, 2004). Typical underwater glider has no propulsive machinery such as thruster, but it has an ability to realise wide-range and long-term operations by using a buoyancy-control device and a centre-of-gravity control device.

The authors have developed several kinds of underwater gliders. The ocean-going underwater glider with independently controllable main wings, named SOARER, was designed for the use of ocean environmental monitoring to the middle depths (Arima, 2011). The feasibility of the solar energy use under water was investigated in detail (Arima, 2012a) and then the ocean-going solar-powered underwater glider was designed (Tonai, 2013). This paper deals with development of an ocean-going solar-powered underwater glider for a long-term and wide-range monitoring of ocean environment and ecosystem.

## THE TONAI60 GLIDER

The ocean-going solar-powered underwater glider was named Tonai60 as an abbreviation of “Twilight Ocean-zonal Natural-resources and Animals Investigator.” The maximum operational depth is 60 metre in the twilight ocean zone and the purpose of this vehicle is a wide-range and long-term monitoring of marine mammals by underwater acoustic observation and reef corals by image analysis. External view and specifications of the Tonai60 glider are shown in Fig. 1 and Table 1, respectively.

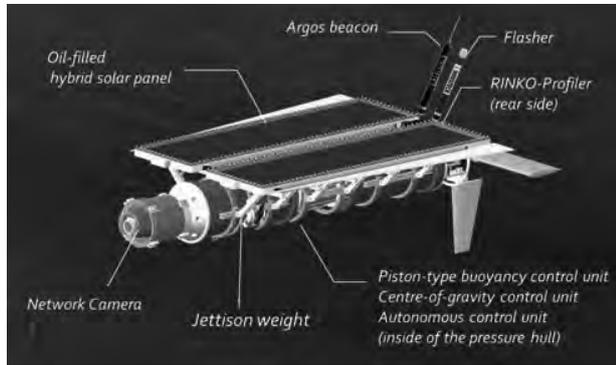


Fig. 1 Ocean-going solar-powered underwater glider, Tonai60.

Table 1. Specifications of the Tonai60 glider.

Length	1.650 m
Breadth (wing span)	1.030 m
Height (including rudder)	0.528 m
Diameter of fuselage	0.200 m
Mass	abt. 92.0 kg
Volume excluding ballast tank	abt. 92.5 ℓ
Volume of ballast tank	1.0 ℓ
Mass of jettison weight	3.0 kg
Time to pour/discharge sea water	abt. 2.5 min. at sea surface
Cruising speed	abt. 0.2 ~ 0.5 m/s
Maximum operational depth	60 m

Specifications of on-board devices and sensors for navigation are shown in Table 2.

Table 2. Specifications of equipped devices and sensors.

Hybrid solar cell VISORA M-HS210 × 2 (Kaneka Corp.)	Max. output: 21.0 W Size: 240 × 998 × 6 mm <sup>3</sup> Weight: 3.1 kg / module
LifePO4 Battery LFX18L1-BS12 × 2 (Shorai Inc.)	Voltage: 12 V Current: 18 A/Hr PbEq Size: 148 × 66 × 105 mm <sup>3</sup> Weight: 1.038 kg / module
GPS module GH-81 (Furuno Electric Co., Ltd.)	16 channels Size: 21 × 21 × 10 mm <sup>3</sup> Weight: 10 g Horizontal accuracy: 15 m
Depth sensor EP101A-C11-C20A*B (Yokogawa Electric Corp.)	Range: 0 ~ 1 MPa abs Output: 1 ~ 5 V DC
Navigation system OS5000US (Ocean Server Technology Inc.)	Magnetic compass Accelerometers for detecting roll and pitch angle
PC for autonomous control PICO820 (Axiomtec Co., Ltd.)	CPU: IntelAtom Z510/ Z530 Size: 100 × 72 mm <sup>2</sup> OS: Microsoft Windows 7 Professional
Micro-computer for a depth sensor and a buoyancy control unit H8SX/1655 (Renesas Electronics Corp.)	CPU: 32bit H8SX (CISC) Memory: 512 KB ROM 40 KB RAM 10 bit ADC × 2ch 10 bit DCA × 2ch

A couple of oil-filled-pressure-compensated hybrid-type solar panels were arranged on the top of the glider. The MPPT (Maximum Power Point Tracking) control was introduced to maintain the optimal utilisation of photovoltaic generation. And a balance charge circuit and a load controller were also applied for realising optimal charge and discharge of the rechargeable battery (Tonai, 2013). A piston-type buoyancy control device was introduced for controlling its attitude and the gliding performance. The cylindrical buoyancy control device has a length of 797 mm and a radius of 105 mm. A piston was controlled by a DC motor (RE35, Maxon Motor AG) with gear-head (GP32HP, Maxon) using ball screw mechanism. Water volume in the ballast tank is controlled as the position of the piston by a servo controller (ESCON 50/5, Maxon). Maximum useable depth of the Tonai60 glider is 70 m, and this is limited by the maximum torque, 8 Nm of this DC motor so as to exhaust sea water from the ballast tank against water pressure at a depth of 70 m. And a lead-made 1.75 kg movable weight was also used for controlling the glider's attitude. Weight was controlled by a DC motor (RE-max21, Maxon) with gear-head (GP22C, Maxon) using ball screw mechanism. Maximum torque of the motor is 2 Nm. The position of the weight is controlled by a digital position control unit (EPOS2 24/2, Maxon). Practical stroke of the movable weight is 470 mm, and pitching angle of the glider can be changed between about ±20 degrees from horizontal condition. The vehicle can realise optimal gliding by repeating diving and surfacing. Right-and-left tailplanes can be controlled independently and it functions as aileron. Aileron and rudder can be controlled by PC through microcomputer using three servomotors (KRS-4034HVICS, Kondo Kagaku Co., Ltd.).

## CONTROLLER OF THE TONAI60 GLIDER

Systems configuration and wiring diagram of the Tonai60 glider are shown in Figs. 2 and 3, respectively. Network camera and 3-axis digital compass are connected with an on-board PC through LAN and USB cables, respectively. Depth sensor is connected with micro-computer through USB cable. The PC and the microcomputer are connected with each other through RS-232C cable. Buoyancy control unit is controlled by the micro-computer using signal from the depth sensor. On the other hand, balance weight unit is controlled by the PC using signal from 3-axis digital compass. Pan and tilt angle of the network camera is also controlled by PC using signals of the fuselage's attitude for recording target objects continuously. Network camera, balance weight unit, buoyancy control unit, aileron and rudder are controlled by PID feedback control.

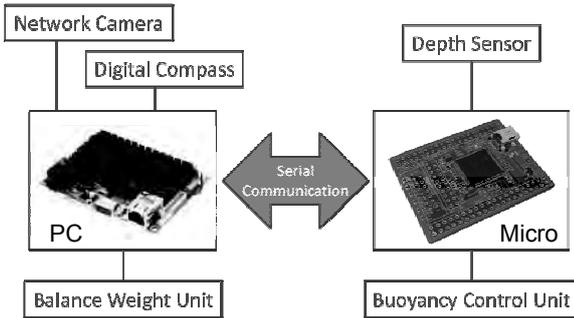


Fig. 2 Systems configuration of Tonai60's controller.

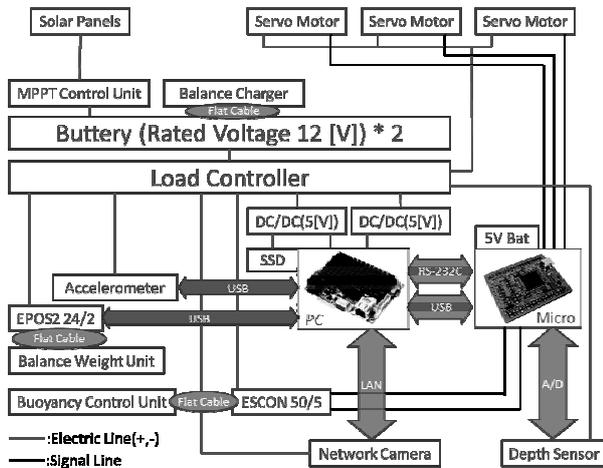


Fig. 3 Wiring diagram of Tonai60's controller.

Application software for controlling the Tonai60 glider was established by C++ language. Language is Japanese for the practical use in Japan. Control panel of the application is shown in Fig. 4. This application runs on the on-board PC, and motion mode such as initialisation, calibration or operation can be selected without writing in and resetting the micro-computer. Remote desktop operation is available through wireless LAN when the vehicle is at surface, and this helps to conduct initialisation of the vehicle and/or calibration of buoyancy adjustment.



Fig. 4 Application software 'Tonai60 APP' for controlling Tonai60.

## ENVIRONMENT AND ECOLOGY MONITORING SYSTEM

The Tonai60 glider is equipped with an environmental multi-parameter data logger profiler 'RINKO-Profiler' (JFE Advantech Co., Ltd.), a network camera 'VB-M40' (Canon Inc.) for monitoring coral reefs, and an acoustic data logger 'A-tag' (Marine Micro Technology Corp.) for monitoring marine mammals. There is no requirement for such a solar-powered underwater glider to dive into deep sea. Adequate sunshine may reach to a hundred metre or thereabouts in the middle of transparent ocean. On the contrary, sunshine may reach only several metres at the enclosed marginal sea. There are various kinds of invaluable marine organisms in the sunlight boundary layer, so-called twilight ocean zone.

### Network Camera VB-M40 for Image Analysis

Coral reefs are very sensitive to environmental changes, and then they can be one of environmental indices such as global warming. The protection of coral reef is also an issue of great urgency. Covered area and species of coral reefs are usually investigated by scuba divers, but there are difficulties in diving time and depth. Then the authors plan to operate the Tonai60 glider for coral monitoring. The solar-powered underwater glider has the ability to be recharged at sea surface in the daytime, and reef corals can be analysed from fluorescent image with ultraviolet light at night. Fig. 5 shows an example of image analysis of reef corals. The experiment was conducted using network camera and OS5000US sensor at Coral Tank of Enoshima Aquarium, Japan.



Fig. 5 Reef corals excited by ultraviolet light and its binarised image.

### Underwater Acoustic Data Logger, A-tag

The underwater acoustic observation system has an ability to detect marine mammals such as killer whale (*Orcinus orca*) and to estimate the number of individuals. Killer whale is situated in the highest position of a food chain in the ocean. Killer whales do not act independently and they usually behave with their family, called 'pod'. The soundness of the ocean area can be thus evaluated from the number of killer whales over the relevant sea area (Arima, 2012b). Fig. 6 shows an external view of A-tag, which has a couple of hydrophones for estimating the direction of killer whales' vocalisation source. A-tag is usually attached to the base under the solar-panel unit. An example of killer whales' behaviour obtained by A-tag in Southern Alaska is shown in Fig. 7. A-tag was towed singly by a small fishing vessel for validation of this acoustic data logger. The time histories of the sound pressure (red lines), time difference (direction of sound source) (black dots) and pulse interval (blue dots) indicate that at least two killer whales have passed around A-tag (red ellipse).



Fig. 6 Acoustic data logger, A-tag.

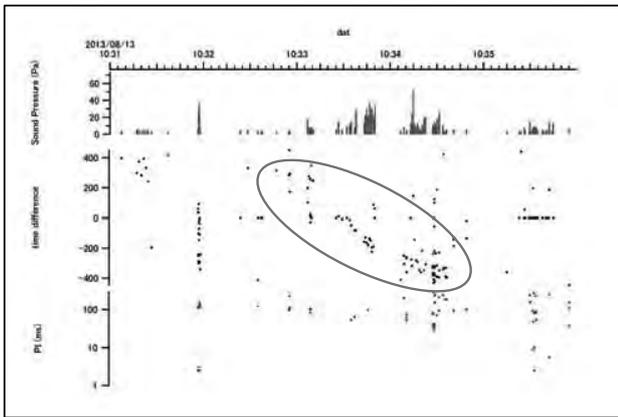


Fig. 7 An example of killer whales' behaviour obtained by A-tag.

### Environmental Data Logger, RINKO-Profiler

The Tonai60 glider is equipped with an ocean-environment monitoring data logger, RINKO-Profiler of JFE Advantech Co., Ltd. Exterior view of original RINKO-Profiler and its specifications are shown in Fig. 8 and Table 3, respectively.



Fig. 8 RINKO-Profiler (JFE Advantech Co., Ltd., 2013).

Table 3. Measuring items of RINKO-Profiler (JFE Advantech, 2013).

Items	Sensor type	Range	Resolution	Accuracy
Depth	Semiconductor pressure sensor	0~1,000m	0.01m	±0.3%FS
Temperature	Thermistor	-3 ~ 45 °C	0.001 °C	±0.01°C (0 to 35 °C)
Conductivity	Electrode	2~70mS/cm	0.001mS/cm	±0.01mS/cm (2 to 65 mS/cm)
Salinity	PSS-78	2 ~ 42	0.001	±0.01 (2 to 40)
DO	Phosphorescent	0~20mg/ ℓ	0.001mg/ ℓ	±2%FS
Chlorophyll	Fluorimeter	0~400ppb	0.01ppb	±1%FS Zero drift ±0.1ppb
Turbidity	Backscattering	0~1,000FTU	0.03FTU	±0.3FTU or measured value ±2%

\*Time constant: DO 0.4 seconds, others 0.2 seconds

The RINKO-Profiler's measuring items are depth, temperature, conductivity, salinity, dissolved oxygen (DO), chlorophyll-*a* and turbidity. The RINKO-type DO sensor is epoch-making device for realising short time measuring. Measurement of dissolved oxygen (DO) using conventional DO sensor takes several seconds usually. However, newly developed RINKO-Profiler has a short time constant of 0.4 seconds, and this enables to achieve successive measurement by underwater vehicles. RINKO-Profiler was installed into the rear cap of Tonai60's pressure hull without the titanium case and sensor guard. About 10 hours monitoring data can be stored into a built-in memory card. Battery charging and data transmission can be done by connecting cables with each pressure-resistant connector on the rear cap.

### TANK TEST AND SEA TRIAL OF THE TONAI60 GLIDER

Tank test was conducted at the Ocean Engineering Tank of Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University. The purpose of this tank test was to verify the initial design of the Tonai60 glider. The position of the centre of gravity, centre of buoyancy and buoyancy were checked under water, and the optimal position was fixed. Then, gliding test was tried by shifting the centre of gravity systematically. Gliding angle of diving was about 20~30 deg. as was expected.

Field test was conducted at Kagoshima Bay, South Kyushu, Japan on 10 December, 2013. Fig. 9 shows the Tonai60 glider hanged from the mother vessel, Nansei-maru of Kagoshima University. There appear often bottlenose dolphins in Kagoshima Bay, but no marine mammals' vocalisation data was recorded by A-tag in this field experiment.

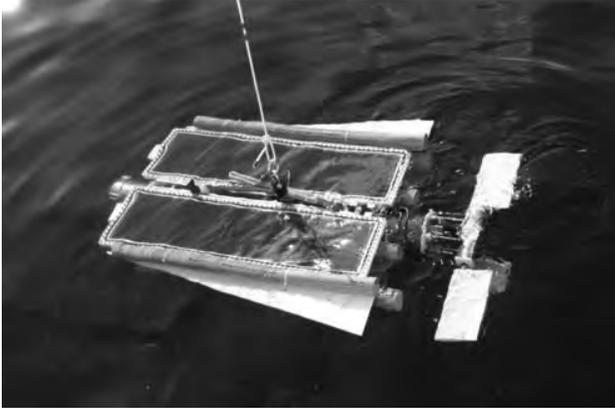


Fig. 9 Sea trial of the Tonai60 glider at Kagoshima Bay.

Accurate location of the mother vessel, Nansei-maru, was obtained by a portable GPS device. The depth of experimental field was about 200 m. Tonai60 was tethered to a winch system of the mother vessel through a pulley. Additional weight of 3.0 kg was fastened around the centre of gravity so that the weight in water was adjusted to be 1.0 kg and the Tonai60's attitude became to be the same condition as the tank test. By setting negative buoyancy of the vehicle and nose-down attitude, Tonai60 started gliding. Tethered cable was veered out to the maximum length of 20 m and then the vehicle was reflated to the sea surface. Time histories of ocean environmental data obtained by the RINKO-Profiler are shown in Fig. 10. Upper-side yellow-band zones mean diving period of the Tonai60 glider.

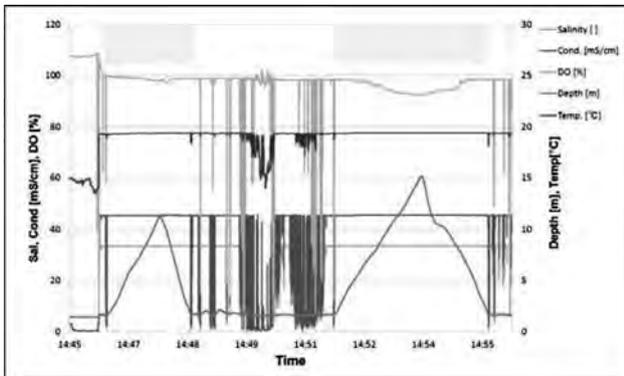


Fig. 10 Time histories of ocean data obtained by RINKO-Profiler.

Findings from this time histories including two dives are as follows; Maximum depth of two dives were 11.2 m and 15.2 m, respectively. Water temperature was about 19.4 centigrade. Salinity was about 33.5 psu. Dissolved oxygen dropped slightly as the depth increased. Conductivity was around 45.4 [mS/cm]. The gliding angle was estimated to be about 34~49 deg. from the relationship between maximum gliding depth and cable length under water. It was windy, and Nansei-maru might have drifted slightly.

## CONCLUSIONS

In this research, an ocean-going solar-powered underwater glider, Tonai60, was developed and the systems were verified by tank test and field experiment. It was demonstrated that Tonai60 had an ability to realise gliding under water and the controller worked well as was expected. Autonomous control program based on PID control is now under construction. For future works, autonomous cruising procedures at sea will be completed by repeating field experiments. Actual endurance should be also investigated through field tests, because performance of photovoltaic power generation may be deteriorated due to biofouling.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to express our deepest appreciation to Associate Professor Masahiko Nakamura, Mr Masaru Inada and Mr Jyoushiro Noda of Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University for their valuable advices in the tank test. Acknowledgement is also due to Associate Professor Tomoko Yamamoto and crews of Nansei-maru of Kagoshima University for their kind cooperation in the field test at Kagoshima Bay.

This work was supported by the KAKENHI (23360393), Grant-in-Aid for Scientific Research (B).

## REFERENCES

- Arima, M, Ishii, K and Nassirei AAF (2011). "Development of the ocean-going underwater glider with independently controllable main wings, SOARER," *Procs. of the twentyfirst (2011) International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE-2011)*, Vol. 2, pp.274-278.
- Arima, M, Tonai, H (2012a). "Feasibility Study of an Ocean-Going Solar-Powered Underwater Glider," *Procs. of the twentysecond (2012) International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE-2012)*, Vol.2, pp.532-537.
- Arima, M, Tonai, H, Kosuga, Y (2012b). "Development of Underwater Observatory Systems for Monitoring Ocean Ecosystem," *Procs. of 2012 Fifth International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology (ICETET-12)*, pp.143-146.
- Arima, M, Tonai, H, Kosuga, Y (2013). "Underwater Glider 'SOARER' for Ocean Environmental Monitoring," *Procs. of 2013 IEEE International Underwater Technology Symposium (UT13)*, UT2013-1096, pp.1-5.
- Japanese Ministry of the Environment (2011). "Marine Biodiversity Conservation Strategy," Japanese Ministry of the Environment.
- JFE Advantech Co., Ltd. (2014). Data given in the table are available as of 20 January 2014, Ocean and River Instruments Division, JFE Advantech Co., Ltd. website: <http://www.jfe-advantech.co.jp/eng/ocean/rinko/rinko-profiler.html>
- Maki, T, Sato, Y, Matsuda, T, Kume, A, Sakamaki, T, Ura, T (2013). "AUV Tri-TON –A Hover Capable Platform for 3D Visualization of complicated surfaces–," *Procs. of International Symposium on Underwater Technology 2013 (UT'13)*, UT2013-1091, CD-ROM.
- Rudnick, DL, Eriksen, CC, Fratantoni, DM, and Perry, MJ (2004). "Underwater gliders for ocean research," *Marine Technology Society Journal, MTS*, Vol.38, No.1, pp.48-59.
- Tonai, H, Arima, M (2013). "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.



## 目的

これまでに進められてきた越境大気汚染の数値モデル研究では、その主な対象が、硫酸塩エアロゾルや黄砂エアロゾルに置かれてきた。しかし、昨今の中国での高濃度の PM2.5 汚染が引き金となって、越境輸送されてくる PM2.5 や国内で生じる P2.5 への関心が高まっている。PM2.5 は直径 2.5 $\mu\text{m}$  以下の微小粒子状物質の「集合体」で、硫酸塩以外にも、硝酸塩、アンモニウム塩 (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) など様々なエアロゾル成分を含む。粒子中の NH<sub>4</sub><sup>+</sup>塩は、硫酸塩や硝酸塩を中和するカウンター成分として重要であるが、その動態については十分に研究されてきていない。

本研究では、科学研究費基盤 S 研究「多波長ライダーと化学輸送モデルを統合したエアロゾル 5 次元同化に関する先導的研究」で新たに導入された大気エアロゾル化学成分連続自動分析装置 (ACSA) や多波長ライダー計測とタイアップして、いままで測定されてこなかったアンモニア (NH<sub>3</sub>) ガスと粒子態アンモニウム塩の測定と解析を行い、PM2.5 エアロゾル濃度変動に関わる NH<sub>3</sub> と NH<sub>4</sub><sup>+</sup>の役割を明らかにする。

## 観測方法

NH<sub>3</sub> と NH<sub>4</sub><sup>+</sup>の測定には、研究代表者が開発した連続測定装置 (Osada et al., AAQR, 11, 170-178, 2011) を用いる。この装置を九州大学筑紫キャンパスの G 棟 607 号室に設置し、2014 年 7 月 31 日から観測を継続している。この測定装置では、大気中の NH<sub>3</sub> と NH<sub>4</sub><sup>+</sup>の分配状態を乱さずに、34 分毎にデータセットが得られる。また、研究協力者の所有する ACSA を用いることで、時別の粒径別 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>や SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>濃度などが得られるので、これらを合わせることで、PM2.5 エアロゾル濃度のモデルシミュレーションの精緻化に資する。

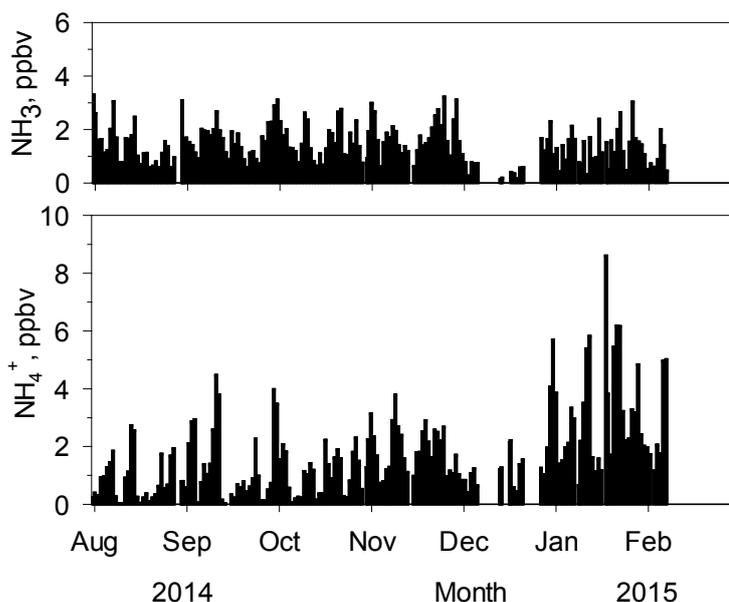


図 1 筑紫キャンパス G 棟で観測した日平均 NH<sub>3</sub> 濃度と NH<sub>4</sub><sup>+</sup>濃度

## 結果と考察

図 1 に示すのは、観測開始以来の NH<sub>3</sub> と NH<sub>4</sub><sup>+</sup>の日平均濃度である。装置のトラブルで 12 月に数日間の欠測となったが、計画停電や装置メンテナンスを除き、ほぼ連続してデータを取得できた。ここまでの日平均値の概要としては、NH<sub>3</sub> 濃度が 0.1~3 ppbv 程度、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>濃度は 0.1~6 ppbv 程度であった。夏から秋にかけて、NH<sub>3</sub> 濃度が NH<sub>4</sub><sup>+</sup>濃度より高いか同程度の日が多いのに対し、1 月以後は、粒子態の濃度がガス態を上回ることが多い。また、粒子態の濃度は数日おきに増減を繰り返す傾向があるの

に対し、ガス態の濃度の増減は粒子態の濃度変化に追従しないことも多い。

図2に示したのは、9月に観測された日内変化の例である。日中に気温が高くなると同時にNH<sub>3</sub>の濃度も高くなり、その際にNH<sub>4</sub><sup>+</sup>の濃度が低下している事例が観測された。これは、気温の上昇に伴う粒子態からガス態への相変化を示唆する。

図3に示したのは、2015年1月に観測された高PM2.5濃度イベントである。微小粒子中のSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>濃度とNO<sub>3</sub><sup>-</sup>濃度の和と、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>濃度はほぼバランスしており、硫酸アンモニウムと硝酸アンモニウムの混合物が存在していたことを示唆する。

以上のように、初年度の観測からは、モデルシミュレーションの精緻化に繋がる、たいへん興味深い時別観測値が得られた。今後は春～初夏のデータを取得し、通年のデータを解析する予定である。

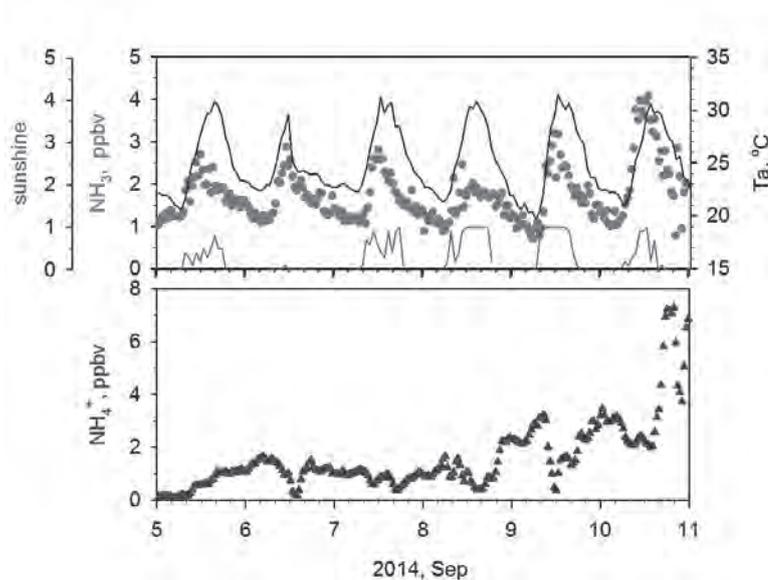


図2 2014年9月の日内変化観測例。気温と日照は太宰府（気象庁・アメダス）での値。

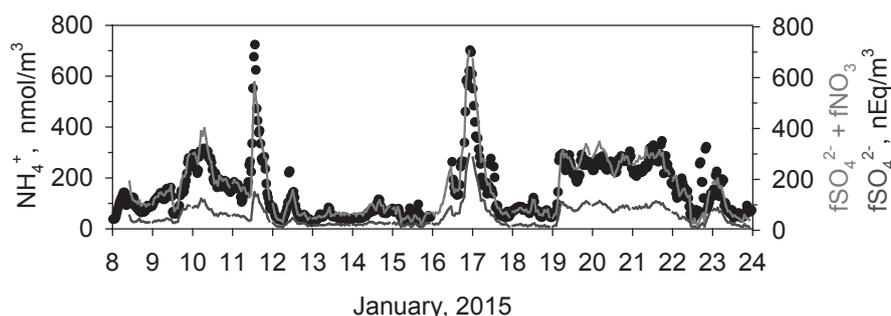


図3 2015年1月のPM2.5高濃度イベント時のNH<sub>4</sub><sup>+</sup>(本研究)、fSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、fNO<sub>3</sub><sup>-</sup> (ACSA) 濃度の観測例。

研究成果報告：  
特になし

### 研究組織

氏名	所属	職名	役割・担当分野
長田 和雄	名古屋大学	准教授	NH <sub>3</sub> /NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> 観測・解析
原 由香里	九州大学応用力学研究所	助教	数値モデル
鵜野 伊津志	九州大学応用力学研究所	教授	総合解析

## 26 AO-3

洋上および海中を航走するビークルに働く流体力解析・機体挙動に関する研究

独立行政法人海洋研究開発機構 海洋工学センター

海洋技術開発部

百留 忠洋

研究目的：

自律型無人潜水機（AUV）の普及や多種多様化にともない、複数機を同時に運用する要求が高まっている。AUVの運用に際して、海中を別海域で航走する無人機を同時に管制することは音響通信の通信距離・範囲の観点から困難である。この問題を解消するためには洋上からAUVを自動で追尾する洋上無人ビークル（ASV）を用意し、これに海中と空中の通信の中継をさせることで遠隔地にある無人機を同時に管制することができるようになる。本件ではASVの模型を用い水槽試験により流体力計測し、それを解析することで波浪中での挙動を検討する。

方法：

実験の様相を図1に示す。全長2m、全幅0.9m、空中重量300kgである。海中のAUVと音響による通信を行うために機体底部にキールおよびポッド部を備える。これは実機の1/3のスケールモデルであり、本件では機体に及ぼす流体力を計測するための実験を実施した。模型による試験では、実機で想定している巡航速力を中心に速度による変化による抵抗の変化や波の変化による動揺の程度を計測し、解析した。この結果の1例を図2に示す。



図1 実験風景

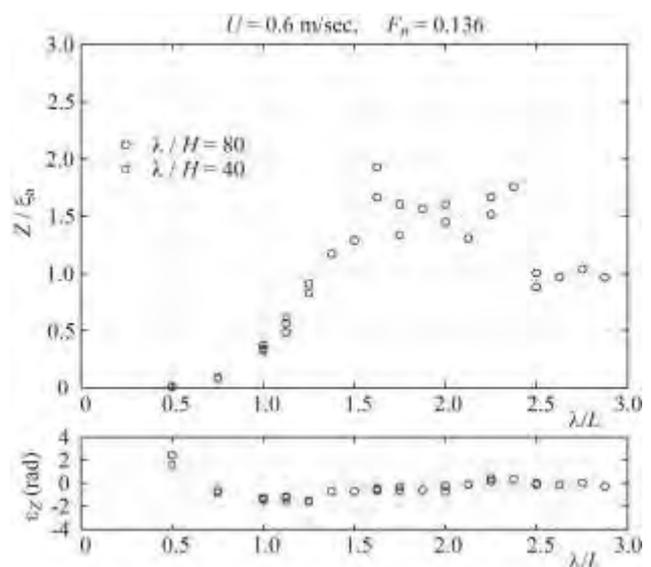


図2 水槽実験の測定データの一例



### 【研究の目的】

越前沿岸域の流れは対馬暖流沿岸分枝の影響を受けやすいことが経験的に知られているが、そのことを説明できるデータは少なかつた。近年、越前岬から北東 20km 程度に位置する鷹巣（図 1 参照）で流速の観測が行われるようになり、九州大学応用力学研究所で日本海高解像度沿岸モデルが開発されたこともあって、越前沿岸域の流況が次第に理解できるようになった。本研究は越前沿岸域の表層流の流動変動の特徴を明らかにすることを目的とし、当海域の鷹巣で実施された観測データおよび上記の高解像度沿岸モデルの計算結果の解析を行った。

### 【観測および解析】

福井県水産試験場の調査船「若潮丸」を用いて鷹巣の定置網近傍に多層流速計（Nortek Aquadopp profiler, 600kHz）と電磁流速計（JFE アドバンテック, compactEM）を設置し、2014 年 5-10 月のデータを取得した。また、データ解析には観測で取得したデータと、同じ測点で以前に取得したデータを利用し、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】

図 2 には、鷹巣で取得したデータを利用して 2014 年 5-10 月の流速の時系列（海面下 10m 層）を示した。越前海岸に沿うように北東へ向かう流れが発生していたことが多いことがわかる。また、8 月 5 日に急潮が発生し、12 日まで強い流れが続いている。この図から読み取るのは難しいが、一時的に流速は 50cm/sec を超えていた。

日本海高解像度沿岸モデルの計算結果を利用して、鷹巣で急潮が発生する前から発生するまでの流動構造の変化を調べた。その一例として、図 3 には急潮発生前の 8 月 1 日と、急潮発生時の 8 月 6 日の流況図を示した。8 月 1 日の流況図をみると、対馬暖流沿岸分枝は若狭湾西



図 1 若狭湾および観測を実施した鷹巣の位置

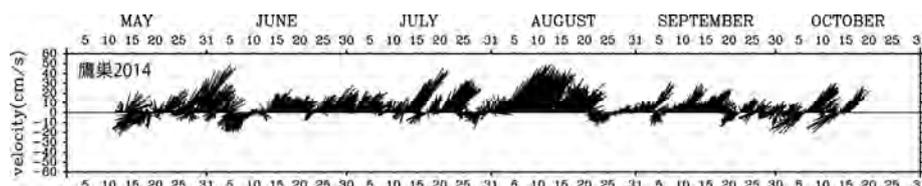


図 2. 鷹巣における流速の時系列 (2014 年, 海面下 10m)

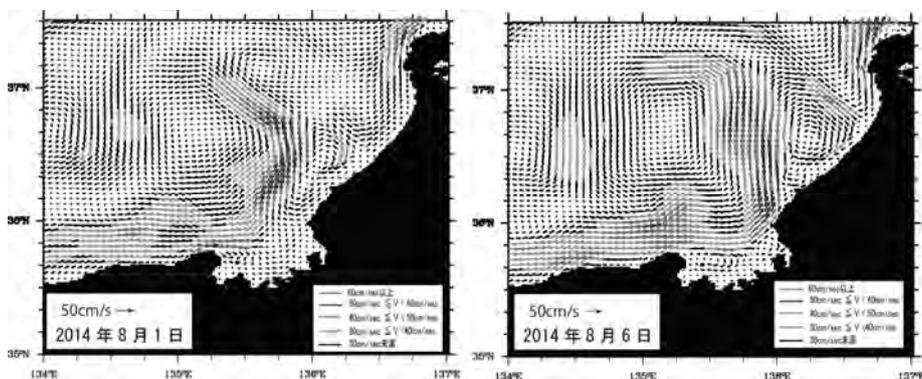


図 3. 急潮発生前の数値計算の結果 (左, 2014 年 8 月 1 日) 急潮発生時の数値計算の結果 (右, 2014 年 8 月 6 日)

部の丹後半島付近では接岸していたものの東へ進むにつれて沖を流れるようになり、鷹巣沖では離岸していた。次に急潮が発生していた8月6日の計算結果をみると、対馬暖流沿岸分枝は丹後半島から越前岬に向かう流路に変わり、鷹巣沖で接岸流路を取っていたことが示された。この計算結果から、8月5日頃に鷹巣で発生した急潮は対馬暖流沿岸分枝の越前海岸への接岸によって引き起こされたと推察した。

さらに、日本海高解像度沿岸モデルの計算結果を利用して急潮が発生したときに鷹巣沖と同様に流れが強くなった範囲や、3日前からの流況の時間変化について検討した。8月4-8日の数値モデルの計算結果を利用して鷹巣沖の流速と他のメッシュの流速との相関を計算し、相関係数を地図上にプロットした(図4)。相関係数が高い場所(図は正の相関のみ着色)は、急潮発生時に鷹巣と同じように流れが強化された場所を示している。若狭湾-鷹巣沖に注目すると、流れが強くなった範囲は越前海岸の岸から80km程度で強化されていたことがわかる。次に、鷹巣で流れが強くなる3日前に流れが強くなった場所について調べるため、鷹巣における上記の期間の流速値と他のメッシュの3日前(8月1-5日)の流速値を利用してLag相関を計算した(図5)。図5の相関係数マップから、鷹巣で流れが強くなる3日前には、若狭湾口部で流れが強くなっていたことが明らかになった。

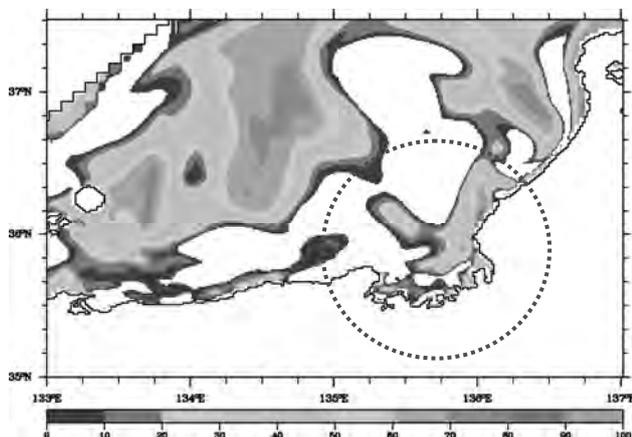


図4. 鷹巣沖の流速と各計算メッシュの流速の相関係数(解析期間2014年8月4-8日)

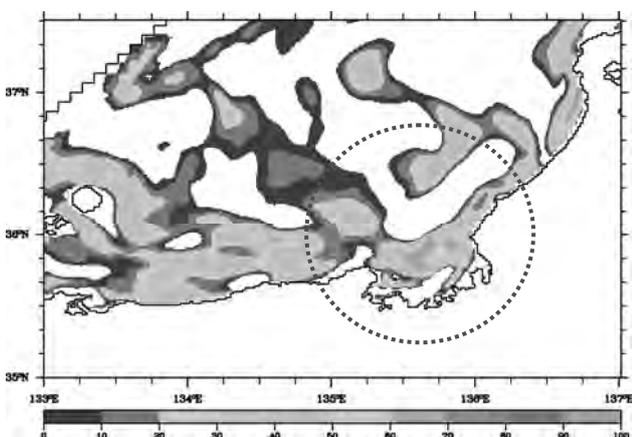


図5. 鷹巣沖の流速(期間は図4と同じ)と各計算メッシュの3日前の流速の相関係数(-3日のLag相関の結果)

急潮はその強烈な流れによって定置網などの漁具被害が発生することが知られており、急潮の発生予測は地域の水産業に対して有益な情報になると考えられている。今回の結果は、対馬暖流沿岸分枝の接岸に注目することが重要であること、さらに鷹巣で急潮が発生する3日程度前に若狭湾の湾口付近で流れが強化される傾向がある可能性を示した。これらのことは、今度の鷹巣における急潮予測に関連する重要な知見といえる。今後も鷹巣で流速観測は継続される予定であることから、同様の解析を行うことによって、さらに詳細な急潮発生過程を把握できる可能性がある。

#### 【研究成果報告】

鷹巣沖における流動変動とその発生要因、兼田淳史・鮎川航太・熊木豊・千手智晴・広瀬直毅・渡邊達郎、日本海洋学会春季大会(2015年3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

## 1. 研究の目的

日向灘で漁獲される多くの沿岸資源の漁獲量は、豊後水道内の漁獲量と同期しており（渡慶次ほか，2014），日向灘と豊後水道において資源的な繋がりが示唆されている。そのため，日向灘北部沿岸域における沿岸資源の卵・仔稚魚の輸送や成魚の移動に影響を与える流動場の把握は重要な課題であった。

本報告では，漁船で計測された流況データを主に使用し，九州東岸沿岸域における表層流動場の季節変動特性の解明を目的とした。

## 2. 使用したデータ

使用したデータは，北浦漁港を拠点として，日向灘北部の水深 100～300m 海域を主に操業する 19 トンのまき網船 1 隻と，細島港を拠点とする表層型浮魚礁「うみさち 2 号」を主に操業する約 5 トンの曳縄船 1 隻が計測した流況データを使用した（図 1）。解析期間は，前者が 2010 年 9 月から 2014 年 8 月までの 4 年間，後者が 2013 年 12 月から翌年 10 月までの 11 ヶ月間とした。流況データは，渡慶次ほか（2013）と同様な方法でクオリティチェックをし，1 分間の時間平均値にした。解析では，船底の泡切れ等により流況データが適切に取得されていない可能性がある操業及び高速移動中を除いた船速 2～12kt の流況データを使用した。

漁船で計測した流況データと比較・検討するため，宮崎水試が実施している船舶の CTD 観測による水温データを使用した。

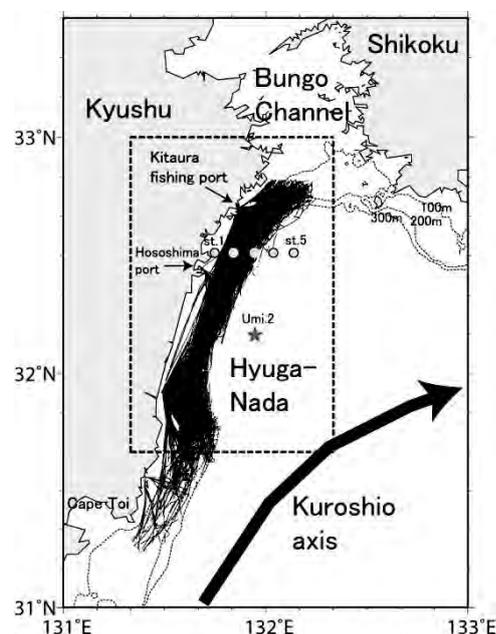


図 1. 研究対象海域。黒点はまき網の航跡，○は CTD 観測地点，☆はうみさち 2 号を示す。

## 3. 結果

まき網船により計測された九州東方海域の表層流動場は，季節変化をしていた。冬季は， $0.2 \sim 0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  の北上流が卓越し，夏季は， $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以下の南下流が卓越していた（図 2）。春季と秋季については，広域で流速が遅かった。次に，冬季と夏季の沿岸域から陸棚斜面域における水温の鉛直断面図に注目した（図略）。冬季は，沿岸側で低温，沖合側で高温となっており，水温の水平勾配は海面から海底まで同程度の大きさであった。一方，夏季は，海面付近において沿岸側で低温，沖合域で高温となっており，その水平勾配

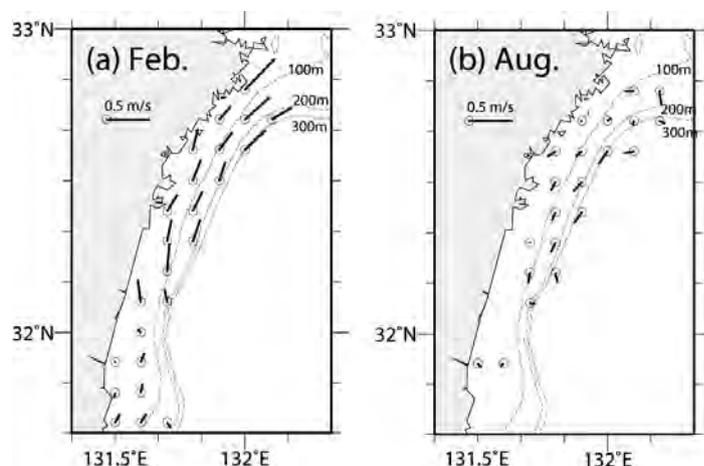


図 2. 緯度・経度  $0.1^\circ$  区画で月平均した海面下約 5m 層の流速ベクトルの空間分布。○は流速ベクトルの始点を示す。

は海面から水深約 50 m にかけて次第に小さくなり、50 m 以深で逆転していた。

細島港とうみさち2号間の北西-南東方向を高頻度で操業する曳縄船で計測した冬季(2月)と夏季(8月)の流況データに注目した(図3)。2014年2月は、沿岸域から陸棚斜面域で $0.1 \sim 0.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ の北上流、陸棚斜面海域より沖合域で約 $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ の南下流となっており、両海域とも表層に最大値となる流速構造をしていた。一方、同年8月は、沿岸域から陸棚斜面域において下層で最大値となる約 $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ の南下流、陸棚斜面海域より沖合域で海面から下層まで同程度の流速値となる南下流が存在していた。

日向灘北部海域において、冬季は、北風が沖合域で強く、沿岸域で弱いため、時計回りの風応力場となっており、流動場の空間分布と類似していた。夏季は、解析期間において、九州東方沖合域の黒潮流軸は接岸していた。九州東方海域の黒潮が夏季に接岸すると、黒潮より沿岸側で湧昇構造を伴うことが知られている(兼田ほか, 2002)。以上の事から、日向灘北部の沿岸域において、冬季の北上流は時計回りの風応力による流れで、夏季の南下流は黒潮接岸による湧昇構造に伴った流れであったと考えられる。

今後は、日向灘で卓越する流況変動の時空間スケールを整理し、スケール毎に変動要因を分析しつつ、流動場と水産資源変動との関係解明を目指したい。

#### 4. 成果報告

渡慶次力 (2014) : 宮崎県海域の海洋環境と漁業の概要, 水産海洋研究, 78(2), 132-133.

渡慶次力, 市川忠史, 児玉武稔, 清水学, 柳哲雄, 広瀬直毅, 千手智晴 (2014) : 日向灘で観測された海洋フロント, 水産海洋研究, 78(2), 143-144.

#### 5. 研究組織

研究代表者	宮崎県水産試験場	主任技師	渡慶次 力
所内世話人	九州大学応用力学研究所	教授	広瀬 直毅
研究協力者	九州大学応用力学研究所	准教授	千手 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 忠史

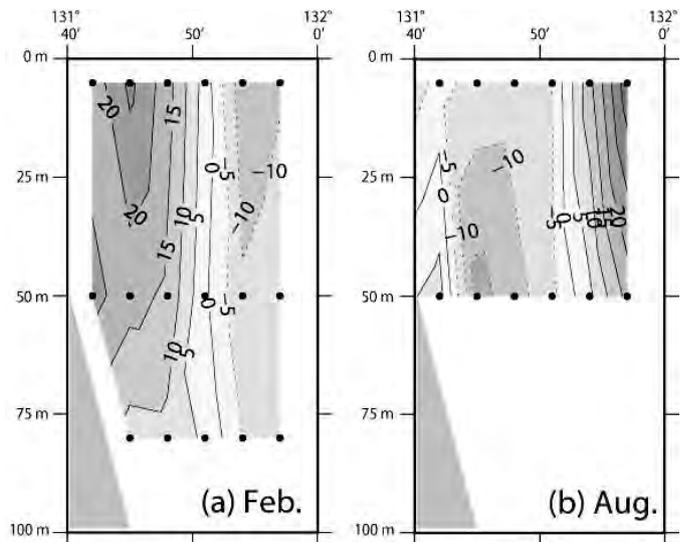


図3. 細島港~うみさち2号間における北方流速成分の鉛直断面図。

コンターインターバルは  $5 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$

### 1. 目的

海洋の大循環は気候や生物環境の形成に重要な影響を与えるが、そのしくみを体系的に理解することは必ずしも十分には行われていない。本研究では数値計算、観測、理論など様々な分野の研究者が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

2014年10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) 潮汐モデルを利用して黄海の海底地形データを修正する：山口博愛・広瀬直毅(九大応力研)
- (2) ロスビー波による南向き(?)渦位輸送：水田元太(北大地球環境)
- (3) 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(2)：柳本大吾(東大大気海洋研)
- (4) 北緯12度50分、東経137度における長期測流結果 -- 1989-1997年、500-4500m(4層) --：石崎廣(気象研)
- (5) 北西太平洋海盆における深層流の中規模変動：宮本雅俊、岡英太郎、柳本大吾、藤尾伸三(東大大気海洋研)、黒木聖夫(JAMSTEC)、羽角博康(東大大気海洋研)
- (6) 黒潮続流の分岐に対する Shatsky Rise の影響：中野英之(気象研)
- (7) 黒潮続流の渦エネルギーは東に運ばれるのか？西に運ばれるのか？：相木秀則(JAMSTEC)
- (8) 親潮海域の平均場の力学：理想化モデル実験：西垣肇(大分大教育福祉科学)
- (9) 低気圧と植物プランクトン：磯辺篤彦(九大応力研)
- (10) 海面加熱時の混合層深度と風成流のスケーリング則：吉川裕(京大理)
- (11) 黒潮前線に対する大気応答の風向依存性--観測・モデル、そして領域的テレコネクションの提案：笠毛健生(九大応力研)
- (12) 海に見える化する：蓮沼啓一(海洋総合研)
- (13) IG 方程式とその応用 --台風に対する海の応答を中心に--：増田章(九大応力研)

### 3. 結果と議論

- (1) 縁辺海の潮汐を数値的に予測する際、海底地形データが不十分なことがしばしば影響する。その影響を系統的に調べた所、渤海の潮汐予報には渤海内部の地形よりも黄海の地形の誤差の影響が大きいことが分かった。また Green 関数法を用いて海底地形の誤差やモデルパラメータを評価する方法について検討した。
- (2) 西岸境界流の再循環域において深層で赤道向き渦位輸送が生じる理由を調べた。2層モデルの上層に振動する外力を与えると倍調波のロスビー波によって下層に赤道向きの渦位輸送が生じることが、再循環域に相当する広いパラメータ範囲で確認された。また極限的な場合において倍調波と渦位輸送の出来方を調べた。
- (3) 北太平洋西部の深層で観測された流速変動の解析を行った。変動は海底勾配が急なほど海底に捕捉され、

変動の主軸は低周波数ほど海底地形に沿う傾向がある。これらの性質は海底捕捉波と整合的であることから平面波を仮定し、波の波数、群速度を推定し、変動の起源を議論した。

(4) フィリピン海における長期係留観測から 500-700m では 4 年周期程度の東西流変動、4500m では北北東向きの定常流が存在することが示された。これらは数値シミュレーションと概ね一致し、500-700m の変動は日付変更線以東から伝播していることが分かった。また全層で 70 日程度の変動が顕著であることも示された。

(5) 黒潮南方の北緯 30 度では 5、60 日程度の周期帯に顕著な流速変動が存在することが深層係留観測によって示された。解析期間の限られていた先行研究と異なり、変動の伝播速度は順圧ロスビー波では説明がつかない。数値シミュレーションとの比較から黒潮再循環によって移流される渦であることが示唆される。

(6) 黒潮続流がシャツキー海膨によって枝分かれすることが観測から示唆されている。このことを理想化した数値実験によって確かめた。続流が海膨に当たり生じた擾乱から東西縞状構造を持つ流れが形成され、それが枝分かれに対応することが示された。縞状構造はスベルドラップ流で移流され十年規模で変動する。

(7) ロスビー波によるエネルギー輸送を圧力がなす仕事から求めた場合と、群速度から求めた場合では結果が異なり、非発散なベクトル分のずれがある。ここでは準地衡流近似を行わずに、群速度に平行なエネルギー輸送の形式を導いた。これを西岸境界流のエネルギー収支に適用すると従来より明瞭な結果が得られる。

(8) 2 層モデルを用いて親潮潮域の海底地形を理想化した数値実験を行った。モデル上層では千島海溝沖にある海膨を低気圧周りに迂回する循環が生じた。この循環は亜寒帯前線に沿った流れと定性的に一致する。その形成要因として海膨周りの順圧流によって傾圧ロスビー波の特性曲線に双曲点が生じたことが挙げられる。

(9) 日本海ではブルーム時に植物プランクトンが日射を吸収することで海面水温が 1 度近く上昇することが混合層モデルから示された。この水温上昇を領域大気モデルに与えた所、弱風時に本州東方の低気圧活動が強まった。このことからブルーム時期を決める海洋混合層の変化が低気圧活動に影響することが示唆される。

(10) 海面が加熱される時の混合層の厚さの指標として Monin-Obukov 長とエクマン層の厚さが知られているが、これらは地球自転または浮力の効果を無視しており、そのままでは現実に適合しない。衛星データの解析から Zilitinkevich の提唱した折衷的なスケーリング則が全球規模で成り立つことが示された。

(11) 観測と数値実験、データ解析から東シナ海の黒潮上で短期的に風が弱まる現象が発見された。また黒潮に平行に風が吹くときは直交する方向に風が吹くときに比べ風が収束し降水が生じやすくなることが分かった。東シナ海の黒潮上の風向は日本海にある低気圧に左右される傾向がある。

(12) 近年、海象・海上気象に関する観測、予測が様々な研究機関で公開されている。気象庁で公開されているデータでは津軽暖流水の季節変動や春先に現れる宗谷暖流水前駆水が現実的に捉えられている様である。また、これらの情報を海上にいる漁業者に知らせ、計画的な漁業活動に貢献する試みが紹介された。

(13) 準地衡流近似が適用出来ない慣性周期より短い時間スケールの変動等を含む現象を体系的に記述することを試みた。f 平面で一変数のみを含む方程式 (IG 方程式) を議論し、台風通過時における低温水域や慣性振動の発生、風応力に対する沿岸流の応答などへの適用例を示した。赤道  $\beta$  面への拡張も試みた。

## 海洋乱流の観測およびモデリング研究

京都大学大学院 理学研究科 准教授 吉川 裕  
九州大学 応用力学研究所 教授 松野 健

地球温暖化や海洋酸性化など、緩やかではあるが持続的な環境変化に果たす海洋の役割は大きい。海洋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が、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、12月23日に京都大学大学院理学研究科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。出席者数は20名であった。

最初の講演では、遠藤が東シナ海の海底乱流境界層における流動・乱流構造の観測結果を報告した。海底境界層は大きく分けて上部と下部に分けられること、下部では半日周期の潮流が、上部では日周期の潮流がそれぞれ混合を引き起こすこと、密度の水平勾配とそれを横切る潮流の時間変化に起因して、鉛直密度勾配も周期的変動をするが、上部では勾配の移流が、下部では流速の鉛直シアーによる鉛直勾配の生成が重要であり、同じ境界層でも上部と下部で性質の異なることが示された。次に古市は、同じく東シナ海の潮流混合とそれに伴う懸濁粒子の巻き上がりや沈降の様子を明らかにするため、ラージエディシミュレーションを用いた数値実験の結果の報告をした。懸濁粒子の粒径や抵抗係数などを考慮して実験を行った結果、粒子の移動速度は概ね流速に等しいこと、乱流がある場合にも粒子の自重で定まる沈降速度で平均的には沈降する様子が示された。一方後藤は、現場で乱流を計測する測器として近年その有用性が期待されているCTDフレーム搭載型乱流計(MicroRider)の計測精度の検証結果について報告を行った。既存の乱流計との比較を行ったところ、CTDの沈降速度が一定でない場合には計測値に大きな誤差が生じることや、高速水温センサーの応答速度に関する問題を補正する方法などについての検討結果が紹介された。次にNohは表層乱流混合を引き起こすと考えられているラングミュア循環の影響を乱流混合スキームに組み込み、海洋大循環モデルでその性能評価を行った結果について報告を行った。ラングミュア循環は高緯度で成層の弱い時期により表層混合を強化し、現状でみられるモデルのバイアスを大幅に減少させることなどを示し、新たな混合スキームの有効性を実証した。山崎は自身が開発したレーザーを用いて、乱流と植物プランクトンなどの微細懸濁物のサイズとの関係に関する先進的な観測結果を紹介した。その結果によれば、コロモゴロフ長よりも小さい粒子の長径は、乱流強度の大きさとともに線形に増加することなどが、黒潮域や湖水域など幅広い環境の見出され、また粒子サイズの平均値ではなく分散値が植物プランクトンの維持に重要である可能性が示された。島田は北極海の最新の研究成果と、乱流現象に関連した流動現象に関する観測結果の報告を行った。北極海では近年海水面積の減少が著しいが、その原因の一つは北極海の海水が融けて動くようになり、それが海洋循環を引き起こし、その結果暖かい海水が海水域に運ばれさらに海水が融けるなど、正のフィードバックが働いていることに起因していることが示された。また、海水下の流動構造を観測した結果、混合層内で慣性振動が卓越していること、その慣性振動は流氷速度に関係していることなどが示された。田中は、ベーリング海陸棚縁辺域で高い基礎生産を生み出す要因として鉛直混合に着目し、

鉛直混合や流動構造の現場観測を行った。その結果、高い基礎生産は硝酸塩と鉄に律速されていること、鉄は陸棚海底から潮流混合により巻き上がり、等密度面混合を経て陸棚縁まで輸送されること、外洋で高い値をもつ硝酸塩が陸棚縁まで輸送されること、などを示した。また、数値模型を用いた実験を行い、以上の過程が矛盾なく起きることを示した。最後に田中は赤道域にみられる熱帯不安定波に着目し、その変動が深層における海洋内部はを引き起こす過程について解析結果を紹介した。OFES と呼ばれる高分解の海洋大循環モデルの結果を解析し、不安定波の収束・発散が引き起こす鉛直混合が Lee Wave を引き起こしていることを、線形解析解との比較を通じて明らかにした。

以上の話題提供とその後に行われた質疑応答や議論は、予定を大幅に超えて活発に行われた。また、これまでの断片的な知識の整理や、今後の研究の方向性を考える上で非常に有意義なものであった。とりわけ今回は若い大学院生の参加も多く、研究を始めたばかりの院生からその道のトップランナーである年長者まで幅広い年代の参加者による忌憚のない議論を可能とするこのような研究会が、海洋乱流のコミュニティーを形成・維持にも非常に有効であることが確認できた。この研究会は来年度も継続して進めることも確認された。

---

#### プログラム

---

2014年12月23日

09:30 - 09:40 吉川 (京大理)

趣旨説明

09:40 - 10:10 遠藤 (東大)・他

東シナ海陸棚上の海底混合層内で観測された成層および乱流強度の潮汐周期変動

10:10 - 10:40 古市 (環境研)・他

LESに基づく海底混合層過程の数値実験

10:40 - 11:00 休憩

11:00 - 11:30 後藤 (東大)・他

高速水温センサを用いたCTDフレーム搭載型乱流計測の応答検証

11:30 - 12:00 Noh, Yign (Yonsei Univ)・他

Parameterization of Langmuir Circulation in the Ocean Mixed Layer Model Using LES and its Application to the OGCM

12:00 - 14:00 休憩

14:00 - 14:30 山崎 (東京海洋大)・他

海洋乱流と植物プランクトンの微細構造

14:30 - 15:00 島田 (東京海洋大)・他

北極海における海氷運動と海氷下の流速変動と海氷変動

15:00 - 15:20 休憩

15:20 - 15:50 田中 (東大大海研)

ベーリング海南東部陸棚縁辺域での栄養塩輸送を支える水塊構造と乱流鉛直混合に関する研究

15:50 - 16:20 田中 (東大理)・他

高解像度OGCMでみられる太平洋赤道域の内部波

16:20 - 17:20 総合討論

## 海洋表層境界層における乱流混合の観測

京都大学大学院 理学研究科 准教授 吉川 裕  
九州大学 応用力学研究所 教授 松野 健

## 1. 目的

風による海洋表層の乱れは、100m以下の小さい規模の現象であるが、混合層深度や海面水温などを変化させることで、大規模な海洋・大気場に影響を与える。このような風による乱れは、風に加えて海面加熱や波浪に影響を受けるが、その影響の詳細は不明な点が多く、海洋モデルの不確定要素であると同時に海洋の長期予報の不確実性の原因の一つとなっている。そこで本研究では、海洋表層の乱れを計測し、その風や海面加熱、波浪に対する依存性を明らかにすることを目指して行った。

## 2. 観測の概要

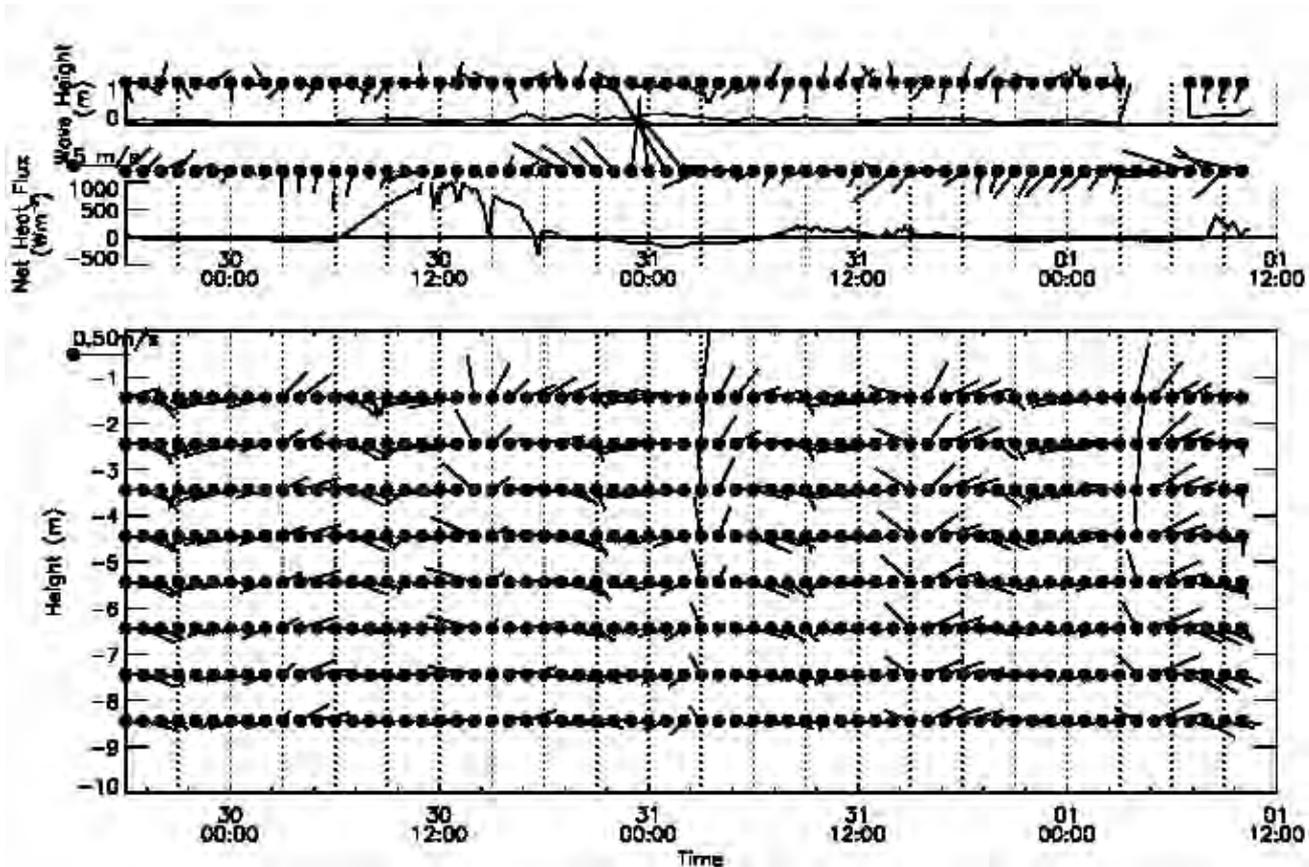
現場観測は八代海と和歌山県白浜沖でそれぞれ行った。八代海の観測は、水産研究所瀬戸内水産研究センターのしらふじ丸による有害赤潮の観測航海にて行った。7月29日16時45分から8月1日10時にかけて、北緯 $32^{\circ} 21.3'$  東経 $130^{\circ} 16.4'$  に流速計と波浪計を係留し、流速と波浪の連続観測を行った。係留系は、水平流速の水平分布を計測可能な流速計 (RDI社製、HADCP600kHz、水深2m) と、水平流速の鉛直分布を計測可能な流速計 (RDI社製、WorkHorse1200kHz、水深10m)、GPS波浪ブイ (ゼニライト社製) からなり、応用力学研究所の油布技術職員が制作したブイを用いて係留した。また、係留地点において、乱流微細構造プロファイラーを用いた乱流エネルギー散逸率の観測を7月30日10時30分頃より8月1日8時30分ころまで2時間おきに行った。

一方、白浜での観測においては、京都大学防災研究所の白浜海象観測塔 (北緯 $33^{\circ} 43'$ 、東経 $135^{\circ} 20'$ ) に八代海でも用いたHADCPを塔脚に取り付けた (設置水面は約3m)。また水深4m、8mの位置に小型メモリー式水温計も設置した。さらに塔から約30m離れた水深10mの地点に、波浪計測モードを備えたADCP (RDI社製、WorkHorse 1200kHz) と、小規模流動構造を計測可能なADCP (RDI社製、SV20) を設置し、波浪と流速の小規模構造の計測を試みた。

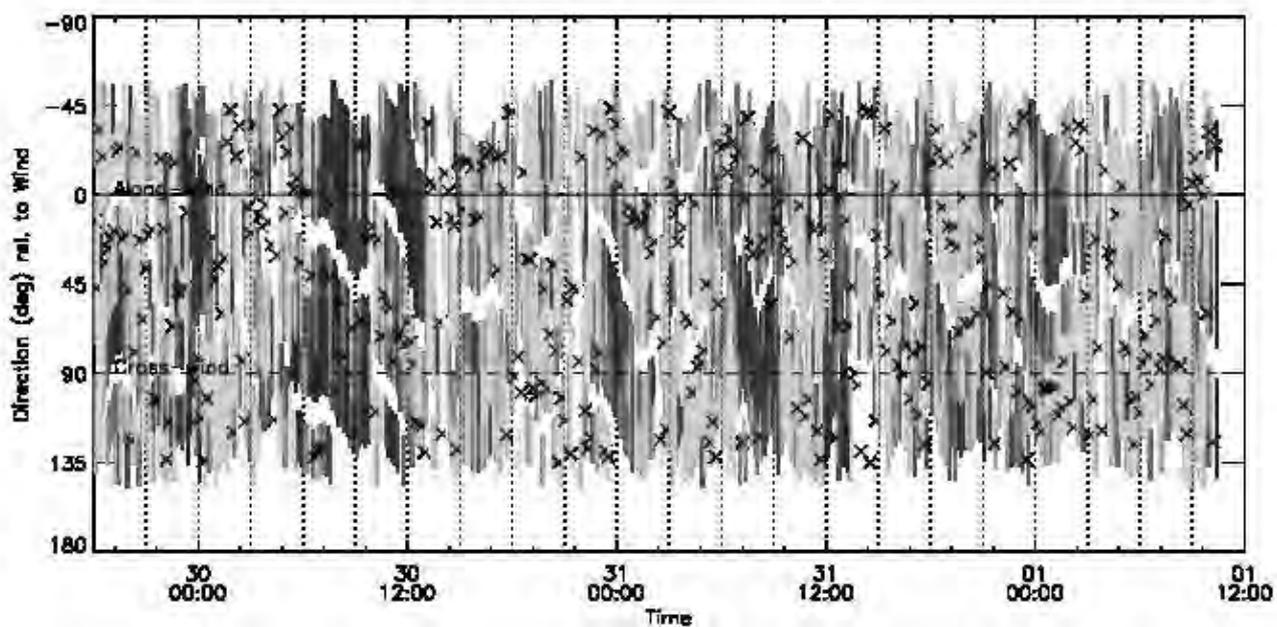
## 3. 観測結果

八代海観測時には、7月31日0時頃に5m/sを超える強い風が吹いたが、反閉鎖性である八代海では有義波高は0.5mにも及ばなかった。それでも波浪に伴う軌道運動流速は大きく、風向き方向の流速成分に大きな流速変動が検出された。また、10分間平均した水平流速は、10m以上の深さにまで風が引き摺る流れがおよぶ様子を検出した。乱流散逸率は2時過ぎに深さ10m以上にまで大きく、風による乱れが発達し、運動量を下層へ輸送することで、水平流速が徐々に深まっていくことが確認された。

また、白浜観測においては、波浪に伴う軌道運動流速を明瞭に捉えることができた。周波数解析など詳細な解析を行うことで、波浪と水平流との関係について、今後調べてゆく予定である。



八代海観測結果の例。上段：有義波高および波向き。中断：風向・風速および海面熱フラックス。下段：水平流速の鉛直分布。



水平流速変動強度の時間変化。横軸は時間、縦軸は風向からの相対角度。風向が強いときに、乱れが大きくなっている様子が見て取れる。

### 1. 研究の目的

グライダー型水中ビークルはプロペラやスラスタ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。このため省エネルギー性や静粛性に優れ、近年需要の高まっている海洋の自律長時間連続観測に適していると考えられる。一方で、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要求されるが、スラスタを持たないグライダー型水中ビークルの場合、機体形状や重心位置などの僅かな変化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、これまでの研究で設計した運動制御系をグライダー型水中ビークルに実装し、実海域において運動制御試験を実施すると共に、実海域試験結果を用いて機体の運動モデルの精度を検討し、流体力係数の見直しを行った。

### 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機体を図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。浮力調節装置は図3に示すように、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変化させ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力、浮心位置の変動により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

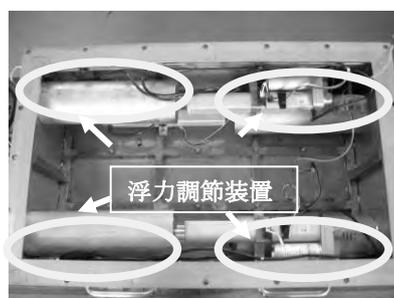


図2 機体内部構造

表1 機体主要目

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

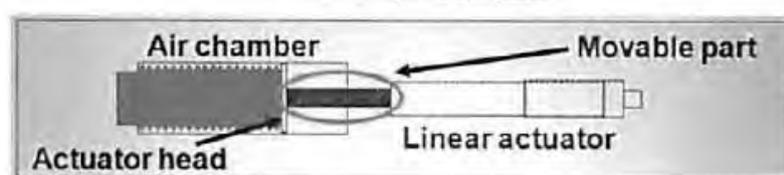


図3 浮力調節装置構造図

### 3. 機体運動制御系

機体には圧力センサーと加速度センサーを搭載しており、機体深度とロール角、ピッチ角を観測し、フィードバック制御系を構成する。ここではPD制御系により各浮力調節装置のアクチュエータヘッド

の制御量を決定し、機体の深度と姿勢を制御する。(1)式に制御量算出式を示す。

$$\begin{aligned}
 l_z &= l_z - \frac{1}{4}K_z(Z-h) + \frac{1}{4}K_z \frac{d}{dt}(Z-h) - \frac{1}{4}K_z(\theta-\theta^*) - \frac{1}{4}K_z \frac{d}{dt}(\theta-\theta^*) \\
 l_x &= -\frac{1}{4}K_x(Z-h) - \frac{1}{4}K_x \frac{d}{dt}(Z-h) - \frac{1}{2}K_x(\phi-\phi^*) \\
 &\quad - \frac{1}{2}K_x \frac{d}{dt}(\phi-\phi^*) - \frac{1}{4}K_x(\theta-\theta^*) - \frac{1}{4}K_x \frac{d}{dt}(\theta-\theta^*) \\
 l_y &= -\frac{1}{4}K_y(Z-h) - \frac{1}{4}K_y \frac{d}{dt}(Z-h) + \frac{1}{2}K_y(\phi-\phi^*) \\
 &\quad + \frac{1}{2}K_y \frac{d}{dt}(\phi-\phi^*) - \frac{1}{4}K_y(\theta-\theta^*) - \frac{1}{4}K_y \frac{d}{dt}(\theta-\theta^*)
 \end{aligned} \tag{1}$$

$l_x, l_y, l_z, l_{bi}$ : 各アクチュエータへの制御量  
 $Z, \phi, \theta$ : 機体深度、ロール角、ピッチ角の検出量  
 $h, \phi^*, \theta^*$ : 機体深度、ロール角、ピッチ角の目標値  
 $K_z, K_x, K_y, K_\phi, K_\theta, K_\theta$ : ゲイン定数

#### 4. 鹿兒島湾実海域試験

設計した PD 制御系を用いた運動制御試験を鹿兒島湾において実施した。水深 2m まで潜降した後 0.5 m まで浮上する指令を与えた際の機体深度とピッチ角の時刻歴を図 4 に示す。機体は約 2.3m まで潜降した後浮上を開始し、潜航開始後約 60 秒で深度 0.6m に到達した。また、この間のピッチ角は  $-20^\circ$  から  $-50^\circ$  と常に機首下げの姿勢であった。

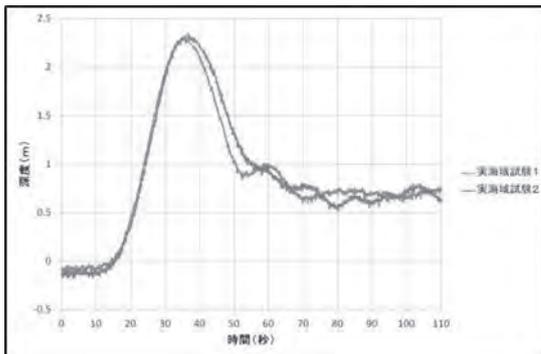


図 4 実海域試験結果 (機体深度)

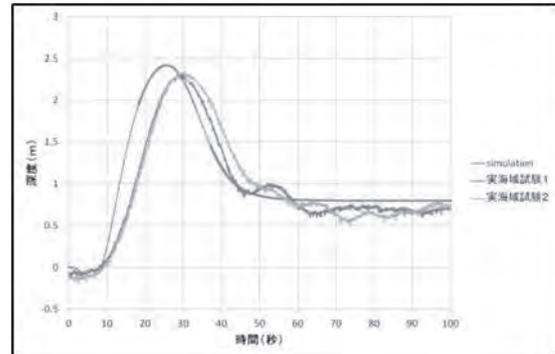


図 5 シミュレーション計算結果 (機体深度)

#### 5. 機体運動モデルの精度の検討

機体固定座標系における 6 自由度運動方程式に基づき、機体運動のシミュレーション計算を実施した。実海域試験と制御系設計に用いた流体力係数によるシミュレーション結果の間には差異が見られ、幾つかの流体力係数の精度が不十分であることが認められたため、試験結果を元に流体力係数等の値を再考し運動モデルの精度向上を計った。図 5 に実海域試験と新たに推算した流体力係数によるシミュレーション計算を比較して示す。シミュレーション計算結果の方が深度 2m への到達が約 6 秒早い等、若干の違いが見られるが、実海域試験結果を概ね再現する運動モデルが得られた。

#### 6. まとめ

機体深度、ロール角、ピッチ角をフィードバックし、浮力調節装置を用いてグライダー型水中ビークルの機体運動を制御する PD 制御系を実装し、実海域において運動制御試験を実施した。機体運動モデルの流体力係数の精度向上を計り、その有効性を確認した。

## 26 AO-10

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

気象庁気象研究所 弓本 桂也

### ● 目的

黄砂は中国内部の砂漠域で舞い上がった土壌粒子が、下流域である朝鮮半島や日本列島、北太平洋へと輸送される現象であり、その活動は東アジアの春季で顕著となる。土壌から大気へと輸送される黄砂の量は 300Tg に達する。黄砂は、視程のような大気環境だけではなく、健康被害、海洋の生物循環、気候など幅広く影響を与える。こういった影響を調べるためには、黄砂の発生・輸送・沈着といった一連の過程を把握することが必要である。この目的のため、観測や数値モデルを用いた研究が行われてきたが、観測だけでは全体像を把握するのが難しく、数値モデルによるシミュレーションだけでは定量的にも不確実性が残されてしまう。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、開発した同化システムと衛星観測データを用い、長期間に及ぶ黄砂発生量の逆推計を行い、黄砂版の再解析データの整備を行った。

### ● 実験方法

エアロゾル同化システムには SPRINTARS/4D-Var (Yumimoto and Takemura, 2013)を用いた。SPRINTARS は大気大循環モデルと結合した全球エアロゾル気候モデルで、黄砂を含めた対流圏の主要なエアロゾルを取り扱う。エアロゾルやその気候影響に関する様々な研究に用いられている他、日々の予測計算にも使われている。同化データには極軌道衛星 TERRA と AQUA に搭載された可視センサー MODIS で観測されたエアロゾル光学的厚さを用いた。本研究では 2005–2012 年の 8 年間におよぶ逆推定計算を実行し、最適化された黄砂の発生強度・分布から黄砂の 4 次元分布・沈着量・放射強制力などを求めた。また、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(AD-Net)などの観測データを用いて結果を詳細に検証した。

### ● 結果と考察

図 1 に逆推計に対する検証結果を示す。松江ライダーサイトにおける黄砂消散係数の時間-高度断面の比較である。各図上段から、観測、逆推計前後の値、逆推計前後の差 (increment) である。モデルの空間解像度は約 2.8 度と粗いが、観測された黄砂の到来時期と濃度を全体的に良く再現出来ている。逆推計前後の差を見てみると、逆推計による黄砂発生量の最適化によって消散係数が増減 (黄砂の濃度が増減) している。特に特徴的なイベントは、2006 年 4 月 20–23 日、2007 年 5 月 12–14 日、2009 年 5 月 18–21 日に到来した黄砂イベントで、モデルの過大な消散係数が逆推計によって緩和され、観測に近い値となっていることがわかる。逆に、2011 年 5 月 19–21 日の黄砂イベントでは、モデルは観測ではみられなかった濃いダスト層を高度 2–4 km に予測したが、逆推計を行うことで修正されている。他にも、逆推計によって 2006 年 5 月 29–30 日を初めとするモデルの過大評価や、2010 年 5 月 3–5 日といった過大評価イベントが改善された。

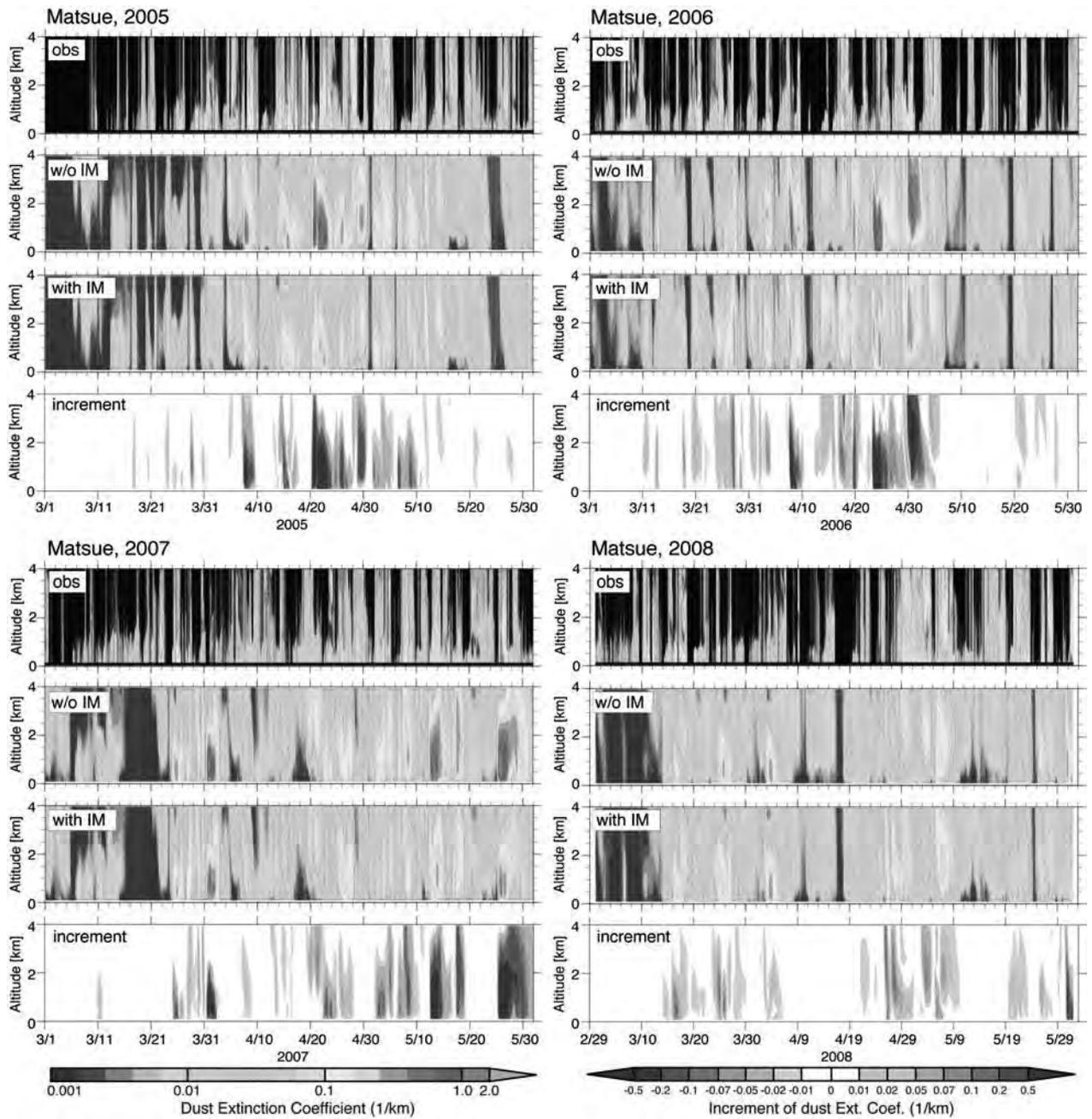


図 1. 松江におけるダスト消散係数の時間高度断面の比較。(上段) AD-Net ライダーで観測されたダスト消散係数。黒塗りの領域は雨や雲による欠損を表す。(二段目、三段目) モデルによるダスト消散係数 (逆推計無、有)。(4 段目) 逆推計有の結果から逆推計無を引いた差。

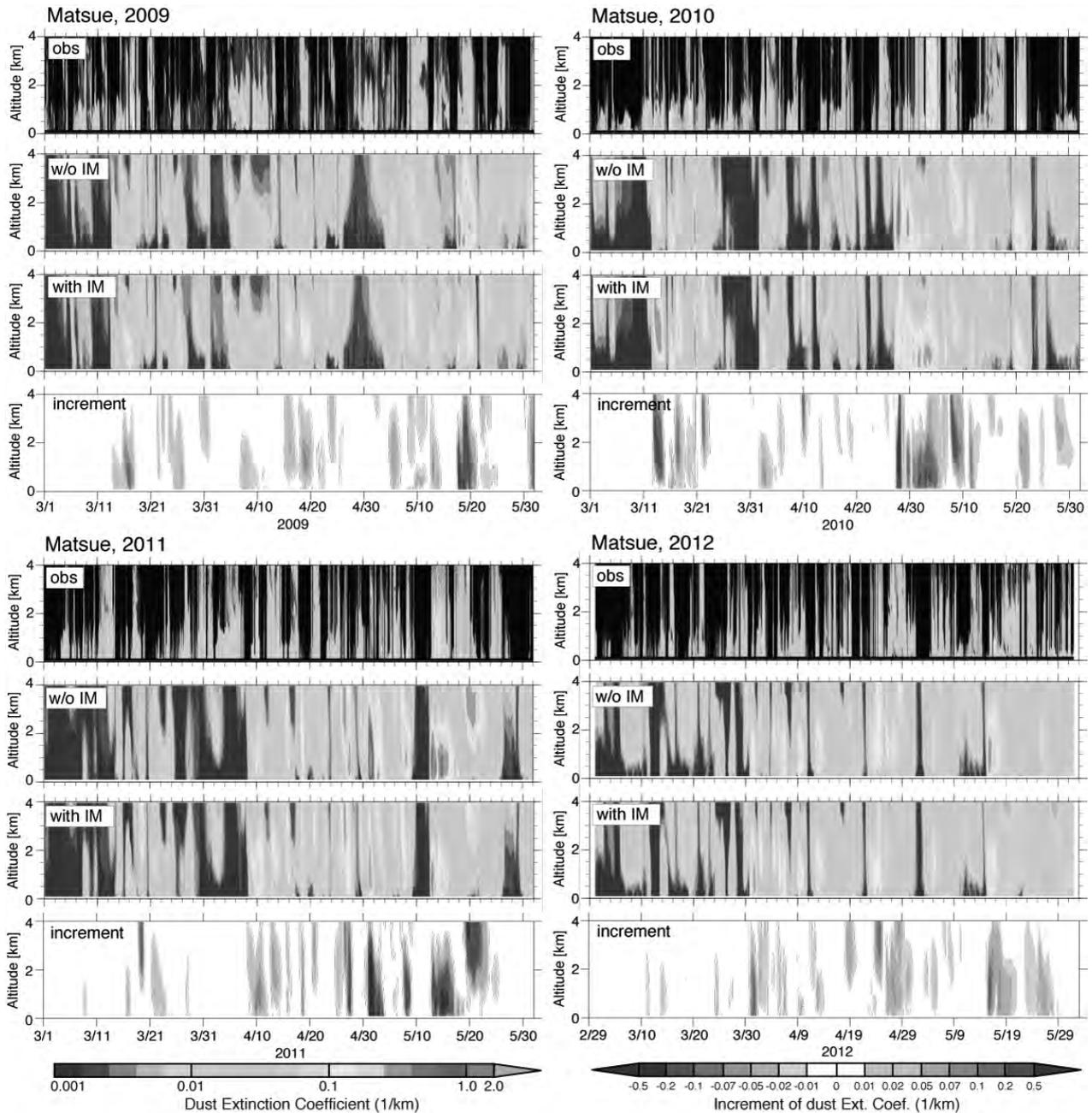


図 1. (続き)

図 2 にゴビ砂漠およびその周辺地域での黄砂発生量の年々変動を示す。逆推計によって得られた黄砂発生量の 8 年平均値は 332 Tg/year で、逆推計前と比べ僅かだが減少した。これは、モデル自体に大きなバイアスは存在しないことを意味している。しかし、各年を見てみると、逆推計によって発生量が大きく変化していることがわかる。例えば、2006, 2008, 2009, 2010, 2012 年は発生量が 0.6–61.1%増加したが、2005, 2007, 2011 年は逆に 12.3–26.3%減少した。逆推計によって 2007 年のピークや、2009–2010 年の谷はなだらかになり、年々変動の振幅は逆推計前に比べて小さくなったが、それでも依然として大きな年々変動が存在している（8 年間の標準偏差は 55.3 Tg/year）。

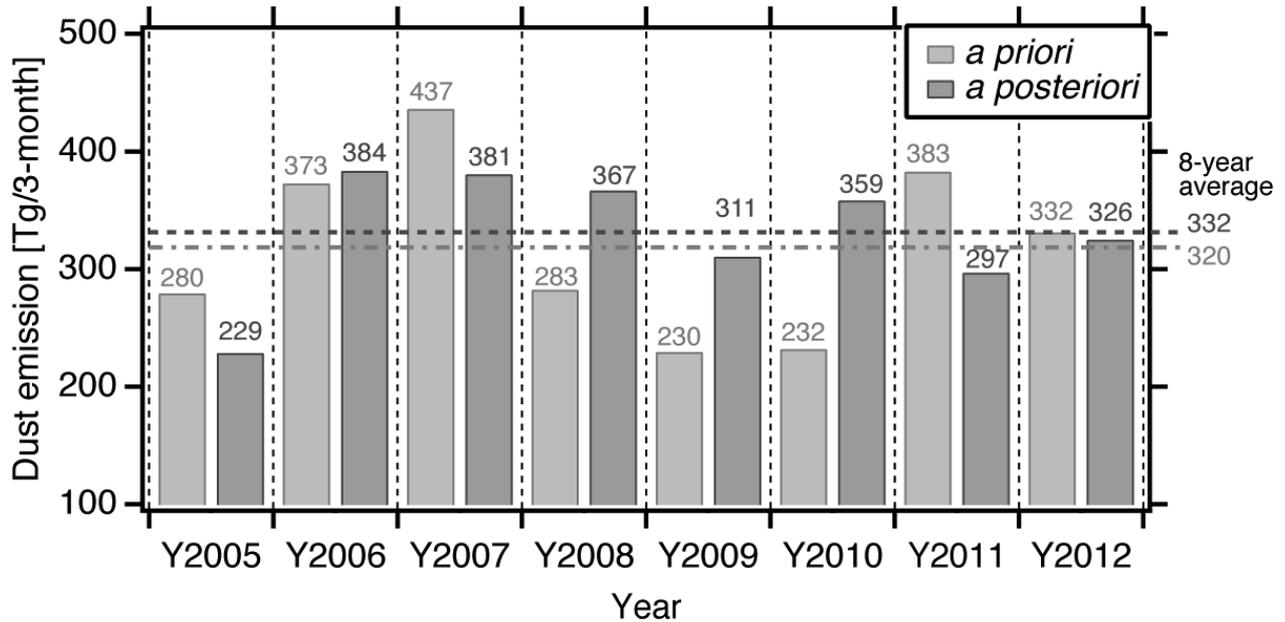


図 2. ゴビ砂漠・内モンゴル周辺地域におけるダスト発生量の年々変動。灰色と赤色のバーはそれぞれ逆推計無、逆推計有の結果。破線と鎖線、および欄外の数字は8年間の平均値を表す。

- まとめ

本研究では、衛星観測を同化することで黄砂の発生量の長期間逆推計を行った。地上ライダー観測と比較することで、逆推計による発生量の最適化がモデルシミュレーションを改善していることがわかった（二乗誤差で 38–50%）。逆推計によって得られたゴビ砂漠とその周辺地域の黄砂発生量の 2005–2008 年の平均値は 332 Tg/year で、大きく年々変動していることがわかった。逆推計によって得られたシミュレーション結果は黄砂版再解析データとして、輸送経路の理解、空間分布の年々変動、海洋への沈着量推定、北米への長距離輸送、放射強制量の見積もり、健康被害調査のためのインプットデータなど幅広く利用されることが期待できる。

- 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, 2013

Yumimoto, K., and Takemura T.: Long-term inverse modeling of Asian dust: Interannual variations of its emission, transport, deposition, and radiative forcing, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120, doi:10.1002/2014JD022390, 2015

## 26 AO-11

複合雲解析アルゴリズムのための衛星赤外サウンダを使った水蒸気プロファイル解析手法の開発

気象研究所 気象衛星・観測システム研究部 石元裕史

### ・目的

雲の生成や雲微物理特性には水蒸気場の変化や水蒸気の過飽和度が深く関与しており、広い空間スケールでの雲の微物理情報とその生成過程を明らかにするためには衛星データを用いた水蒸気場の解析が重要である。衛星赤外サウンダは衛星マイクロ波センサーに比べて高い水平・鉛直分解能で温度と水蒸気の鉛直プロファイルを推定することができる。特に Atmospheric Infrared Sounder (AIRS)の輝度温度データから求めた温度・水蒸気場は、ほぼ同時刻に同じ場所を周回する A-Train 衛星群の衛星雲レーダ CloudSat と衛星ライダー(CALIPSO)データによる複合的雲微物理解析の結果を解釈する上で有力な情報となると考えられる。本研究では AIRS 輝度温度データを用いて海・陸域および一部下層雲域に解析対象域を拡張した水蒸気プロファイルのリトリバルアルゴリズムを開発する。このアルゴリズムから求めた水蒸気場や水蒸気過飽和情報と、九大応力研・岡本教授研究グループが開発した CloudSat/CALIPSO データを複合的に利用した雲微物理リトリバルアルゴリズムでの解析結果とを組み合わせることで、新たな統合的雲物理解析システムを開発する。

### ・研究方法

赤外サウンダの輝度温度データから温度と水蒸気のプロファイルを推定する手法として 1次元変分法(1D-Var)を用いる。1D-Var で必要な前方計算には気象研究所が開発した AIRS 用の高速放射モデル(MITRAN)を使用する。また背景場として気象庁数値モデルによる全球客観解析場(GANAL)を用いる。比較的溫度プロファイルに精度のよい GANAL を初期値に用い、また McNally and Watts (2003) の手法を応用して、対流圏中上層のリトリバルが可能な大気条件を AIRS の 110 の CO<sub>2</sub> チャンネル輝度温度から判定する。リトリバル条件が適合したときに AIRS の 45 の水蒸気チャンネルを用いて、水蒸気と湿度のプロファイルを推定する。

### ・研究結果

まず 1D-Var 計算による水蒸気推定の効果を調べるため、冬季 50 日間における AIRS とゾンデ観測との全球マッチアップデータを作成し、AIRS データと GANAL を用いた 1D-Var 結果とゾンデ観測結果とを比較した。その結果、対象となる 200-600hPa 高度において 1D-Var 解析による水蒸気場(比湿・相対湿度)は GANAL 初期値に比べて有意にゾンデ観測値に近づいており、また NASA が提供している AIRS の標準プロダクトによる水蒸気プロファイルよりも良い結果であった。このことから我々の解析手法の有効性が明らかとなった。次に幾つかの事例を選んで、1D-Var で解析した対流圏中上層の水蒸気場と九大応力研 岡本研究室による CloudSAT/CALIPSO 解析結果とを比較した。AIRS の 1D-Var 解析では、対流圏中上層の氷雲近傍において水蒸気の氷過飽和が推定される場合が多い。CloudSAT/CALIPSO データとの比較により、氷雲が存在する高度と、氷過飽和が推定された高度がよく対応しているという結果が得られた。このことは氷雲の生成に水蒸気の氷過飽和が伴っていることを示唆するとともに、氷雲の生成・消滅に関わる微物理過程を複合的な衛星観測によって広範囲に調べることが可能であることを示している。これらの結果についてまとめた論文は J. Geophys. Res.誌に投

稿・掲載された (doi:10.1002/2014JD021706)。その後、主に気象研側で行っていた 1D-Var 計算のデータおよび解析コードを九大応力研 岡本研究室に移植し、応力研で長期間のデータ解析が行える環境を整備した。さらに夏季冬季のそれぞれ数か月の期間について CloudSat/CALIPSO と AIRS のマッチアップデータを作成し 1D-Var 計算を実施した。計算結果を用いた雲解析結果については九大応力研メンバーが主著として学会発表等を行った (下記成果報告参照)。

#### ・考察

アルゴリズム改良や計算の高速化など、幾つかの課題が残っているが、概ね当初の予定通りの解析を実施し、成果をまとめることができたと考えている。また解析コードや数年分の AIRS データ GANAL データを移植したことで、九大での衛星データの統合的解析環境がより充実した。

#### ・成果報告

査読付き論文

Ishimoto, H., Okamoto K., Okamoto H., Sato K. (2014). One-dimensional variational (1D-var) retrieval of middle to upper tropospheric humidity using AIRS radiance data. J. Geophys. Res. Atmos., 119, 7633-7654, doi:10.1002/2014JD021706.

学会発表 (主著)

Ishimoto H., Okamoto K., Okamoto H., Sato K., Humidity around ice clouds in middle to upper troposphere retrieved by using AIRS radiance data. AOGS2014, AS48-A011, Sapporo.

石元裕史、岡本幸三、岡本創、佐藤可織、「赤外サウンダ AIRS データの 1DVAR リトリーバルから推定した北極域対流圏中上層の水蒸気場と CloudSat/CALIPSO 解析による雲情報との関係」、日本気象学会 2014 年度春季大会 D202、横浜

学会発表 (共著)

Sato K., Okamoto H., Ishimoto H., Updated treatment for warm cloud microphysics: Its foundation and application, AOGS2014, AS48-A040, Sapporo.

Okamoto H., Sato K., Hagihara Y., Ishimoto H., Borovoi A. Development of EarthCARE CPR, ATLID and MSI algorithm for cloud microphysical retrievals, AOGS2014, AS48-A028, Sapporo.

岡本 創、佐藤可織、田中健太、牧野利行、石元裕史、「CloudSat-CALIPSO-AIRS 衛星の複合利用による過飽和度と氷雲微物理特性の解析」、日本気象学会 2014 年度春季大会 D203、横浜

田中健太、岡本 創、佐藤可織、石元裕史、「衛星搭載雲レーダ・ライダ・赤外サウンダの複合利用による氷水量と過飽和度の解析」、日本気象学会 2014 年度秋季大会 C105、横浜

佐藤可織、岡本 創、石元裕史、「衛星搭載アクティブセンサ複合解析手法の改良：下層雲への適用」、日本気象学会 2014 年度秋季大会 C106、福岡

Tanaka K., Okamoto H., Sato K., Ishimoto H., Relationship between ice cloud microphysics and supersaturation from spaceborne cloud radar, lidar and infrared sounder, AUG fall meeting, A21-3158, San Francisco.

Okamoto H., Sato K., Hagihara Y., Tanaka K., Ishimoto H., Makino T., Nishizawa T., Sugimoto N., Evaluation of ice cloud retrievals using CloudSat/CALIPSO/MODIS/AIRS and EarthCARE, AGU fall meeting, A13P-02, San Francisco.

## 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ものから、専用の母船を必要としない小型のものまで数多く作られ、実用的な段階へと入りつつある。特に、技術者の支援を必要とせず、海洋物理の研究者が比較的容易に海洋観測に使用できる、中、小型のビークルは、専用母船、すなわち専用の母船に装備された投入・回収装置を持たないため、作業がいつそう困難なものとなる。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。

本年度は、海中を浮遊しているビークルの回収と海底に着底しているビークルの位置特定手法について報告する。

### 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2014年11月長崎新漁港近海の水深55m海域で実施された (Fig.1)。実験風景を Fig.2 に示す。



Fig. 1 ビークル実験海域



Fig. 2 ビークル実験風景

### 3. 海中浮遊ビークルの回収

一回目の潜航開始後、ビークルの潜航深度がビークル搭載の超音波式位置検出装置 (SSBL) によると 11.2m より増大しなくなってしまった。ビークル内に空気が残留してしまい、浮力過多となり、潜航できずに海中を浮遊していると考え、網によるビークルの回収を試みた。

Fig.3 に船上で急遽作成した網を示す。二本の金属パイプの間に網を張り、上部のパイプには 12m 程度のロープを介して浮き玉を設置し、下部パイプにはウエイトを取り付けた。網を低速で曳航すると、浮き玉とロープにより網が水深 11m 程度の海中を曳航され、下部パイプのウエイトにより網が垂直になり、ビークルが網に捕らえられるはずである。



Fig. 3 船上で製作された網

網の曳航状態を Fig.4 に示す。

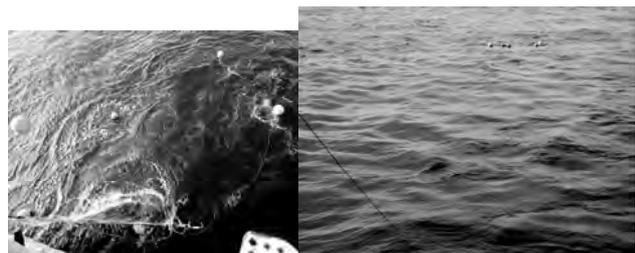


Fig. 4 網の曳航状態

ところが、位置検で計測したビークル位置を通過するが、ビークルを回収できず、長崎丸の魚探でもビークルが検出されなかった。状況を下記に示す。

- ・ ビークルが船の 12 時方向になるように操船し、位置検で計測したビークル位置に接近する。
- ・ ビークルとの距離が 60m 程度に接近すると位置検の位置情報が不安定になる。ビークル位置が 3 時方向や 6 時方向などにばらつくが距離は 60m ぐらいで安定している。
- ・ ビークルの上を通過しても距離は 60m ぐらいで安定しており、方向だけがばらつく。
- ・ ビークル上を通過した後はビークル位置が 6 時方向で安定しだし、距離も増大していく。

以上の挙動より、位置検の深度計測がおかしく、ビークルは水深 60m 程度の海底に着底していると判断し、網による回収作業を中止した。実験終了後、位置検メーカーより、実験中は 1/5 の深度を表示していたとの連絡があった。マイコンに深度計（圧力計）のスペックを設定する際のミスとのことであった。やはりビークルは水深 56m の海底にプログラムに従って着底していたことになる。

#### 4. 海底に着底しているビークルの位置特定

深度の計測に信頼がおけない状況になったため、深度情報を使用する位置検（SSBL）によるビークル位置の計測を断念し、三点測量による位置特定を試みた。位置検によるビークルまでの距離は深度情報を用いず計測されるので信頼性がある。そこで、長崎丸の位置を三度変更し、それぞれの位置においてビークルまでの距離を位置検により計測した。船の位置は GPS により計測される。ビークルの着底水深を 58m とし、それぞれの位置から計測距離を

半径として円を描くとその交点がビークル位置となる。この手法により特定できたビークル位置は、緯度：32 度 46.0596 分、経度：129 度 45.9461 分であった。参考までに、位置検（SSBL）による計測位置は緯度：32 度 46.0536 分、経度：129 度 45.9615 分、網で回収作業中に海底上に魚探の反応（ビークルとは確定できないが）があった位置は緯度：32 度 46.02 分、経度：129 度 45.940 分であった。また、ビークル着水後イリジウム通信で送られてきた、ビークル搭載の GPS による 1 回目潜航開始直前の位置は緯度：32 度 46.05528 分、経度：129 度 45.9669 分であった。

三点測量による位置と SSBL による位置の距離は 21.8m、潜航開始直前のビークル位置と SSBL による位置の距離は 9.4m である。四つの方法で計測したビークル位置を Fig.5 に示す。

ビークルの回収作業では、三点測量による位置を信用し、ダイバーが潜水したところ、三点測量による位置直近にビークルが着底していることが確認された。

#### 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、内田淳  
（長崎大学水産学部 准教授）  
木下宰、山田弥知（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）  
野田 穰士朗  
（九州大学応用力学研究所 技術職員）



Fig. 5 ビークルの計測位置

## 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

一般市民からの目線で考えると「PM2.5」という言葉が昨年始めて出来たような雰囲気になっているが、今に始まったことではない。日本国内から排出される大気汚染物質に加え、中国大陸から越境する大気汚染物質、黄砂粒子、森林火災など、それらが複合した影響は、風下側に位置する日本に影響を受けている。特に、大陸から近い九州地方では、東アジア域における化石燃料消費等による人為起源の大気浮遊微粒子（エアロゾル）の輸送により、健康被害や気象障害など、私たちの生活にも影響している。本研究は、2003年から応用力学研究所屋上において太陽光と周辺光の放射輝度を用いたスカイラジオメーターを使って連続観測を行い、「PM2.5」を含んだエアロゾル光学的特性の解析を行っている。これらの観測データにより、エアロゾルやそれが核となって形成する雲の気候影響を評価することを目的とする。エアロゾル粒子の輸送は、越境大気汚染として、次世代の大気化学・気象結合モデルの開発や応用を行うためにも、定量的な地上観測データの蓄積が重要となる。エアロゾル気候影響を評価する際には、応用力学研究所大気環境モデリング分野で開発・改良されているエアロゾル気候モデルSPRINTARSを用いて、地上観測や衛星観測の結果を基にモデルの検証を行う。また、主として九州・沖縄地域の観測地点（福岡、長崎、福江島、沖縄等）を利用して、大陸から日本へ輸送されてくるエアロゾルをいち早くモニタリングし、それらを同化データとして組み入れ、モデルの精度向上につながることを目的としている。

## 2. 観測・解析概要

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、2014年1月から2014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 $0.5\mu\text{m}$ のエアロゾルの光学的厚さ(AOT(0.5))とオングストローム指数(Alpha)の月平均値である。昨年(2013年)の季節変化と同様にエアロゾルの光学的厚さは、春に最大となり、秋から冬にかけて最小に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、春に黄砂粒子を中心とした大粒子の影響が春に確認されるとともに、人為起源のエアロゾルの影響が8月のオングストローム指数を高めていることが確認された。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。

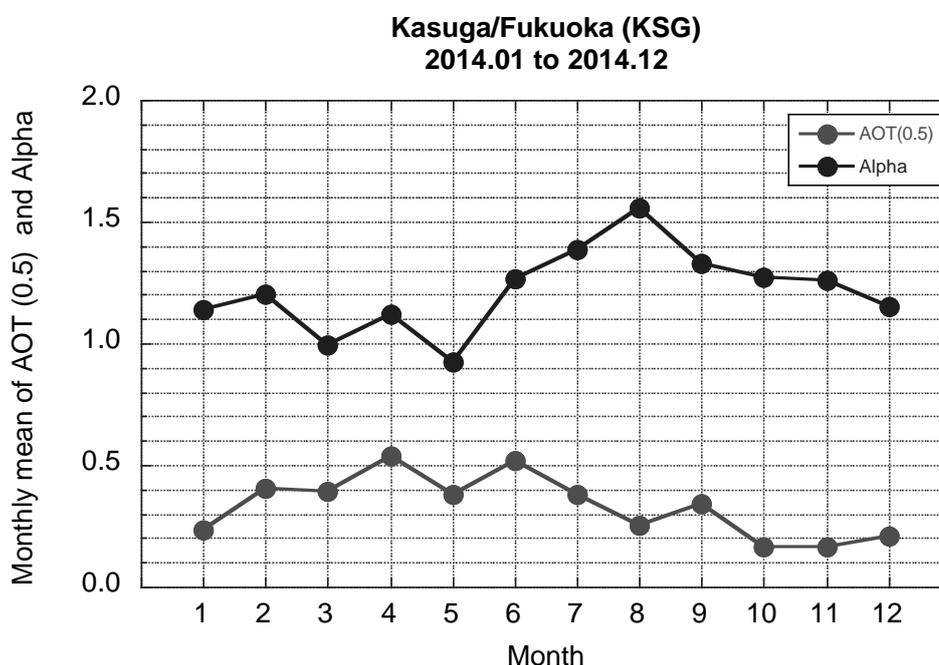


Fig. 1 2014年1月から2014年12月までの福岡県春日市（九州大学応用力学研究所）における0.5 $\mu\text{m}$ のエアロゾルの光学的厚さ（AOT(0.5)）とオングストローム指数（Alpha）の月平均値

#### 4. 研究成果

Teppey J. Yasunari, K.-M. Lau, Sarith P. P. Mahanama, Peter R. Colarco, Arlindo M. da Silva, Teruo Aoki, Kazuma Aoki, Naoto Muraio, Sadamu Yamagata, Yuji Kodama, (2014) The GODdard SnoW Impurity Module (GOSWIM) for the NASA GEOS-5 Earth System Model: Preliminary Comparisons with Observations in Sapporo, Japan, SOLA, 10, 57-61.

#### 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)

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

(独) 国立環境研究所環境計測研究センター 西澤智明

#### 目的

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間・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。

本目標遂行のために、応用力学研究所大気物理研究室の岡本創教授と H23 応用力学研究所特定研究で、衛星ライダーデータからエアロゾル種毎（鉍物ダスト、海塩、大気汚染粒子）の鉛直濃度を抽出する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ともに、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。そこで、H24 年応用力学研究所一般研究にて、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。H25 年一般研究では、本研究を継続し、エアロゾル種分類推定手法等で用いるエアロゾル光学モデルの改良を目指し、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クラスター解析により統計解析し、光学モデルの構築を推進した。また、推定精度向上を目指し、より高度な数値解法（最適化法）の導入を検討した。

そこで、本研究課題では、昨年度の研究をさらに進めて、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の強化および信頼性の高い全球エアロゾルデータの抽出を推進する。

#### 実施方法

エアロゾル種分類推定手法への最適化手法の導入による信号ノイズに頑強な解析手法の実現を進める。地上スカイラジオメーターにより得られているエアロゾル光学特性データにクラスター解析を適用して統計解析し、エアロゾル光学モデルの構築を図る。また、アルゴリズムの高度化へ向けた他のアイデアを検討する。

#### 結果と考察

CALIPSO 衛星搭載ライダーを用いたエアロゾル種分類推定アルゴリズムへの最尤法を用いた最適化手法の導入を進めた。また、その発展形となる CALIPSO 衛星搭載ライダーと衛星搭載受動型測器モーディスを複合利用したエアロゾル種分類推定アルゴリズムの開発も進めた。このライダー・モーディス複合アルゴリズムにも最尤法を用いた最適化法を導入し、現在プログラムの構築を行っている。最尤法を用いた手法は、ルックアップテーブル法を用いた手法に比

べ計算コストが非常に大きいことが再確認された。計算コスト低減へ向けたアイデアの検討も今後の課題となる。

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昨年に引き続き進めた。スカイラジオメーターデータの選別（雲によって影響されたデータの除去や、推定誤差の大きなデータの除去など）を行い、エアロゾル光学モデルの高度化を行い、全球でのエアロゾル光学モデルのプロトタイプを構築した。また、アフリカ地域へ特化した詳細な解析も実施し、アフリカ域でのエアロゾル光学モデルの構築を進めた。

エアロゾル種分類推定アルゴリズムの高度化を目指し、2006年から2010年の5年間のCALIPSOデータへエアロゾル種分類推定手法を適用し、その推定結果を他の研究グループの解析結果（CALIPSO標準プロダクト）と比較した。本研究で推定された全エアロゾルの光学的厚さは、CALIPSO標準プロダクトに比べ、洋上で大きく、陸上で小さいという傾向が見られた。この差の要因として、本アルゴリズムの洋上での鉱物ダストの推定値が大きいことや陸域での大気汚染粒子の推定値が小さいことが示唆された。より長期にわたる解析データの比較や他の観測データとの比較を今後進め、アルゴリズムの改良に関する基礎データを蓄積していく必要がある。

## 研究成果報告

Nishizawa, T., A. Higurashi, N. Sugimoto, R. Kudo, E. Oikawa, and H. Okamoto, Aerosol and cloud retrieval algorithms from ATLID and MSI measurements, EarthCARE workshop, Tokyo, Japan, September 2014 (Oral)

Nishizawa, T., A. Higurashi, N. Sugimoto, R. Kudo, E. Oikawa, and H. Okamoto, Aerosol and cloud observation with the JAXA/ESA EarthCARE high spectral resolution lidar, 1<sup>st</sup> international workshops on space-based lidar remote sensing techniques and emerging technologies, Paris, France, September 2014 (Oral, invited)

Nishizawa, T., A. Higurashi, N. Sugimoto, R. Kudo, E. Oikawa, and H. Okamoto, Japanese aerosol and cloud retrieval algorithms using EarthCARE ATLID and MSI, Washington, USA, November 2014 (Poster)

## 研究組織

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.ac.jp

## 26 AO-15

### 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確立されていない。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、このような海域の代表例である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。特に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、その上部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昨年度の共同研究により明らかになりつつある。しかし、その詳細な力学過程は不明な点が多いため、この点に注目して研究を行う。

#### 研究方法の詳細

2014年9月11日と10月24日に、それぞれ伊予灘の西部の測点 I7(サンドウェーブ上)と中央部の測点 I4(平坦な海底地形)において、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船「いさな」にて乱流観測を行った。1回の観測で3~4回の TurboMAP のキャストを1セットとして30分ごとに計測を行い、約6時間の準定点観測を行った。乱流の計測と同時にいさな搭載の Workhorse ADCP (300kHz) を鉛直解像度 1m、測定間隔 0.8 秒に設定し、高解像度の水平流速の鉛直分布を得た。

#### 結果

9/11 の測点 I7 における観測では大潮期であり流れが強かったため、船を漂流させながらサンドウェーブを縦断しつつ流速観測を行う形となった。1セットの計測の中で、顕著なサンドバンク(図2 横軸距離 500 m 付近)の上流側と下流側で TurboMAP のキャストを実施した結果、図3に示すように上流側に比べて下流側の方が大きな値の乱流運動エネルギーの散逸が得られた。特に水深 20~40m においては 1 オーダー以上の顕著な  $\epsilon$  の値の上昇が見られたが、同位置では流速の観測結果に縞状の構造が見られたことから(図1;赤点線に囲まれた部分)、サンドバンクと潮流との相互作用で発生した lee wave が顕著な乱流混合を引き起こした要因の一つであると推測された。10/22 の平坦な海底上で実施された計測では同様の現象は観測されなかった。

#### 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)

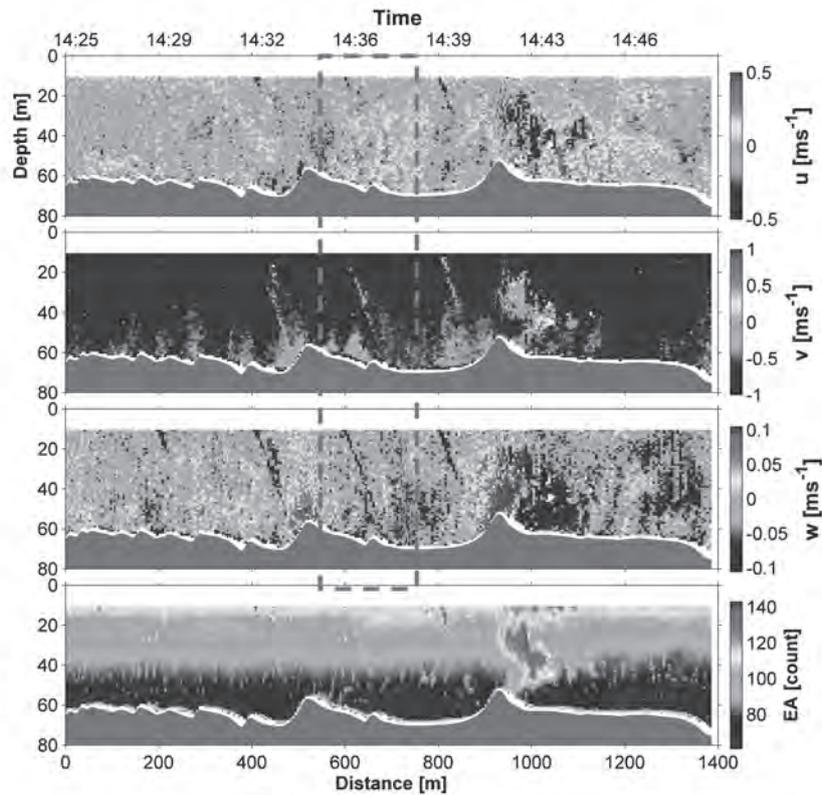


図1 測点I7におけるADCP観測結果の一例.上から,船の漂流方向(南西)に対する直交流速成分 $u$ ,平行成分 $v$ ,鉛直流速 $w$ ,反射強度EA.流速は10サンプル(約8秒間)毎の平均値である.赤い点線で囲んだ部分はサンドバンクの下流側に位置し,海底上20~30m, 水平距離200m程度にわたって縞状の流速構造が見られる. なお距離1000m付近(横軸)における高い反射強度はカタクチイワシの魚群によるものであり流速の値は信頼できない.

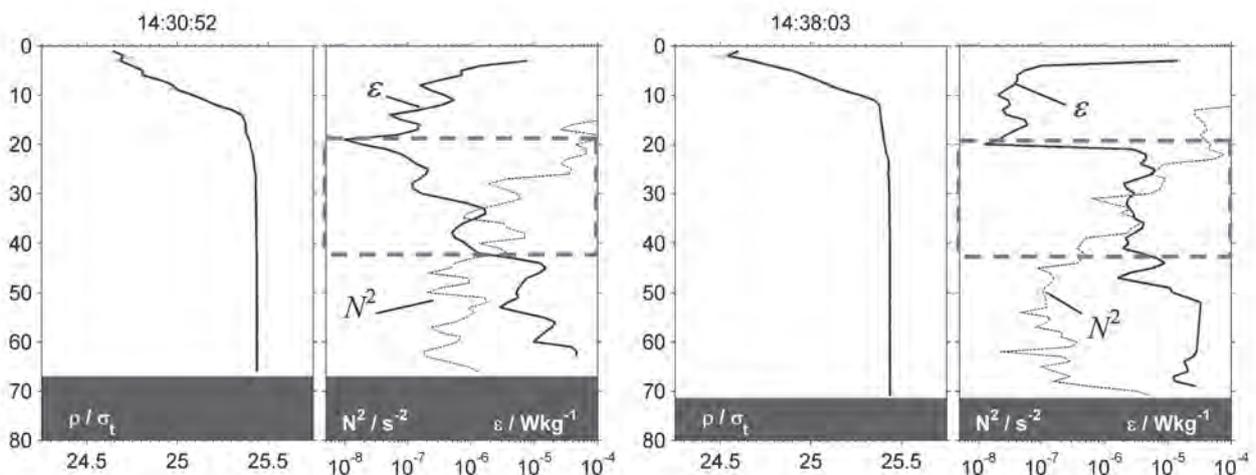


図2 9/11のTurboMAPによる海水密度 $\rho$ , 浮力振動数 $N^2$ , 乱流運動エネルギー散逸率 $\varepsilon$  の計測結果. 縦軸は海面からの距離[m]. (左) 計測終了時刻が14:30:52のキャスト, (右) 計測終了時刻が14:38:03のキャストでそれぞれ図1に示す距離500m付近に位置するサンドバンクの上流側と下流側における観測結果. 下流側では上流側に比較して海底(灰色)上と中層(水深20~40m; 赤点線)において  $\varepsilon$  の上昇が見られる.

## 26 AO-16

### 有明海における潮流と成層構造に関する観測的研究

研究代表者 愛媛大学沿岸環境科学研究センター 堤 英輔

#### 目的

九州西部に位置する有明海では、2000年の大規模な養殖ノリの色落ち発生を契機にこれまで多数の漁業被害や海洋環境悪化が報告されてきた。多数の機関によって調査が行われてきた中で、特に物理の分野では流れ場と鉛直混合の変化が注目され多数の流速の観測や数値実験が行われているが、環境変化を明確に説明できるような結果は提示されていない。そのような中で近年我々の現地観測によって、有明海で成層期に内部潮汐が発生し顕著な鉛直混合を生じ得るといった新しい知見が得られつつある。しかし有明海のような極浅海域における内部潮汐は世界的に見ても観測例が極めて少なく、その解析方法も確立されていない。本研究では有明海において流速観測を行ってデータを蓄積するとともに、内部潮汐成分を適切に分離し、その物理的特性をより厳密に議論できる解析法を確立することを目的とする。

#### 研究方法の詳細

内部潮汐流を観測する目的で係留系を用いた流速測定を諫早湾湾口付近の測点 A と有明海中央部の測点 B において(図 1)、2014 年 8 月 20 日から 9 月 28 日まで行った。応用力学研究所所有の超音波流速計 Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP; 600kHz Workhorse, TRDI 社) を海底に設置して用い、流速を海底上 1.2 m から海面下約 1m まで 0.5 m 間隔で計測した。測点 A の ADCP は 1 Hz のサンプリング周波数で 30 分毎に 600 サンプルを記録するバーストモードで、測点 B の ADCP は 1/4 Hz のサンプリング周波数で 10 分毎に 150 サンプルのアンサンブルを記録するモードで使用した。

#### 結果

海域には観測開始から9月中旬まで比較的強い成層が存在し、その後緩やかに弱まっていったことが別の現地観測により確認されている。測点Bにおいて得られた流速には、顕著な海底境界層を持った半日周期の傾圧的な潮流が確認される一方で(図2a)、海洋中層において傾圧的な流速構造も認められる(図2b赤破線枠)。このような流速の傾圧成分を見積もるために、カットオフ周波数 1/30, 1/4 [cph] を持つバンドパスフィルターを通過させた流速(潮流流速)の  $u, v$  成分に対してCEO解析を行い、海底境界層を持つ傾圧流速成分を経験的に見積もった。これをもとの潮流流速から差し引くことで傾圧流速成分を見積もった(図3)。このようにして得られた傾圧、傾圧流速の鉛直構造は、ともに理論的に予測されるものと矛盾がなく、鉛直平均流を傾圧成分とする従来の解析方法よりもより適切に内部潮汐の解析が展開できると期待される。

#### 研究組織

堤 英輔(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)

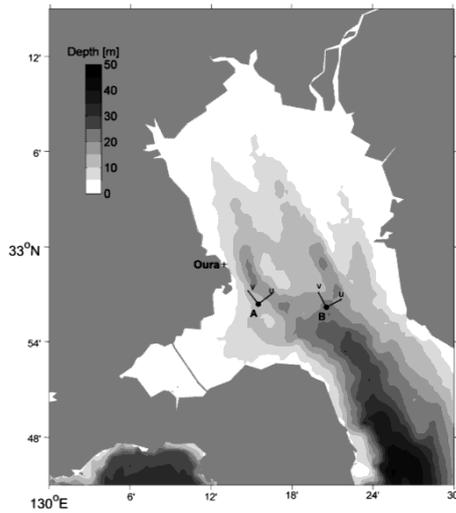


図1 有明海における流速観測点 Stn.A (130°15.50'E, 32°56.40'N, 平均水深 11.4 m) および Stn.B (130°20.55'E, 32°56.20'N, 平均水深 25.0m). 図中の  $u$ ,  $v$  は半日周期潮流楕円の短径および長径の向きを示す.

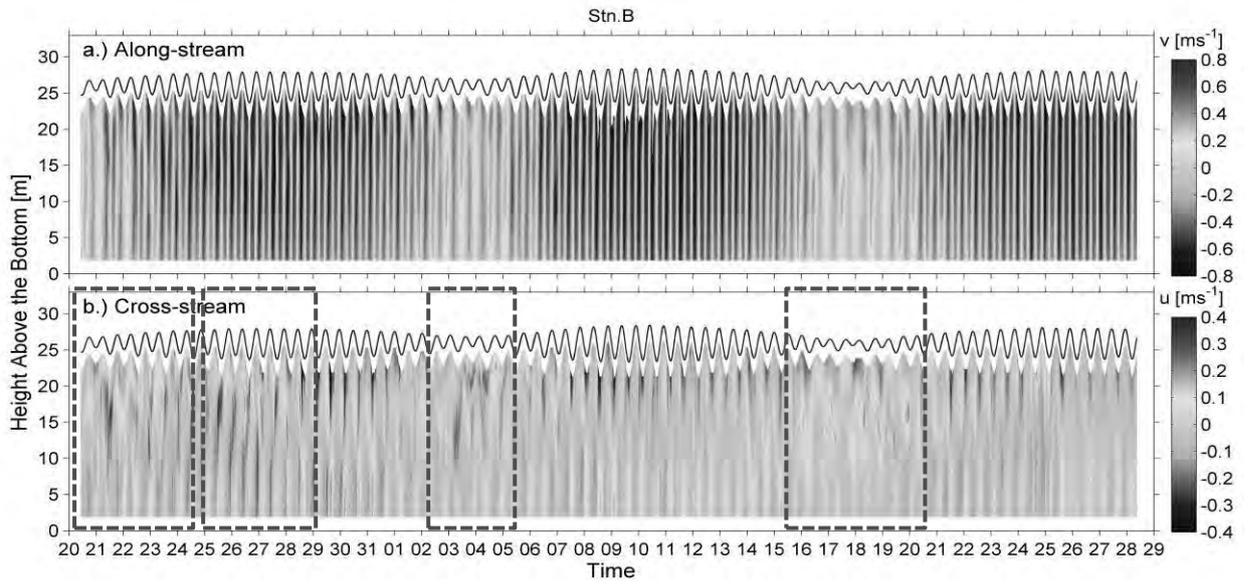


図2 測点Bにおける30分平均流速の (a) 長径  $v$  方向成分と (b) 短径  $u$  方向成分. 赤い破線の枠は内部潮汐と思われる鉛直構造が見られる箇所を示す.

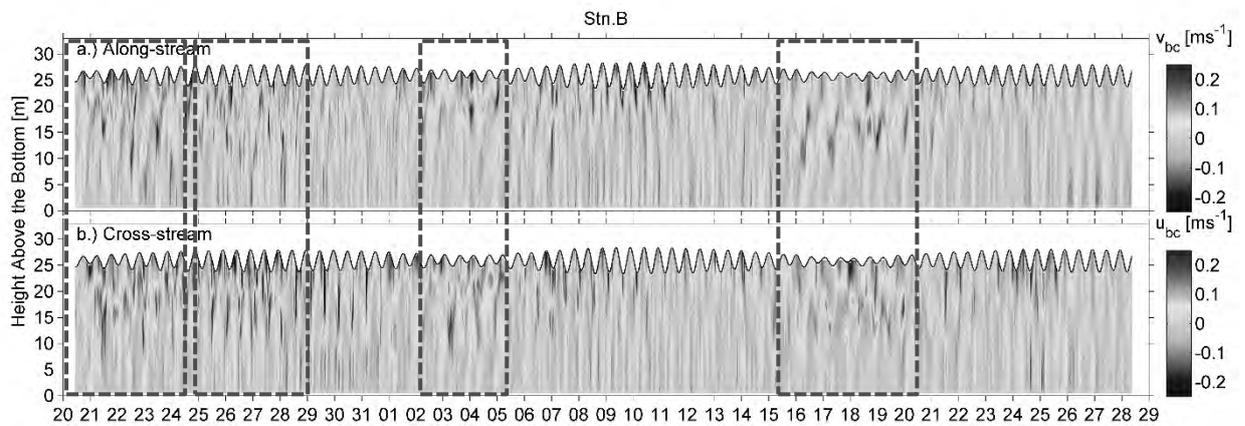


図3 測点Bにおける傾圧流速の (a) 長径  $v$  方向成分と (b) 短径  $u$  方向成分. 赤い破線の枠は図2と同様.

水中洞窟系のロボット探索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

少人数で対応できる小型水中ロボットは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・調査に活躍している。本研究グループは、水中洞窟系探索にも対応できるロボットシステムの研究開発を行ってきた。複雑な形状の未知環境である水中洞窟系の探索ミッションには、自己位置推定可能でケーブルに拘束されない自律型水中ロボット(AUV)が適している。平成 26 年度の研究目的は、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のための 3D 環境地図作成とした。鹿児島県徳之島の浅間湾屋洞穴において探索計測実験を実施した。低視界環境である未調査アンキアライン水没部「ウンブキ」奥に、PID 制御探索によって未知の水中洞窟を発見し撮影記録を行った。さらにソナー計測によって「ウンブキ水中洞窟」の 3D 概形モデルを作成した。

2. 水中ロボットシステム

本研究では、少人数の運用を想定して、小型軽量コンパクトな水中ロボット(ROV)をテストベッドとした(図1)。全長670mm、高さ300mm、幅440mm、重量18kgの機体には、PSoC3を基盤とした操縦支援・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モニターのコントローラー画面で、PIDの制御定数の変更や、手動操縦(ROV)モードと自律航行モード(AUV)の切り替えが可能である。

①水中洞窟の概形計測:

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(図3)

②3D環境地図作成:

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4)

3. 実験結果及び考察

自律航行のためのPID制御試験、ソナー等の校正は本校の無響水槽で実施した。その結果をもとにして、鹿児島県奄美諸島徳之島の浅間湾屋洞穴において、水中ロボット探索計測実験を実施した。ロボットを投入した湾屋洞穴はアンキアライン環境であり、「ウンブキ(海の谷)」と呼ばれる水没部は本校が実験を行うまで未調査であった(図5,6)。

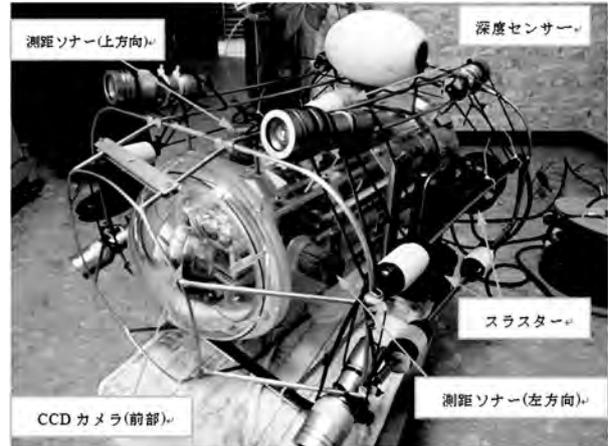


図1. ロボット外観

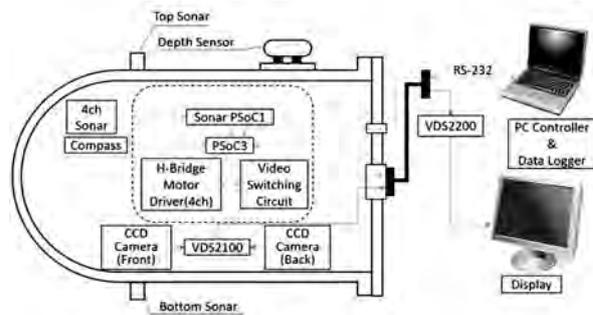
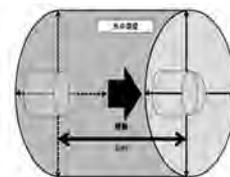


図2. システム構成



ケーブル1[m]間隔で停止  
各センサーのデータ記録

図3. 4方向ソナー計測

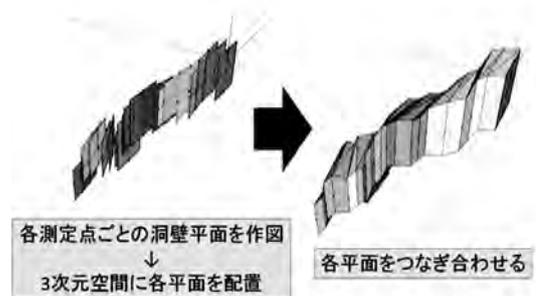


図4. 3D概形モデル化



図5. 湾屋洞穴「ウンブキ」(全景)



図6. 前進基地



図7. 「ウンブキ」水面下に発見した鍾乳洞

深海機器力学実験水槽実験の準備段階でロボットの部品等に故障が生じて実験を実施できなかったため、本校実験水槽において、水中ロボットの各自律航法モード(方位直進・方位保持・深度保持)の実験を行った。その結果に基づいて、低視界環境の「ウンブキ」水面下をPID制御によって探索し、未知の水中洞窟を発見した(図7)。概形計測実験の計測対象を水面直下からケーブル長の最大延長区間に設定した。①は(1)~(3)を反復する：

- (1) ケーブル長を 1m 間隔で記録
- (2) 水中ロボットを一時停止させ、水平姿勢と深度を保持
- (3) 上下左右方向の4距離と水深・方位・姿勢を計測  
計測データを後処理して②の3D概形モデルを作成した(図8)。

#### 4. 結論

本年度は、鹿児島県徳之島浅間湾屋洞穴「ウンブキ」における水中ロボット探査計測実験によって、未知の水中洞窟を発見・撮影記録した。また、水中洞窟の形状データ計測と3D概形モデルの作成を行い、対象区間の形状・方位トレンドを表現することによって、水中洞窟探査への有用性を実証した。今後の課題としては、ソナー計測の詳細化・精密化、3D概形モデル生成の同時リアルタイム処理が挙げられる。

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。深く感謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 眞部広紀, 長嶋豊, 原田明, 福岡聡紀 他:  
**徳之島浅間湾屋のウンブキ水中洞窟におけるロボット探査とソナーによる形態計測の予備実験**,  
佐世保工業高等専門学校研究報告第51号 pp.19-27, 2015年
- 2) 原田明, 長嶋豊, 眞部広紀, 川下智幸:  
**3Dモデリングを目指した水中洞窟探査用自律型水中ロボットの開発**,  
日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会  
2014 in Toyama, 講演要旨集 1A1-G0

## 強非線形・強分散内部波の相互干渉

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・分散性が共に強い内部波の相互作用の場合に対しては、そのような結果が得られるかどうか明らかにされていない。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、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らうとするのが、本共同研究の目的である。

昨年度の研究により、非線形干渉を伴う表面波及び内部波の2次元挙動に関して、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も対象として研究を進めた。今年度は、大振幅孤立波を含む複数の内部波が、1次元、または、2次元伝播する場合の非線形相互干渉に関して、数値解析に基づき研究を実施する。

## 研究の方法

具体的には、1次元、または、2次元伝播する内部波を対象とし、次の各事項を目的として研究を進める。

- (1) 柿沼の方法では、鉛直分布関数を適切に選択する必要があるが、内部波の初期条件・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。
- (3) 大振幅孤立波を含む複数の内部波が、1次元伝播する場合の非線形相互干渉に関して、波の変形等のメカニズムを考察する。

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。全メンバー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(1)に関して、強非線形・強分散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した。すなわち、Newton-Raphson法により移流方程式系の収束解を求める手法を適用し、変分原理に基づく非線形波動方程式系の孤立波解を求めた。そして、理論解や、Euler方程式系の数値解析解と比較し、得られた数値解の妥当性を検討した。その結果、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、速度ポテンシャルの展開項数を3とした場合に、精度の高いものであることが確認された。そして、内部波の振幅が大きくなるにつれて、界面形が台形状に近

付くことが確認された。また、この方法により孤立波を入射させ、津波の伝播解析といった、表面波・内部波共存場の応用計算を行なった。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と考えられる。

- ・ **研究の目的の (2)** 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 の生成が認められた。
- ・ **研究の目的の (3)** に関して、得られた大振幅孤立波解を初期条件として与えた時間発展解析を行ない、大振幅を有する定常進行内部波の伝播や、非線形干渉に関して調べた。内部孤立波の 1 次元伝播解析では、大振幅孤立波が一定速度で変形せずに進行することが確められた。また、鉛直壁に衝突する内部孤立波の数値解析の結果、入射波の振幅がゼロ、または、内部孤立波の最大振幅に近い場合に、鉛直壁位置における波高増幅率が入射波の振幅の 2 倍程度となり、線形波に類似した性質が現れることがわかった。

## 研究成果報告

山下 啓・柿沼太郎・吉本明日妃・吉川 諒: 大振幅内部孤立波の伝播過程における非線形現象, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 70, No. 2, pp. 6-10, 2014.

山下 啓・柿沼太郎・木村晃彦: 深水域から浅水域に伝播する内部孤立波の数値解析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 70, No. 2, pp. 11-15, 2014.

吉川 諒・柿沼太郎・山下 啓・立和田英樹: 地殻及びマントルの運動を考慮した津波伝播の数値解析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 70, No. 2, pp. 171-175, 2014.

## 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)

## 東シナ海陸棚域における海底境界層の栄養塩輸送過程

富山大学 大学院理工学研究部 張勁

## 目的

2013 年度夏季には東シナ海の日本側を「長崎丸」、中国側を中国海洋大学研究考察船「東方紅 2」, 韓国の排他的経済水域では「長崎丸」及び「東方紅 2」による同時期連携観測が行われ、データ・試料の共有など真の意味での共同研究が始まった。東シナ海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、本年度はこれまで「長崎丸」及び上述の共同観測で得られたデータを用い、化学海洋学および物理海洋学の異なった視点から分析解析を実施した。

## 観測調査及び分析解析

7月に、東北海洋生態系調査研究船「新青丸」により東シナ海陸棚縁辺域中央、長崎大学付属練習船「長崎丸」を用いて対馬海峡・九州南西海域において観測航海を実施し、下記の内容の観測・分析および解析を行った。

- 各層海水採取を実施し、栄養塩等の分析・酸素水素同位体組成などの化学分析データに、漂流ブイ観測と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。
- 堆積物・間隙水と同時に懸濁粒子も採取し、海水中栄養塩分布との関連を明らかにした。
- 平成25年夏期に行われた「長崎丸」と「東方紅 2」による日本・中国同時期連携観測の結果を中心に、物理・化学などの試料・データの分析と解析を行った。

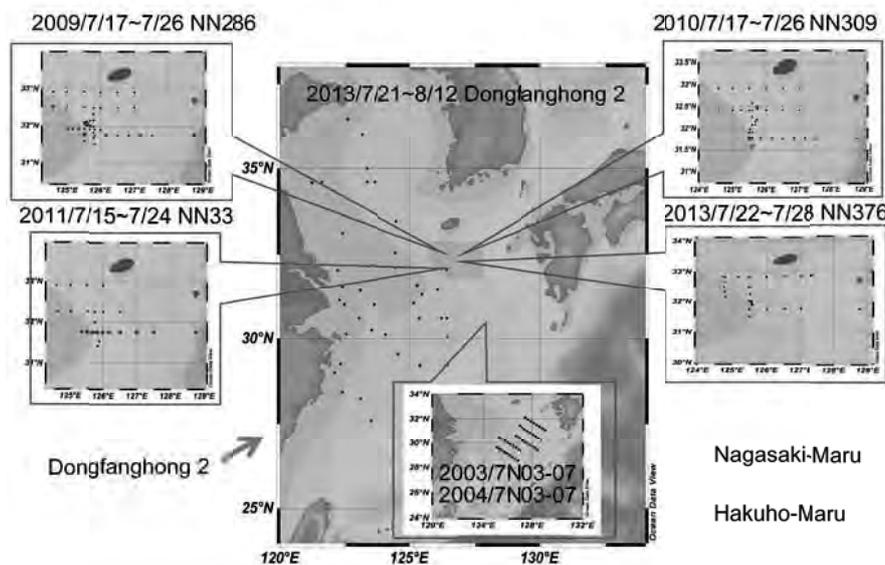


図 1. 研究海域 (2013 年に「東方紅 2」(Dongfanghong2)と「長崎丸」は cross station で同期観測を行った)

## 結果・考察

図1に本研究の観測海域と測点を示している。2003, 2004, 2009, 2010, 2011, 2013 年の長崎大学付属練習船「長崎丸」によって得られた現場観測データ(塩分, 水温, 溶存酸素濃度), 採水データ(塩分, 溶存酸素, 栄養塩等), また, 2013 年「東方紅 2」によって得られた現場観測データ(塩分, 水温, 溶存酸素濃度)に基づいた結果を下記にまとめた。

済州南西水深 40~50m の海域において密度躍層以深(20m~)では, ほぼ毎年の夏期に低い溶存酸素水(LDOW)の分布が確認された(図2)。2011 年は, 例外的に台風通過直後に観測が

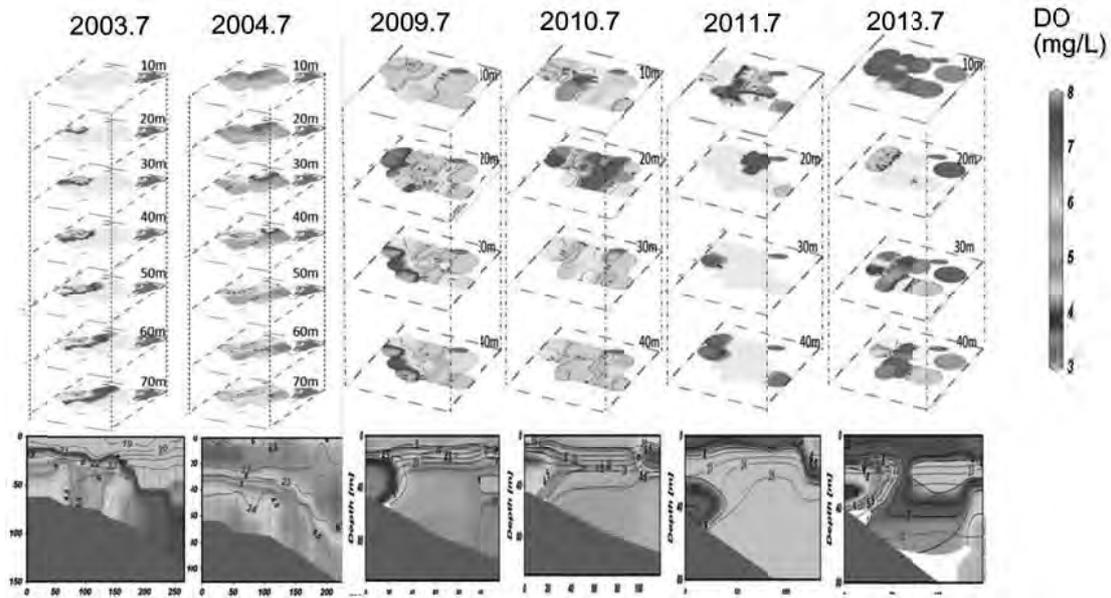


図2. 東シナ海陸棚域におけるLDOW分布の経年変化

行われ、海水の鉛直混合が発達しており、LDOWは見られなかった。また、同時観測が行われた「東方紅 2」では、長江河口域の水深 15~30m に LDOW の分布が観測された(図3)。更に、長江河口域の LDOW 測点は、旧河道域に位置していることを考慮すると、済州南西域に分布するLDOWは長江や周辺地下水に由来する可能性が考えられた。

上述のように、昨年度の中国海洋大学等との連携観測の成功を元に、来年度秋期に、東シナ海韓国経済排他的水域や陸棚縁辺部から黒潮軸の東部までより広範囲に亘り、学術研究船「白鳳丸」と「東方紅 2」の共同・連携観測調査が予定されており、今後、中国側の観測データと併せて広域・総括的な学際共同研究が期待できる。

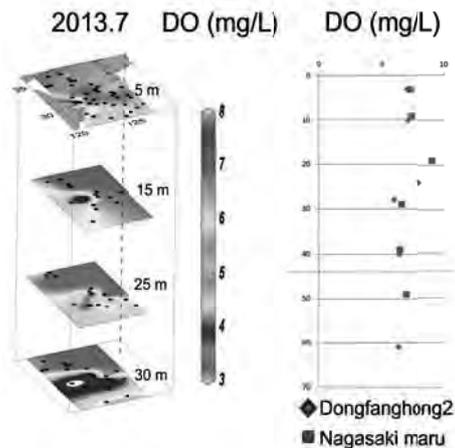


図3. 「東方紅 2」のLDOW分布図

## 研究実績

### 論文:

1. Andreas R. and Zhang J., Characteristics of Adsorption Interactions of Cadmium(II) onto Humic from Peat Soil in Freshwater and Seawater Media. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 92, 352-357, 2014.

### 学会発表:

1. J. Zhang, Y. Fujishiro, T. Matsuno and J. Ishizaka  
Water mass interaction and chlorophyll/nutrient distribution in the cross-slope area of the northeastern edge of the East China Sea. 10th Cross-Strait Marine Science Conference, Taipei, May.
2. J. Zhang, Z.-Y. Luan, H.-L. Ma and M.-X. Zhao  
Distribution of low oxygen water mass and its changes in the south-western area off Jeju island, East China Sea. The 7th Program of the East Asian Cooperative Experiments (PEACE) Ocean Science Workshop, Qindao, China, October, 2014.

### 対馬暖流の長期変動と回遊性魚類の漁場変化

福岡県水産海洋技術センター 安藤 朗彦

#### 目的

近年、九州北部沿岸では、回遊性魚類のマアジやケンサキイカの漁場が沖合化しているという現場漁業者が増えている。当海域に流れ込む対馬暖流は、この2魚種の漁場形成要因に深く関わっていることが報告されている。そこで過去10年間の人工衛星観測結果と応用力学研究所において長期継続している定期航路客船（カメラ）を利用した東西対馬海峡の観測結果から対馬暖流の長期変動を捉え、漁場沖合化との関連を明らかにすることを目的とした。

#### 方法

衛星の観測データは、2000～2012年に衛星NOAAで観測されたAVHRR信号を処理した水温データを用いた。観測時の天候条件により、良好なデータが得られるものを選別した。

定期航路客船（カメラ）に搭載され過去10年間に観測されたADCP観測結果を観測日毎に整理した東西対馬海峡における全流量の記録を用いた。

同様に過去10年間玄界灘で操業する中型まき網漁船の日別操業記録を整理し、データセットとして解析に用いた。

#### 結果・考察

定期航路客船（カメラ）で観測されたADCPのデータを整理しデータセットを作成した。観測された航路上の流速と玄界灘で操業される中型まき網漁船の漁場は、同じ海域ではないため解析方法とデータの取り合わせについて検討を行った。さらに衛星データについては観測結果が時空間的に一致するようなデータの選択と解析方法を検討することが必要であると考えられた。

また中型まき網漁船の操業状況は、年により集中分散が見られるが、出漁頻度が高い漁場は、毎年ある程度の傾向がみられ、海洋構造との関連が示唆された。また漁場により漁獲物の組成が異なる傾向がみられたが、組成の違いは違いに漁場の条件だけで決定されるものではなく、近年の原油価格の高騰等、漁業経営体が抱える諸条件により変化することが伺われ、今後の解析については充分注意して解析することが必要であると考えられた。

#### 研究成果報告

特になし

研究組織

研究代表者 福岡県水産海洋技術センター 安藤 朗彦  
所内世話人 九州大学応用力学研究所 広瀬 直毅  
研究協力者 日本船用エレクトロニクス（株） 宝槻 孝行

## 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

福岡はアジア起源の黄砂・大気汚染の影響が深刻な地域である。応力研グループでは、アジア域における越境大気汚染に関する数値モデル研究と平行し、偏光光散乱式粒子数濃度計(Polarization Optical Particle Counter; POPC)、多波長ライダー、エアロゾル化学成分連続自動分析装置(ACSA-12)などエアロゾルの多成分化学・物理特性の計測も開始しており、今だ十分に明らかにされていない大気中黄砂の化学・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12月11日(木)～12日(金)

場 所：九大筑紫キャンパス大気海洋環境システム学専攻棟(G棟)

11日：2階会議室 12日：2階講義室

### 3. 研究成果

研究集会では国内の黄砂研究に関わる幅広い専門家が数多く集まり、19題の講演発表があった。関係者を含めると60名程度の参加があった。黄砂の発生源における飛砂プロセス、輸送途中における細菌の取り込みや化学・物理的変質、海洋の生物生産に重要となる黄砂の沈着の実態、黄砂の長距離輸送、黄砂のデータ同化予報など、様々な分野から最新の黄砂研究についての発表がなされ、闊達な議論がなされた。昨年度開催された、本共同利用研究集会がきっかけとなり、研究分野を超えたリンクに基づいて、平成26年度に海洋研究開発機構の長島佳菜研究員を代表者とする科研費基盤B「湖年縞堆積物および雪氷コアを用いたアジアダスト輸送の季節性と沈着フラックスの解明」が採択されることとなり、本研究発表会が黄砂コミュニティにおいて大きな貢献を果たしている。

以下に研究集会プログラムを掲載する。

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 12 月 11 日（木）～12 日（金）  
場 所：九州大学筑紫キャンパス 大気海洋環境システム学専攻等(G 棟)  
11 日：2 階会議室 12 日：2 階講義室  
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  
12 月 11 日(木)

-----  
13:15-13:20 はじめに

13:30-13:40 岩本 洋子（東理大・理）海洋に沈着した陸起源ダストの性状

13:40-14:00 谷水 雅治（海洋研究開発機構 高知コア研究所）金属元素安定同位体比の人為起源エアロゾル指標としての可能性

14:00-14:20 河田 綾（東大・大気海洋研）太平洋東部赤道海域から西部北太平洋における微小エアロゾルの雲凝結核特性と化学組成

14:20-14:40 福島 聡（熊本県大・環境共生）黄砂時地上付近エアロゾルの変動

14:22-14:40 村田浩太郎（熊本県大・環境共生） 粒径別黄砂サンプル中に存在する空气中細菌の量と生存状態:2013 年と 2014 年春期の天草西岸部における観測

14:40-15:00 植松 光夫（東大・海洋研・東理大） 北太平洋上に飛来した黄砂

15:00-15:20 休憩

15:20-15:40 杉本 伸夫（環境研）黄砂と大気汚染エアロゾルの混合状態と光学モデルの検討

15:40-16:00 Pan, X., Uno, I. et al.(九大・応力研) Simultaneous transport of mineral dust aerosols with anthropogenic pollutants revealed by Polarization Optical Particle Counter (POPC) occurred in springtime, 2014

16:00-16:20 原 由香里（九大・応力研）一週間継続した汚れた黄砂のモデル解析

16:20-16:40 長田和雄（名大・環境）夏の黄砂は珍しい？

16:40-17:00 三浦和彦（東理大・理）富士山系におけるエアロゾル計測

17:00-17:20 青木一真（富山大・理工）日本における黄砂の光学的特性の時間・空間変動

18:30～ 懇親会

12月12日(金)

-----  
09:00-09:20 石塚正秀（香川大）福島県浪江町における放射性物質の地表面からの再飛散に関する研究

09:20-09:40 三上 正男（気象研）モンゴルにおけるダスト飛散過程の観測

09:40-10:00 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（その2）

10:00-10:20 西川 雅高（東理大・環保セ）十砂十色の黄砂発生源土壌

10:20-10:40 原 和崇（鳥大・乾地研）砂漠の植物表面に存在する氷核活性微生物の探索

10:40-11:00 長島 佳菜（JAMSTEC）堆積物を用いたアジアダストの長距離輸送の季節性の検証

11:00-11:40 清水 厚（国環研）国内におけるライダー黄砂消散係数とSPM・PM2.5の関連

11:40-12:00 総合討論とまとめ



(研究集会)

## 非線形波動研究の現状—課題と展望を探る—

研究代表者 青山学院大学理工学部 増田 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。例えば、観測や実験によって捉えられた様々な流体現象を記述するために KdV 方程式や KP 方程式などが導入され、非線形波動現象の解明はもちろん、プラズマ物理など他の分野へも応用されるようになった。また、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、トロピカル幾何学、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広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。

なお、本研究集会は日本応用数学会応用可積分系研究部会との共催であった。

## 成果の概要

本研究集会は、平成 26 年 10 月 30 日から 11 月 1 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 27 件（口頭発表 15 件およびポスター発表 12 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、セル・オートマトンに関する話題として、

- 実データに基づくセル・オートマトンモデルの構成

という講演が行われ、現象理解を仮定せずに観測データから直接セル・オートマトンを構成する方法について、最新の知見が紹介された。また、生物行動の現象解析の話題として、

- アリの採餌行動における意思決定とゆらぎ—数理モデルと行動実験による複合的アプローチ

という講演が行われた。アリの採餌行動に着目し、先行研究の批判的検討から、実験・観察、シミュレーションによる解析、理論的考察に至るまで、たいへん興味深くかつ詳細な解説があった。さらに、生物種の動態に関する数理モデルの話題から、

- 一回繁殖型の非線形 Leslie モデルの連続化と分岐解析

という講演が行われた。モデルとなる非線形差分方程式の分岐現象を考える際に、連続極限として得られる微分方程式の解析が有効であることを示す内容の報告がなされた。これら特別講演の内容は、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、非線形可積分方程式の漸近解析やハミルトン構造などの理論的な話題から、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 RNA ポリメラーゼが関わるダイナミクスといった現象のモデル化の話題、クラスター代数や（超）離散パルヴェ方程式に関するものまで、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。

発表論文および学会発表 無し

#### 講演プログラムと概要

10月30日(木)

13:30-14:00

一般化戸田格子の超離散化

野邊 厚 (千葉大)

Lie 環を用いた戸田格子の拡張 (一般化戸田格子) において、とくにアフィン Lie 環に付随する戸田格子の離散化・超離散化を行い、戸田型セルオートマトンや周期箱玉系との関係について議論する。

14:00-14:30

**Totally positive matrix** と特異曲線上の因子

岩尾 慎介 (青山学院大)

Totally positive matrix の分解問題と離散可積分系の positive part との関係について知られていることを説明し、これらの対象と特異曲線上の positive part との関係を述べる。時間があれば、トロピカル幾何との関係も説明したい。

14:45-15:45

実データに基づくセル・オートマトンモデルの構成

川原田 茜 (静岡県立大)

セル・オートマトンは全ての変数が離散値をとる離散力学系である。局所的な相互作用によって時間発展規則が定義され、単純な規則からも複雑で多様な挙動を示すために数理モデルとして重宝されている。しかし規則の単純さ故、実際の現象に対してそれを模倣するセル・オートマトンを構成することは一般に容易ではない。本講演では、現象理解を仮定せずに観測データから直接セル・オートマトンを構成する方法について紹介する。尚、本講演は飯間信氏 (広島大学) との共同研究に基づくものである。

16:00-16:30

タイリング問題と可積分系および直交多項式との繋がり

上岡 修平 (京都大)

組合せ論におけるアステカダイヤモンドや六角形領域のタイリング問題は (厳密に数え上げ可能という意味で) 可解である。本講演ではタイリング問題と (厳密解を持つという意味で) 可解な可積分系、およびそれに付随する直交多項式との関係を調べる。特に行列式に基づくタイリング問題の証明法について解説する。

16:30-17:00

各種多面体上の離散ソボレフ不等式の最良定数

○山岸 弘幸 (都立産技高専)、亀高 惟倫 (阪大)、永井 敦 (日大)、渡辺 宏太郎 (防衛大)、武村 一雄 (日大)

各種多面体 (正多面体、切頂正多面体、フラレーン、カーボンナノチューブトラス) 上の離散ソボレフ不等式の最良定数を求めた。多面体の頂点に適切な番号付けをして離散ラプラシアンを導入し、擬グリーン行列 (ペンローズ・ムーア一般化逆行列) とグリーン行列 (逆行列)、離散熱核を求めた。最良定数は擬グリーン行列やグリーン行列の対角成分で求められる。

17:00-17:30

陽的および陰的シンプレクティック数値積分法における運動量保存則

佐々 成正 (原研)

非線形偏微分方程式の時間発展に対し、シンプレクティック数値積分法を適用した時、位相空間内におけるある積分が不変量となる。その積分不変量と (近似的) 運動量保存則の関係について考察する。

10月31日(金)

10:00-10:30

簡略化された **path-preference model** のダイナミクスについて

中田 庸一 (東京大)

Path-preference model は RNA ポリメラーゼが転写中に行うダイナミクスを記述するセルオートマトンであるが、このモデルについてある条件下で流量を測ったところ期待された挙動以外の不連続な変化が起ることが確認されたので、そのことについて説明する。

- 10:30-11:00 変分原理による多孔質岩石中内にある間隙水内の超臨界二酸化炭素吸収過程の解析  
○深川 宏樹 (九州大), 辻 健 (九州大)  
自由エネルギーを使う二成分系混合流体モデルでは潜熱や熱流を十分に考慮することができない。今回、これらを考慮できる変分原理を使ったモデルを提案し、間隙水内の超臨界二酸化炭素の吸収過程を解析する。
- 11:10-12:10 アリの採餌行動における意思決定とゆらぎ —数理モデルと行動実験による複合的アプローチ—  
西森 拓 (広島大)  
アリはハチの祖先から進化し、個々の構造や振る舞いを単純化させる一方でコロニーとしての協調行動を複雑化させ、現在地球上のほとんどの地域で繁栄を謳歌している。我々は、アリの採餌行動に着目し、トビイロケアリに関する実験と数理モデリングを行ってきた。実験では、トビイロケアリの採餌行動が、これまで広く知られている化学走性だけでなく、視覚情報や記憶にも依拠し、これら複数の因子の精妙な組み合わせで行動決定を行っていることが分かってきた。また、数理モデルでは、アリの化学走性にゆらぎ(エラー)の効果を付与し、採餌効率とゆらぎの関係を調べた。その結果、ある給餌環境の変化に応じて、「最適採餌集団」が、同等のエラーをもった「一様集団」から、高いエラー率をもったアリとエラーがほとんどないアリの「2極混合集団」に鋭く転移することがわかった。講演では、以上の実験・計算結果を報告するとともに、現象をより抽象化した理論的試みを紹介する。
- 13:30-14:00 可積分離散非線型シュレーディンガー方程式の漸近解析  
山根 英司 (関西学院大)  
defocusing な可積分離散非線型シュレーディンガー方程式 (Ablowitz-Ladik model) は逆散乱法で解ける。本講演では、逆散乱法の発展である非線型鞍点法によって解の  $t \rightarrow \infty$  における漸近展開が得られることを述べる。
- 14:00-14:30 高次分散を取り入れた Green-Naghdi 方程式とハミルトン構造  
松野 好雅 (山口大)  
Green-Naghdi (GN) 方程式は大振幅波動伝播の記述に有効な水の波のモデル方程式であるが、分散効果は最低次しか考慮されていない。ここではこれを高次分散項を含む方程式に拡張する。具体例として、 $\delta^4$  のオーダーの分散項を含む GN 方程式 ( $\delta^4$  モデル) を導出する ( $\delta$  は浅水パラメータ)。得られた方程式系は GN 方程式と同様のハミルトン構造を有することを示す。さらにこの系が Zakharov のハミルトン形式と等価であることを証明する。最後に、 $\delta^4$  モデルの孤立波解を摂動法により求める。
- 14:45-15:15 高次保存量を持つセルオートマトンについて  
○高橋 大輔 (早稲田大), 松木平 淳太 (龍谷大)  
状態変数の2次以上の保存密度を持つセルオートマトンについて、そのような保存量を持つ仕組み、解の構造、基本図の構成などについて解説する。また確率変数を導入した場合の基本図の解析についても述べる。
- 15:15-15:45 セルオートマトンの逆超離散化における重ね合わせ原理とその応用  
○吉井 理比古 (東京大), 星野 隆行 (東京大), 満洲 邦彦 (東京大)  
逆超離散化において CA のルールが拡張トロピカル多項式で記述できれば重ね合わせの原理が成り立つことを証明した。また、その応用として ECA からフィルター関数を含まない PDE を導出し、そのダイナミクスを解析した。
- 11月1日(土)  
10:00-10:30 時間遅れをもつ交通流モデルの離散化とその解について  
○松家 敬介 (東京大), 金井 政宏 (東京大)  
本講演では、Newell が提案した時間遅れ微分方程式で記述される交通流モデルの離散化及び超離散化を紹介する。また、離散化及び超離散化で得られた差分方程式は時間遅れをもち、それらの進行波解についても議論する。「本講演では、Newell が提案した時間遅れ微分方程式で記述される交通流モデルの離散化及び超離散化を紹介する。また、離散化及び超離散化で得られた差分方程式は時間遅れをもち、それらの進行波解についても議論する。」この離散化は時間遅れをもつ差分方程式であり、進行波解の連続極限及び定数解の線形安定性について議論する。

- 10:30-11:00 交通流モデルによる歩行者の引き込み現象の解析  
金井 政宏 (東京大)  
引き込みとは、弱い結合によって複数の振動子の位相が揃う現象である。今回、歩行を周期運動と捉え、基本的な交通流モデルである最適速度 (OV) モデルから着想を得て作られたモデルにより歩調が揃う現象を解析する。
- 11:10-12:10 一回繁殖型の非線形 Leslie モデルの連続化と分岐解析  
今 隆助 (宮崎大)  
Leslie モデルは年齢構造を持つ単一種の個体群動態を記述する差分方程式である。本講演では非線形の Leslie モデルの自明平衡点 (絶滅平衡点) の分岐について考える。特に、最終齢の個体だけが繁殖できる一回繁殖型の Leslie モデルについて考える。このような Leslie モデルは、微分方程式によって近似することができる。本講演では、この微分方程式を解析することによって、元の差分方程式の分岐に関して理解できることを紹介する。
- 13:30-14:00 パンルヴェIII型方程式のある特殊解系列の超離散極限  
磯島 伸 (法政大)  
差分パンルヴェIII型方程式は、その成分が差分ベッセル方程式の解で与えられる行列式を用いて表される特殊解の系列を持つ。本講演では、成分に差分ベッセル関数を与えた場合の特殊解系列の符号付き超離散極限を、一般のシステムパラメータに対して与える。
- 14:00-14:30 クラスタ代数と  $q$ -Painleve 方程式  
大久保 直人 (東京大)  
クラスタ代数はクラスタ変数、係数 (と呼ばれる変数)、quiver に mutation と呼ばれる操作を繰り返すことで定義される。本公演では mutation-period と呼ばれる性質をもつ適当な quiver を考えたとき、クラスタ変数、係数の満たす関係式が、いくつかの  $q$ -Painleve 方程式の双線形形式、非線形形式となることを紹介する。

#### ポスターセッション概要

- (1) 離散ハングリーロトカ・ボルテラ系に基づく非対称帯行列の全固有対の計算  
○竹内 弘史 (東京理科大), 相原 研輔 (東京理科大), 福田 亜希子 (芝浦工大), 石渡 恵美子 (東京理科大)  
離散ハングリーロトカ・ボルテラ (dhLV) 系に基づく、ある非対称帯行列の複素固有値を計算する方法が知られている。本研究では、dhLV 系の時間発展を利用して固有ベクトルを計算する方法を示す。さらに、固有ベクトルの各成分の陽的な表現を与える。
- (2) 離散戸田方程式のある拡張に基づく **Totally Nonnegative** 行列の固有値計算アルゴリズム  
○隅蔵 亮 (東京理科大), 福田 亜希子 (芝浦工大), 石渡 恵美子 (東京理科大), 山本有作 (電通大), 岩崎 雅史 (京都府立大), 中村 佳正 (京都大)  
本発表では、箱に番号が付いた箱玉系に由来する離散戸田方程式の拡張を基に、Totally Nonnegative 行列の固有値を計算するアルゴリズムを示す。また、収束加速のための原点シフトを導入する。
- (3) 平面離散曲線の例について  
○井ノ口 順一 (山形大), 加藤 慎也 (山形大)  
離散可積分系理論の発展に鼓舞されて、微分幾何学的対象の離散化が研究されるようになった。これまでの研究では離散可積分系で統制される離散曲線や離散曲面が主に扱われてきたが、離散曲線そのものをどのように研究対象としていくかについてはまだ研究が少ない。ハイポサイクロイドの離散化に関する研究結果を報告する。

- (4) **Max-Min-Plus 表現を用いた 5 近傍粒子 CA の確率化について**  
 ○津川 未希 (龍谷大), 松木平 淳太 (龍谷大), 高橋 大輔 (早稲田大)  
 セルオートマトンの時間発展に確率を導入する研究が活発に行われている。確率を導入することにより、さらに現実に近いモデルとして応用が可能となることが期待できる。しかしながら、確率変数を含んだ Max-Min 表現の発展方程式を得る方法はまだ確立されていない。本研究では、基本図と発展方程式の関係を用いて、幾何学的な観点から、確率変数を含んだ Max-Min-Plus 表現の発展方程式を得ることに成功した。従来の方法では、4 近傍・5 近傍の粒子セルオートマトンの確率化は難しいとされていたが、本研究で用いた手法により 4 近傍では 4 個、5 近傍では 16 個のルールの確率化に成功した。
- (5) **病理モデルにおける連続型と超離散型との対応関係**  
 ○関口真基 (都立荻窪高), 石渡恵美子 (東京理科大)  
 連続型病理モデルを超離散化することで得られる超離散型病理モデルの解の挙動が、もとの連続型モデルと同様に議論できることを示し、解の大域的性質が、連続型モデルと超離散型モデルで対応することを示す。
- (6) **Jeu de taquin slide と超離散 KP 方程式**  
 ○片山 陽介 (立教大), 笥 三郎 (立教大)  
 三上・太田は、組合せ論における jeu de taquin slide の操作を差分方程式で表し、超離散 KP 方程式との関係を議論した。本研究では、三上・太田の結果に若干の変更を加え、逆操作にも適用可能な方程式を提案する。
- (7) **情報提供による、分岐のある道路における交通流の最適化**  
 今井 武晃 (東京大), 西成 活裕 (東京大)  
 分岐のある道路においては、カーナビゲーションシステムや ITS などの交通情報提供装置によって交通が制御されている。しかし、情報提供の内容によっては、交通量が一つの道路に偏りかえって交通状況を悪化させるようなことが起こる。最適な交通状況を実現するための情報提供内容と情報提供方法についての研究の成果を示す。
- (8) **群衆の出口選択における歩行者同士の相互作用について**  
 井上 翔介 (東京大), 西成 活裕 (東京大)  
 部屋に複数の出口があった場合、歩行者の出口選択には近接する人の選択につられ、混んでいる出口を避けるという仮定のもとでシミュレーションをし、その相互作用がどのように流れに影響するのかを調べた。
- (9) **平面渦の定常配置と安定性**  
 ○上野 拓 (立教大), 笥 三郎 (立教大)  
 Hemery と Veselov は、2次元平面での完全流体における渦の定常配置に対して、新しい例を構成した。本研究では、それらの安定性を考察する。
- (10) **表面張力入りの Hele-Shaw 問題**  
 ○野見山 雅之 (立教大), 笥三郎 (立教大), 梶原健司 (九大)  
 Hele-Shaw 問題において、ある種の表面張力効果を考慮すると、Dym 方程式に外力項を付け加えた方程式が得られる。本研究では、その方程式を双線形化法の立場から議論する。
- (11) **結合型変形 KdV 方程式のソリトン解の構造**  
 ○中川 剛 (立教大), 笥 三郎 (立教大)  
 岩尾・広田によって提出された結合型変形 KdV 方程式のソリトン解は、多くのパラメータを含んだ複雑な構造を持つ。本研究では、ある意味で“1-ソリトン解”を調べれば十分であることを示す。
- (12) **楕円曲線と Hankel 行列式**  
 由良 文孝 (はこだて未来大)  
 楕円曲線上の点の Hankel 行列式表示について議論する。

開催の期間 平成 26 年 10 月 30 日 ~ 平成 26 年 11 月 1 日

参加者 70 名



## 研究成果報告書

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

平成 26 年 12 月 11 日（木）－12 日（金）

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

## 「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)

2014年12月11日から12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件の講演があった(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。

例年に変わらず、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。

## プログラム

「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」

日程: 平成 26 年 12 月 11 日 (木) - 12 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>)

本研究集会は 12 月 10 日午後-11 日午前に開催されます「海洋レーダに関する研究集会」(代表者: 藤井智史 (琉球大)) に引き続き行います。

----- 12/11(木) -----

13:30-13:40 趣旨説明

13:40-14:40

Shoaling Internal Solitary Waves in South China Sea

Ren-Chieh Lien (APL, University of Washington)

14:40-15:00

2013 年夏から秋に山陰沿岸で観測された顕著な水位差変動

滝川哲太郎 (水大校), 渡辺俊輝 (山口水研セ), 千手智晴 (九大応力研),

森本昭彦 (名大水循環セ)

15:00-15:20

2014 年 6 月に山陰沖・遠距離海洋レーダ観測海域で得られたプランクトン分布

永沼元、滝川哲太郎 (水大校)、小針統 (鹿大水産)、森本昭彦 (名大水循環セ)、杉谷茂夫、岩井宏徳 (NICT 沖縄)、久島萌人

(名大水循環セ)、藤井智史 (琉大工)、市川香 (九大応力研)、雨谷純 (NICT 沖縄)

15:20-15:30

休憩

15:30-15:50

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よる予測実験について

石崎士郎(気象庁)

15:50-16:10

気象庁海洋観測定線東シナ海 PN 線の長期変化 (その2)

村上 潔 (気象庁海洋気象課)

16:10-16:30

日向灘北部沿岸域における流況の季節変化

渡慶次力 (宮崎水試)・清水学 (水研セ中央水研)・市川忠史 (水産庁)・広瀬直毅・千手智晴 (九大応力研)

16:30-16:40

休憩

16:40-17:00

漁船による流況観測に見られた沿岸捕捉波の時空間変動

福留研一 (水研セ日水研)・井桁庸介・(水研セ日水研)・大慶則之 (石川水総セ)・千手智晴 (九大応力研)・渡邊 達郎 (水研セ日水研)

17:00-17:20

気象庁 wave setup 現業モデル開発および防波堤が wave setup に及ぼす影響について

近澤昌寿 気象庁日本海海洋気象センター

17:20-17:40

風波と規則波が吹送流に及ぼす、波と流れの相互作用の相違について

水野信二郎 (元広島工業大学)

12/11 講演終了後 懇親会

----- 12/12(金) -----

09:00-10:00

傾圧海洋の慣性・準地衡線形応答

増田章(九大応力研)

10:00-10:20

対馬海峡周辺における水温・塩分の短周期変動から見た低塩分水の挙動

富石悠太（九州大院総理工）・松野健（九州大応力研）・千手智晴（九州大応力研）

10:20-10:40

対馬海峡と宗谷海峡における表面流速の相関関係とその要因について

佐原賢紀（京大理）、吉川 裕（京大理）、江淵 直人（北大低温研）

10:40-10:50

休憩

10:50-11:10

2014年2-3月における津軽海峡への日本海水の流入について

渡邊修一、佐々木建一、脇田昌英、田中義幸、川上創、山本秀樹、津幡圭介、吉川泰司（海洋研究開発機構むつ研究所）、齊藤誠一、小林直人（北海道大学水産科学研究院）

11:10-11:30

対馬暖流の水塊起源の特定

高谷周平（富山大院・理工）、松浦知徳（富山大院・理工）、広瀬直毅（九大応力研）

11:30-11:50

淀川感潮域における海水遡上に対する物理現象の把握

小山悠人（神戸大院海事）・中田聡史（神戸大院海事）・林美鶴（神戸大内海域セ）

11:50-12:10

総合討論



## 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、高い時空間分解能で継続的に沿岸海域をモニタリングすることが可能である。また、陸上設置の観測器であることから、洋上または船舶の観測に比べて運用保守などが容易であるという利点がある。この特徴を生かして、海洋環境の把握や防災への活用、海運や水産業への貢献などが期待されている。

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 年度に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： 2014 年 12 月 10 日(水) 午後(13:00~17:30)  
11 日(木) 午前(9:00~12:00)

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： 10 日 48 名  
11 日 45 名

## 3. 発表概要

本研究集会では 14 題の発表があり、観測システムの高度化から観測データの解析・検証まで広い分野での議論が 2 日に渡って活発に行われた。特に今回の企画として、1 日目後半に今まで海洋レーダを利用していないテーマでの海洋レーダデータの適応検討とその期待についての講演 4 題を設け、応用分野拡張の可能性について議論することとした。

1 日目前半では 4 件の講演があり、まず北海道大学の Wei らが、紋別沿岸に設置の CODAR/SeaSonde レーダのスペクトルデータの形状ならびに伝搬損失のシミュレーションから流氷の検知法について報告した。海外でも報告例が少ない応用であり水平線越えでの流氷検知が実用になれば効果が期待できる。電力中央研究所の坪野らは、グリーン関数を視線方向流速に適用して M2 潮流の内挿を行った。本来、視線方向流速しか得られないドップラレーダでは、複数レーダを用いてそのビームの重なる方向でのベクトル合成が基本であったが、より広域に渡る内挿が可能になる点で有用な手法と考えられる。名古屋大学の森本から、NICT・九大・水産大学校・琉大との共同プロジェクトである遠距離海洋レーダを用いた対馬海流観測に関して、海底設置 ADCP や漂流ブイとの流速精度検証について報告があった。これはプロジェクト全体の初期的結果であり、今後の成果が期待される。JAMSTEC の佐々木からは、昨年度末に稼働し始めた津軽海峡東口での観

測の現状について報告があった。定性的には妥当な流速パターンが観測されているとのことであり、今後の継続的な観測とデータ提供への期待が大きい。

1 日目後半の 4 題は、上述の通り、いままで海洋レーダのデータを使用されていなかったテーマに関して、海洋レーダに対する期待を含め、その可能性について講演を依頼したものである。JAMSTEC の石川は、海洋レーダデータのデータ同化への活用とその可能性を念頭におき、前講演で紹介された津軽海峡東口の観測結果を用いて、海洋レーダデータの特徴に関して論じた。モデル計算の結果との比較から、レーダ観測での流速が小さいことを指摘し、その原因の究明とより詳しいデータ解析の必要性を明らかにした。気象研究所の碓氷も、データ同化へのレーダデータ利用の可能性について述べた。気象庁で現用の海象予報システムと同化モデルについての解説と沿岸域での高精度化のために未利用の流速データの同化方法とその有用性に触れた。中央水研の青木からは、橋湾と有明海での赤潮発生メカニズムの紹介があり、流動場と塩分分布が関係しているとの報告があった。表層流速分布の時間変化の観測は海洋レーダの得意とするところであり、さらに海洋レーダデータを用いた塩分計測の可能性の報告もあることから、研究連携が期待される。九大総理工の経塚は、潮流・海流発電の現状を紹介し、同分野への海洋レーダの期待を述べた。発電機設置場所の調査・選定にあたっては、現用レーダの能力を超える分解能が要求されたが、同分野での環境調査への海洋レーダの期待が示された。

2 日目は、主にレーダのハードウェアと観測手法についての 6 件の講演があった。新潟大学の龍川らは、Khatli-Rao 積拡張を用いた仮想アレイによる角度分解能を向上させて得られた表層流速の評価を報告した。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は、その必要面積が大きいことから、このような技術による設置場所選定における要求条件緩和が期待される。情報通信研究機構の杉谷らは、同様にアレイアンテナ構成での海洋レーダに対する技術革新として、受信機間の信号同期に関する新しい方式について紹介した。これは、各素子アンテナに受信機を配備した場合に必要となるものであり、アンテナ配置の自由度向上に貢献する技術である。東京農工大の宇野らの講演では、海洋レーダの受信信号スペクトルから海上の船舶を検知できることを示された。最近国外の研究で、船舶からの反射エコーに関する報告が出てきているが、国内の既存レーダでも十分可能であることが示された。琉球大学の久木は、レーダスペクトルを海上の直交格子内で平均化後、自己組織化マップを用いてその形状分類することで波浪スペクトルを推定する手法を紹介した。従来の方法に比べて推定領域やレーダの数などを自由に設定できる利点がある。電力中央研究所の坂井らは、津波検知を目的とした短時間観測での観測精度について遠州灘での VHF 海洋レーダを用いた実観測から検証した。観測範囲や測得率が時間的変化し、風速による影響があることや、係留流速計との比較から 3 分間隔の流速との相関がやや低いことなど、実際の津波観測への課題が示された。三菱電機の石川らは、海洋レーダの視線方向流速からレーダ覆域内での津波波高を推定する計算方法について述べた。実際の海洋レーダの観測時間間隔やそれに応じた流速精度との検証が今後必要と思われる。

今回の研究集会では、1 日目と 2 日目の 2 回討論の時間を設けた。1 日目は、主に海洋レーダの無線局免許方針が総務省より示されたことに対する、現行レーダでの問題点と対処方法に関する議論を行った。実用局として免許されるようになることに対して必要となる事項を検討し、今後の実験局免許の取扱と実用局への転換についての対策が議論され、各レーダ局管理者ならびにメーカや

代理店等関係者の連携と総務省との調整の必要性が示された。2日目の総合討論では、現在の海洋レーダを取りまく状況や今後の方向性など、研究集会での議論のまとめを行い、研究集会を終了した。

#### 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26年12月10日(水)～11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10日(水)

13:00-13:05 あいさつ・趣旨説明

藤井智史(琉球大)

13:05-13:30 Drift Ice Detection by HF radar off Mombetsu

張偉、江淵直人(北大低温研)

13:30-13:55 グリーン関数法を用いた有明海における視線方向のM2分潮流速の物理的内挿

坪野考樹、三角和弘、津旨大輔、坂井伸一(電力中研)

13:55-14:20 対馬・相島遠距離海洋レーダの精度検証

森本昭彦(名大HyArc)、杉谷茂夫(NICT)、市川香(九大応力研)、久島萌人(名大HyARC)、  
滝川哲太郎(水産大学校)、藤井智史(琉球大)、岩井宏徳、雨谷純(NICT)

14:20-14:45 海洋短波レーダーによる津軽海峡東口表面流計測の現状について

佐々木健一、渡邊修一、吉川泰司、柳谷敏典、脇田昌英、田中義幸、山本秀樹、津幡  
圭介(JAMSTEC)

14:45-15:00 休憩

15:00-15:25 津軽海峡 HF レーダーデータのデータ同化にむけて： レーダーデータの基礎的な解  
析結果

石川洋一、佐々木健一、渡邊修一(JAMSTEC)

15:25-15:50 気象研究所における沿岸同化モデルの開発

碓氷典久、藤井陽介、坂本圭、倉賀野連(気象研)

15:50-16:15 橘湾・有明海における Chattonella 赤潮出現特性の把握

青木一弘、清水学(中央水研)、山砥稔文、石田直也、土内隼人(長崎水試)、片岡智哉(国  
総研)

16:15-16:40 日本における潮流・海流発電の現状と海洋レーダへの期待

経塚雄策(九大院総合理工)

16:40-17:30 議論・情報提供

12月11日(水)

- 09:00-09:25 仮想レーザを用いた角度分解能向上による二次元表層流速推定結果について  
龍川卓也、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)
- 09:25-09:50 分散型海洋レーザ開発にむけての高精度同期信号供給システム開発  
杉谷茂夫、雨谷純、岩井宏徳(NICT)
- 09:50-10:15 既存海洋レーザを用いた船舶検知等の調査検討  
宇野亨(東京農工大)、藤坂孝彦(東京海洋大)、藤井智史(琉球大)、赤井秀樹(総合研究  
奨励会)、澤谷邦男(東北大)、鈴木真二(東京大)
- 10:15-10:25 休憩
- 10:25-10:50 海洋レーザによる波浪方向スペクトル推定手法の拡張  
久木幸治(琉球大)
- 10:50-11:15 外海域における津波検知のための基礎観測  
坂井伸一、松山昌史(電中研)、奥田康三、上原史洋(中部電力)
- 11:15-11:40 海洋レーザで算出された表層流速分布から津波の波高を推定する手法の検討  
石川博章、永野隆文、中西孝行(三菱電機)、谷智之、金戸俊道(東京電力)
- 11:40-12:00 総合討論

## 「東シナ海の循環と混合に関する研究」

"Workshop on the Circulation and Mixing in 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することとした。

出席者は、名古屋大学3名、長崎大学2名、富山大学1名、環日本海環境協力センター2名、東京大学1名、九州大学5名であった。本研究集会では、

石坂丞二（名古屋大学）、伊藤雅（名古屋大学）、Hao Qiang（名古屋大学、中国第2海洋研究所）、武田重信（長崎大学）、梅澤有（長崎大学）、遠藤貴洋（東京大学）、張勁（富山大学）から話題提供があり、それぞれについて議論を行った。

## 2. 研究集会の概要

日時：2015年2月2日（月） 10:00~17:00

場所：九州大学応用力学研究所 6F W601

石坂は、日本海の高気圧性渦が日本海の生産に与える影響について、2003年と2004年の春季ブルームに注目して発表した。海面高度計データによると、2003年にはウルルン海盆、大和海盆の2か所、2004年にはウルルン海盆、大和海盆、ウラジオストック沖の3か所で高気圧性の渦が確認された。春季ブルームは、空間的に変動が激しかった。2004年のウラジオストック沖以外の渦では、春季ブルームが渦内では外よりも遅く始まり、これは渦の中では冬季に混合層が深かったことによる可能性が考えられた。渦が比較的沿岸近くにあった2004年のウルルン海盆と大和海盆の渦では、渦の外に比較して中のピーク濃度が高かったが、他の渦ではそれほど大きく異ならなかった。衛星の解像度、亜表層のクロロフィル、低気圧性渦などに関する議論が行われた。

つぎに伊藤は、日本海の数値計算で、夏の対馬海峡の下層から流入する栄養塩を変化させると、春季ブルームには影響は出ないが、秋季に日本海の広い範囲で植物プランクトン量を変化させることを示した。今回は人為的な影響で栄養塩がたまった場合の変化を表すために、栄養塩のみを対馬海峡の境界条件で変化させている。現実の黒潮系と黄海底層冷水切り替わるような場合は、物理構造の変化も考慮する必要があることなどの議論があった。

Hao は、渤海、黄海、東シナ海の衛星のクロロフィル a データを現場データで合わせこんで、濁りによる衛星データの過大評価を減少させ、季節変化を再現させた。その結果、浅い海域では濁りによって、夏季に最大値を示すが、夏に懸濁物が少ない沖合では春季ブルームが存在することが明らかとなった。また、現場の基礎生産のデータを利用して、表面光によって水柱で最大のクロロフィル a あたりの基礎生産 ( $PB_{opt}$ ) を表すことで、衛星によって通年の基礎生産を計算した。これによって、これまで一般的だった温度依存性のモデルの過大評価を小さくすることができ、の基礎生産データを魚類の生活史と比較した。

武田は、2014 年の長崎丸航海で取得された、東シナ海と対馬海峡でのクロロフィル蛍光と硝酸塩の詳細プロファイルと比較した結果を示した。亜表層クロロフィル極大が厚い場合には、硝酸塩躍層が複数見られ、栄養塩が枯渇した場合でも高いクロロフィルが存在する場合があった。一方、極大が狭い場合には、硝酸塩躍層は一つである傾向があった。また、ケイ素の取り込みから推定した珪藻の増殖は必ずしも、クロロフィル蛍光や硝酸塩プロファイルの特徴と対応はしていなかった。また、藍藻類は珪藻の少ないときに観察された。

梅澤は、2014 年の長崎丸で懸濁物のサイズ分画を行い、N/P 比を測定した結果を示した。亜表層クロロフィル極大域に関して、大型の懸濁物は N/P 比の変動が大きくレッドフィールド比よりも高い場合があったが、小型の懸濁物に関しては比較的レッドフィールドに近く変動も小さかった。現場の栄養塩の N/P 比の変動と対応はしていなかったが、大型珪藻が長江起源の高い栄養塩を蓄えている可能性や窒素固定するトリコデスミウムの影響を示した。しかし、懸濁物中には植物プランクトン以外も含まれ、食物連鎖への影響は実験室で調べる必要があると考えられた。

遠藤は、2011 年の長崎丸で観測した済州島南西での ADCP と TurboMAP の時系列データを用い、底層混合層内での乱流微細構造と潮汐流の力学的関係について解析を行った。密度の時間変動は、混合層上部では潮汐流による背景で決まるのに対して、混合層下部では密度場の水平移流で決まっていた。また、上部では半日周期以外に日周潮が観測されるのに対して、下部では半日周期のみであった。さらに、成層の時間変動は、上部ではほぼ移流によったが、下部では **Straining** と移流によった。

張は、2015 年秋に予定されている、白鳳丸と東方紅 2 号の共同調査に関して紹介した。白鳳丸は 10 月 14 日—11 月 2 日に東京—長崎で、東方紅は 10 月 19 日—11 月 7 日に青島—青島で予定されており、名簿の最終確定は、白鳳 6 月末、東方紅は 4 月であることが確認された。

すべての発表ののちに、2015 年夏に予定されている長崎丸の航海に関して、打ち合わせを行った。航海期間は 7 月 18—27 日である。議論の末、測点を三角形に設け、時系列観測を行うこととなった。

九州大学応用力学研究所研究集会

「東シナ海の循環と混合に関する研究」

日時 2015年2月2日(月)

場所 九州大学応用力学研究所 W601

10:00-10:40 Influence of mesoscale eddies on spatial and temporal variability of spring phytoplankton bloom in the Japan Sea

Eligio Maure、石坂丞二

10:40-11:20 対馬海峡を通過する栄養塩量の変化に伴う日本海の植物プランクトン量の変化

伊藤 雅・森本昭彦・石坂丞二・高山勝巳

11:20-12:00 Temporal and spatial variation of satellite primary production in the eastern China seas

Hao Qiang

昼 食

13:30-14:10 東部東シナ海の垂表層クロフィル極大層付近における栄養塩の動態と珪藻類の増殖活性

増田阿美、森川誠聖、武田重信

14:10-14:50 夏季の東部東シナ海における画分別の懸濁態粒子の NP 比の変動

野崎 龍、尾崎健史、山岸龍ノ介、梅澤 有

14:50-15:30 東シナ海陸棚上の海底混合層内で観測された成層および乱流強度の潮汐周期変動

遠藤貴洋

15:30-16:10 2015年の東シナ海日中共同観測

張 勁

16:10-17:00 議論



平成26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超高速オシロスコープや高速カメラの導入により 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。相互相関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。本研究では相関解析による雑音成分の低減、統計精度向上、の高度化に加え、相関からは直接検出できない隠れた相関を検出する手法の開発を行う。

### サブテーマ

本特定研究では 12 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

最も大きな成果は本共同研究により開発した「波動伝搬を用いた磁力線構造観測法」により磁気面のストキャスティック化を観測し、更にストキャスティック化によりプラズマ流が強い減衰を受ける事を発見した事である。本成果を基に核融合科学研究所と九州大学との共同記者会見が行われた(居田, 稲垣)。本特定研究 3 年間の活動を代表する成果である。今年度に関しては、高速カメラ(大館)や超高速オシロスコープの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、ドップラーシフトの空間多点同時計測に成功した。PANTA では更に template 法(位相同期型コンディショナル平均法)を用いた密度分布の高精度計測の開発が進展している。LHD では長時間放電においてアンサンブル数を従来の 100 倍にする事で低周波の微小揺動成分の観測に初めて成功した(土屋)。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)。新たな解析法として、ヒルベルト変換を用いた瞬時値解析法がヘリオトロン J 装置に適用され(大島)、時系列信号をネットワーク化するという従来とは大きく異なるアプローチも PANTA に適用する(谷澤)等、着実に進展している。レーザー位相面の揺らぎを検出すると言う新しい計測法の開発も開始された(秋山)。今後は、これまで開発された手法を様々なプラズマへと適用する。



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

本研究は磁力線構造の観測手法の開発を行う事を目的とする。磁力線構造を可視化する事で磁気面のストキャスティック化を観測する事が可能となる。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ため、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のは急務の課題であった。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成果をあげてきた。本手法の更なる高度化のため、多くの装置のプラズマ実験に適用する。更に、開いた磁力線構造での波動伝搬の理解のため応用力学研究所の直線装置 PANTA を用いた実験も併せて行う。

波動伝搬による磁力線構造の可視化

本研究では図 1 に示したような磁力線構造の変化を観測する事に成功した。この手法は熱の伝わり方が磁力線に沿った方向と横切る方向で  $10^{3-5}$  の大きな違いがある事を基盤にしている。プラズマの中心に加熱を断続的に入射(ECH モジュレーション)する事でプラズマ中に熱波動を励起し、その熱波動の伝搬特性(時空間構造)を観測する。磁気構造が"閉じた磁気面"である場合、熱は磁力線を横切って伝搬する必要があるため、径方向の熱伝搬速度はゆっくりとしている。しかし磁気面が"ストキャスティック化"すると磁力線自身が空間的に大きく動くため、熱波動は磁力線を横切らずとも径方向に伝搬できるようになるため伝搬速度は圧倒的に速くなる。図 1 下段には熱波動が伝搬する際の遅れ時間の径方向分布を示している。磁気面がストキャスティック化している場合、熱波動は瞬時(遅れ時間~0s)に伝わる事が分かる。このように熱波動の伝搬から磁気面の状態を推定できる。

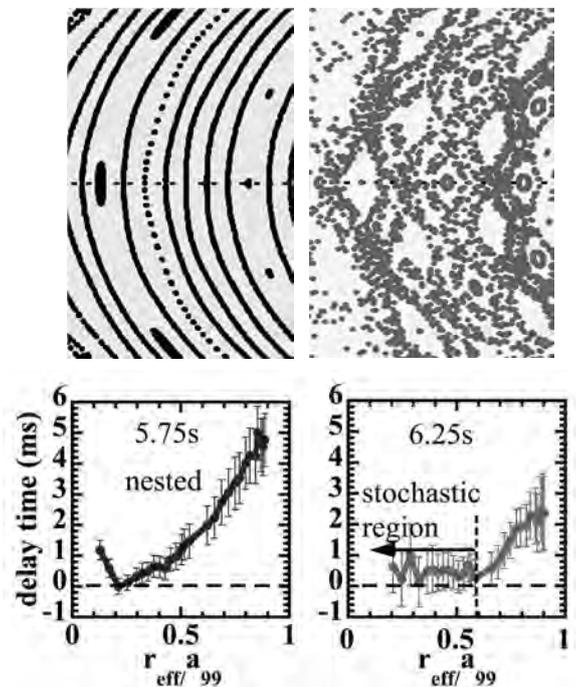


図 1 閉じ込め磁場の断面構造および熱波動の伝搬。(上段左)閉じた磁気面、(上段右)ストキャスティック化した磁気面、(下段左)閉じた磁気面での熱伝搬特性、(下段右)ストキャスティック化した磁気面での熱伝搬特性。

運動量輸送への影響の観測

可視化手法の開発は昨年度中にほぼ完了したため、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、磁力線構造が運動量輸送に与える影響を調べる研究へと発展させた。

LHD において磁気シアを制御し、磁気面をストキャスティック化させる実験を行った。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ると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 に減少させた。磁気シアが 0.5 程度まで減少すると磁気面がストキャスティック化している事が熱波動伝搬特性により明らかになった。この時、磁気面がストキャスティック化に伴い、

トロイダル回転速度が減衰する現象が発見された。ストキャスティック化している場合はトロイダル回転速度はほぼ0になってしまう。磁気面のストキャスティック化による回転速度の減少は粘性の増加として理論的に予測されてきた。しかし今回は理論予測の5倍以上の強い減衰が観測されており、減衰の様相は粘性の増加では説明できない事が明らかになった。

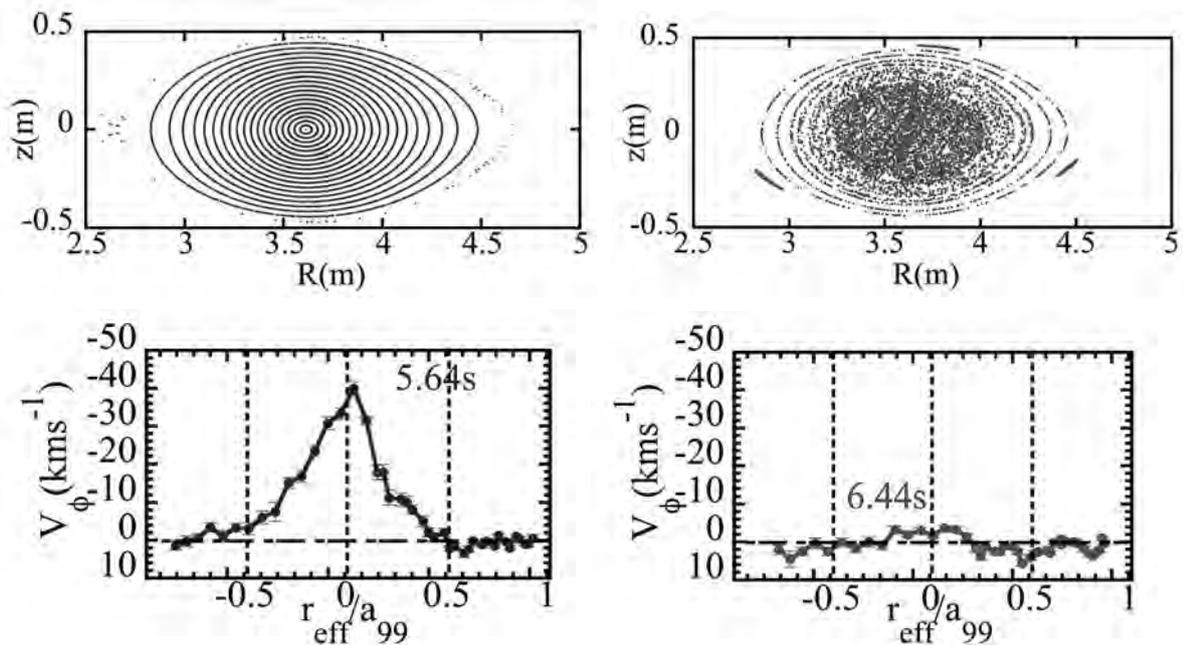


図2 ストキャスティック化の(左)前および(右)後の(上段)磁気面構造及び、(下段)トロイダル回転速度の空間分布の違い

### 成果の評価

磁気面のストキャスティック化とプラズマの運動量輸送との関連は非常に重要な課題であり世界的に研究が進められている。今回初めて観測されたストキャスティック化による回転の非常に強い減衰の発見は大きな成果である。本成果は *Nature Communications*, 6 (2015) 5816 にて発表される等国際的にも高く評価されている。本成果には本共同研究の「波動伝搬を用いた磁力線構造観測法」が磁気面のストキャスティック化の観測という重要な点を担っている。このため核融合科学研究所と九州大学との共同成果として記者会見が行われた\*。本手法は 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。実際に今年度は DIII-D の実験にも適用し、新たな結果を得ている。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、本手法の開発に成功した事は大きな意義がある。

\* [http://www.kyushu-u.ac.jp/pressrelease/2015/2015\\_01\\_08.pdf](http://www.kyushu-u.ac.jp/pressrelease/2015/2015_01_08.pdf)

### 研究組織

居田克巳	核融合科学研究所
稲垣滋	九州大学応用力学研究所
小林達也	核融合科学研究所

## 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

磁場閉じ込め核融合プラズマの研究において、乱流物理の理解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、マイクロ波などの電磁波を用いた乱流揺動計測法が開発され各種装置に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、ハードウェアとして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

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光源とする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。本年度は、前者の周波数コムシステムは、ka-band から U-band までの周波数領域への拡張を行い、より広い空間の情報が得られるようになった。後者の cECE 計測について以下に詳細を述べる。

### 3. 実験結果

電子熱流束の乱流揺動成分は、電子温度  $T_e$ 、電子密度  $n_e$ 、速度  $V_r$  を用いて、

$$Q_e = \frac{3}{2} T_e \langle \tilde{n}_e \tilde{V}_r \rangle + \frac{3}{2} n_e \langle \tilde{T}_e \tilde{V}_r \rangle$$

と記述できる。したがって、密度揺らぎだけでなく温度揺動の情報も必要である。一般に高時間分解能が期待できる ECE ラジオメータ信号では、乱流に起因するような波数の高い揺動成分は、ECE の雑音成分に埋没し、検出が困難である。

そこで、空間的に近接している（ただし帯域の重

複の無い）2つの空間測定位置からの ECE 信号間の相互相関を取得し、そのアンサンブル平均処理を

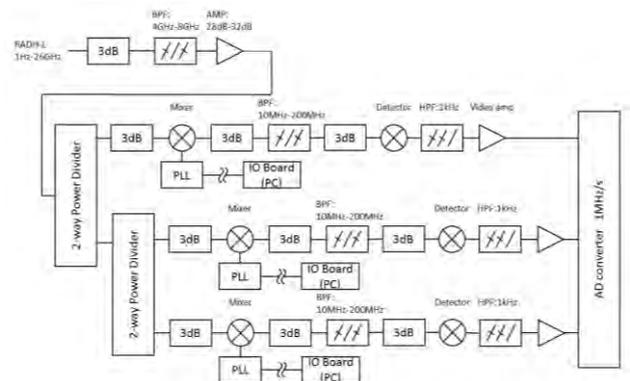


図1：cECE システム概略図

施すことにより雑音成分から電子温度乱流情報の抽出を行う cECE 法の適用を LHD にて行った。図 1 に cECE システムの概要を示す。システムは、既存の ECE ラジオメータ (RADH) の信号の一部を分岐これに周波数可変の局発波をミキシングすることにより、ECE 信号を検出する。局発波の周波数を変化させることにより、プラズマ中の任意の位置の観測を可能とする点が特長である。本年度、局発波の周波数を PLL 安定化、バンドパスフィルタの帯域の最適化などを実施し、LHD からの放射 ECE 信号の検出に成功した (図 2)。

図 1 に示すように 3ch の計測システムとしており、同時に異なる 2 点間の相関計測が可能である。図 3 には、相互相関解析で求めた cECE と対応する空間を計測している従来型のラジオメータ信号のコヒーレンスの時間変化を示す。 $t > 5.5s$  より周波数的に広がったスペクトルが観測できる。また、 $t > 6.5s$  以降では、従来のラジオメータではコヒーレンスが低くなっているが、cECE はより高周波数まで広がっている。この差は、信号の周波数帯域が cECE の方が半分、チャンネル間の周波数がより近接していることによると考えられる。今後、平均化処理による雑音成分の低減によるより高周波数の揺動成分や多点計測による空間相関長、径方向波数観測などの諸量の抽出手法の確立を行っていく。

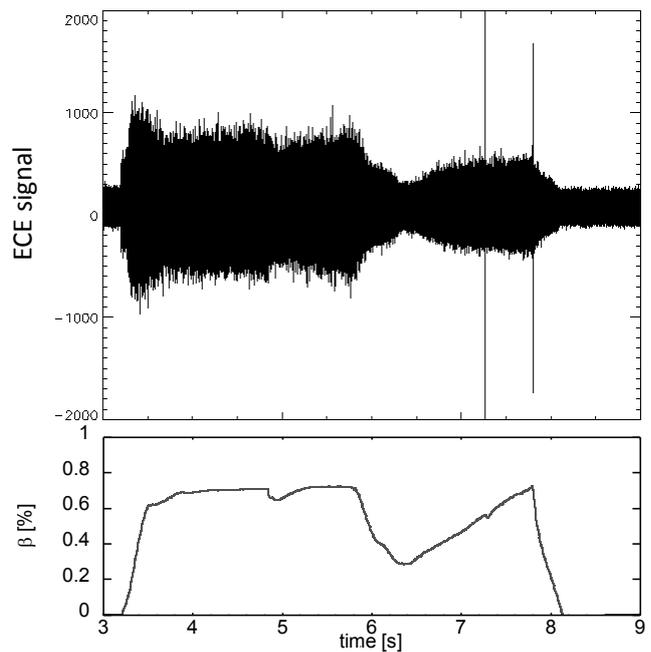
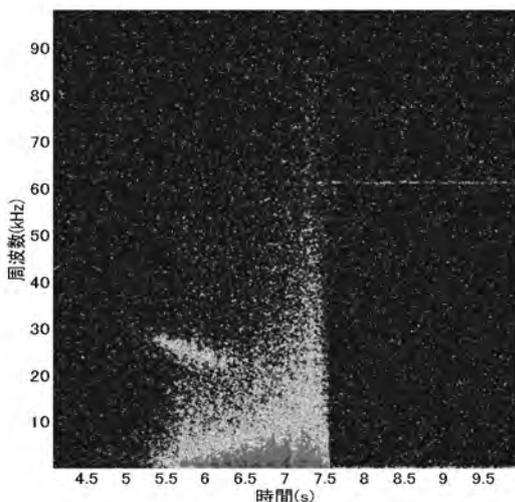


図 2 : cECE で計測した ECE 信号 (上) とプラズマベータ値 (下) の時間変化

cECE <ch2-ch3>



RADH <ch18-ch19>

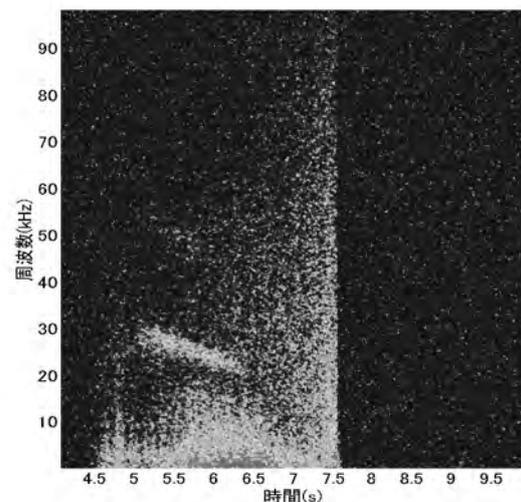


図 3 : cECE により求めた 2 点間のコヒーレンスの時間変化 (左)、RADH のもの (右)。

# 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

超高温のプラズマを安定して閉じ込めるためにはプラズマ中に形成されるドリフト波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 現在までの研究結果

本研究は 2012 年に谷澤と中村によって得られた時系列データのネットワーク化手法 [1, 2, 3] を円筒形直線型プラズマ内ドリフト波乱流の観測およびシミュレーションから得られる時系列データに適用するものである。この手法は、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  $x(t-1), x(t-2), \dots$  とランダムノイズ  $\varepsilon(t)$  を用いて

$$x(t) = a_0 + a_1x(t-l_1) + a_2x(t-l_2) + \dots + a_wx(t-l_w) + \varepsilon(t) \quad (1)$$

と線形モデル化し、各時間項  $x(t), x(t-l_1), \dots, x(t-l_w)$  を表わすネットワークノードにおいて、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する。ここで、パラメータ  $a_0, a_1, \dots, a_w$  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) を合わせて用いることにより、いくつかの時間遅れ項  $x(t-l_1), x(t-l_2), \dots, x(t-l_w)$  から最適な部分集合を選び出す。この手法においては、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という利点がある。

図 1 に、円筒形直線型プラズマ内ドリフト波乱流の 64 チャンネルの測定から得られた時系列データのうちのひとつ（チャンネル 16）を本研究の手法によりネットワーク化したものを示す。

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]。

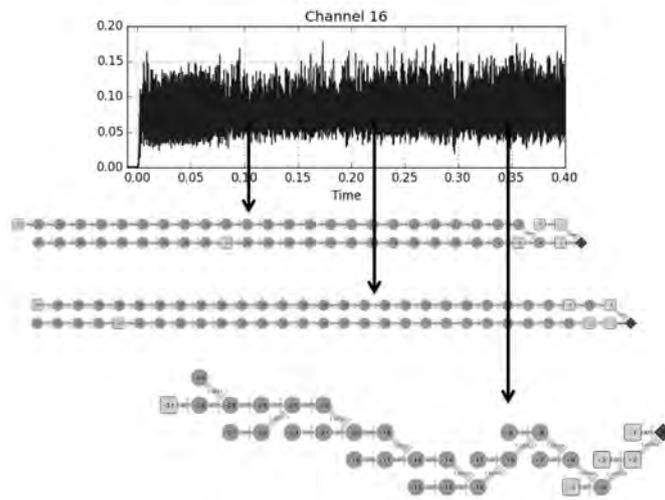


図1 円筒形直線型プラズマ内ドリフト波乱流 64 チャンネルの測定データのうちの一つのチャンネル (チャンネル 16) の時系列データを谷澤・中村の手法によりネットワークとして視覚化したもの。時間経過に伴う振動の性質の違いがネットワークトポロジーの違いとして明確に表現されている。

### 3 今後の研究の方向について

今後、さまざまな状況下におけるドリフト波乱流の観測および数値シミュレーションデータをこの手法により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予定である。また、さらに各チャンネル間の関係性やプラズマ乱流の非局所的相関関係についても、多次元時系列解析の手法等も用い、解明していきたい。

### 4 研究成果発表

現在のところなし。

### 参考文献

- [1] 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

自然科学研究機構 核融合科学研究所 ヘリカル研究部 田村直樹

### 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た。これを受けて、本研究では、同評価手法において取り扱う実験データに対して雑音成分の低減技術や統計精度向上技術などを適用し、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を目的としている。

### 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、特にその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。昨年度に引き続き、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などについて考察を行った。

### 研究結果

核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)において、トレーサー内蔵固体ペレット(TESPER)入射により非局所輸送現象(周辺電子温度の瞬間的低下に対応した即時的な中心電子温度の上昇)が発現した場合におけるTESPER入射時刻を基準とした変動電子温度勾配の時間発展の空間分布を図1の上段に示す。図1の下段は、規格化小半径位置 $\rho = 0.12, 0.41, 0.61$ それぞれにおけるTESPER入射時刻を基準とした変動電子温度の時間発展である。図1下段に示した通り、LHDで観測されている非局所輸送現象は、プラズマの電子密度が増加するとともに消失する。図1上段より、TESPERがプラズマに侵入した直後、プラズマ周辺部の広い領域( $\rho > 0.62$ )に亘って電子温度勾配が瞬間的に増加していることが分かる。この時、TESPERの侵入範囲は、図で示した範囲よりも外側( $\rho > 0.8$ )である。その後、これを発端として、プラズマ中心部まで電子温度勾配の変化フロントが伝播している。図1中の斜破線で示したように、比較的低密度の $n_{e\_bar} = 0.7 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ の場合は、プラズマ中心部( $\rho < 0.65$ )全域において電子温度勾配の変化フロントの弾道的伝搬が確認できる。その一方で、電子密度が増加すると、例えば $n_{e\_bar} = 0.9 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ の場合、より内側の $\rho < 0.25$ の範囲において、電子温度勾配の変化フロントの位相が反転していることが分かる。図1上段右側より、この位相反転の範囲は、電子密度がさらに増加すると、さらに広がる事が分かる。昨年度の解析により、この時非常に広い領域( $\rho < 0.65$ )における電子熱流束が既に変化を開始している点から、図1上段に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であることが分かっている。した

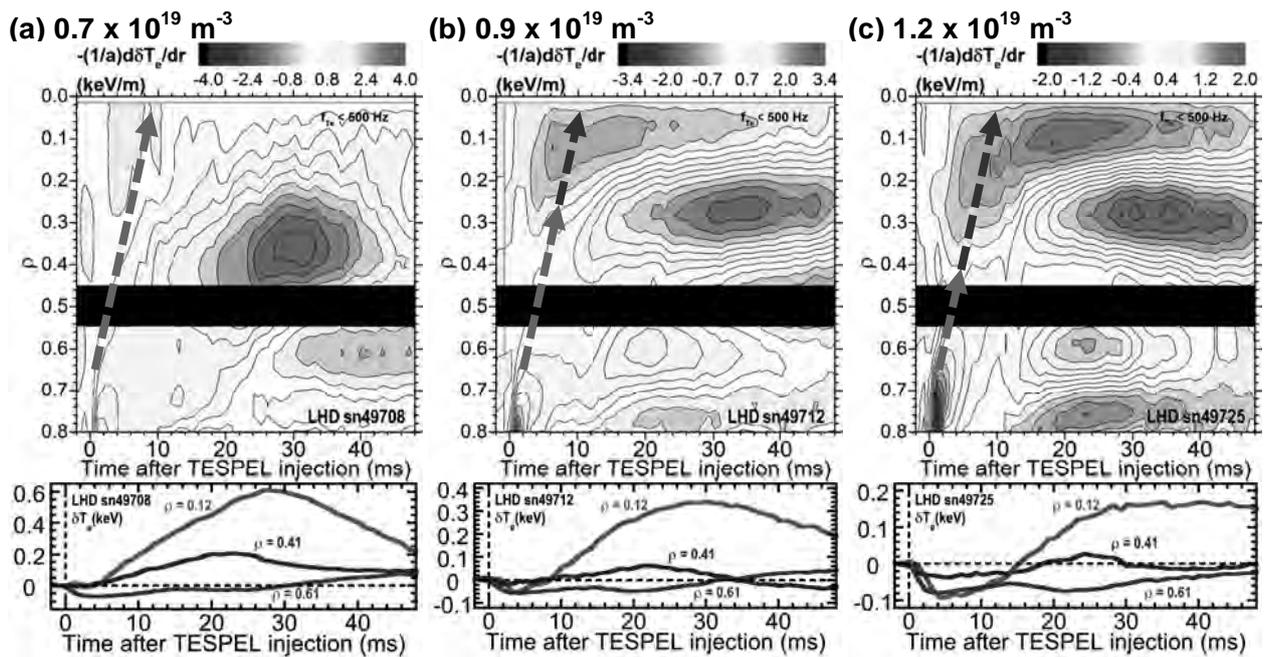


図1. LHD においてトレーサー内蔵固体ペレット (TESPEL) 入射により非局所輸送現象が発現した場合における変動電子温度勾配の時間発展の空間分布 (上段) と各規格化小半径位置における変動電子温度の時間発展。(a)  $n_{e\_bar} = 0.7 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ , (b)  $n_{e\_bar} = 0.9 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ , (c)  $n_{e\_bar} = 1.2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ .

がって、この位相反転の結果は、非局所輸送現象の直接的原因であると考えられている長い相関長を持つ揺動との非局所相互作用が電子温度勾配の変化フロントの伝搬に影響を及ぼしていることを示唆している。

## 今後の予定

磁場閉じ込めトロイダルプラズマ中の電子乱流熱輸送における非局所性について包括的理解を得ることを目的として、本研究で培ってきたデータ解析手法などをヘリカルプラズマのみならず、トカマクプラズマで得られた実験データにも適用する予定である。

## 研究成果報告

ここで示した解析結果を以下の学会で発表した。

N. Tamura, K. Ida, S. Inagaki, T. Tokuzawa, H. Tsuchiya, K. Itoh, K. Tanaka, T. Shimozuma, S. Kubo, Y. Nagayama, S. Sudo, H. Yamada, Y. Takeiri and LHD Experiment Group, “Ballistic Propagation of the Change Front of the Electron Temperature Gradient in the Nonlocal Electron Heat Transport Event on LHD”, 4th Asia Pacific Transport Working Group International Conference, (June 10-13, 2014, 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)、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 の開発とプラズマ実験への適応

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要求される計測には同時に高いレベルの時間分解能と空間分解能が求められる。磁化プラズマにおいて、電子サイクロトロン放射 (ECE) 計測はプラズマを乱さず局所計測ができる有用な計測手法であるが、背景ノイズや機器に由来するノイズが多いのが難点である。近年、ノイズ低減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になりハードウェア的な複雑さが増す割には解析の柔軟性には乏しい。そこで、単一チャンネルで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 を提案している [1]。一昨年度より、応用力学研究所との協力により本計測を大型ヘリカル装置 (LHD) に導入し実データの取得を行っている。昨年度までに ECE を本計測にて測定できることは確認されたが、本来の目的である電子温度揺動は未だ検波されていない。そこで、本年度はプラズマが不安定になりやすい電子温度がより高い領域での実験を行った。

2. デジタルコリレーション ECE の解析手法

近年の電子デバイスの進展に伴う ADC (analog Dijital Converter) を有するデータ収集装置の高速化が目覚ましく、ギガヘルツもしくは数十ギガヘルツの帯域をもつ機器も開発されてきた。プラズマより発する ECE の周波数帯は実験磁場に依存するが、ヘテロダイン検波を行った中間周波数帯 (IF : intermediate frequency) は通常ギガヘルツ帯であるので、直接 IF をデジタイジングすることが可能になった。そこで、IF デジタイジングされたデジタルデータより数値解析的に空間的に分離した電子温度揺動を算出した上で、温度揺動の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 は解析手順を示すブロック図である。従来型マルチチャンネル型ラジオメーターでアナログ的に行われることを図 1 の上段の部分で数値解析的に再現される。この際、 $x(t)$  の時間窓の幅を任意に選択することができるので、電子温度時間発展  $T_e$  の時間分解能を任意に選択

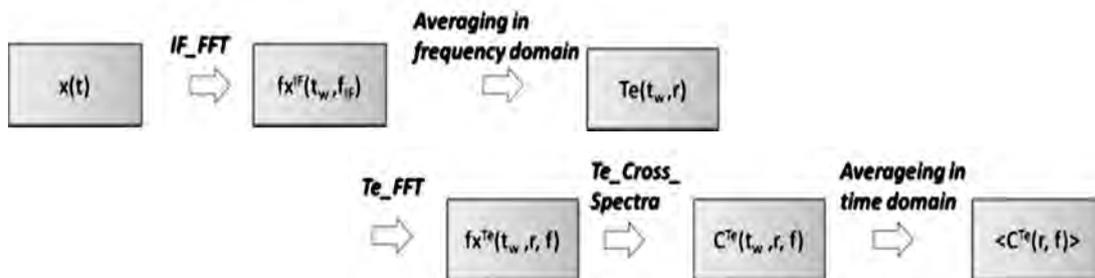


図 1 DCECE 解析ブロックダイアグラム。IF 信号  $x(t)$ , IF のスペクトラム  $fx_{IF}(t_w, f_{IF})$ , 電子温度時間発展  $T_e(t_w, r)$ , 電子温度揺動クロススペクトル  $C^{Te}(t_w, r, f)$ .  $t_w$  は  $x(t)$  を分割した時間窓を示す。

することができる。また、IF 周波数はプラズマ中の磁場強度に依存するため、 $f \times IF$  を周波数領域に任意の数に区切り、その区間のスペクトルをそれぞれ平均すると、ある空間領域の温度とすることができる。周波数領域の区間は任意であるので、従来の計測より空間分解能を挙げることも容易である。電子温度時間発展に変換した後は、地点間の相関をとるなど従来より使われている解析手法が適応できる。このように、IF 信号を取得することで、時間分解能と空間分解能の選択が解析する段階で任意に選べるのが利点である。

### 3. ECE 実データ取得と比較

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 lecrocy 社製, サンプルングレート 10GHz, データ取得時間 51msec）にて取得することができた。ECE 強度は電子温度に比例するため、同装置では最も高い温度領域をもつプラズマを計測対象とした。この条件では、急峻な圧力勾配の為に数キロヘルツの MHD 揺動の発生がしばしば観測されている実験領域である。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。今年度の本計測で初めて、5kHz 程度の優位な電子温度揺動が観測できた。図 2 は従来型 ECE 計測のコヒーレンス空間分布に DCECE の測定結果を重ねたものである。

従来型より空間分解能が 6 倍向上させた状態でも従来型と同様の揺動を観測できていることが分かる。また、従来型と比較して周波数ピークがシャープに計測できた。空間分解能を変化させるとピークの半値幅が変化することが分かった。これは、IF 信号が離散データであることからフーリエ変換を行った時の離散化誤差の影響の影響の為に考えており、適応可能な解析パラメータの検討が必要であることが分かった。

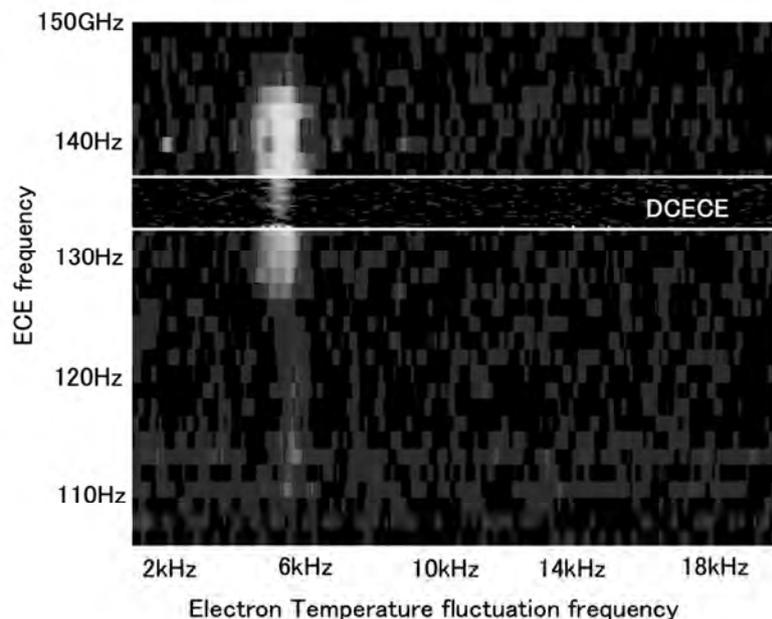


図 2 温度揺動コヒーレンス空間分布.横軸は温度揺動周波数.縦軸は ECE 周波数,高周波側がプラズマ中心側,DCECE は 132.5~137GHz の領域を測定した。

#### 参考文献

- [1] Hayato TSUCHIYA, Sigeru INAGAKI<sup>1,2)</sup>, Tokihiko TOKUZAWA, Naoki TAMURA and Yoshio NAGAYAMA, Plasma and Fusion Research Volume 9, 3402021 (2014)

## 26 特 2-6

### 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。最終年度となる今年度にて、これまで開発してきた手法を整理し、その適用例について総括を行う。

#### 研究集会の開催

2015 年 2 月 27 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、1-2 人の極小規模なグループに別れ個別にデータ解析作業会や PANTA ツアーも行った。

技術論：高速デジタルオシロスコープによる計測結果が多く報告された。特にマイクロ波コム反射計への適用が進展し、これまでよりも格段に多くの空間点における乱流の同時観測が実現した。直線プラズマ実験装置 PANTA における高速カメラ計測もルーティン的に行われるようになった。これにより、1-10GB のデータが取得されるようになり、データハ

ンドリングを高度化する必要が出てきた。現時点ではデータ解析時間ボトルネックであるが、将来的にアルゴリズムの高度化やFPGA(ハードウェア演算)の発展によって解析時間は格段に短縮できる可能性がある。このため将来的にデータ取得装置からデータ解析装置までのデータ転送がボトルネックとなる可能性がある。巨大な生データと解析結果を保存する方法も重要になるだろう。今回の作業会ではデータ解析の高度化のため Fortran や python といったツールを使用した。

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ことができる。

### 1. 新たなデータ解析法

- ・瞬時位相と瞬時振幅の検出(Hilbert 変換)
- ・線形モデルとネットワーク化

### 2. 既存解析法の適用

- ・磁力線可視化法による磁気面ストキャスティック化の観測
- ・バーストイベントの瞬時位相解析
- ・Template 法を用いた電子温度揺動の評価
- ・高速度カメラ計測データの処理
- ・長時間放電を用いた超多アンサンブル平均による S/N 比の向上
- ・eGAM の観測
- ・conditional 法による磁気島内輸送の分岐の観測
- ・電極バイアス実験への波数分解バイスペクトル解析

### 3. 新計測法

- ・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
- ・デジタル相関 ECE の開発
- ・レーザー位相面揺らぎ観測法の開発

議論：今回新たに提案されたレーザー位相面揺らぎ観測法に関して、これまで蓄積された知見から多くの新しいアイデアが提案され議論が行われた。新たなプラズマ中心部の乱流観測法としての期待が高まった。

## 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旨とする。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 Q<sub>r</sub>-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 (3-4eV) のプラズマを生成し、グリッドを通して実験領域に流入させる。一方、装置右端に配置したタングステン電極を 2000°C 以上に加熱することによって低温の熱電子 (約 0.2 eV) を生成し、半径方向位置に対応してこれらの重畳割合を制御することによって、径方向の電子温度勾配を形成する。電子温度のみの空間勾配を制御し、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 (ETG モード) の違いがあるかどうか注目する。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) モードおよびフルート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。

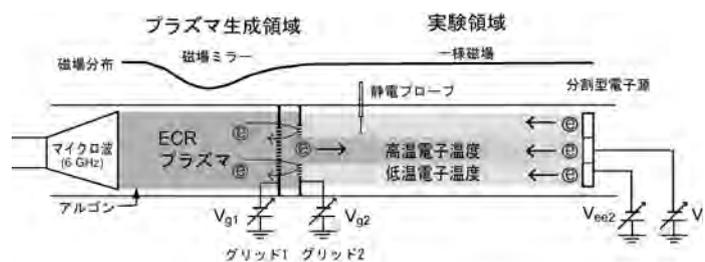


図 1: 電子温度勾配形成実験装置。

### 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 (ドリフト波モード) の二つの揺動が励起され、さらに新たに約 4 kHz の低周波揺動 (フルートモード) が励起されることが観測された。図 2 に ETG によって励起された ETG モード及びフルートモードの (a)  $\tilde{I}_{es} / \bar{I}_{es}$  と (b) バイコヒーレン

ス  $\hat{b}^2$  の電子温度勾配 ( $\nabla T_e$ ) 依存性を示す [ $\nabla T_e = (T_e(r = -0.5 \text{ cm}) - T_e(r = -1.5 \text{ cm})) / 1 \text{ cm}$ ].

これまでの成果から、 $\nabla T_e$  が 1.2 eV/cm を超えると ETG モードからのエネルギー移送によってドリフト波モードが励起されることが分かっているが、さらに ETG を強くすると、ドリフト波モードは  $\nabla T_e$  が 1.6 eV/cm を超えると次第に飽和していくことが分かった。このとき、フルートモードの揺動強度が次第に増大しており、さらにドリフト波モードとフルートモードとのバイコヒーレンスが  $\nabla T_e \sim 1.6 \text{ eV/cm}$  以上で大きくなっていることが明らかとなった。

これらの結果から、ETG のエネルギーははじめに高周波揺動である ETG モードを励起するが、非線形結合によって一度ドリフト波モードに移送され、さらにドリフト波モードとフルートモードとの非線形結合によって、フルートモードへエネルギーが移送されることが分かった。

今後は、これらの高周波揺動と低周波揺動間のエネルギー移送の詳細を、過渡応答実験を行うことによって明らかにしていく予定である。

#### 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 (九州大学), 伊藤 公孝, 小林 達哉 (核融合研)

#### 5. 研究成果報告

- 1) [招待講演] 金子俊郎, “電子温度勾配乱流の非線形過程”, Plasma Conference 2014, 朱鷺メッセ (新潟県新潟市), 2014 年 11 月 18~21 日.
- 2) 小木曾舜, 加藤雄人, 下山学, 文贊鎬, 金子俊郎, 平原聖文, “直線型磁化プラズマ装置を用いたプラズマ波動・粒子相互作用の直接観測実験”, 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, パシフィック横浜会議センター (神奈川県横浜市), 2014 年 4 月 28~5.2.
- 3) 小木曾舜, 加藤雄人, 下山学, 平原聖文, 文贊鎬, 金子俊郎, 小嶋浩嗣, “実験室プラズマにおける波動・粒子相互作用の直接観測実験”, 第 136 回地球電磁気・地球惑星圏学会総会・講演会, キッセイ文化ホール (長野県松本市), 2014 年 10 月 31 日~11 月 3 日.
- 4) 加藤雄人, 金子俊郎, 文贊鎬, 平原聖文, 下山学, 小木曾舜, “Direct measurements of wave-particle interactions in the evolution of the drift wave instability: Application of space plasma instrumentation Wave-Particle Interaction Analyzer”, Plasma Conference 2014, 朱鷺メッセ (新潟県新潟市), 2014 年 11 月 18~21 日.

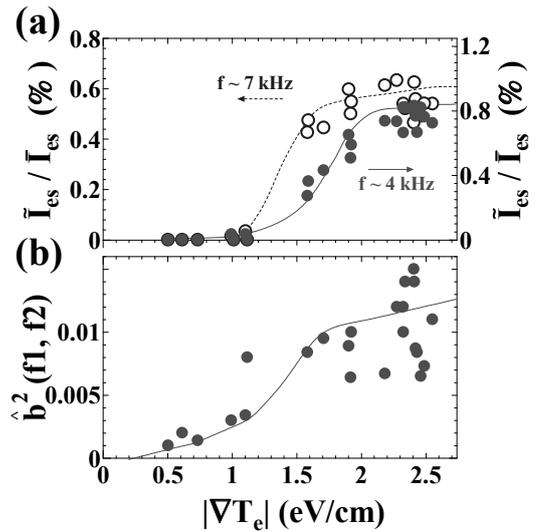


図2: ドリフト波モード及びフルートモードにおける (a) 規格化振幅強度と (b) バイコヒーレンスの  $\nabla T_e$  依存性.

## 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 大館暁

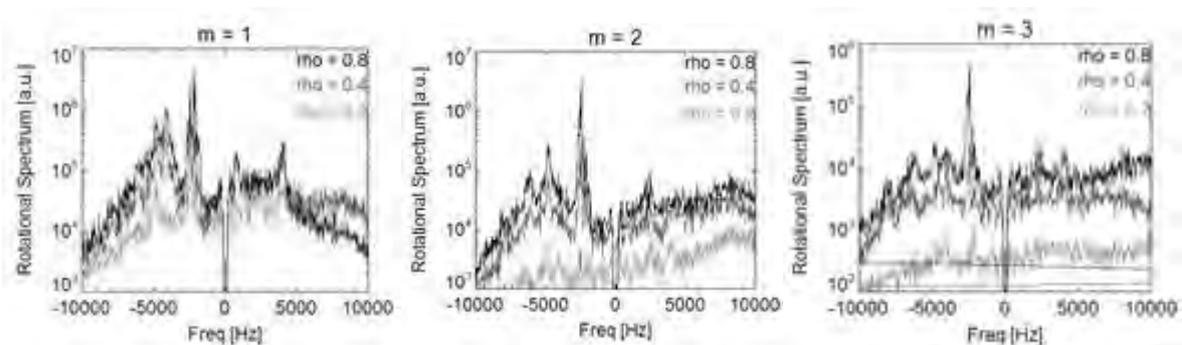
## 目的

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 日に行った実験の解析結果を主に報告する。

## 実験結果

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。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。

2 次元揺動データを理解するために、イメージのモード解析を行った。イメージは十分な回転対称性があることから、方位角方向にはモード数 4 までのフーリエ分解、径方向には 10 次までのベッセル関数による展開を行い良好結果を得た。展開後、回転の位相、揺動強度の径方向分布から回転スペクトルを求めた (図 1)。2 ~ 3 KHz にピークを持つ支配的な揺動が見える、イオン反磁性ドリフト方向への回転を示している。これは静電プローブを使ったデータ解析でも同様の特徴を示しており、高速度カメラデータの計測が密度揺動計測として十分機能していることを示唆している。図 3 に画像データの時間変化を示す。m=1 の回転が顕著に見える。大部分の時間は準定常的に回転しているが、時々停滞あるいは、飛躍していることがわかる(たとえば t = 200.12ms)。所々で定速の回転がディスタープされていることがわかる。この時、プラズマのコア部に周辺部とは、接続していない高い径方向モードを持った揺動パターンが観測されていることがわかった。



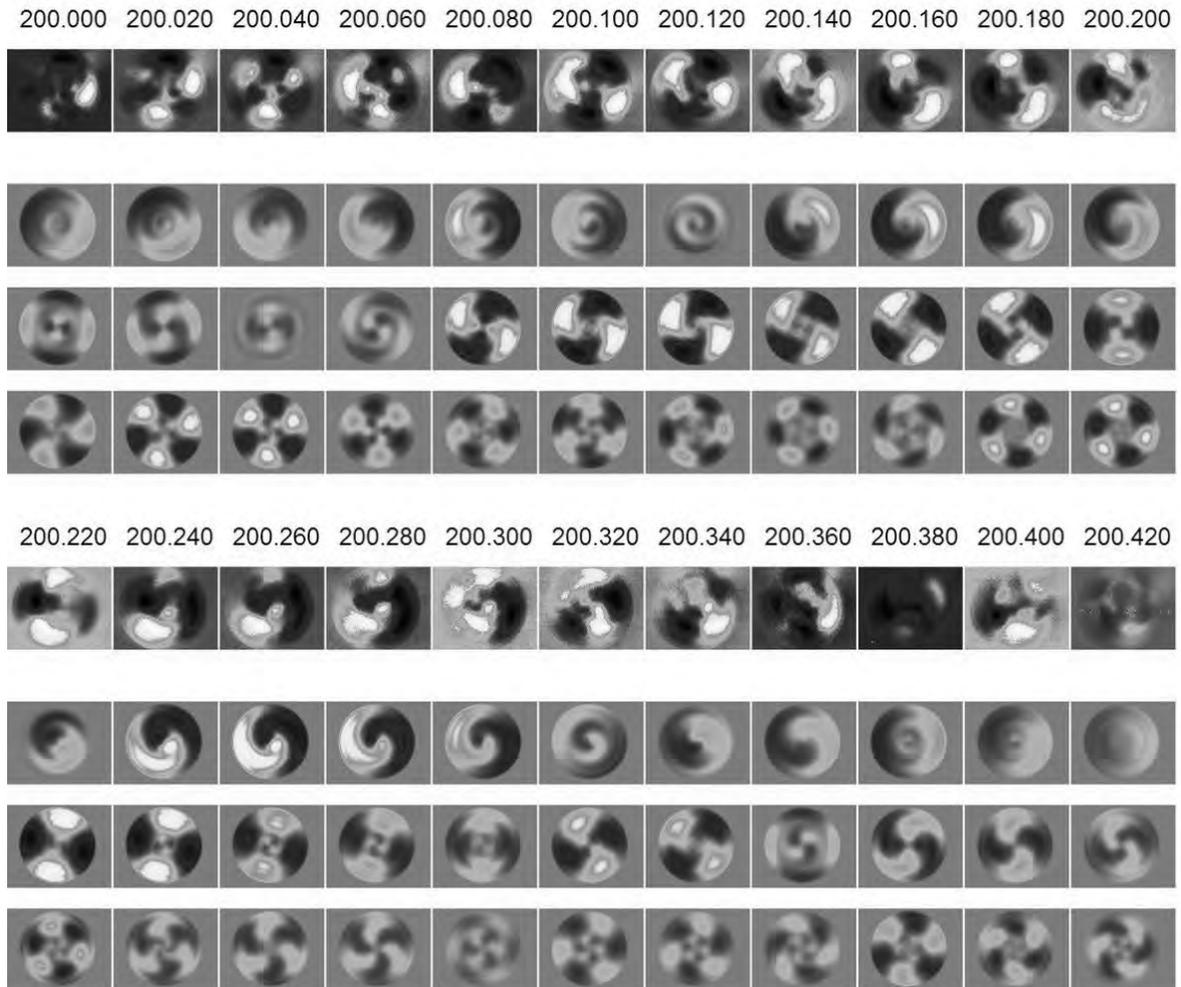


図2 揺動データの時間変化 最上段に全揺動成分、2～4段目に  $m=1, 2, 3$  の成分をそれぞれ示す。

### 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直接的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。観測されているプラズマ揺動のダイナミク的な挙動と、静電プローブ測定を通じて明らかになっている揺動の統計的性質がどのように結びついていくかについてさらに考察を行っていきたい。

### 今年度の発表

S. Ohdachi, et. al., “A study of the fluctuations observed in the PANTA device using imaging diagnostics”, Plasma Conference, Niigata, 2014. Nov

## 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，定評のある並列化 FFT ライブラリ **FFTW** 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，**FFTW** による処理を行い，並列処理の評価を行った．
3. **PANTA** 実験装置の測定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および最適化の検討を行った．

**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

### 1. 背景と目的

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プラズマの乱流研究において強力なツールである。九州大学が有する直線型装置 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し、トーラス装置で適用可能な乱流研究用プローブと、データの解析手法についても検討を進めてきた。

解析信号  $Z(t)$  は元信号  $x(t)$  のヒルベルト変換によって得ることが可能であり、複素関数  $Z(t) = r(t) \cdot \exp(i\theta(t))$  とあらわすことができる。 $r(t)$ ,  $\theta(t)$  はある時間での強度、位相であり瞬時振幅・瞬時位相とそれぞれ呼ばれる。この実部が実信号に相当する。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。瞬時振幅に関しては揺動の振幅の時間変化を評価する際に一般によく使われており、例えば、帯状流の広帯域乱流への影響を評価する際などに広く活用された。解析信号によって表現することで、特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、直観的にその特徴を把握することができる。

本研究では、これまで解析信号を活用したプラズマ計測・揺動解析法を開発してきた。特に、新しく瞬時位相の差である瞬時位相差という考え方を導入し、2 信号の位相差の時間変化を高時間分解能で評価する手法を考案した。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、 $Z_1^*(t) \cdot Z_2(t) = |Z_1^*(t)| \cdot |Z_2(t)| \exp(i\phi(t))$  であり、ここで  $\phi(t) = \theta_2(t) - \theta_1(t)$  が両信号の位相差、つまり瞬時位相差を評価することができる。この位相差を評価することで、例えば揺動の振幅 1 周期以内に変動する時間的な位相変化についても検出が可能となる。本手法を多チャンネルの BES 計測器と組み合わせることで、MHD 不安定性の二次元構造の可視化に成功している。さらに、位相差を評価する解析手法や計測器、例えば多チャンネルで計測した信号や、干渉計や反射計などへ適用することが可能である。

本報告においては、干渉計測に対して本手法を適用し、高分解能化に成功した例について報告する。

### 2. 解析信号法の干渉計測器への適用

ヘリオトロン J 装置の従来のマイクロ波干渉計システムにおいては、ショットキーバリアダイオード(SBD)によって検出される信号光 (Probe Beam) 信号と参照光 (Reference Beam) 信号を位相検波器に入力し、出力される位相差信号に相当する変換係数を乗ずることで線平均密度を求めていた (Fig. 1 (a))。ここで信号/参照光の中間周波数 (IF) 1 MHz である。その時間および信号の分解能は位相検波器および ADC の性能で決まり、本システムの場合は 25 kS/s であった。

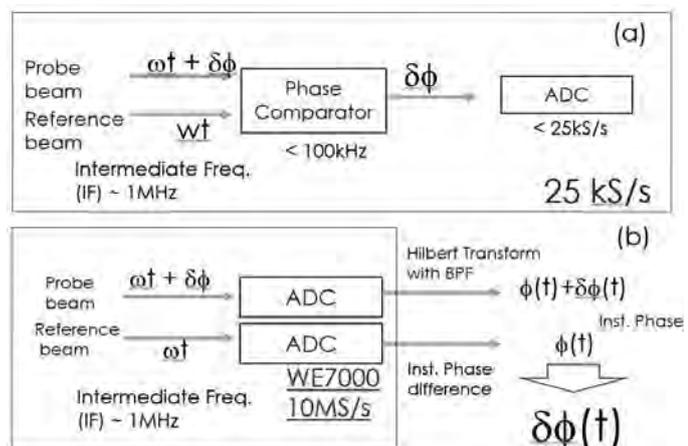


図 1 (a)ヘリオトロン J 装置の従来の干渉計システムと (b) 瞬時位相評価による干渉計システムの構成。

そこで、本研究では信号/参照光を 10 MS/s の ADC にて直接記録し、解析信号法によって瞬時位相を求め、両者の位相差から密度を計測することを試みた。システムとしては、位相検波器を排除し、直接 ADC にて SBD 信号を記録するというシンプルな構成となる (図 1 (b))。

実際に、本システムによって計測した例を図 2 に示す。実験は、ECH モジュレーション加熱を適用したプラズマにおいて行った。ECH のモジュレーション周波数は 0.5 kHz である。従来の干渉計システムと瞬時位相評価法による干渉計システムとの比較を図 2(b) と (c) に示す。従来の干渉計では密度への応答は位相計の分解能以下となりほとんど観測できなかったが、瞬時位相によって評価した場合、明確にモジュレーションと同期した応答を確認できた。応答した密度の程度としてはおよそ 2% 程度である。また、図 2(d) に示すように、磁気信号においては、モジュレーションと同期した揺動の増減が確認される。線平均密度の信号においても、磁気信号と比較すると明瞭ではないものの同期した信号が観測された。

更に、干渉計信号と磁気信号のスペクトルの比較を図 3 に示す。磁気プローブ信号だけでなく、干渉計信号においてもモジュレーションと同期した揺動の応答が明確に確認できる。今後、モジュレーション時の分布勾配-揺動の関係などを議論することが可能になると考えられる。

### 3. まとめと今後の課題

本研究によって、従来の干渉計システムの若干の変更と解析信号を用いた解析によって、揺動計測可能な干渉計システムへの高性能化が可能であることを示した。今後、更に反射計への適用など含め、幅広い応用の可能性を検討する。

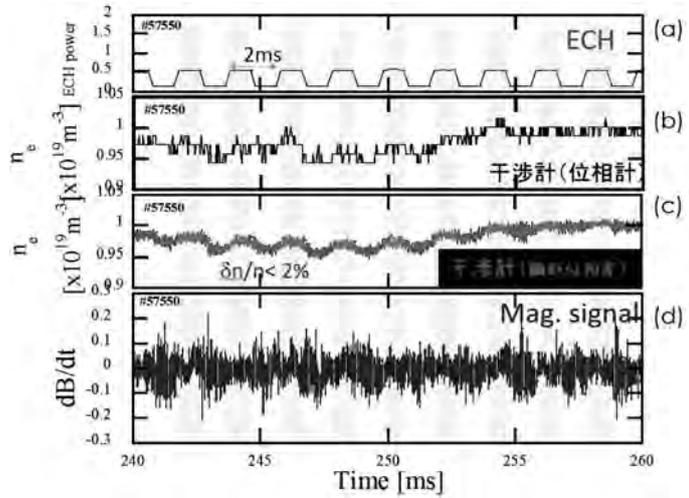


図 2 (a)ECH 加熱パワー、(b)従来の干渉計システムによって計測された線平均密度、(c)瞬時位相評価による干渉計システムによって計測された線平均密度、(d)磁気プローブ信号。

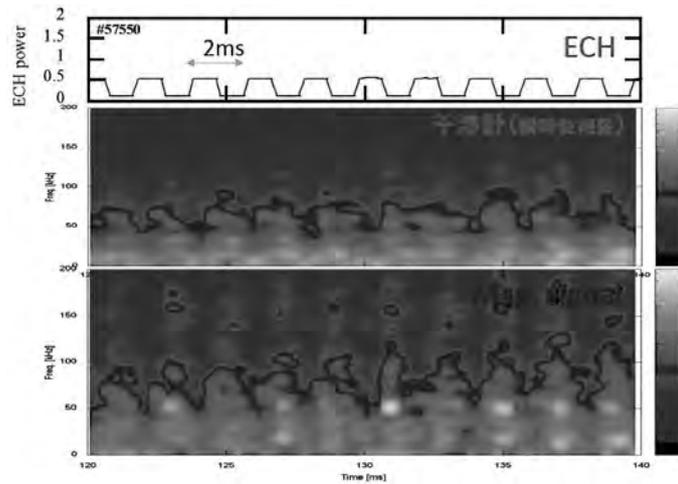


図 3(a) ECH 加熱パワー、(b) 瞬時位相評価による干渉計システム計測された線平均密度、および (c) 磁気プローブ信号のスペクトログラム。

## 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

プラズマ乱流中のメゾスケール構造（ストリーマーやゾーナルフロー）は径方向輸送に大きな影響を与えるため、近年トロイダルプラズマや直線プラズマで広く研究されている。直線プラズマは低温度で近接性に優れ、乱流やメゾスケール構造の計測に有意である。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とその媒介波が世界で初めて発見された[1][2]。また、PANTA 装置のエンドプレートに正電圧バイアスをかける実験では、ストリーマー構造から孤立波状態への遷移が観測され、エンドプレートバイアスによってストリーマーの制御が可能であることが確認された[3]。本研究では引き続き PANTA のストリーマー構造に対するエンドプレート実験を継続し、バイアス中の二次元フーリエスペクトルの変化や非線形結合（バイコヒーレンス）の変化を調べることでストリーマー構造の変化を観測し、ストリーマーの制御や発生機構の解明など更なる研究の進展を目指す。

## ・実験方法

直線プラズマ実験装置 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の構造や、二次元スペクトル、バイコヒーレンス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 RF 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た。軸方向の磁場には 0.09 T を選び、内部に封入したアルゴンの圧力を 0.8 mTorr に調整することで、ドリフト波乱流がストリーマー構造を形成した。中心部の密度は  $10^{19}$  m<sup>-3</sup> 程度、電子温度は  $3 \pm 0.5$  eV のおおよそ平坦な分布である。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二次元フーリエスペクトルを観測した。また、軸方向  $z = 1.625$  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、そこに最大で 50 V までの電圧を印加した。

## ・実験結果

PANTA にストリーマー構造が発生している状態（磁場 0.09 T、圧力 0.8 mTorr）でエンドプレートバイアス実験を行ったところ、印加電圧に応じてバイアス電流が流れ、電圧に対して線形に応答したが（10 V に対して 3 A 程度）、バイアス電圧が 20 V 以上になるとバイアス電流が 6 A 程度で飽和した。ところがバイアス電圧を 50 V まで上げたところ、突然バイアス電流が 8 A まで流れる状態に遷移するようになり、6 A の低電流モードと 8 A の高電流モードの 2 つの状態を頻繁に行き来するようになった。以降は、元のストリーマー状態を S モード、低電流状態を B1 モード、高電流状態を B2 モードと呼ぶことにする。

バイアス中、バイアス電極より内側 ( $r < 25$  mm) の径では電子密度が上昇し、外側 ( $r > 25$  mm) では電子密度が減少し、電子密度の径方向分布はバイアス前よりピーキングした形となった。また、B2 モードでは B1 モードに比べてよりピーキングが強くなった。電子密度揺動に関しては、全ての径で揺動の絶対レベルは減少し、特に B2 モードでは減少が顕著であった。ただし、外側の径では電子密度の平均値も減少しているため、相対揺動レベルはバイアス中でも変わらないか、むしろ上昇した。以上のことから、バイアス実験を行うことで電子密度分布はピーキングし、プラズマの乱流揺動が抑制されることが分かり、プラズマ乱流の制御に効果的であることが分かった。

次に、バイアス実験によるストリーマー構造の変化を時空間構造、二次元スペクトル、バイコヒーレンスの変化を観測することで調査した。図 1(a)はストリーマー状態時の電子密度揺動の時空間構造である。右上方向に伝播する数 kHz の伝送波が包絡線構造を形成し、包絡線構造自体は右下方向に 2 kHz 程度で伝播していることが分かる。図 1(b)は B1 モード、(c)は B2 モードの時空間構造である。徐々に包絡線構造が失われ、右下方向に伝播する 2 kHz 程度の孤立波状態に移していることが分かる。図 1(d)(e)(f)はそれぞれストリーマー、B1 モード、B2 モードの密度揺動の二次元スペクトルである。正の周波数を持つ波が先の伝送波、モード数 1/周波数 -2 kHz 程度の波が媒介波（包絡線構造と同じ構造）である。バイアス中は B1 モード、B2 モードと変化するにつれて伝送波成分が減少し、媒介波が強くなった。また、媒介波の高調波成分が多く生じるようになり、時空間構造が孤立波状態に変化したことと一致した。また、オートバイコヒーレンスを計算すると、B1 モード、B2 モードと変化するにつれて伝送波が関わる非線形結合が減少し、媒介波の自己結合が増加することが分かった。

以上のことからストリーマー状態にエンドプレートバイアスをかけることでストリーマー構造が破壊され、媒介波を基本波とした孤立波構造に移ることが分かった。この結果は、装置外部から容易にストリーマーの制御が行える可能性を示し、非常に重要である。今後は二次元バイコヒーレンスや、径方向構造の変化なども調査していく予定である。

## 参考文献

- [1] T. Yamada *et al.*, Nature Phys. **4**, 721 (2008).
- [2] T. Yamada *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **78**, 123501 (2007).
- [3] T. Yamada *et al.*, Nucl. Fusion **54**, 114010 (2014).

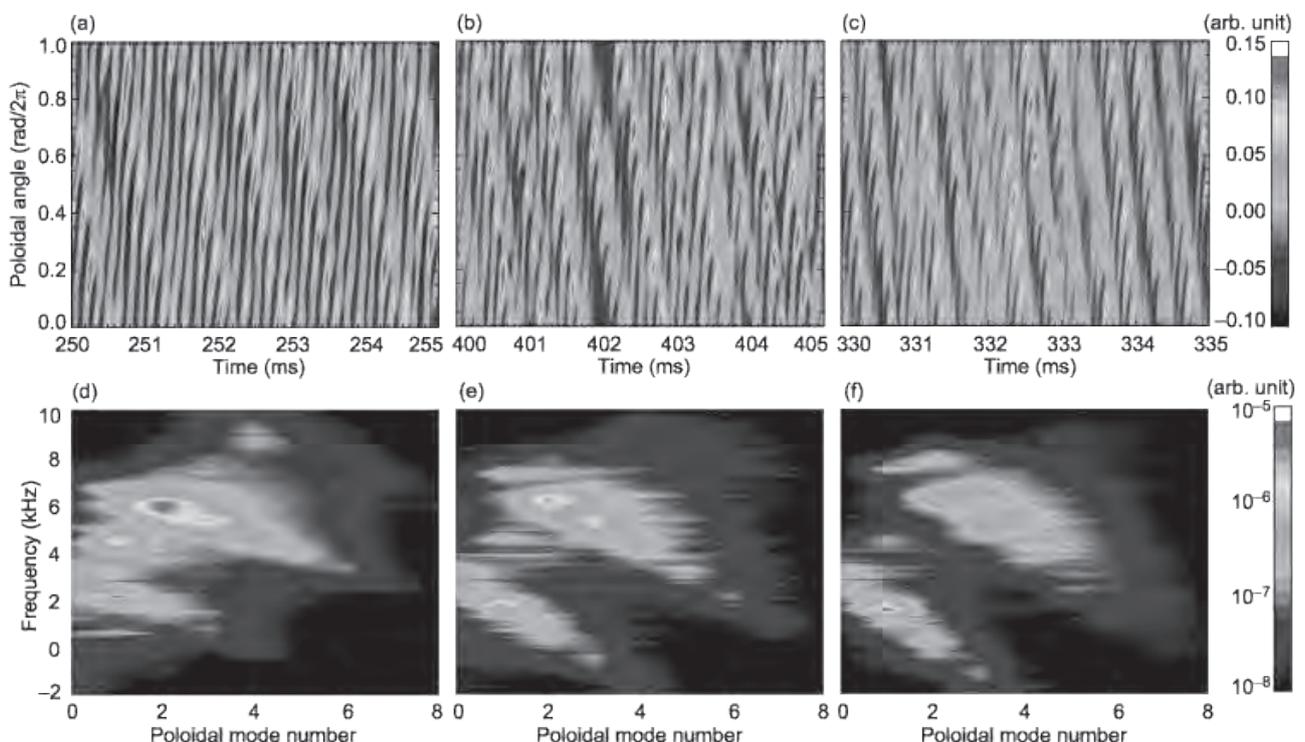


図 1. (a)ストリーマー状態、(b)B1 モード、(c)B2 モードにおける電子密度揺動の時空間構造。(d)ストリーマー状態、(e)B1 モード、(f)B2 モードにおける電子密度揺動の二次元スペクトル。時空間構造で右上に伝播する波が二次元スペクトルでは正の周波数を持つ。モード数 1 で負の周波数を持つ波がストリーマー構造の媒介波であり、バイアス中は高調波が生じている。

## 「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(EGAM)発生時にバルクイオンのエネルギー Spektrum が変化する現象の物理機構の解明のために、EGAM のポロイダル 2 次元空間構造を直接的に計測する手法の開発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。しかし、なぜ高速イオンによって共鳴励起された EGAM がさらにエネルギーの低いバルクプラズマと共鳴条件を満たすのかは明らかではない。そのモデルとしてポロイダル断面上の非対称性の存在が共同研究者 (佐々木) により提案されており、HIBP を用いてその検証を試みた。

HIBP ではビームの入射角を掃引することにより、1次元分布を測定することが出来るが、さらにビームエネルギーを変えることにより計測位置を 2次元に掃引することが出来る。ただし、ビームエネルギーを変更すると、それに応じてビームラインの制御パラメータの変更と調整を行う必要があり、従来はその作業に 30 分程度の時間を要するため、実際の実験時にビームエネルギーを変更することは困難であった。そこで、ビームラインパラメータの自動変更、調整システムを構築した。これにより放電シーケンス間(約 3 分間)にエネルギー変更して測定することが出来るようになった。

これを用いて 9 通りのビームエネルギープラズマ断面を掃引した。すべてのビームエネルギーでデータの取得には成功したが、信号／ノイズ比 (S/N 比) が低く、現時点では、電位揺動の 2 次元非対称性を検証するまでには至っていない。

S/N 比改善の手法としては、イオン種を変えることが考えられる。遠隔操作によるイオン種変更機構は本年度完成したため、来年度以降の実験において、引き続き 2 次元構造の検証実験を行う予定である。

・ 研究成果報告

1. 井戸 毅、長壁正樹、清水昭博、西浦正樹、渡利徹夫、小川国大、伊藤公孝、LHD 実験グループ、「LHD における高速イオン励起 GAM の同定」

第 10 回核融合エネルギー連合講演会(筑波, 2014 年 6 月 19 日-20 日)

ポスター発表

2. 井戸 毅、長壁正樹、清水昭博、西浦正樹、渡利徹夫、小川国大、伊藤公孝、LHD 実験グループ

「LHD における高速イオン励起 GAM の特性」

Plasma Conference 2014 (新潟, 2014 年 11 月 18 日-21 日)

・ 研究組織

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

## 26 特 2-13

レーザー光波面の乱れを利用したプラズマの乱流計測手法とデータ処理方法の開発

核融合科学研究所・ヘリカル研究部 秋山毅志

### 目的

プラズマの閉じ込め性能を向上させるためには、乱流の物理機構を理解することが重要である。その計測は様々な手法があるが、本研究ではレーザー光の波面の乱れからプラズマ乱流の情報を引き出す手法を提案し、実証することを目的とする。本手法は非接触で、かつ干渉や変調などの作用を用いずに、直接的に乱流を計測できる特徴がある。

### 実験方法

地上に設置した天体観測用望遠鏡では、像の瞬きやボケが問題となる。これは、大気温度揺らぎによって観測対象からの光の波面が乱されるためである。そこで、すばる望遠鏡を始めとする大型望遠鏡では、「補償光学」を追加して解像度を高めている。補償光学とは、波面の乱れを測定するセンサと可変形鏡、そして帰還制御のための計算機から成る。波面センサは入射光の波面の乱れを測定し、その信号を元に可変形鏡がミラー形状を変形させて波面の乱れを補正し、像のボケを大幅に改善している。

本研究では、図1のようにプラズマ中にレーザー光を入射し、上記の大気揺らぎをプラズマ中の乱流や不安定性に置き換え、乱流によって乱された波面を波面センサで測定しようという試みである。本手法をプラズマ計測に応用するのは初の試みであり、そのため第一ステップとして波面センサは市販のものを利用する。現在、CMOSカメラの前面にマイクロレンズアレイを配置した、シャックハルトマン型波面センサを利用する予定である。シャックハルトマン型波面センサに平面波が垂直に入射した場合は、マイクロレンズアレイによってCMOS上に集光点が等間隔の格子状にできるのに対し、波面が傾いたり乱れたりした場合は、集光点が不規則に点在することになる。

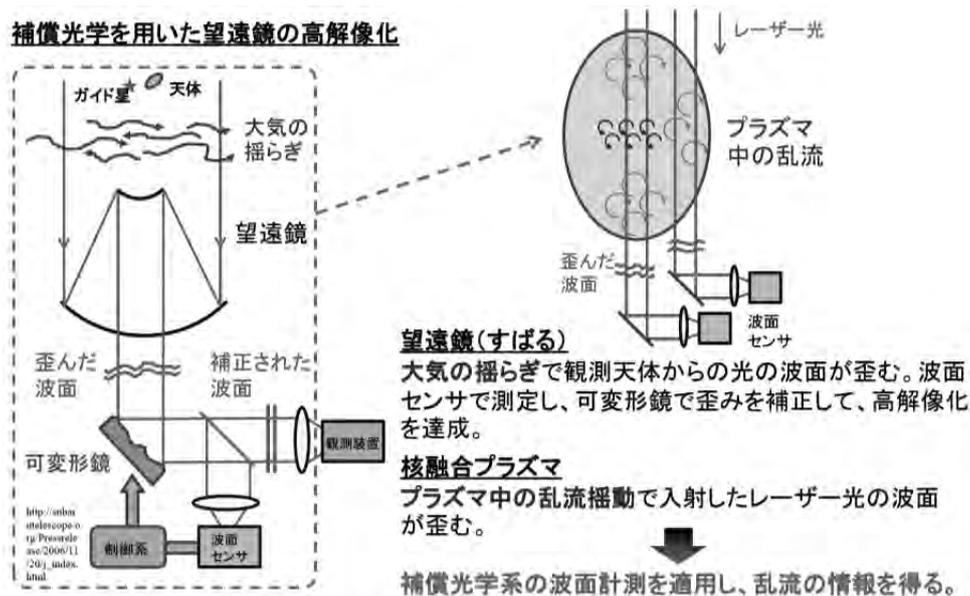


図1:波面乱れを利用したプラズマ乱流計測の概念図

その集光点の変位から、波面の情報を得ることができる。現在市販されているシャックハルトマン型波面センサは、フレームレートが 880 Hz であるため、単独では高周波の揺動計測を行うことは難しい。そのため、イベントトリガとして他の計測データを利用し、条件付き平均などを用いることにより、時間分解能を補うことが必要である。

光源レーザーには、波長 1.064  $\mu\text{m}$  の Nd:YAG レーザーを用いる。乱流による位相変化(=波面の乱れ)の大きさの観点では、赤外領域などより長波長の方が位相量が大きく好ましいが、現在入手可能な波面センサの帯域は可視～近赤外であることから、本波長のレーザーを選定した。利用する Crysta Laser の半導体励起の連続発振レーザーは、縦横シングルモードの発振で、干渉計にも使える周波数安定性(=位相の安定性)を持ち、波面測定には適したレーザーである。

現状で構成できる波面計測は、乱流の信号を得るためには計測系や分解能等の面で工夫が必要であるため、その原理検証には大きな乱流や不安定性を誘起でき、またそれらの特性が他の計測器で測定できることが望ましい。その点、PANTA 装置はそれらの条件に適しており、図 2 に示す配置で初期計測を行う。まずは、PANTA 装置の多くの計測視線と同様に、直線プラズマに対して垂直に観測を行うため、磁場コイル間に上記のレーザー及びミラー、レンズ系を配置する。対向する真空容器窓の外に波面センサを配置し、乱れた波面の計測を行う。

以上の原理検証実験を、平成 27 年 3 月に実施する予定である。その際、有意な大きさの波面乱れが計測できない場合は、対向位置の波面センサをミラーに置き換え、複数回レーザー光を往復させて光路長を稼ぐか、エンド部からプラズマ生成部に向かってレーザー光を入射し、プラズマの軸に沿った長い視線での計測に変更することを検討している。また、本計測はレーザー光軸に沿った乱流の線積分値であるため、局所的な情報を得ることは単一視線では不可能である。そこで、交差する 2 視線を用意し、両者の積分値の相関を取ることで、交差部分の局所情報を試みる。

## 研究組織

研究代表者: 秋山毅志(核融合研)

研究協力者: 居田克巳(核融合研)、稲垣滋(応力研)

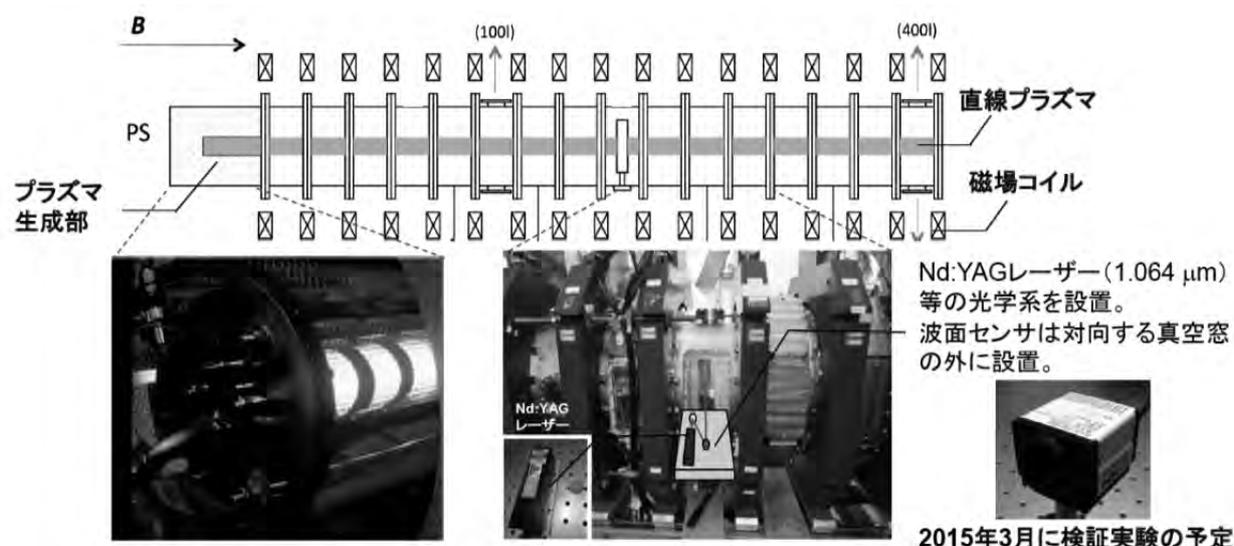


図 2: PANTA 装置での波面乱れ計測の原理検証実験の配置図

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。雲レーダやライダー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) で発表され、学術雑誌に 2 編の研究論文として発表された。心電図解析で用いられるテンプレート法を用いたプラズマ揺動解析、また高速ミリ波切替器による高性能フィルタの開発など、実験手法、解析手法ともに分野を横断した議論、適用が行われた。



## 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

京都大学生存圏研究所 山本真之

### 1. 研究目的

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貢献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リーバルにおいて、鉛直流はリリーバルされた雲微物理量の不確定性を生む大きな要因である。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、査読付き論文として公表した (Gan et al., 2014)。

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・鉛直分解能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するとともに、降水粒子の影響を極力小さくすることで高精度の鉛直流計測データを得る手法は確立していない。そのため、計算機実験と 50MHz 帯 WPR による観測データを用いることで、降水領域内において鉛直流を高精度で推定できる手法を開発した。乱流エコーを検出するドップラー速度範囲に制約を加えて鉛直流を推定することで、鉛直流計測における降水粒子の影響を極小化できることを示した。さらに、ドップラー速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、これらの計測精度が向上できることを示した。開発成果を学会で発表するとともに、査読付き学術雑誌に投稿した。

#### 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 (RIM) 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 (30-50m) 計測を可能とする。RIM 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できる、有用な手段である。高速サンプリングと低コストを両立するデジタル受信機を開発し、1.3GHz 帯 WPR にオーバーサンプル (OS) 付き RIM 機能 (RIM-OS) 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。RIM-OS 機能付き 1.3GHz 帯 WPR で得られた大気境界層内のサーマル等の観測成果を、学会で発表した。

## 2.3 WPR 用デジタル受信機の開発

1.3GHz 帯 WPR 用に開発したデジタル受信機の汎用化を進めることで、50MHz 帯 WPR に OS 付き RIM 機能を付加することに成功した。開発成果を学会で発表した。さらに、OS 付き RIM 機能を付加した 50MHz 帯 WPR・1.3GHz 帯 WPR・CPR 等の同時観測を 2014 年に実施した。現在、観測データの解析を進めている。

## 3. 今後の展開

50MHz 帯 WPR・1.3GHz 帯 WPR・CPR 等の同時観測で得られた高分解能の風速・大気乱流・雲の計測データの解析を通じ、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精度向上と地上検証計画の立案に寄与していく。WPR の計測精度劣化の要因となる地面等からの不要信号(クラッタ)のアダプティブな抑圧に必要となる、デジタル受信機が多チャンネル化を実現する。これらの今後の開発成果を通じ、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貢献していく。

## 4. 論文及び学会発表

### 論文

- 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.*, 49(12), 1214-1231, doi:10.1002/2013RS005369, 2014.
- 山本真之, マルチリモートセンサーによる雲の微細構造の解明, 低温科学第 72 巻“雲とエアロゾルをつなぐ観測とモデリング”(藤吉康志編・北海道大学低温科学研究所発行), 195-205, 2014.

### 学会発表

- Yamamoto, M. K., T. Gan, M. Yabuki, H. Hashiguchi, H. Okamoto, T. Nakajo, and M. Yamamoto, Vertical wind measurement in the boundary layer by 1.3-GHz range-imaging wind profiler radar, *EarthCARE Workshop 2014*, Tokyo, Japan, 17-19 September, 2014.
- Gan, T., M. K. Yamamoto, H. Okamoto, H. Hashiguchi, and M. Yamamoto, Development of a signal processing method for vertical wind velocity measurement by wind profiler radars, *EarthCARE Workshop 2014*, Tokyo, Japan, 17-19 September, 2014.
- Yamamoto, M. K., T. Gan, H. Okamoto, H. Hashiguchi, and M. Yamamoto, Validation of EarthCARE product using vertical wind measurement by wind profiler radars, *EarthCARE Workshop 2014*, Tokyo, Japan, 17-19 September, 2014.
- 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, *14th International Workshop on Technical and Scientific Aspects of MST Radar (MST14)*, São Jose dos Campos, Brazil, 25-31 May 2014.
- Yamamoto, M. K., T. Gan, T. Fujita, Noor Hafizah Binti Abdul Aziz, H. Hashiguchi, T. Nakajo, H. Okamoto, T.-Y. Yu, and M. Yamamoto, Development of a range-imaging boundary layer radar with oversampling capability, *14th International Workshop on Technical and Scientific Aspects of MST Radar (MST14)*, São Jose dos Campos, Brazil, 25-31 May 2014.
- Gan, T., M. K. Yamamoto, H. Okamoto, H. Hashiguchi, and M. Yamamoto, Development of a method for estimating vertical wind velocity in precipitation using VHF atmospheric radars, *日本気象学会 2014 年度秋季大会*, C305, 福岡県福岡市, 2014 年 10 月.
- 山本真之, GAN Tong, 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 2014 年度秋季大会*, P145, 福岡県福岡市, 2014 年 10 月.
- Gan, T., M. K. Yamamoto, H. Hashiguchi, H. Okamoto, and M. Yamamoto, Measurement of vertical wind in precipitation by the MU radar: A case study, *第 8 回 MU レーダー・赤道大気レーダーシンポジウム(第 260 回 生存圏シンポジウム)*, 京都府宇治市, 2014 年 9 月.

## 1. はじめに

マイクロ波イメージングは、プラズマ中の揺動現象の時間空間的振舞いと閉じ込めへの影響を研究する有力な手段として注目されているが、各種プロセスの内部構造可視化（非破壊検査）、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  $15.5 \pm 0.8$  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。平成 26 年度は、研究分担者の一人（近木）により、画像処理ソフトの改良、および空間分解 10 cm とリアルタイム処理の実現を目指した研究が進められている。

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（2 GHz 以下）、十分な空間分解を実現することが困難という問題がある。代表者等は、この問題を克服するため、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、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。

マイクロ波変調レーザ SAR は、光無線融合を利用した計測開発ということが出来る。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) 合成開口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ck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

平成 26 年度、送受信光学系として、フィールド試験にも対応できるよう、光軸調整が容易で雑音・振動にも強いモノスタティック方式を製作した。マイクロ波変調レーザ出力は、増幅されたのち光ファイバー、サーキュレータを経由してファイバーコリメータに入力され放射される、物体からの反射光は、同じファイバーコリメータに入力され、光ファイバーに入り光受信器でマイクロ波信号に変換される。

レーザレーダの原理再検証の一環として、チャープマイクロ波を発生する電圧制御発振器の変調信号として、任意波形発生器を使用し変調周波数の線形性を改良させた。周波数掃引形（FM-CW）レーダでは、反射波と参照波をミキサに入力することにより得られる中間周波数出力は、反射波までの距離に比例することが知られているが、本レーザレーダにおいても図 1 に示すように同一な結果が得られた。周波数掃引幅 5 GHz、掃引時間 0.1 ms である。線形性の改良により、距離分解  $\sim 1$  cm が実現している。

合成開口イメージングの実現のためには、高精度チャープマイクロ波発生装置、およびレーザ出力を二次元掃引する駆動光学系が不可欠である。平成 19～24 年度開発製作したマイクロ波 SAR では掃引周波数幅 2 GHz をもつ高精度チャープマイクロ波発生装置を製作した。本研究では掃引周波数 18 GHz が必要であるため、予算上の課題もあり、ベクトルネットワークアナライザ（VNWA）を適用することにした。VNWA の周波数領域は 1 MHz～30 GHz、掃引速度は 0.2 ms/point である。また、微弱光信号の増幅のため、低出力光増幅器を使用し、中出力増幅器との間にバンド幅 1 nm をもつ波長可変フィルタを挿入して SN 比の改善を図った。現在のシステム構成を図 2 に示した。

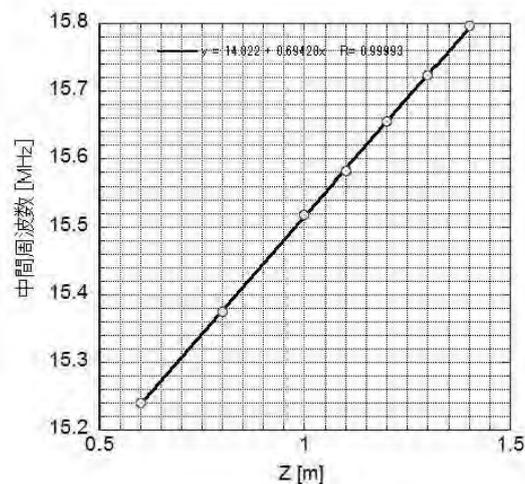


図1. IF周波数 vs. 物体までの距離.

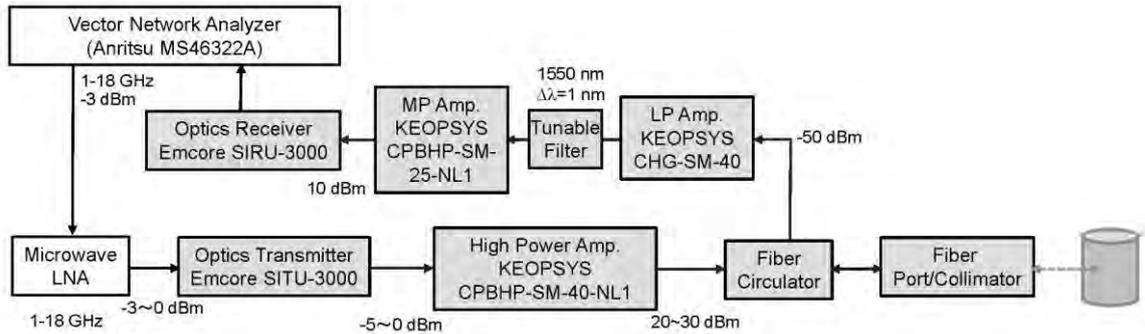


図 2. マイクロ波変調レーザ応用合成開口イメージング装置の構築。

### 3. 駆動光学系の設計・製作

スポットライト方式合成開口イメージングのためには、レーザ光を掃引する必要がある。本研究では、i) 送受信部に回転ミラーを用い、被測定対象への光照射を二次元掃引する。ii) GPS アンテナ付ジンバル制御システムを使用する、の二方式について設計製作を進めた。回転ミラーはガルバノスキャニングシステムで、応答速度は  $200 \mu\text{s}/\text{step}$ 、 $\phi 10 \text{ mm}$  のビームを  $\pm 20^\circ$  の領域で  $xy$  方向に掃引する。一方、ジンバル制御装置は、動作範囲  $-25 \sim 20^\circ$  で、応答速度は  $45^\circ/\text{s}$  である。500 m 遠方では  $180 \text{ m} \times 180 \text{ m}$  の領域に相当する。いずれも今年度中に完成予定となっている。

### 4. まとめ

レーザレーダとしての原理的検証では、電圧制御発振器の周波数掃引の線形性を向上することにより、レンジ方向の空間分解  $1 \text{ cm}$  が得られた。本年度は第一に、反射波の位相情報を精度良く求めるためのシステムの整備があり、高精度チャープ信号の発生と位相信号の取得のためベクトルネットワークアナライザを用いることにした。レーザ光掃引には、ガルバノ式回転ミラーあるいはジンバル制御装置を整備し、トモグラフィ方式ないし合成開口方式イメージングの検証を実験室で進める。その後フィールド試験、車両搭載による地上試験に移行する予定である。

### 5. 研究成果報告

- [1] X. Wang, I. Sakagami, A. Mase, M. Ichimura, IEEE Trans. Microw. Theory Tech. **62**, 3, 422-430 (Mar. 2014).
- [2] D. Zhang, A. Mase, Biomedical Eng.: Applications, Basis and Communications **26**, 1450004 (Apr. 2014).
- [3] X. Wang, A. Mase, H. Ikezi, M. Inutake, Y. Kogi, K. Uchino, J. Electromagnetic Waves and Applications **28**, 917904 (Jun. 2014).
- [4] X. Wang, I. Sakagami, A. Mase, M. Ichimura, IET Microw. Antennas, Propagation, **8**, 9, 666-672 (Sep. 2014).
- [5] 間瀬：「ミリ波イメージングレーダの基礎および応用と実用化事例」JTC セミナー (Nov. 2014).
- [6] Y. Kogi, T. Higashi, S. Matsukawa, A. Mase, J. Kohagura, Y. Nagayama, K. Kawahata, D. Kuwahara, M. Yoshikawa, Rev. Sci. Instrum. **85**, 11D411 (Nov. 2014).
- [7] X. Wang, I. Sakagami, Z. Ma, A. Mase, M. Yoshikawa, Int. J. Electron. Commun. **69**, 1, 418-423 (Jan. 2015)
- [8] X. Wang, I. Sakagami, Z. Ma, A. Mase, M. Yoshikawa, M. Ichimura, IEEE Trans. Compon., Packag. Manuf. Technol. (in press).
- [9] 間瀬、犬竹、王、池地、近木：平成 26 年度通研共同プロジェクト研究発表会 (2015 年 3 月 2 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 祐一郎	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 季彦	核融合科学研究所
王 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

## 26 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

2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27年2月26日（木）、27日（金）  
場 所： 核融合科学研究所研究棟 I-501 室

2月26日（木曜日）

- 13:45-13:55 ・研究集会開催にあたって  
(九州大学応用力学研 花田和明)
- 13:55-14:00 ・研究集会主旨説明  
(九州大学応用力学研 出射 浩)
- 14:00-14:45 ・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)
- 14:45-15:30 ・高密度プラズマにおけるミリ波加熱のための Full-wave  
解析の導入 (核融合科学研究所 伊神 弘恵)
- 15:30-15:40 コーヒーブレイク
- 15:40-16:25 ・準光学高純度 HE11 モード発生器  
モーメントシミュレータとキルヒホッフ積分コードの活用  
(九州大学応用力学研 出射 浩)
- 16:25-17:10 ・マイクロ波から赤外領域のレーダと応用について  
(九州大学産学連携センター 間瀬 淳)
- 17:10-17:55 ・LiveSAR 開発の現状  
(福岡工業大学工学部 近木 祐一郎)

2月27日（金曜日）

- 9:00-9:45 ・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)
- 9:45-10:30 ・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)

10:30-11:15 ・ QUEST における反射計計測と FADIS について  
(九州大学応用力学研 出射 浩)

11:15-12:00 全体討論

平成 27 年度核融合科学研究所の(作業会)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」との合同開催で行われた。本申請研究集会との連携開催で有意義な議論・展開が図れるため、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とした。平成 27 年度核融合科学研究所の(作業会)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」は 27 日午後で開催された。

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)

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」

高温高密度プラズマ中の電子の密度揺動の波数・周波数を同定する手段として協同散乱計測は有望である。実際に、LHD においてはイオンの熱揺動に伴う電子の密度揺動からイオンの速度分布関数の計測(CTS)を行っており、多重反射の影響もあるが、有意の散乱信号を受信していることが確認された。QUEST 装置の電子バーンシュタイン波(EBW)加熱・電流駆動は重要なテーマであるが、その最適化には、加熱波動である EBW の伝搬・減衰過程を実験的に検出することが必要であるが、熱揺動ではなく、加熱励起波動であり、EBW が静電波であることから、散乱効率はCTS に比べると圧倒的に高くなることが予想される。ただし、QUEST で予想される EBW の波数から散乱計測に最適なプローブビームの周波数が 300-1000GHz 辺りにあり、発信源の入手可能性、受信器の感度の点からプローブビームの周波数を選択する必要がある。LHD の CTS 用に 300GHz 帯のジャイロトロンが開発が進められており、テラヘルツジャイロトロンも有力な候補となる。今後、EBW の分散関係を使って、EBW の電力密度、そこから決まる散乱効率を評価し、実際の計測配位を検討していく必要がある。

・ 「高密度プラズマにおけるミリ波加熱のための Full-wave 解析の導入」

(核融合科学研究所 伊神弘恵)

プラズマカットオフ近傍での OX モード変換の描像を得るために、有限要素法による 2 次元 Full-wave 計算を行うための計算コード整備を進めている。有限幅を持つビームの伝播特性を解析するため、マルチレイによる光線追跡計算結果を参照して境界値となる波動電場

ベクトルの分布を与えられるようにした。2次元 Full-wave 計算はプラズマ境界部における OX モード結合効果の解析にも応用する予定である。

- ・ 「準光学高純度 HE11 モード発生器：モーメントシミュレータとキルヒホッフ積分コードの活用」

(九州大学応用力学研究所 出射 浩)

モーメント法シミュレータによって、3次元電磁波解析を行うことができるが、商用ソフトウェアであるため、準光学鏡の設計などにはあまり適さない。キルヒホッフ積分コードは、断面の複素電界分布を与えれば、電磁波伝搬を扱うことができる。キルヒホッフ積分コードは九州大学で開発されたもので、準光学鏡の設計などに用いることができる。大電力ミリ波伝送に用いられる円形コルゲート導波管の主伝搬モード (HE11 モード) 励起するモード発生器が開発された。2つ (集束・発散) のガウスビームを合成することで、ほぼ 100 % のモード純度励起が可能で、実験的にも 98 % 励起に成功した。

- ・ 「マイクロ波から赤外領域のレーダーと応用について」

(九州大学産学連携センター 間瀬 淳)

電磁波は、測定対象に入射した場合、その反射波、透過波の振幅・位相を観測することにより様々な情報を得ることができる。本グループは、必要とされる応用分野に対応して最適な波長 (周波数) を選択し、実機適用を進めている。本会合では、その中で生体計測、車載レーダ、赤外レーザ応用合成開口レーダ (SAR) の研究を中心に報告した。生体計測は心拍・呼吸等バイタル信号の測定および解析のためのハード及びソフトの開発と実用化について、車載レーダでは現在の課題とその解決のための方策について、赤外レーザ SAR では高空間分解イメージングシステムとしての設計製作の状況、特に送受信光学系、二次元掃引のための駆動光学系、SN 比改善の方策等について報告された。

- ・ 「LiveSAR 開発の現状」

(福岡工業大学工学部 近木 祐一郎)

洪水時の浸水域検出のための Spotlight モード合成開口レーダ「LiveSAR」を開発している。これまでに地上および航空試験をおこない、10cm 級あるいは 30cm 級解像度の地表の画像を撮像してきたが、高解像度画像取得の歩留まりや解像度、ゴーストの発生、測定レンジの短縮 (目標 15km、実績 5km) 等の点で問題があった。今年度は実験室内でのファイバースプールを用いた波形生成のアルゴリズムやレーダ制御方法のエラー改良を行った。改良後に地上試験を行ったところ、10cm あるいは 30cm 級解像度の画像が高い SN 比で取れることを実証し、その結果、9km のレンジの対象も撮像できることを示した。

- ・ 「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)

将来の核融合炉において、テラヘルツ波パルス光源とするプラズマ計測に適した計測システムを構築するために必要なデバイスの開発試験(フィルタ、導波管、PCアンテナ等々)を説明された。また、計測実装において重要な開発要素である高時間応答性について、フィルタバンクを用いた方式、非同期光サンプリングを用いた方式などの特性試験について議論された

- ・ 「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では、マイクロ波反射計を用いて、ICRF波動が引き起こす密度変動を測定し、波動物理の研究に用いている。H26年度は、これまでの測定データの解析を進めるとともに、マイクロ波源を増設し、近接した二周波数で測定を行った。測定位置がアンテナに近く、波動電場が強い場合には、電場と密度変動の線形性が悪いことが分かっている。これについて考察を進めた結果、波動電場によるポンデロモーティブ力で反射面が変形し、反射計測定の感度に変化することが原因として考えられることが分かった。

- ・ 「QUESTにおける反射計計測と FADIS について」

(九州大学応用力学研 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。反射計でのアダプティブアレイ法の適用が紹介された。計測においてはウィンドウプロファイラレーダ計測で用いられている計測システムが導入されている。前日にCTSでのフィルタが議論され、フィルタ適用に向けたFADIS(高速ミリ波切替器)の特に2周波数動作につき、詳細設計が示された。

全体討論・今後の進め方では、これまで進展のあったウィンドウプロファイラレーダ、プラズマ輻射計測でのアダプティブアレイ法、心電図解析、プラズマ解析でのテンプレート法など、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題した特定研究内容につき、総括・議論された。CTSへのFADISフィルタ適用などは、今後も継続して議論・検討することとした。

## 26 特 3-4

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た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。モード変換領域近傍では WKB 近似が破綻するため、光線追跡計算では波動伝播の正確な描像を得ることができない。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ー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、波動場の広がり範囲内で磁場や密度が2次元あるいは3次元に変化する場合は、単純な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 装置をはじめとした高 $\beta$ プラズマ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検討してなお十分な 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

Maxwell 方程式を境界値問題として解く TASK/WF2D コードを用いて、OX 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結果を参照して、エヴァネセント近傍点での有限幅をもつ波動電場の空間分布を与え、これを境界値として数値計算を行う。また、XB モード変換が起こる高域混成共鳴層近傍でも同様に衝突効果、運動論効果を入れた誘電率テンソルを用いて数値計算を行う。

### 経緯と結果

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1に示すように、O-X モード変換が起こるプラズマカットオフの近傍で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ている。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。今年度はビーム幅を考慮したマルチレイ計算を行い、各レイが図1の $xd=0$ 平面に達した際の座標点とパワーに関する重み係数を用いて得られる離散的なビーム強度

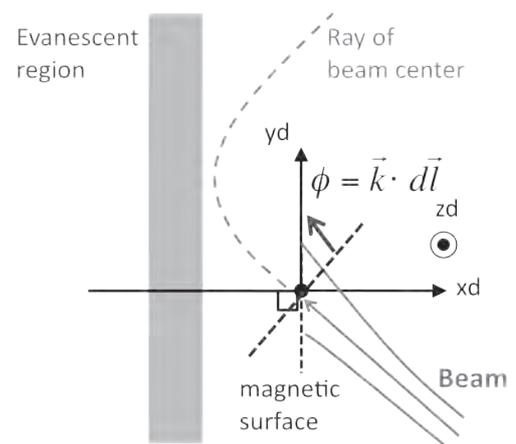


図1: 計算に用いる座標系

分布を2次元補間して  $yd$  軸上のパワー分布を得られるようにした。図2に補間により作成した  $xd=0$  平面上のビーム強度分布を示す。磁場に平行方向を  $z'$  方向とすると、一様プラズマ近似により光線追跡計算から得られた波数ベクトル成分を用いて波動方程式は式(1)のように書けるので、この式を解いて  $E_{y'} = C_y E_{x'}$ ,  $E_{z'} = C_z E_{x'}$  と表される係数  $C_y, C_z$  をもとめ、図1で用いる座標系への変換を行うことで  $E_{xd}, E_{yd}, E_{zd}$  成分を得ることができる。

$$\begin{pmatrix} k_y^2 + k_z^2 & -k_x k_{y'} & -k_x k_{z'} \\ k_y k_{z'} & k_y^2 + k_x^2 & -k_y k_{z'} \\ -k_x k_{z'} & -k_y k_{z'} & k_y^2 + k_x^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{x'} \\ E_{y'} \\ E_{z'} \end{pmatrix} = \frac{\omega}{c} \begin{pmatrix} S & -iD & 0 \\ iD & S & 0 \\ 0 & 0 & P \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{x'} \\ E_{y'} \\ E_{z'} \end{pmatrix} \quad \text{式 (1)}$$

ここで、 $S, P, D$  は Stix パラメータである。さらに図1に示しているように、メッシュ点からビーム中心の群速度ベクトルに垂直な面との位相差  $\phi$  を考慮して、 $(E_{xd}, E_{yd}, E_{zd})^t \exp(i\phi)$  とすることで、各メッシュ点間の電場の位相差を与える。図3に求めた  $E_{xd}, E_{yd}, E_{zd}$  の実数成分と複素数成分の分布を示す。この初期値を用いて波動方程式を解き、0-Xモード変換過程の波動伝播描像を得る予定である。また、高域混成共鳴層付近でも計算を行う予定である。

#### 研究発表

H. Igami et al. “Modeling of the electron cyclotron wave propagation in the boundary region of the high dense plasma”, PLASMA2014, 18-21 Nov., Niigata (2014)

A. Fukuyama, H. Igami, H. Idei, “Full wave analysis of EC wave mode conversion in tokamak plasmas”, 41th EPS Conference on Plasma Physics P4.014, Berlin, 23-27.June (2014)

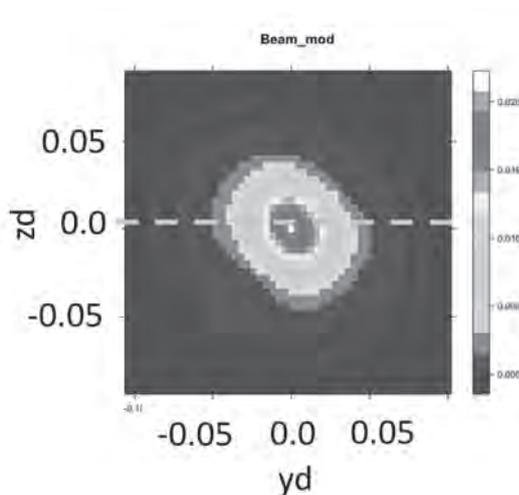


図2: マルチレイ計算結果を補間して得た  $xd=0$  平面でのビーム強度分布

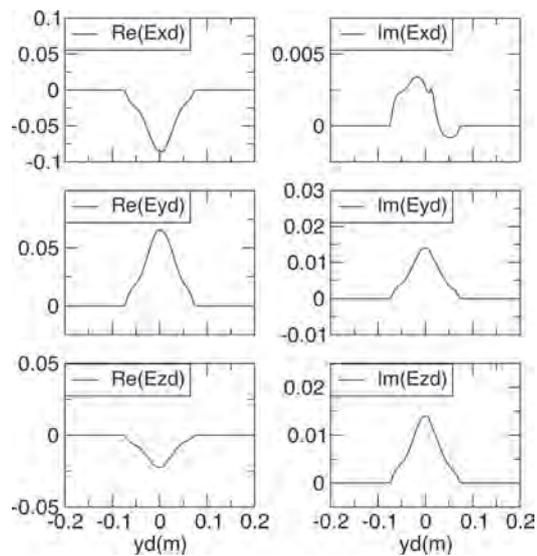


図3:  $yd$  軸上での各電場成分の分布

## 26 特 3-5

### 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。核融合科学研究所において行われている協同トムソン散乱計測においては、その散乱ソースとして現在77GHz大電力ジャイロトロンを用いているが、次期計画として、より高密度で、屈折の影響を受けにくく、さらに、背景電子サイクロトロン放射のレベルが少ない300GHz帯のジャイロトロンを想定しており、福井大学においてジャイロトロン開発が行われている。また、それを用いた伝送システムの検討もすすめられている。そこで、今年度は300GHz帯のソースを用いることも視野に入れて検討を加えた。

#### 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。
4. 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 $N_{||}=0.56$ とした

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ており、300GHzや400GHzを散乱計測のプローブビームとして用いた場合に、観測できる散乱角(10°, 90°, 180°)に対応する波数をそれぞれ赤と青の実線で示した。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 $2 \times 10^4 \text{ m}^{-1}$ 程度になることが予想される。図に示したように、この場合、電子バーンシュタイン波を同定するためには、プローブビームとして300-400GHzの水平面を挟んで入射受信システムを構成した後方散乱を用いるのが適当であることが解る。

### 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

$$P_s/P_i = 4\pi \frac{r_0^2}{R^2} [\tilde{n}(\mathbf{k}, \omega)]^2 V^2 \quad (1)$$

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

$$P_H = \omega \epsilon_0 \frac{\tilde{E}_H^2}{2} \quad (2)$$

と表され、電荷の保存則 $\frac{\partial(\epsilon \tilde{n})}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{j} = 0$ と電子バーンスタイン波の分散関係から加熱振動電場 $\tilde{E}_H$ とそれに伴う電子密度揺動 $\tilde{n}$ が決定されるので、最終的に散乱効率は、

$$P_s/P_i = 8\pi \frac{r_0^2}{R^2} V^2 \left( \frac{e^2 n_c^2}{\epsilon_0 \omega k^2 T^2} \right) \left\{ 1 - \Lambda_0(\beta) - \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\omega}{\omega - n\Omega} \left[ 1 - W \left( \frac{\omega - n\Omega}{|k_{\parallel}|(T/m)^{1/2}} \right) \right] \Lambda_n(\beta) \right\}^2 \quad (3)$$

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。以上のように、プローブビームとして300-400GHzを選択しても、全散乱効率には依存せず、入射・受信配位から予想される散乱角と計測可能な波数の関係が決まることが解った。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.

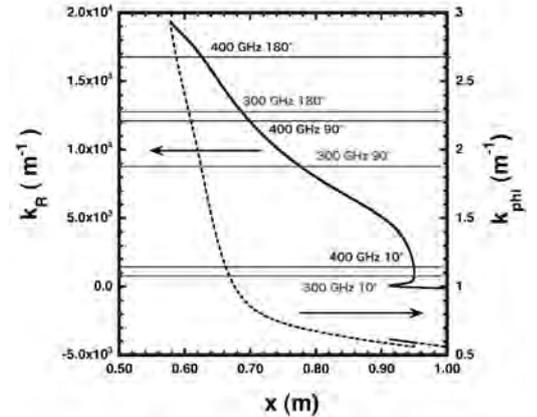


図 1. 8.2 GHz O モードの電磁波を Quest の水平面外側から O-X-B モード変換に最適な入射角で入射した場合の波数の変遷と 300GHz と 400GHz のプローブビームを用いた場合の散乱測定可能範囲

## 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

核融合発電を目指した高温プラズマ閉じ込め研究において、近年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た。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はマイクロ波からテラヘルツ波(0.1-10THz)領域に広がる。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、従来の物性研究で用いられてきたテラヘルツ波計測では事例のないサイズと物体である、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。

### 2. 計画と実験方法

核融合科学研究所の大型ヘリカル装置LHDでは、これまで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、100~1000GHz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逡倍する方法、もう一つは時間領域分光法で用いられるテラヘ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。平成26年度の実験において、初めて反射信号を受信することができた。背景雑音や偽反射信号から真の信号抽出を行うアルゴリズム処理の開発が必要で、現在解析中である。一方、後者はパルスの持つ周波数空間の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。本年度は時間応答性についての試験を行ったので、以下に述べる。

#### 2. 時間応答性の高めた飛行時間型パルスレーダ計測手法

パルス計測におけるデータ取得法として、発振ジッタの影響を軽減するため、発振に同期しかつ遅れ時間を追加したタイミング信号を用いて、信号を取得するサンプリングデータ取得法がある。これを用いて多数の周波数成分を連続波として計測する場合、遅れ時間を生成する機構が重要で、マイクロ波帯であればこれを電氣的に処理できるが、テラヘルツ帯では通常これを機械式ステージを用いて行うことが一般的であった。しかしこれではプラズマ計測に必要とする時間応答を満たせない。そこで、今回これに対応するため、非同期サンプリング法の特性試験を行った。

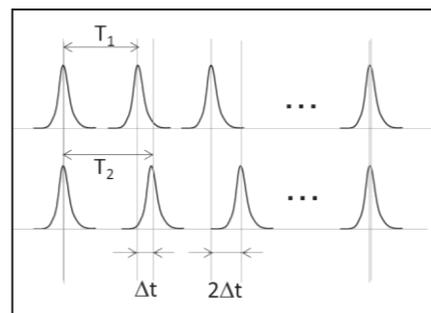
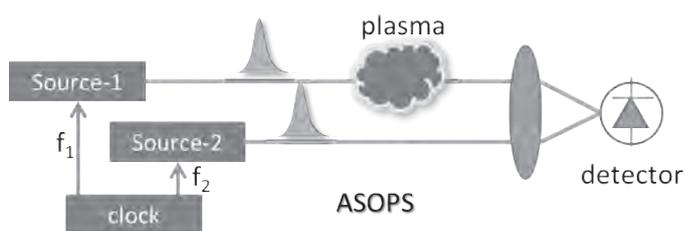


図1 非同期サンプリング法の概略図(左)とタイミングチャート(右)

図1に非同期サンプリング法の概念図及びそのタイミングチャートを示す。2つの光源をわずかに周期をずらして発振させることにより、検出器上ではビートが形成される。このビート波形の包絡線は、元の光源から発振波形をダウンサンプリングしたものとなる。通常のサンプリング手法で波形を取得するのに比べ数桁の高い時間応答が得られる。図2に、100kHzおよび99kHzで2台のパルスジェネレータ(PSPL-2000)を発振させ取得したビート信号を示す。200nsのパルスを約3桁落として観測できることが分かる。

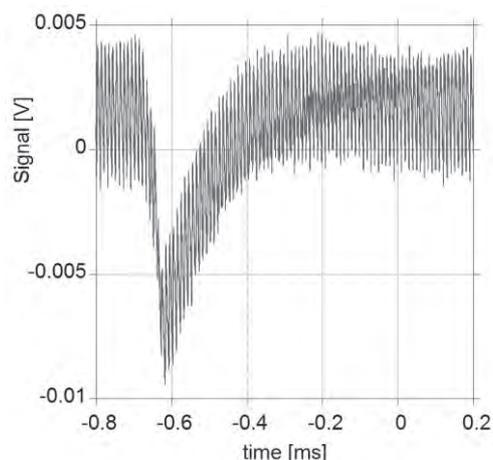


図2 非同期サンプリング法で求めた伝送パルス信号波形

この非同期サンプリングの原理を用いたテラヘルツ波時間領域分光システムを用いたプラズマ計測試験を行った。図3に計測配置を示す。13.56MHzのRF波動により生成したICPプラズマを光ファイバ接続の光伝導アンテナを介してテラヘルツ波計測を実施した。プラズマ有無による位相の変化量を1計測8msの時間応答で計測しそれを4096回分平均化したものを図4に示す。今回の実験では電子密度が薄く、本テラヘルツ波システムでは有意な差が得られなかったが、信号観測はできておるので、今後より高密度化し計測実証を目指す。

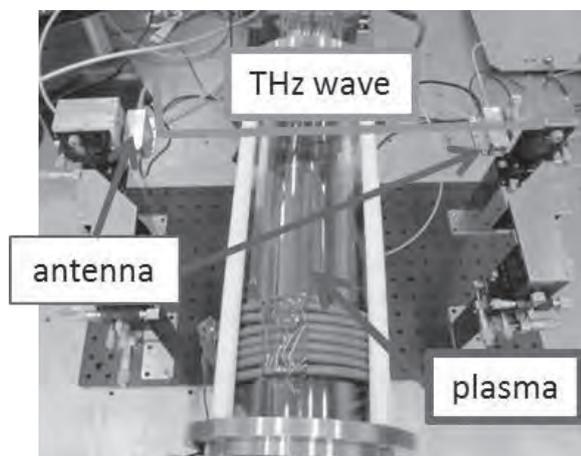


図3 非同期サンプリング法によるプラズマ計測テストシステム

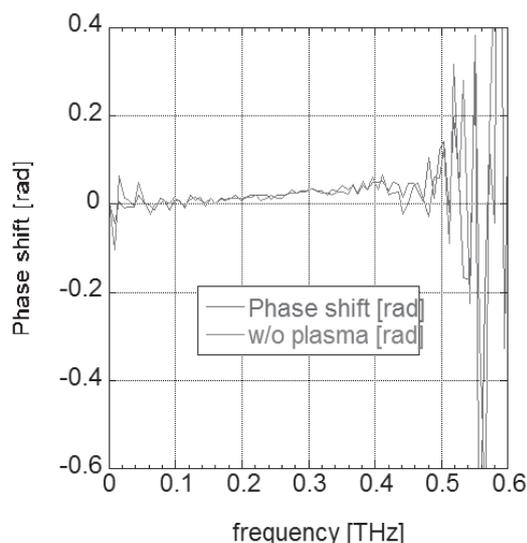


図4 周波数に対する位相変化

## 26 FP-1

高エネルギーイオン照射によるタングステン中の照射欠陥回復温度依存性と水素同位体滞留ダイナミクス

静岡大学大学院 理学研究科 大矢恭久

### 【目的】

核融合炉のプラズマ対向壁には、水素同位体滞留量の少ないタングステン(W)の利用が考えられている。しかし、プラズマ対向壁はDT核融合反応により生成した中性子を含む高エネルギー粒子に曝されることにより、照射欠陥が形成し水素同位体が安定的に捕捉されると報告されている。また、照射欠陥は熱により安定化するとともに、拡散して回復する等の複雑な挙動が予想される。核融合炉の定常運転のためには、熱影響を考慮した欠陥状態と水素滞留量評価が必要不可欠である。そこで本研究では鉄イオン照射したWを各温度まで焼鈍した後、透過型電子顕微鏡(TEM)観察により照射欠陥の熱による成長、回復挙動について評価を行った。さらに、同様の試料に重水素イオンを照射し昇温脱離(TDS)測定を行ない、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、各照射損傷量まで鉄イオン照射したWを用いて1173 K加熱実験を行うことで、欠陥回復挙動と重水素滞留挙動におよぼす影響についても明らかにした。

### 【実験】

試料としてアライドマテリアル社製の歪取加工済の多結晶W(10 mm $\phi$ , 0.5 mm $h$ )を用いた。不純物除去のため加熱処理を1173 Kにて30分間行った後、照射損傷を導入するため日本原子力研究開発機構高崎量子応用研究所の3MVタンデム加速器(TIARA)にてFe<sup>2+</sup>を室温にて損傷量0.1 dpaまで照射した。その後、九州大学応用物理学研究所のTEM装置を用いて、試料中の照射損傷を観察した後、573, 873, 1173 Kにて30分間焼鈍し、同様にTEM観察を行うことで、欠陥回復挙動の観察を行った。さらに、同様にダメージを導入したWを静岡大学にて573, 873, 1173 Kにて30分間焼鈍し、重水素をエネルギー1.0 keV D<sub>2</sub><sup>+</sup>にてフラックス1.0 $\times 10^{18}$  D<sup>+</sup> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>、フルエンス1.0 $\times 10^{22}$  D<sup>+</sup> m<sup>-2</sup>まで室温にて照射し、TDSにて重水素滞留挙動を明らかにした。

また、Fe<sup>2+</sup>を室温にて損傷量0.01 - 1.0 dpaまで変化させて照射したWを1173 Kまで加熱した後、TEM観察およびD<sub>2</sub><sup>+</sup>照射、TDS測定を行った。

### 【結果および考察】

図1に室温にてFe<sup>2+</sup>照射したW試料を各温度にて焼鈍した後にD<sub>2</sub><sup>+</sup>照射した際の重水素放出スペクトルを示す。重水素の放出はPeak 1(400 K付近)、Peak 2(600 K付近)およびPeak 3(800 K付近)の3つの放出ピークに分けられた。Peak 1は表面吸着された重水素および転位ループに捕捉された重水素の放出、Peak 2は原子空孔からの重水素放出<sup>[1]</sup>、Peak 3はボイドからの重水素放出<sup>[2]</sup>とそれぞれ帰属した。

図2に各Peakにおける重水素滞留量をまとめた。焼鈍温度の上昇によりPeak 3における重水素滞留量が減少した。これは焼鈍によってW原子の再配列が

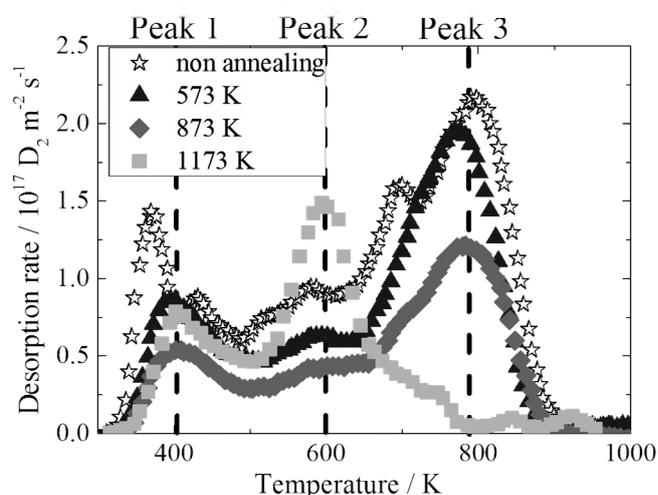


図1 各焼鈍試料におけるD<sub>2</sub>TDSスペクトル

起こりやすくなり、ボイドが回復したためであると  
考えられた。一方で、Peak 1 における重水素滞留量  
は焼鈍温度が上昇してもほとんど変化がないこと  
が示唆された。

図 3 に各温度で焼鈍した試料の転位ループの  
TEM 写真を示す。転位ループは 573 K にて集合を  
開始し、大きく成長後、1173 K までの加熱でほとん  
ど消滅した。転位ループが回復しているにもかかわらず、Peak 1 における重水素滞留量がほとんど減少  
しないことから、転位ループに捕捉される重水素滞  
留量が少ないために転位ループの回復による重水  
素滞留挙動への影響が小さいことが示唆された。

図 4 に、各損傷量まで Fe<sup>2+</sup>照射した後 1173 K ま  
で加熱した W における重水素放出スペクトルを示  
す。損傷量が減少するにつれてボイドからの放出ピ  
ークは低温側にシフトした。0.1 dpa においてボイド  
における放出ピークは消滅し、原子空孔の放出ピー  
クが見られ、0.01 dpa では原子空孔およびボイドに  
よる重水素滞留は見られなかった。このことから、  
欠陥密度が高い場合欠陥同士の集合頻度が高くな  
り回復よりも成長するが、欠陥密度が低くなると大  
きな欠陥は回復途中で分解し原子空孔のような小  
さな欠陥となることが示唆された。

これらの結果から、焼鈍による欠陥の回復は W  
中の重水素滞留量の減少を引き起こし、その主要  
因はボイドの回復によるものと考えられる。

- [1] H. Eleveld *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **191** (1992) 433  
[2] O.V. Ogorodnikova *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **415**  
(2010) 661

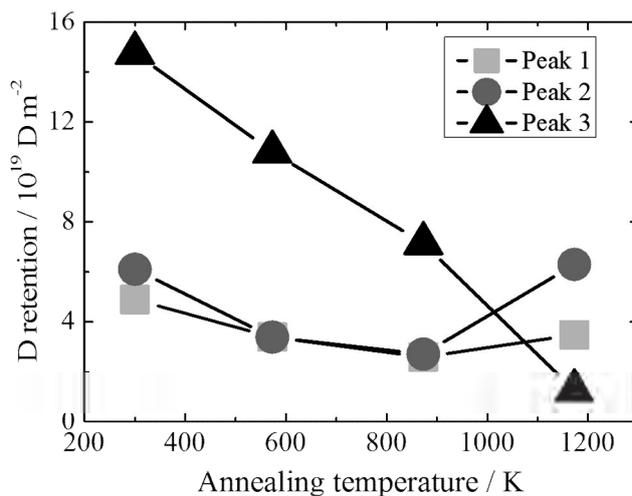


図 2 各 Peak における重水素滞留量変化

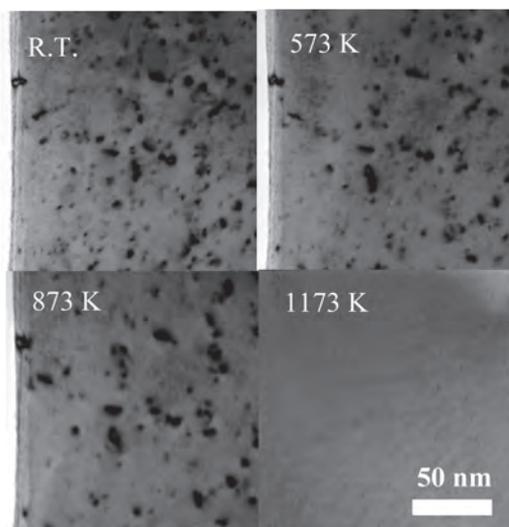


図 3 各温度における TEM 写真

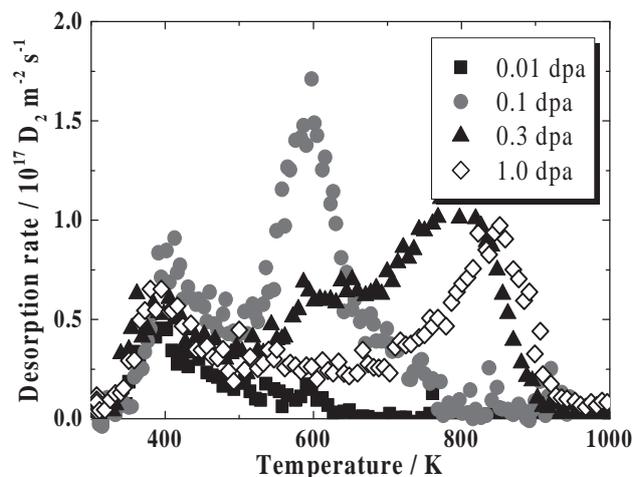


図 4 各損傷量導入(1173 K 焼鈍)試料  
における D<sub>2</sub> TDS スペクトル

## 真空プラズマ蒸着したタングステンの微細組織と強度特性の相関

京都大学エネルギー理工学研究所 谷口修一、奥西成良、韓 文妥、木村 晃彦

## 1. 目的

核融合炉のダイバータ・ブランケットでは、耐熱負荷特性や耐スパッタリング特性に優れ、さらに水素同位体リテンションの少ないタングステン (W) を低放射化構造材料の表面に被覆・接合し、アーマ材として使用することが期待されている。しかし、W と代表的な低放射化構造材料であるフェライト鋼の接合・被覆については、両者の熱膨張係数が大きく異なるため、熱疲労による破壊を考慮した適切な界面強度設計が必要である。真空プラズマ溶射 (VPS) 法は、金属粉末を溶射することで、材料表面を異種金属などで覆う被覆法であり、VPS-W を第一壁として採用するブランケットの設計もあるが、VPS-W そのものの諸特性については不明な点が残されている。そこで本研究では、低放射化材料に VPS 法を用いて作製したタングステン被覆材そのものの強度特性評価および微細組織観察を実施し、第一壁材料としてより優れた VPS-W を作製するための金属組織学的因子を明らかにすることを目的とする。

## 2. 研究成果の概要

1) **W 溶射法**：本実験での W 溶射は、トーカロ株式会社でスルザーメテコ社製の装置を用いて真空プラズマ溶射(VPS)法で行った。溶射システムは、スルザーメテコ社製 A-2000V タイプで、溶射ガンは F4VB 型である。基板材料には ODS 鋼と F82H 鋼を用いた。基板温度の調整は、プラズマジェットと基板材料との距離を変化させることによって行っている。より良い製膜を行うためには、基板温度を高くすることが有効であることが分かっている。しかし、それぞれの材料には、求められている機械的特性を維持できる最高温度が決まっている。これまでの研究において ODS 鋼では 1510 K において機械的特性が変化しないことが確認されている。また F82H については、製造時に 1013 K で焼き戻し処理を行っているためそれ以上の温度では組織が変化する。よって W 溶射時には基板温度をこれらの温度より十分に低くする必要がある。

2) **マスキング法**：本実験では、2 種類の溶射法を採用した。大きな違いは、溶射時の基板温度、タングステン粉末粒径、グラファイトマスクの有無である。本実験では W 粉末溶射時にグラファイトマスクを用いたものを「VPS-W(M)」、グラファイトマスクを用いないで溶射したものを「VPS-W(NOM)」と呼称する。

「VPS-W(NOM)」では、溶射時に熔融した W 粉末が積層するまでに再凝固し被膜表面に堆積する。この再凝固粒が多い層では気孔が多く形成され、熱伝導率に影響を与えることが分かっている。これを改善するため、再凝固粒を遮断する目的でグラファイトマスクを用いた。溶射の概略図を図 1 に示す。グラファイトマスクは溶射ガンの中心から、Y 軸方向に 20mm 離れた位置に設置している。これは+25 mm 以上の範囲に堆積する W 粉末で再凝固粒の割合が高いためである。それぞれの方法で ODS 鋼と F82H に W 粉末を溶射した接合体の機械的特性評価を行った。

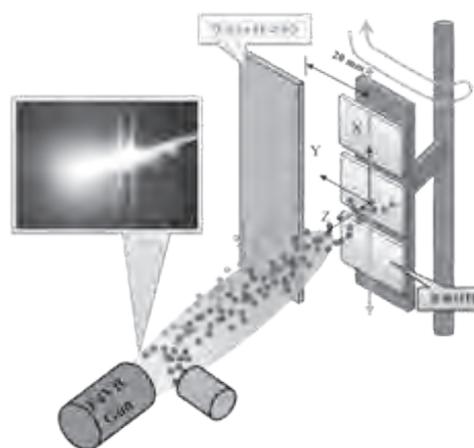


図 1：W 溶射の概略図（グラファイトマスク装着時）

### 3) 接合体の強度と密度の関係

微小3点曲げ試験の結果、すべての接合体の破断はVPS-W内で発生していた。破断位置を観察するため試験後樹脂埋めを行い、振動式自動研磨装置 Vibromet2(ビューラー社製)を用いて1時間研磨を行った。VPS-W内に発生した亀裂は、VPS-Wの層境界に沿って発生していることが分かった。また柱状粒が伸びている部分には亀裂は発生していない。また、亀裂の進展がVPS-Wの層境界に沿って起きていることが分かった。VPS-Wの機械的特性評価では、亀裂は柱状粒に沿って進展していた。また、破断強度においてもVPS-W(M)で400MPa程度であったが、接合体ではVPS-W(M)で100MPa前後であり大きな違いが認められた。よってこれらの違いは、VPS-Wの破断と、接合体におけるVPS-Wの破断が異なっていることを示している。

接合体の破断強度は、VPS-W(M)で大幅に改善している。図2に相対密度と接合体の破断強度との関係を示す。この図から密度が上昇することで強度も上昇していることが分かる。よって、VPS-Wの密度が接合体の破断強度に影響を与えていることが分かる。

VPS-W(M)ではグラファイトマスクによって再凝固粒を遮断している。これにより溶融したW粉末のみが基板材料まで到達する。さらに、溶射W粉末粒径を $37\mu\text{m}$ と大きくしていることで保持できるエネルギーが大きくなり、加えて基板温度も上昇させている。これらの理由から、VPS-W(M)では基板に到達した後も溶融状態を長時間維持することができる。よってW同士の密着性が良くなると考えられる。密着性が上昇すると柱状粒の割合が高くなることが分かっている。さらに、4種類のVPS-Wの層の厚さを5カ所で測定し、平均を求めた結果、両基板材料ともに

VPS-W(M)で約 $4.1\mu\text{m}$ 、VPS-W(NOM)で約 $2.0\mu\text{m}$ となり、VPS-W(M)層の方が厚くなっていることが確認できた。よって柱状粒の数が増加し、大きく成長することで亀裂の進展が起りにくくなり強度が改善したと考えられる(図3)。層がVPS-W(M)において厚くなった原因としては溶射時のW粉末粒径の違いと、基板材料へ到達後の冷却速度の違いが考えられるが、断定するにはさらなる調査が必要である。

接合体の微小3点曲げ試験より、VPS-W(M)で大幅な破断強度の改善が確認できた。一方で、すべての接合体がVPS-W内の層境界に沿って破断していた。このことから本実験の破断強度はVPS-W内の剥離強度である。すなわち接合界面の強度は本実験の破断強度より高いと考えられる。今後、高温域での評価も必要である。

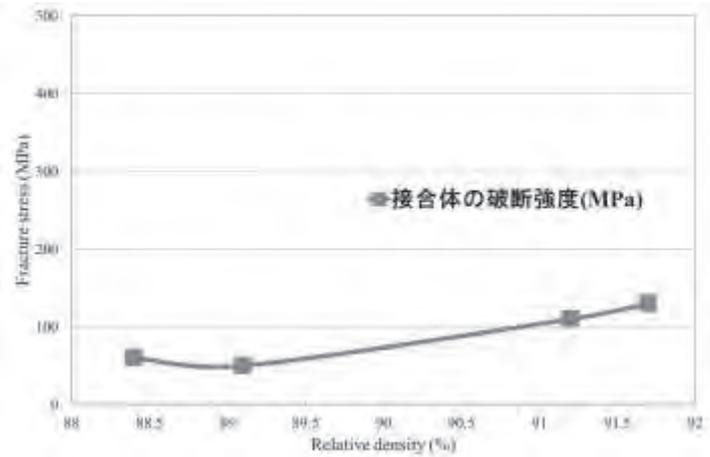


図2：相対密度と接合体破断強度の関係

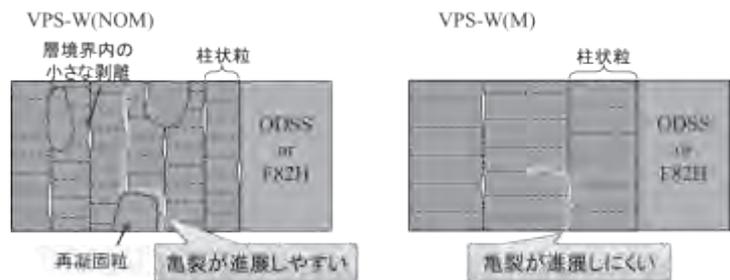


図3 接合体での亀裂進展 概略図

#### 4. 成果発表

奥西成良、能登裕之、谷口修一、韓 文妥、木村晃彦：高熱負荷を受けたタングステンモノブロック冷却構造体の組織観察、核融合エネルギー連合講演会、2014年6月19-20日、つくば国際会議場

奥西 成良、能登 裕之、谷口 修一、韓 文妥、木村晃彦：高熱負荷を受けた W-モノブロック冷却構造体の組織観察、日本原子力学会、2014年9月8-10日、京都大学

奥西成良、能登裕之、谷口修一、韓 文妥、木村晃彦：高熱負荷を受けた W-モノブロック冷却構造体の組織観察、日本金属学会、2014年9月24-26日、名古屋大学



## 26 FP-3

カスケード損傷下における空孔型欠陥のクラスター形成に及ぼす共存水素同位体の影響

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

原子炉材料および核融合炉材料は高エネルギー中性子の照射を受けカスケード損傷を生じる。また、原子炉材料中には冷却水から発生した水素が、核融合炉材料中には燃料である重水素とトリチウムが浸入する。照射損傷と水素同位体のいずれもが材料を脆化させるが、両者が共存する場合の相互作用についてはわかっていない部分が多い。応用力学研究所の高エネルギーイオン発生装置は重イオンと水素同位体イオンの同時照射を実施できる世界でもユニークな装置であり、この分野での貢献が大きく期待される。本研究の目的は重イオンと水素同位体イオンの同時照射によりカスケード損傷組織の発達に及ぼす共存水素同位体の影響を明らかにすることであるが、今年度はそれに先立ち、重イオン単独での照射実験を行い微細組織観察した。試料には近年照射損傷導入後の水素同位体挙動が活発に調べられているタングステン (W) を用いた。また、欠陥濃度の一つの目安として、照射後に重水素 (D) を導入し照射欠陥に捕獲された D 濃度を測定した。

### 2. 実験

供試材には Goodfellow 社製の純 W 板材 (純度 99.95%) を用いた。直径 3 mm の薄膜試料を調製したのち、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室温あるいは 600°C で 2.4 MeV の Cu イオンを 0.5 dpa (損傷ピーク深さでの値) まで照射し、微細組織を同様に応用力学研究所の透過電子顕微鏡 (TEM) で観察した。また、10×10×0.5 mm の板状試料を調製し、250、500、800、1000 °C にて 6.4 MeV の Fe イオンを 0.5 dpa (損傷ピーク深さでの値) まで照射した。そのうち 0.1 MPa の D<sub>2</sub> ガスに 400°C で 10 時間曝露し、捕獲された D 濃度を核反応法 (NRA) で測定した。Fe イオン照射には京都大学の加速器 DuET を用い、NRA 測定はドイツ マックスプランク・プラズマ物理研究所との共同研究として実施した。

### 3. 結果および考察

2.4 MeV の Cu イオンを室温あるいは 600 °C で 0.5 dpa 照射した W の TEM 明視野像を図 1 に示す。黒いコントラストが格子間原子あるいは原子空孔が集積して形成された転位ループである。600 °C で照射した場合には転位ループが大きく成長すると共に、密度が低下している。これは高温では格子間原子や空孔、特に室温ではほとんど動かない空孔の拡散が活発になり長距離拡散するためだと考えられる。図 2 は同様の試料をアンダーフォーカスにて観察した像で、ボイド (空孔集合体) の観察を試みたものである。室温で照射した場合にはボイドが明確には観察されなかったが、600°C で照射した場合にはいくつかを矢印で例示したように直径 1 nm 程度のボイドが多数見られた。転位ループの場合と同様に、600 °C では空孔の長距離拡散が活性化したため集合体の形成が進展したものと考えられる。図 3 では、250~1000 °C において Fe イオンで 0.5 dpa まで照射したのち D<sub>2</sub> ガスに曝露した試料の損傷領域中の捕獲 D 濃度を照射温度に対してプロットしている。照射温度の増大と共に捕獲 D 濃度が減少しており、1000 °C で照射した場合には 250 °C の約 1/3 となっている。これらの結果をまとめると、この温度領域では照射温度の上昇に伴い照射欠陥の集積が進みより粗大な集合体が低密度に形成されるようになり、結果として水素同位体の捕獲サイトとして働く欠陥の密度が低下するものと考えられる。

水素同位体は空孔型欠陥とクラスターを形成することが知られている。照射中に水素同位体が共存す

ると、クラスターの形成を通して空孔型欠陥の拡散に影響を及ぼす可能性があり、上述の微細組織がどのように変化するか大変興味深い。

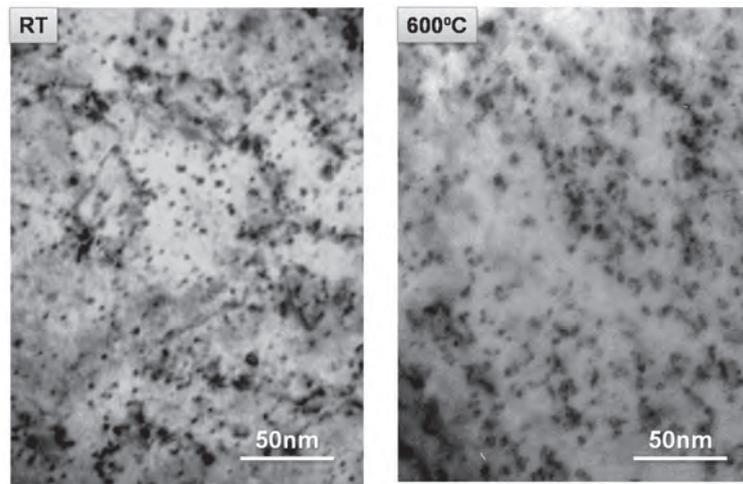


図1 室温（左）および600℃（右）で2.4 MeVのCuイオンを0.5 dpa照射したWのTEM明視野像。

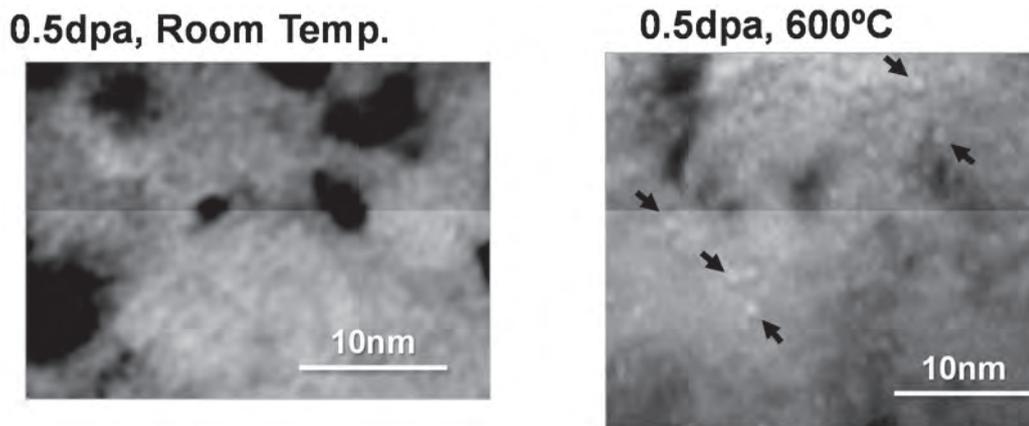


図2 室温（左）および600℃（右）で2.4 MeVのCuイオンを0.5 dpa照射したWのTEM明視野像（アンダーフォーカス）。

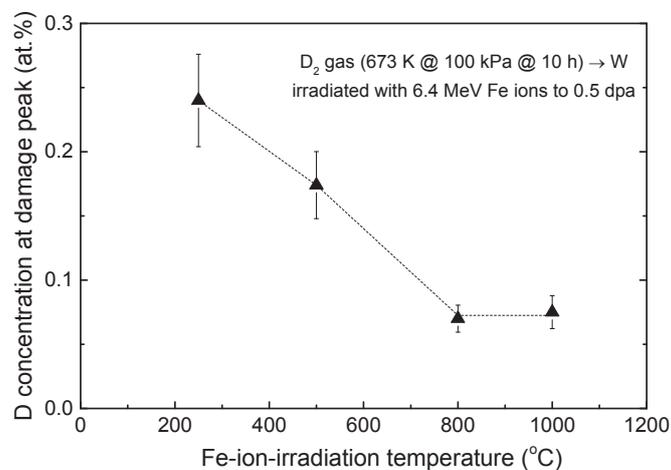


図3 6.4 MeVのFeイオンを0.5 dpa照射したのち400℃で0.1 MPaのD<sub>2</sub>ガスに10時間曝露したW試料の損傷領域中の捕獲D濃度（損傷ピークでの値）。

学会発表

- 1) Y. Hatano, V. Kh. Alimov, N. Yoshida, H. Watanabe, M. Oyaidzu and T. Hayashi, “Surface Morphology of F82H Reduced Activation Ferritic/Martensitic Steel Exposed to High Flux Deuterium Plasma”, 12th International Workshop on Hydrogen Isotopes in Fusion Reactor Materials, June 2 - 4, 2014, University of Toyama, Toyama, Japan.
- 2) Y. Hatano, V.Kh. Alimov, N. Yoshida, H. Watanabe, M. Oyaidzu, T. Hayashi, “Surface morphology change and sputtering of F82H reduced activation ferritic/martensitic steel and Fe by low-energy high-flux deuterium plasma”, Plasma Conference 2014, November 18-21, 2014, TOKI MESSE Niigata Convention Center, Niigata, Japan.



ヘリウムイオンプラズマ照射したタングステンにおける  
ヘリウムバブル形成挙動の系統的観察

島根大学大学院総合理工学研究科 宮本光貴

1. はじめに

将来の核融合炉においては、燃焼プラズマを定常的に取扱い、壁材料は反応生成物の高エネルギーヘリウムを含む多様な粒子負荷および過酷な熱負荷に絶え間なく曝されることが予想される。特にヘリウムは、材料欠陥との相互作用が極めて強く、ヘリウムイオン照射やプラズマ曝露が表面特性に著しい影響を及ぼすことが示されている。この表面特性の変化には、表面直下に形成するヘリウムバブルが主要な役割を担うと考えられるが、様々な条件下におけるヘリウムバブルの形成とその成長過程に関連した系統的な研究は成されていない。そこで本研究では、多様な条件下でヘリウム照射/曝露したタングステン試料を用いて、ヘリウムバブルの形成挙動（密度、サイズ、深さ分布）を、照射条件（照射量、エネルギー、温度）の関数として評価することを目的とした。

2. 実験方法

本実験では、(株)ニラコ社製の粉末焼結タングステンを予め $\phi 3 \times 0.1 \text{ mm}^3$ に形成後、再結晶熱処理を施し試料として用いた。ジェット研磨により薄膜加工した試料を、イオン照射装置直結型透過顕微鏡により、室温から 1273 K の温度範囲における一定温度で  $3 \text{ keV-He}^+$  ( $\sim 2.5 \times 10^{17} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )イオン照射下その場観察を行った。

3. 結果および考察

図 1 は室温から 1273K の範囲の一定温度で、 $3 \text{ keV-He}$  イオン照射下でのタングステンの微視的損傷発達過程を示した。いずれの温度においても、照射量の増加に伴い、明瞭なバブル形成が観察されている。また、照射温度の増加に伴い、より低照射量からバブルが観察され始める傾向が確認された。これは空孔やヘリウム-空孔複合体の移動が、高温により活発になりバブルの核形成が促進されたものだと考えられる。図 2 には、これらの観察から得られたバ

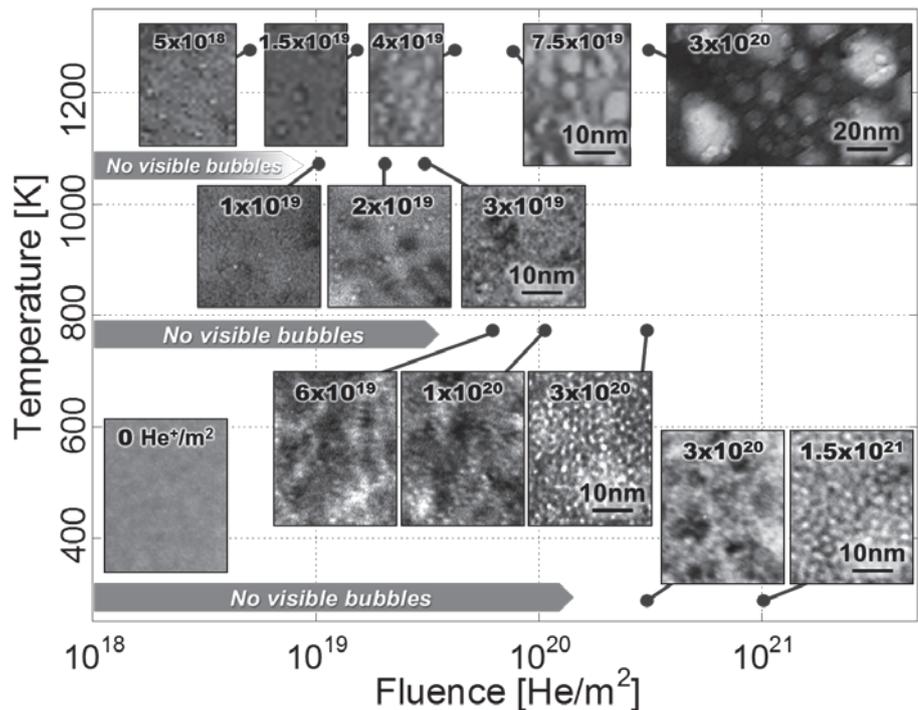


図 1 室温から 1273K の一定温度下で  $3 \text{ keV-He}$  イオン照射したタングステンの微視的損傷発達過程 (TEM 像)。

ブル密度, およびサイズの照射量依存性を示す. 本実験範囲においては, 1073K 以下の照射温度ではバブルの急激な成長は観察されず, 1-2nm 程度のサイズに留まり, 密度も飽和傾向を示した. 一方, 1273K で照射した試料においては, バブルの連続的な成長と,  $10^{20}\text{He}/\text{m}^2$  以上の照射量における密度の減少が確認された. また, 1273K における照射下その場観察では, 隣接するバブル同士の合体成長や, 比較的大きなバブル(~10nm)の表面での消失が観察された. これらの結果は, 1273K 以上の照射温度では, バブルが移動を伴い成長していることを示している.

現在, 同様の条件下で照射したタングステン試料を集束イオンビーム(FIB)加工により断面薄膜化し, 断面組織観察に取り組んでいる. バブルの深さ分布も含めて, データを整理する予定である. また, 本実験ではバブルの明確な長距離移動は観察されなかったが, 今後, 照射条件の拡張, および高純度試料の利用等により, バブルの動的挙動の実時間観察を行い, 移動のメカニズムや関連する移動エネルギーの評価を行う予定である.

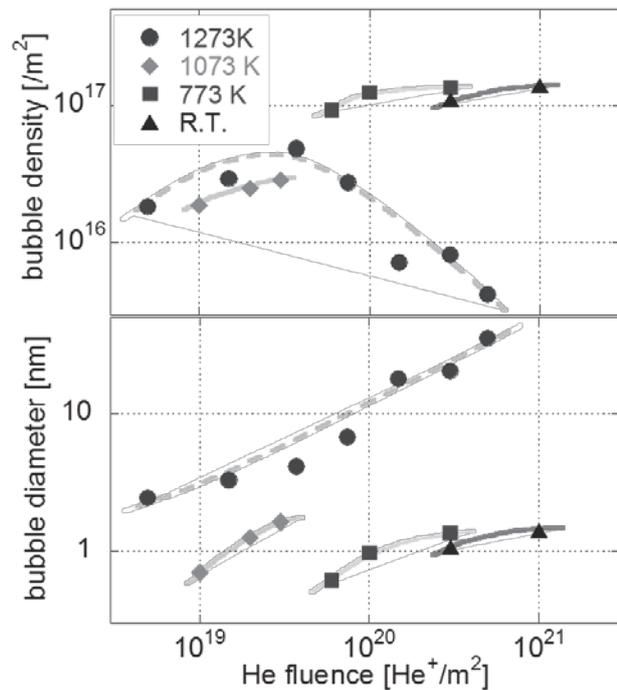


図2 一定温度照射下でタングステン試料中に形成したヘリウムバブルの密度(上), およびサイズ(下)の照射量依存性.

### ● 研究組織

研究代表者： 宮本光貴 (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： 飯島信行, 田中徳人, 三上 聡 (島根大学大学院総合理工学研究科博士前期課程)

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 山口正剛

【研究の背景】

国際熱核融合実験炉(ITER)では激しいプラズマ粒子の照射をダイバーターと呼ばれる部位で受ける構造になっている。そこで、ダイバーターは融点が高く水素（水素同位体）をほとんど溶解しないタングステン(W)で表面を被覆し保護する予定である。それでも強い照射によって水素が侵入し貯蔵されることが懸念されている。特に、トリチウム(T)は放射性同位体であるためその残留量の上限が法令でも規制されている。また、崩壊熱の影響も問題視されている。そこで、タングステン中に貯蔵される水素に関する研究が始まった。水素のタングステンへの溶解熱は原子1個当たり1.2eV(吸熱反応)と金属では最も高く、結晶格子に水素が直接残留することはない。しかし、空孔型の格子欠陥など原子レベルの隙間には捕獲される。そこで、密度汎関数法に基づいた第一原理計算を行いタングステン空孔と水素との結合エネルギーの計算が行われている<sup>1)</sup>。

タングステン空孔中の水素の安定構造は通常のBCC金属とは異なる特異な構造になることがわかった<sup>2)</sup>。さらに、水素は軽い原子であるため零点振動エネルギーが大きく、原子の質量に依存する同位体効果が顕著とも考えられる。本研究では水素の振動数を計算し同位体効果について研究した。また、水素雰囲気下では空孔の超多量生成が起こる可能性がある。タングステン空孔を生成するためには3.1eVのエネルギーが必要であるが、空孔水素複合体を生成することで大幅に生成エネルギーが減少し、場合によってはマイナスになることもある。そうなると、空孔が自発的に発生し大量の水素吸蔵と材料強度の低下の原因になる可能性がある。本研究では平衡状態を仮定した熱力学的モデルに基づき、この水素による空孔の超多量生成に関する研究も行った。同位体効果に関する研究では、二種類の水素同位体が共存する時の空孔による水素の捕獲量の違いを求めた。

【計算方法】

水素の安定構造や空孔との結合エネルギーの計算には、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。計算セルはBCC格子の6×6×6(432格子点)という大きなものを使った。後述するように格子振動のエントロピーを計算するためである。ポテンシャルはGGAタイプのPBEポテンシャル、K点の密度は2×2×2、原子緩和は各原子に働く力が0.003 eV/Å以下になるまで緩和を繰り返した。水素の零点振動エネルギーは水素原子の変位と復元力が比例することを仮定した調和近似で計算した。

熱力学的モデルはヘルムホルツの自由エネルギー  $F=U-TS$  を使って空孔密度などを計算した。内部エネルギー  $U$  は第一原理計算から求めた空孔の生成エネルギーと水素の結合エネルギーで構成されている。エントロピー  $S$  は配置と格子振動のエントロピーで構成されている  $S=S_{com}+S_{vib}$ 。配置のエントロピーとは空孔や水素を結晶格子のどこに置くかの場合の数  $W$  を求めボルツマンの式  $S_{com}=k_B \ln W$  から計算される。振動のエントロピーは空孔の存在による格子振動の乱れに由来する。特に、振動のエントロピーの計算に重点を置いたので後で詳しく述べる。

【計算結果】

図1のようにタングステン空孔中の水素は他のBCC金属とは異なる特異構造を持つ。(a)鉄など多くのBCC金属空孔では水素はO-siteと呼ばれる対称性の高い場所の近傍が安定で最大6個まで捕獲されるが、b)タングステン空孔内では水素は歪んだ構造になる。さらに、タングステン空孔には最大12個まで水素が捕獲される可能性がある。

図2ではタングステン空孔と各水素同位体の結合エネルギーを示す。軽い同位体の方が空孔とは強く結合して、いわゆる同位体効果は明確である。また、零点振動エネルギーの計算には図1で示したような正しい水素の構造に関する情報が不可欠である。本研究によって初めて正しい同位体効果の研究が可能になったことを強調しておく。

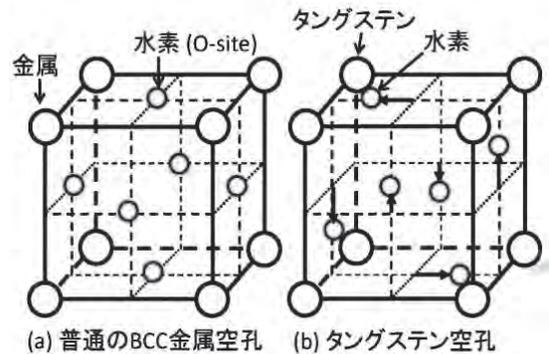


図1:金属空孔中の水素6個の安定構造。(a)鉄など普通のBCC金属結晶(b)タングステン空孔中の特異な構造。

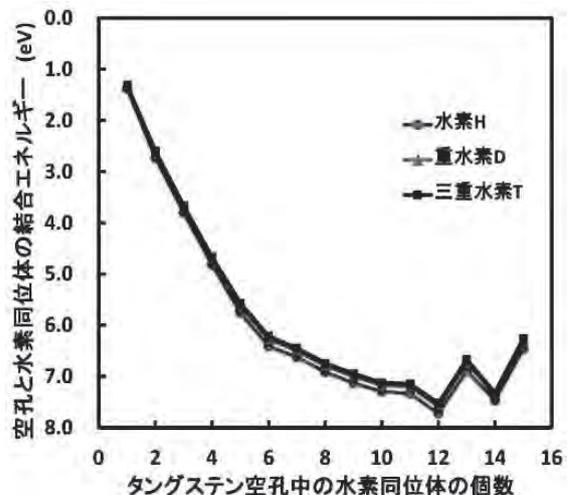


図2:水素同位体ごとのタングステン空孔と水素の結合エネルギー。

**【熱力学的モデルによる空孔の超多量生成の計算】**

空孔が水素の影響で自発的に形成される場合を研究した<sup>3)</sup>。生成する空孔水素複合体の個数は平衡状態を仮定した熱力学的モデルによって計算した。ここでは振動のエントロピー $S^{vib}$ への寄与について詳しく述べる。振動のエントロピーは空孔水素複合体が存在することで格子振動に起きる乱れに由来している。水素を $k$ 個捕獲した空孔水素複合体を $VH_k$ とし、その振動のエントロピーへの寄与を $P_k$ とする。 $VH_k$ が $n_k$ 個存在すると

$$S^{vib} = k_B \sum_k n_k \ln P_k \quad P_k = \prod_i v_i / v_{ki}'$$

である。ここで $i$ は $VH_k$ 近傍のタングステン原子の通し番号、 $v_i$ は完全結晶の $v_{ki}'$ は $VH_k$ によって変調を受けた格子振動である。欠陥から十分遠方では格子振動は完全結晶のものに漸近するので振動のエントロピーには寄与しなくなる。

BCC格子では点欠陥から第一近接原子は8個、第二近接原子は6個、それ以降は12個、24個、8個、6個となる。それぞれの近接原子グループごとに完全結晶との格子振動数の比を計算したのが図3である。第一と第二近接原子グループでは $VH_k$ による格子振動の変調が顕著である。しかし、第六近接グループになると格子振動はほとんど欠陥からの影響を受けない。本計算では第五近接原子までエントロピーの計算に考慮した。

自由エネルギーを極小にする状態が実現するので、空孔水素複合体 $VH_k$ の個数に関して次の式が成立する。

$$\partial F / \partial n_k = 0$$

図4は水素濃度(原子数比)と温度に対する空孔水素複合体濃度の関係である。(a)は水素の零点振動の影響を無視したモデル、(b)は水素(H)の零点振動の影響を考慮したモデルである。詳細な点は違うが両者は共通点も多い。水素低濃度の極限では通常の熱平衡空孔濃度に一致する。また、水素濃度が上昇するとある閾値から急に空孔濃度が増加する。高水素濃度では空孔中に水素が6個捕獲された $VH_6$ が大量に生成される。

**【水素同位体が共存する時の空孔による水素の捕獲量】**

二種類の水素同位体が共存する状態を研究した。ただし、こちらのモデルでは空孔は照射などの外的要因で導入されることを想定し一定であることを仮定する。例としてタングステンに対して空孔濃度が $1 \times 10^{-4}$ であり、HとDが共に $5 \times 10^{-3}$ の濃度である時に空孔に捕獲されるHとDの量を示す。図5によると、空孔にはHの方が多く捕獲される。特に低温になるほどその差は大きくなる。一方でDの空孔による捕獲量は温度によらずほぼ一定である。結合エネルギー(図2)より空孔と強く結合するHの方が空孔に多く捕獲されることが予想されたが、その通りになった。さらに図5をみると空孔がDを捕獲するのをHは阻害しているようにみえる。

**【まとめ】**

タングステン空孔に捕獲される水素は特異な構造を持つ(図1)ために、零点振動エネルギーの計算にはそのことを反映しなければならない。水素同位体ごとのタングステン空孔との結合エネルギーを計算したところ軽い同位体ほど結合が強いという同位体効果がみられた(図2)。熱力学的モデルには内部エネルギーと配置と振動のエントロピーの影響を考慮した。空孔水素複合体の生成(図4)や二種類の同位体が共存する場合の空孔への捕獲量を計算した(図5)。同位体による相違点(同位体効果)が明確にみられ、軽い核種の方が空孔に捕獲されやすい。この結果は炉壁材料から三重水素を回収する技術への応用が期待される。

**【研究組織】**

研究代表者 山口正剛、所内世話人 大澤一人

参考文献

- [1] K. Ohsawa et al., Phys. Rev. B 82 (2010) 184117.
- [2] K. Ohsawa et al., Phys. Rev. B 85 (2012) 094102.
- [3] K. Ohsawa et al., J. Nucl. Mater. 458 (2015) 187.

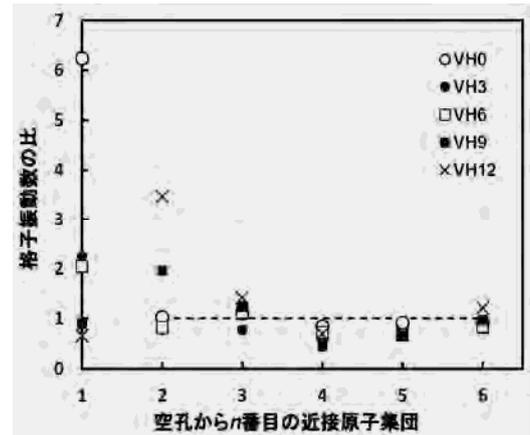


図3: 近接原子グループごとに計算した振動数の比。空孔水素複合体 $VH_0$ 、 $VH_3$ 、 $VH_6$ 、 $VH_9$ 、 $VH_{12}$ の例を記載。

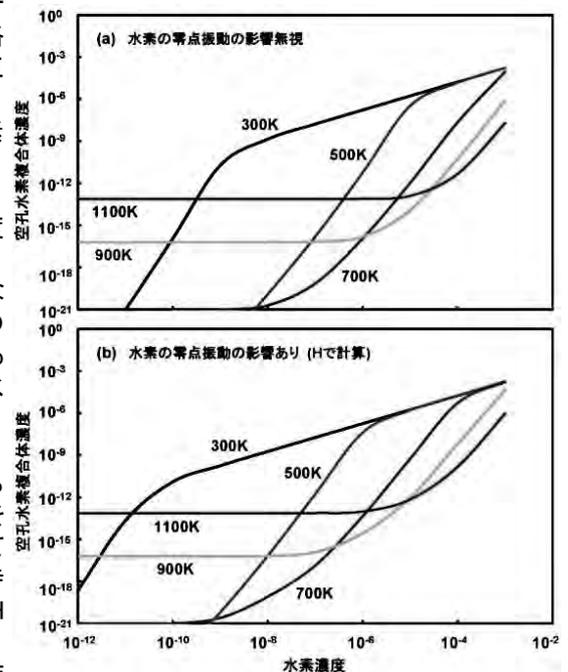


図4: 水素濃度と温度に対する全空孔水素複合体(空孔)の濃度。(a)水素の零点振動の影響を無視、(b)影響を考慮。

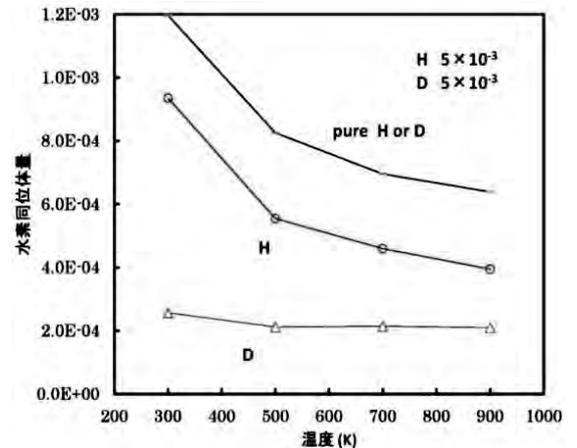


図5: 空孔濃度が $1 \times 10^{-4}$ でHとDの濃度が $5 \times 10^{-3}$ の時に空孔に捕獲されるHとDの量。

## 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

大阪府立大学 堀史説

### 【研究の背景】

金属間化合物は複数の合金元素からなり、特定の結合により形成する化合物の配列に規則性があり、化合物としての特徴を持つ合金である。このような金属間化合物の中に水素との相互作用が重要なものがある。核融合炉で用いられるプラズマ対向材料(タングステン系合金)や水素吸蔵合金、水素雰囲気下での水素脆化の問題などである。水素との相互作用は合金種、組成や構造等によって多様な特徴がある。その中でも本研究が注目するのは構造欠陥を含む空孔型欠陥による水素の捕獲や吸蔵現象である。空孔型欠陥は照射環境下では非平衡欠陥として多量に導入されるので、核融合や原子力材料の分野では重要な課題である。特に、化合物を形成している合金では空孔種は多様であるが、熱平衡では特定の欠陥が安定構造をとる場合が多い。しかし、照射環境で導入される非平衡欠陥は照射条件によってはランダムに生成し、非平衡な状態で水素と相互作用した場合には、従来の熱平衡状態で議論されてきた欠陥状態とは異なる挙動を示す可能性が高い。これまでの第一原理計算においては、B2構造のFeAl合金において、熱的安定性の低いアルミニウム単一空孔に対する複数個の水素原子の捕獲が計算されているが、従来の本合金における欠陥の研究はそのほとんどが熱平衡状態のものであるため、非平衡な欠陥状態とは異なる。そこで本研究では金属間化合物の主に非平衡状態での欠陥への水素捕獲サイトや捕獲状態および移動拡散に関する知見を得るために、空孔型欠陥に敏感な陽電子消滅法による水素の分析を行い、実験結果と理論計算との比較による詳細な水素の状態評価を行なうことを目的としている。また、1原子レベルでの水素の検出は実験的には非常に難しいため、陽電子消滅の計算機シミュレーションと実験との対比により、より詳細な解析をすすめる。そのため本年度は、密度汎関数法にもとづく第一原理計算による水素の安定構造計算と、非平衡欠陥での陽電子消滅の計算機シミュレーションプログラムの構築し、それらの異なる欠陥種での陽電子消滅について比較検討した。

### 【陽電子消滅計算】

電子-陽電子対消滅の計算方法には、M.J.Puskarらのsuperimposed atom methodを適用した[1]。結晶全体の電子分布はモデル結晶中の原子に各々Herman-Skillmanが求めたFeおよびAl原子の電子分布(動径波動関数)を用い[2]、これにより結晶中での陽電子が感じるポテンシャルをクーロン相互作用( $V_c$ : Coulomb part)と、電子-陽電子間の相関ポテンシャル( $V_{corr}$ : correlation part)との和で表す。相関ポテンシャルはBronskiとNieminenによって報告されている内挿公式を用いた[3]。以上により、FeAl中で陽電子の感じるポテンシャルを決定した。次に、密度汎関数理論に基づいて結晶中での陽電子の波動関数を求めた。陽電子の波動関数はコーン-シャム方程式から数値緩和法を用いた数値計算によって解くことができる。上で求めたポテンシャルをシュレディンガー方程式に代入し、メッシュ分割した空間を変分法により解き、エネルギー固有値を求め、陽電子の波動関数を得た。その際に、結晶の全空間での波動関数の積分値が1になるように規格化した。求めた陽電子の波動関数から陽電子の消滅確率を求め、その逆数から陽電子寿命を決定した。計算に用いたモデルは

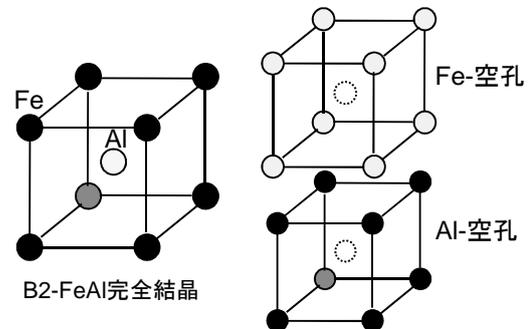


図1: 陽電子消滅計算に用いたB2-FeAlモデル結晶格子

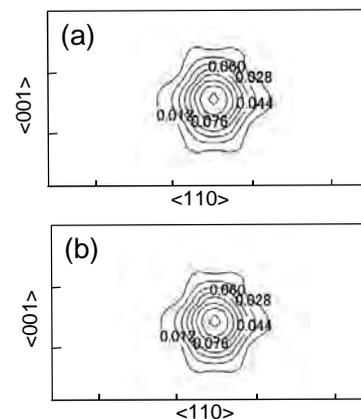


図2: 単一空孔での陽電子の波動関数の分布  
(a) Fe-空孔、(a) Al-空孔

3a × 3a × 3aの格子中にB2構造となるような格子位置にFe原子とAl原子を導入し、モデル結晶とした。このモデル結晶に対してメッシュ間隔a/10で計算を行った。

**【計算結果】**

図2にはそれぞれ単一のFe-空孔、Al-空孔をモデル結晶内に作成し、陽電子を入れた際の陽電子は導関数の広がりを示す。完全結晶の場合は、陽電子は結晶全体に広がって分布(ブロッホ状態)するが、単一空孔ではいずれの空孔タイプでも空孔位置に陽電子が局在しており、計算により陽電子が空孔に局在することがわかった。また、グラフからは空孔種に依存した顕著な波動関数の違いは見られなかった。一方、これらの空孔の中心に水素原子を1個配置して同様に陽電子の波動関数を計算したところ、空孔のみでは空孔位置に強く局在していた陽電子が、いずれも周囲の格子間にやや広がることがわかった(図3,4)。これは、空孔の中心位置に水素を配置したために、陽電子と水素の斥力が働いたためであると考えられる。また、これらの水素を配置した空孔では陽電子波導関数の分布にも顕著な違いは見られなかった。そこで、これらの波動関数から求めた陽電子寿命値について比較する。表1に、各種空孔での陽電子消滅寿命計算結果を示す。水素を含まない空孔では鉄空孔の方がAl空孔に比べ、およそ10psecほど高い値を示すことがわかった。実験で確認されている空孔寿命はこれらの中間的な値であり[4]、これは本計算が緩和を考慮していないことを考えると、熱平衡で鉄空孔が優先的に生成するとされる報告とも一致しており[5]、空孔単体の状態では陽電子によりこれらを識別可能であることがわかった。また、水素を中心に配置したV-Hの場合、空孔種に依存せず値は同じで、完全結晶に近い値まで下がった。これは、今回の計算では水素を格子位置に配置したことにより、ほぼ完全結晶と同じ位置に原子が配置されたためと考えられるが、実際の配置は第一原理計算では中心の格子位置とはずれた位置で安定性が高いことがわかり、水素の数を増やしても中心位置には存在しないことがわかった。そのため、今後は第一原理計算での安定配置を取り入れた陽電子計算に展開する必要がある。

**【まとめ】**

今回の計算で、B2型FeAl合金中の空孔種は陽電子にて同定可能であり、特に照射などにより非平衡に導入された空孔の形態の特定に繋がることが示唆された。また、水素との相互作用については、緩和を取り入れた安定構造計算を行う必要があり、現在計算している安定配置を今回構築した陽電子計算プログラムへ取り込んで陽電子計算を行うとともに、H26年度に実施した電子線照射した試料の陽電子消滅測定および解析結果との比較検討を今後実施する。

**【研究組織】**

- 堀 史説 (大阪府立大学、研究代表者)
- 大澤 一人 (九州大学応用力学研究所、所内世話人)
- 上野陽平 (大阪府立大学、研究協力者)

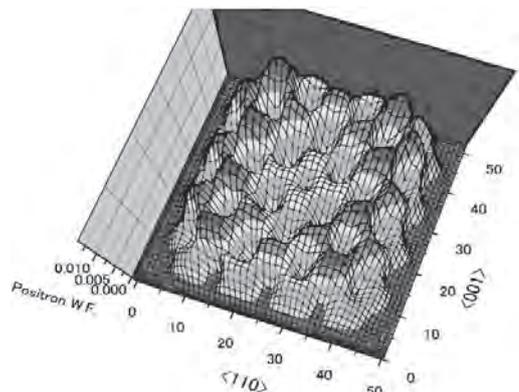


図3: 水素原子をFe単空孔中心に配置したFeAl合金での陽電子波動関数

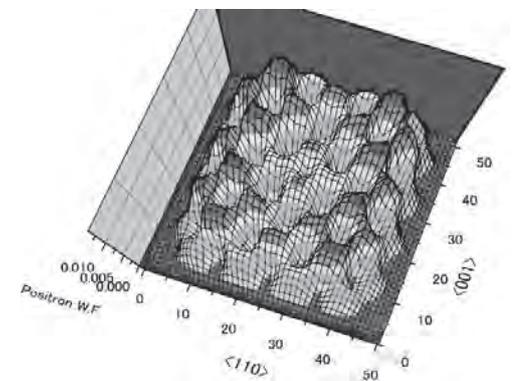


図4: 水素原子をAl単空孔中心に配置したFeAl合金での陽電子波動関数

表1 B2-FeAl合金中の陽電子寿命の計算結果

	陽電子寿命(ps)
完全結晶	112
V <sub>Fe</sub>	195
V <sub>Fe</sub> + H	113
V <sub>Al</sub>	182
V <sub>Al</sub> + H	113
V (実験値)	187 <sup>[4]</sup>

**参考文献**

- [1] M.J.Puska, R.M.Nieminen; J.Phys. F: Met.Phys, vol.3, 20 (1991) 3455.
- [2] F.Harman, S.Skillman ;Atomic Structure Calculations, Prentice Hall Inc.
- [3] E.Boronski, R.M.Nieminen; Phys. Rev. B346 (1986) 3820.
- [4] T.Haraguchi, F.Hori, R.Oshima and M.Kogachi; Intermetallics 9 (2001) 763.
- [5] T.Haraguchi, M.Kogachi, S.M.Kim; Intermetallics 6, 6 (1998) 499.

## 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

原子力・核融合分野において様々な機器構造材料として用いられている Fe 基合金の、照射環境下での脆化機構の解明と非破壊評価法の検討が求められている。それらを効率的に進める研究手法として、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。高温環境下で二相分離により脆化が生じるとされる Fe-Cr 合金に着目し、膜厚 30nm の Fe-20%Cr 単結晶薄膜を 475°C でイオン照射した結果、磁気ヒステリシス曲線の保磁力の増加を確認し、二相分離の照射促進を磁氣的に捉えたと考えている[参考文献1]。これまでの実験では、試料作製の制約から膜厚の薄い単結晶合金について調べてきた。実材料に与える照射効果を考える上で、さらに膜厚の厚い試料の作製と照射実験が必要である。このような考えに基づき、膜厚 180nm の Fe-20%Cr 単結晶膜を作製し、成膜中の詳細な構造評価を実施するとともに、磁気ヒステリシス特性に与える重イオン照射効果を調べた。また、並行して膜厚 330nm の純鉄単結晶を作製して重イオン照射を行い、陽電子  $\mu$  プローブを用いた陽電子寿命測定を行った。

## 方法

超高真空中で電子ビーム蒸着により試料を作製した。MgO(001)基板上に室温で Fe-20%Cr 合金を成膜し、180nm 積層後、600°C で 10min 熱処理を行った。成膜および熱処理時には、反射高速電子線回折 (RHEED) 観察を行い、結晶構造・薄膜形態を観察した。その後、タンデム型加速器 (九大・応力研) を用いて、照射温度 3 条件 (室温、290°C、475°C) で 2.4MeV の  $\text{Cu}^{2+}$  イオンを照射した (照射量:  $1.2 \times 10^{18}$  個/ $\text{m}^2$ )。未照射材と照射材のそれぞれの磁気ヒステリシス特性を VSM により測定した。並行して膜厚 330nm の純鉄単結晶薄膜を作製し、室温と 290°C で  $\text{Cu}^{2+}$  イオン照射をした後、陽電子  $\mu$  プローブ (産総研) で陽電子寿命測定を行った。

## 結果および考察

図 1 に RHEED 観察の結果を示す。Fe-Cr 薄膜は膜厚が薄い段階では MgO(001)と膜面内で 45 度回転した Fe-Cr(001)が成長した(図 1(a))。ところが膜厚が厚くなると、Fe-Cr(001)に加えて Fe-Cr(221)の双晶ドメインが島状成長することを確認した(図 1(b))。この成長挙動は、純鉄でも同様に確認された。この種の報告はこれまでに無く、その成長機構の解明には成膜条件を系統的に変えた実験がさらに必要であるが、原因の一つとして MgO(001)基板のステップに起因して生じる厚さ方向の格子整合性が関係すると考えている。一方、600°C で熱処理すると(221)の回折パターンは消え、(001)のみのストリーク状パターンとなった(図 1(c))。

図 2 に磁化測定の結果を示す。保磁力は、未照射材でも保時温度が高くなると小さく、照射によ

りさらに減少する傾向が見られた。これは、膜厚 30nm の Fe-20%Cr 単結晶薄膜の 475°C 重イオン照射[参考文献 1]および Fe-20%Cr バルク材の 290°C 中性子照射[成果報告 1]で見られた、保磁力増加と挙動が異なる。本実験では膜厚が厚い場合、成膜時に(221)双晶ドメインが成長した。成膜直後の熱処理により双晶ドメインは消失したと考えているが、何らかの残存欠陥組織が照射により回復することで保磁力が低下した可能性がある。残存欠陥組織の存在を示唆する結果として、未照射の膜厚 330nm の純鉄単結晶薄膜で陽電子寿命が長いことが確認している[成果報告 2]。今後、(221)成長の影響を排除した試料の検討が必要である。

**参考文献**： [1] Y. Kamada, H. Watanabe, S. Mitani, J. N. Mohapatra, H. Kikuchi, S. Kobayashi, M. Mizuguchi, and K. Takanashi: Ion-irradiation Enhancement of Materials Degradation in Fe-Cr Single Crystals Detected by Magnetic Technique, J, Nucl, Mater. 442 (2013) S861-864.

**成果報告**： [1] 兜森達彦, 鎌田康寛, 小林悟, 三谷誠司, 渡辺英雄, “Fe-Cr2 元合金の磁気ヒステリシス特性に与える照射効果”, 日本金属学会東北支部第 30 回研究発表大会, 講演概要集 p16, 岩手大, 盛岡, 2014.12.10

[2] N. Oshima, Y. Kamada, H. Watanabe, A. Kinomura and R. Suzuki, Development of Combinatorial Defect analysis with an Intense Positron Microprobe, JJAP Conf. Proc. 2 (2014) 011306/1-10. 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

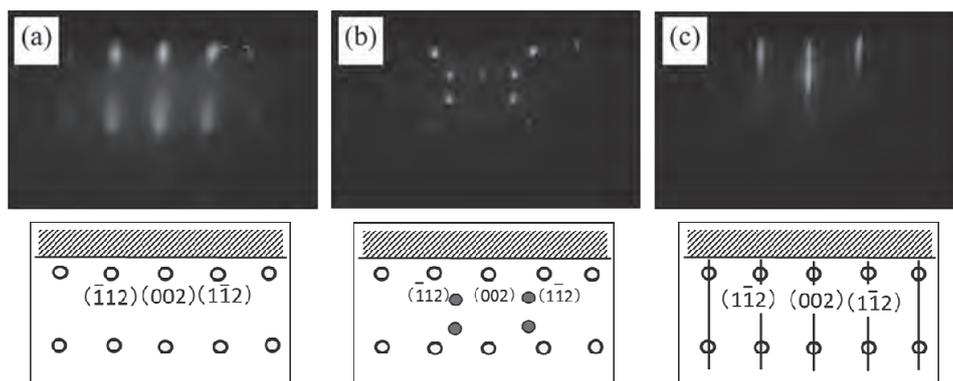


図 1 Fe-20%Cr 合金薄膜の成膜中の RHEED 観察。[100]MgO 入射。  
(a) 10nm 積層後、(b)100nm 積層後、(c) 180nm 積層後に 600°C アニール

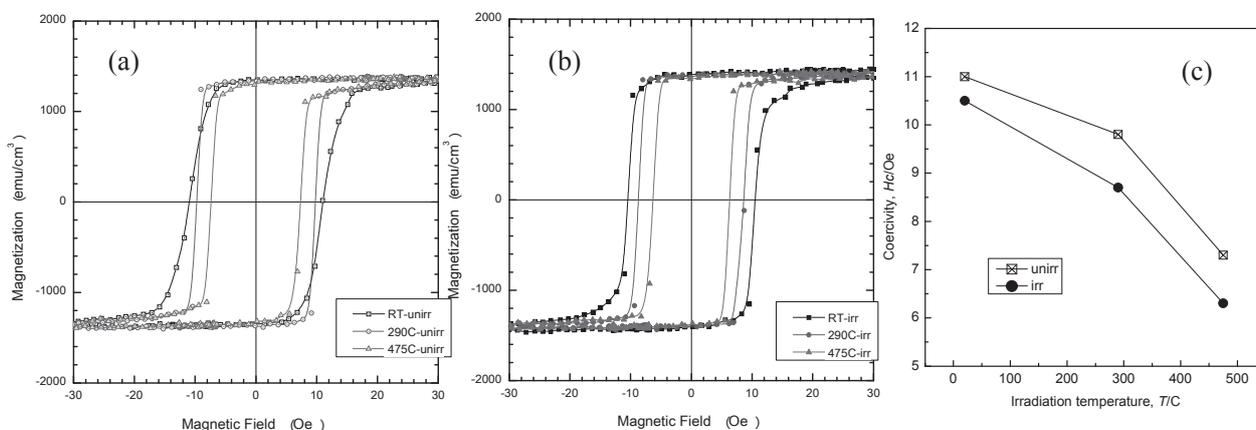


図 2 Fe-20%Cr 合金薄膜の磁気特性に与える重イオン照射効果  
(a)未照射試料および(b)照射試料の M-H 曲線、(c)保磁力の照射効果

## 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（第2報）

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もので、これらと、本共同研究結果の比較を行う。これらが本共同研究のあらましであるが、現在、電子ビーム装置が修理中であるので、本年度はサンプル材料のレーザー照射を準備した。内容の中心は、タングステンコートしたダイヤモンド（複合）層による、高エネルギー密度入射下装置壁の損耗破壊に起因する各種装置の破壊予防モニターの提案と、その初期実験結果の報告である。

## 厳しい環境下にある内壁検査のための変位計光学モニターの提案

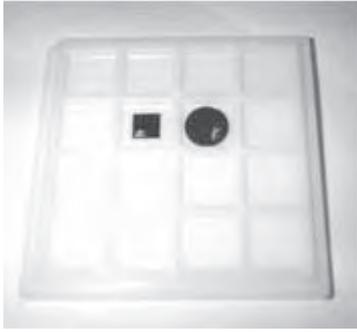
厳しい環境下に置かれる構造物の代表的なものは、核融合装置の観測窓、第1壁、リミター、ダイバーターなどの、いわゆるプラズマ対向壁である。

昨年度の本研究成果報告書には、WやSiCの耐力測定結果を書いたが、市販の多結晶CVDダイヤモンドの耐力も、我々の以前の研究で、明らかになっている。そこで、ここでは、一例として、タングステンコートしたダイヤモンド（複合材料）層を、同じく市販の表面変位計と組み合わせた損耗計測利用・炉壁破壊防止監視モニターを提案する。

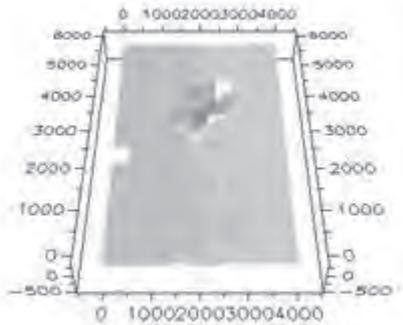
## タングステンによるモニターヘッドの表面コーティング

エルミネット社に依頼して、ターボスパッターコーターによる英国製多結晶CVDダイヤモンド円板（直径8mm）のタングステンコーティングを行った。コーティング条件は(a)50mA×5分（スピード5.8nm/分×5分）の予備コーティングにより、29nm厚さのコーティングを行い、(b)100mA×60分（スピード11.8nm/分×60分）の708nmの主コーティングを行った。これらの厚さは概算予想値で、実際の厚さ測定は、別所に示す。コーティング後の円板を第1図右側に示す。図中左側の四角形状のものは、別の米国製のものである。両板上には、左下コーナー部と右下コーナー部に、コート層の一部を機械的にはがした切り欠き部がある。これらは、レーザー損耗小穴作成前に、試験的に作成した模擬損耗穴である。

上記のサンプルを変位計により計測した結果、第2図（3次元鳥瞰図例）が得られた。切り欠き部は、ダークアウト領域として観測できた。このようなモニター複合層を核融合装置内壁に面一に設置しておけば、高密度熱入射によるタングステン薄層の損耗が発生する場合に、これを検知して警告を発することができる。ArFレーザーの多重照射による小穴作成模擬実験は、近く実施する予定である。



第1図 タングステンコートしたダイヤモンド板例



第2図 切り欠き付サンプルの変位計測定結果  
(3次元鳥瞰図中にブラックアウト穴の観測)

#### 核融合反応炉の安全監視モニター用変位計の候補

監視モニターシステムの1例が、別論文に示してある。上記のようなタングステンコートのダイヤモンドサンプルを、炉壁に面に設置する。サンプル背後に設置した変位計により、タングステン表面の損耗を監視する。核融合プラズマの高熱流負荷によりタングステン層の一部或いは全部が損耗消失する時、ダークアウト信号の開始をモニターできる。もちろん、ダークアウト以前のタングステン層厚さ減少を観測できる場合には、より早期の警戒信号を発することができる。これにより、炉のメンテナンスに移行することが可能となる。

市販の変位計の中で、当該モニターに使いそうなモデル例として、キーエンス社の以下のものがある。ダークアウト信号のみの観測でよい場合には、SIシリーズ(熱耐力に応じて、SI-F01, SI-F10, SI-F80)がある。より高度の変位計として、タングステン薄層厚さの定量的測定ができるものが望まれる。もちろん、この場合の純タングステン層厚さは、炉壁の大部分を占める場所のタングステン厚さよりも

かなり薄い厚さである。この場合、タングステンコートなしのダイヤモンド板を、タングステンと変位計先端部の間に設置し、タングステン損耗小穴等が発生する場合に、炉全体の真空度低下などに伴う稼働の妨げがないようにする。この場合、SI-F80R厚さ計が有用である。但し、現存の厚さ計で測定可能とするには、損耗によりできるクレーター形状に、厚さ計側から見て凹面状態となる部分を含む必要がある。これらの計測ヘッド群とは別に、SI-Tシリーズセンサーヘッド(SI-T10, SI-T80)があるが、これらは、全タングステン仕様の炉壁のごく一部に純ダイヤモンド板を面に設置したモニターの場合に有効である。もちろん、先と同様に、現存の市販計器を使う場合、観測できるクレーター形状に、上記と同様の制限がある場合に限られる。

#### 謝辞

本研究を進めるにあたり、東工大名誉教授の井関孝好先生、応用ながれ研究所、レーザー技術総合研究所、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、(株)エルミネット などの方々にお世話になった。

#### 発表資料

- [1] K.Kasuya et al., Laser Erosion Diagnostics of Plasma Facing Materials with Displacement Sensors and their Application to Safe Guard Monitors to Protect Nuclear Fusion Chambers, 20<sup>th</sup> International Symposium on High Power Lasers and Applications, 25.08.2014-29.08.2014, Chengdu, China, Proceedings in print (2015).
- [2] K.Kasuya et al., Laser Erosion of Plasma Facing Materials: Observations with Displacement Sensors and Their Applications, レーザ研シンポジウム2015報告書, 平成27年4月8日-9日, 大阪大学・銀杏会館、印刷中 (2015).

## 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)では、ヘリウムプラズマによる長時間放電の研究が行われている。加熱入力は水素マイノリティの ICH+ECH が用いられており、平成 25 年度の実験においては平均で 1.2MW の加熱入力で  $T_{i,e} \sim 2 \text{ keV}$ ,  $n_e \sim 1.2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$  のプラズマを 47 分間にわたって維持することに成功している。密度フィードバックの粒子供給制御により、47 分間の放電時間全域にわたってほぼ一定の電子密度を得ることができたが、そのバックグラウンドでは「①壁排気率の動的変化」と「②不純物混入によるプラズマ放電の停止」という 2 つの制御困難な問題を抱えていた。LHD のプラズマ対向壁は 90%以上が第一壁材料であるステンレス鋼(SUS316L)、残りの 5%程度が炭素性のダイバータタイルで構成されている。放電中は第一壁の温度はほぼ室温に保たれている。平成 25 年度までに実施した応用力学研究所との共同研究において、このような対向材料の特徴が①と②の物理に深く関わっていることが少しずつ明らかになってきた。特に注目すべきは、長時間放電中の対向材料表面には、放電中にダイバータタイルや第一壁からスパッタリングされた炭素や鉄の不純物が堆積することで、炭素を主とし、鉄をわずかに含む Mixed-material 堆積層が連続して形成され続けることが示されたことである。この堆積層にヘリウムが吸蔵・放出されることで LHD の長時間放電中の粒子バランス、つまり壁排気の動的変化に影響を与えていることが予想される。また、Mixed-material 堆積層は構造的に脆い性質を有しており、熱負荷や堆積層中に発生するガスバブルの圧力などによって剥離を引き起こし、プラズマ中に混入することが考えられる。このように、Mixed-material 堆積層の構造特性評価とそこに捕捉されるヘリウム粒子の定量評価を行うことで、①と②を引き起こす物理を解明できる可能性がある。今年度の研究では、昨年度得られた上記の知見に対して次のような追加解析を実施した。①では、材料中に捕捉されるヘリウム粒子が実際の粒子バランスに対してどの程度の量であるのかを定量的に比較検討した。②では、堆積層の構造特性をより詳細に解析することで堆積層の剥離機構のモデル化を目指した解析を実施した。

### 【実験方法】

ステンレス鋼試料を LHD の第一壁位置まで挿入し、「目的」の節で述べたヘリウムの長時間放電に 1000 秒、3389 秒、9980 秒曝露した。取り出した試料表面には Mixed-material 堆積層が形成されており、この試料に対して集束イオンビーム加工観察装置(FIB)と透過型電子顕微鏡(TEM)を用いて表面微細構造のナノ観察を行った。また、昇温脱離ガス分析装置(TDS)を用いて捕捉されたヘリウム粒子の定量評価を実施した。昨年度実施した結果も含まれるが、今年度はグローバル粒子バランス解析との比較を行うことで「①壁排気率の動的変化」の機構解明を目指した。また、LHD のダイバータタイルや第一壁に堆積した Mixed-material 堆積層に対しても FIB と TEM を併用した微細構造解析を行い、「②不純物混入によるプラズマ放電の停止」の機構解明を目指した。こちらについても、昨年度実施した結果も含まれるが、より詳細な考察を行った。本報告書では「①壁排気率の動的変化」の機構解明についてのみ報告する。

### 【結果および考察】

図 1 に LHD 長時間放電に(a)1000 秒、(b)3389 秒、(c)9980 秒曝露したステンレス鋼(SUS)試料とその表面に堆積した Mixed-material 堆積層の断面 TEM 像を示す。曝露時間が増加するごとに堆積層の厚さも増加していることがわかる。また、電子線回折(ED)像から、堆積層の構造はアモルファスに近い微細構造を有していることが明らかになった。加速器を用いたイオンビーム分析の結果から、堆積層の組成は 98%が炭素、2%が鉄で構成されている Mixed-material 堆積層であることが確認された。TEM 像のコントラストから判断して、この堆積層はポーラスな構造であり、空隙を多く有している。このような空隙部がプラズマから入射するヘリウム粒子の捕捉サイトとして機能している可能性が考えられる。

次に、この堆積層にどの程度のヘリウム粒子が捕捉され、その捕捉率は単位時間当たりどの程度であるのかを定量的に求めるための解析を行った。昨年度の TDS 実験結果により、定常長時間放電曝露後の試料では、室温(300K)から 600K までに急激なヘリウムの放出が確認されている。このような室温付近での放出は、弱い捕捉機構であり、大分分が Mixed-material 堆積層に捕捉された、ヘリウムである可能性が高い。そこで、

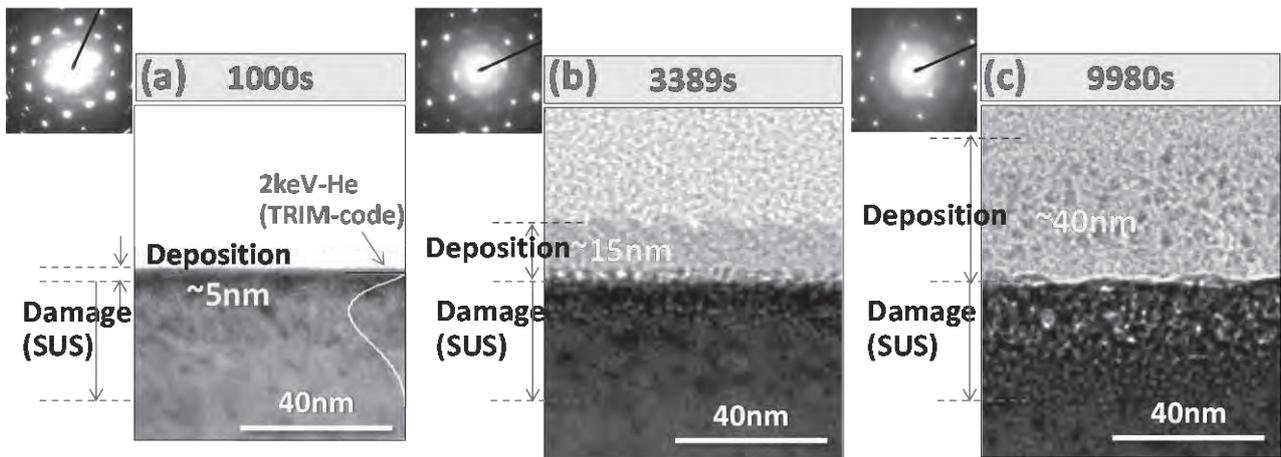


図 1. LHD 長時間放電に(a)1000 秒, (b)3389 秒, (c)9980 秒曝露したステンレス鋼(SUS)試料とその表面に堆積した Mixed-material 堆積層の断面 TEM 像. 各 TEM 像左上に示した図は堆積層と SUS 基盤の電子線回折(ED)像.

300-600K までの放出量の積分値を定常放電への試料の曝露時間に対してプロットした図を図 2 に示す. この図より, Mixed-material 堆積層へのヘリウムの捕捉率は堆積層の厚さの増加と共にリニアに増加し, その捕捉量は 10000 秒経過後であっても飽和する傾向が無いことがわかる. これはすなわち, Mixed-material 堆積層が形成され続ける限り長時間放電中のヘリウムの壁排気が飽和することなく継続することを示唆している. 47 分間の放電におけるグローバル粒子バランス解析の結果では[1], 壁排気率( $\Gamma_{wall}$ )は時間と共に動的に変動することが示されており, その排気率は  $\Gamma_{wall} \sim 1.0 \times 10^{20}$  He/s (0-300s),  $\Gamma_{wall} \sim 3.5 \times 10^{18}$  He/s (400-1500s),  $\Gamma_{wall} \sim 1.4 \times 10^{19}$  He/s (1900-2800s) となる. これに対して, 図 2 の材料分析結果から求められる Mixed-material 堆積層へのヘリウムの平均の捕捉率  $1.6 \times 10^{16}$  He/m<sup>2</sup>s で壁排気率を予測すると, Mixed-material 堆積層が LHD の壁全体の 3/4 (~548m<sup>2</sup>)に形成されていると仮定した場合,  $\Gamma_{wall} \sim 8.8 \times 10^{18}$  He/m<sup>2</sup>s と見積もることができる. この値はグローバル粒子バランスで求めた 1900-2800s のときの壁排気率  $\sim 1.4 \times 10^{19}$  He/s に近い値である. 本結果より, 長時間放電中に発生する壁排気率の動的変化は, 壁表面に連続して形成される Mixed-material 堆積層による影響が極めて高いことが示唆される. 今後は, 加熱入力がさらに高くなった場合に壁温度がどのように変化し, それに伴う壁排気特性の変化について研究を進めていく必要がある.

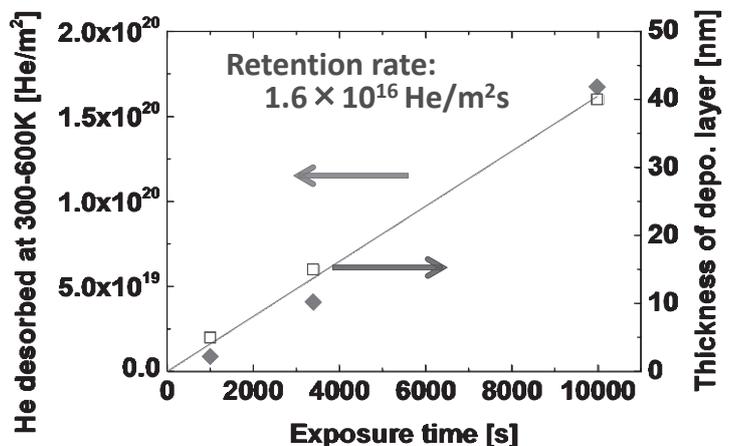


図 2. 照射時間増加に伴う 300-600K における He 放出量と Mixed-material 堆積層の厚さの関係

#### Reference

[1] G. Motojima et al., J. Nucl. Mater. in press

#### 【成果報告】

M. Tokitani et al., "Plasma wall interaction in long-pulse helium discharge in LHD – Microscopic modification of the wall surface and its impact on particle balance and impurity generation" J. Nucl. Mater. accepted, in press

## 1. はじめに

プラズマに照射される材料の表面状態は、照射損傷、スパッタリング、再堆積、バブル形成等の様々なプラズマ・壁相互作用 (PWI) 現象に起因して変化する。この表面改質が壁の水素吸蔵・放出特性に与える影響の理解は、材料の特性を理解する上で重要である。本研究では、低損耗、高融点、低水素吸蔵率という特長から現在注目を集めているタングステン材料に着目し、小型の直線型プラズマ生成装置 APSEDAS を用いた低エネルギー・高フラックスプラズマのタングステンへの照射及びタンデムミラー型プラズマ閉じ込め装置 GAMMA10 を用いた高イオン温度プラズマのタングステンへの照射実験を行い、極限環境下におけるタングステン中の水素吸蔵、材料損傷に関する基礎過程の理解を深めることを目的としている。本報告では、ヘリウムバブルの効果を中心に報告する。

## 2. 実験結果及び考察

タングステン表面へのヘリウムバブル生成は APSEDAS を用いて行われた。通常は試料を冷却ステージにしっかりと固定するが、今回は冷却が効かないようにステージの上に設置した。このタングステン試料 (ニラコ社製、厚さ 0.1mm) に対して、フルエンス  $4\sim 8 \times 10^{25} \text{ He/m}^2$  程度ヘリウムプラズマを照射した。ヘリウムのフラックスは約  $2 \times 10^{22} \text{ He/m}^2\text{s}$  であり、エネルギーは約 30 eV であった。また、タングステンの表面温度は、1700 K ~ 1900 K であった。このようなヘリウムプラズマにより生成されたタングステン表面の SEM 画像を図 1 に示す。表面に数  $\mu\text{m}$  以下の凹凸や筋模様ができていることが分かる。また、FIB 加工と TEM 観測を組み合わせた試料の断面画像を図 2 に示す。表面直下に約 10nm から 200nm 以下のヘリウムバブルが形成されていることが分かる。

ヘリウムプラズマを照射して、表面にヘリウムバブルを形成したタングステン試料に対して、昇温脱離装置を用いた加熱 (昇温速度 1 K/s、最高温度 1173 K) により試料内部のヘリウムの脱離を 3 回実施した。これにより、800 K 以下でのヘリウムの脱離は観測されなくなった。この試料に対して、APSEDAS を用いて重水素プラズマ照射を行い、その後昇温脱離スペクトル (TDS) 測定を行った。

今回の実験では、同一のヘリウム予照射試料に対し、フルエンスを変えて重水素プラズマ照射とその後の TDS 解析を繰り返して行った。ヘリウム予照射試料に用いた重水素プラズマパラメータは、電子密度が  $2\sim 3 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ 、電子温度が 6~8 eV、空間電位が 20~30 V、フラックスが  $2.6\sim 3.0 \times 10^{21} \text{ D/m}^2\text{s}$  であり、プラズマ照射中の試料温度は約 500K であった。重水素プラズマの照射時間は、600 秒~約 14000 秒であり、重水素フルエンスは  $1.6 \times 10^{24} \sim 4 \times 10^{25} \text{ D/m}^2$

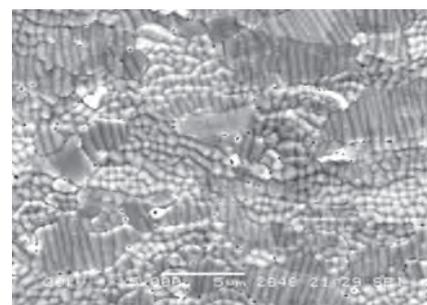


図 1 ヘリウムプラズマ照射されたタングステン試料表面の SEM 画像

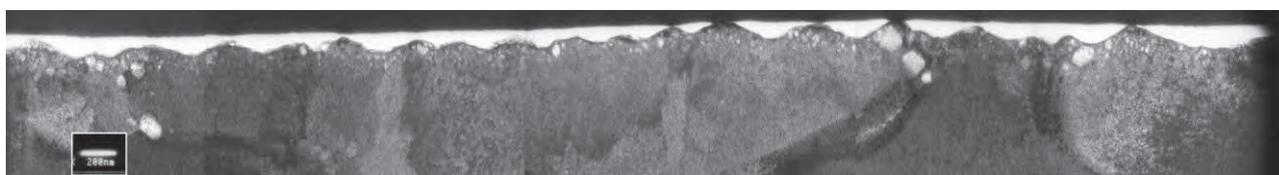


図 2 ヘリウムプラズマ照射されたタングステン表面の断面 TEM 画像

である。TDS の条件は昇温速度 1 K/s、最高温度は 750 K である。図 3 に重水素プラズマ照射(フルエンス  $1.8 \times 10^{24}$  D/m<sup>2</sup>)を行ったヘリウム予照射試料の高分解能 QMS 解析による昇温脱離スペクトル(昇温速度 1K/s)を示す。重水素の脱離が約 600 K 以下で起きているのに対し、ヘリウムの脱離は 1000K 以上で主に観測されている。TDS 中の最高温度が高い場合、材料内におけるバブルの移動(>1300K)や高温側に捕捉されているヘリウムの脱離による特性の変化が考えられるため、実際の TDS 測定では最高温度を低く設定(773K)した。

図 4 にヘリウム予照射タングステン試料とヘリウム未照射試料に対する重水素リテンションのフルエンス依存性を示す。ヘリウムプラズマを照射していない未照射タングステンの重水素リテンションはフルエンスの約 0.5 乗で増加するが、ヘリウム予照射試料では、低フルエンス側ではリテンションが未照射タングステンよりも 1 桁以上高いのに対し、高フルエンス側ではリテンションが飽和傾向にあり、未照射タングステンとほぼ同じ値になっていることが分かる。この現象は、ヘリウムバブル層が、重水素の捕捉サイトになっていることと同時に材料中の重水素の放出も促進していることを示唆していると考えられる。6 番目と 7 番目のリテンションが低いのは、それまでの重水素プラズマ照射と TDS の繰り返しにより、ヘリウムバブル層の特性が変化したものであると考えられる。

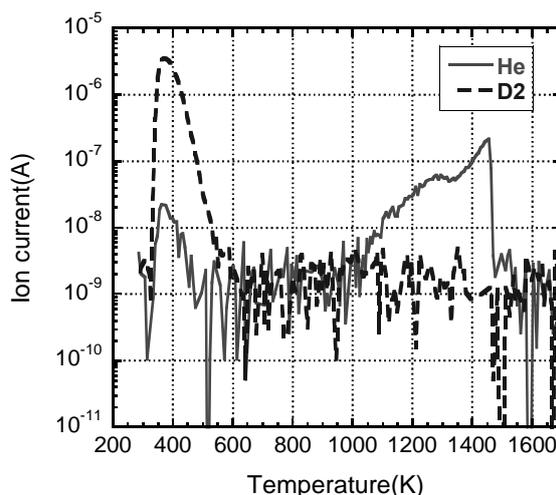


図 3 重水素プラズマ照射を行ったヘリウム予照射試料の高分解能 QMS 解析による昇温脱離スペクトル

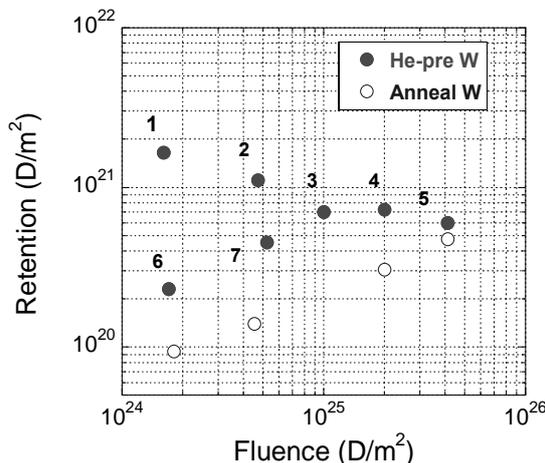


図 4 ヘリウム予照射タングステン試料と未照射試料に対する重水素リテンションのフルエンス依存性。図中の数字は重水素プラズマ照射の順番を示している。

### 3. 研究組織

氏名	所属	職名等	役割分担
坂本 瑞樹	筑波大学・数理物質系	教授	代表者
大木 健輔	筑波大学・プラズマ研究センター	研究員	プラズマ計測
吉川 基輝	筑波大学・数理物質科学研究科	大学院生 (M2)	表面計測
野原 涼	筑波大学・数理物質科学研究科	大学院生 (M2)	プラズマ計測
寺門 明紘	筑波大学・数理物質科学研究科	大学院生 (M1)	表面計測
野尻 訓平	筑波大学・数理物質科学研究科	大学院生 (M1)	プラズマ計測
宮本 光貴	島根大学・大学院総合理工学研究科	准教授	水素吸蔵解析
時谷 政行	核融合科学研究所	助教	微細組織解析
渡邊 英雄	九州大学・応用力学研究所	准教授	所内世話人
吉田 直亮	九州大学・応用力学研究所	名誉教授	微細組織解析

## 輸送コードに導入するためのジャイロ運動論解析を用いた熱拡散係数のモデリング

核融合科学研究所 登田慎一郎

磁気核融合装置におけるプラズマ閉じ込めを行うには、乱流輸送は最も重要な課題のひとつである。最近では、トロイダルプラズマにおいて多数のジャイロ運動論シミュレーションが行われている。LHDにおけるITGモードや帯状流を研究するのにジャイロ運動論方程式を解くGKV-Xコードが使われている。LHDでの高イオン温度放電(#88343)のときに、簡約化モデル  $\chi_i \sim \rho_{ti}^2 v_{ti} f(\mathcal{L}, \tilde{\tau}_{ZF})/R$  が提唱されている。 $\mathcal{L}$ は混合長概算  $\tilde{\gamma}_{\tilde{k}_y}/\tilde{k}_y^2$  を  $\tilde{k}_y$  空間で積分したものである。ここで、 $\tilde{\gamma}_{\tilde{k}_y}$  はITGモードを規格化した線形成長率で、 $\tilde{\tau}_{ZF}$  は規格化した帯状流崩壊時間である。しかしながら、TASK3Dのような動的な輸送コードで時間ステップごとにジャイロ運動論線形シミュレーションを行うのはコストがかかる。なぜならヘリカルプラズマを対象とする輸送解析は、径電場や磁場配位を正確に評価するために径方向に高解像度が必要だからである。本研究では、低計算コストでの、ジャイロ運動論シミュレーションから導かれたITGモードの乱流熱拡散係数に関する簡約化モデルの適用方法を示す。簡約化モデルの中の項  $\mathcal{L}$  は、動的な輸送コードでのプラズマ不安定性のパラメータ依存性を含むことが必要である。イオン温度勾配の典型長  $L_{Ti} (= -T_i/(\partial T_i/\partial r))$  が  $\mathcal{L}$  を、輸送コードで適用するパラメータとして選ばれる。磁場配位は輸送シミュレーションの初期状態で固定される。項  $\mathcal{L}$  に対する式を  $L_{Ti}$  に関してモデル化した。帯状流の崩壊時間は磁場配位にのみ依存し、プラズマ分布には依存しない。従って、帯状流崩壊時間の式は初期状態でのみ計算する必要がある。項  $\mathcal{L}$  と  $\tilde{\tau}_{ZF}$  の式を簡約化モデルに代入した計算は、簡約化モデルの値を許容できる誤差の範囲内で再現できる。輸送シミュレーションでの時間ステップごとで乱流イオン熱拡散係数の値を得るためのコストは、本研究でのモデリングによれば、線形ジャイロ運動論シミュレーションによるものよりも大きく削減できる。本研究で示すモデリングは輸送コードに適用され、シミュレーション結果をLHDにおける実験結果と比較研究することができる。

初めに、LHDでの高イオン温度放電(#88343)におけるITG不安定性について考察した。

まず、乱流イオン熱拡散係数  $\chi_i^{(1)}/\chi_i^{GB}$  の値は関数  $\mathcal{L} (\equiv \int (\tilde{\gamma}_{\tilde{k}_y}/\tilde{k}_y^2) d\tilde{k}_y)$  だけで、 $\chi_i^{(1)}/\chi_i^{GB} = C_0 (C_T \mathcal{L})^\delta$  のように近似されている。ここで  $\chi_i^{GB}$  はジャイロボーム因子であり、規格化は  $\tilde{\gamma} = \gamma/(v_{ti}/R)$  と  $\tilde{k}_y = k_y \rho_{ti}$  である。また  $\mathcal{L}$  と  $\tilde{\tau}_{ZF} (= \tau_{ZF}/(R/v_{ti}))$  の関数であるITG乱流熱拡散係数の簡約化モデルは、 $\chi_i^{(2)}/\chi_i^{GB} = A_1 \mathcal{L}^\alpha / (A_2 + \tilde{\tau}_{ZF}/\mathcal{L}^{1/2})$  のように得られている。 $C_0, C_T, A_1, A_2, \alpha$  と  $\delta$  は数値因子である。イオン温度勾配の特性長がITG不安定性に重要なパラメータであると考えられている。 $L_{Ti}$  の関数として、パラメータ  $\mathcal{L}$  は以下のようにモデル化される。

$$\mathcal{L} = a(\rho) \left( \frac{R}{L_{Ti}} - \frac{R}{L_{Tc}} \right) \quad (1)$$

ここで  $L_{Tc}$  はITGモードが不安定化する規格化したイオン温度勾配である。ITGモードにおける  $L_{Tc}$  を調べるために、イオン温度勾配以外のプラズマパラメータを固定して、 $\mathcal{L}$  の  $R/L_{Ti}$  に対する依存性を調べた。密度やイオン温度分布については、LHD高イオン温度放電(#88343)での時刻  $t = 2.233\text{s}$  の実験結果を用いた。径方向点で線形関数(1)を計算し、 $R/L_{Tc}$  の値を得た。ITGモードの臨界イオン温度勾配(a)  $R/L_{Tc}$  と  $R/L_{Ti}$  に関する傾き(b)は図1で得られる。統合輸送コードでイオン熱拡散係数を計算する際、 $R/L_{Tc}$  と  $a(\rho)$  の補間多項式  $R/L_{Tc} = 4.0929 - 3.7681\rho + 19.712\rho^2 + 11.087\rho^3 - 14.272\rho^4$  と  $a(\rho) = 0.38661 - 0.070919\rho + 0.2571\rho^2 + 0.95949\rho^3 - 0.92978\rho^4$  を使用する。

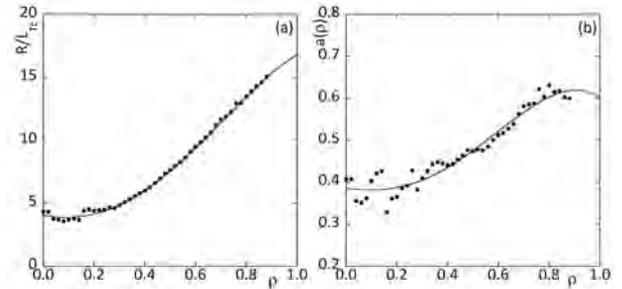


図1: (a)  $R/L_{Tc}$  と (b)  $a(\rho)$  の径方向依存性

帯状流崩壊時間に対する補間関数は  $\tilde{\tau}_{ZF}(fit) = 0.98565 - 0.65943\rho + 2.4471\rho^2 + 3.2337\rho^3 - 2.8382\rho^4$  で与えられ、輸送シミュレーションの際に使われる。項  $a(\rho)(R/L_{T_i} - R/L_{T_c})$  を  $\chi_i^{(1)}/\chi_i^{GB}$  の  $\mathcal{L}$  に代入した最初のモデル化したイオン熱拡散係数は、

$$\frac{\chi_i^{FTS(1)}}{\chi_i^{GB}} = C_0 \left( C_T a(\rho) \left( \frac{R}{L_{T_i}} - \frac{R}{L_{T_c}} \right) \right)^\delta \quad (2)$$

で示される。項  $a(\rho)(R/L_{T_i} - R/L_{T_c})$  を  $\chi_i^{(2)}/\chi_i^{GB}$  の  $\mathcal{L}$  に代入し、補間関数  $\tilde{\tau}_{ZF}(fit)$  を  $\chi_i^{(2)}/\chi_i^{GB}$  の  $\tilde{\tau}_{ZF}$  に代入した2つめのモデル化したイオン熱拡散係数は

$$\frac{\chi_i^{FTS(2)}}{\chi_i^{GB}} = \frac{A_1 \left( a(\rho) \left( \frac{R}{L_{T_i}} - \frac{R}{L_{T_c}} \right) \right)^\alpha}{A_2 + \tilde{\tau}_{ZF}(fit) / \left( a(\rho) \left( \frac{R}{L_{T_i}} - \frac{R}{L_{T_c}} \right) \right)^{1/2}} \quad (3)$$

で与えられる。輸送コードの各時間ステップごとに乱流イオン熱拡散係数の値を得るために、式(2)と(3)が使われる。

次に TASK3D を使って、モデル化したイオン熱拡散係数を適用し輸送ダイナミクスを考察した。イオン温度分布の初期条件として、LHD 高イオン温度放電 (#88343) において  $t = 2.233s$  での実験結果を用いた。  $T_i$  分布ダイナミクスを拡散方程式を解析することにより考察した。径方向領域  $0.265 \leq \rho \leq 0.785$  で径電場の3つの解が求められる。径電場分布は時間的に固定する。式(2)と(3)を用いて乱流拡散係数を計算する。まず、正電場を選ぶ。図2において、 $t = 0.1s$  での定常イオン温度分布のシミュレーション結果を示す。図2(a)では、 $\chi_i^{FTS(1)}$  を用いたときのイオン温度分布のシミュレーション結果を示す。 $\chi_i^{FTS(2)}$  を用いたときのイオン温度分布を図2(b)で示す。LHD 放電 #88343 における  $t = 2.233s$  での  $T_i$  分布を破線で示している。図2では、 $T_i$  分布の解析結果は、実験結果と矛盾しない。

特に、乱流イオン熱拡散係数を  $L_{T_i}$  に加えて  $\tilde{\tau}_{ZF}$  でモデル化した図2(b)の場合、実験結果とシミュレーション結果との間でより良い一致が見られる。イオン温度勾配  $L_{T_i}$  による  $\mathcal{L}$  のモデリングには、違う  $L_{T_i}$  の値について3回のプログラム実行が径方向の1点について動的な輸送シミュレーションの前に必要である。1回のプログラム実行について1時間かかる。もし  $\mathcal{L}$  の値を TASK3D で時間ごとに計算すると、10万回のプログラム実行が必要である。それ故、ジャイロ運動論解析に基づく簡約化モデルのさらなるモデル化により輸送シミュレーションの低コスト化を行うことができた。次に負電場を選んだ。イオン中心温度は  $T_i \simeq 3.2keV$  になり、実験結果とは違いが見られる。

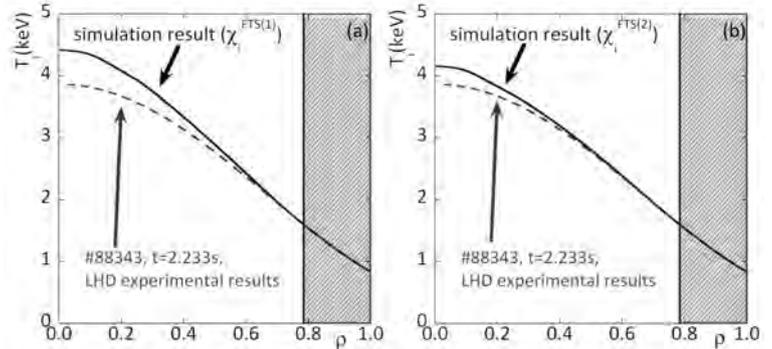


図2:  $T_i$  分布のシミュレーション結果

計算コストを減らすために、ジャイロ運動論解析の精度を保ったまま、動的輸送コードにジャイロ運動論解析に基づく輸送モデルの適用の仕方を示した。イオン温度勾配の典型長に関する付加的モデリングのために GKV-X コードを実行した。簡約化モデルの帯状流崩壊時間に対する補間式を与えられた磁場配位で求めた。非常に低計算コストで、さらにモデル化した乱流イオン拡散係数により、簡約化モデルの値を再現した。モデル化した乱流イオン拡散係数を動的な輸送コードに適用した場合の計算結果を示した。本研究では、許容できる誤差の範囲内で、ジャイロ運動論輸送モデルを輸送コードに適用する手法を提唱した。ここで示した乱流イオン熱拡散係数の式は LHD 高イオン温度放電 (#88343) で適用できる。

## 乱流計測シミュレータによる ジャイロ運動論的シミュレーション・データの数值乱流計測

核融合科学研究所 ヘリカル研究部 沼波 政倫

### 研究の目的

高温磁場閉じ込めプラズマ研究において、乱流輸送機構の解明と定量予測は最重要課題の一つである。ジャイロ運動論に基づいた第一原理シミュレーションによる数值解析は、その理解に向けた強力なツールの一つである。一方、シミュレーションに対する Validation 解析は、定量的な輸送評価に向けても必須である。本研究では、これまでに我々が進めてきたジャイロ運動論的乱流シミュレーションによって蓄積された乱流計算データに対して、応用力学研究所で開発が進められている乱流計測シミュレータを適用し、実験計測を数値的に模擬することで、ジャイロ運動論的シミュレーションの Validation 解析手法を確立することを目的としている。特に、乱流揺動分布の詳細な計測に威力を発揮する 2次元位相コントラスト・イメージング (2D-PCI) [1] による数值計測をこの乱流計測シミュレータで模擬し、シミュレーション内で観測される乱流揺動のスペクトル構造や空間分布を詳細に調べ、実際のプラズマ実験での観測結果と定量的な比較を行うことで、ジャイロ運動論的シミュレーションにおける定量的な乱流構造解析の手法確立を目指す。

### 研究方法

本研究課題で用いる乱流計測シミュレータは、磁場閉じ込めプラズマにおける乱流シミュレーションとその実験計測を模擬した数值診断を行うためのコード群である [2]。この中には、PCI、反射計、重イオンビームプローブ等が含まれており、乱流シミュレーションや計測手法の特性を考慮し、それぞれの組み合わせから、目的に応じた解析を選択し実行することができる。

本課題で対象とする乱流シミュレーション・データは、局所フラックス・チューブ配位の下でのジャイロ運動論的シミュレーション・コード GKV-X[3] で得られたポテンシャル揺動分布データを用いる。従って、実空間上での計測を模擬するにあたっては、いくつかの点においてデータの準備が必要になる。まず、対象となる揺動分布の時系列データを、乱流計測シミュレータに即した時系列データとして整理する。次に、局所フラックス・チューブ配位に対する幾何データを実空間配位に変換する。局所フラックス・チューブ近似の下で得られているシミュレーション・データは、磁気座標を用いた 3次元平衡コードによって空間幾何配位が計算されている。従って、数值揺動計測にあたっては、実空間上への変換が必要になるため、シミュレーション・データの計測シミュレータに適合したデータへの変換を進める。変換された乱流揺動データに対して、計測シミュレータを用いて、2次元 PCI 計測を模擬し、乱流揺動の波数空間スペクトルや実空間分布を計測する。ここで得られる計測結果とこれまでの乱流シミュレーション解析結果を基に、シミュレーションの Validation 手法の確立を進める。

### 今年度の成果

密度揺動の波数スペクトル計測に使われる PCI は、入射レーザーの密度揺動による散乱を利用して、揺動の波数に関する 2次元パターンを得る。乱流計測シミュレータにおける PCI 計測モジュールでは、乱流場データから観測位置での密度の値を抽出し、2次元分布に描き直す。レーザーの入射位置と観測位置を任意に選択することが出来、プラズマを有限な領域幅で切り出した上で、2点を結ぶ視線方向で積分して 2次元イメージの密度分布を得る。さらにフーリエ変換する事で、2次元波数スペクトルを出力する。

この計測シミュレータをジャイロ運動論的シミュレーションから得られたデータに適用するため、今年度はまず、データの精査と局所フラックス・チューブ配位の幾何情報の実空間配位への変換処理を進めた。フラックス・チューブ配位では、ある磁力線の近傍において、磁気座標系  $(r, \theta, \zeta)$  を用いて  $(x, y, z) = (r - r_0, (r_0/q_0)(q\theta - \zeta), \theta)$  の field-aligned 座標を用いている。ここで、 $r_0, q_0$  はそれぞれ、注目する磁気面における小半径と安全係数である。一方、乱流計測シミュレータでは、実空間の直交座標系でシミュレーション・データを取り込むため、双方の座標系変換を行う必要がある。図 1 は、複雑な 3 次元構造をもつ磁場配位において実行した GKV-X によるシミュレーションで得られるポテンシャル揺動分布データを

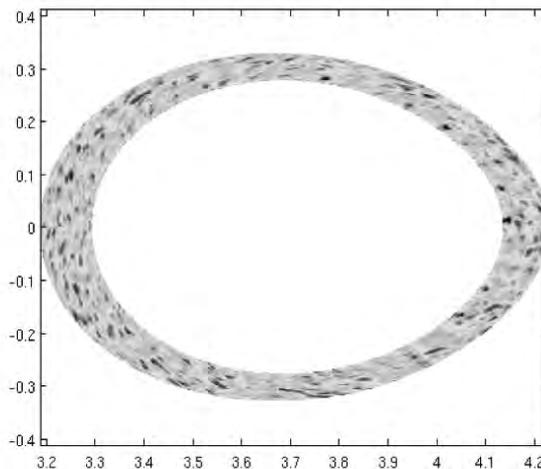


図 1: 乱流計測シミュレータによる GKV-X シミュレーションで得られた 3 次元乱流ポテンシャル揺動分布データのポロイダル断面への変換例。座標系の変換も含めて問題なく動作していることが確認できる。

を円筒座標系を介して、実空間直交座標系に変換したデータを、数値計測シミュレータに読み込ませた例である。あるポロイダル断面上のポテンシャル揺動分布が出力されており、座標変換とデータの読み込みが問題なく処理されていることが分かる。ここで変換された揺動分布データに対して、上記で述べた PCI 計測のモジュールを適用することで、現実的な PCI 揺動分布計測を模擬することが可能になる。

#### まとめ

乱流計測シミュレータは、実験計測を数値的に模擬するためのシミュレーション・コード群である。これによって、3次元乱流シミュレーションと実際の実験計測結果を直接比較が可能になる。本課題では、乱流構造の理解に強力な手法の一つとなる PCI 計測の模擬を目指し、計測シミュレータにおける PCI 計測モジュールのジャイロ運動論的乱流シミュレーションでの乱流揺動データへの適用を試みた。今回、計測シミュレータへ適用されたデータを利用し、今後は 2次元波数スペクトルなど、実際の実験で計測される乱流揺動分布との直接的な比較を行い、乱流シミュレーションの Validation 解析を進めるとともに、より多くの数値乱流シミュレーションのデータを利用し、数値解析の側から実験計測に対する指針提供に繋げていきたいと考えている。

#### 参考文献

- [1] K. Tanaka, *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **79**, 10E702 (2008).
- [2] N. Kasuya, *et al.*, Plasma Sci. Technol. **13**, 326 (2011).
- [3] M. Nunami, *et al.*, Plasma Fusion Res. **5**, 016 (2010).

SiO<sub>2</sub> 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, 狩俣佑妃  
九州大学応用力学研究所 渡邊英雄, 吉田直亮

## 【研究の目的】

アモルファス SiO<sub>2</sub> (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ヘリウムの挙動については未知の部分が多い。本研究では SiO<sub>2</sub> 中のヘリウムの挙動についての計算機シミュレーションを総合的に発展させることを目標とし, その方法論の確立を試みた。本年度は基礎的な金属材料であり, 計算機シミュレーションについての多数の先行研究がある鉄中のヘリウムについての第一原理計算および分子動力学計算を行い, よりラージサイズの計算へつなげるための知見を得た。

## 【研究方法】

本研究では純鉄にヘリウムを照射する系についての分子動力学計算を行った。He-He 間および He-Fe 間のポテンシャルについては, Dmol3 を利用して作成した。Dmol3 は密度汎関数理論に基づく第一原理計算ソフトであり, 内殻電子まで含んだ計算が可能であることから原子間ポテンシャル作成に最適であると考えられる。なお, Fe-Fe 間は, 金属中における自由電子が及ぼす多体効果を含んだ Finnis-Sinclair ポテンシャルを利用した。実験系としては, 原子数 432 個の Fe のスーパーセルを構築し, その中にいくつかのヘリウムを配置し, NTP アンサンブル法(粒子数, 温度, 圧力が一定)を使用してヘリウムの挙動を調べた。

## 【研究結果】

図 1 はスーパーセルの内部にヘリウムを 36 個をランダムに配置した初期構造である。図 1(a)~(d)は初期構造から 300 K で一定温度に保ち, 40 ps まで計算したときの構造を示す。分子動力学計算を開始すると, 図 1 (b)に示すように鉄中のヘリウムは格子間を拡散していくことにより徐々に集合していき, “格子間ヘリウム集合体”を形成する。時間の経過に伴い格子間ヘリウム集合体は成長していく(ヘリウムを吸収していく)が, ある時点で図 1(c)に示すように複数個の鉄原子をまとめて格子間に放出することで大きな空孔集合体を形成し, そこにヘリウムが捕獲されるようになる。時間の経過に伴い, 次々に鉄は押し出され空孔は増加していき, 空孔形成が終了したら, すべてのヘリウムはこの空孔集合体に捕獲され安定化する(図 1(d))。この状態は極めて安定なヘリウムクラスターであり, 照射下で物質に様々な影響を与えるヘリウムバブルの安定核である。このことは, ヘリウムが結晶中に高濃度に存在するとき, 原子空孔を自発的に作り出すことでバブルの安定核が形成されることを示唆している。本研究により, ヘリウム濃度がかなり高い状況下 (He/Fe 比が 0.05 程度以上) では, 原子空孔がなくともヘリウムバブルを形成し得ることが明らかになった。核融合炉第一壁環境下に入射してくるヘリウムのフラックス成分のほとんどが 100 eV という状況

を考慮すると、本研究で示唆されたバブル形成モデルが核融合炉環境下では主体となる可能性がある。次は、本研究で得られた知見を用い、 $\text{SiO}_2$  中のヘリウムの挙動についての研究を進めていく。

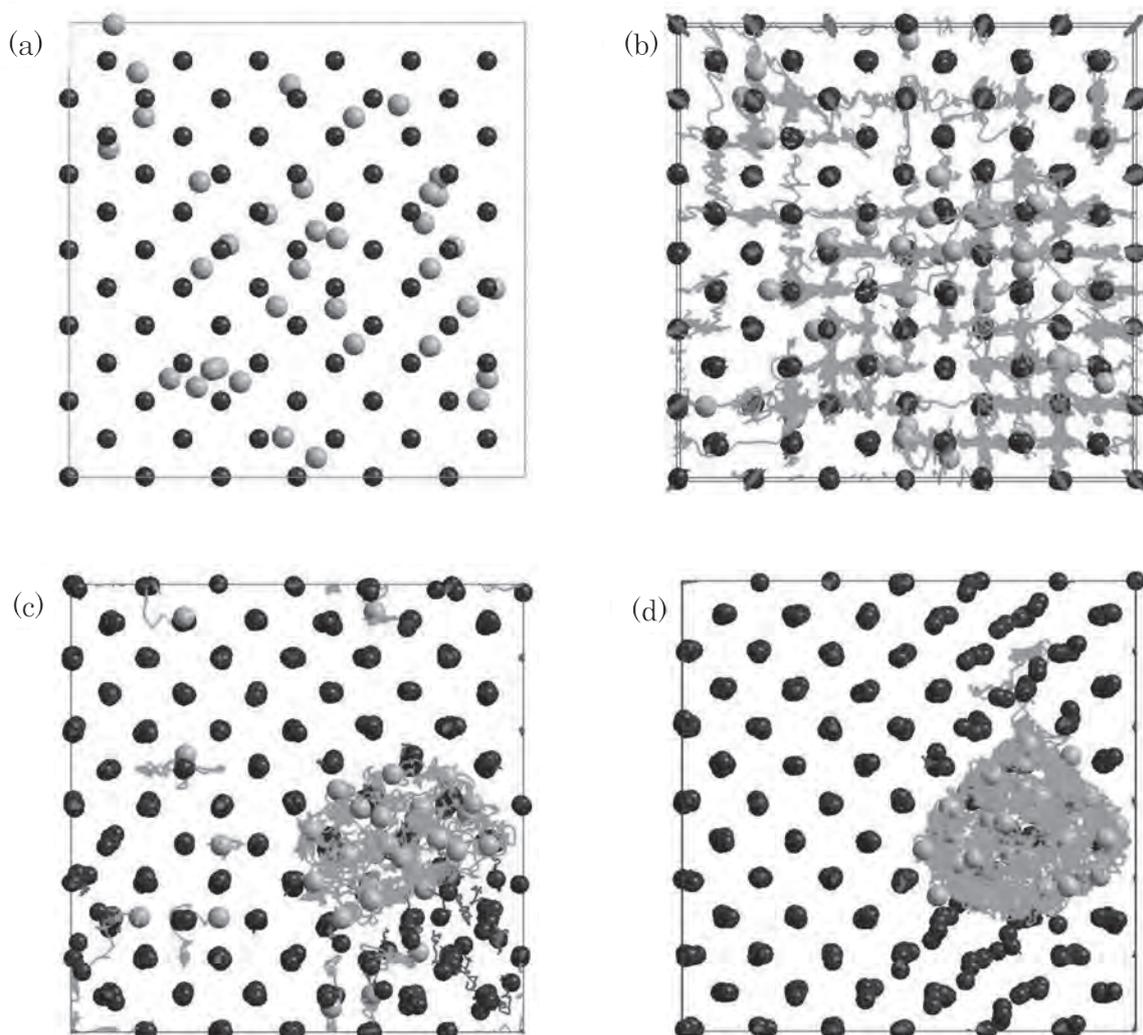


図1 分子動力学計算により計算された鉄中のヘリウムの凝集の様子。青が鉄原子、濃黄がヘリウム原子であり、緑線および赤線がそれぞれの原子の軌跡を示す。(a) 0 ps (初期配置)、(b) 5 ps 後、(c) 5 ps 後、(d) 40 ps 後

(成果発表)

- 村吉範彦, 「物理教育高度化のための計算機シミュレーション ～固体材料中におけるガス原子の存在状態～」, 2015年 琉球大学大学院教育学研究科, 修士論文

京都大学原子炉実験所 徐 虬 佐藤絃一  
九州大学応用力学研究所 徳永和俊

### 1. 目的

核融合炉内には、多量の水素が存在し、更に核融合反応によってヘリウムが発生する。ヘリウムと水素は原子空孔との相互作用が非常に強いので、これらのガス元素は核融合炉の第一壁材料の損傷組織及び力学特性に大きな影響を与える。一般的に、水素またはヘリウムは材料の脆化を引き起こす元素である。タングステンは融点が高い、スパッタ率が低い、水素蓄積が少ない利点があるため、プラズマ対向材料として注目されている。本研究は、水素の代わりに、バックグラウンドが低い重水素を用い、まず材料の力学特性に悪い影響を与える水素とタングステンの相互作用を調べる。

### 2. 実験方法

本研究に使われた試料は、アライドマテリアル製の純度 99.95at%、厚さ 0.2mm の板状タングステンであった。転位以外の欠陥を取り除くため、1273K で電解研磨した  $\phi$  5mm の試料に対して 5 時間の焼鈍を行った。これに対して、すべての既存の欠陥を取り除くため、1773K で同様の試料に対して 1 時間の焼鈍を行った。良く焼鈍した試料に京都大学原子炉実験所電子線加速器の電子線照射により原子空孔を導入した。損傷量は  $2.9 \times 10^{-5} \sim 1.3 \times 10^{-4}$  dpa であった。また、京都大学大学院工学研究科附属量子理工学教育センターの重イオン加速器の 6MeV 鉄イオンにより転位ループと原子空孔集合体を導入した。照射温度は 573K で、表面から  $1 \mu\text{m}$  までの平均損傷量は 1.8dpa であった。既存または導入した欠陥と重水素の相互作用を調べるため、マグネットセパレータ付 He イオン銃（オメガトロン社製）を用いて重水素注入をした。イオン注入装置においては、バリアブルリークバルブで重水素ガスの流量を調整し、イオンガンコントローラーでフィラメントの電流や加速電圧等を調整した。重水素イオンカレントは、ファラデーカップによりを測定した。重水素イオンビームを均一にするために、ファラデーカップは  $\Phi 3$  mm と  $\Phi 6$  mm の 2 つを用いた。その後、試料に重水素イオンを注入した。なお、重水素注入前の真空度は  $10^{-5}$  Pa オーダーで重水素注入中はおよそ  $2 \times 10^{-4}$  Pa である。重水素注入は室温で、弾き出し損傷ができない加速電圧 1keV で行った。重水素照射量は  $1.0 \times 10^{20}$   $\text{D}_2^+/\text{m}^2$  であった。注入後、昇温脱離ガス分析法 (TDS) により 1523K までヘリウムの放出を調べた。昇温速度は 1K/s であった。

### 3. 実験結果と考察

図 1 と 2 に 1273K で 5 時間と 1773K で 1 時間焼鈍したタングステンの内部組織を示した。前者に転位が観察され、後者に欠陥が殆んど観察されなかった。また、後者の陽電子消滅寿命測定は 108.3 ps であったので、透過電子顕微鏡では観察できない欠陥も無かったことが分かった。図 3 に良く焼鈍されたタングステンに  $5.0 \times 10^{21}$   $\text{D}_2^+/\text{m}^2$  まで重水素を注入した TDS の結果を示す。タングステン表面にトラップされた重水素の放出温度は 400~600K である。図 4 に電子線照射により導入した単空孔にトラップされた重水素の放出温度は 550~600K であることを示した。これに対して、図 5 に示したように転位にトラップされた重水素の放出温度は 600~650K である。高エネルギー鉄イオンにより格子間原子と原子空孔集合体が形成される。格子間原子集合体と重水素との相互作用が転位と重水素との相互作用と同じだと考えられるので、図 6 に示した重水素の放出が原子空孔集合体によるものであったことが分かる。その放出温度は 800~900K である。

また、TDS の昇温速度を変えることにより、以下の式を用い、欠陥と重水素の解離エネルギー  $E_d$  を求められる。ここで、 $\beta_i$  は昇温速度、 $T_i$  は重水素の放出ピーク温度、 $k_B$  はボルツマン定数である。単空孔と重水素の解離エネルギーは 1.40eV であった。この値は、文献値と合致するものであった。

$$\ln \beta_i + 0.4567 \left( \frac{E_d}{k_B T_i} \right) = \text{constant}$$

### 4. まとめ

本研究では、核融合炉のダイバータ部での使用が見込まれるタングステンを対象とし、照射による欠陥と重水素との相互作用に注目した。そして、タングステン中の重水素トラッピングサイトの同定と単原子空孔と重水素の解離エネルギーの算出を目的とした。単空孔、転位と原子空孔集合体によりトラップされた重水素の放出温度は、それぞれ 550~600K、600~650K と 800~900K である。単空孔と重水素の解離エネルギーは 1.40eV であった。

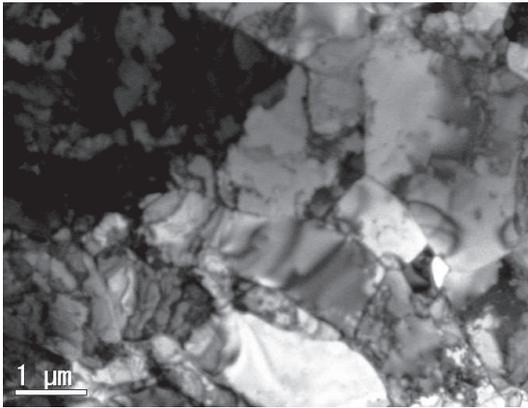


図1 1273K で5時間熱処理したタングステンの組織

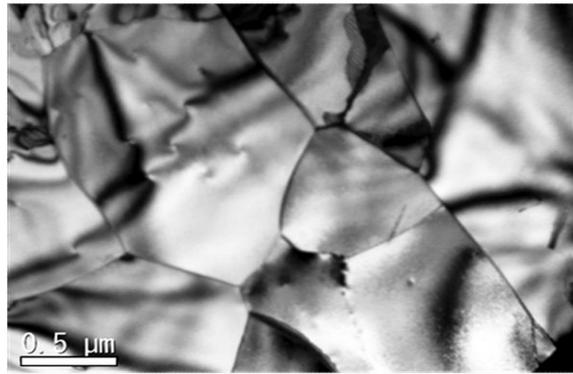


図2 1773K で1時間熱処理したタングステンの組織

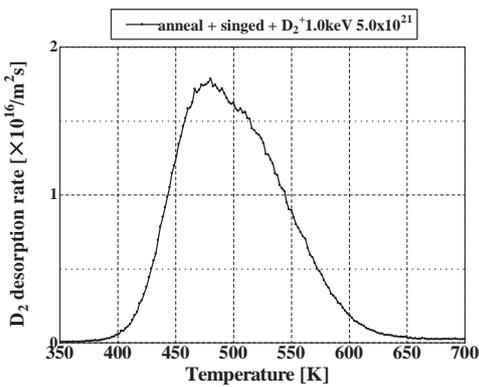


図3 良く焼鈍したタングステンに重水素を注入した試料のTDS結果

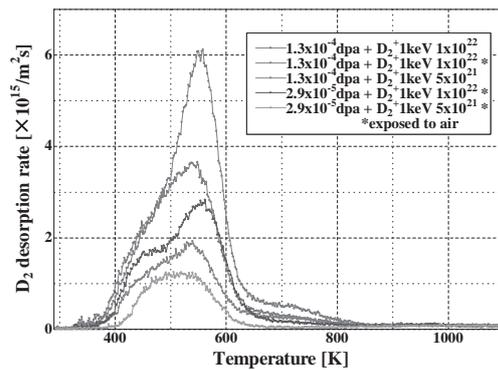


図4 タングステンにおける単空孔にトラップされた重水素の放出

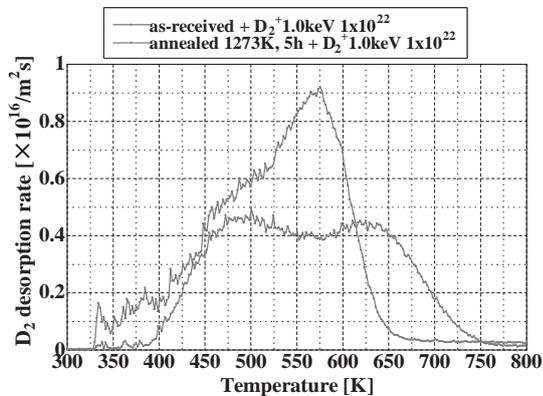


図5 タングステンにおける転位にトラップされた重水素の放出

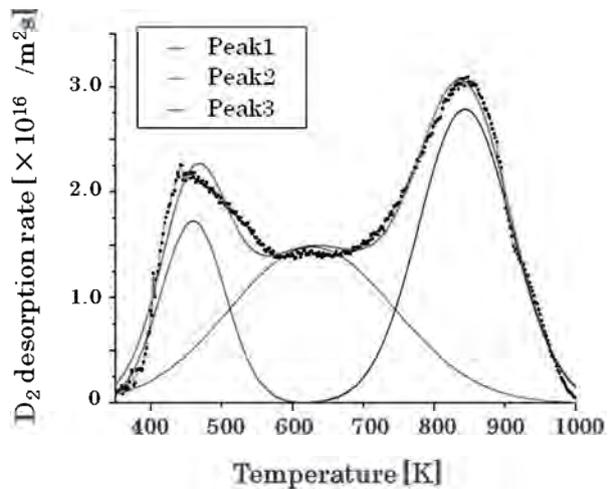


図6 タングステンにおける空孔集合体にトラップされた重水素の放出

## 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、前年度に引き続き森の射影演算子法から導かれる時間相関スペクトルと記憶関数スペクトルの関係式に着目して、主にアルヴェンカオスを記述する小数自由度モデル[1]の散乱モデルの統計的性質について議論を行う。

### 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：

本年度の研究成果は以下の通りである。いくつかの初期結果については、学会発表を行っている[成果 1]。

#### (1)アルヴェンカオス系におけるカオス摩擦の評価と周期成分の抽出

アルヴェンカオス系の直接数値計算を行い時系列データから射影演算子法を用いてカオス摩擦の評価を行った。具体的には、(1)記憶関数をマルコフ化して摩擦係数にする、(2)時間相関関数の発展方程式を強制減衰振動の式に変形する、(3)数値計算データの周波数分析(FFT)から得られた外力(印加アルヴェン波)モードのパワーを拘束条件として強制減衰振動子の解から摩擦係数を求める、という手順で評価を行った。この手順ではサイドバンドによる変調は再現することができないが、求めた強制減衰振動子の解の位相は数値計算データの速度相関のものと良く一致することが分かった。また、求めた摩擦係数の大きさは他の係数の値と比べて同オーダーの値をとった。

#### (2)アルヴェンカオス系における時系列の位相相関

(1)で用いた数値計算データに対して、サロゲートデータ法を用いた位相相関指数の計算[3]を行った。具体的には、フーリエランダムサロゲートを生成し、そのデータ

とオリジナルデータ、位相を人工的に揃えたデータの構造関数をそれぞれ評価したものをを用いて、ランダムサロゲートとオリジナルデータの有意差を示す0から1の値をとる指数の計算を行った。その結果、カオスが生じる場合でも、パラメータによって有意な位相相関がみられる場合と位相相関が弱い場合（ガウス過程に近い場合）とが確認された。ただし、マルコフ化を施した(1)の評価では位相相関指数にあまり関係なく良い一致が見られていることから、有限な位相相関がある時系列に対しても(1)のようなカオス摩擦の定義が使用可能であることが示唆された。

時系列の周波数分析より、外力モードの印加アルヴェン波が親波となった変調不安定性により励起されたサイドバンドが確認された。有限の位相相関もこの変調不安定性(波動間相互作用)により生成されていると考えられるため、物理的意味合いの理解のためには高次統計量と位相相関指数の関係性を明らかにする必要がある。また、時間相関関数を用いた定式化からはウィーナーヒンチンの定理よりフーリエモードの位相の情報が見失われているため、(1)の計算や過去の研究[1,4]で行われているような記憶関数(記憶スペクトル)の評価とは別の視点からの時系列の非マルコフ的な性質の評価を検討する必要がある。

引用文献: [1] T. Hada et al, Phys. Fluids B 2(11), 2581 (1990); A. C. -L. Chian et al, J. Geophys. Res., 11, A07S03 (2006). [2]e.g., H. Mori and M. Okamura, Phys. Rev. E, 80, 051124 (2009). [3] T. Hada et al, Space Sci. Rev., 107, 463–466, 2003; F. Sahraoui, PRE, 78, 026402, 2008. [4] R. Ishizaki, S. Kuroki, H. Tominaga, N. Mori, and H. Mori, Prog. Theor. Phys., 109(2), 169 (2003); R. Ishizaki, H. Mori, H. Tominaga, S. Kuroki, and N. Mori, Prog. Theor. Phys., 116(6), 1051 (2006); H. Mori, S. Kuroki, H. Tominaga, R. Ishizaki, and N. Mori, Prog. Theor. Phys., 111(5), 635 (2004).

## 公表状況 :

### (学会発表)

[成果 1]成行泰裕, 佐々木真, 糟谷直宏, 羽田亨, 矢木雅敏, Evaluation of chaos-induced friction in Alfvén system by using the projection operator method, Plasma Conference 2014, 20PA-043, 新潟, 2014.11.

## 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、岡村先生、原研の矢木先生に謝意を表します。

## 目的

プラズマ物理においては、時間尺度および空間尺度が異なる諸現象（MHD、微視的乱流等）が異なる空間領域にわたって相互作用し、その結果としてプラズマ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、外部加熱をともなう輸送、MHD、乱流の非線形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おこない、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を推進する。

## 研究成果

LHD における ECRH 印可実験ではマクロスケールの揺らぎが観測されており、非局所輸送の候補と考えられている。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が求められている。これまでの先行研究では、分布の速い応答は説明できるものの、分布の大局的な変化を説明するには至っていない。本研究では簡約化 MHD モデルを用いて定常乱流状態を作り出し、過渡的な加熱ソースを印可し、プラズマの過渡応答を調べている。炉心部の閉じ込めにはイオン温度勾配 (ITG) に起因する乱流が重要な役割を果たしていると考えられている。非局所応答が発見された簡約化 MHD シミュレーション [1, 2] には炉心部の ITG 乱流の効果は含まれていない。今回、大域的 ITG 乱流コードに、粒子入射の効果をもイオン温度に対するシンク（冷却、コールドパルス）として実装する拡張を施し、簡約化 MHD シミュレーションと同様なシミュレーションを行った。この ITG 乱流シミュレーションでは簡約化 MHD シミュレーションで見られたような非局所輸送は観測されなかった。図 1 は  $400 \leq t \leq 450$  の間、 $r/a = 0.8$  付近にコールドパルスを与えたときの温度揺動の  $\cos\theta$  成分の時空間変化を示している。この成分は簡約化 MHD シミュレーションで見つかった非局所輸送において重要な役割を果たしているが、ITG 乱流により散逸され、非局所輸送に必要な半径方向に伸びた構造を保てなくなることがわかる（図 1 左）。一方、図 1 右は  $t=400$  から乱流との非線形結合を人工的に切った場合であるが、半径方向に伸びた構造を保っている。このように ITG 乱流は非局所輸送を妨げる傾向にあることが明らかになった [3]。

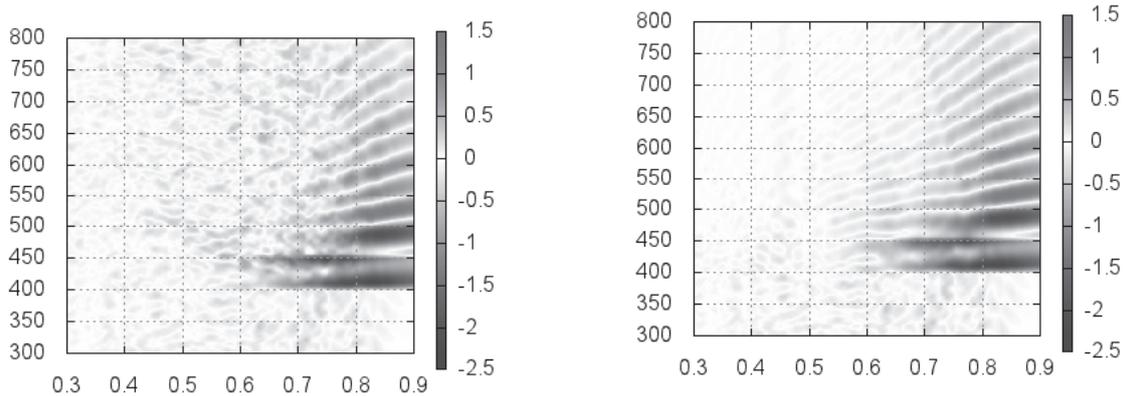


図 1 : 温度揺動の $\cos\theta$ 成分の時空間発展を示す。非線形効果あり(左図)、非線形効果なし(右図)。

## 考察

今年度の研究により、非局所輸送がモデルやソース、シンクに依存していることが明らかとなった。H25 年度に報告したシミュレーションでは、ソースモデルとして  $S = S_{AMP} \exp(-\xi^2 / 2\Delta^2)$ ,  $\xi^2 = r^2 + r_s^2 - 2rr_s \cos\theta \cos\theta_s - 2rr_s \sin\theta \sin\theta_s$  を用いたが、 $\theta_s = 0$  のみの場所に着目した。一方、今回の研究で明らかになった点は、 $\sin\theta$  成分はいわゆる GAM(Geodesic Acoustic Mode)振動と関連するものであり、ソースによるその影響を考慮するためには  $\theta_s \neq 0$  にする必要があること。また ITG モデルでは温度の発展方程式に対し、シンクを導入したが H25 年度の研究ではソースを考えている。ペレット入射実験では密度と電子温度が関係しており密度のソースと電子温度のシンクを同時に考える必要があること。また今回考えた ITG 乱流もあわせて考慮する必要があることなのである。今後の課題として、これらの問題点を考慮したモデルの拡張、コード開発を進め、非局所輸送のシミュレーション研究につなげることがあげられる。

## 参考文献

- [1] 矢木雅敏、平成 25 年度共同利用報告書 25FP-1
- [2] Yagi, M., Matsuyama, A., Miyato, N., et al., "Simulation study of nonlocal transport from edge to core in tokamak plasmas," Contribution to Plasma Physics, 54, 363 (2014).
- [3] Miyato, N., "Effect of Ion Temperature Gradient Driven Turbulence on the Edge-Core Connection for Transient Edge Temperature Sink," Plasma and Fusion Research, 9, 1203148 (2014).

## 研究組織

矢木雅敏(原子力機構)、宮戸直亮(原子力機構)、松山顕之(原子力機構)、糟谷直宏(九大応力研)、佐々木真(九大応力研)

### 1. 目的

各種原子力プラントにおいて照射下で使用される高温構造材の使用下限温度を決めるのは、多くの場合照射による硬化とそれに伴う脆化である。低温領域では照射による析出は起こりにくく、転位ループの形成、成長による硬化が支配的であることが知られている。転位ループの形成、成長については、純金属やモデル合金に関し多くの研究があるが、先進耐照射性材料として期待される V-4Cr-4Ti 合金における研究例は少なく、中性子照射との相関研究は極めて限られている。原子炉による中性子照射の機会が限られている現状では、重イオン照射の役割が特に大きい。本研究では、上記合金の照射脆化が顕著な温度領域において制御された重イオン照射を行い、微細組織、特に転位ループの形成・成長過程を明らかにし、中性子照射と比較することにより、重イオン照射による使用下限温度の予測の精度を高めることを目的とした。

### 2. 方法

核融合科学研究所で製作した、V-4Cr-4Ti 合金共通試料 NIFS-HEAT-2 を対象とした。応用力学研究所の重イオン加速器を用い、照射脆化の激しい 400-600K で 0.1-1 dpa の照射を行い、照射後の組織観察を応用力学研究所および核融合科学研究所の透過電子顕微鏡とエネルギー分散型 X 線分光器を用い、転位ループの密度、サイズの変化を求めた。また Ti が転位に局所濃縮、欠乏していないかを確認し、転位誘起の Ti-CON 析出の可能性を調べた。さらに JMTR 中性子照射組織と比較し、重イオン - 中性子照射相関を求めた。

### 3. 結果と考察

Table 1 に照射条件を示す。Fig. 1 に、イオン照射の組織変化を示す。観察された組織はほとんど転位ループあるいはドットイメージであった。微小な欠陥の観察のため、暗視野弱ビーム法による観察を併用した。

Fig. 2 に転位ループ、ドット密度の照射温度依存性を示す。比較のため、電子線照射による V-20Ti, V-3Ti-1Si のデータも示す。[1] 温度依存性が 500K 以下でほとんど無く、500K 以上で顕著に現れる点、全体に同じ傾向が見られる。中性子照射材の密度が他と比べてやや低い、これは損傷速度の違いを考慮すると定性的に説明できる。573K イオン照射材においてループへの Ti 偏析は確認できなかった。

今後は、転位ループへの Ti の偏析のイオン・中性子照射の差、より高温における照射誘起析出の発生過程を明らかにする予定である。

### 参考文献

[1] T. Muroga, H. Watanabe, N. Yoshida, ASTM STP 1047 (1990) 199-209

### 4. 研究組織

室賀健夫、菱沼良光、宮澤健（核融合科学研究所）、渡辺英雄（九州大学応用力学研究所）

### 5. 発表論文

- (1) T. Muroga, J.M. Chen, V.M. Chernov, R.J. Kurtz, M. Le Flem, " Present status of vanadium alloys for fusion applications ", J. Nuclear Materials, 455, 2014, 263-268
- (2) T. Miyazawa, T. Nagasaka, R. Kasada, Y. Hishinuma, T. Muroga, H. Watanabe, T. Yamamoto, S. Nogami, M. Hatakeyama, " Evaluation of irradiation hardening of ion-irradiated V-4Cr-4Ti and V-4Cr-4Ti-0.15Y alloys by nanoindentation techniques" J. Nuclear Materials, 455, 2014, 440-444

### 6. 国際会議での発表

T. Muroga, T. Miyazawa, T. Nagasaka, H. Watanabe, "Dislocation Loop Evolution in V-4Cr-4Ti by Heavy Ion and Neutron Irradiation at Relatively Low Temperature", JCS-12 (Sept. 2014, Shizuoka)

Table 1. 照射条件

Irradiation	Temperature	dpa	dpa/s
2.4MeV Cu <sup>2+</sup> ions	403-413K	1.0 (peak)	4.5 x 10 <sup>-3</sup>
	473K	1.0 (peak)	4.5 x 10 <sup>-3</sup>
	573K	1.0 (peak)	4.5 x 10 <sup>-3</sup>
Fission Neutrons (BR2)	363K	0.20	1.10x10 <sup>-7</sup>
	563K	0.20	1.10x10 <sup>-7</sup>
Fission Neutrons (JMTR)	563K	0.08	4.4x10 <sup>-8</sup>

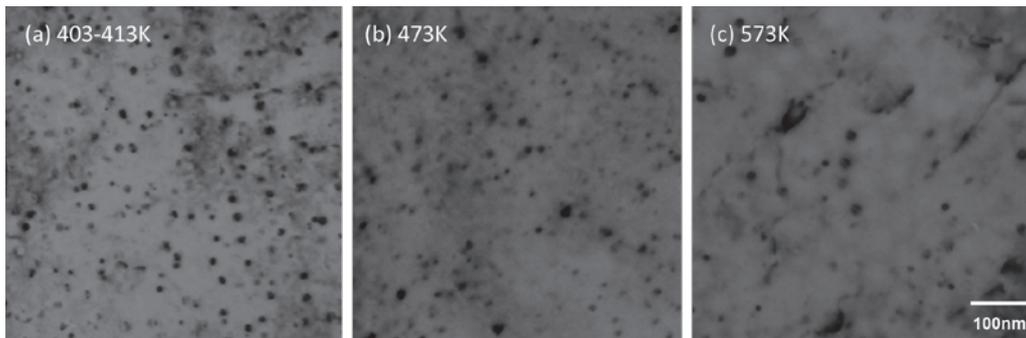


Fig. 1 V-4Cr-4Ti 合金のイオン照射による組織変化

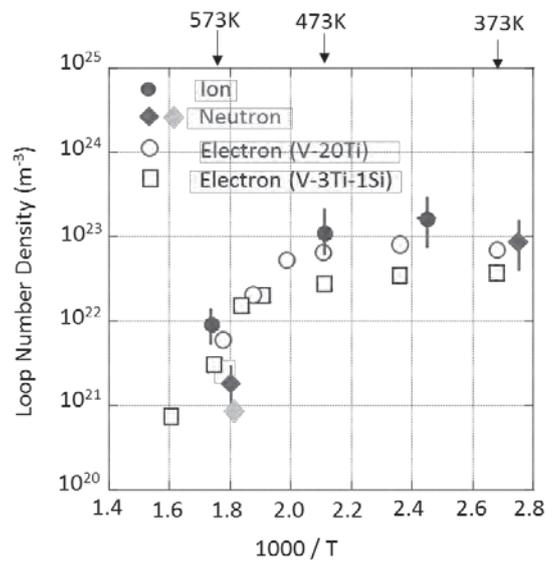


Fig. 2 V-4Cr-4Ti 合金の転位ループ密度の照射温度依存性。  
V-20Ti 合金, V-3Ti-1Si 合金の電子線照射[1]と比較して示す。

## 26 FP-18

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・高木郁二

課題番号：26FP-18

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：H26 年 4 月 1 日－H27 年 3 月 31 日

所内世話人：岡子秀樹

協力者：3 名（大中雅侑、岡子秀樹，A. Kuzmin）

配分額：研究費（6 万円），旅費（9.3 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。水素分子が金属中に溶解するためには表面で原子に解離しなければならないこと、原子への解離確率は特殊な場合を除いては極めて小さいこと、水素原子は金属中に容易に溶解し、拡散・透過することから、金属膜をプラズマに曝すと、プラズマから飛来した水素原子はよく透過するが、周辺から飛来する水素分子はほとんど透過しないというプラズマ誘起透過現象が起こる。透過量を四重極ガス分析器などで測定すると、水素分子が多数存在する条件であっても、水素原子を選択的に検出することができる。このシステムを水素原子プローブと呼ぶ。

本研究では水素原子束を定量的にリアルタイムで測定し、しかも耐久性のあるプローブを開発し、水素原子束測定方法の確立をめざす。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ことを目的としている。昨年度まではプローブシステムを設計、製作し、QUEST 内の複数の位置に設置し、透過量を観測してきた。今年度は、プローブの定量性（感度、検出限界）、時間応答性および耐久性を評価することが目的である。

### 水素プローブとその耐久性：

代表者らは、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,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 ショットに及ぶ回数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た。しかしリアルタイムで水素原子束の時間変化を観察するには性能が不十分であった。そこで、水素の拡散が速く、薄くても破損しないような優れた機械的強度を有し、水素化物を生成しない金属膜として PdCu を選択し、平成 24 年度に厚さが 22μm で、真空中に耐えるように両面を透過率 50%、厚さ 1 ミリのステンレスで支持する構造の原子束計測プローブ（長さ約 80mm,直径 30mm)を開発した。同年、このプローブを QUEST 内の下側ダイバーター部に設置し、水素原子プローブとしての基本性能を 100-400℃の温度範囲で満たすことを確認した。平成 25 年度はこのプローブを 2 個製作し、図 1 に示すように上下の平板ダイバーター（PDP4）、外側水平壁部（PDP6）に設置し、多点位置での局所吸蔵率の推定を行った。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ため、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。

QUEST で 38 日間、892 回のショットに曝した後で水素分子による透過実験で評価したところ、透過量は最大でも 5%しか減少していなかった。また、QUEST に設置したプローブは 2 年間、8095 回のショットに曝しても稼働していた。これらのことから、PdCu 膜のプローブは十分な耐久性を有していると言える。

**定量評価：**

PdCu 膜の定量評価のための実験は、京都大学にある小型プラズマ実験装置を用いた。この装置は 20W 程度の RF 発振器と放電管、水素透過系で構成しており、イオン加速器からイオンをその場で透過試料に照射できるようになっている。試料は厚さ 0.02mm の PdCu 膜であり、この片面を重水素の RF プラズマに曝して、他方に透過する重水素量の時間変化を測定した。また、試料をプラズマに曝した状態のまま <sup>3</sup>He イオンを照射し、核反応法を用いて試料表面近傍の重水素濃度を測定した。

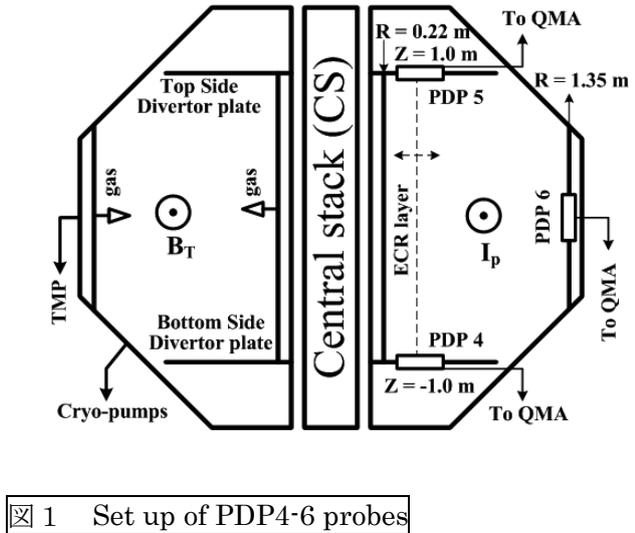


図1 Set up of PDP4-6 probes

まずプラズマ側と透過側の再結合定数  $K_u$ 、 $K_d$  を求めた。通常の透過実験では  $K_u$  と  $K_d$  はアレニウス型の温度依存性を示すと仮定するが、本実験では濃度を直接測定しているために値を一義的に決定することができる。その結果、図2に示すように、 $K_d$  は高温部と低温部で温度依存性が異なることが分かった。これらの値を用いて透過束の時間変化を計算したところ、図3に示すように実験値とよく一致し、値の妥当性を確認することができた。透過束を  $J$ 、入射水素原子束を  $F$  とすると、定常状態における収支は

$$F = (K_u + K_d)J/K_d \quad (1)$$

と表される。図2によると480K以下では  $K_u = K_d$  とみなせるため、定常状態では  $F = 2J$  という極めて単純な関係で水素原子束を評価できることが分かった。

時間応答性については、プラズマと試料との間に設置した機械的なシャッターを開閉し、透過束を測定した。その結果、シャッターを動作してから0.9s以内に透過束が変化した。実際の応答はこれよりも早いと考えられるので、より速い計測が可能な機器を用いて今後追試を行う。また、拡散係数と再結合定数から時間応答を数値解析によって評価することもできるため、拡散係数の測定も行う。

入射束の検出限界は、評価に用いた小型プラズマ実験装置では  $4.6 \times 10^{11} \text{ atoms cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  であった。検出限界はガス分析計のバックグラウンドのゆらぎに最も強い影響を受けるため、安定したガス分析計を用いれば更に高感度のシステムを構築できることが分かった。

以上の成果は2015年原子力学会春の年会にて発表した。

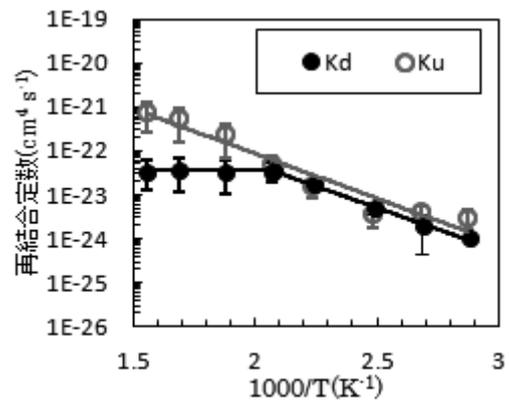


図2 再結合定数の温度依存性

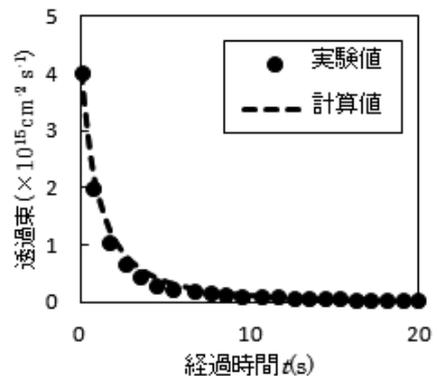


図3 483Kにおける透過束の時間変化

## QUEST スクレイプオフ層における 原子密度・速度局所計測のための近赤外干渉分光器の開発

京都大学大学院工学研究科 四竈 泰一

### 研究目的

トカマクプラズマ境界の開いた磁場構造を持つスクレイプオフ層 (Scrape-off-layer: SOL) におけるイオン流れは、プラズマの境界条件を決める重要な因子であると考えられており、流れの駆動メカニズムの理解と制御に向けた研究が進められている。流れの駆動力の一つは、磁力線に沿ったイオン圧力勾配であり、また、流れはイオンと原子の荷電交換反応による運動量損失で散逸する。これらの過程は、電離束及び荷電交換の反応レートを通して原子の密度、速度の空間分布に影響を受けることから、イオン流れの生成、散逸メカニズムを理解するためには、原子の密度及び速度の空間分布を計測することが必要だと考えられる。

原子は電荷を持たないため、プラズマ中でその密度、速度を測定するためには、発光線形状の測定 (発光強度, ドップラーシフト) がほぼ唯一の方法である。この際、単純な受動分光法では、測定値は視線上に存在する発光の線積分値となる。空間分解した発光の情報を得るためには、レーザ誘起蛍光のような能動的な分光法、あるいは複数の視線を利用したトモグラフィー法を用いる必要がある。しかし、レーザを用いる場合は入射経路や観測視線配置の制限により空間分布を得ることが簡単ではなく、トモグラフィー法では波長シフトの情報を空間分解することが困難である。そこで申請者は、磁場中の発光線のゼーマン分裂を利用することで、受動分光法単独で原子発光線の局所計測が可能となる新たな手法の開発に取り組んできた。

原子発光線は SOL 近傍に局在している。さらにトカマク内では磁場強度の勾配が存在する。これらの性質を利用することで、発光位置に応じたゼーマン分裂の違いから局所発光線を分離することが可能となる。これまでに、この手法を水素、ヘリウム原子からの可視発光線に適用し、原子の局所計測が可能であることを実証した。本研究では、更に進んで上記計測手法を原子の近赤外発光線へと拡張し、計測精度を向上させることで、放電条件に応じた原子の密度、速度の空間分布を明らかにすることを目的とする。本年度は、ヘリウム原子  $2^3S-2^3P$  発光線 (波長 1083 nm) を高波長分解能で測定することが可能な近赤外干渉分光器を開発し、QUEST での初期データ取得を試みた。

### 研究方法・結果

開発した近赤外干渉分光器の模式図を図 1 に示す。捕集した発光を光ファイバで分光器内に導入し、対物レンズ (ミットヨ M Plan Apo NIR 10×) により直径約 8 mm の平行光線に変換する。この際、シアリング干渉計 (シグマ光機 SPV-05) を利用し、光線の広がり角が 0.1 度以下であることを確認した。その後、虹彩絞 (シグマ光機 IH-30) により光線の直径を 1 mm 程度に減少させ、ファブリ-ペローエタロン (LightMachinery OP-1986-64, 波長 1083 nm) に入射する。エタロンは実効フィネスが約 30, FSR が約 0.6 nm であり、ピエゾ素子によってギャップ長を掃引することで透過波長を変化させることができる。掃引速度は最大で 1 FSR あたり 10 kHz であり、本報告内の測定時には 20 V<sub>pp</sub>, 10 Hz の三角波電圧を印加し、約 2 FSR の波長領域を掃引した。エタロンを透過した光は、干渉フィルタ

(Omega Optical XB173-1080BP10, 中心波長 1080 nm, FWHM 20 nm) を通り、冷却光電子増倍管 (浜松ホトニクス R5509-43) で検出される。全ての光学部品はアルミ製の筐体内に設置しており、標準的な空調環境下で約 1 日の間、測定値の再現性を確認している。

エタロンの掃引電圧と透過波長との関係を校正するために、グロー放電プラズマからのヘリウム原

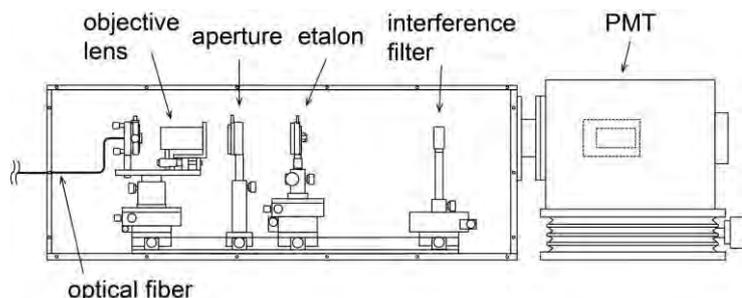


図 1. 近赤外干渉分光器の模式図

子発光線を観測した。測定結果を図2に示す。 $2^3S-2^3P$  発光線は表1に示す3本の微細構造を持ち、これらが2つのピークとして観測されている。掃引電圧-透過波長間の線形性を仮定し、ドップラーシフトを無視し、ふく射再吸収を考慮した2つのピーク波長の計算値から、透過波長( $\lambda$ )と掃引電圧( $V$ )の関係を  $d\lambda/dV = 73.0$  pm/V と見積もった。図2上の横軸に電圧、下の横軸に波長を示す。

次に、分光器の装置関数を評価するために、装置関数と比較して線幅が十分に小さい単一縦モードレーザーダイオード(Thorlabs L1060P200J; 波長 1060 nm)の光を測定した。発光線をローレンツ関数でフィッティングした際の半値全幅は約 235 mV となった。 $d\lambda/dV$  は波長に依存するが、エタロンのギャップ長  $l$  に対して  $d\lambda/dV \approx \lambda/l$  と近似すると、1060 nm では  $d\lambda/dV = 71.4$  pm/V、装置関数は 16.8 pm となる。さらに、装置関数が波長の2乗に比例すると近似すると、1083 nm における装置関数は 17.5 pm と見積もられた。

開発した分光器を QUEST に適用した。トロイダル磁場のみを印加した状態で、8.2 GHz ECH によりセンタースタック近傍に局在した円筒状のプラズマを生成し、中央平面上の径方向視線を用いて磁場に垂直な方向から発光を計測した(図3)。発光線形状から、ドップラー広がり、シフトを評価可能であることを確認した。

表 1. ヘリウム原子  $2^3S-2^3P$  発光線の微細構造

遷移	波長 (nm)	A 係数 ( $\times 10^7$ s $^{-1}$ )
$2^3S_1-2^3P_0$	1082.909	1.0216
$2^3S_1-2^3P_1$	1083.025	1.0216
$2^3S_1-2^3P_2$	1083.034	1.0216

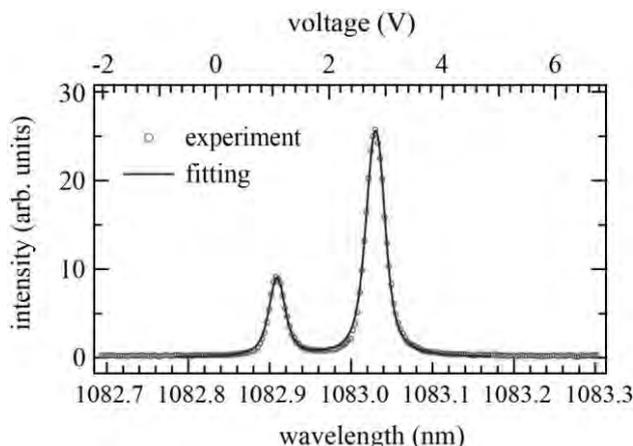


図 2. ヘリウム原子発光線 (グロー放電)

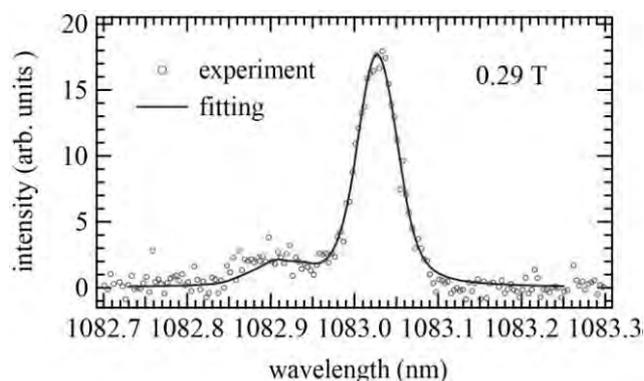


図 3. ヘリウム原子発光線 (QUEST)

## 成果報告

- [1] T. Shikama, S. Ogane, H. Ishii, Y. Iida, and M. Hasuo, "Measurements of helium  $2^3S$  metastable atom density in low-pressure glow discharge plasmas by self-absorption spectroscopy of HeI  $2^3S-2^3P$  transition", *Jpn. J. Appl. Phys.* **53**, 086101 (2014).
- [2] S. Ogane, T. Shikama, H. Zushi, and M. Hasuo, "Development of a near-infrared interference spectrometer for measurements of the local helium atomic emission lines in the spherical tokamak QUEST", *7th Japan-Korea Seminar on Advanced Diagnostics for Steady-State Fusion Plasmas*, P1-17, 2014.8.17-20, Kyoto, Japan.
- [3] 大金 修平, 四竈 泰一, 冨子 秀樹, 蓮尾 昌裕, 「球状トカマク QUEST におけるヘリウム原子発光線局所計測のための近赤外干渉分光器の開発」 *Plasma Conference 2014*, 19PB-085, 2014.11.18-21, 新潟.
- [4] 四竈 泰一, 大金 修平, 飯田 洋平, 蓮尾 昌裕, 「ふく射再吸収によるヘリウム原子  $2^3S-2^3P$  発光線形状の変化を利用した磁場中のヘリウム  $2^3S$  準安定原子密度計測」日本物理学会 第70回年次大会, 21pBH-1, 2015.3.21-24, 東京 (予定).
- [5] 大金 修平, 四竈 泰一, 冨子 秀樹, 蓮尾 昌裕, 「球状トカマク QUEST における近赤外干渉分光器を用いたヘリウム原子発光線の局所計測」日本物理学会 第70回年次大会, 21pBH-4, 2015.3.21-24, 東京 (予定).

本研究グループでは、高温プラズマ閉じ込め装置 QUEST および LHD におけるプラズマ・壁相互作用 (PWI) の実態を明らかにするために多くのプローブ試料やテスト機器を炉内に設置し、高温プラズマがプラズマ対向材料に及ぼす照射効果について調べてきた。いずれの装置においても、近年プラズマの性能が上がるにつれて PWI によってプラズマの閉じ込め性能が左右される事象が多く見られるようになり、この分野の研究が一段と重要になってきた。

本年度は QUEST や LHD でプラズマ曝露された各種試料について応用力学研究所に設置されている走査型電子顕微鏡 (JSM-5900)、透過電子顕微鏡 (JEM-2000EX) を用いて表面組織や内部組織を詳細に調べると共に、低エネルギーガスイオン注入装置や昇温脱離装置を用いて水素同位体の吸蔵・放出特性 (特に各装置の壁面温度近傍での最大吸蔵量や放出の時定数など) を調べた。また、断面組織の観察には収束イオンビーム加工観察装置 (FB-2100) を用い試料を加工した。研究成果の一部は末尾に記した学会で報告したが、本稿では QUEST におけるプラズマ対向壁の表面変質の実態とそこに至った原因とプロセスについての研究に絞って報告する。

図 1 (a) は 2014 年春・夏キャンペーン (2014SS) 終了後の QUEST 内部を示す写真であり、壁面の色が場所によって大きく異なることが注目される。トロイダル方向 (水平方向) はほぼ同じような色合いになっているが、ポロイダル方向 (垂直方向) では複雑に変化しているのが特徴である。写真中に記した T1~B21 に沿って測った壁面の RGB 値 (ポータブル型カラーアナライザーで測定、1024 階調表示) を図 1 (b) に示す。最上部は最も強く変色しているが、下がるにつれて RGB 値は急激に増加し、上部壁の中段から赤道部壁中心 (赤道線) にかけての広い領域で変色は僅かで本来の壁 (ステンレス鋼) に近い色を保っている。これとは対照的に、赤道線より下側ではポロイダル方向の変化も弱く薄い茶褐色となっている。図 2 は図 1 (a) に記した 5 か所 (T1, T2, T3, T4, B15) から採取した壁面サンプルの断面組織写真である。実測した堆積層の厚さを写真中に記した。着色が激しいほど (RGB 値が低いほど) 堆積層は厚くなっており、厚い T1、T2 では各放電キャンペーンに対応する明瞭な層状構造を持っている。図 3 は T1 の断面組織写真とそれに対応する GD-OES

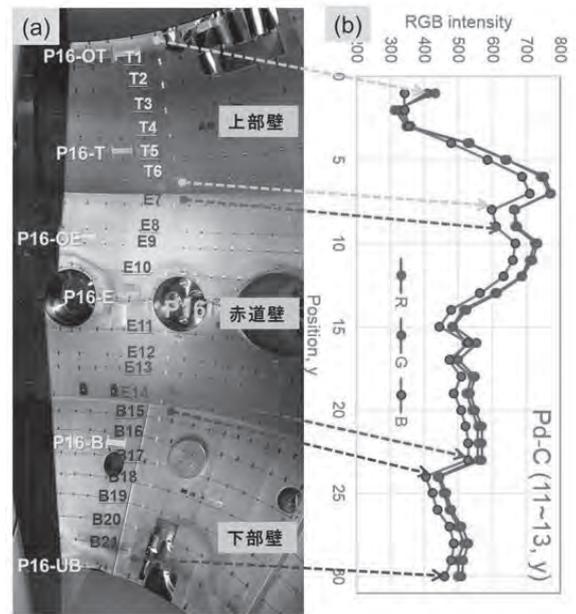


図 1 (a) 2014SS 実験終了後の炉内の状況 (b) T1 から B24 近傍の RGB 値

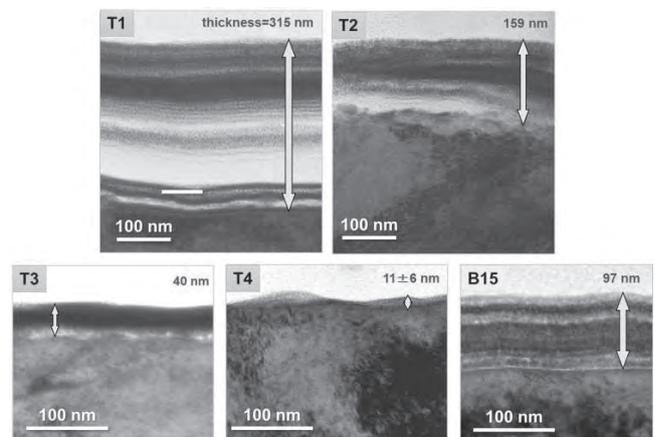


図 2 壁面より剥がしたサンプルの断面組織を示す透過電子顕微鏡写真

分析データを比較したものである。例えば、中央部の白い部分では金属元素は少なくCが主となっている。個々の実験キャンペーンで堆積した不純物の組成と比較することにより、この白色の領域はCの発生が異常に多かった2012SS、2012AWで形成されたものであることが判った。その上に積もった黒い層は内部機器（ステンレス鋼製）の一部が放電中に熔融したことによって放出されたFe、Crなどを通常より多く含む2013SS、2013AWの堆積層である。他の層についてもそれらが形成されたキャンペーンを図中に記した。一方、上部壁中央部から採取したT4の表面は10nm程度の薄い不純物層で覆われている。この近傍で2014SSのみのプラズマに曝した試料への堆積層の厚さも同程度であることからこの領域では付着した不純物原子はいずれ再放出されるいわゆる損耗ドミナントな現象が起こっていることが判る。

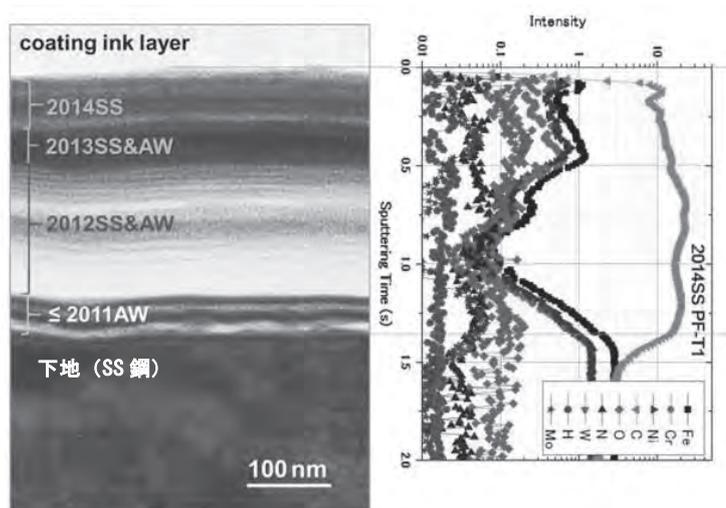


図3 T1の断面組織とそれに対応する構成原子の深瀬分布（GD-OES分析）

堆積層の厚さとRGB値には図4に示すような相関がある。この換算曲線を用いると評価に手数がかかる堆積層の厚さを簡便なRGB測定から容易に評価することが可能となる。ただし、この手法の適用に当たっては堆積層に組成や構造が似通って物質であることが前提となる。両者の相関を理論付ける詳細な研究は別途行われている。

図5は2014SSにおいて炉内の6ヶ所（P26-OT, P26-T, P26-OE, P26-E, P26-B, P26-UB）に置かれ試料ホルダーの写真である。図6は左右に隣り合う2枚の薄板試料（圧さ0.1mm）と上下の2枚の固定板（厚さ0.1mm）で囲まれ周りより0.1mm程度低くなった長方形（1x10mm程度）の隙間（窪み）を拡大して示した写真である。写真を撮るにあたっては周りの試料や固定板は取り外してあり、その部分はプラズマに曝されていないため本来に色を保っている。隙間の着色（不純物原子の堆積）は設置場所によって大きく異なるのみならず、均一に着色した隙間もあれば、一部のみ着色したものもある。着色は正味の不純物堆積量（全堆積量－全損耗量）で決まり、水素プラズマによるスパッタリングにより損耗起こったと仮定すると、以下の

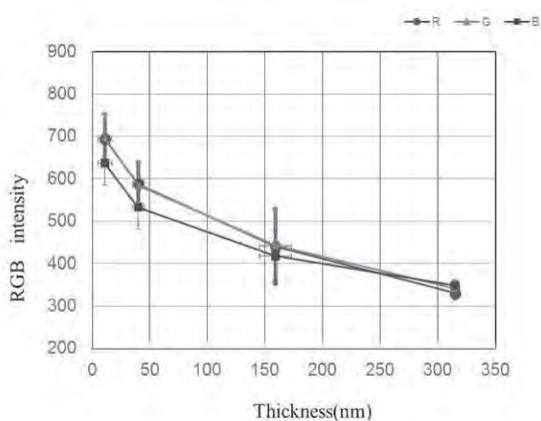


図4 RGB値と堆積層の厚さとの関係

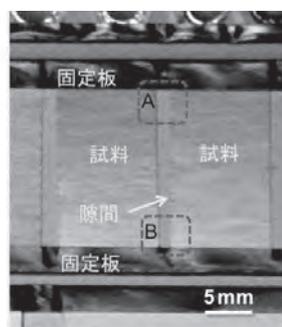


図5 プラズマ曝露試料の固定状況。赤線で囲った試料の隙間分部を図6に示した。

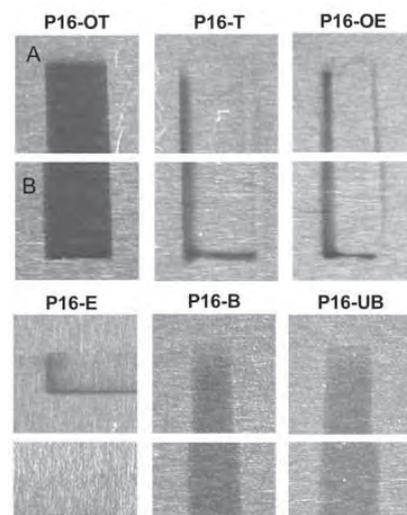


図6 各所において試料の間に積もった不純物

ことが推論できる。

- ① 不純物 (C, Fe, Cr, W など) は壁の全面に飛来しているが赤道線より上側で多くなっている。
- ② 不純物原子の飛来方向は、ほぼランダムである。
- ③ 損耗を起こす水素の飛来は設置場所依存性が強い。上部壁半ばから赤道線までの間では水素のフラックスが高く、損耗ドミナント (堆積速度 < 損耗速度) となっており、表面には両者の動的なバランスにより僅かの不純物原子が存在する。
- ④ 隙間周辺部の堆積層の付き方から上部壁半ばから赤道線までの領域では水素は左下から右上方約  $20^\circ$  の角度でまた壁面に対しては  $20\sim 25^\circ$  程度の角度で入射していることがわかる。
- ⑤ 赤道面より下の領域では不純物原子の飛来は少ないが、損耗を起こす水素は更に少なく徐々に正味の堆積が起こっている。ただし、キャンペーンによっては損耗ドミナントな時もあり際どいバランスで堆積が優位となっている。
- ⑥ 最上部は 不純物堆積  $\gg$  スパッタリング損耗 の状況にあるが、水素のフラックスが他の場所よりはるかに低いということが主な原因であると思われる。

上述の実験結果から、QUEST の水素リサイクリング過程を精度良く評価するにあたっては、赤道面より上側の損耗ドミナントな領域と赤道面より下側の穏やかな堆積ドミナントな領域についてそれぞれ水素の吸蔵・放出過程を議論する必要があることが判った。粒子バランスのモデリングにはこれらの表面についてのバランス方程式を連立させることにより精度の良い評価が可能になると思われる。

詳細は省略するが、2014SS でプラズマ曝露し不純物が 20nm 程度堆積したステンレス鋼は従来見られなかった水素の吸蔵・放出挙動を示すことが明らかになった。水素リサイクリングを大幅に変える可能性のある現象であり、来年度の課題として詳細な検討を予定している。

#### 学会発表

1. PSI2014 (Kanazawa, 2014.5), “Plasma Facing Surface and Retention and Desorption of Hydrogen in QUEST”, N. Yugami, N. Yoshida, K. Matsumoto, T. Fujiwara, K. Araki, R. Yoshihara, H. Watanabe, K. Hanada, H. Zushi, Y. Hatano, Y. Oya and K. Okuno
2. PSI2014 (Kanazawa, 2014.5), “Temperature impact on W surface exposed to He plasma in LHD and its consequences for the material properties”, E. Bernard, R. Sakamoto, N. Yoshida, H. Yamada and LHD group
3. PSI2014 (Kanazawa, 2014.5), “Retention and Desorption of Hydrogen and Helium from Stainless Steel Exposed to Plasmas of LHD”, N. Yoshida, N. Yugami, Y. Kimura, H. Harada, T. Fujiwara, K. Araki, R. Yoshihara, H. Watanabe, M. Tokitani, S. Masuzaki, Y. Hatano, Y. Oya and K. Okuno
4. Hydrogen Workshop (Toyama, 2014.6), “Application of TEM for Nanoscopic Understanding of Plasma-Wall Interaction”, Naoaki Yoshida
5. Plasma conference 2014 (新潟, 2014.11) ”QUEST プラズマ対向壁の水素吸蔵・放出特性(2)”, 湯上尚之, 吉田直亮, 藤原正, 荒木邦明, 吉原麗子, 渡邊英雄, 花田和明, 関子秀樹, 波多野雄治, 大矢恭久, 奥野健二
6. プラズマ・核融合学会九州・沖縄・山口支部会支部大会 (春日, 2014.12), “QUEST における壁の色測定による膜厚評価”, 下地貴大, 花田和明, 吉田直亮, 関子秀樹, 他 14 名



## 構造材料中の水素挙動に及ぼす照射損傷の影響

茨城大学工学部 車田 亮

## 1. 研究目的

核融合実験装置等の構造材料は、プラズマ対向材料を透過した中性子損傷を受けるとともに、重水素やトリチウム等が材料内部に拡散すると考えられる。一方、構造材料のき裂進展や破壊には、応力腐食割れ (SCC) や活性経路割れ (APC) 等がしばしば問題となり、その1つの要因として材料中の水素の影響が懸念されている。そこで、本研究では、構造材料 (ステンレス鋼等) 中の水素の透過・放出挙動が、照射環境下でどのように変化するかを調査することを目的とする。そのために、茨大の水素マイクロプリント法 (HMPT) や昇温脱離ガス分析装置 (TDS) と、九大応力研の高エネルギーイオン発生装置や SEM・TEM の微細組織観察装置を共同研究に利用する。その結果、材料に関する豊富な知識と経験を共有しながら、核融合実験装置等の構造材料中の水素の透過・放出挙動を解明することにより、重水素やトリチウムと構造壁との相互作用を抑制・制御できる知見を得て、核融合実験装置等の構造材料の健全性および実用寿命の延長に貢献する。

## 2. 実験方法

## 2.1 試料

試料には、高強度鋼の欠点である応力腐食割れや粒界腐食の発生を抑制した準安定オーステナイト系ステンレス鋼 (SUS304L) を用い、試験片形状は、JIS 規格に基づくダンベル形引張試験片をワイヤーカット放電加工機により切り出した。その後、 $\text{H}_2\text{SO}_4$  水溶液 (pH=2.0, 触媒: 0.1[mass%  $\text{NH}_4\text{SCN}$ ]) を用いて、陰極を試験片、陽極を Pt とし、電圧 10[V]、電流密度 10[mA/cm<sup>2</sup>]、30[min] の電気分解を利用した水素チャージを実施した。

## 2.2 水素マイクロプリント法 (HMPT)

水素マイクロプリント法 (HMPT) は、材料を鏡面仕上げした後、水素ガスチャージや電解水素チャージにより水素原子を材料中に浸透させ、その後、写真用乳剤中の臭化銀の水素還元反応により還元された銀粒子の場所と量を SEM・TEM 観察することにより、材料中の水素の透過・放出挙動を解明することができる。ここで、写真用乳剤中のハロゲン化銀と鋼材中から放出される水素の化学的な還元作用は、下記の反応式により表される。



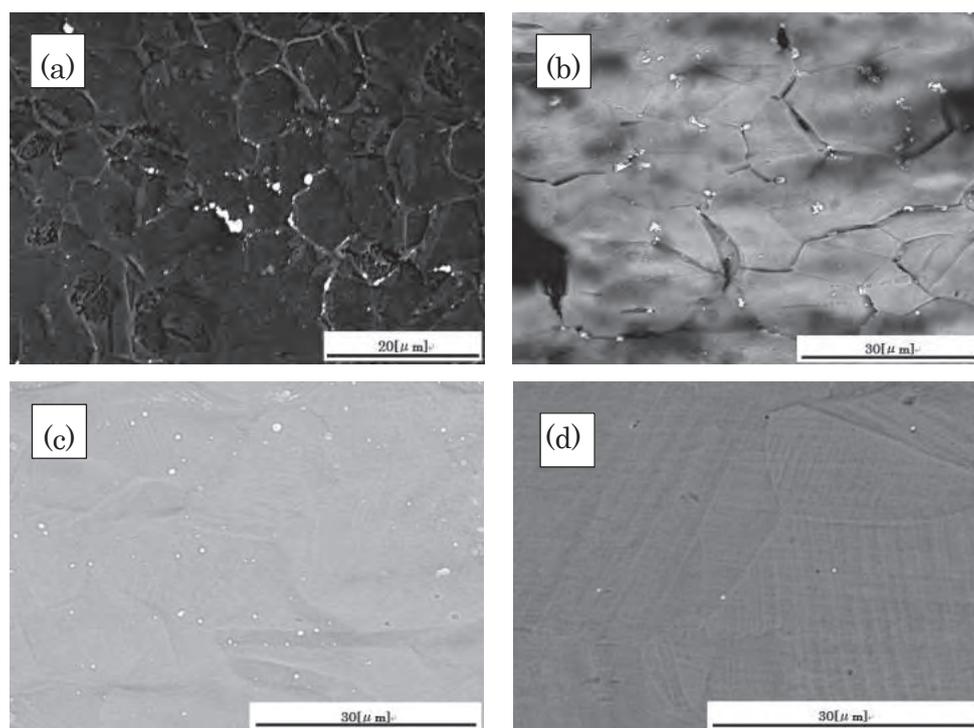
## 2.3 引張応力負荷

水素チャージした試験片に写真用乳剤を塗布した後、観察面を遮光した状態で、引張速度 0.5[mm/min] と 0.005[mm/min] の負荷速度で、引張強度の 90[%] まで引張応力負荷を実施した。

## 3. 実験結果及び考察

Fig. 1 は、陰極水素チャージを施した観察面の HMPT/SEM 画像を示した。ここでは、水素侵入面を IS、水素透過面を TS とし、電気分解による水素チャージを EHC で表わした。(a) は無負荷材の侵入面 SEM 画像を示した。水素放出箇所を表す銀粒子は局所的に粒界から検出され、検出量も少なかった。(b) は引

張速度 0.5[mm/min]の引張応力負荷材の侵入面 SEM 画像を示した。無負荷材よりも銀粒子の検出量が約 1.4 倍増加し、粒界以外に粒内からも検出された。これは、塑性変形によって増大した転位による水素の輸送が要因と考えられた。(c)は引張速度0.005[mm/min]の引張応力負荷材の侵入面 SEM 画像を示した。銀粒子の検出箇所は粒界と粒内の両方であり、検出量は無負荷材の約 2.2 倍となった。これは、低速引張による加工誘起マルテンサイト相中の水素拡散や転位による水素の輸送が要因と考えられた。(d)は引張速度 0.005[mm/min]の引張応力負荷材の透過面 SEM 画像を示した。侵入面と比較して銀粒子検出量が明らかに減少していた。この理由として、低速引張であっても侵入面からの水素放出が主となったことが考えられた。



(a)IS without tensile loading, (b)IS after tensile loading (0.5[mm/min]),  
(c)IS after tensile loading (0.005[mm/min]), (d)TS after tensile loading (0.005[mm/min])

Fig.1 HMPT/SEM images after EHC

#### 4. まとめ

本研究は、構造材料 (SUS304L) 中の水素侵入・放出挙動に及ぼす応力負荷の影響を、水素マイクロプリント法 (HMPT) により究明した。その結果を以下に示す。

- [1] 水素の主な放出経路は粒界であり、塑性変形に伴う転位の移動により粒内からも少量放出された。
- [2] 引張応力負荷材の場合、塑性変形に伴う転位とその回りの応力場に高い水素集積が生じ、水素放出量が無負荷材の約 1.4 倍に増加した。
- [3] より低速で引張応力負荷材の場合、水素が加工誘起マルテンサイト相中も拡散し、水素放出量が無負荷材の約 2.2 倍に増加した。
- [4] 透過面においては、より低速で引張応力負荷した場合であっても、侵入面からの水素放出が主なため、水素の放出量は全体的に極めて微量となった。

## タングステン材料の高熱流束負荷下における損傷変化と熱応力評価

茨城大学工学部 車田 亮

【目的】プラズマ閉じ込め実験装置の第一壁・ダイバータのアーマ材には、高温特性及びスパッタリングによる損耗特性などに優れ、さらに水素リテンションの少ないタングステン(W)材が使用される。たとえば、ダイバータに使用される際には、再結晶温度の 1300°C 程度以下で使用される。本研究では、これらを踏まえ、タングステンの延性脆性遷移温度(DBTT ; 350°C 程度)以上の高温領域に着目し、W 材を使用する際、熱負荷や接合等により発生する応力が引き起こす弾塑性変形による表面形状及び内部組織変化、亀裂発生、破壊、寿命低下等の材料挙動を明らかにする。特に、大型プラズマ閉じ込め装置のダイバータ板の開発を進める上では、まず、要素材料の試作・評価を行い、これを元にさらに改良材を製作し、試験用の小型モックアップ、プロトタイプのコックアップ等を作製・評価し、実機サイズのダイバータ板の製作を完成させる必要がある。このため、要素材の特性評価は最も基本となるものである。しかし、要素材とダイバータ板では、その実験及び使用条件が大きく異なり、ダイバータ板に使用された際の性能を、要素材で評価する方法を確立することが必要である。本年度は、要素材の熱負荷特性評価法を確立するために、W材の熱負荷実験を行い、温度変動下において人工的に熱応力を負荷し、その際発生する損傷を調べた。また、熱解析と比較することによる定量評価も行った。

【実験及び解析】実験には、粉末焼結材 (ITER Grade W ; IG W) とその再結晶処理材 (RC IG W) を使用した。試料サイズは 10mm×10mm×1mm で、実験前に電解研磨を行った。また、本実験では、九州大学応用力学研究所の電子ビーム熱負荷実験装置を用いた。熱源として電子ビームを用い、試料は Cu 製の強制水冷却を行っている試験台に φ5mm の孔が開いた W 製の押さえ板で機械的に固定した。試料の表面温度は、二色放射温度計を用いて測定した。電子ビームの加速電圧は 20 kV で、ビームサイズは約 φ3mm、2 秒間の照射で試料表面が約 1300°C に達するようパワーを調節した。2 秒間のビーム照射の後、冷却時間として 7.5 秒間保持することで、1 サイクル 9.5 秒とした。このようなサイクルを、各試料に対し計 200 回繰り返した。また、損傷過程を確認するため適宜取り出し、走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いて表面観察を行った。さらに、熱負荷実験時の試料の温度分布や熱応力の定量的な評価を行うために、有限要素法を用いた熱および応力解析を行った。解析に使用したモデルは対称性を利用し、実験で使用した試料の 1/4 モデルとした。これにより計算時間の短縮を図った。試料へ負荷される熱流束は、実験とほぼ同じ熱流束の 40 MW/m<sup>2</sup> で、φ3 mm の部分を照射した。試料と冷却台には、温度依存性を考慮した熱伝導率、熱膨張率、比熱、密度を定義した。応力解析では、弾性域だけではなく塑性域に達した際の、試料に生じる応力やひずみを正確に求めるために、引張試験結果から求めた応力-ひずみ曲線の温度依存性を定義した。この応力-ひずみ曲線には、2 直線近似したものを使用しており、使用した応力-ひずみ曲線を図 1 に示した。降伏応力は、温度が上昇するにつれて低下し、温度が高いほど塑性変形が起こり易いことが分かった。また、応力-ひずみ曲線は移動硬化則に従うこととし、バウシinger 効果を考慮した。これらの条件で解析を行い、熱流束を試料に負荷させた時から冷却に至るまでの温度分布と x、y、z 軸方向の応力分布及び Mises 応力分布の時間変化を求めた。

【結果】図 2 及び図 3 に、それぞれ、未処理材及び再結晶処理材に 200 回繰り返し熱負荷を行った各試料の SEM 観察結果を示した。繰り返し熱負荷前では、IG W の表面は滑らかで粒界などを識別することは困難だった。一方、RC IG-W では、表面は滑らかであったが、SEM 像の明暗により粒界が確認できた。これは、再結晶処理材であるため、結晶方位の違いによる入射電子線のチャネルリングにより発生

する SEM 像の明暗がはっきりしているためであると考えられた。熱負荷を 20 回繰り返した後、両試料で変形が生じた。IG W では結晶内に白線が確認でき、転位の移動により生じたすべり線であると考えられた。結晶粒界にも変形が生じているが、その程度は小さかった。RC IG-W では、IG W よりも表面が荒れていた。結晶粒内は IG W より多くのすべり線が見られ、結晶粒界も凹凸が生じていた。40 サイクル後では、IG W 及び RC IG W 共に、新たなすべり線や結晶粒界部分の凹凸に大きな変化は見られなかった。70 サイクル後では、IG W では多少凹凸が激しくなっているが、大きな変化は見られなかった。RC IG W も同様に顕著な変化は確認できなかった。200 サイクル後、IG W の損傷が急激に進み、表面の凹凸は激しくなり、結晶粒内及び結晶粒界共に亀裂が確認できた。また、粒界に沿う剥離も観察された。図 4 には、ビーム照射開始 2 秒後の温度及び応力分布の熱解析結果を示した。温度は中心部表面で最も高く、電子ビーム熱負荷実験による最高到達温度とほぼ同じ温度である約 1300℃となった。また、中心から遠ざかるにつれて小さくなっていき、その勾配も緩やかになった。この温度分布により熱応力が発生し、中心部の表面では約 400MPa が負荷された。さらに、この熱応力により歪が発生し、中心部で最も大きくなった。また、熱負荷中の試料中心部分付近には、圧縮応力が働き、降伏応力を越え塑性変形が発生していた。これは、熱負荷実験でも中心部付近の試料表面にすべり線が形成されており、実験結果と一致していた。さらに、熱解析では、ビームを止めた後の冷却中には試料中心部付近に、引張応力が生じていた。熱負荷実験においても、試料中心部付近には粒界等にミクロな亀裂が観察されており、この冷却中に発生する引張応力によって形成されたものと考えられた。以上のように、実験と解析を比較することにより、試料の温度分布及び負荷される応力を評価し、要素材の定量的な熱特性評価を行うことができることを実証した。今後、実機装置のダイバータ板の温度及び応力分布を解析等で求め、その状況が要素材において実現できるか検討する。

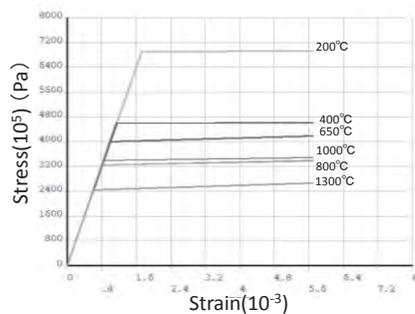


図 1 応力-ひずみ曲線（二直線近似）

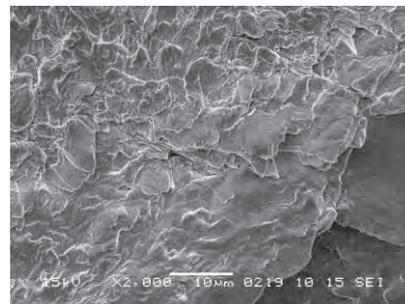


図 2 IG W の電子ビーム照射後の SEM 像

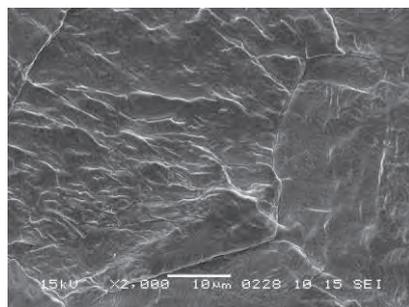


図 3 RC IG W の電子ビーム照射後の SEM 像

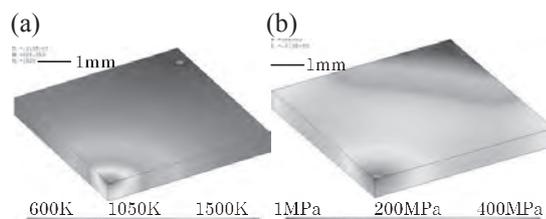


図 4 IG W の電子ビーム照射時の温度(a)及び応力(b)分布

多孔質金属膜における水素捕捉・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 片山一成

【緒言】 利用時に環境負荷が小さい水素は、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、高性能材料開発及び種々の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(W)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、膜形成過程で多量の水素を捕捉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、重水素プラズマスパッタリングにより形成される W 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っている。このことから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、W 堆積過程での水素捕捉機構については明らかとなっていない。本研究では、プラズマスパッタ装置内の異なる環境下における W 堆積量と水素捕捉量を調査し、W 堆積過程での水素捕捉機構について考察した。

【実験方法】 容量結合型 RF 水素プラズマにより W をスパッタリングして、基板上に W 薄膜を作製した。プラズマスパッタ装置の概略図を Fig.1 に示す。アルミニウム製の基板設置ステージは、下部のグラウンド電極上に固定した。スパッタターゲットとして W 板(ニラコ社製 50mm×50mm,厚さ 1mm)を上部の RF 電極に設置し、基板として W 箔(10mm×5mm,厚さ 0.2mm)及び石英晶片(10mm×5mm,厚さ 1mm)をステージの各位置に設置した。ターゲットを除く部分はステンレス製のメッシュでアースシールドをし、電極構造材の損耗を防いだ。グラウンド電極、基板設置ステージ及び真空容器は接地した。水素ガスは、マスフローコントローラーにより流量を制御して真空容器に導入した。ガス圧が安定した後、100W の RF 電力を印加して放電を開始し 310 時間放電を継続した。放電前後の基板質量変化をマイクロ電子天秤で測定し、堆積量を算出した。W が堆積した W 基板をアルゴン雰囲気中で 100℃ずつ段階的に 800℃まで加熱し放出される水素量をガスクロマトグラフで測定した。なお、温度毎に水素放出が検出されなくなるまで測定を行った。石英基板は SEM 観察に用いたが本報告では省略する。

基板設置位置の詳細を Fig.2 に示す。Fig.2(a)は装置上部から見た基板設置位置を示し、Fig.2(b)は装置断面から見た基板設置位置を示す。基板設置環境は次の 3 つにわけられる。

- A 領域:プラズマと接し、ターゲットが見通せる。
- B 領域:プラズマとは接せず、ターゲットが見通せる。
- C 領域:プラズマとは接せず、ターゲットが見通せない。

堆積過程で装置内に存在する水素の形態を次の 3 つに分類する。

- H<sub>i</sub>:プラズマ中の水素イオン
- H<sub>R</sub>:ターゲットからの反跳水素
- H<sub>M</sub>:水素分子

プラズマの空間電位は数 10V 程度であるため、接地された基板への水素イオンの入射エネルギーは数 10eV 程度である。ターゲット W には、およそ 1kV の自己バイアスが発生するため、1keV のエネルギーで水素イオンが衝突し、その多くは高エネルギーを保持して反跳される。エネルギー反射係数はおよそ 0.5 程度であるため、反跳水素はおよそ 500eV 程度の初期エネルギーでターゲットから飛び出し、水素分子との衝突でエネルギーを失いながら基板へ到達する。なお、10PaH<sub>2</sub>雰囲気での W 薄膜への水素分子の溶解量は極めて少ないと考えられる。

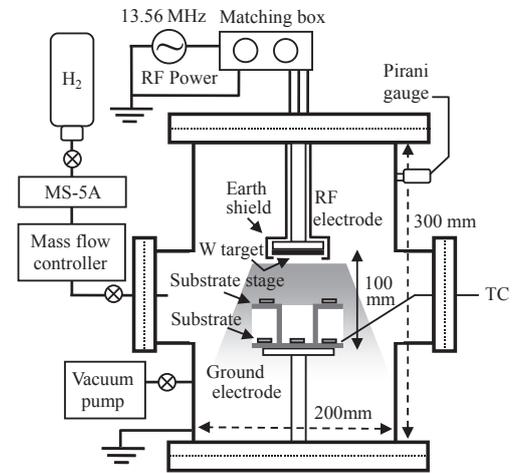


Fig.1 プラズマスパッタ装置概略図

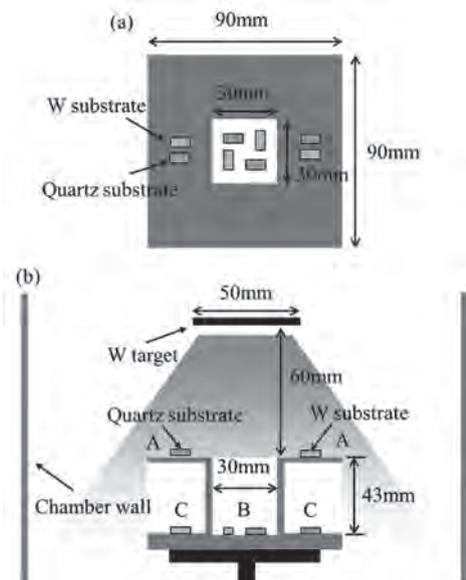


Fig.2 基板設置位置詳細図。装置上部から見た基板設置位置(a)、装置断面から見た基板設置位置(b)

水素プラズマによりスパッタされた W 原子は、表面結合エネルギー(8.7eV)以上のエネルギーを持って飛び出し、気相中の水素分子との衝突でエネルギーを失いながら基板へ到達する。W 原子の質量は水素分子よりはるかに大きいので、1回の衝突でのエネルギー損失は小さく、弾道的に基板へ衝突する W 原子が存在する。水素分子との衝突によりエネルギーを失った W は、プラズマ中或いは気相中を拡散・浮遊した後、基板へ到達する。気相中を浮遊する W 原子が拡散過程でクラスターを形成し、微粒子として堆積する機構も想定される。ここでは堆積機構により W を2つに分類する。

W<sub>B</sub>: ターゲットから弾道的に飛来する W 原子

W<sub>D</sub>: プラズマ中或いは気相中を拡散・浮遊した後、飛来する W 原子  
或いは W クラスター

各領域で薄膜形成表面に飛来する水素及び W を Table1 にまとめる。

Table 1 薄膜形成に寄与する水素および W の形態

	H <sub>I</sub>	H <sub>R</sub>	H <sub>M</sub>	W <sub>B</sub>	W <sub>D</sub>
領域 A	○	○	○	○	○
領域 B	×	○	○	○	○
領域 C	×	×	○	×	○

**【結果及び考察】** Fig.3 に領域 A,B,C に設置した W 基板への単位面積当たりの堆積量[mg/cm<sup>2</sup>]と薄膜中の H/W 比を示す。水素原子数は、800°Cまで放出された水素量から算出し、W 原子数は堆積量から見積もった。領域 A の堆積量が最も多く、周囲を壁に囲まれている領域 B の堆積量は領域 A の1/3程度であった。この結果は領域 A において、ターゲットから弾道的に飛来・堆積する機構(W<sub>B</sub>)よりも、水素分子との衝突を繰り返しながら全方位から堆積する機構(W<sub>D</sub>)の方が支配的であることを示す。領域 C にもわずかながら堆積がみられ、プラズマ中及び気相中を拡散・浮遊した後、飛来する W が存在することが確認された。薄膜中の H/W 比は、堆積量が最も少ない領域 C で最も高く、領域 A が最も低いことがわかった。Fig.4 に領域 A,B,C の W 薄膜から各温度で放出された水素量を H/W 比で比較する。水素放出挙動は領域ごとに大きく異なることがわかった。これは、水素捕捉機構の違いを反映している。これらの結果から、各領域での主要な水素捕捉機構について、一つの仮説として次のように考察する。領域 C では薄膜形成表面への水素イオン H<sub>I</sub>、反跳水素 H<sub>R</sub> の入射はないため、プラズマ中を拡散・浮遊する W 微粒子に水素イオンが化学吸着し、水素を取込んだ W 微粒子が基板へ堆積する(捕捉機構 A)。領域 B では比較的高いエネルギーを持った反跳水素 H<sub>R</sub> が薄膜形成表面に打ち込まれることで水素が捕捉される(捕捉機構 B)。領域 A では反跳水素 H<sub>R</sub> の入射(捕捉 B)とプラズマ - 薄膜界面での水素イオン H<sub>I</sub> の W への化学吸着(捕捉機構 C)により水素が捕捉される。プラズマ中或いはプラズマ - 薄膜界面での水素イオン H<sub>I</sub> と W との吸着反応により捕捉される水素(捕捉機構 A,C)の放出ピークは 500~600°C と高く、薄膜に打ち込まれた水素(捕捉機構 B)の放出ピークは 300°C と低いことが示唆される。領域 A では、両機構で捕捉される水素が同程度あることから、ピーク位置が 400°C になったと推測される。今後さらに実験データを取得し、水素捕捉機構の解明を進める予定である。

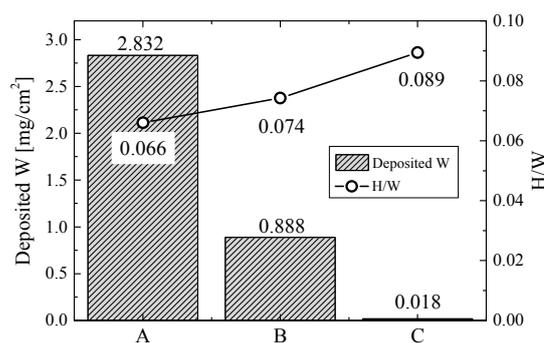


Fig.3 領域 A,B,C に設置した W 基板への単位面積当たりの W 堆積量と薄膜中 H/W 比

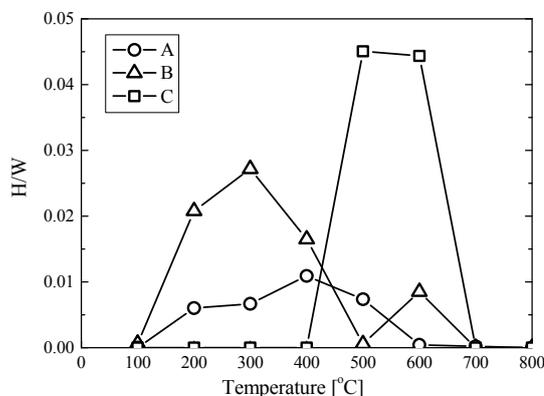


Fig.4 領域 A,B,C の W 薄膜から各温度で放出された水素量(W 原子数あたりの放出水素原子数)

**【成果報告】**

- [1] K. Katayama, K. Uehara, H. Date, S. Fukada, H. Watanabe, “Temperature dependence of deuterium retention in tungsten deposits by deuterium ion irradiation”, Journal of Nuclear Materials, In Press, Corrected Proof, Available online 3 December 2014.
- [2] K. Uehara, K. Katayama, H. Date, S. Fukada, “Hydrogen gas driven permeation through tungsten deposition layer formed by hydrogen plasma sputtering”, 28<sup>th</sup> SOFT, Sep 29<sup>th</sup> –Oct 3<sup>rd</sup> 2014, San Sebastian, Spain.

## 26 FP-24

### ヘリウム照射によるタングステンの損傷組織形成に及ぼす照射温度の影響

核融合科学研究所 坂本隆一

#### 目的

プラズマ対向材料として使用されるタングステンの材料強度特性、水素リサイクリング特性といったグローバルな特性に及ぼすヘリウムの照射効果を、素過程から理解することを目的として、ヘリウムプラズマや、ヘリウムビームで照射したタングステンの損傷組織変化を透過型電子顕微鏡観察するとともに、微小押込み試験や昇温脱離実験を行う。

ヘリウムは水素と比べて、材料中の格子欠陥との相互作用が強く、高温環境下でも材料中に捕捉され、損傷組織形成に大きな影響を及ぼすことから、ヘリウム灰が生じる核融合炉やヘリウム放電実験を行うITERの初期実験フェーズにおいて重要な課題となっている。本研究では特に、核融合炉第一壁を想定した、高温領域におけるヘリウム照射効果に着目した研究を行った。

#### 研究方法

低エネルギーイオンビーム照射装置を用いて、温度制御されたタングステンへのヘリウム照射実験を行い、その照射損傷組織を透過型電子顕微鏡（水素動態観測装置）にて観察するとともに、微小押込み試験や水素イオンの追照射後の昇温脱離実験を行い、ヘリウム照射によるミクロな損傷組織変化が、機械強度や水素吸蔵特性といったグローバルな材料特性におよぼす影響を調べる。また、高エネルギーイオン発生装置にて、予め高エネルギーの重イオンを照射した試料へのヘリウム照射実験を行うことにより、損傷組織とヘリウムの相互作用に関する知見を得る。さらに、核融合科学研究所のLHDにて、高温環境下でヘリウムプラズマを曝したタングステンについても同様な観測を行い、イオンビームを用いたヘリウム照射実験との比較を行う。LHDプラズマへ曝した場合、弾き出し損傷を起こさない様な低エネルギー成分のヘリウムによる照射環境下であり、この比較実験によって、材料中に注入されたヘリウムや、損傷組織が材料特性に及ぼす影響を明らかにする。

#### 実験

今回の共同研究費は、タングステン照射試料作成（電解研磨と真空焼鈍）と高エネルギー重イオン予照射実験を、応用力学研究所にて行うための旅費として使用させていただいた。試料は0.1 mm厚のタングステン薄板を切り出して作成し、水酸化ナトリウム水溶液による電解研磨ののち、真空雰囲気中で1000 °Cを3時間保持する歪みとり焼鈍材と、約2000 °Cで15分保持する再結晶熱処理材を作成した。主に、電子顕微鏡観察用として、再結晶熱処理材を用い、その他の目的には歪み取り焼鈍材を用いた。

照射実験は核融合科学研究所のLHDの10.5Lポートに設置された試料駆動装置を用いて、真空容器壁位置まで挿入し、ICH加熱したヘリウム放電の周辺プラズマに曝した。照射時間は合計で約1000秒である。照射試料を載せた試料ホルダは、55 Wのセラミックヒータにて最大1300 Kまで昇温可能であり、今回の照射実験においては1073 Kに定温維持した。図1に高温試料ホルダの形状と温度分布を示す。ホルダには、透過型電子顕微鏡（TEM）用薄膜試料（3 mmディスク）に加えて、収束イオンビーム（FIB）加工による断面観察用試料（3 mmディスク）、昇温脱離実験用試料（7 mm正方形、15 mmディスク）など、複数種類の試料を配置し、全試料とも同条件下で照射実

験を行った。試料ホルダを設置した真空容器壁位置では、主に荷電交換中性粒子による照射が主であり、数eVからkeVまでの広いエネルギー範囲の粒子負荷環境下に置かれ、弾き出し損傷に比べて、100倍程度多いヘリウム粒子が注入されていることが、エネルギー分布を考慮したTRIMコード計算より予測される（図2）。

また、中性子照射環境下におけるヘリウムプラズマ照射効果を調べることを目的として、応用力学研究所の高エネルギーイオン発生装置（加速器）にて、高エネルギー銅イオンの予照射実験を行った。

### 実験結果と今後の計画

LHDプラズマに曝したタングステン薄膜試料を透過型電子顕微鏡観察し、図3に示すようにヘリウムナノバブルが形成されていることを確認した。観測された損傷組織は、これまで行った1000 K以下でのLHDプラズマ照射による損傷組織と大きな違いはない。現在、FIBによる断面観察試料を作成しており、バブルのサイズや深さ方向分布を詳細に調べ、照射温度が損傷組織形成に及ぼす影響について調べる。また、銅イオン予照射したタングステンに対してもヘリウムプラズマ照射実験を行い、予め導入された照射欠陥がヘリウムバブル形成に及ぼす影響を調べる。

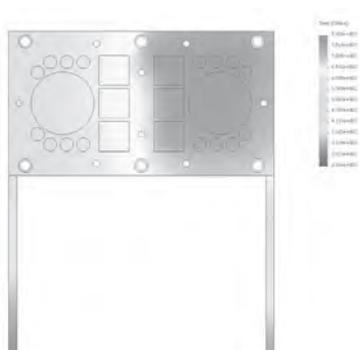


図1 高温ホルダ上の試料配置と温度分布。

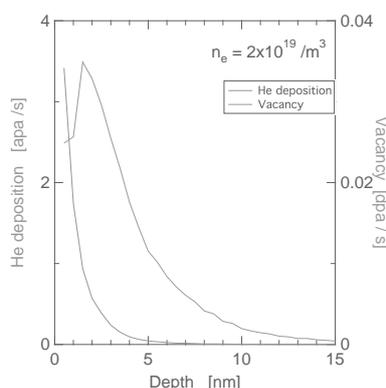


図2 荷電交換中性粒子のエネルギー分布を考慮して計算した、照射欠陥量とヘリウム粒子量

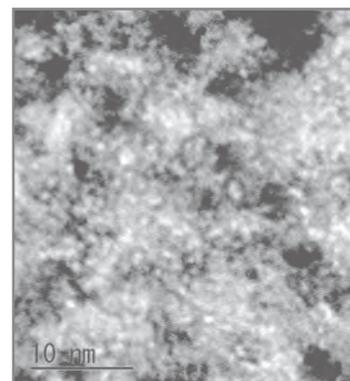


図3 LHDヘリウムプラズマ照射によって導入された、照射損傷組織（バブル）。

### 研究成果報告（予定）

- R. Sakamoto, E. Bernard, N. Yoshida et al., “High temperature helium irradiation of tungsten: multi technique defect characterization and additional H trapping”, 15th International Conference on Plasma-Facing Materials and Components for Fusion Applications (PFMC-15), 18—22 May 2015, Aix-en-Provence (France).

### 研究組織

研究代表者

核融合科学研究所，坂本隆一（男性，46歳）

研究協力者

核融合科学研究所，Elodie Bernard（女性，30歳），現・Aix-Marseille大学

九州大学 応用力学研究所，吉田直亮

九州大学 応用力学研究所，花田和明（所内世話人）

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5）」

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°C、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、 $\gamma/\gamma'$ 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°C、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、550、600、650、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。

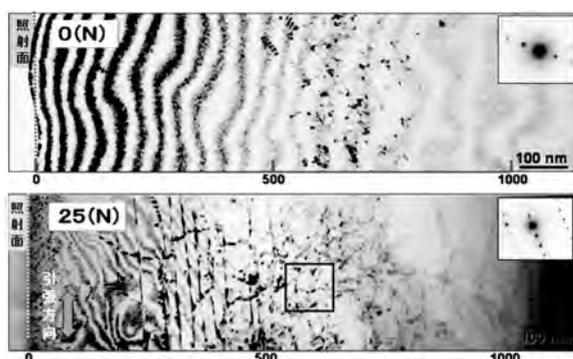


図1 照射試料断面の微細組織観察結果 (400℃, 5dpa)

応力無負荷における高 Ni 鋼 (15Cr-43Ni、 $\gamma'/\gamma$ 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  $\gamma'/\gamma$  ( $\text{Ni}_3(\text{Ti,Al})/\text{Ni}_3\text{Nb}$ ) 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。

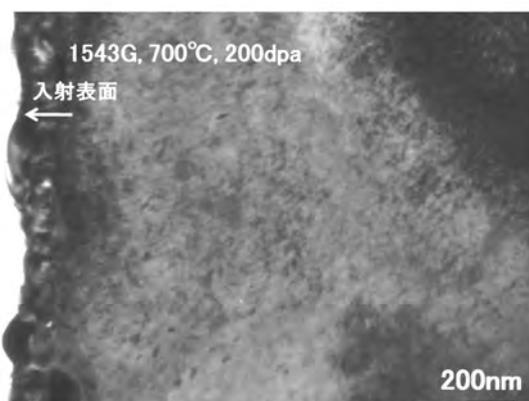


図2 照射した高 Ni 鋼試料断面の微細組織観察結果 (700℃, 200dpa)

また、応力無負荷における高 Ni 鋼（15Cr-35Ni、15Cr-43Ni）の 500～650℃、100dpa 照射等におけるスエリング挙動の結果概要を図-3、組織変化を図-4 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。また、550℃、650℃では顕著なボイドスエリングは確認されず、600℃においてボイドが大きく成長することを確認した。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。

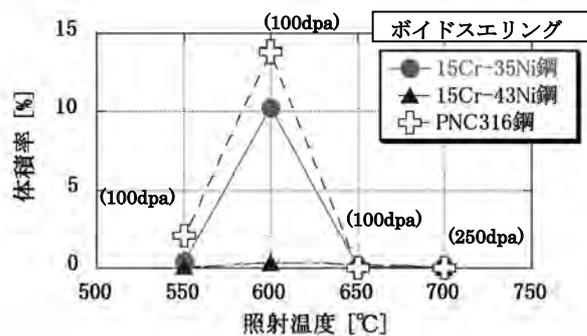


図3 照射した高 Ni 鋼のスエリング抑制の照射温度依存性(図中の括弧内は照射量を示す)

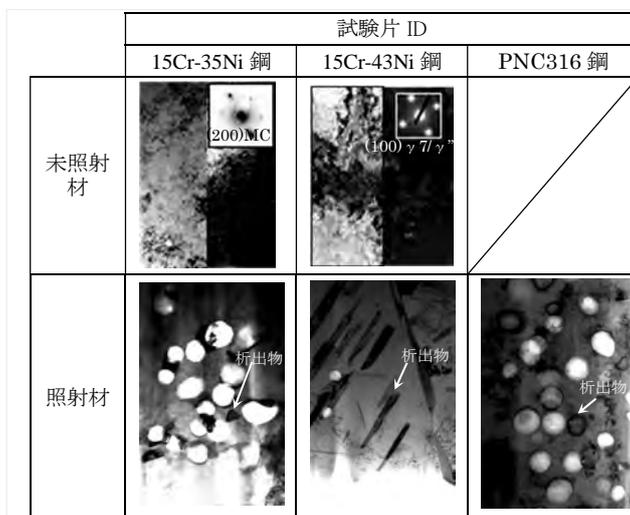


図4 未照射材(左側:明視野、右側:暗視野)及び 600℃、100dpa トリプル照射材の微細組織



## 26 FP-26

### QUEST 装置における ECH プラズマ分光のための CCD 雑音の経年変化に関する研究

核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・森田繁

課題番号：26FP-26

研究課題：QUEST 装置における ECH プラズマでの希ガス不純物の振舞いに関する研究

研究期間：H26 年 4 月 1 日－H27 年 3 月 31 日

所内世話人：岡子秀樹

協力者：5 名（森田繁，大石鉄太郎，黄賢礼，張洪明，Santanu Banerjee）

配分額：研究費（30 千円），旅費（102 千円）

#### 目的：

不純物分光のために QUEST では VUV 分光器，LHD では EUV 分光器を使用している．QUEST では ECH で加速された高エネルギー電子が放射する硬 X 線が真空容器を貫通して，LHD では NBI に起因した高エネルギー中性粒子が回折格子で反射して CCD 検出器に到達し，大きな雑音の発生源となる．これら硬 X 線や高エネルギー中性粒子の CCD 検出器に与える損傷の経時変化について研究した．今回の結果は中性子による CCD 検出器損傷を推測するための参照データとして有用な情報を与える．

#### 実施方法：

QUEST に設置した 20cm 直入射真空紫外分光器と LHD に設置した EUV 分光器の同じ背面照射型 CCD 検出器で検出された雑音を比較し，検出器性能の経年変化を調べる．QUEST には 2008 年度に，LHD には 2004 年度に同型の CCD 検出器を設置し，計測を継続している．



図 1 背面照射 CCD 検出器

#### 実験結果：

QUEST では放電密度が低いので逃走電子のエネルギーが大きく，最大 1MeV 程度までの硬 X 線が装置から放射される．装置から 2m 程度の距離に設置された CCD 検出器には容易に硬 X 線が貫通し，大きな雑音を生じさせる．図 2 (a) にその典型的な硬 X 線によるスペクトルを示す．すべて硬 X 線による雑音であり，VUV スペクトルは雑音に比べ強度が弱く認識することは難しい．それぞれの雑音パルスの波高を解析することにより，CCD に検出されている硬 X 線のエネルギー分布を得ることができる．結果を図 2 (b) に示す．おおよそ 80keV 程度までの硬 X 線を検出していることが分かる．

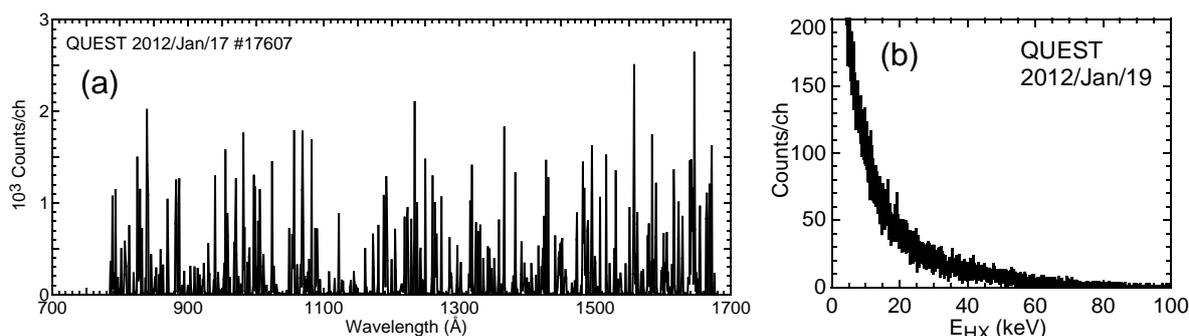


図 2 (a) QUEST で観測される硬 X 線による雑音パルス (b) 硬 X 線エネルギー波高分布

無電流プラズマを生成する LHD では硬 X 線は発生しないが、NBI ビームに起因した高エネルギー中性水素粒子がプラズマから放出される。その高エネルギー粒子は EUV 分光器の回折格子で反射され CCD 検出器に到達する。特に低密度放電ではビームの減衰時間が長く、より多くの高エネルギー粒子が観測される。図 3 (a)にその典型的な高エネルギー粒子による雑音パルスを示す。EUV スペクトルは唯一 67.4Å のところに CVI の 2 次光が確認できる。QUEST の場合と同様に、その雑音パルスの波高を分析することにより CCD にやってきている高エネルギー粒子のエネルギー分布を求めた。結果を図 3 (b)に示す。最大で 150keV までの粒子を観測でき、このエネルギーは 180keV で入射されている負イオン NBI に対応する。正イオン NBI の入射エネルギーは 40keV である。

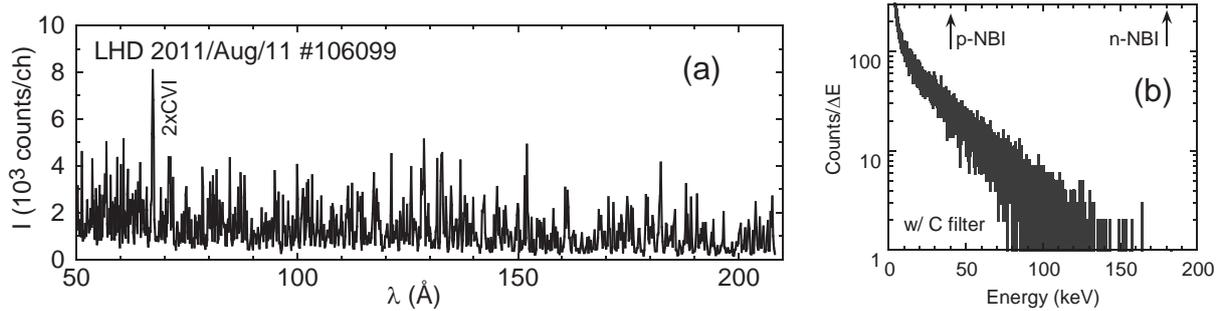


図 3 (a) LHD で観測される高エネルギー中性粒子による雑音パルス (b) 高エネルギー粒子波高分布

QUEST では 8 年間、LHD では 12 年間、同じ CCD を継続して使用した。従って CCD 検出器はその期間の間、硬 X 線もしくは高エネルギー粒子の照射を受けたことになる。そこで、CCD 検出器で得られるスペクトルを使用し始めた時期とごく最近の時期とで比較した。紙面の都合上、ごく最近得られたスペクトルのみ図 4 に示す。図 4 (a)は QUEST から VUV スペクトル、(b)は LHD から EUV スペクトルである。LHD のデータはネオンをパフした放電から得られている。長年の硬 X 線や高エネルギー中性粒子の照射にも関わらず、スペクトルには全く雑音らしきものは観測されていない。使用し始めに得られたスペクトルと同様の性能を示しており、全く CCD 検出器に損傷は見当たらない。

また、2次元の画像でスペクトルを観測しても、CCD 素子の損傷を示す白い斑点も全くない。結論として、通常の核融合装置で観測される硬 X 線や高エネルギー粒子照射量では CCD 検出器は損傷を受けないことが分かった。

硬 X 線は CCD 素子内の電子に吸収され、また、高エネルギー粒子は CCD 検出器のごく表面で電子を励起する。中性子は CCD 素子を構成する原子そのものを移動させると考えられるので、お互いの影響を直接には比較できないが、今回得られたデータは今後の分光計測にかかる中性子影響についての参考となる。

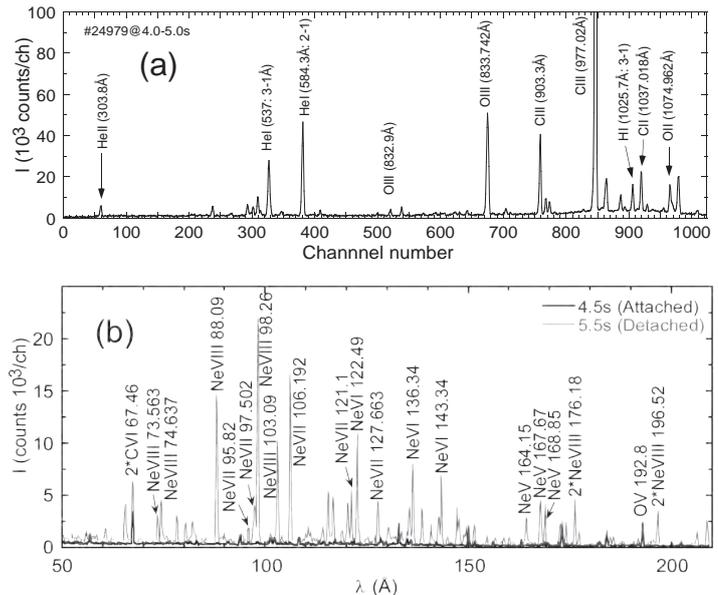


図 4 最近観測した(a) QUEST の VUV スペクトル及び (b) LHD の EUV スペクトル。

平成 26 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, 2]。

実験観測の進展

「遠非平衡」という概念が用いられる時、熱平衡からの乖離の度合いが定量化出来るのではないかという直感的な見方が底流にある。乖離の度合いをどのように記述するかは、現在プラズマ物理学の中心課題である。

熱平衡の近傍では、巨視的な観測量のダイナミクスと、それらの輸送を司るマイクロな揺動との間に、明確なスケール分離が成り立つ。解析対象とする現象を記述する輸送係数は、その対象のスケールに依存しない「輸送係数 (輸送行列)」となる。スケール分離がもし成り立つなら、マイクロ揺動の特性時間・特性長は、巨視的観測量の時空定数より格段に短く、巨視観測量が変化する各瞬間に、巨視変数に応じた定常状態に達しているはずであり、マイクロ揺動のもたらす輸送量は、巨視変数に応じた値を取ると予想される。この考え方が「局所クロージャー」仮説 (輸送係数が、その位置その時刻の巨視的変数で表現される、という仮説) である。

本共同研究では、理論・実験にわたる総合的な研究を展開し、輸送量と巨視的変数との間の局所クロージャー仮説の破れを詳細に検証した[2]。

実験では、輸送現象での局所クロージャーの破れを確認する大きな進歩を得た。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  $\text{grad } T$  と熱流  $q$  とが

$$q/n = -\chi \text{ grad } T$$

のような一価の関数 (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[3]。(nはプラズマ密度。) 右図に実験結果を引用する。従来、輸送関係が L-H 遷移のよ

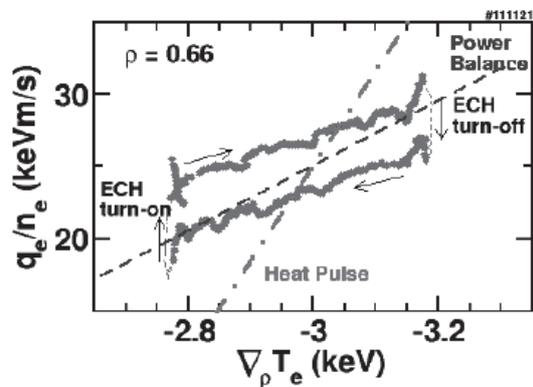


図 1 : 勾配-熱流関係のヒステリシスが発見された。[3]

うな場合[4]を除き一価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。この図で、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、一価関数としての当てはめを（定常バランスの比較や周期熱伝播観測という）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來の謎であった。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た。詳細に温度変動の時空構造を分析したものが図2である[5]。図2は、左側が拡散モデルの場合の振る舞い、右側が実験観測（図1をもたらず状況）である。それぞれ、最上段が周期的な入力の変動、中段が規格化半径( $r/a$ ) 0.37 (加熱部の少し外側), 0.82 (加熱部から離れた下流) での周期的温度変動を示す。最下段は、温度変動の時間・半径面上の全体像である。時間は、図中央が加熱入力の終了時に揃えられ、 $t < t_0$ では加熱、 $t > t_0$ では休止という位相にある。周期的な加熱変化に対応して、下流の位置では、温度変化が位相遅れを持つ。拡散的モデルの場合では、変動値が0、最大、最小のそれぞれを比較すると、下流の離れた位置では、いずれもほぼ同じような位相遅れを示す。（一つの時定数を持つ。）こうした従来の予想とは異なり、実験観測では、変動値が0の位相は拡散モデルと類似の遅れを示すが、加熱 on-off の状況の伝達は、ずっと速い時定数で伝達されている。明らかに複数の時定数が共存している。従来見逃されていた本質的な問題を発見したと言える。

この観測の普遍性を確認する為の努力を続けた。例えば、畳込み法を採用した事で、加熱変動周波数の高調波迄高精度で観測する事が可能になった。5次、7次、9次等の高調波の空間分布を比較する事で、単純な拡散モデルが破れている事を確認する方法を示した[6, 7]。これにより、稠密な計測が可能な大型装置だけではなく、限られた少数の位置のみに観測データが限られるような状況にあっても、輸送の局所クロージャーの破れを実験的に観測する事が可能になった。多数の実験観測や理論解析を総覧する総合論文をまとめ発表した[2, 8]。

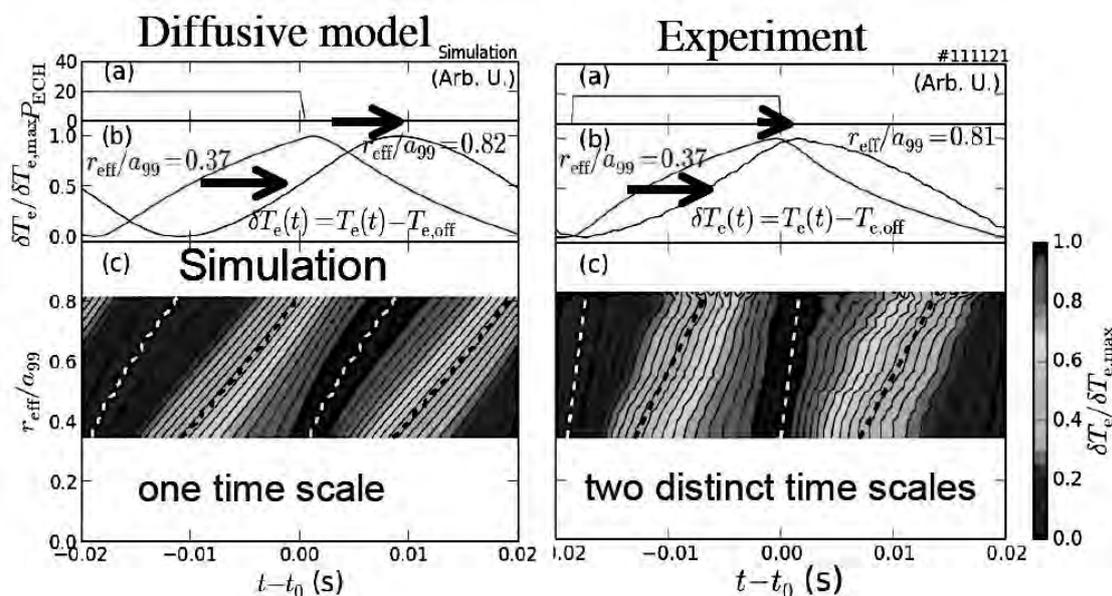


図2：周期的な時間変化を持つ加熱モジュレーションに対する温度摂動の時空変化を示す。左側が拡散モデルの場合の振る舞い、右側が実験観測（図1をもたらず状況）。最上段：周期的な入力の変動。中段：規格化半径( $r/a$ ) 0.37, 0.82 での周期的温度変動。最下段：温度変動の時間・半径面上の全体像である[5]。

## 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に直接に熱流を変化させる可能性を指摘した[9, 10, 11]。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。その力を表現するパラメタとして

$$\Gamma_h = \frac{\gamma_h}{\chi_{\perp} N k_{\perp}^2} = \frac{\delta P}{\delta P} \frac{1}{\chi_{\perp} N k_{\perp}^2}$$

が提案されており、新たに非平衡性を表現するパラメタ $\Gamma_h$ が導入された。乱流輸送係数は $1/(1-\Gamma_h)$ という依存性を含む事が示された。 $P$ は加熱入力であり、直接加熱入力に乱流や輸送に影響する様相が示された。更に $\Gamma_h$ が1に近づくときの理論式も求められた[12]。

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作る前に熱流が変化している事を示している、それがヒステリシスに現れる。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根本問題を解決する為の今後の研究の方向を示している。

## H-mode 研究の進展

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。ここでは、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やドリフト波等が共存している。径電場分岐モデルに立脚し、遷移条件を詳細に検討した[13]。先進データ解析法を活用し、L-H 遷移における時空ダイナミクスの次実験観測を取りまとめて発表した[14]。

## 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.-I. Itoh, et al.: Project review J. Plasma Fusion Res. Vol.90, No.12 (2014)793
- [3] S. Inagaki, et al.: Nucl. Fus. **53** (2013) 113006
- [4] S.-I. Itoh and K. Itoh, Phys. Rev. Lett. **60**, 2276 (1988).
- [5] S.-Inagaki, et al.: Dynamic method to study turbulence and turbulence transport , IAEA Conference on Fusion Energy, 2014, St. Petersburg, paper EX2-1
- [6] S. Inagaki, et al.: Plasma and Fusion Research **8** (2013) 1202173
- [7] S. Inagaki, et al.: Plasma and Fusion Research: Rapid Comm. **9**, 1202052 (2014)
- [8] K. Ida, et al.: Nucl. Fusion **55** (2015) 013022
- [9] Itoh, S.-I. and Itoh, K.: Sci. Rep. **2** (2012) 860
- [10] Sanae-I. Itoh, Kimitaka Itoh: Nucl. Fusion **53** (2013) 073035
- [11] Yusuke Kosuga, Sanae-I. Itoh, Kimitaka Itoh: JPS Conf. Proc. , **1**, 015002 (2014)
- [12] K. Itoh, et al.: ITC 24 (2014) paper I3.
- [13] S.-I. Itoh and K. Itoh: Nucl. Fusion **54** (2014) 114017
- [14] T. Kobayashi, K. Itoh, et al.: Nucl. Fusion **54** (2014) 073017



### ・目的

本研究は、応用力学研究所に今年度導入された最新鋭の球面収差補正機構付き透過型電子顕微鏡 JEOL JEM-ARM200CF の機能を最大限に活用した、原子力材料の構造寿命予測モデルを確立するために必要不可欠な基礎研究である。原子力材料の寿命を損なう脆化モードの一つである粒界破壊は、材料中の結晶粒界に偏析した不純物が原因で起こることはよく知られているが、そのメカニズムの詳細は未だ明らかではない。例えば、申請者は最近、割れた粒界の両破面を精密に組成分析した結果、同じ粒界であっても不純物濃度が場所によって異なることや、粒界は必ずしも偏析濃度ピークのところを境にして均等に割れる訳ではないことを見出した (Fig. 1) が、これらは従来理解・予想を覆す全く新しい知見である。本申請研究では、これらの新知見を足掛かりにし、最新鋭の電子顕微鏡を用いて、技術的に難易度の高い実験を行うことで、“破壊の起点はどこか?”というマテリアルサイエンスの古典問題を解明することを目指す。

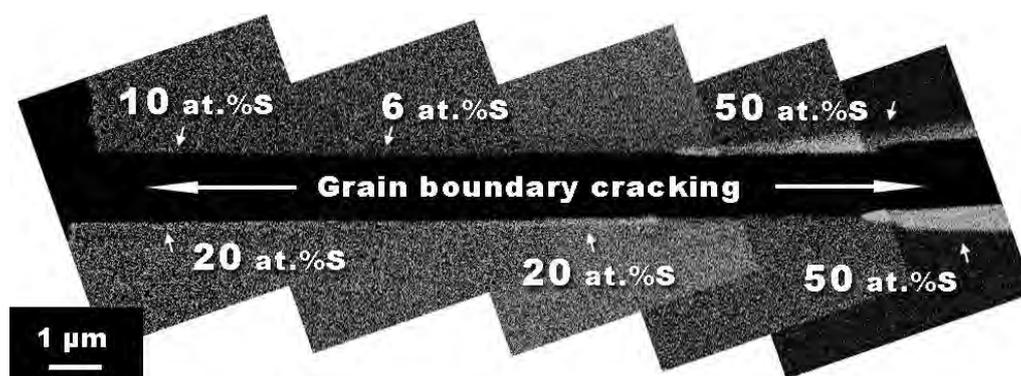


Fig.1 | 不純物（硫黄）が偏析したニッケルの粒界割れの EDS マップ

### ・実験方法

粒界に不純物を偏析させた金属試料を、透過型電子顕微鏡の中で引張り破断し、その破断過程を動的観察する（引張りホルダは自前の物を持参）。粒界に偏析した不純物の濃度を、破断前後で比較することによって、破壊の起点を不純物濃度の観点から議論する。組成分析に用いる EDS（エネルギー分散型 X 線分光）に関しては、S/N 比に優れた最高水準のものが装備されている（冷陰極電界放出型電子銃、コンデンサレンズの球面収差補正機構、直径 100 ミリの検出器）ため、偏析濃度が低い場合でも定量分析が十分可能であると期待できる。従来の電子顕微鏡では、割れた粒界（自由表面）の結晶格子縞を観察する際に、格子縞が実際の試料位置よりも外側まで滲み出てしまい、どこに現れた格子縞が粒界の真

の情報を反映しているのかがわからないという問題があった (image delocalization と呼ばれる問題である)。これは顕微鏡レンズの球面収差に起因する問題であり、本電子顕微鏡は正にこの点を改善した仕様となっている。破断過程の動的観察は技術的に極めて難しい実験だが、破断前後の組成分析は比較的容易である。しかし、この電子顕微鏡では容易にできる“破断前後の粒界組成の比較”や“割れた両破面の同時観察”は、粒界破壊の研究にこれまでよく用いられてきたオージェ電子分光法や3次元レーザーアトムプローブでは、やりたくてもできない分析である。これが本研究で期待できる成果の新奇性についての、最低保証ラインである。

#### ・研究経過及び結果

放射線従事者登録の書類手続きが難航したため、電顕を使用できたのは 2/24~2/25 の 2 日間のみであった。他のユーザーと共に装置の使用方法についてガイダンスを受講するという制約があったため、引張りホルダを使用した本格的な実験は行わず、装置の操作方法をマスターすることを主目的として、難易度の低い試料の分析を行った (Fig. 2)。この試料の元素マッピングは、分析に特化したこの電顕では容易であったが、これとは仕様異なる同型機種 (ショットキー電界放出型電子銃、対物レンズの球面収差補正機構、直径 30 ミリの検出器) では、微細な析出物をここまで鮮明に映し出すことはできなかった。尚、このデータは本申請課題である粒界の研究テーマとは直接関係していないが、単なるテスト分析という訳ではなく、現在投稿中の論文に必要なものであるという意味で有意義な実験である (Nature Physics のレフリーからのコメントに対応するための追加データ)。この他に、これとは別の電子顕微鏡を用いて原子レベルの動的観察技術のノウハウ蓄積は着々と進めており (Fig. 3)、次年度からの本格的な実験に向けて、準備は整いつつある。

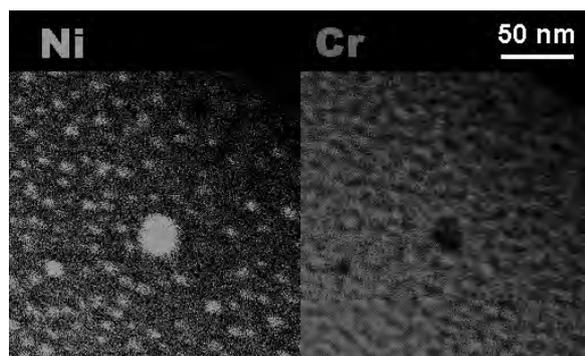


Fig. 2 | 2相ステンレスに析出した金属間化合物 G 相と Cr-rich  $\alpha'$  相の EDS マップ

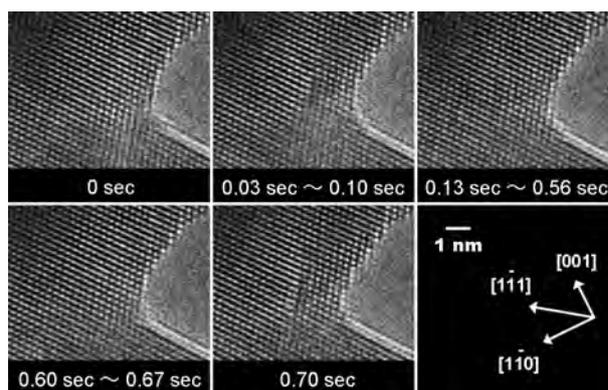


Fig. 3 | 進展するクラックの原子レベル動的観察

#### ・成果報告

実験開始が 2/24 であったため、この成果報告書を執筆している時点 (2/28) では、論文及び学会発表は無し。

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って装置内で再堆積層やダストを形成する。核融合燃料であり、放射性物質であるトリチウムの堆積物への取り込みは放射性物質の炉内残留を引き起こし、また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、今までの核融合実験装置のプラズマ対向壁として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を取り込まれることが問題となっている。これまで、Heliotron-DR 装置を用いた低温・低密度水素プラズマに炭素不純物としてメタン (CH<sub>4</sub>) を用いた水素化炭素膜堆積実験により、水素・メタン混合プラズマにわずかな窒素導入 (Q<sub>N</sub>/Q<sub>H</sub>~0.05) によって炭素膜堆積が大きく抑制されることを見いだしている。

2. Heliotron-DR における重水素ベンゼンを用いた炭素不純物導入

図 1 に Heliotron-DR を用いた炭素膜堆積および重水素吸蔵の実験概要図を示す。これまで炭素不純物源としてメタン (CH<sub>4</sub>) を用いてきたが、今回、将来の昇温脱離分析 (TDS) なども考慮して軽水素を極力含まない水素化炭素膜堆積とその抑制実験を行うために、炭素不純物として重水素化ベンゼン (C<sub>6</sub>D<sub>6</sub>) を用いた実験を行った。窒素導入に伴う原子・分子反応の解明のために、3 台の四十極質量分析器を主排気ダクトおよび加熱試料台の差動排気系に接続し排出ガス分析を行った。また、可視分光器により発光粒子分析を行った。水素化炭素膜の成長過程の観察のために加熱試料台に置かれたシリコン試料上に堆積する水素化炭素膜厚を分光エリプソメータで測定し、光学顕微鏡ならびに SEM で表面観察を行った。

図 2 にシリコン表面に堆積した水素化炭素膜堆積速度の表面温度依存性を示す。加熱試料台を試料導入用ポート内側 (円形真空容器壁面より ~4 cm 外側) の陰領域に設置した場合においても、メタンと同程度の ~ 数 nm/h 程度の堆積速度を持った炭素膜堆積特性を得たが、メタンと重水素化ベンゼンで異なる表面温度依存性が見られている。この異なる炭素膜堆積特性が炭素不純物源の違いによるものか、または試料台の設置位置の違いによるものかについては、今後検討する予定である。以降、重水素化ベンゼンを用いた炭素膜堆積抑制実験は十分な炭素膜堆積が得られる T<sub>s</sub>=300~320 K の温度領域で行った。

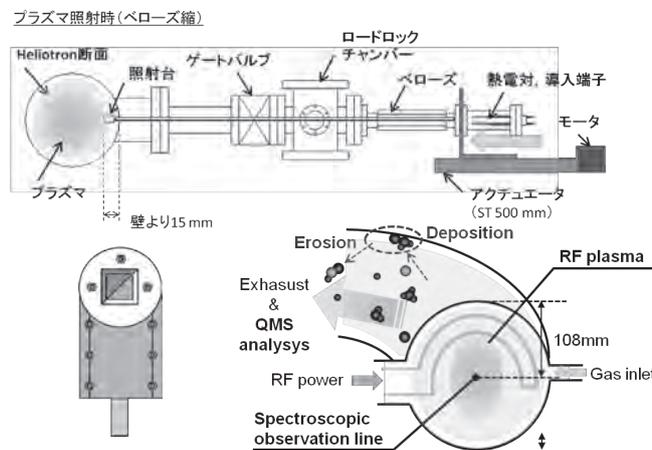


図 1 Heliotron-DR 装置 (断面概略図と試料台) と実験概要図

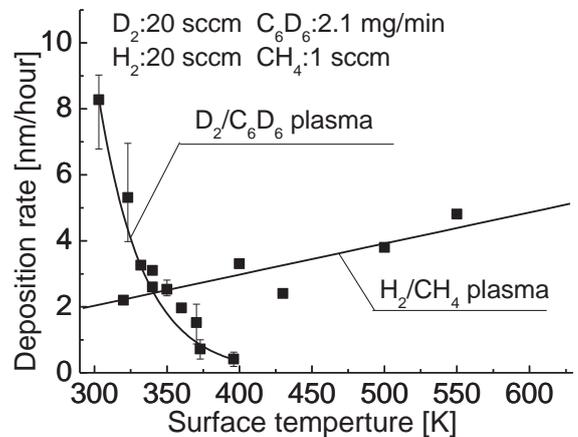


図 2 メタンまたは重水素化ベンゼン導入による水素化炭素膜堆積速度の試料表面温度依存性

### 3. 窒素導入による水素化炭素膜堆積と重水素吸蔵の抑制：窒素スカベンジャー効果

図3に重水素/重水素化ベンゼンプラズマ中に窒素を導入したときの質量分析結果を示す。窒素導入に伴い、揮発性の $\text{ND}_3$ や $\text{CN}$ などのNを含む粒子分圧値の大きな増加が見られる。一方、可視分光測定からは $\text{CN}$ 分子スペクトル強度の大きな上昇が観測されている。これらの観測結果は、窒素導入により低温領域で凝集性の強い炭化水素( $\text{C}_x\text{D}_y$ )から非凝集性の $\text{ND}_z$ や $\text{CN}$ 系粒子が選択的に生成されたことによるものと考えられる(窒素スカベンジャー効果)。図4に窒素導入に伴う水素化炭素膜厚変化を示す。窒素導入により水素化炭素膜成長が強く抑制されている。この炭素膜成長の抑制は、炭素膜中に吸蔵されている重水素量の低減効果をもたらすことが期待される。

図5に窒素ガスをステップ的に導入した時の主要な分子性粒子のガス分圧時間変化を示す。水素化炭素膜堆積の抑制に主要な役割を果たす揮発性 $\text{CN}$ 系粒子や重水素吸蔵を抑制することが期待される揮発性 $\text{ND}$ 系分子の分圧上昇が見られる。また、これら揮発性ガス分圧変化の特性時間(10~20分)は、装置のガス導入/排気系の特性時間や炭素不純物導入時の炭化水素分圧変化の特性時間に比べてはるかに長く、導入された窒素が関与する分子反応は炭素堆積膜中への窒素原子の拡散と膜中での揮発性分子形成が強く関係していることを示唆するものと考えている。

図6に同様に窒素導入量をステップ的に変化させた時の重水素原子分圧の時間変化を示す。窒素導入量の増加につれて、重水素原子の分圧はステップ的に増加する。この分圧上昇は、ベンゼン導入に伴い重水素を取り込みながら炭素膜が形成されていた(重水素化炭素膜の形成)系に窒素が導入されることで炭素膜中への重水素吸蔵が抑制されたことを示すのもである。同様な分圧上昇が、 $\text{D}_2$ ( $m/z=4$ )や $\text{HD}$ ( $m/z=3$ )にも見られており、今後、詳細な重水素吸蔵量の評価を行い、窒素導入による重水素吸蔵抑制効果を明らかにする予定である。

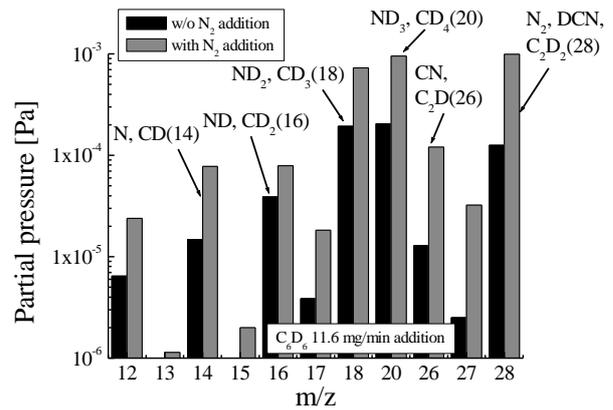


図3 重水素/重水素化ベンゼンプラズマへの窒素導入有無によるガス分圧値の比較

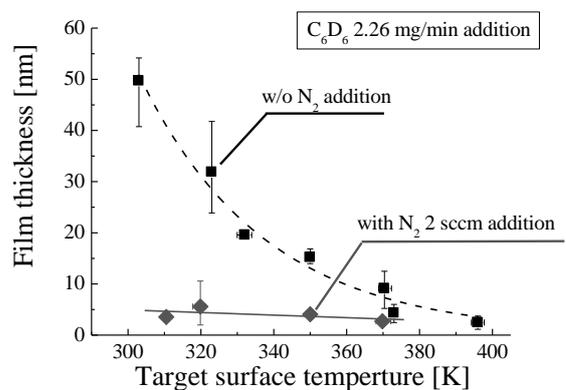


図4 堆積膜厚の試料表面温度依存性

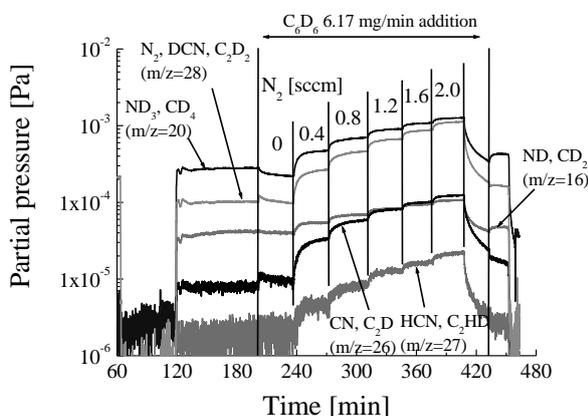


図5 重水素/重水素ベンゼンプラズマ中への窒素導入に伴う分子性ガス分圧の時間変化

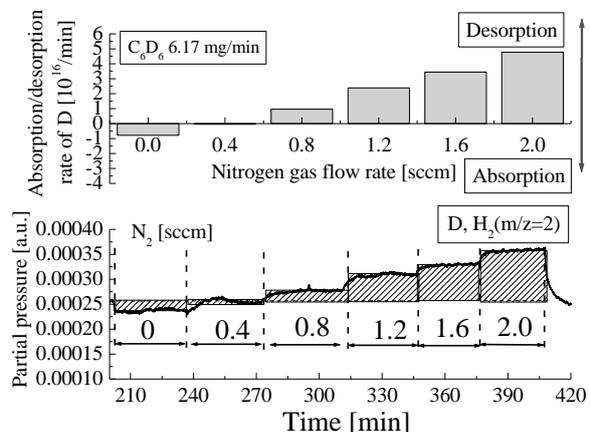


図6 重水素/重水素ベンゼンプラズマ中への窒素導入に伴う重水素原子分圧の時間変化

## 燃料電池用水素吸収・貯蔵リチウムセラミックス材料中の水素の熱放出特性

Thermal release property of hydrogen absorbed and stored in lithium oxides ceramics for fuel cells

名城大学理工学部 土屋 文

Bun Tsuchiya

Faculty of Science and Technology, Meijo Univ.

**目的** 現在、自動車用水素燃料電池の水素供給源に求められる水素貯蔵材料の水素吸収、貯蔵および放出特性は、常温貯蔵、5 wt%以上の水素の重量貯蔵容量および150°C以下の放出温度である。本研究室では、これまで、常温および大気中において安定で水素の拡散係数の高いリチウムチタネート( $\text{Li}_2\text{TiO}_3$ )、リチウムジルコネート( $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$ )、リチウムシリケート( $\text{Li}_4\text{SiO}_4$ )セラミックス材料の水素吸蔵特性を調べた結果、 $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$  および  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  の材料において、材料の重量が室温において空気に曝すだけで時間と共に増加することを発見した。この重量の増加は、空気中の水蒸気が材料中に取り込まれ、水素として貯蔵されていることを意味しており、新規な水素燃料電池用の水素供給源として利用される可能性がある。従って、本研究の目的は、タンデム加速器を用いた反跳粒子検出(ERD)法および熱放出実験装置(TDS)を用いて、水素放出温度を決定すると共に、水素の熱放出挙動および材料中に貯蔵された水素の占有位置について明らかにすることである。

**実験方法** 寸法 $\phi 8.0 \times 1.0 \text{ mm}^3$ 、 $2.53 \sim 3.78 \text{ g/cm}^3$ の密度、単斜晶(蛍石型構造)の $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$ 試料を使用した。この試料を真空内で473~573 Kまで加熱して試料中の残留水素を取り除いた後、約286~297 Kの室温および約30-55%R.H.の相対湿度の大気中に放置した。このとき、精密電子天秤を用いて、 $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$ 試料の重量を大気に曝した時間(空気暴露時間)に対して測定した。さらに、1.7 MV タンデム加速器からの2.8 MeV  $\text{He}^{2+}$ イオンをプローブビームとしたERD法により、試料中に吸収された水素(H)の濃度を測定した。捕捉H濃度および重量が一定になった後、これらの試料を真空内で室温から約673~773 Kまで加熱して、ERD法およびTDS法により捕捉H濃度測定および放出ガス種の判別をそれぞれ行った。

**実験結果および考察** ERD法により得られた $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$ 試料中のHの濃度分布を図1(a)に示す。図1中の298 Kのスペクトルは試料作製後の試料中のH濃度分布を示す。水( $\text{H}_2\text{O}$ )が試料作製時に混入し、格子間H原子、水酸基(-OH)あるいは $\text{H}_2\text{O}$ 等の形状で吸収されていると考えられる。333~423 KにおけるERDスペクトルは、試料を各温度で約10分間の等時加熱を行った後に測定された。深さに対するH濃度は温度上昇とともにほぼ同程度で減少することがわかった。次に、各温度のERDスペクトルの全カウント数を298 KのERDスペクトルの全カウント数で規格化し、加熱温度に対してプロットした(図1(b))。試料中の捕捉H濃度は、約323 Kの低温から減少し始め、約423 Kで全H濃度の10%以下に達することが判明した。この結果は、 $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$ 中に捕獲されたHは、各トラップサイトから脱離あるいは脱捕獲するためのエネルギーが極めて低く、また拡散係数が非常に高いことを示している。

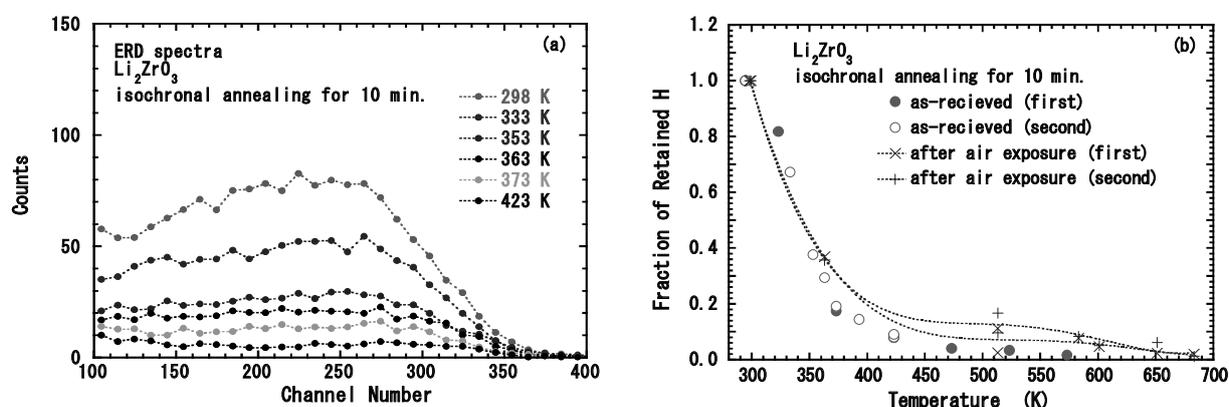


図1 (a)室温から423 Kまで加熱された $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$ のERDスペクトル、(b) $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$ 中の捕捉H濃度の温度依存性。

次に、真空内で残留水素を取り除いた  $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$  試料を室温において大気中に曝した。空気暴露時間に対する試料の重量増加の割合(wt%)を図 2 に示す。試料の重量増加の割合は、どの密度に対しても急激に増加した後、ある時間で一定に達することがわかった。特にもっとも密度( $2.53 \text{ g/cm}^3$ )の低い試料の重量は、約 1500 hrs で約 25 wt%まで増加した。次に、1410 hrs の空気暴露時間後に得られた ERD スペクトルおよび空気暴露時間に対する ERD スペクトルの全カウント数をそれぞれ図 3(a)および(b)に示す。ERD スペクトルの横軸の Channel Number は反

跳された  $\text{H}^+$  イオンのエネルギーであり、深さ方向の情報を与える。従って、H の濃度は、どの深さに対してもほぼ同程度

増加することがわかった。また、図 2 および 3(b)を比較すると、空気暴露時間に対する試料の重量増加と捕捉 H 濃度の増加が似た傾向を示すことがわかる。従って、重量増加は大気中の水蒸気吸収が要因の一つとして考えられる。

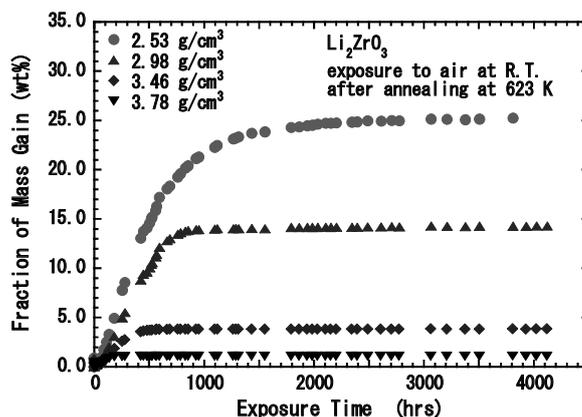


図 2 室温で大気中に曝された  $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$  の重量変化。

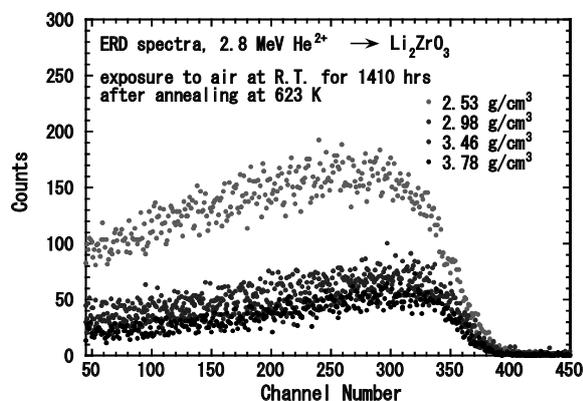
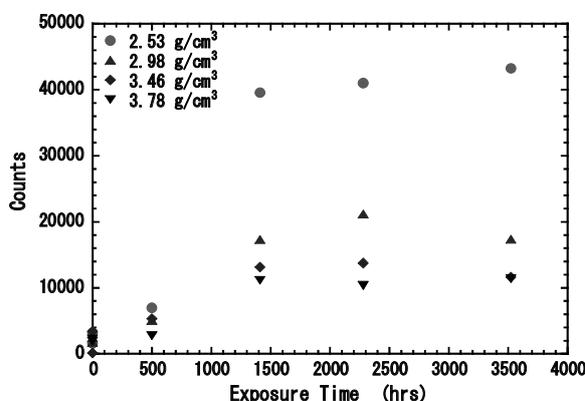


図 3 (a)室温で大気に 1410 hrs 曝された ERD スペクトル。



(b)  $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$  中の捕捉水素濃度の空気暴露時間依存性。

次に、TDS 法を用いて、重量変化が一定になった  $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$  試料を室温から 773 K まで 4 K/min の温度上昇速度で加熱し、試料から放出されるガス種の判別を行った。得られた TDS スペクトルを図 4 に示す。 $\text{CH}_4$  および  $\text{H}_2\text{O}$  が約 300 K の低温から放出し、続いて  $\text{H}_2$  の放出ピークが約 427 および 603 K の加熱温度で観測された。さらに、10 min 間の等時加熱後に ERD 法によって測定された  $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$  中の捕捉 H 濃度の変化を図 1(b)中に示す。捕捉 H 濃度は約 323~423 K および約 473~573 K の温度範囲で減少することがわかった。2 段階の H 放出は、2 種類のトラップサイトが存在することを示し、第 1 段階は Li あるいは Li 水酸化物( $\text{LiOH}$ )の周りに吸着した  $\text{H}_2\text{O}$  の脱離、第 2 段階は H 原子の酸素空孔からの脱離が律速で生じると考えられる。また、図 4 から 500 K 以上になると  $\text{CO}$  および  $\text{CO}_2$  の放出も観測された。これらのガス種も  $\text{H}_2\text{O}$  と同時に大気中から試料中に吸収されており、重量増加の割合を高めている要因であると考えられる。

**まとめ** 真空内で約 473~673 K まで加熱して残留 H を取り除いた  $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$  を室温で大気中に放置した。重量法および ERD 法により、 $2.53 \text{ g/cm}^3$  の  $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$  の重量が約 1500 hrs の空気暴露時間で約 25 wt%まで増加し、飽和捕捉 H 濃度は密度の増加と共に減少することがわかった。また、TDS 法および ERD 法により、捕捉 H は約 300 K の低温から  $\text{CH}_4$  および  $\text{H}_2\text{O}$  の形状で放出し、捕捉 H 濃度は約 423 K で 10%以下まで減少することがわかった。

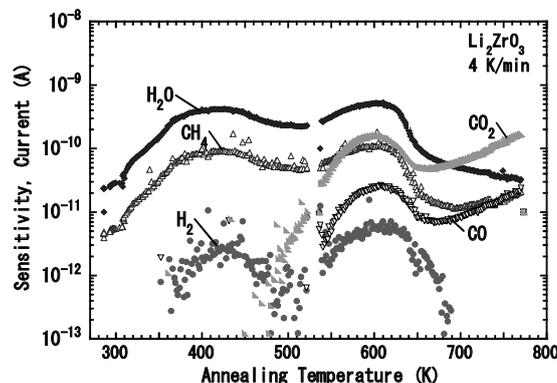


図 4 加熱された  $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$  からの放出ガス種の温度依存性。

## 26 FP-31

研究課題名：酸化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

核融合炉システムにおいて燃料であるトリチウムは、核融合炉構造材あるいは配管材として使われる金属、合金に溶解、透過し易く、結果として、その一部が炉内へ蓄積したり、あるいは、炉外へ漏洩して安全上問題となる可能性がある。このような、金属、合金へのトリチウム溶解を防ぐために、各種の酸化物材料が漏洩防止のコーティング材としてその有効性が研究されている。コーティング材として代表的な酸化物材料に、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Er}_2\text{O}_3$ 、 $\text{ZrO}_2$ 、 $\text{SiO}_2$ （石英ガラス）などがある。ただ、これらの材料中のトリチウムを含む水素同位体挙動は、元々、溶解度が低く、また、拡散係数も小さいと理解されており、その実験手法も限られ、溶解度、拡散係数に関するデータも核融合炉用コーティング材として評価するには十分ではない状況にある。現実的には、コーティング材として使用する場合には、その酸化物材料のバルクとしての性質とともに、粒界や気孔などの欠陥が、コーティングの性能を左右する可能性も否定できないが、酸化物材料の本来の性能を知り、改良を可能とすることがコーティング材の高性能化には欠かせない。本研究では、今年度、 $\text{ZrO}_2$  に注目し、重水素 ( $\text{D}_2\text{O}$ ) あるいは重水 ( $\text{D}_2$ ) を用い水素同位体の溶解・放出挙動を明らかにすることを目的とした。

具体的には、熱的、化学的に安定な立方晶イットリア安定化ジルコニア単結晶 (YSZ) を用い、水素同位体の溶解、拡散、放出挙動を調べる。これらの試料に高温でのガス吸収法にて重水素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、真空雰囲気中で昇温し、水素同位体放出挙動を観測する。

### 2. 実験方法

表面を鏡面研磨した厚さ 0.5 mm の立方晶 YSZ (13% $\text{Y}_2\text{O}_3$  添加  $\text{ZrO}_2$ (100)、Dalian Keri Opt. Tech.) 板材を、 $0.5 \times 10 \times 0.5 \text{ mm}^3$  あるいは  $0.2 \times 10 \times 0.5 \text{ mm}^3$  に加工して試料とした。試料を  $\text{D}_2$  ガス雰囲気中で曝露し (温度：873 K～1373 K、 $\text{D}_2$  圧力：～450 Torr)、重水素を溶解させた後、応用力学研究所の昇温脱離ガス分析装置 (ULVAC YLK-2S) を用いて、試料からの重水素を含むガス ( $\text{D}_2$ 、HD、 $\text{D}_2\text{O}$ 、HDO) の TDS スペクトル (昇温速度 1 K/s、～1400 K) を測定した。なお、放出ガスの定量には、標準 He リークを用いた。

### 3. 結果と考察

1173 K、1273 K および 1373 K で重水素溶解した YSZ の  $\text{D}_2$  の TDS スペクトルを図 1 に示す。放出はほぼ単独のピークとして現れ、その温度は 1200～1300K であった。 $\text{D}_2$  溶解温度の影響は、放出量の差として顕著に見られ、溶解温度が高いほど放出量が多いことが分かった。なお、1173 K よりも低い温度での  $\text{D}_2$  曝露試料では、検出された  $\text{D}_2$  量は極僅かであり TDS の定量限界以下であった。この  $\text{D}_2$  とその他のガス種 (HD、 $\text{D}_2\text{O}$ 、HDO) の放出量の結果をまとめて図 2 に示す。重水素は水素ガスあるいは水蒸気として放出されており、その比率は溶解条件あるいは水素の放出量によって異なることが分かった。1373 K では、水素ガスが主であるのに対し、それ以下の温度では、水蒸気が主となっている。

これらの放出された重水素の総量を算出し、この値を YSZ 試料に溶解した重水素全量と見なし、水素の溶解度とした。水素溶解度のアレニウスプロットを、ジルコニアへの水素溶解度文献値とともに図 3 に示す。YSZ への水素溶解量は、溶解温度とともに上昇する、吸熱型の温度依存性を示し、溶解熱の値は+0.9 eV であった。この結果は、より低温域で立方晶 YSZ を使って測定されたトリチウム実験の結果と一致していた。ただ、水素溶解度の温度依存性は、この図に見られるように、ジルコニアの結晶系、溶解温度あるいは水素源の化学種（水素ガス、水蒸気）によって変化し複雑である。

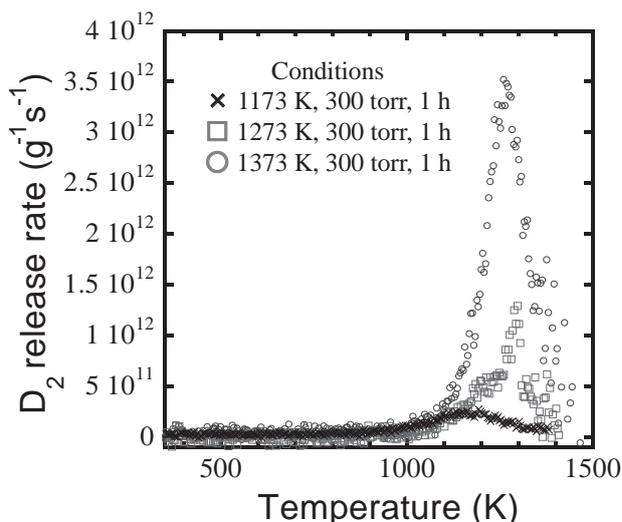


図 1 YSZ からの重水放出スペクトル  
重水曝露温度：1173, 1273, 1273K

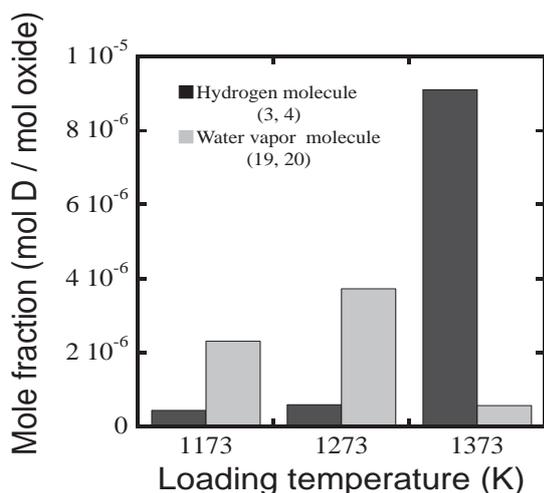


図 2 TDS 時の YSZ からの放出ガス種

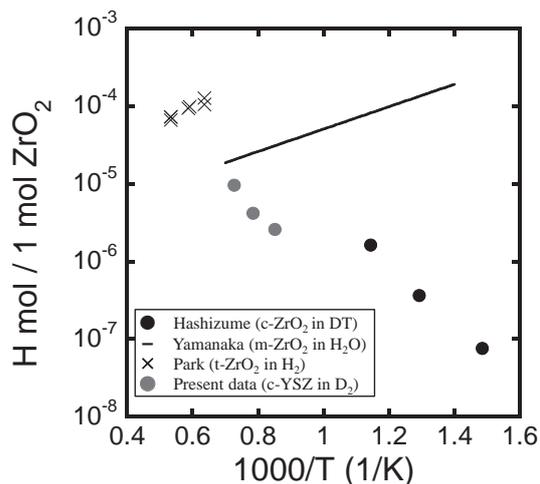


図 3 ジルコニア中の水素溶解量

#### 4. まとめ

単結晶 YSZ 中の高温での重水素溶解量を TDS 実験により測定した。その結果、溶解度は溶解温度とともに増大し、吸熱型の溶解挙動を示した。この温度依存性は、過去の低温で測定された立方晶 YSZ の場合と一致しており、溶解熱の値も近いものであった。今後、より高性能の核融合炉用コーティング材料の探索のために、TDS 等を利用した共同利用、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：松田浩輝、山下健太、山口諒真  
九大応力研：渡辺英雄

## 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 桑原 健人(院), 高木 聖也, 安田 和弘, 山本 知一, 吉岡 聡, 松村 晶

### 1. 目的

蛍石型酸化物は耐照射損傷性に優れるため、長寿命核種の核変換処理材料等として期待されている。蛍石型酸化物中では、陽イオンと陰イオンの質量が大きく異なり、かつはじき出しエネルギーは陽イオンのほうが大きい。このため、蛍石型酸化物中の陰イオン点欠陥の形成速度は、陽イオンと比べて著しく大きくなる。陽および陰イオン点欠陥の形成速度比は、一次はじき出し原子のエネルギーに依存するため、放射線の種類やエネルギーによって変化する。このため、一次はじき出し原子のエネルギースペクトルが広い原子炉環境において、陽陰イオン点欠陥の形成速度比が照射欠陥形成・成長過程に及ぼす効果を明らかにすることが重要である。本研究では、蛍石構造酸化物である  $\text{CeO}_2$  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ている。電子照射と重イオン照射を組み合わせ、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調べてきた。本年度は、蛍石型酸化物である  $\text{CeO}_2$  を対象とし、陽および陰イオンのはじき出し損傷比や電子励起効果などが異なる条件下での照射欠陥形成・成長過程を明らかにすることを目的とした。そのため、透過型電子顕微鏡 (TEM) を用いて幅広いエネルギー範囲の電子を照射しながら照射欠陥の形成・成長挙動を「その場」観察した。さらに、形成された転位ループの熱的安定性についても調べた。

### 2. 実験方法

$\text{CeO}_2$  粉末 (レアメタリック社製、純度 99.99 %) を一軸加圧および静水圧加圧し、ペレット状に成型した。これを 1873 K の大気中にて、12 時間焼結した。焼結体を直径 3 mm の円板状に打抜き、機械研磨を施した後、Ar イオン研磨法により TEM 観察用薄膜試料を作製した。この試料を TEM 内に挿入し、電子照射を行いながら照射欠陥の形成・成長挙動を「その場」観察した。九州大学超顕微解析研究センターおよび大阪大学超高压電子顕微鏡センターの TEM を用いて、80 - 3000 keV の幅広いエネルギーの電子を照射した。照射温度は、1250 keV 以下の場合には室温とし、1500 および 3000 keV の場合には、室温から 1073 K の範囲とした。照射電子線束密度は  $1.0 \times 10^{23} - 3.1 \times 10^{24} \text{ e}^-/\text{m}^2\text{s}$ 、最大照射時間は 30 min とした。これまでに報告されている O および Ce イオンのはじき出しエネルギーを考慮すると、1250 keV 以下の電子照射では O イオンにのみ選択的にはじき出され、1300 keV 以上の電子照射では O および Ce の両イオンにはじき出し損傷が誘起される。さらに、1250 keV 以下の電子照射により形成された転位ループの熱的安定性を電子を照射しない状態にて調べた。

### 3. 結果および考察

図 1 は 200 keV 電子照射により形成された転位ループの成長挙動の一例を示す。転位ループは強い歪みコントラストを伴いながら約 20 nm の大きさまで成長している。1250 keV 以下の電子照射では、O イオンにのみはじき出し損傷が誘起されるため、この転位ループは Yasunaga ら<sup>(1)</sup>によって報告されている {111}面を晶癖面とする O イオンによって構成される格子間型転位ループであると考えられる。すなわち、1250 keV 以下の電子照射下において形成される酸素イオン格子間原子が集合することにより形成される転位ループ<sup>(2,3)</sup>であると考えられる。

0 イオン格子間型転位ループについて、以下の方法により成長挙動を解析した。転位ループは、直径  $D$  が照射時間  $t$  のべき乗  $t^p$  に比例して成長すると仮定し、個々の転位ループ直径の時間変化から  $\delta$  値を評価した。この結果、 $\delta$  値は電子エネルギーに依存して変化しており、500 keV 以上のエネルギーでは約 0.3 の一定値を示しているが、それ以下のエネルギーでは  $\delta$  値は電子エネルギーの低下に伴って増加し、140 keV 以下で再び減少することがわかった<sup>(4)</sup>。純金属を用いた過去の研究により、 $\delta$  値は空孔の移動度が十分に高い場合には  $\delta \approx 1$  となり、空孔の移動度が低い場合には  $\delta \approx 1/3$  となることが報告されている<sup>(5)</sup>。1250 keV 以下の電子照射で形成される転位ループは、0 イオンのみによって構成されると考えられるため、電子エネルギーに依存する  $\delta$  値の変化は、0 空孔の移動度が電子エネルギーに依存して変化していることを示唆している。 $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> などの酸化物では電子励起効果によって点欠陥の荷電状態が変化し、それに伴って点欠陥の拡散が誘起されることが報告されている。すなわち、 $\delta$  値が電子エネルギーに依存する結果は、140–500 keV のエネルギー域において、電子励起によって 0 空孔の移動度が増大していることを示唆している。

図 2 は、200 keV の電子照射で形成された転位ループを室温で保持した際の時間変化を示している。O イオン転位ループは 283 - 333 K の温度範囲に保持すると収縮・消滅することがわかった。この結果は、O イオン転位ループがこの温度域で熱的に不安定であることを示している。収縮速度は温度と共に増大した。収縮速度のアレニウスプロットにおける直線近似式から、収縮挙動を律速する点欠陥の移動活性化エネルギーを算出すると、 $0.95 \pm 0.06$  eV と評価できた。図 3 に示す転位ループは O イオン格子間原子ループと考えられるため、その収縮は O 空孔の移動および再結合によるものと考えられる。しかしながら、評価した O 空孔の移動活性化エネルギーは、報告値の 0.46 - 0.58 eV<sup>(3)</sup> とは異なっている。転位ループ収縮挙動の機構については、更なる検討が必要である。

- (1) K. Yasunaga, K. Yasuda, S. Matsumura, T. Sonoda, *Nucl. Instrum. Meth. B* 266 (2008) 2877.
- (2) K. Shiiyama, T. Yamamoto, T. Takahashi, A. Guglielmetti, A. Chartier, K. Yasuda, S. Matsumura, K. Yasunaga, C. Meis, *Nucl. Instrum. Meth. B* 268 (2010) 2980.
- (3) S. Takaki, T. Yamamoto, M. Kutsuwada, K. Yasuda, S. Matsumura, *Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 'Advances in Materials for Nuclear Energy'* 1514 (2013) 93.
- (4) 桑原 健人 九州大学修士論文(2015).
- (5) M. Kiritani et al.: *J. Phys. Soc. Japan* 35 (1973) 6.

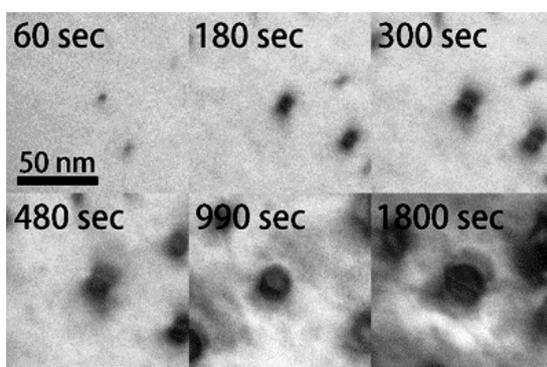


図 1. 室温下 200 keV の電子照射で形成された転位ループの成長挙動。電子線束密度  $1.61 \times 10^{23}$  e-/m<sup>2</sup>s。

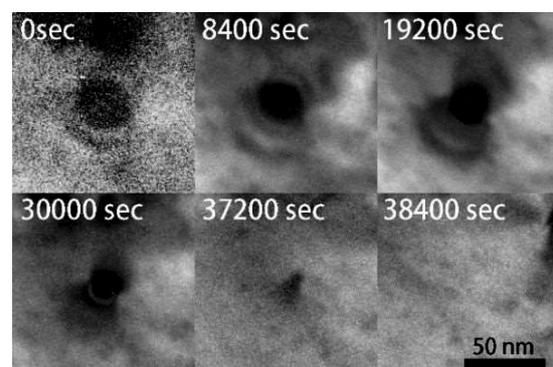


図 2. 200 keV 電子照射で形成された転位ループを室温で保持した際の収縮挙動。数字は保持時間(秒)。

## 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科 西野信博

## 目的と特徴

核融合プラズマを実現する上で重要なキーとして、今なお閉じ込め制御、定常化が挙げられる。特に、閉じ込め制御に関しては、周辺プラズマにおける乱流状態を抑制・制御する必要がある、そのための実験や理論的研究、あるいは、シミュレーションが盛んに行われている。既に、多種の磁場配位で突発的な粒子・エネルギーの掃出しを伴う乱流現象が観測されており、この乱流(Blob と称される)はプラズマと磁場との相互作用において一般的な物理現象と認識されている。

日本における核融合研究では、全国に種々の磁場配位の装置が稼働している。代表的な直線磁場配位は筑波大学の GAMMA 10 があり、ヘリカル型配位では LHD や Heliotron J, また, S T, あるいは, トカマク型配位では, 九州大学の QUEST がある。このように、現時点で稼働している実験装置の磁場配位の種類は世界一とあってよい。そこで、本研究会の目的は、日本の利点を生かし、上記多種の磁場配位の装置で実験的に観測されているエネルギー閉じ込め特性（エネルギー・粒子閉じ込め時間）の向上を阻む周辺プラズマ乱流の計測結果を統一的な視点でとらえようとする試みである。

最終年度の本年は、今までの計測結果のまとめ、また、最新の乱流の計測結果の紹介、今後の乱流計測の計画などを参加者で議論し、乱流現象に対する理解を深めることにある。主催者の個人的な偏見ではあるが、この3年の間に装置間での乱流研究の知見の交換ができ、磁場配位との関連性が見え始めてきた感があり、本研究会を開催できて本当によかったと思っている。

以下は、本年度開催した研究会の情報である。

プロシーディングスを含む詳細な資料（3年分）は、応用力学研究所の HP (<https://storage.iii.kyushu-u.ac.jp/public/9WVQAAhIXQ4ANkABupJLJpmPlqPTpNUeHiaozvj7Sfv9>) にパスワード付で掲載している。参加者以外で情報を得たい方は、西野（広大）、発表資料の各担当者、もしくは、所内世話人 関子秀樹教授に連絡されたい。

## 研究会日程とプログラム

日時：平成 27 年 2 月 13 日（金）

会場：九州大学応用力学研究所 QUEST 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：関子秀樹

トピックス：各装置における周辺乱流研究の紹介と今後の計画など

## プログラム

13：00－13：15 Opening address by Nobuhiro Nishino (Hiroshima Univ.)

Chair: Nobuhiro Nishino (Hiroshima Univ.)

13：15－14：15 ヘリカル・直線型装置における静電揺動解析 by Hirohiko Tanaka (NIFS)

14:15–14:20 (Coffee Break)

14:20–15:20 ヘリオトロンJ装置における揺動研究 by Shinsuke Ohshima (Kyoto University)

15:20–15:25 (Coffee Break)

15:25–15:55 直線円筒形プラズマのためのトモグラフィアルゴリズムの開発 (Development of Tomography Algorithms for a Linear Cylindrical Plasma) by 大野 翔 (Kyushu University)

15:55–16:25 直線プラズマ装置 PANTA におけるトモグラフィシステムを用いたプラズマ揺動とコヒーレンスモード構造解析 by 高橋 宏輔 (Kyushu University)

15:25–16:55 多チャンネル多波長分光による直線プラズマのトモグラフィと乱流特性解析 (Tomography and Turbulence Characterization Observed with Multi-channel and Multi-wavelength Spectroscopic System in Linear Cylindrical Plasma) by 武次 克哉 (Kyushu University)

16:55–17:00 Closing Address by Nobuhiro Nishino (Hiroshima Univ.)

#### 参加者名簿

- 西野 信博 (広大院・工学研究院・准教授)
- 大島 慎介 (京大・エネルギー理工学研究所・助教)
- 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・研究員)
- 大野 翔 (九大応用力学研究所・修士)
- 高橋 宏輔 (九大応用力学研究所・修士)
- 武次 克哉 (九大応用力学研究所・修士)

発表概要は、以下のとおり。

#### 1. H. Tanaka

LHD における研究成果と進捗状況について

Plasma Blob 輸送、非接触プラズマ中の間欠的輸送に関する発表

GAMMA 10 における研究成果と進捗状況

コア-エッジ揺動相関に関する発表

#### 2. S. Ohshima

Heliotron J における長距離相関に関する研究発表

瞬時位相差を導入した信号解析に関する発表

#### 3. S. Ohno

直線装置 PANTA プラズマを対象としたトモグラフィ解析の開発に関する発表

#### 4. H. Takahashi

直線装置 PANTA プラズマの揺動解析 (主に、スペクトル解析、モード解析) に関する発表

#### 5. K. Taketsugi

直線装置 PANTA プラズマの ArI, ArII の発光強度分布と揺動スペクトルに関する発表

装置としては、直線装置 GAMMA 10 と PANTA、環状装置 LHD, Heliotron J の発表があった。最後に、3年間の間いろいろご協力いただいた応用力学研究所、特に、QUEST 関係者に深く感謝いたします。

## 共同利用研究集会

## 第 12 回トロイダルプラズマ統合コード研究会

## 12th 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://bpsi.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 12 回目となるが、そのうち、第 2 回~第 8 回と前回第 11 回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。前回よりトロイダルプラズマを対象を拡大し、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：2014 年 12 月 11 日（木）－ 12 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：23 件、参加者数：29 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 23 件を内容別に分類するとトカマク統合シミュレーション 8 件、ヘリカル 5 件（うち統合シミュレーション 3 件、乱流 2 件）、SOL/ダイバータ 4 件、基礎 6 件であった。どれも質の高い研究成果報告であった。今回は SOL/ダイバータ関連のセッションを構成することができた。また、高周波物理、運動論効果、材料特性などプラズマ複合現象のシミュレーションの基盤となる基礎研究の発表も数多く、幅広い研究内容を含む研究会とすることができた。本年も昨年を引き続き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印象付けた。以下に講演内容を抜粋して説明する。

研究会の冒頭に SOL/ダイバータセッションを構成した。滝塚より SOL プラズマの輸送に重要な中性粒子拡散係数に関する考察がなされた。空間領域からの損失を表す成分が拡散係数を小さくし、流体モデルと運動論モデルの差を埋め得ることが報告された。河村よ

り LHD 周辺プラズマシミュレーションについてダイバータ構造による輸送の違いが報告された。本間より新古典効果を含むモデリングと粒子シミュレーション計算がなされ、ピンチ項と温度遮蔽効果項の影響について報告された。

矢木からはプラズマ崩壊現象のシミュレーションについてレビュー講演がなされた。逃走電子の振る舞いを理解することが重要で、その生成機構、MHD 不安定性との結合による再分配、持続機構と制御、磁場摂動による逃走電子の損失について説明があった、また奴賀からは電子分布関数の hot tail による逃走電子生成について報告された。林からは JT60-SA の運転シナリオについて、統合コードを用いた予測の進展が報告された。藤田からは統合コード TOTAL へのピンチモデルと高エネルギー粒子効果の導入により不純物輸送と sawtooth 制御についてそれぞれ議論がなされた。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に境界モデルを導入した進展について報告された。糟谷からはヘリカルコアプラズマの流体モデルを用いた乱流シミュレーションで、熱流束 - 圧力勾配関係のヒステリシスとそこで働く揺動がもたらす輸送伝播機構が報告された。河野からはアンテナとプラズマの相互作用による RF シースの形成が報告された。福山からは TASK コードの進展について波動解析を中心に報告された。

輸送をモデル化しコードに取り入れることで、少ない計算量で実験を再現する取り組みが数多くなされている。登田はジャイロ運動論コード GKV-X によるイオン温度勾配不安定性計算結果をモデル化し、LHD の輸送解析に取り入れた。横山は LHD 実験解析を TASK3D-a コードを用いることにより効率化し、データベース作成および輸送スケーリング導出を行った。LHD については村上、山口よりも NBI 加熱プラズマの解析結果が報告された。

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。Lesur からは運動論的非線形性と流体的非線形性を組み合わせた高エネルギー粒子駆動不安定性解析から、線形安定な領域での不安定性励起機構について議論がなされた。小菅、佐々木、服部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。

来年度も第 13 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、世代交代を促進していくことを決定し、閉会した。

#### 4. 研究集会プログラム

(18 min talk+7 min discuss or 15min talk+5min discuss)

12 月 11 日(木)

9:00 – 9:10 はじめに 福山 (京大)

(座長：矢木)

9:10 – 9:35 講演 1-1 滝塚 (阪大)

On the Fluid Modeling of Neutral Particle Transport in a SOL Plasma

9:35 – 10:00 講演 1-2 河村 (核融合研)

Transport Modeling of Peripheral Plasma in the Open/Closed LHD Divertor Configurations

10:00 – 10:25 講演 1-3 本間 (慶大)

Kinetic Modeling of Classical and Neo-Classical Transport for High-Z impurities in Fusion

SOL/Divertor Plasmas using Binary Collision Method

10:25 – 10:45 講演 1-4 東郷 (東大)

Simulation Study of SOL-Divertor Plasmas Using a Virtual Divertor Model

10:45 – 11:00 休憩

(座長：河村)

11:00 – 11:25 講演 1-5 登田 (核融合研)

How to Apply a Turbulent Transport Model Based on a Gyrokinetic Simulation for Helical Plasmas

11:25 – 11:50 講演 1-6 村上 (京大)

Integrated Transport Simulation of High Ti LHD Plasmas by TASK3D

11:50 – 12:50 昼休み

(座長：福山)

12:50 – 13:15 講演 2-1 藤間 (原子力機構)

Integrated Simulation with the Fast Ion Fokker-Planck Modeling Consistent with the Evolving Equilibrium in Tokamaks

13:15 – 13:40 講演 2-2 奴賀 (原子力機構)

Fokker-Planck Simulation of the Runaway Electron Generation in Tokamak Disruption

13:40 – 14:05 講演 2-3 Lesur (九大)

Hybrid, Reduced Modeling of Coupled Energetic-Particle Modes

14:05 – 14:30 講演 2-4 佐々木 (九大)

Formation Mechanism of Steep Wave Front in Magnetized Plasmas

14:30 – 14:45 休憩

(座長：村上)

14:45 – 15:10 講演 2-5 林 (原子力機構)

Integrated Modeling of JT-60SA Plasma Operation Scenarios with Model Validation and Verification

15:10 – 15:35 講演 2-6 糟谷 (九大)

Simulation Study of Hysteresis in the Flux-Gradient Relation Responding to a Source Modulation

15:35 – 16:00 講演 2-7 河野 (九工大)

Radio-Frequency Sheath-Plasma Interactions in a Semi-Realistic Tokamak Model

16:00 – 16:20 講演 2-8 山口 (京大)

NBI Heating Analysis in Multi-Ion Species Plasma in LHD

16:20 – 16:35 休憩

(座長：登田)

16:35 – 17:00 講演 2-9 瀬戸 (原子力機構)

Development of L-H Transition Simulation Framework with BOUT++ Code

17:00 – 17:25 講演 2-10 大澤 (九大)

Isotope Effect of Hydrogen in Tungsten

17:25 – 17:45 講演 2-11 服部 (九大)

Analysis of Ion-Temperature-Gradient Instabilities by Using a Gyro-Fluid Model in Cylindrical Plasmas

17:45 散会

19:30 – 22:00 懇親会

**12月12日(金)**

9:00 – 9:05 事務連絡

(座長：糟谷)  
 9:05 – 9:30 講演 3-1 藤田 (名大)  
 Simulation on Tungsten Transport and Sawtooth Control in Tokamak Plasmas with TOTAL Code  
 9:30 – 9:55 講演 3-2 本多 (原子力機構)  
 Toroidal Rotation Modeling with the 3D Non-Local Drift-Kinetic Code and Boundary Models for JT-60U Analyses and Predictive Simulations  
 9:55 – 10:20 講演 3-3 小菅 (九大)  
 Density Peaking by Parallel Flow Shear Driven Instability  
 10:20 – 10:35 休憩  
 (座長：藤田)  
 10:35 – 11:00 講演 3-5 矢木 (原子力機構)  
 Progress on Disruption Research by Integrated Simulation  
 11:00 – 11:25 講演 3-6 福山 (京大)  
 Progress of Integrated Modeling Code TASK  
 11:25 – 11:50 講演 3-7 横山 (核融合研)  
 Statistical Approach for Predicting Energy Transport in LHD Plasmas Based on the TASK3D-a Analyses Database  
 11:50 – 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
鈴木隆	原子力機構	東郷訓	東大新領域
瀬戸春樹	原子力機構	本間裕貴	慶大理工
藤間光徳	原子力機構	藤田隆明	名古屋大学
奴賀秀男	原子力機構	稲垣滋	九大応力研
林伸彦	原子力機構	大澤一人	九大応力研
本多充	原子力機構	糟谷直宏	九大応力研
矢木雅敏	原子力機構	小菅佑輔	九大高等研
河村学思	核融合研	佐々木真	九大応力研
登田慎一郎	核融合研	花田和明	九大応力研
横山雅之	核融合研	Maxime Lesur	九大応力研
福山 淳	京大工	河津賢太郎	九大総理工
村上定義	京大工	仙頭寛輝	九大総理工
山口裕之	京大工	服部元隆	九大総理工
河野晴彦	九州工業大学	福永航平	九大総理工
滝塚知典	阪大工		

## 26 FP-S3

### 第4回アジア輸送ワーキンググループ国際会議

応用力学研究所 稲垣 滋

#### 目的と背景

日本、中国、韓国の参加国を中心にプラズマ乱流及び乱流輸送に関する国際的な研究グループが形成され、年に一度一同に会し、直接議論する場をもうけている。本議論を契機にその後大きく進展した研究が多く、近年の乱流物理の進展に大きく寄与している。一例としてリミットサイクル振動現象の理解が挙げられる。

このような活動において、応用力学研究所を中心とした研究グループの存在感は極めて高く、2014年度の会議は九州大学筑紫キャンパスで行われる事となった。

本研究集会の目的は、この国際会議を共催し、かつ、応用力学研究所の共同研究の優れた成果を多く発表する事で応用力学研究所のリーダーシップが一層強化され、アジア及び世界でプラズマ乱流研究を先導する事を目的とする。

#### 研究集会の開催

開催日時：2014.06.10-2014.06.13

開催場所：九州大学 筑紫キャンパス C-Cube 1F 筑紫ホール

現地実行委員長：稲垣 滋

URL: <http://aptwg2014.nifs.ac.jp>

#### 予算の執行

フランスから招待講演者1名の招聘(X. L. Zou)旅費に執行した。

#### 研究集会のまとめ

本国際会議は

##### 1) 招待講演、プレナリー講演

“What can we learn from basic experiment?”, Fujisawa (RIAM, Kyushu)

“What determines the SOL layer width?”, L. Wang (ASIPP)

“Particle transport and fueling effect on ELMs”, X. L. Zou (CEA)

##### 2) テーマグループ講演

A. Turbulence suppression and transport barrier formation

Effect of magnetic topology on MHD activity and transport

B. Non-diffusive contribution of momentum and particle transport

C. Non-local transport and turbulence spreading and coupling

D. Energetic particles and instability

3) ポスターセッション

4) 若手研究者フォーラム

5) サマリー

の形式で行われる。

会議の summary は以下に公開されているので詳細はこちらを参照されたし。

K. Ida, J. M. Kwon, M. Leconte, W. H. Ko, S. Inagaki, Y. Todo, Y. Kosuga

"The 4th Asia-Pacific Transport Working Group (APTWG) Meeting"

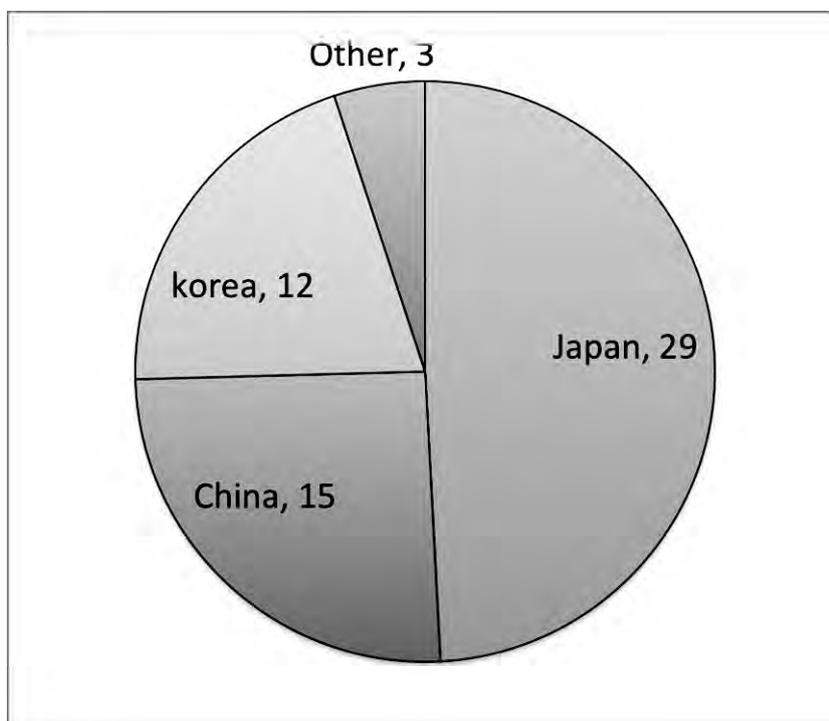
Nuclear Fusion (2015) vol.55 017001

今回は初めて**Poster Prize**が設けられ、日中韓核国2名の選考委員による投票により、

**Ms. Dongmei Fan**

Dalian University of Technology, China

が受賞した。



**Total 59**

平成26年度

新エネルギー力学分野  
共同研究成果報告



## 26 特 4-1

### AlGaN 系窒化物半導体の基板作製と結晶成長の熱力学解析

*Study on Thermodynamics of Crystal Growth and Fabrication of AlN Nitride Substrates*

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）

#### 背景

窒化物半導体の AlN 基板の作製を研究対象に、有機金属気相エピタキシャル成長法 (MOVPE 法)、ハイドライド気相成長法 (HVPE 法) による成長素過程の理解、また転位密度の低減を目的とする。当該材料を用いたデバイスへの応用例として、電子線励起および LED (Light Emitting Diode) を利用した深紫外光源開発が挙げられる。この光源では AlGaIn 混晶の組成を制御することで、単色発光のみでなく、スペクトル幅の調整も可能な発光特性が期待できる。また、AlN、GaIn は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。本研究では当該結晶材料の高品質化・高機能化に向けて、1) 基板等のファセット形態による変調、2) 成長原料の供給・成長温度による変調を行い、これらの変調による組成制御、転位密度低減の効果を明らかにする。

#### 研究方法

本研究では、AlGaIn 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基板として利用する AlN 単結晶の高品質化を目指す。【三重大学における研究内容】 HVPE 成長における AlN テンプレート上の AlN 成長を模擬した炉内流体解析を行い、成長条件（供給ガス分圧 (HCl 及び H<sub>2</sub>、NH<sub>3</sub> 及び H<sub>2</sub>)、成長温度) の最適化指針を得る。次に、解析により得られた指針を元に成長実験を行い AlN/α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> テンプレートを作製する。【九州大学における研究内容】三重大学にて作製した AlN/α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> テンプレートを初期基板として、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 AlN 厚膜を堆積する。3SG-AlN(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

【三重大学における研究結果・進捗状況】 図 1 に HVPE 法により作製した AlN/α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> テンプレートの光学写真を示す。堆積した AlN の膜厚は 1μm である。X 線回折 (XRD) により得られた AlN/α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> テンプレートの構造解析を行った。谷保ら[1]により、XRD-FWHM と転位密度の相関は以下の式で記述されている。

$$N_S = \frac{\alpha_{\text{tilt}}^2}{4 \cdot 35 |b_c|^2}, \quad N_E = \frac{\alpha_{\text{twist}}^2}{4 \cdot 35 |b_A|^2} \quad (1)$$

ここで、 $N_S$ 、 $N_E$ はそれぞれらせん転位、刃状転位の貫通転位密度である。 $\alpha_{\text{tilt}}$ および $\alpha_{\text{twist}}$ はそれぞれチルト角、ツイスト角である。 $b_C$ 、 $b_A$ はそれぞれ[0001]および1/3[11-20]バーガスベクトルである。式(1)により、本実験により作製した AlN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> テンプレートにおけるらせん転位、刃状転位密度はそれぞれ $\sim 10^7$ 、 $\sim 10^9$  cm<sup>-2</sup>と見積もられた。

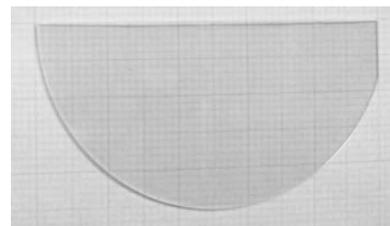


図1 AlN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> テンプレートの光学写真。

【九州大学における研究結果・進捗状況】三重大学にて作製された AlN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> テンプレートを用いて AlN-3SG 成長を行った。図2に得られた試料の断面走査電子顕微鏡 (Cross-SEM) 像を示す。テンプレート中心付近に厚膜結晶が成長している様子が観察される。しかし、その形状から、(1)表面が平坦であったテンプレートが成長開始前にエッチングされることでクレーター状に窪み、(2)その後、成長が開始したと考えられる。これは次の理由によると考察される；(1)成長初期はテンプレートが Al 融液に覆われており昇温 (1250 °C) 過程でメルトバックが起きる。(2)窒素原料 (Li<sub>3</sub>N) から N が供給 (輸送) され溶液中の Al-N が過飽和になることで成長が開始する。現状では厚膜が  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 基板から直接成長しており AlN テンプレートの効果が期待できないため、初期のメルトバックを抑制する必要がある。



図2 3SG 法により成長させた厚膜結晶の断面 SEM 写真。W (タングステン) は坩堝材の位置を示す。

今後も共同利用研究を継続し、高品質 AlN 基板を作製し、最終目標である AlGa<sub>2</sub>N 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, T. Makimoto: J. Cryst. Growth **298** (2007) 310.

「ワイドバンドギャップ材料の成長と結晶評価」

共同主催：応用力学研究所全国共同利用研究集会（26 特 4-2）  
日本学術振興会第 161 委員会（第 90 回研究会）

日時：2015 年 3 月 5 日（木）13:00 - 17:20

場所：九州大学 伊都ゲストハウス多目的ホール

1. 13:00～13:05

開会挨拶 東大生研 藤岡 洋

2. 13:05～13:50

東京農工大学 副学長 瀬瀬明伯 教授

「窒化物半導体の HVPE 成長」

窒化物半導体の HVPE（ハイドライド気相成長）技術について概説する。気相成長の理解のために、HVPE 法の反応機構および熱力学解析結果を示す。さらに、III 族原料分子を制御した新しい HVPE 成長法の熱力学解析結果を示し、新しい原料分子を用いた新しい HVPE 法により、従来不可能であった AlN および InN の HVPE 法が可能なることを述べる。加えて、他のバルク結晶成長法では成長が難しい AlGaIn および InGaIn 三元混晶の厚膜・高品質の可能性についても言及する。

3. 13:50～14:35

大阪大学 酒井 朗 教授

「窒化物半導体厚膜結晶のマルチスケール構造評価」

窒化物半導体結晶膜における欠陥の抑制や制御の手段として、基板に種々の加工を施し選択エピタキシャル横方向成長（ELO）を誘発させる技術が有効である。こうした特異な膜構造では基板との格子不整合や熱膨張係数差に起因する局所歪みが蓄積されている。特異な膜構造における構造的物性を解明する上で X 線回折（XRD）や透過電子顕微鏡（TEM）等に代表される回折法は極めて有効である。特に前者は広域、後者は局所域の解析に適している。本講演では局所と広域を橋渡しする評価解析ツールである X 線マイクロ回折（XRMD）を用いた窒化物半導体膜の構造解析結果を紹介する。

4. 14:35～15:20

マレーシア工科大学 桑野範之 教授

「走査電子顕微鏡法による窒化物薄膜の微細構造解析（何がどこまで見えるか）」

結晶評価・解析の主要方法の一つである走査電子顕微鏡（SEM）法の概要と最近の進歩を紹介する。通常の SEM の結像には試料から放出される二次電子（SE）あるいは後方散乱電子（BSE）を用いる。SE と BSE のどちらの電子をどの検出器で結像するかによって像コントラストが異なり、得られる情報も異ってくる。半導体結晶や金属結晶試料を例にして、内部微細組織がどのように解析できるかを議論する。さらに電子線後方散乱回折（EBSD）法の応用についても述べる。

5. 15:35～16:20

九州大学 田中将己 准教授

「超高压電子顕微鏡によるSi結晶中の亀裂先端転位三次元構造解析」

超高压電子顕微鏡法と電子線トモグラフィーを組み合わせることで、シリコン単結晶中に導入した亀裂先端転位の性格および三次元構造を明らかにすると共に、亀裂先端における転位増殖モデルを提案した。

6. 16:20～16:35

九州大学 安田和弘 准教授

「超顕微解析研究センターの紹介」

九州大学超顕微解析研究センターは、1975年に学内共同利用施設「超高压電子顕微鏡室」として発足し、以後40年近くにわたって最先端顕微解析設備を保有する共同利用施設として、原子・分子レベルの局所構造・組成・結合状態の顕微解析法の教育・開発、ナノテクノロジー、理工学、環境・エネルギー、ナノバイオロジー等の様々な分野の発展に貢献してきた。本講演では幾つかの研究例と共にセンターの紹介を行う。

7. 16:35～17:20

九州大学 安田和弘 准教授

「超顕微解析研究センター装置見学」

講演6で紹介した装置が設置されている超顕微解析研究センターの施設見学を行う。

## 研究集会「ワイドバンドギャップ材料の成長と結晶評価」

共同主催：応用力学研究所全国共同利用研究集会 (26 特 4-2)  
日本学術振興会第 161 委員会 (第 90 回研究会)

日時： 2015 年 3 月 5 日 (木)

場所： 九州大学 伊都ゲストハウス  
(〒819-0395 福岡市西区元岡 744)

<http://www.kyushu-u.ac.jp/access/index.php> (伊都キャンパス)

<http://www.isc.kyushu-u.ac.jp/supportcenter/housing/house-ito> (伊都ゲストハウス)

[http://www.kyushu-u.ac.jp/pressrelease/2012/2012\\_08\\_16.pdf](http://www.kyushu-u.ac.jp/pressrelease/2012/2012_08_16.pdf) (伊都ゲストハウス)

### ◇研究会スケジュール

13:00～13:05 開会挨拶

13:05～13:50 「窒化物半導体の HVPE 成長」

瀬瀬明伯(東京農工大学)

13:50～14:35 「窒化物半導体厚膜結晶のマルチスケール構造評価」

酒井 朗(大阪大学)

14:35～15:20 「走査電子顕微鏡法による窒化物薄膜の微細構造解析(何がどこまで見えるか)」

桑野範之(マレーシア工科大)

15:20～15:35 休憩

15:35～16:20 「超高压電子顕微鏡による Si 結晶中の亀裂先端転位三次元構造解析」

田中將己(九州大学)

### ◇装置見学会スケジュール

16:20～16:35 「超顕微解析研究センターの紹介」

安田和弘(九州大学)

16:35～17:20 超顕微解析研究センター装置見学

<http://www.hvem.kyushu-u.ac.jp/greeting.html>

幹事:寒川義裕、柿本浩一(九州大学)、三宅秀人(三重大学)



## 1. 目的

炭化ケイ素(SiC)は絶縁破壊電圧、耐熱性、周波数特性などの優れた特徴を有したワイドバンドギャップ半導体として注目されており、SiC を基板としたパワーデバイス開発が盛んに行われている。また、デバイス分野ではナノ及びアトムテクノロジーの貢献に伴い微細構造の構築技術の進展に暇がない。6H-SiC(0001)表面は、真空中で加熱することによりSi原子が表面から脱離することでSi-richからC-richなグラフェン表面へと構造変化し、様々な再構成表面を形成することが知られている。これらの極微細な構造のデバイス応用を考えた場合に原子層レベルでの絶縁膜を形成した表面における構造及び電子状態の理解が非常に重要である。現在、SiC MOSFET が試作されているが、理論計算から期待されているチャンネル移動度を大きく下回っている。これはチャンネル-ゲート酸化膜界面に存在する界面準位密度の影響を受けていることが要因だと考えられている。また、グラフェンも電氣的に非常に優れた特徴を有しており、バンドギャップ制御技術として酸素導入が期待されている。以上のことから、Si-rich から C-rich な SiC 表面上の酸素原子の挙動を調べ、絶縁膜形成の初期過程における表面構造と電子状態の知見を得ることを目指した。

## 2. 実験方法

本実験で使用した装置の概略図を図1に示した。測定チャンバーには、ヘリウム準安定原子源と静電阻止型エネルギー分析器と低速電子線回折装置を備えた。試料表面の準備としては6H-SiC基板(Mateck社製、 $4 \times 8 \times 0.33$ [mm<sup>3</sup>])に対してSi蒸着を行い、基板加熱温度を1000[°C]まで変化することで再構成表面((3×3)→(1×1)→ $(\sqrt{3} \times \sqrt{3})$ → $(6\sqrt{3} \times 6\sqrt{3})$ →グラファイト)を形成した。これらの表面へ超高真空中において酸素ガスを60[L]まで曝露した。試料温度は、非接触放射温度計で測定した。表面構造については、

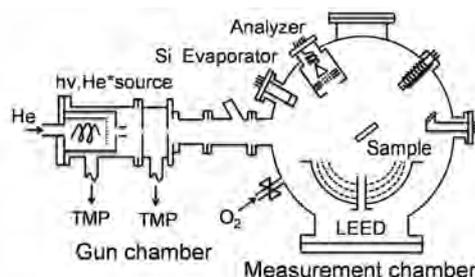


図1 実験装置の概略図

は、低速電子線回折法(LEED)により二次元的な周期構造を観察し、電子状態については、最表面の局所的な情報を準安定原子誘起電子分光法(MIES)により、価電子帯の情報を紫外光電子分光法(UPS)により観測した。MIESの特徴としては、入射粒子としてヘリウム準安定原子を用いることで、最表面の吸着層に対してダメージを与えることなく観測でき、入射粒子と表面原子との電子遷移によって局所的な電子状態の情報を得ることから、極めて表面敏感な手法である。

## 3. 実験結果と考察

Si蒸着した6H-SiC(0001)表面を基板温度500~1000[°C]で加熱した際の表面をLEEDにより観察した。800[°C]で加熱した時の(3×3)構造と900[°C]での $(6\sqrt{3} \times 6\sqrt{3})$ 構造のLEED観察結果を図2に示した。これにより、加熱温度に伴う表面再構成を確認した。本研究では、(3×3)及び(1×1)構造をSi-rich表面とし、 $(6\sqrt{3} \times 6\sqrt{3})$ 構造及びグラフェンをC-rich表面としてMIES測定を行った。

図3に酸素を曝露した(a) Si-rich SiC表面、(b) C-rich表面における

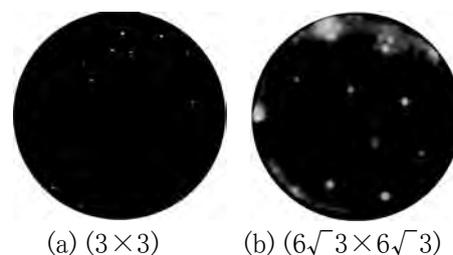


図2 SiC表面のLEED観察結果

MIES測定結果を示した。Si-rich表面におけるMIESスペクトルでは、8[eV]付近にSi-3p軌道に起因したピーク構造を確認した。この表面に酸素を曝露した際に、曝露量増加に伴ってSiによるピーク強度が減少し、O-2p軌道及び5[eV]付近にSi-Oの結合に起因したピークが出現した[1]。他の研究者によるSiO<sub>2</sub>表面のMIESスペクト

ルでは、O-2p 軌道によるピークが Si-O によるものよりも高い強度を取ることが報告されている[2]。そのため、Si-rich SiC 表面の酸化初期過程では、SiO<sub>2</sub>としてではなく SiO<sub>x</sub> 表面を優先的に形成することが分かった。

図 3(b)の C-rich SiC 表面では、4.8~6.5[eV]付近にグラフェンの特徴である  $\pi$  及び  $\sigma^*$  によるピーク構造を確認した。グラフェン表面の参照基板として高配向熱分解グラファイト(HOPG)を用いて同様の結果を得たことから、SiC 上にグラフェン層が形成されたことを確認した。C-rich 表面に酸素を 8[L]まで曝露した場合には、8.3[eV]付近にショルダーが出現し、曝露量増加に伴い  $\pi$  によるピークが広がったような構造を確認した。これは O-2p 軌道による電子放出強度が増加したためであると考えた。しかしながら、8[L]から 60[L]まで酸素曝露した表面における MIES スペクトルでは、ピーク位置及び形状が大きく変化していないことから、表面近傍で結合している酸素は僅かであると考えられる。つまり、初期酸化におけるグラフェンへの酸素吸着レートは、8[L]以降で非常に緩やかになっている、或いは酸素原子がグラフェンより下地に潜った可能性がある。また、1[L]の酸素曝露によるスペクトルでは、全体の電子放出強度が下がっていることが分かる。これは、ステップエッジや表面欠陥などの酸素原子が吸着しやすいサイトに吸着したことで、表面付近における電子がとられた可能性を示唆している。

以上のことから、Si-rich 表面及び C-rich 表面における酸素吸着初期過程について、電子状態的見地から調べた。C-rich 表面と比べて、Si-rich 表面の方がより酸化が容易であることは確認できたが、酸素原子の吸着位置におけるモデル提案までは至らなかった。今後も貴研究所の寒川義裕准教授との共同研究を継続し、有限温度・有限ガス分圧下での表面構造状態図を作成頂くことで、酸素原子吸着時における詳細な表面構造を提案したいと考えている。

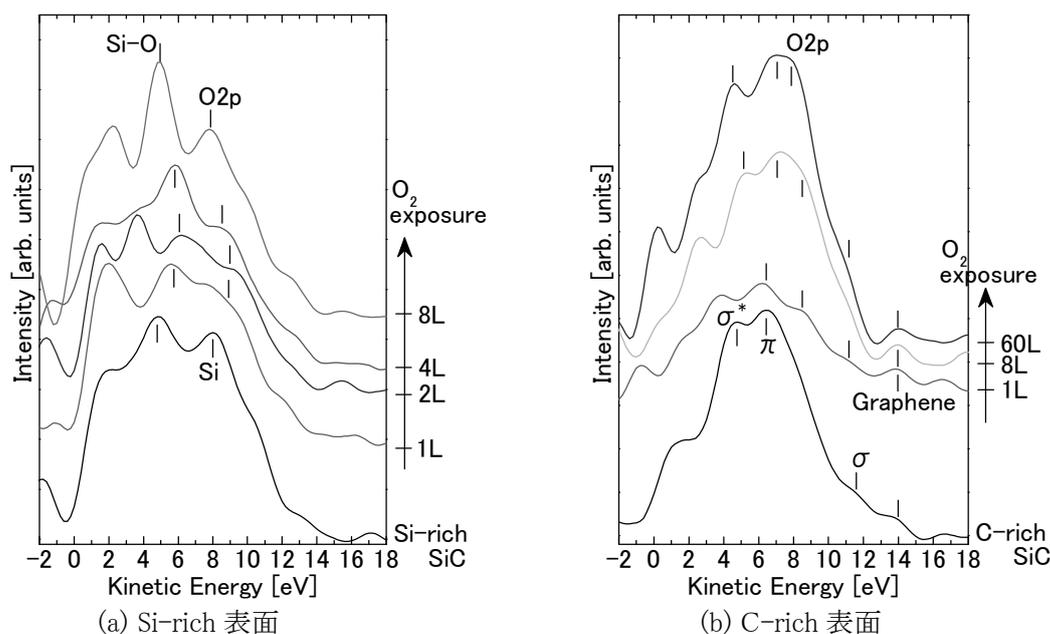


図 3 酸素曝露した各 SiC 表面における MIES 観測結果

#### 参考文献

- [1] M. Brause, D. Ochs, J. Günster, Th. Mayer, B. Braun, V. Puchin, W. Maus-Friedrichs, V. Kempter, Surf. Sci., 383, 216 (1997).
- [2] Y. D. Kim, T. Wei, D. W. Goodman, Langmuir, 19, 354 (2003).

#### 4. 研究成果報告

- [1] 「グラフェン/SiC 表面の酸化による電子状態変化」、碓智徳、第 7 回九大グラフェン研究会「グラフェン研究の最前線」、平成 27 年 2 月 10 日、九州大学応用力学研究所

## SiC 結晶中におけるらせん転位周りの圧力分布解析

三重大学大学院工学研究科 河村貴宏

## 研究背景・目的

SiC は高い絶縁破壊電界を有するワイドギャップ半導体であり、ハイブリット自動車や電気自動車に搭載する高効率・小型インバータなどの次世代パワーデバイス用材料として期待されているが、結晶中に形成される欠陥により材料特性の劣化を招くことが問題となっている。特にらせん転位は耐圧劣化・酸化膜不良・エピ欠陥の発生原因等への影響が挙げられる。欠陥構造は不明な点が多く、大口径ウエハ製作・性能向上に向けて詳細な解明が求められている。そこで本研究では古典分子動力学(MD)法を用い、4H-SiC 構造におけるらせん転位の圧力分布解析及び歪エネルギー解析を行った。

## 計算方法

古典 MD 法に基づく数値シミュレーションを行った。図 1 に示すように SiC 結晶中心付近に c 軸に平行にバーガースベクトルが  $1c$  ( $c$  は 4 分子層厚),  $3/4c$ ,  $1/2c$ ,  $1/4c$  の貫通らせん転位が存在する計算モデルを作成した。これらのモデルを用いて転位のバーガースベクトルをパラメータとして、らせん転位による結晶内の圧力分布を計算した。また、完全結晶モデルと転位を含むモデルのポテンシャルエネルギー差を歪みエネルギーとして算出した。

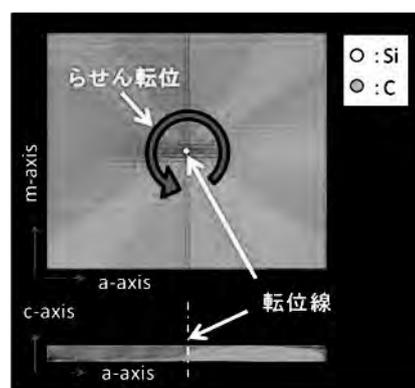


図 1 らせん転位の計算モデル

## 結果及び考察

図 2 にバーガースベクトルが  $1c$  のらせん転位周りの圧力分布を計算した結果を示す。転位芯付近の原子配列の乱れにより大きな圧力が発生している事が分かる。また、バーガースベクトルが  $1c$ ,  $3/4c$ ,  $1/2c$ ,  $1/4c$  の結果を比較するとバーガースベクトルが小さいほど圧力が減少することが分かった。しかしながら、この解析方法ではこれ以上の詳細な検討

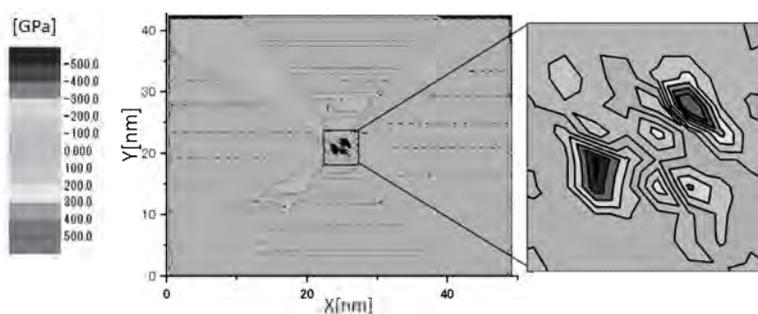


図 2 バーガースベクトル  $1c$  のらせん転位周りの圧力分布。  
右図は転位芯付近の拡大図。

が困難であったので、研究方針を変更し、歪みエネルギーに関する議論を行った。

図3にバーガースベクトルが  $1c$  のらせん転位モデルの歪みエネルギーを計算した結果を示す。プロットの大きさと色が各原子の歪みエネルギーの大きさに対応している。この結果から、転位芯のあるセル中心に大きな歪みエネルギーがあることが分かる。計算モデルの壁面にも歪みエネルギーの発生が見られたが、これはモデル境界の影響であり転位とは無関係である。転位芯から半径  $r$  の距離内にある原子を抽出し、それらの歪みエネルギーの合計を抽出半径  $r$  の関数として表わしたグラフを図4に示す。抽出半径がおおよそ  $10\text{\AA}$  以下は転位芯の歪みエネルギー領域と考えられる。この範囲の値を比較すると、バーガースベクトルが大きいほど歪みエネルギーが大きい事が分かる。これは転位論においてらせん転位の歪みエネルギーがバーガースベクトルの 2 乗に比例する事と一致する。抽出半径が大きい範囲ではバーガースベクトルが  $1c$  のグラフとそれ以外では明らかに異なる傾向を示した。 $1c$  のグラフ以外では抽出半径に比例して歪みエネルギーが増加している事から、それらはらせん転位に伴い  $c$  軸方向の積層周期がずれて発生した面欠陥による寄与を表わしていると考えられる。これらのグラフの傾きを比較したところ、 $1/2c < 1/4c \approx 3/4c$  のモデルの順に大きな値を示した。したがって、これら 3 つのらせん転位モデルの中ではバーガースベクトルが  $1/2c$  のらせん転位に伴う面欠陥の歪みエネルギーが最も小さいと考えられる。

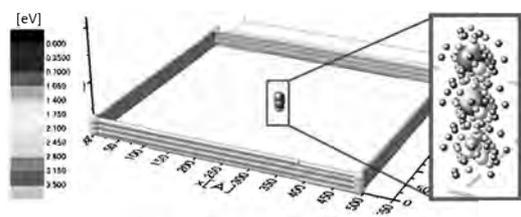


図3 バーガースベクトル  $1c$  のらせん転位周りの歪みエネルギー。

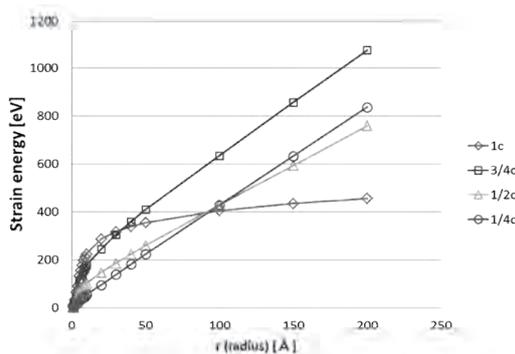


図4 らせん転位周りの歪みエネルギーと抽出半径の関係。

## 研究組織

研究代表者 河村貴宏 (三重大)

研究協力者 水谷充利 (三重大), 柿本浩一 (九大応力研), 寒川義裕 (九大応力研)

## 研究成果報告

“分子動力学法によるらせん転位を含む  $4H\text{-SiC}$  の歪みエネルギー解析”, 水谷充利, 河村貴宏, 鈴木泰之, 寒川義裕, 柿本浩一, 第 44 回結晶成長国内会議, 07aD07, 2014.11.6-8. 学習院大学

“分子動力学法による  $4H\text{-SiC}$  内のらせん転位解析”, 水谷充利, 河村貴宏, 鈴木泰之, 寒川義裕, 柿本浩一, 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 18a-A17-4, 2014.9.17-20. 北海道大学

## 26 特 5-1

(研究集会)

### 洋上複合エネルギーファームの開発

研究代表者  
広島大学大学院工学研究院教授  
岩下 英嗣

#### 1. 目的

海洋再生可能エネルギー開発に関して、一つの浮体に風車一基の洋上風力発電システムの技術はほぼ確立されているが、応用力学研究所では一つの浮体に風車数基、さらに太陽光パネル、波力発電装置も搭載される斬新なアイデアに基づく洋上複合エネルギーファームが提案されている。この構想の実現にこれまで多くの研究開発が行われてきており、応用力学研究所は、H26 年度に共同利用の特定研究として「海洋エネルギー取得のための新型海洋構造物に関する研究」を設定している。本研究集会では、この特定研究の共同研究者を中心に、いろいろな分野の研究者が一堂に会し、海上風、潮汐、波浪を利用した発電技術の開発に関わる水槽実験、理論解析及び数値シミュレーションによる基礎的・実用的な研究について研究成果の発表、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12月19日（金）13：00～17：30

12月20日（土） 9：00～15：40

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。

#### **Numerical and Experimental Strategies for Tidal Turbine Farms Design (Keynote Invited Lecture)**

Pierre Ferrant (Director, LHEEA Lab, Ecole Centrale de Nantes, France)

The state of the art of the research and development activities in France on utilization of tidal current energy is outlined. Major research projects in LHEEA Lab on marine renewable energy development are introduced, including WEC, floating wind turbine, fixed wind turbine, and tidal turbine farm. Newly obtained research results on numerical modeling, model tests and full scale testing are presented.

#### **Offshore Wind Energy in the US and the Development of new IEC Design Standards for Offshore Wind Turbines (Keynote Invited Lecture)**

James Manwell (Director, Wind Energy Center, University of Massachusetts, USA)

In this presentation, the IEC 61400-3 standard is explained, which is a set of design requirements for offshore wind turbines, to ensure that wind turbines are appropriately engineered against damage from hazards within the planned lifetime. Related researches on offshore wind turbine in USA are also introduced.

#### **Downwind Rotor Technologies for Offshore Wind Turbines**

Shigeo Yoshida (Kyushu University, Japan)

Downwind rotor is shown to be promising for floating offshore wind turbines. Researches on wind-rotor alignment, floating wind turbine stability, tower shadow modeling, and noise/infrasound measurement have been carried out and recently obtained results are presented.

## **Numerical Simulations of Offshore Wind Turbine Wake Flows and its Supported Floating Platform Flows**

Decheng Wan (Shanghai Jiao Tong University, China)

An in-house CFD solver, naoe-FOAM –SJTU 1.0, for viscous wake flows around offshore wind turbine is developed. Major techniques on the solve are explained including: (1) Decoupled pressure field and velocity field by PISO (pressure-implicit split-operator); (2) Free surface by level set; (3) Complex shape of ship hull is handled by overset grid technique; (4) RANS turbulent model and (5) High performance parallel computation.

## **A Preliminary Design and Performance Estimation of an Ocean Current Turbine**

Kohei Tokunaga, Hidetsugu Iwashita (Hiroshima University, Japan)

Okinawa Institute of Science and Technology (OIST) has proposed an ocean current turbine concept. In this research preliminary design of the ocean current turbine are carried out and numerical simulation and model experiment are performed to study its performance of. studies.

## **CFD Simulation of a Horizontal Axis Tidal Turbine based on OpenFOAM**

Cheng Liu, Changhong Hu (Kyushu University, Japan)

As a preliminary study, this paper presents the numerical simulation of a three bladed horizontal axis tidal turbine (HATT) by OpenFOAM, in which the Reynolds Average Navier Stokes (RANS) equation with Shear Stress Transport (SST) turbulence model is applied. The Multi Reference Framework (MRF) method is adopted for dealing with grid relative rotating or moving. The rotor pressure coefficients and wake vortex as well as flow field information are presented in details. The resultant power and thrust coefficients of these simulations are compared with experimental results at various tip speed ratios.

## **Development of accurate and practical unstructured-grid model for interfacial multi-phase fluid dynamics**

Feng Xiao, Bin Xie (Tokyo Institute of Technology, Japan)

This talk presents a numerical solver for interfacial multiphase fluid dynamics on unstructured grids. The fluid solver is based on a multi-moment finite volume formulation, where both the volume integrated average (VIA) and the point value (PV) are treated as the computational variables and updated simultaneously at each time step. The THINC method is used as the interface capturing method. Integrating these component schemes and other physical models on the OpenFOAM platform, we developed a multi-functional numerical solver on unstructured grids for interfacial multiphase flows.

## **Numerical and experimental study of the aero/hydrodynamics of FOWT in HEU**

Liang Zhang (Harbin Engineering University, China)

Numerical and experimental researches on aero/hydrodynamics of FOWT, which are carried out in Harbin Engineering University, are presented. A simplified non-linear model for coupled motion of FOWT is proposed. Comparison between the numerical results and model test are carried out.

## **Prescreening of environmental conditions for dynamic analysis of floating structures**

Dong-Hyun Lim, Taeyoung Kim, Yonghwan Kim (SNU, Korea)

As modern offshore platforms are operated in ocean deeper than ever, and the floating-type platforms are getting popular. One of difficulties in the design of floating-type offshore platforms is to simulate the interaction of body motion and mooring lines in the various conditions of ocean waves, wind, and currents. This study introduces a new methodology and procedure to prescreen the severity of mooring loads in various ocean environmental conditions. This method doesn't require huge CPU time and the accuracy is very acceptable range. This study validates such reliability and accuracy by comparing the results of direct simulation.

### **Prediction of springing-induced tension on TLPs**

Taeyoung Kim, Yonghwan Kim (SNU, Korea)

In this study, we develop a new method to predict the contribution of the second-order springing to extreme loads on TLP. Particularly the developed method is not based on direct simulation of load signal but based on an analytic method which is more accurate and simpler than the numerical generation of load signals. The statistical properties of the springing loads are predicted by using eigen-value analysis, and the extreme wave loads are obtained by using such properties. The results are validated by comparing the results of statistical analysis of direct signal simulation, showing a very good correspondence.

### **Characteristics of Motions of a Floating Body for Offshore Wind Power Generation**

Kyohei Kajino, Hidetsugu Iwashita, Yasushi Higo (Hiroshima University, Japan)

Three years ago, Kyushu Univ., Osaka Univ., some companies and us, Hiroshima Univ., launched out a joint project to develop a new-type platform for offshore wind power generation, and proposed a semisubmersible type floating structure. Unlike the general offshore structures, the platform for offshore wind power generation is usually installed at a site where we can expect abundant wind resources, that is, strong wind condition. Therefore it is easily supposed that the strong wind affects the motions of the platform significantly. In this study, we investigate the effect of the static attitude of the platform (as a result of the steady drift, sinkage, trim and heel) due to the strong wind upon the motions of the platform in waves.

### **Hydrodynamic prediction of FOWT with multiple wind-lens turbines**

Yingyi Liu, Changhong Hu (Kyushu University, Japan)

In this study, a potential flow based numerical model is proposed for analysis of the dynamic response of an offshore floating wind turbine system, with the consideration of hydrodynamic loads on the floating platform, the aerodynamic loads on the multiple wind turbine, and the hydrodynamic loads on the mooring lines. A semi-sub type floating wind turbine which is being developed in Kyushu University is analyzed by the proposed numerical model..

### **Conversion efficiency of Backward Bent Duct Buoy**

Yasutaka Imai (Saga University, Japan)

The influence of moment of inertia on the generation efficiency of a "backward bent duct buoy" wave energy converter was investigated at the tank test in the RIAM, Kyushu University. And the experimental results were compared with the result which was carried out in 2012. The highest efficiency was same order of the 2012 experiment. On the other hand, the generation efficiency became higher in a long wave region.

### **Measurement of sloshing flows using Particle Image Velocimetry**

Jieung Kim, Sang-Yeob Kim, Yonghwan Kim (SNU, Korea)

This study is the first step of the measurement of fluid velocity in sloshing flow fields. PIV has been applied to measure the velocity field in a 2D tank which is under regular harmonic motion. The difficulty in this application is the sloshing flow is unsteady and sometime very violent. In this study, as the first trial of PIV application, sloshing flows due to small amplitude excitation are generated, and the velocity vectors in a domain near tank wall are measured. The measured velocities are compared with the analytic solution based on potential theory. It is shown that the current PIV measurement has very fair agreement with the analytic solution of linear boundary value problem.

### **Zero scattered-wave energy and wave pattern in cloaking phenomenon**

Takahito Iida, Mariko Miki, Masashi Kashiwagi (Osaka University, Japan)

Present study has revealed that scattered wave can be estimated by the scattered-wave energy and can be practically zero by arranging some outer optimized bodies, and zero wave drift force is also achieved as well.

These can be confirmed not only numerical computation but also model experiment. Thus cloaking may be practical application so as to reduce the wave drift force.

### **Development of an ocean current turbine at OIST**

Katsutoshi Shirasawa, Tsumoru Shintaki (Okinawa Institute of Science and Technology, Japan)

Our ocean current turbine will be moored from seabed to convert the kinetic energy of the marine current into electricity. So, a stability of the mooring system is an important issue to realize this power takes off system. In order to verify the mooring system, we have developed a scale model of the OIST ocean current turbine. The scale mode was set in a circulation water channel. we have observed the stability of the floating body under various flow and wave conditions. The experimental results have demonstrated that the mooring system works stably.

### **Offshore wind farm experiment using Wind-lens turbines**

Tomo Nagai (Kyushu University, Japan)

This study presents the results of our first offshore hybrid energy farm experiment in Hakata bay, Fukuoka, Japan. One of the main goals of this experiment was to clarify the advantage of wind farming at offshore locations, even relatively short distances from the adjacent shore, with typical annual average wind speed in Japan. The floating platform is equipped with new type of highly efficient shrouded turbines, named the “Wind-lens turbine”, developed at Kyushu University. This experiment is a significant step toward next-generation mid-size offshore hybrid farms.

### **Recent Progress of Tidal Current Power Projects in Japan**

Yusaku Kyojuka (Kyushu University, Japan)

Present status of the tidal current power generation is introduced in several aspects such as the total power potential of tidal currents of the world, R&D of the tidal power devices, and the information of the field demonstration sites together with the ongoing projects of the world. The characteristics of tidal power devices including the horizontal- and vertical axis turbines, oscillating wing devices, and the vortex induced vibration devices are discussed. Recent situation of the tidal current power generation in Japan is explained about the trends of financial supports, feed-in tariff system started from 2012 and the ongoing projects supported by the public funding. Finally, the outline of the joint project by the Ministry of Environment and NEDO, (New Energy and Industrial Technology Development Organization), which our group deeply concerns as a consortium member in the demonstration experiments in Goto Islands, Nagasaki Prefecture, is briefly explained.

## **4. おわりに**

「洋上複合エネルギーファームの開発」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。なお、この研究集会は、応力研とエネルギー基盤技術国際教育研究センター共催国際シンポジウム「International Symposium on Ocean Renewable Energy Technologies」とも共同開催となり、12月19日にフランス、アメリカ、中国から著名な研究者により特別講演を行った。また、大阪大学、東京工業大学、広島大学、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 12 月 19 日 (金), 20 日 (土)  
場 所： 九州大学応用力学研究所本館 6 階 W601 室

### 19 December (Friday)

- 13:00 - 13:10      Opening Address  
Yuji Ohya (Director, RIAM, Kyushu University, Japan)
- 13:10 - 14:00      *Keynote Invited Lecture*  
Numerical and experimental strategies for tidal turbine farms design  
Pierre Ferrant (Director, LHEEA Lab, Ecole Centrale de Nantes, France)
- 14:00 - 14:50      *Keynote Invited Lecture*  
Offshore Wind Energy in the US and the Development of new IEC Design Standards for Offshore Wind Turbines  
James Manwell (Director, Wind Energy Center, University of Massachusetts, USA)
- 14:50 - 15:00      Coffee break
- 15:00 - 15:30      Downwind Rotor Technologies for Offshore Wind Turbines  
Shigeo Yoshida (Kyushu University, Japan)
- 15:30 - 16:00      Numerical Simulations of Offshore Wind Turbine Wake Flows and its Supported Floating Platform Flows  
Decheng Wan (Shanghai Jiao Tong University, China)
- 16:00 - 16:30      A Preliminary Design and Performance Estimation of an Ocean Current Turbine  
Kohei Tokunaga, Hidetsugu Iwashita (Hiroshima University, Japan)
- 16:30 - 17:00      CFD Simulation of a Horizontal Axis Tidal Turbine based on OpenFOAM  
Cheng Liu, Changhong Hu (Kyushu University, Japan)
- 17:00 - 17:30      Development of accurate and practical unstructured-grid model for interfacial multi-phase fluid dynamics  
Feng Xiao, Bin Xie (Tokyo Institute of Technology, Japan)

### 20 December (Saturday)

- 9:00 - 9:30        Numerical and experimental study of the aero/hydrodynamics of FOWT in HEU  
Liang Zhang (Harbin Engineering University, China)
- 9:30 - 10:00      Prescreening of environmental conditions for dynamic analysis of floating structures  
Dong-Hyun Lim, Taeyoung Kim, Yonghwan Kim (SNU, Korea)
- 10:00 - 10:30      Precision of springing-induced tension on TLPs  
Taeyoung Kim, Yonghwan Kim (SNU, Korea)
- 10:30 - 11:00      Characteristics of Motions of a Floating Body for Offshore Wind Power Generation  
Kyohei Kajino, Hidetsugu Iwashita, Yasushi Higo (Hiroshima University, Japan)

11:00 - 11:30	Hydrodynamic prediction of FOWT with multiple wind-lens turbines Yingyi Liu, Changhong Hu (Kyushu University, Japan)
11:30 - 12:00	Conversion efficiency of Backward Bent Duct Buoy Yasutaka Imai (Saga University, Japan)
12:00 - 13:00	Lunch
13:00 - 13:30	Measurement of sloshing flows using Particle Image Velocimetry Jieung Kim, Sang-Yeob Kim, Yonghwan Kim (SNU, Korea)
13:30 - 14:00	Zero scattered-wave energy and wave pattern in cloaking phenomenon Takahito Iida, Mariko Miki, Masashi Kashiwagi (Osaka University, Japan)
14:00 - 14:30	Development of an ocean current turbine at OIST Katsutoshi Shirasawa, Tsumoru Shintaki (Okinawa Institute of Science and Technology, Japan) Kohei Tokunaga, Hidetsugu Iwashita (Hiroshima University, Japan)
14:30 - 15:00	Offshore wind farm experiment using Wind-lens turbines Tomo Nagai (Kyushu University, Japan)
15:00 - 15:30	Recent Progress of Tidal Current Power Projects in Japan Yusaku Kyojuka (Kyushu University, Japan)
15:30 - 15:40	Closing Remarks Hidetsugu Iwashita (Hiroshima University, Japan)

平成 26 年度応用力学研究所特定研究報告  
洋上風車用大型三角形セミサブ浮体構造の構造強度に関する研究

九州大学大学院工学研究院  
准教授 安澤 幸隆

1. 研究目的

近年、温室効果ガスによる気候変動の防止と、化石燃料の枯渇に対して、持続可能な社会を構築するために再生可能エネルギー利用の必要性が世界的に謳われている。また、日本では2011年に起きた未曾有の原発事故により、代替エネルギーの開発が急務となっている。

日本は世界第6位の面積の排他的経済水域 (EEZ) を有しており、この海域の海洋エネルギーのポテンシャルは膨大であるため、今後最も期待されるエネルギー源と考えられ、洋上風力発電は最も実用化の可能性が高い。しかし、日本は欧州と異なり、水深が深いので、着底式風力発電施設ができる海域は限定されている。

そこで、浮体式の洋上風力発電施設が考案されており、浮体式にすることで、日本の水深が深い海域でも、十分な洋上風力発電が期待できるとされている。また、今後波力発電設備の搭載も考えられる。この開発プロジェクトにおいては、波力などの影響を受けにくい鋼管で構成されたジャケット構造によって構成された新しい構造形式が採用されている。

本研究では、我々が、材料力学的あるいは構造力学的に構造形式および構造寸法を決めたジャケット構造ブリッジ方式のセミサブ浮体の構造応答を調べ、構造強度上、重要な部位について明らかにすることを目的としている。

2. 研究方法

本研究で対象とする浮体はFig. 1に示すような三角形の浮体構造であり、Table 1に示す主要目を有し、頂点の位置に風車、3辺に太陽電池パネルを設置する浮体式エネルギーステーションである。初期設計フローにより、風車を含むすべての重量、浮力、ブリッジ部に対する縦曲げ強度、波浪中の応答、固有周期などを考慮して、初期構造寸法を材料力学的に決定し、それを初期構造寸法としている。

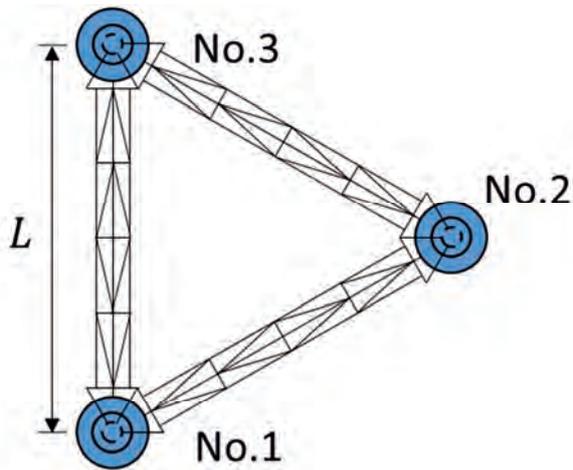


Fig. 1 浮体構造平面図

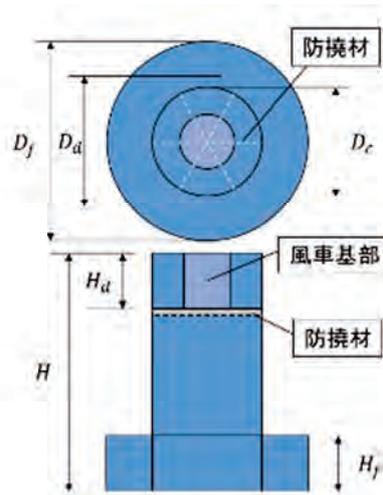


Fig. 2 風車下浮体構造

Table 1 初期構造寸法

風車間距離	$L$	60m
浮体深さ	$H$	13m
カラム・デッキ部直径	$D_d$	6m
フーティング直径	$D_f$	11m
デッキ深さ	$H_d$	3m
フーティング深さ	$H_f$	3m
デッキ内部隔壁	$L_{d.bh}$	6枚配置 半径方向長さ 1.5m
風車基部直径	$D_w$	3m
フーティング内隔壁	$L_{f.bh}$	6枚配置 半径方向長さ 5.5m

今回は、風車下構造の構造応答に着目し、次の手順で構造解析を行い、構造応答を調べた。

- 1) 風車下構造をシェル要素で詳細に分割し有限要素モデルを作成する。
- 2) 風車から受ける風車基部のモーメントおよび鉛直力、水平せん断力に対する応答を調べる。
- 3) 風荷重に対する構造応答をしらべ、風向の影響を調べる。

### 3. 研究組織

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
大坪俊介	九州大学工学部地球環境工学科	学部4年	数値解析
胡 長洪	九州大学応用力学研究所	教授	解析指導

## 4. 研究概要

### 4. 1 風車自重による風車下構造の応答

#### 1) デッキ部の構造応答

風車下構造のデッキ部はFig. 3のような二重円筒構造となっており、風車の自重は、放射状の隔壁および、デッキ部底板の曲げを通じて下のカラム部に伝達される。変形と応力分布をFig. 4, 5に示す。検討の結果、隔壁周辺においてせん断による最大応力が発生するため、隔壁の板厚が重要である。

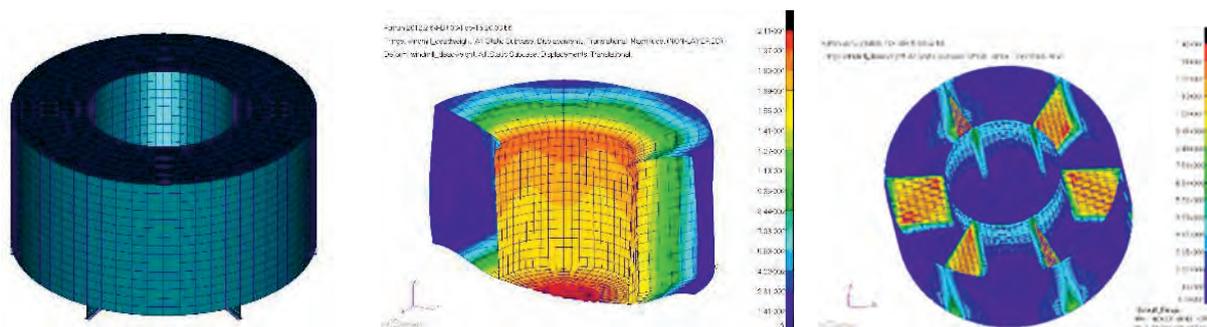


Fig. 3 風車下デッキ構造      Fig. 4 デッキ部の変形      Fig. 5 応力分布 (Mises応力)

#### 2) 風荷重による風車下構造の応答

風荷重に対する風車基部に作用するモーメント、水平せん断力については、それぞれ単位力、単位モーメントに対する応答をまず求め、風車のスペックによって柔軟に設計できるように構造応答を重ねあわせる手法をとった。

構造解析モデルを、Fig. 6に示す。

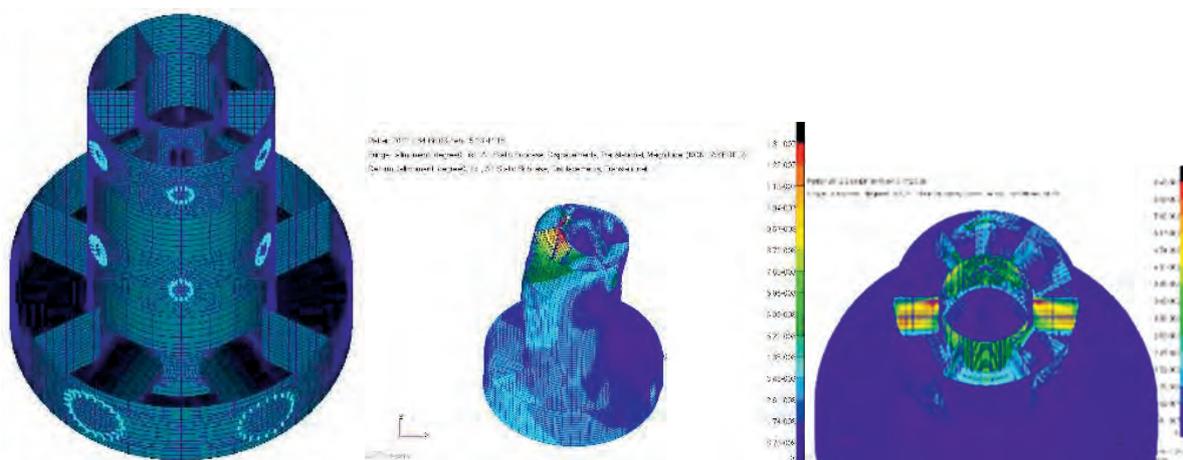


Fig. 6 風車下浮体構造      Fig. 7 基部モーメントによる変形      Fig. 8 応力分布

基部モーメントによる応答をFig. 7, Fig. 8に示す。

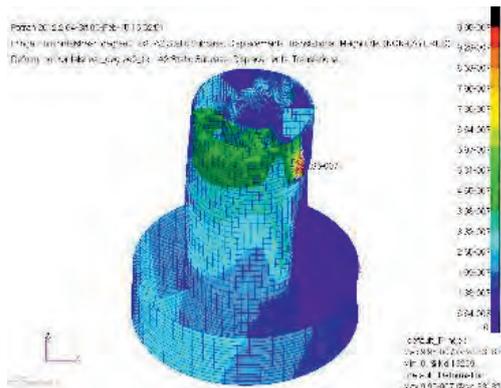


Fig.9 水平せん断力による変形

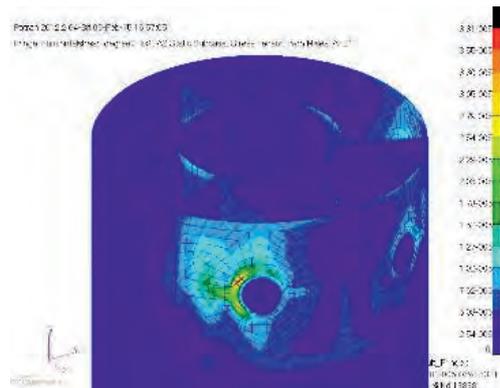


Fig.10 水平せん断力による応力

Table 2 風車の諸元

デッキ面からのナセル高さ	23m	
	運転時	荒天時
抗力係数	1.02	
風速	20m/s	60m/s
風荷重	168659N	878018N

風荷重家における応答は、Table 3のようになり、風車基部における基部モーメントによる応答が最も厳しいため、風車基部の構造設計の詳細な検討が更に必要であることがわかった。また、風向による構造応答についても明らかにした。

Table 2 風荷重下における浮体静止時の応答[MPa][mm]

	風車基部転倒モーメント作用時		風車基部水平せん断力作用時	
	最大相当応力	最大変位	最大相当応力	最大変位
①	1.30E+02	2.65E+00	3.59E+01	9.48E-01
②	1.15E+02	2.40E+00	3.20E+01	9.31E-01
③	1.31E+02	2.52E+00	3.35E+01	8.74E-01
④	1.16E+02	2.32E+00	3.20E+01	9.31E-01

## 5. 結言

九州大学において開発中の浮体式洋上風力発電ステーションの構造開発に関連し、浮体構造の特に風車下構造の風車自重および風荷重に対する構造応答を調べ、フィージビリティおよび詳細構造検討の必要な部分を明らかにした。

## 荒天下にて浮体式洋上風力発電プラットフォームの係留索に働く最大張力の推定

神戸大学大学院海事科学研究科 橋本 博公

### 研究目的

我が国の浮体式洋上風力発電を考える際には、台風や津波来襲時の安全性確保が重要な課題となる。特に浮体式プラットフォームの位置保持に係る係留索の破断は深刻な漂流事故に繋がりをため、係留索に作用する変動張力、最大張力の推定は破断の有無を検討するうえで不可欠である。本研究では浮体式洋上プラットフォームの定量的な安全性評価手法を構築すべく、粒子法にもとづく強非線形水波中での波浪外力推定と係留索の動的解析、さらには風外力推定手法を組み合わせることで、極限的な荒天下における浮体式プラットフォームの動揺予測と係留索に作用する最大張力の推定を試みる。

### 数値計算の概要

台風来襲時のような極限的な荒天下での波浪外力の推定のため、強非線形自由表面流れの数値解法として知られる粒子法を用いる。粒子法の中でも完全陽解法の SPH 法は並列化効率に優れ大規模計算に適している。そこで本研究では SPH 法のオープンソースである DualSPHysics を流体ソルバーとして用いた。DualSPHysics は演算処理に CPU ではなく GPU を使用しており、安価な計算機でも数千万粒子の計算が実行可能である。

### 計算結果（2次元）

まずは数値計算の妥当性を確認するため、2次元の数値水槽に単純なスパー型の浮体を浮かべた状態にて、水槽両側のプランジヤを周期的に上下させることで造波を行い、入射波に対する浮体運動の時刻歴を求めた。計算は浮体を全く係留しない状態と水面下の重心位置に直立のマストに対して $\pm 30$ 度の角度で線形バネにより係留した場合の2パターンについて行った。線形バネの影響は、SPH法から求まる流体力を用いて浮体の運動方程式を解く際に考慮している。Fig.1に線形バネありの計算例を示す。なお、プランジヤにより造波された波の岨度は碎波寸前の1/10程度である。

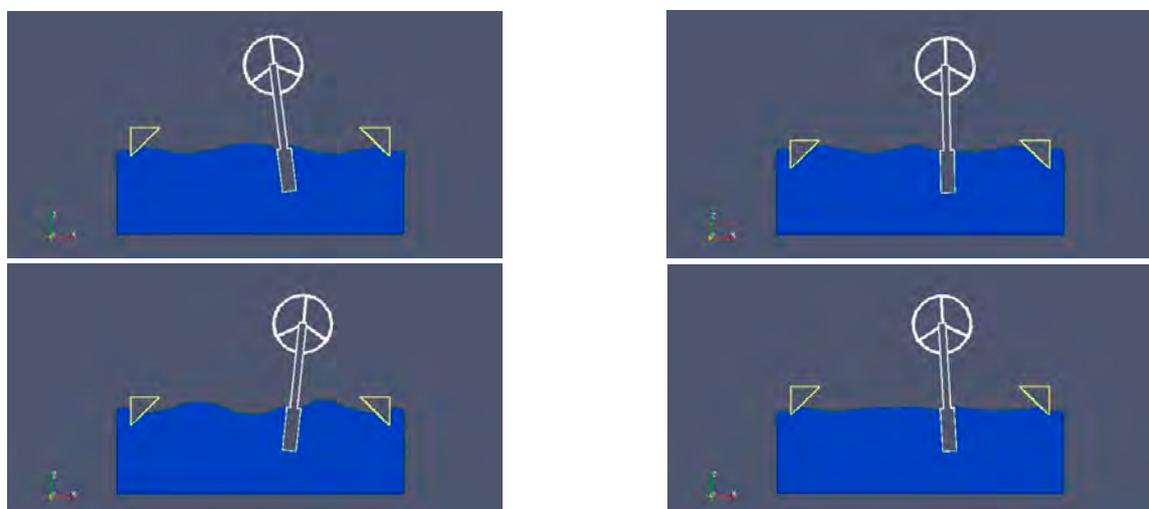


Fig.1 An example of 2-D simulation

今回は計算の妥当性を示すため、バネ定数を系統的に変更し、浮体の sway 運動と波が同調するポイントを探した。このときの sway と pitch の時系列を Fig.2 に示す。バネなしの場合と比較すると、sway が同調して非常に大きくなった反面、pitch 運動は抑えられていることが分かる。以上より、SPH 法による 2 次元流体力計算と運動方程式へのバネの考慮が正しく行われていることが確認できた。

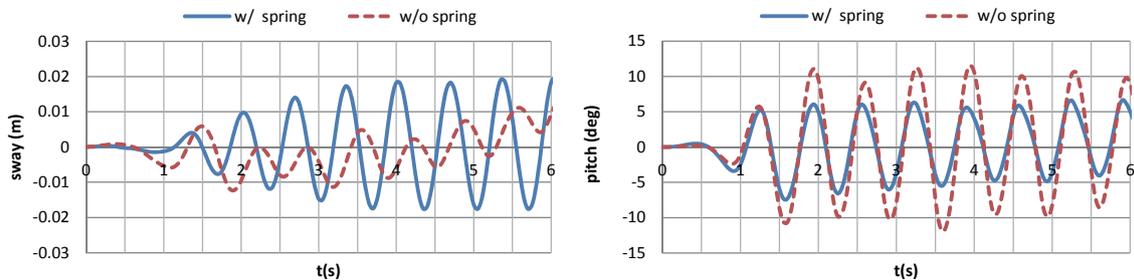


Fig.2 Effect of spring on sway and pitch motions of a floater

### 計算結果 (3次元)

2次元計算の妥当性が確認できたので、続いて3次元計算の検討を行った。その第一歩として、任意の波動場が再現可能となるように逆円錐型連結プランジャ造波機を備えた数値水槽を採用し、極限的波浪として水槽中央部で集中波を発生させた。この計算結果を Fig.3 に示す。集中波が重力に逆らって高く突き上がる様子が再現されている。今後はこの集中波を浮体に作用させた場合の非線形応答を計算し、その場合の張力について検討を行う予定である。

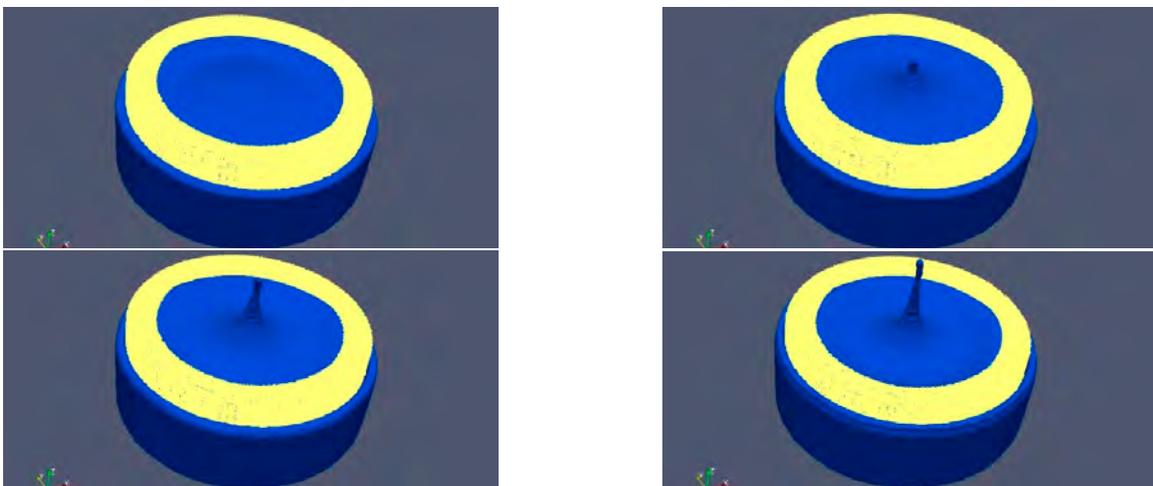


Fig.3 Concentrated wave by 3-D SPH

### まとめ

SPH 法をベースとした極限的波浪を受ける洋上浮体の非線形応答計算の基礎が構築された。今回は係留索モデルとして単純な線形バネを用いたが、今後はプラットフォームの漂流影響を正確に考慮すべく、ランプドマス法による動的解析等に切り替えていく予定である。

### 成果報告

特になし

• 目的

九州大学応用力学研究所では、風力発電・波力発電・海流発電といった海洋自然エネルギー源を総合的かつ効率的に利用するための新型海洋浮体及び個々の発電技術の開発研究が進められている。このような複合発電システムの設計にあたって、自由界面を含む多相流体と複雑幾何形状を持つ構造物との相互作用は支配的な検討事項である。そのため、複雑幾何形状を精確に表現できる非構造格子における高性能な数値シミュレーション技術の研究開発は不可欠である。本研究では、我々の研究グループで提案した非構造格子における新しい数値計算手法を用い、自由界面多相流と移動構造物の連成数値解析モデルを構築する。今年度は、主に非構造格子における流体ソルバー及び自由界面捕獲法の改良を中心に研究を行った。

• 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と改善

昨年度で開発した非構造格子マルチモーメント有限体積法 (VPM) の改良版として、任意格子に適用できる MCV-SPCV (Multi-moment Constrained finite Volume method with Solution Points at Center and Vertices) を提案した。この手法では、各メッシュセルの重心点及び頂点の点値 (point values: PV) を計算変数とする。格子セルにおける体積分平均値 (volume integrated average: VIA) は直接に予報変数として取り扱わず、一つの制約条件としてセル中心点の予測式に加える。本手法では、すべての計算変数は点値であるため、最小二乗法等非構造格子における高精度補間法を適用しやすくなり、計算精度及び格子に対するロバスト性の改善に繋がる。

Table 1. Comparison of the numerical errors in velocity and pressure for different methods on unstructured grids of good quality (Grid A) and bad quality (Grid B). The small the degradation error is, the more robust the numerical method is in respect to the grid quality.

Method	$L_1$ error of $ \mathbf{u} $			$L_1$ error of $p$		
	Grid A	Grid B	Degradation error	Grid A	Grid B	Degradation error
FVM	$2.416 \times 10^{-2}$	$6.876 \times 10^{-2}$	$4.460 \times 10^{-2}$	$1.434 \times 10^{-1}$	$2.502 \times 10^{-1}$	$1.068 \times 10^{-1}$
VPM	$9.562 \times 10^{-3}$	$3.348 \times 10^{-2}$	$2.392 \times 10^{-2}$	$4.267 \times 10^{-2}$	$7.598 \times 10^{-2}$	$3.331 \times 10^{-2}$
MCV	$3.592 \times 10^{-3}$	$1.071 \times 10^{-2}$	$7.118 \times 10^{-3}$	$1.002 \times 10^{-2}$	$3.547 \times 10^{-2}$	$2.545 \times 10^{-2}$

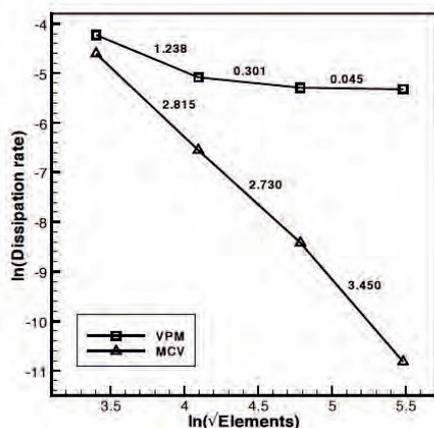


Fig.1 The convergence rate in numerical dissipation for Taylor vortex test problem.

表1には、二次元テラー渦のベンチマークテストによる検証結果を示す。直交性、スキュニス、アスペクト比の指標から品質の良い格子 (Grid A) と悪い格子 (Grid B) を用い、従来型の有限体積法 (FVM)、VPM 法及び MCV 法それぞれの誤差評価を行った。他の手法に比べ、MCV 法の計算結果は速度と圧力場において最も小さい数値誤差を示している。また、格子品質悪化による精度の劣化についても MCV 法は最も少ないことが分かる。

図1はテラー渦のベンチマークテストにおける運動エネルギー散逸の収束率を表す。VPM 法に比べ、MCV 法の数値散逸誤差は大きく減少したことは明らかになる。よって、MCV 法は高レイノルズ数や乱流等の現象のシミュレーションにより優れたことを示唆する。

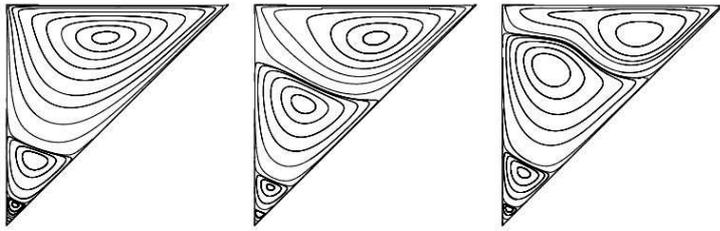


Fig.2 Streamline contours of lid-driven triangular cavity viscous flow tests. Displayed are the results for Reynolds number of 100(left), 500(middle) and 1000(right) respectively.

図2には、三角形キャビティ流れの計算結果を示す。異なるレイノルズ数における計算結果は他の高精度手法の結果とよく一致している。

### (2) 非構造格子の自由界面捕獲スキーム

非構造格子における代数型VOF (volume of fluid) 自由界面捕獲法であるTHINC法を開発し、実用化に向けた改良を行った。任意形状の非構造格子セルにおいて数値積分に基づく多次元THINC

再構築法に成功した。これによって、二次(曲面)多項式による界面近似が可能になり、幾何再構築を用いたVOF法に遜色しない計算精度を得ている。非構造格子における変形流れ場による自由界面の移流テストを行った。界面の初期形状は円形(図3(2次元))及び球形(図4(3次元))で与えられ、変形流れ場によって移流させる。その後、速度場を反転し、界面を初期の位置に戻すまで計算を続ける。2次元と3次元のテスト問題の計算結果を図3及び図4に示す。これらの結果から、本手法は幾何再構築によるVOF法に匹敵する計算精度を有することを実証できる。

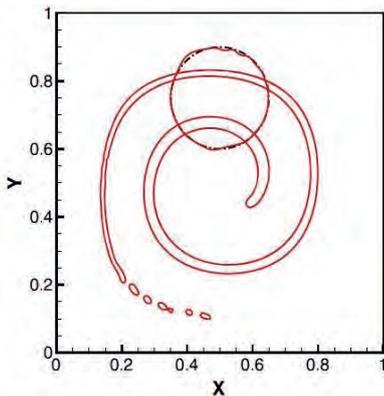


Fig.3 Numerical results of time-dependent single vortex flow test problem on unstructured grid. The black dot line represents the initial profile (exact solution).

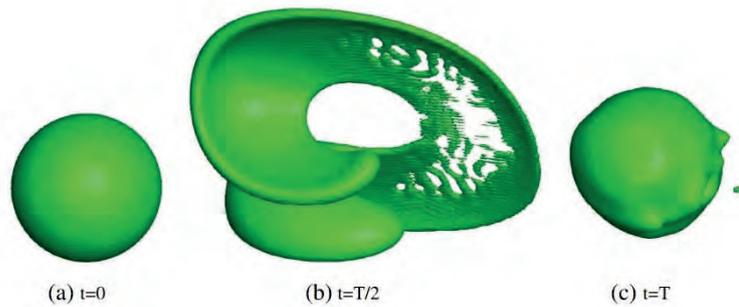


Fig.4 Numerical results for time-dependent 3D vortical deformation flow test. Displayed are the isosurfaces of contour 0.5 of the instantaneous solutions.

### 研究組織

役割	氏名	所属・身分	滞在延べ日数
研究代表者	肖 鋒	東京工業大学・准教授	2日
研究協力者	孫紫堯	東京工業大学・博士1年生	2日
研究協力者	車玉章	東京工業大学・博士1年生	2日
研究協力者	依 平	東京工業大学・交換留学生(博士2年)	2日
研究協力者	金 鵬	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・教授	

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

1. 目的

後ろ曲げダクトブイ (Backward Bend Duct Buoy ; BBDB) は浮体式振動水柱型波力発電装置の一種である。この装置は、波エネルギーを空気エネルギーへ変換し、空気エネルギーを電気エネルギーへと変換を行う。BBDB は波により装置全体が動揺し、浮体と水室内水柱の共鳴時に空気圧力が非常に高くなり、高効率な発電が可能となる。

本実験では BBDB の中型模型を用いて実験を行った。この中型模型は、BBDB の小型模型の長さ比を 3 倍にしたものである。2011 年度の BBDB の中型模型の重心ピッチまわりの慣性モーメントは、小型模型の慣性モーメントの  $3^5$  倍の約 83% であった。今回の実験では、小型模型の慣性モーメントの  $3^5$  倍の約 93% まで大きくして実験を行った。本研究は BBDB の一次変換効率及び、発電効率に及ぼす慣性モーメントの影響を調べることを目的とした。Fig.1~3 は、BBDB の小型模型、2011 年度の実験時の BBDB、2014 年度の実験時の BBDB である。



Fig.1 BBDB small model

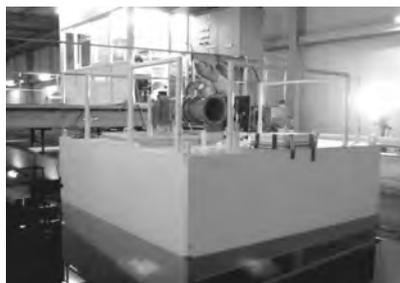


Fig.2 BBDB Experiment of 2011



Fig.3 BBDB Experiment of 2014

2. 実験方法及び実験条件

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で規則波中応答試験を実施した。実験で用いた BBDB の中型模型を Fig. 4 に示す。使用した水槽は、長さ 65m、幅 5m、深さ 7m の三次元水槽である。水槽内の配置図を Fig.5 に示す。一次変換実験では、ノズル比 1/300 のオリフィスを用いて、入射波高 50mm、周期 2~3 秒で、入射波高、反射波高、空気室内部波高、空気室内部圧力、浮体の運動、係留力、を 120 秒間計測した。発電実験では、入射波高 50mm、周期 2~3 秒で、入射波高、反射波高、空気室内部波高、空気室内部圧力、浮体の運動、係留力、発電機電力を計測した。

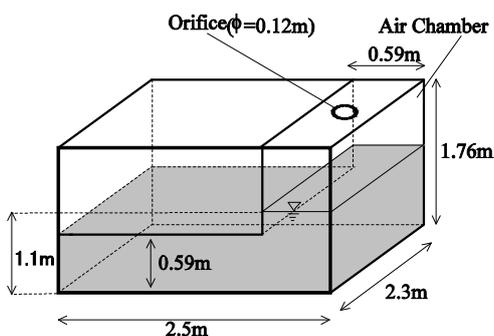


Fig. 4 BBDB

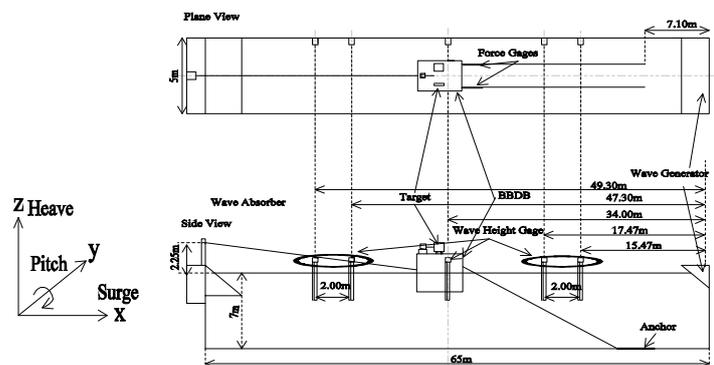


Fig. 5 Configuration of experimental apparatus

### 3. 実験結果及び考察

Fig. 3 は、一次変換実験の一次変換効率  $\eta_1$  である。Fig. 4 は、発電実験の発電効率である。横軸は、入射波長  $\lambda$  と BBDB の全長  $L$  の比である。一次変換実験では、2010 年度の実験時より Surge 方向と Heave 方向の運動が大きくなった。運動が大きくなると、ダクト内では、大量の水が出入りする。そのため内部波高と内部圧力が上昇し、一次変換効率が大きくなったと考えられる。発電実験では、 $\lambda/L=5$  のとき、 $\eta=0.279$  が最大となった。このときの Surge 方向と Heave 方向の無次元振幅をみると、Surge は最大、Heave は極小値となっている。また内部波高と内部圧力の無次元値は最大となっているので、発電効率が最大になったと思われる。2011 年度の実験と比較すると、最大効率はあまり変わらなかったが、長波長側で発電効率は上昇した。Surge の振幅は長波長側で大きくなっている。2011 年度より運動が長波長側で大きくなったと考えられる。また運動が大きくなり、ダクト内を出入りする水の量も多くなり、内部圧力、内部波高の無次元値は、2011 年度の最大効率点以外 ( $\lambda/L=3.5$ ) で大きくなり、長波長側で効率が高くなったと考えられる。

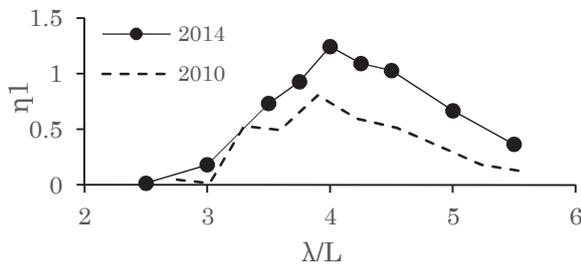


Fig.6 Primary conversion efficiency

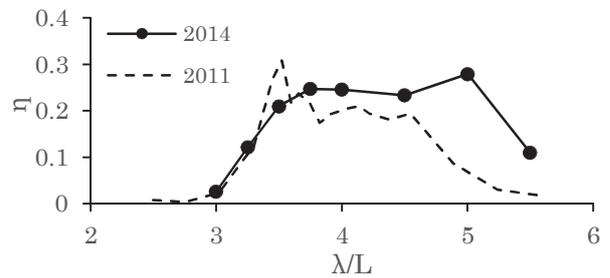


Fig.7 Generating efficiency

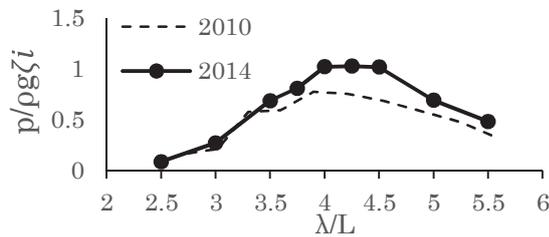


Fig.8 Inner pressure

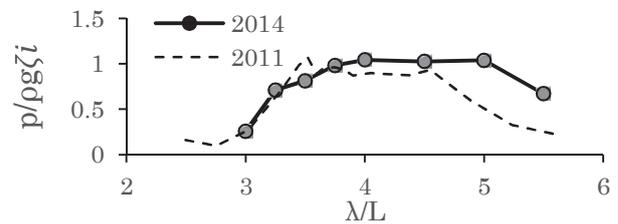


Fig.9 Inner pressure

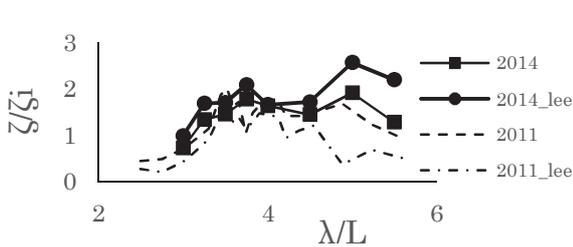


Fig.10 Inner water elevation

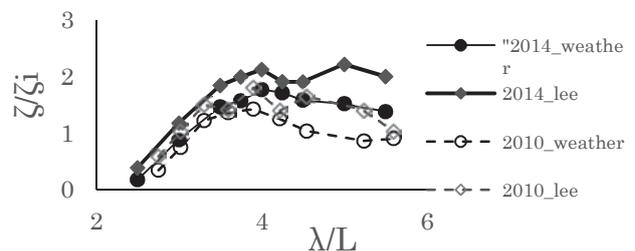


Fig.11 Inner water elevation

### 4. 結論

一次変換実験では、重心ピッチまわりの慣性モーメントを大きくしたことにより、前回時より運動が大きくなったことで、内部波高と内部圧力が高くなり、一次変換効率が高くなった。また発電実験では、重心ピッチまわりの慣性モーメントを大きくしたことにより、2011 年度の最大効率 ( $\lambda/L=3.5$ ) 以外の点、とくに長波長側で最終効率が高くなった。これは、長周期の波に対応できるようになったといえる。

## 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

### 1. 目的

沖縄科学技術大学院大学（以下 OIST）では 2012 年度より、海流発電機の開発を行っている。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。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おり、海洋エネルギーもその 1 つである。欧州では中心に潮流発電を始めとした海洋エネルギーの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。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タービンにより安定に発電する。OIST はこれまでにタービン直径 2 m の試験機を製作し、海洋実験や曳航水槽実験などを行い機体の安定性や発電効率などを調査してきた。回流水槽においても小型模型を用いた係留試験を行い、機体や係留システムの安定性を確認している。また 2014 年度からはタービン直径 5 m、定格出力 10 kW の機体を目標として研究開発を進めている。この計画では設置コストの問題などから海流ではなく沿岸近くの潮汐流を利用して発電システムを実証することを考えている。

### 2. 開発状況

OIST では現在 10 kW 機の開発を目標として研究開発を進めている。その状況を以下に報告する。

#### 発電機

海流発電機には、水中で動作する発電機が必須である。今回は発電機の外装がナセルを兼ねると仮定している。そこで、我々はスカイ電子（株）社製の 1 kW 発電機 (SKY-MG350) の駆動軸部にメカニカルシールを設置する事により、耐水性を持たせることにした。図 1 に発電機とメカニカルシールの写真を示す。メカニカルシールは三和工機株式会社製のものを使用した。メカニカルシールは炭化ケイ素(SiC)の摺動面で液体をシールする。発電機としての性能を評価するために駆動用のモーターとトルクモニタを介して接続し、発電特性を測定した。シール部は水圧をかけるためのケースを更に設置し、水圧 10 気圧を

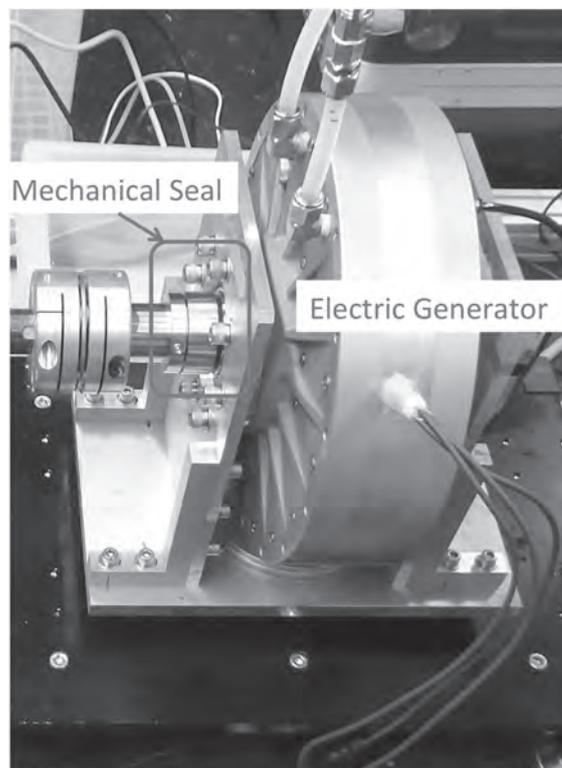


図 1, 新規開発したブレードと海流発電機。

かけながら測定を行った。結果として、メカニカルシールによる損失は殆どなかった。また、水の漏れも見られなかった。

### 観測用中層浮体

実際の海況を観測し、係留された浮体がどのような動きをするのか観測するために、観測用中層浮体の設置を行っている。図 2 に概略を示す。浮体本体は実績のある中層漁礁を使用しており、海流から受ける抗力が直径 5 m のタービンと同じになるように断面積を調整している。

海底に設置されたシンカーより係留索にて固定されている。浮体本

体の高さは約 8 m であり、浮体の上部が水深 15 m 以上となるように設置する計画である。浮体の上部、下部と係留索の間に水深計を備えており、流れを受けた時の各部の水深を計測できる仕組みになっている。海上には通信と標識を兼ねたブイを設置する。ブイの下部には ADCP を設置して、鉛直方向の流速分布を計測する。取得されたデータは携帯電話の回線を使用して定期的に送信し、OIST に設置された PC より閲覧する事が可能となる。また加速度計を浮体本体の数カ所に設置し、運動を観測するが、これは通信にはのせず、ロガー方式となる予定である。設置場所は沖縄県北部の宜名真漁港沖であり、水深は約 100 m である。浮体本体の設置は 2014 年 12 月末に終わっており、順次ブイや通信機器の設置を行っていく予定である。

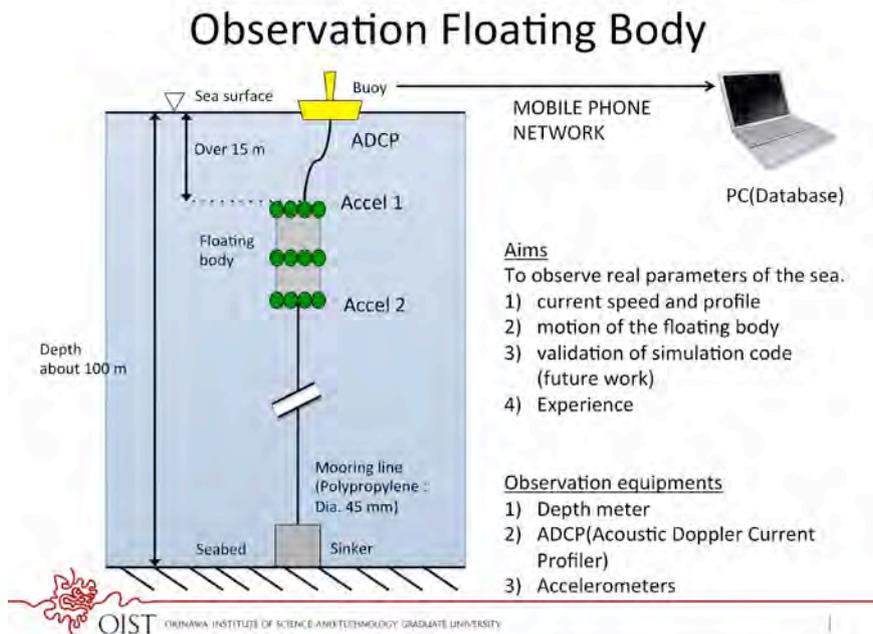


図 2, 観測用中層浮体の概略図。

### 3. まとめ

平成 26 年度は研究の進捗により、九州大学応用力学研究所の施設を使用した実験は実施しなかった。しかし、発電機を始めとする各要素技術の開発や海況観測装置の設置などを着実に進めることができた。今後、水槽などの施設を利用しながら開発品の実証や性能評価などを行っていきたいと考えている。

### 4. 研究組織

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
南潤一郎	沖縄科学技術大学院大学	技術員	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 2 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

1. はじめに

日本南岸域には海流発電に適した北太平洋亜熱帯循環系の西岸強化流である黒潮が流れ、その流速は速いところで 2m/s に達することもある。本研究では、数値モデル (MRI.COM) の計算結果を用いて黒潮のエネルギーポテンシャルを調べ、ポテンシャルの観点から黒潮を利用した海流発電に適した海域を示した。さらに、それらの海域のエネルギーポテンシャルの変動特性を明らかにした。

2. 日本近海のエネルギーポテンシャル

気象庁気象研究所海洋研究部で開発された MOVE/MRI.COM の 1993 年～2012 年の日平均流速値 (水平解像度：約 10km) を用いて黒潮のエネルギーポテンシャルを解析した。20 年間のスカラー平均流速を図-1 に示す。台湾西方沖 (A 線) と東シナ海 (B 線)、四国沖 (D 線)、紀伊半島沖 (E 線)、房総半島沖 (F 線) で黒潮の強流域が存在し、これらの線上には海流発電を行うのに必要な条件として挙げられている平均流速 1m/s 以上の強い流れが存在していた。海流発電のタービン設置水深である深さ 50m のエネルギーポテンシャルの比較を行うと、20 年間の平均値は紀伊半島沖の E 線と四国沖の D 線で最も大きく、次いで台湾西方沖の A 線と東シナ海の B 線、房総半島沖の F 線となり、トカラ海峡の C 線で最も小さい値を示している (表-1)。

3. A～F 線上のエネルギーポテンシャルの変動特性

黒潮の流路や流速は必ずしも時空間的に一定ではなく変動するものであることから、海流発電の事業化を目指すためには予めポテンシャルの時間変動の特性を把握しておく必要がある。上記 6 線の深さ 50m におけるポテンシャルの 20 年間の時系列を調べると (図-2)、どの海域の線上においてもポテンシャルが大きな増減を繰り返している。特に紀伊

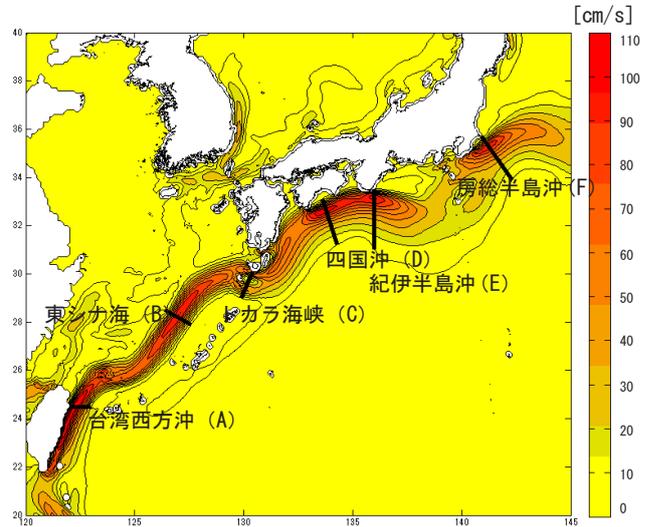


図-1 20 年間のスカラー平均流速

表-1 各線上のエネルギーポテンシャルの平均値、標準偏差、最大値、最小値

	平均値 (MW)	標準偏差 (MW)	最大値 (MW)	最小値 (MW)
台湾西方沖 (A)	37.7	18.5	165.6	0.4
東シナ海 (B)	35.8	14.6	123.4	6.7
トカラ海峡 (C)	9.3	5.7	39.3	0.3
四国沖 (D)	53.1	26.6	195.4	1.7
紀伊半島沖 (E)	59.6	29.9	261.6	4.0
房総半島沖 (F)	37.2	19.6	189.6	0.1

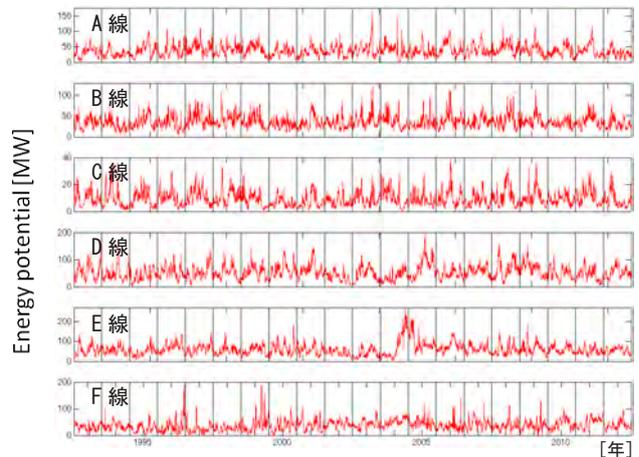


図-2 A～F 線上のエネルギーポテンシャルの時系列

半島沖の E 線，四国沖の D 線は平均値だけでなく変動幅も非常に大きい．このような大きな変動の卓越周期をスペクトル解析で調べると（図-3），トカラ海峡以東の D～F 線では 1 年周期の明瞭なピークは無く，それよりも長い周期帯でエネルギーレベルが高いことが示された．図-2 をみると，紀伊半島沖の E 線では 2004～2005 年の大蛇行期にはポテンシャルが大きく増大している．ポテンシャルは大蛇行期間では非大蛇行期間よりも紀伊半島沖では約 2 倍，房総半島沖では約 1.5 倍に大きくなっている．

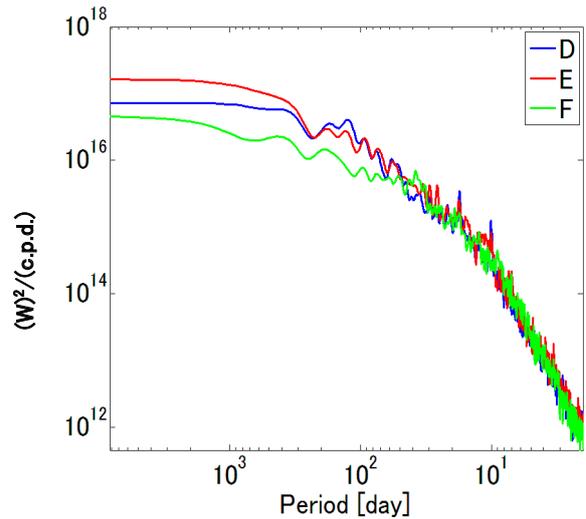


図-3 D～F線のエネルギーポテンシャルのスペクトル

#### 4. St. 1 と St. 2 のポテンシャルの変動特性

発電装置を実際に設置することを考えると，広い範囲のポテンシャルの特徴を把握するだけではなく，実際に設置場所を決めるためには，黒潮の短期的な流路変動も考慮する必要がある．そこで，各線上において，海流発電の適地選定における基準の1つである流速 1m/s 以上の出現頻度が最も高い地点でのポテンシャルの変動特性を調べることにした．例として，台湾西方沖 A 線上の陸から約 30km 沖合の地点 (St.1) と，紀伊半島沖の E 線上の陸から約 50km 沖合の地点 (St.2) の 2 つの地点を挙げる（図-4）．各線上の 1 格子当たりの平均ポテンシャルと 1 地点のポテンシャルの時系列を比較すると（図-4），St.1, St.2 のポテンシャル変動の方が非常に大きく，台湾沖では最小で約-7MW，最大で約 23MW，紀伊半島沖では最小で約-9MW，最大で約 34MW の変動を示している．このような変動は台湾沖の St.1 では黒潮の流速変動，紀伊半島沖の St.2 では，黒潮の流速変動のみならず流路の南北変動の影響も大きく受けていた．

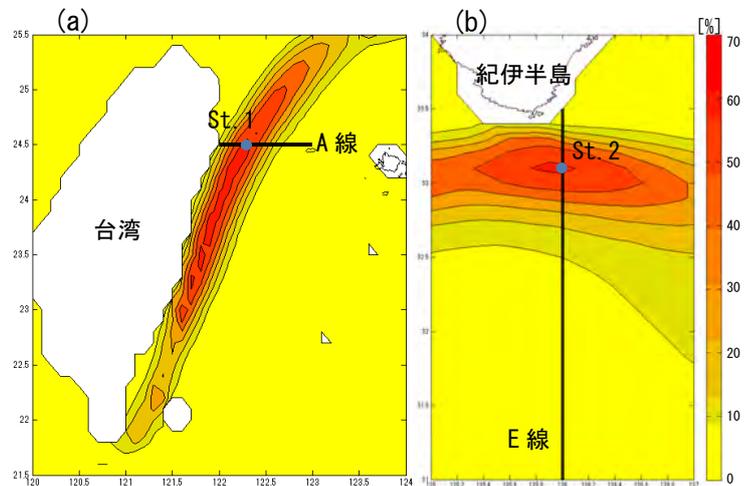


図-4 深さ 50m の (a) 台湾西方沖 A 線と (b) 紀伊半島沖 E 線付近の流速 1m/s 以上の出現頻度

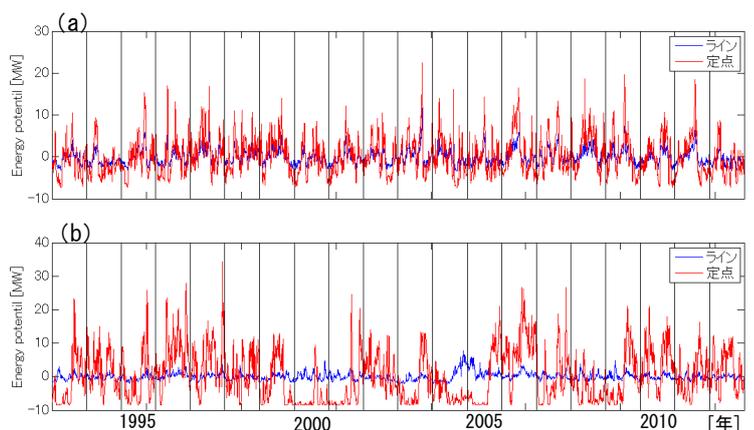


図-5 (a) A 線上の平均ポテンシャル (青線) と St.1 のポテンシャル (赤線) と (b) E 線上の平均ポテンシャル (青線) と St.2 のポテンシャル (赤線) の時系列

謝辞：MOVE/MRI.COM の計算結果は気象庁から貸与されたもので，ここに深く感謝申し上げます．

## 26 特 5-8

### 波浪中浮体の流体力と波動場の高度計測技術に関する研究

広島大学大学院工学研院エネルギー・環境部門  
教授 岩下 英嗣

#### 1. 研究目的

波浪中の浮体や船舶に作用する流体力や動揺の計測技術はある意味完成された技術となっているが、近年の数値流体力学の進展に伴い、その結果を検証するためのより高精度な実験データが必要になって来ているのも事実である。そこで切望されるデータとは、浮体や船舶に作用する流体力や、その外力を受けて生じる動揺など、いわゆる積分量としてのデータではなく、浮体や船舶が造波する波や物体表面の圧力などの局所的な物理量であり、これらを計測・解析する新たな技術の開発が急務となってきている。

こうした背景を受け、本研究では、水槽実験において波や圧力など波動場の計測技術を高度化させることを目的として行う。

#### 2. 研究方法

船体形状の異なる供試模型をいくつか用いて九州大学応用力学研究所の深海機器力学実験水槽において水槽試験を行い、船体に作用する流体力や抵抗、船体運動を計測する。実施する試験は強制動揺試験、波強制力試験、運動計測試験である。同時に船体近傍での非定常波の計測も行う。船体近傍での波形は、地上波高計を用いて縦切り波形を計測する、いわゆる大楠法により得ることができるが、この方法では抵抗増加への寄与の大きな船首近傍の波形を取得することができない。そこで、船体表面上のガースに沿って取り付けられた容量式波高計を用いて、船首側壁に沿った非定常波を計測する方法を提案した。これにより船体側面において波形を直接的に計測することができる。また、船体には複数個の圧力計が設置されており、船体が動揺する際の船体表面圧力を計測することができる。

#### 3. 研究組織

本研究は下記のような組織で行った。

氏名	所属	職名	役割・担当
岩下 英嗣	広島大学大学院工学研究科	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	博士課程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	修士課程2年	実験補助
森 孝彦	大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻	修士課程1年	実験補助
安田 栄史	大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻	修士課程1年	実験補助

## 4. 研究結果

### 4.1 供試模型

実験で使用する供試模型の図とその諸次元を Fig. 1, Fig. 2, Table.1 に示す. 実験には船首形状の異なる 2 種類の Tanker 型の供試模型および Bulk carrier 模型, Container 模型を使用した. Tanker 船型の違いは Fig. 1 に示すように, 片方の船型にはチェーンラインが入っておりフレアーが強くなっている. Tanker 模型には船側波高を計測するために容量式波高計を設置しており, 直接的に船首近傍での波形の計測を行うことができる. 容量式波高計については Fig. 1 の左図に示すように両船型とも左舷側の ordinate. 10.0, 9.875, 9.75, 9.625, 9.375, 9.125 の 6 つの断面に沿って, 船体側面から 5mm のところに設置し, 波高を直接的に計測する. 後者の 2 船型に関しては圧力計が設置できるようになっており Bulk carrier 模型は ordinate. 9.5, 1.5 の 2 点, Container 模型は ordinate. 8.5, 1.5 の 2 点に設置可能となっている. 圧力ゲージは, 喫水面から船底へ垂線を下ろしたときの角度を 0 度とし, 15 度おきに 7 点設置する. 船尾部には 15 度と 90 度を除いた 5 点に設置した. (Fig. 3)

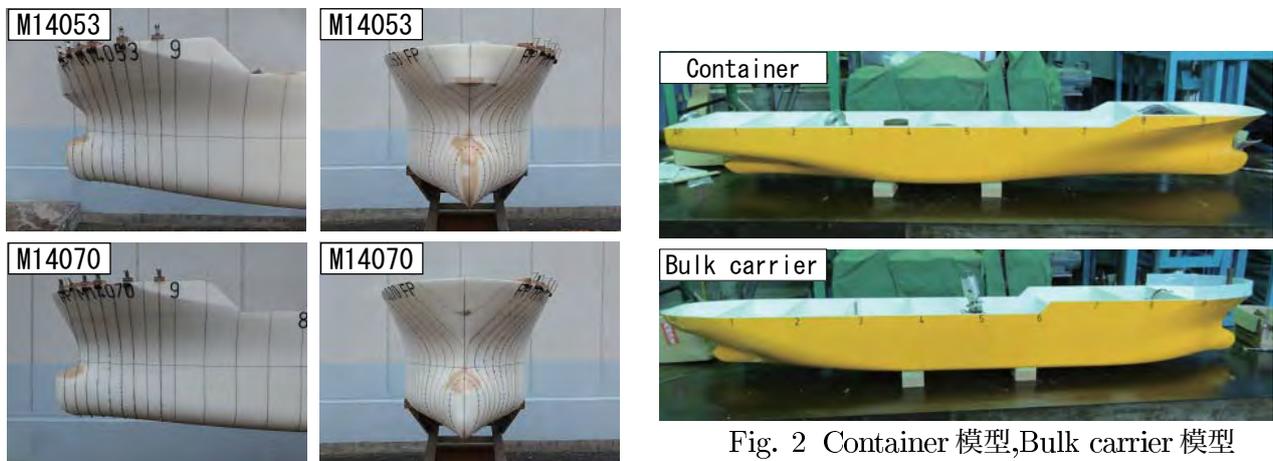


Fig. 1 Tanker 模型

Fig. 2 Container 模型, Bulk carrier 模型

Table.1 諸次元

要目	Tanker(M14053)	Tanker(M14070)		Container	Bulk carrier	
	運動計測試験	強制動揺試験 波強制力試験	運動計測試験	運動計測試験	強制動揺試験 波強制力試験	運動計測試験
$L_{pp}$ (m)	2.3500	2.3500	2.3500	2.5000	2.4000	2.4000
$B$ (m)	0.3744	0.3744	0.3744	0.3846	0.4000	0.4000
$d$ (m)	0.1366	0.1366	0.1366	0.1374	0.0818	0.0818
$\nabla$ (m <sup>3</sup> )	0.0945	0.0945	0.0945	0.0813	0.0619	0.0619
$C_b$	0.7860	0.7860	0.7860	0.6004	0.7888	0.7888
$Aw=S_0$ (m <sup>2</sup> )	0.7660	0.7660	0.7660	0.7666	0.7933	0.7933
$x_F$ (m)	-0.0296	-0.0296	-0.0296	-0.1684	-0.0443	-0.0443
$x_f \cdot Aw=S_1$ (m <sup>3</sup> )	-0.0227	-0.0227	-0.0227	-0.1248	-0.0343	-0.0343
$x_B(=x_G)$ (m)	0.0639	0.0639	0.0639	-0.0525	0.0312	0.0312
$z_B(=KB-d)$ (m)	-0.0605	-0.0605	-0.0605	-0.0623	-0.0605	-0.0605
$KB$ (m)	0.0139	0.0139	0.0139	0.0519	0.0392	0.0392
$BM_T$ (m)	0.1937	0.1001	0.1001	0.0996	0.1958	0.1958
$BM_L$ (m)	3.0506	3.0506	3.0506	3.4675	4.5496	4.5496
$KG$ (m)	0.1390	0.1340	0.1360	0.1323	0.1059	0.1059
$k_{yy}/L$ (m)	0.2492	0.2438	0.2497	0.2492	0.2492	0.2492
$z_G(=KG-d)$ (m)	0.0016	-0.0036	-0.0016	0.0180	0.0241	0.0241

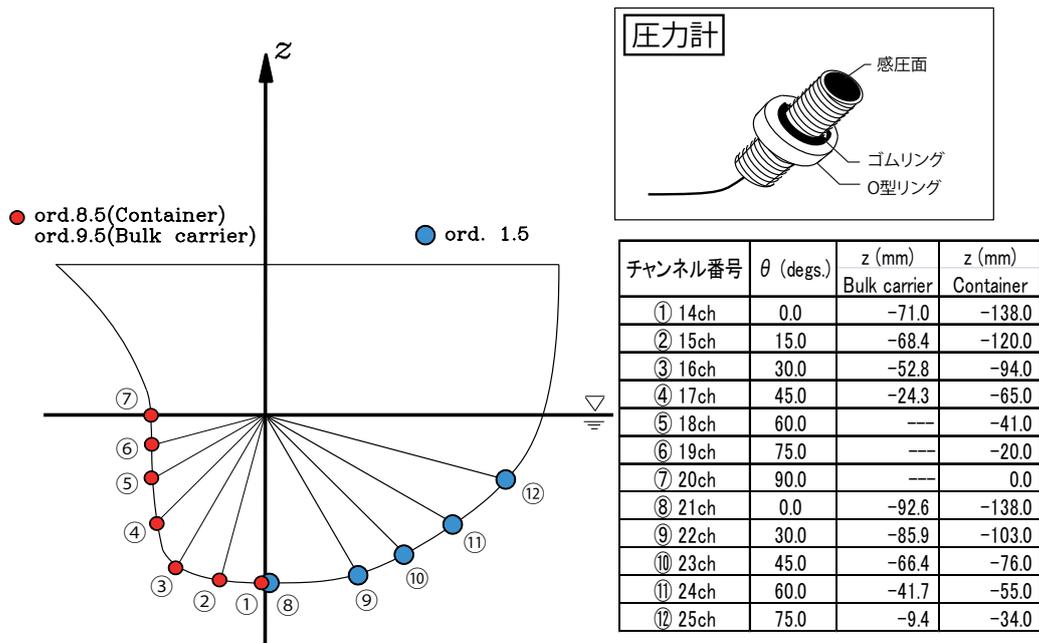


Fig. 3 圧力計の設置方法

## 4.2 試験内容

### 水槽試験

試験項目は、Tanker 模型 (M14053), Container 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, 船首近傍船側波形の計測を行った. 実験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の 2 項目を行った. 解析位置は船体中央から  $x_G$  離れた重心周りである. Tanker 模型 (M14070), Bulk carrier 模型に対しては上記に加え, 強制動揺装置を用いた heave, pitch 方向の強制動揺試験と入射波中を船体を固定して曳航する波強制力試験を行った. なお, Bulk carrier 模型は喫水をバラスト状態に設定して計測を行った. Fig. 4 に運動計測試験の装置設置図, Fig. 5 に運動計測試験時のシステム図, Fig. 6 に強制動揺試験の装置設置図, Fig. 7 に強制動揺試験システム図を示す. 供試模型と地上波高計との距離は船体側面から  $y=100\text{mm}$  の位置である.

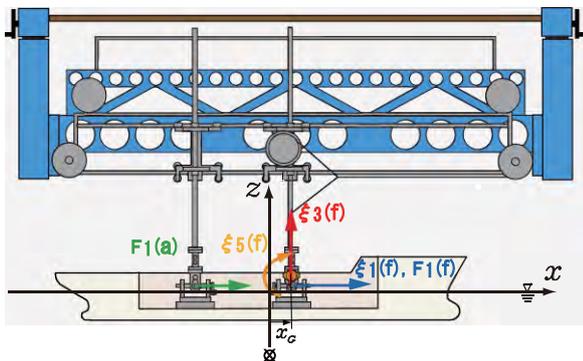


Fig. 4 運動計測装置設置図

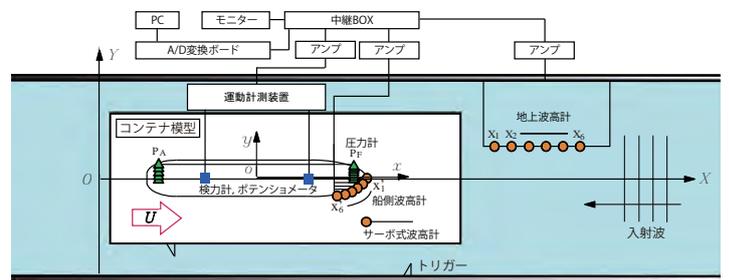


Fig. 5 運動計測試験システム図

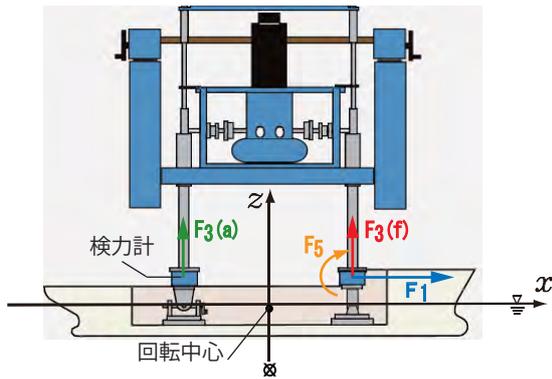


Fig. 6 強制動揺装置設置図

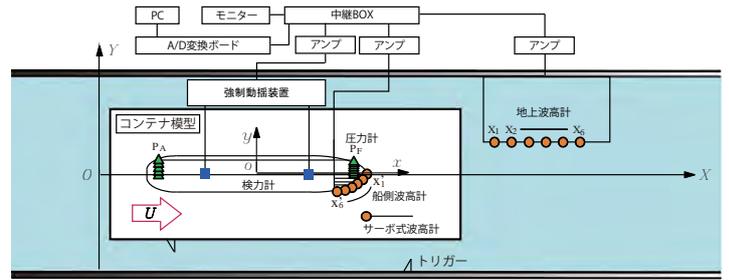


Fig. 7 強制動揺試験システム図

### 4.3 実験条件

船速は Tanker 模型が  $F_n=0.1879$ , Bulk carrier 模型が  $F_n=0.19$  で行った. Container 模型に関しては  $F_n=0.18$  と設計船速の  $F_n=0.25$  よりも船速を遅くして計測を行った. 計測範囲は運動・抵抗増加計測試験に関しては  $\lambda/L=0.3\sim 3.0$  で正面向かい波 ( $\chi=180\text{deg.}$ ) 中の曳航試験を行った. 強制動揺試験では  $\lambda/L$  を  $K_e L$  に換算した値を基準として計測を行い, 強制動揺装置で計測しうる  $\lambda/L=0.5$  に相当する  $K_e L=34.882$  から  $\lambda/L=3.0$  に相当する  $K_e L=3.388$  の範囲で計測を行った. 強制 heave 試験の動揺振幅は  $\bar{\xi}_3=0.01\text{m}$  であり, 強制 pitch 試験では強制動揺装置のシャフトを  $180\text{ deg.}$  入れ替え強制動揺させるため  $\bar{\xi}_5$  はラジアン表記する. 回転中心からシャフトまでの距離が  $0.42\text{m}$  であるため, 動揺振幅は  $\bar{\xi}_5 = \tan^{-1}(0.01/0.42) = 1.364\text{deg.}$  となる.

### 4.4 結果・考察

#### 流体力計測

Fig. 8, Fig. 9 に Bulk carrier 模型で行った強制動揺試験により計測した, 模型に作用する付加質量と減衰力係数を示す. グラフは横軸に波数  $K_e$  に船長をかけた無次元値をとり, 縦軸に各係数をとっている. Fig. 10 には波強制力試験で得られた波強制力の結果を示す. 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, 縦軸に波強制力の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.

#### 船体運動

Fig.11 に Bulk carrier 模型の船体運動の結果を示す. グラフは左から surge, heave, pitch の船体運動を示す. 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. 白丸は運動計測で得られた結果, 黒丸は実験で得られた流体力より運動方程式を解くことで得た船体運動となっているが, 両者はよく一致していることから, 実験の妥当性が確認できる. Fig. 12 に Tanker 模型の船首形状を 2 種類変更し行った運動計測の結果を, Fig. 13 に Container 模型の結果を示す. Tanker 模型の heave 運動の同調点は  $\lambda/L=1.3$  付近に存在し, pitch 運動の同調点は  $\lambda/L=1.6$  付近に存在している. surge 運動には同調点は存在しない. Tanker 船型の運動を比較すると同調点付近においてチェーンラインの入ったフレアーの強い船型の方が運動が小さくなっている.

## 非定常波形解析

Fig. 14, Fig. 15 に運動計測試験において船体が造波した波を地上波高計 (x-cut) と船首近傍の船側波高計 (ship-side) で計測した結果を示す。それぞれ  $\lambda/L = 0.5$ ,  $\lambda/L = 1.2$  の結果である。グラフは縦軸に波高を入射波の波高で除した値をとっている。横軸は船体中央からの距離  $x$  を半船長  $L/2$  で除した値をとっており、1 が船首、-1 が船尾の位置を示す。1 段目はフーリエ解析をした 1 次成分の値、2 段目は 2 次成分の値、3 段目は定常成分の値であり定常波を示している。結果を比較すると抵抗増加に対する寄与の大きい船首近傍の波形がフレアの強い M14053 船型のほうが小さな波形となっている。また、短波長域である  $\lambda/L = 0.5$  の波形と同調点付近である  $\lambda/L = 1.2$  波形を比較すると、同調点付近における船側波形の 2 次成分の振幅が縦切り波形の振幅に比べて大きいのが確認できる。このことから、船首近傍では非線形性が強いということが分かる。

## 船体表面圧力

Fig. 16 に Container 模型で計測した船首船尾近傍圧力の結果を示す。それぞれ  $\lambda/L = 0.6$  と 1.0, 2.0 の結果を示す。グラフは縦軸に圧力の無次元値、横軸に船底を 0 度としたときの圧力計の設置位置をとっている。結果をみると、船尾側の圧力は船首側に比べて入射波波長の変化による変動が小さいことが分かる。

## 5. まとめ

圧力や波形などを含んだ計測システムを構築し、それを検証する目的で船型の異なる 4 種類の模型を使用した水槽実験を行った。一連の研究により、当初目的としていた流体力、運動、抵抗増加、波形、物体表面圧力の計測が行えるようになり、加えてこれまでにない局所物理量を含んだデータ構築ができたことになる。

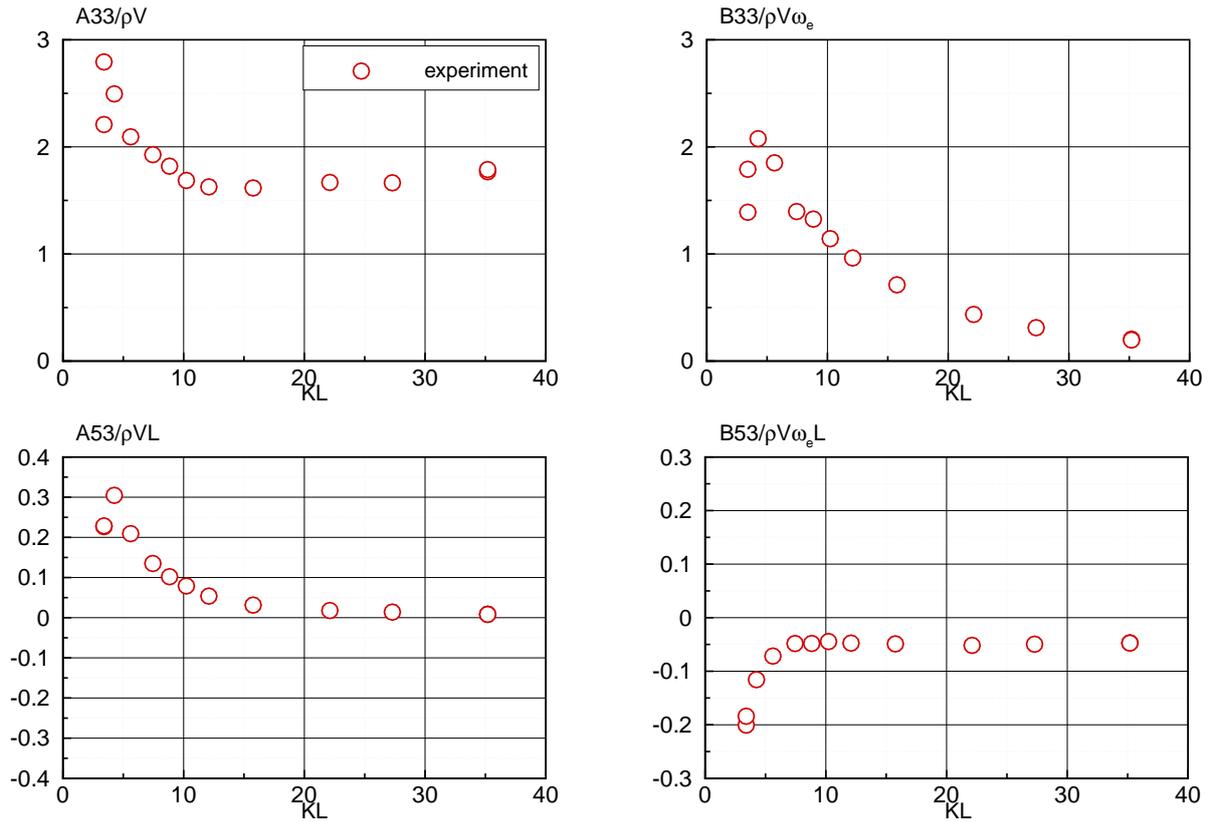


Fig. 8 強制 heave 方向の強制動揺による Bulk carrier 模型の付加質量及び減衰力係数,  $F_n = 0.19$

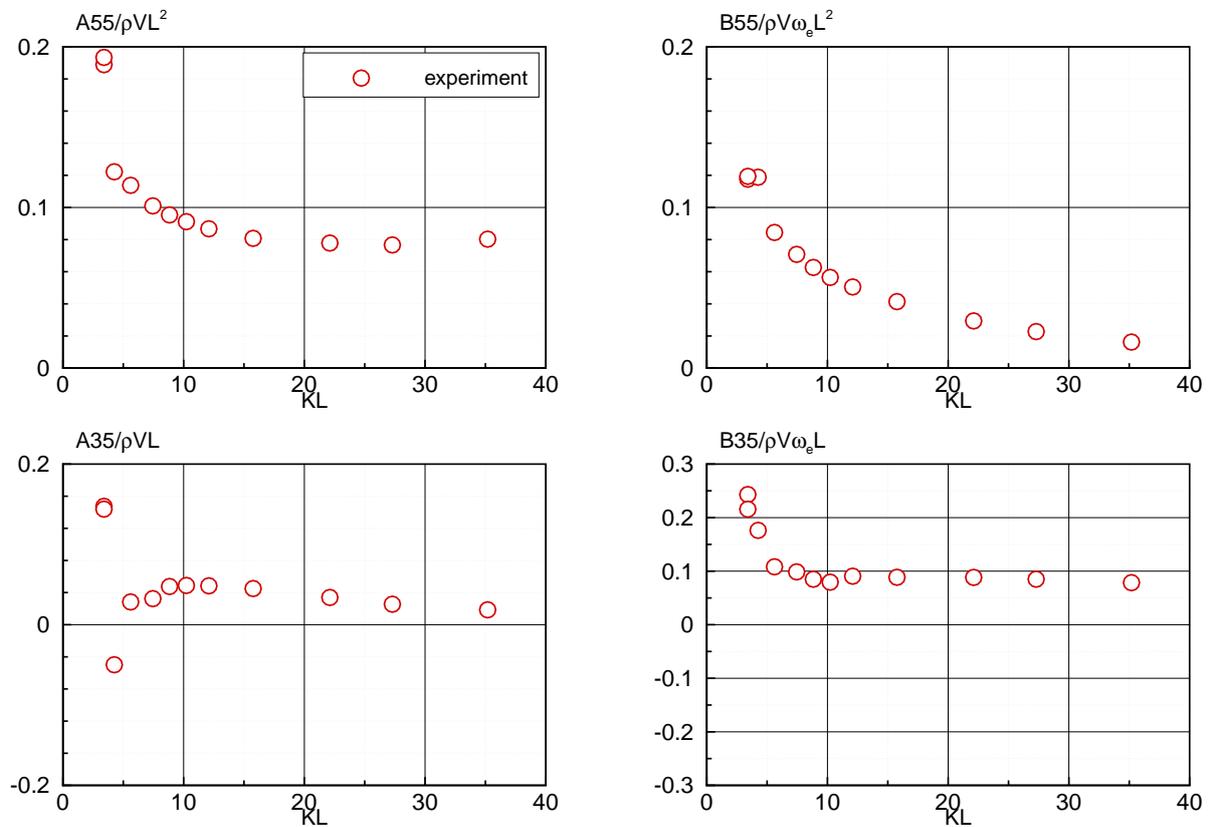


Fig. 9 強制 pitch 方向の強制動揺による Bulk carrier 模型の付加質量及び減衰力係数,  $F_n = 0.19$

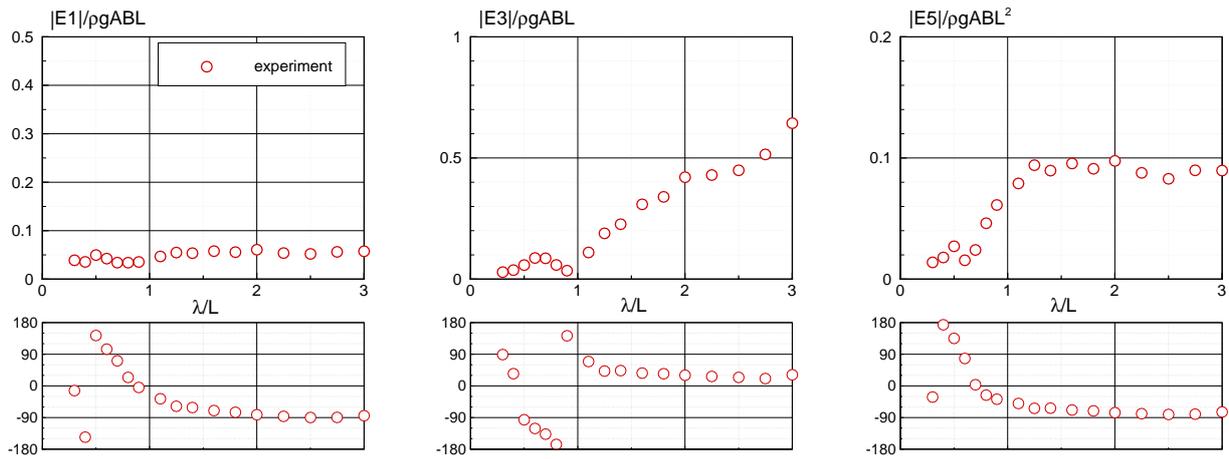


Fig. 10 Bulk carrier 模型の波強制力,  $F_n = 0.19$ ,  $\chi = 180$  degs.

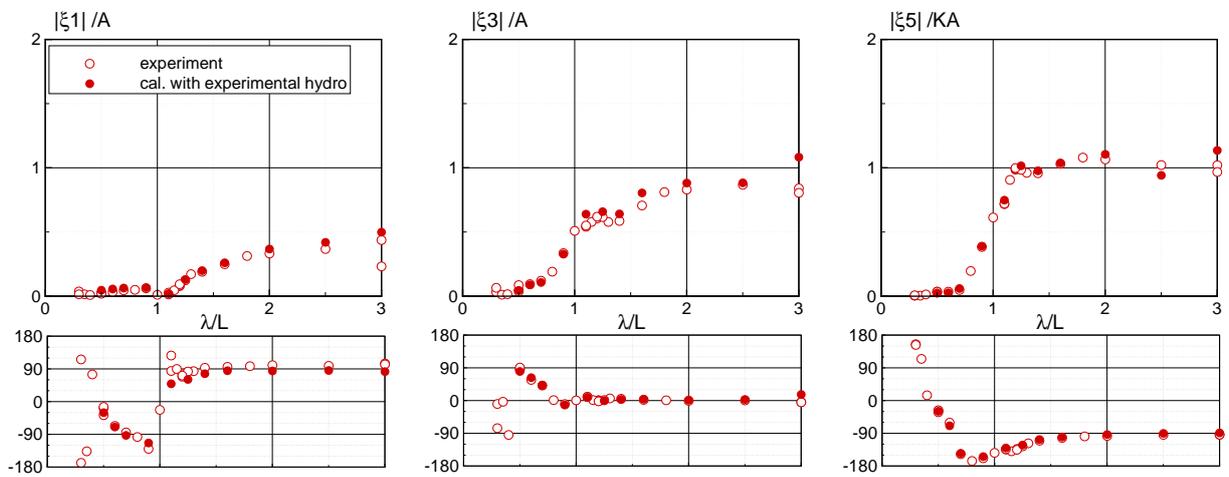


Fig. 11 Bulk carrier 模型の船体運動,  $F_n = 0.19$ ,  $\chi = 180$  degs.

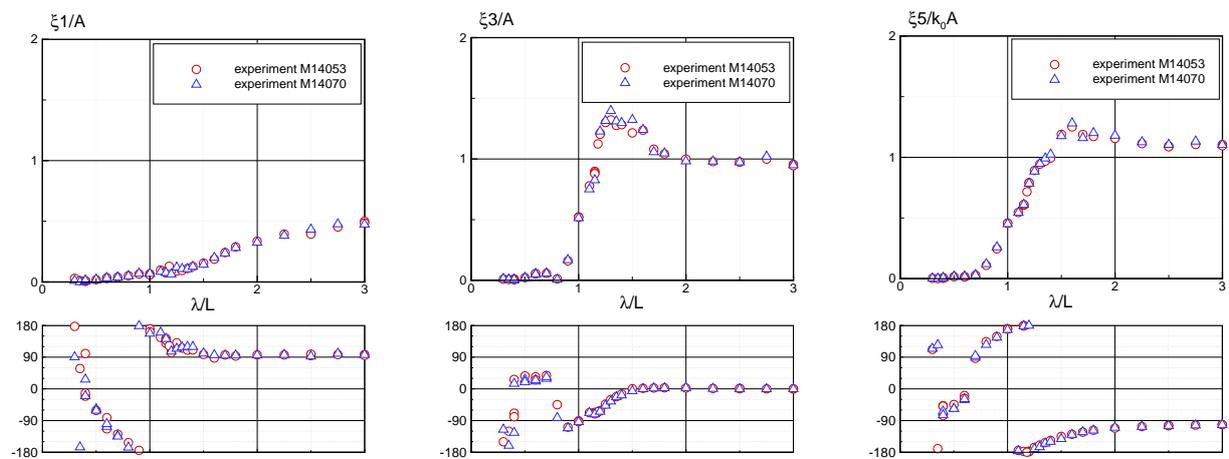


Fig. 12 Tanker 模型の船体運動,  $F_n = 0.1879$ ,  $\chi = 180$  degs.

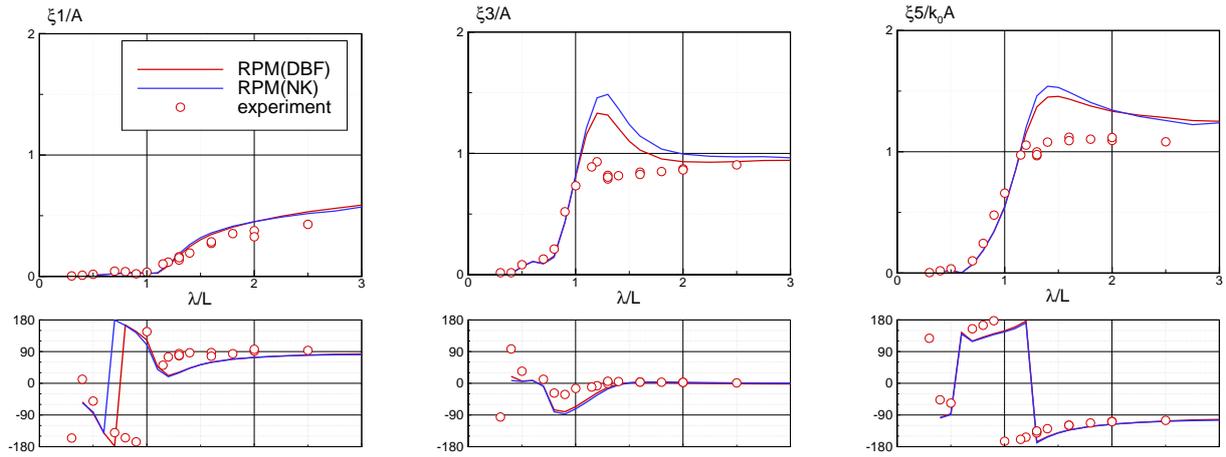


Fig. 13 Container 模型の船体運動,  $F_n = 0.18$ ,  $\chi = 180$  degs.

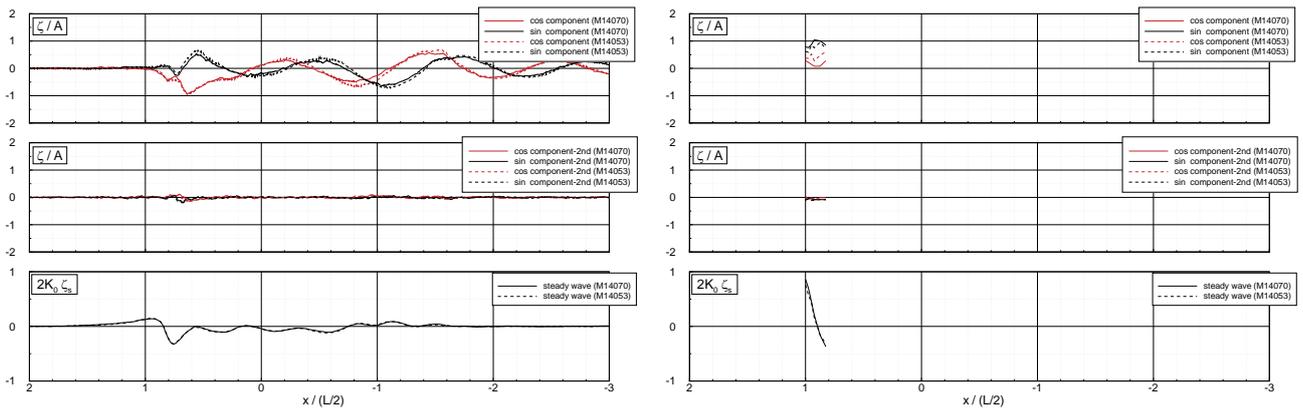


Fig. 14 Tanker の縦切り波形 (左) と船首近傍船側波形 (右) ( $F_n = 0.1879$ ,  $\lambda/L = 0.5$ ,  $\zeta_a = 0.012m$ )

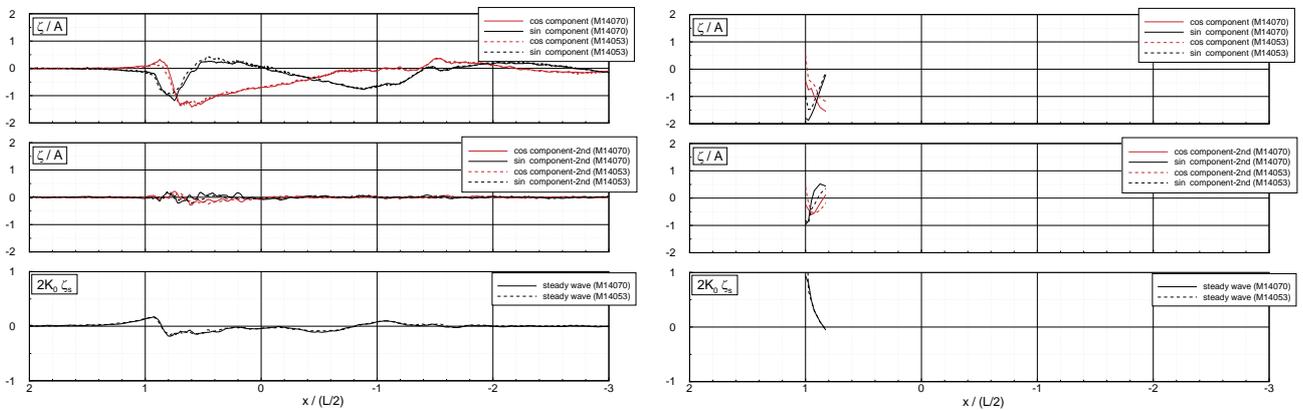
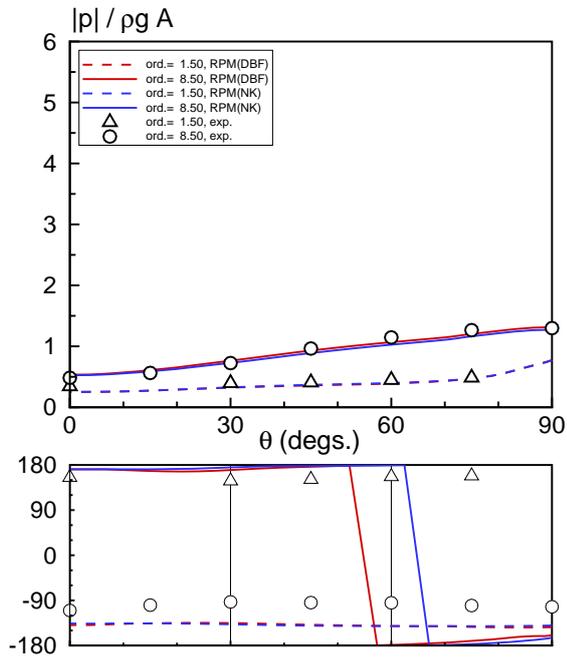
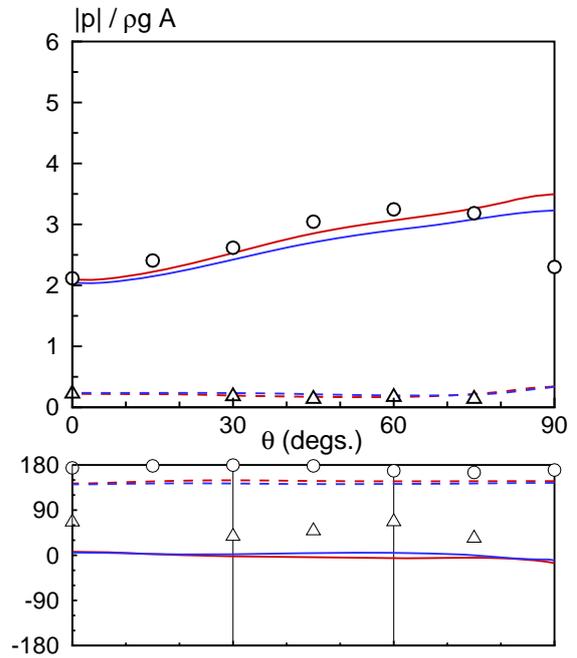


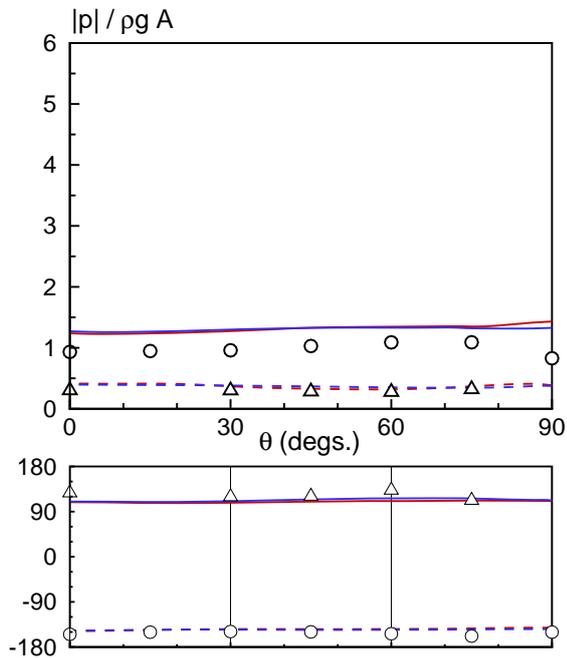
Fig. 15 Tanker の縦切り波形 (左) と船首近傍船側波形 (右) ( $F_n = 0.1879$ ,  $\lambda/L = 1.2$ ,  $\zeta_a = 0.018m$ )



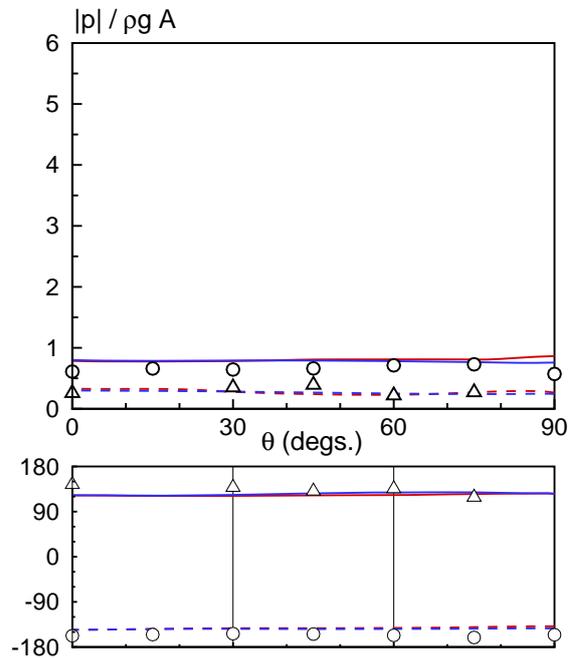
$\lambda/L = 0.6$



$\lambda/L = 1.0$



$\lambda/L = 2.0$



$\lambda/L = 2.5$

Fig. 16 Container 模型の船首船尾圧力,  $F_n = 0.19$ ,  $\chi = 180$  degs.



# 潮流発電用水車ロータの開発研究

九州大学大学院総合理工学研究院 経塚雄策

## 1. はじめに

地球温暖化により様々な環境問題が深刻化しており、この対策として海洋エネルギーへの期待が高まっている。世界第6位の面積の排他的経済水域を有する日本において、海洋エネルギーは高いポテンシャルを秘めており、海洋エネルギーを有効利用することができれば資源問題の観点からも大いに役立つものである。また、昨年7月には政府により実証フィールドが選定され、九州においても佐賀県と長崎県が潮流発電、浮体式洋上風力発電の実証フィールドとして選定された。このことから海洋エネルギーの実用化が現実味を帯び、この動きはさらに加速してゆくものと考えられる。

そこで本研究では、海洋エネルギーの中でも潮流エネルギー、その中でも水平軸発電水車に着目した。潮流は、定常あるいは周期性がありを予測しやすい事からエネルギー源として期待されている。高効率水車のローターブレードを開発することが本研究の目的である。

## 2. ブレード翼形の選択

### 2.1.2 次元翼形解析

本研究では、2次元翼型解析用のフリーソフトXFLR5によって揚抗比を計算し、ブレードセクションの決定を行った。レイノルズ数は $Re=5.0 \times 10^6$ とし、以下の20種類のNACA翼を対象として計算した。

#### 4桁系列

NACA1412, NACA2412, NACA2414, NACA2415, NACA2418, NACA2421, NACA2424, NACA4412, NACA4415, NACA4418, NACA4421, NACA4424

#### 5桁系列

NACA22112, NACA23015, NACA23018, NACA23021, NACA23024, NACA23112, NACA24112, NACA25112

Fig. 1は、迎角に対する4桁系列翼の揚抗比の計算結果の一部を示す。これらの結果から、NACA4415の揚抗比が迎角 $5^\circ$ において160を越えて最大値となったので、Fig. 2の形状のNACA4415を採用することにした。

### 2.2 翼素運動量理論

ブレードが与えられた周速比において最大のパワーを発揮するようにブレードのピッチ角分布 $\beta(r)$ およびコード長分布 $c(r)$ を求める。

翼素運動量理論を用いた設計式を下記に示す。

#### 局所周速比 $\lambda_r$

$$\lambda_r = \lambda_a \frac{r}{R} \quad (1)$$

#### 軸方向誘導係数 $a$

$$16a^3 - 24a^2 + 3(3 - \lambda_r)a + \lambda_r^2 - 1 = 0 \quad 0 < a < 1 \quad (2)$$

#### 接線方向誘導係数 $a'$

$$a' = \frac{1 - 3a}{4a - 1} \quad (3)$$

#### 流入角 $\varphi$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{1 - a}{(1 + a')\lambda_r} \quad (4)$$

#### ピッチ角分布 $\beta(r)$

$$\beta(r) = \varphi - \alpha \quad (5)$$

#### コード長分布 $c(r)$

$$C(r) = \frac{8\pi a \sin^2 \varphi}{N_B C_i(\alpha)(1 - a)} \quad (6)$$

$$C_i(\alpha) = C_L(\alpha) \cos \varphi + C_D(\alpha) \sin \varphi \quad (7)$$

ただし、 $\lambda_a$ :設計周速比、 $r$ :半径方向距離、 $R$ :水車半径、 $\alpha$ :迎角、 $N_B$ :翼枚数、 $C_i(\alpha)$ :揚力係数、 $C_d(\alpha)$ :抗力係数

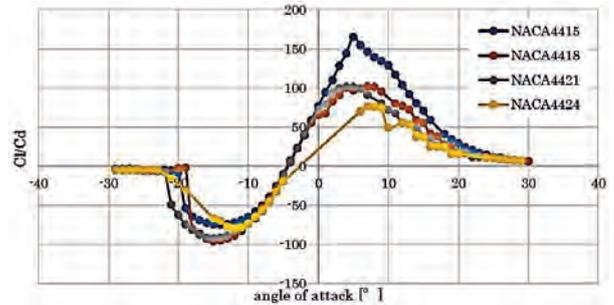


Fig.1 NACA4 桁翼の揚抗比の計算結果(一部)

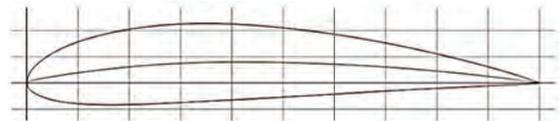


Fig.2 NACA4415 形状

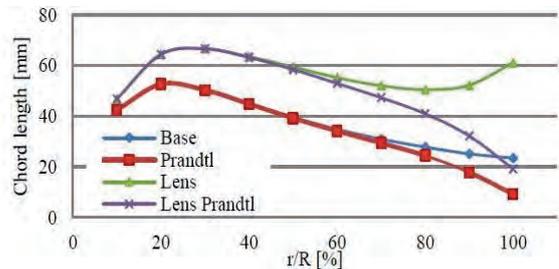


Fig. 3 コード長分布

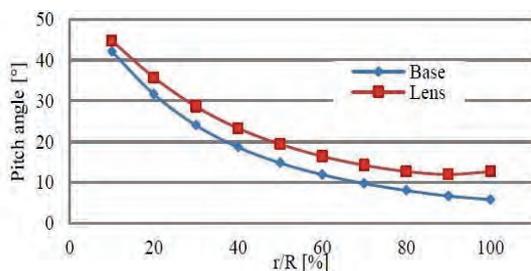


Fig. 4 ピッチ角分布

$\lambda d$ ,  $R$ ,  $N_B$ およびNACA4415の $Cl(\alpha)$ ,  $Cd(\alpha)$ を与え、(1)~(7)を用いて最適ブレードを決定することが可能であるが、翼端部においては3次元影響を受ける。このための修正式がいくつか提案されているが、ここではPrandtlによる修正式を適用した場合としない場合について結果を比較した。ブレード単体の場合、レンズを装着する場合、Prandtlの式の有無による最適設計ブレードのコード長分布とピッチ角分布の結果をFig. 3およびFig. 4に示す。

### 3. 3Dプリンターによるブレード製作

模型用水車の製作には3Dプリンターを用いた。Fig. 5は、3Dプリンターの緒元と写真を示す。ブレード直径は30cmであるので、そのまま1体として製作ができないので3枚のブレードとシャフト部の4分割で製作し、接着剤によって組立てた。

### 4. 実験装置および方法

実験は応用力学研究所の曳航体試験水槽で行った。水車への流入速度 $U=0.8[m/s]$ とし、モーターにより水車の回転数 $n[rpm]$ を操作して各回転数の水車のトルク $T[Nm]$ を測定する。水車は、前述した新型4種と従来から使われてきた翼(Old)の計5種類で実験を行った。

## 5. 実験結果

### 5.1 ブレード単独時の性能比較

Fig.6にブレード単独時のパワー係数 $C_p$ のグラフを示す。新型ブレードの $C_p$ の最高値はBaseが $\lambda=3.5$ で $C_p=0.40$ となった。一方でOldは $\lambda=2.5$ で $C_p=0.33$ となり、今回作成した新型ブレードの方が従来翼より高効率となった。ブレード単独用に設計したブレードについては、いずれも設計周速比 $\lambda=3.5$ にて最高効率となっていることから、最適設計ができていると考えられる。また、レンズ内流速の修正の有無にかかわらず、Prandtlの修正を加えていないものの方が高効率となった。しかし、Prandtlの修正を加えたものの方が周速比の増加に伴う性能低下が少ないといえる。

### 5.2 風レンズ装着時の性能比較

Fig.7に風レンズ装着時のパワー係数 $C_p$ のグラフを示す。新型ブレードの $C_p$ の最高値は、Lensが $\lambda=3.0$ で0.86、Lens Prandtlが $\lambda=4.0$ で0.86、一方でOldは $\lambda=3.3$ で0.84となった。風レンズ用に設計した新型ブレードは、最高効率こそ局所的に勝っているものの、Oldの方が幅広い周速比において安定した性能を見せている。風レンズ装着時の最高効率は、Prandtlの修正の有無にかかわらず、ほぼ同様の値をとっているが、ブレード単独時と同様にPrandtlの修正を加えたものの方が周速比の増加に伴う性能低下が少なく、その効果は風レンズ装着時の方が顕著に現れている。

### 5.3 表面処理の有無による性能比較

以上の実験は、厚さ0.2mmで積層造形されたそのままの表面のブレードで行ってきた。ここでは、ブレードの表面性状が水車効率にどのような影響をもたらすか検証するため、LensとLens Prandtlの2種のブレードについて、表面研磨を施し実験を行った。ここで表面処理を施したものをそれぞれLens polish, Lens Prandtl polishとする。Fig. 8に風レンズ装着時のパワー係数 $C_p$ のグラフを示す。

$C_p$ の最高値はLens polishでは $\lambda=3.5$ のときに $C_p=0.90$ 、Lens Prandtl polishでは $\lambda=4.5$ のとき $C_p=0.93$ となり、かなりの効率向上が確認された。表面処理による効率の向上は周速比が高くなるにつれて大きくなっている。表面処理によって水車効率は大幅に上昇しており、Lens Prandtl polishに関してはOldと比較して、約10%の効率の向上が確認できた。

## 6. まとめ

水車効率は、ブレード単独時ではBaseが $\lambda=3.5$ で $C_p=0.40$ となり、風レンズ装着時では表面処理を施したLens Prandtl polishが $\lambda=4.5$ のとき $C_p=0.93$ となった。ブレード単独時、風レンズ装着時ともにOldよりも効率は向上しており、高効率なブレードを開発することができたといえる。ブレード単独時では、Prandtlの修正をしない方が高効率となったが、風レンズ装着時はPrandtlの修正の有無によるパワー係数の最高値はあまり変化しなかった。しかし、Prandtlの修正を加えたものの方が周速比の増加に伴う性能低下が少なくなっている。表面の研磨によって約10%の効率の大幅な向上が確認できた。

MakerBot 製	Replicator 2X
プリント方式	熱溶融積層造形
ビルド面積	246×152×155mm
レイヤー厚み	0.10~0.34mm
位置精度	XY軸：11 $\mu$ m Z軸：2.5 $\mu$ m
材質	ABS樹脂



Fig. 5 3Dプリンター緒元

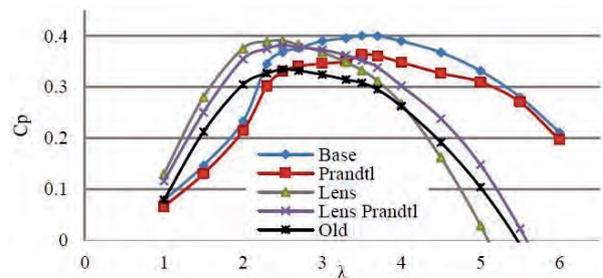


Fig. 6 ブレード単独時のパワー係数

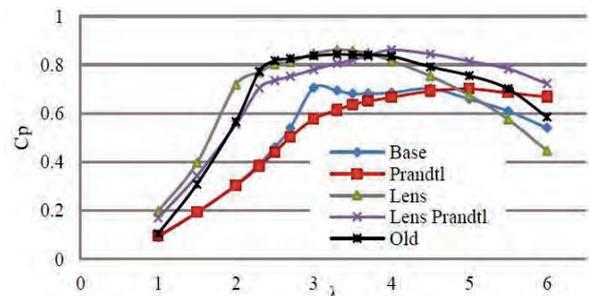


Fig. 7 レンズ装着時のパワー係数

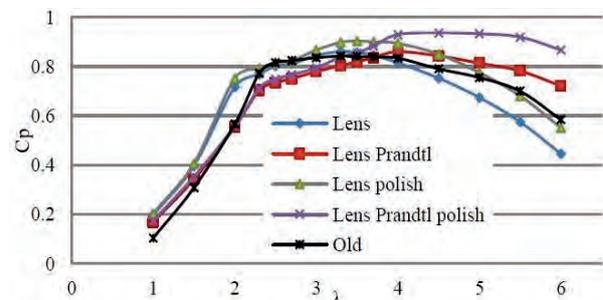


Fig. 8 ブレード表面研磨の影響

研究代表者	経塚雄策
研究協力者	執行健太
所内世話人	胡 長洪

## 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

前年度に引き続き風レンズ風車を軽量化する目的で、九州大学応用力学研究室（新川教授）で開発され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。前報<sup>(1)</sup>においては、機械加工が可能であり、2次元編みの炭素繊維シートを重ねて製作された市販の C/C コンポジットについて主に検討した。その結果、スリット試験片や切欠試験片において、正味応力で評価すると、スリットや切欠寸法に関係なく、統一的な強度評価が可能であった。その検討に引き続き、本年度の研究においては、一方向の炭素繊維シートを用いた場合の炭素繊維複合材料の強度評価を行った。試験片の製作においては九州大学応用力学研究所から指導をいただき、Vacuum assisted Resin Transfer Molding<sup>(2)</sup>によって平板を製作し、それから試験片を切り出した。そして、試験片における繊維の方向を一方向や交互の方向に変化させ、疲労強度と破損・破壊機構を検討した。また、前報にならって正味応力によって疲労強度が統一的に評価できるかどうかについても検討している。なお、塩害による素材の劣化を調べるため、加工した試験片を2ヶ月から6ヶ月間塩水に浸し後に疲労試験を行った。その結果は、塩水に浸さない通常の疲労試験の結果とほぼ同じであったので、現時点（あるいは本研究の段階）では、詳細な検討を行っていない。

## ・材料および実験方法

実験に使用した炭素繊維シートは、有限会社 CAST が製造したカーボン UD であり、炭素繊維が一方向に配置されている。この炭素繊維シートを所定に大きさに切り揃え、12 枚を重ね真空ポンプを使用しエポキシ樹脂をシートの間に入れ込み板状に成形した。この手法は Vacuum assisted Resin Transfer Molding (VaRTM) と称され広く活用されている。これまでの研究によって炭素繊維複合材料は、繊維方向の違いによって強度が変化する異方性を持っていることがわかっている。本研究においては、試験片の繊維方向が全て荷重方向になる場合と荷重方向及びそれに垂直方向の交互に繊維方向を配列した場合について主な検討を行った。他の繊維の組み合わせについても検討したが、それは参考程度にデータを収集する目的で試験片を製作した。また、前報<sup>(1)</sup>の素材である東洋炭素（株）製の機械加工可能な C/C コンポジット CX-31（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）との比較も若干行った。本研究の場合の真空中で繊維素材の間にエポキシをしみ込ませた場合と前報の C/C コンポジットの場合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のかどうかを検討する必要もあると考えている。

図1にエポキシを用いた炭素繊維複合材料の場合の試験片の試験部形状（板厚  $b$  は 2.5～3.1mm）を示す。なお、フェノール樹脂を用いた前報<sup>(1)</sup>の C/C コンポジットの場合は、スリットや穴等を有する試験片について検討を行った。本報告では、一方向繊維素材における破壊過程をスリット試験片のみについて観察結果に基づき検討した。疲労限度については、応力振幅を徐々に増加させていく荷重漸増法（LIT）と一般的な一定応力振幅での疲労試験を行って得られる  $S-N$  曲線に基づく評価によって考察している。そして、前報<sup>(1)</sup>の結果とも比較して、実験結果を整理している。

疲労試験は、引張・圧縮方式で行っている。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。

## ・実験結果および考察

まず、前報<sup>(1)</sup>の C/C コンポジットの結果を簡単に紹介する。目的にも記したが、正味応力で評価した  $\sigma_w'$  の値は切欠きの形状の影響が少なく、ほぼ一定と近似して差し支えないものとみなせる。また、応力分布を解析した結果、き裂の発生挙動は応力集中に関係して切欠きの影響があった。しかしながら、フェノールの部分から発生したき裂の進展は炭素繊維の影響によって、応力集中に大きな影響を受けないことが考察された。以上の結果から、C/C コンポジットでは、切欠底の高い応力の部分でのき裂発生は疲労強度に大きく影響しない。そのようなことが疲労限度の傾向と関係している。また、き裂は板厚方向では斜めに傾斜し、試験片表面では荷重方向にほぼ垂直な方向であった。

エポキシを基材とし VaRTM で製作した試験片では、一方向の繊維の異方性の影響が疲労強度に強く表れた。図2に  $S-N$  曲線の例を示す。繊維方向が一方向（One-direction）に対して、交互の方向（Double-direction）の場合には疲労限度  $\sigma_w$

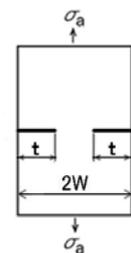


Fig.1 Geometry of specimen ( $t=10\text{mm}-14.5\text{mm}$ ,  $2W=30\text{mm}$ )

が明らかに低下していることが分かる。そして、交互の方向の場合の  $\sigma_w$  は C/C コンポジットの場合に近い値になっていることが分かり、繊維が横方向に配列されることにより著しく強度が低下することが分かった。図2の結果はリガメントが 3mm と比較的狭い試験片の場合のものであるが、リガメント幅が大きい場合においても、同じような疲労限度の傾向が得られることは LIT の結果から確認している。なお、図3に LIT によって簡便に疲労限度を求めた結果を示した。図2と図3の比較から両者の疲労限度の値はほぼ同じであることが分かる。縦方向の繊維と横方向の繊維の割合を変化させても、図2と同じような結果が得られ、また、図3のように LIT で実験すると効率良く疲労限度が検討できる。図2から繊維の方向を荷重方向に揃えることができる場合には試験片の強度を高くできるが、その理由を破壊過程の観察によって考察した。

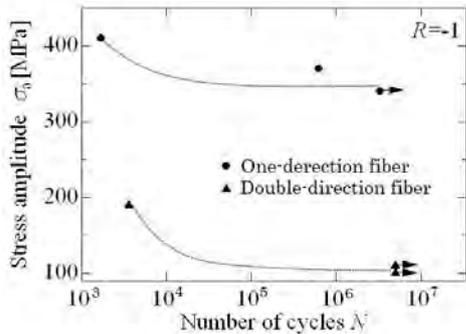


Fig. 2 S-N curves in the case of Epoxy based composite

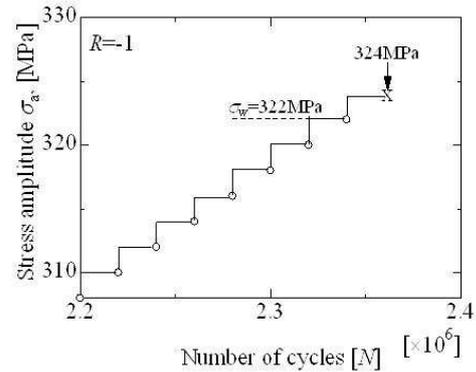


Fig. 3 Fatigue limit determined by Load Increase Test (LIT)

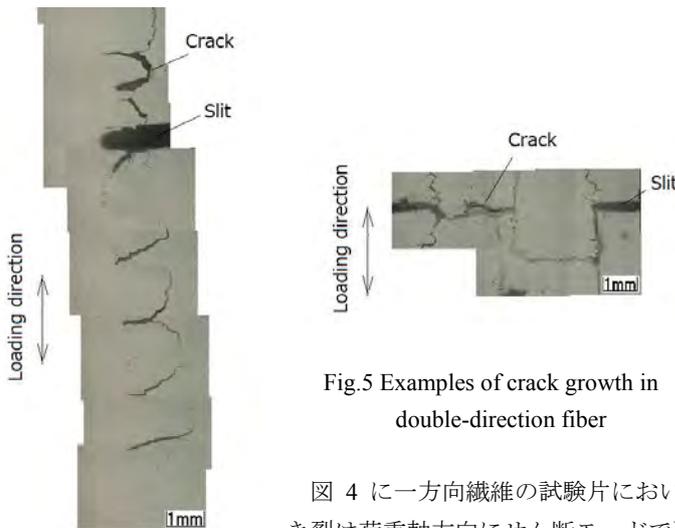


Fig.5 Examples of crack growth in double-direction fiber

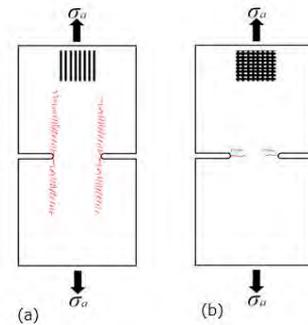


Fig.6 Comparison of crack growth: (a) Fig.4, (b) Fig.5

Fig. 4 Example of crack growth in one-direction fiber

図4に一方方向繊維の試験片においてスリット先端から進展したき裂の観察例を示す。き裂は荷重軸方向にせん断モードで進展している。それに対して、図5に示す交互に繊維方向を配列した試験片では、表面での観察結果によるとき裂は荷重方向に垂直方向にも進展している。そのようなき裂の進展挙動が疲労限度や疲労寿命に関係しており、交互に繊維を配列すると荷重軸方向の繊維の体積率から予想される値よりも低くなる。図6は両者を強調して描いて、比較した模式図である。図5においては、せん断によって横方向に発生したき裂が縦方向の繊維を切る様子が観察される。今後、複合材料同士あるいは金属と複合材料の接合について検討する予定である。接合等を行う場合や切欠きを加工する場合は接合面のはく離や図5のような問題等を解決する必要があると考えている。

・文献

- (1) 真壁, 藤川, Md. S. Ferdous, S. A. Setyabudi, 機械加工が可能な C/C コンポジット切欠試験片の疲労強度について, 圧力技術, Vol.51 (2013), pp.303-311.
- (2) 松野下, 宇田, 小野, 永安, 平川, 永尾, VaRTM 成形 CFRP 積層板の品質向上と CAI 特性に関する研究, 第 52 回 構造強度に関する講演会講演集 (JSASS-2010-3054) 4 ページ

## 洋上レンズ風車を用いた海水の電気分解による水素製造技術

研究実施：鹿児島高専 小田原 悟，所内世話人：鳥谷 隆

**1. 緒言** 水素社会の到来に向けて再生可能エネルギーとして水素の有効性を検証するための実験的研究が重要とされている。風力エネルギーによって得られた水電解水素で燃料電池を稼働して発電する。平成 24 年度補正予算で鹿児島高専に導入された再生可能エネルギー発電装置としてレンズ風車(RIAMWIND 社製)および燃料電池システム(FC R&D 社製)がある。これを利用して都市型の水素社会コミュニティを校内に構築できる。図 1 に示すように電極を近接させたときの水の電気分解では水素と酸素が混合されて酸水素ガスが得られる。酸水素ガスはこれまで爆鳴気として危険扱いされてきたが、膜を使ってうまく水素と酸素に分離できれば高効率で安全なエネルギーとして利用できる可能性がある。

通常の水電解システムは単位発生水素あたりの電力量が  $4\sim 5\text{kWh}/\text{H}_2\text{Nm}^3$  であるので、本研究が目指す酸水素ガス発生技術でこの値をいかに低く抑えるかがカギとなる。

そこで、本研究は酸水素ガスをより高い効率で発生させるための基礎データを得ることを目標とする。図 1 に示すような狭い電極間で電気分解されると、電極間で水素 H と酸素 O が混合されて新たな組成の HHO ガスが生成される。電極間隔を狭くすれば、電流を抑えられて触媒の量を減らすことができる。また、この混合ガスの成分は水クラスターであるといわれている。純水な水素よりも酸水素ガスの方が燃料電池の起電力が条件によっては 10%程度増加することが報告されている<sup>(1)</sup>。

酸水素ガスの発生効率向上に効果的な要素は、電極間隔をある程度小さくすること、電解触媒を少量入れることの 2 点に加えてマイクロバブル状の酸水素ガス-水の 2 相流からガスのみを分離する技術や電極表面に流れを作って電解反応や水分子の分解を促進することなどの工夫が必要となる。

風力による水電解水素の研究については強風が常に吹きすさぶ南米パタゴニアから運搬する技術の構想設計(NEDO)などを中心にして実施されてきた<sup>(2)</sup>。しかし、遠方からの運搬コストが課題となり液化水素が有効なエネルギーとは言い難い。ところが、日本国内の近海において中小分散型の洋上風力の技術が開発されてきており、陸地への運搬も低コストで実現できる。さらに、通常の純粋な水素( $-253^\circ\text{C}$ )よりも格段に液化温度が高いオオマサガス( $-179^\circ\text{C}$ )の発明<sup>(1)</sup>により高密度の風力エネルギーの運搬に成功する可能性がある。本研究により水電解の効率を格段に向上させることが可能となれば、原発に頼らない完全な再生可能エネルギーによる水素社会を実現できる。

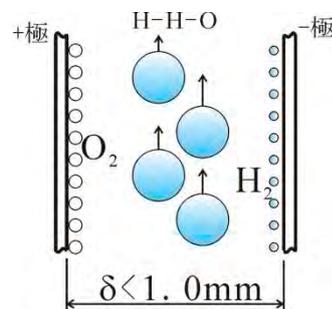


図 1 電極間の HHO ガスの発生

**2. 実験および考察** 酸水素ガスの発生効率の実験として種々の条件で実施した。図 2 に示すように(a)ステンレス板を 2 枚近接させたもの、(b)11 枚にした市販の HHO ガス発生電極(OGO 製)、(c)10 枚の板を 2 ほんの軸に固定して振動モータに接続した構造(オオマサガス)などの電極を用いて実験した。図 2 のようにプラス極、マイナス極を接続した。図 2(b)の n とは neutral plate で電極は繋がらない。

ガス発生効率  $q[\text{ml}/\text{min}/\text{W}]$  はガス発生量  $Q[\text{ml}/\text{min}]$  を消費電力  $P[\text{W}]$  で割った値である。 $Q$  は市販の流量計(コフロック製)で測定した。通常、電気分解において効率は水素ガスが標準状態で  $1\text{m}^3$  発生させるのに要する電力量 kWh として表されるが、本研究においては現用の流量計が L/min の目盛で、安定化電源が電圧  $V[\text{V}]$ 、電流  $I[\text{A}]$  で表示されるので単位として  $\text{ml}/\text{min}/\text{W}$  を使用する。なお、世界的にもガス発生効率としてこの単位が使用され始めており、短縮して“mmW”と表記される。

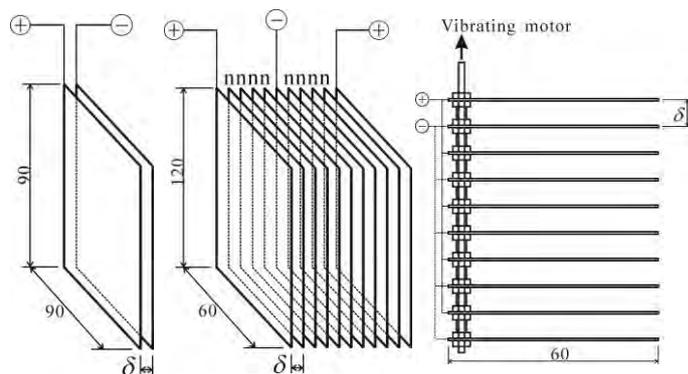


図 2 種々の電極構造

ファラデーの法則に基づくガス発生効率  $q_F[\text{ml}/\text{min}/\text{W}]$  の計算は次の式①を用いた。

$$q_F = \frac{V_{ol}}{tP} = 6 \times 10^7 \left( \frac{RTI}{z_H \rho F} + \frac{RTI}{z_O \rho F} \right) / IV \quad \dots \text{①}$$

ここで、ガス体積  $V_{ol}$  [ml], 時間  $t$  [min.], ファラデー定数  $F=96485\text{As/mol}$ , ガス定数  $R=8.31\text{ J/Kmol}$ , 標準大気圧  $p=1.013\times 10^5\text{Pa}$ , 室温  $T=293.15\text{K}$ , イオン価  $z_H=2, z_O=4$  とした。

図3において電極間隔  $\delta$  が小さいほど  $q$  が大きくなる傾向がある。特に11枚電極の場合、 $\delta=0.8\text{mm}$  のとき  $q$  が  $10\text{mmW}$  を越えている。また、ファラデーの法則から導かれる  $q_F$  に対してどの実験も上回っている。これは H と O が近接した電極の配置によって特別な結合の HHO ガス<sup>(3)</sup> として発生することで高い  $q$  となったと考える。今後、ガスの成分分析を詳細に行い、分子構造が  $\text{H}_2, \text{O}_2$  のみでないことを確認する。

ただし、オオマサガスの場合  $q$  は  $\delta=10\text{mm}$  程度なので  $q=0.6\text{mmW}$  とかなり小さい。この値はファラデーの  $q_F=8\text{mmW}$  よりも小さい。 $q$  が  $q_F$  よりも大きくなるのは  $\delta$  が  $1\text{mm}$  以下の間隔が極端に狭いときである。

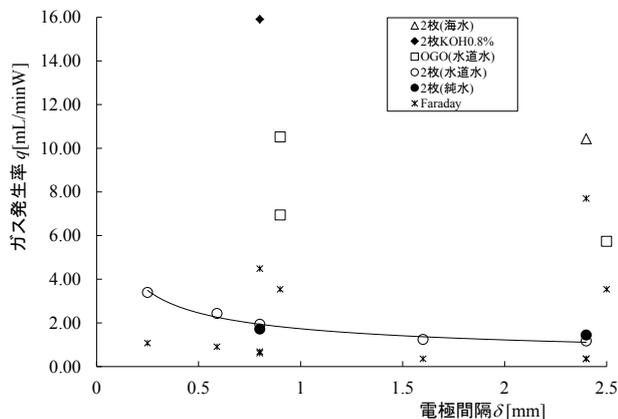


図3 電極間隔とガス発生効率

次に、電解液の成分と  $q$  との関係に着目する。図3で2枚電極の水道水と純水について  $q$  の値にさほど差はない。海水を模した3%食塩水の場合、 $q=10\text{mmW}$  を超えた。このガスには  $\text{H}_2$  や  $\text{O}_2$  のみでなく食塩  $\text{NaCl}$  が分解された塩素ガス  $\text{Cl}_2$  も含まれている。一方、図4に示すように電解触媒によって  $q$  値が変化することが分かった。図4は横軸

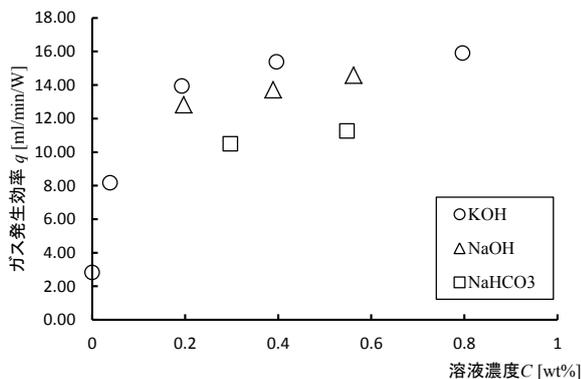


図4 種々の溶液濃度  $C$  とガス発生効率  $q$  の関係

が溶液の wt% 濃度で縦軸が2枚電極のガス発生効率  $q$  である。KOH, NaOH,  $\text{NaHCO}_3$  (重曹) の順で  $q$  の値が小さくなっている。KOH の場合、濃度  $C=0.4\text{wt}\%$  でも  $q\cong 16\text{mmW}$  で十分大きい。 $C>1.0\%$  の条件では実験はしていないが電流が大きくなる分  $q$  は下がると予想される。すなわち、電解液としては KOH 溶液が最も適している。これまで KOH 濃度を  $10\sim 20\%$  とすると多くのガスが発生するとされてきた<sup>(1)</sup>が、単位電力あたりで考えると KOH 濃度は  $1\%$  以下の少量でも効率は十分高いことが分かった。

因みに、オオマサガス発生装置は  $10\text{mm}$  以上の間隔の電極列の振動によって電極板表面に特殊な流れ場を利用して製造する酸水素ガスである。ゆえに、電極間隔  $\delta$  を小さくすると流れが促進されない<sup>(1)</sup>。発生したガスはマイクロバブル状で泡の粒径は目視では  $0.1\text{mm}$  以下である。

なお、海上での水電解には図3のように  $\text{H}_2, \text{O}_2$  のみでなく  $\text{Cl}_2$  も発生する。ガスを単独で捕集するためには特殊膜の構造を利用したガス成分分離技術<sup>(4)</sup>にも注目する必要がある。

今後の課題としては酸水素ガスの発生効率向上のために高電圧パルスを利用する。パルスの形状は矩形波とし、周波数  $2\text{kHz}\sim 5\text{kHz}$  の範囲で可変できる回路を新たに開発する。そして、LC 共振を利用した電流抑制の高電圧パルスで得られた酸水素ガスと直流の場合とを比較検証する。

**3. 結論** 洋上レンズ風車を用いた海水の電気分解による高効率な水素製造を実現するための予備的な実験として狭い間隔の電極の水電解により水素酸素混合の酸水素ガス発生実験を試みた。

- 1) 電極が狭いほど高いガス発生効率  $q$  が得られた。特に、 $\delta=1.0\text{mm}$  以下のとき、 $q$  がファラデーの  $q_F$  よりも大きい値になった。
- 2) 水電解の触媒として KOH が最も適しているが、その濃度については本実験の条件では  $C=0.4\text{wt}\%$  でも  $q\cong 16\text{mmW}$  で十分発生効率  $q$  は高い値となった。

※ なお、当初計画していた「レンズ風車の負荷制御の最適化と集風構造体の振動特性との関係」については九州大学応用力学研究所風工学研究室で十分なデータが得られたので、標記のテーマに変更することとなった。

#### 参考文献

- (1) 新しいエネルギー「オオマサガス」公式サイト, <http://www.ohmasa-gas.org/index.html>
- (2) 太田 健一郎 ほか5名: "平成17年度調査報告書 05003143-0 「南米の再生化エネルギーを利用した水素の生産に関する調査 第II部 アルゼンチンの風力/水素エネルギー生産の可能性調査」", NEDO, (2006).
- (3) Moray B. King: Water Electrolyzers and the Zero-Point Energy, Space, Propulsion & Energy Sciences International Forum-2011, Physics Procedia 20 pp. 435-445.
- (4) 水素分離膜装置「UBE 水素分離膜」, [http://www.ube-ind.co.jp/japanese/products/fine/fine\\_05\\_01.htm](http://www.ube-ind.co.jp/japanese/products/fine/fine_05_01.htm), 宇部興産.

## 風レンズ風車用の炭素繊維強化複合材（CFRP）の衝撃特性評価

岡山理科大学 工学部 横山 隆

## 1. 緒言

九州大学では、効率に優れた「風レンズ風車」を「6角形浮体」に搭載した「洋上エネルギーファーム」の実証試験が2011年11月から開始した。第1期計画では博多湾に直径18mの浮体、第2期計画では福岡県津屋崎沖に直径60mの浮体と2機の風レンズ風車を搭載した実験が計画されている。今後、エネルギーファームの効率を更に高めるためには、軽量でかつ高強度、高剛性である大型風車を開発する必要がある。このような観点から、風車の大型構造部材に炭素繊維強化複合材（CFRP）の使用が計画されている。九州大学応用力学研究所のエネルギー変換工学分野では、真空樹脂含浸製造法（Vacuum assisted Resin Transfer Molding : VaRTM）によるCFRPの開発研究が新しいテーマとして開始されている。この手法を用いると、風車や集風体など複雑な大型部材を作製することが比較的容易になる。風レンズ風車が大波高波浪による衝撃を受けた時の安全性を評価するために、CFRPの衝撃特性データが不可欠である。

本研究の目的は、VaRTM法により成形した直交対称積層カーボン/エポキシ複合材の板厚方向の衝撃圧縮応力-ひずみ特性を評価することである。まず、標準的な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（ $\dot{\epsilon} \approx 10^3/s$ ）での破壊までの圧縮応力-ひずみ関係を測定した。この圧縮応力-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ーを決定した。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力-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。

## 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3.5mmの直交対称積層（[0/90/0/90/0/90]<sub>s</sub>）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、マトリックス樹脂の種類及び繊維体積含有率を、表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<sup>1)</sup>規格では細長比 $h/d = 1.5 \sim 2.0$ が推奨されている。本積層複合材の板厚（ $\approx 3.5$  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 $h/d \approx 1.3$ 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、標準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（ $0.5 \leq h/d \leq 1.0$ ）<sup>2)</sup>に入るように、直径の寸法（ $d = 8$  mm）を決定した。

表1 本試験で使用した複合材の強化繊維材、マトリックス樹脂の種類及び繊維体積含有率

Cross-ply carbon/epoxy laminated composite	
Fiber	HTS40 F13 12K (Toho Tenax)
Matrix	Epoxy XNR/H 6815
Fiber volume ratio $V_f$	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。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、固体潤滑剤である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 衝撃試験では、圧縮型ホプキンソン棒装置を使用した。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。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。静的試験と同様、試験片の両端面には工業用ワセリンを塗布している。試験手順及び測定理論の詳細については、研究成果報告の文献を参照されたい。

### 4. 試験結果および考察

静的および衝撃圧縮応力-ひずみ関係の比較を、図 1 に示す。実線が衝撃試験、一点鎖線が中間ひずみ速度試験、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（最大圧縮応力値）は顕著に増加していることがわかる。極限圧縮強度  $\sigma_C$  を圧壊時のひずみ速度（ $\dot{\epsilon}_f = \epsilon_C / t_f$  ;  $t_f$  は圧壊開始時刻）に対してプロットした結果を、図 2 に示す（極限圧縮ひずみ  $\epsilon_C$ , 極限圧縮ひずみまでの吸収エネルギー  $U_C$  については、紙面の都合上、省略する）。極限圧縮強度は、圧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。

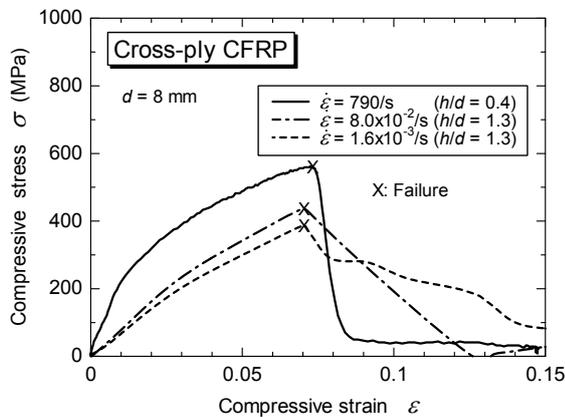


図 1 直交積層複合材の板厚方向における静的・衝撃圧縮応力-ひずみ関係

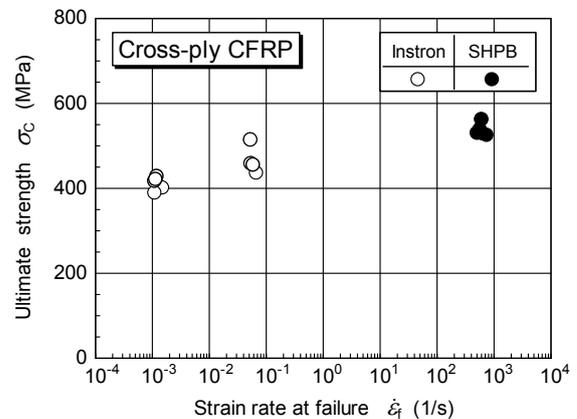


図 2 直交積層複合材の板厚方向における極限圧縮強度とひずみ速度の関係

極限圧縮強度のひずみ速度依存性を考察するために、試験片の巨視的破壊モードの観察をおこなった。図 3 に低・中間ひずみ速度、衝撃圧縮試験後の試験片の写真を示す。低・中間ひずみ速度下での破壊モードをみると、ある部分から亀裂が発生し約 45° 方向に伝ばしており、マトリックス樹脂部でのせん断破壊が支配的である。衝撃圧縮試験では試験片が破壊開始後も入力棒の左端（自由端）で反射する圧縮負荷パルスを繰り返し受けて、試験片が粉碎されるので、破壊モードを明確に把握することができない（図 3 の右端から 2 番目）。そこで本研究では、図 3（挿入図）に示すような簡単な円筒状スリーブ（材質：SUS304）を試験片の大部分を覆うように出力棒の先端部に取り付けることで、試験片が初期の衝

撃圧縮負荷パルスで圧壊した後にそれ以上負荷が作用しない（さらに繰り返し圧縮負荷パルスも作用しない）ように工夫した。この手法を適用すると、初期の圧縮負荷パルスのみで圧壊した試験片（図3の右端）が回収できて、破壊モードを正確に調べることができる。通常の衝撃圧縮試験で粉碎された試験片と比較すれば、破壊モードへ及ぼすその効果が理解される。図3より、ひずみ速度により、破壊モードは大きく変化していることがわかる。

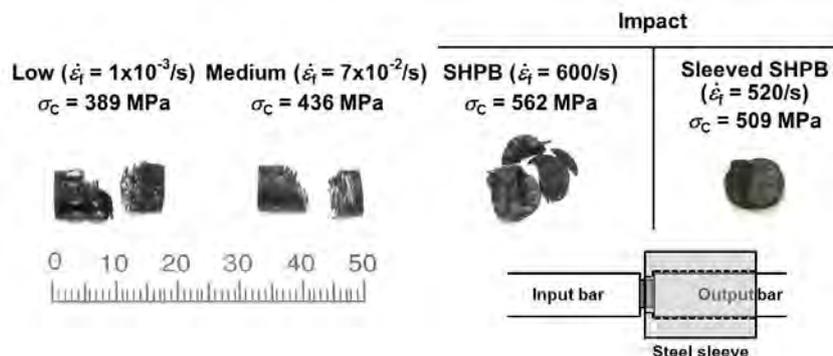


図3 静的・衝撃圧縮試験後の試験片の写真

## 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（ $\dot{\epsilon} \approx 10^{-3} \sim 10^3/s$ ）での圧縮応力－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。その結果、次のような結論を得た。

- (1) 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ーは増加するが、極限圧縮ひずみはわずかに減少する。
- (2) ひずみ速度により、破壊モードは大きく変化する。

## 参考文献

- 1) ASTM E9-89a: Annual Book of ASTM Standards, Vol.03.01, American Society for Testing and Materials, Philadelphia (1995), 98–105.
- 2) G. T. Gray III: ASM Handbook, Vol.8, Mechanical Testing and Evaluation, ASM International, Materials Park, OH (2000), 462–476.

## 研究成果報告

- 1) 中井賢治, 横山 隆, 陳 丁丁, 新川和夫: 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力－ひずみ特性, 日本非破壊検査協会主催 第46回応力・ひずみ測定と強度評価シンポジウム講演論文集 (2015), pp. 23–28.
- 2) 中井賢治, 横山 隆, 陳 丁丁, 新川和夫: 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挙動, 日本実験力学会主催 2014年度年次講演会講演論文集, No. 14 (2014), pp. 297–301.

## 研究組織

- ・ 研究代表者 横山 隆 (岡山理科大学 工学部 機械システム工学科)
- ・ 研究協力者 中井 賢治 (岡山理科大学 工学部 機械システム工学科)
- ・ 研究協力者 陳 丁丁 (九州大学大学院 総合理工学府 物質理工学専攻)
- ・ 所内世話人 新川 和夫 (九州大学 応用力学研究所 新エネルギー力学部門)



## カルコパイライト型化合物半導体太陽電池基板の作製と電気物性評価

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

エネルギー問題を解決するキーテクノロジーの代表格である太陽電池は、低コスト、高効率達成が急務とされている。その中でも、新規材料である  $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}, \text{Se})_4$  (=CZTS, CZTSe, CZTSSe) は、In や Ga 等のレアメタルを含まず、且つ構成元素が地球上に豊富にあるため低コストである。CZTS 系太陽電池は、5 年間程度の間で着実に研究報告が増え、CZTS:8.4%<sup>1)</sup>、CZTSe:9.2%<sup>2)</sup>、混晶である CZTSSe:12.6%<sup>3)</sup> という変換効率が達成されており、年 1% 以上の伸び率を達成している。早急に高効率を達成するために、デバイス応用に向けた薄膜多結晶作製およびそれを用いた物性評価という応用研究が現在世界中で主流となっている。一方で、基礎研究である単結晶成長及び単結晶を用いた基礎物性評価はほとんど報告されていない。基礎物性値を求める場合、多結晶ではなく良質な単結晶を用いて評価することが基本である。我々は、これまでに基礎研究である CZTSSe 単結晶技術を確立し、単結晶を用いて電気伝導メカニズムおよび中心とした報告を行ってきた<sup>4, 5)</sup>。更なる高効率化にむけて伝導プロセスを理解し、制御するためにはキャリアの固有散乱過程を理解することが必要である。特に CZTS 化合物は固有点欠陥密度が高いため不純物散乱の影響は大きいと考えられる。今回、移動度温度変化から不純物散乱を含めた複数の散乱過程を用いて CZTS 化合物の散乱メカニズムを説明する。

## 2. 実験方法

CZTS-Sn 擬二元系状態図は、示差熱法 (DTA) と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。CZTS 単結晶は、移動ヒーター法 (THM) を用いて作製した。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

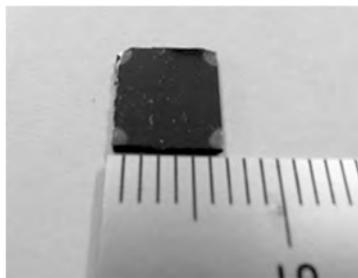


Fig. 1 ホール測定サンプル



Fig. 3 CZTS 単結晶インゴット

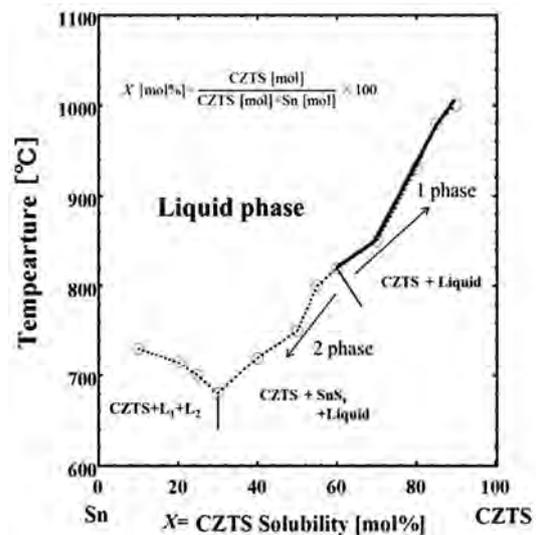


Fig. 2 CZTS-Sn 擬二元系状態図

とし、表面は粗さ 0.01  $\mu\text{m}$  の  $\text{Al}_2\text{O}_3$  粉末で研磨した。Fig. 1 に直径 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サンプルを示す。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。

### 3. 結果と考察

CZTS-Sn 擬二元系状態図を Fig. 2 に示す。mol 濃度  $X$  は式(1)を用いて算出した。

$$X[\text{mol}\%]=\frac{\text{CZTS}[\text{mol}]}{\text{CZTS}[\text{mol}]+\text{Sn}[\text{mol}]} \times 100 \quad (1)$$

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  $\text{SnS}_x$  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 に溶解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  $\text{SnS}$  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. 3 に示す。

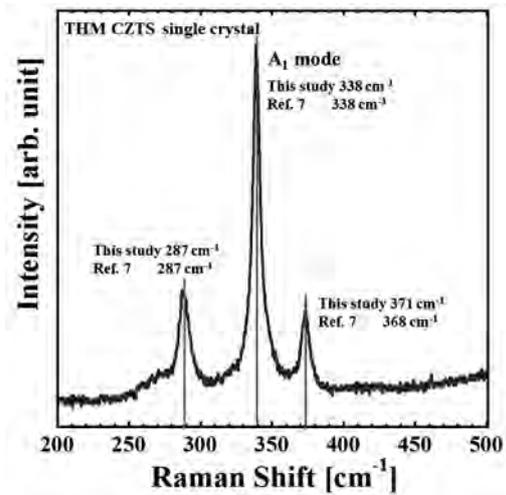
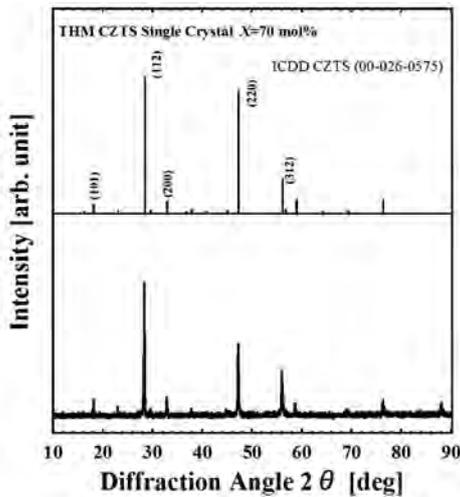


Fig. 4 CZTS 単結晶粉末 XRD パターン Fig. 5 CZTS 単結晶粉末 Raman スペクトル

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<sup>6)</sup>。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 ピーク位置がほぼ同いため Raman 測定を行った。287、338、371  $\text{cm}^{-1}$  にピークを観察し、これは文献と一致している<sup>7)</sup>。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。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 間隔でウェハー状にカットし、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. 6に CZTS 単結晶のホール移動度温度変化を示す。100 K 以下において、移動度は $\sim T^{1.5}$ 、室温付近においては $\sim T^{-1.1}$  に比例し、一般的な低温におけるイオン化不純物散乱 $\sim T^{1.5}$  と室温付近のフォノン散乱 $\sim T^{-1.5}$  を用いて説明する事は困難である。我々はすでに 100K 以下の低温では、ホッピング伝導が支配的であること、100 meV 以上の深い欠陥準位を持つことを報告している<sup>5)</sup>。これらの結果からホッピング伝導(不純物散乱) $\mu_I$  式(2)と中性不純物散乱  $\mu_N$  式(3)、多元系材料であるため極性光学散乱  $\mu_{PO}$  式(4)、格子散乱  $\mu_{AC, NPO}$  式(5)はフォノン散乱と非極性光学散乱を用いて固有散乱メカニズムへアプローチを行った<sup>8-10)</sup>。

$$\mu_I = \frac{D}{k_B T} \exp\left(-\frac{W}{k_B T}\right) \quad (2)$$

$$\mu_N = \frac{m^* e^3}{20 \varepsilon_s \varepsilon_0 N_N \hbar^3} \quad (3)$$

$$\mu_{PO} = 25.4 \frac{T^{1/2}}{\theta} \left(\frac{1}{\varepsilon_\infty} - \frac{1}{\varepsilon_s}\right)^{-1} (m_0/m^*)^{3/2} (e^z - 1) G(z) \quad (4)$$

$$\mu_{AC, NPO} = 3.17 \times 10^{-5} \frac{\rho u^2 S(\theta, \eta, T)}{(m^*/m_0)^{5/2} E_{AC}^2} T^{-3/2} \quad (3)$$

$$u = \frac{k_B \theta_D}{\hbar} \left(\frac{V}{6\pi^2}\right)^{1/3}$$

$$S(\theta, \eta, T) = (1 + A\eta)^{-1}$$

$$A = \frac{HZ}{e^z - B}$$

$$\eta = (E_{NPO}/E_{AC})^2$$

$D$  は定数、 $W$  はホッピングエネルギー、 $k_B$  はボルツマン定数、 $\varepsilon_s$ 、 $\varepsilon_\infty$  と  $\varepsilon_0$  はそれぞれ高周波における比誘電率、比誘電率、と真空中の誘電率、 $N_N$  は中性不純物濃度、 $\theta$  は光学フォノン特性温度、 $m^*$  は有効質量、 $G(z)$  はタブレット関数、 $\rho$  は密度、 $u$  は平均音速、 $\theta_D$  はデバイ温度、 $V$  はユニット体積、 $E_{AC}$  と  $E_{NPO}$  は格子と光子の変化ポテンシャル、 $z = \theta/T$ 、 $H$  と  $B$  は Ref. 11 から求めた。またトータルの移動度  $\mu$  は Mathiessen の法則を用いて算出した。Table 1 に使用したパラメータを示す。特に室温付近においてはフォノン散乱と非極性光学散乱過程が 70%以上を占める結果となり、結晶性の向上が伝導特性を向上させるのに一番重要であることが分かった。現在高効率を達成するために必要な S アニールも深い欠陥準位を形成する S 空孔を抑制し<sup>12)</sup>、結晶性を向上させるため有効な手段である事も固有散乱過程から説明できる。

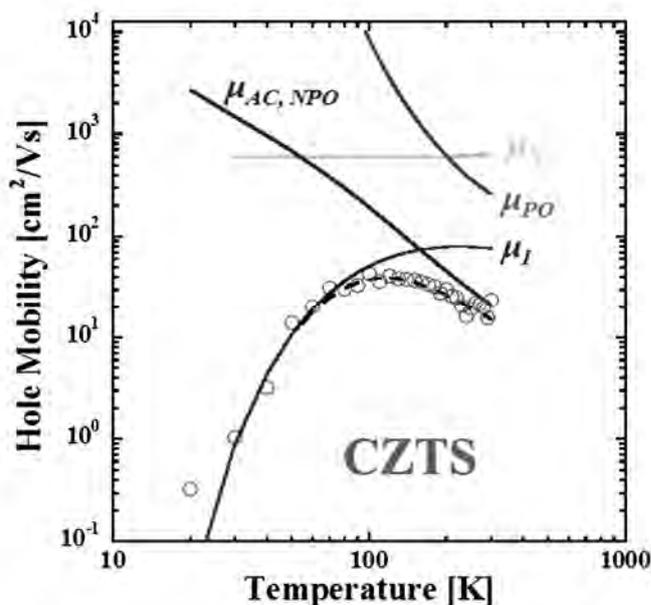


Fig. 6 CZTS 単結晶のホール移動度温度変化

Table 1 使用したパラメータ値

	$m^*/m_0$	$E_a$ (meV)	$E_{AC}$ (eV)	$E_{NPO}$ (eV)	$\epsilon_s$	$\epsilon_\infty$	$u$ (cm/s)	$\theta_D$ (K)	$\theta$ (K)	$\rho$ (g/cm³)	$N_N$ (cm⁻³)
CZTS	0.45	19±2	18±3	24±1	9.1	6.8	2.8×10⁵	302	360	4.40	5.4×10¹⁸

#### 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。ホッピング伝導、中性不純物散乱、極性光学散乱、格子散乱の 4 つの散乱プロセスを用いてホール移動度温度変化から固有散乱メカニズムを解明した。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) B. Shin *et al.*, Prog. Photovolt: Res. Appl. **21** (2013) 72.
- 2) I. Repins *et al.*, Sol. Energy Mater. Sol. Cells **101** (2012) 154.
- 3) W. Wang *et al.*, Adv. Energy Mater. **4** (2014) 1301465.
- 4) A. Nagaoka *et al.*, J. Crystal Growth **341** (2012) 38.
- 5) A. Nagaoka *et al.*, Appl. Phys. Lett. **103** (2013) 112107.
- 6) I. D. Olekseyuk *et al.*, J. Alloys Compd. **368** (2004) 135.
- 7) K. Wang *et al.*, Appl. Phys. Lett. **97** (2010) 143508.
- 8) S. M. Washim *et al.*, Phys. Stat. Sol. (a) **82** (1984) 553.
- 9) T. Irie *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **18** (1979) 1303.
- 10) H. Ehrenreich, J. Phys. Chem. Solis **8** (1959) 130.
- 11) J. D. Wiley *et al.*, Phys. Rev. B **2** (1970) 427.
- 12) S. Chen *et al.*, Phys. Rev. B **81** (2010) 245204.

## 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** 直径 20~30nm(純度 $\geq$  95%)多層カーボンナノチューブ(MWCNTs) 及び溶媒 N,N-dimethylformamide (DMF, 99.5%)を用いた。樹脂には polyurethane (PU)を用いた。MWCNTs を DMF に分散させ、DMF 含有の PU 樹脂と配合し超音波攪拌にて均一な混合液になるように工夫した。異なる CNTs 含有率 (3, 7, and 9 wt%) 及び厚さ (0.1, 0.5, and 2 mm) を作製した。比較のため、PU のみの試料も作製した。また、異なる多層構造シート 3 種類を作製した。

◆**導電性の評価** CNTs は優れた導電性を有しているが、ポリマーとのナノ複合化により誘電体材料となる。そのため材料の電気抵抗は CNTs の含有量に依存する。

電気抵抗の測定は 4 電極法を用いた(Fig.1)。

◆**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波は遮蔽効果(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.2 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。

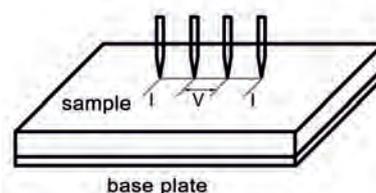


Fig.1 The measurement of electric conductivity.

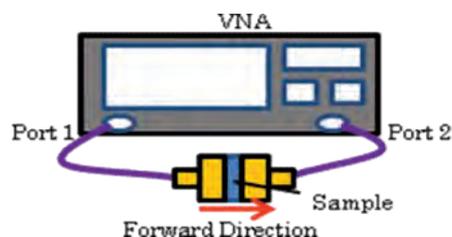


Fig.2 The schematic of an EMI shielding measurement system.

各試料の比誘電率，比透磁率および誘電正接の測定は，上記の同軸管に治具を取り付けることによって測定した。

### 3. 結果および考察

#### ◆CNTs ナノコンポジットの導電性

Fig.3 に異なる CNTs 含有率変化に対する導電性を示す。CNTs 1 wt%の場合，導電性は  $1.26 \times 10^{-2}$  S/m であり，PU 樹脂単体の 10 桁ほど大きい。また CNTs 9 wt%の場合，35 S/m となる。1 wt%前後はパーコレーション閾値であることが分かる。

#### ◆電磁波遮蔽特性

Fig.4 に CNTs 含有率による作製した材料（厚さ 2mm）の電磁波遮蔽効果(EMI SE)を示す。CNTs 含有率の増加に伴い，EMI SE が著しく増加していることが分かる。CNTs 含有率 3 wt%の場合，SE の平均値は 7.7dB であったが，7, 9 wt%の場合，それぞれ 17.3 と 28.5 dB となり，CNTs の添加による電磁波遮蔽効果が著しいことが得られた。また，高周波数帯域においてはさらに高い遮蔽効果があり，CNTs 9 wt%，周波数 16GHz において 35dB となった。

均質材料の SE 予測には，次式は使われる。Fig.5 に測定値と予測値の比較を行う。ここで， $\mu$  は透磁率， $\sigma$  は導電率， $f$  は周波数である。

$$SE = 39.5 + 10 \log \frac{\sigma}{2\pi f \mu} + 8.7d \sqrt{\pi f \mu \sigma} \quad (1)$$

図から予測値は実験値とよい一致を示している。本予測式の有効性が示された。

### 4. まとめ

カーボンナノチューブ (CNTs) をフィラーとし，分散性処理を行い，PU との複合化により CNT/PU ナノコンポジットを創製した。同材料の電気的特性や電磁波遮蔽特性を定量的に評価し，また理論的予測を行い，開発した材料の機能性発現を検討した。CNTs 含有量の増加により電磁波遮蔽効果が著しく向上されたことが明らかとなった。また，ナノフィラーのカーボンナノチューブを添加することで電気的特性は大きく改善された。パーコレーション値は CNTs 含有率 1wt%前後となり，他のナノファイバー（たとえば VGCFs）に比べ明確に改善された。

### 5. 研究組織

- 研究組織
1. 信州大学繊維学部機能機械学科 倪 慶清 (研究代表者)
  2. 九州大学応用力学研究所 汪 文学

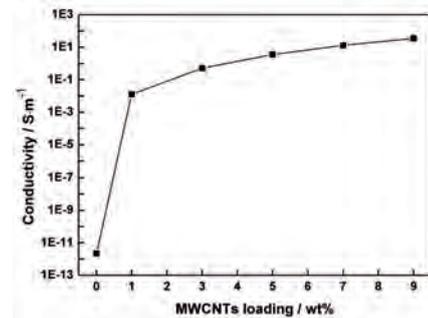


Fig.3 DC conductivity of CNT/PU composites containing various loadings of CNTs.

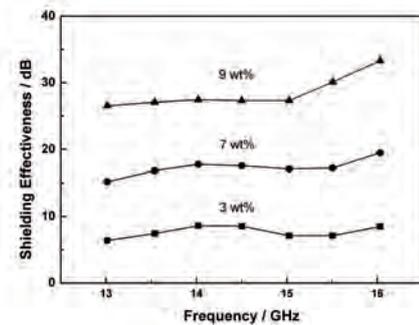


Fig.4 SE of CNT/PU composites (thickness 2 mm) with various CNT loadings (3, 7, 9 wt%) .

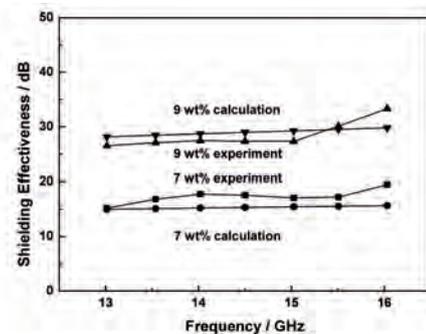


Fig.5 Comparison between calculated and experiment results for the SE of CNT/PU composites of CNTs 7 and 9 wt%.

## 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、低空を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%も良いことから、主機としてプラントで得た電力で駆動するモーターを利用することもできるであろう。本研究では、こうした利点を有する地面効果翼機に関して、その供試模型を用いた水中曳航試験を行い、その空力性能や飛行安定性について検討することを目的としている。

## 2. 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	博士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	修士課程2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2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

## 3. 実験の概要

## 3.1. 供試模型について

著者らは、久保・秋元らと共に新たな前翼式地面効果翼機 [1] を提案しており、ポテンシャル理論を用いた理論計算と風洞試験を通して様々な設計検討を行ってきた。その結果、Fig.1 左に示す下反角・テーパ角そして翼端板 (NACA0006) を有する形状に至っている。本研究ではこの主翼と Fig.1 右に示したアスペクト比3の単純矩形翼を対象とし、翼単体における空力特性と飛行した際に生じる翼周りの圧力場について明らかにした。Table1 に模型の諸次元を示す。水中曳航速度は矩形翼と主翼とでそれぞれ  $U = 2.213 \text{ m/s}$  ( $Re = 5.3 \times 10^5$ ),  $U = 2.500 \text{ m/s}$  ( $Re = 7.4 \times 10^5$ ) に設定し、実験を行った。



Fig.1: Wing models for experiment  
(Left : Main wing with end-plates , Right :  
Rectangular wing).

Table1: Principal dimensions of wings.

	Rectangular wing	Main wing
Chord length	0.24 m	0.30 m
Span	0.72 m	0.72 m
Project area	0.17 m <sup>2</sup>	0.15 m <sup>2</sup>
Velocity	2.213 m/s	2.500 m/s
Reynolds number	$5.3 \times 10^5$	$7.4 \times 10^5$
Airfoil	NACA3409	NACA3409, NACA0006

### 3.2. 水中曳航試験について

九州大学応用力学研究所所有の深海機器力学実験水槽において実験を行った。Fig.3に実験のセットアップ図を示す。Fig.1に示した供試模型は、定格 50 kgf の検力計を前後に 2 つ設置した強制動揺装置、スWORDを介して水中に設置した。水中での迎角設定が容易に行える用、耐水性の加速度センサー (共和電業製, ASW-5A, 定格  $\pm 5G$ ) を使用し、リアスパーに取り付けられたシャフトを回転させ翼に迎角を設定した。検出された加速度を角度に変換することで水中で迎角設定を行った。また、水中には幅 2 m, 長さ 5 m の地面板を設置した。地面板中央部には、翼の幅方向に 7 本、翼中央と翼端部の進行方向に 6 本ずつ圧力センサー (共和電業製 PS-05KD, 定格 50kPa) を設置した。矩形翼と主翼について地面上を定常曳航させ、検力計により翼に作用する流体力を計測すると同時に、幅方向 7 本の圧力センサーで定常圧力を計測した。さらに、強制 Heave 試験を行うことにより、動揺飛行時の流体力と、翼中央部と翼端部に設置した 6 本の圧力計により非定常流体力を計測した。計測法は大楠によって開発された船体周りの非定常波形計測技術 (Multifold Method)[2][3] を非定常圧力計測に応用した。設定水深については、事前に境界要素法による理論計算を行い、自由表面が翼性能に及ぼす影響が、翼性能に対して 1% 以下になる様に決定している。

また、本実験では、翼にタフトを取り付けることで地面効果内における流線の観察も行った。Fig.2 に翼に設置したタフトを示す。重力や浮力の影響を受けない比重 1 のテグスを左右に 3 本ずつ翼中央から翼端にかけて 240 mm 間隔で取り付けた。飛行高度は地面と後縁までの高さ  $h$  (m) をコード長  $c$  (m) の比  $h/c$  として定義しており、飛行高度と迎角をそれぞれ変化させて実験を行った。

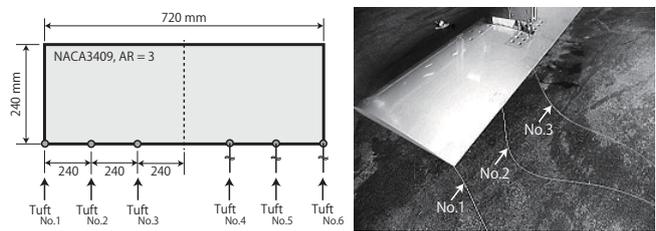


Fig.2: Tuft for visualization of wake deformation.

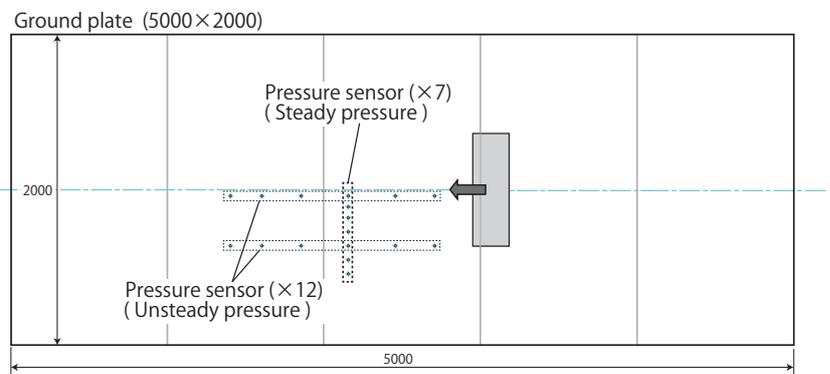
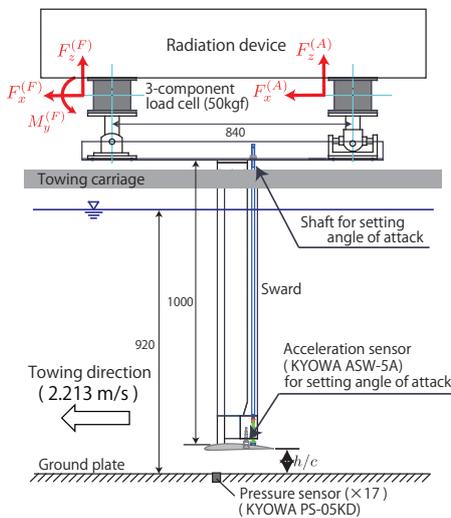


Fig.3: Experimental setup for towing tank test.

## 4. 理論計算

### 4.1. 自由表面干渉影響

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.4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  $\mathbf{n}$  は流体内向きとし、自由表面は剛体壁、

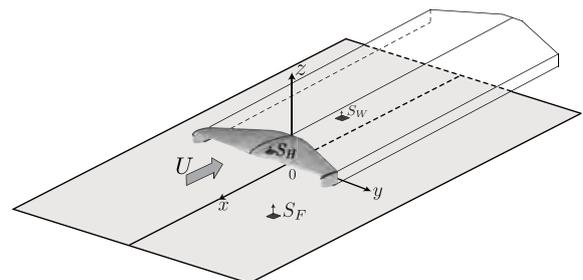


Fig.4: Body-fixed coordinate system

後流面は主流に沿って平行に流れると仮定する. 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する.

$$[L] \quad \nabla^2 \phi(x, y, z) = 0 \quad (1)$$

$$[H] \quad \frac{\partial \phi(x, y, z)}{\partial n} = n_x \quad \text{on } S_H \quad (2)$$

$$[F] \quad \frac{\partial \phi(x, y, z)}{\partial n} = 0 \quad \text{on } S_F \quad (z = 0) \quad (3)$$

$$[K] \quad p^+ - p^- = 0 \quad \text{on } S_W \quad (4)$$

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.

$$\begin{aligned} \frac{\phi(P)}{2} - \iint_{S_H+S_F} \frac{\partial G_0(P, Q)}{\partial n_Q} \phi(Q) dS - \iint_{S_W} [\phi(Q_T^+) - \phi(Q_T^-)] \frac{\partial G_0(P, Q)}{\partial n_Q} dS \\ = - \iint_{S_H+S_F} \frac{\partial \phi(Q)}{\partial n_Q} G_0(P, Q) dS, \quad P \in S_H + S_F (z = 0) \end{aligned} \quad (5)$$

ただし,

$$G_0(P, Q) = \frac{1}{4\pi|PQ|}, \quad |PQ| = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}$$

$$P = (x, y, z), \quad Q = (x', y', z')$$

ここで,  $\phi(Q_T^+)$  と  $\phi(Q_T^-)$  は後縁上下面での速度ポテンシャルを表している.  $S_H$  と  $S_F$  上で速度ポテンシャルが求まれば, 自由表面の干渉を含まない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.

$$\frac{\partial^2 \phi_w}{\partial x^2} + K_0 \frac{\partial \phi_w}{\partial z} = \frac{1}{2} \left( \frac{\rho_a}{\rho_w} \right) \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{p - p_0}{\rho_a U^2 / 2} \right), \quad \zeta = \frac{1}{K_0} \left\{ \frac{\partial \phi_w}{\partial x} - \frac{1}{2} \left( \frac{\rho_a}{\rho_w} \right) \left( \frac{p - p_0}{\rho_a U^2 / 2} \right) \right\} \quad \text{on } z = 0 \quad (6)$$

ここで, 波数は  $K_0 = g/U^2$  と定義し,  $\rho_w$  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波面の剛体壁上を飛行する空力と, 最初に計算された干渉を含まない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を行った. 本研究では, 翼が定常飛行した際に作用する地面上圧力分布を実験と計算結果とで比較することによって自由表面干渉影響の一部の妥当性の検証を行った.

## 4.2. 後流影響・強制 Heave 計算法

翼が飛行しているときの後流変形による影響, 非定常運動する翼の流体力の調査も行うため, 時間領域解法を適用した. Fig.5 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  $U\Delta t$  (m) の後流面を追加しながら一定速度  $U$  (m/s) 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.

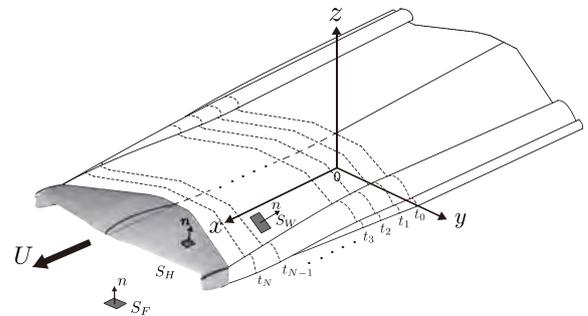


Fig.5: Space-fixed coordinate system

$$[L] \quad \nabla^2 \Phi(x, y, z; t) = 0 \quad (7)$$

$$[H] \quad \frac{\partial \Phi(x, y, z; t)}{\partial n} = U n_x \quad \text{on } S_H \quad (8)$$

$$[F] \quad \frac{\partial \Phi(x, y, z; t)}{\partial n} = 0 \quad \text{on } S_F \quad (z = 0) \quad (9)$$

$$[K] \quad p^+(x, y, z; t) - p^-(x, y, z; t) = 0 \quad \text{on } S_W \quad (10)$$

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。

$$\begin{aligned} \frac{\Phi(P; t)}{2} - \iint_{S_H(t)} \frac{\partial G(P, Q)}{\partial n_Q} \Phi(Q; t) dS &= - \iint_{S_H(t)} \frac{\partial \Phi(Q; t)}{\partial n_Q} G(P, Q) dS \\ &+ \int_0^t \left\{ \iint_{S_W(t)} [\Phi(Q_T^+; \tau) - \Phi(Q_T^-; \tau)] \frac{\partial G(P, Q)}{\partial n_Q} dS \right\} d\tau, \quad P \in S_H \end{aligned} \quad (11)$$

ただし,

$$G(P, Q) = \frac{1}{4\pi} \left( \frac{1}{r} + \frac{1}{r'} \right), \quad \left. \begin{array}{l} r \\ r' \end{array} \right\} = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z \mp z')^2} \quad (12)$$

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  $\Phi$  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  $\nabla$  を取って、

$$\begin{aligned} \nabla \Phi(P; t) &= - \iint_{S_H(t)} \left\{ \frac{\partial \Phi(Q; t)}{\partial n_Q} \nabla G(P, Q) - \nabla \frac{\partial G(P, Q)}{\partial n_Q} \Phi(Q; t) \right\} dS \\ &+ \int_0^t \left\{ \iint_{S_W(t)} [\Phi(Q_T^+; \tau) - \Phi(Q_T^-; \tau)] \nabla \frac{\partial G(P, Q)}{\partial n_Q} dS \right\} d\tau, \quad P \in S_W \end{aligned} \quad (13)$$

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  $\Delta t$  を乗ずることで、後流グリッドの移動量を求めることができる。

Fig.6 に強制 Heave 計算に使用した空間固定座標系を示す。強制 Heave 計算についても時間領域境界要素法を適用したが、長時間計算する必要があったため、後流の変形は考慮していない。翼に与える強制 heave 運動は  $\xi_3(t) = A_3 \sin \omega t$  で与える。ここで、 $A_3$  は加振振幅、 $\omega$  は動揺の円周波数である。全ての時間ステップ計算を行うと、揚力・抗力・モーメントに関する時系列データが得られ、それらをフーリエ級数展開することで非定常流体力について議論している。

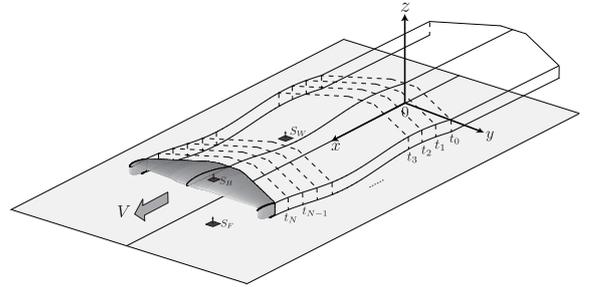


Fig.6: Space-fixed coordinate system for radiation heave calculation.

## 5. 実験結果と考察

### 5.1. 自由表面圧力場と隆起量・干渉影響

翼が定常飛行した際の圧力場について、翼幅方向に設置した圧力計で計測した実験結果と境界要素法による計算結果を Fig.7 に示す。飛行高度及び迎角は  $h/c = 0.30$ ,  $\alpha = 3^\circ$  の結果である。圧力の実験結果は翼幅方向に並べた 7 本の圧力センサーを用い、かつ模型を  $y$  方向に 40 mm シフトさせて計測された合計 14 本分の計測結果であり、上が翼下面から後流下面 ( $x/c = 0.75, 0.00, -1.50, -3.00$ ) における  $y$  断面の圧力分布、下が圧力コンター図である。圧力センサーにより得られたデータを見ると若干のばらつきは見られるものの、地面板上の圧力分布を十分な精度で捕らえることができている。よって、波の隆起量を計算する前段階の妥当性が確認された。翼模型直下の  $x/c = 0.75, 0.0$  では翼中心近傍で大きな正圧が作用しておりその大きさは翼端へ向かって小さくなっている。この分布は翼に作用するスパン方向の荷重分布と類似している。翼の下流部である  $x/c = -1.5, -3.0$  では翼端部に圧力の落ち込みが見

られる。固定後流モデルによる計算では翼端部に負圧域が見られるが、後流変形を追跡して計算する自由後流モデルでは負圧の大きさが小さくなり実験結果と合致してくる。一方、翼に作用する空力に関しては、固定後流モデルと自由後流モデルとによる推定とにほとんど相違が見られないことが分かっている [4]。このことから、空力という積分量の推定においては固定後流モデルで差し支えないものの、圧力分布など局所量の推定に関しては自由後流モデルを用いる必要があると言える。

Fig.8 に翼端板付き主翼の実験結果と計算結果を示す。飛行高度及び迎角は、前翼式地面効果翼機の設計高度と迎角である  $h/c = 0.35$ ,  $\alpha = 3.0^\circ$  である。矩形翼と比較すると、翼中央部における正圧分布は翼中央から翼端にかけてほぼ一定値を保っており、翼端位置において急激に小さくなる。翼端板付き主翼についても自由後流モデルを用いて計算した方が圧力は実験結果と良く一致している。その優位性は翼端部圧力において矩形翼の場合よりも明瞭に現れている。以上から、地面板上の圧力分布の推定に関して、提案する計算法が十分な精度を有していることが確認されたと言え、この圧力分布をベースに推定した翼の造波問題に関する知見の妥当性が示された。

Fig.9 に得られた圧力分布を基にして計算された波の隆起量を示す。フルード数は  $Fn = U/\sqrt{gc}$  と定義し、 $Fn = 1$ ,  $Fn = 3$ ,  $Fn = 10$  の結果である。矩形翼の結果を示しており、 $h/c = 0.30$ ,  $\alpha = 3.0^\circ$  である。低速飛行時では、ケルビン波が観察できるが、飛行速度の増加に伴い、翼端からの隆起が顕著になることが確認できる。しかし、その量は 2 mm 以下 (コード長の 0.3 % 程度) であり、波はほとんど起きないことが分かった。

Fig.10 に検力計で計測された空力の実験結果と境界要素法による空力の計算結果を示す。実線が平板の剛体壁面として計算された結果であり、点線が波面の剛体壁面として計算された結果である。両者の相違は 1 % 以下であり、WIG によって生じる波が空力に及ぼす影響はほとんど無視できることが分かった。また、地面効果によって揚力傾斜が変化し、高高度 ( $h/c = 1.00$ ) から低高度 ( $h/c = 0.30$ ) において約 30 %, 揚抗比の向上が見られた。計算結果と実験結果は良好に一致しており、本研究で提案した境界要素法が十分な精度を有することが確認できた。

## 5.2. 後流の可視化

Fig.11, Fig.12 にタフト法で観察された後流流線を示す。Fig.11 は、 $h/c = 0.30$  で固定し、 $\alpha = 3^\circ$  と  $5^\circ$  における側面からの観測結果であり、Fig.12 は  $\alpha = 3^\circ$  において、飛行高度を  $h/c = 0.30$  と  $h/c = 1.00$  に変化させたときの上方から観測した結果である。側面図からは、迎角の増加に伴い、コード長の延長線上に流線が流出していくことが確認できる。また、Fig.2 の No.1 のタフトは、翼端渦の渦中心に位置しており、翼端からの roll-up が顕著に観察できる。Fig.12 から、地面効果内 ( $h/c = 0.30$ ) における後流は地面の存在により翼幅方向に広がっていくことが分かる。通常、高高度を飛行する場合は後流面は縮流となるため、飛行時の後流が翼幅方向に広がるといった特徴は地面効果内特有の現象と言える。

## 5.3. 非定常流体力と非定常圧力分布

強制 Heave 試験については波数の無次元値として  $Kc$  を定義し実験を行った。Fig.13 に  $\alpha = 3.0^\circ$ ,  $Kc = 1.0$  と  $Kc = 4.0$  における矩形翼の非定常流体力を示す。横軸は  $h/c$  としており、縦軸はフーリエ級数展開後の定常項、非定常項の振幅と位相を表している。非定常項については 2 次オーダーまで展開した。まず、定常項についてみると、揚力、モーメントの定常項の実験結果は定常試験の結果と良く一致しており、実験の妥当性が確認できた。抗力については波数が大きくなるほど定常試験の結果よりも小さくなることが確認できるが、これは振動翼が推力を発生することに起因している。非定常成分を見ると、飛行高度の減少と共に定常・非定常流体力共に増加していることが確認でき、非定常流体力についても地面効果の影響を顕著に受けることが分かった。動揺振幅が 1 cm のとき、定常揚力に占める非定常揚力の割合は約 30 ~ 50% に達するが、その位相は約  $90^\circ$  であり、減衰力として作用していることが分かる。よって、これらの非定常流体力は WIG の飛行運動を悪化させる方向には働かないことが示

唆される。揚力、モーメントには2次オーダーはほとんど含まれないが、これらに比べ値の小さい抗力は1次成分の約30%の2次オーダーが混入しており、動揺振幅の影響を大きく受けることが分かった。

Fig.14は $Kc = 4.0$ ,  $h/c = 0.30$ ,  $\alpha = 3.0^\circ$ における翼中央部と翼端部での非定常圧力分布である。横軸はコード長 $c$ で無次元化しており、0が翼後縁、1が翼前縁を表している。翼中央部・翼端部進行方向に6本ずつ設置した圧力計を用いて大楠のMultifold method[2][3]によって計測された結果である。翼端部においてはほとんど非定常圧力は生じないが、翼中央部においては定常圧力と同程度の大きさの非定常圧力が作用することが分かる。Fig.13, Fig.14を通して、本研究で提案した時間領域境界要素法は空力特性と圧力分布の観点から非常に良い推定精度を持つことが確認された。

## 6. 結言

本研究で実施した水中曳航試験により、地面上圧力分布と空力の同時計測を行い、これまでに無い貴重なデータを取得した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 地面上圧力分布の妥当性が水中曳航試験により確認された。よって、圧力分布をベースとして得られた自由表面隆起量も妥当であると考えられ、 $F_n = 10$ といった高速飛行時においても、波の隆起量はコード長の0.1%程度である。自由表面干渉影響は極めて小さいことが確認された。
- (2) 地面効果内での後流変形は、地面の存在により翼幅方向に広がるといった特徴を有する。翼端におけるroll-up等もタフト法により明瞭に確認できた。
- (3) Heave運動しながら飛行した際の非定常流体力は減衰力として働くため、翼の運動を抑える方向に働く。非定常波形の解析法であるMultifold methodを応用し、非定常圧力分布の解析に成功した。非定常圧力は翼中央部では顕著に作用するが、翼端部においてはほとんど作用しない。
- (4) 本研究により提案した境界要素法による定常計算、時間領域解法による非定常計算は、圧力分布、空力共に良好な推定精度を持つことが分かった。

## REFERENCE

- 1) 久保昇三, 秋元博路: 表面効果翼艇の現状と展望, 日本航空宇宙学会誌, 第50巻, 第585号, pp.220-224, (2002)
- 2) Ohkusu, M.: Added Resistance in Waves in the Light of Unsteady Wave Pattern Analysis, Proc. 13th Symp. on Naval Hydrodynamics, Tokyo (1980)
- 3) Iwashita, H., Elangovan, M., Kashiwagi, M., Sasagawa, T.: On an Unsteady Wave Pattern Analysis of Ship Advancing in Waves, Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol.13, pp.95 ~ 106, (2011)
- 4) 伊藤悠真, 岩下英嗣: 地面効果内を飛行する3次元翼と全機空力に関する自由表面干渉影響と後流影響について, 日本船舶海洋工学会平成26年春季講演会, 講演会論文集, pp.212-214 (CD-ROM 2014S-FS5-7)

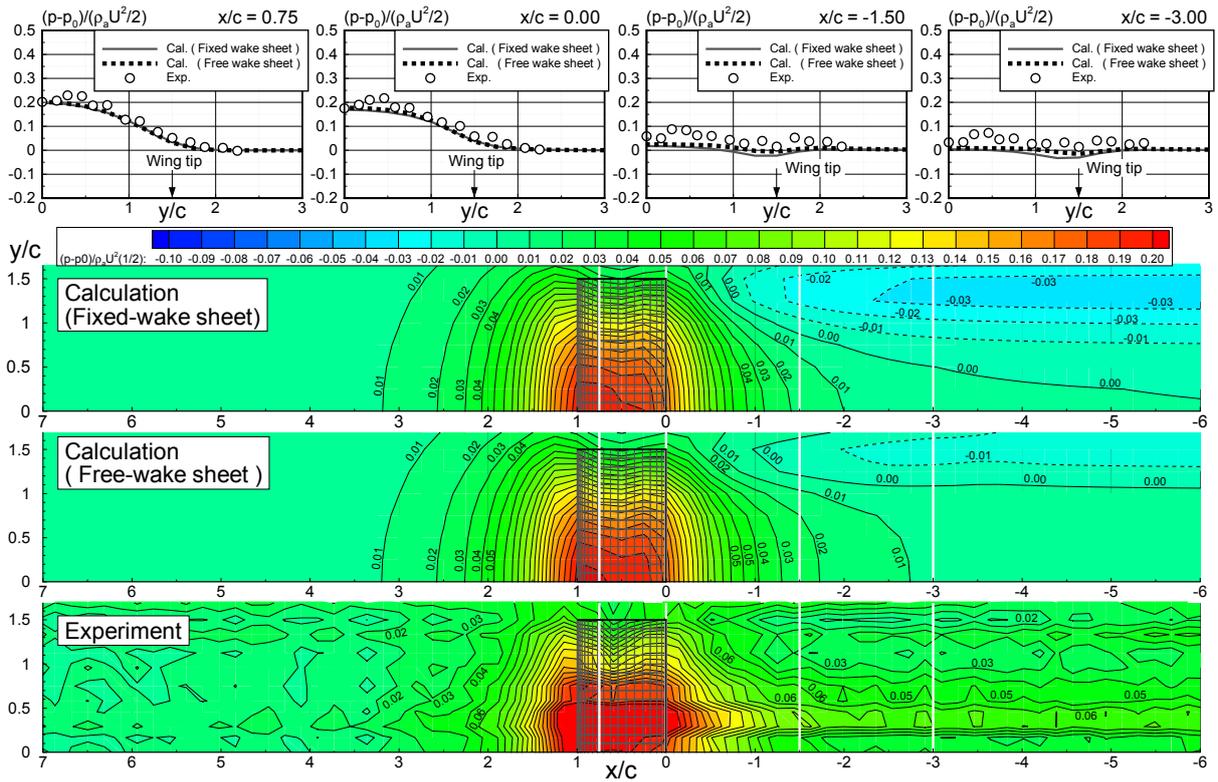


Fig.7 : Steady pressure distributions over the ground plate  
(Rectangular wing of  $\alpha = 3.0^\circ$ ,  $h/c = 0.30$ ,  $Re = 5.3 \times 10^5$ )

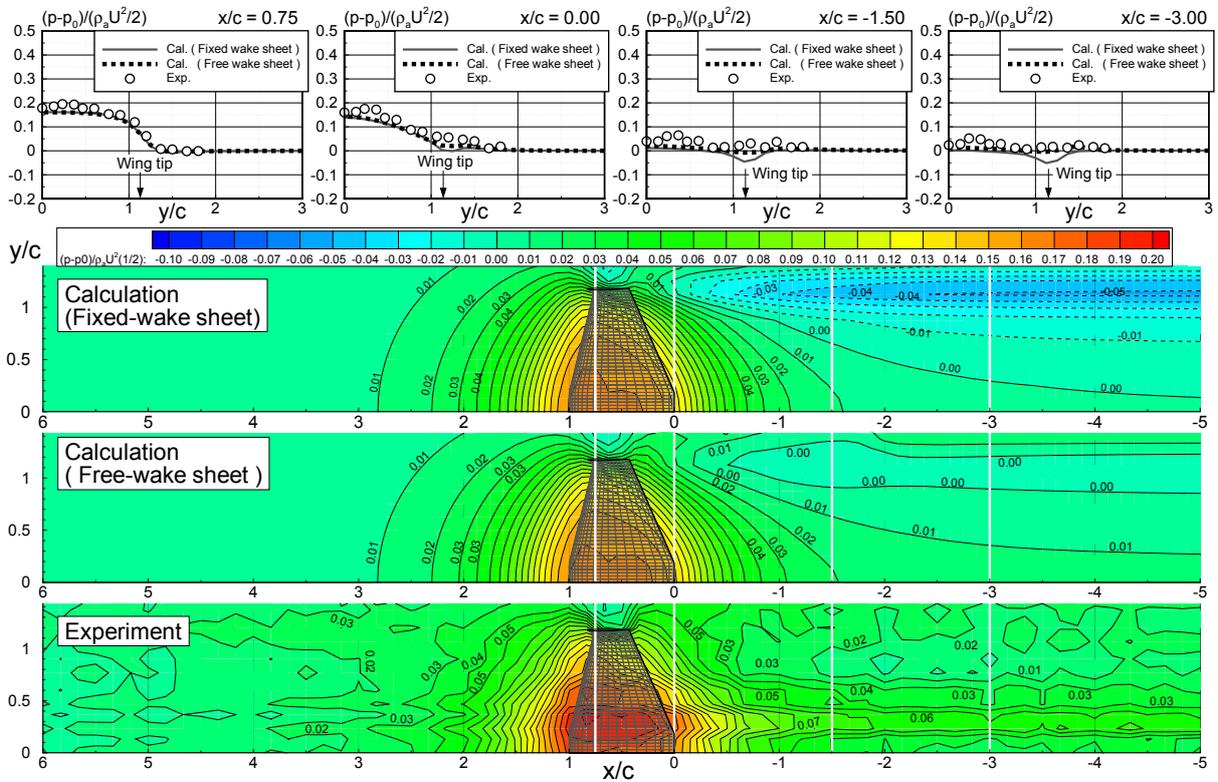


Fig.8 : Steady pressure distributions over the ground plate  
(Main wing with end-plates of  $\alpha = 3.0^\circ$ ,  $h/c = 0.35$ ,  $Re = 7.5 \times 10^5$ )

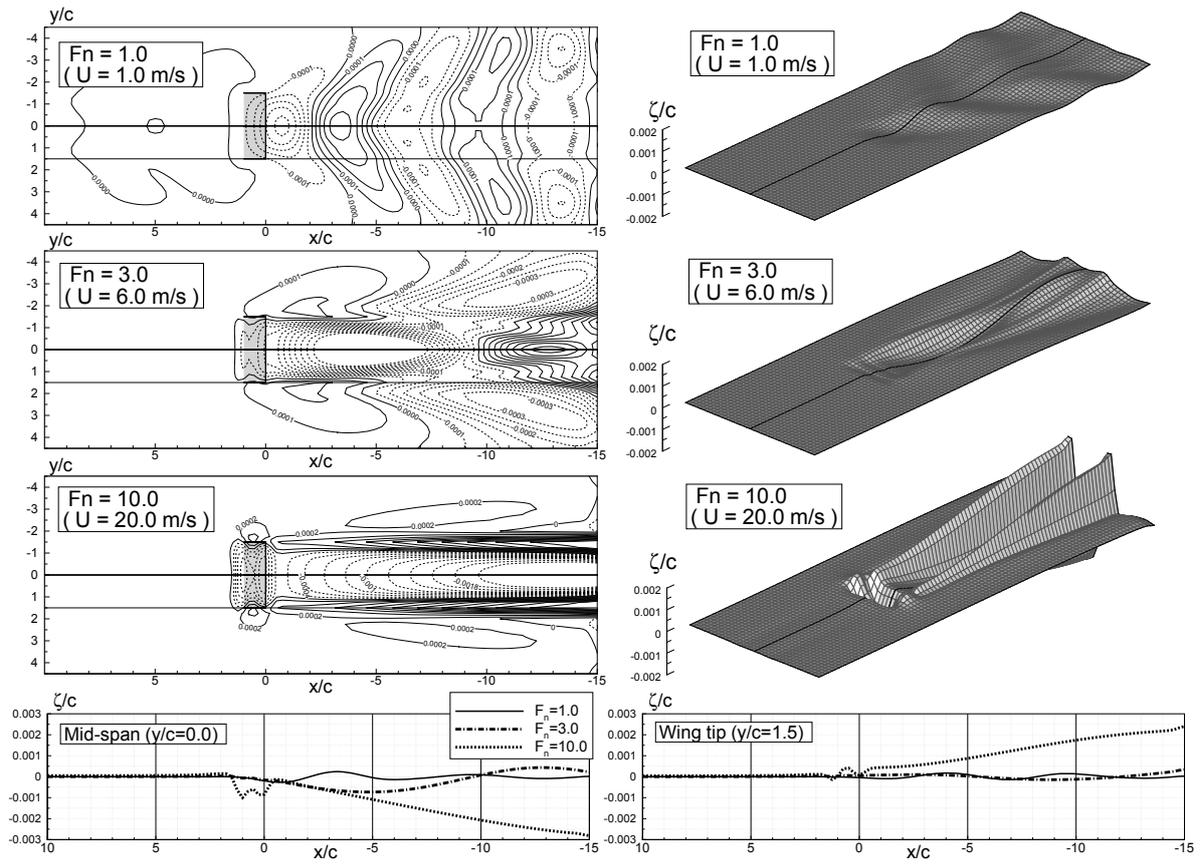


Fig.9 : Perspective views of wave elevations of different  $Fn$  ( $\alpha = 3^\circ$ ,  $h/c = 0.30$ )

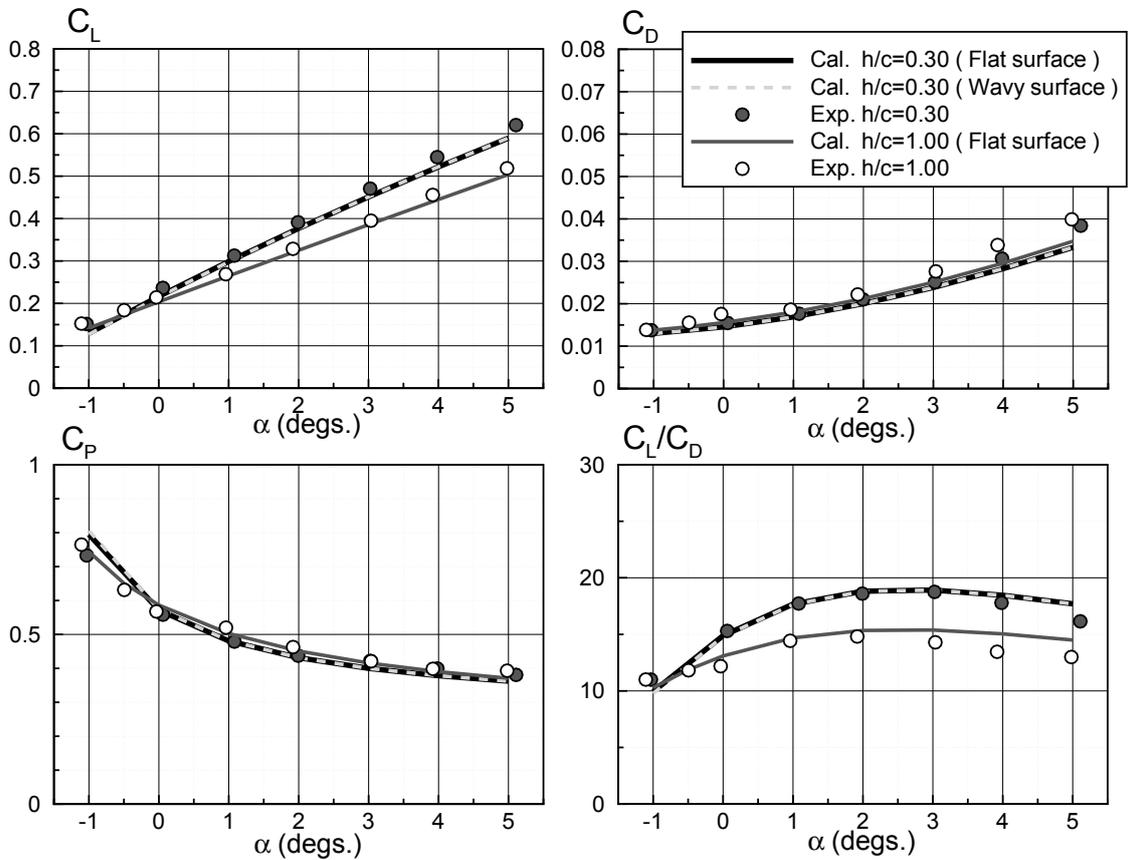


Fig.10 : Aerodynamics properties of rectangular wing ( $h/c = 0.30, 1.00$ ,  $Re = 5.3 \times 10^5$ )

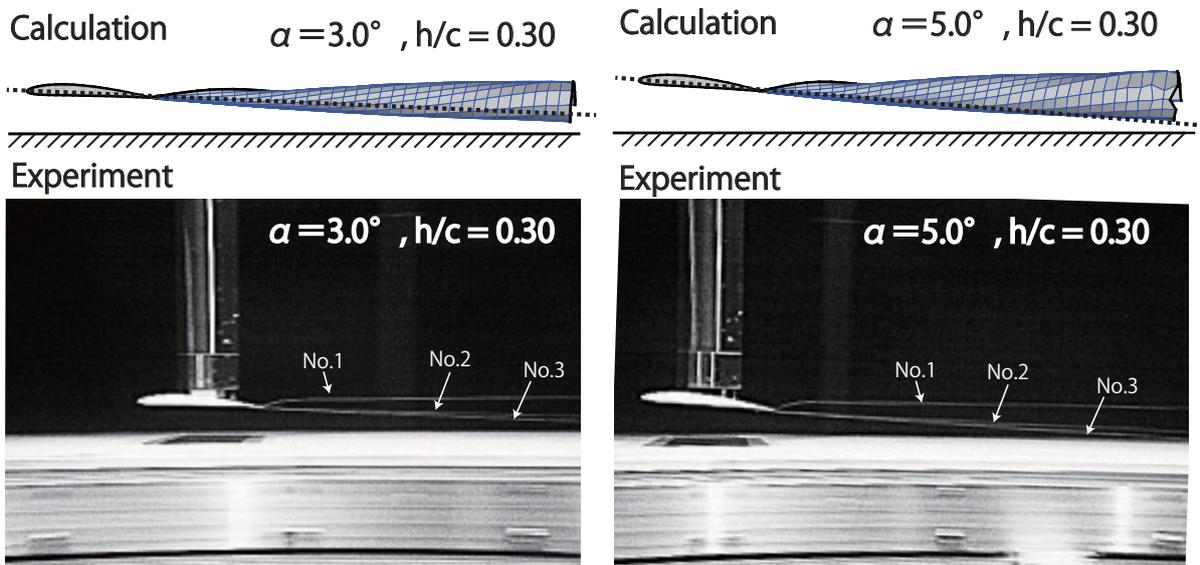


Fig.11 : Side views of the wake deformation of rectangular wing ( Left figure :  $\alpha = 3.0^\circ$ , Right figure :  $\alpha = 5.0^\circ$ ,  $h/c = 0.30$ ,  $Re = 5.3 \times 10^5$  )

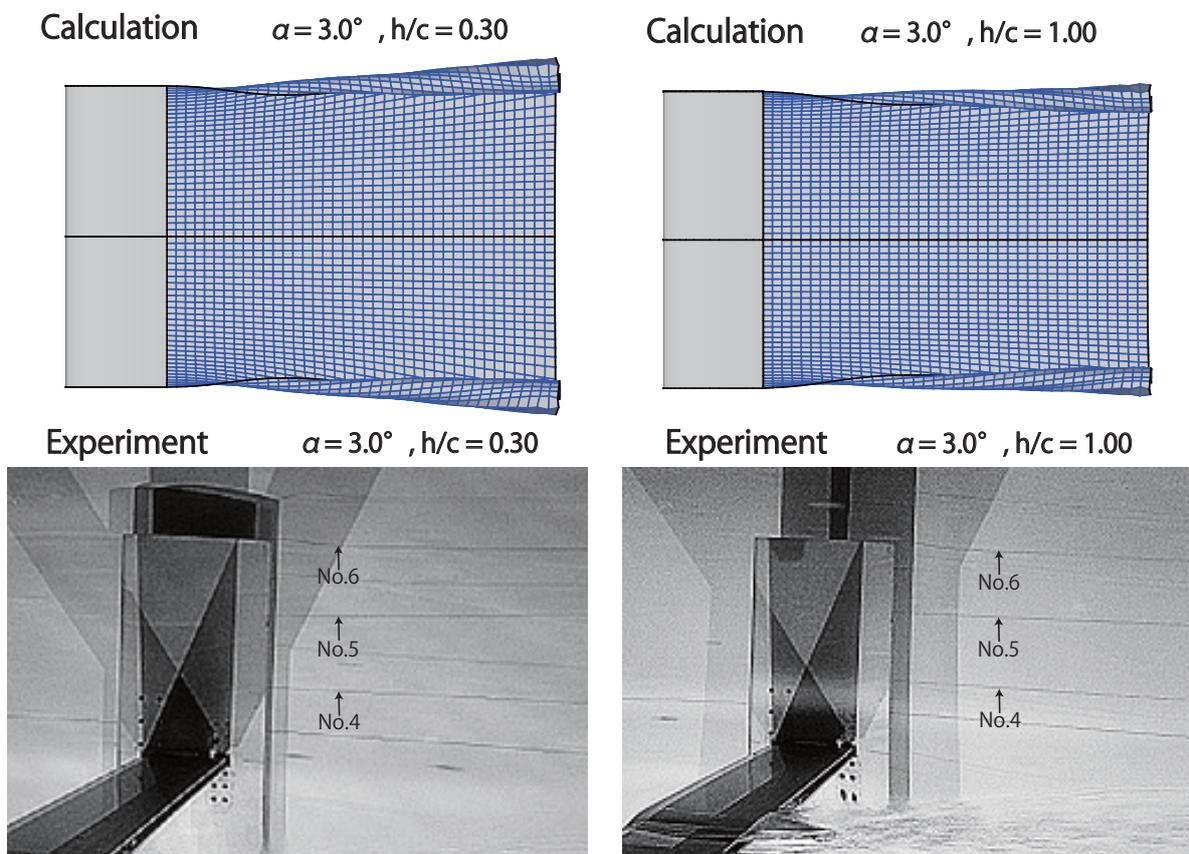


Fig.12 : Top views of the wake deformation of rectangular wing ( Left figure :  $h/c = 0.30$ , Right figure :  $h/c = 1.00$ ,  $\alpha = 3.0^\circ$ ,  $Re = 5.3 \times 10^5$  )

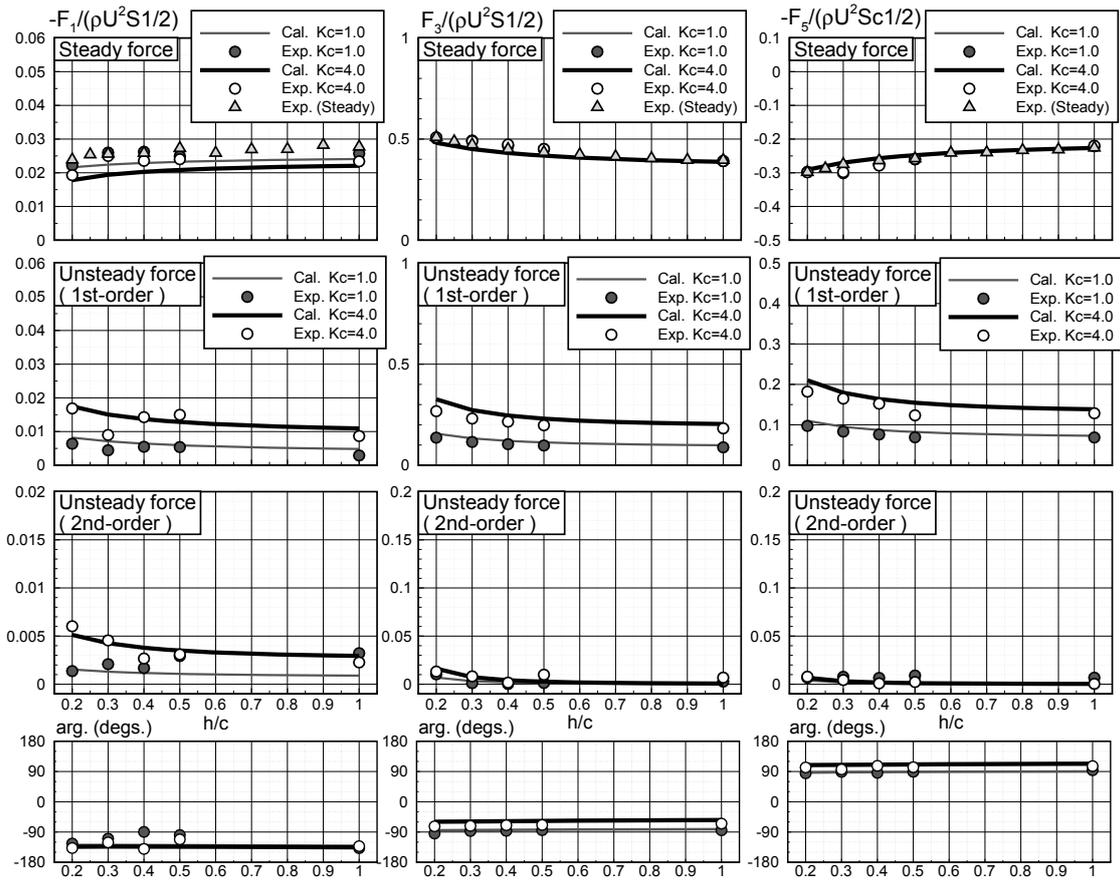


Fig.13 : Unsteady aerodynamics of rectangular wing with heave motion ( $\alpha = 3.0^\circ$ ,  $X_3 = 10$  mm)

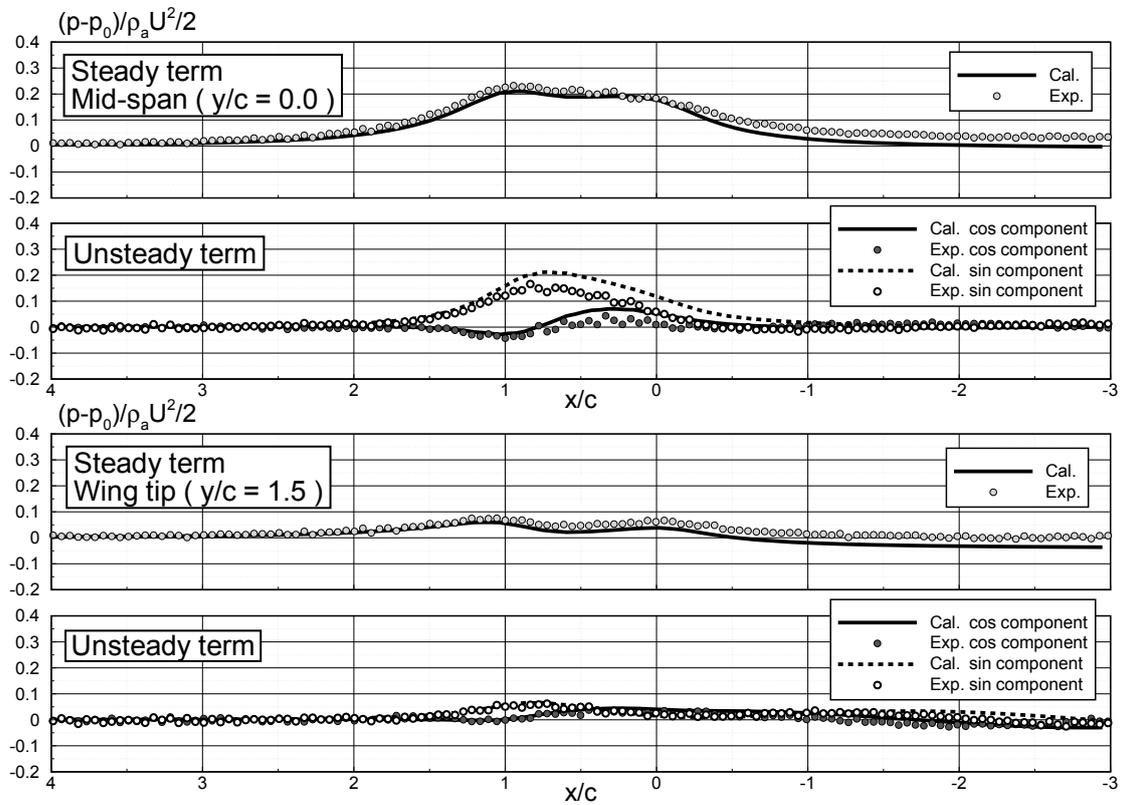


Fig.14 : Unsteady pressure distribution over the ground  
( $\alpha = 3.0^\circ$ ,  $h/c = 0.30$ ,  $X_3 = 10$  mm,  $Kc = 4.0$ )

## 1. INTRODUCTION

Total hip arthroplasty (THA) has been the most suggested treatment for later stage of hip osteoarthritis (OA) patients. Several demographic risk factors were reported contribute to the disease such as elder age, female gender and body mass index [1]. The challenges in promoting long term stability of the arthroplasty are still continue and investigate towards clinical, experimental and computational study. In computational discipline, issues of stress shielding and bone remodeling were continuously discussed and predicted. Both factors were believed to contribute to bone resorption, bone growth and hence lead to implant instability. The presence of hip prosthesis stem has created a mismatch in the elastic modulus of two materials inside the bone. Alteration of stress-strain stimuli in bone will increase bone resorption stage and initiate bone remodeling [2]. Understanding of biomechanical behavior for human lower limbs will be benefit to predict long term performance of hip arthroplasty and gait stability. Thus, the objectives of this research were to (i) develop 3D inhomogeneous model of lower limbs with hip OA and hip arthroplasty, (ii) to evaluate the stress variation and adaptation of lower limbs on both cases and (iii) to predict bone remodeling behavior on the resulting bone mineral density. A weight load distribution of quiet standing is considered in the analysis using the finite element method.

## 2. FINITE ELEMENT MODEL

Computed tomography (CT) based images data of a 79-year old female patient (with hip OA) were used in developing a 3D lower limbs model. The model was designed to be inhomogeneous material using commercial biomedical software, Mechanical Finder v6.1. Distributions of Young's moduli were predicted using the Hounsfield unit of the CT images. The FE model of lower limbs were consisted of sacrum, left and right ilium and femoral shafts. Bonds between cartilage, acetabulum and femoral head, sacrum and ilium were assumed to be rigidly connected. Three dimensional models of lower limbs with hip OA and THA were illustrated in Figs.1. CAD data of total hip replacement were imported and aligned to the hip OA limb (left femur). Interfacial connection between implant and bone was considered as perfectly bonded. A load case of quiet standing was considered in this study. The posture in the foot side-by-side position contributes to structurally and functionally equivalent of the lower limbs. A 60kg load of the patients' body weight was applied at the cross sectional sacrum and fixed at the distal of femoral shafts, as shown in Fig.1.

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

The body weight of a patient was transferred to lower limbs and distribute to left and right limbs, symmetrically. Findings in this study showed that the stress variation was differed between right and left side as osteoarthritis occurred at the left hip joint. Cross-sectional observation of maximum principal stress was illustrated Fig.2(a) and (b) for lower limbs with hip OA and THA, respectively.

Similar pattern of stress variation was indicated on right femurs (healthy hip joint) of both lower limbs. Higher stress were defined at femoral neck and well distributed along the cortical bone shafts. Left femur with hip OA indicated quiet similar pattern of distribution but in lower magnitude. Different pattern of stress distribution was analyzed in left femur with THA. Major load were dominant in stiffer prosthesis stem and lead to stress shielding phenomenon. Presence of prosthesis stem in lower limbs has created a mismatch material inside the bone and contributes to biomechanical instability. More loads were transferred to stiffer material stem and concurrently reduced the stress at the surrounding bone. Changes of stress variation on left femurs between hip OA and THA were demonstrated in Fig.3.

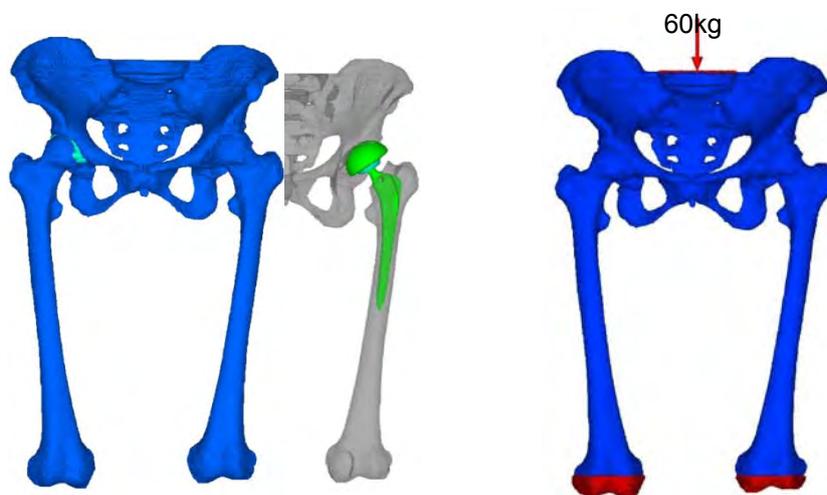


Fig.1. 3D model of lower limbs with OA or THA, and Boundary conditions

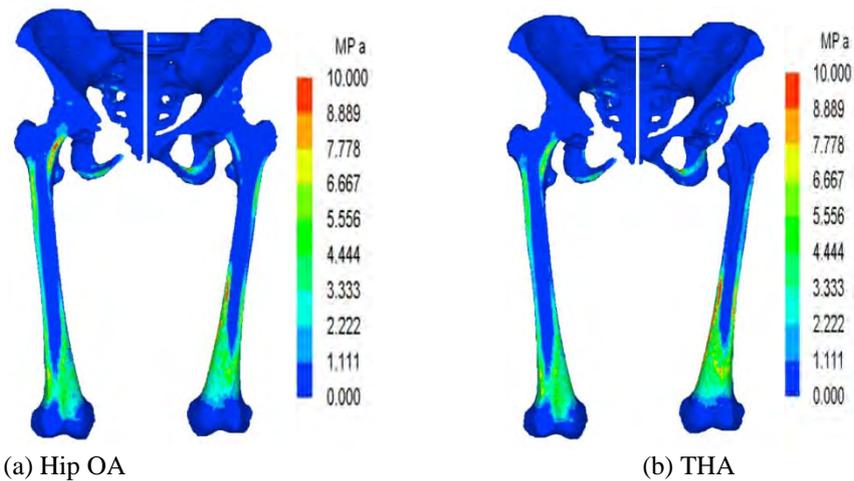


Fig.2 Maximum principal stress variation of lower limbs at cross-sectional anterior-posterior (A-P) view

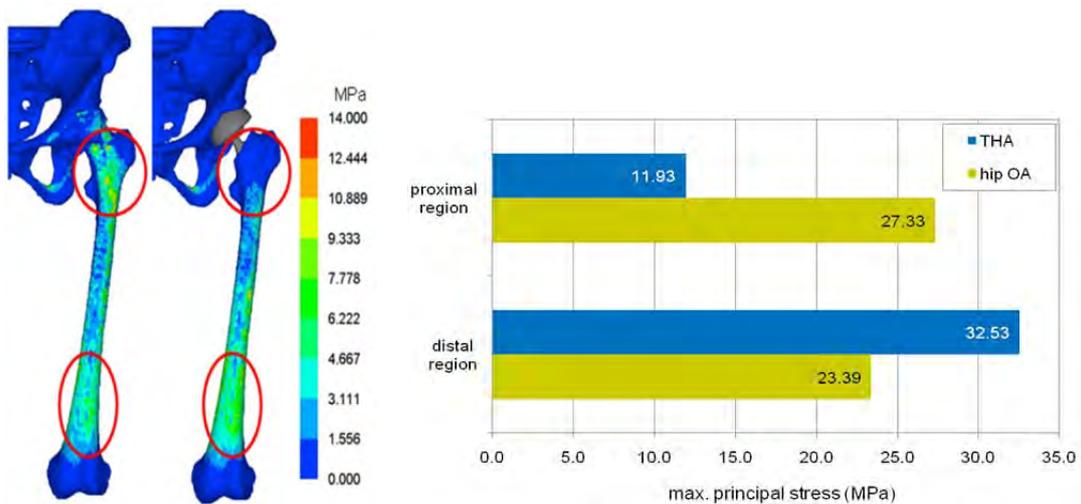


Fig.3. Stress adaptation at left limb

Fig.4. Highest magnitude of principal stress in left limbs

Two different regions were identified to experience most differences namely proximal and distal region. Fig.4 indicates that the stress adaptation occurred in both regions. Magnitude of maximum principal stress in THA was reduced up to 56.36% as compare to hip OA at the proximal region. Unlike proximal region, increment of stress values were indicated in distal region at 39.08% and was expected to promote bone thickening. Less stress that predicted at the proximal femoral shaft may promote to bone resorption and become weak at the respective region. While in the areas of diminished load, the skeleton preserve as much bone tissue as is necessary to sustain the low load level. Normally, the skeleton in the unloaded areas was weaker and at high risk of fracture under unexpected high force.

#### 4. CONCLUSION

Development of 3D inhomogeneous model of lower limbs had appropriately contributed to predict body weight distribution and bone adaptation. Predictions of bone resorption and bone loss were defined on the resulting principal stress and bone mineral density on lower limbs with hip OA and THA. Reduction of stress in THA limbs as compare to hip OA limbs explained biomechanically the resorption phenomenon. Both affected/non-affected and operated/non-operated limbs presenting the changes and experienced bone adaptation. The findings were expected to contribute to gait instability and adaptation of the patients.

#### REFERENCES

- [1] C. Y. Chung, M. S. Park, K. M. Lee, S. H. Lee, T.K. Kim, K. W. Kim, J. H. Park and J. J. Lee, *Osteoarthritis and Cartilage*, vol. 18, pp. 312-316, 2010.
- [2] H. M. Frost, *The Anatomical Record*, vol. 262(4), pp. 398-419, 2001.

## 薬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

九州大学歯学研究院 古谷野 潔

## I. INTRODUCTION

For a large bone defect caused by tumor or cyst, regenerative treatment should be applied to reconstruct the damage bone. Autografting is the standard treatment for such bone regeneration, however, limit of amount, excision of healthy bone, and pain at the excision point has been problems to be solved. Therefore, artificial bone substitutes made of bioceramics have been developed as a substitution for autografts. Calcium phosphates such as hydroxyapatite (HA) and  $\beta$ -TCP have been utilized to develop artificial substitutes because of their similar chemical structure to inorganic component of bone, therefore, excellent biocompatibility. However, the rate of bone formation by the bioceramic substitutes is usually much lower than that of autograft. Development of functional scaffolds is one of the key technologies in bone tissue engineering. Recently, scaffolds with drug release function have also been developed. In the present study, bioceramic/biopolymer composite scaffolds with drug release function were developed by using the template method. A commercial drug, statin, which is known to enhance bone formation in vivo was introduced into the composite scaffolds. Micromorphology was observed by a field-emission scanning microscope. Compressive mechanical properties were evaluated to assess the effect of polymer coating on the properties. Drug release rates were also measured and effects of type of polymer and type of statin distribution were examined.

## II. EXPERIMENTAL

Porous HA materials were fabricated by using the template method. The HA porous materials were sintered at 1300 °C for 3 hours to solidify the structures. Bioabsorbable polymers, PLGA (Gunze Co., Ltd.) and PCL (Dicel Chemical Co., Ltd.), were dissolved in dichloromethane (DCM), respectively. Powder of Fluvastatin Sodium Salt (thereafter, simply called 'statin') was then mixed with the polymer solutions. The HA scaffolds were immersed into the solutions and dried completely to obtain polymer coated HA scaffolds. Those composite scaffolds are thereafter called 'statin-contained type' scaffolds. On the other hand, polymer coated HA scaffolds without statin were also prepared. Statin powder was mixed into distilled water (DW) and the polymer coated HA scaffolds were immersed into the statin-contained DW and then dried completely. These composite scaffolds are thereafter called 'statin-adhered type' scaffolds. The scaffold codes and the compositions of the coating materials are presented in Table 1. The microstructures were observed by FE-SEM. Compressive mechanical tests were also conducted to evaluate compressive elastic moduli and strength. The composite scaffolds were also immersed in phosphate buffered saline (PBS) solutions at an incubator hold at 37 °C up to 3 weeks in order to measure the release rate of statin. The concentration of statin in PBS solution was evaluated by measuring the absorption rate using a spectrophotometer (Shimadzu Co. Ltd.). The surface morphology of the specimens after the drug release tests was also observed by FE-SEM.

Table 1 Materials

Codes	Coating polymer solution [wt%] + Statin solution [wt%]
HA	—
HPS1	Statin[1] / PLGA[1] / DCM[98]
HPS2	Statin[1] / PCL[1] / DCM[98]
HPS3	PLGA[1] / DCM[99] + Statin[1] / DW[99]
HPS4	PCL[1] / DCM[99] + Statin[1] / DW[99]

## III. RESULTS AND DISCUSSION

FE-SEM microimages of porous structure of a PCL/HA/statin composite scaffold and the surface morphology of two types of the scaffolds are shown in Fig.1. It can be observed from Fig.1 (a) that a continuous porous structure was well developed in the scaffold. The porous structure is very similar to that shown in Fig.1, indicating that the porous

structure of PU sponge was well transferred to the composite scaffold. Statin particles distributed in PCL are seen in Fig.1 (b). The particles tended to be aggregated and PCL formed a kind of mesh structure. In the statin-adhered type, aggregated statin particles were well attached on the PCL surface.

The compressive mechanical properties are shown in Fig.2. It is clearly seen that all the properties, elastic modulus, strength and SED, were effectively improved by introducing the polymer coating on the HA surfaces. The modulus, strength and SED of the composite scaffolds are about 1.5, 2 and 6 times larger than those of pure HA scaffold, respectively. It is also seen that the difference between PLGA and PCL coatings is very small and almost negligible. The effect of the type of statin distribution is not very significant.

The results of the drug release tests are summarized in Fig.3. It is obviously seen that the release rates of HPS1 and 2 were much slower than those of HPS3 and HPS4 because statin particles attached on the polymer surfaces are easily released in PBS solution (HPS3 and HPS4), while the embedded statin particles within the polymer coatings are not released until the polymers are degraded or statin particles are decomposed into PBS solution. It is noted that HPS1 exhibited higher release rate than HPS2, corresponding to the faster degradation rate of PLGA than that of PCL. The times when the amount of released statin reached its peak value are about 10 days for HPS1, 20 days for HPS2, and 5 days for HPS3 and 4. This experimental results clearly show that one can control the drug release rate by changing the type of polymer coated on the HA surface (low or high degradation rate) and the type of statin distribution (contained or adhered).

Surface morphology of a HA/PLGA/statin composite scaffold before and after the statin release test is shown in Fig.4. It is clearly seen from the comparison of the top and bottom figures that almost all the statin particles were removed from the surface. Also, the surface became very rough, indicating that PLGA was degraded in PBS solution.

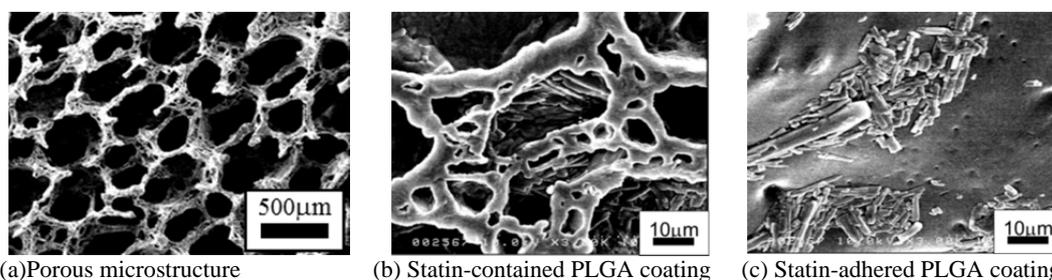


Fig.1 Porous microstructure and distributed statin particles.

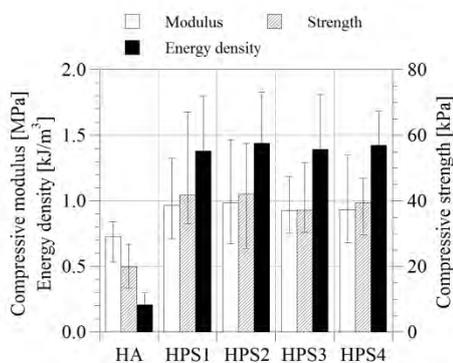


Fig.2 Compressive mechanical properties.

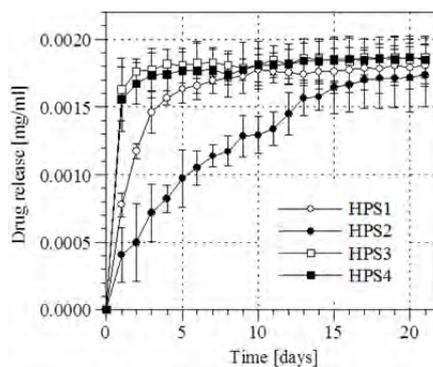


Fig.3 Variation of amount of statin released.

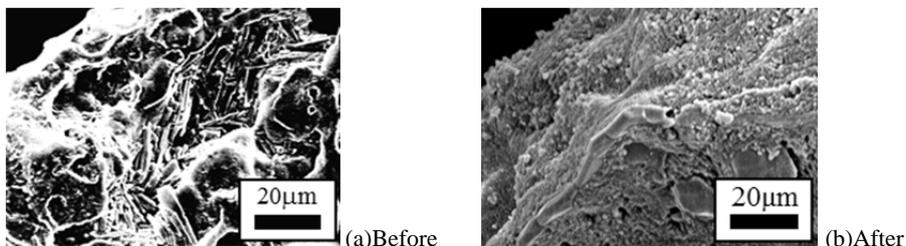


Fig.4 Surface morphology of a HA/PLGA/statin composite scaffold after statin release test.

## 1. 諸言

近年、変形性関節症等により損傷した軟骨に対して組織工学的な軟骨再生法の臨床応用が検討されている。たとえば、患者から採取した軟骨から軟骨細胞を単離し、アテロコラーゲンゲル中で培養後、患部に埋植する方法が行われている。しかし、コラーゲンゲルと軟骨細胞を用いて *in vitro* で作製した再生培養軟骨は、実際の生体軟骨に比べると力学特性の点で劣るため、比較的小規模な損傷の再生に限られているのが現状である。これまでに著者らは、再生軟骨の力学適合性を向上させるために、軟骨再生用の新規足場材料として、コラーゲンゲルとコラーゲンスポンジ (Fig.1(a)) を組み合わせた材料 (Fig.1(b)) を作製し、圧縮力学特性の評価およびヒト間葉系幹細胞 (human mesenchymal stem cell; hMSC) を用いた培養実験を行ってきた。その結果、コラーゲンゲル/スポンジ複合体は、コラーゲンゲル単体やコラーゲンスポンジ単体よりも圧縮力学特性の点で優れると共に、良好な細胞増殖能を有することが分かった。また、軟骨分化誘導剤を用いた軟骨分化培養実験を行ったところ、軟骨分化マーカーである type II コラーゲンやアグリカンの発現が確認され、hMSC が軟骨細胞へと順調に分化している様子が観察された。しかし、hMSC を軟骨細胞へと分化させたことで、細胞の増殖や細胞外基質の形成が抑制されるために、圧縮力学特性は低下してしまった。そこで本研究では、コラーゲンゲル/スポンジ複合 scaffold に hMSC を播種後、細胞増殖用培地を添加し、14 日間通常培養することで細胞数を増加させた後、軟骨分化培地を添加し、軟骨分化培養実験を行った。最長 28 日間培養を行い、圧縮力学特性の評価、細胞増殖能、ALP 活性、遺伝子発現解析、FE-SEM による構造観察を行うことで、組み合わせ培養の効果について検討した。



(a) Sponge (b) Gel/sponge  
Fig.1 Over view of collagen scaffolds.

## 2. 実験方法

コラーゲンスポンジは、ニワトリ軟骨製コラーゲン溶液 (type II コラーゲン, 日本ハム(株)) を用いて、凍結乾燥法により作製した。コラーゲンスポンジのサイズは直径が約 6.5mm, 厚さが約 5.0mm である。次にコラーゲンスポンジをシリコンゴムで作製した型に入れ、ゲル化する前のコラーゲンゲル溶液と細胞の混合液に浸漬させた後にインキュベータ内 (37°C, 5%CO<sub>2</sub>) で 1 時間静置し、ゲル化させることで作製した。用いたコラーゲンゲルは、Cellmatrix TypeI-A (新田ゼラチン(株)) を用いて作製した。コラーゲン溶液, 10 倍濃度の MEM ハンクス培地 (新田ゼラチン(株)), 再構成用緩衝液 (新田ゼラチン(株)) を 8:1:1 の割合で混合している。また、ゲル溶液には hMSC (UE6E7T-3, 理研バイオリソースセンター) を  $1.0 \times 10^5$  cells/scaffold となるように播種している。

次に、作製したコラーゲンゲル/スポンジ複合体を用いて、通常培養と軟骨分化培養を組み合わせた培養実験を行った。まず、細胞増殖培地 (MEM- $\alpha$ , 10%FBS, 1% penicillin-streptomycin) を添加し、14 日間培養することで複合材内の細胞数を増加させた。次に、軟骨分化誘導剤を含有した軟骨細胞分化用培地 (RPMI1640, 血清, アスコルビン酸含有, プライマリーセル(株)) を添加し、さらに 14 日間軟骨分化培養実験を行った。培地は 1 週間に 2 回の頻度で交換を行った。最長 28 日間組み合わせ培養を行い、FE-SEM による構造観察、細胞数、圧縮弾性率について評価すると共に、軟骨分化マーカーの測定を行った。なお、細胞数の測定には Cell Counting Kit (同仁化学研究所(株)) を使用し、プレートリーダーにより吸光度を測定した。圧縮弾性率は、卓上簡易試験機を用いて、室温下で負荷速度 1mm/min で負荷を与えて測定した。構造観察には FE-SEM を使用し、凍結乾燥後の試料を観察した。軟骨分化マーカーの測定には NucleoSpin®RNA II (MACHERY-NAGEL GmbH&Co.) を使用し、RT-PCR を用いて type II コラーゲン, アグリカン を測定した。

## 3. 結果および考察

細胞増殖挙動の実験結果を Fig.2 に示す。培養 1 日目から 14 日目の前半の 14 日間が増殖培養、培養 15 日目から 28 日目までの後半の 14 日間が軟骨分化培養を行った期間である。前半の増殖培養を行った期間では、細胞数は約  $8.7 \times 10^5$  cells/scaffold まで増加した。一方、軟骨分化培養では細胞数があまり変化せず、培養 28 日目において約  $9.0 \times 10^5$  cells/scaffold となっていた。このことは、後半の軟骨分化培養を行った期間では、hMSC が軟骨細胞へと分化したことで細胞数の増殖が抑えられたことを示唆している。

Type II コラーゲンの変化を Fig.3 に示す。前半の増殖培養を行った期間では、Type II コラーゲンはほとんど検出されなかった。一方、後半の軟骨分化培養では Type II コラーゲンが検出されており、培養日数とともに増加する傾向にあった。この実験結果から軟骨分化培養により hMSC が軟骨細胞へと分化したと考えられる。

アグリカンの変化を Fig.4 に示す。前半の増殖培養ではアグリカンは増加せず、培養 14 日目において減少していた。一方、後半の軟骨分化培養では、培養日数とともにアグリカンは順調に増加している。この測定結果も軟骨分化培養により hMSC の軟骨細胞への分化が促進されたことが理解できる。

初期弾性率の測定結果を Fig.5 に示す。前半の増殖培養を行った期間では圧縮弾性率は 2.8kPa から 3.4kPa まで増加している。これは、通常培養により、細胞の増殖や細胞外基質の形成が促進されたために構造が強化されたと考えられる。一方、後半の軟骨分化培養では、ほとんど圧縮弾性率の増加は見られなかった。しかし、細胞を播種してからすぐに軟骨分化用培地を添加した場合は異なり、前半の 14 日間の通常培養により、細胞数の増加や細胞外基質の形成が行われたことで構造が強化され、軟骨分化培養の期間中でも圧縮力学特性を保持していた。培養 28 日目の初期弾性率は 4.4kPa であり、軟骨分化培養のみを行った場合の弾性率より、2 倍程度高い値を示していた。

Fig.6 に培養開始後 28 日目でのゲル/スポンジ複合 scaffold 表面と断面の FE-SEM 画像を示す。試料の表面には軟骨特有の球状の細胞と線維状構造体が多く形成されている様子が観察された。直接に軟骨分化培養のみを行った場合と比較すると、組み合わせ培養を行った試料ではより多くの細胞が確認された。このような細胞数の増加や細胞外基質形成により、Fig.5 に示すような圧縮力学特性の向上が生じたと考えられる。

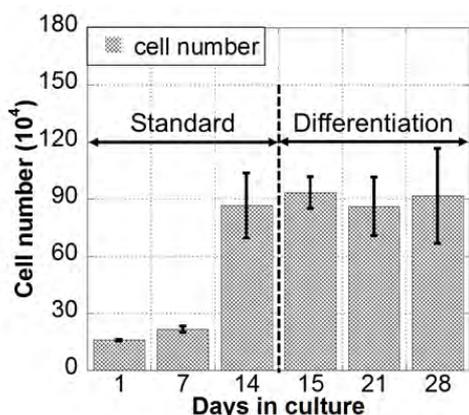


Fig.2 Variation of cell viability.

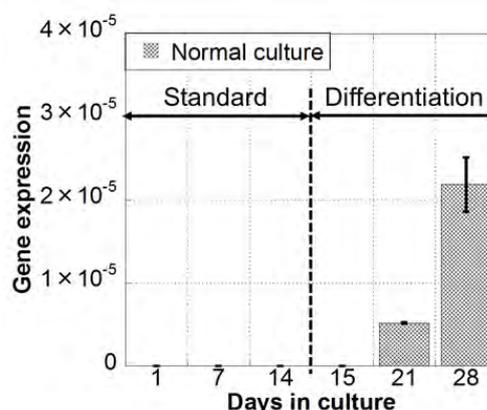


Fig.3 Variation of type II collagen.

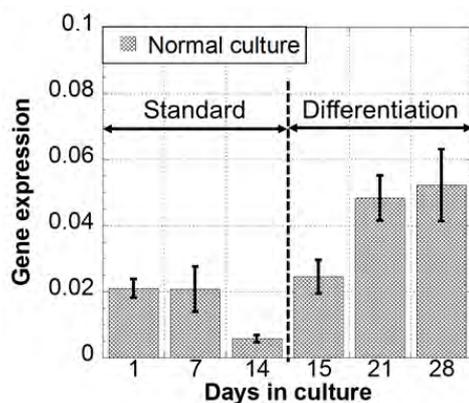


Fig.4 Variation of aggrecan.

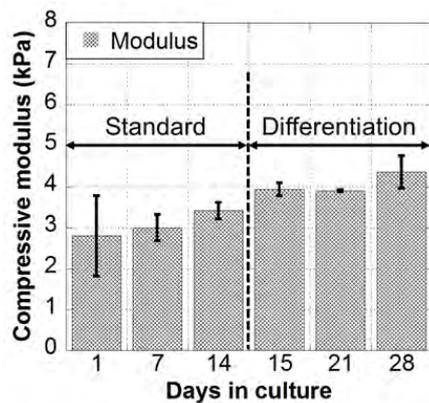
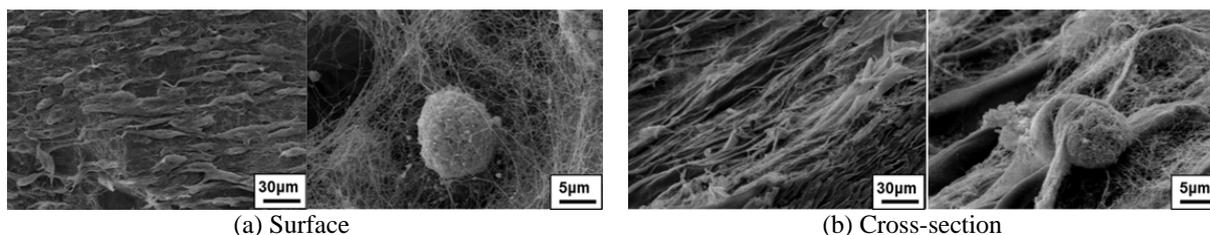


Fig.5 Compressive mechanical properties.



(a) Surface

(b) Cross-section

Fig.6 FE-SEM micrographs of cells after 28 days culture.

## 特発性大腿骨頭壊死症のバイオメカニクスの検討

横浜市立大学医学部 稲葉 裕

## 1. 緒言

大腿骨頭壊死症は、大腿骨頭が阻血性壊死に陥って破壊され、股関節機能が失われる疾患である。大腿骨頭壊死症は血液凝固系の活性上昇や脂質代謝異常、骨頭内圧上昇により骨頭への血流が障害されることにより発症すると考えられている<sup>(1)</sup>。骨頭死が発生した段階では自覚症状はなく、大腿骨頭に圧潰が生じた際に痛みが出現する。治療法として予後が良いと判断される場合は、杖による免荷や長距離歩行の制限などの保存療法が行われる。進行状態が深刻な場合は、大腿骨頭を前方あるいは後方に回転させ健全部を新しい荷重部とする大腿骨頭回転骨切り術や人工股関節置換術などが行われる<sup>(2)</sup>。大腿骨頭壊死に関する医学的な研究は進んでおり、血管内皮細胞において細胞周期の停止や細胞死が誘導され、血管の再生や新生の障害を介して発症する<sup>(3)</sup>というメカニズムが提唱されているが、壊死部の力学的特性を定量的に評価した研究は少ないのが現状である<sup>(4)</sup>。壊死発症後の圧潰のメカニズムを明らかにするためにも、壊死部とその周辺組織の力学特性を明らかにすることは必要不可欠である。

そこで本研究では、大腿骨頭壊死患者から摘出したヒト大腿骨頭から試験片を作製し、圧縮試験を行うことで力学特性を評価した。さらに、 $\mu$ -CT や FE-SEM により微視構造観察を行い、壊死による構造の変化についても検討した。

## 2. 実験方法

横浜市立大学病院において、人工股関節置換術の際に大腿骨頭壊死症患者から摘出した骨頭を凍結保存したものを試験体として使用した。本研究では大腿骨頭壊死症で圧潰を認める stage3 以上でステロイド性の検体から摘出した骨頭 3 例を対象とした。試験体の 1 例を Fig.1 に示す。また、圧縮試験片を切り出す前に micro-CT (SkyScan1176, 東陽テクニカ) を用いて 80kV, 100  $\mu$  A, スライス厚 19  $\mu$  m の条件で構造観察を行った。なお、本試験については横浜市立大学附属病院研究倫理委員会、福岡歯科大学倫理委員会の承認を得ており、患者本人のインフォームド・コンセントを得て実施しており、試験体の保存、データの管理はすべて両機関で行った。

大腿骨頭を万力で固定し、卓上ボール盤と埋木錐（内径 8mm, 全長 25mm）を用いて骨頭から円柱状試験片を抽出した。1つの骨頭から 2~3本の試験片を抽出した。抽出した試験片の 1例を Fig.1 に示す。試験片をメス及び剃刀を用いて壊死部、壊死部と海綿骨の境界領域、海綿骨の 3種類に分離した (Fig.1)。試験片は高さ約 5mm の円柱状に 4~6 等分した。卓上小型材料試験機 (EZ-L, 島津製作所) を用いて圧縮試験を行った。負荷速度は 1mm/min である。得られた荷重-変位関係より応力-ひずみ関係を算出し、さらに初期の線形弾性領域より圧縮弾性率を評価した。なお、電界放射形走査型電子顕微鏡 (FE-SEM) を用いて、圧縮試験前に壊死部と正常軟骨部の表面の微視構造観察を行った。

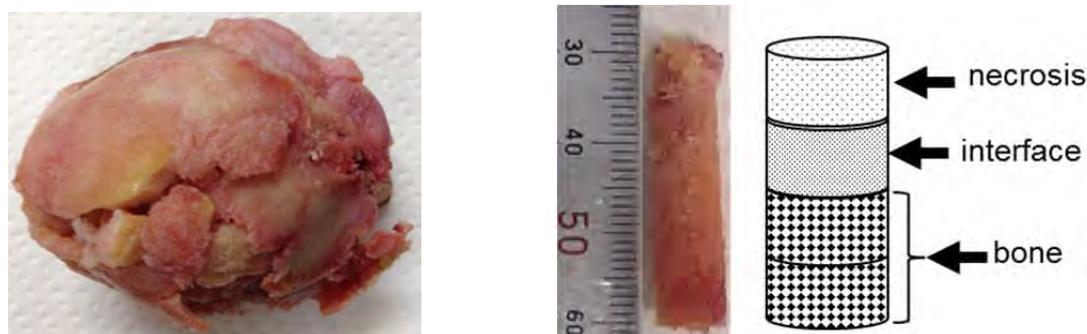


Fig.1 Femoral head with necrosis and specimen

## 3. 結果と考察

Fig.2に micro-CT 画像の 1 例を示す。A が壊死部，B が壊死部と海綿骨の境界領域，C が海綿骨からなる領域と推定される。B は強い白色を示しており，新生骨の生成が示唆される。

Fig.3 に壊死部と正常軟骨表面の FE-SEM 画像を示す。軟骨は II 型コラーゲン線維が凝縮し高密度となっている。それに対し壊死部では，密度が低く空孔率が高くなっていることが分かる。

Fig.4(a)に境界部，海綿骨，正常海綿骨の弾性率の比較を示す。正常海綿骨の弾性率は Kabel らが報告<sup>6)</sup>した値を用いた。壊死部と正常骨の間の境界部には新生骨が発生することが知られているが (Fig.2 参照)，壊死部の影響を含むために境界部は海綿骨より低い弾性率を示している。海綿骨部の弾性率は正常海綿骨の範囲内であり，組織的にはほぼ正常な状態であることが示唆される。Fig.4(b)は壊死部と正常軟骨の弾性率の比較を示しており，Mente らの報告した軟骨の弾性率と比較すると，約 1/45 程度に減少していることが分かる。

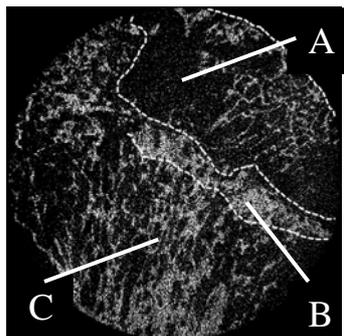
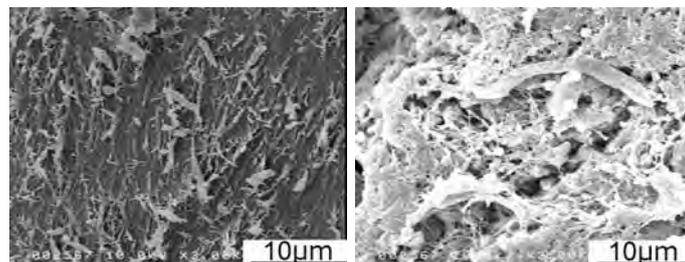


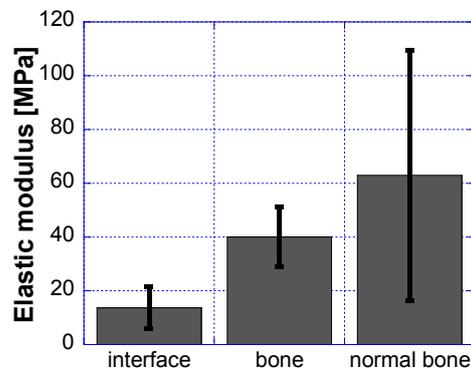
Fig.2 Micro CT image of the Femoral head



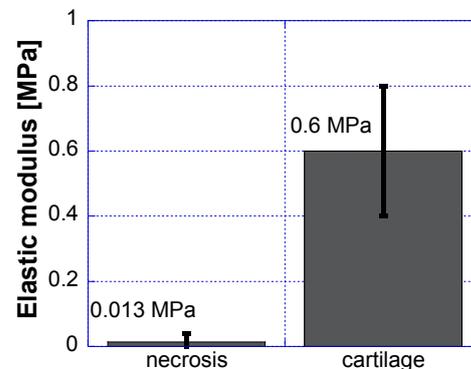
(a) Normal cartilage

(b) Necrosis

Fig.3 FE-SEM micrographs of necrosis and normal bone



(a) Bone and interface



(b) Necrosis and normal cartilage

Fig.4 Comparison of elastic modulus

### CT-FEM を用いた骨粗鬆化脊椎に生じる圧迫骨折のメカニズムに関する研究

研究代表者：順天堂大学医学部整形外科 准教授 米澤郁穂

#### 【背景・目的】

近年高齢化に伴い骨粗鬆症患者数が増加傾向にあり、骨脆弱性骨折を招き大きな社会問題となっている。骨折は、運動機能の損失からほかの疾患を招く原因となり、患者の QOL を著しく低下させ、高齢者においては寝たきりとなる事も多く、高齢化が進む現代においては重大な問題である。骨粗鬆症診断で、骨折の早期発見と予防が求められているが、現在のところ骨破壊という力学現象である骨折の危険性までも定量的に評価するような診断方法は確立されていない。また椎体圧迫骨折後に続発性椎体圧迫骨折が生じる事が多く、骨脆弱性があるため続発性に椎体骨折が生じてしまうと考えられており、力学的な評価はあまり行われていない。本研究では、正常椎体例および椎体圧迫骨折例の椎体への応力集中を脊椎の形状や骨密度分布を反映した有限要素モデルを作成し、力学的に評価する事を目的とした。

#### 【方法】

正常ボランティアと L1 圧迫骨折患者の胸腰椎 CT DICOM データを基に、骨解析ソフトウェアである Mechanical Finder を用いて椎体 3 次元モデル (Th12-L2) を作成し、椎体モデルに運動負荷を加えて様々な状態をシミュレーションした。それぞれの椎体モデルに対して仮想空間内で L2 椎間板を拘束し、Th12 椎間板に圧縮・前屈・後屈・側屈・回旋モーメントを負荷し、椎体に加わる相当応力について正常椎体モデルと椎体圧迫骨折モデルで比較検討を行った。

有限要素法は骨を多数の要素に細分化してそれぞれの要素にヤング率やポアソン比などの物理定数を与えてモデルを作成し、有限要素法方程式を解くことで骨全体の解析を行う事が可能である。本研究では有限要素法を用いた画像処理と力学解析の統合化ソフトウェアである Mechanical Finder (MF) を使用した。MF では、骨の強度解析に必要な患者の形状データと材料特性の全てを DICOM 形式の X 線 CT 画像データから得る。また有限要素ごとに海綿骨や皮質骨から構成される骨の非均質性を反映した材料特性の設定が可能である。正常椎体例と L1 圧迫骨折例 (受傷後 1 年) の胸腰椎 CT 画像 DICOM データを基に、MF を用いて Th12-L2 の 3 次元椎体モデルを作成し、椎体モデルに運動負荷を加えて様々な状態をシミュレーションした。要素の材料特性は、Keyak の換算式を利用して、CT 値 [Hounsfield unit: HU] を基にヤング率 (E) [MPa]、降伏応力 ( $\sigma_r$ ) [MPa] を算出し、それぞれ数値設定を行った。それぞれの椎体モデルに対して仮想空間内で L2 椎間板を拘束し、Th12 椎間板に圧縮、前屈・後屈・側屈・回旋モーメントを負荷し、椎体に加わる相当応力について正常椎体モデルと椎体圧迫骨折モデルで比較検討を行った。有限要素法的主要な解析手順を下記に示す。

- 1) X 線 CT 画像から必要なデータ範囲を設定し、対象とする骨の輪郭抽出を行う。
- 2) 輪郭抽出した骨データから 3 次元有限要素モデルの外形データを作成する。
- 3) 外形データからメッシュ分割を行い、3 次元有限要素モデルを作成する。
- 4) 選択した材料特性換算式を基に各要素に材料特性を与える。
- 5) 荷重条件、拘束条件を設定する。
- 6) 設定した解析法 (静的解析、線形解析等) に基づき、各要素の解析処理が行われる。
- 7) 解析結果から、ひずみ分布、応力分布、破壊荷重などが得られる。

## 【結果】

正常椎体モデルと椎体圧迫骨折モデル間で比較すると、検討を行った全てのモーメントである圧縮・前屈・後屈・側屈・回旋モーメント負荷で椎体圧迫骨折モデルにおける椎体への応力集中が増加していた。特に圧縮・回旋モーメントの椎体圧迫骨折モデルにおける応力集中の増加は顕著であり、圧縮モーメントでは L2 椎体、回旋モーメントでは Th12 椎体に応力が集中していた。

## 【考察】

本研究では、正常椎体例および椎体圧迫骨折例の椎体への応力集中を脊椎の形状や骨密度分布を反映した有限要素モデルを作成し、力学的に評価を行い、続発性椎体圧迫骨折の原因を検討した。続発性椎体圧迫骨折の原因として、単に骨脆弱性があるだけでなく椎体圧迫骨折により周囲の椎体への応力集中が大きくなり、続発性椎体圧迫骨折が生じる可能性があるとし唆された。また回旋モーメント負荷により椎体への応力集中が増加する事は意外な結果であり、椎体圧迫骨折の治療では圧縮、前後屈モーメントだけでなく回旋モーメントにも注意が必要であると示唆された。

## 【研究成果報告】

学会発表

- ・ Finite Element Analysis of Osteoporotic Vertebrae with First Lumbar (L1) Vertebral Compression Fracture、Muhammad Hazli Mazlan、International Association of Computer Science and Information Technology、2014.8.8、シンガポール
- ・脊椎の応力状態に及ぼす圧迫骨折の影響、東藤貢、第5回 MECHANICAL FINDER ユーザー研究会、2014.8.16、UDX GALLERY NEXT
- ・有限要素法を用いた椎体圧迫骨折の力学的評価－続発性椎体圧迫骨折のメカニズムの検討－、高野弘充、第41回日本臨床バイオメカニクス学会、2014.11.21-22、奈良県新公会堂
- ・有限要素法を用いた椎体圧迫骨折の力学的評価－CT 画像を用いた3次元脊椎モデルの構築と応力場の評価－、Muhammad Hazli Mazlan、第41回日本臨床バイオメカニクス学会、2014.11.21-22、奈良県新公会堂
- ・有限要素法を用いた椎体圧迫骨折の力学的評価、高野弘充、第10回御茶ノ水脊椎セミナー、2015.2.28、山の上ホテル
- ・有限要素法を用いた椎体圧迫骨折の力学的評価、高野弘充、第44回日本脊椎脊髄病学会学術集会、2015.4.16-18、福岡国際会議場
- ・有限要素法を用いた椎体圧迫骨折の力学的評価、高野弘充、第88回日本整形外科学会学術集会、2015.5.21-24、神戸ポートピアホテル

論文発表

無し、今後発表予定

## 【研究組織】

研究代表者：順天堂大学医学部整形外科 准教授 米澤郁穂

共著者：九州大学応用力学研究所 准教授 東藤貢、順天堂大学医学部整形外科 高野弘充、九州大学大学院総合理工学府 Muhammad Hazli Mazlan

## 3次元膝関節モデルを用いた人工膝関節の力学的応答解析

愛媛大学医学研究科 三浦裕正

**Introduction**

Mobility at insert-tray articulations in mobile bearing knee implant accommodates lower cross-shear at polyethylene (PE) insert, which in turn reduces wear and delamination as well as decreasing constraint forces at implant-bone interfaces. Though, clinical studies disclosed damage due to wear has occurred at these mobile bearing articulations. The primary goal of this study is to investigate the effect of second articulations bearing mobility and surface friction at insert-tray interfaces to stress states at tibial post during deep flexion motion.

**Method & Analysis**

Figure 1 shows the 3-D computational aided drawing (CAD) model and finite element model (FEM) of implant used in this study. LS-DYNA software was employed to develop the dynamic model. Four conditions of models were tested including fixed bearing, as well as models with coefficients of friction of 0.04, 0.10 and 0.15 at tibial-tray interfaces to represent healthy and with debris appearance (4)(5). A pair of nonlinear springs was positioned both anteriorly and posteriorly to represent ligamentous constraint. The dynamic model was developed to perform position driven motion from 0° to 135° of flexion angle with 0°, 10° and 15° of tibial rotation. The prosthesis components were subjected with deep squatting force from literature (6).

**Results**

Peak values of maximum shear stress for coefficients of friction of 0.04, 0.10, 0.15 and fixed bearing, respectively, are shown in Figure 2. Peak value of maximum shear stress at tibial post of fixed bearing is significantly larger than mobile bearing with tibial rotation. The peak values are 63MPa and 46.7MPa with 10° and 15° tibial rotation respectively for fixed bearing while for mobile bearing the values range from 32MPa to 36.6MPa and from 35.3MPa to 40.6MPa with 10° and 15° tibial rotation respectively. It was found that peak value of maximum shear stress increases with coefficient of friction and tibial rotation. In contrast, with normal rotation, bearing mobility and surface friction do not give any significant effect on the shear stress at tibial post.

**Discussion & Conclusions**

Appearance of second articulations in mobile bearing TKA provides an attribute in reducing force transmission via implant-bone interface which leads to lower shear stress induced in tibial post due to transmitted moment. However, higher surface friction will result in larger frictional force, which in turn induce larger moment at tibial post. Higher conformity will attribute to higher cross-shear level during knee motion. As a result, wear damage at tibiofemoral articular surface of mobile insert become worse.

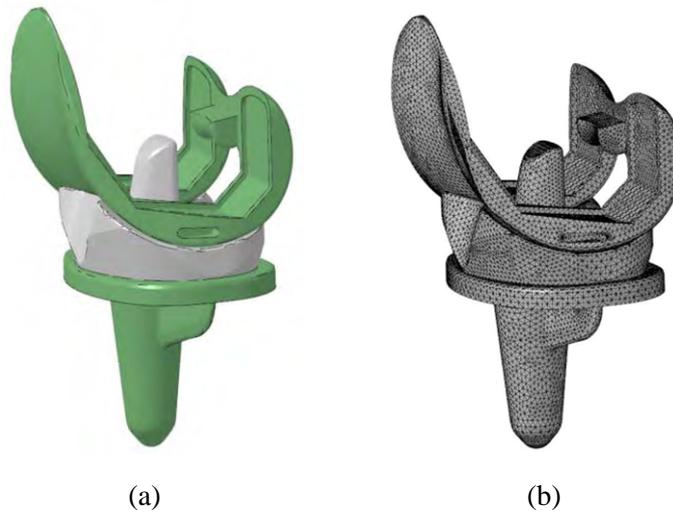


Figure 1 (a) 3-D model (b) Post-meshed model (FEM)

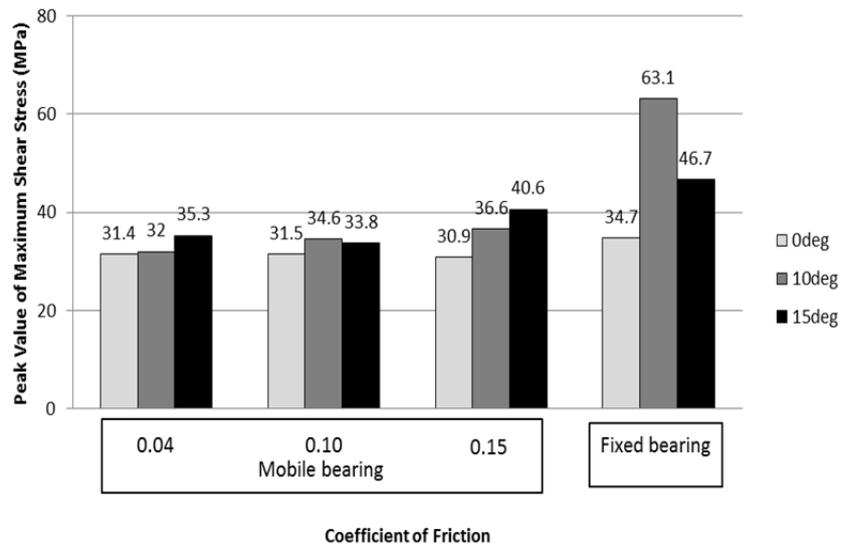


Figure 2 Peak values of maximum shear stress at the tibial post

## ワイドギャップ半導体ダイヤモンド単結晶の大面積化に向けた 結晶成長と結晶構造評価に関する研究

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、Si絶縁破壊電界が高く、キャリア移動度も高いため、非常に高効率の大電力デバイスが実現できる。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、しかしそのためには大面積のダイヤモンド薄膜ウエファーが必要不可欠である。そこで本研究では、大面積化可能な基板材料上にダイヤモンド薄膜単結晶を結晶成長し、その結晶構造評価を行うことにより、結晶成長機構や欠陥導入機構を明らかにし、実現することを目的とした<sup>[1,2]</sup>。

### 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II a 単結晶(不純物<0.1 ppm, 5.4×5.3×0.7 mm<sup>3</sup> (001)面方位)である。この合成単結晶の中には、ほとんど結晶欠陥の見られないものが得られているが[2]、ここでは結晶欠陥の観察のため、欠陥の存在する領域を切り出した。X線トポグラフィー観察は九州シンクロトン光研究センター(SAGA-LS)のビームラインBL09Aで行った。本研究では、透過ラウエ配置により $g = 220$ 等価の四つの回折を観察した。

### 3. 実験結果

図1に $g = 2\bar{2}0$ と $g = 220$ のX線トポグラフィー像とそのスケッチ図を示す。スケッチにおけるB領域とは、(001)成長セクターであり、A、C、D、Eベクトルは(111)成長セクターである。X線トポグラフィー像とスケッチ図で示すように、 $g = 2\bar{2}0$ 条件ではA、B、C領域の転位が visible であるが、D、E領域の転位は invisible であった。また $g = 220$ 条件では、B、D、E領域の転位が visible、A、C領域の転位が invisible であった。これは転位のバーガーズベクトル $b$ と回折ベクトル $g$ との関係が $b \cdot g = 0$ の条件を満たすとき、invisible になるためであり、この関係を用い、各成長セクターの転位のバーガーズベクトルを同定した。

つぎに各領域の転位の方向 $t$ を決定し、バーガーズベクトル $b$ と転位方向 $t$ との関係から、(001)セクターでは、異なるバーガーズベクトルを持つ2種類の刃状転位と混合転位と同定した。また(111)セクターにおいては刃状転位と同定した[3]。

### 4. 結論と今後の課題

高純度タイプII a の HPHT 合成ダイヤモンド単結晶を透過ラウエ配置によりシンクロトン放射光を用いたX線トポグラフィー観察を行い、(001)成長セクターでは異なるバーガーズベクトルを持つ刃状転位と混合転位と同定し、(111)成長セクターにおいて転位は刃状転位とわかった。

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tron光研究センターの川戸清爾博士、石地耕太郎博士に感謝申し上げます。

参考論文

- [1] M. Kasu, M. Kubovic, A. Aleksov, N. Teofilov, Y. Taniyasu, R. Sauer, E. Kohn, T. Makimoto, and N. Kobayashi, *Diamond Relat. Mater.* 13, 226 (2004).
- [2] H. Sumiya, and K. Tamasaku., *Japanese Journal of Applied Physics* 51, 090102 (2012).
- [3] M. Kasu, R. Murakami, S. Masuya, K. Harada, and H. Sumiya, *Applied Physics Express* 7, 125501 (2014)

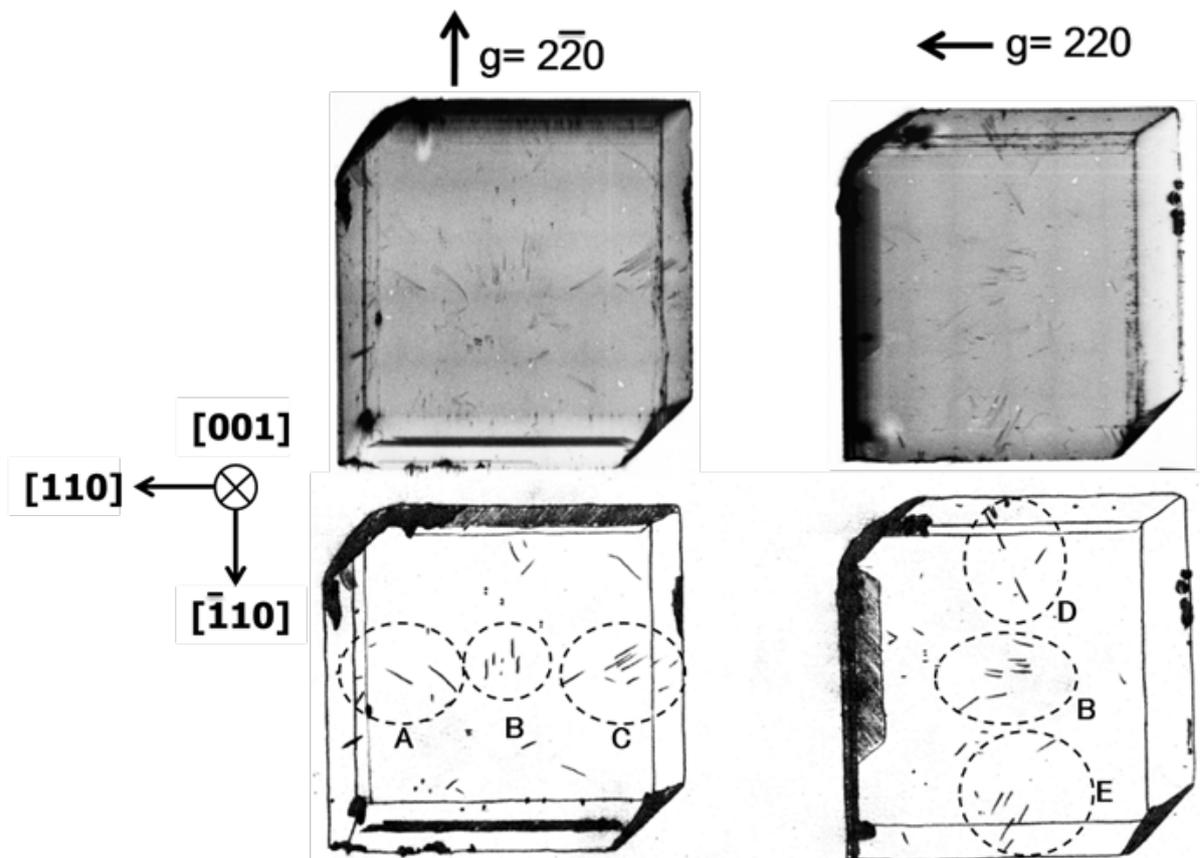


Fig.1 X-ray topography images and its sketches of  $g = 2\bar{2}0$  and  $220$ .

## 翼負荷分布および風レンズ形状が最適化されたレンズ風車の空力性能

九州大学 大学院工学研究院機械工学部門 古川雅人

## 1. 緒言

現在、地球温暖化や資源の枯渇の問題から、環境への負荷が小さい自然エネルギーを利用した発電方法が注目されている。その一つである風力発電は太陽起源の風力エネルギーを利用するため、燃料枯渇の心配がなく、また発電時に二酸化炭素などの温室効果ガスを排出しないという利点を有する。一方で、風力エネルギーはエネルギー密度が小さく、日本など風速や風向が安定しない地域では、効率的に発電できないという問題がある。そのため、これらの問題に対する解決策の一つとして、従来の風車よりも効率的に風力エネルギーを取り出すことができる風車の開発が求められている。

そこで、九州大学では図1に示すレンズ風車を開発した<sup>(1)</sup>。レンズ風車は水平軸型風車にディフューザとつばからなる「風レンズ体」と呼ばれる集風体を取り付けた風車である。風レンズ体内部へ風が流入するとき、つば後方に発生する渦と、ディフューザの曲率に沿って流線が曲げられる効果により、風レンズ体後方に低圧領域が生成される。この低圧領域によって風が風レンズ体内部に引き込まれ、翼車への流入速度が増加する。これを集風効果という。風車の出力は翼車への流入速度の3乗に比例する。そのため、この集風効果により出力を大幅に向上させることができる。

過去の研究において、スパン方向速度分布および負荷分布を考慮可能な準三次元空力設計法を用いて翼車を設計したレンズ風車が最高出力を発揮した<sup>(2)</sup>。過去に設計されたレンズ風車は、風レンズ体形状や翼負荷などの設計パラメータが設計者の経験則に基づいて決定され、翼車が設計されてきた。過去の研究から、翼負荷や風レンズ体形状はレンズ風車まわりの流れ場や出力に大きな影響を与えることが明らかになっている。現在までに百基以上のレンズ風車が設計されてきたが、風レンズ体形状や翼負荷の組み合わせは無限に存在するため、レンズ風車が発揮しうる最大の出力を得るまで十分な数の設計を行えたとはいえない。そのため、翼負荷や風レンズ体形状の最適な組み合わせにより、更なるレンズ風車の性能向上が期待できる。そこで、最適化手法を用いて最適な設計パラメータを生成し、レンズ風車の設計を行うことで、出力を向上させる試みが行われている<sup>(3)(4)</sup>。本研究では、最適化手法を用いて、翼車と風レンズ体が連成して設計されたレンズ風車に対し、大型境界層風洞を用いた実験解析を行った。さらに、過去に最高出力を発揮したレンズ風車と性能および流れ場を比較することにより、最適化手法を用いたレンズ風車の空力設計法を評価した。



Fig. 1 レンズ風車

## 2. 最適化手法

レンズ風車の空力設計に適用された最適化手法は、遺伝的アルゴリズム(以下、GA)と呼ばれる手法である。GAは、世代交代、交叉、および突然変異を繰り返して行い、最適解を求める手法である。図2にGAのフローチャートを示す。最適化手法を適用したレンズ風車の設計法は以下の手順で行う。まず初期条件に基づき風レンズ体形状を決定する。次に、次章で述べる準三次元空力設計法を用いて翼設計を行い、性能を評価する。そしてGAを用いて新たな設計条件を生成して次世代のレンズ風車を設計する。この作業を繰り返すことで最適化を行った。本研究では式(1)に示す局所負荷係数 $\psi$ および風レンズ体形状を最適化し、式(2)に示す出力係数 $C^*_{wmer}$ および式(3)に示す集風効果係数 $K$ を目的関数とした。

$$\psi = \frac{p_1 - p_2}{\rho v_1^2 / 2} \quad (1)$$

$$C^*_{wmer} = \frac{\dot{m} r c_\theta \omega}{\rho A^* V / 2} \quad (2)$$

$$K = \frac{v_1}{V} \quad (3)$$

ここで、 $p_1$ 、 $p_2$ はそれぞれ翼車前後の圧力、 $\rho$ は密度、 $v_1$ は翼車直前の流入速度、 $\dot{m}$ は質量流量、 $r$ は半径、 $c_\theta$ は周方向速度、 $\omega$ は翼車の角速度、 $A^*$ はつば外径に基づくレンズ風車の総受風面積、 $V$ は近寄り風速である。また、局所負荷係数 $\psi$ を次式(4)により空力負荷分布 $rv_\theta$ と関係づけ、設計に適用した。

$$\psi(r) = \frac{2}{v_1^2} \left[ -\omega(rv_\theta) + \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) \right] \quad (4)$$

ここで、 $c_1$ 、 $c_2$ はそれぞれ翼車前後の絶対速度である。

局所負荷係数  $\psi(r)$  および風レンズ体形状の最適化は以下のように行った。局所負荷係数  $\psi(r)$  は図 3 に示すようにスパン方向に固定した 6 点の値を設計変数として最適化を行った。これらを Bezier 曲線により補間することで局所負荷係数分布を得た。風レンズ体形状は図 4 に示すベルマウス高さ、ベルマウス長さ、ディフューザ高さ、ディフューザ長さ、およびつば高さの 5 つを設計変数として最適化を行った。ベルマウスとディフューザの形状はスロート位置を原点とした二次関数で与えており、スロート位置でそれぞれ勾配が 0 となるように設定した。

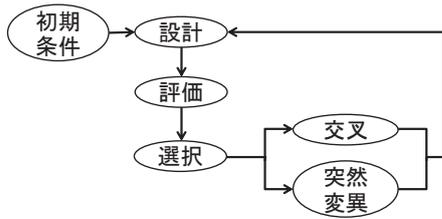


Fig. 2 最適化フローチャート

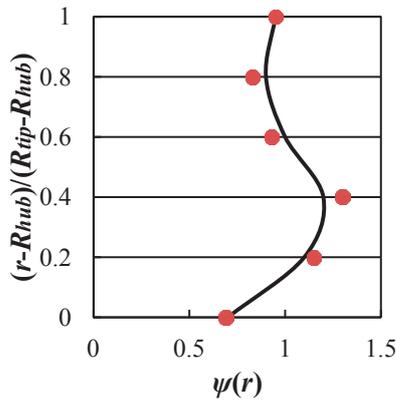


Fig. 3 スパン方向翼負荷分布

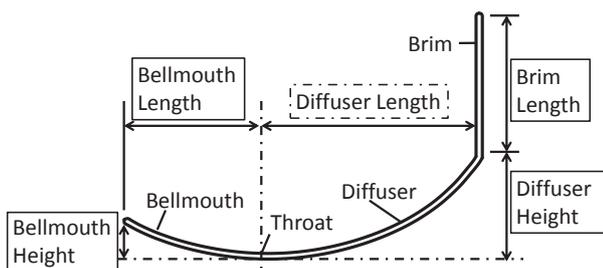


Fig. 4 風レンズ体形状

### 3. 準三次元空力設計法

本研究では準三次元空力設計法を用いて翼車の設計を行った。図 5 に準三次元空力設計法のフローチャートを示す。準三次元空力設計法は主に、翼力を考慮した軸対称子午面粘性流れ解析(以下、子午面流れ解析)過程および二次元翼素理論に基づく翼設計過程の二過程から構成される。まず与えられた設計仕様をもとに子午面流れ解析を行い、スパン方向速度分布を算出する。次にスパン方向速度分布をも

とに翼設計を行い、翼の三次元形状を算出する。軸対称流れを仮定する子午面流れ解析では、翼作用を考慮するために、非粘性の翼作用を翼力(体積力)としてモデル化する。そこで、得られた翼形状をもとに翼力を算出し、この翼力を考慮して再び子午面流れ解析を行って、翼設計過程にフィードバックする。これらの一連の過程を翼形状が収束するまで繰り返し実施する。

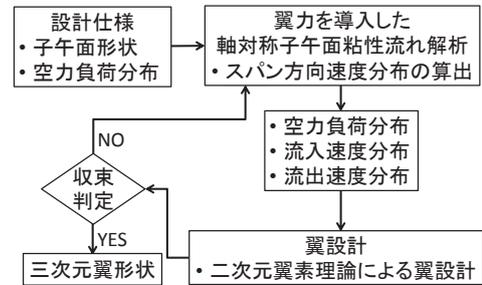


Fig. 5 準三次元空力設計法フローチャート

### 4. 解析対象および設計条件

本研究では、GA を適用した設計法により得られたレンズ風車に対し、実験解析を行って性能を評価し、過去最高出力を発揮したレンズ風車と性能および流れ場を比較した。本研究では、最適化されたレンズ風車を「Opt 風車」、その翼を「Opt 翼」、風レンズ体を「Opt\_lens」と呼称し、比較対象のレンズ風車を「MTVL 風車」、その翼を「MTVL1.2 翼」、風レンズ体を「C-ii」と呼称する。各風車の設計条件について、共通設計仕様を表 1 に、局所負荷係数分布を図 6 に、各風車の風レンズ体形状を図 7 に示す。ここで、翼車は、流入速度が最大になると考えられる風レンズ体のスロート部  $z=0$  の位置に配置される。また、各風車の翼形状を図 8 に示す。

Table1 共通設計仕様

近寄り風速 $V$ [m/s]	10
回転数 $M$ [rpm]	670
ハブ比 $v$ [-]	0.139
周速比 $\lambda$ [-]	3.5
翼枚数	3

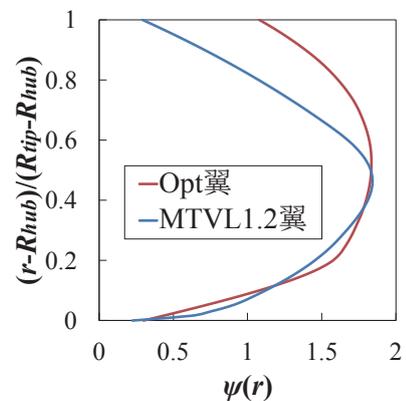


Fig. 6 局所負荷係数分布

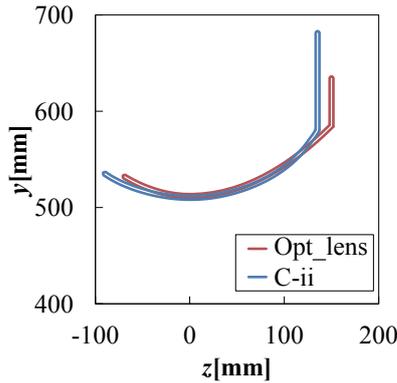


Fig. 7 風レンズ体形状

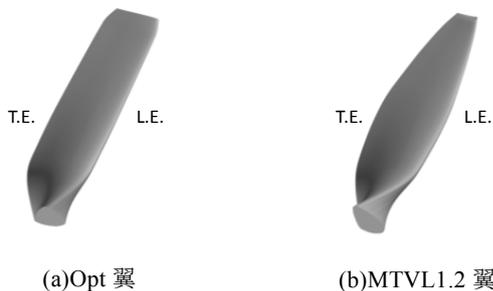


Fig. 8 翼形状

## 5. 実験解析

### 5.1. 実験装置および実験条件

本実験に使用した大型境界層風洞の全体図および実験条件をそれぞれ図9, 表2に示す。本実験において、回転数  $N$  は光学非接触回転計を使用して測定し、AC サーボモータの負荷によって回転数を制御した。また、風車トルク  $T$  はトルク検出器を用いて測定した。なお、トルク計からの信号はトルク変換機とアンプを介し、PCに取り込まれる。流速は熱線流速計により測定し、測定位置はトラバース装置により移動した。熱線流速計からの信号は、PCに取り込み、A/D変換を行って記録した。また、主流速度  $U$  は超音波流速計により測定した。

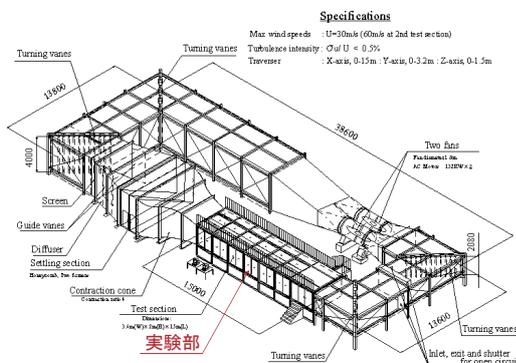


Fig. 9 大型境界層風洞全体図

Table2 実験条件

#### (a) 全体性能測定

解析対象	Opt 風車	MTVL 風車
近寄り風速 $V$ [m/s]	6.0, 8.0	6.0, 8.0
周速比 $\lambda$	2.0-4.5	

#### (b) 流速測定

解析対象	Opt_lens	C-ii
近寄り風速 $V$ [m/s]	8.0	
周速比 $\lambda$	3.5	
測定位置	スロート部	

## 5.2 実験結果

本実験の結果得られた性能特性について、翼車基準の出力係数  $C_W$  の特性曲線を図10に、つば高さ基準の出力係数  $C^*_W$  の特性曲線を図11に示す。また設計周速比  $\lambda=3.5$  付近および最高出力点におけるつば高さ基準の出力係数  $C^*_W$  とそのときの周速比  $\lambda$  を表3に示す。翼車基準の出力係数  $C_W$  およびつば高さ基準の出力係数  $C^*_W$  は次式(4), (5)で定義される。

$$C_W = \frac{W}{\rho V^3 A / 2} = \frac{T \omega}{\rho V^3 A / 2} \quad (4)$$

$$C^*_W = \frac{W}{\rho V^{*3} A^* / 2} = \frac{T \omega}{\rho V^{*3} A^* / 2} \quad (5)$$

ここで  $W$  は風車の出力、 $T$  は風車のトルク、 $\omega$  は風車の回転角速度、 $A$  は翼車外径に基づくレンズ風車の総受風面積である。

図10より、翼車基準の出力を比較すると、Opt風車とMTVL風車の差は小さい。近寄り風速8.0m/sにおける設計周速比での出力を比較すると、Opt風車は  $C_W=0.94$  に対し、MTVL風車は  $C_W=0.98$  であり、4.4%の差である。

さらに、図11より、つば高さ基準の出力を比較すると、全周速比でOpt風車はMTVL風車より高出力であった。前述のようにOpt風車の翼車基準の出力はMTVL風車と同程度であり、また、図7に示すように、Opt\_lensのつば高さはC-iiより小さい。そのため、つば高さ基準でOpt風車の出力はMTVL風車より大きくなった。近寄り風速8.0m/sにおける設計周速比でのつば高さ基準の出力を比較すると、MTVL風車の  $C^*_W=0.53$  に対し、Opt風車は  $C^*_W=0.58$  であり、9.8%増加した。さらにOpt風車の出力の最大値は、近寄り風速6.0m/sにおいてBetz限界0.593を3.9%上回る  $C^*_W=0.62$ 、近寄り風速8.0m/sにおいてBetz限界0.593を1.1%上回る  $C^*_W=0.60$  であった。Betz限界とは翼車単体の風車が發揮しうる出力係数の最大値とされる値である。

また、図10から近寄り風速による出力への影響を比較すると、Opt風車とMTVL風車には以下のような差異があった。MTVL風車は、近寄り風速8.0m/sの場合と比較して、近寄り風速6.0m/sの場合、出力が全周速比で低下した。設計周速比では近寄り風速8.0m/sの場合  $C^*_W=0.53$  に対し、近寄り風速6.0m/sの場合  $C^*_W=0.51$  となり、2.4%出力が低下した。これは、風速が低下したことにより  $Re$  数が減少したためであると考えられる。一方、Opt風車は、近寄り風速8.0m/sの場合と比較して、近寄り風速6.0m/sの場合出力が増加した。設計周速比では近寄り風速8.0m/sの場合

$C^*_{w}=0.58$  に対し、近寄り風速 6.0m/s の場合  $C^*_{w}=0.61$  と 6.2%出力が増加した。これは、実験の際の風レンズ体の振動が原因であると考えられる。Opt 風車の全体性能を測定する際、近寄り風速 8.0m/s の場合、近寄り風速 6.0m/s の場合と比べて風レンズ体が大きく振動した。そのため、風レンズ体内面に翼が接触した跡が確認された。また、風レンズ体が大きく振動することで風レンズ体内部の流れが乱れ、風車の性能に影響したことも考えられる。これらの理由から、Opt 風車では近寄り風速 8.0m/s の出力が近寄り風速 6.0m/s の場合よりも低下したと考えられる。

最後に、風レンズ体単体の性能を比較した。図 12 に、近寄り風速 8.0m/s,  $\lambda=3.5$  での Opt\_lens および C-ii 単体について、スロート部における流速の半径方向分布の測定結果を示す。軸中心からの距離  $r$  および流速  $u$  はそれぞれ風レンズ体のスロート部直径  $D=1020$ [mm], 超音波流速計により測定した主流速度  $U$ [m/s]により無次元化した。図 12 より、C-ii は全体的に Opt\_lens より増速されており、特に風レンズ体の壁面付近で大きく増速された。 $r/D=0.47$  における無次元化された流速  $u/U$  を各風レンズ体で比較すると、Opt\_lens は 1.3 に対して C-ii は 1.6 であった。つまり、集風効果が大きい C-ii は、Opt\_lens より風レンズ体としての性能は優れているといえる。しかし、前述のように、C-ii を用いた MTVL 風車よりも、Opt\_lens と Opt 翼を連成して設計された Opt 風車の出力が大きい。従って、翼車と風レンズ体を連成して設計することで、風レンズ体単体では集風性能が高くなるとも、レンズ風車の出力を増加させることができるといえる。

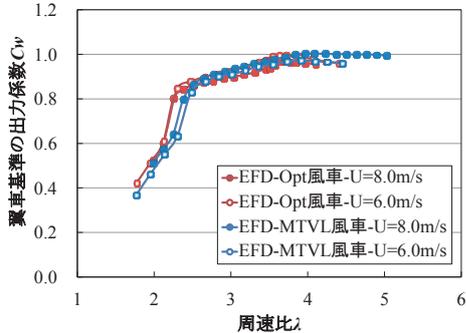


Fig. 10 翼車基準の出力係数に関する特性曲線

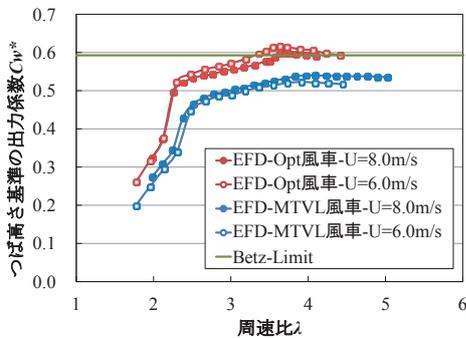


Fig. 11 つば高さ基準の出力係数に関する特性曲線

Table3 Opt 風車および MTVL 風車の出力係数

		U=6.0m/s		U=8.0m/s	
		$C^*_{w}$	$\lambda$	$C^*_{w}$	$\lambda$
Opt 風車	設計周速比	0.61	3.5	0.58	3.5
	最大値	0.62	3.6	0.60	3.7
MTVL 風車	設計周速比	0.51	3.5	0.53	3.6
	最大値	0.52	3.9	0.54	4.1

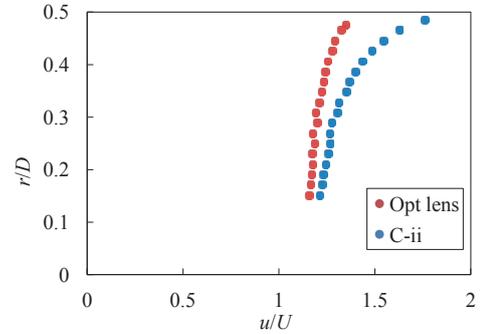


Fig. 12 各風レンズ体単体のスロート部における流速の半径方向分布(近寄り風速 8.0m/s,  $\lambda=3.5$ )

## 6. 結言

本研究では最適化手法を用いて設計されたレンズ風車に対し実験解析を行い、過去に最高出力を得たレンズ風車と性能を比較することにより、最適化手法を用いて設計されたレンズ風車の空力設計法を評価した。その結果、以下の知見を得た。

- 最適化手法を用いて風レンズ体と風車翼を連成して設計されたレンズ風車は、過去最高出力を発揮したレンズ風車より出力が増加し、設計周速比の出力が 9.8% 向上した。
- 最適化手法を用いて設計されたレンズ風車は Betz 限界を最大で 3.9% 超える出力を発揮した。
- 最適化手法を用いて設計されたレンズ風車と過去最高出力を発揮したレンズ風車では、近寄り風速が出力に与える影響に違いがあるが、これは風レンズ体の振動が出力に影響を与えたと考えられる。
- 最適化手法を用いて風レンズ体と風車翼を連成して設計されたレンズ風車は、過去最高出力を発揮したレンズ風車と比較して、風レンズ体単体の集風性能は劣るが、レンズ風車の出力は向上したことから、風レンズ体と風車翼は連成した最適設計法はレンズ風車の性能向上に有用である。

## 7. 参考文献

- (1) Ohya, Y., Karasudani, T., Sakurai, A., Abe, K., and Inoue, M., 2008, "Development of a shrouded wind turbine with a flanged diffuser", Journal of Wind Engineering, Vol.96, pp.524-539.
- (2) Tabata, S., Furukawa, M., Kojima S. and Oka, N., "Aerodynamic Blade Design for Wind-Lens Turbine", Proceedings of the 7th International Conference on Flow Dynamics, pp. 314-315, 2010.

- (3) Nobuhito Oka, Masato Furukawa, Kazutoyo Yamada, Kota Kido, “Aerodynamic Design for Wind-lens Turbine Using Optimization Technique”, Proceedings of the ASME 2013 Fluids Engineering Summer Meeting, ASME Paper No. FEDSM2013-16569, 2013.
- (4) Nobuhito OKA, Masato FURUKAWA, Kazutoyo YAMADA, Kenta KAWAMITSU, Kota KIDO and Akihiro OKA, “Simultaneous Optimization of Rotor Blade and Wind-Lens for Aerodynamic Design of Wind-Lens Turbine”, ASME Paper No. GT2014-25770, 2014.



## LES モデル Riam-Compact とメソ気象モデル WRF による 複雑地形上の局地風解析とその精度検証

東京農工大学農学研究院

辰己 賢一

### 1. 目的

風力・地熱・バイオマスなど各種エネルギー資源の実運用に向けた技術開発は、再生可能エネルギーの積極的導入の機運を背景に、活発に展開されている。特に、風力エネルギーにおいては、その導入量増加予想に伴い、発電装置を効率的に配置し、その性能を客観的に評価する指標作成が求められている。このような背景の下、風力発電の採算性・事業性をより性格に検討するためには、特に地形上における局地風の解析およびその予測を高精度で行える手法の開発が不可欠である。

本研究では、領域気象モデル WRF に LES 機能が融合されている WRF-LES および LES 乱流モデルに基づいた RIAM-COMPACT®(リアムコンパクト)を用い、急峻な 3 次元孤立峰を対象に風況シミュレーションを行い、計算結果の比較を実施した。以上により、各種 LES ソフトウェアの風況評価に資する環境の構築と実環境への適用に向けた技術向上を本研究の目的とした。

### 2. 計算方法・設定

本研究では、RIAM-COMPACT®および WRF-LES を用い、数値風況シミュレーションを実施した。WRF-LES の乱流オプションは、1.5 次 TKE クロージャ、Smagorinsky first order クロージャなど複数のオプションが用意されている。WRF-LES に関する数値計算手法および設定に関する詳細は文献<sup>1)</sup>を参照されたい。また、RIAM-COMPACT®における計算格子セルおよび計算仕様などについては、文献<sup>2)</sup>を参照されたい。表 1 に本研究で用いた RIAM-COMPACT®と WRF-LES における数値計算手法および計算パラメータの概要を示す。

表 1 RIAM-COMPACT®t および WRF-LES による計算条件の比較

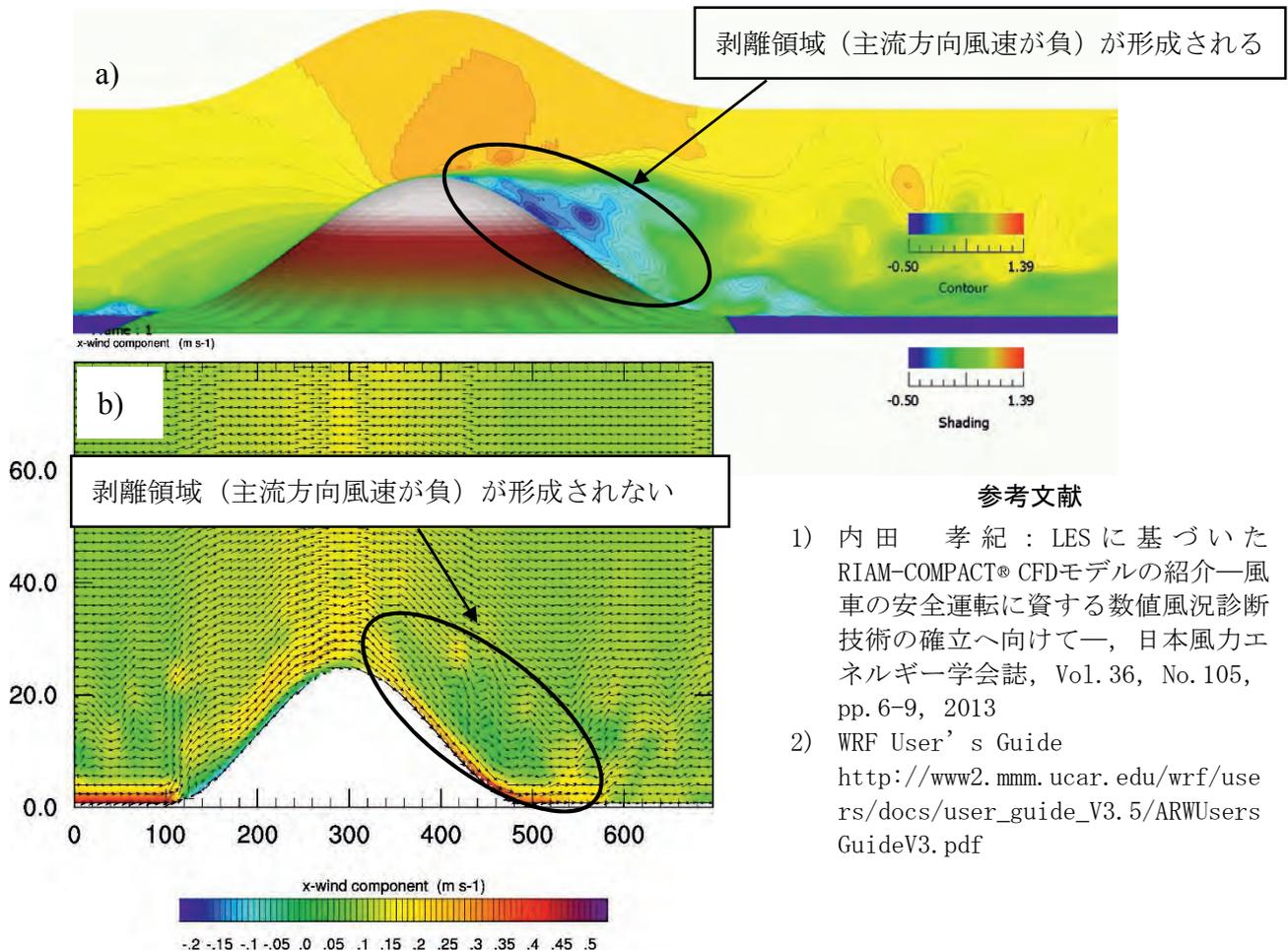
CFDモデル	RIAM-COMPACT®	WRF-LES
乱流モデル	標準Smagorinsky LESモデル	2 <sup>nd</sup> order diffusion term with constant horizontal and vertical diffusion(=0.05)
大気成層(大気安定度)	中立大気	中立大気(相当温位=300Kで固定)
コリオリ力	考慮していない	
地表面の粗度	考慮していない(滑面)	Non-vegetation dependent thermal roughness length over land
地表面の境界条件	粘着条件 (風速3成分ともにゼロとする)	
孤立峰の形状関数z(r)	$0.5h \times \{1 + \cos(\pi r/a)\}$ 但し、 $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$ , $a = 2h$	
孤立峰の高さh	100 (m)	300 (m)
レイノルズ数 $Re(=U_{in}h/\nu)$	$10^6$	$10^5$
時間刻み $\Delta t$	$10^{-5}h/U_{in}$ (s)	$2 \times 10^{-3}$

表 1 つづき

計算領域サイズ	19h (i) × 18h (j) × 8h (k)	7000 × 200 × 810 (m)
計算格子数	436 (i) × 325 (j) × 101 (k) 点 (約1,430万点)	700 (i) × 20 (j) × 81 (k) 点 (約116万点)
主流方向(x)の格子サイズ(Δx)	(0.035~0.5)×h	10 (m)
主流直交方向(y)の格子サイズ(Δy)		
鉛直方向(z)の格子サイズ(Δz)	(0.0001~0.6)×h	10 (m)

### 3. 結果および考察

図 1 に、RIAM-COMPACT®にスパン中央における主流方向の風速(無次元量)の分布(a)、WRF-LES によるスパン中央における主流方向の風速分布(b)を示す。RIAM-COMPACT® (Re=10<sup>6</sup>)の結果では、孤立峰の背後に逆流領域(渦領域)が形成される結果が得られた。一方、WRF-LES の結果では、渦領域は形成されず、重力流のような風状パターンが得られた。このことから、工学分野の LES モデル(RIAM-COMPACT®), 理学分野の LES モデル(WRF-LES)から得られた結果は、流れパターンに明確な差を生んでいる可能性が示唆された。これらの風況パターンの差異は、建物や大気放射などの取り扱いにより引き起こされていることが考えられる。これらの結果を踏まえ、今後はより詳細な感度実験を実施していく予定である。



#### 参考文献

- 1) 内田 孝紀：LESに基づいたRIAM-COMPACT® CFDモデルの紹介—風車の安全運転に資する数値風況診断技術の確立へ向けて—, 日本風力エネルギー学会誌, Vol. 36, No. 105, pp. 6-9, 2013
- 2) WRF User's Guide  
[http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user\\_guide\\_V3.5/ARWUsersGuideV3.pdf](http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3.5/ARWUsersGuideV3.pdf)

### ● 研究の背景・目的

太陽熱と風力エネルギーを利用した発電方法としてソーラーアップドラフトタワー(以下、ソーラータワー)が開発されている。ソーラータワーは、太陽放射によって加熱された地表面が熱源となり、地面を覆うカバーとの間(コレクター部)の空気を温める。コレクター部内の温められた空気と外部の空気との密度差によって、コレクター部の中央に設置された円筒形タワー内に上昇気流が発生する。この時、タワー下部に風力タービンを設置し、発電を行う。上昇気流の持つ運動エネルギー量が発電量に直結しているため、上昇気流の風速の大きさは本システムを開発する上で重要な要素である。

本研究では、ソーラータワーの熱源として地熱エネルギーを利用する新たなシステムの開発を目指している。そのための基礎的研究として、熱水を熱源として用いるソーラータワーの小型模型を作製し、室内実験によりソーラータワーへの地熱エネルギーの利用可能性を検討する。実験では、タワー内の風速 $v$ と(コレクター部温度-外気温)/(コレクター部温度)で表される無次元温度  $T$  との関係性を求め、上昇気流の発生の有無、熱源温度が上昇気流速度に及ぼす影響を明らかにすることを目的としている。

### ● 実験装置

実験装置は上昇気流発生のための熱源として熱水を直接利用するオープンシステムとなっており、タワー、熱水タンク、ヒーター、熱源となる熱水を貯留する円筒型プール、ポンプ、風速計、温度計、熱水流量測定装置によって構成されている。タワーは、高さ 2m、開き角  $4^\circ$  のディフューザー型である(本山、2014)。プールは二重構造になっており、内側および外側のプールの直径はそれぞれ 600mm、700mm で、タワー下部に設置されている。タンクから内側のプールへ熱水をポンプによって揚水し、内側のプールから外側のプールへ越流する。熱水は外側のプールにある二つの排出口から自然流下でタンクに戻り、タンクとプール間を循環する。本研究ではタワーとプールの間をコレクター部と呼ぶ。

### ● 実験方法

タンク内の水道水をヒーターで加熱した。タンクからプールへ流量 6L/min で熱水を揚水し、プール内の熱水温度を目標温度(50℃、60℃、70℃、80℃、90℃)に安定させた。その後、外気温、プール内の熱水温度(熱源温度)、プール水面から 20mm の高さの温度(コレクター部温度)、プール水面から 380mm の高さの風速(タワー内風速 $v$ )を 10 分間測定した。

### ● 実験結果および考察

$v$  と  $T$  の測定結果を平均化し、風速と無次元温度の関係を求めた。この時、熱源の温度が安定していてもコレクター部温度、風速の測定値安定しないため、これらの値について 10 分間平均を求めて用いた。

タワーがない状態で熱源温度 61.8℃の条件で風速を測定したところ、平均風速は 0.445m/s が得られた。同様の条件でタワーを設置した場合、平均風速 1.16m/s であった。このことから熱水を熱源とした場合でもタワー内に上昇気流が発生することを確認した。

熱源の温度上昇とともに  $T$  は大きくなり、それに伴って  $v$  も大きくなる傾向を示した。 $v$  と  $T$  の関係は次式で近似される。

$$v = 10.5T^{0.547} \quad (1)$$

熱源温度を高くすると大きな風速を得ることができるが、タンク内の熱水温度の上限は  $95^{\circ}\text{C}$  である。そのとき、熱源温度は  $85.2^{\circ}\text{C}$  ともっとも高い温度で安定し、コレクター部温度は  $27.8^{\circ}\text{C}$ 、風速は  $1.84\text{m/s}$  であった。しかし、熱源温度の上昇につれて、風速の測定値のばらつきが顕著になり、上記の測定条件の場合がもっともばらつきが見られた。

- 結論

1. 熱水を熱源とした場合もタワー内に上昇気流の発生を確認できた。
2. 熱源温度が高いほどタワー内風速が大きくなった。また、風速と熱源温度を表す無次元温度との関係を近似式で表示した。

- 成果報告

なし

## 26 ME-S1

### 第7回九大グラフェン研究会（主催：応用力学研究所（26ME-S1）） 「グラフェン研究の最前線」

日時：2015年2月10日（火）13:00 - 17:30

場所：応用力学研究所 W601

1. 13:00~13:05

はじめに 九大院工 田中 悟

2. 13:05~13:35 (30分)

九大先導研 吾郷 浩樹 准教授

「エピタキシャル銅系触媒上でのグラフェンの成長ダイナミクスと層数制御」

銅を触媒として用いる CVD 法は、大面積の単層グラフェンを合成する有望な方法として活発に検討されている。我々は、サファイア基板上に堆積させた Cu(111)を用いた CVD により、単層グラフェンを六員環の方位を揃えて成長できることを明らかにしているが、銅の融点に近い温度で起こるグラフェンの成長のダイナミクスは興味深い。本講演では、この成長メカニズムに関する最近の研究結果とともに、トランジスタへの応用が期待される二層グラフェンの選択成長法の開発について紹介する。

3. 13:35~14:05 (30分)

NTT 基礎研 日比野 浩樹 氏

「CVD グラフェンの結晶粒界の可視化と界面制御による機能化」

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。

4. 14:15~14:45 (30分)

NTT 基礎研 佐々木 健一 氏

「グラフェンにおけるバレー反対称ポテンシャルの理論」

グラフェンに時間依存性を持つストレインが加えられたとき、電子状態に時間に依存するポテンシャルが生じることを示したので報告する。このポテンシャルはK点とK'点で符号が反対であり、バレー反対称なものである。バレー反対称ポテンシャルがラマン分光や伝導特性に与える影響を議論する。

5. 14:45~15:15 (30分)

宇部高専 碓 智徳 准教授

「グラフェン/SiC表面の酸化による電子状態変化」

6H-SiC(0001)表面を基板加熱することでグラフェンを形成した表面に対して、低曝露量の酸素を導入した。ここでは、酸素吸着初期過程における最表面電子状態を準安定原子誘起電子分光法をもちいて観測した。また、表面酸化を促進するために触媒として、アルカリ金属を用いた結果についても報告する。

6. 15:15~15:45 (30分)

島根大学院工 影島 博之 教授

「SiC上エピタキシャルグラフェン形成機構と制御指針」

SiC上のエピタキシャルグラフェン成長について、(0001)Si面での形成機構の理論検討を様々な角度から行ってきた。その結果を総合すると、ステップ端が核形成サイトとなっており、高密度なステップ端の原因となる表面のあれがグラフェンのドメインサイズを低下させる原因となる。表面のあれはステップの安定性と関係があり、温度やSi分圧、グラフェン層の厚さによってステップの安定性は左右される。このため、ステップの安定性の制御を通じて、形成されるグラフェンの品質制御が可能となっていることがわかった。

7. 16:00~16:30 (30分)

九大院工 梶原 隆次/田中 悟

「SiC ファセット上の擬1次元グラフェン構造」

グラフェン1次元構造は特異なエッジ状態の理論予測を契機とし、応用へ向けたバンドギャップ付与や電子伝導特性などから近年重要性を増している。我々は1次元構造実現のため、周期的なSiCナノ表面構造に着目し、様々な形態のナノ構造の形成・物性評価を行っている。本講演では代表的な1次元構造であるナノリボンの形成および電子物性について述べ、更に最近見出したSiC高指数面上の擬1次元の周期的リップル構造および0次元構造であるナノディスクについて解説を行う。

8. 16:30~17:00 (30分)

筑波大院物質科学 神田 晶申 准教授

「SiC上グラフェンの伝導測定」

九大田中グループで合成された、SiC傾斜基板上グラフェンの電気伝導特性について報告する。ファセットに沿った伝導特性は半導体的な振る舞いを示し、その活性化エネルギーは10meV前後であった。一方、ファセットに垂直な伝導は無かったことから、テラス上ではグラフェンが繋がっていないと推測される。

9. 17:00~17:30 (30分)

東大物性研 小森 文夫 教授

「SiC 巨大ファセット上のグラフェンの $\pi$ バンドおよびSTM観察」

SiC (0001) 基板の約25度傾斜した巨大ファセット上に熱分解によって作製された単層グラフェンの構造と電子状態を調べた。STM観察により、このグラフェンは周期2.5nmで一次的に変形していることが明らかになり、その変形の振幅は0.1nm程度である。ARPES測定によってその占有状態バンド構造を調べると、このグラフェンのディラック点は、フェルミエネルギー以下0.1eV程度にあることがわかった。これは、SiC (0001) テラス上のグラフェンと比べて、SiC基板からの電子ドープ量が少ないことを意味する。一次的な変形振幅が小さいことと合わせた考察から、このグラフェンはファセット基板には接していないと結論した。

---

---

## 九州大学応用力学研究所

〒816-8580 福岡県春日市春日公園6丁目1番地  
連絡先 九州大学応用力学研究所事務室

電 話 092-583-7702  
F A X 092-583-7701

---

---





