共同利用研究成果報告 第20号



平成 28 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 20 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,2016 年度も特定研究 28 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,2017 年 6 月 1 日-2 日に開催される「RIAM フォーラム 2017」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2016年度は11件行われ,それぞれについてまとめられています。2011年度から実施されている国外在住の外国人研究者が代表者となる国際化推進共同研究は、20件が実施され、研究所の国際化に大いに貢献しています。この中で国際ワークショップが3件開催され、国内外の研究者による活発な議論が行われました。

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。

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。

> 2017年3月 九州大学応用力学研究所 所長 花田 和明

平成28年度 共同研究一覧(目次)

地球環境力学分野					
No.		研究課題	代表者名	所内世話人 協力者数	頁
特定研究 1					
—	雲 リ:	 ・エアロゾルの物理特性導出のための衛星観測・モデ ングデータ解析手法の高度化 	統括責任者 岡本 創		
28特1-1		地上からのウィンドプロファイラレーダ観測による 衛星搭載雲レーダの検証	情報通信研究機構 山本 真之	岡本 1名	1
28特1-2		衛星観測を用いたエアロゾル気候モデルの雲微物理 過程の検証	東京大学 鈴木 健太郎	竹村 俊彦 3名	3
28特1-3	サブテ	衛星搭載ライダCALIOPと雲レーダCloudSatとひまわり8号によるオーバーシュートの同期観測	防衛大学校 岩崎 杉紀	岡本 1名	5
28特1-4	 	静止気象衛星データと地球観測衛星データを複合的 に利用した氷雲の解析	気象庁気象研究所 石元 裕史	岡本 創 2名	7
28特1-5		地上・衛星ライダーデータを用いたエアロゾル光学 特性データセットの構築に関する観測的研究	国立環境研究所 西澤 智明	岡本 創 2名	9
28特1-6		CloudSat/CALIPS0雲特性プロダクトの高度化に向け た全球規模気候学的解析	長崎大学 河本 和明	岡本 創 3名	11
一般研究					
28A0- 1	若狂	決湾における水温急変現象に関する研究	福井県立大学 兼田 淳史	千手 智晴 3名	13
28A0- 2	PM2 に目	2.5エアロゾル濃度変動に関わるNH3/NH4+の動態解明 関する研究	名古屋大学 長田 和雄	鵜野 伊津志 2名	15
28A0- 3	海 注 テ・	羊環境モニタリングのための群知能海中ロボットシス ムの研究開発	大阪府立大学 有馬 正和	中村 昌彦 3名	17
28A0- 4	水	中ビークル運用のための装備に関する研究	長崎大学 森井 康宏	中村 昌彦 8名	19
28A0- 5	富」 測ル	山湾におけるブリの回遊メカニズムと漁獲量中短期予 こ関する研究	石川県水産総合センター 辻 俊宏	広瀬 直毅 3名	21
28A0- 6	船(計)	本に取り付けたサテライトコンパスによる外洋波浪の 則手法開発とGNSS反射信号との対応関係	神戸大学 河口 信義	市川 香 5名	23
28A0- 7	GNS 証筆	SS反射波観測用受信機の開発とマルチコプタによる実 実験	中部大学 海老沼 拓史	市川 香 1名	25
28A0- 8	沿卢	岸波浪とGNSS反射信号との対応関係の観測	京都大学 根田 昌典	市川 香 1名	27
28A0- 9	内部	部波特有の共鳴現象に関する解析	神戸大学 中山 恵介	迁 英一 2名	29
28A0- 10	化 ⁴ の?	学輸送モデルを用いた越境汚染に伴う大気から海洋へ 汚染質と黄砂の沈着過程の研究	電力中央研究所 板橋 秀一	鵜野 伊津志 4名	31
28A0- 11	淀り構め	汽水域における海洋性植物プランクトン赤潮発生機 の解明	神戸大学 林 美鶴	松野 健 3名	33
28A0- 12	海ī	面境界過程の観測	京都大学 吉川 裕	松野 健 3名	47
28A0- 13	海洋	ーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーー	北海道大学 水田 元太	磯辺 篤彦 16名	51
28A0- 14	能	登半島周辺海域における流況と漁況の関係性	石川県水産総合センター 原田 浩太朗	千手 智晴 3名	53
28A0- 15	対馬ンジ	馬海峡から山口県山陰沖にかけての海洋環境モニタリ グ	水産大学校 滝川 哲太郎	千手 智晴 4名	55
28A0- 16	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	57

28A0- 17	日本沿岸域における高解像度塩分動的マップの作成手法の開発	神戸大学 中田 聡史	千手 智晴 2名	59
28A0- 18	GNSS反射信号による海面高度算出手法の開発	リモート・センシンク 技術センター 磯口 治	市川 香 1名	62
28A0- 19	海洋レーダを用いた日向灘表層流の試験観測	宮崎県水産試験場 渡慶次 力	広瀬 直毅 7名	66
28A0- 20	GNSS反射信号を用いた海氷観測手法の開発	東京大学 木村 詞明	市川 香 1名	68
28A0- 21	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	71
28A0- 22	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 7名	73
28A0- 23	インド亜大陸東北部における大気鉛直構造の解明	東京大学 木口 雅司	江口 菜穂 3名	74
28A0- 24	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 2名	77
28A0- 25	バイスタティック海洋レーダによる対馬暖流観測	愛媛大学 森本 昭彦	市川 香 2名	79
28A0- 26	観測塔と飛翔体を利用した波浪及び水面計測	東京大学 早稲田 卓爾	市川 香 7名	81
28A0- 27	マルチコプターを用いた海上気象の観測	名古屋大学 富田 裕之	市川 香 1名	82
28A0- 28	高精度容量式波高計による海表面計測システムの開発	港湾空港技術研究所 田村 仁	市川 香 1名	84
28A0- 29	波浪境界層中間LESモデルの開発にむけた基礎データ取 得のための風洞水槽実験	名古屋大学 相木 秀則	磯辺 篤彦 1名	86

核融合力学分野						
No.		研究課題	代表者名	所内世話人 協力者数	頁	
特定研究 2						
	極降	艮プラズマ科学の新研究手法の開発	統括責任者 藤澤 彰英			
28特2-1		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 3名	116	
28特2-2		イメージング計測を用いたプラズマ乱流のメゾス ケール構造の解析手法の開発	核融合科学研究所 大舘 暁	稻垣 滋 2名	118	
28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	高知工業高等専門学校 谷澤 俊弘	糟谷 直宏 2名	121	
28特2- 4	サ	医療用CTにおける画像再構成手法のプラズマ乱流計 測への応用	帝京大学 荒川 弘之	佐々木 真 4名	123	
28特2- 5	ブ	マイクロ波計測器から得られる大規模データを用い た乱流プラズマの特性抽出法の開発	核融合科学研究所 徳沢 季彦	稲垣 滋 2名	125	
28特2- 6	テ	プラズマ流れ場構造観測に関する統合的研究	核融合科学研究所 居田 克巳	稻垣 滋 2名	127	
28特2-7	1	デジタル相関ECE計測の開発とプラズマ実験への適用	核融合科学研究所 土屋 隼人	稲垣 滋 1名	130	
28特2-8	2	振幅変調反応性高周波放電中のナノ粒子量のエンベ ロープ解析	九州大学 古閑 一憲	稻垣 滋 2名	132	
28特2-9		極限プラズマ科学研究会	九州大学 稻垣 滋	藤澤 彰英 22名	134	
28特2-10		直線ヘリコンプラズマにおける径方向構造のトムソ ン散乱計測	九州大学 富田 健太郎	稻垣 滋 2名	136	
28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	九州大学 山田 琢磨	稲垣 滋 3名	146	

28特2-12	サ バイスペクトル解析による電子温度勾配モードと低 ブ 周波揺動の非線形結合過渡応答特性解明	東北大学 金子 俊郎	稻垣 滋 4名	148
28特2-13	 1 直線プラズマ装置PANTAにおける音速分子ビーム入 マ 射軌道の観測 	核融合科学研究所 小林 達哉	佐々木 真 2名	150
一般研究	•	•		•
28FP- 1	統合輸送コードに導入するための電磁的ジャイロ運動論 解析を用いた輸送係数のモデリング	核融合科学研究所 登田 慎一郎	糟谷 直宏 4名	152
28FP- 2	QUESTにおけるオーミックとRF加熱を用いたプラズマ電 流立ち上げ実験	東海大学 御手洗 修	中村 一男 2名	154
28FP- 3	プラズマ乱流と磁場平行流れ場の相互作用に関する研究	九州大学 小菅 佑輔	佐々木 真 2名	156
28FP- 4	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	大澤 一人 3名	158
28FP- 5	LHDへリウム長時間放電に曝露されたタングステン表面 の構造解析	核融合科学研究所 時谷 政行	渡辺 英雄 2名	160
28FP- 6	ジャイロ流体モデルによる直線装置PANTAにおけるITG モードの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	162
28FP- 7	タングステン中の二原子空孔の安定性に関する研究	日本原子力研究開発機構 山口 正剛	大澤 一人 1名	164
28FP- 8	収差補正機能付き分析電子顕微鏡による構造材料の高精 度定量分析	若狭湾エネルギー研究 センター 安永 和史	渡辺 英雄 1名	166
28FP- 9	プラズマ乱流における非線形時系列データの統計解析	富山大学 成行 泰裕	佐々木 真 2名	168
28FP- 10	プラズマに対向した堆積層の動的水素リテンションに関 する研究	京都大学 高木 郁二	花田 和明 6名	171
28FP- 11	QUEST装置周辺プラズマに対する粒子リサイクリングと 衝突輻射モデルの構築	慶應義塾大学 畑山 明聖	花田 和明 4名	174
28FP- 12	Fe-MnおよびFe-Niモデル合金における照射硬化促進機構 の解明	京都大学 木村 晃彦	渡辺 英雄 3名	177
28FP- 13	タングステン合金の熱負荷特性に及ぼす添加元素の影響	京都大学 徐 虬	徳永 和俊 2名	179
28FP- 14	磁化プラズマの流体シミュレーション	神戸市立工業高等専門学校 西村 征也	糟谷 直宏 1名	181
28FP- 15	水素プラズマスパッタ法で形成される多孔質金属膜への 水素混入と反跳水素の寄与	九州大学 片山 一成	渡辺 英雄 4名	183
28FP- 16	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ックス	静岡大学 大矢 恭久	渡辺 英雄 7名	185
28FP- 17	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	187
28FP- 18	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	189
28FP- 19	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	191
28FP- 20	分光反射率測定を用いたプラズマ対向材料の表面診断	島根大学 宮本 光貴	渡辺 英雄 4名	193
28FP- 21	ジルコニウム合金燃料被覆管腐食材におけるニオブ析出 物の結晶構造及び電子状態分析	東北大学 松川 義孝	渡辺 英雄 1名	195
28FP- 22	多層グラフェン膜を用いた燃料電池用水素供給源の開発	名城大学 土屋 文	徳永 和俊 1名	197
28FP- 23	不純物イオン発光線の高波長分解分光によるQUEST周辺 プラズマのトロイダル流れ計測	京都大学 四竈 泰一	花田 和明 6名	199
28FP- 24	金属材料における格子欠陥と水素原子の相互作用の検出 法に関する研究	鹿児島大学 佐藤 紘一	渡辺 英雄 3名	201
28FP- 25	機械的合金化と高温等方加圧によるナノ粒子分散強化銅 合金の微細構造における高エネルギーイオン照射の影響	核融合科学研究所 室賀 健夫	渡辺 英雄 4名	203
28FP- 26	先進ブランケットを指向した酸化物絶縁被覆材の微細構 造における高エネルギーイオン照射の影響	核融合科学研究所 菱沼 良光	渡辺 英雄 4名	205
28FP- 27	粒内ベイナイトからなる鉄鋼材料の中性子照射後微細組 織	愛媛大学 阪本 辰顕	渡辺 英雄 2名	207

28FP- 28	乱流輸送シミュレーションにおける計測シミュレータを 利用した系統的なValidation解析法の確立	核融合科学研究所 沼波 政倫	糟谷 直宏 3名	209
28FP- 29	鉄系合金の電磁気特性と照射ナノ組織の関係	岩手大学 鎌田 康寛	渡辺 英雄 3名	211
28FP- 30	大規模シミュレーションによるMHD不安定性の3次元構造 解析	核融合科学研究所 佐藤 雅彦	糟谷 直宏 1名	213
28FP- 31	高Ni鋼材料の微細組織安定性に関する研究	日本原子力研究開発機構 井上 利彦	渡辺 英雄 1名	215
28FP- 32	低エネルギーヘリウムプラズマ照射によるナノブリス ターの形成機構	九州大学 吉田 直亮	渡辺 英雄 4名	216
28FP- 33	プラズマ乱流における非線形伝搬と、局地集中豪雨の統 計解析への応用の研究	中部大学 杉田 暁	佐々木 真 1名	219
28FP- 34	酸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	221
28FP- 36	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 8名	223
28FP- 37	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 おける非局所性に関する包括的研究	核融合科学研究所 田村 直樹	稲垣 滋 9名	225
28FP- 38	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 3名	227
28FP- 39	オーステナイト系ステンレス鋼のイオン照射試験および 照射特性評価	(株)日立製作所 丸野 祐策 王 昀	渡辺 英雄 5名	229
28FP- 40	プラズマ輸送理論	核融合科学研究所 伊藤 公孝	稲垣 滋 15名	233

新エネルギー力学分野						
No.		研究課題	代表者名	所内世話人 協力者数	頁	
特定研究 3						
	再生	主可能エネルギーの大規模導入技術に関する研究	統括責任者 吉田 茂雄			
28特3-1		再生可能エネルギー発電のKW価値と系統影響の評価	東京理科大学 近藤 潤次	吉田 茂雄 1名	242	
28特3-2		風力発電の電力系統瞬時電圧低下時の制御手法の開 発	愛知工業大学 雪田 和人	吉田 茂雄 3名	244	
28特3-4		マルチカラム型波力発電装置MC-OWCのエネルギー変換性能に関する研究	九州大学 安澤 幸隆	吉田 茂雄 2名	247	
28特3- 5	サブテ	高空の風力利用についての研究	首都大学東京 藤井 裕矩	新川 和夫 16名	248	
28特3- 6	 	三角翼バタフライ風車の開発研究および流体構造連 成解析	鳥取大学 原 豊	吉田 茂雄 5名	253	
28特3- 7		ガウス関数を用いた水平軸風車後流速度分布の表現	三重大学 前田 太佳夫	吉田 茂雄 5名	255	
28特3- 8		張架式風力発電装置の開発	福岡大学 江崎 丈巳	烏谷 隆 1名	257	
28特3-9		新しい発想による風力発電の研究	首都大学東京 藤井 裕矩	吉田 茂雄 28名	259	
一般研究						
28ME- 1	0pe の打	enFOAMによる風車ウエイクの数値風況解析と気流性状 巴握	東京大学 加藤 千幸	内田 孝紀 3名	265	
28ME- 2	レン		鹿児島高専 小田原 悟	烏谷 隆 4名	268	
28ME- 3	垂ī	直軸風車のエネルギーハーベスティングへの応用研究	鳥取大学 原 豊	吉田 茂雄 5名	270	

28ME- 4	八代海の潮流場に及ぼす長島海峡での潮流エネルギー抽 出の影響について	鹿児島大学 山城 徹	胡 長洪 3名	272
28ME- 5	洋上発電機器開発のための材料強度評価	琉球大学 真壁 朝敏	新川 和夫 2名	274
28ME- 6	波浪中浮体の圧力場の面分布計測技術に関する研究	広島大学 岩下 英嗣	胡 長洪 3名	287
28ME- 7	高効率輸送のための地面効果翼機の翼空力に関する研究	広島大学 岩下 英嗣	大屋 裕二 3名	293
28ME- 8	OVPE成長条件下における安定なGaN(0001)表面構造の検 討	三重大学 河村 貴宏	柿本 浩一 2名	299
28ME- 9	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 4名	301
28ME- 10	血管内治療用カテーテルにおける耐久性と操作性の検証	九州大学 松本 拓也	東藤 貢 4名	305
28ME- 11	CT-FEMを用いた大腿骨頭壊死症による骨頭圧潰メカニズ ムの解明	横浜市立大学 稲葉 裕	東藤 貢 3名	308
28ME- 12	CT-FEMを用いた腱板腱骨付着部のバイオメカニクス解析	久留米大学 金澤 知之進	東藤 貢 2名	311
28ME- 13	CT-FEMを用いた人工股関節置換術後の大腿骨折のバイオ メカニクス的検討	九州大学 中島 康晴	東藤 貢 1名	312
28ME- 14	3Dプリンターを利用した骨再生用多孔質足場材料の開発	大阪大学 名井 陽	東藤 貢 3名	316
28ME- 15	骨粗鬆化脊椎における骨損傷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	318
28ME- 16	歯根膜における3次元超微形態およびバイオメカニクス 解析	久留米大学 中村 桂一郎	東藤 貢 4名	320
28ME- 17	金属フタロシアニンを吸着したグラファイト表面におけ る電子状態の観測	宇部工業高等専門学校 碇 智徳	寒川 義裕 1名	322
28ME- 18	ダイヤモンドおよび酸化ガリウム半導体結晶の欠陥構造 の解明と電力素子特性との関連に関する研究	佐賀大学 嘉数 誠	柿本 浩一 9名	324
28ME- 19	レーザドップラ流速計を用いた風車翼近傍流れの計測	三重大学 前田 太佳夫	吉田 茂雄 4名	326
28ME- 20	ドップラーライダを用いた水平軸風車の制御	三重大学 前田 太佳夫	吉田 茂雄 5名	328
28ME- 21	AIN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 2名	330
28ME- 22	浮体式洋上風力発電システムのモデル予測制御による出 力変動と浮体動揺の安定化	大阪府立大学 涌井 徹也	吉田 茂雄 3名	332
28ME- 23	風レンズ風車用の炭素繊維強化複合材 (CFRP)の衝撃圧縮 特性の負荷方向依存性	岡山理科大学 中井 賢治	新川 和夫 2名	334
28ME- 24	風力エネルギーの効率的利用に資するメソ気象モデルに よる局所風況場の再現・予測特性に関する研究	東京農工大学 辰己 賢一	内田 孝紀 2名	338
28ME- 25	多層接結構造を有する多次元カーボン織物複合材料の開 発	信州大学 倪 慶清	汪 文学1名	340
28ME- 26	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	342
28ME- 27	3D造形を用いたテーラーメイドの骨造成法に関する研究	九州大学 松下 恭之	東藤 貢 2名	344
28ME- 28	極低レイノルズ数翼の革新的空力特性向上の為の基礎研 究	同志社大学 平田 勝哉	内田 孝紀 3名	346

平成28年度 研究集会一覧(目次)

地球環境力学分野						
No.	研究課題	代表者名	所内世話人 講演数・参加者数	開催場所	開催日	頁
28A0- S1	日本海及び日本周辺海域における環境急変現 象(急潮)のモニタリング、モデリング及び メカニズム解明に関する研究集会	日本海区水産 研究所 井桁 庸介	千手 智晴 15件・76名	応用力学研究所	2016. 08. 04- 2016. 08. 05	88
28A0- S2	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	三重大学 万田 敦昌	広瀬 直毅 12件・40名	応用力学研究所	2016. 12. 15- 2016. 12. 16	91
28A0- S3	アジア域の化学輸送モデルの現状と今後の展 開に関する研究集会	国立環境研究所 森野 悠	鵜野 伊津志 18件・40名	応用力学研究所	2016. 12. 02– 2016. 12. 03	94
28A0- S4	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 9件・19名	応用力学研究所	2017. 01. 05- 2017. 01. 06	96
28A0- S5	海洋・海岸における波動の解析モデルの展望	鹿児島大学 柿沼 太郎	辻 英一 9件・24名	応用力学研究所	2016. 12. 17- 2016. 12. 18	99
28A0- S6	非線形波動研究の深化と展開	京都大学 辻本 諭	辻 英一 30件・60名	C-CUBE 筑紫ホール	2016. 11. 03- 2016. 11. 05	103
28A0- S7	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 10件・61名	応用力学研究所	2016. 12. 14- 2016. 12. 15	110
28A0- S8	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 8件・11名	応用力学研究所	2016. 06. 11- 2016. 06. 12	113

核融合力学分野							
No.	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	頁	
28FP- S1	第14回トロイダルプラズマ統合コード研究会	京都大学 村上 定義	糟谷 直宏 22件・24名	応用力学研究所	2016. 12. 07- 2016. 12. 08	235	
28FP- S2	国際プラズマ乱流データ解析ワークショップ	九州大学 稲垣 滋	藤澤 彰英 10件・36名	応用力学研究所	2016. 10. 24–28 2017. 01. 26–27	239	

新エネルギー力学分野							
No.	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	頁	
28ME- S1	第9回 九大2D物質研究会(グラフェン研究会 を改称)	九州大学 田中 悟	寒川 義裕 7件・25名	応用力学研究所	2017.01.27	348	

地上からのウィンドプロファイラレーダ観測による衛星搭載雲レーダの検証

情報通信研究機構 電磁波研究所 山本真之

研究の目的

人工衛星搭載センサによる全地球的な雲の観測は、気候変動の現状把握と予測精度向上に貢献する。 雲レーダ(Cloud Profiling Radar; CPR)は、雲粒からの電波散乱を利用することで、雲に関する物理 量の高度分布を計測する。人工衛星に搭載された CPR は、広域にわたる雲の鉛直分布が観測できる。 EarthCARE (Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer;以下、ECと表記)は、日本と欧州が協 力して開発を進める地球観測衛星である[1]。ECに搭載される CPR(以下、EC-CPR)は、衛星搭載レーダ で初めてドップラー速度を計測する[2]。EC-CPR では、ドップラー速度計測の活用による雲物理量プロ ダクトの精度向上が、期待されている。

時間・高度分解能に優れる地上からの観測は、雲に関する力学過程と雲微物理過程を解明するための、 有用な手段である。ウィンドプロファイラレーダ(Wind Profiler Radar; WPR)は、大気屈折率擾乱が 引き起こす電波散乱エコー(大気エコー)から、風速3成分(鉛直流・東西風・南北風)の高度プロフ ァイルを計測する。鉛直流は、EC-CPRにおける雲物理量プロダクトの不確定性を生じる大きな要因であ る。一方、鉛直流を計測する手段は限られている。そのため、雲内の鉛直流を計測できる WPR は、EC-CPRに用いる雲物理量リトリーバルアルゴリズムの開発における、有用な観測手段である。

鉛直流を計測する WPR と雲粒を計測する CPR を用いた地上からの下層雲観測を、今年度に実施した。

2. 結果

2.1 WPR の観測システム

情報通信研究機構が有する 1.3GHz 帯高分解能 WPR(以下、LQ-13 と表記)を用いた。LQ-13 はルネベ ルグレンズ13基で構成されるフェーズドアレイアンテナを有しており、鉛直及び東西南北(天頂角14°) の5方向にビームを指向できる。ピーク送信電力は5.2kW、中心周波数は1.3575GHz である。LQ-13 は、 大気境界層を含む高度数 km 以下が観測範囲である。LQ-13 は、7基のルネベルグレンズから構成される フェーズドアレイアンテナを有する LQ-7[3]をベースに、開発されている。LQ-13 は、ルネベルグレンズ の数を増やすことで、LQ-7 よりも大型のフェーズドアレイアンテナを構成している。また、LQ-7 より も、送信出力が増大している。

LQ-13 には、高鉛直分解能及び高データ品質を達成するための機能が付加されている。高鉛直分解能 を達成する手段として、LQ-13 はレンジイメージング(Range Imaging; RIM)を用いる。RIM では、送信 周波数を送信毎に切り替えることで、送信周波数が異なる受信信号を得る。さらに、送信周波数が異な る受信信号に対し、適応信号処理を用いた重み付け合成処理を行うことで、レンジ分解能を向上する[4]。 RIM とオーバーサンプリング(Oversampling; OS)を併用することで、さらにレンジ方向の観測精度を 向上できる[5]。LQ-13 では、最大 5 波の送信周波数を用いた RIM と 10 メガサンプル毎秒の OS が、利用 できる。

大気エコー以外の不要エコー(クラッタ)は、WPRの風速計測精度を低下させる。そのため、クラッ タの影響を極力排除する必要がある。クラッタを抑圧する手段として、LQ-13はアダプティブクラッタ 抑圧(Adaptive Clutter Suppression; ACS)を用いる。ACSでは、サブアレイと適応信号処理を用い てレーダービームのサイドローブを制御することにより、クラッタを動的に抑圧する[4]。ACS機能を LQ-13に付加するため、USRP(USRPはUniversal Software Radio Peripheralの略)とワークステー ションで構成される ACS 用多チャンネルデジタル受信機が開発された[6]。

2.2 地上設置の WPR と CPR による下層雲の同時観測

2016年6月に、東京都小金井市の情報通信研究機構本部において、LQ-13と千葉大学が有する CPR[7] (以下、FALCON-Iと表記)による下層雲の同時観測が実施された。FALCON-Iは、周波数変調パルス圧縮 を用いることで、低送信出力、高レンジ分解能、高感度を達成している。鉛直分解能を向上させるため、 LQ-13は、RIMと OS を併用した観測モードで運用した。さらに、ACS に必要となるクラッタからのエコ ーを取得するため、3基の無指向性サブアレイを用いた。

WPR と CPR による下層雲観測事例の解析を実施するため、WPR から得られたデータを処理した。WPR は、

受信された大気エコーのドップラースペクトルからスペクトルパラメータ(エコー強度・ドップラー速 度・スペクトル幅)を推定する。大気エコーは背景風とともに移動するため、鉛直ビームから得られた ドップラー速度の推定結果を用いることで、鉛直流の高度プロファイルが得られる。スペクトルパラメ ータを推定する手段として、大気エコー以外のエコーの混入を考慮したスペクトルパラメータ推定手法 [8]を用いた。さらに、ACSを用いることで、鉛直流の計測結果を得た。

EC-CPR における雲物理量リトリーバルアルゴリズムの開発を見据えつつ、LQ-13 と FALCON-I の観測データを用いた下層雲の事例解析を実施している。

3. 今後の展開

地上設置のWPR と CPR による下層雲観測結果のデータ解析を進め、EC-CPR に用いる雲物理量リトリー バルアルゴリズムの開発に貢献する。EC-CPR 打ち上げ後の検証に向け、WPR による計測データを高精度 かつ高データ品質で得るための技術開発も、さらに進めていく。

参考文献

- [1] 宇宙航空研究開発機構, 雲エアロゾル放射ミッション「EarthCARE」, http://www.jaxa.jp/projects/sat/earthcare/.
- [2] 宇宙航空研究開発機構, 雲エアロゾル放射ミッション/雲プロファイリングレーダ「EarthCARE/CPR」, http://www.satnavi.jaxa.jp/project/earthcare/index.html.
- [3] 電波レンズ搭載型対流圏ウィンドプロファイラレーダー(WPR LQ-7)の開発, SEI テクニカルレビュー, 170, pp. 49-53, 2007. (http://www.sei.co.jp/technology/tr/pdf/sei10497.pdf より入手可能).
- [4] M. K. Yamamoto, New observations by wind profiling radars, in *Doppler Radar Observations Weather Radar, Wind Profiler, Ionospheric Radar, and Other Advanced Applications*, edited by J. Bech and J. L. Chau, pp. 247–270, InTech, Rijeka, Croatia, 2012, doi:10.5772/37140.
- [5] M. K. Yamamoto, et al., Development of a digital receiver for range imaging atmospheric radar, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **118**, pp. 35–44, 2014, doi:10.1016/j.jastp.2013.08.023.
- [6] 山本真之・川村誠治・西村耕司, ウィンドプロファイラ用デジタル受信機の開発, p. 86, 日本気象学会 2016 年 度春期大会講演予稿集, 東京都渋谷区, 2016 年 5 月.
- T. Takano, et al., Development and performance of the millimeter-wave cloud profiling radar at 95GHz: Sensitivity and spatial resolution, *Electronics and Communications in Japan*, 93, pp. 42–49, 2010, doi:10.1002/ecj.10170.
- [8] T. Gan, M. K. Yamamoto, H. Hashiguchi, H. Okamoto, and M. Yamamoto, Spectral parameters estimation in precipitation for 50 MHz band atmospheric radars, *Radio Science*, **50**, pp. 789–803, 2015, doi:10.1002/2014RS005643.

研究成果(学会発表)

山本真之・川村誠治・西村耕司・岡本創・藤吉康志,ウィンドプロファイラにおける信号処理 ーリアルタイムデータ処理とスペクトルパラメータ推定ー,日本気象学会沖縄支部研究発表会,沖縄県名護市,2017年3月.

衛星観測を用いたエアロゾル気候モデルの雲微物理過程の検証

東京大学大気海洋研究所 鈴木健太郎

要旨

エアロゾル変化がもたらす雲・降水過程への影響を、NASA/A-Train 衛星群に含まれる複数衛星 の観測データとエアロゾル気候モデル MIROC-SPRINTARS とで比較した。その結果、気候モデル はエアロゾル増加による雲水量の増加を系統的に過大評価する傾向にあることがわかった。この ことは、現在の気候予測において、エアロゾル間接効果による冷却効果が過大評価されているこ とを示唆している。

序論

エアロゾルが雲核となって雲を変質させる効果(エアロゾル間接効果)は現在の気候予測におい て最大の不確実要因のひとつである。これを低減するためには、気候モデルを雲の素過程レベル で観測情報にもとづいて評価検証し、エアロゾル増加がもたらす雲の変質を精度良く定量化する ことが必要である。従来の衛星観測では、雲に関する観測情報が非常に限られていたために、モ デルの構成要素である個々の物理素過程にまでさかのぼって評価することは多くの場合困難で あった。ところが、近年の衛星観測技術の進歩によって、雲に関する詳細な情報が観測的に得ら れるようになってきた。研究代表者の鈴木健太郎は複数の衛星センサーから得られるこれらの新 しい観測データを複合的に組み合わせることで、エアロゾル間接効果の影響を特に受けやすい低 層雲の微物理プロセスを統計的に描き出す解析手法を開発してきた。本研究課題は、これらの手 法を用いて、九州大学応用力学研究所において開発されたエアロゾル気候モデル MIROC-SPRINTARS を雲の素過程レベルで評価検証し、エアロゾル変化がもたらす雲の変調を定量化する ことを目的として行われた。

方法

NASA/A-Train 衛星群に含まれるCloudSat 衛星およびAqua/MODIS 衛星から得られる降水生成に 関する情報と雲光学的厚さ・有効粒子半径のデータを組み合わせた解析を行い、エアロゾル変化 に伴う低層雲の雲水含有量の変化を全球規模でとらえる統計を作成した。これは現実大気におけ るエアロゾル増加への雲の応答のシグナルを観測的に与えるため、それをリファレンスとして気 候モデルの当該プロセスを評価することができる。そこで、衛星観測に対応する解析をエアロゾ ル気候モデル MIROC-SPRINTARS について行い、衛星観測と比較した。

結果と考察

このような比較解析の結果、MIROC-SPRINTARS モデルはエアロゾル増加に対する雲水の増加を衛 星観測に比べて過大評価する傾向にあることがわかった。衛星観測によれば、エアロゾル増加に 対する雲水量の変化は系統的な地域分布 を示し、雲水量が増加する場所と減少する場所が特徴的 な分布パターンを持つ。一方、MIROC-SPRINTARS モデルでは、エアロゾル増加に対して雲水量は 単調的に増加する傾向が全球規模にわたって支配的であり、エアロゾル間接効果 によって雲水 は一方的に増加する傾向にあった。これは、モデルにおける雲微 物理過程の表現方法に原因が あり、エアロゾル増加に伴って降水効率が減少する物理プロセスが強調されすぎていることが主 な理由であると考えられる。すなわち、衛星観測でとらえられた現実大気では、エアロゾル増加 による降水抑 制がもたらす雲水の増加だけでなく、蒸発やエントレインメントなど雲水を減 少 させるプロセスがはたらいていると考えられ、気候モデルではこれらが適切 に表現されていな いことが示唆される。この結果は、現在の気候予測ではエアロゾル間接効果による冷却効果が系 統的に過大評価されている可能性を物語っており、より詳細に雲の素過程に根ざしたモデル検証 と改良が必要であること を意味している。

成果報告

Michibata, T., K. Suzuki, Y. Sato, and T. Takemura, 2016: The source of discrepancies in aerosol-cloud-precipitation interactions between GCM and A-Train retrievals, *Atmos. Chem. Phys.*, **16**, 15413-15424, doi:10.5194/acp-16-15413-2016

衛星搭載ライダ CALIOP と雲レーダ CloudSat とひまわり 8 号による オーバーシュートの同期観測

防衛大学校 地球海洋学科 岩崎杉紀

目的

本研究は、成層圏まで達する積乱雲(オーバーシュート)が対流圏から成層圏に物質を運ぶのか、運 ぶとしたらどのように運ぶのか、これらを観測から明らかにすることを目的としている。ここで、オー バーシュートとは対流圏界面(対流圏と成層圏の境界)を超えた積乱雲の頂上のことである。

一般に、オーバーシュートは断熱過程で成層圏に達しているので、その空気塊は対流圏界面付近の気 温より冷たく重い。このため、成層圏まで達してもすぐに下降し始めて対流圏に戻る。つまり、対流圏 の空気はオーバーシュートによって成層圏に運ばれるものの、そのまま対流圏に戻る、と思われている ことが多い。しかし、衛星観測の中にはオーバーシュートの上空は湿っていることを示唆していたり、 オーバーシュートから誘発された非断熱過程(重力波の砕波)によって成層圏に雲を運ぶことが数値計算 で示されている。この現象は jumping cirrus と言われている。しかし、これの定量的な観測はまだ一例もな い。例えば、その生成消滅過程であったり、どんな条件で、何個、どのタイミングで、どのくらいジャンプする か、といった基本的なことでさえ分かっていない。本研究では、オーバーシュートから派生する jumping cirrus のこのような性質を富士山特別地域気象観測所(旧富士山測候所)にカメラを設置して明らかにする。

方法

富士山は世界遺産になので、こげ茶色に塗った 3つのカメラケースを図1 のように富士山特別地域気象観測 所に原状復帰できるよう金具で固定した。ケースの中に USB3.0 カメラを1 台ずつ設置し、水平70 度のパノラマ 写真(中心の向きは東北)が取れるようにした。カメラ 3 台をUSB3.0 の マに ハマを1 本のUSB3.0 の80m 延長 ケーブルに、その延長ケーブルを屋内のパソコンにそれぞれ接続した。なお、ハブや電源はカメラケースの中に 収めている。

カメラは、昼は15秒年、夜は1分年に撮影するよう設定した。夜間に撮影する理由は、星を撮影することに よって、写真のピクセルごとに方位角と仰角を算出するためである。撮影期間は2016年7月11日から8月11日の 1か月間とした。神奈川県横須賀市にある防衛大学校の屋上(標高100m)にも同カメラを北向きに設置した。 同じ雲が両カメラで撮影できれば、ステレオ解析できるためである。

なお、ここでの jumping cirrus の定義は数値計算の知見から以下のようにした。通常、積乱雲の雲頂は対流 圏界面より上に行かないので平らになっている(図2の点線)。積乱雲全体またはその一部(turret)が強い 上昇流を持っていると平らな面から盛り上がる(図2のオーバーシュート)。それが下がり平らな面に



図 1 山頂に設置した 3 台のカメラ。風で飛ばされないよ 図 2. 2016年7月31日の12時30 分頃に撮影され う金具で固定している。



た霞ヶ浦付近(または鹿島灘沖)に現れた jumping cirrus.

戻ったと同時に雲が数kmほどジャンプすることがある(図2のjumping cirrus)。それを jumping cirrus と呼ぶことにする。オーバーシュートが盛り上がり始めてから jumping cirrus が飛び出るまでおよそ 5 分である。図 2 では、jumping cirrus を誘発したオーバーシュートはすでに消えており、別のオーバーシュートが写っている。

筆者は1回だけ肉眼で jumping cirrus を見たことがある。10m/s ほどの上昇速度の現象ではあるが、そこから数 10km 離れていたので(離れないと積乱雲の雲頂付近は見えない)、雲は動いていないよう に見えた。つまり、この現象は一見するだけでは、通常の雲と区別がつけられない。

結果

1か月の撮影期間で、山頂に設置したカメラには7個のjumping cirrus が撮影出来た。ただし、成層圏に 達していたか否かの判定はまだ2 例のみしか出来ていない。2 例とも対流圏界面に達していなかったよう である。7個すべて7月29日以降であった。東海から関東地方の梅雨明けは7月28から29日だったので、 すべて梅雨明け以降に観測された。また、北向きカメラ(北関東から南東北地方を撮影)が5 個と最 も多く撮影した。

なお、下層に雲が多かったため、防大に設置したものでは 1つも撮影できなかった(それ以降にいくつか撮影は出来ている)。これより、少なくとも 2016 年の夏は富士山の山頂のほうがjumping cirrus の観測に向いていたことが分かる。

図2は2016年7月31日の12時半ころに現れた jumping cirrus である。写真の jumping cirrusの方位角 とひまわり 8 号の赤外画像の低温部が一致する位置は、霞ヶ浦付近または鹿島灘沖である。両地点とも富 士山から見ると同じ方角で、どちらにも低温部分がある。どちらであるかは今後検討するとして、もし jumping cirrus が霞ヶ浦付近に現れたとすると、富士山から 185km 離れている。距離と写真の仰角から計算する と、積出雲の雲頂は高度 11.2km で、jumping cirrus はそこから12.8km まで8分21秒で1.6km ジャンプしてい た。レーダ解析では、時間雨量は 20mm 程度でエコー頂は13km (高度分解能は 2km) であった。ただし、館 野のラジオゾンデのデータは高度 16km が気温が最も低かった。

レーダで見ると強い積乱雲が立っていても、それが撮影できないことがほとんどであった。これ は、積乱雲が立ちやすい時は山頂にも雲がかかりやすいためである。また、絞りが付いていないカ メラ(通常の産業用カメラ)を用いたのだが、雲の白飛びを防ぐため絞りを絞って撮影を行った。 しかし、これだ日没後 30-60 分で暗くなり、積乱雲が最も活発な時間の撮影が出来なかった。撮影時間 を少しでも伸ばすため、来年度は絞りの代わりに紫外線の量で透過率の変わる光調整フィルタを用いる予 定である。また、撮像素子の大きいカメラも用いる。これらの準備も行った。これで満月であれば夜間で も雲観測が出来る予定である。

成果報告

この観測は 2016 年の夏に初めて行ったので、まだ発表は行っていない。以下は予定である。

- 1. <u>岩崎杉紀</u>、鴨川仁、久保田尚之、岡本創、石元裕史、牛山朋來、積乱雲のてっぺんからジャンプする雲 (jumping cirrus)の特徴、第 10 回成果報告会(認定NPO 法人富士山測候所を活用する会)、東京、2017年3 月5 日。
- <u>岩崎杉紀</u>、瀬口貴文、鴨川仁、久保田尚之、岡本創、石元裕史、牛山朋來、積乱雲の雲頂から飛び上が る雲の撮影、日本気象学会春季大会、東京、2017年5月。
- 以下は、昨年度の共同利用の成果とそれを受け本研究を思いついた研究(本研究の前段階の内容)の発表 である。
- 1. <u>Iwasaki, S.</u>, T. Shibata, H. Kubota, H. Okamoto, Large size and low number concentration cloud in mid and high latitudes, 17th International Conference on Clouds and Precipitation, Manchester, UK, Jul., 2016.

静止気象衛星データと地球観測衛星データを複合的に利用した氷雲の解析

気象研究所 気象衛星・観測システム研究部 石元裕史

・要旨および序論

全球や広い領域を対象として氷雲の生成や雲微物理特性を明らかにするためには、衛星データを複合的に 利用した高度な解析が必要である。これまで応用力学研究所 岡本創研究室との共同研究では、衛星赤外サウ ンダ (AIRS) データと全球客観解析値を初期値とした1次元変分法解析 (1D-Var)によって、対流圏中上層 の水蒸気場を解析してきた。またその結果を用いて氷雲周囲の水蒸気氷過飽和度の推定を行い、 CloudSat/CALIPSO 観測結果と組み合わせることによって氷雲生成過程と氷過飽和との関係について調べてき た。岡本研究室が主体となって開発している多重散乱ライダーについては、多重散乱計算についての計算技 術支援を行ってきた。さらにライダー観測による配向性氷晶の後方散乱特性については、H26 年度九大共同 研究において気象研究所の計算手法による計算結果と九大応力研側の計算結果との相互比較等を行うなど、 基礎と応用の両面における技術協力を行っている。

本研究課題では衛星データ解析について、これまでと同様の衛星センサデータ解析を通じた研究協力を行 う。さらに 2015 年より正式運用が始まったひまわり 8 号データを加えた新しい雲解析技術の共同技術開発に 着手する。ひまわり 8 号は、その高い時間分解能とともに従来の地球観測衛星と同等な空間分解能と搭載チ ャンネル数を持つ世界に先駆けた次世代静止気象衛星である。このひまわり 8 号データと、気象研究所が整 備している非球形水晶散乱データベースおよび最適雲解析アルゴリズムを使い、九大応力研の CloudSAT/CALIPS0プロダクトとの比較などによって氷雲タイプによるリトリーバルに最適な氷晶種類の選択 する技術を開発し、またそれら解析結果に基づいた氷雲の微物理に迫る研究を実施する。

・研究方法

衛星赤外サウンダを用いた水蒸気場の 1D-Var 解析については、サウンダ観測データおよび初期値となる大 気プロファイルデータおよび解析プログラムを気象研が提供し、九大応力研で一定期間のデータ解析を実施 できる環境を整備する。ひまわり 8 号データについては、データ配信開始後の解析をスムーズに実施できる 環境と解析コード開発、またひまわり 8 号チャンネル波長に対応した非球形氷晶粒子散乱データベースの整 備を行う。九大応力研による CloudSat/CALIPSO 解析データとひまわり 8 号とのマッチアップデータ作成、解 析事例の選定と予備解析実験を行い、氷雲の複合衛星データ解析手法の開発を開始する。

・H28年度研究結果

H27 年度に引き続き以下に示す共同研究を実施しその成果を発表した。衛星赤外サウンダ AIRS データを用い た晴天域・下層雲域の水蒸気 1D-Var については本共同研究での研究目的を概ね達成した。これに関する成果 まとめとして、九州大学応用力学研究所 RIAM フォーラム 2016 において講演を行なった[1]。また CloudSat/CALIPSO とのマッチアップ解析については研究世話人である岡本創教授による学会発表の共著とし て研究に参加した[7]。ライダー多重散乱計算については、研究協力者の佐藤可織助教が多重散乱物理モデル を新たに開発し[9]、このことによりライダー観測の解析技術が大きく進歩した。

氷粒子のライダー後方散乱特性について、気象研で開発している計算手法である改良型幾何光学近似法 (Geometrical Optics-Integral Equation: GOIE)の結果と、岡本研究室が CALIPSO データ解析に関して共 同研究を行っているロシア Borovoi 教授による Physical-Optics approximation (PO)法による結果とが整合 していることを確認した。それを受けて気象研で共同研究を行なっている気象衛星センター増田一彦博士と 氷晶粒子のライダー後方散乱比(ライダー比、偏光解消度、カラー比)の粒子形状や微小な形状の歪みに対 する依存性について数値シミュレーション実験を行なった[4]。またそのまとめを論文として投稿し受理され

7

た[2]。本論文では計算結果だけでなく、氷晶粒子の形状と後方散乱特性との関係についての本質的な議論も 行なっており、同様な散乱特性計算を行なう研究者にとって示唆に富む内容であると考える。

ひまわり8号データの解析については、気象研が開発した氷晶モデルを導入し台風や豪雨事例での解析を通 じて、同じ粒子モデルに対する衛星ライダー観測とひまわり観測での整合性などについて研究した。またそ れに関連して、POLDER衛星による多方向観測結果を使って、現在世界で用いられている各種氷粒子モデルに ついての観測整合性の比較を行なった結果についての共著論文が受理・掲載された[3]。これら研究成果によ って、氷雲に用いる粒子形状モデル、その粒子の精度の良い光散乱特性計算、観測結果から得られる雲微物 理特性、といった統合的雲研究に必要な基礎解析技術が大きく向上したと考えている。

また本共同研究の派生的な研究課題である衛星赤外サウンダを用いた火山灰エアロゾルの物質情報推定に ついては、研究の進展を国内外での学術会議で発表した[5,6,7]。いまだ開発の途中段階ではあるが、ひまわ り8・9号による火山灰推定アルゴリズムへ応用できる技術であり、現在その推定精度に大きな誤差がある 衛星からの火山灰推定を改善する新しい試みとして期待されている。

・成果報告

講演会

 [1] 衛星赤外サウンダ AIRS による水蒸気推定と CloudSat_CALIPSO_AIRS 複合解析への応用, RIAM フォ ーラム 2016, 2016 年 6 月, 福岡県春日市

査読付き論文

- [2] Masuda, K., <u>H. Ishimoto</u>, 2017: Backscatter ratios for nonspherical ice crystals in cirrus clouds calculated by geometrical-optics-integral-equation method. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, **190**, 60-68, doi:10.1016/j.jqsrt.2017.01.024.
- [3] Letu, F., <u>H. Ishimoto</u>, J. Riedi, T. Y. Nakajima, L. C.-Labonnote, A. J. Baran, T. M. Nagao, M. Sekiguchi, 2016: Investigation of ice particle habits to be used for ice cloud remote sensing for the GCOM-C satellite mission. Atmospheric Chemistry and Physics, 16, 12287-12303.

査読なし論文

[4] Masuda, K., <u>H. Ishimoto</u>, T. Sakai, <u>H. Okamoto</u>, 2016: Backscattering properties of nonspherical ice particles calculated by Geometrical-Optics-Integral-Equation method . *EPJ Web of Conferences*, **190**, 16001, doi:10.1051/epjconf/201611916001.

学会発表 (主著)

- [5] Estimation of the volcanic ash refractive index from satellite infrared sounder data, International Radiation Symposium 2016, 2016 年 4 月, ニュージーランド, オークランド
- [6] 衛星赤外サウンダデータの解析による火山灰物質情報,日本地球惑星科学連合2016年大会,2016年5月, 千葉県千葉市
- [7] Investigation of the spectral refractive indices of volcanic ash materials using satellite infrared sounder measurements, 2016 AGU Fall Meeting, 2016 年 12 月, アメリカ, サンフランシスコ
 学会発表(共著)
- [8] <u>岡本創, 佐藤可織, 石元裕</u>史,「CloudSat-CALIPSO-AIRS の複合利用による氷粒子微物理特性の形成メ カニズムの全球解析」, 日本気象学会 2016 年度春季大会 B406, 2016 年 5 月, 東京都渋谷区
- [9] 佐藤可織, 岡本創, 片桐秀一郎, 石元裕史,「衛星搭載ライダを用いた新しい水雲プロダクト」,日本気象 学会 2016 年度秋季大会 D156, 2016 年 10 月, 愛知県名古屋

地上・衛星ライダーデータを用いた エアロゾル光学特性データセットの構築に関する観測的研究

(独)国立環境研究所環境計測研究センター 西澤智明

要旨

エアロゾルの気候・環境への影響評価に資するエアロゾル光学特性のデータセットの構築を主眼とし、 地上および衛星ライダーデータを用いたエアロゾル光学特性抽出アルゴリズムの高度化および周辺技 術の開発を行った。具体的には、(1)昨年度開発したエアロゾル種分類推定アルゴリズムパッケージ を用いて CALIPSO 衛星搭載ライダーの長期データ解析を行い、エアロゾル種毎の全球時空間マップを 構築した。衛星搭載受動型センサーMODIS や CALIPSO 標準プロダクトとの比較も実施し、アルゴリズム の改良に資する知見を得た。(2) 全7チャンネルを有する多波長ラマンライダーや高スペクトル分解 ライダー用のエアロゾル種分類推定手法の開発を行った。本アルゴリズムでは、4種エアロゾルの消 散係数と共にエアロゾル種毎の粒径を推定する。

序論

エアロゾルの気候・環境への影響を評価するためには、時間的そして空間的(水平、鉛直)に密なエ アロゾルの光学特性に関するデータセットが必須となる。本研究では、地上ライダー観測データと衛 星搭載ライダー観測データを解析し、導出された光学特性を統合化することで時間的・空間的に密に 包括されたエアロゾルデータセットの実現を主眼とした解析手法の開発及びデータ解析を行う。

これまでに実施してきた研究経過を踏まえ(九州大学応用力学研究所共同利用研究:特定研究(H23、H27)、一般研究(H24-H26)等)、本研究では、地上および衛星ライダーデータを用いたエアロゾル光 学特性のデータセット構築を推進する。そのために必須となる、エアロゾル光学特性抽出アルゴリズ ムの高度化および周辺技術の開発を行う。また、地上ライダーデータの蓄積も図るため、地上ライダー 観測も行う。

実施方法

- (1) 昨年度構築したライダーデータを用いたエアロゾル種分類推定アルゴリズムパッケージを用い、CALIPSO 衛星搭載ライダーデータへのアルゴリズム群の適用を行う。
- (2) 地上の多チャンネルライダー(多波長ラマンライダーや高スペクトル分解ライダー)用のエ アロゾル種分類推定手法の開発を行う。

結果と考察

(1) 2波長偏光ライダーを用いた3種エアロゾル(鉱物ダスト(DS)、海塩粒子(SS)、全大気汚染粒子(TAP))推定手法(2 β +1 δ 手法)、単波長ラマンライダー(や単波長高スペクトル分解ライダー)を用いた3種(DS,ブラックカーボン(BC)、BC以外の大気汚染粒子(AP))ないし4種(DS,BC,SS,AP)エアロゾル推定手法(各々、1 α +1 β +1 δ 手法、1 α +2 β +1 δ 手法)を昨年度パッケージ化した。このパッケージの2 β +1 δ 手法を用いて、CALIPSO衛星搭載ライダーCALIOPの長期データ解析を実施し、エアロゾル種毎の全球時空間分布を推定すると共に、雲・エアロゾル識別等も行った。

得られた結果を受動型衛星センサーMODIS や NASA から公開されている CALIPSO 標準プロダクトとの 比較も行った。本研究で推定した DS の消散係数や光学的厚さは MODIS 等の解析値に比べ高く、一方で SS や AP は低いなどの相違がみられ、アルゴリズムの仮定等を改良する必要性が示唆されたが、エアロ ゾル種毎の全球時空間マップは世界でも類を見ないプロダクトであり、同化・検証等、モデル研究への 活用が期待できる。 (2) これまでは最大で全4チャンネルのライダーデータを用いたエアロゾル種分類推定アルゴリズムの開発を行ってきた。国立環境研究所・九州大学の共同研究の下、全7チャンネルの多波長ラマンライダーや多波長高スペクトル分解ライダーの開発・運用が進められている。そこで、全7チャンネルのライダーデータを用いて、4種エアロゾルの消散係数と共にDS, SS, APの粒径を推定するアルゴリズムを試作した。このアルゴリズムでは、ライダー測定値(消散係数及び後方散乱係数)の波長依存性が粒子の粒径に鋭敏であることを利用して、エアロゾル種毎の粒径を推定する。また、アルゴリズムの性能評価や観測データのリアルタイム解析を見越して、試作した本アルゴリズムを上記のエアロゾル種分類推定アルゴリズムパッケージへ組み込み、利便性を向上させた。今年度はアルゴリズムの評価までには至らなかったが、今後、シミュレーションや実データへの適用を経てアルゴリズムを評価していく。

成果報告

- Nishizawa T., Sugimoto N., Matsui I., Shimizu A., Hara Y., Uno I., Yasunaga K., Kudo R., Kim S. W., Groundbased network observation using Mie-Raman lidars and multi-wavelength Raman lidars and algorithm to retrieve distributions of aerosol components, Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer 188, 79-93, 2017. http://dx.doi.org/10.1016/j.jqsrt.2016.06.031
- **西澤智明**、工藤零、**岡本創**、ライダーデータを用いたエアロゾルコンポーネント導出パッケージの開発、日本気象学会 2016 秋季大会、愛知県名古屋市、2016 年 10 月
- **西澤智明**, 杉本伸夫, 松井一郎, 清水厚, 鵜野伊津志, 原由香里, 工藤玲、 多波長ラマンライダーデータを 用いたエアロゾルコンポーネント解析、第 34 回レーザーセンシングシンポジウム、長野県下高井郡 野沢温泉村、2016 年 9 月

他3件

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	室長	代表者	nisizawa@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	<u>sato@riam.kyushu-u.ac.jp</u>

CloudSat/CALIPSO 雲特性プロダクトの高度化に向けた全球規模気候学的解析

長崎大学大学院水産・環境科学総合研究科 河本和明,山内晃 九州大学 応用力学研究所 岡本創

・要旨

九州大学で作成された CloudSat/CALIPSO 併用データを使用し、-25~0℃温度域におけるユーラシア大陸の東西間では雲の氷相割合の違いがあり、ユーラシア東部(40-80N°,60-120E°)では氷相割合が増加しており、一方で水相割合は減少していることを明らかにした。また温度毎の氷相割合は-20~-5℃ 域、高度毎では下層 3km 以下において東西間の差が大きいことを示した。このことはユーラシア西部(40-80N°,0-60E°)に比べて、ユーラシア東部の下層で氷相の形成が促進していることを示唆している。

・序論

雲や降雨は、地球のエネルギー収支や水循環を通して、気候の変動・維持に大きな影響を与えている。広域的な雲の分布 を観測する手段として人工衛星のデータが広く利用されてきたが、2006 年に能動型センサーを搭載した CloudSat やCALIPSO 打ち上げられたことによって、雲内部の鉛直方向の情報が得られるようになった。しかしながら、 氷雲の形成過程や成長過程についてはまだ詳しくわかっていない。本研究では、-40℃以上の雲層内の氷 粒子の形成過程に着目し、2007年月の2つの領域(東・西ユーラシア大陸)について比較を行った。

・実験方法

雲粒子相判別(KU-type)はYoshida et al. (2010)が開発した CALIPSO 衛星に搭載されている能動型センサ -CALIOP から得られる、後方散乱係数と偏光解消度を使用した相判別手法が用いられている。また、氷相は雲粒子判 別が水平状氷粒子(2D-plate)、三次元ランダム配向氷粒子(3D-ice)、3D とD の混合層(mixture of 2D-plate and 3D-ice)の場合と定義し、水相は 0℃以上の水粒子(warm water)、過冷却水粒子 (supercooled water) の場合と定義した。雲量は Hagihara et al. (2010) が開発した CloudSat/CALIPSO 併用雲マス ク(KU-mask) を使用した。雲内部の鉛直気温データは CloudSat のECMWF-AUX プロダクト(Partain 2007)を使用し、地上 2m 気温、短波・長波放射量は JRA-55 再解析データ(Kobayashi et al. 2015, Harada et al. 2016)を使用した。

雲層内の氷相割合(Fice)と水相割合(Fwater)は以下のように定義し、

 $F_{ice} = N_{ice} / (N_{ice} + N_{water})$ (1) $F_{water} = N_{water} / (N_{ice} + N_{water})$ (2)

ここで、N_{ice} は雲層内で検出した氷相雲層数を示し、N_{wate} 水相雲層数を示す。ただし、光学的厚い雲が 発生している場合、雲層内でライダーが減衰して検出できなくなってしまうため、雲頂から光学的厚さが 程 度までの雲を対象としている。





図1 . ユーラシア大陸東部(赤) 西部(青) 全球(黒)における温度毎の(a) 氷相割合(b) 水相割合。(c) 温度毎のサンプル数、点線が氷相、実線が水相を示している。

-40℃以上の雲層内の氷相割合はユーラシア東部で高くなっている。図1はユーラシア大陸東部(赤) 西部(青) 全球(黒)での温度毎氷相(図1(a))・水相(図1(b))を示している。-30℃以下ではあまり違いは生じ ないが、-20℃から-5℃域では明らかにユーラシア東部域での氷相割合が増加している(約20%)ことが わかる。室内実験により、この温度域で氷晶は不均質核形成の中でも内部凍結や接触凍結によって生成 されることがわかっており(*Hoose and Möhler*, 2012)、ユーラシア東部で内部凍結・接触凍結が促進 していることを示している。



図2.ユーラシア大陸東部(赤) 西 部(青) 全球(黒)における高度 毎の(a)氷相割合(b)水相割合。 (c)高度毎のサンプル数、点線が氷相、 実線が水相を示している。(d)ユーラシ ア大陸東部(赤)西部(青)の高 度毎の雲層内平均気温(エラーバー は標準偏差を示す)。

ユーラシア東西間の雲層内氷相割合の差は対流圏下層で特に顕著になっている。図2はユーラシア大陸東 部(赤)西部(青)全球(黒)での高度毎氷相(図2(a)・水相(図2(b)を示している。ユーラシア 大陸東西における氷相割合の差は地表から3km以下で顕著であり、特に1km付近で40%と最大となっていた。 また、ユーラシア西部や全球の対流圏下層3km以下の氷・水相割合はカーブを描くように変化しているが、ユ ーラシア東部では地表面から80パーセント程度でほとんど変化していない。この変化は雲層内の気温(図 2(d)と概ね対応しており、ユーラシア東部の1km付近で雲層内気温は最大となり-10℃程度を示し、こ の高度より高高度や低高度では気温が減少している。この-10℃付近では少しの気温の変化で氷・水相割合 は急激に変化する(図1(a)ため、この気温の上がり下がりによってユーラシア西部の氷・水割合はカー ブを描くように変化することがわかる。

これらの結果はユーラシア東部の雲層は地表面付近から氷相化しており、地表面エアロゾルが氷晶核として効果的に働いている可能性を示唆している。

本研究の結果は、数値モデル出力結果との検証に有用であり、数値モデル内で扱われている雲層内氷相割合の見直しに貢献することができると考える。

・学会発表リスト

山内晃,河本和明,岡本創,「CloudSat-CALIPS0 併用データを用いて解明したユーラシア大陸広域にわたる 氷相割合の違いについて」,日本気象学会 2016 年度秋季大会, B104,10 月,名古屋大学

山内晃,河本和明,岡本創,「CALIPSO 衛星データを用いて解明したユーラシア大陸広域にわたる氷相割合の違いについて」,第3回国公私3大学環境フォーラム,12月,福岡工業大学

若狭湾における水温急変現象に関する研究

福井県立大学 海洋生物資源学部 兼田淳史

【研究の目的】

若狭湾(図1)では、数日のうちに水温が変化する現象が発生 する。研究の初年度にあたる昨年は2015年に若狭湾の5測点で 実施されていた水温データを分析し、8月に大規模な水温低下現 象が発生したことを報告した(図2参照)。

この低温化現象が発生した時、若狭湾南部の丹生では水温計を 設置すると同時に、多層の流速が測定できる ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler, 超音波ドップラー多層流速計)を 設置していた。今年度は水温が低温した時の海水の動きを明らか にすることを目的とし、流れや風のデータ、高解像度モデルの計 算結果を分析した。

【観測および解析】

若狭湾の定置網漁場の環境を把握するため、福井県立大学、福 井県水産試験場、九州大学は水温や流れの観測を実施している。 丹生定置は我々が観測を実施している測点の一つで、5-10月 頃、海面から海底付近まで10m おきにメモリー式水温計を設置 して水温を測定すると同時に、ADCP によって多層の流速も測定 している。本研究では、丹生定置で水温の低温化現象の発生が確 認された2015年の観測データを用いた(図2参照)。また、低温化 現象発生時の流れの情報として、九州大学応用力学研究所が開発 した日本海沿岸海況予測システムの計算結果を用い、さらに気象 庁のウェブサイトから天気図や敦賀の気象データをダウンロード して分析した。

【結果および考察】

図3には、低温化現象の発生前から発生後の2015年8月24-29 日の風、南北成分の流速、水温の変化を示している。8月25-26 日にかけて台風が日本海を北東方向へ進んでいたため敦賀では風 速10m/sを超える強い南風が吹いており(図3上段)、そのとき流 れが強くなっていた(図3中段)。ここで風と流れの時系列を比べ ると、風は南から北へ向かって吹いていたのに対して、流れは北か ら南へ向かっていた。また、最も流れが強くなったのは25日夜で、そのとき最も流れが強くなったのは表層

でなく海面下 30m 層付近に出現したことを示している。

この強風時の流れの時間変化については、日本海沿岸海況予報システムの計算結果を用いて詳しく検討した(図4)。風が吹き始めた8月25日12時頃の流況図をみると(図4上段)、海面下5mの流れの計算結果は風下方向である北に向かって流れていた。その後、風がさらに強くなった26日0時頃になると(図4下段)、表層では北へ向かう流れが強まる一方で海面下30mでは南へ向かう流れが強くなっていた。このこと



図1 測点図. 〇、口は水温の係 留観測を実施した測点. 初年度の 研究で、2015年8月に水温低下現 象が丹生、宇久、大島、高浜で発 生していたことを確認した。





は、南へ向かう流れが海面下 30m 層付近で発生したことを示した 観測データをよく再現している。 次に 25-26 日の水温の時系列に 着目すると(図3下段)、水温に は大きな変化が生じていなかっ たことがわかる。つまり、台風に よる強風は敦賀半島付近で強い 南向きの流れを引き起したもの の、水温の低下を引き起こす原因 ではなかったといえる。

そこで、強風がおさまってきた 26 日以降のデータに着目する。 図 3 に示した流れと水温のデー タは、弱い西風または南西風が吹 き始めた 26 日 12 時頃から上層 は沖向き(北向き)、下層は岸向 き(南向き)の構造を持つ流れが 発生し、このときに水温が低下し ていたことを示した。この沿岸湧

図3 2015 年 8 月 24-29 日の敦賀の風(上段)、丹生定置で測定された流速(中段)、水温(下段)

昇発生時と類似の流動構造が水温を引き起こしたと考えられる。しかし、このとき特に強風では無かったこ とから、この流れの構造がその場の風で引き起こされたのか、あるいは別の条件で形成されたのか、丹生の みのデータでは理解することは難しかった。今後も観測を継続して現象の発生頻度や詳細な発生機構につい て検討する必要がある。



図4 数値モデルの計算結果.2015年8月25日 12時30分(上段)、8月26日0時30分(下段) 左図は海面下5m、右図は海面下30mの流れを示 す。

【成果発表】

「Impacts of Typhoon on Coastal Currents and Primary Production in Wakasa Bay, Japan」A. Kaneda, K. Ayukawa, T. Senjyu.<u>,</u> Asia Oceania Geosciences Society 2016,13th Annual Meeting, (2016 年 8 月)

【研究組織】

【研究代表者】		
富井県立大学	海洋生物資源学部	兼田淳史
【研究協力者】		
福井県水試 漁	魚場環境研究グループ	鮎川航太
福井県立大学	生物資源学専攻	吉川泰広
【所内世話人】		
九州大学応用力]学研究所	千手智晴

PM2.5 エアロゾル濃度変動に関わる NH₃/NH₄+の動態解明に関する研究

名古屋大学大学院 環境学研究科 長田和雄

目的

中国における高濃度の PM2.5 汚染に関する報道がきっかけとなり、PM2.5 の越境輸送や国内での 発生状況、発生要因の解明に関心が高まっている。PM2.5 は直径 2.5 μ m 以下の微小粒子状物質の「集 合体」で、硫酸塩(SO4²⁻)以外にも硝酸塩(NO3⁻)、アンモニウム塩(NH4⁺)など様々な化学成分を 含む。粒子中の NH4⁺は、SO4²⁻や NO3⁻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。これら粒子中の NH4⁺や NO3⁻の生成にはガス状のアンモニア

(NH₃) や硝酸(HNO₃) 濃度の測定が重要であるが、これまで時日別の測定例は少ない。そこで、 PM2.5 濃度変動要因について検討するために、ガス状の NH₃や HNO₃ と粒径別の NH₄⁺と NO₃⁻につい て 1 時間から数日の時間分解能で濃度を測定した。

観測方法

大気観測の手法については前年度の報告に詳細を記したので、ここでは概要を示す。NH3 と微小 NH4⁺については連続測定装置(Osada et al., AAQR, 11, 170-178, 2011)を用い、HNO3 と粒径別 NO3⁻の 観測にはデニューダー・フィルター法を用いた(長田ほか, 2016)。観測は九州大学筑紫キャンパスの G棟 607 号室にて、2014 年 7 月 31 日から 2015 年 10 月 19 日まで行った。H28 年度は、これらデー タの解析を行った。

結果と考察

図1に示したのは、下から順に、微小粒子中のNH4+濃度、NH3 (赤)と光学的黒色炭素(OBC)濃(灰)、太宰府での気温と 時別雨量(青の縦棒)、太宰府での風向(赤)・風速(黒)であ る。微小粒子のNH4+濃度には規則的な日内変化が見られないの に対し、NH3ではほぼ毎日、朝から昼前にかけて濃度が上昇し た。NH3の発生源としては畜産・家禽、施肥等の生物・農業活動 のほか、自動車排ガスも寄与すると言われている。しかし、デ ィーゼル排ガスの影響で濃度が上昇するOBCとは、日内変化の 様子が必ずしも一致しなかった。図には示さないが、風向別に 各種濃度をプロットすると、NH3とOBCでは北東〜南東方向に かけて濃度が高くなっていた。これは、NH3については東〜南 東方向に存在する養鶏場などの生物・農業由来発生源の影響を 受けるためと考えられる。OBCについては、観測地の東方に位 置する幹線道路の影響を受けているのかもしれない。



Fig. 1 NH₃ 濃度の日変化の観測例 (2014年11月15~24日)

Fig. 2に、粒径別NH4+濃度とNH3濃度、全アンモニア 態窒素(NHx)の月平均値、その内訳(%)、月降水量 を示す。粗大粒子のcNH4+濃度は、1~3月に濃度が高く 、微小粒子のfNH4+濃度は、1~5月にかけて高めとなる 季節変化を示した。NH3濃度は春~夏にかけて濃度が高 いが、14年8月のように雨量が多いと夏でもNH3濃度が 低い。NHx濃度は2~4月の春に高く、NHxに占める粒子 態の割合は、気温の低い12~1月で70~80%と高く、気 温の高い7~8月には50%以下と低かった。

図には示さないが、HNO3濃度もNH3濃度と同様に春 ~夏にかけて高く、粒子中のNO5濃度は微小・粗大とも に気温の低い時期に高かった。粗大NO3濃度は冬よりも 春に高くなる傾向があり、黄砂や海塩粒子をキャリアに した長距離輸送の影響を受けるためと考えられる。

ガス状・粒子状のアンモニア態窒素と硝酸態窒素濃度 について、通年にわたり同時に測定した例は、世界的に 見ても少ない。本研究では、研究協力者の尽力により、 非常に貴重な通年データを得ることができた。今後は、モ デルシミュレーションによる解析を含めてさらに考察を進 める予定である。



Fig.2 筑紫キャンパスにおける各濃度の月 平均値と内訳(%)、大宰府での月間降水量。 f は微小粒子、c は粗大粒子を示す。

- 研究成果報告:【論文】長田和雄,上口友輔,山本重一,桑原昇平,Pan Xiaole,原由香里,鵜野伊津志,大気 エアロゾル化学成分連続自動分析装置(ACSA-12)とデニューダー・フィルター法による大気エアロゾル粒子 の粒径別イオン成分濃度の比較,エアロゾル研究,31,203-209,2016.
- 【学会発表】長田和雄・上口友輔・山本重一・鵜野伊津志・Pan Xiaole・原由香里・桑原昇平, 大気エア ロゾル化学成分連続自動分析装置(ACSA-12)とデニューダー・フィルター法による大気エアロゾル 粒子の粒径別イオン成分濃度の比較, 第33回エアロゾル科学・技術研究討論会, A03, 2016年8月31日 ~9月2日, 大阪府立大学
- 長田和雄・上口友輔・山本重一・鵜野伊津志・Pan Xiaole・原由香里・桑原昇平,大気エアロゾル化学成 分連続自動分析装置(ACSA-12)とデニューダー・フィルター法による大気エアロゾル粒子の粒径別 イオン成分濃度の比較,第57回大気環境学会年会,P-081,p341,2016年9月7日~9月9日,北海道 大学
- 長田和雄・鵜野伊津志・板橋秀一,九州大学筑紫キャンパスにおけるNH3とNH4+濃度の通年にわたる時別 連続観測,第57回大気環境学会年会,2A1000,p381,2016年9月7日~9月9日,北海道大学

研究組織

代表者:長田和雄(男、53歳)名古屋大学・教授、NH3/NH4+とHNO3/NO3-等の観測・解析

- 協力者:原由香里九州大学応用力学研究所・助教、数値モデル
- 協力者:鵜野伊津志九州大学応用力学研究所・教授、総合解析

地球環境力学分野 一般研究

海洋生態系モニタリングのための群知能海中ロボットシステムの研究開発

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、海洋生態系のモニタリングを行うための群知能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、広範囲に亘る海洋生態系のモニタ リングや海洋調査に資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SOARER (Fig.1)や長期間・広範囲の運 用を目指す実海域用ソーラー水中グライダーTonai60 (Twilight Ocean-zonal Naturalresources and Animals Investigator) (Fig.2)を開発している。最大潜航深度1,500mの

 Fig.1
 主翼独立制御型ソーラー水中グライダー

 SOARER



Fig.2 ソーラー水中グライダー Tonai60

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技術交流や情報交換によって群知能海中ロ ボットシステムに係る研究の飛躍的な進展が図れると考えたことも共同利用研究の目的の ひとつである。

SOARER には、多項目海洋環境データ ロガーRINKO-Profiler を搭載している。-方, 最大潜航深度 60m の 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 メラや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A-tag, 多項 目 海 洋 環 境 デ ー タ ロ ガ ー RINKO -Profiler を搭載している。これらの自律型 水中グライダーには実海域での高度な自律 性が求められるので,その自律制御システム を確立するためには、深海水槽における多岐 に亘る基礎データの収集・解析が必要不可欠 である。研究代表者らの所属する大阪府立大 学の船舶試験水槽(長さ×幅×深さ: 70m×3m×1.5m) は,水中グライダーの性 能評価を行うには幅と水深が不十分であり, 九州大学・応用力学研究所の深海機器力学実 験水槽(長さ×幅×深さ:65m×5m×7m) を使用させていただくことが本研究の進

展に最も有効であると判断した。貴研究所・

□研究の成果

本研究では、実海域でこれら複数機の自律型水中 グライダーを効率的に運用するために、群知 能海中ロボットシステムの構築を検討 した。グライダー型海中ロボットによ る長期間・広範囲の運用を実現するため に、雰囲気水と機体との密度差を利用した密 度差エンジン水中グライダー(Fig.3)を提案 し、その実現可能性を検討した。バッテリーなどの 動力源を一切用いずに浮力と機体姿勢を自動的 に調整することのできる試験機体を設計・製作 して、食塩水を用いて密度躍層を形成した水槽 試験によって「密度差エンジン水中グライダー」が 実現可能であることを実証した(Fig.4)。

次年度以降、SOARER やTonai60 などの自律型水 中グライダーと連携した群知能海中ロボットシ ステムの構築に向けて,完成度を高めたいと 考えている。群知能海中ロボットシステムは, 長期間・広範囲に亘る海洋環境生態系のモニタ リングを目指していて,海中音響観測に関する装置 (4ch-UPAMS および 2ch-UPAMS)を用いた海



Fig.3 密度差エンジン水中グライダー 試作機



Fig.4 密度差エンジン水中グライダーの潜航試験

棲哺乳類の鳴音解析アルゴリズムの構築、船舶が発生する雑音の低減手法の開発を行った。

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	教授	代表者・総括,システム計画
石井 和男	九州工業大学・ 生命体工学研究科	教授	水中ロボットの自律制御
中村 昌彦	九州大学・応用力学研究所	准教授	所内世話人

□研究組織

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 森井 康宏

1. はじめに

近年、海洋観測・調査用の海中ビークルは、専 用の母船を必要とする大型の物から、専用の母船 を必要としない小型のものまで数多く作られ、実 用的な段階へと入りつつある。特に、技術者の支 援を必要とせず、海洋物理の研究者が比較的容易 に海洋観測に使用できる、中、小型のビークルは、 専用母船、すなわち専用の母船に装備された投 入・回収装置を持たないため、作業がいっそう困 難なものとなる。長崎大学附属練習船長崎丸は応 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、円盤型水中グライダーによる海洋観 測、グライダーの位置検出の試み、観測母船の模 型試験立会、ビークルの針路保持制御実験につい て報告する。

2. 円盤型水中グライダーによる海洋観測

円盤型水中グライダーによる海洋観測が 2016 年 7月、東シナ海で実施された。観測場所を Fig.1 に 示す。水深 100m の海底が平らな海域である。



Fig. 1 海洋観測海域

ビークル投入後、SSBL でビークルが順調に潜航 していくことを確認した後、「長崎丸」はビークル 投入地点 C1W1 (30.15'284 N, 126.51'055 E)を離 脱して決められた定点 C1N (30.18'704 N, 126.58'987 E)、C1S (30.08'553 N, 126.55'234 E)、 C1E (30.11'999 N, 127.52'814 E)、C1C (30.15'531 N, 126.57'206 E)、C1W2 (30.15'141 N, 126.51'201 E)を巡回し、「長崎丸」装備の CTD による観測、 採水、採泥(堆積物採取)、FRRF(高速反復速度 蛍光光度計)による光合成パラメータの測定、 TurboMAP(乱流海洋鉛直微細構造測定装置)によ る微細な流速分布の測定などの海洋観測を行った。

Fig.2、Fig.3 に CTD による海水温度・塩分計測 結果と ADCP による流速計測結果の一例を示す。 夏季の観測であるので,海面付近で水温・塩分が大 きく変化している様子が捉えられている。また,水 深 60m~80m付近で流速が周期的に変動している ことがわかる。



Fig.2 ビークルで観測された水温・塩分の鉛直分布



Fig. 3 観測された流速鉛直分布の時間変化

3. 水中グライダーの位置検出の試み

長崎丸装備のソナーにより潜航中のビークルを 検出できるかどうかの試験を2016年7月に実施し た。海域は海洋観測を実施したFig.1に示す海域と 同じである。視認できる漁具をソナーでも確認でき たがビークルの検出には至らなかった。試験時は測 定範囲が300m程度のSSBLでもビークル位置を 特定できなかったので、検出可能範囲内にビークル が存在しなかった可能性が高い。



Fig. 4 ソナーによるビークル検出

4. 新造中の長崎丸の模型試験立会

新造中の長崎丸の模型試験が三井造船昭島研究 所で実施中であったので、立会いを2017年2月に 実施し、斜航中に船体に働く流体力、強制動揺試験 により得られる船体に働く流体力について情報収 集を行った。引き渡し後の長崎丸の操船についての 有用な情報となるはずである。



Fig. 5 斜航試験

5. 円盤型水中グライダーの針路保持制御実験

バーチャルモアリング性能を向上させるための 針路保持制御実験が 2017 年 3 月に長崎新漁港沖の 水深 60m海域(Fig. 6)で実施された



Fig. 6 実験実施海域

コントローラはビー クルの非線形運動方程 式を滑空平衡状態のま わりで線形化して得ら れる状態空間表現をら たこ設計される LQI コ ントローラが採用され た。事前に実施された 1/2模型を使用した水槽 試験 (Fig. 7) で PID コ ントローラ良好な制御 性能 (Fig. 8) が得られ たためである。残念なが ら、滑空角度が想定した



Fig. 7 模型試験

値と大きく異なってしまったため良好な針路保持 性能が得られなかった。次年度共同利用が採択され れば再度挑戦する予定である。



Fig. 0 英主的该称

5. 研究組織

·研究代表者

森井康宏 (長崎大学水産学部教授)

·研究協力者

山脇信博、内田淳、清水健一、木下宰、楠本成美、 八木光晴(長崎大学水産学部) 中村昌彦 {所内世話人}、野田 穣士朗

(九州大学応用力学研究所)

富山湾におけるブリの回遊メカニズムと漁獲量中短期予測に関する研究

富山県農林水産総合技術センター水産研究所 小塚 晃石川県水産総合センター 辻 俊宏

1. 目的

富山湾においてブリは古くから漁獲されている重要な魚種である。特に冬季に定置網で漁獲される大型の 成魚は寒ブリと呼ばれ、市場価値が非常に高い。そのため寒ブリの豊凶は水産業界のみならず地域社会の大 きな関心事であり、漁況予測とその変動要因の解明が求められている。そこでこれまで、応用力学研究所の 海洋同化モデル DREAMS_M の水温分布を用いて、ブリの漁期を通した漁獲量の予測を実施してきた。一方実 際のブリの漁獲量は、約3か月の漁期中における数回の大量入網によって決まることが多く、より精度の高 い漁獲量予測を行うには、日単位の解析が必要である。これまで大量入網の要因として気象擾乱がいくつか の研究で指摘されているものの、海洋環境との関係については、ほとんど調査されていない。そこで、ブリ の大量入網機構を解明することを目的とし、富山湾における大漁入網の3事例について、流速との関係を解 析した。

2. 方法

富山県農林水産総合技術センターが収集している県内の定置網のブリ(4kg以上)漁獲量データと漁業 者から聞き取りを基に大量入網日を推定した。大量入網のあった漁期(11月~1月)の深度 10m, 50m, 100m の富山湾西部(図1)のモデル流速値を DREAMS_M から抽出し、北東方向の流速成分の全メッシュ1日平均 (以下、平均流速)を深度別に計算した。気象擾乱の指標とするため、島根県西郷と北海道寿都との日平均

海面気圧の差(以下、気圧差)を求めた。

3. 結果および考察

大量入網日として、1997 年 12 月 21 日(富山県西部〜中央部の定置網に 1 万尾超の入網)、2011 年 1 月 2 日(富山湾西部の定置網に 1 万尾超の入網)、2014 年 12 月 27 日(富山湾西部の定置網に 2000 尾 超の入網)を選定した。

漁期全体の気圧差と平均流速(いずれも5日移動平均)の時系列を比較した。期間中、平均流速は正の値 を示すことが多く、つまり北東流が卓越していた。しかしながら、西高東低の気圧配置となり、気圧差が大 きくなると、いずれの水深帯においても、平均流速が小さくなり、流れが弱まるか、南西流に転じた(図2)。 さらに、その後1週間程度で北東流が卓越する状態に戻ることが示された。

次に大量入網日前の気圧差および平均流速の変化に着目した(図 2)。3 事例とも大量入網の 8~11 日前 に気圧差が 8.7~13.8 の極大となり、それに合わせて平均流速も極小となった。その後、平均流速が急激に 上昇する途中で大量入網となった。つまり、3 事例の共通点として、西高東低の気圧配置が強まり、富山湾 西部の流況は一時的に北東流が弱まり、さらに南西流となった後に、冬季に特徴的な北東流が卓越する状態 に戻る約 10 日間以内に大量入網が起こったといえる。

気象擾乱に伴った流況変化が大量入網の要因である可能性があることが示された。一方、ここで示した同様の気象擾乱と流況下においても大量入網とならない場合も多く見られる。今後、さらに事例を増やし、大量入網機構を明らかにしていきたい。



図 1. 平均流速の計算に用いた富山湾
 西部のメッシュの位置
 黒色:10, 50,100m、濃灰色:10,

50m、薄灰色:10m を使用





図 2. 水深別日平均流速と気圧差(いずれも5日移動平均)
 左上 1997 年漁期
 右上 2010 年漁期
 左下 2014 年漁期
 射影は推定された大量入網日

4. 発表等実績.

小塚 晃 富山湾周辺の流れと漁況. 第47回日本海定置漁業振興大会,2016.6.7,魚津市小塚晃 富山湾の平均的な流れと、冬型気圧配置(ブリ起こし)のイベント的な流れ. 第71回日本海海洋調査技術連絡会,2016.12.7,千代田区

5. 研究組織

研究代表者	石川県水産総合センター	辻	俊宏	主任研究員
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	富山県農林水産総合技術センター	小塚	晃	研究員
研究協力者	九州大学応用力学研究所	千手	智晴	准教授

船体に取り付けたサテライトコンパスによる外洋波浪の計測手法開発と

GNSS反射信号との対応関係

神戸大学 海洋底探査センター 河口信義

研究要旨

本研究は GNSS の一つである GPS 衛星から発射された信号の海面による反射波を計測することで, 海面における波浪・海氷,風速などの状態を推定するための基礎的な研究である.本年度は昨年度作成 した自動計測可能なサテライトコンパスユニットを曳航船及び被曳航船に設置し,多種類の洋上移動体 姿勢計測装置を搭載した中型自航式多目的船に設置し,出入港時,狭水道通過時,沿岸航海時及び作業 時に分けて,それぞれの計測装置から得られた結果を示し,GNSS-R による波浪計測の糧とする.

1. 目的

当研究室は 2015-2017 までの間,文部科学省宇宙科学研究拠点形成プログラム「GNSS 反射信号を用 いた全地球常時観測が拓く新しい宇宙海洋科学」をテーマとした研究プロジェクトに参画しており,本 研究はその中で船舶に搭載したサテライトコンパスによって波浪による船体動揺の計測を実験的に調 査することを目的とし,洋上移動体にサテライトコンパス設置した実験を行ったので,その結果を述べ る.

2. 実験

洋上移動体におけるサテライトコンパスユニットを用いた実験は、2016年9月30日から10月2日までに3日間、大分港より神戸港まで航行する船舶に搭載し実施した.図1にサテライトコンパスユニットを示す.実験洋上移動体としての曳航船は全長30.4m、総トン数19トン、最大乗員数6名及び被曳航船は長さ60m、幅22m、深さ3.5m、船体重量は535トンで、図2に曳航船と被曳航船を、図3に大分-神戸間の実験航海の航路を示す.



図1 サテライトコンパスユニット

図2 曳航船と被曳航船



図3 実験航路

全航海時間は 38 時間であり航海であったが、その間において比較的荒天と考えられるのは台風の影響を多く受けていた海域は前章の航過表によると山口県祝島付近であったことから、ここではその荒天時(波高1m,風向 NNW,風力4)に的を絞って解析を行う.

3. 実験結果

図5に荒天時の曳航船と被曳船の実際の針路,図6に実際の速力,図7に上下方向の移動量,図 8-9に姿勢角であるロール・ピッチ角を曳航船と被曳航船について示す.



4. まとめ

本研究は大分から神戸を航行する曳航船及び被曳船に加速度計及びサテライトコンパスを設置し,針路・速力・姿勢角・上下動について荒天時の実験結果を示した.その結果から,概ね洋上移動体における針路・速力・姿勢角・上下動は計測可能で,今後は本装置を用いて海洋波浪情報の抽出を試み,波浪 計測ブイによる検定や GNSS-R 信号との対応関係を調べる予定である.

研究成果

- 1) GPS コンパスを利用した曳航船・被曳船の船体姿勢計測について,久保田崇;河口信義;斎藤威志, 日本航海学会講演予稿集 Vol.4, No.2, pp.250-253, 2016.10.
- Experimental Result of 3-D Movements of Tug Boat and Barge using GPS Compass, Takashi KUBOTA, Nobuyoshi KOUGUCHI and Takeshi SAITO, Proceedings of the Asia Navigation Conference '16 Yeosu, pp.62-71, 2016.11.

GNSS 反射波信号観測用受信機の開発とマルチコプタによる実証実験

中部大学工学部 海老沼拓史

1. 目的

本研究では、海面で反射した測位衛星システム(GNSS: Global Navigation Satellite System)の信号を利用した新しい海洋リモートセンシングの実現を目標としている.これは、GNSS 衛星を信号源としたパッシブなレーダー観測であるため、小型化・省電力化が可能である.また、一度に複数の GNSS 信号を観測できるため、広範囲な海洋観測が可能となる.このようなセンサを複数の小型衛星や無人飛行機などに搭載することで、時間分解能の高い海洋リモートセンシングが期待できる.

九州大学応用力学研究所との平成 28 年度共同利用研究では,平成 27 年度に開発した GNSS 反射波観測用受信機を,応用力学研究所が所有するマルチコプタに搭載して海面高 度計測の実証実験を実施した.

2. GNSS 反射波による海面高度計測

GNSS 反射波観測受信機は、GNSS 衛星からの直達波を観測する天頂方向のアンテナと、海面からの反射波を観測する nadir 方向のアンテナをと反射波を搭載している.海面からマルチコプタまでの高度が地球の半径に対して十分に小さく、海面が平面として近似できるものとすると、海面高度と GNSS 信号の幾何学的関係は図 1 で表すことができる.



図 1: GNSS 反射波と海面高度との幾何学的関係

ここで,海面から観測地点までの高度をh,衛星仰角をE,アンテナ間の時刻同期誤差をdt,光の 速度をcとすると,直達波と反射波の伝搬距離差dpは次式で表される.

$$dp = 2h \sin E + cdt$$

GNSS 反射波観測受信機で観測される伝搬距離差dpに対して、未知数は海面からの高度 h とアンテナ間の時刻同期誤差dtとなる.通常,複数の GNSS 衛星が同時に観測できるた め、これら 2 つの未知数に対して最小二乗法を解くことで、海面から観測地点までの高度 を求める.このとき、マルチコプタの位置が高精度で測位さえていれば、GNSS 反射波観測 受信機で推定された高度から、相対的に海面高度を求めることができる.

3. 海面高度計測の実証実験

本研究では、平戸に停泊中の銀河丸から、GNSS 反射波受信機を搭載したマルチコプタを フライトさせ、高度 150m からの海面高度計測の実証実験を実施した. 図 2 に計測結果の 一例を示す.ここで、青線は GNSS 反射波受信機から推定されるマルチコプタの高度であり、 赤線は平戸に設置されている電子基準点との精密測位によるマルチコプタの高度を示して いる.



図 2: GNSS 反射波による高度推定結果

図2 において、マルチコプタが観可かの甲板上ご着地している高度 0m 付近では、海前からの反射波を受信できていないためご精密測益結果とは一致しないが、フライト中の高度 50m 以上では、GNSS 反射波による海前からの高度の推定値と高い一致性を示している。しかし、海面での反射時における電波の帯起した、反射点以外からのマルチパスの影響で、GNSS 反射波による高度推定値のなどっきが大きい。

マルチコプタの搭載できるアンテナのサイズに制動あり、マルチパスの低減は胚難であるが、反射波観則専用のアン テナ語が冷後の課題である.また、今回の実験では伝搬開発をの計測に疑び距离観測値を用いたが、より精度の高い搬送 波站目による高度推定も試みる予定である.

沿岸波浪と GNSS 反射信号との対応関係の観測

京都大学大学院理学研究科 根田昌典

目的

文部科学省国家課題対応型研究開発推進事業における平成 28 年度宇宙航空科学技術推進委 託費に採択されている研究プロジェクトに関連して,波浪と GNSS 反射波の関連性を調査す る必要性が高まっている。そこで,波浪がGNSS 反射波に与える影響についての基礎的な調査を 実施するために、GNSS レシーバと波浪の長期観測を実施する。和歌山県田辺湾にある京都 大学防災研究所白浜海象観測所が管理する高潮観測塔を利用して、GNSSレシーバを長期問 設置し、塔の通常観測データを利用して GNSS 反射波と波浪の関係についての基礎的デー タを取得する。検証のために、応力研が所有する波浪ブイ、マルチコプターを借用して和歌 山県田辺湾において波浪観測を行う。また、(独) 水資源機構が琵琶湖に設置している安公川沖 ブイにおいても同様の試験観測を実施する。

研究の実施体制

本研究は以下の体制で実施した。 研究代表者:根田昌典(51):京都大学大学院理学研究科 助教 所内世話人:市川香(50):応用力学研究所 准教授

手法と結果の概要

研究は、波浪と GNSS 反射波の関連性を調査す るための予備的な調査を実施した咋年の結果を踏 まえ、継続的なデータを取得するために京都大学防災 研究所流域災害研究センター白浜海象観測所の田 辺中島高潮観測塔と水資源機構琵琶湖開発総合管 理所が所轄する安暴川沖総合自動観測所に GNSSレシーバーを設置し(写真1)、水面状態や海上風 などの周辺環境による GNSS 信号の反射波の挙動を 調べるための基礎データを取得した。



写真 1: (左)観測塔での GNSS レシーバー 設置場所(赤線枠)と設置近影

研究では京都大学防災研究所流域災害研究センター白浜海象観測所の協力を得て、2016 年 6月27日に和歌山県田辺湾湾ロ付

近にある田辺高潮親測塔にGNSSレ シーバーを設置し、連続観測を実 施した。波高データから有義波 高、有義波周期、Mean Square Slope などの波浪パラメーターを 計算した(図1)。



図1:設置翌日(6月28日)の有義波高とMSSの時間変化

このデータを基にして昨年度実 施した波浪ブイのデータを検証し たところ、GROWTHプロジェクト で新規購入した小型の波浪ブイは 風波程度の短周期波を比較的良く 再現している(図2)。一方、小型ブ イは観測塔の波高計よりも高い有 義波高を示すとともに有義波周期 はより長い値を示した。小型ブイに よる観測値はほぼ同時期に観測し た中型波浪ブイの観測値とほぼ同 等である。白浜観測塔の波高計は超 音波式であるためそのフットプリ ントの影響で波高データが過小評 価される可能性があるとの指摘も あり、5秒以上の周期の波の成分だ けで比較したところ、有義波高、周 期ともに観測塔データとブイデー タの差が縮小した。(表1,2,図3)

また、波浪情報としてマイクロ波 領域でもっとも感度があると考え らるMean Square Slopeと成分波の有



表1:5秒以下の周期成分から計算した有義波の波高と秋季の比較

	有義波高(塔)	周期	有義波高(ブイ)	周期
小型ブイA	0.131m	3.6s	0.278m	4.5s
小型ブイA	0.119m	3.7s	0.298m	4.7s

表2:5秒以上の周期成分から計算した有義波の波高と秋季の比較



図 3:(左) 5 秒以上の周期の成分比較と(右) 5 秒以下の周期の成 分比較の例。線は小型ブイの値、黒線は観測塔波高データを示す。

義波の波形勾配を比較したところ、うねり成分についてはよい一致を見せ、風波成分についてはあまりよい一致とは言えないことが分かった(図4)。これは有義波の定義と各成分波の波高分布の関係に依存するが、風波は波長のスペクトル幅が広いことに関しては注意が必要である。

GROWTHの一環としてGNSS信号による波浪観測試験は琵琶湖にある独立行政法人水資源 機構の安曇川沖総合自動観測所(安曇川沖ブイ)においても昨年度末に設置したGNSSレシ ーバーの維持作業を続けるとともに基礎データを取得した。また、2017年1月7日は安曇川

沖ブイに最も近い地域の一つである高島 市の琵琶湖こどもの国の湖岸においてド ローンを用いた比較検証事件を実施した。 大型のドローンは機器トラブルのため十 分なデータの取得はできなかったが、小型 ドローンによる反射波観測とGPS信号受 信器を用いた直達波の同時観測を実施し た。



図 4:(左) 観測された波の MSS と(中央)うねり成分 の MSS (右) 風波成分の MSS に対するそれぞれの成 分波から計算した有義波の勾配(有義波高/有義波長) の比較
内部波特有の共鳴現象に関する解析

研究代表者 神戸大学大学院工学研究科 中山恵介

研究の目的

過去における研究成果として, 辻・及川らは KP 方程式を利用し 2 層流体において 2 波 が干渉する場合, Miles の解で示されるような入射波に対して 4 倍にもおよぶ大振幅内部 ソリトン波の発生可能性を示した. しかし, 2層流体では critical level で示される内部ソリ トン波の振幅を抑制する特徴が存在し, 修正された Miles の解を直接適用できるかどう かの問題が存在する. 現在, 申請者等によって投稿準備が進められている論文において, 2 層流 体における内部波を取り扱う場合, 表面波とは異なるメカニズムで共鳴による大振幅の発 生が抑制される可能性が示されている. 一方で, 表面ソリトン波では修正された Milesの解によ りピーク位置の推定が可能であることがこれまでの本研究グループにより示された. そこ で本共同研究では, 入射波の振幅および critical level が内部波の共鳴現象に与える影響を 評価し, 内部波特有の共鳴現象の解明を行うことを目的とする.

研究の方法

2次元平面内において干渉する 2つの内部ソリトン波を対象とし, criticallevel が共鳴に よる振幅増幅に与える影響を検討するため,以下の研究項目を実施する.

- 1. これまでは、それぞれ独立したソリトン波同士の干渉を検討してきたが、本研究ではある間 隔で進行する2波が干渉する場合、つまり4波の干渉について検討する.
- 2. 4 波の干渉となる場合, 異振幅の共鳴による振幅増幅率を理論的に推定し, 計算により得られている大振幅が共鳴現象であるかどうかの確認を行う.
- 3. 内部波に対して、2波の干渉に critical level がどの程度影響をおよぼすかを検討する.

主要な成果

本研究の主要な結論は、以下のとおりである.

- (1) 表面波を対象として4波の干渉に関する検討を行った.臨界角度より大きな角度で入射・干渉する場合には、反射波が O-type であることから、その後の反射波同士の干渉 も容易に推定することが出来た.一方で、入射角度が臨界角度より小さい場合には、 (3142)-type での干渉となるため、反射波同士の干渉が stem を持つ複雑な形状を有す るのではないかと推測された.しかし、理論的な説明も含めて、反射波の干渉は O-type であ ることが分かり、その後の干渉も臨界角度より入射角度が大きい場合と同様に容易で あることが示された.
- (2) 上述の結果で示されたとおり、反射波を含む干渉もソリトン波の共鳴現象であること が示された.

(3) 内部ソリトン波の干渉に関して、大振幅となる場合、critical level との影響も含めて増幅 率が3程度にとどまることが示された.

研究成果報告

- K. Nakayama, T. Kakinuma, H. Tsuji, Oblique reflection of large internal solitary wave, European Journal of Mechanics (B), submitted, (2017)
- 中山恵介,清水健司,柿沼太郎,辻英一,ソリトン波群の共鳴を対象とした強非線形強分散 波動方程式による解析,土木学会論文集 B2(海岸工学),Vol.72, No.2, pp. I_7- I_12 (2016)

組織

中山恵介	国立大学法人神戸大学大学院 工学研究科・教授
柿沼太郎	国立大学法人鹿児島大学学術研究院 理工学域・准教授
辻 英一	国立大学法人九州大学応用力学研究所・助教

化学輸送モデルを用いた越境汚染に伴う大気から海洋への汚染質と黄砂の沈着過程の研究

一般財団法人 電力中央研究所 環境科学研究所 板橋 秀一

1. 目的

アジア域の急速な経済発展に伴い窒素酸化物 (NOx) などの大気汚染物質排出量が増加し,それに よる大陸からの越境汚染が懸念されている.大気汚染物質の動態を明らかにしていくには,その 除 去過程である沈着過程も重要な視点である.昨年度の共同利用研究(27AO-21)においては, ガス 状硝酸と海塩粒子から形成される粗大硝酸塩(NO₃)を化学輸送モデルで考慮し,中国由 来の反応 性総窒素化合物(NOy)の約48%が日本縁辺海域に沈着していることを明らかとした (Itahashi et al.,2016)本年度は,特に春季に見られる黄砂飛来時の粗大 NO₃の越境輸送を視野に 入れ,化学輸送モデルへの黄砂発生スキームの導入を検討し,検証を行った.

2. 手法

アジアスケールをカバーした化学輸送モデル CMAQ (Community Multi-scale Air Quality)を用いた. 化学輸送モデルの検証には, 2013年秋季から九州大学応用力学研究所において連続観測を行ってい るエアロゾル化学成分連続自動分析装置 (ACSA)を用いた. ACSA により 1 時間の高時間分解 能で微小・粗大 NO₃などの観測が可能である.3 年にわたる微小・粗大 NO₃の観測値の解析も合 わせて進めた. CMAQ に導入した黄砂発生スキームでは,土地利用区分毎の臨界摩擦速度を設定 するが,これらの設定がガス状硝酸と鉱物粒子から形成される粗大NO₃の再現性にも大きな影響 をもつことがわかった.一方,微小 NO₃の観測値の解析から,高濃度となる事例が 2015 年1 月 に見られた.この事例について化学輸送モデルを適用し,詳細な解析を行った (Itahashi et al., 2017)

3. 結果と考察

化学輸送モデルは 2015 年1 月7-18 日の解析対象期間に観測された 2 度の高濃度 PM_{2.5} を良好に 再現できていた. ACSA の解析から, 1 月 11 日のピーク時には硫酸塩 (SO4²) よりも NO3 が高濃 度であった. 図 1 には,モデルで計算されたこのピーク時の空間分布を示す. 福岡では SO4²は約 10 μ g/m³ であったのに対し, NO3 は 15 μ g/m³ であった. 図 1 には後方流跡線解析の結果 (左図の黒いライン, 丸い点は 6 時間毎の空気塊の位置) も示すが,高濃度時に大陸からの移流があったことが示唆され た. 流跡線上の NO3 の時間変化を解析し, NO3 の越境輸送には SO4²と NO3 の対イオンであるアン モニウム (NH4⁺) とのイオンバランス,湿度などの気象条件が重要であることを明らかとした.



図1. 西日本において高濃度 PM_{2.5} が観測された 2015 年 1 月 11 日 15 時(日本時間)の (左) SO₄²,(右) NO₃のモデル計算値. コンターは40,60 µg/m³を示す.

4. まとめ

SO4²の越境輸送は従来から指摘されていたが、冬季の NO3 の越境輸送の重要性が本研究から明らか とされた. 今後は特に春季の事例を対象として、粗大 NO3 の生成に関わる黄砂発生スキームについ て検証を進め、粗大 NO3 の大気中での動態や沈着(窒素負荷)の生態系への影響をさらに解明して いく必要がある.

·研究体制

研究代表者	電力中央研究所 環境科学研究所	板橋秀一
研究協力者	大阪大学 工学研究科	嶋寺光
研究協力者	名古屋大学大学院 環境学研究科	長田和雄
研究協力者	国立環境研究所	杉本伸夫
所内世話人	九州大学 応用力学研究所	鵜野伊津志

・学会発表

Itahashi, S., Hayami, H., Uno, I., Uematsu, M.: Numerical analysis of nitrogen deposition from atmosphere on East Asian oceans, Goldschmidt Conference 2016, パシフィコ横浜, 2016 年6 月29 日

・学術論文

Itahashi, S et al. (2016), *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1002/2016GL068722 Itahashi, S et al. (2017), *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, doi:10.5194/acp-2016-870

淀川汽水域における海洋性植物プランクトン赤潮発生機構の解明

神戸大学 自然科学系先端融合研究環 内海域環境教育研究センター 林 美鶴

1. 序論

図 1 に示す淀川大堰より下流の感潮域(河口から約 10km の範囲)では、2007 年以降の春季に海洋 性有毒植物プランクトンの Alexandrium tamarense による赤潮と、これに伴うシジミ貝毒が 2011 年、 2013 年、2014 年及び 2016 年の春季に発生している。海水遡上により河川内の塩分が上昇すると海洋性植 物プランクトンが増殖可能となることから、これまでに現場観測を実施し、また流動モデルによる 解析を行った。2016 年度は一般の海洋数値生態系モデルに塩分を加味して、河口付近での A.tamarense の動態解析を行った。また、河川内で定点観測を行い、赤潮発生年と非発生年の生物生産環 境の差異を検討した。

2. 方法

淀川河口から 2.8km までの範囲を対象に、鉛直 3 層のボックスを設定して、リン循環を解析する数値生 態系モデルを構築した。植物プランクトン増殖の律速栄養塩がリンであることは確認している。上層は 0~ 0.5m、中層は 0.5~1.5m、底層は 1.5~河床で、塩分成層を元に設定した。2012 年4 月2~3 日の小潮時の一 潮汐隔時観測を実施し、物理項目に加え、A.tamarense の細胞密度や栄養塩などの計測も行っていることか ら、この日の再現計算(24 時間 1 分ステップ準定常計算)を行った。尚、この年は A.tamarense 赤潮の発 生はなく、河口付近でのみ A.tamarense が検出されたため、河口付近を計算対象とした。各層にリンの存 在形態として、栄養塩(DIP) DOP、A.tamarense を含めた植物プランクトン、及び懸濁態物質の 4つに分 け、これらの間の生化学過程および移流・拡散の物理過程を定式化して、各形態の濃度変動を計算した。同時 に A.tamarense も計算し、低塩分によって増殖が停止・枯死し、日周鉛直運動が時間(昼間上昇、夜間下降) だけでなく塩分によっても変化(低塩環境へは移動しない)するようモデル化した。一般的な海洋の生態 系モデルでは低塩環境は考慮されていない。そのため A.tamarense の塩分応答については、Lima and Ogata(2005)の培養実験を元に定式化した。塩分 5 毎のA.tamarense の増殖実験によると、塩分10 以下では増殖

出来ず、15 では多少増殖する。このことから、塩 分 15 以上の実験結果の近似線を求め、 A.tamarense が増殖可能な塩分の閾値、同時に枯 死の閾値として14 を使用した。拡散は鉛直方向で のみ考慮し、河床-水中間の物質交換は考慮し なかった。各層の日射量は、日中の観測で得た 水中光量の鉛直分布と全天日射量から算出し た。河川流量は国土交通省近畿地方整備局淀川 河川事務所から提供頂いた。上流境界での流速 は、ボックスの体積・塩分保存から推定した。 また淀川河川公園 (河口から上流約5km)沖河床 (水深 2m 前後)で2015 年1月~2016 年5月 に定点観測を行った。



図1 研究対象領域

3. 結果

各形態の計算結果の時間変動は概ね観測結果の時間変動を再現しており、A.tamarense を細胞密度換算した計算結果の相対バイアスは-3%であった。

各形態の移動量の計算結果を日合計し、これを大阪湾から下層への A.tamarense 流入量で標準化する と、大阪湾からの流入に対し河口では 7%しか増殖せず、流入量の約 8 割が上流へ輸送された。計算結 果を昼(6~18 時)・夜(18~6 時)に分けて合計したフラックスを、昼の大阪湾から下層への A.tamarense 流入量で標準化した結果(図 2 上)、A.tamarense は昼間に下層でのみ増殖し(大阪湾からの 流入量の 16%)、夜間に上流への輸送量が多かった。計算結果を上げ(22~13 時)・下げ(13~22 時) 潮流別に分けて合計したフラックスを、上げ潮流時の大阪湾から下層への A.tamarense 流入量で標準化 した結果(図 2 下)、上げ潮流で上流へ輸送され、下げ潮流で下流へ回帰した。

4. 考察

数値生態系モデルの結果から、A.tamarense の主たる起源は大阪湾であり、夜間に上げ潮流になると上流 への輸送がより増える可能性があることが示唆された。淀川で A.tamarense 赤潮は、2007 年以降に 5 回 (年)発生し、あとの 5 年は発生しなかった。大阪府による大阪湾での赤潮調査結果から、淀川で A.tamarense 赤潮が形成される場合は、必ず大阪湾でも赤潮が形成もしくは A.tamarense が出現していた。 しかし大阪湾で A.tamarense 赤潮が形成もしくは出現している場合、必ずしも淀川内でA. tamarense 赤潮 は形成されなかった。

A. tamarense 赤潮が発生しなかった 2015 年から、発生した 2016 年にかけて淀川河川公園河床で観測した結果によれば、2015 年の春期

は断続的に塩分が 10 を下回っ たが、2016 年は塩分 10 以上が維 持されていた。水温と日射量に ついては、両年で違いは見られ なかった。このことから、2015年 は A.tamarense が生息できない 塩分環境であったと考えられ る。両年の淀川流量を比較する と、2015年は多かったことか ら、過去 10 年の 3・4 月の平均 河川流量を調査したところ、も 赤潮発生年に比べ非発生年の流 量は多かった。以上のことから、 大阪湾で A.tamarense 赤潮が発 生し、且つ淀川内で塩分 10以上 に維持されることが、淀川内で A.tamarense 赤潮が形成される要 件であると言え、いずれかの要 件を無くす、現実的には淀川大 堰で流量を制御することで、赤 潮が抑制可能だと考えられる。



5. 成果公表

- ・林美鶴、宮脇知美、古賀竜太郎「塩分を加味して河川に適用した低次生態系モデル」、日本海洋学会 2016 年度秋季大会、2016 年 9 月
- ・ANALYSIS OF MARINE PHYTOPLANKTON IN THE YODO RIVER ESTUARY BY THE NUMERICAL ECOSYSTEM MODEL, EMECS'11 Sea Coasts XXVI, 2016 年 8 月

塩分を加味して河川に適用した

低次生態系モデル

○林 美鶴 ・ 宮脇知美 ・ 古賀竜太郎
 (神戸大・内海域セ)(神戸大・院海事)(川崎冷熱)
 キーワード: Alexandrium tamarense ・ 数値生態系モデル・塩分・感潮域・海水遡上

1. はじめに

淀川大堰より下流の感潮域(河口から約10kmの範囲) には海水が遡上する。ここにはシジミの漁場があり、2007 年以降の春季に海洋性有毒植物プランクトン Alexandrium tamarense による赤潮と、これに伴うシジミ 貝毒が断続的に発生している。これまでに著者らは、現 場観測結果(2012 年年度)から海水遡上要因を解析し (2014 年度春季)、物理モデルを用いた海水遡上のシミ ュレーションを行い(2014 年度春季)、物理素過程の寄 与を明らかにし(2015 年度春季)、遡上距離の推定式を 提案した(2015年度秋季)。河川の高塩化がA. tamarense 赤潮や貝毒の原因であるため(Yamamoto et. al., 2013)、 著者らの結果は河川流量を制御して低塩下を抑制するこ とで、これらを防止することが可能であることを示して いる。一方で、河川内の低次生物生産過程を明らかにし なければ、赤潮発生の根本原因を明らかにする事は出来 ず、また適切な低塩環境を定義することも出来ない。

低次生物生産過程を明らかにするには、数値生態系モ デルが有効だが、一般的な海洋の生態系モデルでは低塩 環境は考慮されていない。そのため著者らは、低塩環境 に耐性のある A. tamarense の生化学反応を考慮した低次 生態系モデルの構築を行ってきた(2014年秋季、2015年 春季)。本研究では、改良したモデルを用いて、淀川河口 での A. tamarense 濃度変動特性を解析した。

2. 方法

淀川河口から 2,800m 上流までの間を鉛直三層(~ 50cm、~1.5m、~海底)に分け、各層にA. tamarense、そ れ以外の植物プランクトン(主として珪藻)、動物プラン クトン、溶存無機態リン、溶存有機態リンを想定し、律 速栄養塩であるリン循環の数値生態系モデルを構築した。 A. tamarense の生化学過程には、低塩環境下では増殖が抑 制され、逆に枯死し、また鉛直日周移動が停止する反応 を加えた。これらの定式化やパラメータ設定は、Lima and Ogata (2005)の培養実験に基づいた。また光合成に DOP を利用できる様に設定した。光合成に関するパラメータ は、夏池ら(2013)の培養実験で求められた値を用いた。モ デルに、2012年4月2~3日(小潮、赤潮なし)の観測 データを与えて、24時間の準定常計算を行った。

3. 結果

図はA. tamarense の日合計収支で、下流境界から下層

に水平移流で流入する量(海洋からの供給量)4,185× 10³mg で標準化した割合である。また、昼夜と潮流別に 分けた収支も求めた。河口において、A. tamarense は底層 でのみ増殖し(図中アンダーライン左側の数値)、その量 は大阪湾からの供給量の 7%である。逆に表層では低塩 のため枯死する(図中アンダーライン右側の数値)。日周 鉛直移動では、低塩のため上層へは移動せず、夜間に底 層へ移動する(図中太字)。大阪湾から輸送された量の 78%が上流へ、主に上げ潮時に輸送されるため、夜間に 上げ潮になると輸送量が大きくなる可能性がある。26% は中層に戻るため。大阪湾から輸送された量の 52%は上 流へ輸送され、上流で失われる。

今回用いたデータは赤潮が発生しなかった時のデー タであるが、塩分に応じた A. tamarense の生化学反応は 表現できた。



図 A. tamarense の日合計収支割合

謝辞

本研究は(財)みなと総合研究財団による平成26年度 「未来のみなとづくり助成」、及び大阪湾広域臨海環境整 備センターによる平成23・24年度「大阪湾圏域の海域環 境再生・創造に関する研究助成」により実施した。調査 実施にあたり、国土交通省淀川河川事務所福島出張所に は多くのご指導を頂いた。研究にあたり大阪府立環境農 林水産総合研究所山本圭吾博士、国際エメックスセンタ 一柳哲雄博士から多くのご助言を頂いた。観測には、奈 良教育大学藤井智康博士のご協力を賜り、一部の観測機 器は九州大学応用力学研究所から借用し、松野健教授、 石井大輔博士にご尽力いただいた。関係各位に感謝申し 上げます。



CERTIFICATE OF ATTENDANCE AND PUBLICATION

this is to certify that

Mitsuru Hayashi, Tomomi Miyawaki, Ryutaro Koga

participated in

EMECS'11 – SEA COASTS XXVI Joint Conference

"Managing risks to coastal regions and communities in a changing world"

and presented as an *poster* presentation the following article

ANALYSIS OF MARINE PHYTOPLANKTON IN THE YODO RIVER ESTUARY BY THE NUMERICAL ECOSYSTEM MODEL

that is published in the Conference Full-size Proceedings submitted for indexation to Web of Science and Scopus

ANALYSIS OF MARINE PHYTOPLANKTON IN THE YODO RIVER ESTUARY BY THE NUMERICAL ECOSYSTEM MODEL

Mitsuru Hayashi, Kobe University, Japan Tomomi Miyawaki, Kobe University, Japan Ryutaro Koga, Kawasaki Thermal Engineering, Japan

mitsuru@maritime.kobe-u.ac.jp

In order to understand the temporal variation of the physics and fluid structure of Yodo River estuary in detail, we had made in-situ observation. And the temporal variation of *Alexandrium tamarense* which cause the shellfish poisoning of natural freshwater clam was analyzed by the numerical ecosystem model which is considered the salinity effects. Stratification develops in the downstream side. Chl.a concentration is high in the seawater region. *A. tamarense* is detected in the downstream side. The numerical ecosystem model including the salinity effect for *A. tamarense* was formulated. *A. tamarense* grow only in the bottom layer in daytime, and the daily mean of it is 7 % of it transported from Osaka Bay. *A. tamarense* is transported to the upstream in flood tide. 81 % of it transported from Osaka Bay goes to the upstream zone. Much *A. tamarense* transported to the upstream zone in nighttime due to the vertical migration. Therefore when it is the flood tide in nighttime, more of *A. tamarense* might be transported to the upstream zone.

Key words: Alexandrium tamarense, Yodo River, estuary, numerical ecosystem model, red tide, shellfish poisoning

I. INTRODUCTION

The Yodo River estuary shown in Fig. 1 which is defined in this research as a zone from the river mouth up to 10 km, has fisheries of natural freshwater clam around at 5 km from the river mouth. Shellfish poisoning of natural freshwater clam occurred intermittently in the estuary in spring since 2007, and the shipment of freshwater clams was halted due to government regulations. Cause of the shellfish poison is *Alexandrium tamarense* [1] which is poisonous marine phytoplankton appearing in Osaka Bay every year, and can growth in salinity environment of more than 15 [2]. The lack of fresh water discharge from the weir promoted the initiation of the bloom of *A. tamarense* [3]. In order to understand the temporal variation of the physics and fluid structure of the area in detail, we made in-situ observation and analyzed the temporal variation of *A. tamarense* by using the numerical ecosystem model.

II. METHODS

The observation was carried out during April 2nd and 3rd in 2012 in the neap tide. Vertical profiles of water temperature (T), salinity (S), fluorescence, photon (I) and so on were measured by CTD (the conductivity, temperature and depth profiler) in 10 cm width at 5 stations in the intertidal zone between the river mouth and the Yodo River weir shown in Fig. 1. Surface water (0 m) and

the bottom water which is above 1 m from the bottom were sampled at the same time by a bucket and Kitahara water sampler, respectively. Sampled water was dispensed to the poly bottles, and was analyzed for the chemical and biological analysis. The items are cell density of *A. tamarense*, Chl.a (chlorophyll-a), TP (total phosphorus) and DIP (dissolved inorganic phosphorous) concentrations and so on. Sampled water were kept in the dark and cool condition, and were transported to Research Institute of Environment, Agriculture and Fisheries, Osaka Prefecture to count the cell density, and to Hyogo Environmental Advancement Association to analyze Chl.a, TP and DIP concentrations and so on. The fluorescence values of CTD were converted into Chl.a concentrations using the analyzed Chl.a concentrations. ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) observation was carried out along the traverse line (L1 in Fig. 1) at the river mouth in every 23 cm depth at 0.2 Hz. The observation was repeated 4 cycles during one tidal period shown in Fig. 2(a). The water level was monitored every 10 minutes at Fukushima as shown in Fig. 1 by the Yodogawa River Office, Kinki Regional Development Bureau, Ministry of Land, Infrastructure and Transport.



Fig. 1. Study area.



Fig. 2. Temporal variations of tidal change.



Fig. 3. Size of the calculation zone.

The calculation zone by the numerical ecosystem model shown in Fig. 1 is from L1 up to 2,800 m upstream. Water depth became deeper toward the upstream side, and is shallow in the outside of the upstream boundary. Stn. 3 is included in the zone. The calculation zone was divided into the surface layer (above 0.5 m), the transition layer (0.5-1.5 m) and the bottom layer (below 1.5 m) m) as shown in Fig. 3. The phosphorus (P) cycling during 24 hours, which is one tidal period of the day was calculated. DIN/DIP ratio is larger than the Redfield ratio (C:N:P=106:16:1) in this observation. It means that the primary production is limited by DIP. The compartments of the numerical ecosystem model is shown in Fig. 4. The types of P are DIP, DOP, phytoplankton, A. tamarense, zooplankton and detritus, and are changed by the biochemical processes. Phytoplankton in this research means other than A. tamarense, and is mainly diatom. A. tamarense utilizes DOP in photosynthesis. The exchange processes between the layers or the outside of the area are the horizontal and vertical advection, the vertical diffusion, the natural sinking of phytoplankton and detritus and the diurnal vertical migration of A. tamarense. A. tamarense move to the surface during the day, and move to the bottom during the night. The horizontal diffusion would be quite small compere to the horizontal advection. Therefore the horizontal diffusion is not assumed. The water depth is shallow in the river. So, the vertical advection speed is assumed as a constant in each depth. The upstream and upward fluxes are positive.



Fig. 4. The compartments of the numerical ecosystem model

Temporal changes in P concentration of each compartment, P in phytoplankton, A. tamarense, zooplankton and detritus, DIP and DOP, are represented by the equations. For example,

equation (1) represents the temporal change of P concentration in *A. tamarense (ATM)*. The first and second terms mean photosynthesis. The 3rd term means extra cellular excretion of DOP by photosynthesis. The 4th term means mortality. The 5th term means grazing by zooplankton. The 6th term means the horizontal and vertical transports including the vertical migration.

$$\frac{dATM}{dt} = A_{1-i}ATM_{0} + A_{1-o}ATM_{0} - A_{2}(A_{1-i} + A_{1-o})ATM_{0} - A_{3}ATM_{0} - B_{1}ZOO_{0} + \frac{1}{V_{0}}(F_{d}U_{d}ATM_{d} - F_{u}U_{u}ATM_{u} + F_{s}WATM_{v} + F_{s}w_{t}ATM_{0} + F_{s}\frac{K}{H_{v}}(ATM_{v} - ATM_{0}))$$
⁽¹⁾

where A's are the coefficients of biochemical processes related to phytoplankton, and will be explained later. B_I represents grazing by zooplankton. Subscripts of the concentrations mean place. Subscript 0 refers to the calculating layer. Subscript d and u refer to the downstream and upstream side, respectively. But when the water flows out from the calculation layer, the concentration of the calculated layer should be used. Subscript v refers to the source layer of outflow. V_0 is the volume of the calculation layer. H_v is the distance between the surface and transition or the transition and bottom layers. F's are the section. U's are the horizontal advection velocity. Subscript d refers to the downstream side, u is the upstream side, and s is the surface. W is the vertical advection speed. K is the vertical eddy diffusivity. The estimation mothed of U, W and K will be explained later. w_t is the vertical migration speed of A. tamarense. It is $w_t > 0$ during the day (at 06-18), and means the upward motion. It is $w_t < 0$ during the night (at 18-06), and means the downward motion. Moreover, A. tamarense would not swim to the lower salinity layer. Therefore, the vertical advection, diffusion and migration are double in the transition layer which have two boundaries with the upper and lower sides.

 A_I represents the photosynthesis, and is the function of DIP or DOP concentration (DIP_0 , DOP_0), *T*, *I* and *S*. Equation (2) shows in case of DIP. A1 of phytoplankton does not include the term of salinity. And phytoplankton does not used DOP in photosynthesis.

$$A_{1-i} = V_{\max} \cdot \frac{DIP_0}{DIP_0 + k_p} \cdot \frac{T}{T_o} \exp(1 - \frac{T}{T_o}) \cdot \frac{I}{I_o} \exp(1 - \frac{I}{I}) \cdot \left[1 - \exp\left\{k_{gs}(S^* - S)\right\}\right]$$
(2)

The term of nutrient represents by the Michaelis-Menten equation. V_{max} is the maximum uptake ratio of nutrient. k_p is the half saturation constant of nutrient for phytoplankton. V is V_{max} and k_p are different depending on the type of nutrients and the phytoplankton spices. Shapes of the temperature and photon terms represent that growth is most active in the optimum water temperature (T_o) and photon (I_o) . However photoinhibition do not occur even when the photon in the water is more than I_o . So, $I=I_o$ is applied when $I>I_o$. The function of salinity effect is formulated based on the result of incubation shown in Fig. 5 [2]. And the threshold of salinity (S_g^*) which stop the growth of A. tamarense, and the coefficient of salinity dependency in the photosynthesis of A. tamarense (k_{gs}) are given. A_2 is the coefficient of the extra cellular excretion of DOP by photosynthesis. A_3 represents the mortality, and is given by the following equation which is the function of T, and of S only case of A. tamarense. The function of salinity effect is also formulated by Fig. 5.

$$A_{3} = m_{p0} \exp(k_{m-p}T) \cdot \exp\{k_{ms}(S_{m} * -S)\}$$
(3)

where m_{p0} is the mortality speed of phytoplankton at 0 deg-C, k_{m-p} is the temperature dependency of mortality for phytoplankton, k_{ms} is the salinity dependency of mortality for *A. tamarense*, S_m^* is the threshold of salinity in photosynthesis of *A. tamarense*. Mortality accelerates when salinity is over S_m^* .



Parameters of constant of the ecosystem model are shown in Table 1, and are referred to the previous study [4]. It analyzed the competitive relationship of diatom and non-diatom in the inner part of Osaka Bay which is the estuary of the Yodo River. w_t has been tuned to reproduce the observed value, and is 1/20 of the value by reference [4]. V_{max} and k_p related to photosynthesis are referred to previous study [5] based on the incubation by using the Yodo River water. The parameters of salinity for *A. tamarense* were determined based on Fig. 5.

The data sets of the boundary and environmental conditions of T, S, I, V, H_v and F_v , which vary temporally and are inputted to the model every minute for 24 hours, were constructed by the observation data. The variations of salinity are 1.0-2.2 in the surface layer, 9.1-12.7 in the transition layer and 24.6-26.5 in the bottom layer. Salinity in the surface and transition layer are always less than 14 which is the threshold of salinity in photosynthesis of A. tamarense. The variations of water temperature is 10.8-11.6 deg-C which is lower than the optimum water temperature. Photoenvironments were the optimum condition at 6 to 18 in the surface layer, and is enough for photosynthesis.

P concentrations in Stn. 1 were used as the boundary condition of the downstream side, and it in Stn. 5 was used as the upstream side. P concentrations in phytoplankton were calculated by Chl.a concentration converted from fluorescence values of CTD and P/Chl.a which was estimated by C/Chl.a=30 [6], the Redfield ratio and the atomic weight of C and P. P concentrations in zooplankton were assumed 10 % of phytoplankton. P concentrations in *A. tamarense* estimated by the cell density and P weigh par cell which calculated by C weigh per cell and the Redfield ratio. 2,000 pg-C cell⁻¹ [7] was used, then 48.7 pg-P cell⁻¹ was obtained. TP:DOP in the inter tidal zone of Yodo Rivre is 14.5 % [8]. P concentrations in detritus is obtained by subtracting these concentrations from the TP.

Parameters	Symbol	Value	unit
Surface Area of Box	F _s	2,100,000	m ³
Cross Section Area of the Upper Layer at the Downstream Boundary	F _d	400	m ²
Cross Section Area of the Middle Layer at the Downstream Boundary	F _d	800	m^2
Cross Section Area of the Upper Layer at the Upstream Boundary	F_{u}	350	m^2
Cross Section Area of the Middle Layer at the Upstream Boundary	F_{u}	700	m^2
Sinking Speed of Phytoplankton	W _p	23.2×10 ⁻⁵	cm s ⁻¹
Sinking Speed of Detritus	Wd	23.2×10 ⁻⁴	cm s ⁻¹
Vertical Migration Speed of A. tamarense	w _t	0.39×10 ⁻³	cm s ⁻¹
Maximum Uptake rate of Phytoplankton	V max-p	0.75	day ⁻¹
Maximum Uptake rate of A. tamarense	V _{max-t}	0.5	day ⁻¹
Half Saturation Constant of DIP for Phytoplankton	k_{p-p}	0.12	μM
Half Saturation Constant of DIP for A. tamarense	k_{p-i}	0.15	μM
Half Saturation Constant of DOP for A. tamarense	k _{p-0}	0.1	μM
Optimum Ligth Intensity of Photosynthesis for Phytoplankton	I _{о-р}	75	$\mathrm{E} \mathrm{m}^2 \mathrm{s}^{-1}$
Optimum Ligth Intensity of Photosynthesis for A. tamarense	I _{o-t}	100	$\mathrm{E} \mathrm{m}^2 \mathrm{s}^{-1}$
Optimum water temereture of photosynthesis	Τ _o	30.8	°C
Salinity Dependency of Photosynthesis for A. tamarense	k _{gs}	0.23	
Threshold of Salinity for Photosynthesis of A. tamarense	S_g^*	14	psu
Ratio of extra cellular excretion of DOP by photosynthesis	A_2	0.135	$g m^{-1} s^{-1}$
Mortality Speed of Phytoplankton at 0 deg-C	m_{p0}	8.0	m ³ g-P day ⁻¹
Temperature Dependency of Mortality for Phytoplankton	k _{m-p}	0.069	°C
Salinity Dependency of Mortality for A. tamarense	k _{sm}	1.2	
Threshold of Salinity for Mortality of A. tamarense	<i>Sm</i> *	14	psu
Ivlev Constant	λ	0.47	
Threshold of Phytoplankton Density for Grazing by Zooplankton	PHP*	0.1	mg Chl.a ⁻¹
Grazing Speed of Phytoplankton by Zooplankton at 0 deg-C	g_{p0}	0.1	
Temperature Dependency of Grazing for Zooplankton	k _{g-p}	0.069	$^{\circ}C^{-1}$
Constant for Urine Generation of Zooplankton	α	0.4	
Constant for Fecal Pellet Generation of Zooplankton	β	0.3	
Mortality Speed of Zooplankton at 0 deg-C	m_{z0}	30.0	
Temperature Dependency of Mortality for Zooplankton	k _{m-z}	0.069	$^{\circ}\mathrm{C}^{-1}$
Decomposition Speed of Detritus to DIP at 0 deg-C	d _{di}	0.03	
Decomposition Speed of Detritus to DOP at 0 deg-C	đ _{ảo}	0.03	
Decomposition Speed of DOP to DIP at 0 deg-C	d _{oi}	0.03	
Temperature Dependency of Decomposition of Detritus to DIP	k _{di}	0.069	°C ⁻¹
Temperature Dependency of Decomposition of Detritus to DOP	k _{do}	0.069	°C ⁻¹
Temperature Dependency of Decomposition of DOP to DIP	k _{oi}	0.069	°C ⁻¹

Table 1. Values of the parameter used in the ecosystem model.

U, W and K_v are estimated by the physical model. The governing equations based on water and salt balances. The water balance in each layer are given by the following equations.

$$\frac{dV_1}{dt} = U_{d1}F_{d1} - U_{u1}F_{u1} + WA_s = 0$$

$$\frac{dV_2}{dt} = U_{d2}F_{d2} - U_{u2}F_{u2} = 0$$

$$\frac{dV_3}{dt} = U_{d3}F_{d3} - U_{u3}F_{u3} - WF_s = \frac{dH_3}{dt}F_s$$
(4)

where subscript u refers to the upstream boundary, d is the downstream boundary. The subscripts of number refer to the layer. H_3 is the thickness of the bottom layer. Since V_1 and V_2 are constant, the water budgets by advection are zero. The variation of V_3 by the tidal change and the budget of advection are balanced in the bottom layer. U_{d1} , U_{d2} and U_{d3} were obtained by ADCP observation. Therefore, the unknown quantities are U_{u1} , U_{u2} , U_{u3} and W.

The salt balance in each layer are given by the following equations.

$$\frac{dS_{1}}{dt}H_{1}F_{s} = U_{d1}S_{d1}F_{d1} - U_{u1}S_{u1}F_{u1} + WS_{2}F_{s} + K_{v12}\frac{S_{2} - S_{1}}{H_{12}}F_{s}$$

$$\frac{dS_{2}}{dt}H_{2}F_{s} = U_{d2}S_{d2}F_{d2} - U_{u2}S_{u2}F_{u2} - WS_{2}F_{s} + WS_{3}F_{s} + K_{v12}\frac{S_{01} - S_{02}}{H_{12}}F_{s} + K_{v23}\frac{S_{03} - S_{02}}{H_{23}}F_{s}$$
(5)
$$\frac{dS_{3}}{dt}H_{3}F_{s} = U_{d3}S_{d3}F_{d3} - U_{u3}S_{u3}F_{u3} - WS_{3}F_{s} + K_{v23}\frac{S_{02} - S_{03}}{H_{23}}F_{s}$$

where subscript 12 refers to the boundary of the surface and transition layers, 23 is the boundary of the transition and bottom layers. The additional unknown quantities are K_{v12} and K_{v23} . The unknown quantities at the observation time are obtained by the inverse matrix because there are six equations for six unknown quantities.

III. RESULTS AND DISCUSSIONS

Stratification develops in the downstream side. Seawater intrudes to close to Stn.9 in flood and high tides. And Chl.a concentration is high in the seawater region. Seawater intrusion stops at around Stn.7 in ebb and low tides. High concentration of Chl.a near the surface would be freshwater phytoplankton. Seawater expansion to the river spread a habitat of marine phytoplankton [9]. *A. tamarense* is detected in the downstream side mainly, therefore the calculation zone has been set at the river mouth. However, the cell density is small, and the red tide was not formulated in this year. Figure 2(b) shows the depth-time cross section of the flow velocity at the river mouth. Plus means the upstream flow. It is the downstream flow in all depth from the observation start until 23 o'clock which is weak ebb tide. It is the upstream flow in all depth from 1 to 4 o'clock which is flood tide. Since the variations of horizontal advection by the budget estimates, it is the downstream flow in all boundaries during 13-21. Therefore, this period was defined as ebb tide. And the other period, during 21-13, was defined as flood tide. The estimated vertical advection velocity is $\pm 9 \times 10^{-3}$ cm s⁻¹, and the vertical diffusion coefficient is 10^{-5} - 10^{-4} cm s⁻².



(a) Temporal variations of calculation and observation (b) Correlation with statistical values. Fig. 6. Calculation result of A. tamarense.

Figure 6(a) is the results of cell density of *A. tamarense*. Dots show the observed data with the error bar which means the conversion error from concentration in cell density. The results almost reproduced the observed values. Figure 6(b) shows the correlation chart with statistical values. DIP and Chl.a concentrations are under estimate because freshwater phytoplankton is not considered in the model. But *A. tamarense* is over estimate a little especially in the surface layer. Phytoplankton tends to increase only in the daytime in the bottom layer. Since *A. tamarense* move to the bottom during night, the increase tendency is also in the nighttime a little.

Figure 7 shows the budgets of *A. tamarense*. Each number is total flux of 24 hours, and has been standardized by the horizontal advection, $4,185 \times 10^3$ mg, to the bottom layer of the downstream boundary. The standard number means the volume of *A. tamarense* supplied from Osaka Bay. *A. tamarense* grow only in the bottom layer, and the volume is 7 % of it from Osaka Bay (the numbers at the left side with an underline means photosynthesis in Fig. 8). *A. tamarense* dies at the surface layer (the numbers at the right side with an underline means mortality & grazing), and moves to the bottom layer by the diurnal migration (the numbers of bold type means diurnal migration). These are salinity effect. 78 % of *A. tamarense* transported from Osaka Bay to the bottom layer goes to the upstream zone (the numbers without decorations means advection). And 26% returns to the transit layer. 52% of *A. tamarense* transported from Osaka Bay is lost in the upstream zone. *A. tamarense* is increased in the bottom layer (the numbers in parentheses mean the budget). It suggests the long term variation, for example, spring and neap tide, and the seasonal variation.

Figure 8 shows the budgets which is divided to flood and ebb tides. Each number has been also standardized, and the volume in flood tide, $4,185\times10^3$ mg, was used in this case. *A. tamarense* is transported from Osaka Bay to the upstream zone in flood tide mainly (81%), and the half of this is returned in ebb tide (27+13 %). Other half is lost in the upstream zone. Return volume to the transit layer is larger than to the bottom layer. *A. tamarense* would not go to lower salinity layer by itself. So, it is considered that *A. tamarense* will be transported by the vertical advection and/or diffusion. Figure 9 shows the budgets which is divided to the daytime and nighttime. Each number has been also standardized, and the volume in daytime, $1,878\times10^3$ mg, was used in this case. *A.*

tamarense grow only in daytime in the bottom layer, and the volume is 16 % of it from Osaka Bay. A. tamarense do not go to the transit and the surface layers by itself even daytime because of low salinity, but is transported by the vertical advection (12+22 %) and diffusion (15+32 %). Therefore A. tamarense died at the surface layer (17 % & 22 %), and transported not so much to the upstream zone (27 %). A. tamarense is also transported by the vertical advection (17+29 %) and diffusion (34+109 %) in nighttime. However the comparable volume (24 % & 139 %) move to the bottom layer by itself. Therefore much A. tamarense (148 %) transported from the ocean go through upstream.



Fig. 7. Budgets of A. tamarense. Fig. 8. Budgets of A. tamarense divided to flood and ebb tides.



Fig. 9. Budgets of A. tamarense divided to daytime and nighttime.

IV. CONCLUSION

In order to understand the temporal variation of the physics and fluid structure of Yodo River estuary in detail, we had made in-situ observation. And the temporal variation of *A. tamarense* which cause the shellfish poisoning of natural freshwater clam was analyzed by the numerical ecosystem model which is considered the salinity effects.

Stratification develops in the downstream side. Chl.a concentration is high in the seawater region. *A. tamarense* is detected in the downstream side. The numerical ecosystem model including

the salinity effect for *A. tamarense* was formulated. *A. tamarense* grow only in the bottom layer in daytime, and the daily mean of it is 7 % of it transported from Osaka Bay. *A. tamarense* is transported to the upstream in flood tide. 81 % of it transported from Osaka Bay goes to the upstream zone. Much *A. tamarense* transported to the upstream zone in nighttime due to the vertical migration. Therefore when it is the flood tide in nighttime, more of *A. tamarense* might be transported to the upstream zone.

V. ACKNOWLEDGMENT

This research is supported by Osaka Bay Regional Office Environmental Improvement Center, Dr. Koigo Yamamoto, Research Institute of Environment, Agriculture and Fisheries, Osaka Prefecture, Dr. Tomoyasu Fujii, Nara University of Education, Mr. Nobuo Nozaki, Dr. Kohei Hirono, Mr. Ippei Nakamura and Dr. Satoshi Nakada, Kobe University, the Yodogawa River Office, Kinki Regional Development Bureau, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Waterfront Vitalization and Environment Research Foundation, Dr. Takeshi Matsuno and Dr. Daisuke Ishii, Kyushu University.

VI. REFERENCES

[1] K. Yamamoto, H. Homi, and M. Sano, "Occurrence of a red tide of the toxic dinoflagellate Alexsandrium tamarense in the estuary of the Yodo River in 2007 -Dynamics of the vegetative cells and the cysts," *Bull. Plankton Soc. Japan*, vol. 58(2), pp. 136-145, 2011(in Japanese).

[2] P. Lim, and T. Ogata, "Salinity effect on growth and toxin production of four tropical Alexandrium species (Dinophyceae)," *Toxicon*, vol. 45, pp. 699-710, 2005.

[3] K. Yamamoto, H. Tsujimura, M. Nakajima, and P. J. Harrison, "Flushing rate and salinity may control the blooms of the toxic dinoflagellate Alexandrium tamarense in a river/estuary in Osaka Bay, Japan," *J. Oceanogr.* vol. 69, pp. 727–736, 2013.

[4] M. Hayashi, and T. Yanagi, "Analysis of change of red tide species in Yodo River estuary by the numerical ecosystem model," *Marine Pollution Bulletin*, vol. 57, pp. 103-107, 2008.

[5] M. Natsuike, I. Imai, K. Yamamoto, and M. Nakajima, "Effects of phosphorus supply from the Yodo River water on interspecific competition between *Alexandrium tamarense* and *Skeletonema sp.*," *Setonaikai*, vol. 66, pp. 50-53, 2013 (in Japanese).

[6] T.R. Parsons, Y. Maita, and C.M. Lalli, A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis, Pergamon Press, Oxford, 1984, pp. 173.

[7] T. Yamamoto, "Phytoplankton," in *Marine Coastal Environment*, T. Hirano, Eds. Tokyo, Fuji techno-system, 1998, pp. 144-174 (in Japanese).

[8] Y. Nakaguchi, Y. Yamaguchi, T. Nishimura, Y. Hatano, M. Imanaka, and Y. Arii, "Behavior and seasonal variation of eutrophication substances in the Yodo River system," *Chikyukagaku (Geochemistry)*, vol. 39, pp. 173-182, 2005 (in Japanese).

[9] M. Hayashi, R. Koga, T. Fujii, and K. Yamamoto, "Analysis of Seawater Run Up in the Yodo River Estuary," Proc. EMECS 10- MEDCOAST 2013 Joint Conference, vol. 2, pp. 1225-1235, August 2013.

海面境界過程の観測 "Field Measurements of Marine Boundary Processes"

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

海洋表層の 100m以下の小さい規模の乱流は、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うる。近年の数値実験(たとえば Grant and Belcher 2009)によれば、このような乱流は風に加えて波浪によっても生成される。一方、現場観測

(D'Asaro 2001)によれば、鉛直流速強度は主に摩擦速度に比例しており、波浪には影響 を受けていないように見える。このように波浪に起因する乱流とその影響に関しては、理論

(数値実験)と観測に齟齬がある。現状ではこのように波に起因する乱流混合とその影響が不定 であり、それが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、2014年11~12月と2015年11~12月に和歌山県白浜沖に京都大学防 災研究所の所有する海象観測塔で計測された乱流結果をまとめ、乱流強度の発生条件や速度スケール などについて先行する理論と比較した。

2. 観測の概要

観測塔の近傍の水深 9m 地点に、ADCP (RD 社製、Sentinel-V、1000kHz)を上向きに設置し、 流速の鉛直分布を連続的に計測した。この際、波浪計測モードで計測することで、波浪スペクトル も同時に計測した。計測は毎時 0 分~20 分とし、ピン発信間隔は 3Hz とした。観測塔では超音波 風速計 (ソニック製 SAT-550、サンプリング間隔は 10Hz) により平均風速と (渦相関法を用い て)運動量フラックスおよび顕熱フラックスを毎時 0 分~20 分計測した。潜熱フラックスは、 同時刻に赤外放射計で計測した水温と気象計で計測した気温の差と顕熱フラックスと比較すること求 めたバルク係数を始めに求め、気象計で得られた比湿を用いて計算した。日射計による短波放射および 海面水温から Kim(1992)の式に従って計算した長波放射を合わせて総熱フラックスを計算し、 重力加速度と密度を用いて浮力加速度フラックスに変換した。また波浪スペクトルから Kenyon (1969)の式を用いてストークス速度を計算した。

流速のエネルギースペクトルをもとに波浪成分(周期 T<30 秒)乱流成分(30 秒<T<20 分)平均流动分(T=20 分)と定義して、ローパスフィルターを用いて乱流成分を抽出した。本研究では、鉛直流成分を主に解析した。

47

3. 結果と考察

図1に 2015 年に計測された風速・風向、有義波高と海面ストークス速度、総熱フラックスの 時間変化を示す。観測期間中の風速は最大で 21.9m/s、有義波高は最大で 2.8m、熱フラックスは最大 2150W/m²(冷却)であった(いずれも 2015 年に観測)また図2には 2015 年

11 月 27 日、10:00-10:20 に計測された鉛直流速の鉛直分布の時間変化を示す。強い(最大 0.1m/s 程度)の鉛直流が海面付近から海底近傍まで及んでおり、活発な乱流混合が起こっている様子が伺える。このとき風速は 14.7m/s、有義波高は 1.63m、熱フラックスは 352W/m2

(冷却)であった。平均流の水平流速は 0.12~0.17m/s で鉛直にほぼ一様であったが、ストークス速度は海面で 0.45m/s もあった。

上述のような強い鉛直流は観測期間中の有義波高の高い期間に観測された。しかし、有義波高が高い場合には風速も海面冷却も大きい(図1)ため、強い鉛直流の生成要因について断定することはできない。そこで、鉛直流の強さ(分散値の鉛直平均値)を、波による乱流生成量と風による乱流生成量の比の概数であるラングミュア数(La=(U_{*}/U_s))と、波にゆる乱流生成量と熱による乱流生成量の比の概数であるヘニッカー数(Ho=BH/U_{*}U_s)で分類しな(ここでU_{*}は 摩擦速度、U_sはストークス速度、B は海面浮力加速度フラックス、H は水深である)La が小さい

(大きい)場合には波成(風成)乱流が、Ho が小さい(大きい)場合には波成(熱成)乱流が 卓越することに対応する。図3に鉛直流の強さを La およびHo の関数として示した。Ho が正のと きに海面冷却、負の時に海面加熱である。鉛直流速が強いときにはLa とHo の絶対値が小さいと き、すなわち波成乱流が卓越しているときに発生していることがわかる。これより、本観測対象海域・期 間における鉛直流速の生成要因は主に波であると結論づけられた。また、この結果は Li and et al. (2005)の数値実験結果とも良く整合するものであった。

また、鉛直流速の大きさと摩擦速度の関係を調べたところ、両者は概ね比例しているという先行 研究 (D'Asaro 2001) と同様の結果が得られた。先行研究ではその理由を摩擦速度

(U_{*}) とストークス速度(U_s)が比例しているからと推測しているが、本観測結果において は、風が強まると運動量フラックスだけでなく(顕熱、潜熱フラックスに起因して)浮力加速度 フラックスも増加するため、La が大きいときには Ho も大きくなり、結果として鉛直流速の大き さが摩擦速度に比例しているように見えるためであることが示唆された。

謝辞

本観測と解析には(株)ハイドロシステム開発の支援を受けた。記して感謝いたします。



図1:2015年観測時における(上段)風速(赤線、左軸)と風向(青点、右軸)(中段)有義波高(赤線、 左軸)と海面ストークス速度(青線、右軸)(下段)総熱フラックスの時系列。横軸は計測開始時から の時間。



図2:2015年11月27日10:00-10:20に得られた鉛直流速。横軸は時間(単位は秒)縦軸は深さ。



図3:鉛直流速の分散(色)のラングミュア数(横軸)およびヘニッカー数(縦軸)依存性.

海洋大循環の力学 ---エクマン層から中深層循環まで

北海道大学大学院 地球環境科学研究院 水田元太

1. 目的

海洋大循環は地形、中規模擾乱や潮汐、鉛直混合など様々な要因の影響を受けており、そのしくみは十分 には理解されていない。本研究では数値モデル、観測、理論それぞれの専門家が最新の知見を持ち寄ること 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

2016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かけて発表を行い、 研究者間で活発に議論を行うことによって有効に研究を進めた。

(1) 潮流が励起する不安定による河川プリュームの発達制御機構:岩中祐一、磯辺篤彦(九大応力研)

(2) Finite volume modeling of channel transports for the East/Japan Sea: Sooyeon Han, Naoki Hirose

(Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University)

- (3) 海洋表層混合過程の観測と数値実験:吉川裕(京大理)
- (4) 大槌沖陸棚上の海底境界流の観測への挑戦: 柳本大吾(東大大気海洋研)
- (5) 東経 137 度線の亜表層における東西流の経年変動:石崎廣(気象研)
- (6) A Lagrangian view of spring phytoplankton bloom:木田新一郎(九大応力研)
- (7) 亜表層で形成される中・深層水: 蓮沼啓一(海洋総合研究所)
- (8) 係留観測データセットから見た北西太平洋における擾乱の特性:水田元太(北大地球環境)
- (9) Prandtl-Batchelorの定理 --般化ほかー: 増田章(九州大学名誉教授)

3. 結果と議論

(1) 非静水圧力学モデルを用いて河川プリュームの形成に対する潮汐の影響を調べた。潮汐がある場合、ない場合のモデル実験の比較から、潮汐によってプリュームによる河川水の沖向きの輸送が抑えられることが示された。また慣性不安定、KH不安定が起きていることが確認された。河川水の輸送が抑えられる原因として、これらの不安定による運動量輸送によってプリュームの持つ沖向き運動量が失われるためであるという仮説を提唱した。実際、モデル実験の結果によると、潮汐がある場合の方が塩分勾配に伴うシアーが強く、渦活動が活発であった。このことは上の仮説と矛盾しない。

(2)日本海と北太平洋をつなぐ海峡の通過流量を数値シミュレーションで精度よく再現することは、これまで 困難であった。この問題を解決するために海峡内部の海底地形を高精度で表現可能な有限要素法モデルを用 いたシミュレーションを行った。その結果、津軽海峡の流量が過大評価されやすい、という従来のシミュレ ーションで見られた傾向が大きく改善された。これは津軽海峡内部の地形の解像度を上げたことで形状抵抗 が増加したことに対応していた。地形を変えた実験から海峡内の sill が流量の再現に重要と考えられる。

(3)海洋混合層の深さは風による乱流混合と、海面の冷却加熱によって支配されると考えられてきたが、近年、 波とラングミュア循環の寄与が重要であるという指摘がなされている。一方で、それと矛盾する様な結果を 示した研究もあり、明瞭な知見は得られていない。この様な問題を明らかにするために白浜海象観測所(京

51

都大学)の観測塔において H-ADCP と 5 ビーム式 ADCP を用いた流速観測を行った。それによると乱流の鉛直 流速はラングミュア数が小さい時ほど大きくなり、波の寄与を示す結果となった。また ADCP で得られたレイ ノルズ応力から乱流運動エネルギーの各生成項を直接評価することを試みた所、風より波の寄与が大きく、 熱の寄与は小さいことが示唆された。

(4)外洋と内湾の海水交換のしくみを理解することは生態系や漁業活動への影響を知るうえで重要である。船 底固定式と洩航式の二種類の ADCP を組み合わせ大槌湾湾口の潮流の詳細な構造を明らかにすることを試み た。その結果、上げ潮時に時間とともに傾圧的な潮流が発達し、従来の湾内のみの観測で見られていた潮流 の傾圧的構造が、外洋へ出た場所でも存在することが示された。これに対し、海底付近では水平、鉛直方向 に複雑に変動する擾乱的な流れが存在していた。今後は親潮、津軽暖流の影響についても調べる予定である。

(5)北太平洋の(137E, 12.5N)における長期係留観測から 500 ないし 700 mの亜表層で4年周期の東西流の変 動が存在することが示された。数値シミュレーションとの比較からこの4年周期変動は北太平洋全体にわた って見られることが分かった。すなわち、北部では西北西-東南東、南部では逆方向にわずかに傾いた東西に 長く伸びた分布を持った東西流が存在し、南北に伝播していた。観測では亜表層と深層で流速変動に位相差 が見られることから、これらの変動が赤道波によるものである可能性が示唆される。また十年規模の東西流 変動も観測され、風応力によって生じたものであることが示唆された。

(6) 植物プランクトンの春季ブルームが起きるしくみには、冬季混合層が薄くなるためであるとする説や、混 合層(=混ざった結果)よりも混合強度が弱まることが重要であるとする説などがあり十分な理解が進んでい ない。この問題を解決する試みとして、栄養塩、プランクトンを Lagrange 粒子として扱うモデルを開発した。 栄養塩粒子が植物プランクトンに取り込まれるまでの時間として age, photo age という二つの量を導入す ると、植物プランクトンの増殖速度が混合強度によって制限されているか否かが区別可能なことが示された。

(7) 三陸沖では津軽海峡を通じて亜熱帯に起源をもち高温高塩分で特徴づけられる津軽暖流水が低温低塩分 な亜寒帯系の親潮水の中へと流入している。この海域では春から秋にかけ 400-600m の亜表層に高温高塩分の 貫入がしばしば見られ、これらは津軽暖流水がその深さまでもぐり込んだものと考えられる。こうした貫入 は鉛直スケールが数十メートルであることから、輸送の過程で上下の水と混合し水塊変質を受けやすい。そ れが密度、もぐり込みにどう影響するかは今後の課題として興味深い。同様の高温高塩分水の貫入はオホー ツク海や日本海など他の海域でもしばしば見られる。

(8)北太平洋西部の深層に広くみられる中規模擾乱は非線形性の強い渦的なものか、あるいは波的なものか、 起源は何かといった疑問に答えるために係留観測の歴史的データの解析を行った。解析海域のほぼ全体で、 中規模擾乱の流速変動には異方性が見られ、運動のエネルギーは海底で強化されており、擾乱が波的な性質 を持つことを示された。卓越する流速変動の方向から擾乱の源が黒潮続流付近にあることが示唆された。

(9)風応力の影響が無視できる深層に渦位が一様な領域が生じるとする Rhines and Young (1982)の渦位一様 化理論が成り立つためには粘性が移流に対し十分小さいという前提が必要とされているが、どれ位小さけれ ばよいか、そもそもその前提は物理的に正しいかといった疑問がある。そこで、楕円型偏微分方程式の最大 値の原理を使うことで、粘性が任意の大きさの場合について渦位のとり得る値の範囲を求めた。すなわち、 ある閉じた流線内の渦位の値は、流線上の渦位がとる最大、最小値の範囲内に必ずおさまる。これは Rhines and Young (1982)の理論を完全に含んでいる。ただし、渦運動が存在する場合は注意を要する。

能登半島周辺海域における流況と漁況の関係性

石川県水産総合センター 原田 浩太朗

目的

能登半島周辺海域、特に富山湾沿岸はブリをはじめとする多くの回遊性魚種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、本海域の海況変動機構の理解 が重要である。本研究では、能登半島沿岸の対馬暖流沿岸分枝流(以下沿岸分枝流)の変動と主要魚種 の定置網による漁獲との関係を解析することで、能登半島周辺海域における漁場形成メカニズムや、 沿岸分枝流が定置網の漁況に及ぼす影響について検討することを目的とした。

方法

沿岸分枝流量の算出には、大慶(2015, 共同利用研究成果報告第 18 号)の手法を用いた。まず、 石川県調査船白山丸による ADCP 観測データから能登半島一舳倉島間(図1、Line 1)の沿岸分 枝流量を計算した。次に、九州大学応用力学研究所が舳倉島に設置した水位計および国土地理院輪島検潮 所の毎時の水位データを輪島の海面気圧で補正したうえで両者の差を取り、輪島と舳倉島との水位

差を算出した。水位差と流量との間には有意な正の相関が 認められたため、この関係をもとに水位差から流量を推定 する回帰式を作成し、毎時の沿岸分枝流量時系列データを 得た。この流量データと石川県沿岸の観測ブイ(図1、St.1 ~7)による10m深の流速観測データから、沿岸分枝流量 の変動が定置網周辺の流況に及ぼす影響について解析し た。また、石川県水産総合センターの漁獲統計システムによ る定置網の魚種別水揚量データと、上記沿岸分枝流量デー タとを比較し、沿岸分枝の挙動が定置網の漁獲量に及ぼす 影響を解析した。



結果と考察

上記手法により、2008 年8 月から 2016 年9 月までの 8 年間にわたる断続的な毎時沿岸分枝流 量が得られた。年間平均流量(図2)は0.38 Sv 程度であり、流量には顕著な季節変動が認められ、 7 月および 12 月に極大、2~3 月および 10 月に極小となった。各観測ブイによる流向流速観測デ ータから、岸を右に見る向きを正とした各点の月別流速と沿岸分枝流量とを比較した結果(図3)、能登半 島西岸では特に夏期から秋期に沿岸分枝流量と同調して流速が変動していることが明らかになった。 また、各年 8~10 月の沿岸分枝流量と能登半島東岸の St. 7 における流速を比較したところ、沿岸分 枝流量の低下と St. 7 における流向の反転のタイミングがよく一致しており、沿岸分枝の変動が富 山湾内邪の流況に対しても影響を与えていることが示唆された。

沿岸分枝流量と月別水揚量とを比較した結果、いくつかの魚種で水揚量と月平均沿岸分枝流量との間に 有意な相関関係が認められ、沿岸分枝の変動に伴う能登半島周辺海域の流況変動が、実際に漁獲に対して影響 を及ぼしていることが示された。また、旬平均沿岸分枝流量と旬別水揚量とを比較して明瞭な対応の見られる魚種が あり、例えばシイラは流量の低いときに水揚量が多くなる傾向があることが示された(図 4)。シイラは春期から夏期に北上し、秋期から冬期に南下する回遊を行うが、石川県の定置網では北上期には漁獲がなく、南下期にのみ漁獲される。南下期にのみ漁獲されるのは、秋期に沿岸分枝流量が低下することを利用して沿岸寄りを回遊することが原因となっている可能生がある。このように、対馬暖流の能登半島沿岸分枝流が能登半島周辺海域および富山湾の海洋環境に大きな影響を与えていることが示された。今後は、さらに多様・主要な魚種の漁況・漁場形成について海況との関係を解明することで、漁況予測や効率的な漁業への貢献を目的として研究を這展させていく。また、沿岸分枝流量の変動やそれに伴う沿岸流況の変化のメカニズムについてもさらなる解析を進め、その解明をめざす。





上:能登半島西岸 St.1 下:能登半島東岸 St.7

研究組織

研究代表者	原田	浩太朗
研究協力者	大慶	則之
所内世話人	千手	智晴
研究協力者	広瀬	直毅



図4 沿岸分枝流量・シイラ水揚量比較 8 月上旬から 12 月下旬の旬平均流量およ び旬別水揚量の 2008~2015 年の平均値 水揚量は St.7 周辺の大型定置網による漁獲

対馬海峡から山口県山陰沖にかけての海洋環境モニタリング

長崎大学大学院水産・環境科学総合研究科 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 道の離島等における水温・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

対馬海峡東水違から山陰沿岸の4 観測点(美津島,小呂島,蓋井島,青海島通)に水温・塩分計(または水温計)を設置し,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深に観測機器を設置した.また,萩市浜崎(図1)と見島の間を2または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.

青海島通と見島宇津に水圧式の小型水位計(Rugged TROLL100, In-Situ 社)を 2012 年 8 月下旬から設置し,10 分間隔で 2 測点の水位を観測している(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.水位計のセンサードリフトを調べるために,半年に 1 回程度の水位データ 収集時に大気圧を測定している.本報告では,主に,水位計のセンサードリフトについて報告する.

3. 結果

青海島通と見島宇津で観測された水位に、48 時間のタイドキラーフィルター(花輪・三寺,1985,沿 岸海洋研究ノート)を施し、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~2016年8月下旬).2015年以降,水位差が上昇している.2014年 以前と比べると、4-6 cm程度の水位差の上昇が確認できる.Takikawa et al. (2016), CSRの水位 差と流速の関係式を用いると、この水位差上昇により、両島間の流速が、10-17 cm/s程度、増加した ことになる.この顕著な水位差上昇が、自然現象なのか、それともセンサードリフトの影響なのか、大 気圧の測定結果を用い検討した.

図 3 に、水位計で観測した大気圧(10 分間隔)と萩の海面気圧(1 時間間隔)の時系列を示す.2012 年 8 月の水位計による大気圧の測定値は、萩の気圧の変動と対応している.2012 年 8 月 11 時 20 分から 11 時 40 分の水位計による大気圧の平均値と、2012 年 8 月 11 時と 12 時の萩の海面気圧の 平均値を基準とし、水位計のセンサードリフトを見積もった(図 4).2014 年まで、青海島と見島の水 位計のセンサードリフトは、±2 hPa 以内と小さく、同様の変化傾向を示した.しかし、2015 年以降、 両者は異なる変化を示した.特に見島のセンサードリフトは、2016 年 3 月には、5 hPa 以上と大きく なった.両島間のセンサードリフトの差は、2015 年 10 月に最大 6.2 hPa となった.この差は、水位 に換算すると約 6.2 cmに相当する.2015 年以降の水位差上昇は、自然現象ではなく、センサードリフ トの影響を受けていると考えられる.



黒線は両島間の水位差を示す.







図4. 青海島(赤丸)と見島(青四角)の水位 計のセンサードリフトの時間変化.

4. 研究組織

研究代表者	長崎大学大学院水産・環境科学総合研究	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, 松井	繁明
	山口県水産研究センター	渡辺	俊輝	
	愛媛大学沿岸環境科学研究センター	森本	昭彦	

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

背景と目的

豊後水道の底層に黒潮域から冷水が侵入する現象は底入り潮として知られている. 底入り潮は水道部を通過し て瀬戸内海へと冷水と豊富な栄養塩を供給することから, 瀬戸内海の熱や栄養塩の収支に深く関わり, 瀬戸内海 の生態系に大きな影響を持つと考えられている. この底入り潮の発生について, 潮汐の大潮・小潮周期との関連 が指摘されており, 潮流に伴う鉛直混合が関わることが示唆されているが, その詳細な物理過程は未だ明らかで ない. 豊後水道における鉛直混合過程に関しては, , 島影に形成される水平渦によって顕著な混合が生じること が数値実験により明らかにされている [Nagai and Hibiya 2013]. この他に, 内部潮汐が鉛直混合に寄与する可能 性が観測により示唆されている [Kawamura et al. 2006]. 豊後水道における内部潮汐に関しては, 申請者らが豊後 水道東岸において継続的に実施している水温観測によって, 夏季には定常的に発生することが分かっているが, その流動構造に関してはほとんど明らかでない. 本研究は, 豊後水道において乱流と流れの現場観測を実施し, 乱流混合と内部潮汐の特性を明らかにすることを目的とする.

研究内容

2016 年 8 月 20 日に愛媛大学沿岸環境科学研究センター研究船「いさな」を用いて豊後水道における海洋観測 を実施した. 図 1 に示す測点 02 から 16 までの計 8 点において,応用力学研究所所有の微細構造プロファ イラ TurboMAP-5 と「いさな」搭載の音響ドップラー流速計 ADCP を用い,乱流と流れの鉛直分布を計測した. <u>結果</u>

本研究の観測とは別に,申請者所属機関によって,図1の星印で示す地点において2016年の夏季から秋季にかけて海底設置 ADCP を用いた係留観測が実施されていた.その観測結果より8月20日の乱流観測時には,傾圧第2モードの半日周期内部潮汐流が顕著に発生していたこと,およびその内部潮汐のエネルギーは底層から表層へ伝搬していたことが明らかになっている.

図 2a に乱流強度の指標である乱流運動エネルギー散逸率,図 2b に鉛直平均流を順圧流として計算した傾 圧流速の断面に沿う方向の成分を示す. 測点 12-16 にかけて表層と底層で南向き,中層の北向きの流れが見ら れるが,この特徴は海底設置 ADCP で捉えられた傾圧第 2 モードの半日周期内部潮汐流の特徴と一致し, 同一の流れを捉えたものであると考えられる.この内部潮汐流に伴って,海面下 40 m 付近では流れは強い鉛 直シアを持ち,いくつかの層ではリチャードソン数が 1/4 を下回り,不安定が生じ得る条件にあった.実際にこの ような層の周辺では乱流運動エネルギー散逸の極大が観測されている(図 2b).内部潮汐は,観測された浮力 振動数(図 2c)を基に背景の流れが無いとして計算した内部潮汐波エネルギーの伝搬方向(特性曲線)の分布から, 豊後水道南部の陸棚端を起源とする可能性が示された(図 2a, b).

本研究によって豊後水道の半日周期内部潮汐波と乱流混合の空間構造が初めて捉えられた.更なる内部潮汐 と乱流混合間の関係,およびその底入り潮をはじめとする黒潮系外洋水の波及過程の理解とためには,より多くの 観測例と知見を蓄積し,統合的な現象の理解に結びつけていく必要があると考えられる.



図1 豊後水道における乱流観測点 (測点02-16).



図2 断面観測結果.(a) 乱流運動エネルギー散逸率(b) 傾圧流速の断面に沿う方向成分(正の値は北西 向きを示す).(c) 各浮力振動数の2 乗(青線) とその空間平均値(黒線). 図a,b 中の黒の実線・点線は 海水の密度(シグマティ)を示し、マゼンタ点線は、図c の浮力振動数を基に、背景流が無いとして計算 した半日周期内部潮汐エネルギー(群速度)の伝搬方向(特性曲線).

日本沿岸域における高解像度塩分動的マップの作成手法の開発

中田聡史 神戸大学大学院海事科学研究科

1. 目的

低塩分水の指標となる海表面塩分(SSS)の情報は、内湾域の水環境のみならず漁場環境の 保全の観点から非常に重要である。例えば、河川から沿岸海域に出水される低塩分水(河川 プリューム)は陸域由来の有機物を多く含み、海洋生態系や漁場環境への栄養塩を供給する ため、沿岸漁業者や養殖業者からも関心が高い。近年、海表面塩分測定センサーが搭載され た SAC-D 衛星(Aquarius)等が打ち上げられ、毎日の海表面水温と同時に SSS も面的に得ら れるようになったが、データ水平分解能は約 50 km であり沿岸域で使用するには極めて困難 である。ゆえに、沿岸域において衛星データから塩分場を推定する手法は確立することが不 可欠である。縁辺海や沿岸域においては、河川からの陸域由来の有色溶存有機物(CDOM) が存在し、CDOM 濃度と塩分値には高い負の相関関係があることが知られている。本研究で は、この関係を利用して、日本沿岸域における塩分定点観測データと海色衛星観測により得 られた CDOM データから、高解像度の海表面塩分値を推定する方法を開発している。前年度 は対馬暖流域における河川プリュームを静止海色衛星データから推定した海表面塩分マップ を試験的に作成し、韓国沿岸からの河川出水の影響が日本海にも及んでいることを発見した。 また、沿岸域に設置された現場塩分データと比較することで SSS マップの妥当性を議論した。 当該年度は、韓国南岸からの河川出水の影響を直接受ける対馬海峡に注目し、出現する河川 プリュームの動態を調べた。

2. 方法

使用した衛星データは、「千里眼」と呼ばれる静止海色衛星の毎時観測によって 2011 年 3 月より得られている水平解像度約 500 m の COMS/GOCI プロダクトから CDOM データ(以 降、衛星 CDOM)を抽出して解析に使用した。衛星 CDOM から SSS を推定する経験式を作 成するため、対馬海峡内において博多一釜山を1日1回往復する旅客船 Camellia によって得 られた現場観測 SSS データを用いて、衛星 CDOM データが得られた日時とマッチングをし た。現場塩分データ提供期間である 2011 年 4 月から 2012 年 8 月までを解析期間とした。本 期間内において、現場 SSS と衛星 CDOM との間には、やや相関係数(R=0.71)が低いもの の、線形的な相関関係があることが確かめられ、経験式(SSS = -8.081 × CDOM + 33.62)が作 成された。この経験式に基づき、解析期間におけるスナップショットの衛星 CDOM マップか ら、対馬海峡における SSS マップを作成・整備し、河川プリュームの動態解析に用いた。ま た、対馬海峡内における沿岸域(豆酘、郷ノ浦、沖ノ島)で観測された現場塩分データ(海表 面下 5m)と衛星データから得られた推定 SSS データを比較することで SSS データの精度を検 証可能かどうか議論した。

59

3. 結果と考察

対馬海峡における河川プリュームの解析結果の一例として、図1に2015年5月29日と8 月5日における日平均(9:00~16:00まで1日8回平均)SSSマップを示す。いずれのマップ においても、韓国南岸から韓国最長河川である洛東江(ナクトンガン、延長525km、流域面 積23384km²)からの出水による河川プリュームが沿岸域に分布している様子がわかる。また、 蟾津江(ソムジンガン、延長212km、流域面積4897km²)も対馬海峡に流入しており、両河 川の年平均合計流量は1000m³/sを超える。それらの河川流量を反映して、洛東江の河口より 西側の韓国南岸は塩分33以下の低塩分水に覆われていることが多い。このような河川プリュ ームは韓半島から切離されて日本海内部に流入し、韓半島東側に形成された中規模渦にとり こまれている様子も捉えられた(図2)。九州北岸の沿岸域においては、低塩分水が張り付い ているものの、5月と8月も韓国南岸における低塩分水域よりも狭く、九州北岸から流入す る河川流量は洛東江や蟾津江のそれよりも少ないことを示唆している。

5月29日の対馬海峡西水道内に注目すると、韓国南岸に張り付く河川プリュームの沖側に、 低塩分水が済州島付近から進入してきている特徴がみえる。これは5月下旬から長江水が対 馬海峡に流入したことを示唆している。

昨年度に作成した SSS マップと比較すると低塩分水の推定精度が改善されていることがわ かった。例えば、韓国沿岸や九州北岸に分布する低塩分水の塩分レンジは 30~33 であるのに 対して、昨年度の塩分レンジは 20~28 でありやや現実的な塩分を表現していなかった。これ は、今年度は旅客船カメリアを利用した現場塩分データを用いて SSS 推定式を作成したため 推定精度が向上したと考えられ、昨年度よりも現実的な SSS マップ推定が可能となった。



図1 2015 年 5 月 29 日と 8 月 5 日における日平均海表面塩分(SSS)マップ。青矢印は洛東江の河口



図 2 2015 年 5 月 19 日と 5 月 21 日における日平均海表面塩分(SSS)マップ。

研究体制

- 中田聡史(神戸大学) 代表者
- 千手智晴(九州大学) 所内世話人
- 広瀬直毅(九州大学) 研究協力者
- 高山勝巳(九州大学) 研究協力者

GNSS 反射信号による海面高度算出手法の開発

(一財)リモート・センシング技術センター 磯口 治

要旨

Global Navigation Satellite System (GNSS)の反射波による海面高度算出を実施した。TechDemoSat-1 (TDS-1)の Delay Doppler Maps (DDM)に対して波形解析を実施して直達波と海面からの反射波の差に 関する情報($\Delta \tau$)を算出し、それをもとに海面高度の算出を行った。距離に関する線形成分としての 誤差補正を適用した海面高度は、平均海面高度の変動と比較的よく一致した結果が得られた。アンテ ナゲインが 7.5dBi 以上という良好な観測条件のデータに対しては、おおよそ 1m の計測誤差で海面高 度が検出可能であることが確認できた。

1. 序論

Global Navigation Satellite System (GNSS)は主に位置決定のツールとして、現在では、多くの分野で 実利用されている。近年、GNSS の海洋からの反射波から海洋の情報(海面高度、海上風、波浪) を検出 する可能性が示された。米国ではThe Cyclone GNSS (CYGNSS)ミッションのように反射波(GNSS-R) を受信する衛星群によりサイクロン内の海上風を観測し、極端気象現象の予報への貢献を目的としたミッ ションが立ち上がり、2016 年 12 月に小型衛星群が打ち上げられた。従来の地球観測衛星と比較した 時、最も特徴的な点は、受信機のみであることから衛星が小型化でき安価なシステム構築が可能であるこ と。また、それにより、衛星群を形成することで観測頻度の向上を実現できることと言える。日本において も、文部科学省国家課題対応型研究開発推進事業における,H27 年度宇宙航空科学技術推進委託費に採 択されている研究プロジェクトに関連して、GNSS 反射波から物理量を計測するための手法を開発す る必要性が高まっている。本報告では、昨年度に引き続きGNSS-R からの海面高度算出の基礎となる反 射波の波形解析に関する検討を行い、実際に海面高度の検出および平均海面との比較を行った結果を 報告する。

2. 方法

GNSS-R データとして英国の Surrey Satellite Technology Ltd (SSTL) を中心に開発・運用されてい る TechDemoSat-1(TDS-1)によるデータを使用した。太平洋の反射点における Level 1b の Delay Doppler Maps (DDM)を解析に用いた。検出に用いた反射点の軌道例およびアンテナゲインプロファイル、 SNR プロファイルを図1に示す。カラー図は衛星高度計を基に算出された平均海面高度である。データを 調べた結果、アンテナゲインが大きい DDM は SNR が高く良好な検出が可能であることが明らかとなっ た。図2にアンテナゲインが 0.5dBi の場合と 11dBi の場合の DDM およびプロフィルを示す。0.5dBi のDDM はノイズが大きく、立ち上がり位置の検出も手法の違いにより差が生じている。一方、11dBi の DDM は最大受信レベルが高く立ち上がり幅が大きいため、立ち上がり位置が決まり易く手法によ る差は小さい。

62

波形解析の手法として、昨年度検討した、①Offset Centre of Gravity Retracker (OCOG)、②Threshold Retracker (閾値法)に加えて、③直下型高度計の波形解析で使用されている、理論モデル(Brown Model)をベースにした手法を適用した。比較の結果、②Threshold Retracker (閾値法)の結果がノイズが少なく最も安定していたため、本検討では閾値法を適用した。

波形解析によって算出されたΔτを基に、式(1)により軌道に沿った海面高度(SSH)を算出した。

$$SSH = \frac{-(\alpha\beta + H_t) + \sqrt{(\alpha\beta + H_t)^2 - (\alpha^2 - 1) \cdot (\beta^2 - R_t^2)}}{\alpha^2 - 1}$$
(1)
$$\alpha = \frac{H_r - H_t}{K} \qquad \beta = \frac{R_t^2 - R_r^2 + K^2}{2K} \qquad K = R_t + R_r - c\Delta\tau$$

ここで、Rt は送信機と反射点の距離、Rr は受信機と反射点の距離、Ht は送信機と反射点の接 平面との距離、Hr は受信機と反射点の接平面との距離、c は光速である。



図1 (a) 検出に用いた TDS-1 の反射点の軌道(b)軌道に沿ったアンテナゲインおよび(c)SNR。



図2 (上図)アンテナゲインが0.5dBi および(下図)11dBi の場合のDDM およびプロファイル例。

3. 結果

算出した SSH プロファイルを図3(a)に示す。赤点が算出 SSH、青線が図1の平均海面の軌道に沿ったプロファイルである。検出高度は平均海面に対して差が生じているが、複数の軌道データからの算出により、差は軌道距離に対して線形で減少する傾向が見られ(図3(b))、その傾きは固有の受信機に対してほぼ同じ値を示すことが確認された。原因は現状では解明できていないが、本検討では、線形の誤差成分を除去することで算出高度の補正を行った。補正済み海面高度と平均海面との比較を図3(c)に示す。アンテナゲインの値が高く 7.5dBi 以上の北緯 40 度付近までは比較的良く海面高度変動が検出出来ている。一方で、アンテナゲインが低くなる 40 度以北では検出高度に大きなバラツキが見られることが確認できる。両者の残差の標準偏差は 3.12m であった。アンテナゲインが 7.5dBi より大きい北緯40 以南の検出データから、異常値を除き、1/e スケールが 75km の重み付け平均を行って平均海面との比較を行った(図3(d))。緑線で示した重み付け平均プロファイルと青線の平均海面との残差の標準偏差は 1m となった。


図3 (a) DDM により算出した SSH(赤点)と平均海面(青線)の比較。(b) 距離に対する算出 SSH-平均海 面(青線)と線形の近似値(赤線)。(c) 補正済み SSH(赤点)と平均海面(青線)の比較。(d) アンテナゲイン 7.5dBi 以上の海域における比較図。緑線は補正済み SSH(赤点)を1/e スケール 75km で重み付け平均 したプロファイル。

4. 考察

本解析の結果、TDS-1 の GNSS-R 信号を処理することにより、条件の良い観測(アンテナゲイン 7.5dBi 以上)では、海面高度を 1m 程度の誤差で検出可能であることが確認された。1m の精度は、海 流に関する力学的海面高度変動(O~10cm)の検出には十分でないが、時間変動がない、平均海面、すなわち、 ジオイド高の変動程度の検出には繰返し観測を行うことで、利用可能であることを示している。また、ノイズ 的な検出誤差はレンジ分解能(帯域幅)、および、SNR をあげることで向上するため、将来の GNSS に 対しては 10cm オーダーでの検出に対して期待のもてる結果であると言える。

論文と学会発表リスト なし。

海洋レーダを用いた日向灘表層流の試験観測

宮崎県水産試験場 渡慶次 力

1. 研究の目的

日向灘の流況は、黒潮流軸や黒潮系暖水の接岸に伴って不規則に変動し、流速値 1m/s 以上の速い流 れが頻繁にあるため(岡田, 2003)、漁業者の操業成否や水産資源の卵仔稚魚の輸送・成魚の移動に大 きな影響を与えているが、その変動特性に関する知見は極端に不足している。そこで、日向灘広域にお ける数時間スケールでの表層流況変動の把握を目的に、海洋レーダを宮崎県に設置した。流況観測の結 果、黒潮接岸時に海岸から 20km 以上の沖合域で双峰型ドップラースペクトルが発生し、海洋レーダの 照射領域内の観測セル内に異なる流れが存在する可能性を指摘している(大城ら, 2016)。本報は、海 洋レーダ流速値と実測流速値を比較することで、海洋レーダ計測の流速値の特徴を整理し、双峰型ドッ プラースペクトルの要因を検討した。

2. 使用したデータ

使用した短波海洋レーダは,琉球大学工学部所有の24.5MHz 帯フェーズドアレイアンテナ型で,2015年11月に宮崎港(以 下「宮崎港局」)に,同年12月に清武川左岸(以下「清武川局」) に設置した(図1)。短波海洋レーダのシステム構成やレーダ局 は既報に準じた(藤井,2001)。レーダ局では,発射された電波 の1/2 波長を持つ海面波浪による強い後方散乱波が受信・信号 処理されて記録される。データを手動取得した後,一次散乱の ドップラースペクトルのピークの正負の周波数の違いを読み取 ってビーム視線方向の表層(約0.5m)流速(以下「レーダ流速」) を得た。本報は,約1年間の連続したデータが取得出来た宮崎 港局のレーダ流速を使用した。

現場流速は,約 30km 沖合にある表層型浮魚礁うみさち4 号に設置された日本無線社製 ADCP (NJC-30C-10, 240kHz) による 10m 深の流速値を使用した(以下「4 号流速」)。両流



★は表層型浮魚礁うみさち4号の位置を示す。

速の比較では、うみさち4号に最も近い観測セルのレーダ流速と、レーダ照射方向の4号流速成分を用いた。また、4号流速と同様に処理した4号風速も利用した。

3. 結果

レーダ流速と4号流速は、異なる計測水深に加えて、ビーム照射領域内の広域計測と1点計測の違い があるにも関わらず、1年間を通して高い正相関(R=0.6, p<0.01)となっていた(図2,表1)。しかし、 冬季(11月~1月)は、レーダ流速に10cm/s以上の沖合に向かう成分が加わっており、北西風に対応 する沖合方向へ吹く4号風速値も大きい。すなわち、冬季の海面付近を測定するレーダ流速は、4号流 速に比べて、吹送流の影響を強く受けていたと考えられる。以上のことから、大城ら(2016)が事例紹 介した2015年12月~翌年1月に計測された双峰型ドップラースペクトルは、黒潮離接岸に伴う流速 変動に北西風の影響を受けた吹送流が重なって発生した可能性がある。 引き続き,海洋レーダによる長期間の 流況データを取得・分析して,双峰型ス ペクトルピークの原因を調べていく。現 配置の宮崎港局と清武川局では,レーダ のビーム交差角が小さく,ビーム合成で 生じる誤差が大きいため,誤差低減に向 けたレーダ局の配置転換を予定してい る。これらの視線方向流速からベクトル 合成された流速値を解析して,日向灘の 表層流動場の時空間変動特性を明らかに していきたい。



表1 レーダ流速と4号流速の相関係数(R),回帰直線の傾き(Slope)と切片(Intercept),4号風速の季節変化(正負は図2と同じ)。

Mon.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	all
R	0.35	0.45	0.66	0.65	0.72	0.71	0.49	0.70	0.38	0.52	0.67	0.61	0.60
Slope	0.62	0.68	0.91	0.89	1.29	0.95	0.77	0.99	0.54	0.84	1.04	1.05	0.97
Intercept (cm/s)	-17	-4	-3	-4	+1	-10	-1	-7	-22	-14	-12	-18	-10
Monthly Mean Wind Speed (m/s)	-4.8	-1.7	-1.4	+0.4	+1.0	-0.4	+1.2	-0.6	+2.0	+0.9	-2.2	-3.5	-1.2

4. 論文等

渡慶次力,林田秀一,福田博文,清水学,市川忠史(2016):漁船計測による日向灘海況情報提供シ ステムの運用と他海域への展開可能性,沿岸海洋研究,53巻2号,151-157.

渡慶次力,西口政治,桟敷孝治(2017):宮崎県海況情報の漁業者への経済効果,水産海洋研究,81 巻1号,印刷中.

5. 研究組織

代表者	宮崎県水産試験場	主任技師	渡慶次	文 力
世話人	九州大学応用力学研究所	教授	広瀬	直毅
協力者	九州大学応用力学研究所	教授	磯辺	篤彦
協力者	九州大学応用力学研究所	准教授	千手	智晴
協力者	九州大学応用力学研究所	研究員	高山	勝巳
協力者	水産研究・教育機構 研究推進部		清水	学

GNSS 反射信号を用いた海氷観測手法の開発

東京大学 大気海洋研究所 木村詞明

1. 目的

地球の気候変動の実態把握と将来予測のため、さらには極域海洋の航路等としての利用のために、 海氷のモニタリングの必要性は増してきている。現在の海氷リモートセンシングの主力は衛星搭載のマ イクロ波放射計だが、観測分解能や頻度、観測できる物理量に限界があり、新たなモニタリング手法の開発 に対する期待は大きい。本課題の目的は、文部科学省国家課題対応型研究開発推進事業における宇宙航 空科学技術推進委託費に採択されている研究プロジェクトに関連して、GNSS 反射波を用いた 海氷モニタリング手法の開発と、それに寄与するための海氷変動の実態解明をすすめることである。

2. 検討と高解像度データ解析

現在、マイクロ波放射計 AMSR2 は数キロメートルの分解能で 1 日 2 回海氷分布をモニタリング できる。衛星で GNSS 反射信号を受信する場合、これを大幅に上回る分解能を期待するのは難しい。

GNSS 反射信号を有用に利用できる可能性があるのは、海氷の厚さ、さらにその推定につながる 表面状態(粗度等)の観測である。とくに、短い時間スケールでの表面状態の変化を観測できること が期待される。海氷の表面状態を左右させる細かいスケールでの力学的変形(海氷盤どう しの乗り上 がりや破砕)を観測するため、今年度は人工衛星搭載センサーMODISによる観測画像を用いた海氷 の動きのモニタリング手法の開発をすすめた。Aqua と Terra のふたつの衛星による時間間隔約3時 間での分解能 250 メートルの可視画像を用いることにより、海氷の動きを 2 キロメートルの分解 能で導出することに成功した。それにより、特に氷縁に近い海氷域では10km スケールの海氷変動が 多くみられ、そのスケールでの海氷の収束と発散は広いスケールでみた海氷の状態を大きく変化さ せうることがわかった(図1)。

3. 今後の課題

まず、GNSS 反射信号が海氷の何を捉えているのかを把握する必要がある。そのために GNSS 反射信号と他の衛星搭載センサーとの観測値の比較をすすめなくてはならない。今年度の研究に より比較対象として、マイクロ波放射計と、光学センサーによる可視・赤外画像データは有用で あること が示された。

また、検証のため現場での海氷表面の観測を行う必要がある。そのために、応用力学研究所の所有す るマルチコプターによる海氷表面の状態の観測が有効である。可能であれば2台のカメラによるステレ オ観測により表面の凹凸を定量的に観測することが望ましい。観測海域としては、アクセスが容 易なことと、様々な状態の海氷の観測が期待できる点から紋別市から知床半島にかけての北海道沿岸 域が適している。今年度もチャンスがあればマルチコプターを用いた北海道沿岸域での予備観測を予定し ていたが、事情より実施できなかった(海氷の接岸期間が短く、陸からの観測が困難な状況であった: 図2)。



図1:AMSR2 画像から計算した北極海(カラ海)での海氷の動きとその収束・発散(左)と MODIS によ る可視画像から計算した赤枠内での海氷の動きとその収束・発散(右)青が収束、赤が発 散を示 す。60 キロメートル分解能のAMSR2 による海氷漂流速度では一様に収束しているように見える が、2 キロメートル分解能のMODIS を使うことにより、その内部で細かい空間スケールでの収 束・発散が起こっていることがわかる。



図2:現場観測の候補地のひとつ、紋別市のオムサロ海岸。沖合数十キロメートルまで海氷は全く存在しなかった。(2017年2月19日撮影)

4. 研究成果の報告

Kimura, N., S. Yaguchi, H. Hasumi, H. Yamaguchi, Satellite observation of the dynamic deformation of sea ice, The 32nd International Symposium on Okhotsk Sea and Polar Oceans, 2017 年2月22日, 紋別市 文化会館 (北海道紋別市)

5. 研究組織

研究代表者	国立極地研究所	木村詞明
所内世話人	九州大学応用力学研究所	市川香

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

要旨

大陸から越境して輸送される大気エアロゾルの気候影響を研究するため、2003年から九州 大 学応用力学研究所において、太陽放射観測を行っている。これらのデータをもとに、エアロゾル の気候影響解明はもちろん、数値モデルの精度向上など利用している。2016年のエアロゾルの光 学的厚さの2015年の季節変化と同じような傾向にあったが、他の日本での季節変 化とは違った 傾向が観測された。

1. はじめに

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、日本国 内から排出される大気汚染物質に加えて、風下側に位置する日本に影響を受けている。 九州地 方北部では、越境大気汚染やローカルな大気汚染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 用力学研究所において太陽光と周辺光の波長別の放射輝度データをスカイラジオメーターによ り連続測定し、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と数値モデルな どの結果により、エアロゾル粒子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。エアロゾル粒子は、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、応用力学研究所気候変動科学分野 で開発・改良されているエアロゾル気候モデルSPRINTARSを用いて、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、越境大気汚染としての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晴天時日中に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/)を利用している。九大応力研をはじ め、様々な場所において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。 今年度は、測器の故障があり、一時期、別の測器を利用して、観測を継続した。

3. 結果及び、考察

Fig.1は、2015年1月から2016年12月までの九州大学応用力学研究所(福岡県春日市)における 0.5µmのエアロゾルの光学的厚さ(A0T(0.5))とオングストローム指数(Alpha)の月平均値を示し たものである。エアロゾルの光学的厚さとオングストローム指数の季節変化は、2015年と2016年で概ね 同じような傾向が見られた。エアロゾルの光学的厚さは、1月から12月にかけて減少しており、他 の日本各地での観測結果、すなわち、春に最大で、秋冬に最小となる 季節変化とは、ここ2年間 は異なっていた。しかしながら、オングストローム指数の季節変化を見てみると春と秋に低い、す なわち、大粒子(黄砂)の影響が見られているため、輸送される物質の変化ではなく、量的な変 化からエアロゾルの光学的特性の季節変化が変わっていたのかと考える。この傾向がどうして なのか、さらに研究を進める予定である。今後も継続した観測を行うことにより、SPRINTARSや 衛星観測等と比較しながら、越境大気汚染やローカルな影響評価を行い気候影響の解明につなげ ていきたい。



Fig. 1 2015年1月から2016年12月までの九州大学応用力学研究所(福岡県春日市)における 0.5um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

- Aoki, K.,: Long-term and spatial variability of Aerosol optical properties measured by sky radiometer in Japan site. (AGU FALL MEETING 2016, San Francisco, USA, 2016.12.16)
- Aoki, K.,: Temporal and spatial variability of Aerosol optical properties retrieval from sky radiometer observation in Japan site. (AeroCom&AeroSAT2016, Beijing, China, 2016.9.22)

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)

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

国立研究開発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:

本年度は ASV 試作機の流体力や運動性能の情報を基に ASV 実証機の実機を製作した。実機の製作の工程が大幅に遅れたため、この模型を製作することができなかったため実験をするにはいたらなかった。しかしながら前年度までに行った ASV 試作機の模型の実験で得られた流体力を実証機スケールに換算して流用することで、実証機の運動性能試験を実施することができた。



図 開発中のASV 実証機

インド亜大陸東北部における大気鉛直構造の解明

東京大学生産技術研究所 木口雅司

1. 研究の目的

アジアモンスーン域の一角であるインド亜大陸北東部は、世界最多降水量の記録を持つインド・メガラ ヤ州チェラプンジがあるシロン高地や、その世界最多降水量がもたらされるシロン高地からの雨が一気 に流下するメグナ川流域、チベット高原から下るガンジス川、ブラマプトラ川という巨大河川の河口域に 当たるバングラデシュ、そしてチベット高原から流下するブラマプトラ川の中流域にあたりアジアモン スーン域で最も早くから降水現象のあるインド・アッサム州を含み、多量の降水、世界的大河川の集ま る、地球水循環を考える上で重要な地域である。また、対流活動が活発であり、竜巻を引き起こす小規模 な積雲対流活動などの擾乱が成層圏に流入する水蒸気量に影響を与えている。そのため、研究対象地域に おける大気鉛直構造の解明は重要である。

本研究では、高層ゾンデ観測や高高度の水蒸気測定が精度よく観測できる Snow White、全球雷データ などの観測データと総観気象場とを組み合わせた解析を実施し、研究対象地域における大気鉛直構造の 解明を目指す。

2. 研究の手法

バングラデシュ気象局の高層気象観測やインド亜大陸北東部に展開されている官署の雨量観測データ、 レーダ観測データなど地上観測データを用いて、プレモンスーン期とモンスーン期における擾乱現象を 捉え、積乱雲の存在の有無が分かる全球雷データ(WWLL、http://webflash.ess.washington.edu/)を用い て、その要因が積乱雲によるものかどうかを判定する。2007年に集中高層気象観測で取得された6時間 データや通常用いられているゾンデより上層の湿度測定が可能であるSnow Whiteを用いて取得された 水蒸気データ、衛星データ(EOS MLS,AIRS等)を用いて、プレモンスーン期とモンスーン期の擾乱現象 が発現しているときとそうでないときの詳細な大気鉛直構造を明らかにする。さらに、擾乱現象が発現し ているときとそうでないときの総観気象場を、NCEP/NCARやERA40、JRA55を用いて示し、その大 気鉛直構造がどのように形成されるのかを解明する。

昨年度、Snow white データを用いて高層気象観測や衛星データの検証を実施した結果、科学的解析に 耐えうることを確認できたので、それらを用いて気候学的な視点から長期解析を進めた。

3. 結果

まず、全球雷データを用いて、本研究対象領域を含む南アジア域の雷発生数と対流活動(OLR)の分布を 調べた。解析対象期間は、2008~2013年のプレモンスーン期(3~5月)とモンスーン期(6~9月)とした。 バングラデシュ周辺では、OLR の分布からはプレモンスーン期の 3~4月はまだ対流活動が活発ではな いが、雷発生数でみるとインド亜大陸などの周辺地域に比べ高いことが分かった(図1)。年々変動に着目 すると(図2)、2008~2013年を通じて、5月中旬からバングラデシュ及びその近傍で雷発生数が増加す る。2010年のプレモンスーン期のバングラデシュでは、雷発生数が他年と比べて多くなっており、一方 2013年は4月中旬から6月上旬まではバングラデシュ及びベンガル湾上で雷発生数が多く、モンスーン 後期の9月中旬から下旬にかけて大変活発な雷活動が見られる。プレモンスーン期はそれに対応するよ うに、大気上層(250hPa 面)の比湿も上昇しており、2010年は他年に比べて多い(図3)。このような年々 変動の要因として、ENSOが考えられたが、2010年はLa Nina年、2013年は通常年であり、関係性は あまり見られなかったが、もう少し詳しく調べる必要がある。次に EOS MLS データから CO、H₂O、O₃ といった微量気体成分の緯度時間断面図を100、146、215hPa 面で作成した(図は省略)。経年変動が大き く見られたが、雷発生数との関連は今後の課題である。



図1:2008~2013年の3~9月における(左)雷発生数と(右)OLR分布。



図2:2008~2013年3~9月における雷発生数の緯度時間断面図。



図 3:2008~2013 年 4 月の 250hPa 面の比湿(kg/kg)。

次に、雷を発生させるような激しい擾乱の形状について、バングラデシュのレーダを用いて分類を行った。バングラデシュ国内には、現在 5 つのレーダサイトがバングラデシュ気象局によって運用されている。そのうち、南部のケッパラと南東部のコックスバザールに設置されているレーダを用いて、2010~2014年において観測された降水システムを、形状を「弧状型」、「線状型」、「分散型」に分類した(図 4)。 プレモンスーン期からモンスーン初期にかけて、弧状型が多く、モンスーン期に入ると分散型が多いことが分かった。



図 4: Kheppupara レーダ及び Cox's Bazar レーダで 2010-2014 年に観測された線状型,弧状型,分 散型の発生数の月別発生数の分布。

4. まとめ

今年度は、主に全球雷データを中心に月平均スケールの大気場の描像を明らかにした。プレモンスーン 期の年々変動も雷の発生数から示唆することができ、特に大気上層での水蒸気の増加が総観場解析から 明らかになった。また、擾乱の主な形状がプレモンスーン期とモンスーン期で異なり、このことが成因と 鉛直構造の違いを示していることが示唆された。

今後の課題として、より詳細な大気場の時空間変動に着目し、小規模な積雲対流活動に関連する現象の 解明を行いたい。

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

Nutrient transport via sea floor of shelf area in the East China Sea

1. Estimation of exchange between shelf water and open sea based on international joint cruises

1-1 Introduction

Marginal seas in the western North Pacific and the western boundary current area are rich in the variability of bottom character and bathymetry, constantly or intermittently exchanging energy and materials between land and open ocean. Water mass, as the material transporting carrier, is important to analyze but it is difficult since water masses often have various origins with complicated structures especially in marginal seas and open-ocean interaction dominated areas. To characterize and analyze the water mass structures and to quantify the contributions with high-resolution, in this study, current biogeochemical cruises covering the East China Sea and Kuroshio area connecting to the western North Pacific are introduced using multiple trace elements and isotopes.

1-2 Observations and Data

The Hakuho Maru KH-15-3 cruise was successfully conducted, to understand the biogeochemical/physical processes, spatial and temporal variations and cycles of nutrients in the East China Sea. Two cross stations were successfully conducted by two research vessels in very similar date, R/V Hakuho-maru on 27-28 October and R/V Dongfaonghong2 (Ocean University of China) on 25-26 October. Hydrographic data (Temperature and Dissolved Oxygen) caparison by using these two ships is showing in Figure 1.



Figure 1. Hydrographic data caparison by using R/Vs Hakuho-Maru and Dongfanghong2.

1-2 Result

Chemical tracers e.g. rare earth elements and Nd isotope (ϵ Nd) are suitable and conservative as water mass indicators, and are excellent tools for classification and analysis of water masses while coupling with salinity and temperature. These physico-chemical tracers can be applied to characterizing and quantifying multiple water masses (>3), particularly where there is complex water structure. Three end-member box models for ϵ Nd of various water masses including CDW (Changjiang Diluted Water), YSCW (Yellow Sea Cold Water) and KW (Kuroshio Water) indicates that the KW contributes 55% to the Japan Sea, and another half portion comes from Yellow Sea Water (37%) and CDW (8%); and approximately over 10% of CDW can influence Kuroshio/the adjacent area of Northwest Pacific.

2. How significant of diffusive benthic nutrient flux in the central of East China Sea?

To evaluate the importance of sediment nutrient source, phosphate, silicate, nitrate and nitrite at the porewater, overlying water, and entire water column were measured in the central of East China Sea. Moreover, to quantify the influence of suspended particle, a measurement of multi-size particulate characterizing contour (LISST) was carried out together with CTD casts. All nutrient concentrations in the porewater were greater than overlying water at two sites (B1 and C1), suggesting sediment was nutrient source to the water column. Nutrient diffusion fluxes were calculated from the corresponding concentration gradients at these two stations, accounting for 20-60% of primary productivity. In contrast, at station C4, sediment was nutrient sink. Bottom water at station C4 had low dissolved oxygen (DO, 1.8 ml/l), high weighted nutrients, and finest suspended particle relative to stations B1 and C1 (Fig.2.). Thereby, opposite nutrient diffusion at station C4 is most likely caused by organic matter remineralization at the bottom water. However, phosphate concentrations at the bottom seawater were greater than the overlying water at all three stations. It might be affected by lateral transport near bottom or phosphate was absorbed by high concentration of particles at the seafloor. This study infers that nutrient flux from sediment to the overlying water, and further diffusion to the water column depends on the sediment property (e.g. grain size), in situ biogeochemical process and may associated with water transport.



Figure 2. Hydrographic results of the shelf water in East China Sea.

3. Scientific meetings

1. J. Zhang, Q. Liu, T. Matsuno, Water mass analysis using rare earth elements of shelf water in the East China Sea: contribution of Kuroshio Intermediate Water. JpGU, Chiba, Japan, May 2016.

2. Q. Liua, J. Zhang, K. Jiang, S. Kambayashi and T. Matsuno. How significant of diffusive benthic nutrient flux in the central of East China Sea? JpGU, Chiba, Japan, May 2016.

3. J. Zhang, Q. Liu and Z-H Zhao, Water mass analysis and fraction estimates using rare earth elements, Goldschmidt 2016, Jun. 2016.

4. J. Zhang, What can we learn from rare earth elements and Nd isotope: material transport and interaction between the East China Sea and the western North Pacific. 3rd Xiamen Symposium on Marine Environmental Sciences (3rd XMAS), Xiamen, Jan. 2017.

バイスタティック海洋レーダによる対馬暖流観測

愛媛大学沿岸環境科学研究センター 森本 昭彦

1.研究の目的

対馬暖流は対馬海峡を通過後いくつかの分枝流に分かれるとされている。研究代表者らはこの分枝流 を観測するため、長崎県対馬市と山口県萩市沖の相島に海洋レーダを設置し海面流速を観測している。 海洋レーダは通常2つの送受信局から電波を送信・受信し観測を行うが、我々は1局から送信、2局で 受信するバイスタティック観測を行っている。昨年度の共同研究により相島から送信し、相島と対馬で 受信するシステムを完成させ、対馬から100km 程度の範囲の海面流速を測定できるようになった。しか し、対馬暖流の分枝流、特に200m 等深線に沿って流れるとされる第二分枝流を観測するには、対馬局から 5 150km の範囲の海面流速を測定する必要がある。対馬局から送受信する観測方法では、対馬局から 170km 程度の範囲まで観測可能なことから、バイスタティック観測システムを改良することで観測範囲 を広げることが可能であると考えている。現在のシステムでは100km 程度の範囲しか観測できない理由 として、我々の使っている電波の周波数に近い外来電波の影響があげられる。外来電波によるノイズを 減らすことで、少なくとも対馬局から150kmの範囲の観測を可能にするシステムを構築することが本研 究の目的である。

2. 参加者

森本	昭彦	(愛媛大学沿岸環境科学研究センター)
杉谷	茂夫	(情報通信研究機構沖縄電磁波技術センター)
市川	香	(九州大学応用力学研究所)

3. 研究成果の概要

3-1. バイスタティック海洋レーダの概要

本研究で使用する海洋レーダは、情報通信研究機構が開発した送信周波数 9.2 MHz のレーダである。海洋レーダは陸上の無線局から海面にむけて短波帯の電波を照射し、照射した電波の波長を持つ海上の重力波からの後方散乱波を受信し、照射した電波のドップラーシフトから海面流速を計測する。海洋レーダにより観測できる海面流速は、受信ビームの視線方向のみであり、海面流速のベクトルを得るためには2 局のレーダサイトをそれぞれのビームが交差するように配置し観34N 測を行う必要がある。本研究の海洋レーダシステムは2 局のレーダサイトがあるものの、送信機は1 局しかない。そのため、1 海流のベクトルデータを得るためには、送信機のある局では通常の観測を行い、受信機しかないもう1 局では海上で側方散乱

された電波を受信し流速を計測する必要がある。このような1局

送信2局受信のレーダはバイスタティックレーダと呼ばれてい



図 1. 対馬レーダと相島レーダのビーム配置(青線)と対馬暖流の流路(灰色線)。

る。バイスタティックレーダの原理は理論的に示されているが、海洋レーダでこの観測方法が使われた ことはほとんどない。

本研究では、山口県の相島局から送信周波数 9.2 MHz の電波を送信し、相島局で後方散乱波を、長崎

県の対馬局で側方散乱波を受信する(図 1)。2015 年度の研究により側方散乱された電波を受信出来る システムを構築することができたが、外来電波のノイズレベルが高く目標としている対馬暖流域の流速 を計測することができなかった。今年度は送信局(相島局)の送信波を受信局(対馬局)で正確に再現 し、受信波とビートを取りながらより狭い帯域に受信波をおとすビートダウンと呼ばれる方法を導入し て観測海域を拡大させることを目的とした。

3-2. バイスタティックレーダの開発と観測結果

対馬局の受信システムを図2に示す。今年度開 発したのは図中の赤枠の部分である。1本の受信 アンテナにより相島局から送信された直達波を 検出し、その直達波と全く同じタイミングで疑似 信号を発生させる(図2の青枠の部分)。この内 部で発生させた信号と海面からの散乱波とビー トをとり、さらに、狭い帯域のバンドパスフィル ータにより海面で側方散乱されたシグナルを取 り出す。直達波の検出は容易であったが、同じタ イミングで内部信号を作り出す部分の作成に時 間を要したが、ビートをとるのに十分な精度で疑 似信号を発生させることに成功した。なお、原因 は不明であるが、1日に1,2回直達波を検出でき ないことがある。

図3にビートダウン導入後に 対馬局で観測されたドップラ ースペクトルの例を示す。図3 のスペクトルは目標としてい た対馬局から150km地点および 170km地点のものである。対馬 から152kmでは約10dB、171km では約8dBのスペクトルピーク が見られる。これらの場所は山陰 沖の陸棚斜面域にあたり、対馬暖 流第二分枝が存在するとされる



図 2. バイスタティックレーダシステムの構成。 赤枠の部分が今年度開発したビートダウンに関 わる部分である。



図 3. 対馬局から 152km, 171km 地点でのドップラースペクトル。 縦の実線は重力波の位相速度に対応したドップラー周波数を示し ている。

海域である。図3のようなスペクトルピークはほとんどのデータで認められることから、本システムに より対馬暖流第二分枝の変動をとらえることができると言える。

観測塔と飛翔体を利用した波浪及び水面計測

研究課題分野 地球環境

研究代表者氏名	早稲田卓爾	東京大学大学	·院・	新領域創成科学研究科・准	教授
応用力学研究所	所内世話人	氏名	市川	香	
研究課題	観測塔と飛翔	体を利用した	波浪	及び水面計測	

研究組織

早稻田卓爾	東京大学大学院	教授	代表者
稲津大祐	東京大学	特任准教授	実験補助
遠藤貴洋	東京大学	特任准教授	実験補助
藤本航	東京大学大学院	博士後期1年	実験補助
北祐樹	東京大学大学院	博士前期1年	実験補助
鈴木直弥	近畿大学	准教授	実験補助
田村仁	港湾空港研	研究員	実験実施

研究目的:

文部科学省国家課題対応型研究開発推進事業における,宇宙航空科学技術推進委託費に採択されている 研究プロジェクトでは、H27年度よりGNSS-Rを利用した波浪、高度、風速計測を東京大学は平塚沖総 合実験タワーで開始した。観測研究には,波浪と海面水位の現場観測が必要となる。応力研は、現場での 観測の経験が豊富であり、計測機器も揃っている。一方、東京大学は平塚沖総合実験タワーを維持管理し ている。

共同研究を行うことにより、現場での集中観測が実現する。

研究成果:

平成 27 年度に開始した東京大学平塚沖総合実験タワー(<u>http://157.82.157.148/oa/</u>)における, GNSS (GPS など)の直接波および反射波の計測を継続し、波高計アレイによる海面波形勾配平均値(Mean Square Slope)、波浪方向スペクトル、風速等、Sea Truth 計測を行った。また、GNSS-R 長期計測を継 続し、データベースを構築した.



図: 左から、平塚塔に設置した波浪計アウトリガーと風速計、屋上に設置した GNSS-R 受信アンテナ、 屋上に設置した風速計

以上

マルチコプターを用いた海上気象の観測

富田裕之(名古屋大学·宇宙地球環境研究所)

1. はじめに

海上気温,湿度,風速などの海上気象要素の現場観測は、大気の状態を把握するためのみ ならず、大気海洋の間のエネルギー収支や大気海洋相互作用の実態を把握するために重要な 海面フラックスの推定にも必要不可欠である。現在は係留ブイ,観測塔,または船舶などの 観測プラットフォームで観測が行われているが、必ずしも十分でない。一方、近年ではマル チコプターをはじめとする無人機の技術発展と普及がめざましく、気象学や海洋学において の利用にも大きな可能性がある。本研究では、マルチコプターを利用して海上気象要素(特 に気温と湿度)の観測を実施し、海洋学,気象学においての利用可能性を検討することを大 きな目的とする。研究の最初のステップとして、データ取得方法について検討し、マルチコ プターによって取得されるデータの特性の理解を試みた。

2. 使用機器·方法

使用したマルチコプターは DJI 社の Phantom 2(以下 P2)である。機体重量は、xxx で、 標準のバッテリーを用いておよそ 10~20 分程度の連続飛行が可能である。実際の飛行時間 は、気象条件、搭載する物体の重量に大きく依存する。気象要素の情報を得るセンサーとし て、数種類の気温,湿度計を検討した。仕様として、単体でデータをロギング可能な機能を 備え,小型軽量で、防水,検定が可能などの点を考慮して Fujita 社の KT295F を使用した。 観測精度は、カタログに記載されている情報として、気温について 0.3℃,湿度については 5%である。予備実験として実施した高精度の観測ができるバイサラ社の WXT520 との比較で、 概ねカタログ精度と同等の観測性能を示した。また複数のセンサーの差も、誤差の範囲内で 一致していることを確認した。

マルチコプターへのセンサーの設置可能スペースは限られている。P2 の場合、カメラが本体の下部に搭載されており取り外しはできない。バッテリー下部、脚部に設置が可能なスペースがある。バッテリー下部は日射の影響を受けにくいが、バッテリーの発熱の影響があり得る。脚部は日射の影響を受ける可能性がある。

本研究では、まずリファレンスデータを取得しやすい地上数mまでの飛行により地上付近 のデータの取得のための実験を行った。まずは日射の影響を受けにくい日陰のサイトで実施 し、センサーの設置場所は、バッテリー下部のスペースと、一部のフライトでは脚部に設置 した。実施場所は、屋内と屋外の両方で実施した。

3. 結果

図1に、マルチコプター搭載の温湿度センサーと地上に配置したセンサーとで取得した気 温データの比較結果を分散分布図として示す。両者の関係は概ね良好で、マルチコプター搭 載のセンサーで気温を観測できていることが分かる。バッテリーの発熱による観測への影響 は見られない。一方、灰色で示すプロットは、P2の脚部にセンサーを取り付けたフライトで 得たデータであり、このフライトでのデータにはマルチコプターと地上に配置したセンサー との間に大きな差が見られる。日射の影響や、ローターによる上空の空気の巻き込みの影響 などが考えられる。

4. まとめと今後

本研究ではマルチコプターによる海上気象要素の観測のためのテストとして、実際にマル チコプターに搭載したセンサーと地上センサーで得られた観測の比較から、観測の特性につ いて検討した。マルチコプターで観測を行う場合、日射の影響が少なく、ローターによる影 響を受けにくい場所を選定する必要がある。

高精度容量式波高計による海表面計測システムの開発

港湾空港技術研究所 田村 仁

1. 研究目的

散乱計や合成開口レーダ,また近年注目を集める測位衛星を利用した GNSS-R は人工衛星から発信した マイクロ波信号が海面や地表面で反射することを応用したリモートセンシングで,海面上の風,波,流れ など様々な物理現象を可視化する.これらの衛星リモートセンシングは直接的には波長数十 cm 程度の海 表面の高波数スペクトル成分に関連する物理量を観測するため,より精度の高い海表面パラメータの推定 には、実海域における「さざ波」の物理現象を解明することが重要なポイントとなる.しかしながら、卓越す る風波(波高:メートルオーダー)の上に乗る極微小のさざ波(波高:ミリメートルオーダー)を現場海 域で直接観測することはきわめて困難であり衛星データの工学的利用への大きな障壁となっている.本研 究では高波数スペクトルを観測可能な計測システムの開発を行い、神奈川県平塚海洋観測タワーおよび 琵琶湖安曇川沖総合自動観測所において波浪観測を行った.その結果,波数10-20(rad/m)の短波 重力波領域までの波浪を計測可能であることを示した.

2. 研究内容

容量式波高計を高密度に配置し高精度波数スペクトル推定するための観測システム開発を行い,相模湾 平塚沖および琵琶湖において現地観測を行った.観測期間および計測条件などは表1の通りである.

	琵琶湖観測	平塚夏季観測	平塚冬季観測
設置期間	2016/3/28-4/27	2016/6/8-8/10	2017/1/17-27
サンプリング周波数	50Hz	50Hz	20Hz
計測時間	30min	30min	30mins
データ取得数	1010	3017	400

表1 波高計による現地観測概要

ここでは得られた観測結果のうち,平塚 冬季観測の結果を示す.波高計センサー上 部の海面高度 2m に取り付けた風速は観測 期間中およそ 1-12m/s であり,風向に関し ては冬季の気圧配置から北寄りの風が卓越 していた.一方,海象場(図1)に関しては 最大で 1.5m の有義波高が観測されている. 観測期間中,データ欠損期間(例えば Yday22 および23)が確認されるが,高波浪お よび満潮時により波高計センサー長 3m の物理的な上限を超えたことによる.以上 の結果から観測期間中は比較的広範囲の気 象海象場をカバーしていたと確認できる.



図1 観測期間中の海象時系列データ (上段:有義波高,中段:周波数スペクトル,下段:平均海面)

短波重力波領域の波浪(さざ波)に対する波数スペクトル推定には線形分散関係式を仮定した周波数 領域から波数領域への変数変換は適用できない.つまり,線形分散関係

$$\sigma^2 = (g + \gamma k^2)k \tag{1}$$

および、周波数ドップラーシフト条件: $\omega = \sigma + \mathbf{k} \cdot \mathbf{U}$ から

$$F(k,\theta) = \frac{c_g}{2\pi} \left(1 + \frac{\mathbf{k} \cdot \mathbf{U}}{kc_g} \right) F(\omega,\theta)$$
(2)

が得られる.一般的に、流速Uは長周期波や一般流を含んでいるためどう評価するか不明瞭で短波重力波 領域の波数スペクトル推定に適用はできない. そのため本研究では Donelan et al (1996)による wavelet directional method (WDM)を用いた. これは wavelet 変換から得られる時々刻々の波浪振幅, 波数, 方向か ら直接的に波数スペクトルを推定する手法である.

図2に WDM によって得られた 1 次元波数スペクトル(黒線)を示す.またここでは FFT から得られる 周波数スペクトルに対し,式(2) および流速をゼロと仮定して得られる波数スペクトル(グレー) も 比較のために示す.ピークスペクトル周辺(k~0.05 rad/m)では,FFT ベースの波数スペクトルは, WDM による直接推定値と同様な値および形状になるものの,高波数側(k>3 rad/m)では明らかに過大評 価をしている結果となっている.さらに高波数スペクトル(k=10 rad/m)の平均波向きが海上風向に概 ね対応していることが確認できることから(図3)開発を行った波高計センサーおよび解析手法の妥当 性が確認される.



研究代表者	港湾空港技術研究所	田村	仁	研究員
所内世話役人	九州大学応用力学研究所	市川	香	准教授
研究協力者	近畿大学	鈴木	直哉	准教授
発表論文及び	学会発表無し			

図3

研究組織

波浪境界層中間 LES モデルの開発にむけた基礎データ取得のための風洞水槽実験

相木秀則 (名古屋大学 宇宙地球環境研究所)

はじめに

台風シミュレーション研究において最近では大気・海洋・波浪結合領域モデルがよく使われている(相木 他,2015)。大気海洋間フラックスのバルク式を高度化するために「風洞 水槽実験」、「海上波浪観測」、「気液連続LES数値実験」のような基礎研究が行われてきた。この成果を引 き継ぎ、時代の変化に即した学際連携・分野開拓を目指す事が本研究の目的である。特に本共同利用研 究では波浪境界層(水深10mから海上100mまでの領域)における渦・波・物質輸送の動態の メカニズムの考察を発展させるとともに、波浪境界層に関する実験教育・社会還元のよう な啓蒙活動のあり方を探求する。実のところ、波浪境界層に関する学問発展は理学・工学・環 境学の狭間にあり、単一学会(コミュニティー)としての基盤形成が難しいという性質がある が、応用展開については多岐にわたるアプローチが期待されている(下図参照)。



図1:代表者が展開・計画している波浪境界層関連研究の模式図

本研究のアプローチ1:波浪境界層中間LESモデルの開発のための風洞水槽実験

波浪境界層の素過程(波動力学・乱流混合・物質輸送・大気海洋間フラックス)の考察 を発展させるには、1 つの LES 数値モデルで気側と水側の流体運動を連続的に再現し,統 合解析する事が重要である。しかし、従来の土木・機械工学分野の LES では時空間スケール が小さすぎる。また従来の大気・海洋分野の LES では水面波の位相変化を陽に解く事ができな いという問題がある。そこで本研究では、鉛直ストレッチ格子と水平 1m 程度の格子を使っ て、グリッドスケールの水面波は位相変化も含めて陽に解き、サブグリッドスケ ールの水 面波は従来型のエネルギースペクトルモデルを使って統計的に解くという「波浪境界層に ついての新しい中間スケール解法」を開拓する事を目指している。WAVEWATCH のような エネルギースペクトルモデルには砕波によるエネルギー消散のバルク式が入っているが、(上 記の中間 LES モデルを組み上げるには砕波の位相情報を付加する必要がある。そこで本共 同利用研究では、応力研・風洞付内部波水槽(全長 17m)を用いて風速5~15 m/s の範 囲において、100Hz の波高測定とビデオ撮影を行い、この結果を基礎データセットとして、 位相関係を詳細に解析できるようにした。

本研究のアプローチ2:シースプレー測器の開発のための風洞水槽実験

波浪境界層における物質輸送の動態を明らかにする研究の一環として本共同利用研究代 表者は、海上観測プラットホーム(係留ブイ・海上観測塔)のような強風・塩水飛沫にさ らされる環境下において、シースプレーの粒径別個数の時系列を計測できるような測器の 実用化を並行して目指している。シースプレー観測は国内ではあまり行われていないが、 海洋性エアロゾルの生成源の理解および、衛星や地上ライダー観測による対流圏のエアロ ゾル分布と雲物理の関係解明(大気化学分野)との連携において重要である。このシース プレー測器は、風波の一つ一つの砕波による空気中の粒子数変化や水面波との位相関係を 調べる事ができるように3軸加速度センサーを内蔵している。本共同利用研究においては この3軸加速度センサーに関する基礎データを取得するために、応力研・海洋環境シミュ レーション水槽(全長 54mを用いてプランジャー造波による不規則波測定実験を行った。水面 に浮かべた加速度センサー筐体を係留する場合と漂流させる場合を比較した。

応用力学研究所・風洞水槽施設・利用日

2016年9月29-30日、2017年2月28日:計3日間 (担当:油布・石橋)

本共同利用研究に関する発表

相木秀則(名大)・根田昌典(京大)・田中潔(東大)・久島萌人(名大)・油布 圭(九大), シースプレー測器による海上観測計画:海面砕波と海洋性エアロゾル生成の時空間構造を捉 える, JpGU-AGU 合同大会, M-IS15, 2017 年 5 月 24 日(予定:幕張)

参考文献

相木秀則ほか:大気海洋波浪結合モデルの開発と台風実験への応用,沿岸海洋研究,52, 139-148,2015

「日本海及び日本周辺海域における環境急変現象(急潮)のモニタリング、

モデリング及びメカニズム解明に関する研究集会」報告

研究代表者: 井桁 庸介 (水研機構日水研)

本研究集会は、2016 年 8 月 4 日から 5 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開催された。この会合は今回が 2 回目の開催であり、モニタリング・急潮予報業務等を実務とする水産試験研究機関の担 当者と、海洋物理学的な研究を継続してきた研究者とが議論することを目指したもので ある。

大学および試験研究機関を中心に、両日とも 38 名が参加し、合計 15 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。

今回は、日本海に関する発表が8題、太平洋沿岸~東シナ海沿岸に関する発表が7題 と、日本全国で実施されているモニタリング・モデリングに関する発表がなされた。沿 岸で起きる短期的な環境変動に関わる、物理・生物・水産的な応答に関する数多くの講 演がなされ、活発な議論が交わされた。モニタリングデータを手にする水産試験研究機 関の担当者にとっては、自身の持つデータの解析方針や手法等を学ぶ良い機会になった ようだ。気象擾乱・河川の大規模出水に対する沿岸水の短周期応答への、水産資源・一 次生産の応答を把握する試み等、海洋物理学的な知見を基盤にした応用的な研究につい ての発表がなされ、今後の発展が期待された。

また、水産試験研究機関におけるモニタリング体制の紹介や、観測計画等の紹介もあ り、各府県におけるモニタリングの現状等について共通認識を形成することが出来た。 そのような情報共有に基づき、参加者同士の懇親を深めた結果、データを通した共同研 究へ発展した事例もあった。今後も、このような議論を継続することで、新たな研究シ ーズの創出が見込まれると感じられた。

沿岸・短周期変動をキーワードに参加者の募集を行い、研究者の交流の場を作ること は重要である。今後は、生物、水産系にも積極的に間口を広げ、研究集会を出来るだけ 継続することで、研究シーズの創出につながることを期待する。 プログラム

8月4日(木) 13:10~13:20 趣旨説明

 $13:20 \sim 13:45$

富山湾の平均的な流れと、冬型気圧配置(ブリ起こし)のイベント的な流れ 小塚 晃 (富山水研)・辻俊宏・大慶則之(石川県水産総合センター)・千手智晴・広瀬直毅(九 大応力研)

 $13:45 \sim 14:10$

富山湾における近慣性内部波の伝播 久賀みづき・井桁庸介(水産機構日水研)・広瀬直毅(九大応力研)

14:10~14:35

発生域と伝播経路の違いによる近慣性周期波動の増幅海域の変化 山崎恵市(水産機構中央水研)・北出裕二郎(海洋大)・井桁庸介(水産機構日水研)・ 熊木豊(京 都府農林水産技術センター)・渡邊達郎(水産機構日水研)・清水勇吾(水産機構中央水研)

 $14:35 \sim 15:00$

富山湾周辺における対馬暖流沿岸分枝の流路遷移 井桁庸介(水産機構日水研)・福留研一(富山高専)・Alexander Yankovsky(USC)・池田 怜(新 潟水海研)・大慶則之(石川県水産総合センター)・鮎川 航太(福井水試)・兼田淳史(福井県 立大)・渡邊達郎(水産機構日水研)

15:00~15:10休憩

15:10~15:35 能登・佐渡沿岸域の流れ場の変動 和川 拓・井桁庸介 (水産機構日水研)・池田 怜 (新潟水海研)・福留研一 (富山高専)

15:35~16:00千葉県外房沿岸域の急潮について小林 豊(千葉県水産総合研究センター)

16:00~16:25 室戸岬東沿岸の定置網周辺における潮流の解析 猪原 亮(高知水試)

16:25~16:50 日向灘における流況変動特性

16:50~17:15 日本海沿岸帯域海況予測モデルの西方拡大 広瀬直毅(九大応力研) 8月5日(金) $9:00 \sim 9:25$ 若狭湾急潮発生時における対馬暖流沿岸分枝の時空間変化 福留研一(富山高専)・井桁庸介(水産機構日水研)・熊木豊(京都府農技セ) 9:25~9:50 京都府における近年の急潮対策 舩越裕紀、上野陽一郎(京都府水技センター) 9:50~10:15 若狭湾における急潮モニタリングと情報提供について 鮎川航太(福井県水産試験場) 10:15~10:25 休憩 10:25~10:50 駿河湾の急潮 -流動モニタリング-勝間田高明・仁木将人・田中昭彦・萩原直樹(東海大海洋) 10:50~11:15 駿河湾の急潮一栄養塩とプランクトン 萩原直樹、勝間田高明、田中 昭彦、仁木 將人 (東海大海洋) 11:15~11:40 トカラ海峡で観測された黒潮を反転させるほどの強流現象について 千手智晴・松野 健・堤 英輔・Keunjong Lee (九大応力研)・中村啓彦・仁科文子 (鹿大水産)・ 郭新宇 (CEMES) · 長谷川大介 (水産機構東北水研) 11:40~12:00

総合討論

渡慶次 力(宮崎水試)

「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(三重大学)

2016 年 12 月 1 5 日から1 6 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 ア海洋大気現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約40 名 が参加し、合計 1 2 件の講演があった(講演内容は下記プログラム参照)。一題あたり、質 疑応答含む25 分という十分な時間を割いたため、非常に活発な議論が行われ、時には講演時 間を超過することもあった。

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

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

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

[日時] 2016年12月15日(木) ~ 12月16日(金)

[場所] 九州大学応用力学研究所6 階多目的交流室(W601)

[研究代表者]

万田 敦昌 (三重大学)

[所内世話人]

広瀬 直毅(九州大学)

※ 本研究集会は12月14日午後~15 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))に引き続き行われます。 プログラム

趣旨説明

$$13:40 \sim 14:05$$

津軽海峡の過大なモデル流量を修正する方法

広瀬直毅・韓 修妍 (九大応力研)

$$14:05 \sim 14:30$$

長門市青海島と萩市見島の水位差から見積もられた対馬暖流沿岸分枝の変動

滝川哲太郎(長崎大院水産・環境),渡辺俊輝(山口水研セ),千手智晴(九大応カ研),森本昭彦

(愛媛大沿岸セ)

$$14:30 \sim 14:55$$

日本海表層貯熱量の十年規模変動

碓氷典久, 広瀬成章, 豊田隆寛, 藤井陽介, 高槻靖, 倉賀野連

休憩

$$15:10 \sim 15:35$$

2010年以降の日本海盆における日本海固有水の水温と溶存酸素の変化について 中野俊也(気象庁)

 $15:35 \sim 16:00$

100年後の日本海水温・生態系予測

高山勝巳・広瀬直毅・吉田尚郁(九大応力研)

 $16:00 \sim 16:25$

日本海における春季植物プランクトン現存量の時空間変化とその要因

伊藤雅·児玉武俊·和川拓·井桁庸介(水研機構日水研)

休憩

 $16:40 \sim 17:05$

北西太平洋高解像度日別海面水温解析 (HI MSST) の概要紹介

八川操規(気象庁海洋気象課日本海海洋気象センター), 菅野能明・小司晶子・平原幹俊・

桜井敏之・木村未夏・佐藤克成・小林健作・小林熙(海洋気象課海 洋気象情報室)

(懇親会)

$9:30 \sim 9:55$

短波海洋レーダによる宗谷暖流の観測と対馬暖流系の季節・経年変動

江淵直人・大島慶一郎・深町康(北大低温研),清水大輔(極地研),森島秀太(元北大低温 研),柏瀬陽彦(北大低温研)

 $9:55 \sim 10:20$

自律型海洋観測装置(AOV)を用いた日本周辺の海況モニタリングの開始

西村一星・増田貴仁・土屋主悦・糸井洋人・加藤弘紀(海上保安庁海洋情報部)

 $10:20 \sim 10:45$

日本海の前線近傍における水中グライダー観測

和川拓・井桁庸介・本多直人(水研機構日水研)

休憩

$11:00 \sim 11:25$

High-resolution modeling of Kuroshio for the ocean current energy estimation in the Takara Strait

Bin Wang (Hohai Univ.), Tianran Liu, Naoki Hirose (RIAM, Kyushu Univ.), Toru Yamashiro (Kagoshima Univ.)

 $11:25 \sim 11:50$

強い逆流が風波の発達に及ぼす効果一異常波浪の発生原因の一つ一

水野偏二郎 (元九大応力研)

$$11:50 \sim 12:10$$

総合討論

アジア域の化学輸送モデルの現状と今後の展開に関する研究集会

国立環境研究所 森野 悠

1. 目的

応用力学研究所の大気環境モデリング研究グループは、世界的に見てもアクテイブに研究を進める 研究グループの一つであり、モデル研究と平行して、3波長のレーザーレーダーを導入して黄砂と大 気汚染粒子の同時計測を開始している。福岡は特にアジア起源の黄砂・大気汚染の影響が深刻な地域 であり、応力研グループによる数値モデルと観測データを統合した解析や、多波長データ同化による 黄砂の粒径分布の推定は、未だ十分に明らかにされていない大気中黄砂やエアロゾルの物理特性に関 する科学的ブレークスルーをもたらすとして、国内外から大きく期待されている.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、アジア域の化学輸送モデル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、アジア域の 化学輸送モデル研究の推進や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

場所 九州大学応用力学研究所 W601多目的研究交流室 日時 平成28年12月2日 13:30-18:00、 3日8:40-12:45

3. 研究成果

研究集会では、国内の化学輸送モデルを用いた大気環境モデリングに関わる幅広い専門家が数多く 集まり、18題の講演発表があった。関係者を含めると40名程度の参加があった。2日間の研究集 会の内容としては、「モデル研究と連携する野外観測」、「大気汚染質の排出量の推計とソースリセプ ター解析」、「領域化学輸送モデルを用いた越境大気汚染の現状と問題点」、「データ同化モデルを用い た PM2.5 と AOD の研究の進展」、「今後の大気観測とモデリングの展望」などの最新の成果の報告さ れ、本研究会が化学輸送モデルを用いた大気環境モデリングのコミュニテイにおいて大きな貢献を果 たしていくことが期待できる。

以下に研究集会のプログラムを掲載する。

資料1

「アジア域の化学輸送モデルの現状と今後の展開に関する研究集会」

94

場所 九州大学応用力学研究所 W601多目的研究交流室 日時 平成28年12月2日 13:30-18:00、 3日8:40-12:45

プログラム

12月2日

13:30 - 13:40 研究集会趣旨説明 森野悠、鵜野伊津志

13:40 - 15:40

櫻井 達也(明星大学): 観測及びモデル解析に基づく大気アンモニアの動態解析
速水 洋(電力中央研究所) : 真瀬フラックスサイトにおける硝酸エアロゾル鉛直濃度勾配の観測
Wei Hu(熊本県立大学): Insights into a dust event transported through Beijing in spring 2012:
Morphology, chemical composition and impact on surface aerosols
早崎 将光(国立環境研): PM 広域高濃度と気温逆転層

15:20-15:40 休憩

15:40 - 18:00

Ying Li (国立環境研):Global maps and altitude profiles of particle phase state in atmospheric secondary organic aerosols. 堀江洋佑 (兵庫県環境研究センター) : WRF-CMAQ による PM2.5の発生源解析

浦西克雄(大阪大学): PMF 及び CMAQ による PM2.5 の発生源解析-2013 年度 東海・近畿地方

小松宏昭(神奈川県)、化学輸送モデルを用いた PM2.5 の発生源寄与解析

嶋寺 光(大阪大学): WRF-CMAQ による高濃度 PM2.5 予測に対する各種設定条件の影響

12月3日

8:40 - 10:30
板橋 秀一(電力中央研究所): 化学輸送モデルを用いたアジア域の窒素化合物の沈着量推計
Wang Zhe(王哲) (九大応力研): Modeling study of wintertime LRT of air pollutants in East
Asia with NAQPMS and CMAQ
鵜野 伊津志(九州大学): GEOS CHEM を用いた PM2.5 越境汚染のソースリセプター解析
森野 悠(国立環境研): 有機エアロゾルの揮発特性のモデリング

10:20-10:40 休憩

10:40 - 12:45

原 政之(埼玉県環境科学国際センター):領域気象モデルの境界条件による大気環境シミュレーションの不確実性の評価

茶谷 聡(国立環境研):客観解析の違いによるインド大気質予測への影響

山地 一代(神戸大学):モデル間相互比較 J-STREAM の紹介とお誘い

弓本 桂也 (気象研究所):気象庁・気象研におけるエアロゾルデータ同化-同化予測システムと再解析 プロダクト-

森川 多津子(日本自動車研究所): JATOP における大気質モデル予測精度向上の取組み

共同利用研究集会 「海洋乱流の観測およびモデリング研究」 "Workshop for observational and modeling studies of ocean turbulence"

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. 目的と経緯

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、気候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。

本研究集会では、上記の問題解決を見据え、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研究成果 を発表することで、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いる。2010年度より共同研究として開始したが、研究集会のスタイルが定着してきたこ とを踏まえ、本年度より研究集会の枠で申請し採択された。

2. 研究集会の概要

今年度は 2017 年 1 月 5~6 日に応用力学研究所で開催した。出席者数は記帳に基づくと19 名 (九大 8、東 大 4、京大 3、北大、東北大、延世大(韓国)、水産工学研究所それぞれ 1) であった。プログラムの詳細は 最後に記す。

最初の講演では、東京大学の永井がインドネシア多島海における水塊変質過程に関する数値実験結果につい て報告を行った。多島海での複雑な地形による潮汐混合により、インドネシア通過流が太平洋からインド洋へ運 ぶ海水の水質は大きく変化すると考えられているが、その詳細は不明であった。そこで潮汐混合を陽に再現する 数値実験を行い、多島海での海水の変質過程を定量的に調べた。その結果、潮汐混合が確かに水質を変化させて いることを確認するだけでなく、サブメソスケール規模の水平渦が引き起こす水平混合も変質過程に重要であ ることを示す貴重な結果を得た。次に東京大学の大貫は、PSIと呼ばれる内部波の非線形相互作用に着目し、 そのメカニズムと現実の太平洋で混合に果たす役割について報告を行った。初めに理想化された数値実験を行 い、PSIが内部波の3波共鳴過程を通じて大きなスケールの内部波からより小さな内部波へとエネルギーを カスケードさせるプロセスであることを分かりやすく説明した。次にそのようなPSIにより引き起こされる 鉛直混合強度を見積もるため、内部波の鉛直構造を考慮した新たな非線形共鳴の計算式を導入し、内部潮汐の減 衰率を計算した。その結果、減衰率はPSIの臨界緯度付近で最大となることなど観測と整合的な結果を得ると ともに、内部波の鉛直構造に応じた減衰率の構造を理論的に提案することに成功した。次に東北大学の山口は、 北太平洋の季節躍層内の水温構造と鉛直拡散に着目した観測データ解析を報告した。混合層下への熱の鉛直輸 送を、Argo フロートが取得した水温の鉛直構造から定量評価し、その空間構造を明らかにした。次に混合層内 の熱収支解析を行い鉛直拡散の強さの分布を見積もったところ、その分布は熱の鉛直輸送の分布に概ね対応す ること、さらに鉛直拡散が混合層下への熱輸送の40%程度を担いうることを明らかにした。

休憩を挟んで行われた京都大学の牛島の発表では、日変化する海面熱フラックスが海洋混合層深度に 与える影響に関する数値実験について報告された。乱流を精度よく再現するLE

Sを行うことで、海面加熱期の風成混合による混合層深化過程に、日変化する海面熱フラックスが与える影響を調べたところ、低緯度においては、日変化のある場合には無い場合に比べて混合層深度は深くなるが、高緯度においてその逆に浅くなることを示した。さらにそのメカニズムを単純なジルク模型で説明するとともに、海面水温に 有意な影響を与え得ることも示し、気候への影響についても議論した。次に水産工学研究所の古市は、夏期の東シ ナ海における乱流強度の現場観測とそのスケーリングに関する報告を行った。これまでに得られた乱流強度の直接観 測結果を、海底混合層と中層に分けてまとめることで、それぞれの領域での乱流強度の既存のスケーリングを検証し、 その修正などを行った。その結果、観測とより良く一致するスケーリングを得ることができた。

二日目の最初の講演は、京都大学の萬年から、海洋中の沈降粒子の平均的な沈降速度に対する乱流の影響に関する数値実験結果が報告された。粒子の慣性が無い場合において、乱流が沈降速度に与える影響を体系的に明らかにするため、理想化された状況で実験を行いその影響を整理した結果、乱流の時空間変動が十分に大きい場合には、乱流は海面から沈降し始める粒子の平均沈降速度に影響を与えないが、混合層内部から沈降する粒子には沈降速度を減速させる効果がみられた。さらにこの効果を2次元流の運動学的性質から説明した。次に韓国の延世大学の魯(Noh)は、自然界における多粒子流体に関する総説的な講演を行った。初めに、海洋混合層における乱流は植物プランクトンなどの粒子をより多く混合層内に留める効果があること、ラングミュア循環と呼ばれる乱流はその効果がより顕著であることなどが報告された。次に粒子が流体の密度を変化させることによる影響に関する室内実験、数値実験結果の紹介がなされた。最後に雲中の雨滴粒子成長と沈降、雲の発達と降雨に関する最新のシミュレーション結果について紹介がなされた。

休憩を挟んで行われた北海道大学の松村の発表では、乱流中の流体粒子分布が流体運動に与える影響を陽に表現 した最新の数値モデルを用いて、氷河からの濁った融解水がフィヨルド内を3次元的に輸送される現象のシミュレ ーションについて報告がなされた。融解水は初期には懸濁物を取り込んで流れるが、やがて速度が減じると懸濁物は 沈降し堆積する一方で、(もともと低塩分なため軽い)融解水は湧昇すること、このような融解水に伴って生じる濁 度が最大となる層は亜表層にみられること、10 µm より小さい懸濁粒子のみが 10km より遠方に輸送されうること、 などが再現されたとの報告がなされた。最後に九州大学の堤は、トカラ海峡で観測された黒潮流軸付近での強い乱流 混合について報告を行った。トカラ海峡内にある海山周辺では鉛直拡散係数にして0.1m2/s にも達する強い鉛直混合 が生じていることが明らかとなり、有光層への栄養塩供給過程の一つとして重要である可能性が明らかになった。

3. おわりに。

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。今回も、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。

97

プログラム

2017年1月5日

13:30 -13:40 吉川裕(京大理)

趣旨説明

13:40 - 14:20 永井平・日比谷紀之(東大院理)

インドネシア通過流の水塊変成に関する数値的研究

- 14:20 15:00 大貫陽平・日比谷紀之(東大院理)海洋内部領域での潮汐混合に関わる非線形波動力学の研究
- 15:00 15:40
 山口凌平・須賀利雄(東北大院理)

 Argo データによる季節躍層の鉛直構造と鉛直拡散との関係性について
- 15:40 16:00 休憩
- 16:00 16:40 牛島悠介・吉川裕(京大院理)

熱フラックスの日周変動が海面加熱期の混合層に与える影響に関する研究

- 16:40 17:20 古市尚基(水産機構水工研)・東博紀(環境研)・他4名 夏季の東シナ海における乱流強度の現場観測とスケーリング
- 2017年1月6日
- 09:00 09:40 萬年隆裕・吉川裕(京大院理)海洋混合層における粒子の平均沈降速度に関する数値実験
- 09:40 10:20 Yign Noh (Yonsei University)

Turbulent Particle-Laden Flows in Nature: from Plankton to Clouds

- 10:20 10:40 休憩
- 10:40 11:20 松村義正(北大低温研)・漢那直也(北大北極域研セ)・他3名 グリーンランド氷河融解水の湧昇・エントレインメント過程が駆動するフィヨルド内 の熱・物質循環
- 11:20 -12:00 堤英輔・松野健(九大応力研)・他7名トカラ海峡の黒潮における乱流混合
- 12:00 12:30 総合討論

海洋・海岸における波動の解析モデルの展開

研究代表者 鹿児島大学学術研究院·理工学域 柿沼太郎

研究の目的

申請者らは、平成 20 年度より、九州大学応用力学研究所の共同利用研究として、内部波を含む 海洋波動の非線形問題に関して継続して研究を行なってきた.この成果を踏まえ、様々な視点から 海洋・海岸における波動問題に関する研究を行なっている研究者らとともに、平成 27 年度に、応 用力学研究所共同利用研究集会を開催した.その際、質疑応答が大変活発に行なわれ、本研究集会 の重要性が、参加者によって強く認識された.そこで、波動モデルに関する最新の研究成果を踏ま え、それぞれの波動現象に対して個別に開発されてきたモデルが有する、利点や問題点を議論す ることを目的として、平成 28 年度に、応用力学研究所共同利用研究集会を開催した.本研究集会 による成果は、申請者らの今後の応用力学研究所の共同利用研究に活かされるのみならず、海洋学 並びに海岸工学の両者の分野において、様々な波動問題に活用されるモデル開発のための、重要な 基礎資料になると考えられる.

本研究組織は、本研究集会を経て有機的に連携し、それぞれのモデルが持つ利点や問題点を整理 し、一つの統合的なモデルの開発を目指している。そのために、本研究集会では、海洋波動及び海 岸波動の研究者のみならず、多相流体を含む様々な流体を対象とした数値モデルの開発者や、実験 的に研究を進める研究者、そして、応用物理学者並びに数学者をその参加者に迎え入れ、多様な角 度から流体の波動問題に関して議論した。

本研究集会は、海洋・海岸における波動をとりまく多彩な分野の研究者が、互いの情報を交換し、 個々の研究の最前線やその拡がりを理解することで問題意識を共有するとともに、従来のモデルを 俯瞰し、更なる発展や展開のためのアイディアを生み出す場となった.

研究集会の内容

本研究集会は、2016年12月17日(土)午後~18日(日)午前に、九州大学応用力学研究所の 多目的交流室(W601)において開催された.なお、研究集会参加者の主メンバが土木学会海岸工 学委員会波動モデル研究小委員会委員であったため、主催を土木学会海岸工学委員会とした. ただし、本委員のメンバは、九州大学応用力学研究所、大阪市立大学及び慶應義塾大学の、物理学、 応用数学、並びに、数学の研究者を含んでおり、九州大学応用力学研究所で開催するに相応し い研究集会となった.参加者数は、第1日が13人、第2日が11人であった.すべての発表に 対して、質疑応答が活発になされた.座長は、研究代表者が務めた.

まず,第1日の第1セッションにおいて,波動のシミュレーションに関する2件の口頭発表及び質疑応答が行なわれた.すなわち,鉛直積分型数値モデルの実際の港湾への適用と,3次元数値 モデルによる津波等の波動シミュレーションに関する発表がなされた.

次に,第2セッションでは,波動の数値解析法に焦点が当てられ,2件の口頭発表及び質疑応答 が行なわれた.すなわち,格子法と粒子法の両者を適用した構造流体連成解析と,コンパイル型言 語とスクリプト言語の両者を用いた数値モデルによる波動解析に関して発表された. 第3セッシ ョンは,多層と波動と銘打って,2件の口頭発表及び質疑応答が行なわれた.すなわち,2層流体 における界面の非線形発展と,線形定常型の多層波動方程式に関する発表が行なわれた.

第1日には,懇親会が開催され,水の波に関する様々な対象をとりあげてきた理学・工学分野の 研究者間で,忌憚のない議論が行なわれた. そして,第2日の第4セッションでは,孤立波の解析に関して議論された.すなわち,Lattice Boltzmann Entropic Method を用いた非線形波動の数値解析と,表面波・内部波共存場における孤立 波の数値解に関する,2件の口頭発表及び質疑応答が行なわれた.

更に,第5セッションでは,波動の数理に関して1件の口頭発表及び質疑応答があった.すなわち,水の波の変分構造と磯部一柿沼モデルに関する研究成果が論じられた.

以上の発表内容の概要を含む、本研究集会のプログラムを以下に示す.

九州大学応用力学研究所 共同利用研究集会

「海洋・海岸における波動の解析モデルの展開」

- 日 時 2016 年 12 月 17 日 (土) ~18 日 (日)
- 場 所 九州大学応用力学研究所 多目的交流室(W601)
- 主 催 土木学会海岸工学委員会

2016年12月17日(土)

開会の挨拶(13:00~13:10)

柿沼太郎(土木学会海岸工学委員会波動モデル研究小委員会委員長)

第 1 セッション - 波動のシミュレーション-

「NOWT-PARI の反射・透過境界とそれを用いた港内静穏度解析」(13:10~13:50)

平山克也(海上・港湾・航空技術研究所・港湾空港技術研究所)

ブシネスク方程式を導出する過程で透水層内の流体抵抗則を考慮することにより,分散波の波エ ネルギーを効率的に減衰させる高次スポンジ層境界,及び消波ブロックによる波の任意反射を再現 する透水層境界を開発した.本発表では,これらの概要とこれらを適用した波浪変形計算結果に基 づく港内静穏度解析の事例等を紹介した.

「3 次元数値流体力学ツール OpenFOAM による波動シミュレーション」(13:50~14:30)

川崎浩司(ハイドロソフト技術研究所・研究開発センター)

オープンソース数値流体力学ツール OpenFOAM と構造解析モデル SeanFEM を組み合わせた3 次 元流体-構造モデルについて説明した.そして,東北地方太平洋沖地震津波で被害があった小白浜漁 港の防潮堤を対象に本モデルを適用し,被災メカニズムについて検討した.また,バーチャルリアリ ティ技術を活用した津波浸水動画についても紹介した.

第 2 セッション 一波動の数値解析法一

「格子法と粒子法による構造流体連成解析について」(14:40~15:20)

陸田秀実(広島大学大学院·工学研究院)

本発表では、格子法と粒子法を用いた構造流体連成問題における数理モデルの計算技術につ
いて紹介するとともに,格子法と粒子法の利点・欠点を相互補完する格子粒子ハイブリッド法の計 算事例を紹介した.特に,津波,浮体,係留索,漂流物のすべてが連成する場合の力学的取り扱い 方法について述べるとともに,その精度検証結果を説明した.

「z 座標 3 次元グリッドモデルによる波動解析の試み」(15:20~16:00)

新谷哲也(首都大学東京·都市環境学部)

コンパイル型言語の高速性とスクリプト言語の柔軟性を取り入れた 3 次元流体シミュレー タFantom Refined を紹介し,特に局所高解像度化のアイディアについて詳しく説明した.波動 問題への適用例として孤立波伝播,規則波の浅水変形を取り上げ,その再現精度について報告 を行なった.

第 3 セッション 一多層と波動一

「密度の異なった 2 層流体における界面の非線形発展 – 密度非一様性を伴った軸対称渦層の 3 次元発展」(16:10~16:50)

松岡千博(大阪市立大学大学院・工学研究科)

Swirl と呼ばれる軸対称流れが存在する場合としない場合の両方について密度の異なった 2 層流体における渦層の運動が調べられた.その結果,密度非一様性があると円筒型渦層の運動は, 自動的に 3 次元化(角方向の運動が存在)し,界面(渦層)は,歪みを伴って巻き上がって回 転運動をすることがわかった.また,重力を入れると軸方向に強い伸長効果が生じることが報 告された.

「定常型の多層波動方程式について」(16:50~17:30)

金山 進(日本大学・工学部)

大規模な没水構造物化や水深が大きく変化する水域に対する静穏度計算へ適用すべく, Radiation mode および Evanescent mode の両者を評価できる周波数依存タイプの線形定常型の多層 波動モデルについて検討した.従属変数の数を低減するため,従来,水位変動と各層の流速を対象 としていたものを各層上端での鉛直流速に変更した.

懇親会

2016 年 12 月 18 日 (日)

第4 セッション 一孤立波の解析-

「Lattice Boltzmann entropic method による非線形波動の数値解析」(10:00~

10:40) 辻 英一(九州大学・応用力学研究所)

Lattice Boltzmann Method (LBM) の非線形波動モデル方程式への適用例として Burgers 方程式を 例にとり解析した. Entropic Method を用いて定式化したスキームは,従来のものと比較して良い結果を与えること,特にその長所は,粘性が弱い場合により顕著になることが,明らかになった.

「表面波・内部波共存場の孤立波解」(10:40~11:20)

柿沼太郎(鹿児島大学学術研究院·理工学域)

変分原理に基づく、定常進行波を解とする非線形波動方程式系を基礎方程式系とし、自由水面を 有する 2 層流体を対象として、表面波・内部波共存場における孤立波解を求めた. その際に、 Newton-Raphson 法を適用して,孤立波の数値解を得た. そして、表面波モード及び内部波モードの それぞれの表面孤立波及び内部孤立波の特性に関して調べた.

第5 セッション 一波動の数理一

「水の波の変分構造と磯部-柿沼モデル」(11:30~12:10)

井口達雄 (慶應義塾大学・理工学部)

水の波の基礎方程式系は、変分構造を有している.そのラグランジアンを近似し、対応するオイ ラーーラグランジュ方程式として磯部ー柿沼モデルが導かれる.近似を変えることにより様々な磯 部ー柿沼モデルが得られるが、それらの線形分散関係式の間に成り立つ関係について、特に浅水波 近似という観点から報告した.

総括及び今後の展望等に関する議論・閉会の挨拶(12:10~12:40)

柿沼太郎

(共同利用研究集会)

非線形波動研究の深化と展開

研究代表者 京都大学情報学研究科 辻本 諭

研究集会の目的

近年、著しい発展を遂げてきた非線形波動の研究は、その源流ともいえる流体力学から始まり、様々 な幅広い分野を取り込みながら、現在の社会基盤を支える重要な分野になるまでいたっている。非線形波 動研究が発展していく過程において、理論研究と実験研究が密接に連携をとることを基礎に据えつつ、全く 新しい分野との関連性を見いだすことで、非線形波動研究のさらなる発展を導いてきた。ここでの研究対象 である非線形波動は、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、 その性質を理解し、また解析手法を発展させることは、地球環境を理解する上でも重要な役割を果たすと思 われる。また、非線形波動研究の成果はその普遍性から、非線形現象の物理現象のみならず、生命動態、渋 滞等の社会現象、情報学におけるアルゴリズムやネットワークなど、多種多様の分野に波及することになる。

本研究集会は、物理、数学、工学、情報などの多彩な分野から、現象論や数理的研究に関する研究発表を 幅広く募り、最先端の研究に現れる種々の現象とその背後にある普遍的原理について様々な分野の立場か ら議論することで、非線形波動研究の深化とその新たな展開を目指す。「非線形波動」をとりまく様々な分野の 研究者が互いの情報を交換し、個々の研究の最前線を理解することで、問題意識を共有するとともに、更 なる発展や新しい展開を生み出す場を本研究集会によって提供したい。本研究集会の趣旨である、異分野 の相互作用による研究の促進のためには、共同利用研究拠点である応用力学研究所での共同研究集会開催 がふさわしいと考えられる。

なお、本研究集会は日本応用数理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 28 年 11 月 3 日から 11 月 5 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(ロ頭発表13件およびポスター発表14 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、離散数学に関する話題として、

• ZDD による組合せ集合の表現と列挙: 基礎から応用へ

という講演が行われ、情報科学の分野で注目を集めているZDD (ゼロサプレス型二分決定グラフ)の基礎および応用について研究動向も交えて紹介された。また、最近の海洋波の非線形相互作用に関する話題として、

• 海洋波の非線形相互作用と巨大波浪生成のメカニズム解明

という講演が行われ、巨大波の実際の観測から理論的考察に到るまで、興味深い解説がなされた。さらに、 可積分な数理モデルに関する話題として、

• 可積分確率過程に現れる対称関数

という入門的講演が行われ,幅広い分野の研究者による多角的な議論が加えられた。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、可積分性を有するオートマトンとしての箱玉系の解析, 偏微分方程式の数値計算に関する報告および,海洋上の巨大波クラスターからパンルヴェ方程式,数え上 げ数学,直交多項式に関する話題まで、多種多彩な内容の報告が行われた。水準の高い講演がなされ、分野 を越えた活発な議論が交わされた.

本研究集会は、物理・数学の話題から工学・情報の応用に至る幅広いテーマを扱うこと、3件の招待 講演を除き、講演は公募によるもので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、幅広い 分野での最先端の研究について、多角的な視点から議論することで、非線形波動研究の深化とその新たな 展開を図るという当初の目的は、一定程度達成できたものと思われる。「非線形波動」研究のような、様々な テーマが密接に関連しあう分野では、本研究集会のような場の存在が極めて重要である。本共同利用研究 集会を実現させていただいた九州大学応用力学研究所に対して、参加者を代表して深く感謝申し上げた い。

講演プログラムと概要

11月3日(木)

13:30~14:00 前田一貴(関西学院大) **番号付き・運搬車付き箱玉系の有限戸田表現**

> 玉に番号がついており,かつ運搬車容量に制限のある箱玉系に対する 有限戸田表現を与える.これに関連して,従来知られていたルール とは異なる番号付き・運搬車付き箱玉系の類似物も得られたので,こ れについても報告する.

14:00~14:30村田 実貴生(東京農工大)連立型反応拡散セル・オートマトンの進行波

多成分のセル・オートマトンの中で基本的と考えられるセル・オート マトンとして「連立型反応拡散セル・オートマトン」を提唱した. 今回 は、その連立型反応拡散セル・オートマトンに現れる進行波について報 告する.また、反応拡散方程式で現れる進行波との共通点や相違点 について考察する.

14:45~15:45 **[特別講演]** 堀山 貴史(埼玉大) **ZDD による組合せ集合の表現と列挙: 基礎から応用**へ

ZDD (Zero-suppressed Binary Decision Diagrams; ゼロサプレ ス型二分決定グラフ) は、有向非巡回グラフにより集合族 (or 組合せ集合) をコンパクトに表現することのできるデータ構造 である。また、ハッシュ表を巧妙に利用することで、ZDD に関す る演算を効率よく実行することができる。こうした特長を活かして、 制約充足問題の解の列挙や評価にZDD が利用されている。近年、効 果的なZDD の構築法が提案され、スマートグリッドに向けた電力 網の解析、統計的検定、選挙区の区割り、避難所の割り当てなどに向けて、 応用が広がってきている。この講演では、ZDD の基礎から応用までを解 説する。

16:00~16:30辻本 諭(京都大)新しい箱玉系のルールとその解析

オートマトン表示に基づく新しい箱玉系として、一つ飛ばしルー ルや、2番目空き箱ルールなどを紹介し、その解析結果を報告す る。

16:30~17:00 中田 庸一(東大) 超離散 Somos-4,5 の初期値問題の解法

> Somos sequence は Laurent性を持つ離散方程式系として知られ ているが。その超離散対応物のうち超離散 Somos-4 および Somos-5 について任意の初期値に対する一般解を導出したので、 その方法について解説する。

17:00~17:30 野邊 厚(千葉大)

A⁽¹⁾ 型クラスター代数の変異と離散戸田格子

 $A_1^{(1)}$ 型離散戸田格子のスペクトル曲線である楕円曲線の加法構造を用いて、 $A_1^{(1)}$ 型離散戸田格子の時間発展と $A_1^{(1)}$ 型クラスター代数の変異との関係を与える.

11月4日(金)

 $10:00 \sim 10:30$

丸野健一(早大),永原新(早大) Davey-Stewartson II 方程式のダーク型線ソリトンの相互作用: 理論と数値計算

Davey-Stewartson II 方程式のダーク型ソリトン相互作用について厳密解と数値計算を用いて詳しく調べ、ダーク型ソリトンの相互作用パターンの遷移等について明らかにする.

10:30~11:00 辻 英一(九大) Lattice Boltzmann Entropic Method を用いた Burgers 方程式 の数値計算

> 格子ボルツマン法は、優れた特徴を有する数値計算法である。従 来この方法はNS 方程式などに適用されていたが、この方法を Burgers 方程式の数値計算に適用した。合わせて流体波動のモデ ルとしての非線形波動方程式への適用性について議論する。

11:10~12:10 [特別講演] 森 信人(京大) 海洋波の非線形相互作用と巨大波浪生成のメカニズム解明

Freak wave/Rough wave は、外洋において突然(想定を越えて)出現 する高波を指し、出現確率の観点から有義波高の2倍を超える最大 波と定義される事が多い. 1990 年前半に工学分野で議論が盛んに 行われた Freak wave の研究では,一般的な外洋における発生原 因として、ほぼ同時期に 3 次以上の高次の非線形干渉の影響が大 きいと報告が数値計算および水槽実験の両面で報告された以降、数 値 シミュレーションおよび理論共に大きな進展は見られなかった. しかし、2000年から理工両分野から注目を集め始め、分野をまたい だ国際会議も数度開催されている.特に、ここ 10 年間の研究の進 展は大きい. Freak wave の研究は、非線形波動から非線形統計 そして波浪予測まで渡る幅広い研究展開がなされており,1990 年 代の現象の解明に関する研究から、その予測に大きくシフトして きた. 今回は,非線形波動力学および工学の両面から見 Freak wave の研究の流れを解説すると共に、不規則な波の中の最大波の予 測に重要 な水面変位の4次モーメントであるkurtosis を予測す るための予測式、方向分散性の影響を加えた半経験式について概説す る. その結 果, 水槽実験結果については, スペクトルから最大波の分 布を推定 できることがわかった.

13:30~14:30 [特別講演] 竹山 美宏(筑波大) 可積分確率過程に現れる対称関数

ソリトン方程式としてよく知られている KdV 方程式を 2 次 元空間に拡張したKadomtsev-Petviashvili (KP) 方程式につい ては、それと可換な高次の時間発展を記述する無限個の非線形 偏微分方程式が存在する。この方程式系は KP 階層と呼ばれる が、KP 階層の一般解の構成においては、Schur 関数と呼ばれる 多変数対称関数が重要な役割を果たす。数学においては、Schur 関 数の様々な拡張(Hall-Littlewood 多項式、Macdonald 多項式 な ど)が考えられており、可積分系の研究でも広く使われている。最 近の可積分系の研究で注目を集めている可積分確率過程におい ては、これまでに考えられていなかった Schur 関数の拡張が現 れる。今回の講演では、この新しい多変数対称関数について、主に 代数的な観点から概説する。 14:45~15:15 鈴木貴雄(近大)
 *q*パンルヴェVI 方程式の *q*-超幾何関数の観点からの一般化
 神保・坂井によって導入された *q*パンルヴェVI 方程式は, *q*-超幾何関数 2¢1 を特殊解として持つことが知られている. 今回はハイネの *q*-超幾何関数 *n*+1¢*n* を特殊解として持ち, *n* = 1 の場合に *q*-パンルヴェVI 方程式と一致するような, 2*n* 階の差分方程式系を導入する.

15:15~15:45 Philip Broadbridge(ラ・トローブ大),梶原健司(九大),丸 野健一(早大),Dimetre Triades(九大/ラ・トローブ大) Construction and simulation of discrete integrable model for soil water infiltration problem

> 土壌中の水の浸透現象を記述する可積分モデルと、その離散化を提 案する.モデルはBurgers 方程式にホドグラフ変換を施した 1 次元非線形拡散方程式に対する非線形境界値問題として定式化さ れ、それを用いて可積分離散化を行ったモデルを導出する.また、数 値シミュレーションでの数値安定性と、厳密解が求まる場合との高 精度の一致を要請すると、モデルに対して可積分性とは別の観点か らの議論が必要である.この点に関しても考察する.

11月5日(土) 10:00~10:30

三木 啓司 (同志社大) **多重直交多項式と可積分系**

複数の関数を共通の分母多項式を持つ有理関数で近似する同時パ デ近似の理論で用いられる多重直交多項式は直交多項式の一つ の拡張である.本発表では、直交多項式と戸田方程式の対応に注 目して、多重直交多項式から戸田方程式の高次元拡張を提案する.

10:30~11:00 ム岸弘幸(都立産技高専) 糸のたわみ問題とソボレフ不等式の最良定数

天井からゴム膜で吊るされた無限長の糸に荷重をかけたときの糸 のたわみは、2階線形常微分方程式にしたがう.糸のたわみの最大幅 は、たわみのポテンシャルエネルギーの定数倍で評価する、ソボレフ 不等式で表される.定数倍のうち、最も小さい定数が最良定数であ る.本講演ではゴム膜のバネ定数が一様ではなく、区間によって異な る簡単な場合での、ソボレフ不等式の最良定数を求めた.

11:10~11:40 鈴木 大庸(法政大) 礒島 伸(法政大) 離散可積分系による Newell-Whitham モデルの時間差分化とその解

交通流モデルの1つである遅延微分方程式Newell-Whitham (NW) モデルと、可積分である Kac-van Moerbeke (KvM) 系との対比 に注目し、離散時間KvM 系を利用したNW モデルの時間差分化を 提案し、得られた離散時間モデルの厳密解についても議論する。

11:40~12:10上岡修平(京大)森居数広(京大)平面分割に関連するパフィアンについて

行列式はGessel-Viennot-Lindströtmの方法により、パフィアンは Stembridge の手法により、非交叉格子路の言葉で組合せ論的に解釈できる。本講演では、対称な平面分割の分配関数を与えるパフィアンに着目し、それの満たす性質について考察する。

ポスターセッション概要

朴 炯基(九大)

Explicit Formulas for Area-preserving Deformations of Plane Curves in the Equicentroaffine Geometry.

We present a formulation of discrete dynamics of discrete plane curves in the equicentroaffine geometry which is characterized as an areapreserving defor- mation. The deformation is governed by the discrete Korteweg-de Vries(KdV) equation. We also construct explicit formulas for the discrete deformation as well as the continuous deformation of smooth curves, in terms of the τ (tau) function. In the construction, we use the correspondence to the isoperimet- ric(arc lengthpreserving) deformation of plane curves in the Minkowski plane.

赤木 洸仁(東海大)長井 秀友(東海大) 連立線形方程式の一般解の差分・超離散対応

Max-Plus 代数を用いて構成される連立線形超離散方程式は係数の大小関係によって分類される周期的な解挙動をもつことが知られている。本発表では差分方程式の一般解に対して超離散化を行うことで、これらの分類との対応を与える。

安藤 卓哉(早大)高橋 大輔(早大) **束方程式の解の挙動の束依存性について**

共役元付き分配束上で束の演算を用いた方程式を考える.この方程式の特殊化 として,Boole 束上ではECA を,全順序集合の束上ではmax-min の方程式を 表現できる.本発表では半順序集合の束も考慮し,それぞれの束での解の挙動の 相似と相異について議論する.

篠原 麻礼 (早大) 坂田 幸太郎 (早大) 辻本 諭 (京大) 高橋 大輔 (早 大)

1つ飛ばし箱玉系について

辻本氏によって発見された、箱玉系で定義される種々のソリトン系が存在する。このうちで、玉を持った運搬車が特徴的な動きをする1 つ飛ばしの箱玉系に焦点をあてる。この系のルール、解のふるまい、max-plus 表現による解析などを解説する予定である。

福田 亜希子(芝浦工大) 山本 有作(電通大) 岩崎 雅史(京都府大) 石渡 恵 美子(東京理科大) 中村 佳正(京大) **箱と玉の両方に番号が付いた箱玉系について**

番号付き箱玉系として,玉に番号を付けて区別した箱玉系および箱に番号を付けて区別した箱玉系が知られている。本講演では,それらの番号付き箱玉系の一般化として,玉と箱の両方に番号を付けて区別した箱玉系を定義する。また,新たに定義した番号付き箱玉系の保存量についても触れる。

高松 啓太 (京大)

2つの ECA の組み合わせがつくるケーリーグラフの平均距離について

ECA(Elementary Cellular Automaton) とは、直線上に並んだ 0 あるいは 1 の 2 状態をとりうるセルの時間発展ルールで、自身および両隣のセルの状態か ら次の時刻の状態を決定する。また、ECA による時間発展がケーリーグラフ上 のランダムウォークと対応づけられることが知られている。本講演では、ECA のうちルール 60 とルール 195 の組により生成されるケーリーグラフとルール 15 とルール 240 が生成するケーリーグラフが同型であることを変換行列の視 点から示す。 ー木信吾(東大)柳澤大地(東大)西成活裕(東大) 隣接サイトの状態に依存する吸脱着機構を持つ完全非対称単純排他過程と 複雑ネットワークへの応用

前方の隣接サイトの状態に依存する吸脱着機構を持つ一次元開放系の完全非対称単純排他過程について、平均場近似を用いて定常状態を解析した結果を紹介する.また、最後に、この模型の今後の展望の一つとして、複雑ネットワークへの応用について言及する.

松家 敬介(武蔵野大) 時間遅れをもつ常微分方程式の離散化について

ロジスティック方程式に時間遅れを入れた Hutchinson-Wright(HW) 方程式の解 の挙動は時間遅れに関するパラメータによって変化することが知られている。本 講演では HW 方程式の離散化とその解の挙動が微分方程式の場合と同様に時 間遅れに関するパラメータで変化することを報告する。

新澤信彦(西日本工大) Max Plus 代数での行列式について

Max Plus の連立方程式から変数を消去しようとすると、方程式が極端に複 雑になってしまう事が多い。ここでは、あるクラスのMax Plus 線形方程式で は、その様な複雑化が起らず、可解条件を行列式に相当するもので表せる事 を示す。

山本 太郎(京大)

2つ飛ばし箱玉系の解析

粒子性を有するミーリ・オートマトンの中で、1つ飛ばし箱玉系のソリトン 性が明らかになってきた。本発表では、その一般化として2つ飛ばしルールをもつ オートマトンを取り上げ、そのソリトン性を考察する。

羅宇 (京大)

例外型直交多項式の零点の性質及びその応用

古典直交多項式は、零点に関するStieljes-Calogero 関係式により、特殊な多 体系と関連していると指摘された。古典直交多項式の一種の拡張である例外型直 交多項式について、零点に関するStieljes-Calogero 関係式及びその変形を調 べる。それらの結果を利用し、例外型直交多項式と関連する多体系を解析する。

佐藤亜理紗(立教大), 筧三郎(立教大) 期間構造モデルの離散化の試み

金利の期間構造の研究において、Vasicek モデル., CIR モデルなどといっ たアフィン型モデルは基本的であり、多く利用されてきた。このクラスのモデルで は、対応する微分方程式がリッカチ型になるため、厳密解を明示的に求めることが できる。本研究では、時間を離散化したモデルにおいて、同様の考察を試みる。

足立好輝(立教大), 筧三郎(立教大) GL(3)型 Atiyah-Ward 仮説とモノドロミー保存変形

Atiyah-Ward 仮説とはSU(2) 自己双対ヤン・ミルズ方程式の解法の一つであり, 相似簡約を通してパンルヴェVI 型方程式と関係する。本研究では、これをGL(3)型に拡張し、対応するモノドロミー保存変形方程式を考察する。

久保涼平(立教大), 筧三郎(立教大) 超幾何関数で表される不変量を持つ差分方程式の楕円関数解

榊・筧によって、超幾何関数で表される不変量を持つ差分方程式の構成法が提案され、 近藤によって厳密解が考察されている。今回は、榊・筧の論文では扱われていなか った場合について、楕円関数で解が表示されるものについて報告する。

開催の期間 平成 28 年 11 月 3 日 ~ 平成 28 年 11 月 5 日

参加者 60 名

(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係する研究者、利用者が一堂に会する研究 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:	2016年12月14日(水) 午後(14:00~17:00)
	15日(木) 午前(9:30~12:00)
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6 階 W601 号室
参加者:	14 日 33 名
	15日 28名

3. 発表概要

本研究集会では 10 題の発表があり、観測システムの運用報告から津波観測への応用、観測デー タの解析まで幅広い分野での議論が2日に渡って活発に行われた。

1 日目は 6 件の講演があり、前半は津波観測に関する話題が発表された。三菱電機の山田らは、 津波検出に関して、潮流等の長周期成分を除去したのちに観測域内を通過する流速変化の等位相線 を検出することで津波到来波面前面としてとらえる手法を提案した。国際航業/愛媛大院理工の藤 らは、仮想津波観測実験を通して津波検知距離の統計的解析を行った。津波の流速エネルギーと背 景流のエネルギーとの比が検知結果とほぼ一致し、エネルギー比1で検知確率 50%に相当するこ とを示した。また、検知距離の日周変動が電離層と関係していることも示唆した。琉球大学院理工 の渡久地らは、伊勢湾に設置された海洋レーダで観測された 2011 年東北地方太平洋沖地震津波到 来時の流速データから、その固有振動モードに関して二次元分布とスペクトルの時間変動について 考察した。スペクトル増幅関数については湾外の観測データとの比較の必要性が指摘された。電力 中央研究所の坂井らは、VHF レーダにより中部電力浜岡発電所地先の観測に関して、定点観測と GPS 漂流ブイとの比較検証を行い、良い一致を示したことを報告した。津波検知に関する考察も行 い、Lipa らにより提唱された Q 値については御前崎沖の複雑な地形では利用できないことに言及 した。JAMSTEC むつ研究所の渡邉らから、津軽海峡東部海域観測用に設置した海洋レーダの運用 状況に関して報告があった。電磁流速計の繋留観測との比較を昨年に引き続き実施し、南北方向成 分流速が一致するのに対して東西成分が海洋レーダでは過小評価になることを示した。視線方向流 速で比較すると大畑局の流速値の相関が低いことが分かった。今後さらに原因究明と改良を進める とのことであった。海上保安庁海洋情報部の西村らは、相模湾レーダによる観測結果から、相模湾 内の平均流は反時計回りが卓越し、EOF 解析から第一モードが黒潮流入に対応し、第二モードが 局所的海上風に駆動された吹送流成分に関係することを明らかにした。また同時に、第一・第二モ ードで約 70%を支配していることも示した。

2日目は4件の講演があった。情報通信研究機構の杉谷らは、対馬と相島に設置した遠距離海洋 レーダによる対馬海流分岐流観測について、バイスタティックレーダの技術的な紹介をした。彼ら は、観測距離の延伸のために受信信号から直達波を検出し、ビートダウン用ローカル信号を同期さ せて掃引し、中間周波段に狭帯域フィルタを適用する方法を開発した。琉球大学院理工の大城らは、 日向灘観測用に宮崎市に設置した海洋レーダで取得された、双峰型スペクトルに関して検証を行っ た。アンテナパターン計測からサイドロブによる他方向からの情報混入はないことを示した。さら に、双峰型スペクトルの発生頻度と黒潮離岸距離を比較しその関係を示唆した。電力中央研究所の 坪野らは、有明海でのVHFレーダ観測の視線方向流速から潮流4分潮を拘束条件としてパラメー タ推定を行った。抗力で潮位と潮流の位相差は補正できたが、粘性係数については感度が低いこと が示された。この結果は、視線方向流速だけでもデータ同化に利用できることを示唆している。琉 球大学理の久木は、海洋レーダから求まる海上風向を波浪推算に用いる方法を紹介した。島嶼沿岸 域のように吹送距離が風向により大きく変化する海域での波浪推算に有効であると考えられる。

講演後の総合討論では、今回の研究集会での議論のまとめが行われ、今後も研究集会を開催する 方針が表明された。加えて、琉球大工の藤井から最近の総務省での海洋レーダ無線局免許に関する 問題点を挙げ、その状況把握と対応に関する課題を提示し、今後も関係者が連携して情報交換を密 にすることを話し合った。

- 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 28 年 12 月 14 日(水)~15 日(木)
- 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 号室

12月14日(水)

14:00-14:10 あいさつ・趣旨説明

藤井智史(琉球大)

14:10-14:35 海洋レーダを用いた津波波面推定方式の検討

山田哲太郎、小幡康、亀田洋志、小柳智之、川相隆、有岡俊彦(三菱電機)

- 14:35-15:00 海洋レーダを利用した津波検知距離の統計解析と測定精度の検証 藤良太郎(国際航業/愛媛大院理工),日向博文(愛媛大院理工)
- 15:00-15:25 海洋レーダ観測による津波到来時の伊勢湾の固有振動モードに関する考察 渡久地優(琉球大院理工)、藤井智史(琉球大工)、日向博文(愛媛大院理工)
- 15:25-15:40 休憩
- 15:40-16:05 遠州灘沖の海洋レーダ観測による防災・環境モニタリングへの活用 坂井伸一、新井田靖郎(電中研)、田中良仁、上原史洋(中部電力)
- 16:05-16:30 津軽海峡海洋短波レーダの運用状況 渡邉修一、佐々木建一、山本秀樹、柳谷敏典(JAMSTEC むつ研)
- 16:30-16:55 海洋短波レーダーを用いた相模湾における表層循環流の考察 西村一星(海上保安庁海洋情報部)、中野知香(東京海洋大)、松坂真衣(海上保安 庁海洋情報部)、寄高博行(高知大)、陳イネイ(東芝システムテクノロジー)、 白川徹(ウイングマリタイムサービス)、根本雅生、吉田次郎(東京海洋大)

12月15日(木)

- 09:30-09:55 遠距離海洋レーダによる対馬暖流分岐流のバイスタティク観測 杉谷茂夫、雨谷純、岩井宏徳(NICT)、森本明彦(愛媛大沿岸セ)、久島萌人(名 大宇宙地球環境研)、藤井智史(琉球大工)、滝川哲太郎(長崎大院水産・環境)、 市川香(九大応力研)
- 09:55-10:20 海洋レーダによる日向灘観測において取得したドップラースペクトルについて 大城弘貴(琉球大院理工)、藤井智史(琉球大工)、渡慶次力(宮崎県水試)
- 10:20-10:45 有明海においてレーダ観測で得られた分潮成分を用いたモデルのパラメータ推定 坪野考樹、三角和弘、津旨大輔(電中研)
- 10:45-11:00 休憩
- 11:00-11:25 島嶼沿岸域の波浪推算への海洋レーダ利用 久木幸治(琉球大)
- 11:25-12:00 総合討論

(共同利用研究集会)

「東シナ海の循環と混合に関する研究」

"Workshop on the Circulation and Mixing in the East China Sea"

研究代表者 石坂丞二(名大宇宙地球環境研究所)

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3名、京都大学1名、富山大学1名、九州大学3名 であった。本研究集会では、松野健(九州大学)、相木秀則(名古屋大学)、石坂丞二(名古 屋大学)、梅澤有(長崎大学)、藤田裕也(長崎大学)、徐倩(名古屋大学)、吉川裕(京都大 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: 2016年6月11日(土)13:30~12日(日)12:00 場所:九州大学応用力学研究所6F W601

松野は、東シナ海陸棚域底層での高濁度層における観測結果から、水温と DO が海底境 界層で一様であるのに対し、懸濁物量や乱流強度は底層近くで大きくなっていることを報 告した。粒子の沈降と鉛直拡散のバランスを仮定して、懸濁粒子の沈降速度を見積もったが、 沈降速度が拡散係数に大きく依存する結果となり、仮定したバランスについてさらに検討 する必要があるのではないかという議論がなされた。また、リン酸濃度が下層で増加してい ることから、堆積物あるいは水中の懸濁物質からの溶出の可能性が示唆された。

相木は、陸棚域における台風起源の波動エネルギーフラックスの診断手法などについて 述べ、波浪を考慮した大気海洋結合モデルを用いた解析から、内部重力波および外部波の挙 動を診断する方法について理論的なアプローチを紹介した。また、海面の波浪の観測機器に よって海洋内部へのエネルギーの移動について評価することの重要性について提案した。 石坂は東シナ海のメソスケール渦と春季ブルームへの影響について述べ、日本海若狭湾 沖の低気圧性、高気圧性の渦に関して、春季ブルームの開始のタイミングが異なることについて述べた。それに対して、混合層の定義の問題や、熱フラックスの日周性の重要性などについて議論があった。

梅澤は、硝酸窒素同位体を用いて東シナ海・黒潮海域の基礎生産を支える栄養塩動態について発表した。冬季に発達した塩分33程度の黄海冷水塊は、成層の発達によって夏季に北部東シナ海の底層に孤立し、亜表層の植物プランクトン生産に影響を与えること、秋に移行するにつれて、成層構造が弱まり、冷水塊は黒潮由来の海水に押し込まれるようになるため、 黒潮中層水由来の栄養塩が生産に与えることが、δ¹⁵N-NO₃シグナルからも示された。南風が卓越する夏季の東シナ海では、台湾海峡からの表層水や、長江希釈水の影響が強くなると考えられるが、秋季には、窒素固定や再生産の影響が黒潮中層水にまで見られ、北部東シナ海まで影響していることが示された。夏季における黄海底層冷水の存在や、秋季には黒潮中層にも窒素固定や再生産の影響が見られるなど、複雑な環境が議論された。

藤田は、白鳳丸 KH-15-3 次航海における硝酸塩センサーによる連続観測の結果について 発表し、硝酸塩センサーによる測定と採水サンプルからの分析結果に十分有意な相関があ ることを示し、硝酸塩センサーによる詳細な鉛直分布を用いて、硝酸塩躍層の位置とクロロ フィル極大層の深さとの相対的な位置関係を示すとともに、黒潮系水が陸棚中央部の下層 に入り込んでいる可能性を指摘した。徐倩は、2009、2010、2011、2013 年の7月の済州島 南海域での植物プランクトン群集構造を比較し、2009 と 2013 年には 2010, 2011 年より も、珪藻が多く、リン酸塩濃度も高いことについて述べ、湧昇等の影響がある可能性を指摘 した。

吉川は、浅海乱流中の懸濁粒子の振る舞いに関する数値実験の結果について報告した。海 底近くでは、別々の沈降速度を持つ沈降粒子が異なる見かけの拡散係数を示すこと、また表 層乱流が沈降速度に与える影響については、粒子の位置によって相違が見られ、海面におい た粒子では、渦によって沈降速度は変わらないのに対し、海面下においた粒子では、渦によ って沈降速度は減少し、大きな渦ほど粒子をその位置に保持する効果が大きいことが示さ れた。

張は、希土類元素に対して、塩分、懸濁物質、溶存有機物が影響する実験結果について報 告した。

すべての発表ののちに、総合討論を行った。亜表層クロロフィル極大付近での基礎生産や 海底境界層内での物質循環の研究を今後どのように勧めるか。具体的に 2016 年 7 月の長崎 丸での航海計画を含め議論した。また、来年度以降の研究集会や航海計画、関連する PEACE ワークショップや PICES の CREAMS-AP の活動についても議論した。

114

応用力学研究所共同利用研究集会 東シナ海の循環と混合に関する研究

日時: 2016 年 6 月 11 日(土) 13:30~12 日(日)12:00 場所:九州大学応用力学研究所 W601 (6 階)

6月11日

13:30-15:00

東シナ海陸棚域底層における懸濁物の沈降速度の推定

松野健・李根淙・堤英輔(九州大応力研)・小川俊樹(九大総理工)・張勁・Qian LIU・ 神林翔太(富山大理工)

陸棚域における台風起源の波動エネルギーフラックスの診断手法

相木秀則(名大 ISEE)

Impact of mesoscale eddies on spring bloom initiation in the Japan Sea Eligio Maure (名大環境) • 石坂丞二 (名大 ISEE)

15:30-17:00

東シナ海・黒潮海域の基礎生産を支える栄養塩動態

梅澤 有・野崎 龍(長崎大水産・環境)

白鳳丸 KH-15-3 次航海における硝酸塩センサー観測

藤田裕也・石田朗人・近藤能子・武田重信(長崎大水産・環境)

Phytoplankton distributions induced by phosphate availability in the summer East China Sea

徐倩(名大環境)·石坂丞二(名大 ISEE)

6月12日

9:30-10:30

浅海乱流中の懸濁粒子の振る舞いに関する数値実験(その2)

吉川 裕(京大理)

希土類元素を用いた東シナ海起源水解析

張勁(富山大理工)・麻洪良・梁傑・何滙軍(中国海洋大)

 $10\ddot{\cdot}30\!-\!12\ddot{\cdot}00$

総合討論

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

<u>目的</u>

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。

<u>実験方法</u>

大型望遠鏡では、大気の揺らぎによって天体からの光の波面が乱され、解像度が向上しない問題がある。 これに対し、すばる望遠鏡では波面形状を計測し、乱れを可変形鏡で補正する補償光学により、解像度の大 幅な改善に成功している。プラズマにレーザー光を入射した場合、乱流揺動に対応するのが望遠鏡での大気 揺らぎであり、レーザー光の波面を測定することで、乱流揺動の情報が得られると考えられる。この波面計 測による電子密度揺動計測は、平成27年度より本格的にPANTAにて計測を開始した。平成27年度は、市販 のシャックハルトマン波面センサーを使用してプラズマ揺動の計測を試みたが、有意な波面の変化は観測で きなかった。これは密度揺動がごく微小である上、波面センサーを構成するシリコン受光素子の感度特性か ら使用できる近赤外光では、プラズマによる位相変化が小さいことが原因であると考えられた。波面センサ ーには撮像素子の画素数、撮像素子の前に配置したマイクロレンズアレイのアレイ数・焦点距離などのフリ ーパラメータがあり、観測対象物によってそれらが最適化される必要がある。現在のところ、波面の微小変 化計測を目的として生産された波面センサーはなく、使用した市販の波面センサーではハルトマンスポット の解像度が不十分であったと判断した。

<u>開発・実験結果</u>

平成28年度はプラズマ乱流揺動の検出に適した波面センサーを自作し、そして、昨年度に引き続き、PANTA にて乱流揺動による波面変化が自作波面センサーで計測可能か検証を行った。通常の波面センサーは、レン ズアレイが撮像素子上に集光スポット(「ハルトマンスポット」)を形成し、そのスポット位置の変化から波 面形状を評価する。プラズマ計測の場合、電子密度の乱流揺動による波面の変化は微小であり、ハルトマン スポットの位置の変位量は極めて小さい。そこで、揺動周期より露光時間を十分長くとった場合、重心位置 を中心にスポットが微小変動し、それが露光時間内で積算されることによって、撮像されるハルトマンスポ ット幅が広くなると予測される。従って、波面センサーはハルトマンスポットの位置変化ではなく、スポッ ト形状の精密計測ができることを主眼とした。そのため、昨年度の波面センサーと比較し、画素数の大きい CMOS を利用し、レンズアレイのレンズ数が小さいものを使うことで、1スポット当りの画素数が1桁程度多 くなるようにした。製作した波面センサーを図1(a)に示す。また、微小なハルトマンスポット幅から波面 変動を捉える場合、機械振動でスポット位置が変動するとプラズマによるスポット位置変化に対してノイズ になり、データ解析が難しくなる。また、昨年度の光学台は小さく、光学系を改良する際に支障が生じてい たため、平成28年度は光学架台を製作し直し、梁による補強や振動減衰シートの使用などを併用し、光学架 台の対策を講じた。PANTA に設置した光学系を図1(b)(c)に示す。

以上の波面センサー、光学系を用い、PANTA にてスポットがどのように変化するかを調べた。波面変動は微小であるので、複数枚のハルトマンスポット画像を重ね合わせ、計測誤差を除去することとした。昨年度の 計測では、波面センサーのトリガー系が十分に整備できず、プラズマあり、無しのデータ数を十分に取るこ とが出来なかったため、今年度は PANTA のプラズマ生成時のトリガーを取り込めるようにし、統計データ数

116

を増やした。一つのプラズマ条件につき、100 フレームのデータを取得して解析を行った。プラズマがある場 合、ない場合でハルトマンスポットを 100 フレームずつ撮像し、それぞれで積算平均した後にその差分を取 った像がハルトマンスポットの広がりとなる。図 2 (a) に計測結果を示す。上記の計測誤差となる要因が、 ハルトマンスポットをどの程度広げるかを評価するため、プラズマがない場合のデータを時間的に前後二つ に分け、それぞれの積算平均の差分を取ったものを「確かさの下限」として定義し、図 2 (b) に示す。プラ ズマありの場合のハルトマンスポットの広がりは、確かさの下限よりも有意な広がりを持っていることが確 認され、プラズマ中の乱流揺動による微小波面変化を測定出来ていると考えられる。スポット幅の広がりが プラズマ揺動によるものであることを確認するため、PANTA のガス圧を増大させ、揺動が大きくなる条件で の計測を行った。その条件ではスポット幅がより広がることが確認でき、揺動による波面広がりが測定でき ていることを支持する結果が得られた。



図 1(a) 九州大学応用力学研究所の PANTA 装置。(b) PANTA 装置設置した Nd:YAG レーザーとビーム径調 整用ビームエキスパンダを含む伝送光学系。半導体レーザーは光軸調整用。(c) 受光光学系。

(a)プラズマあり P-nP, frm1, Data, 1mslrSh161213





図 2(a) ハルトマンスポットとプラズマ有り/無しでのハルトマンスポット分布。(b) プラズマ有り/無しでの各ハルトマン スポットの y(垂直) 方向の 2 次のモーメント。

<u>今後の予定</u>

今後、計測分解能を高めるためには、振動の更なる抑制、光学系を完全に囲って空気の流れを極力少 なくすることなどの光学架台の改造が挙げられる。また、望遠鏡では光量もサイズも小さな太陽系外惑 星を観察する際に、明るい恒星からの光を消去するため、フォトニック結晶光渦マスクによるゼロ次成 分の除去が提案されている。波面センサーを用いたプラズマ乱流揺動計測にも、同様の光渦マスクを用 いることで、ゼロ次成分を除去し、高次の波面乱れ成分だけを測定することで、撮像素子のビット数を 有効に利用できると期待される。今後、プラズマ実験に適用し、計測精度改善の有無を検証する。

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)

イメージング計測を用いたプラズマ乱流のメゾスケール構造の解析手法の開発

核融合科学研究所 ヘリカル研究部 大舘暁

目的

プラズマの揺動の情報を含んだ可視光の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装置の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。

はじめに

直線型のプラズマ閉じ込め装置 PANTA で観測される乱流揺動の周波数スペクトルには、 多数の小さなピークが見られる。ドリフト波の分散関係から予想される周波数と波数を持 つ波と他の波との相互作用からこのような複雑な構造を持つスペクトルが生み出されると 考えられている[1]。特にドリフト波と、イオン反磁性方向に回転する m=-1 の波との相互作 用は重要である。2016 年度はこの相互作用に的を絞って可視の2次元揺動のダイナミック な挙動の解析をめざした。

実験結果

図1に64 ピンプローブアレイによってイオン飽和電流を測定しているチャンネルの波 数・周波数スペクトルを示す。m=1,f = 2.3kHz のピークがおそらくもっとも不安定なモ ードであるが,m=2,m=3 に見られる多数の小規模なピークは波の非線形結合で生み出され たものと考えられる。参考文献[2]では同様のプラズマに対して、図1(b)に示すような結 合の組み合わせが提案されている。



図1 周波数・波数スペクトルと(A) とモード間の結合のダイアグラム (B)

118

この中から、今回のデータセットの中で 実際にピークが見えている(D) + (C) →

(H)、(A) + (C) → (E)の関係の解析を 行った(図2)。通常のバイスペクトル解析を 行うと時間平均された相関を検出すること ができるが、それでは2次元データの挙動 との比較が難しくなると考え、空間方向の 積分を先に行う以下の解析手法を適用し た。

静電プローブデータの揺動成分x(θ_L,t)に 対して各データ計測時間に対して、 a_i= $\sum x(\theta_i, t) * sin(m_i \times \theta)$, $b_i = \sum x(\theta_i, t) *$ $cos(m_i \times \theta)$ という空間的なフーリエ分 解を行う。 $Z_i = a_i + ib_i = Z(t) * e^{\{i\omega t\}}$ と複素 振幅表示をおこなうことで、あるモードの 振幅と進行方向を同時に表すことができ る。波数・周波数スペクトルで見出されたピ ークの周波数を含む、比較的広い幅の周波 数フィルターをデータに適用しその状態で上 記のデータ処理を行うことで、モードの周波 数、位相が時間的に変化している時に、複数の 波の相互位相がどうなるかを解析することが できる。図 3 に D,C,H の 3 つの波のうち、D, Cの波の強度を掛け合わせたものと、Hの波の 強度、3波の間の位相差の情報を表示した。3 つの波の位相が、そろっている時には H の振幅 が大きいことから、非線形相関によって、Hの ピークが生成性されている可能性を示唆する。 注目すべきは位相差の情報であり、位相差が0 に近いあたりから、位相が急速にずれることが 繰り替えし観測されている。これは非線形結合 が時間的に定常に起きているわけではなくて、



図 3 CxD の振幅、H の振幅、C,D,D の 位相差

結合がある時間帯と、そうでない時間帯を繰り返していることを意味している。

この相関がある時間帯から位相がずれる時にどのような現象が起きるかを2次元イメー ジングデータを使って調べた。図4に t=0.062s から 0.063s にかけての2次元揺動の振る 舞いをしめす。



図4 位相がずれる時間帯での高速度カメラで測定した2次元揺動の振る舞い。

左から右へ時間が進んでいる。各段は m=1,2,3 とモード分解した結果となる。0.0628s 付近ではプラズマのコア部までモード構造が広がる。また、定常的に回転していた各モー ドが回転を止めて、再回転を始めるなどの複雑な現象が生じているが、現象の複雑さから 現象の理解には至っていない。今後、多数観測されている位相スリップ時のイベントを多 数集めて解析を行い、スリップから相関が失われる現象が本質的はどんな物理現象が何で あるかを解明したいと考えている。

[1] T. Yamada, et. al., Phys. Rev. Lett., 105, 225002 (2010).

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

サブテーマ代表者:高知工業高等専門学校ソーシャルデザイン工学科 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] 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。 この手法では、時刻 t における時系列データ x(t) をその時刻以前のいくつかのデータ x(t-1), x(t-2),... とランダムノイズ e(t) を用いて

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{a}_0 + \mathbf{a}_1 \mathbf{x}(t - \mathbf{l}_1) + \mathbf{a}_2 \mathbf{x}(t - \mathbf{l}_2) + \ldots + \mathbf{a}_w \mathbf{x}(t - \mathbf{l}_w) + \varepsilon(t)$$
(1)

と線形モデル化する。ここで、パラメータ a_0, a_1, \ldots, a_w は実際に観測された時系列データと線形モデル によって生成されるデータ間の誤差の二乗平均を最小化し、さらにモデルの最適化基準として情報量基準を 合わ せて用いることにより、いくつかの時間遅れ項 $x(t-I_1), x(t-I_2), \ldots, x(t-I_w)$ から最適な部分 集合を選び出すものとして決められる。この手法は Reduced Auto-Regressive Model (RAR) と呼ばれ ている。RAR モデルは時系列データが持つ周期をその時間遅れ項の中に必ず含むことがわかっている。

図 1 は、今回解析した直線円筒型プラズマ内のドリフト波乱流の軸方向に直交する断面における全 64 チャンネルの測定値の一例である。この全 64 チャンネルの測定値を上述の方法で RAR モデル化すると、得られた時間遅れは図 2 のようになる。ここで、1 の時間遅れは $10[\mu s]$ に対応しており、1~7 程度の時間遅れ項は、測定値に含まれるランダムネスを反映したものと考えてよい。したがって、非自明な時間遅れは下の表にまとめた通りとなり、周波数に直して、0.897[kHz]、0.962[kHz]、2.00[kHz]、3.22[kHz] に対応する周期が特徴的に現れていることが抽出できる。

lag	period [µs]	frequency [kHz]
31	310	3.22
50	500	2.00
104	1040	0.962
111.5	1115	0.897



図 1 直線円筒型プラズマ内のドリフト波乱流の軸方向に直交する断面における全 64 チャンネルの測定 値のうち第一チャンネルの測定結果。



図 2 全 64 チャンネルの測定値を RAR モデル化し,得られた時間遅れのヒストグラム。

3 今後の研究の方向について

現在, RARモデルの時間遅れから得られる「周期」が離散フーリエ解析のパワースペクトル等から得られる「特 徴的な周波数」とどのような関係にあるのかを解析中である。さらに各チャンネル間の関係性やプラズマ乱流の 非局所的相関関係を明らかにするために,多次元時系列解析およびネットワーク可視化等に関する手法も新たに 開発していく予定である。

4 研究成果発表

谷澤俊弘・中村知道、プラズマ・核融合学会誌小特集「核融合プラズマ研究におけるデータマイニングの活用」・ネットワーク可視化を用いた新しい時系列解析法、Vol. 92, 352-356 (2016).

参考文献

 Tomomichi Nakamura and Toshihiro Tanizawa: "Networks with time structure from time series," Physica A, Vol. 391, pp.4704-4710(2012).

医療用 CT における画像再構成手法のプラズマ乱流計測への応用

帝京大学福岡医療技術学部診療放射線学科 荒川弘之

・背景と研究目標

九州大学応用力学研究所における直線磁化プラズマ発生装置 PANTA では,近年コンピュ ータ断層撮影(CT)技術を応用し、多チャンネル光ファイバーを用いたプラズマ乱流揺動計 測の開発が進められている。開発においては、光検出器による線積分されたプラズマの発光 情報からプラズマ乱流揺動の情報を画像再構成手法により再構築する必要がある。一方で、 CT 技術は当初医療分野において開発され、長年の実績により、その画質やノイズの評価の 手法が多く開発されている。しかし、医療分野における CT 画像再構成手法やその評価の膨 大な成果・知識量に対して、プラズマ乱流揺動計測への最適な手法の取り入れができていな いのが現状である。この為、医療分野で現在導入されている、または導入が検討されている 画像再構成手法をプラズマ乱流計測に応用を行うための基礎的な検討を行う。

以下の2つのアプローチにより、研究を行った。

(a) 医療用 X 線 CT および画質評価用のファントムをコンピュータ上に構築し、基礎的な物 理特性と画像のノイズ、ノイズレベル低減の為の画像再構成手法の選択を行なう。

(b) 医療用 X 線 CT で近年研究されている"圧縮センシング"を用いたプラズマ乱流計測への適用について検討を行った。

以下、アプローチ(a)、(b)に分けて成果を報告する。

アプローチ(a)

・方法

本研究に用いる X 線のモンテカルロシミュレーションコード PHITS が X 線 CT のエネルギ ー領域において物理過程を正しく計算できるかどうかの確認を行った。材質が水、空気、ポ リエチレン、アクリル、骨の厚さ 10 c mの板をそれぞれ計算機上に作成した。10~120keV の X 線をそれぞれの板へ入射させる計算を繰り返し行い、減弱係数及び統計的ゆらぎを、既 知のデータと比較した。次に、X 線 CT の線源、検出器、ACR CT ファントムを計算機上にモ デル化し、計算を行った。線源はファンビームとし、管電圧 120kV のエネルギースペクトル を模擬した。検出器数は 1 列, 256ch とした。模擬計算から、サイノグラムを作成し、Shepp-Logan フィルタを用いたフィルタ補正逆投影法 (FBP 法) で、再構成を行った。模擬計算は、 X 線入射数を変えて複数回行った。

結論

減弱係数は低エネルギー部分において、若干の違い(最大 20%程度)がみられたが、すべ ての材質において既知のデータとよく一致した。統計的な分布は、二項分布によく一致し た。低エネルギー部分は画像再構成における寄与が少ないため、PHITS は、X線 CT のエネル ギー領域において、物理過程を正しく計算できると判断した。FBP 法により ACR CT ファン トムの CT 値を求めた結果が、既知のデータとよく一致することを確認した。更に、X線入 射数を増加させることで、再構成されたファントム画像のノイズレベルが低くなることを 確認した。

アプローチ(b)

・検討と結果

医療用 X線 CT で近年活発に研究されている"圧縮センシング"を用いたプラズマ乱流計 測の CT への適用について検討を行った。圧縮センシングは、医療用 CT において、通常数百 の角度からの対象への投影が必要なところ、1/10 以下の投影角度から、対象内部の情報を 高精度に再構成できる手法である。本研究対象となっている、直線磁化プラズマ発生装置で のプラズマ乱流計測においては、高時間分解能(1 µ sec)かつ高精度(5mm 程度)が必要とされ る。このため、医療用 X線 CT のように検出器を動かすことはできず、固定された計測器を 用いる必要がある。また、設置位置の制約から、計測点は少ない形で高精度なプラズマ内部 の再構成を行う必要がある。以上を考慮し、圧縮センシングをプラズマ CT へ適用すること で、既存の手法よりも2倍程度の高精度化の可能性が見込まれることが分かった。

圧縮センシングを適用するにあたって、現状のプラズマ CT の計測体系の改良を検討した。 現状はプラズマからの光を計測器を平行に並べて計測しているが、プラズマ周辺部におけ る集光の効率が悪い。このため、扇状の形に計測器を並べて集光することが、より効率化が 可能であると考えられる。

今後は、圧縮センシングによる再構成プログラムの制作を行い、プラズマの模擬データに より、計測体系(検出器間隔や集光角度)の最適化を進める。

成果報告:

(1) 第72回日本放射線技術学会総会学術大会(平成28年4月17日、パシフィコ横浜会議センター)にて発表を行い、Premium Award を受賞した(約500演題の中から学術的に最も優れた1演題のみが受賞)。(演題番号:10183、題名「Monte Carlo Simulation of X-ray CT and Image Reconstruction by using PHITS」)

マイクロ波計測器から得られる大規模データを用いた乱流プラズマの特性抽出法の開発

核融合科学研究所・ヘリカル研究部 徳沢季彦

1. 目的

乱流プラズマは太陽をはじめとした宇宙プラズマにおいても普遍的に観測されているが、核融合プラズマ 研究においても種々の乱流物理現象の理解は最重要研究課題の一つである。特に非平衡な状態、現象が時間 的に変化しているような状況における乱流の時空間構造を調べることは、この物理現象を理解する上で非常 に重要である。しかしながら、高温プラズマ実験においては、その計測手段・状況がこれまで非常に限られ ていた。そこで我々は、マイクロ波を用いた新しい非接触な計測手法の開発を行い、乱流の高精度な時空間 構造を観測することを目指している。これまでに周波数コムを用いたドップラー反射法を開発し、応用力学 研究所の PANTA 装置や核融合研の大型ヘリカル装置 LHD などに適用し乱流構造に関する大規模なデータ を得られるようになってきた。今回、より空間分解能を高くする計測手法を検討したので、以下に報告する。

2. 周波数掃引型反射計による乱流計測への適用についての概念

マイクロ波を用いた電子密度分布計測法として、周波数掃引型反射計という手法がある。これは、プラズ マへ入射したマイクロ波が対応する反射層でカットオフされて戻ってくるまでの時間を位相変化量として測 定し、反射層の位置を得るというものである。この時、位相変化の直読化のために、入射周波数を線形に掃 引する。これは、周波数掃引速度Δf/Δt が位相変化に比例する関係を利用するためである。歴史的に、この掃引 速度を速くすることで密度分布の再構成の精度を向上させる努力が続けられてきており、マイクロ波技術の進

歩に伴い現在ではΔt =1µs での掃引が可能になっている。 この高速掃引を利用すれば、1µs 毎に同じ周波数のマイクロ波 をプラズマ中に入射してプロ ーブ光として用いることが可 能となる。この測定法の概念を 図1に示す。周波数掃引を(a)の ように繰り返している時に、同 じ周波数(緑点あるいは赤点) が出現した時の、信号をサンプ リング抽出して行けば、周波数 毎の反射層の揺らぎの時間変化、 すなわち時空間構造を求めるこ とが可能となる。



図1:周波数掃引システムによる揺動計測の概念図。それぞれの周 波数成分発振時の信号をサンプリングすることで、周波数毎の位 相変動信号を抽出する。

3. 高速掃引型反射計信号から模擬した乱流揺動 信号を抽出できるかをシミュレーション調査

高速掃引型反射計の信号に計算機上で乱流成 分(図2上に示すような乱流スペクトルを持つノイ ズ)を模擬して加え、これを入射周波数毎による サンプリング処理で再現できるかどうかを調べ た。掃引時間は 1µs とし、これの繰り返し数を変 えて、その分解能を調査した。図2(下)には、繰り 返し 512 回分で求めた揺動信号成分の周波数 スペクトルを示す。図のように元の乱流信号を 再現できていることが分かる。一方、時間分解 能を高めるため、この繰り返し数を減らすと、 時間一周波数の関係から図 3 に示すように、 元の乱流スペクトル波形を再現することは困 難である。今回のように 500kHz 程度までの 乱流信号を求めることを考えると、100-500 us 程度の時間分解能での時空間計測が可能 であると考えられる。

今後、この計測をプラズマ実験で検証することを 計画しているが、この測定には、速いサンプリング レートのデータ収集(Δf/Δt に依存するが> 100MHz以上)が必要であり、またプラズマに よる乱流の時間変化すなわち時空間構造を求 めるためには、大規模データの収集処理が必須 となる。

4. 論文と学会発表

1. T.Tokuzawa, "Turbulence in edge and core transport barriers: new experimental results and modeling", Nuclear Fusion, Vol. 57, No.2, pp.025001 (2017).



図2:高速掃引型反射計信号から乱流スペクトルを 抽出した例。上図が模擬した乱流スペクトル信号(黒 線)で下図が抽出した計測信号から求めた周波数ス ペクトル。周波数掃引繰り返し数:512回の場合



図 3:異なる周波数掃引繰り返し数(上:64回、 下:16回)の場合の信号から抽出した周波数ス ペクトル

また、次の学会にて発表を行った。

 T. Tokuzawa, et al. "Observation of oscillation of poloidal rotation velocity in LHD, 18th International Congress on Plasma Physics (ICPP 2016), Kaohsiung, Taiwan, June 27 – July 1, 2016.
 T. Tokuzawa, et al., "Magnetic island formation in locked-like mode in helical plasmas 26th IAEA Fusion Energy Conference, Kyoto, Japan 17-22 October 2016

3. 徳沢季彦 "マイクロ波計測器から得られる大規模データを用いた乱流プラズマの特性抽出法の開発", RIAM フォーラム 2016, 九州大学筑紫地区共通管理棟 3F 大会議室, 2016 年 6 月 2 日.

プラズマ流れ場構造観測に関する統合的研究

核融合科学研究所 ヘリカル研究部 居田克巳

目的

本研究はプラズマ流れ場構造に関する計測手法の開発が目的である。高温プラズマ中のイオンの 流れ場の速度はイオンの熱速度より小さく、そのマッハ数は1以下である。イオンの速度空間の分 布がシフトしたマックスウエル・ボルツマン分布をしている時には、イオンの流れ場の速度はその 1次のモーメントで定義される。しかしながら、プラズマが小崩壊現象を起こす場合にはイオン分 布関数に歪みが生じる為に、1次のモーメントで定義されたイオンの流れ場の速度を研究するだけ では不十分となる。ここでは、イオン分布関数に歪みが生じたときに、イオン分布関数のマックス ウエル・ボルツマンからのずれを検出する方法を開発する。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プラズマ流れ場構造の理解のため応 用力学研究所の直線装置 PANTA を用いた実験も併せて行う。

プラズマの小崩壊現象

今年度は、核融合科学研究所にあ る大型ヘリカル装置 LHD において、 イオン分布関数を計測する為の高速 荷電交換分光を用いて、小崩壊現象 に伴うマックスウエル・ボルツマン からのずれを観測した。図1はプラ ズマが小崩壊現象を起こした時の異 なるトロイダル角において磁気プロ ーブで計測したポロイダル磁場変 動、電子サイクロトロン放射で計測 した電子温度、その時間変化から求 めたプラズマの変位量、RF プローブ で計測したイオンサイクロトロン放 射強度の時間変化である。

プラズマの小崩壊現象は、トロイ ダル方向に局在化したポロイダル磁 場変動と、プラズマの2cmにもおよ ぶ外側への変位によって特徴つけら れるタング変形がトリガーとなり、 イオンの速度空間の変化により引き 起こされた不安定性によるイオンサ イクロトロン放射強度の急激な上昇 とプラズマの急激な電子の温度低下 として観測される。

イオン分布関数の歪み

イオン分布関数を計測する為に、高 速の荷電交換分光で炭素イオンのト ロイダル方向の速度空間分布を計測 した。図2はタング変形前後のトロ イダル方向のイオンの速度分布関 数、ガウスフィット曲線と測定値、を 使って求めた速度分布関数上のへこ



図1プラズマが小崩壊現象を起こした時の (a)(b)(c)異なる トロイダル角でのポロイダル磁場変動、(d)電子温度、(e) プラズマの変位量、(f) RF プローブで計測したイオンサ イクロトロン放射強度の時間変化

み(dent)とふくらみ(swell)の時間変化と、ヘこみとふくらみの時空間変化である。ここでは、 イオンの速度分布関数の時間変化を詳細に解析する為に、RF プローブで計測したイオンサイクロ トロン放射強度の立ち上がりを参照時間として「条件付き平均法」を適用した。タング変形前のイ オンの速度空間分布はマックスウエル・ボルツマン分布をしているが、タング変形後にマックスウ エル・ボルツマン分布からのずれが観測された。このずれは、等価電流と同じ方向(V>0)に移動し ているイオン密度の減少と、逆方向(V<0)に移動しているイオン密度の増加を示している。ヘこみ とふくらみは規格化平均小半径 0.7 付近で発生して、その後プラズマの周辺部(規格化平均小半径 1.0)に伝播し、3-4ms後には消滅する。

補足粒子が等価電流と同じ方向に運動するときには内側(磁気軸側)に少しシフトするのに対し、 等価電流と逆方向に運動するときには外側に少しシフトする。従って、観測されたへこみ(dent) とふくらみ(swell)は熱速度から熱速度の2倍程度のエピサーマルの補足粒子の勾配の急激な減少 が原因と考えられる。このへこみとふくらみはイオン・イオン衝突時間のタイムスケールでマック スウエル・ボルツマン分布へと緩和する為にタング変形にトリガーされたプラズマ小崩壊の後に過 渡的に観測される。



図2(a)タング変形前後のトロイダル方向のイオンの速度分布関数、(b)ガウスフィット曲線と測定 値、速度分布関数上の(c)へこみ(dent)とふくらみ(swell)の時間変化、(d)へこみと(e)ふく らみの時空間変化

成果の評価

流れ場計測に重要なイオン分布関数の計測において、プラズマ小崩壊現象に伴ってイオン分布関数に歪みが現れる事が明らかにした点で、大きな成果と考えられる。これらの成果をまとめた論文が Scientific Reports 6 (2016) 36217 に掲載された*。論文発表に合わせて、核融合科学研究所で共同プレスリリースを行った**。本成果は国内の新聞のみならず、海外のインターネットメディアにも取り上げられるなど、国際的にも高い評価を受けた。本研究で使われた「条件付き平均法」は LHD

において九州大学と共同で開発されたものであるが、トロイダル磁場閉じ込め装置にその手法が応 用され、イオン分布関数に歪みの発見に結びついたのは意義深い。

*参考論文

http://www.nature.com/articles/srep36217

**プレスリリース

https://www.kyushu-u.ac.jp/ja/researches/view/59

研究組織

居田克巳	核融合科学研究所	(59 歳、	男性)
小林達也	核融合科学研究所	(30歳、	男性)
稻垣滋	九州大学応用力学研究所	(48 歳、	. 男性)

デジタル相関 ECE 計測の開発とプラズマ実験への適用

核融合科学研究所 土屋 隼人

1. 要旨

開発中のデジタル相関 ECE 計測を LHD 実験に応用するべく、高速デジタイザーのシー ケンシャルモードの開発とデジタル相関 ECE 計測の特性を検証した。開発中の同計測はデータ量 が大きく、また LHD で使われているデジタイザーと異なるため、データ収集系の独自開発が必要 であった。また、同計測手法は実験の後に測定パラメータを変更できるという利点があるが、パラ メータ設定の自由度が高いために、解析結果の見え方が大きく変わることを示唆した。

2. 序論

あらゆる実験研究分野において、高空間分解能かつ高時間分解能で現象を観測することで、 現象を正しく理解し、新たな発見をもたらす。プラズマ研究においても同様で、乱流のようなスケ ールが小さく現象の時間スケールも小さい現象を正確に観測する計測器が望まれている。LHDのよ うな大型のプラズマ実験装置では、磁場強度と電子温度領域の関係から、電子サイクロトロン放射 (ECE)計測が利用できる。そこで、ラジオメーターを用いた ECE 計測を発展させたデジタル コリレーション ECE(DCECE)を提案している[1]。昨年度までに、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試験的に行ってきており、今年度は、 高速デジタイザーを LHD に導入した。LHD 実験は3分周期のプラズマ放電が行われており、本 計測の稼働率を上げるために、シーケンシャルモードを備えた自動収集システムを開発し運用を開 始することができた。

3.デジタルコリレーションECE原理

近代ではムーアの法則(半導体 の集積密度は 1.5~2 年で倍増する)と して知られているように保存できるデ ータ量が飛躍的に伸びてきましたが、デ ータのサンプリング速度も伸びてきま した。ADC (Analog Digital Converter) を有するデータ収集装置の高性能化に より、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。 つまり、LHD などの大型磁場閉じ込め 装置のプラズマから放射される ECE の



図1. フィルターバンク型とデジタル相関 ECE の 分解能の比較

周波数帯は 50GHz 以上であるが、ヘテロダイン検波を行った中間周波数帯(IF: intermidiate frequency)は通常ギガヘルツ帯であるので、直接 IF をデジタイジングし、IF 波形を保存することが可能になった。これにより、離散化された IF 波形をフーリエ変換することで、IF の分光スペクトルを得ることができる(デジタル分光)。分光スペクトルの時間変化を高速で追うことで、スペクトルパワーに比例する電子温度の揺動を測定することができる。しかしこのままでは離散化ノイズなどが多いので、相関 ECE の原理を適応し、有意なプラズマ揺動の観測につなげる。

この計測の最大の利点は従来のアナログバンドパスフィルターをつかったフィルターバンク型 ラジオメーターよりトーラス小半径方向の空間分解能が高いことであり、かつ分解能は可変である ことである。図1にフィルターバンク型と本計測の分解能の比較を示す。フィルターバンク型では 分解能が20mmで固定であるが、本計測手法では一例として3mmを示した。

4. ECE 実データ取得とパラメータ比較

大型ヘリカル装置(LHD)において、高速デジタイザー(LabMaster 10-36Zi, teledyne lecroy 社製,データ長 512Mbyte)を用い ECE の IF 波形を取得した。図2に本手法で得 られた電子揺動分布を示す。図のカラー軸は隣接する地点とのコヒーレンスを示し、縦軸の IF 周 波数はプラズマ中のトーラス小半径方向に対応する。1-4GHz を12分割(Nch=12)から48分割 した場合において図の丸印の部分に局所的な有意な揺動が発見された。しかし、解像度を上げる とバックグラウンドレベルと同程度になり検出できなくなる。このようにパラメータの選択が重 要であり、揺動レベルと現象のスケールに応じて適切な解像度やサンプリング周波数を設定する 必要がある。



図2. デジタル相関 ECE の分解能パラメータの違いによるコヒーレンス分

参考文献

*1. Hayato TSUCHIYA, Sigeru INAGAKI^{1,2)}, Tokihiko TOKUZAWA, Naoki TAMURA and Yoshio NAGAYAMA, Plasma and Fusion Research Volume 9, 3402021 (2014)

発表論文

1. H. Tsuchiya, S. Inagaki, T. Tokuzawa, N. Tamura, Y. Nagayama

"Validation of the Digital Correlation ECE measurement technique using low frequency fluctuation in LHD"

Plasma and Fusion Research 11, 2402072 (2016).

布の比較

振幅変調反応性高周波放電中のナノ粒子量のエンベロープ解析

古閑一憲、白谷正治、稲垣滋

半導体集積回路製造においてトランジスタを作製する前工程の 70%以上を占めるまでに 成長したプラズマプロセスは今、「3次元スケーリング」に対応する新展開が求められてい る。中でもプラズマプロセスにおけるゆらぎの抑制は、作製デバイスのプロセス寸法精度を 決定する最重要課題の一つである。筆者らは、プロセスプラズマ中ナノ粒子をナノ界面のモ デルとして用い、プラズマとナノ界面の相互作用ゆらぎについて研究している。現在までに 以下の結果を得ている。

- 1) 高周波放電 CVD プラズマ中で形成されるナノ粒子に関して、放電電圧の振幅変調がサ イズ・サイズ分散の減少をもたらす [1]。
- 2) 結果 1)において、ナノ粒子とラジカルのカップリングが重要な役割を果たしている[2]。
 3) 振幅変調放電におけるナノ粒子量のゆらぎにプラズマ乱流解析を適用し、ラジカルと ナノ粒子の非線形結合を示唆する結果を得た。
- 4) プラズマ乱流解析で用いられているエンベロープ解析を適用してプラズマとナノ粒子 の相互作用ゆらぎの抽出に成功した。

ここでは、エンベロープ解析を用いてプラズマとナノ粒子の相互作用ゆらぎの時空間構造 を調べた結果を報告する。

実験には、図1に示す容量結合型プラズマ CVD 装置を用いた[1]。反応容器中心に直径 60mm(r = -30 ~ +30 mm)の2 枚の電極を 20mm(z = 0 ~ 20mm)の間隔で設置した。Ar と DM-DMOS(Si(CH₃)₂(OCH₃)₂)を、それぞれガス流量 40sccm、2sccm で容器内に導入し、圧力を 166.3Pa とした。周波数 60MHz、電圧 120V の高周波電圧を電極間に印加し、プラズマを生 成した。このとき、放電電圧に変調周波数 100Hz、変調度 30%の正弦波で振幅変調を加え、 プラズマ密度に意図的に摂動を与えることにより、プラズマ密度の揺動がナノ粒子成長に 与える影響について調べた。気相中ナノ粒子量の時空間変化は 2 次元レーザー散乱法で計 測した。シート状 YAG レーザー光(厚さ 16mm、幅 1mm、入射パワー2.0W、波長 532nm)を、 接地電極と放電電極間(電極間距離 20mm)に平行に入射し、ナノ粒子からの 90 度レーリー 散乱光を、干渉フィルタを装着した高速度カメラ(1000fps)で撮影した[3,4]。

レーザー散乱光(LLS)強度にエンベロープ解 析を適用して、ナノ粒子とプラズマの相互作用 ゆらぎを抽出した。LLS 強度に 94 -106Hz でバ ンドパスフィルタをかけることで、LLS 強度ゆ らぎの 100Hz 成分を抜き出し、100Hz 振幅のエ ンベロープを得た。100Hz エンロープは、プラ ズマポテンシャル振動によるナノ粒子密度揺動 に対応するものと考えられ、100Hz エンベロー



図 1. 実験装置図。

プの振動成分は、プラズマポテンシャルとナノ 粒子の相互作用ゆらぎを示唆している[5,6]。

図 2(a)、(b)、(c)にそれぞれ放電開始 3、3.25、 5 秒後におけるプラズマポテンシャルとナノ 粒子の相互作用ゆらぎの電極間全体の空間分 布を示す。図 2(a)では、電極中心(|r| ≦ 5 mm) 付近の放電電極近傍(z=3~6mm)において、強 い相互作用ゆらぎが発生している。同時に電極 の周縁部(|r|~25 mm)において電極間で強いゆ らぎが発生している。図2(b)では、電極中心付 近に発生している強い相互作用ゆらぎが図 2(a)より電極上部へ少し形を変えながら伝搬し ている。また、図 2(a)で|r|~25mm 付近でほと んど左右均一な強さであった相互作用ゆらぎ が、r = 25 mm 付近のみで強い相互作用ゆらぎ となっている。これは、r ≥ 25 mm で発生し たゆらぎが r=25 mm で垂直に発生しているゆ らぎに衝突しているためである。図 2(c)では、 図 2(a)、(b)と比較して空間全体で均一に相互作 用ゆらぎが存在している。この時間帯では、相 互作用ゆらぎの伝搬はほとんど見られず、局 所的に相互作用ゆらぎが発生している。これ らの結果は、筆者らがこれまでに明らかにし た電極間の r = 0mm で発生していた相互作用



図 2. プラズマポテンシャルとナノ粒子の 相互作用ゆらぎの空間構造。それぞれ放電 開始後, (a) 3.00s, (b) 3.25s, (c) 5.00s。

ゆらぎの発生・伝搬の結果と一致している。今後は、電極間全体における相互作用ゆらぎの 発生・伝搬の時空間構造の解明へと繋げたい。応用の観点からは、電極周辺部だけで無く株 電極中央部近傍にも強い揺らぎが存在する点がプロセスの均一性との関連で興味深い。 参考文献

[1] K. Kamataki, et al., J. Instrum. 7 (2012) C04017.

[2] M. Shiratani, et al., Jpn. J. Appl. Phys. 53 (2014) 010201.

[3] M. Shiratani, et al., Faraday Discussions., 137 (2008) 127.

[4] S. Nunomura, et al., J. Appl. Phys., 99 (2006) 083202.

[5] T. Yamada, et al., Nature Phys. 4 (2008) 721.

[6] T. Kobayashi, et al., Nucl. Fusion 55 (2015) 063009.

学会発表:国際会議4件、国内会議3件

極限プラズマ科学研究会

応用力学研究所 稲垣 滋

本研究は「特定研究2:極限プラズマ科学の新研究手法の開発」における個別課題の成果の統合を 議論する。

目的と背景

現在、極限プラズマは新機能性物質創生、半導体プロセス、医療応用、核融合等、様々な分野で 発展しており、それらを包括する学術基盤の形成は近未来の技術革新にとって非常に重要である。 極限プラズマ科学はプラズマの非平衡性、極限的な性質の理解を通し、様々な産業に応用する為の 基盤を与える。本研究では、研究集会を開催し、特定研究2のサブテーマリーダーが一堂に会して、 それぞれの領域で発展してきたプラズマ科学の中から共通な機構や課題を抽出するための議論を 行う場を提供する事を目的とする。プラズマ科学の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、極限プラズマの研究手法そのものに新展がもたらされることが 期待できる。本研究で取り組む課題はプラズマ乱流に限らず、医療やナノ粒子生成等多くの先端科 学における共通の課題であり、応用力学研究所の共同研究として遂行し先導する事が必要である。

研究集会の開催

2017 年 2 月 23-24 日に応用力学研究所 2F 会議室において研究集会を開催した。研究会のプログラムを添付する。

予算の執行

予算は研究集会参加の旅費に執行した。

研究集会のまとめ

基礎プラズマにおける乱流計測データの同時多点計測技術の進展、トロイダルプラズマにおける乱 流輸送解析法の開発、プラズマ乱流計測で開発した手法の医療用 CT で開発された圧縮センシング 技術のプラズマ乱流計測への適用、プロセスプラズマに時空間における不均一性の高精度計測に加 え、ソーシャルネットワーク科学に用いられるビックデータ解析手法に関してその成果を発表し情 報交換及び討論を行った。以下に主な成果を記す。 トロイダルプラズマにおける長年の問題であったプラズマの局所的変形からフルート状の巨視的 振動へと緩和するプロセスが初めて観測された。圧力の高いプラズマではプラズマの一部が局所的 に変形し、それがプラズマ全体へと広がって行きやがて中立安定となる事が理論的に予測されてい たが、これまでプラズマの局所的変形を観測した事はなかった。LHD ではイオンサイクロトロン輻 射と磁気プローブ信号との関連に着目する事で巨視的振動と局所変形の弁別に成功した。また、こ れらの信号をトリガーとする事でイオン速度分布関数の歪みの時間発展を観測する事に成功した。 PANTA における乱流構造の理解が進展し、乱流の相図の再検討を行った。これまで Streamer 相、孤 立波相、弱非線形相と分かれていた領域の境界を非線形結合度により定量的に決定する事が提案さ

れた。今回の相図はプラズマの運転条件をパラメータとした2次元図であり、乱流の物理量への変換、多次元化について議論がなされた。

レーザーによる精密計測に関して多くの議論がなされた。トリプルグレーティング分光器を用いて トムソン散乱により PANTA プラズマの温度、密度の径方向勾配が得られた。空間分解能 1mm 程度で の温度、密度の評価が可能になり、半径 3cm 程度の位置で密度勾配が急激に現れる事、プラズマの 条件によってその勾配の位置がシフトする事が明らかになった。また、天文分野で用いられている 波面センサーをプラズマに適用し、密度揺動を検出する試みが行われた。レーザーの波長が最適で はないもののプラズマ中の密度揺らぎによる波面の揺らぎ、正確にはハルトマンスポットの変動、 の検出に成功した。今後の展開として 2 波長化やレーザー光渦等の導入による感度向上が議論され た。

本特定研究で発展してきた研究手法は PANTA のみならず、LHD のような大型高温プラズマにも適用 が開始されている。周波数コムを用いた超精密計測がルーチン的に稼働を開始した。更にディジタ ル相関 ECE も稼働し始めており大量にデータを取得する事が一つの研究手法として定着しつつあ る。

ソーシャルネットワーク科学の手法が紹介された。ネットワーク科学ではある地点あるいはある時 刻の変数の値を得るのに有限な周辺、及び有限な過去の変数の値を用いる、というものであり、方 程式から予測するというアプローチとは大きく異なっている。ソーシャルネットワークでは情報の 伝搬の様相が、情報が真か偽かで変わる事が指摘されている。例えばデマが広がるにはある条件が あり、デマの流行は一種の相転移状態と考えられる事が紹介され、プラズマ乱流との異同が議論さ れた。ネットワーク科学、数理情報学、イメージングは非常に親和性が高い。これらの協同により これまで見えなかった現象が観測できる事が期待される。新たなプラズマ研究法としての期待が高 まった。

135

直線ヘリコンプラズマにおける径方向構造のトムソン散乱計測 Thomson scattering measurements of radial structures in a linear helicon plasma

富田健太郎(九大総理工)、内野喜一郎(九大総理工)、稲垣滋(九大応力研)

要旨

直線ヘリコンプラズマ装置 PANTA に対してレーザートムソン散乱計測を行い、プラズ マの電子密度・温度の径方向分布を明らかにした。プラズマ生成時の磁場強度およびガス圧 (Ar)はそれぞれ 600,900,1500Gauss,1,3,5 mTorr とした。計測用レーザーには Nd:YAG レーザー第2高調波(波長532 nm)を、検出器には信号増強型 CCD カメラを用いた。微 弱なトムソン散乱信号を検出するため、レーザー500 ショット分の信号積算を行うと同時 に、迷光除去のために差分散型三回折格子分光器を用いた。計測はプラズマ中心(r=0)お よび r=20,30,40,50 mm の5点で行った。磁場やガス圧にかかわらず、r=30mm 付近で 急激な電子密度勾配が確認された。プラズマ中心での電子密度・電子温度範囲は、それぞれ (1.3·2.6)×10¹⁹m⁻³,1.2·2.4 eV であった。また、プラズマ周辺部(r=40mm)における電子密 度・電子温度範囲はそれぞれ(2·3)×10¹⁸m⁻³,0.4·1.5 eV であった。今後の時間分解計測のた めの予備実験として、レーザー1 ショットでの計測を行った。現行のシステムであっても 10¹⁹m⁻³以上の電子密度領域であれば、単発でのトムソン散乱計測が可能であることを確認 した。

序論

プラズマの応用研究は、核融合を目指した磁場閉じ込めや半導体プロセス、高出力光源や 農業・バイオ応用など、広範に渡っている。ヘリコンプラズマは比較的容易に生成する事が 可能であり、磁化プラズマ乱流やプロセスプラズマの基礎過程の研究に利用されてきた。応 用力学研究所の直線プラズマ乱流装置 PANTA においてヘリコンプラズマ中に乱流を励起 し、乱流が輸送に与える影響を観察している。PANTA ではプラズマの計測にはプローブ法 や分光法が用いられてきたが、乱流駆動輸送のより定量的な評価を行うためにはプラズマ の温度と密度の径方向分布を高精度に計測し、勾配と流束を評価する事が必須である。トム ソン散乱計測はプラズマに与える擾乱が小さく、かつ高精度に温度と密度が計測可能であ る。本研究では PANTA プラズマの電子密度・電子温度の径方向構造を高精度に観測する事 を目指し、トムソン散乱計測の適用を試みた。

すでに行われているプローブ計測の結果から、予想される電子密度・電子温度の範囲はそれぞれ10¹⁹m⁻³、数 eV と予想された。このようなプラズマに対しては、0.1 J クラスの小規 模な可視光レーザーをプローブとした、比較的簡易なシステムでトムソン散乱計測が可能
であると予想された。前年度は PANTA プラズマに初めて可視プローブを用いたトムソン 散乱計測システムを構築し、プラズマ中心位置における電子密度・電子温度計測の実証を行 った(文献、まだ投稿中)。本年度はこの結果をさらに進展させ、プラズマの径方向計測、 並びに時間分解計測に向けた、1ショット計測の実証を行った。

実験方法(トムソン散乱)

トムソン散乱計測は、核融合を目的とした磁場閉じ込めプラズマや、低圧半導体プロセス プラズマ、さらには高気圧中で生成される大気圧非平衡プラズマなど、様々な電子密度・電 子温度領域にあるプラズマに対して、すでに適用されている。PANTA プラズマで予想され る電子密度・電子温度からのトムソン散乱信号は微弱であることが予想される。また、数 eV 程度の電子温度であるため、可視波長(波長 532 nm を想定)プローブの場合、トムソン散 乱スペクトル広がりは、レーザー波長を中心に、2,3 nm 程度であると予想される。このと き、計測レーザーの一部がチャンバー窓表面などで乱反射し、迷光として分光器内に侵入し て微弱なトムソン散乱スペクトルを覆い隠す恐れがある。まず、微弱な散乱信号に対しては、 多くのレーザーショットからの散乱信号を、検出器側で積算計測することで対処した。また、 迷光の除去に関しては、高い迷光除去性能が確認されている差分散型三回折格子分光器(以 下トリプル分光器と呼ぶ)を構築・使用することで対処した。

実験装置

トムソン散乱計測に向けて、次のような実験装置を構築した。全体の装置配置を図1に示 す。



図 1. PANTA 用可視トムソン散乱計測システムの配置図(図中スケールはすべて mm)

計測に必要な主な装置は、レーザー(Qスイッチ Nd:YAG レーザー)、分光器である。分 光器は市販の光学実験用台の上に、各種光学部品を組み込んで自作した。分光器内の概要を 図2に示す。図2には併せて、散乱光の受光光学系の概略を示した。1st レンズはできる限 り大きな受光立体角が望ましいが、チャンバー外に配置せざるを得ないことや、保有するレ ンズ種類の制限から、焦点距離 400 mm で、有効直径 46 mm のアクロマートレンズを使用 した。このレンズで一度平行光にした散乱光の一部を、f = 220 mm のレンズで入口スリッ トに集光し、分光器内に導いた。分光器内の回折格子は、トムソン散乱で使用する偏向方向 に高い回折効率を持つ、サインカーブ形状の反射型回折格子(刻線本数 2400 本/mm)を用 いた。スリット幅、焦点距離、回折格子条件などで決まる波長分解能は、0.2 nm程度であっ た。検出器には ICCD カメラ(米国 Princeton Instruments 社製 PIMAX)を用いた。使 用したプローブレーザーは移動が容易な小型のレーザー(米国 Continuums 社製 Surelite) を用いた。今回使用した第2高調波(波長532 nm)の出力は130 mJ程度であり、レーザー の繰り返し周波数は10 Hzであった。



図 2. トムソン散乱用トリプル分光器の概要図(図中スケールは mm)

図3に計測システム導入後の装置周辺の写真を示す。計測時、分光器やレーザー光軸は、 背景光を除去するために完全に遮光した。図4には自作したトリプル分光器の写真を示す。 分光器および受光系の光軸調整は、PANTA チャンバー側面の反対側の窓から、波長532 nm の半導体レーザーを入射し、行った。



図 3. トムソン散乱システム導入後の PANTA 装置周辺写真。プローブレーザーのレーザ ーヘッドは写真下。レーザーは暗箱を通り、PANTA 装置した側に設置されたミラーおよ び集光レンズを通り、チャンバー中心軸上で集光され、その後チャンバー上側のビームダ ンパーに導かれる。トムソン散乱光の一部は、PANTA チャンバー横の窓からレンズで受 光され、分光器内に導かれた。



図 4. 自作したトリプル分光器の内部写真。

実験結果と考察

レーリー散乱およびラマン散乱より、構築したシステムが正常に動作したことを確認し たのち、トムソン散乱計測を行った。計測内容は以下のとおりである。

- ・ プラズマ生成時のガス圧は Ar 1,3,5 mTorr, 磁場強度 600,900,1500 Gauss とした。
- ・ レーザーの積算回数は、各プラズマ条件で1000 shot × 3セットとした。
- ・ 計測中心の±3 mm幅の散乱信号を、空間積分して解析した。
- ・ プラズマとレーザーの時間同期は取らず、10 Hzで計測した。
- プラズマの Duty 比が1:1ということで、得られたトムソン散乱信号強度を2倍にして、電子密度を求めた。



得られたトムソン散乱スペクトルの例を、図5に示す。

図 5. トムソン散乱スペクトル例

中心(プローブレーザー)波長±0.3 nm程度は、迷光除去のためにトリプル分光器内に設置 された逆スリットによりカットされている。一方で今回の計測は非協同散乱領域であり、ス ペクトル形状は電子の速度分布を反映している。そこで、速度分布がマクスウェル分布だと 仮定してフィッティングを行い、電子密度・電子温度を決定した。図5のスペクトルにフィ ッティング曲線を付与した結果を図6に示す。



図 6. トムソン散乱スペクトルとそのフィッティング曲線

散乱光強度の絶対値較正は窒素ガスからのレーリー散乱信号を用いて行った。図7,8には、 それぞれ電子密度・温度の径方向分布を示す。図9には、得られた密度・温度から、電子に よる圧力分布を示す。プラズマ生成条件によって密度・温度に差異があるものの、r=30 mm 近辺における密度の急激な減少と、それに伴う電子圧力の低下は、すべてのプラズマ生成条 件に共通していることが分かる。今回の解析では空間分解能を 6mm(計測中心から±3mm) と落としているため、r=30 mm近辺の密度勾配に、プラズマ生成条件による差異は見られな いが、より空間分解能を向上させたデータ解析では、差が表れるかもしれない。それを示唆 するデータを図10に示す。例えば r=20mm の計測では、r=15-25mm のデータを一度に計 測している。その結果、r=30mm の生データでは、密度の急激な勾配が観測されている。図 10 で示したのは 1mTorr, 1500Gauss と 5mTorr, 600Gauss の2条件だが、前者のほうがよ り密度勾配が強く、さらに密度の減少位置が、プラズマ中心に近いように思われる。空間分 解能の向上は S/N の低下とトレードオフであるので、現実には 0.5mm 以上の空間分解は困 難である。今後、ラマン散乱の空間分布との比較により、0.5mm 程度の空間分解での解析 を進める予定である。



図 7. 電子密度の径方向分布



図8. 電子温度の径方向分布



図 10. トムソン散乱計測結果の解析前データ

最後に、1ショット計測の結果を図11に示す。



図 11. レーザー1 ショットでのトムソン散乱計測結果。

図 11 (a)は1ショットでの ICCD カメラデータである。(b)はその一部を拡大したものだが、 光子計数レベルの微弱光観測であることが分かる。それでも空間積算すると、(c)に示すよう に、明確なスペクトルが得られる。時間同期をとっていないので、2回に1回は、(d)のよう に背景ノイズ(主に、遮光の不十分さによるノイズであり、読み取りノイズはさらにずっと 下の信号強度である)のみの計測となる。この背景ノイズとトムソン散乱計測の結果は、明 確にことなることが分かる。(e)、(f)は比較・参考のために掲載した、同条件における 500 シ ョット積算の場合のデータである。

まとめと今後の展望

本共同研究の成果を以下に示す。

- ・ PANTA 装置における高精度な電子密度・電子温度の計測手法として、トムソン散乱 計測を実施した。
- レーリー散乱やラマン散乱計測を通じ、システム全体の較正が容易に行える環境を整

備した。これにより、高い信頼性のもとでトムソン散乱計測を実施可能とした。

- ガス圧力や印加磁場強度を変化させ、異なるプラズマ生成条件でトムソン散乱計測を 行った。その結果、圧力や磁場強度により明確に異なるトムソン散乱スペクトルが観 測された。
- ・ プラズマ中心に加え、計5か所の半径方向分布計測を行い、密度・温度の径方向分布 を得た。特に密度は、r=30mm 近辺で高い密度勾配があることを確認した。
- 時間分解計測に向けて、レーザー1ショット計測でも明確なトムソン散乱信号が鰓得ることを確認した。

今後の課題は、レーザー・カメラとプラズマに印加する高周波電圧の時間同期制御を行い、 各電圧位相における電子密度・電子温度の空間分布を明らかにすることである。現在、その ための時間同期システムの構築を行っているところである。1ショットであっても、読み出 しノイズに十分に打ち勝てる、明確なトムソン散乱信号が、0.1 J クラスの小型レーザーで 獲得できることが分かった。検出下限向上には、受光立体角のさらなる向上や、レーザーエ ネルギーの増強で対応可能であり、10¹⁸m⁻³までの1ショット計測が、システムの改善で視 野に入る。径方向の密度分布はさらに分解能を上げた解析が必要であり、それも進めていく。

論文および学会発表

(投稿中) Kentaro TOMITA, Yuta SATO, Nima BOLOUKI, Tatsuro SHIRAISHI, Kiichiro UCHINO, Yudai MIWA, Tatsuya KOBAYASHI and Shigeru INAGAKI, Measurements of Electron Density and Electron Temperature Using Laser Thomson Scattering in PANTA, Plasma and Fusion Research: Regular Article

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

1. 目的

プラズマ乱流中のドリフト波(ミクロスケール構造)が非線形結合することで発生するストリーマーや ゾーナルフロー(メゾスケール構造)は径方向輸送に大きな影響を与えるため、その発生機構が近年トロイ ダルプラズマだけでなく直線プラズマなどでも広く研究されている。直線プラズマは低温で近接性に優れ るため、乱流やメゾスケール構造の基礎的解析を行うには有利である。九州大学応用力学研究所の直線プラ ズマ実験装置 LMD-U では、メゾスケール構造の一種であるストリーマーと、その構造形成に重要な役割を 果たす媒介波が世界で初めて発見された。計測は周方向に 64 チャンネルの電極が等間隔に配置されたプ ローブアレーと径方向駆動プローブによって行われ、相関解析により直線プラズマの 2 次元円断面内にお いて詳細な構造が明らかとなった。これにより、ストリーマー構造は周方向に自己収束し、径方向に伸びた 構造を持つことが分かり、媒介波は径方向に節を持つ構造であることが分かった。ところがストリーマー構 造・媒介波・ストリーマーを形作る搬送波の軸方向構造と三者の関係については詳しい解析は行われていな かった。そこで本研究では軸方向に並んだプローブを用い、相関解析をすることでストリーマー構造・媒介 波・搬送波の軸方向構造について解析を行った。解析は周方向計測の強みを活かし、モード分解した状態で も行われた。

2. 実験方法

直線プラズマ実験装置 LMD-U を用いてストリーマー実験を行い、多数の静電プローブでイオン飽和電流(電子密度揺動)を計測することで、ストリーマー構造とその発生に重要な役割を果たす媒介波、またストリーマーを形作る搬送波(ドリフト波)についての 3 次元的空間構造を明らかにした。LMD-U は軸方向の長さが z = 3740 mm、内径 r = 450 mm 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することで真空容器内部に直径が約 100 mm の直線プラズマが発生する。軸方向に 0.09 T の磁場を発生させ、内部に封入したアルゴンの圧力を 1.5 mTorr に調整することで、ドリフト波乱流が非線形結合を通してストリーマー構造を形成する。このとき中心部の密度は 10¹⁹ m⁻³ 程度、電子温度は 3±0.5 eV のおおよそ平坦な分布である。

軸方向 z = 1885 mm 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。このプローブは精度 よく周方向に電極が等間隔に設置されているため、半径 r = 40 mm の位置での詳細で精度の良い乱流の 2 次元フーリエスペクトルを観測し、プラズマ内に発生する揺動の周方向モード数を特定することができる。 また、軸方向 z = 1625 mm と1375 mm の位置には径方向駆動プローブがそれぞれ設置されており、今回は 軸空間構造を解析するためにこれらのプローブを r = 40 mm の位置に固定した。ストリーマーの搬送波と なるドリフト波や、構造形成に関わる媒介波は個々がある周方向モード数と周波数を持つ単一の揺動であ り、これらの構造解析には相互相関解析を用いた。2 つの揺動のクロススペクトルの位相情報はこれらの 位相差を表すので、ある参照波を基準として用いれば揺動の位相構造が特定できる。ストリーマー自体は 搬送波が周方向に自己収束した構造体であり、その包絡線は媒介波と位相関係を保持する。つまり搬送波 が形作る包絡線構造は媒介波と同じ周方向モード数と周波数を持つことになる。そのため、ストリーマーの 位相構造を特定するためには、媒介波を参照波として、媒介波と 2 つの搬送波のバイスペクトル解析を行えば よい。この場合、バイフェーズが搬送波の包絡線(ストリーマー構造) と媒介波の間の位相差を表す。

また、周方向プローブを用いている点を活かすことで、搬送波(ドリフト波)を周方向モード数に分解して観測し、より詳しい情報を得ることができる。z = 1625 mm の位置で周方向 64 チャンネルプローブによ

って計測した時系列データを周方向モード数で分解すれば、z = 1625 mm, 1375 mm の位置での測定がシ ングルプローブ計測であったとしても、各揺動の位相差は周方向モード数ごとに分解されたものが求まるこ とになる。

3. 実験結果

LMD-U にストリーマーが発生している状態(磁場 0.09 T、圧力 1.5 mTor)でz = 1885 mm, r = 40 mmの周方向 64 チャンネルプローブと、z = 1625/1375 mm, r = 40 mm,周方向角度 0 の合計 3 つのプローブを用い、ストリーマーの包絡線構造、媒介波、搬送波の軸方向位相構造を観測した。媒介波は周方向モード数 $m_1 = 1, f_1 = -1.2$ kHz で、径方向 r = 30 mm に節構造を持つ波であった。ストリーマーの包絡線の位相構造を求めるために、周方向 64 チャンネルプローブで媒介波を測定して参照波とし、z = 1885/1625/1375 mm, r = 40 mm,周方向角度 0 の位置で搬送波を測定した。結果として、媒介波とストリーマーの包絡線構造はともに位相差が軸方向にほぼ 0 で一定という結果になり、軸方向モード数 n がともに n = 0 であることが示された。

一方、搬送波にドリフト波の中から代表として振幅が強く媒介波との結合が強い $m_2 = 2, f_2 = 7.8$ kHz の波 と $m_3 = 3, f_3 = 6.6$ kHz の波を選んだ。媒介波と合わせた 3 つの波は、非線形結合のための 3 波結合条件 $m_1 + m_2 = m_3, f_1 + f_2 = f_3$ を満たす。この 2 つの揺動についても相互相関解析により軸方向構造を求めると、結果は軸 方向モード数がともに n = -1 と求まった。ここで負のモード数は、装置のエンド側からソース側へ向かう伝 播方向を示す。これらの結果は、媒介波と搬送波が軸方向モード数についての 3 波結合条件 (n:0-1=-1) を満たすことからも、妥当と言える。また、周方向モード数に分解して相関解析を行い、モード数ごとに n を評価すると、揺動レベルが高く媒介波と強く結合している周方向モード数・周波数領域では広く n = -1 であるこ とが分かった(図1)

以上のことから、ストリーマーの包絡線構造と媒介波は軸方向モード数 *n*=0 を持つのに対し、搬送 波は広い周方向モード数・周波数領域で軸方向モード数 *n*=-1 を持つことが明らかになった。 本研究は、九州大学応用力学研究所の共同利用研究の助成を受けた。



図 1. (a)周方向モード数・周波数スペクトル。(b)各周方向モード数における搬送波の軸方向モード数。

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 非線形結合過渡応答特性解明

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(ETG)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 モードのエネルギーが移送されるメカニズムを明らかにすることを目指す.本研究では,MHz 領域 の高周波揺動と kHz 領域の低周波揺動との非線形相互作用を調べるために,大容量のデータを取得 する必要があるとともに,その解析手法もバイスペクトル解析をはじめとして多岐にわたるため, 応用力学研究所との共同研究として遂行する.

2. 実験方法

本実験は東北大学 Qr-Upgrade 装置を用いて行う. アルゴン (Ar) を作動ガスとした電子サイク ロトロン共鳴 (ECR) 放電によって磁気ミラー領域 (共鳴磁場強度 2.14 kG) で高電子温度 (3·4 eV) のプラズマを生成し、グリッドを通して実験領域に流入させる.一方,装置右端に配置したタ ングステン電極を 2000℃以上に加熱することによって低温の熱電子 (約 0.2 eV) を生成し、半径 方向位置に対応してこれらの重畳割合を制御することによって,径方向の電子温度勾配を形成する. 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に注目す る.また、電子密度勾配および空間電位勾配を変化させることでドリフト波 (DW) モードを観測 し、さらに径方向電場 Eによる $E \times B$ 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.

3. 実験結果及び考察

上記の装置を用いて ETG を過渡的に形成したところ, ETG 強度の増大に伴い約 550 kHz の高 周波揺動(ETG モード)がまず成長し,その飽和とともに約 5 kHz の低周波揺動(ドリフト波(DW) モード)が成長することが分かった.本年度は,*E*rを能動的に形成することによって,揺動励起・ 抑制因子の一つでもあるフロー強度成分 – *E*r*E*r"を制御し,各揺動強度と非線形結合度の時間発展 計測を行い,マルチスケールエネルギー移送に及ぼす – *E*r*E*r"効果について調べた.図 1 に,空間 電位 ϕ_s と *E*r, また – *E*r*E*r"の半径方向分布を示す. ETG 領域(r=-1.2~-1.8 cm)において, (a) *E*r が内向きに形成される場合(*E*r =-0.6 V/cm)に比べて, (b) *E*r が外向きに形成される場合(*E*r =1.0 V/cm)は, –*E*r*E*r"が正に強く形成されること(揺動抑制効果)が分かった.図 2 に *E*rが(a)内向き(– *E*r*E*r"~0 V²/cm⁴)と(b)外向き(–*E*r*E*r" > 0 V²/cm⁴)の条件において,ETG を過渡的に変化させた時 (*t*g = 0 ms,立上り時間< 20 µs, r =-1.5 cm)の ETG モードと DW モードの揺動強度及び(c)平 均バイコヒーレンス強度の時間変化を示す.ETG 形成 (∇ *T*e~ 1.0 eV/cm, *t*g< 40 µs) とほぼ同時 に、ETG モードが成長を開始し、その後 $-E_rE_r$ "が未形成の場合において、非線形結合度の増加(t_g <1 ms)とともに DW モードが $t_g \simeq 0.3$ ms 付近から成長することが観測された. それに対して、正 の $-E_rE_r$ "が形成されている場合、非線形結合度は増加せず、DW モードのみが抑制されていることが分かった.以上の結果から、 $-E_rE_r$ "を変化させることよって、低周波揺動(DW モード)に抑制 効果が作用するとともに、高周波揺動(ETG モード)との非線形結合も制御可能であることが示唆さ れた.



図 1: 空間電位 øs, 径方向電場 *E*, フロー強度 成分-*E*,*E*,"の半径方向分布. 黄色領域は ETG 領域を示している. (a) *E*,内向き(-0.6 V/cm), (b) *E*,外向き(1.0 V/cm).



図 2: (a) - *E_rE_r*"~0 V²/cm⁴, (b) - *E_rE_r*">0 V²/cm⁴ における ETG モードと DW モードの揺動強度 及び(c)平均バイコヒーレンス強度の時間変化.

4. 研究組織

金子 俊郎, 酒井 優, 児玉 佳季, 畠山 力三 (東北大学), 稲垣 滋, 伊藤 早苗 (九州大学), 伊藤 公孝, 小林 達哉 (核融合研)

5. 研究成果報告

- C. Moon, T. Kaneko, K. Itoh, K. Ida, T. Kobayashi, S. Inagaki, S.-I. Itoh and R. Hatakeyama, Effects of radial electric field on suppression of electron-temperaturegradient mode through multiscale nonlinear interactions, Plasma Physics and Controlled Fusion, Vol. 58, No. 10, pp. 105007-1-6, 2016.
- 2) 児玉佳季,酒井優,金子俊郎,"Temporal Evolution of Plasma Spatial Profiles Interacting with Electron Temperature Gradient Mode",平成 28 年度電気関係学会東北支部連合大会, 東北工業大学(宮城県仙台市),2016 年 8 月 30~31 日.
- 3) 酒井優, 稲垣滋, 小林達哉, 伊藤公孝, 金子俊郎, "バイフェーズ解析による電子温度勾配モードとドリフト波モード間の因果関係解明", 日本物理学会 2016 年秋季大会, 金沢大学(石川県金沢市), 2016 年 9 月 13~16 日.
- 4) 児玉佳季,酒井優,金子俊郎,"電子温度勾配モード励起に伴うプラズマ空間分布の時間発展",日本物理学会2016年秋季大会,金沢大学(石川県金沢市),2016年9月13~16日.
- 5) 酒井優, 稲垣滋, 小林達哉, 伊藤公孝, 金子俊郎, "径方向電場印加時における電子温度勾配 モードとドリフト波モード間のバイスペクトル時間分解解析", プラズマ・核融合学会第33 回年会, 東北大学(宮城県仙台市), 2016年11月29日~12月2日.
- 6) 児玉佳季,酒井優,金子俊郎,"電子温度勾配モード励起に伴うプラズマ空間分布変化の時間 分解解析",プラズマ・核融合学会第33回年会,東北大学(宮城県仙台市),2016年11月29 日~12月2日.

直線プラズマ装置 PANTA における音速分子ビーム入射軌道の観測

核融合科学研究所 小林達哉

研究目的

直線プラズマ装置 PANTA では磁場閉じ込めプラズマ中のドリフト波不安定性の非線 形乱流構造の選択則を明らかにするため、実験パラメータを変えた放電を行い、様々な 非線形乱流構造を再現する実験が行われている.変化させるパラメータは主に閉じ込め 磁場強度と中性ガス圧の2つである.中性ガス圧を変化させると、イオンー中性粒子衝 突周波数と電子密度勾配が同時に変化してしまう.これらの量はそれぞれドリフト波の 線形減衰率と線形成長率を変化させる.このためこれまでのパラメータスキャン実験で は非線形乱流構造発展の際に、線形不安定性が及ぼす影響の切り分けが困難であった. 新たなコントロールノブを導入し、イオンー中性粒子衝突周波数を変化させずにプロフ ァイルをコントロールする方法(若しくはその逆)の開発が望まれている.

直線プラズマ装置 PANTA には、主に計測ビームとして SMBI (Super Molecular Beam Injection, 超音速分子ビーム入射)装置が導入されている. SMBI の入射パターン (入 射圧力及び入射時間)を適切にコントロールし、密度プロファイルをコントロールする ことを本研究の目的とする.本年度はこれまで行われた磁場-中性ガス圧パラメータス キャン実験のデータを解析し、現状の実験フレームワーク下での非線形乱流構造選択則 をまとめた.

研究結果

直線装置 PANTA では、磁場が低い場合に単一線形ドリフト波が観測され、磁場を上げ るとドリフト波が非線形化する.中性ガス圧が低い際にはストリーマと呼ばれる、 Azimuthal 方向に局在化し、半径方向に伸びた非線形構造が、中性ガス圧が高い際には 孤立波と呼ばれる、鋸歯状の波形をした大振幅の非線形波形がそれぞれ観測される.両 者はそれぞれ時空間発展及び周波数・波数スペクトルに異なる特徴を持つ.この特徴を 利用して各放電に於けるストリーマ・孤立波の強度を定義して2次元パラメータ空間で の選択則を求めた.

ストリーマは電子反磁性方向に伝播するドリフト波が、イオン反磁性方向に伝播する 媒介波によってモジュレーションを受けることで形成される.2次元 FFT-逆 FFT 及びヒ



ルベルト変換を用いて,電子反磁性に伝播する 波の振幅と,イオン反磁性方向に進む波の波形 を抽出し,両者のコヒーレンスをとったものと, イオン反磁性方向に進む波の強度の積をストリ ーマの強度と定義した.

一方孤立波は, 鋸歯状波形であるため, 周波数 -Azimuthal スペクトルでピークが一直線に並ぶ ことがその特徴である.スペクトル上で中心周 波数・波数の, 揺動強度での重み付け平均を行い, 孤立波強度を定量化した.図1はそれぞれの強 度に適当な閾値を与え, 非線形波形の存在パラ メータ領域を図示したものである.低ガス圧領 域でストリーマが, 高ガス圧領域で孤立波がそ れぞれ存在することが示されている.

研究組織

稲垣滋(九大応力研),佐々木真(九大応力研)

統合輸送コードに導入するための電磁的ジャイロ運動論解析を用いた 輸送係数のモデリング

核融合科学研究所 登田慎一郎

核融合装置において、乱流輸送はプラズマ閉じ込めのために解決すべき重要な課題である。なぜ なら、乱流輸送は、トロイダルプラズマにおいて、大量の粒子、熱損失をもたらすからである。プ ラズマ微視的不安定性による乱流輸送改善による最適化が期待される。トロイダルプラズマにお いて、乱流輸送に関して多くのジャイロ運動論シミュレーションがされている。トカマク、ヘリカ ルプラズマにおけるジャイロ運動論シミュレーションによる結果は実験結果と比較研究がされてい る。ヘリカル系プラズマは長時間放電の定常状態を保持するのに優れているのはよく知られてい ることである。ヘリカルプラズマのジャイロ運動論シミュレーションはヘリカルリップル構造を解 析に反映させるために、多数のメッシュ点が必要である。

ジャイロ運動論的方程式を解くGKV-Xコード[1]は、ヘリカルプラズマでの乱流輸送を研究する のに、大型ヘリカル装置 (LHD) におけるイオン温度勾配 (ITG) モードを調べるために使用されて いる。電子運動に断熱近似を用いたジャイロ運動論シミュレーションがLHDにおける高イオン温 度モード (#88343) についてされている。輸送シミュレーションのために、GKV-X コードを使っ て、イオン熱拡散係数の簡約化モデルが提唱されている。簡約化モデルは、ITG モードの線形成 長率と帯状流崩壊時間の関数である。TASK3Dのような動的な輸送コードで各時間ステップごと に線形計算を行うことは、高コストである。なぜなら、電場や磁場を正確に評価するために、ヘ リカルプラズマの輸送解析は径方向に高解像度が必要だからである。低コストで、ヘリカルプラ ズマにおいて、ジャイロ運動論シミュレーションから得られた ITG モードの乱流拡散係数の簡約 化モデルを、輸送コードにどのように適用するかを示している [2]。ポロイダル波数空間を積分し た線形成長率と帯状流崩壊時間を簡約化モデルに代入すると、簡約化モデル自体の値を再現する。 ITG モードによるイオン熱フラックスは実験結果と良い一致を示している。断熱電子を用いた輸 |送シミュレーションによるイオン温度分布は実験結果と矛盾しない。しかしながら、運動論的電 子を用いたジャイロ運動論シミュレーションは LHD 実験結果よりも大きなイオン熱フラックスを 示す。運動論的電子効果は、ITGモードの線形成長率の値を大きくする。ジャイロ運動論的シミュ レーションによるイオン熱拡散係数の結果を実験結果と比較するには、運動論的電子の効果を取 り入れるべきである。運動論的電子の効果を調べるために、イオンに加えて電子についてもジャイ ロ運動論的方程式を解析し、イオン熱拡散係数の簡約化モデルを構築する必要がある。ポロイダ ル波数領域は、ITG モードが不安定化する $0.1 \le \tilde{k}_u \le 0.5$ にとる。

LHD における高イオン温度モード #88343 で時刻 t = 2.233s での密度、電子とイオン温度分布を 使用する。計算機コストと広いプラズマパラメータ領域で、非線形 GKV-X シミュレーションを行 うために、フーリエモードを少数とる。 $x \ge y$ 方向の全フーリエモードは16と16である。 $\tilde{k}_x \ge \tilde{k}_y$ 方向の全フーリエモードは9と6である。 $\rho(=r/a)=0.46$ と $\rho=0.80$ の間の10径方向の点で非 線形GKV-X シミュレーションを行う。運動論的電子を用いたジャイロ運動論シミュレーションの 結果として、 $\rho = 0.65$ での全イオンフラックスの時間発展を調べる。時刻 t は R/v_{ti} で規格化され る。非線形飽和を、イオンエネルギーフラックスで見ることができる。時間間隔 50 < *t* < 100 で イオンエネルギーフラックスの平均値 0.12 MW/m²を得る。文献 [3] では、 時間間隔 50 < t < 80 でイオンエネルギーフラックスの平均値は 0.13 $\,\,\mathrm{MW/m^2}$ である。この時フーリエモード数は $ilde{k}_x$ と \tilde{k}_y 方向に 256 と 43 である。フーリエモード数が \tilde{k}_x と \tilde{k}_y 方向にわずか 8 と 6 でも、本研究で は、イオンエネルギーフラックスは近い値を得ることができた。全イオンエネルギーフラックス Q_iに対する電磁成分 Q^{em} の時間発展についても研究した。ベータ値は 0.3% であるので、時間間 隔 50 < t < 100 で |Q^{em}|/Q_iの平均値は 0.33% で、低い値である。電子エネルギーフラックス でも飽和は見られ、時間間隔 50 < t < 100 での平均値は 0.070 MW/m² である。文献 [3] では、 時間間隔 50 < t < 80 で電子エネルギーフラックスの平均値は 0.058 MW/m² である。しかしな がら、調べているプラズマは低ベータプラズマにもかかわらず、 全電子エネルギーフラックス

 Q_e に対する電磁成分 Q_e^{em} の、時間間隔 50 < t < 100 における平均値は 30% になってしまう。 もし、フーリエモードをより多数取れば、電磁成分の割合は減少する [3]。したがって、本研究 ではイオン熱拡散係数についてのみ、輸送モデルを構築することにする。乱流ポテンシャル揺動 の 2 乗 $\mathcal{T}\left(=\sum_{k_x,k_y\neq 0} \left\langle \left| \tilde{\phi}_{k_x,k_y} \right|^2 \right\rangle / 2 \right)$ と帯状流ポテンシャル揺動の 2 乗 $\mathcal{E}\left(=\sum_{k_x} \left\langle \left| \tilde{\phi}_{k_x,k_y=0} \right|^2 \right\rangle \right) / 2$ の時間発展を調べた。ここでも \mathcal{T} と \mathcal{Z} の時間発展において、非線形飽和を見ることができる。

LHDにおける高イオン温度モードでの時刻t = 2.233sでの密度、温度分布や磁場配位についての実験結果に基づいて、電子、イオン温度勾配 R/L_{T_e} と R/L_{T_i} 、密度勾配 R/L_n や安全係数 q が径方向に変化する。断熱電子と運動論電子を用いた非線形ジャイロ運動論解析によるイオン熱拡散係数 $\bar{\chi}_i$ の径方向分布を比較した。ここで、「は非線形飽和状態の時間間隔 50 < t < 100 での平均値を表す。運動論的電子を用いた解析による $\bar{\chi}_i$ の値は、断熱電子を用いた解析の値と比べて 2 ~ 3 倍大きい。規格化した電子とイオン温度勾配の大きさを、径方向の点 $\rho = 0.46$, $\rho = 0.50$, $\rho = 0.54$, $\rho = 0.58$, $\rho = 0.62$, $\rho = 0.65$, $\rho = 0.68$, $\rho = 0.72$, $\rho = 0.76$ と $\rho = 0.80$ で、実験値から 0.8 倍から 1.2 倍に変化させる。Figure 1 で、 \bar{T} と \bar{z} のモデル関数と輸送係数 $\bar{\chi}_i/\chi_i^{GB}$ の比較を行った。イオン熱拡散係数のフィッティング関数は、以下の通りである。



Figure 1: 非線形解析による $\bar{\chi}_i / \chi_{GB}$ の値とモデル関数 \mathcal{F} (1) の値の比較

$$rac{ar{\chi}_i}{\chi^{GB}_i} = \mathcal{F}(ar{\mathcal{T}},ar{\mathcal{Z}}) \equiv rac{C_1ar{\mathcal{T}}^lpha}{C_2 + ar{\mathcal{Z}}^{rac{1}{2}}/ar{\mathcal{T}}}$$

ここで、係数は $\alpha = 0.24$, $C_1 = 0.11 \ge C_2 = 1.8 \times 10^{-3}$ であり, χ_i^{CB} はジャイロボーム因子である。Fによる $\bar{\chi}_i/\chi_i^{GB}$ を近似する相関誤差は0.31である。ここで、相関 誤差は $\left[(\bar{\chi}_i/\chi_i^{GB})/F - 1\right]$ の2乗平均平方根である。したがって、イオン熱拡散係数はモデル関数 (1) でよく再現することができる。

- [1] T. -H. Watanabe and H. Sugama, Nucl. Fusion 46 24 (2006)
- [2] S. Toda et al., Journal of Physics: Conference Series 561 012020 (2014)
- [3] A. Ishizawa et al., Nucl. Fusion 55 043024 (2015)

学会発表リスト

Construction of reduced transport model by gyro-kinetic simulation with kinetic electrons in helical plasmas,

S. Toda, M. Nakata, M. Nunami, A. Ishizawa, T. -H. Watanabe and H. Sugama 58th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, TP10.00015

ヘリカルプラズマにおける電磁的ジャイロ運動論解析による簡約化輸送モデル構築、 登田慎一郎、仲田資季、沼波政倫、石澤明宏、渡邉智彦、 洲鎌英雄 第 11 回核融合エネルギー連合講演会 15P079

ヘリカルプラズマにおける運動論的電子を用いたジャイロ運動論解析による簡約化輸送モデル構築 登田慎一郎、仲田資季、沼波政倫、石澤明宏、渡邉智彦、 洲鎌英雄 第 33 回 プラズマ・核融合学会 年会 29aP41

QUEST におけるオーミックと RF 加熱を用いたプラズマ電流立ち上げ実験

Plasma current ramp-up experiments using the Ohmic and RF heating in QUEST

御手洗 修 東海大学(熊本) 2016年9月まで

有限責任事業組合 先進核融合・物理教育研究所(熊本)

1. 研究目的

今まで、QUEST 装置において RF でブレークダウンさせ、オーミックコイルを用いてプラズマ電流を立ち 上げ実験を行ってきた.QUEST のようなスフェリカルトカマク (ST)においては、プラズマ断面積が大きいので、高 アスペクト比のトカマクに比して安全係数が大きくとれるので、大きなプラズマ電流を流すことが可能である.しかしな がら、オーミックコイルの磁束が小さく、装置上大きなプラズマ電流を得ることは困難である.ここに ST プラズマ電 流立ち上げの大きな問題がある.

現在,世界の ST において RF のみを用いてプラズマ電流を立ち上げる実験が行われている.しかし,これらの実験 の多くでは、プラズマの上下安定性を確保するためにダイバータコイル電流はプラズマ電流と逆向 きに設定している. ST で炉を作る場合、ダイバータコイル電流はプラズマ電流と同方向でなければ、必要なプラズマ断面積を確保 できない.

申請者の今までの QUEST 共同研究では、オーミックコイル、プラズマ電流と同方向のダイバータコイルを 用いてプラズマ電流を立ち上げる実験を行ってきた. 今までに得られた実験結果では、磁束の小さい QUEST に おいては、得られたプラズマ電流 I_pの大きさはプラズマ中心位置 R に反比例した関係 ($I_p \propto 1/R$) が得られ ている. そのためにダイバータ放電ではプラズマを外側に生成する必要があるために、プラズマ電流は 50~60 k A程度に限られている.

もし RF 加熱パワーを電流立ち上げ時に重畳できれば、プラズマ位置はさらに外に移動するので、その分垂直磁場を大きく印加できプラズマ電流を増加させることができる.本共同研究では立ち上げフェーズに 28 GHz の RF を重畳し、加熱することによって垂直磁場効果によるプラズマ電流の増大ができることを実験的に示すことであったが、実験を行う機会がなかったので理論解析を行った.その結果について報告する.

2. 計算結果

0 次元の密度,温度分布を用いて,粒子バランス,パワーバランス方程式とプラズマ電流回路方程 式を連立させて解く.

[1] RPパワーを印加しない場合のプラズマ 電流立ち上げ:

Fig.1 に示すようなプラズマ電流50kA が 得られた外側ダイバータの実験結果#23253[1]につ いて解析し,これに RF パワーを印加してその 効果を調べる.

この実験で得られたコイルパラメータを 用いてプラズマ電流を数値計算した結果を Fig. 2 に示 す. このとき R=0.68m, $a=0.4m, B_t=0.25 T, 閉じ込め増倍度 IPB98y2 則$ $の <math>0.8^{\sim}1.15$ 倍,内部インダクタンス $D_i=0.5$, $Z_{eff}=2$ と仮定した.(注:コイル電流の極性は正負 反対になっている.)

Fig. 2 に示すようにプラズマ電流波形は Fig. 1 と同様である. プラズマ電流が約 50 k A に達する が,そのときのループ電圧は実験値と同様に 0.9V 程度である.実験ではプラズマ位置は内側から外 側に移動しているが,計算でその変化を取り入れる なので一定値としている.ここではプラズ



Fig. 1 Temporal evolution of plasma parameters in #23253 with outer divertor Ohmic discharge. (a) The plasma current I_p , (b) CS current I_{CS} , (c) PF26 and PF17 vertical field coil currents, (d) divertor coil current I_{PF35-1} and I_{PF35-2} (e) loop voltages, (f) various fluxes, (g) plasma position of the center, (h) plasma inner and outer edge.

マ中心を R=0.68m とし PF17, PF35-1, PF35-2 コイル電流に実験値を用いて, 平衡に必要な垂直磁場を作る

PF26 コイル電流を

 $I_{PF26} = \{B_{VE} - (B_{zoPF17}I_{PF17} + B_{zoPF351}I_{PF351} + B_{zoPF352}I_{PF352})\}/B_{zoPF26}$ で計算し,これを実際に印加したコイル 電流と比較し,同じ程度の値が出るまで 繰り返して計算した.図に示すように計 算した値 (Fig. 2-(c)のIPF26VT(赤の点 線) は実際の PF26 コイル電流 (cの黒 破線)に近くなっているので,実験結果 をよく再現できていると考えられる.プ ラズマの中心密度を n=1x10¹⁸m⁻³に設定 すれば,温度は T(0)=300eV になる.

ここでは実験と同様に,逆電流を減 らすために PF35-1,2コイルの初期電流 値を1kA にしているが,これを0 にすれば, プラズマ電流は 2/3 程度に減少する.こ れは実験での傾向と一致している.

また,注目すべきはプラズマの密度を 例えば n=3x10¹⁸m⁻³に設定するとプラズ マ電流値は約半分になる.これは実験中 にガスパフ量を増やした場合,プラズマ 電流が減少した結果と符合している.

[2] RP パワーを印加した場合のプ ラズマ電流立ち上げ:

密度,閉じ込め増倍度,オーミックコ イル電流 I_{CS}, PF17 コイル電流を同じにして, 50kW の加熱パワーを印加する.

プラズマ電流が増大する分だけダイバー タコイル電流を増やす必要がある.その結 果,平衡位置から計算した PF26 コイル電 流(Fig.3(c)の赤点線) に近づけるために, 設定 PF26 コイル電流(Fig.3(c)の黒破線) を増やした.その結果を Fig.3 に示す.プ ラズマ電流は 70[~]80kA 程度まで増大する. ループ電圧が Fig.2 とほとんど同じであ るのは、ダイバータコイル電流を増大させ た分だけ PF26 コイル電流がわずかに増大 し、差し引き0になっているからだと思わ れる.また電流駆動効率は 2 x 1017[Am-2W-1]と低く設定しているので駆動電流は非常 に小さい.

温度は加熱パワーを印加した場合が高い ので、ここでのプラズマ電流増大はRF 加熱 パワーによるプラズマ抵抗の減少の結果だ と思われる.



Fig. 2 Calculated parameters using the poloidal coil current in #23253. (a)-(e) The same as in Fig. 1 except for (f) plasma density and temperature and (g) RF power



Fig.3 RF power of 50kW is applied. F35-1, PF35-2, PF26 coil currents are increased. (a) to (g) are the same as in Fig. 2.

垂直磁場の効果を検証するにはさらに大きな加熱パワーを印加した場合についての解析が必要にな ると思われる.

謝辞

本研究は、九州大学応用力学研究所の共同利用研究の助成を受けたものです。

[1] O. Mitarai, K. Nakamura, M. Hasegawa, et al.,

"Comparative studies of inner and outer divertor discharges and a fueling study in QUEST" Fusion Engineering and Design 109-111 (2016) 1365-1370

プラズマ乱流と磁場平行流れ場の相互作用に関する研究

九州大学 応用力学研究所・高等研究院 小菅佑輔

目的

磁化不均一プラズマ乱流のダイナミクスを理解するために、磁場方向流れ場の重要性が指摘 されている。磁場方向流れ場が重要となる例として、乱流が駆動するトロイダルプラズマ中の自発回 転や、地球磁場のカスプ領域のイオン流の電子等方性の問題がある。 平行流れ場が乱流を駆動する場合 には、軸方向の対称性が破られている事が理論的に指摘されているが、これらの例では直接計測によって 理論の検証を行う事が難しい。その一方で、応用力学研究所が有する直線プラズマ乱流実験装置 PANTA では、実装されているプローブ群による乱流揺動、乱流駆動束、プロファイルの直接計測が可能 である。また、NLD による数値診断を加える事で、研究を加速的に進める事も可能となる。そこで、本 研究では、平行流れと乱流との相互作用をキーワードに、周方向と軸方向の2次元計測データを用いた 乱流揺動場の可視化をおこなうことで、磁場方向の対称性の破れを検 証する事を目的とする。併せて、 平行流れ場を加える形に NLD を拡張すること、平行運動量輸送に時間遅れ効果を取り込む事、およ び平行流れ場が駆動する乱流と垂直流れ場が駆動する乱流との違いを理論的に明らかにするこ とも目的とする。

主たる成果

NLDコードを平行流れ場を含む形に拡張 することができた[1]。非線形シミュレーシ ョンを行うことで、密度駆動型のドリフ ト波や平行流れ駆動のダンジェロモー ドの共存・競合する様子を再現すること ができている。特に、従来の NLD で再現さ れていたドリフト波乱流に加え、平行速 度ソースを導入することができ、平均流 の駆動を取り扱うことができるように なった。速度場が急峻化した場合に、速 度勾配を緩和させる効果(図1)や、規 格化された平行速度揺動が規格密度揺動



と同程度の大きさを持つことなど、ダンジェロモードが有する特徴を再現することができて いる。

実験結果としては、プローブ計測に より異なる半径位置と周波数領域にド リフト波とダンジェロモードが存在す る様子が観測されている[2,3]。イオン 音波で規格化した速度揺動と、平均値 で規格化した密度揺動の比を半径方向 スキャンにより評価した。ここでは、 PANTA の内側、高周波数領域において ダンジェロモードの特徴を有するモー ドが観測されている。



図2:ドリフト波とダンジェロモードの共存。 赤い領域がドリフト波、青い領域がダンジェロ モードの特徴を有する。

基礎研究結果を踏まえ、トカマク

プラズマの周辺(SoL)領域への応用についての検討を進めた[4]。これらの成果が得られたことで、非線形効果を含めた研究[5]など、今後更なる展開をするための礎を築くことができた。

参考資料

- 佐々木真、糟谷直宏、登田慎一郎、小菅佑輔、小林達哉、荒川弘之、山田琢磨、稲垣滋、 矢木雅敏、伊藤公孝、伊藤早苗 「直線磁化プラズマ乱流シミュレーションによるドリフト 波と軸方向流れ駆動不安定性の競合」 日本物理学会2016年秋季大会 15pKA11 2016.9.13-17金沢大学'
- T. Kobayashi, S. Inagaki, Y. Kosuga, M. Sasaki, Y. Nagashima, T. Yamada, H. Arakawa, N. Kasuya, A. Fujisawa, S.-I. Itoh, and K. Itoh: 'Structure formation in parallel ion flow and density profiles by cross-ferroic turbulent transport in linear magnetized plasma' Phys. Plasmas 23 102311 (2016)
- N. Dupertuis, S. Inagaki, Y. Nagashima, Y. Kosuga, F. Kin, T. Kobayashi, N. Kasuya, M. Sasaki, A. Fujisawa, M.Q. Tran, S.-I. Itoh and K. Itoh: 'Coexistence of drift waves and D'Angelo modes at different position and frequency in linear plasma device' Plasma Fusion Res. 12 1201008 (2017)
- 4. Y. Kosuga, S.-I. Itoh and K. Itoh: 'Turbulence dynamics with the coupling of density gradient and parallel velocity gradient in the edge plasmas' Contrib. Plasma Phys. **56** 511 (2016)
- 5. 小菅佑輔、伊藤早苗、伊藤公孝、「磁場方向流れ場駆動乱流の波数スペクトル時間発展」日本物理学会2016年秋季大会14aKA9 2016.9.13-17 金沢大学

金属間化合物における空孔型欠陥と水素原子の相互作用に関する研究

【研究の背景】

研究代表者 大阪府立大学工学研究科 堀史説

核融合炉などの特殊な環境下で用いられる材料中の不純物水素原子と格子欠陥との 相互作用は重要な課題である。すなわち空孔型欠陥中の水素挙動と材料特性には相関 が高いに もかかわらず、材料中の水素挙動に関してあまり詳細に解明されていない。 特に、実用材 として用いられる金属は様々な合金であり、それらは基本となる空孔型 の欠陥だけでも複 雑な種類が存在し得るが、実験的にそれらを分離することはこれま でほとんど不可能であった。また、材料中の水素の状態評価も他の元素に比べて評価 が難しく、微量検出や欠陥 との結合捕獲状態などの評価は限られた手法で特定のもの に限られて来た。陽電子消滅法 は原子レベルでの空孔の検出に優れており、近年では 陽電子消滅時の対消滅相手となる電 子の密度分布を簡便に詳細な評価が可能になっ てきた。そこで、化合物合金中の空孔型欠 陥の特定と水素原子の捕獲による電子状態 の変化についての検討を行っている。一方、核 融合炉のプラズマ対向材料の候補とし て考えられているタングステン合金などでは水素同 位体の貯留が大きな問題になっ ている。これはタングステン中に照射によって空孔型欠陥 が導入され、そこに多量の 水素が捕獲されることが予想されるからである。このような水 素との強い相互作用は 同じ結晶系である一部の金属間化合物でも起こる事が知られている。中でもタングス テンと同じ体心立方格子 (bcc) 型の B2 型規則構造を有する Fe-Al 合金は水素吸収しや すい合金として知られており、水素脆性などの問題を抱えた合金である。こ のような bcc 型合金では特定の空孔型欠陥による大量の水素捕獲が理論計算でも示唆されてお り、空孔と水素との詳細な相互作用の解明が課題としてあげられる。そのため、我々 はこれまでの第一原理計算において、B2 構造の Fe-Al 合金中の空孔種の違いによる水素 捕獲構造安定性の結果から空孔中の水素の状態が空孔によって異なる事を示唆するデ ータを 示して来た。また、前年度には異なる電子エネルギーで照射することにより導 入される欠 陥を制御できることを示した。今年度はこの合金中への水素チャージなど により実際に水 素を吸蔵させた試料の陽電子消滅測定を行い、これまで行って来た陽 電子消滅計算のシミ ュレーションに電子運動量計算まで加えた結果と比較検討した。

【電子線照射試料中の水素】

陽電子消滅運動量計算:陽電子の計算方法は、モデル結晶中の原子に各々Herman-Skillman が求めた Fe とAl およびH 原子の電子密度分布を用いて陽電子の感じるポテンシャルを決定 し、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陽電子の波動関数を求めた。 求めた陽電子は導関数から陽電子寿命値と対消滅 y 線運動量密度分布を求めた。

実験方法:アーク溶解によって精製した Fe-48at.%Al、Fe-50at.%Al の6 mm 径の ボタン材合金を 10 mm×10 mm×1 mm の板状に切り出し、表面を鏡面研磨したものを 使用した。この板材に内部の欠陥を取り除くことを目的として、3×10⁴ Pa の真空中で 600℃、120 時間の焼鈍を行った。空孔の導入の方法として京都大学原子炉実験所及び 量子化学技術研究開発機構(QST)-高崎量子応用研究所においてそれぞれ 8 MeV と 2 MeV の電子線照射を行った。照射温度はいずれも $35^{\sim}40$ ℃で、照射量はいずれも 1×10^{18} e⁷ cm² である。一方、照射試料に電解水素チャージによる水素の導入を行った。 また比較のために、未照射材に対しても同様の水素チャージを行った。一方、欠陥の導入 と水素の同時注入を行うために QST-高崎研究所において真空中での 1.5 MeV の水素イ オン照射を行った。照射温度は室温で、照射量は 1×10¹⁶ ions/cm² である.

実験結果:図1に各試料の XRD の結果を示す。 いずれの試料においてもB2以外の構造を示す回 折ピークは出現しておらず、照射による構造相転移 などは起こっていない事がわかる。さらに水素を注入 しても同様に構造に影響するものではないことがわか る。一方、図2および3に2および8MeV で電子線照 射した試料に水素注入した場合の陽電子 CDB ス ペクトルの変化を示す。前年度までの結果からこ れらの2つのエネルギー電子照射では導入された 欠陥の比率が異なる事がわかっている。



図2 2MeV電子線照射したFe-Al合金への水素 注入による陽電子CDBスペクトルの変化

図にはいずれも水素を注入した場合におよそ 0.017m0c 付近にピークが出現している。この ピークの由来について検討するために、図4に 計算機シミュレーションで求めた各空孔に水 素を配置した場合の電子の運動量分布曲線を 示す。この図から水素を空孔内に配置した場合 にいずれの空孔においても 0.017m0c 付近が 僅かに増加していることがわかる。すなわち図 2、3の水素注入後のスペクトル変化は照射で 導入された空孔内部に水素原子が捕獲された ことを示している。異なる欠陥(鉄空孔 VFe と アルミ空孔 VA1)いずれに対しても水素が起こ っており、この結果は第一原理計算で示された 各空孔中への水素捕獲状態の安定性と良く対応



図1 照射前後および水素注入した Fe-Al 試料での X 線回折結果



図3 8MeV電子線照射したFe·Al合金への水 素注入による陽電子CDBスペクトルの変化



図4 水素捕獲した各空孔での陽電子消滅電子 運動量のシミュレーション結果

している。本 CDB 運動量計算では水素1個のみしか実施できなかったため、これらの実 験結果は水素捕獲が単一か複数個なのか現時点で判断できていない。この点は今後の検討 課題である。

LHD ヘリウム長時間放電に曝露されたタングステン表面の構造解析

核融合科学研究所 ヘリカル研究部 時谷 政行

【目的】

近年,実験室における基礎研究から,タングステンに He を照射した際に極めて複雑なナノ繊維状構 造を持つ表面損傷組織(W-fuzz)が形成されることが知られている[1]. 照射条件はいずれも試料温度 1000-2000K, 照射量~1×10²⁵m⁻²以上,入射イオンエネルギー20eV 以上の条件で発現する.タングス テン表面がこのような構造に変化した場合,熱伝導率の低下,ダストの発生など様々な望まれない影響 を引き起こす恐れがある. 大型の実機装置において W-fuzz 構造が実験室と同じように形成され得る か否かを確認しておくことは,将来のダイバータ設計を検討するにおいて不可欠である.しかしながら, これまで実機プラズマ照射によりタングステン表面に W-fuzz が形成されることが確認された例はほ とんど無い.その理由として,ヘリウムプラズマを安定して長時間維持することができる実機装置が少 ないことが考えられる.数十分以上の安定したヘリウム放電時のダイバータプラズマにタングステンを 連続して照射することができなければ,基礎実験での形成環境を模擬することは困難である.このよう な観点において.核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)では,水素マイノリティ ICH+ECH 加 熱方式を用いたヘリウムプラズマの長時間放電の研究が継続して行われており,

2013 年度の実験においては平均で 1.2MW の加熱入力でT_{i,e}~2 keV, ne~1.2×10¹⁹m³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.この安定したヘリウム放電をプラットフォームとすれば, ヘリウムのダイバータプラズマへのタングステンの長時間曝露が可能となる.実機において本研究では, LHD に既設の試料駆動装置を用いて,タングステンバルク試料を ICH+ECH 加熱時のヘリウム長時間 放電のダイバータプラズマに連続的に照射することで,W-fuzz構造が形成されるかどうかの確認,および,形成された場合にはその微細構造特性を調べること目的とした.

【実験方法】

LHD に既設の試料駆動装置を用いて、タ ングステンバルク試料をLHD ダイバータプ ラズマ位置に挿入した.図1にその模式図を 示す. 試料駆動装置は差動排気式となって いるため、LHD の真空を破ることなく照射 用の試料を出し入れすることができる.ダイ バータプラズマのストライクポイントが 80mm×30mm×1.5mm の試料のちょうど中 央付近に位置するように試料駆動装置の上 下動位置を調整した.照射中の試料の全体 像は上方約 5.1m の監視ポートに設置し た可視カメラによりモニターされ、タング ステン表面の温度は同じく 5.1m の監視ポ ートに設置した IR カメラによりモニター された. 照射時の典型的なプラズマパラメー タ,照射条件および照射中の試料温度を表1 に示す. ヘリウムプラズマの照射は平均的に 数百秒程度の時間で連続して 22shot 実施さ れた. 取り出したあとの試料を 20mm×20mm 程度の大きさにスローカッ ターを用いて切断し、表面分析を行った. 用いた分析機器は電解放出型走査電子顕微 鏡(FE-SEM),原子間力顕微鏡(AFM)であ る.AFM は九州大学応用力学研究所の機器 であり,今年度共同研究の主な利用機器であ る.



図 1. LHD 既設の試料駆動装置を用いたダイバータプラズマ へのタングステン試料照射実験の模式図

Input power	1.2MW~3.0MW	
Total exposure time	10190s (22 discharges)	
Gas	Не	
Surface temperature	1900K-2300K (ε~0.3)	
Incident He energy	~100 eV	
He flux at strike point	~5 × 10 ²¹ He/m ² s	
He fluence at strike point	~5 × 10 ²⁵ He/m ²	

表 1. タングステン試料照射時の典型的なプラズマパラメー タ,照射条件および照射中の試料温度 【結果および考察】

図2に、ストライクポイント近傍のFE-SEM像を示す.42mm,47mmという表記は 試料上の座標を意味しており、80mmの試 料上のほぼ中央付近に対応する.構造状態か ら判断してW-fuzz構造の初期状態が形 成されていると考えられる.照射量やエ ネルギーが明白ないわゆる制御された条件 における実機のヘリウムダイバータプラ ズ照射においてW-fuzz構造の初期状態が 確認されたのは世界でも初めての結果で ある.W-fuzz構造の形状を定量的に調



図 2. ダイバータストライクポイント近傍の典型的な表面構造

べるために、九州大学応用力学研究所の AFM 装置で表面観察を実施した結果を図 3 に示す.図3の 場所は図2の 47mm の位置に対応している.W-fuzz の繊維状突起の直径は約 20~30nm 程度であるこ とがわかる.また、図2と図3の結果を総合的に見て、W-fuzz 層の厚さは 100nm 前後ではないかと推 察される.ストライクポイントのヘリウム照射量は~5×10²⁵He/m²であるが、同じ照射量での実験室実 験の結果と比較すると成長量が低いことになる.この理由は、LHD 実験の場合、22shot のプラズ マ照射を繰り返し実施し、合計の照射量となるため、温度上昇と冷却が繰り返され、実験室実験のよう に連続した照射と比較して成長速度が遅くなったのではないかと考えられる.透過型電子顕微鏡(TEM) による分析結果も用いて比較検討を行っていきたい.



図 3. AFM で得られた表面構造画像と定量的な断面凹凸情報

参考文献

[1] S. Kajita et al., Nucl. Fusion 49 (2009) 095005

【成果報告】

M. Tokitani et al., "Initial growth phase of W-fuzz formation in ultra-long pulse helium discharge in LHD" 22nd International Conference on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices, May 30-June 3, 2016, Urbaniana University, Rome, Italia

(4)

ジャイロ流体モデルによる直線装置 PANTA における ITG モードのシミュレーション研究

量子科学技術研究開発機構 矢木雅敏

目的

九大応力研付属の直線装置PANTAではイオン温度勾配モード(ITGモード)の励起実験が検討されている。このため、 理論・シミュレーションの観点から ITG モードが線形的に不安定になるパラメータ領域を調べ、実験にフィード バックすることを研究目的とする。ジャイロ流体モデルを用いたシミュレーションコードを開発し、これを用いたシミュレ ーション研究を推進する。

研究成果

磁場閉じ込めプラズマにおける異常輸送の原因の1つにイオン温度勾配による微視的不安定性(ITG 不安定性)が挙げられる。ITG不安定性の励起条件や、それらモード間の非線形結合の研究は、直線型磁化プラズマを用いた基礎実験において行われており[1]、直線装置 PANTA においても、イオン温度計測が進められ流体モデルを用いた ITG 不安定性の解析が行われている[2]。ITG 不安定性はイオンの温度勾配 L_{T} =d(lnT)/dr と密度勾配 L_n =-d(lnn)/dr の比 η_i = L_n/L_T が閾値を超えることにより励起されるがイオン温度が数 [ev]と低くても $k_{\perp}\rho_s \sim 1$ のモードが不安定となり得ることが確認されている[2]。そのため、有限ラーマ 半径(FLR)効果を含めた、より詳細な解析が求められる。これまでに、ジャイロ運動論方程式のモーメントをとることにより導出されるジャイロ流体方程式を用いた局所解析を行い、研究成果として ITG 不安定性の線形成長率のパラメータ依存性を得ている[3]。今回は、より詳細なプラズマ中での輸送現象の理解を図るために、ジャイロ流体モデルにおいて、モード構造が得られる大域固有関数解析を行った。開発したコードの動作確認のために試験的な計算を行い、局所解析の結果を再現した。さらに FLR 効果を含めた ITG 不安定性の特徴を調べた。参考文献[4]の(1)-(10) 式を線形化して解くことで、線形成長率を評価する。

$$\lambda n + ik_z u_{\parallel} + ik_\theta \Psi + \eta_{i\perp} \Psi_1 = 0 \tag{1}$$

$$\lambda u_{\parallel} + ik_z (T_{\parallel} + n + \Psi) = 0, \tag{2}$$

$$\lambda T_{\perp} + ik_z q_{\perp} + \Psi_1 + \eta_{i\perp} ik_{\theta} \Psi + \eta_{i\perp} \Psi_2 = \frac{1}{3} \nu_{ii} (T_{\parallel} - T_{\perp}), \tag{3}$$

$$\lambda T_{\parallel} + ik_z (2u_{\parallel} + q_{\parallel}) + \eta_{i\parallel} ik_{\theta} \Psi = -\frac{2}{2} v_{ii} (T_{\parallel} - T_{\perp}),$$

$$(1+\frac{b}{2})n - \frac{b}{2}T_{\perp} - ((1+\frac{b}{2})^2 - 1)(1+\frac{b}{2})\Psi = \tau(1+\frac{b}{2})^3\Psi,$$
(5)

$$\Psi_1 = \left(\frac{ib}{2k_\theta} - \frac{ibk_\theta}{2} \frac{1}{1+b/2}\right)\Psi,\tag{6}$$

$$\Psi_2 = \left(-\frac{ibk_\theta}{(1+b/2)^2} + \frac{ib}{k_\theta} \frac{1}{1+b/2} - \frac{ib}{4k_\theta^3} \right) \Psi.$$
(7)

ここで v_{ii} はイオン同士の衝突周波数, τ はイオン温度 T_i と電子温度 T_e の比 $\tau = T_i/T_e$ 、 $b = k_r^2 + k_\theta^2$ である。 λ を固有値として解くことで、線形成長率と周波数を求める(局所解析)同様に(1)-(10)式を r, θ, z 方向で以下のようにフーリエベッセル展開する:

$$\phi(r,\theta,z) = \sum_{m=-M}^{M} \sum_{k=1}^{K} \sum_{l=1}^{L} \phi_{mkl} J_m(\lambda_{mk}r_*) e^{im\theta} \cos\left(\frac{\pi}{2}(2l-1)z_*\right),\tag{8}$$

$$u(r,\theta,z) = \sum_{m=-M}^{M} \sum_{k=1}^{K} \sum_{l=1}^{L} u_{mkl} J_m(\lambda_{mk}r_*) e^{im\theta} \sin\left(\frac{\pi}{2}(2l-1)z_*\right).$$
(9)

ここで0 ≤ r ≤ 1であり、 $J_m(r)$ はベッセル関数、 $r = \lambda_{mk}$ は $J_m(\lambda_{mk}) = 0$ となる点を表している。スペクトル展開した行列式を、固有値法と初期値法の2つの方法で解く。固有値法では行列の固有値ωを求め、 $Re(\omega)$ の最大値を得ることにより、線形成長率を求める。初期値法では予測子修正子法により各係数の時間発展を解くことにより線形成長率と周波数を求める。比較のため衝突とFLR効果を無視し、 $v_{ii}=0$ 、b=0としたモデルの計算を行った。ここで $q_{\perp}=q_{\parallel}=0$ とした。解析には PANTA 装置実験を想定して以下のパラメータを用いる:装置長l=4.0[m]、プラズマ半径a=7.0[cm]、 $n=1.0\times10^{19}$ [m⁻³]、B=0.1[T]、イオンラーマ半径 $\rho_s=1.1$ [cm]。また、線形局所解析での測定位置r=3.5[cm]とする。

図1に方位角方向モード数 m=2 の場合の局所解析および大域固有関数解析による線形成長率および



周波数の η 依存性を示す。図1より、線形成長率においては閾値がおよそ 0.8 でほぼ同じ値でありその変 化も同様な形を取っているが、周波数においては大域解析での値が局所解析での値よりおよそ10 倍小さい値と なっている。これは k_{θ} が半径 rに依存することによる。そこで大域解析において k_{θ} の値をr = 3.5[cm]の 局所的な値に固定して計算した(図2)図2 より、成長率、周波数共にほぼ同じ値となっている。この ように開発したコードによる計算結果の妥当性を確認することができた。

参考文献

[1] A.K.Sen, et al., Phys. Rev. Lett. 66, 429 (1991)

[2] Y Miwa, et al., Plasma Fusion Res. 8, 2403133(2013)

[3] G. Hattori, et al., Plasma Fusion Res. 10, 3401060(2015)

[4]応用力学研究所共同利用研究平成27年度成果報告 27FP-37

研究組織

矢木雅敏(量研機構)、糟谷直宏(九大応力研)、佐々木真(九大応力研)、稲垣滋(九大応力研)、糟谷和賀子 (応用流れ研究所)

タングステン中の二原子空孔の安定性に関する研究

日本原子力研究開発機構 山口正剛

【研究の背景】

タングステンは高い融点、高い熱伝導度、低い水素溶解度といった特徴を持つ金属で、 しかも機械的強度に優れ誘導放射化も少ない。そのため核融合炉のプラズマ対向材料と して有望である。その非常に低い水素溶解度を考えれば結晶格子内に水素が入り込むこ とはない。しかし、空孔型欠陥や不純物の周辺には相当量の水素が捕獲され残留するこ とが実験的にも示されている。特に、放射性同位体の三重水素の貯蔵量やその除去方法 が問題になっている。そこで、空孔や不純物に捕獲される水素および水素同位体の量、 結合エネルギーや乖離温度に関する研究が行われている。

ところで、最近 Ventelon ら[1]によってタングステン空孔に関して重要な発見があっ た。通常の金属は単原子空孔よりも、二原子空孔の方が内表面積を小さくなるため安定 である。しかし、タングステン空孔に関してはその一般則が成立せず、単原子空孔のま まの方が安定であることが密度汎関数法に基づいた第一原理計算から示唆された。これ はあくまでも、水素の無い状態での計算である。そこで、本研究では核融合炉を意識し 水素が作用した場合の二原子空孔の安定性を研究する。比較のために他の BCC 金属空孔 に作用する水素の影響、特に鉄とタングステン空孔を比較した結果を報告する。

【計算方法】

第一原理計算には汎用コードである VASP を使った。周期的境界条件の影響を緩和するために比較的大きな計算セルを用いた。BCC 格子で 6×6×6、原子数では 432 個の構成された計算セルを使った。平面波の cut-off エネルギーは 350eV とした。水素を捕獲した空孔水素複合体の結合エネルギーを

$E_{\scriptscriptstyle B} = E\big[\mathrm{VH}_{\scriptscriptstyle m}\big] + E\big[\mathrm{VH}_{\scriptscriptstyle n}\big] - E\big[\mathrm{V}_{\scriptscriptstyle 2}\mathrm{H}_{\scriptscriptstyle m+n}\big]$

のように定義した。ここでVは金属結晶中の単空孔、Hは水素、mとnは単空孔に捕獲 された水素の個数を表す。関数Eはそのようなセルの凝集エネルギーである。符号が正 の時は引力を表す。

【計算結果】

BCC 金属中の二原子空孔は図 1 のように 二通りの配置がある。Fe、Nb、Ta は(a)の <100>方向配置、V、Cr、Wは図 1(b)の<111> 方向の配置が安定であり、本研究の結果は Ventelonの計算とも一致する。



図 1:二原子空孔の配置

鉄の二原子空孔に水素が捕獲されると 図 1 のように空孔の配置にも変化が起き る。鉄の場合、水素なしと水素1個までは 空孔は<100>方向配置が安定であるが、2 個以上捕獲されると<111>方向配置が安定 になる。一方で、タングステンの二原子空 孔は<111>方向配置が常に安定である。

図3は4種類のBCC金属中の空孔、および空孔水素複合体の結合エネルギーを



図 2:水素がある時の鉄二原子空孔の安定性。 <111>方向配置(b)の方が安定になる。

示す。タングステン以外の金属では空孔が結合し二原子空孔を形成した方が安定である。 タングステンだけは二原子空孔は不安定であるということは先行研究[1]と一致する。しか し、空孔水素複合体になると結合した方が安定である。図4はタングステン空孔に水素が 0、1、2、3、6個捕獲した空孔水素複合体同士の結合エネルギーである。空孔中に水素 が1個以上存在すれば結合することで安定化する。

【議論】

核融合炉の炉壁材料研究ではタングステン中の空孔が拡散し成長してボイドなど大きな照 射組織を形成する過程は重要なテーマである。本研究の結果を使うと、タングステン中の二 原子空孔は不安定であるから生成しない、少なくとも単空孔同士は結合しない。逆に水素が 作用すると結合が促進されるというモデルが提案できる。今後は陽電子消滅など実験的な手 法も使いながら検証をすることも必要になる。

[1] L. Ventelon et al. J. Nucl. Mat. 425 (2012) 16-21.



図 3:BCC 金属中の空孔 V および空孔 水素複合体 VH_6 の結合エネルギー。



図 4:タングステン中の空孔水素複合体 の結合エネルギー。

収差補正機能付き分析電子顕微鏡による構造材料の高精度定量分析

公益財団法人若狭湾エネルギー研究センター 安永和史

1. 緒言

Zrを母相としその性質(機械的特性、耐酸化性、耐食性)の改善を目的として様々な元素(Fe、Cr、Ni、Sn)が添加 されたZr合金が開発されており、その一種であるジルカロイ2は沸騰水型の軽水炉(BWR)の燃料被覆管材料として用 いられている。ジルカロイ2は高燃焼度において脆化することが知られており、照射欠陥や析出物と水素吸収との関連 が指摘されている。そこで、重イオン照射後に水素を注入する模擬実験により欠陥形成と脆化との関連を明らかにする調 査を計画している。昨年度は、重イオン照射前のジルカロイ2焼鈍材の微細組織について調査し、焼鈍材は転位がほとん ど存在せず析出物のみが分布した状態であり、析出物にはZr2(Fe, Ni)、Zr(Fe, Cr)2及び組成不明の微小析出物の3種類 が存在することを明らかにした。本年度は、重イオン照射されたジルカロイ2の微細組織、特に析出物の構成元素の重イ オン照射による変化(析出物の重イオン照射下での相安定性)について調査した結果を報告する。

2. 実験方法

試料はジルカロイ2で、その成分元素の分析値を表1に示す。焼鈍したジルカロイ2試料は、九州大学応用力学研究 所に設置されたタンデム型加速器を用いて重イオンを照射した。重イオンの照射条件は、イオンエネルギー及びイオン種 は3.2 MeVのNiイオン、試料温度は400℃、ピーク照射量は30 dpa である。重イオン照射された試料は、集束イオン ビーム (Focused Ion Beam; FIB) 装置 (FB-2100、HITACHI)を用いて薄膜化し断面 TEM 観察用に加工した。試料の 微細組織の観察には TEM(JEM-3000F、JEOL)を用いた。加速電圧は300 kV である。STEM (Scanning Transmission Electron Microscopy) 及び STEM-EDS (Energy Dispersive Spectroscopy)による元素分析を行った。

結果および考察

図1は重イオン照射されたジルカロイ2試料をFIBを用いて薄膜化した断面微細組織を示すSTEM-BF像である。左上に試料表面が存在しており、2本の白い点線は試料表面に近い方から重イオン照射による損傷が最大の深さ(約1750 nm)及びそれ以上では重イオンによる弾き出しが誘起されない深さ(約2600 nm)をそれぞれ示している。枠で囲まれた領域はSTEM-EDSにより元素分析を行った領域である。領域1は、重イオン照射によるダメージピーク及び弾き出しが誘起されない深部の断面組織をともに含んでいる。

図 2 左は、図 1 中の領域 1 の STEM-EDS マッピング像であり、Fe は緑、Cr は赤、Ni は青で表示し STEM-BF 像に 重ね合わせたものである。図 2 右は重ね合わせ像中に記号を付した析出物の元素分析結果であり、両端に母相を含み析 出物を横切るようにして元素プロファイルを得た。縦軸は元素の特性 X 線のカウント数、横軸は距離(µm)である。水色 の粒径約 350 nm の析出物(A1)及び粒径約 120 nm の析出物(A2)は、Zr-Ni-Fe 系の析出物で、Fe と Ni の濃度がほ ぼ同一であることから Zr₂(Fe, Ni)と考えられるものである。A1 は A2 と比較して Fe の濃度が若干低いことは、弾き出 しによる Fe の減少を示唆している。一方、赤色及び黄色の粒径 50~210 nm の析出物は、Zr-Cr-Fe 系の析出物である。 B1 から B3 の析出物の色は赤から黄色に変化している。この現象は、重イオン照射による弾き出しの影響を受けて Zr(Fe, Cr)₂から Fe が減少する程度が試料表面からの深さにより異なることにより生じたと考えられる。すなわち、試料表面か らダメージピーク近傍では顕著に Fe の減少がみられ、ダメージピークよりも深部では B3 の元素プロファイルに示され るように Fe の減少は観察されず Fe と Cr の強度がほぼ等しい。以上の結果から Zr-Ni-Fe 系及び Zr-Cr-Fe 系の析出物 ともに重イオン照射による弾き出しが誘起される領域において Fe が減少することが明らかとなった。現時点では同程度 のサイズでの比較はできていないが、重イオン照射による Zr-Cr-Fe 系の析出物からの Fe の減少の程度が高く、照射下 での析出物の相安定性が Zr-Ni-Fe 系と Zr-Cr-Fe 系で異なる可能性が示唆される。

4. まとめ

重イオン照射後のジルカロイ 2 試料に存在する析出物の組成分析を STEM・EDS により行い、試料表面からの深さ依存性を調査した。その結果、焼鈍材で確認された Zr2(Fe, Ni)及び Zr(Fe, Cr)2の成分組成をもつ析出物から Fe が減少した析出物への変化が観察された。この現象は重イオン照射による弾き出し損傷の誘起される領域で顕著に観察され、析出物への照射効果であることが明確に確認された。析出物からの Fe の減少の程度は、Zr2(Fe, Ni)よりも Zr(Fe, Cr)2の方が顕著で Zr(Fe, Cr)2 析出物中の Fe ほぼ完全に消失していた。これらの結果は重イオン照射下での析出物の相安定性はZr2(Fe, Ni)の方が Zr(Fe, Cr)2 よりも高いことを示唆していると考えられる。

研究組織

研究代表者:安永和史(公益財団法人若狭湾エネルギー研究センター主任研究員)

研究世話人:渡辺英雄(九州大学応用力学研究所准教授)

研究協力者:牟田口嵩史(九州大学応用力学研究所技術職員)

研究協力者: 島袋瞬(九州大学応用力学研究所技術職員)

表1 ジルカロイ2の成分元素の分析値

	Sn	Fe	Cr	Ni	Zr
wt.%	1.38	0.15	0.09	0.05	Bal.



図1 重イオン照射されたジルカロイ2の断面微細組織。枠内はSTEM-EDSにより元素分析をした領域



図2 領域1におけるFe(緑)、Cr(赤)、Ni(青)の面分布を示すSTEM・EDSマッピング及び析出物の元素プロファイル

プラズマ乱流における非線形時系列データの統計解析

Statistical analysis of nonlinear time series in plasma turbulence

富山大学·人間発達科学部 成行 泰裕

研究目的:

プラズマ乱流の性質を理解する場合、その乱流を形成している擾乱間の非線形相互作 用の解明が重要になる。一方で、プラズマ中には速度分布に起因する微視的不安定性や熱 的ノイズなどが存在するため、コヒーレントな波動間相互作用が卓越するとは限らない。 また、線形の分散関係がほぼ満たされている弱乱流と非線形性が卓越する発達した乱流と ではスペクトルのべき指数等性質そのものが異なることも知られている。

本研究課題では、前年度までのモデル方程式を用いた統計解析の話を前に進め、統計解析法の改良およびその手法の数値計算データや観測データへの適用を目指す。

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:

前年度まではサロゲートデータ法と構造関数で定量化した位相相関指数と射影演算子 法を用いて構築した物理モデルを組み合わせてカオスを示す時系列の議論を行った。本年 度は少し視点を変え、機械学習法を用いて統計モデルを作成し、より多角的に非線形性の 評価を行うための手法の開発に取り組んだ。

本年度は、九州大学応用力学研究所の PANTA 実験装置で生成されたプラズマ乱流(静 電ポテンシャル)の時系列データに対し、ランダムフォレスト[1]を用いて特定のプローブで 観測されたデータに対する回帰モデルを作成した。具体的には、32 本配置されている PANTA のプローブの中のある一つのプローブの観測データを目的変数、他のプローブ(6本) が観測したデータを説明変数として、統計ソフト R(3.1.3)[2]の randomForest パッケージ[3] を用いて計算を行った。8 本のプローブは目的のプローブの両側に4 本ずつとり、間隔無 し、1 本間隔、2 本間隔の3 通りで回帰モデルの作成を行った。解析は時系列が統計的定常 状態になっている時間帯のデータを用いて行った。回帰モデルの作成には各時系列で1 万 点のデータ点を用いた。

Fig.1 はそれぞれ間隔無し、1 本間隔、2 本間隔の場合における回帰モデルを用いた予測結果である。ここでは、学習に用いた時間帯とは別の時間帯のデータを検証用に用いている。検証用データの点数は学習用データと同じく1万点である。Fig.1 上図が示すように、学習データのプローブ間隔が無い場合は、目的プローブのデータを回帰モデルにより精度

168

良く再現できていることが分かる(相関係数は 0.99)。また、1本間隔(中図)、2本間隔(下図) になるにつれて、精度は悪くなっている(相関係数はそれぞれ 0.95, 0.81)。ただし、1本間 隔・2本間隔データから見た場合は目的プローブのデータは粗視化スケールの現象である にもかかわらず、それがある程度の精度で再現されていることに注意されたい。また、 randomForest パッケージ[3]で計算される学習データの重要度は、間隔無しと1本間隔の場 合は目的プローブ最寄りのデータの重要度が最も高いが、2本間隔の場合はそうではなく なっている。このことは、周方向の構造に起因するものであると考えられる。今後は、検証 法の改良、時系列中の位相相関(非線形性)と予測精度の関係、異なる場所のプローブを用い た場合の解析を進め、物理現象との関連をより詳細に議論していく。

引用文献: [1] L. Breiman, Machine Learning, 45, 5–32 (2001); 平井有三, はじめてのパターン 認識, 森北出版(2012). [2] R Core Team (2015). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL http://www.Rproject.org/. [3] A. Liaw and M. Wiener (2002). Classification and Regression by randomForest. R News 2(3), 18--22.

公表状況:なし(2016年2月末時点)

*以下の論文が受理済みである

Yasuhiro Nariyuki, Makoto Sasaki, Naohiro Kasuya, Tohru Hada, and Masatoshi Yagi, Phase coherence among the Fourier modes and the non-Gaussian characteristics in Alfven chaos system, accepted to Prog. Theor. Exp. Phys.

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)



0.005 0.010 0.015 0.020 0.025 0.030 0.035 original 細測データ(探動)と予測データ(欲動)の数本図 プローブの即原がなわざわ即原

Fig.1 観測データ(横軸)と予測データ(縦軸)の散布図。プローブの間隔がそれぞれ間隔無し (上図)、1本間隔(中図)、2本間隔(下図)を表している。

プラズマに対向した堆積層の動的水素リテンションに関する研究

京都大学大学院工学研究科 高木郁二

要旨

QUEST の運転中にプラズマ対向壁上に成長した堆積層中の水素の動的リテンションを測 定した。堆積層の温度が高いほどリテンションは少なく、この結果は水素の溶解と捕捉、表 面からの再結合を考慮したモデルで定量的に説明することができた。

1. 序論

プラズマに対向した固体表面における水素リテンション(保持量)は、プラズマの長時間 維持に大きな影響を及ぼし得る因子である。リテンションは入射水素数と放出水素数を定 量的に把握すれば予測できるが、後者の量を決定する再結合定数は理論的な取扱が難しい ため、実際に用いられている材料での値を評価する必要がある。

本研究は、QUESTのプラズマ対向壁に成長した堆積層を試料とし、小型のプラズマ装置 と加速器分析を組み合わせたその場観察法で再結合定数や動的リテンションを調べた。

2. 方法

試験片は QUEST の運転中に堆積層が 成長した 316 ステンレス鋼であり、ステン レス鋼と堆積層の厚みはぞれぞれ、0.1mm と 30nm である。この試験片を 12x12mm² に分割した試料 (DS-14-B-01~B-04) を実 験に用いた。

リテンションを測定した実験装置の概 要を図1に示す。試料を真空槽に取り付 け、堆積層のある側を重水素プラズマに曝 し続ける。この状態で45度方向から³He イオンビームを試料に照射し、D(³He, p) ⁴Heによる核反応を利用して、試料中の重



水素濃度の深さ方向分布を測定した。1回の測定に必要な時間は15分程度である。プラズ マを停止した後も測定を続けた。4つの試料は、それぞれ温度を変えて測定した。プラズマ はRFによる弱電離であり、水素粒子の典型的なエネルギーは1eV程度である。

3. 結果

堆積層中の重水素を明瞭に観察することができた。一例を図2に示す。横軸は表面からの 深さ、縦軸は重水素濃度である。重水素が負の方向に拡がっているのは、システムの分解能 が無限小でないため であり、実際には正の 方向にしか存在しな い。システムの分解能 は半値幅で 100nm 程 度であり、これは堆積 層の厚み(30nm)より も大きい。従って、図 2の表面におけるピ ークは、堆積層中の重 水素の面密度を表し ているだけで、その横 方向の拡がりからは 情報は得られない。以 降は、ピークの面密度 で重水素の量を表す ものとする。

試料 DS-14-B-02 に 室温でプラズマを曝 したときの重水素面 密度の時間変化を図 3に示す。面密度は速





図3 プラズマ曝露(左枠)とプラズマ停止(右枠)中の 重水素面密度の時間変化(DS-14-B-02, 300K)

やかに上昇して一定値 1.3×10¹⁶ cm⁻²に達した。次にプラズマを停止すると面密度は速やか に減少したが、ゼロにはならず、0.6×10¹⁵ cm⁻²が残った。この残量は重水素が捕捉サイト に捕捉されている量に相当し、プラズマ曝露中の量と停止後の残量との差 0.7×10¹⁵ cm⁻²が 動的リテンションであると考えられる。

堆積層の厚みは 30nm なので、面密度 1.3×10¹⁶ cm⁻² から平均濃度を換算すると 4.3× 10²¹ cm⁻³ を得る。堆積層の主成分は炭素であるので、その原子密度は黒鉛の値と同じであると仮定すると、重水素/炭素原子数比は 4%である。黒鉛に水素イオンを注入した際の原子数比は最大で 40%程度であるので、堆積層にはまだ水素を保持する容量が充分にあった可能性が高い。

4. 考察

図3に示した面密度の時間変化を記述するモデルを検討する。先ず、重水素は溶解してい るか捕捉されているかのどちらかであり、両者は常に平衡状態にあるものとする。次に、溶 解している水素の濃度の二乗に比例して表面から水素が分子となって放出されると考える。 また、プラズマ領域から入射した水素は、一定の確率で堆積層中に侵入するが、速やかに堆
積層中に拡がるものとする。以上の条件から、次の式が導かれる。

$$K = \frac{(C_{t0} - C_t)C_s}{C_{s0}C_t}$$
(1)

$$L\frac{dC}{dt} = Fa\left(1 - \frac{C}{C_{s0} + C_{t0}}\right) - 2k_R C_s^2$$
(2)

ここに、*K*, *L*, *F*, *a*, *k*_Rはそれぞれ、溶解・捕捉間の平衡定数、堆積層厚み、重水素原子の入 射束、重水素原子の侵入確率および再結合定数であり、 C_s , *C* と C_{s0} , C_0 はそれぞれ、溶解 している重水素と捕捉された重水素の濃度、溶解サイトと捕捉サイトの密度である。また、 $C = C_s + G$ である。

式(1), (2)を以下のような手順で図3に示したデータに適用した。先ず、 $C_{\rm c}$ はプラズマを 停止してから充分時間が経過したときの面密度から得た。プラズマを曝して定常になった ときの面密度はCであるので、 $C_{\rm s}$ は $C - C_{\rm c}$ から得られる。 $C_{\rm s0}$ は一義的に求められないの で、黒鉛の原子密度の40%とした。 $C_{\rm t0}$ はKの値がアレニウス図上で直線に並ぶように選ん だ。 $k_{\rm R}$ はプラズマを停止した直後の面密度の時間変化を再現するように選んだ。最後にaは式(2)の定常状態、つまり左辺を0とした式から求めた。以上の結果、図3の曲線で示す ように、モデル式は実験値を再現することができ、このときのa、 $C_{\rm t0}$ 、 $k_{\rm R}$ はそれぞれ、0.004、 2×10²¹cm⁻³および3×10⁻³¹ cm⁴s⁻¹であった。

図3から分かるように、300Kでは動的リテンションは全リテンションの半分以上を占め ており、水素は短時間の間にかなりの量が放出される。放出の速度を決定づける再結合定数 を今回求めることができたが、値の妥当性について今後検討しなければならないし、他の条 件で成長した堆積層についても同様の手法で調べ、放出現象全体を把握していく必要があ る。

論文・学会発表リスト

学会発表

K. Hanada, N. Yoshida, T. Honda, Z. Wang, A. Kuzmin, I. Takagi, et al., "Investigation of the role of deposition layer in hydrogen recycling property on QUEST", PSI2016, FEC-26(IAEA) EX/P4-49, 2016/5/30-6/3, Roma.

花田和明、中村一男、出射 浩、長谷川 真、図子秀樹、吉田直亮、Kuzmin Arseniy、他、「QUEST におけるプラズマ長時間維持研究の進展」、第 11 回核融合エネルギー連合講演 会、2016/7/14-7/15、九州大学伊都キャンパス.

花田和明、中村一男、出射浩、長谷川真、図子秀樹、吉田直亮、Kuzmin Arseniy、他、「QUEST 高温壁における一時間を超える長時間放電の粒子バランス解析」、プラズマ核融合学会第33 回年会、2016/11/29-12/2、東北大学青葉山キャンパス.

QUEST 装置周辺プラズマに対する粒子リサイクリングと衝突輻射モデルの構築

慶應義塾大学大学院理工学研究科 畑山明聖 岡本浩輔、阿部和広、矢本昌平 九州大学・応用力学研究所 花田和明

1. 研究背景·目的

将来の核融合炉におけるプラズマ対向材料は、トリチウム の長時間吸蔵による装置の早期放射化を防ぐという観点か ら、金属材の使用が見込まれている^[1].しかしながら、特に 長時間運転の際に、金属材が持つ短時間粒子吸蔵特性(動的リテ ンション^[2])による炉内への粒子再放出が、炉心プラズマ密度の 制御を妨げてしまうことが問題となっている^[3].本研究では、動 的リテンションによる壁からの粒子放出機構を理解し、粒子放出が プラズマ密度に与える影響を理解することを目的として、まずは超ご吸 蔵された水素原子と炉や粒子に対する0次元モデルを構築し、九州大 学応用力学研究所実験装置QUEST^[4]を想定した系において妥 当性の検証を行った.また、より詳細な解析を行うため、2次 元中性粒子輸送モデルを作成し初期計算を行った.今後、本モデ ルと研究室にて開発済みの2次元プラズマ流体モデル^[5]とを統合 することにより、動的リテンションが炉心プラズマ密度に与える影 響を評価することが可能となると考えられる.

2. 0次元壁粒子密度計算モデル

プラズマ対向壁と炉内を想定した2つの領域で0次元的 に粒子バランスの式の数値解析を行った.式(1)に、プラズ マ対向壁内の粒子バランスの式を、式(2)に粒子種jの密度 n_iに関する方程式を示す.

$$\frac{\mathrm{d}n_{\mathrm{H}_{\mathrm{wall}}}}{\mathrm{d}t} = \frac{\Gamma_{\mathrm{in}}}{d} - \frac{2k}{d}n_{\mathrm{H}_{\mathrm{wall}}}^2 \tag{1}$$

$$\frac{\mathrm{d}n_j}{\mathrm{d}t} = \sum R_{\mathrm{gain}} n_k n_l - \sum R_{\mathrm{loss}} n_m n_j - \left(\frac{n_j}{\tau_j}\right) + S_j \qquad (2)$$

式(1) において、 $n_{H_{wall}}$ は壁における単位体積あたり のH 原子数, Γ_{in} は炉内から壁への粒子束, k は放出率に関 わる係数, d は粒子が吸蔵される壁(再堆積層)の厚さと した、ここで、右辺第一項目で表される壁への粒子寄与は、 式(2)の右辺第三項の輸送損失項と、荷電交換反応によっ て生成した高速のH 原子を考慮している.また,壁から の粒子放出率は、再結合による熱脱離が支配的であると仮定し た^[4]. 式(2)において, R_{gain}, R_{loss}は粒子種j の生成, 消滅の 反応レート係数であり、 τ_i は輸送によるjの損失時間、 S_i は注入や排気,壁からの寄与などによる j の増減レートを 表している. 炉内に存在する粒子種は*j*=e⁻,H⁺,H⁺,H⁺,H,H₂ を考慮し、H 原子に関しては、QUEST実験との比較を行 うため, Hα 線発光強度計算に必要である電子状態 n=5 まで考慮した解析を, 衝突輻射モデルを用いて行った. また, τ_i, k は実験と合うように定めた. 解析においてはQUEST装 置を想定して電子温度を10 eV とし、実験^[4]と同様の条件 で燃料粒子を系内に与えた.

子放出率kの値を2つの場合によって解析することで,壁吸 蔵粒子数のk依存性を示している.kの値が大きい場合 は, 飽和までの時間が短く,時刻tの値が小さいときには 壁吸蔵 粒子数の様子に差は見られないことがわかる.また, Fig.2 に は実験によって得られた壁吸蔵粒子数の壁温度依存性を示 す.これらより,本モデルにおけるパラメータkと,実験に おける壁温度の対応が確認できる.しかしながら,本解析で は粒子輸送や,壁粒子密度 $n_{H_{wall}}$,再堆積層の厚みdの空間 分布などが考慮されないことが課題である.





Fig. 2 Wall temperature dependence of H atom wall-inventory^[4].



3. 結果·考察

Figure 1 は、壁吸蔵粒子数の時間発展を表し、炉内への粒

Fig .3 Simulation model and numerical mesh for the neutral transport simulation.



Fig. 4 Assumed background plasma condition in a limiter configulation.

4. 2次元中性粒子輸送モデル

先に述べた0次元壁粒子密度計算モデルの課題より,二次元 中性粒子輸送モデルを作成し,初期計算を行った.本モデル は,QUEST装置内の H や H₂の軌道を解析し,衝突をモ ンテカルロ的に扱うモデルである.シミュレーションは QUEST装置を想定したFig.3 に示す系で行った.壁面に示した 点から時間ステップdt = 10^{-7} s ごとにH₂ テスト粒子を入 射し,定常とみなせる状態(t = 3 ms)まで反復した.なお, 背景電子の密度,温度の分布はFigure 3 のように与え,考慮した 反応を表1に示した.また,入射分子の速度は温度0.01 eVの Maxwell分布から抽出し,壁に入射した粒子は簡単のため消 減するとした.

5. 結果·考察

Figure 5 はそれぞれ, t = 3 ms における H_2 と H のテス ト粒子数分布を表している. Figure 5 左図より,壁から放出 された H_2 が,最外殻磁気面に達すると速やかに反応し,解離し ていることが確認できる.また,Fig. 5 右図より,最外殻磁気 面付近で生成したH 原子がプラズマ内部でイオン化した り,壁方向に拡散してゆく様子が確かめられる.装置内側 壁付近におけるH の数が少ないのは,発生したH が速やか に壁へ入射し,消滅しているためであると考えられる.



Fig. 5 The distribution of H₂ (top) and H (bottom) Monte Carlo test particles in the quasi steady state.

6. 結論と今後の方針

動的リテンションをシンプルに表現した0次元密度計 算モデルを用いて壁吸蔵粒子数を解析し、QUEST 実験に おける壁温度に対応する粒子放出係数k を調査し、定性的 な傾向を再現した.しかし、レート方程式における輸送損失時間で の値はパラメータとして与えた.従って、さらなる詳細な 実験との比較を進めるため、2次元中性粒子輸送モデルを構築 し、初期計算を行った.これにより、装置内や壁の空間的な分布を 考慮できるようになり、今後プラズマ流体モデル^[5]と統合する ことによって、プラズマ密度に与える影響の解析が可能とな る.また、レート方程式において考慮した荷電交換などの反応 種を2次元解析に用いること、さらに開発済みの衝突輻射モデル (下記本研究に関する成果参考)を適用することで、 QUEST 実験との比較を行う予定である.

参考文献

- [1] S.Brezinsek, et al, Nucl. Fusion, 53(2013)083023.
- [2] M.Sakamoto, J.Plasma Fusion Res.Vol.84,No.12(2008).
- [3] E.Tsitrone, Journal of Nuclear Materials 363-365 (2007).
- [4]本田拓巳,九州大学大学院修士論文(2014).
- [5]古田哲郎,慶應義塾大学大学院理工学研究科基礎理工 学専攻修士論文(2013).

本研究に関する成果

1. 国内講演会発表

- (1) 岡本浩輔,矢本昌平,畑山明聖,花田和明,「プラ ズマ・壁相互作用を考慮した核融合プラズマ粒子バ ランスの解析」第11回核融合エネルギー連合講 演会九州大学伊都キャンパス・椎木講堂,2016年 7月14日-7月15日.
- Q 阿部和広,宮本賢治,柴田崇統,畑山明聖,「熱パルスに対するデタッチメントプラズマの動的応答解析」第32回プラズマ・核融合学会年会,名古屋大学東山キャンパス・豊田講堂,2015年11月24日-11月27日.
- (3) 阿部和広, 植田翔子, 武智さゆり, 畑山明聖, 「非接触プラズマを対象とした運動論的なプラズマー中性粒子相互作用モデリング」第 33 回プラズマ・核融合学会 年会, 東北大学青葉山キャンパス, 2016年11月 29日-12月2日.

Fe-Mn および Fe-Ni モデル合金における照射硬化促進機構の解明

京都大学エネルギー理工学研究所 藪内 聖皓、木村 晃彦

1. 目的

鉄鋼材料における Mn および Ni は、オーステナイト形成元素としての役割が良く知られている。核融 合炉の構造材料として使用が期待されている鉄鋼材料においては、低放射化対応として、Ni を Mn に置 き換えて合金設計されている。一方、Fe-Mn 合金は、他の 2 元系鉄基合金に比べ、照射硬化量が極めて 大きく、照射脆化が促進される傾向を示すため、Mn 添加が及ぼす照射硬化への影響については国際的に 高い関心がもたれている。

Mn による照射硬化促進の機構としては、Mn が空孔あるいは格子間原子と結合し、それが核となって、 Mn 析出物を形成することが考えられるが、その詳細は不明である。我々は、ナノサイズの Mn 析出物が 格子間原子型の転位ループ上に析出すると仮定し、イオン照射した Fe-Mn 合金を透過電子顕微鏡により 観察してきたが、Mn 析出物のサイズが 1 nm と極めて小さいため、Mn 析出物と転位ループの相対位置関 係についてはいまだ確認されていない。

そこで本研究では、九大応力研に導入された高分解能分析電子顕微鏡(管理区域内設置)を用い、原 子炉照射した Fe-Mn 合金の微細組織観察をおこない、格子間型転位ループとナノサイズの Mn 析出物の 相対位置関係を明らかにすることを目的とする。

2. 研究成果の概要

1) 経過

圧力容器鋼の照射影響評価のための基礎研究として、鉄基モデル合金における照射脆化挙動に及ぼす 中性子照射の影響を高照射量(高経年対応)まで調査した結果、Fe-Mn 合金では、高照射領域において のみ、照射硬化量が顕著に増大することが判った。高経年化に伴う照射脆化の促進が懸念されることか ら、この現象を「Mn 影響」と名付け、その発現機構に関する研究を実施している。この Mn 影響は、鉄 格子の中に均一に固溶している Mn 原子と照射によって形成された Vacancy (V:空孔)や Interstitial

(I:格子間原子)との強い相互作用に起因すると考え られるが、その詳細は明らかではない。特に、V-Mn 相 互作用と I-Mn 相互作用のどちらが重要になるかにつ いては、照射脆化予測に大きな影響を及ぼすことから、 早期の解決が望まれている。

2) 照射実験

イオン照射(290℃、1dpa)により、Fe-1Mn および Fe-1Ni 合金は、顕著な照射硬化を示し(図1)、透過型 電子顕微鏡による微細組織観察から、いずれも黒点状 の微細な照射損傷組織が形成されていることが判明し ている。これらの損傷組織を TEM 内で焼鈍しながら直 接観察すると、500℃まではほとんど変化しないが、 550℃になるとそのサイズが大きくなることを既に報 告している。純鉄に比べると、粗大化開始の温度が高



温側にシフトしており、Fe-1Mn 合金では、格子間原子の易動度が純鉄に比べ低下していると考えられる。 なお、平成 28 年度は新規導入の TEM の性能評価ならびに今後の中性子照射試料の観察に向けて RI 輸送 に関する手続等の確認を行うとともに、「Mn 影響」メカニズムについて検討した。

3.「Mn 影響」のメカニズム

Fe-Mn 合金と Fe の照射損傷組織を比較すると、Fe-Mn 合金において転位ループの微細化が顕著に生じ ていることが判明している。転位ループは、格子間型であることが判明しており、微細化の理由として は、格子間原子あるいは微細な転位ループの移動度が Mn 原子による捕獲効果により、低下しているこ とがあげられる。すなわち、ここでは Mn 原子と Fe 格子間原子あるいは微細な格子間型転位ループとの 相互作用により、それらの移動が Mn 原子により、抑制されたために、核生成サイト数が増加し、成長が 遅れたと考えることが可能である。この様子を Fe-Mn 合金と純鉄と比較してモデル化して示すと図2の 様になる。

一方、最近の高分解能分析電顕による TEM 観察によれば、イオン照射した Fe-Mn 合金において、板状の Mn 集合体の形成が認められている。Mn 原子の集合には、Mn-V 対や Mn-I ダンベルなどの移動が必要になる。また、Mn 原子単独の効果の他にも、酸素原子の関わりを示唆するデータも存在する。今後は、不純物酸素量の影響についても調査する。

4. まとめ

今後 JMTR や BR-2 炉を用いた中性子照射実験により、Mn 添加効果を低合金鋼の中性子照射影響評価に 取り込んでいくための基礎的知見が得られると期待される。平成 29 年度は平成 28 年度に PIE が可能に なった合金試料を九州大学に搬送し、高分解能 TEM を用いて観察する。

5. 成果発表

東北大学大洗センターでの照射試料の分別が遅れたため、平成 28 年度に当該実験を実施することが できなかった。今年度は特になし。



タングステン合金の熱負荷特性に及ぼす添加元素の影響

京都大学原子炉実験所	徐	虬
九州大学応用力学研究所	徳永和]俊

1. 目的

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。一方、低温脆化、再結晶脆化及び照射脆化がタングステンの使用の問題点となっ ている。これら脆化に関する問題を解決するために、われわれは放電プラズマ焼結する方法を用いて、超 微細結晶粒を有するタングステン合金を開発した。開発した合金の力学特性、熱特性を評価すると共に、 第一壁材料として低エネルギー水素・ヘリウムとの相互作用の研究も必要である。応用力学研究所には 整備されている電子ビーム熱負荷実験装置と材料実験用試料搬送装置があるので、目的とする研究進め るうえで最適である。本研究では、開発した炭化タンタルを添加したタングステン合金に対して、電子ビ ーム熱負荷装置を用い、繰り返し熱応力による材料表面の損傷を調べた。

2. 実験方法

1.0、2.0 と 4.0wt%の TaC 粒子(粒子サイズ約 50nm、純度 99.9%)を加えたシュウ酸水溶液にパラタ ングステン酸アンモニウム(NH₄)₁₀H₂W₁₂O₄₂・4H₂O (APT)溶解した。170[°]Cのメチルシリコーン油浴中 に上記の溶液を攪拌しながら蒸発させ、W/TaC の前駆体を得た。粉砕した前駆体を高純度水素を流した 管状炉内に 5[°]C/分の速度で 800[°]Cまで加熱した。また、200、500 及び 800[°]Cでそれぞれ 30、60 及び 60 分に保持した。加熱した粉末 W/TaC を昇温速度と同じ速度で室温まで冷却した。その後、W/TaC 粉末 を直径 50mm のグラファイトダイスに詰め、圧力をかけながら高温で固める。この方法で TaC を添加し たタングステン合金を得た。

3 種類の TaC を添加したタングステン合金から厚み 2mm、直径 7mm の試料を切り出した。試料の表面を粗研磨から鏡面研磨まで実施した。応用力学研究所に設置された電子ビーム熱負荷発生装置を用いて、繰り返し熱負荷実験を行った。電子ビームエネルギーは 20keV で、ビーム径は約 3mm であった。 パルスの幅は 9.5 秒 (beam on: 2 秒、beam off: 7.5 秒) であった。試料表面の最高温度を 1250℃に電子 ビームの電流を調整し、100 パルスの照射を行った。熱負荷実験の後に、走査型電子顕微鏡を用いて、試 料の表面を観察した。

3. 実験結果と考察

表に TaC を添加したタングステン合金の密度、粒径などを示す。参考のため、同じ方法で作製した純 W のデータも示す。他の合金に比べ、W-1%TaC の密度及び相対密度と純 W の差が最も小さいことが分 かった。また、TaC の添加量の増加と共に、粒径のサイズが小さくなる。熱負荷実験結果を理解するた めに、TaC を添加したタングステン合金の熱伝導率の温度依存性を調べた。図1に、W-1%TaC、W-2%TiC 及び W-4%TiC の熱伝導率の温度依存性を示す。比較のために、純 W の結果も示される。W と W-TaC 合金においては、温度の上昇と共に、熱伝導率が下がる。純 W に比べ、W-1%TaC の熱伝導率が高い、 逆に W-2%TaC と W-4%TaC の熱伝導率が低いことが分かった。

図 2—5に走査型電子顕微鏡(SEM)による熱負荷実験を行った W、W-1%TaC、W-2%TaC 及びW-4%TaC の表面観察結果を示す。純W(図 2)とW-4%TaC(図 4)に大きな亀裂が発生した。一方、W-1%TaC とW-2%TaC には小さな亀裂しか発生しなかった。特に、W-1%TaC の耐熱性が良かったことが分かった。このことからTaC 粒子を多量に添加すると、逆にタングステン合金は脆くなることを示唆している。

4. まとめ

湿式化学プロセス(Wet Chemical Process)を用いて、放電プラズマ焼結する方法で3種類のTaCを 添加した高密度のタングステン合金の開発を成功した。物性実験及び熱負荷実験の結果からW-1%TaC の熱伝導率と耐熱性が最も良いことが分かった。来年度以降に、今年度に行われた研究を踏まえ、タン グステン合金における非定常熱負荷ディスラプションによる材料表面の損耗・損傷をさらに詳細に調べ る予定である。また、集束イオンビーム加工装置(FIB)を用いて、材料表面の損傷部分を切り出し、透 過型電子顕微鏡により組織の詳細を調べる。

表 W及びW合金の密度と粒径

	W	W−1%TaC	₩-2%TaC	W-4TaC
密度	18.8	18.6	17.9	17.4
(g/cm^3)				
相対密	97.2	96.5	93.1	91.4
度(%)				
粒径	6-25	8-16	1.5-6	0.5-8
(µm)				
平均粒	15	12	3	1.5
径(µm)				



図1 熱伝導率の温度依存性



図2 SEM による熱負荷実験を行った Wの観察



図 3 SEM による熱負荷実験を行った W-1TaC の観察



図 4 SEM による熱負荷実験を行った W-2TaC の観察



図 5 SEM による熱負荷実験を行った W-4TaC の観察

磁化プラズマの流体シミュレーション

神戸市立工業高等専門学校 電気工学科 西村 征也

【研究目的】

磁場閉じ込め方式の核融合装置や天体近傍の宇宙空間においては、高温プラズマが背景磁場に磁化さ れた状態にある。このような磁化プラズマにおいては、磁気再結合や圧力駆動型モードなどの電磁流体 力学的不安定性が発生する。磁場閉じ込め核融合装置においては、ELM と呼ばれる圧力駆動型モードに よる激しい熱と粒子の乱流輸送が存在する。ELM を抑制するために、外部から共鳴磁場摂動(以下、RMP) を印可する研究が精力的に進められている。RMP は強制的に磁気再結合を起こして磁気島やストキャス ティック層を形成するが、この過程を RMP のしみ込みと呼ぶ。プラズマ流が存在する場合には、プラズ マ流による遮蔽効果が存在するため必ずしも RMP のしみ込みが起きるとは限らない。既存の理論モデル は RMP のしみ込み閾値の実験計測を定量的に説明できないことが問題となっており、基礎研究の充実が 期待されている。本研究においては、RMP による強制磁気再結合、プラズマフロー、圧力駆動型モードを セルフコンシステントにシミュレーションするための 流体シミュレーションコードを開発する。

【研究方法】

磁化プラズマを記述する簡約化 MHD 方程式をモデルとして用いる。モデルは、渦度方程式、一般化 されたオームの法則、圧力の発展方程式によって構成される。ポロイダル断面をスラブ近似し、小半径方 向とポロイダル方向の2次元空間において、簡約化 MHD 方程式の初期値境界値問題を数値的に解くコ ードを開発する。コードにおいては、空間微分を 2 次精度の有限差分で近似し、時間積分を4次精度の ルンゲクッタ法で求めるアルゴリズムを用いる。簡約化 MHD 方程式においては渦度から流れ関数(静電ポ テンシャル)を求めるためのポアソン方程式を数値に解くルーチン(以下、ポアソンソルバ)必要が ある。

【研究結果】

本年度実施した研究について、以下の 4つの内容を報告する。

1. ポアソンソルバの高速化

年度当初においては、ヤコビ法を用いたポアソンソルバの並列化効率の改善を試みた。通信不可を 減 らすためにノンブロッキング通信などを適用しても、並列化効率はほとんど改善されなかった。そこで、 ポロイダル方向の周期性を活用し、ポロイダル方向の空間微分を離散フーリエ変換によって処理するアル ゴリズムを試みた。このアルゴリズムの実装においては、兵庫県立大学大学院シミュレーション学研究科の沼 田龍介准教授の協力を得た。離散フーリエ変換に対してはFFT を用いた。スペクトル分解されたポアソン 方程式は、小半径方向に座標変数に関する三重対角行列を係数行列 に持つ連立一次方程式となる。 従って、LU 分解の手法によって高速に解くことが可能である。以上の実装は順調に進み、ポアソンソ ルバの高速化に成功した。

2. オームの法則の実装とテアリングモードのベンチマーク

モデルを渦度方程式とオームの法則を連立するものへと拡張した。テアリングモードが不安定となるハリスシートと呼ばれる磁場平衡に対して、シミュレーションを行い、テアリングモードの線形成長

率の電気抵抗依存性について、解析解と数値解のベンチマーウを行った。

3. 共鳴磁場摂動の実装と強制磁気再結合のシミュレーション

RMP を実装するためには、プラズマ-真空境界において有限の径方向磁場揺動が存在するように、ポロ イダル磁束揺動の境界条件を変更する必要がある。この径方向磁場揺動がプラズマ内部までしみ込み、共 鳴面(有理面)において強制磁気再結合を起こす。はじめに、テイラーの問題として知られる、テアリン グ安定な磁場平衡に対して単一のフーリエ成分の RMP を考えるモデルについてシミュレーションを行っ た。強制磁気再結合が発生し、磁気島が形成される様子が観察された。磁気島の飽和幅は真空磁気島と呼 ばれる解析モデルによって予測される値と一致することが確認された。次に、平衡にプラズマフローがあ る場合について考えた。この場合、RMPによって歪んだプラズマ-真空境界に沿ってプラズマフローが流れ るように境界条件を適切に設定する必要がある。コードにおいては、Militello('09)において用いられて いる境界条件を実装した。シミュレーションの結果、プラズマフローが存在する場合に、磁気島の飽和幅 が抑制されることが観察された。

4. 圧力の発展方程式の実装と初期的なシミュレーション結果

圧力駆動型 MHD 不安定性を扱うために、圧力の発展方程式をコードに実装した。径方向の磁場曲 率が bad curvature の方向に十分強い場合は、抵抗性インターチェンジモードが励起されることが 観察された。RMP とプラズマフローを含まない場合には、抵抗性インターチェンジモードはポロイダ ルモード数が m=1,2,3 などのモードが不安定となる。RMP とプラズマフローを含む場合には、RMPのし み込みに対する抵抗性インターチェンジモードの効果を調べることが可能である。シミュレーションの 結果、抵抗性インターチェンジモードは RMP のしみ込みを促進する効果があることが分かった。

【まとめと今後の課題】

RMP による強制磁気再結合、プラズマフロー、圧力駆動型モードをセルフコンシステントにシミュ レーションするための流体シミュレーションコードを開発した。コードの開発状況と初期的なシミュレ ーション結果について報告した。本年度はポアソンソルバの拡張を中心に行ったため、シン グル CPU 用 のコードを開発が中心となった。NEC SX-ACE における並列計算用のコードへの拡張は今後の課題で ある。例えば、FFTをFTW にすることや、スペクトル分解されたポアソン方程式の LU 分解による行列解 法を並列化することが今後の研究の方向性として考えられる。

【学会発表リスト】

- [1] 西村征也, 共鳴磁場摂動によって駆動される強制磁気再結合, 日本物理学会2016 年秋季大会, 15aKA-12, 2016.9.15
- [2] 西村征也, 共鳴磁場摂動のしみ込みに対するインターチェンジモードの影響, 第 33 回プラズマ核融合 学会年会, 29aP34, 2016.11.29
- [3] 西村征也, 簡約化 MHD モデルを用いた共鳴磁場摂動への非線形プラズマ応答のシミュレーション, MHD に関するNIFS ネットワーク型研究合同打ち合わせ, 2016.12.16

水素プラズマスパッタ法で形成される多孔質金属膜への水素混入と反跳水素の寄与

九州大学大学院総合理工学研究院 片山一成

【緒言】

水素は利用時に環境負荷が小さいことから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開発が進められている。水素の安全取扱の観点や高機能材料開発の観点から、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等が高い水素吸蔵特性を有するのに対し て、白金やタングステン(W)等はほとんど水素を吸蔵しないことが知られている。しかし報告者らの研究により、 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。また、形成後に重水素プラズマを照射すると、比較的高濃度に重水素が保持される ことも観測されている。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 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 れた水素の多くはナノスケールの微結晶粒の粒界や空隙に捕捉されていると推定される。このような知見は、将来 水素貯蔵用機能性材料の開発に進展をもたらす可能性がある。しかしながら、成膜過程での水素取込機構について は十分には理解されておらず、微細構造と水素吸蔵・放出挙動との関係性や水素取込に寄与する放電中の水素形態 について詳しく調べる必要がある。

スパッタ・成膜過程では、膜成長表面はワーキングガスである水素ガス、プラズマからの水素イオン、スパッタ ターゲットからの反跳水素等にさらされる。しかしながら、それぞれの水素が W 膜形成過程での水素捕捉にどの ように寄与しているかについては明らかとなっていなかった。一昨年度の応用力学研究所との共同研究において、 プラズマスパッタ装置内に基板設置ステージを取り付け、異なる環境下における W 堆積量と水素捕捉量を調査し た。その結果、スパッタターゲットからの反跳水素の影響が支配的であることが示唆された。本研究では、成膜過 程での水素取込機構の理解を深めるため、異なる水素ガス圧での実験を行った。また、重水素プラズマを用いた成 膜を行い、水素同位体放出特性を調査した。

【実験方法】

RF 水素プラズマにより W 板をスパッタリングして、W 基板及び石英基板上に W 薄膜を作製した。スパッタター ゲット、基板設置ステージ及び基板の位置関係と水素形態 のイメージを図1に示す。水素形態モデルとして、スパッ タ装置内には、水素分子、水素イオン、反跳水素の3つが 存在すると考える。また、基板の設置位置として、以下の 3つを対象とした。

B(Bottom)領域:プラズマとは接さず、スパッタターゲット が見通せる。

P(Plasma)領域:プラズマと接し、スパッタターゲットが見 通せる。

S(Shadow)領域:プラズマとは接さず、スパッタターゲット が見通せない。

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接地した。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

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、排気コンダクタンスを調

整して、ガス圧を制御した。

上部の RF 電極に設置し、基 Table 1 軽水素及び重水素プラズマスパッタによる成膜条件 板としてW箔(10mm×5mm、 厚さ 0.2mm) 及び石英片 実験 1 2 (10mm×5mm、厚さ1mm)を ターゲット ステージの各位置に設置し



Target W plate Cathode electrode ~ Earth shield Plasma facing region Plasma Plasma facing facing region region Molecular hydroge Shadow Ionized hydrogen region Reflected hydrogen Sputtered tungsten Shadow Anode electrode Bottom W or quartz substrate region region

Fig.1 スパッタターゲット及び基板の位置関係と 水素形態のイメージ図

ガス圧が安定した後、100WのRF電力を印加して放電を 開始し所定の時間、放電を継続した。昨年度までに軽水素 ガス10Pa、200Paでの成膜を行い、今年度は2Paでの成膜 を行った。加えて、重水素ガス2Pa,10Pa,200Paでも成膜 を行った。成膜前後の基板質量変化をマイクロ電子天秤 で測定し、W堆積量を算出した。成膜条件をTable1にま とめる。

TDS 分析により、W 膜からの水素放出挙動を観測した。 W 膜付 W 基板を石英管に充填し、真空雰囲気下で 1000℃ まで 1℃/min で等速昇温した。放出された水素同位体は、 四重極質量分析計で測定した。W 膜付石英基板は、SEM 観察に用いた。P 領域とB 領域では、µm オーダーの表面 構造には違いが見られなかった。S 領域では堆積量が少な く明瞭な表面構造観察ができなかった。

【結果及び考察】

Fig.2 軽水素プラズマによる成膜時のターゲットスパッタ 速度と成膜速度の圧力依存性を示す。圧力の増加に伴いス パッタ速度が増加した。これは、イオンフラックスの増加に 因ると考えられる。一方、成膜速度は P 領域と B 領域で圧 力依存性に違いが見られた。P 領域での成膜速度は 2Pa よ りも 10Pa の方が速いものの 200Pa では低下した。スパッタ W 粒子は、高いエネルギーで比較的弾道的に飛来するもの と、水素分子との衝突によりエネルギーを失い散乱を経て 飛来するものがあると考えられる。200Pa では散乱の効果が 大きくなり、成膜速度が低下したと考えられる。B領域での 成膜速度は 2Pa と 10Pa では変化がないものの 200Pa では低 下した。B 領域はステージの形状により散乱を経て飛来す る W 粒子数が低減され、弾道的に飛来する W 粒子の割合 が多いと考えられる。2Paと10Paでは水素分子との衝突に よる W 粒子のエネルギー低減効果が小さく成膜速度に影 響を与えないが 200Pa まで圧力が高まると W 粒子がエネ ルギーを失い、散乱効果により成膜速度が低下したと考え られる。S 領域では成膜量が少なく、圧力依存性を議論す るためには成膜時間をより長くする必要がある。Fig.3 に P 及びB領域で形成されたW膜からのD2及びHD放出挙動 を示す。いずれの膜からも200℃付近と400℃付近に放出ピ ークがみられた。P 領域の方が低温ピークが大きく、B 領 域の方が高温ピークが大きいことがわかった。また、P 領 域に比べて B 領域の方が放出開始温度が低いこともわかっ た。Fig.4 に成膜過程での水素捕捉モデルを示す。放出開始 温度は、重水素捕捉時の温度を反映していると考えられる ことから、B 領域に比べて P 領域の膜成長表面温度が高く







維持されていたことを示唆する。これはP領域がプラズマに接しており、プラズマからのエネルギー付与による ためと言える。表面層温度が高く維持されることで入射された重水素の拡散が促され、より安定なサイトに捕捉 された結果、B領域に比べてP領域の方が高温側のピークが多くなり、低温側のピークは少なくなったと考えて いる。今後B領域に外部加熱を行うなど、水素捕捉モデルの妥当性を検証するための実験を行う予定である。

【成果発表】

 [1] 野口瑞貴、片山一成他、"水素プラズマスパッタ法におけるW堆積層形成過程での水素捕捉",第11回核 融合エネルギー連合講演会、2016年7月13-14日、九州大学伊都キャンパス.
 本研究は、九州大学応用力学研究所の共同利用研究の助成を受けたものです。

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ックス

静岡大学学術院理学領域 大矢恭久

【目的】

核融合炉プラズマ対向材料であるタングステン(W)には、炉運転中に中性子や水素同位体、 ヘリウム(He)などの高エネルギー粒子に曝され、水素同位体捕捉サイトとなる欠陥が導入され るとともに、Heバブルが形成される。実炉環境下での水素同位体ダイナミクスを理解するため、 照射欠陥およびHeバブルの相互作用が水素同位体滞留挙動へ及ぼす影響を明らかにすることが 重要である。また、W中のHe滞留挙動についても重要である。さらに、実炉の運転環境下では、 Wに水素同位体とHeに同時に照射される。そのため、本研究では種々のエネルギー、照射量を 制御したHeと水素同位体を同時照射したWに対して、九州大学応用力学研究所の透過電子顕 微鏡(TEM)を用いて照射欠陥およびHeバブルの挙動の観察を行い、水素同位体およびHeの 滞留挙動を昇温脱離法(TDS)によって評価することで、水素同位体およびHe滞留挙動に及ぼ す照射欠陥およびHeバブルの影響を明らかにした。

【実験】

試料としてアライドマテリアル社製歪取加工済多結晶 W(10 mm⁹,0.5 mm¹)を用いた。高真空 下(<10⁻⁶ Pa)、1173 K で 30 分間加熱処理することで不純物除去を行った。この試料に対して静 岡大学の 3 種イオン同時照射装置を用いて、He⁺を照射エネルギー3.0 keV、フラックス 1.0×10¹⁶~1.0×10¹⁸ He⁺ m⁻² s⁻¹、フルエンス 1.0×10²⁰ ~ 1.0×10²² He⁺ m⁻²、H₂⁺または D₂⁺を照射エネル ギー1.0~3.0 keV、フラックス 1.0×10¹⁸ H⁺ (D⁺) m⁻² s⁻¹、フルエンス 1.0×10²² H⁺ (D⁺) m⁻² まで照 射した。その後、静岡大学の TDS 装置にて、昇温速度 30 K min⁻¹ にて 1173 K まで TDS を行い、

D 滞留挙動評価を行った。また、核融合科学研 究所(NIFS)の高温 TDS 装置にて、昇温速度 30 K min⁻¹ にて 1673 K まで TDS を行い、He 滞 留挙動の評価を行った。さらに、九州大学応用 力学研究所にて TEM 観察を行い、照射欠陥お よび He バブルの成長・回復挙動を評価した。

【結果・考察】

図1にHeフルエンス1.0×10²¹He⁺m⁻²でHe⁺ 単独照射したWとHe⁺-H₂⁺同時照射したWに おけるHe TDS スペクトルを示す。過去の研 究より、He の TDS スペクトルを三つの脱離 温度領域を分けた[1]。室温から600Kまでは



図1 He 単独照射とHe⁺-H₂⁺同時照射 W におけ る He TDS スペクトル(He フルエンス: 1.0 ×10²² He⁺ m⁻²)

原子空孔による捕捉、600~1000 K は転位ルー プによる捕捉、1000 K 以上は He バブルの崩壊 による He の放出であると帰属した。He⁺単独 照射 W に比べ、He-H₂⁺ (3.0 keV) 同時照射 W では 1000 K 以上温度領域で He の放出量が大 きく増加した。このことから、同時照射によっ て、He 単独照射より多くの He バブルが形成す ることが示唆された。さらに、1.0 keV の H₂⁺照 射によって、900 K 付近の放出ピークが増加し、 1400 K 以上の He 放出が減少した。このことか ら転位ループに He が捕捉されることで He 拡 散・集合が抑制されるため、He バブルサイズ が小さくなったことが示唆された。

図 2 に種々の He フルエンスにて He⁺- H₂⁺ (3.0 keV) 同時照射 W の TEM 写真を示す。 過去の研究により、He フルエンス 1.0×10^{21} He⁺ m⁻²の単独照射によって He バブルが飽和する ことが明らかとなっている[2]。図 2 から、He フルエンス増加により、He バブルのサイズお よび密度が大きく増加することがわかった。 これらの結果より、He 単独照射 W に比べて、 He⁺- H₂⁺同時照射下 W 中の He 滞留量は He フ ルエンス 1.0×10^{21} He⁺m⁻²では飽和せず、He フ



図 2 異なる He フルエンス下に He⁺-H₂⁺同時照射し た試料の TEM 写真



図 3 He⁺-3.0 keV D₂⁺同時照射 W における D₂の TDS スペクトル

ルエンスの増加とともに、He滞留量も増加することが示唆された。

図 3 に He⁺-3.0 keV D₂⁺同時照射 W における D₂の TDS スペクトルを示す。He フルエンス 1.0×10^{20} He⁺m⁻²から 5.5×10^{21} He⁺m⁻²までの領域においては、He フルエンスの増加に伴い D 滞留 量が増加したが、He フルエンスを 5.5×10^{21} He⁺m⁻²以上においては、D 滞留量は大きく減少した。 こレハ He フルエンス増加に伴う転位ループ等の照射欠陥の増加により D 滞留量が増加するこ とを示唆している。しかし、高 He フルエンス (5.5×10^{21} He⁺m⁻²以上) では、図 2 に見られるよ うに W 表面における He バブルの密度増加に伴う、D 捕捉サイトの減少により、D 滞留量が減 少したと示唆された。

参考文献

- [1] M.Tokitani, et al., J. Nucl. Mater. 463(2015)91.
- [2] M.Tokitani, et al., J. Nucl. Mater. 329-333(2004)76.

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、茨城大学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、九州大学応用力学研究所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

供試材料は、オーステナイト系ステンレス鋼の SUS304L およびアルミニウム合金の A7075-T6 を 採用した。特徴として、SUS304L 材は高強度鋼の欠点である応力腐食割れや粒界腐食等の発生の抑 制が挙げられる。A7075-T6 材はアルミニウム合金中で最高強度を有していることが挙げられる。ま た、SUS304L 材には、構造機器を製作する際の塑性加工を考慮して、加工ひずみ 45[%]と60[%]をそ れぞれ与えた。本実験に使用する試料形状は、両材料共に 5×5[mm]の正方形で、SUS304L 材は 厚み 0.3[mm]、A7075-T6 材では 0.6[mm]とした。それらの材料表面は、湿式研磨(~#2000)とバ フ研磨(~#0.3µm)を施し鏡面に仕上げた。その後、H₂SO₄ 水溶液(pH=2.0, 触媒: 0.1[mass% NH₄SCN])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/cm²]、30[min]の電 気分解を利用した水素チャージを実施した。また、試験片中央(φ 4 mm)には、銅イオン(Cu²⁺)を1dpa 照射した。

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、試料表面から放出された水素を、写真用乳剤に含まれる臭化 銀の擬似的な感光現象により可視化する手法である。HMPTの原理概略図を Fig. 1 に示す。金属材 料から放出される水素は、化学的に原子状態となっているため、放出された水素は、臭化銀中の銀イオ ンと(1)式に示すような還元反応を起こして金属銀を生じる。

$Ag^++H \rightarrow Ag^+H^+ \cdot \cdot \cdot (1)$

その後、現像処理により金属銀を安定化し、定着処理により未反応の臭化銀粒子を溶解、除去する。こうして得られた試料表面上の SEM 観察と EDXS 分析を行い、銀粒子の位置と量から水素放出挙動を解明する。^{1,2)}

3. 実験結果及び考察

Fig. 2 は、陰極チャージを施し、HMPT 試験後の SEM 観察画像を示す。一部矢印で示した白色の 粒子が銀粒子である。図中の(a)はA7075-T6 の母材、(b)はA7075-T6 の照射損傷材のSEM 像を示す。 母材では、銀粒子が局所的に点在し、粒界が水素の主な放出経路であることが分かった。照射損傷材では、 銀粒子が粗大化し、照射損傷による転位密度の増大により、粒内からも水素の放出が確認された。銅イオ ン照射により、材料表面層の転位密度が増加して転位ループやボイドが形成され、水素が多量に侵入し、 水素の拡散が早い粒界からだけでなく、粒内からも多量に水素が放出されたと考えられる。

図中の(c)はSUS304Lの母材、(d)はSUS304Lの照射損傷材のSEM像を示す。母材では、水素 放出量が非常に少なく、一部の粒界から局所的に水素の放出が確認された。また、照射損傷材では、粒界や粒内からも水素放出が確認された。銅イオン照射により、材料表面層の転位密度が増大し、転位ループやボイドを形成 し、粒界のみではなく粒内からも水素の放出が起こったと考えられる。





Fig.1 HMPT method.

d. **Fig.2** SEM images after HMPT. (a) A7075-T6, (b) irradiated A7075-T6, (c) SUS304L and (d) irradiated SUS304L materials.

4. まとめ

本研究は、銅イオン照射損傷を施したオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304L 材及びアルミニウム 合金 A7075-T6 材の 2 種類の構造材料について、水素を可視化する手法である水素マイクロプリント法 (HMPT)を用いて、材料表面から侵入及び放出される水素の変化およびその水素のトラップサイトと 照射損傷との関連を調査した。以下に得られた結果を要約して示す。

- (1) SUS304L 材およびA7075-T6 材のHMPTより、母材では、粒界析出物にトラップされた水素が粒 界を通して放出され、照射損傷材では、銅イオン照射により、材料表面層の転位密度が増加し、転位ループやボイ ドを形成して、多量に水素が導入され、粒界のみならず粒内からも水素放出が確認された。
- (2) SUS304L 材の塑性ひずみ材では、すべり線上からも水素放出が確認され、塑性ひずみ照射材では、粒界のみならず粒内やすべり線上からも水素が集積して多量に放出された。

以上の結果から、構造材料が照射損傷と塑性変形を同時に受けた場合には、多量の水素が導入お よび放出されることが明らかとなり、今後、注意が必要であると考えられた。

参考文献

1) 和田、車田、他、第 23 回茨城講演会講演論文集、日本機械学会関東支部,(2015.8.25.日立),133-134.

2) 和田、車田、他、第 24 回茨城講演会講演論文集、日本機械学会関東支部,(2016.8.26.日立),101-102.

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℃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℃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作製し、試験用の小型モックアップ、プロトタイプのモ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。初年度は、要素材の熱負荷特性評価法を確立するために、Wの要素材について熱負荷実験を行い、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、さらに、熱解析と比較することによる定量評価を行った結果について報告した。昨年度は、タングステンをアーマ材とした小型のモックアップについて、強制冷却下における熱 挙動(温度分布等)の実験及び解析を行い結果を検討した。本年度は、さらに熱応力解析を行った結果について報告する。

【実験及び解析】20×20×2.6 mm の低放射化フェライト・マルテンサイト鋼(F82H, Fe-8Cr-2W)の表面にプラズ マ溶射法(PS 法)によりタングステン(W)を 1 mm 被覆した。溶射は大気圧プラズマ溶射法(APS)及び減圧プ ラズマ溶射法(VPS)により行った。それら W 被覆 F82H 材料を、内径 7 mm の冷却管付き高伝導度無酸素銅 (Oxygen Free High Conductivity Copper, OFHC)に冶金接合することによって、テスト用のモックアップを作 製した。図 1 に作製したタングステン被覆低放射化フェライト・マルテンサイト鋼(APS-W/F82H)を冷 却管付き 無酸素銅(OFHC)に接合したモックアップ(APS-W/F82H/OFHC)を示す。作製し た APS-W/F82H/OFHC 及 び VPS-W/F82H/OFHC について、電子ビーム熱負荷による熱応答及び繰り返し熱負荷実験を 行った。また、モックアップの熱応答実験時の定常時における定量的な熱特性の評価を行うために、有限要素法 を用いた熱解析を行った。図 2 に作成したモデルを示す。このモデルでは、冷却管内壁から冷却水への熱伝達 については、冷却管の内径、冷却水の流速及び圧力、入口温度等を考慮することで、温度を関数とした相関式を 用いて導出した熱伝達係数をモデルの冷却管内壁部分に定義した。また、このモデルでは F82H と OFHC 部分に、 温度依存性を考慮した熱伝導率を定義した。ここで、VPS-W の熱伝導率は、W の 30~50%の実測値が報告されて いるので、その中間値を取って W の40%とした。

【結果】 図3 には、熱流束が 3.4 MW/m² の場合の VPS-W/F82H/OFHC に発生する X、Y 及びZ 方向の応 力を示した。X 及びZ 方向に関して、VPS-W 及び F82H 部分にはせん断応力が働いており、F82H の部分 で中心方向に、VPS-W 部分で外側方向に応力が印加されていることが分かる。また、Y 方向に関して、せん 断応力は働かないが、F82H の部分で VPS-W 部と比較してより高い応力が働き、膨張していることが分か る。図 4 には、ミーゼス応力(a)と VPS-W の表面からの深さ方向の距離の関数とした応力(b) を示した。ミ ーゼス応力は、一軸に投影したスカラー値で、破壊強度の評価する際に用いられる。この解析におけ るVPS-W 部の温度は、W の DBTT 以上である。従って、VPS-W と F82H は延性材料として評価すること ができる。その結果、ミーゼス応力により強度特性を評価することができる。計算結果によると、W の引張試 験のデータをそのままあてはめれば、VPS-W 部の応力は弾性限界以下であるが、VPS-W の強度特性は W とは異なっていることから、W の値をそのまま使用し評価することは難しい。また、この温度での F82H の 0.2%耐力は、500 MPa 程度であることから、VPS-W と F82H の界面の F82H の中心付近では、塑性変形は発生 しないもの考えられる。この計算結果では、VPS-W と F82H の界面の中心(A)では、400 MPa の応力が負荷さ れているが、実験では剥離やき裂の発生は観察されなかった。したがって、この VPS-W と F82H の界面は、 同条件の 400 Pa の応力に耐えることができるものと予想される

【まとめ】原型炉の構造材料の候補材料である低放射化フェライト/マルテンサイト鋼 F82H(Fe-8Cr-2W)の 表面に、大気圧プラズマ溶射法(APS)及び減圧プラズマ溶射法(VPS)により、厚さ 1mm のW を被覆した。こ のタングステン被覆 F82H を冷却管付きの無酸素銅(OFHC)に冶金接合し、核融合装置のプラズマ対向材料と しての使用の可能性を評価するために、強制水冷却下における熱負荷実験を行った。また、熱応力解析を行い実 験結果を定量的に評価した。その結果、熱応答実験では、熱流束が増加するに従い、タングステンの表面、F82H 部 及び OFHC 部の温度は直線的に増加した。また、熱流束が、3.2MW/m² で、200 回までの繰り返し熱負荷 試験では、表面形状変化、き裂や剥離は発生せず、健全性が保たれることが分かった。これらの熱応答及び繰 返し熱負荷実験から、PS-W/F82H は原型炉のプラズマ対向材料として、高い熱特性に有することが明らかと なった。また、定常状態における熱応答特性を接合体モデルで再現し、その熱応力解析により実験結果を定量 的に評価できた。



する X 方向(a)、 Y 方向(b)及び Z 方向(c)の応力

の表面からの深さ方向の距離の 関数とした応力(b)

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4報) 極限状態材料の損耗破壊監視計測法の確立を目指して

概要

表記の課題に関連する、最近の共同研究結果について、下記の項目別にその概要を述べる。(1)薄膜 タングステンと、各種高耐力バックプレート材料の 損耗試験、(2)放射のアップコンバージョン法を利 用する新しい温度計測法、(3)関連する各種高耐力 材料のXUVレーザー光による表面損耗解析

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、各種計測装置により、 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。より高い入射強度の電子ビームによる評価 結果や、各種のレーザービーム照射による評価結果 を、既に多く蓄積しているので、これらと、本共同 研究結果の比較を行う。これらの結果を生かして、 極限状態材料の損耗破壊監視計測法の確立を目指す。 これらが本共同研究の最終目標である。

高密度エネルギー入射損耗試験

本年度は、再稼働した電子ビーム装置により、厚 い SiC 板表面の照射をしたが破断したために、ま た、その後装置の修理に入ったために、本格的な照 射実験は次年度回しとなった。材料表面の超高温度 と水冷背面の温度差に伴う急温度勾配と、材料固定 方法の非最適化による過度の機械的ひずみ発生が原 因と推定される。また、前報記載のナノ秒 EUV レー ザーによる照射サンプル材料の詳細な解析を実施し た。内容の中心は、プラズマ対向壁等の候補材料で あるタングステン、SiC、モリブデンの照射と、種々 の方法による照射後の損耗測定などであるが、詳細 は文末リスト中にある本年度の関連既発表論文を参 応用ながれ研究所、レーザー技術総合研究所 糟谷 紘一

照する。これらは、むしろ厚い材料の表面損耗であ る。また、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をこれ までに行ったが、市販のパーツを組み合わせたモニ ターの完成に向けた種々の検討と準備研究を最近実 施したので、その一部を以下で述べる。これらは、 むしろ薄い材料表面損耗の、実機への応用である。

厳しい環境下にある内壁検査のための光学モニタ ーの提案と実機の完成向け予備実験

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。本報 告では、タングステンによるモニターヘッドの表面 コーティングの代わりに薄膜タングステン(対向壁 表面材相当)を用い、その背後に各種基板を設置す る方法を新規に提案する。また、最近の技術の進歩 により、可視光透過型SiCの入手も可能となって来た ので、従来の可視光を通さないSiCの活用に加えて、 可視光透過型SiC活用法の提案も行い、広範囲の各種 計測法にブレークスルーを与える斬新な方法の開発 ができることを示す。使用する諸材料や表面変位計 は、原則として市販品を使い、それらの特性を生か した、新規な方法の提案と開発が、当グループの主 要研究・開発目標である。これらの方法は、核融合 分野以外の広範囲な応用分野でも利用することがで きる。さらに、少々異なるアイデアとして、高温核 融合炉壁からの熱放射を測る方法として、アップコ ンバージョン法を利用する新規な方法を提案する。 複雑な放射やノイズの影響を除いた、目的とする放 射スペクトル領域に限定した有用な計測法開発の可 能性を示す。

実験結果

薄膜材料の短パルス繰り返しArFエキシマーレ ーザー光照射実験の模式図を第1図に示す。透明な 2 種(多結晶SiC、CVD-SiC)、不透明SiC、W等を照射し、 同一箇所への多重照射の積み重ねショット数を変えて、表 面損耗とレーザー光貫通状態を観測した。結果の一例を第 2図に示す。



第2図 透明多結晶SiC薄板の貫通に到る多重照射 結果(顕微鏡による背面からのパターン撮影写真)

今後の課題に向けた検討結果

可視光透過炭化シリコンの損耗監視モニターへの応用可能性を検討するため、材料の小窓強度設計(対・大気圧)を行った。0.3mm厚さ(市販変位計で測定可能な厚さの最大値)のSiCの場合、直径25mm以下ならば、大気圧に耐えることが判った。

先端薄板の高温化で発生する近赤外光を、アッ プコンバージョンにより可視光に変換し、これを 透明SiC越しに観測すれば、薄板そのものの温度が 測れることになる。もちろん、貫通と同時に外方 向に出てくる内部からの電磁波そのものも検出で きるから、アップコンバージョンしなくとも、こ れらを検出すれば、破壊の瞬間を検知できるから、 一応は、大型装置の破壊に至る危険な状態は十分 にモニターできる。これとは別に、破壊前後の検 出ヘッド薄板の温度変化の・その場測定が、アップ コンバージョン光の計測により推定できることにな れば、当初の目的以上の方法論的成果が得られるこ とになる。

そこで、市販のアップコンバージョン光発生用蛍 光剤をW薄板上に塗布して、半導体レーザー光を照 射して、アップコンバージョン光発生試験を行っ た。現在までの所、目視の範囲内であるが、コンバ ージョン光の発生を観測することができている。

謝辞

この研究は、九州大学応用力学研究所との国内共 同研究費(分類番号28FP-19)の援助を受けて実施し た。本研究を進めるにあたり、九州大学応用力学研 究所(徳永和俊准教授、糟谷直宏准教授)チェコ・ プラズマ物理研究所グループ(K.Kolacek 博士等) 応用ながれ研究所(糟谷惠子副代表)核融合科学研究 所、レーザー技術総合研究所(本越伸二主任研究 員)電気通信大学レーザー新世代研究センター(自川 晃准教授)(株)キーエンス、(株)東海フアィンセラミ ックス、 などの方々にお世話になった。

発表資料

2017/02/28 報告

[1] K.Kasuya et al., 21st International Symposium on High Power Laser Systems and Applications, Gmunden, Austria, September 5-9, 2016, Book of abstracts, pp.155-156, and SPIE Digital Library, Conference Proceedings, SPIE Volume 10254, 102541B (January 13, 2017); doi: 10.1117/12.2256562.

K.Kolacek et al., 26th IAEA Fusion Energy
 Conference, 17-22 October 2016, Kyoto, Japan,
 Post-dead-line poster paper, PDP-22.

[3] K.Kasuya et al., NIFS Collaboration Workshop on Advanced Diagnostics for Burning Experiments of Magnetic and Inertial Fusion, NIFS, Japan, 27-28 September 2016.

[4] 糟谷紘一ほか、第11回核融合エネルギー連合講 演会、平成28年7月14日—15日、九州大学伊都キャンパ ス 椎木講堂、ポスター講演 14p105.

分光反射率測定を用いたプラズマ対向材料の表面診断

島根大学大学院総合理工学研究科 宮本光貴

1. はじめに

燃焼プラズマを定常的に取り扱う核融合炉においては、時々刻々と変化していくプラズマ対向材料の表 面特性を実時間で正確に把握しておくことが、プラズマ制御と炉の安全性維持に重要である.

本研究では、光反射率スペクトル測定による材料の診断手法を提案しており、低エネルギーイオン照射 やプラズマ曝露した金属ミラー材の光学特性の劣化機構を電子分光学的立場から調べることを目的と する.本年度は、主にイオン照射した SUS ミラー試料の光反射率の、エネルギー依存性およびイオン 種の影響を評価した.照射による結晶構造の乱れ、および試料表面上の堆積層形成に伴う光学特性変化の 検出は、将来の核融合炉における壁材料の簡便な診断手法としても期待できる.

2. 実験方法

(㈱ニラコ社製の SUS316L を鏡面研磨したのち,室温で 3 および 5 keV のヘリウムイオン(He+)照射 を行った.スーパーコンティニュアム白色光源(*λ*: 450~2000 nm)を用いて,照射下における光反射率スペク トル変化を実時間測定した.また,照射による組織変化の反射率劣化に与える影響を調べるために SEM を用いた表面組織観察を行った.さらに,イオン種の影響を評価する目的で,3keV のアル ゴンイオン(Ar+)を用いて同様の照射下光反射率スペクトル測定を行った.

3. 結果および考察

図1は鏡面研磨した SUS316L に室温で(a)3keV, および(b)5 keV-He⁺照射した際の光反射率変化のその 場測定結果を示す.測定波長範囲においては、いずれの場合も 3 keV-He⁺照射の方が反射率の減少が大き いが、これはレーザー侵入領域 (~15 nm)に分布する欠陥量に依存すると理解されている[1].また 5keV-He⁺照射では、照射量 10²² He/m² 程度を周期とする反射率の回復(振幅)が見られた.これは、損傷の蓄 積に加え、一定の照射量を超えると損傷層が剥離し、それが繰り返されることが原因と考えられた. 同様の回復現象は W 試料においても確認されているが、W 試料での回復周期は 1x10²³ He/m²と



図1 SUS316L ミラー試料に室温で(a)3keV, および(b)5 keV のヘリウムイオン(He+)照射した際 の光反射率変化の照射量依存性.

SUS 試料と比べ一桁程度差があり、両者のスパッタ率や損傷発生効率の差異に起因している[2]. 図2 には、 $1\sim5 \text{ keV}$ の各エネルギーで約 $10^{23} \text{ He/m}^2\text{H}$ まで He⁺照射した SUS 試料表面の SEM 観察結果を示す. 5keV-He⁺照射試料でのみ、照射面に特異なステップ状構造が観察され、この形態変化が図 1(b) に見られる反射率回復の原因になったのではないかと考えられる.



図2 1, 3, 5 keV の各エネルギーで約10²³ He/m²H までHe⁺照射したSUS 試料の表面微細組織

図3にHe+照射による反射率スペクトル変化と比較するため、3keV-Ar+照射中の反射率スペクトル を測定した結果を示す.反射率強度はHe+照射と同様大きく低下したが、その低下度合いは大きく、He 照射 より一桁程度少ない照射量で反射率が40%まで減少した.He+照射では、試料表面直下に形成する

He バブルが反射率の減少の主要な要因であっ たのに対して,Ar⁺照射では,その飛程が浅く, He⁺と比較して一桁程度スパッタ率が高いこと から,表面の形状変化の影響を強く受けている ものと考えられる.今後,分光光度計を用いた絶 対反射率測定や,試料表面および表面直下の微 細組織観察を行い,反射率減少の要因を明確に していく予定である.

現在,本手法の大型装置への適応性を検証す るために QUEST において光反射率スペクトル の実時間測定の取り組みが始まっている.大型 装置での実用化を考えるうえで,局所的な光反 射率測定により得られる情報とプラズマ性能の 相関を見出し,炉の運転に如何に貢献できるデ ータを提供していくかが課題となっている.



図3 SUS316L 試料に室温で3 keV-Ar+照射下 における光反射率変化の照射量依存性.

[1] H. Urabe, M. Miyamoto et al., J. Nucl. Mater. 386 (2009) 1038.

[2] M. Miyamoto, K. Ono et al., Plasma Devices and Operations, Vol. 17 (2009) 155

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:	田中徳人,	藤井悠太,東 勇太(島根大学大学院総合理工学研究科博士前期課程)
	濱口 大	(量子科学技術研究開発機構,研究副主幹)

ジルコニウム合金燃料被覆管腐食材におけるニオブ析出物の結晶構造及び電子状態分析

東北大金研 松川義孝 九大応力研 渡辺英雄

1. 背景

軽水炉の燃料被覆管に用いられるジルコニウム合金の材料寿命を決定する要素は、いわゆる照射損傷で はなく、高温水(PWRの場合約598K)による腐食とそれに伴う水素脆化である。Zr合金にNbを添加 すると耐食性が飛躍的に向上することは昔から知られており、その経験則は最新の材料開発(米国の ZIRLOTMやEUのM5[®]、日本のJ-AlloyTM)にも生かされているが、耐食性向上のメカニズムは未だ明ら かではない。その理由は、Nb 析出物のふるまいがこれまでの研究では十分把握できていなかったため である。先行研究では、Nb 析出物が腐食によって最終的にZrマトリックスに再固溶するという報告が 2 つある。但し、両者は再固溶が起こる条件についての結論が異なり、一方は高濃度Liの条件のときに のみ起こると結論づけているのに対し、他方は蒸留水でも起こると結論づけている。

また、先行研究では、Nb 析出物は腐 食(酸化)によってアモルファス化 した後に再固溶すると結論づけてい る報告もあるが、このシナリオの妥 当性については慎重に評価する必要 がある。アモルファス化と再固溶が 同時に起きているのであれば、それ はアモルファス化が O と Nb の両方 が拡散できる条件で起きているとい うことを意味する。アモルファス化 が酸化や水素化など、拡散を伴う過 程でも起こることは 1980 年代から 知られているが、従来の研究では、 最終的にアモルファスを構成する2 つの元素のうち、片方が完全に動け ない条件でしかアモルファス化が確 認されていない。このような共通認 識を念頭に置き、本研究では PWR 模 擬条件で腐食した Zr-2.5Nb 合金に おける Nb 析出物のふるまいを TEM/STEM-EDS/EELS で調査した。



図1 Zr-Nb合金腐食材の表面酸化被膜におけるNb 析出物のふるまい(従来の研究と本研究の比較)

2. 実験結果

分析の結果、(1) PWR 模擬条件(低濃度 Li)では腐食時間が 13,000 時間でも再固溶は起こらないこと、 (2) 表面酸化被膜中の Nb 析出物は分析手法によっては(アーティファクトの影響で)あたかも再固溶 したように見えてしまう場合があること、(3) この一見消失したように見える析出物はアモルファスの Nb₂O₅ であることを明らかにした。アモルファス Nb₂O₅ は他の Nb 酸化物と比較して、バンドギャップ の非常に大きい(3.5 eV) 誘電体であるという特徴がある。また、(4) アモルファス Nb₂O₅ が出現する とき、析出物はマトリックスと Pilling-Bedworth 比が大きく異なるため、結果的に約 50 GPa もの高圧が 負荷された状況にあること、(5) アモルファス Nb₂O₅ が出現するタイミングが、合金の耐食性が変化す るタイミング(本合金の耐食性はステージ II から良好になる)によく一致することも明らかとなった。 さらに、析出物のサイズ分布を詳細に検討することによって、この温度では熱時効しても Nb は拡散で きないが、酸素が関与すると拡散が促進されることを明らかにした。厳密な意味において、O と Nb の 両方が動ける条件でアモルファス化を確認した最初の報告ということになる。



図 2 アーティフ アクトの影響(Z コ ントラストや Nb-L 線の元素マップで は、析出物があたか も再固溶したよう に見える)

3. 本年度 発表リスト

[口頭発表リスト]

1) 松川義孝, "フェライトにおける G 相の二段階核形成: 臨界サイズと臨界組成",日本鉄鋼協会 2017 年 秋季講演大会, 2016.9.21-23,大阪(阪大豊中キャンパス).

2) Y. Matsukawa, "Transmission electron microscopy analysis on oxidation of Nb precipitates in Zr–Nb alloys subjected to water corrosion", NuMat2016 (The Nuclear Materials Conference 2016), 2016.11.7–10, Montpellier (France).

3) Y. Matsukawa, "The two-step nucleation of G-phase in ferrite: the critical size and composition for the structural change of solute clusters", TMS2017 (The Minerals, Metals & Materials Society 2017 Annual Meeting), 2017.2.26–3.2, San Diego (USA), (招待講演)

4) 松川義孝, "PWR 模擬水中で腐食させた J 合金の酸化被膜における Nb 析出物の酸化挙動の解析",原 子力学会 2017 年春の年会, 2017.3.27–3.29, 神奈川(東海大湘南キャンパス).

5) 大熊一平, 松川義孝, "Zr-2.5Nb 合金における bcc 析出物の組成に及ぼす加工熱処理の影響調査", 原 子力学会 2017 年春の年会, 2017.3.27-3.29, 神奈川(東海大湘南キャンパス).

[論文発表リスト]

1) Y. Matsukawa, T. Takeuchi, Y. Kakubo, T. Suzudo, H. Watanabe, H. Abe, T. Toyama, Y. Nagai, "The two-step nucleation of G-phase in ferrite", Acta Materialia, Vol. 116, 104–113, 2016 (2016 年 6 月 6 日).

2) Y. Matsukawa, I. Okuma, H. Muta, Y. Shinohara, R. Suzue, H. L. Yang, T. Maruyama, T. Toyama, J. J. Shen, Y. F. Li, Y. Satoh, S. Yamanaka, H. Abe, "Crystallographic analysis on atomic-plane parallelisms between bcc precipitates and hcp matrix in recrystallized Zr-2.5Nb alloys", Acta Materialia, Vol. 126, 86–101, 2017 (2016 年 12 月 20 日).

3) Y. Matsukawa, S. Kitayama, K. Murakami, Y. Shinohara, K. Yoshida, H. Maeno, H. L. Yang, T. Toyama, K. Yasuda, H. Watanabe, A. Kimura, H. Muta, S. Yamanaka, Y. F. Li, Y. Satoh, S. Kano, H. Abe, "Reassessment of oxidation-induced amorphization and dissolution of Nb precipitates in Zr–Nb nuclear fuel cladding tubes", Acta Materialia, Vol. 127, 153–164, 2017 (2017 年 1 月 14 日).

多層グラフェン膜を用いた燃料電池用水素供給源の開発

Developments of hydrogen storage for fuel cells using multilayer graphene films

名城大学理工学部 土屋 文

Bun Tsuchiya

Faculty of Science and Technology, Meijo Univ.

■的 安全でクリーンな水素酸素燃料電池は、火力発電や原子力発電に替わる発電機として世界的に大きな期待を寄せられている。一般に、水素酸素燃料電池は燃料(水素)、電解質および酸化剤(酸素)から構成されている。最近、水素燃料供給源(水素電極)に水素吸蔵合金(チタン水素化物)、電解質に水素イオンだけが電気伝導に関与するプロトン導電性固体高分子膜(フッ素樹脂系イオン交換高分子膜)を用いた小型化可能な高効率・高出力のマイクロ燃料電池の開発が進められている。水素電極に水素吸蔵合金を用いる理由は、ガス電極のように水素分子の解離過程を経ずに、水素原子を直接電解質中に固溶およびイオン化させて電流密度の増加を図るためである。面心立方晶を有するチタン水素化物を水素電極に用いた場合、水素電極から電解質への水素輸送温度は 200℃以上と高い値を示す。より低温で稼動するマイクロ燃料電池の開発を目指すためには、より低い水素の解離温度を有する水素電極を開発する必要がある。これまで、本研究室では、ミスト化学蒸着法を用いて、多層グラフェン薄膜を作成し、その薄膜における水素の解離温度は約 100℃以下であることを発見した。しかしながら、薄膜からの水素の加熱再放出機構についてはまだ明らかにされていない。本研究では、核反応(NRA: Nuclear Reaction Analysis)法、反跳粒子検出(ERD: Elastic Recoil Detection)法および昇温ガス脱離(TDS)法を用いて、加熱された多層グラフェン薄膜中の水素濃度および放出ガス種の解離温度を測定し、薄膜中の水素の加熱挙動について調べた。

実験方法 ミスト化学蒸着法を用いて、1.3x10³ Pa の真空排気および 925℃に加熱された石英管内にミスト状のメタ ノールおよび 2%H₂ を含有する Ar 混合ガスを流した後、Cu 板を 2 分間導入して多層グラフェン薄膜試料を作製し た。ラザフォード後方散乱(RBS: Rutherford Backscattering Spectrometry)法および光吸収法により、作製された多 層グラフェン膜の厚さは約 8±3 nm (約 24±9.層程度)であると評価した。次に、多層グラフェン薄膜試料を恒湿恒温器 内に導入し、約 24~30℃の室温および約 30・40%R.H.の相対湿度の雰囲気中に放置した。空気中の水蒸気が多層グラ フェン薄膜内に飽和するまで吸収された後、量子科学技術研究開発機構に既存のタンデム型加速器からの 6.38~6.50 MeV N+イオンをプローブビームとした NRA 法を用いて、H および N 間の核反応(H(¹⁵N, αγ)¹²C)により生成された 4.44 MeV のガンマ線を NaI (TI) シンチレーション検出器により検出し、深さに対する H 濃度分布を数 nm の深さ分 解能で測定した。次に、東北大学金属材料研究所に既存のタンデム型加速器からの 2.8 MeV He²⁺イオンをプローブビ ームとした ERD 法を用いて、作製した多層グラフェン薄膜試料を真空雰囲気で室温から約 300℃の各温度において 10 分間の等時加熱(isochronal annealing)を行い、各温度における捕捉 H 濃度の変化について調べた。また、飽和注 入後、九州大学応用力学研究所に設置された TDS 法により、放出ガス種の判別および各ガス種の解離温度を調べた。 **実験結果および考察** Cu 板上に形成された多層グラフェン薄膜表面の FE-SEM 像を図 1 に示す。図 1 から、基盤の Cu 板の形状に影響するが、グラフェンは平坦になっておらず、歪んだ形状を帯びていることがわかる。RBS スペク トルおよび光吸収測定から、試料のどの位置でも、ほぼ一様の厚さであることがわかった。

次に、約24~30℃の室温およ び約30-40%R.H.の相対湿度の 雰囲気の条件で、長時間空気暴 露された多層グラフェン膜につ いて測定されたNRAスペクト ルを図2に示す。横軸は、N+イ オンの入射エネルギーであり、



図1 Cu板上に形成された多層グラフェン薄膜表面の FE-SEM 像。

多層グラフェン膜表面からの深さを表す。縦軸は、多層グラフェ ン膜中の水素濃度を表す。図 2 から、多層グラフェン膜表面に は1個の C 原子に対する H 原子数比(H/C)は約 0.88 であり、H 濃度が極めて高いことがわかった。また、約 24 層中の多層グラ フェン膜中の H/C は約 0.03 と評価された。これらの結果より、 僅かな原子状 H がグラフェン層間(インターカレーション)を占 有し、多量の水(H₂O)が歪んだ多層グラフェン膜表面に吸着して いることが考えられる。

次に、室温から 300℃の温度までの各温度で 10 分間の等時加 熱後、ERD 法を用いて測定された多層グラフェン膜の ERD ス ペクトルを図3に示す。ERD スペクトルから求めた作製後の多 層グラフェン膜中の水素濃度は、H/C=0.74 であり、NRA 法によ り求めた結果とほとんど一致することがわかった。しかしながら、 ERD 法では約100 nm 以上と深さ分解能が低いため、膜表面上の



図 2 Cu 上に形成された多層グラフェン中の水素濃度分布(NRA スペクトル)。

H₂O とインターカレーション中の H を分けることができない。従って、縦軸のピーク強度は、多層グラフェン膜表面 および層間の合計の H 濃度を表す。図 3 から、ERD スペクトルの強度は、加熱温度の増加とともに減少することが わかる。加熱温度に対する多層グラフェン膜中の捕捉 H 濃度の変化を図 4 に示す。図 4 より、多層グラフェン膜中の 捕捉 H 濃度は、グラファイト中の H 濃度が 400℃まで全く減少しないことに対して約 100℃以下の低温で除々に減 少し、300℃で約 3 割程度まで減少することがわかった。グラファイトの場合、H は 400℃以上で CH₄の形状で放出 されることが報告されているので、多層グラフェン膜からの H は、H₂O および H₂の形状で放出されていることが推 測される。

TDS 法を用いて、重量変化が一定になった多層グラフェン膜を室温から 500℃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。H₂O が約 100℃以下の低温から放出し、続いて H₂の放出ピークが 約 500℃近くの加熱温度で観測された。放出温度は異なるが、H 放出は、多層グラフェン膜表面に吸着した H₂O の脱 離、層間を占有した H 原子の脱離が律速で生じると考えられる。

まとめ NRA 法、ERD 法および TDS 法を用いて、真空内で約 300~500℃まで加熱された多層グラフェン膜中の水 素濃度変化について調べた。大気に放置された多層グラフェン膜表面には多量の H₂O が吸着しており、微量の H が 層間に占有していることがわかった。また、これらの捕捉 H 濃度は約 100℃以下の低温から除々に H₂O および H₂の 形状で放出され、300℃で約 3 割程度まで減少することがわかった。



不純物イオン発光線の高波長分解分光による QUEST 周辺プラズマのトロイダル流れ計測

京都大学大学院工学研究科 四竈 泰一

目的

最外殻磁気面近傍からスクレイプオフ層に至るトカマク周辺部のイオン流れは、プラズマ不安定性の抑制, ブロッブ輸送、ダイバータでの中性粒子圧縮等の事象の制御因子であることが明らかになっている.このた めイオン流れの空間分布診断にもとづく流れの駆動および散逸機構の解明に向けた研究が進められている.

このような状況の中で、申請者等は高波長分解の可視分光を用いて QUEST 周辺部における不純物イオン 発光線のドップラーシフトを計測し、イオンのトロイダル速度を推定することを試みている.不純物イオン を利用して水素イオンの流れを推定するにはこれらのイオンの速度分布が緩和していることが必要となる. 本研究では2種類の不純物イオン C²⁺, O⁺の温度およびトロイダル速度を計測し、両者の比較から水素、不 純物イオン間での速度分布の緩和を検証した.

方法

QUEST において、中心ソレノイドコイルによ る電磁誘導を重畳した 8.2 GHz 電子サイクロト ロン共鳴加熱放電を用いて実験を行った. 波長 465 nm 付近に存在する C²⁺, O⁺イオン発光線を 計測対象とした.

観測は中央平面の MH16 ポートに設置した合成石英窓を通して行った.弱磁場側周辺部に放射状の14 視線を配置し,定常状態のプラズマからの発光を集光した(図1).集光した光はバンドル型光ファイバ(三菱電線工業 ST230D; コア径230 µm,クラッド径250 µm,開口数0.2)を用いて伝送し,ツェルニ=ターナ型分光器(Acton



図1. 計測系と視線

Research AM-510; 焦点距離1 m, 回折格子 1800 本/mm) および CCD (Andor DU440-BU2) を用いてスペクトルを計測した. 波長分解能は収差の違いにより視線に応じて 20-50 pm であった. 放電間に波長リファレンスの ThAr ホローカソードランプ (Photron P858A) からの光を計測することでスペクトルの波長誤差を 0.5 pm 以下 (速度換算で約 0.3 km/s 以下) まで低減した.

結果

視線7で計測したスペクトルを図2に示す. C²⁺, O⁺ イオンの微細構造遷移による複数の発光線が観測され た. 図中に矢印で示した2本の発光線を解析した.

観測された発光線形状は視線上に存在する局所的な 発光線を視線に沿って積分したものである.イオンの 放射率,温度,トロイダル速度の局所値を求めるため に、トロイダル断面内のプラズマの軸対称性を仮定し た逆変換を行った.逆変換時には中央平面を図3に示 すようなリング状の領域(シェル)に分割し,各領域 に視線が1本ずつ含まれるようにした.トーラス外側 から内側に向かって,各視線で計測される発光線形状



図 2. 視線7 で計測したスペクトル

の計算値を実験値に対して最小2乗フィッティングし、シェ ル内のイオンのパラメータを決定した.逆変換の範囲は、有 意なフィッティング結果を得るのに必要な S/N のスペクト ルが得られた視線から最も内側の視線までとした.

ガス入射量を変化させた3種類の放電:0.05mPa(#31687), 0.1 mPa(#31700), 0.6 mPa(#31708) で計測した発光線に逆 変換を適用した.得られた C2+, O+イオンの温度,トロイダ ル速度の差分を図4に示す. 圧力は真空容器での値である. 圧力 0.1 mPa および 0.6 mPa の条件では 2 種類のイオン発光 線から得られた温度,トロイダル速度は同程度であった.不 純物イオン密度は水素イオン密度に比べて小さいため、水 素,不純物イオン間での速度分布の緩和時間は,不純物イオ ン間に比べて短くなる. したがって, C2+, O+イオンが同程 度の温度,トロイダル速度を持つことから,水素, 不純物イオン間で速度分布が緩和していると考え られる.一方, 圧力 0.05 mPa の条件では C2+および O+イオンから求めた温度,トロイダル速度に有意な 差が見られた. 上記の2条件に比べてイオン温度が 上昇し、電子密度が低下したことによって速度分布 の緩和時間が長くなり、水素、不純物イオン間で速 度分布が緩和していない可能性がある. 本研究により、不純物イオンを利用した QUEST プ ラズマの流れ計測時には水素、不純物イオン間の速 度分布の緩和について慎重な検証が必要であるこ とが分かった.

成果報告

- K. Nii, <u>T. Shikama</u>, A. Fujikawa, *et al.*, "Spatiallyresolved spectroscopic measurement of impurity ion toroidal rotation in QUEST", 4th A3 Foresight Summer School and Workshop on Spherical Torus (ST), 2016/8/2-5 (ポスター).
- [2] 新居 邦亮, <u>四竈 泰一</u>,藤川 祥亘,他,「QUEST における不純物イオントロイダル回転の多視線 分光計測」,日本物理学会秋季大会 16aKA-3, 2016/9/13-16(口頭).



図 3. シェル配置



図 4. C²⁺と O⁺イオンの温度,トロイダル 速度の差分(ΔT = T_{C2+} - T_{O+}, ΔV = V_{C2+} - V_{O+}). R は大半径,点線はシ ェル外径を表す.

- [3] <u>四竈 泰一</u>,新居 邦亮,藤川 祥亘,他,「多視線分光による不純物イオン流れの空間分布計測」, QUEST 研 究会,2016/9/20 (ロ頭).
- [4] 新居 邦亮, <u>四竈 泰一</u>,藤川 祥亘,他,「QUEST における不純物イオントロイダル回転の多視線分光計測」, NIFS 合同研究会 2016/12/20-22(口頭).
- [5] 新居 邦亮,「QUESTプラズマ周辺部における不純物イオントロイダル流れの多視線分光」,京都大学大学院 工学研究科 機械理工学専攻 修士論文 (2017).
- [6] <u>T. Shikama</u>, K. Nii, A. Fujikawa, *et al.*, "Spatially-resolved measurements of impurity ion troidal flow velocity in QUEST using multiple viewing chords spectroscopy and inversion", Fuzhou workshop on edge plasma stability and transport, 2017/3/3-4 (口頭).

金属材料における格子欠陥と水素原子の相互作用の検出法に関する研究

鹿児島大学学術研究院理工学域 佐藤 紘一

要旨

今年度は電子線照射したタングステンに高圧水素チャージを行い、水素チャージ前後での陽電子寿命 値の変化から、欠陥に捕獲された水素数を検討した。同時に、水素の導入が硬さに及ぼす影響も調べた。 陽電子寿命値の変化から欠陥には2個程度の水素が捕獲されていることが分かった。熱処理を行ったとき の陽電子寿命値の変化から、欠陥からの水素の脱離が約573K付近から開始していることが分かった。

1. 研究背景と目的

核融合炉や加速器駆動未臨界炉は次世代のエネルギー源として有力な候補であり、低放射化フェラ イト鋼やタングステンは、それらの構造材料として使用が検討されている。いずれも、中性子などの高 エネルギー粒子によって激しい損傷を受けると同時に、核変換によって多量のガス原子が生成する。生成 したガス原子は格子欠陥と相互作用し、脆化やスエリングを助長するため、その相互作用を調べることは大 変重要である。本研究では、それら金属材料の格子欠陥とそこに捕獲される水素原子の数を検出することを目 的とする。今年度は電子線照射したタングステンに水素チャージを行い、陽電子消滅寿命測定と硬さ試験を行 った。その結果から、欠陥の水素の捕獲数と脱離温度を評価した。

2. 実験方法

本研究ではアライドマテリアル社製の厚さ 0.2mm のタングステン(純度 99.95at%)の板材を用いた. その板材からワイヤー放電加工によって直径 5mm のディスクを作成した. 試料内部には加工による転位や空孔が存在しているので、タングステンを 10⁻⁴Pa 以下の真空中で 1773K、1 時間の熱処理を行い転位と空孔を取り除いた. 電子線照射における電子のエネルギーは 8MeV であり、照射量は2.92×10⁻⁴ dpa であった。材料への水素チャージには、高圧水素チャージを用いた。試料は 573K で240 時間熱処理を行った後、573K で5.8MPa の水素に240 時間曝して、試料内部に水素を導入した。次に、陽電子消滅寿命測定を行い、欠陥の大きさと量を調べた。同時に、硬さ試験を行った。その後、室温から 50K 毎こ1 時間の等時焼鈍を行い、焼鈍温度が 573K まで到達した後は、573K で等温焼鈍を行った。その都度、陽電子寿命値と表面硬さを調べた。

3. 結果と考察

表1 に電子線照射前後および水素チャージによるタングステンの陽電子寿命値の変化を示す。長寿命成分 から、電子線照射後に原子空孔が形成し、水素チャージをすることによって、原子空孔が水素を捕獲し、陽 電子寿命値が減少した。シミュレーションとの比較から、原子空孔には平均して2 個の水素が捕獲され ていることが分かった。陽電子消滅寿命測定と硬さ試験の変化から、573K 程度で水素が原子空孔から解 離することも分かった。また、水素チャージし、等時焼鈍を行った後の硬さの変化を図 1 に示す。水素 チャージを行った直後は硬さが上昇したが、その後の 573K までの等時焼鈍では水素チャージ前の硬さとほ ぼ同じ値に戻り、573K での等温焼鈍では硬さがさらに低くなった。水素チャージを行った直後に硬さ 試験を行ったため、拡散性の水素が硬さに影響した可能性がある。拡散性の水素がなくなったと考えられ る熱処理後の材料では水素チャージ前の硬さに戻った。硬さがさらに低下した原因は水素を原子空孔ほど強く 捕獲しないサイト(転位ループなど)の変化が考えられるが、今後も継続してこの原因を調べなければ ならない。

	Mean	Short lifetime		Long lifetime	
Sample	lifetime	Lifetim	Intensi	Lifetim	Intensi
		e [ps]	ty	e [ps]	${ m ty}$
Well-annealed	113	-	-	-	-
Electron-irr.	150	81	28	167	72
Hydcharged	127	24	18	149	82
573K, 10h	147	83	20	157	80

表1 よく焼鈍したタングステン、2.92×10⁻⁴ dpaの電子線照射したタングステン、照射後水素チャ ージしたタングステンの陽電子消滅寿命値



図1.6.4×10⁻⁴ dpa の電子線照射後、水素チャージ、等時焼鈍、等温焼鈍したタングステンのビッカース硬 さの変化。e-irr.は電子線照射、H.C.は水素チャージを示す。

成果報告リスト なし

機械的合金化と高温等方加圧によるナノ粒子分散強化銅合金の微細構造における 高エネルギーイオン照射の影響

核融合科学研究所 室賀健夫

1.目的

ヘリカル型核融合炉(FFHR)の設計において、ダイバータの配置変更による中性子負荷の低減の可能性が 明らかにされている。この中性子負荷の低減によってダイバータを構成する部材に適用する候補材料として銅合 金が再び注目されている。過去に、高温強度、耐照射性に優れた合金として、アルミナ分散強化銅合金(Glidcop) が、ダイバータ構成部材として検討され、数多くの試験結果が報告されている。核融合科学研究所では、Glidcop の製法や微細構造を改良することによる分散強化銅合金の大幅な特性改善を目的に、機械的合金化(MA)と高 温等方加圧焼結(HIP)を組み合わせた新たな分散強化銅合金の製法(MA-HIP 法)の研究を開始した。本研究 ではこれらの合金特性の改善と同時に微細構造における照射損傷現象及びその強度特性への効果の理解のため、 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、イオンビーム照射した分散強化銅合金の微視組織と 強度を明らかにすることを目的とする。

2. 方法

MA-HIP 法による種々の分散強化銅合金製作は次のように行った。基材となる純銅は 99.8 %の粒子を使用 した。また添加粒子は、Gridcop®との比較のため、純度 99.98 %のアルミニウム(AI)を用いた。試料は、高純 度不活性ガスグローブボックス内において、純銅に添加材を 1Wt.%となるよう AI を添加し、遊星型ボールミ ル装置により 250 rpm、1~32 時間 MA 処理を行った。その後、粉末試料を、500 ℃の高温脱気処理に供した 後、大気に曝すことなく軟鋼カプセルへ真空封入した。HIP 処理では、950 ℃、150MPa の環境で 1 時間保 持することにより焼結を行った。得られた焼結材について、カプセル開封後、光学顕微鏡(OM)および走査型 電子顕微鏡(SEM)により組織観察を行い、ビッカース硬さ試験機を用いて機械的特性を評価した。また X 線 回折装置を用いた MA 及び HIP 処理による格子定数の変化測定、電気伝導度の測定、透過型電子顕微鏡(TEM) による内部組織観察により材料学的評価を行った。続いて、九州大学応用力学研究所の高エネルギーイオン発 生装置(タンデム型加速器)で重イオン照射を行い、照射量及び照射温度をパラメータとした照射試料の準備 を進めた。

結果と考察

3-1. 合金の基本特性

回転速度を 250rpm に保ち MA 時間を進行させた結果、粉末は微細化した後、扁平化、等軸形粗大粉末へ と変遷した。更に、MA ポットやボールへの凝着が抑制され、粉末の回収率が向上した。MA 時間の上昇に伴 い、結晶粒形は層状となり 32 時間で局所的ではあるが微細化が見られた。この結果に対し、時間に対する結 晶粒径とビッカース硬さの値を図1に示す。その結果、1 時間から 8 時間では結晶粒径の急激な減少とビッ カース硬さの急激な上昇が見られた。8 時間から 32 時間では、大きな変化は見られなかった。この結果に対 し、図 2 に結晶粒径の-1/2 乗に対するビッカース硬さをプロットした結果を示す。粒径と硬度の関係を示す 法則に Hall-Petch 則があるが、図2より、本試作合金では結晶粒径が大きいにも関わらず、Glidcop®と同程 度の硬度を得た。従って試作材の強化機構として、結晶粒微細化だけでなく分散強化の効果が示唆されている。

図3は HIP 前後の X 線解析した結果を示す。MA 未処理材では明瞭に表れていた AI (200)は MA 開始に 伴いほぼ消滅し、Cu(111)のピークはブロード化した。これは、MA 処理を施すことにより AI はCu の母相中 に固溶し、更に転位が導入され歪が蓄積されたためと考えられる。Cu(111)について、Bragg の条件から格子 定数を評価した。MA 処理に着目すると HIP 前では格子定数が減少しているにも関わらず、HIP 後ではMA 未処理材に近い値が得られた。これは、8時間までの MA では、HIP 前後とも AIがCu に固溶していたが、 32 時間のMA では、HIP 後固溶した AI が析出し、マトリクスが純銅に近づいたためと考えられる。

内部組織観察には、TEM と付随のエネルギー分散型 X 線分光器 (EDS) を用いて、32 時間MA 試料について内部組織観察とマッピングを行なった。その結果、AI が濃化した粒子が広い領域で観察された。また内部 組織は、微細領域と粗大領域に分離され、粗大領域では、AI 濃化粒子は粒界に偏在し、マトリックスはほとん ど純銅であった。一方、微細粒領域では粒界および粒内に AI 濃化粒子が観察された。以上の結果から、微細 領域が強度を保っていると考えられる。

3-2. 照射試験

製作試料を 0.1mm 厚さ、3mm 径のディスクに打ち抜き、表面を電解研磨した。重イオン照射は、 2.4MeV のCu²⁺イオンを用い2 x 10⁻⁴dpa/s の照射強度で0.1, 1, 5, 10, 20, 30 dpa 照射を進めている。 また比較のため無酸素銅を600℃ 2 時間焼鈍した材料も同様に照射を進めている。現在ほほ半分の照射試 料の製作が終了し、マイクロビッカース硬度、TEM 観察の準備を進めている。



4. 研究組織

室賀健夫、菱沼良光、能登裕之(以上核融合科学研究所)渡辺英雄(九大応力研)

5. 発表論文

T. Yamada, H. Noto, Y. Hishinuma, T. Muroga, H. Nakamura, Development of a dispersion strengthened copper alloy using a MA-HIP method, Nuclear Materials and Energy, Volume 9, December 2016, Pages 455–458.

H. Watanabe, K. Yamasaki, A. Higashijima, H. Taguma, T. Nagasaka, T. Muroga, Microstructural changes of Y-doped V-4Cr-4Ti alloys after ion and neutron irradiation, Nuclear Materials and Energy, Volume 9, December 2016, Pages 447-450.

先進ブランケットを指向した酸化物絶縁被覆材の微細構造における 高エネルギーイオン照射の影響

核融合科学研究所 菱沼 良光

1. 研究目的

液体金属や溶融塩を用いた核融合先進ブランケットの要素技術開発において、MHD による液体金属 の圧損や透過によるトリチウム漏洩の抑制は大きな課題である。その対策としてブランケット部材への 酸化物被覆が検討されている。酸化物被覆層における中性子照射効果は、先進ブランケットを設計する上 で、大変重要な因子である。しかしながら、中性子照射効果については国内的に原子炉が停止している事情も 申ことながら、大変手間がかかる上に長期間の照射時間を要する。一方で、イオン照射は損傷領域が限定され るものの短時間で大きな照射量が期待できる。イオン照射は、中性子照射の加速試験に相当するものであ り、酸化物被覆材の中性子照射効果を検討する上で重要な知見を与えるものである。そこで、九州大学応 用力学研究所に設置されている重イオン照射が可能な高エネルギーイオン発生装置にて照射損傷された酸化 物被覆層の微視的構造及び膜質の変化を明らかにすることを目的とする。

2. 実験方法

Er₂O₃/SUS316 単層被覆材は核融合研の MOCVD 装置にて成膜された。Er₂O₃ 被覆は直径 10 mm、

厚さ1mm の SUS 基板上に成膜し、その成膜条件は500 $^{\circ}$ の3 時間と した。なお、Er₂O₃ 被覆材の厚さは約300 nm 程度であると確認 した。Er₂O₃/SUS316 被覆材を九州大学応用力学研究所のタンデム 型イオン加速器にて成膜表面に対してイオンビーム照射を実施し た。なお、イオン源は 2.4 MeV の Cu²⁺イオンとした。イオンビ ーム照射前にTRIM コードにて Er₂O₃/SUS における照射損傷速度 を計算した後に、Er₂O₃ 酸化物層における照射量として室温にて 0.01 から 1.5 dpa 相当のCu²⁺イオン照射を実施した。

Cu²⁺イオン照射前後の Er₂O₃/SUS 単層試料に微細組織や微細構 造の観察は、X 線回折(XRD) 走査型電子顕微鏡(SEM)及び透 過型電子顕微鏡(TEM)等の分析装置を用いて実施した。なお、TEM 薄片化試料は、集束イオンビーム加工装置(FIB)にて作製した。一方、Cu²⁺ イオン照射前後の Er₂O₃/SUS 単層被覆材の膜質変化の 1 つとし て、Er₂O₃ 被覆とSUS 基板との間の剥離強度に注目したスクラッチ 試験も同時に実施した。図 1 にスクラッチ試験機の外観と原理を示 す。スクラッチ試験は、自動車の多重塗膜や DLC 等の硬質被膜の剥 離を数値化する目的で頻繁に用いられており、すでに日本工業規格 (JIS)にも認定されている試験法である。





図 1 ナノスクラッチ試験機の外観と試験原理図

3. 結果と考察

3-1. Cu²⁺イオン照射前後の Er₂O₃ 被覆層の微細構造変化

図2 に Er_2O_3 被覆における Cu^{2+} イオン照射前後の制限視野電子 回折 (SAED; Selected Area Electron Diffraction) パターンを示す。 得られた回折パターンは Er_2O_3 相の指数として同定出来た。これは、 1.5dpa のイオン照射をしても Er_2O_3 の結晶構造は維持されること を示唆している。また、XRD でもイオン照射前後の Er_2O_3 結晶に 変化がないことが確認されている。これらによって、1.5 dpa の Cu^{+2} イオン照射でも、 Er_2O_3 結晶は十分な耐性を有し結晶構造が 維持されることが分かった。今後の課題としては、高温下や更なる 照射量での Er_2O_3 結晶の構造変化の検討が挙げられる。



図 2 Cu²⁺イオン照射前後の Er₂O₃ 被覆層の SAED 回折パターン

3-2. スクラッチ試験による Er2O3/SUS 層界面における剥離強度評価

スクラッチ試験は、ダイアモンド圧子の荷重を増加させながら被覆膜に押し付けるために、摩擦力も

増加する。被覆膜の表面を滑っている状態では、摩擦係数に 比例して摩擦力は単調に増加する。しかしながら、膜の剥離 が発生すると顕著な摩擦係数の変化が現れる。この摩擦力に 変化が生じる荷重を剥離する臨界荷重とし、剥離強度として 評価している。図 3 に Er₂O₃/SUS 単層被覆の剥離強度に おける照射損傷量依存性を示す。照射損傷量の増加に伴って 剥離強度は低下する傾向が観測された。1.5 dpa の照射損傷 では、未照射と比較して約85%の強度まで低下した。照射 損傷によって強度が低下する原因について考察する。図 4 に 1.5 dpa の照射損傷を受けた試料の断面STEM像を示 す。Er₂O₃ 層とSUS 基板の界面には、約 200 nm の厚さの 反応層が生成している。また、この反応層は、照射損傷量の 増加に伴って厚くなる傾向があり、照射損傷によって剥離強 度が低下する主な要因は層界面に生成する反応層にあると 考えられる。今後は、Cu²⁺イオン照射による剥離強度の低下 と層界面付近に生成する反応層の相関について詳細に検討 する必要がある。また、TRIM 計算コードでも明らかのよう に、界面及び SUS 基板での照射損傷量は Er2O3/SUS 被覆 と比較して約2から4倍多いことから、照射損傷を受けた SUS 基板内での照射損傷過程と反応層の生成機構との相関 についても検討する必要がある。



図 3 Er₂O₃/SUS の剥離強度における照射 損傷量依存性



図 4 1.5 dpa の照射損傷を受けた Er₂O₃/SUS 断面における STEM 像

粒内ベイナイトからなる鉄鋼材料の中性子照射後微細組織

(研究代表者) 阪本 辰顕¹⁾、仲井 清眞²⁾、渡辺 英雄³⁾

¹⁾愛媛大、²⁾ 愛媛大学名誉教授・客員教授および三浦工業株式会社社外取締役・監査等委員 ³⁾九大応力研

1. 緒言

耐照射損傷性に優れる合金を作製するために、照射欠陥のシンクを材料中に導入することが効果的 であることが知られている。たとえば組織の微細化により界面を多量に導入することが望ましい。超 微細な粒内ベイナイトのみからなる鉄鋼材料においては、幅数ミクロンのベイナイト・ラスが旧オー ステナイト粒内に多方位に生成し、微細な組織が形成される。その結果、ラス界面が高密度に導入さ れるため、高い耐照射損傷性を有する鉄鋼材料が作製できることが期待される。我々はこれまでオー ステナイト化処理の前に冷間圧延や(フェライト+オーステナイト)二相共存領域で等温保持を行う ことにより粒内ベイナイトの生成を制御できることを明確にしている。これまでの中性子照射した試 料の透過型電子顕微鏡(TEM)観察の結果、圧延の有無にかかわらず転位ループと思われるコントラ ストが観察された。しかし、これらの機械的性質との関連性はいまだ不明な点が多い。そこで本研究 では、中性子照射を行った粒内ベイナイト鋼の TEM 観察を行い、機械的性質に及ぼす中性子照射効 果を実験的に明らかにすることを目的とする

2. 実験方法

鉄鋼材料の化学組成を Table 1 に示す。室温で 0~10%の冷間圧延を施した後、750℃で 60s の等温 保持を施し、続いて 1400℃で 300s オーステナイト化処理を施した。その後 500℃で 20s のベイナイト 生成処理を施した後、氷塩水中に焼入れた。熱処理を施した試料にベルギー・モル研究所に設置され ている原子炉(BR2)で中性子照射を行った。照射条件を Table 2 に示す。

これらの鉄鋼試料と V 合金 TEM 試料をツインジェット電解研磨法により作製した。TEM 観察を JEM-ARM200F(加速電圧 200kV)を用いて行った。

3. 結果および考察

Figure 1 に中性子照射を施した鉄鋼材料の明視野像を示す。圧延無しの試料(CR00と称する)では 見られない 10nm 程度の粒状の析出物が圧延 5%(CR05と称する)と 10%(CR10と称する)の試料で は見られた。この析出物は中性子照射前にはこれまで見られていない。CR10について、この粒状の析 出物周囲の EDS マッピングを行った。その結果を Fig.2に示す。析出物の箇所には Cu と S が検出さ れた。このことから CR05 と CR10において中性子照射によって Cu が析出したと考えられる。Fe 中 の Cu の析出についてはこれまで多くの報告があり、析出初期には bcc、続いて 9R、最終的に fcc の構 造になることが知られているが、本研究においては析出物の結晶構造はいまだ未確認であり、今後の 課題である。

一方、引張試験の結果において、中性子照射による降伏強度の増加は CR00 で最も大きく、CR10 で 最も小さかった。すなわち Cu の析出が見られない CR00 において降伏強度の増加が著しく、Cu が析

С	Si	Mn	Р	S	Cu	Ν	0
0.075	0.25	1.45	0.001	0.001	0.2	0.003	0.002

Table 1	鉄鋼試料の化学組成(mass	%)
		~ ,

Table 2	BR2 におけ	る中性子	·照射条件
---------	---------	------	-------

specimen	capsule	cycle	temperature($^{\circ}$ C)	fluence(n/m ²)
鉄鋼材料	14M-33BR	MICADO-8 CALLISTO	290	$\sim 1 \ge 10^{24}$

出したと思われる CR05 や CR10 では降伏強度の増加が抑制されているため、Cu の析出の照射脆化への影響はほとんどないと考えられる。これは Cu が微細であるためであると考えられる。

 論文と学会発表 今年度はありません。



Fig.1 鉄鋼材料の中性子照射後の TEM 写真. (a) 圧延無し、(b)圧延 5%、(b)圧延 10%.



Fig.2 圧延 10%の試料における中性子照射後の TEM による元素マッピング.
乱流輸送シミュレーションにおける 計測シミュレータを利用した系統的な Validation 解析法の確立

核融合科学研究所 ヘリカル研究部 沼波 政倫

研究の目的

磁場閉じ込め核融合研究において、高温プラズマの異常輸送機構の解明と定量的な輸送予測は 最重要課題の一つである。ジャイロ運動論的シミュレーションによる数値解析は、5次元位相空 間上の分布関数の発展を扱うことが出来、乱流輸送の物理解明には強力な解析手法である。計算 コードや計算機の発展に伴い、ジャイロ運動論的手法による多くのシミュレーションが実行でき るようになってきたが、一方で計算結果に対する定量的な解析の重要性が増している。本研究課 題の目的は、ジャイロ運動論的乱流シミュレーションに対する乱流計測シミュレータ[1]を用い た実験計測模擬の手法をさらに発展させ、系統的なValidation 解析を念頭にした新しい乱流 解析の手法を確立することである。これまでに実施した共同研究課題では、乱流揺動分布の解析 に威力を発揮する位相コントラスト・イメージング (PCI) による数値計測を実行し、乱流揺動の スペクトル構造や空間分布を解析することが可能になってきている。本研究課題では、計測シミ ュレータを用いて現実の実験計測により即しながら、ジャイロ運動論的シミュレーションを系統 的で定量的な乱流解析手法に発展させることを目的にする。

研究方法

本研究課題では、局所フラックス・チューブ近似の下での実施したジャイロ運動論的コード 「GKV-X」[2] による乱流シミュレーションから得られるデータを基礎にして進める。これまで に実施した主にヘリカル系におけるジャイロ運動論的シミュレーションでの乱流揺動データ(磁 力線に沿った3次元揺動分布データ)を乱流計測シミュレータに渡し、PCI 模擬計測を実行する。 ここでは、計測視線方向に沿った線積分値をPCI 計測であると解釈した上で、再構成された局所 スペクトルの空間解像度についても評価する。

- 実験での計測を模擬したシミュレーション
 これまでに得られたGKV による乱流シミュレーション・データ、特に密度揺動のデータから、
 PCI での計測視線に考慮しながら計測模擬を行う。PCI はプラズマの密度揺動についての高い解像度での波数スペクトルを得る計測手法であるが、ここでの計測シグナルは視線垂直方向に有限の空間領域を伴って視線方向に沿った積分値として得られる。
- ・ 径方向に渡った計測模擬シミュレーション GKV は局所フラックス・チューブ・コードであるため、径方向に渡った計測模擬を行うために、同一の実験ショットに対応した複数のフラックス・チューブで実施した GKV シミュレーション結果を用意し、図 1 のように共通の計測視線を用いてPCI の計測模擬シミュレーションを行う(図 1)。計測模擬で得られる密度パターンからフーリエ変換によって波数スペクトルを得る。

今年度の成果

今年度は、実験での計測視線を模擬しながら、径方向に渡った 計測模擬シミュレーションを実施し、そこから得られた PCI シ グナルについて詳細に評価した。線積分を行って得られた PCI シグナルから、局所的な値を解像することが課題であるが、磁 場配位データから得られる磁力線のピッチ角情報がその解像に 有益になる。また、局所的なスペクトルを評価するには、乱流シ ミュレーションデータの空間解像度に十分に注意しておく必要が ある。図 2 は、局所揺らぎと積分シグナルの分解から得た波数 -周波数スペクトルである。これより、ある波数と周波数の領域に 揺動ピークが現れていることが分かる。

まとめ

数値計測シミュレータは、プラズマ・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する強力なツールである。 本課題では、特に、乱流構造の理解に強力な手法の一つとなるPCI 計測の模擬を実施し、計測シミュレータにおける PCI 計測モジ ュールを複数の磁気面におけるフラックス・チューブ上で実行さ れたジャイロ運動論的乱流シミュレーションの乱流密度揺動データ に適用し、計測模擬されたスペクトルデータを得た。数値計測シミ



図 1: 複数のフラックスチューブ における乱流シミュレーションデー タと模擬計測視線。

ュレータは、今回のPCI 計測モジュールだけでなく、プラズマ中の電場計測に威力を発揮する HIBP 計測のモジュールなど、他の計測模擬手法も有している。今後は、新古典的粒子シミュレーション で得られる密度分布データへのHIBP 計測模擬など、適用範囲を大きくし、乱流シミュレーション に加えて、運動論的シミュレーション研究のValidation 解析の強力なツールとして、実際の実験計測への 貢献に繋げていきたいと考えている。

本研究は、九州大学応用力学研究所の共同利用研究の助成を受けたものです。

参考文献

[1] N. Kasuya, et al., Plasma Sci. Technol. 13, 326 (2011).

[2] M. Nunami, et al., Plasma Fusion Res. 5, 016 (2010).



図 2: 局所揺らぎ(a) と積分シグナルの分解(b) から得た波数・周波数スペクトル。

鉄系合金の電磁気特性と照射ナノ組織の関係

岩手大学理工学部 物理・材料理工学科 鎌田康寛

目的

原子炉圧力容器(RPV)に内貼されたステンレス鋼クラッド材は、γオーステナイト相を母相と して、溶接割れを防ぐため10%程度のδフェライト相を含む二相構造をとる。約300℃の照射環境下 で長期運転した場合、ナノ・ミクロ組織に変化が生じて機械・腐食特性が低下し劣化する可能性が ある。鋳造二相ステンレス鋼では、300-500℃程度で長時間熱時効した際にフェライト相で鉄とクロ ムが二相分離して脆化することが知られており、二相分離に敏感な電磁気計測による非破壊脆化評 価法の研究提案がなされている。一方、電磁気特性の変化と脆化材のナノ組織との対応関係および、 熱と照射が脆化に与える相乗効果について、十分に解明されていない。本年度は、(1)二相ステン レス鋼バルク材を用いて、500℃時効で熱脆化を生じさせた際の、硬度および磁気特性の変化とナ ノ組織との関係を調べた。並行して、鉄系合金の磁気特性に与える照射効果を明らかにするため、 (2) Fe-Ni 合金のエピタキシャル単結晶膜を用いて、重イオン照射実験を行った。

研究成果1(二相ステンレス鋼の熱時効ナノ組織)

実用二相ステンレス鋼(S32750、Fe-25Cr-7Ni-4Mo)の厚板から放電加工機により薄板試験片 (15×3×1mm)を切り出し、真空加熱炉を用いて 500℃で 480 時間まで所定の時間時効した。マイ クロビッカース硬さと研究室で組上げた装置で磁気ヒステリシス計測を実施した。さらに FIB 加 工によりフェライト相領域を切り出し、ARM (JEOL 原子分解能分析電顕、九大)を用いて時効に よる元素分布の変化を調べた。

図 1 に、マイクロビッカース硬さとヒステリシス計測より求めた保磁力の熱時効時間依存性を 示す。硬さは時効初期に大きく増加して一定傾向を示した後、長時間時効でさらに大きく増加した。 保磁力も同様の変化挙動を見せたが、特に長時間時効による増加量が大きかった。図 2 に 50 時 間および 480 時間時効後の二相ステンレス鋼の、Cr および Mo のEDS 元素マップを示す。50 時 間時効材では粒界付近で Mo の偏析が見られるが、粒内で顕著な変化は見られなかった。一方、480 時間時効材では、Cr の二相分離と Mo 系化合物の析出が確認された。後者の析出物は、磁壁幅と 同程度のサイズで非磁性であると予想されることから、磁壁のピン止めが強いと推測され、保磁力 増大の主因と考えられる。

研究成果2 (Fe-Ni 合金の磁気特性に与える照射効果)

超真空電子ビーム蒸着法により、厚さ 200nm の Fe-39at%Ni 合金 および Fe-31at%Ni 合金を、 MgO(001)基板上に 500℃で成長させた。成膜後に 1000℃でアニールし、EBSD 測定に相判定と方 位解析を行った。図 3 に極点図を示す。いずれの薄膜も、fcc-Ni(001)[100]//MgO(001)[100]の方位で エピタキシャル成長していることを確認した。これらの試料をタンデム型加速器(応力研)で 2.4MeV Cu2+により室温でイオン照射した。2 つの合金薄膜の未照射材、0.9dpa 照射材の磁化曲線 を図 4 に示す。Fe-39Ni 合金では顕著な変化は見られなかったが、Fe-31Ni 合金では磁化曲線の形状 が変化するとともに、磁化温度曲線の測定から母材に比べてキュリー温度の高い磁性相が照射により 生じていることを確認した。35%Ni 前後の Fe-Ni 合金はインバー合金と言われ、磁気的に特異な性 質を示すことが知られている[文献]。空孔の形成に伴う原子間距離の拡大や、カスケード損傷過程で の短距離秩序化が生じ、低 Ni 組成の Fe-Ni 合金の磁性に影響を与えた可能性が考えられる。 まとめ

実用二相ステンレス鋼の熱時効材のナノ組織評価を行い、非破壊脆化評価を実現する上で不可欠 となる磁気特性とナノ組織の関係を明らかにした。また、Fe-31%Ni 合金の磁気特性が、イオン照 射により大きく変化することを明らかにし、磁性相の安定性の観点から原因を考察した。照射環境 下で使用する磁性材料の安定性を考える上での一つの指針となる成果と考える。

参考文献: M. Schilfgaarde, I. A. Abrikosov, B. Johansson, Nature, 400 (1999) 46-47.

成果報告:Y.Kamada, T. Kabutomori, J.N. Mohapatra, S. Kobayashi, H. Watanabe "Nanoscale-structures and magnetic properties of neutron and ion irradiated Fe-Cr binary alloys", 4th Nuclear Materials Conference, NuMat2016, P1-51, Nov. 7, 2016, Montpellier, France ほか

研究組織:鎌田康寛,小林悟,村上武,高橋智史,小宅智樹:岩手大・理工、渡辺英雄:九大・応力研



図 1 硬さと保磁力の時効時間依存性 ND,TD,RD は切出方向(試験片長手方向)



図2 500℃熱時効材のCr 及びMo 分布 (1) 50 時間後 (2) 480 時間後



図4 Fe-Ni 薄膜の{100}極点図 (1) Fe-39Ni、(2)Fe-39Ni



図4 Fe-Ni 薄膜の室温磁化曲線, Fe-39Ni :(1)未照射材 (2)照射材 Fe-31Ni :(3)未照射材 (4)照射材

大規模シミュレーションによる MHD 不安定性の 3 次元構造解析

核融合科学研究所 ヘリカル研究部 佐藤雅彦

LHD 実験においては、体積平均ベータ値が約 5%のプラズマが得られている。このような高ベータ LHD プラズマでは、周辺部に磁気丘が存在するため、理論的には周辺部にて MHD 不安定である。こ のような高ベータ LHD プラズマの MHD 特性を明らかにするため、非線形 MHD コードであるMIPS コードを用いた解析を進めている。これまでに行ってきたシミュレーションでは、周辺部にて抵抗性バル ーニングモードが不安定であるが、非線形状態において MHD 不安定性の影響がコア領域へおよび、最終 的にはコア崩壊が引き起こされることを示してきた。本研究では、このコア崩壊現象の解析を進め、コア崩 壊現象のメカニズムの詳細について調べた。

本研究で用いた MIPS コードは、一流体 MHD 方程式を初期値問題として数値的に解くシミュレーシ ョンコードである。円柱座標系のもとで微係数を 4 次精度の中心差分で離散し、時間積分については 4 次精度のルンゲ・クッタ法が用いられている。MPI により並列化が行われており、大規模計算が可能な シミュレーションコードである。MHD 平衡は、入れ子状の磁気面の存在の仮定を用いないHINT2 コー ドを用いて構築した。この構築した MHD 平衡に対して、微小な初期摂動を加え、その後の物理変数の時 間発展を MIPS コードで計算することになる。物理現象の解析のため、円柱座標系で得られた物理変数 を Boozer 座標系上でフーリエモード展開を行っている。そのため、HINT2 コードで構築した MHD 平 衡に対応した Boozer 座標系を構築する必要がある。この Boozer 座標系は、VMEC コードと NEWBOZ コードを用いて行う。その構築方法は次の通りである。まず、HINT2 コードで得られた MHD 平衡に対 して、磁力線追跡を行い、最外殻磁気面を同定し、最外殻磁気面の形状データを取得する。その最外殻磁 気面を境界条件として、VMEC コードにより MHD 平衡の再構築を行う。VMECコードで得られた VMEC磁場スペクトルデータを、NEWBOZコードで Boozer磁場スペクトルデータを取得する。



図1. 縦長断面での圧力分布(上段)、摂動圧力分布(中段)、z=0上での圧力分布(下段)の時間発展。

本解析では、中心ベータ値が 9.2%の MHD 平衡を考え、磁気レイノルズ数は 10⁵ を仮定した。線形計 算によれば、この平衡はトロイダルモード数 n が 10≤n≤15 のモードが最も線形不安定であった。

図 1 に非線形シミュレーションで得られた縦長断面での圧力分布、摂動圧力分布、z=0上での圧力分布の時間発展を示す。非線形初期段階では、線形不安定モードにより、周辺部にて圧力の平坦化が 見られるが、最終的にはコア領域全体で圧力分布の平坦化が発生する。モードごとの時間発展を調べ ると、非線形初期段階に低次モードの急速な成長が見られる。この低次モードは周辺部にて発生する が、次第 にコア領域へ広がっていく。線形段階と非線形段階における n=1~3 の径速度のモード構造を図 2 に示す。ここでは、ポロイダルモード数は1≦m≦5 に対して示している。赤の太線は(n,n)=(1,1) モードに対応する。この図から、コア領域にて(n,n)=(1,1)が他のモードよりも増加していることがわ かる。この n=1 の フローパターンは図 3 の通りになる。磁気軸にて有限な振幅を持つため、コア領域をシフトする流れになっている。この流れによって中心から周辺への輸送が起こり、中心圧力の低下 が起こる。詳細なモード解析を行ったところ、(m,n)=(1,1)の径速度は、主に、n=10とn=11のモードカップリングにより増大していることがわかった。非線形段階のコア領域では低次モードが支配的となり、非線形的に生成された低次モードの自己相互作用によるモードカップリングが原因で、中心圧力の著しい低下が発生することがわかった。



図 2. n=1~3の径速度のモード構造。左図は線形段階、右図は非線形初期段階に対応する。



図3. 非線形初期段階におけるn=1のフローパターン。右図は、コア領域を拡大した図である。

高 Ni 鋼材料の微細組織安定性に関する研究

原子力機構 井上 利彦

1. はじめに

高 Ni 鋼は、良好な耐スエリング特性を有していることから燃料被覆管材料として開発されている一方、照射 や高温熱時効にともなう延性の低下が課題である。照射実績を有する Nimonic PE16 では γ '(Ni₃(Ti, Al))析 出物の粗大化や粒界での再析出が延性低下の要因の一つとされている^[1,2]。これら課題を克服するため、 JAEA では Nimonic PE16 で利用している γ '析出型とは異なる炭窒化物析出型の高 Ni 鋼(15Cr-35Ni 鋼)と、 γ 'よりも安定と考えられる γ "(Ni₃Nb)を加えた γ '/ γ "析出型の高 Ni 鋼(15Cr-43Ni 鋼)の 2 鋼種を開発し、 特性評価を進めている。本研究では、耐スエリング特性や照射下での微細組織安定性の評価を目的として、 系統的な条件での照射試験が可能な TIARA にてイオン照射を行った。

2. 実験

供試材は主に 2 種類の高 Ni 鋼(①15Cr-35Ni 鋼(0.05C-15Cr-35Ni-2.3Mo-1.5W-0.4Nb-0.2V (wt%)、 23%CW +720℃×10hr)、②15Cr-35Ni 鋼-28 (0.05C-15Cr-35Ni-2.3Mo-1.5W-0.4Nb-0.2V (wt%)、23%CW +720℃×10hr+10%CW)とした(表-1、2 参照)。また、耐スエリング特性の相対比較のために、中性子照射デ ータが豊富な PNC316 鋼(0.05C-16Cr-14Ni-2.5Mo-1.8Mn-0.7Si-0.025P-0.004B-0.1Ti-0.1 (Nb+Ta) (wt%)、 20%CW)を同時に照射した。照射条件は、トリプルビーム照射モード(12MeV-Ni3+イオン、1.05MeV-He イオ ン、380keV-H イオン)において、試験温度 550、600、650℃、照射量 100、250 dpa(同時照射における He イオ ン及び H イオンの注入量は 100 dpa において、それぞれ 100appm、1500appm)とした。その後、各試料の損 傷領域について集束イオンビーム装置(FIB)による試料加工及び透過型電子顕微鏡による微細組織観察を 行った。

3. 結果と考察

2 種類の高 Ni 鋼のボイドスエリング(体積率)の照射量依存性を図 1 に示す。比較材の PNC316 鋼及び 15Cr-35Ni 鋼で顕著なボイドスエリングが認められた照射温度 600℃において、10%冷間加工を加えた 15Cr-35Ni 鋼-28 は、耐スエリング特性が照射量 250dpa においてもボイドスエリングが低く抑えられていることを確認 した。照射量 100 dpa 試料では、15Cr-35Ni 鋼-28(製造まま材)を用いた転位密度評価や微細組織観察の結 果から、高い転位密度及び転位上の微細な炭化物の析出物を観察していることから、照射欠陥のシンクサイト として追加工した加工転位が有効に働いたため、15Cr-35Ni 鋼-28 の体積変化率が抑えられたと考えられる。 照射量 250 dpa 試料においても、体積変化率が抑えられていた。この理由として、PNC316 鋼と 15Cr-35Ni 鋼-28 の析出物数密度は同じレベルに低下していると考えられるため、高 Ni 化により体積変化率が抑えられたと考えられる。

	Ni	Cr	Mo	W	Nb	V	Ti
15Cr-35Ni	35	15	2.3	1.5	0.35	0.2	0.01
15Cr-35Ni-28	35	15	2.3	1.5	0.32	0.2	< 0.01
PNC316	14	16	2.5	-	0.1 (Nb+Ta)	0.01	0.10
表-1 供試材の化学組成							
15Cr-35Ni	15Cr-35Ni SA(1,130°Cx2min)+23%CW+HT(720°Cx10hr)						
15Cr-35Ni-28	SA(1	,130℃	x2min)+	23%C	W+HT(720	°Cx10hr)	+ <u>10%CW</u>
PNC316	PNC316 SA(1,095°Cx1min)+20%CW						
(SA:Solution Annealing, HT:Heat Treatment, CW:Cold Working)							
表-2 供試材の加工熱処理条件							



低エネルギーヘリウムプラズマ照射によるナノブリスターの形成機構

九州大学応用力学研究所 吉田直亮

1. 緒言

核融合炉におけるダイバータ材やプラズマ対向壁材の候補として高融点でスパッタリング損耗が少な く熱伝導性にも優れたタングステン及びその合金が有力な候補材料と考えられており、近年様々な視点から集 中的に研究が行われている。W は本来脆い材料であり高い熱負荷によって発生する内部応力に十分耐えられ るかなど、課題も多いのが現状である。また、核融合炉環境下では高い熱負荷のみならず燃料である水素同位 体や核融合反応によって発生するヘリウムのプラズマや中性粒子による激しい照射損傷も懸念される。特 に、He 原子が集合することによって発生するHe バブルは、ダイバータで問題となる 1000℃ 以上の高温に おいても表面に特異なファズ構造を形成することが報告され、近年大きな関心を集めている。一方、炉壁では 比較的温度が低いため(600℃ 程度)ファズ構造のようなドラスティックな表面劣化現象はこれまで報告さ れておらず一般的な関心は比較的低い。

核融合科学研究所のLHD では一般的なH プラズマ放電に加えHe プラズマ放電も頻繁に行われている。例えば第18 サイクル (C-18、2014 年) では約1/4 がHe 放電であり、プラズマ対向材料への影響が特に大きい長時間放電では専ら He が用いられている。本研究では He による長時間放電が頻繁に行われるようになったC-15 から C-18 においてプラズマ曝露された W 等におけるナノレベルでのプラズマ照射損傷について研究した。

2. 実験方法·結果·考察

プラズマとの相互作用が強いLHD の Inner Board _ 部図 1 9I-3,9I-5 位置等にW およびSUS316L の板材 や予め薄膜化した試料を設置し、C-15 から C-18 のプラズマに曝露した。試料は各キャンペーン終了後取り 出し、板材からは収束イオンビーム加工装置を用いて断面薄膜試料を切り出した後、透過型電子顕微鏡(TEM) を用いてプラズマ対向面直下の微細組織を調べた。また、走査型電子顕微鏡による表面組織観察やナノインデ ンターを用いたプラズマ曝露面の表面硬度測定も合わせて行った。

図2にあらかじめ薄膜化した後プラズマ曝露した W 薄膜試料(厚さ 80nm 程度)の TEM 写真である。 明視野像には直径数 nm の白点像や 20nm を超える明るい像が大量に見られる。また、暗視野像(g=(110)) では更に微細な像が全面を埋め尽くしている。これらの像はプラズマ曝露によって大量のナノサイズのキャビ



図1 LHD 炉内写真。損耗ドミナントな 9I-3、9I-5 等に試料を設置



C16 9I-5 W

ディーや転位ループが発生していることを示している。 大きい明るい像は成長してキャビティーあるいは剥離によ る膜厚の減少を示している。これまでの基礎研究からこの ような激しい損傷を起こすことができるのはHe プラ ズマのみであることが解っており、これらの照射欠陥は He を用いた長時間放電下で形成されたものと言える。典型 的な He プラズマ放電下でのプラズマ対向面における He deposition rate (apa/s) と vacancy の発生速度 (dpa/s)の深 さ分布を図3に示す。長時間放電では数分から数 10 分間 放電が持続することを考えると、すさまじい量の He と欠 陥が導入されていることが理解できる。実際、プラズマ曝 露した試料における He は深さ約 50nm 程度までの領域に



入 (apa/s) と弾き出し損傷 (dpa/s) の 深さ分布

強く捕捉され、表面近傍での濃度は 20at%程度に達していることが別途行った GD-OES 分析から明らかに なっている。これらの事から微細なキャビティーは内部に大量の He を含む He バブルであることがわかっ た。図4は典型的なプラズマ曝露 W の断面 TEM 写真である。直径数 nm 以下の微細なHe バブルは主に深 さ 20nm 以上の領域に分布しており、深さ 60nm の領域まで存在が確認できる。一方、表面から 20nm 程度ま での領域では直径 5-10nm 程度まで成長した球形の He バブルが多く見られる。更に表面層では深さ約 10nm 程度の局所的な剥離が多数発生している。部分的な表面剥離は走査型電子顕微鏡によっても確認した(図 5) 表面の微細な窪みは He の高い内圧によってバブル間に亀裂が走り発生するブリスターの表皮(蓋)が欠落 してできたものと思われる。一般的にはプラズマ対向材料の損耗量はスパッタリング損耗を想定して評価さ れているが、今回の実験結果は W の場合ブリスタリングも重要な損耗プロセスであることを示唆している。

図4に見られるように表面直下約 155m の領域は黒ずんだコントラストを持っており、試料を傾斜しブラ ッグ条件を変えてもコントラストは殆ど変化しない。このことはこの領域の結晶格子が発生した転位ループや バブルによって激しく歪んでいることを示唆している。また、XPS, GD-OES 及び EDS による表面分析か

らこの表面直下領域には Heのみならず、 C、O、B 等が相当量混入しておりいわ ゆるミキシング層が形成されていること も判っている。大量の照射欠陥や不純物 元素が存在する最表面直下は本来脆い W を更に固くし脆くしていることが想定 されたため、ナノインデンターを用いて 表面近傍の硬度を測定した。図6に示すよ うに表面下15nm 程度までの領域の硬度 は非照射材の7 倍の硬度を示し、ブリスタ リングによって表面層が容易に剥離し 損耗が起こり易い条件になっているこ とが確認できた。W とは対照的に、高い靭 性を持つ SUS316L では W と同様大 量のバブルが形成されているにも関わ らず表面につながる亀裂は観察された



図4 損耗ドミナント領域(C16-9I-3)に置いた Wの断面 TEM 写真。表面近傍に種々の激しい損傷が発生。

ものの表面層が剥離したと思われるような窪みは殆ど認められなかった。

最後に、この様なナノブリスター形成による損耗が核融合炉の第一壁で起こりうるかどうかを考察する。核 融合炉環境とLHD 環境の大きな違いは:①LHD の炉壁温度は高々150°C 程度と低い。②LHD では He と H の照射は単独で起こるのに対して、核融合炉では同時照射となり He のフラックスは水素同位体の 1/10 程度 である。これまでの研究から He 照射下の He バブルの発生・成長過程は 600°C においても室温と大差なく、 ナノサイズのバブルが大量に発生することがわかっている。また、水素と格子欠陥との強い相互作用は精々 400-500°C 程度までであり核融合炉で問題となる 600°C では H が He の挙動に強い影響を与えることは考 え難い。以上の観点から、核融合環境下においても LHD で見られたようなナノブリスター形成による損 耗と剥離したブリスター表皮のプラズマへの混入によるプラズマ汚染が想定され、W 壁の寿命やプラズマ への影響を評価する上で無視できない現象である。線形プラズマ発生装置等を用いた定量的な基礎研究が期待 される。

現在、LHD で長年にわたりプラズマ曝露された保護板 (ステンレス鋼)について同様な研究を進めている。 この結果が纏まり次第、来年度になるが、今回報告した成果も合わせて学会での発表および論文の投稿を予定 している。



図5 損耗ドミナント領域 (C17-9I-5) におい てプラズマ曝露した W の表面形状を示 す SEM 写真。



図6 損耗ドミナント領域 (C16-8I-3) に おいてプラズマ曝露した W のナノ インデンターを用いた硬度評価

プラズマ乱流における非線形伝搬と、局地集中豪雨の統計解析への応用の研究

(Nonlinear Propagation Phenomena in Plasma Turbulence

and Its Application to Statistical Analysis of Localized Torrential Rainfall)

杉田 暁¹、佐々木 真²、荒川弘之³

¹中部大学 中部高等学術研究所 国際GISセンター、²九州大学 応用力学研究所、³帝京大学

序論

近年、乱流プラズマに外部から擾乱を印加することにより、プラズマの強い応答が非線形・非局所 的に伝搬することが、実験[1]及び非線形シミュレーション[2]で明らかにされた。この応答の 非局所的かつ弾道的な伝搬過程は、広く自然科学、社会科学の分野において重要となる現象である。 大気・海洋・土壌汚染に代表される環境問題や、伝染病の感染、各種災害時の正誤入り混じった情報など、リスク が相互に関連した事象や情報は、非線形的に、時空間的に波及・伝搬する特徴を有しているが、既存の古典的な拡散 モデルでは記述できない現象であり、このような事象を理解し、共存し、持続可能な社会を構築することは、人類 社会に課せられた大きな課題である。特に、平成26年8月に広島市を襲った豪雨に代表される、突発的な局地 的大雨や集中豪雨、及びそれに伴う洪水・内水氾濫や、地すべり・土石流などの災害に、急激な状況変化への対 応ができず、被害が生じる事例が増加している。近年整備されてきた、時空間に高分解能かつ国土全域を覆う気 象データを利用して、局地的大雨や集中豪雨に関する知見を得、そのダイナミクスを理解することにより、減災 に寄与することは重要である。

著者は、これまで核融合プラズマ乱流中で、乱流の塊(クランプ、ブロッブ)が非線形的に伝搬 し、非拡散的な輸送を駆動する現象について非線形シミュレーションと統計的解析手法を用いて研 究を行ってきた[3]また、地理情報システム/デジタルアースを利用した防災に関する研究を行い、気 象と自然災害の重要性に着目している[4]これらの経緯から、気象、特に局所的な集中豪雨に関して の実証的な統計的定量化、及び非線形ダイナミクスの統計的手法による定式化の可能性 があるた め、今回の研究対象の情報として選択した。

方法

本研究で取り扱う気象データとして、気象庁・一般財団法人気象業務支援センターの配信する「高解像度 降水ナウキャスト」を用いた。高解像度降水ナウキャストは、2014 年8 月7 日から配信の始まった新しい データで、5分間隔で配信される全国 250m メッシュの格子データであり、そのサイズは、圧縮状 態で1日あたり 46GB にもなる大規模データである。全国 20 ヵ所のドップラーレーダー、気象 庁・国交省・地方自治体の保有する全国 10,000 ヵ所の雨量計の観測データ、国交省XRAIN等 を活用することで実現されている。特に今回は、配信されるデータに含まれる予測データ は用い ず、リアルタイムの実況データのみを解析の対象とし、台風の影響が大きく、岩手県岩泉町での豪 雨災害などのあった 2016 年 8 月下旬から約2ヶ月間のデータを対象にプレリミナリな統計解析 を行った。

結果

まず、高解像度ナウキャストについて、大規模データの取扱い、局所的集中豪雨についての統計 的定量化の基盤を構築するため、Web GIS 上での可視化を行った(図1)。過去のデータについ ては、閲覧、検索、解析を目的に 2015 年11月初頭より上記のデータ配信を受け、中部大学中部高等 学術研究所国際GISセンターのデジタルアース・サーバに蓄積を行っており、一部をウェブ・サー ビスとして公開している[5]。次に、全国、及び一部地域のデータについて、プレリミナリな統計解 析を行い、図2に5分間降水量の、全国・2ヶ月間での時空間積分値の確率密度関数を示した。分布は極めて裾 が長く、降雨が単純な確率に基づく過程ではないことを表している。



図 1 高解像度降水ナウキャストの Web GIS 上 での可視化



謝辞

本研究は、九州大学応用力学研究所平成28年度共同利用・共同研究28FP-33、中部大学問題複合体を 対象とする共同利用・共同研究 IDEAS201631、及び文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業 (S1201030)の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] S. Inagaki, et al., Nuclear Fusion 53 (2013) 113006.
- [2] N. Kasuya, et al., Plasma Phys. Contrl. Fusion 57 (2015) 044010.
- [3] S. Sugita, et al., Plasma Fusion Res. 9 (2014) 1203044.
- [4] S. Sugita, et al., 5th Digital Earth Summit (2014) and 6th Digital Earth Summit (2016).
- [5] http://de08.digitalasia.chubu.ac.jp/map/index.jsp (要ログイン)

酸化物結晶における照射欠陥形成およびその安定性

九大工 山口芳昭 (学生), 山口理一郎, 永石大誠 (院), 吉岡 聰, 安田和弘, 松村 晶 CEA-Saclay Jean-Marc Costantini

1. 目的

蛍石構造酸化物セラミックスは、放射線照射下において優れた耐照射損傷性を持つことが報告 されている。二酸化ウラン(UO₂)はこれまでに軽水炉燃料としての実績があり、安定化ジルコニ ア(YSZ)は、長寿命核種の核変換母相材料として期待されている。これらの材料中には核分裂片 による高密度電子励起損傷が誘起され、イオントラックと呼ばれる柱状の照射欠陥が形成される。 これまで、UO₂の模擬材料として同一の結晶構造と類似の物性を持つ CeO₂を用いてイオントラッ クに関する研究が行われており、CeO₂中のイオントラックは蛍石構造を保持するものの、2 nm 程 度の中心領域で原子数密度が低下していることが明らかにされている。一方、YSZ は同じく蛍石構 造を呈する酸化物であるが、酸素副格子に構造空孔が存在し、また、室温から 1000 ℃での熱伝導 度は約 2 W/(m・K)と、UO₂および CeO₂の 1/3 以下の低い値を示す。このため、YSZ 中のイオントラッ ク構造に関する知見は十分ではない。本研究では、核分裂片を模擬した高速重イオンを照射した YSZ の微細組織を透過電子顕微鏡法により観察し、YSZ 中のイオントラック構造及び形成効率を明 らかにすることを目的とした。

2. 実験方法

ZrO₂にY₂O₃を9.8 mol%添加した板面(001)面のYSZ単結晶、および8 mol%のY₂O₃を含むYSZ 粉末から作製した焼結体を使用した。YSZ 粉末を一軸加圧および静水圧加圧により柱状ペレット に成形し、1600 K まで昇温した後、12 時間保持して室温まで冷却し、焼結体を作製した。焼結体 を低速ダイアモンドカッター、SiC 耐水研磨紙で厚さ約 500 µm にし、YSZ 焼結体および単結晶を 直径 3 mm の円板に打ち抜いた。これらを回転研磨機により厚さ約 150 µm にした。この試料に日 本原子研究開発機構のタンデム加速を用いて 200 MeV Xe¹⁴⁺イオン(電子的阻止能値:28 keV/nm) を室温にて 3×10¹¹~5×10¹⁴ cm⁻² 照射した。ディンプラーにより照射試料の中心領域を厚さ約 15 µm まで薄くし、Ar イオン研磨装置を用いて薄膜試料とした。この試料を九州大学超顕微解析研究セ ンター内のハイコントラスト補助電子顕微鏡(JEOL、JEM-2100HC)により明視野法を用いて加速電 圧 200 kV にて観察した。また、同施設内に設置される収差補正走査/透過電子顕微鏡(JEOL、 JEM200F)を用いて走査透過電子顕微鏡法による高分解能観察を行った。

結果および考察

図1に200 MeV Xe¹⁴⁺を1×10¹³cm⁻²まで照射した YSZ の同一視野における明視野像を示す。YSZ 中のイオントラックは、CeO₂中のイオントラックと同様にフォーカス条件に依存して白黒反転するフレネルコントラストとして観察された。このことは、YSZ 中のイオントラック中心領域の原子数密度が CeO₂の場合と同様に低下していることを示している。

YSZ 中のイオントラック密度の照射量依存性を得るため、200 MeV Xe¹⁴⁺を 3×10^{11} cm⁻²から 5×10¹⁴cm⁻²の範囲で照射し、明視野法により観察した。図2にイオントラック数密度の照射量依存 性を CeO₂の結果と共に示す。YSZ 中のイオントラックは直径 1.5 nm であり、CeO₂のトラックサ イズ (直径 2.2 nm)に比べて小さいことがわかった。また、図2より、YSZ および CeO₂共にイオ ントラック数密度は低照射領域において照射量に比例して増加し、高照射領域では飽和している ことがわかる。このことは、いずれの試料でも高照射領域ではイオントラックの形成と回復が平 衡していることを示している。しかしながら、イオントラック蓄積過程の解析から得られた形成 効率は、CeO₂の0.61に対してYSZでは0.05となり極めて小さい値となった。さらに飽和数密度 は、YSZ(8.3×10¹¹cm⁻²)の方がCeO₂(4.7×10¹¹cm⁻²)の2倍程度高い値を示した。この飽和数密度 に基づいて、YSZおよびCeO₂の回復影響領域をそれぞれ直径2.8 nm、および13.2 nmの柱状領域 と評価した。以上の結果は、CeO₂よりもYSZの方が高密度電子励起損傷からの回復が起こりや すいことを示している。これにはYSZ中の酸素構造空孔が影響を及ぼしていると考えられるが、 更なる研究が必要である。

YSZ 中イオントラックの詳細な構造を調べるため、HAADF-STEM 法による観察を低照射量 (3×10¹¹cm⁻²)および高照射量(5×10¹⁴cm⁻²)試料に対して行った。図 3(a)に示す高照射領域の低倍 HAADF-STEM 像からイオントラックは黒いドットコントラストとして観察され、YSZ の原子数 密度が低下していることを示している。図 3(b)に1つのイオントラックを拡大した原子分解能像 を示す。白い点は Zr 副格子に対応しており、イオントラック中心領域においても Zr 副格子の周 期性は保たれている。また、幅 5 nm 程度の領域で信号強度が低下している(図 3(c))。信号強度が 大きく低下している領域(幅 1.5 nm) はフレネルコントラストのサイズとほぼ一致し、この領域 の原子数密度が低下していることを示している。



図1 200 MeV Xe イオンを 1×10¹³ cm⁻² 照射した同 一視野 YSZ TEM 明視野像。Δf は、デフォーカス量 の値を示している。



図 2 YSZ 中イオントラックの面密度の照射量依存性。 CeO2のデータはTakakiらによる。

S. Takaki, et al. Nucl. Instr. Meth. B, 326 (2014) 140.



距離(nm)

図 3 200 MeV Xe¹⁴⁺を 1×10¹³cm⁻² 照射した YSZ 中イオントラック(a) 低倍 HAADF-STEM 像、(b) 高分解能像、(c) (b)の点線で囲んだ領域の信号強度

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

筑波大学数理物質系 坂本瑞樹

1. はじめに

タングステンは低損耗、高融点、低水素吸蔵率という特長から核融合炉のプラズマ対向材料の最有力候 補材と考えられている。しかし、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、バブル形成等のプラズマ・材料相互作用に起因する表面改質により変化し続けることが知られている。 この表面改質が材料の水素吸蔵・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。 今年度は、タングステンへの重イオン照射による水素吸蔵特性への影響に着目して研究を進めた。応用力学 研究所のタンデム加速器により再結晶タングステン試料に2.4 MeV の Cu²⁺イオンを照射した後、その試 料に小型プラズマ生成装置 APSEDAS (筑波大学)を用いて低エネルギー・高フラックスの重水素プラ ズマを照射し、昇温脱離ガス測定から水素同位体吸蔵特性を評価した。

2. 実験結果及び考察

本研究で用いた試料は、アライドマテリアル社製の ITER 仕様タングステン (10mm x 10mm x 1mm)を 2000℃で1時間焼鈍した再結晶タングステンである。結晶粒径は 10~50µm 程度であり、表面は鏡面研磨されている。再結晶タングステンを用いる理由は、材料中の潜在的な欠陥の影響を極力減らし、重イオン照射の影響を見やすくするためである。この試料に対して、九州大学のタンデム加速器を用いて、2.4MeV のエネルギーの銅イオン (Cu²⁺)を照射した。今回の実験で用いた銅イオン照射用ステージは温度制御が可能となっており、室温、500K、873K の3種類の試料温度にて、4dpa まで銅イオン照射を行った。この時の銅イオンのフラックスは、5×10¹⁵m⁻²s⁻¹ である。

九州大学において銅イオン照射された3種類のタングステン試料に対して、筑波大学の小型プラズ マ生成装置 APSEDAS (筑波大学)を用いて重水素プラズマ照射を行った。照射したプラズマの電子温

度と電子密度はそれぞれ約 10 eV と約2.8 × 10^{17} m⁻³である。フラックスは約3.8 × 10^{21} m⁻²s⁻¹ であり、フルエンスが 2.0 × 10^{25} m⁻²sでプラズマ照射した。プラズマの空間電位は約 30V であり、アース電位の試料に入射する重水素イオンのエネルギーは30eV と考えられる。放射温度計で測定した照射中の試料表面温度は約 480K であった。プラズマ照射後に試料を昇温脱離装置に移し、十分に真空排気を行った後に、1K/s の昇温速度で1173K まで加熱して試料から放出されるガス量を四重極分析器にて測定した。

図1に3種類の試料の昇温脱離スペクトル を示す。どのスペクトルにも3つのピークがあ ることが分かる。それぞれのピークでの温度 は、①約640K、②約750K、③約850Kであり、 銅イオン照射時の試料温度が室温から873K まで変化してもピーク温度にはほとんど変化



図1 試料温度が室温、500K、873K において 銅イオンを 4dpa まで照射したタングステ ン試料の重水素の昇温脱離スペクトル

がないことが分かる。これらの温度は試料 中の欠陥の種類と関係しており、低温から 順 に ①dislocation と grain boundary、 ②vacancy、③nano-void とvacancy cluster であると考えられる。各ピーク温度での脱 離速度は、銅イオン照射時の試料温度が高 くなるほど減少しており、脱離速度を積分 して得られるタングステン試料中の重水素 リテンションも図2に示すように減少して いる。銅イオン照射時の温度が高くなるこ とで、欠陥の生成が抑制されることが示唆 される。今後、透過型電子顕微鏡観測を通し て、欠陥の微細組織と重水素吸蔵特性の関 係を詳細に調べることが必要である。



図 2 重水素吸蔵量の銅イオン照射時試料温度 依存性

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
寺門 明紘	筑波大学·数理物質科学研究科	大学院生(D1)	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(D1)	プラズマ計測
田中 裕樹	筑波大学·数理物質科学研究科	大学院生(M2)	プラズマ実験
伊能 俊太朗	筑波大学·数理物質科学研究科	大学院生(M1)	水素吸蔵解析
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
渡邉 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

4. 成果報告

- (1)田中裕樹、坂本瑞樹、渡邉英雄他「高エネルギー銅イオン照射されたタングステンの重水素吸蔵特性評価」第11回連合講演会(九州大学、平成28年7月)15P064.
- (2) H. Tanaka, M. Sakamoto, H. Watanabe, et al., "Deuterium retention in heavy-ion-irradiated tungsten exposed to low energy and high flux plasma", 13th China-Japan Symposium on Materials for Advanced Energy Systems and Fission and Fusion Engineering, 26-29 Sep. 2016 (Hefei, China)
- (3)田中裕樹、伊能俊太朗、坂本瑞樹、渡邉英雄 他「重水素プラズマ曝露された照射欠陥導入タングステンの昇温脱離スペクトルの解析」第 33 回プラズマ・核融合学会年会(東北大学、平成 28年 12 月) 01aP79.

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 非局所性に関する包括的研究

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トロイダルプラズマ中の電子熱輸送に対し て確率論的手法を適用し、磁場閉じ込めトロイダルプラズマの閉じ込め状態に関する新しい評価 手法を提示している。これにより、例えば、核融合科学研究所の大型へリカル装置(Large Helical Device: LHD)で生成されたプラズマにおいて観測されている非局所輸送現象と呼ばれるプラズマ 周辺部を冷却するとほぼ同時にプラズマ中心部の電子温度が上昇する現象が、従来考えられてい たプラズマ中心部において輸送が改善する遷移現象が発生したためではなく、1)プラズマ周辺 部において輸送が改善する遷移が発生し、2)そのプラズマ周辺部が輸送の変化に対して裕度の 高い状態になっているプラズマ中心部と相互作用を起こしたためであることが明らかになった。 本研究では、九州大学応用力学研究所の単独研究及び研究代表者と応用力学研究所所内世話人で ある稲垣滋教授との共同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ことで、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関する包括的理解を得ることを目的としている。

研究方法 九州大学応用力学研究所の単独研究及び研究代表者と同研究所との共同研究で培ってき 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。平成28年度は、米国で稼動して いた大型トカマク装置 TFTR で得られた電子 乱流熱輸送における非局所性に関する実験デ ータを解析した。

研究結果 図1に、米国のプリンストン大学 プラズマ物理研究所(PPPL)で稼動してい た大型トカマク装置 TFTRで観測されていた 非局所輸送現象の一例を示す。時刻 2.325 秒 (図中の縦破線)において、カーボンリミタ ーからカーボン小片がプラズマに侵入したこ とで、それに呼応するように中心の電子温度 が上昇しているのが分かる。上述の通り、こ のような現象は核融合科学研究所のLHD に おいても観測されている。図2(a)に、この時 の局所電子温度勾配の時間発展を示す。参考 として、図2(b)に、LHD の非局所輸送現象発 現前後の局所電子温度勾配の時間発展を示す。 TFTR では周辺冷却に伴って急増した電子温 度勾配が、LHD の場合とは異なり、保持されず に減少した。しかし、一旦減少した電子温度勾 配は再び過渡的に増加した。また、その電子温 度勾配の過渡的な増加は、プラズマ周辺



図1. TFTR で観測された非局所輸送現象の一例。 時刻 2.325 秒付近でリミターからのカーボン小片 がプラズマに侵入したことで、非局所輸送現象が発 現している。



図2. (a) TFTR において非局所輸送現象が発現した時の局所電子温度勾配の時間発展、(b) LHD において非局所輸送現象が発現した時の局所電子温度勾配の時間発展。

部からプラズマ中心部に向けて伝搬しているように見える。このように、周辺冷却に呼応して中心 電子温度が上昇する、という観測される事象は同じであるにも関わらず、局所電子温度勾配が示唆 する輸送の変化はヘリカル型のLHD とトカマク型のTFTR で大きく異なっている可能性が高いこ とが明らかとなった。

今後の予定大型のヘリカル型装置LHD、中型のトカマク型装置HL-2A、そして大型のトカマク型 装置TFTR それぞれにおける非局所輸送現象に対して、共通の解析手法を適用することで、これま で得られなかった知見を得ることができた。今後、3つの装置間における比較研究をさらに詳細に 進めることで、磁場閉じ込めトロイダルプラズマにおける電子乱流熱輸送における非局所性に関す る包括的理解の獲得を目指す。

研究成果報告特になし。

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)

酸化物セラミックス中の水素同位体の溶解、拡散、放出挙動に関する研究

九州大学大学院総合理工学研究院 エネルギー理工学部門 橋爪 健一

1. 目的

プロトン導電性酸化物は、500℃以上の高温で水素ポンプとして使用できることから、核融合システムにお いて生成するトリチウムを含むガスの精製、回収の上で非常に重要な電気化学素子の一つである。トリチウ ムは、軽水素や重水素および水素含有ガス、ヘリウムなど他のガスとの混合ガスとなることが想定される。 このような混合ガスからプロトン導電性酸化物を水素ポンプとして使用し、高温ガス中の水素ガス分離、回 収、および、トリチウム濃度の測定精度を向上させる方法が期待されている。本研究では、プロトン導電体 セラミックスとして、セレート系(BaCeO₃)、ジルコネート系(CaZrO₃)、インデート系(BaInO_{2.5})などの材料か ら材料を選択し、重水素あるいは重水を用い水素同位体の溶解・放出挙動に関する実験・解析を行う。

我々は、最もプロトン伝導度の高いBaCeO₃試料について、トリチウム水蒸気を用いて溶解度や拡散係数を 明らかにしてきた。そのトリチウム分析の際、室温大気中で試料表面から、徐々にトリチウムが放出される ことを見出した。そこで、本実験では、BaCeO₃試料からの放出挙動とともに水素含有ガス種(水素分子と水 蒸気)による水素溶解度の違いを明らかにすることを目的とした。具体的には、高温で重水、重水素に曝露 溶解したBaCeO₃試料を準備し、室温大気中での保持時間を変化させて、応用力学研究所および当研究室の昇 温脱離ガス分析装置(TDS)を用いて水素同位体放出挙動を観測した。

<u>2.実験</u>

10%Y 添加 BaCeO₃粉末(原料粉末を(株) TYK より購入)を、金型プレス、静水圧プレス(200MPa) で円板形状に成形後、粉末焼成法(大気中1873K、20h)により焼結体円板(密度98%TD以上、直径約8 mm、厚さ約2 mm)を得た。この焼結体円板を切断加工し、短冊形状試料(0.5×2×8 mm³)を準備した。 この試料を、一旦1000℃で真空加熱し残留ガス成分を放出させた後、重水素あるいは重水蒸気曝露(773K、 3h、約30Torr)を行った。その後、1日から1週間、試料を大気中に保持後、TDS 装置にて試料からの 重水素を含むガス種(HD、D₂、HDO、D₂O)のTDS スペクトル(昇温速度1K/sec)を測定した。

<u>3. 結果と考察</u>

 D_2 、 D_20 曝露した Y 添加 BaCeO₃の1日大気保持後の TDS スペクトルを図1、図2に示す。 D_2 曝露した 試料では、水素ガス(HD、 D_2)の放出ピークが大きく、水蒸気ピーク(HDO、 D_2 O)も観察される。また、 ピーク温度に差があり、水素ガスでは約600℃、水蒸気は約750℃であった。一方、 D_20 曝露した試料で は、ほとんどが、水蒸気ピーク(HDO、 D_2 O)であり、ピーク温度は D_2 曝露試料とほぼ同じ約750℃であ った。HD、HDOのH成分は大気保持中の同位体交換が主要因と考えられるが、詳細な供給源、供給機構 については今後の検討課題である。

図3は、D₂、D₂0曝露したBaCeO₃の1日、3日、7日大気保持後のTDSスペクトルから得られた残留D 量である。D₂、D₂0曝露試料で、溶解条件は同じであるが、水素溶解量はD₂0曝露試料の方が1桁以上高 いことが分かる。これは、水素の溶解反応式がそれぞれ、

$D_2 \ddot{R} fi : D_2 + 2O_0 + 2h^{\bullet} \Leftrightarrow 2OH_0^{\bullet}$ $D_2 O \ddot{R} fi : D_2 O + V_0^{\bullet} + O_0 \Leftrightarrow 2OH_0^{\bullet}$

と書かれ、D₂0 曝露では Y 添加により形成した酸素イオン空孔(Vo)が、水蒸気の溶解として水素溶解 反応に利用されるためである。また、大気保持時間については、D₂0 曝露ではほとんど残留 D 量が変化 していない。この D₂0 曝露の結果は、先行研究であるトリチウム水蒸気曝露実験の表面からの放出の結 果と比較、検討すると、試料表面の近傍では水素の同位体交換による水素の放出が起こるが、1週間程 度ではバルク中からの顕著な放出は起こらないと解釈できる。一方、D₂曝露では溶解量が低いだけでな く低下が見られる。図4は D₂曝露の結果を再プロットしたものである。この低下速度から重水素の拡散 係数を評価すると 10⁻¹⁰ cm/s 程度の値が得られた。室温での水素の拡散係数の過去の報告はないが、高 温側の拡散係数の文献データから外挿した値とほぼ一致した。



図1 重水曝露 BaCeO3 重水素放出スペクトル



図3 室温大気保持後の BaCeO₃中の残留 D 量



図2 重水曝露 BaCeO3 重水素放出スペクトル



<u>4. まとめ</u>

本年度行った TDS 実験の結果は、酸化物プロトン導電体 BaCeO₃ 中の水素溶解挙動の水素源の化学種に よる違いを明らかにするものであり、水蒸気溶解では溶解度が高く、室温大気保持での放出も少ないが、 水素ガス溶解の場合は、溶解度は低く、室温大気保持での放出は多いことが分かった。

5. 研究組織

九大総理工:橋爪健一 大学院生:植田侑吾、後藤健吾、城慎之介 学部生:岩佐匡浩 九大応力研:渡辺英雄

オーステナイト系ステンレス鋼のイオン照射試験および照射特性評価

日立製作所 研究開発グループ 王昀

1. 目的

現在,原子炉の炉内構造材を対象として,耐食性,耐SCC性並びに耐照射性を向上した オーステナイト系ステンレス鋼の開発に取り組んでいる.その特性評価の一環として,耐照 射脆化性,耐照射誘起粒界偏析性を評価する必要がある.そこで,九州大学応用力学研究所 殿所有の重イオン照射システムを用いて,イオン照射により,照射欠陥を導入した開発材料 の照射特性の評価を試みた.2016年度は耐照射特性に及ぼす合金添加元素影響を明らかに することを目的とし,ナノインデンテーション法によりオーバーサイズ元素添加/非添加材 を対象とした照射硬化特性を評価した.

2. モデル合金組成

モデル合金の試作目標組成を表 1 に示す. 耐照射特性への添加元素影響を明確化するこ とを目的とし,欠陥捕獲元素種及び欠陥捕獲元素種濃度を変化させた 3 種のモデル合金を 作製した. 表 2 に照射試験のマトリクスを示す. 添加元素量を振ったモデル合金に加え, 比較材及び実機製造条件にて作製した開発材を対象として,照射試験および評価を実施す る.

No.	材料ID	C	Si	Mn	Р	S	Ni	Cr	Мо	#	備考
1	LC0	<0.01	<0.01	1.70	<0.005	<0.003	10.70	19.00	0.02	-	低C無#
2	LC0.6	<0.01	<0.01	1.70	<0.005	<0.003	10.70	19.00	0.02	0.60	低C高#
3	LC1.4	<0.01	<0.01	1.70	<0.005	<0.003	10.70	19.00	0.02	1.40	低C超高#

表1 供試材の試作目標組成

表2 イオン照射試験に用いる供試材及び照射試験条件

温度	照射量	SUS316L	実機プロセス材 (LC0.6 相当)	LC0	LC0.6	LC1.4
	0.3dpa	0	O	0	0	0
300°C	1dpa	0	0	\odot	\odot	\odot
	3dpa	0	0	0	0	0

3. 2016年度実施項目

(1) イオン照射用試験片作製

所定の熱処理を加えた供試材よりφ3×0.2tのTEMディスクを採取し、表面を電解研磨してから、真空焼鈍を実施する.電解研磨は、「燐酸168cc+無水クロム酸20g+精製水32cc」の溶液を用いて、電圧12Vで、1sec間行った.真空焼鈍は、図1に示すように、試験片を 石英管に真空封入した状態で、「1050℃/5min→炉冷」の条件で行った.



(a) 石英管による試験片の真空封入



(b) 真空熱処理用電気炉

図1 試験片の真空焼鈍

(2) イオン照射試験

欠陥集合体形成挙動,照射誘起偏析特性を評価するために,0.3,1.0,3.0dpaのNi^{3+イ}オン照射を実施した.イオン照射条件を表3に示す.解析コードSRIM-2008により求められた深さ方向の照射損傷分布を図2に示す.線量率ピーク位置は1050±100nmであることを確認した.

表3イオン照射試験の条件

イオン照射装置	HVEE 社製タンデム型加速器
イオン種	Ni^{3+} (3.2MeV)
照射速度	3.5×10-4 (dpa/s)
照射温度	300°C
目標照射量	0.3, 1.0, 3.0dpa(線量率のピーク位置)



図2 損傷分布の深さ依存性(SRIM-2008による計算)

(3) 硬さ評価

イオン照射試験を行った供試材を対象とし、ナノインデンテーションによる微小硬さ 変化評価を実施した.測定は、九州大学所有の Elionix ENT-1100 ナノインデンタを用い て、最大荷重 5mN で行った.照射前の電解研磨後並びに照射後にインデンテーション硬さ 測定を実施し、照射による硬化量を評価した.

4. 硬さの測定結果

図 3 に照射前後のビッカース硬さ測定結果を示す.事前にビッカース硬さ標準試料を 対象に、ナノインデンタから得られた硬さパラメータ *H*_{IT} と *HV* の関係式を求めた.この 関係式から、各試験片の照射前後で測定した硬さパラメータ *H*_{IT} をビッカース硬さ *HV* に 換算した.

図 3 (a) に示した硬さ HVでは,LC0.6 相当の実機プロセス材は,1dpa までは他の材料に比べて若干硬さが高い傾向が確認された.組織観察により,本材の結晶粒径はモデル合金および SUS316L に比べて小さかった.一方,3dpa では現行材 SUS316L と同等な硬さとなることが示唆された.

図 3(b) に示した硬さ増量 △*HV*では,現行材 SUS316L に比べて,3dpa までの照射 量では,全体的にモデル合金および実機プロセス材は SUS316L と同等な照射硬化特性を有 することが示唆された.



Irradiation dose (dpa)



図3照射試験後の硬さ変化

5.まとめ

耐照射特性に及ぼす合金添加元素影響を明らかにすることを目的とし、ナノインデンテ ーション法によりオーバーサイズ元素添加/非添加材を対象とした照射硬化特性評価を実施 した.

オーバーサーズ元素を添加したモデル合金および実機プロセス材は,3dpa までの累積照 射量では,SUS316Lと同等な照射硬化特性を有することを確認した.

6. 今後の課題 と対応

今後は各モデル合金を対象に,照射誘起粒界元素偏析特性に及ぼすオーバーサーズ元 素の添加量の影響を検討するため,照射済みの試験片から,収束イオンビーム (FIB)を用 いて粒界サンプルを採集し,透過型電子顕微鏡 (TEM)分析を実施する計画である.これ により,オーバーサーズ元素の添加による照射誘起粒界元素偏析の低減効果を検討する予 定である.

プラズマ輸送理論

代表者 核融合科学研究所 伊藤公孝 所内世話人 稲垣滋

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[1]。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ことを目指す。

Heating heats turbulence から Fuelling fuels turbulence へ

従来のプラズマ乱流輸送の考え方では、ミクロ乱流は定常状態に達し、輸送量は巨視変数 に応じた値をとると考えられてきた。輸送係数がその位置その時刻の鋸歯変数で表現されるとい う、「局所クロージャー」仮説という考え方である。本共同研究を通じて、この局所クロージャー仮説の破 れを確認する大きな進歩を得ている。すなわち、勾配一熱流関係にヒステリシスが存在[2]し、これを説明 する試みとして位相空間における新しい駆動力を取り入れた乱流物理像[3]を提示して きている。プラズマ加熱という「分布関数を変形する力」に着目することで、プラズマの加 熱入力が直接に熱流を変化させるという、「Heating heats turbulence」という概念を提示し ている。

今年度の共同研究では、「Heating heats turbulence」 描像に立脚することで、 輸送の同位体 効果に対する結果を得た。 分布関数を変形する力を表現するパラメタ

$$\Gamma_h = \frac{\delta P}{\delta p} \frac{1}{\chi_N k_\perp^2}$$

と乱流輸送係数の加熱による増倍率

 $1/(1 - \Gamma_h)$

が提案されている[3]。P は加熱入力であり、直接加熱入力が乱流や輸送に影響する様相 が示された。「hに対する水素同位体効果を考えると、共通なパラメタに対し、水素イオン の質量が増すと「hが低下する。その結果、輸送ヒステリシスの幅が狭くなり結局輸送量が減 少することを理論的に示した[4,5]。ヒステリシスの幅は Observable であり[2]、今後 の検証が待たれる[5,6]。

乱流は直接加熱されるのみならず、粒子補給からも影響を受ける。Fueling fuels turbulence」という考え方である[7]。ここでは、SoL プラズマの揺動が粒子補給を介して炉 心プラズマ揺動に転写されるという過程を定式化した。SoL 密度が変動すると、それに応じた 中性粒子密度の変動が生じ、イオン化による粒子補給が変化する。その結果、炉心の密度揺動 へと変動が伝わる。炉心プラズマの揺動レベルの混合長理論予測値からの増倍率が

$$\frac{C}{\rho_i \Delta_n k^2} \left| \frac{\tilde{n}_e}{\langle n_e \rangle} \right|_{SoL}$$

としてまとめられている。ここで C は O(1)の定数、 Δ_n は中性粒子の侵入長である。この 係数はイオンの質量比に依存することが報告されており[7]、同位体効果を考える上での新た なパスとなる可能性がある。

展望

以上の共同研究成果は、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。

謝辞

This work was supported in part by the Collaborative Research Program of Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University.

成果論文

- 1. S.-I. Itoh, et al: Project Review J. Plasma Fusion Res. 90 (2010) 793
- 2. S. Inagaki, et al. Nucl. Fusion 53 (2013) 113006
- 3. S.-I. Itoh and K. Itoh, Sci. Rep. 2 (2012) 860
- 4. S.-I. Itoh, K. Itoh, S. Inagaki, Nucl. Fusion 57 (2017) 022003
- 5. K. Itoh, et al.: 'Hysteresis and fast timescale in transport relation of toroidal plasmas' 26th IAEA Fusion Energy Conference OV-P8, Kyoto, Oct.17-22.2016
- 伊藤公孝 「LHD 重水素実験を舞台とした学術研究」プラズマ核融合学会 第33回年会 S2-6 東北大学 2016.11.29-12.2
- 7. K. Itoh, et al., submitted to Nucl. Fusion (2017)

共同利用研究集会

第 14 回トロイダルプラズマ統合コード研究会

14th Burning Plasma Simulation Initiative (BPSI) Meeting

研究代表者 京都大学 村上定義 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://pgrp.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14回目となるが、そのうち、第2回~第8回と第11回~第13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。第11回よりトロイダルプラズマに対象 を拡大し、炉心プラズマと周辺プラズマ、MHD現象と輸送現象、高エネルギー粒子と乱流輸 送、加熱・電流駆動と長時間運転等の複合現象の統合モデリングおよびそのシミュレーショ ンについて、包括的なアプローチとして議論しようとするものである。

2. 開催日時

開催日程: 2016 年12 月7 日 (水) - 8 日 (木) 開催場所: 九州大学応用力学研究所 2 階大会議室 講演数: 22 件、参加者数: 24 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22件の申し込 みが集まり、件数は例年並みであった。外国(韓国)からの参加者もあった。内容別に分類 するとトーラス統合シミュレーション2件、加熱・粒子供給1件、運動論的効果4件、 乱流8件、輸送3件、SOL/ダイバータ2件、MHD1件、材料1件であった。便宜上分類 をしたが複数の分野にまたがる内容も多い。どれも質の高い研究成果報告であった。今 回のプログラムの特徴は基礎実験装置を対象とした乱流のセッションを構成することが できたことである。運動論効果、材料特性などの研究と合わせ、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が数多くあり、幅広い研究内容を含む研究会 とすることができた。このように毎年新たな話題も随所に加えながら研究会の数を重ね ることができている。さらに本年もポスドク・学生による講演が8件あり、当該分野の 若手の底上げを図りながら研究を進展できていることも印象付けることができた。以下 に講演内容を抜粋して説明する。

本年度の研究会は、藤田による高エネルギー粒子生成磁場を含む平衡解析についての 講演から始まった。高エネルギー粒子の軌道計算を含む拡張の初期結果を報告した。本 多はトーラスプラズマのトロイダル回転について、ITER における実磁場配位を考慮し た評価、JT-60SA における共鳴摂動磁場の効果、JT-60U の H モードにおける residual stress による自発回転など多岐にわたる成果を報告した。福山は世界における ITER に 向けた統合モデリングの趨勢について講演した。共通データフォーマットの構築および その適用状況や各国における統合シミュレーションの進展を多くの例を交えて解説し た。林は JT-60SA の放電シナリオについて統合コード TOPICS のコア—エッジ結合モ デルの進展を報告した。ダイバータ熱負荷低減に欠かせない不純物輸送について評価し た。Hahm は電子内部輸送障壁形成における補足電子の役割について講演した。乱流低 減について E×B シアとトロイダル歳差運動シア両者が重要であり、両者を考え合わせ ることで多様な電子内部輸送障壁形成の機構を説明することができる。また、矢木はジ ャイロ流体モデルを用いた乱流シミュレーションで局所的に加えた熱ソースへの応答 から、内部輸送障壁の形成機構について報告した。瀬戸は BOUT++を用いたグローバル 解析によりバルーニングモード不安定性の特性を調べた。

ヘリカルプラズマも需要な研究対象で、その中でも LHD は現在稼働中の大型装置として 精力的に研究がなされている。沼波はジャイロ運動論コードを用いて、LHD における複 数種粒子の効果を解析した。同位体効果、水素/ヘリウムプラズマ比較、不純物ホール放 電時の輸送といったトピックスについて ITG/TEM の不安定性とそれらによる輸送の評 価をし、実験結果との比較を図った。糟谷は LHD での実磁場配位を用いたジャイロ運動論 シミュレーションから得られた乱流の 3 次元データに対して、実験計測シミュレーションを 適用し、実験との比較を図っている。登田は GKV によるイオン温度勾配不安定性計算結 果をモデル化して輸送計算に取り入れるため、電子の扱いを断熱的にした場合と非断熱 的にした場合の比較を行った。村上は LHD 重水素実験時の中性子発生の予測結果を報告し た。前田は同位体効果を含む各種モデルによる輸送シミュレーション結果を報告した。

基礎実験装置を対象とした乱流シミュレーションからも、磁場閉じ込めプラズマに共 通する物理機構の理解が図られている。佐々木と小菅は直線装置 PANTA を対象として、 複数の乱流駆動源、不安定性がある場合の競合過程についてシミュレーション及び理論 解析の結果を報告した。阿部は PANTA 装置で需要な役割を果たす中性粒子について、 粒子コードを用いた分布計算とその結果を反映させた抵抗性ドリフト波乱流計算を行 い、中性粒子分布がモードスペクトルに影響することを示した。松井は PANTA 装置の 乱流状態のパラメータ依存性について調べた。

周辺および壁材料特性の研究も進展している。、滝塚は PIC シミュレーションでダイバータ プラズマにおける物理機構について考察した。デタッチメントに関する衝突性プラズマ においても運動論的効果の重要性を指摘した。東郷は1次元数値モデルと解析モデルを 用いてダイバータ板粒子束の解析を行った。大澤からは水素によるタングステン中の空 孔クラスターの成長促進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。

統合輸送コード TASK については、福山の講演に加えてそれぞれに様々な進展が報告 された。フォッカープランクシミュレーションについては奴賀から電子分布関数の hot tail に よる逃走電子生成について報告された。また永井から ITER 燃焼プラズマの放電立ち上 げシナリオについて評価がされた。池田からは電子サイクロトロン周波数帯波動解析の ための粒子コード開発について報告された。

来年度も第 15 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、また本年度で退職となる福山先生の長年の貢献に対して感謝の意を表して、 閉会した。

4. 研究集会プログラム

(18 min talk+7 min discuss or 10 min talk+5min discuss) 12月7日(水) 核融合エネルギーフォーラムサブクラスター会合 9:00 - 12:4512:45 - 13:45昼休み 13:45 - 13:55 はじめに 村上 (京大) (座長:村上) 13:55 - 14:20講演 1-1 藤田 (名大) Analysis of axisymmetric equilibrium including magnetic field generated by energetic particles 本多 (量研機構) 14:20 - 14:45講演 1-2 Predictions of toroidal rotation and torque sources arising in non-axisymmetric perturbed magnetic fields in tokamaks 14:45 - 15:10講 演1-3 福山 (京大) Status of integrated modeling activity for ITER 15:10 - 15:35講演1-4 林 (量研機構) Integrated modeling of JT-60SA high-beta steady-state scenario 15:35 – 15:50 休憩 (座長:藤田) 15:50 - 16:15 講演1-5 T.S. Hahm (Seoul Univ.) Role of trapped electron dynamics in ITB formation 16:15 - 16:40 講 演1-6 沼波 (核融合研) Turbulent transport of multi-ion-species plasmas in helical systems 講演1-7 糟谷 (九大) 16:40 - 17:05Turbulence diagnostic simulation for comparison with experiments 17:05 - 17:30講演1-8 奴賀 (核融合研) Fokker-Planck simulations of runaway electron generation in tokamak disruption 17:30 散会 19:00 - 21:00懇親会 (馳走 やまとや 博多駅東店にて) 12月8日(木) 9:00 -9:05 事務連絡 (座長:登田) 9:05 -9:30 講演2-1 佐々木 (九大) Status and future plans of turbulence simulation on linear plasmas 9:30 -9:55 講演2-2 小菅 (九大) Cross scale energy transfer in parallel flow shear driven turbulence 松井 (九大) 9:55 - 10:10 講演2-3 Nonlinear simulation on profile formation with drift-wave instability in linear devices 10:10 - 10:25講演2-4 阿部 (九大) Turbulence simulation of structural formation considering neutral particle profiles in linear devices 休憩 10:25 - 10:40(座長:福山) 10:40 - 11:05講演2-5 滝塚 (阪大) Kinetic simulation for edge plasma and detached divertor 11:05 - 11:30講演2-6 東郷 (筑波大) Research on behavior of divertor particle flux with a one-dimensional numerical model

and an	analytical one	
11:30 - 11:55	講演2-7	大澤 (九大)
Vacan	cy cluster growth	in tungsten induced by hydrogen
11:55 - 13:00	昼休み	
(座長:糟谷)		
13:00 - 13:25	講演3-1	矢木 (量研機構)
Simula	ation study on inte	ernal transport barrier formation using gryofluid model
13:25 - 13:50	講演3-2	瀬戸 (量研機構)
Linear	analysis of non-i	deal ballooning mode instability with real electron inertia
13:50 - 14:05	講演3-3	池田 (京大)
PIC si	mulation of EC w	ave propagation and absorption in plasmas
14:05 - 14:20	講演3-4	永井 (京大)
Start-u	p simulation of b	urning plasma by integrated modeling code TASK
14:20 - 14:35	休憩	
(座長:矢木)		
14:35 - 15:00	講演3-5	登田 (核融合研)
Constr	ruction of reduced	transport model by gyro- kinetic simulation with kinetic electrons
in heli	cal plasmas	
15:00 - 15:25	講演3-6	村上 (京大)
Predic	tion of neutron pr	oduction in the deuterium experiment of LHD
15:25 - 15:40	講演3-7	前田 (京大)
Heat a	nd particle transp	ort modeling of LHD plasma by integrated transport simulation
15:40 - 16:00	まとめ	糟谷 (九大)

16:00 散会

氏名	所属	氏名	所属
鈴木隆	量研機構	福山淳	京都大
林伸彦	量研機構	村上定義	京都大
本多充	量研機構	池田智英	京都大
矢木雅敏	量研機構	永井一輝	京都大
瀬戸春樹	量研機構	前田渉吾	京都大
登田慎一郎	核融合研	大澤一人	九大応力研
沼波政倫	核融合研	糟谷直宏	九大応力研
奴賀秀男	核融合研	小菅佑輔	九大応力研
T.S.Hahm	SNU	佐々木真	九大応力研
滝塚知典	大阪大	阿部哲	九大総理工
藤田隆明	名古屋大	松井庸介	九大総理工
東郷訓	筑波大	大野友嗣	九大総理工

5. 参加者リスト

国際プラズマ乱流データ解析ワークショップ

応用力学研究所 稲垣 滋

目的と背景

プラズマ乱流及び乱流輸送に関するデータ解析に関する国際的なワークショップを開催する。本 議論を契機にプラズマ乱流実験および乱流物理の理解の深化に寄与する。本研究集会は高エネルギ ーイオン輻射に関して行ってきたワークショップ及び日中プラズマ乱流データ解析ワークショッ プという日中の研究者による研究グループが中心となり行われてきた作業会を更に発展させたも のである。本作業会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。一例として磁気島や MHD と乱流揺動との関連の理解、ICE と高速イオン分布との相 関の観測が挙げられる。このようなこれまでの活動において、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、中国の若手研究者らを先導する立場にあった。本作業会を主催する 事で応用力学研究所のリーダ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 る事を目指す。

研究集会の開催

第一回

開催日時:2016.10.24-28

開催場所:九州大学 応用力学研究所 現地実行委員長: 稲垣 滋

第二回

開催日時:2017.1.26-27

開催場所:九州大学 応用力学研究所 現地実行委員長: 稲垣 滋

予算の執行

中国西南物理研究所(SWIP)からの1名(J. Cheng)、Warwick 大学からの1名(R. O. Dendy)の招聘旅費 に執行した。

本研究集会の特徴

本研究集会は実作業を重要視する。招待者らによる話題提供、問題定義の後、各テーマの詳細講演 を行う。その後グループごとにデータ解析作業を行い、参加者全員が一同に会し途中結果の報告及 び議論を行う。最終日には作業結果をレビューし、サマリーを行う、という形式で行われた。今回 の議論では 2016 年に開催された IAEA 国際会議での共著論文を主に少なくとも 3 編の論文が共著 論文として投稿される。また、次回 EPS 会議での発表内容も検討した。 研究集会のまとめ

1. MHD と turbulence との相互作用

近年、静電的揺動と電磁的揺動との相互作用が注目されている。このため本会議では主に HL-2A の 実験データに関して以下の点について議論を行った。

- Response of turbulence/Er at sawtooth

- Dynamic synchronization & Sawtooth

- Fulx of parallel momentum: Profiles of stresses and turbulence

鋸歯状波の伝搬に伴って乱流が増加する事が示され、統計誤差について議論された。条件付き平均 法を試みる。

2. Internal Transport Barrier (ITB)

ITB は高い閉じ込め特性を有し魅力的であるが未だシミュレーションで ITB 形成の再現に成功した 例はなく、その形成機構は不明な点が多い。近年 HL-2A にて ITB の形成が観測された。本会議で はその結果について以下の観点で議論を行った。

- Discovery of Double internal transport barrier, birth & termination of ITB, etc.

- Dynamic study after the collapse of the Long-Lasting Mode, by CXS conditional average 今後の作業として、いつ、どこで ITB が形成されるのか、その条件を明らかにする、ITB 形成後の フローと温度の勾配がどのような時間スケールで発展するかを明らかにする、事が了承された。

3. Ion Cyclotron Emission (ICE)とELMとの関連

ICEとELMの関連はELMのプリカーサの探求という点から非常に重要である。本会議ではこのテ ーマに関して以下の2つの発表があった。

"Modelling and interpretation of ion cyclotron emission chirping during ELM crashes in KSTAR plasmas" "Ion Cyclotron Emissions around edge-localized mode"

本会議ではELMを周辺に局在化したモード構造を指し、バースト的な崩壊のステージをELM crash と呼ぶ。どちらの現象に対しても同期してICEが変化する。また、Crash直前にICE スペクトルの 変化が観測された。ICEがどこから来ているのかという議論があり、周波数スペクトルから磁場強 度が分かり、磁場強度から位置が特定できるとの議論があった。またその際、アンテナのサイズ の制限で基本波計測の感度が低くても、高調波から基本波の周期を精度よく求められる事が確認 された。 応用力学研究所研究集会

"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"

日時: 2017年2月23日-24日

場所: 応用力学研究所2F会議室

プログラム

2月23日(木)

13:30-13:40

はじめに (藤澤)

13:40-14:10

直線ヘリコンプラズマにおける径方向構造のトムソン散乱計測(富田)

14:10-14:40

直線磁化プラズマにおけるストリーマー構造の解析 (山田)

14:40-15:10

イメージング計測を用いたプラズマ乱流のメゾスケール構造の解析手法の開発(大舘)

休憩

15:20-15:50

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(谷澤)

15:50-16:20

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(秋山)

16:20-16:50

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過渡応答特性解明 (金子) 16:50-17:20 全体討論

2月24日(金)

9:30-10:10 招待講演

磁場閉じ込めプラズマにおける局在化したプラズマ変形の観測(居田)

10:10-10:40

直線プラズマ装置 PANTA における音速分子ビーム入射軌道の観測 (小林)

10:40-11:10

医療用 CT における画像再構成手法のプラズマ乱流計測への応用(荒川)

11:10-11:40

マイクロ波計測器から得られる大規模データを用いた乱流プラズマの特性抽出法の開発(徳沢)

13:30-15:00 全体討論

再生可能エネルギー発電の kW 価値と系統影響の評価

東京理科大学 理工学部 電気電子情報工学科 近藤 潤次

1. 序論

再生可能エネルギー発電の多くは発電出力が気象・海象状況等により 変動する。一方,電力系統では常に電力需要以上の発電設備容量(供給 力)を確保しなければならない。電力需要の多い時間帯は供給力に余裕 が無いので,その時に高出力を期待できる電源は価値が高い。この観点 で定義した発電設備の価値が kW 価値である。本研究では,風力発電, 潮流発電,波力発電の kW 価値を算出した。紙面制約より,風力発電の 結果については既発表資料^[1]を参照いただき,本資料では潮流発電と波 力発電の kW 価値の K90 手法^[2]による算出結果を記す。

2. 潮流発電

日本の海域の中で、潮流の流れが速いとされる瀬戸内海の3地点(来島 海峡・速吸瀬戸・大畠瀬戸)に、水平軸プロペラタービン式^[3]または垂直 軸ダリウス式^[4]の潮流発電機を設置した場合を想定した。図1に各方式 の発電機の出力特性を示す。潮流パワーは流速の3乗に比例するが、潮 流パワーから発電電力への変換効率を、プロペラ式は44%^[5]、ダリウス式 は28%と想定し、定格出力に達する流速以上では定格出力になるとした。 また、解析に用いたデータは、2016年の中国電力の1時間毎の電力需要 ^[6]と、海上保安本部海洋情報部の推算^[7]した2016年の流速である。2016 年の中国電力において需要が高かった夏の日、冬の日、その中間期の一日 における流速変化の例を図2に示す。潮流は潮汐と同様に、地球と月・太 陽との位置関係によって定まる周期的な流れであり、日本の海域では月 の引力による半日周期のM2分潮と太陽の引力による半日周期のS2分潮 などが潮流に主要な影響を及ぼす。

K90 手法では、まず 2016 年の1 年間の電力需要が大きい上位 100 時間 を抽出し、その高需要 100 時間における各潮流発電出力の持続曲線(発電出力値を大きい順に並べ替えたグラフ)を描く(図3)。図3 の横軸の 時間確率 90% での発電出力を kW 価値とする。評価した kW 価値の値を表 1 に示す。表 1 より以下のことが分かる。

・各潮流発電設備の kW 価値は 1%にも満たないが,3 ヶ所を集合化した 総発電出力の kW 価値は 10%を上回る。これは,各潮流発電設備の出力 は零となる時間があるが,3 ヶ所あれば(少なくとも高需要 100 時間 は)常にどこかの発電設備は発電するという平滑化効果[8]に依る。線 路混雑の問題が無ければ,需給バランスは系統全体(今回の場合は中 国電力全体)で維持すれば良いので,集合化した総発電出力に関して kW 価値を評価すべきである。

 ・ 効率も単位面積当たりの定格出力も高く設定したプロペラ式の方が、 潮流エネルギーを有効利用できる。しかし、設備利用率と集合化した 場合の kW 価値はダリウス式の方が若干高くな った。これは設備利用率や kW 価値を定格出力 に対する割合で評価したためである。



北海道、北陸、四国の3電力系統エリアの沿岸 (北海道5ヶ所,北陸4ヶ所,四国6ヶ所)に,



図 2 一日における流速変化の例



図3 高需要 100 時間における各潮流発電出力の 持続曲線 (プロペラ式)

81	L I	潮流発電	の設備利用率	国と kW	「価値の評価結果
----	-----	------	--------	-------	----------

		来島海峡	速吸瀬戸	大畠瀬戸	合計
	設備利用率[%]	46	17	41	
フロヘラ式	K90值[%]	0.78	0.00	0.78	11.34
ダリウス式	設備利用率[%]	51	21	46	
	K90值[%]	0.00	0.00	0.00	14.19

Pelamis Wave Power 社により開発された Pelamis 波力発電装置 (定格 750 kW)を設置した場合を想定した。図 4 にPelamis の発電 出力特性を示す。波力パワーは有義波高 H1/3 の2 乗と有義波周期 T1/3 の積に比例する式で表されるが、Pelamis の発電出力もこれ らを変数とした表で記されている^[9]。また、解析に用いたデータ は、2013-2015 年の北海道、北陸、四国の各電力会社エリアの1 時 間毎の電力需要^[10-12]と、NOWPHAS 波浪観測データ^[13]である。

一例として、2015年における高需要100時間における各波力発電出力の持続曲線を図5に示す。図5(c)において集合化の時間確率90%が90時間とずれている理由はデータ欠損である。図5から分かるように、今回の評価の結果では、各波力発電設備も集合化総出力についても、kW価値はほぼ零となった。その原因は、高需要期にあまり発電できていない事、数カ所の集合化では平滑化効果が小さいこと、日本の海象に対してPelamisの定格出力が大きすぎること¹が挙げられる。

4. 結論

波力発電と潮流発電の kW 価値を評価した。今回の評価結果で は、潮流発電では比較的高い kW 価値を望める結果となった一方 で、波力発電の kW 価値は低い結果となった。ただし波力発電設 備として想定した Pelamis の定格出力が大きいことと、kW 価値を 定格出力に対する割合で表した影響が大きい。最後に、本報告書 の図やデータは当研究室に在籍する井手裕介君と西野順菜さんの 卒業論文より引用したことを付記し、感謝の意を表する。

参考文献

- [1]齋藤大地・鈴木優・近藤潤次:「風力発電の kW 価値の評価手法の比較」,電気学会新エネルギー・環境/高電圧合同研究会,FTE-16-35, pp. 133-138 (2016.7)
- [2] 宮崎聡・阿部英文・山地憲治・都筑建:住宅設置太陽光発電デ ータ分析による kW 価値の評価,電気学会論文誌 B, 124 巻11 号, p.1293-1299 (2004)
- [3]川崎重工業株式会社:「着定式潮流発電装置」,平成 25 年度 NEDO 新エネルギー成果報告会発表資料, http://www.nedo.go.jp/content/100546658.pdf, pp. 38-47 (2013)
- [4] 木方靖二・塩野光弘:「来島海峡におけるダリウス形水車による潮流発電」,電気学会論文誌 D, Vol.112, No.6, pp.530-538 (1992)
- [5]藤井雅之・綿屋茂男:「大畠瀬戸の潮流発電に関する研究」,独 立行政法人国立高等専門学校機構大島商船高等専門学校紀要 39, pp. 52-57 (2006)
- [6] 中国電力でんき予報:過去の電力使用実績データ, http://www.energia.co.jp/jukyuu/download.html



図4 Pelamis の発電出力特性











(c) 四国

図 5 高需要 100 時間における各波力発電出力 の持続曲線

[7] 第五管区海上保安本部海洋情報部:「瀬戸内海潮流推算」, http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KAN5/index.html

- [8] 例えば,日本風力エネルギー学会訳:「風力発電導入のための電力系統工学」,オーム社, pp. 108-110 (2013)
- [9] J. Aubry, H.B. Ahmed, B. Multon, A. Babarit, A. Clement, "Wave Energy Converters", Ch. 11 in Marine Renewable Energy Handbook, pp. 323-366, ISTE Ltd., 2012.

[10]北海道電力:「過去の電力使用状況データダウンロード」, http://denkiyoho.hepco.co.jp/download.html
[11]北陸電力:「電力使用状況データダウンロード」, http://www.rikuden.co.jp/denki-yoho/index.html#download
[12]四国電力:「過去の使用状況データのダウンロード」, http://www.yonden.co.jp/denkiyoho/download.html
[13]国土交通省港湾局:「全国港湾海洋波浪情報網(ナウファス)波浪データ」, http://nowphas.mlit.go.jp/nowphasdata/sub300.htm
[14]渡部富治・近藤俶郎:「21 世紀のクリーンな発電として波力発電(原理から応用まで)」, パワー社, p. 101 (2005)

¹ 文献 [14]に「Pelamis の定格出力 750 kW は、有義波高 H1/3=5.5 m、有義波周期 T1/3=8 s、単位幅当たり波力パワー106.5 kW/m という常識外の高い波力パワーを基準にしているため、実海域運転での設備利用率は大変低い値(例えば 10%以下)になりかねない。」旨の記述がある。

風力発電の電力系統瞬時電圧低下時の制御手法の開発

Development of Instantaneous Voltage Drop Detection Device in Power System for Wind Turbine

代表:雪田和人(愛知工業大学 工学部 電気学科) 所内世話人:吉田茂雄(九州大学 応用力学研究所)

目的

再生可能エネルギーによる発電装置を電力系統と連系する場合,各国で規定されている系統連系要件 (グリッドコード)に基づいた制御が必要となる。このグリッドコードには、電力系統の瞬時電圧低下が 発生した場合、電力系統に大量連系している発電装置のいっせい解列による電力系統の不安定を防ぐために、 電力系統との連系を維持し運転を実施するフォルトライドスルー (FRT)についても記載されている。この FRT に関しては、太陽光発電装置においては十分な研究開発が実施されているものの,発電機のエネ ルギーを時々刻々変動する風に依存している風力発電に関しては十分でないものと思われる。特に、 数 kW から数十 kW の小型風力発電機を系統連系する場合には、経済性の観点から太陽光発電用の系統 連系装置が用いられる場合も少なくない。しかしながら、出力変動が激しい風力発電に関しては、太陽光発 電用に調整された系統連系装置が十分な対応ができないものと想定される。

そこで本研究では,実際の小型風力発電を用いて、風力発電の出力変動が発生した場合にも、グリッドコードを満たすシステムの開発について基礎的な検討を実施した。

提案方法

発電能力が数 kW 程度の小型風力発電は、大型風力発電装置と異なり、経済性の観点などから高価パワエ レ機器などが導入されていなく、風車と発電機からなる単純な構造なものが多いのが現状である。また、大型 発電機と異なり小型の場合は、回転数が高く、慣性も小さいことが特徴としてあげられる。このため、太陽光発 電装置の出力変動と比較すると、系統連系装置の入力されるエネルギーは変動が激しいことが予想される。さ らに、系統連系装置が起動し、系統連系実施の瞬間においては、十分なエネルギーが必要とされるため、系統連 系装置入力側の電圧低下が懸念される。このような一次側での電圧低下が発生した場合、この低下深度にも依存す るが、再度系統連系するまでに数分間の待機時間が必要とされる場合がある。このような小型風力発電システムおけ る年間総発電量について注目すると、大きな損失となることが予想される。

そこで本研究では、以下の方法について検討を実施した。

(1).系統連系装置の入力側である一次側の電圧低下発生時においても、数秒で再連系する方法

(2).系統連系装置の入力側に小容量の蓄電装置を導入する方法

モデル系統

本研究で用いたモデル系統の構成図を図1に示す。また、実際の外形を図2に示す。さらに、各装置 の仕様を表1に風力発電機、表2に系統連系装置を各々示す。

本研究は、図1に示すような小型発電機、整流器、系統連系装置、最大負荷追従装置、蓄電装置から構
成して小型発電機モデルを用いた。同図に示すように系統連系装置の一次側には最大負荷追従装置が接続し, 二次側には電力系統としている。



(a)従来の構成

(b)蓄電装置を導入した構成

図1. モデル系統

表1.風力発電の仕様



(a)小型風力発電装置



装置 (b)系統連系装置 図2.実験装置外形図

設備名称	風力発電装置		
タイプ	直線翼垂直軸型		
翼 数	5 枚		
容量	2 kW		

表2. 系統連系装置の仕様

設備名称	パワーコンディショナー (太陽光発電用)
出力容量	10kW
入力電圧	DC 150~570V
出力電圧	AC 202V

実験結果

本研究の実験結果を図 3 に示す。同図には発電機の回転数と電力の特性を示している。ここで図 3(a) に は本研究で提案した(1)と(2)を併用した場合であり、(b)は従来の構成の場合である。(a)と(b)を比較する と、従来のシステムでは回転数が高くなるにつれて電力が安定していないが、提案方法を導入したシステムで は、回転数と電力が安定していることがわかる。これにより、本提案方法の有効性がわかる。



図 3.実験結果(回転数と電力特性)

成果報告

濱仲真和、雪田和人、細江忠司(愛知工業大学)吉田茂雄(九州大学):風力発電の電力系統瞬時電圧低下の一検討,電気学会 東海支部 第2回若手セミナー 2017年2月



マルチカラム型波力発電装置 MC-OWC のエネルギー変換性能に関する研究

九州大学大学院工学研究院 海洋システム工学部門 安澤 幸隆

E-mail: <u>yasuzawa@nams.kyushu-u.ac.jp</u>

東日本大地震以降、原子力発電の長期停止および削減方針により,日本の発電量のおよそ 9割が化石燃料による発電から得ている.しかし,その化石燃料はほぼ全量を海外から輸入 に頼っている状況であり,化石燃料の産出国には政治情勢が不安定な中東地域も多いため, 化石燃料の安定供給が困難になる可能性がある.この状況において,エネルギー源を原子力 や化石燃料に替わるエネルギー源が求められており,地域自立型である海洋再生可能エネ ルギーの利用に関心が高まっている.

そこで、著者らは、海洋再生可能エネルギーの1つである波力エネルギーに着目し、複数 の発電用カラムと浮力カラムおよびデッキ構造からなるマルチカラム型波力発電用浮体の 研究をおこなっている.これまでの研究において、複数の円筒振動水柱(以下:OWC)カラム に対して、波および OWC 内の水領域に対して 3 次元境界要素法に基づき、複数のカラム 間の相互干渉影響および空気室との干渉を含んだ波浪中応答を計算するプログラムを開発 した.

さらに九州大学応用力学研究所の深海水槽を利用して、複数の発電用カラムと浮力カラムを配置して実験を行い,空気室内の水位や圧力を計測しエネルギー1次変換性能を解析して数値解析の値と比較し,マルチカラム型波力発電装置の一次変換応答特性について研究してきた.

その結果、数値解析結果の周波数応答曲線の水槽試験結果と数値解析結果は、定性的にも 定量的にもよく一致し、カラム間の流体力学的干渉についても、両者で確認できた。しかし、 試験結果による一時変換効率の周波数応答曲線には、数値解析では得られない変動やピー クが観察された。

そこで、数値解析の高精度化を目指し、非線形性の強い、空気室の挙動について理論的検 討を行った。実機サイズでは、圧縮性影響が顕著になるという scale effect が示された。今 後、それを検証するための水槽試験を実施する予定である。



Buoyancy Column

Bottom is closed

OWC device Bottom is open Turbine & Generator are installed at top

マルチカラム型波力発電浮体



水槽試験用試験体

高空の風力利用についての研究

(株) TMIT・研究開発部・所長、

首都大学東京・システムデザイン学部・客員教授 藤井 裕矩

要旨

今後ますます我が国の再生エネルギー生産において重要な分野となると予想される風力エネルギー発 電方法について、強い恒常的な風力が得られる高空風力発電について基礎研究を行った。世界的にも先 進的な高度な技術が要求されるため、その基礎的な部分である軽量風車の開発について実験的に研究を 進めた。

序論

風力発電が今後の重要な自然エネルギー供給手段であることは言を待たない。風力発電においては風 況の良い場所の選択が主要な要素である。風況の良いところとして、地表部のキャノピーを越えた高度 の位置が一つとしてあげられる。このような高空における風力発電技術はいまだ未開発の分野として残 され、海外でも米国、オランダなどで開発の端緒が開始されたところである。本研究は、代表者の提唱 のもと日本で関係する研究者たちが高空風力を利用した風力発電の研究を主軸にして結集したもので ある。この研究者は、直線翼型風車の研究者・製作者、UAVや飛行船、さらに航空機などの飛行技術 の研究者・製作者、制御技術研究者、宇宙テザー技術の研究者、各種メカニズム設計製作の研究製作者 などからなる専門家集団を形成している。このうちテザー技術はエネルギー伝達機構として有望視され ているものである。一方、九州大学応用力学研究所における共同研究の大きな枠組みとして平成 22 年 度より「新エネルギー力学」の分野が作られ、九州大学でも風力発電技術の研究開発にかかわっており、 新川教授においては高空発電に関する本研究におけるリーディング・メンバーとして、大きな期待を背 負ってもらっている。このため、九州大学応用力学研究所との共同として研究を遂行した。

実験日程と経過

2016 年 3 月 13-14 日に行ったフェーズ 1.5(0.2 k W 級)の風車性能の風洞実験(工芸大学)に続いて、本年度は以下のように実施した。

- ▶ 2016 年 5 月 21、22 日 敦賀松原海水浴場においてフェーズ1モデルのデモンストレーション 実験
- ▶ 2016年6月1日 神奈川工科大学においてテザーによるトルク伝達実験
- ▶ 2016 年 7 月 1 3 日 石川県白山市松任海水浴場において凧の浮揚実験(離陸、安定、着陸) 実験
- ▶ 2016 年 8 月 3-5 日 神奈川工大においてフェーズ 1.5 テザー伝達試験
- ▶ 2016 年 9 月 11-14 日 九州大学風洞と応用力学研究所、九州大学筑紫キャンパスにおいてフェーズ 1.5 (0,2 k W 級)風車の風洞実験。
- ▶ 2016 年 9 月 11-14 日 日本機械学会 2016 年度年次大会(九州大学伊都キャンパス)に参加。
- ▶ 2016 年 9 月 15 日 九州大学 応用力学研究所において「第 4 回全体会議」開催、(西棟 6 F 多目的

研究交流室)

- ▶ 2016年10月29、30日 工芸大風洞を用いたテザー型飛翔体、エレボン装備機とインフレ ータブル軽量設計機の風洞実験
- 2016年3月16、17日 日本機械学会関東支部第23期総会・講演会(東京理科大学)に参加し17
 日には第5回全体会議」を開催(予定)

技術課題への成果

本年度の研究成果により、以下の2つの技術課題について、3のように風洞実験でのデモンストレ ーションを行った。

技術課題:

- 1. 試作した軽量風車の性能実験
- 風洞における動作・性能測定
- 2. エネルギー伝達手法

フェーズ 1.5 における試作軽量風車からテザーでつながれた発電機へのトルク伝達実験 デモンストレーション:

3. フェーズ 1.5 (0.2 k W) 風車全体風洞実験

フェーズ1.5風車は、0.2kWとはいえ、直径0.6m、全幅は1.5mにも及ぶ大型となる。このため、 九州大学応用力学研究所の大型境界層風洞を用いて2016年9月11-14日に風車自由回転実験ならびに テザー伝達による発電デモンストレーションを行った(Fig.1:図中、直径600mm、スパン1500mmの直 線翼風車が天井に吊り下げられ回転し、テザーを介して台上の発電機に回転エネルギーを伝達する。)。 その結果、Fig.2に示すように直線翼風車が揚力型としての回転を行うことを確認し、現在解析中であ るが、発電の確認を行った。



Fig.1 大型境界層風洞での実験

Fig.2 周速に対する伝達された電力値

主に以上の3点については結果と考察について、いずれも、「研究成果報告」の節で示したように学 会で発表し、議論した。(「研究成果報告」の項参照。)

氏名	所属	役職	性別	年齢
藤井 裕矩	ТМІТ	所長	男	71
大久保 博志	神奈川工科大学	教授	男	66
新川 和夫	九州大学	教授	男	
草谷 大郎	都立産業技術高専	准教授	男	
髙橋 泰岳	福井大学	准教授	男	43
中嶋 智也	大阪府立大学	講師	男	
遠藤 大希	九州大学	博士課程1年	男	27
上井 満広	神奈川工科大学	修士課程2年	男	25
丸山 勇祐	前田建設	研究員	男	45
岩原 誠	(有)ザクシス	代表取締役	男	

研究組織(性別·年齢)

研究成果報告

*学会論文

1) Hironori A. FUJII, Masahito HIRAKAWA, Mitsuyosi Tuchiya and Kenji UCHIYAMA, Space tether technology and its application to air borne wind energy generation, Proceedings of the 26nd Workshop on JAXA Astrodynamics and Flight Mechanics, Yoshinodai, Kanagawa, 2016, pp.TBD.

2)藤井裕矩,平川雅人,内山賢治,渡部武夫,草谷大郎、「凧型テザー風車の動力伝達テザーとテ ザー形状の検討」、ブイヤント航空、Vol. 43, No. 1, 2016 年 6 月, pp. 39-46.

3) 草谷大郎,藤井裕矩,川崎天揮,冨田匠,黒田将茂,角舘李果、「高空風力発電用の繋留型オールインフレータブル構造航空機の検討」、ブイヤント航空、Vol. 43, No. 1, 2016 年 7 月 18 日, pp. 47-54.

*学会発表

1)藤井 裕矩、渡部 武夫、草谷 大郎、小島 広久、「スーパー・テザー展開性能の飛行後検討」、(社) 日本航空宇宙学会第47期定時社員総会/年会講演会、2016年4月14[~]15日、東京大学山上会館。

2) 草谷大郎,川崎天揮,冨田匠,黒田将茂,角舘李果、「インフレータブル飛行機の検討と無人機試作」、日本航空宇宙学会第47期定時社員総会/年会講演会講演集 CD-ROM 1B13, pp. 201-202、2016年4月14[~]15日、東京大学山上会館。

2) 草谷大郎、藤井裕矩、渡部武夫、「係留気球式高空発電装置の動向と取り組み」、ブイヤント航 空懇談会、東京都立産業技術高等専門学校、2016(平成28年)年6月20日。

3)藤井裕矩、渡部武夫、草谷大郎、内山賢治、「走行するテザーを持つ凧型風車の運動の定式化について」、第2回ブイヤント航空懇談会、東京都立産業技術高等専門学校、2016(平成 28 年)年6月20日

4) 土屋光慶、藤井裕矩、平川雅人、草谷大郎、内山賢治、「近年のインフレータブル・カイトプレ

ーンの形式とオーバービュー」、第3回ブイヤント航空講演会、東京都立産業技術高等専門学校、 2016年7月18日。

5) 草谷大郎、藤井裕矩、川崎天揮、冨田匠,角舘李果,黒田将茂、「高空風力発電用のインフレー タブル航空機の検討」第3回ブイヤント航空講演会、東京都立産業技術高等専門学校、2016年7月 18日.

6) 大久保博志, 佐藤 強, 原田恭輔, 渡辺大誠, 藤井裕矩、「高空プラットフォームを利用した風力発電に 関する研究」、第60回宇宙科学技術連合講演会講演集, JSASS-2016-4187, 2016.9.7

7)藤井裕矩,大久保博志,丸山勇祐、栗田 篤,Zxivanovich Sava、「テザーシステムによる再生可能エネ ルギーの伝達について」日本機械学会 2016 年度年次大会、J0550404、2016 年 9 月 11~14 日、九州大学伊都 キャンパス.

8) 丸山勇祐,藤井裕矩,大久保博志,岩原 誠,佐藤 強,原田恭輔,松井 正宏,関 和市、「テザーを活 用した浮遊風車への縦軸直線翼風車の特性について」、日本機械学会 2016 年度年次大会、J0550405、2016 年 9月11~14日、九州大学伊都キャンパス

9) 遠藤大希、「複合高空発電プラットフォームの基礎研究」、日本機械学会 2016 年度年次大会、J0550407、 2016 年 9 月 11~14 日、九州大学伊都キャンパス

10)近藤智行,高橋泰岳,小島令子「カイト型テザー係留飛行ロボットを用いた小型 風力発電システムの 試み」日本機械学会 2016 年度年次大会、G1500401、2016 年 9 月 11~14 日、九州大学伊都キャンパス

1 1) Hironori A. FUJII, Hiroshi Okubo, Yusuke Maruyama, Tairo Kusagaya, and Takeo Watanabe,"Air Borne Wind Energy Generation on Tethered System," *Proceedings of WWEC2016 TOKYO* C-3-6,(2016), 2 November 2016, University of Tokyo, Japan.

12) 草谷 大郎、冨田 匠、藤井 裕矩、「高空風力発電用カイツーンの検討」第38回風力エネルギー利 用シンポジウム、2016年11月30日・12月1日,科学技術館、千代田区、東京, B5-4.

13)藤井 裕矩、丸山 勇祐、大久保 博志、草谷 大郎、「テザーを用いた風力発電について(機能試験)」、 第38回風力エネルギーシンポジウム、第38回風力エネルギー利用シンポジウム、2016年11月30日・ 12月1日,科学技術館、千代田区、東京, C4-6.

14)藤井裕矩、丸山 勇祐、大久保 博志、草谷 大郎、「テザー型高空風力発電の研究-2016 年度進捗報告」、日本機械学会関東支部第23期総会・講演会 0S0201-01、2017 年3月 16-17 日、東京理科大学.

15) 真志取秀人、伊藤 香織、井上 美潮、「垂直軸風車のための曲率翼に関する予備研究」、日本機械学会 関東支部第23期総会・講演会 0S0201-02、2017 年3月16-17日、東京理科大学。

16)原田恭輔、佐藤 強、相原浩司、小川慎平、大久保 博志、藤井 裕矩、遠藤 大希、丸山 勇祐、「テザ 一型高空風力発電の研究-直線翼風車モデル(Phase1.5)の風洞試験」、日本機械学会関東支部第23期総会・ 講演会 0S0201-03、2017 年 3 月 16-17 日、東京理科大学.

17)花田 泰智、遠藤 大希、高橋 泰岳、田村 剛志、「連凧浮体利用型高空風力発電に関する実験的研究(Iot 計測機器の有用性に関する報告)」、日本機械学会関東支部第23期総会・講演会 0S0201-04、2017 年3月16-17日、東京理科大学. 0S0201-04、

18)近藤智行、高橋泰岳、遠藤大希、「連凧を用いた小型高空風力発電の試み」、日本機械学会関東支部第 23期総会・講演会 0S0201-05、2017 年 3月 16-17 日、東京理科大学.

19)山本広樹、草谷大郎,、「高空風力発電用繋留テザーのためのトルク制御アーム付巻取装置モデル」、 日本機械学会関東支部第23期総会・講演会 0S0201-06、2017 年3月16-17日、東京理科大学.

20) 丸山勇祐、藤井裕矩、大久保博志、遠藤大希、草谷大郎, 関和市、「テザーを利用した高空風力発 電装置の設備利用率に関して」、日本機械学会関東支部第23期総会・講演会0S0202-01、2017年3月16-17 日、東京理科大学.

21) 大久保博志、小川慎平、相原浩司、原田恭輔、佐藤強、藤井裕矩、岩原誠、丸山勇祐、「テザー型高空 風力発電の研究--テザーによる動力伝達について」、日本機械学会関東支部第23期総会・講演会080202-02、 2017年3月16-17日、東京理科大学.

22)藤井裕矩、平川雅人、土屋光慶、内山賢治、「テザー型飛翔体の運動特性の基礎研究」 草谷 大郎、「高空風力発電用繋留型インフレータブル飛翔体の検討」、日本機械学会関東支部第23期総会・ 講演会 0S0202-03、2017 年3月16-17日、東京理科大学.

23) 草谷大郎,富田匠,藤井裕矩,丸山 勇祐、渡部武夫「高空風力発電用繋留型インフレータブル飛翔体の 検討、日本機械学会関東支部第23期総会・講演会 0S0202-04、2017 年 3月 16-17 日、東京理科大学.

謝辞

本研究は、九州大学応用力学研究所の共同利用研究(一般研究)の助成を受けたものである。

三角翼バタフライ風車の開発研究および流体構造連成解析

鳥取大学大学院 工学研究科 機械宇宙工学専攻 原 豊

1. はじめに

鳥取大学は、小形風力発電の低コスト化を目指して垂直軸風車の過回転抑制機構(OCS: Over-speed Control System)の開発を行っており、その実効性を示してきた 現在、企業等の協力も得て、図l(a)に示す実用機サイズの小形風力発電機として、アルミ三角翼バタフライ風車の試体機を開発中である(ただし、2017年2月時点では発電機などの電装部品は装備されていない)、本研究は、この風車の性能を安全性を予測するため、翼一枚ごついて有限要素法(FEM: Finite Element Method)による構造解析と数値流体力学(CFD: Computational Fluid Dynamics)による流体力解析を連成させた流体構造動効料が(FSI: Fluid Structure Interaction)を行い、垂直軸風車の翼の挙動と安全性に関する知見を得ることを目的とする。本年度は、その前段階として翼一枚ごついてのFEM 構造解析とCFD 解析をそれぞれ独立に(非連成で)実施した。

2. 方法

計算対象は、ロータ直径:D=7.0m、ロータ高さ:H=2.7m、翼弦長:c=0.242m、翼型:NACA 0018 の垂直軸タイプ の三角翼バタフライ風車の一つの三角翼(図1(b))である.計算ソルバーはFEM と CFD の両解析ともにSTAR-CCM+ ver.11.02 を用、た、構造解析では簡単のため、翼の端面を完全固定(位置、角度の各々3 成分を固定) とした、計算格子はテトラメッシ ユを選択し、基準サイズは 2mm、総セル数は約920 万セルである. FEM では遠心力と重力のみを考慮し、空力荷重は考慮して いない、流体解析の計算領域は直径48D、長 さ64D の円柱体積内とし、流入端より24D の位置に風車モデル(一翼)の回転中心 を設定した. CFD 解析では主として非構造格子のポリヘドラルメッシュを採用した、計算領域の総セル数は添11200 万セルで ある. 風速は2m/s とし、先端間速比 が 3.0、4.0、5.0、5.5 となる4つの回転数(65pm、85pm、110pm、120pm)につい て計算した.本研究のCFD では平均特性がはまれでする6 回転まで計算を実行し、最後の1 回転のトルク平均値からトルク 係数や出力係数などを算出した、なお、本対象風車は回転数が 110pm 以上では頭斜角が 5°以上になるが、本年度の計算では、 翼傾斜は考慮していない、



図1 三角翼バタフライ風車の実正機(a)と翼解析モデル(b)



図 2 変形量と応力分布(N=120rpm)

3. 主な結果と考察

回転数N=120 rpm の場合の構造解析結果を図2 に示す. 灰色で示す翼 認所能の翼形状であり、カラーグラデーションが変形後の形状を10 倍に拡大して表示したものであり色は応力を表す. 翼は半径方向外向きに大きな遠心力を受け変形している. 最大応力は翼根元で発生し、その大きさは155.14 MPa である. 一方最大変位 垣転中心から最も離れている翼の直線部中央で発生し、その大きさは179.46mm である. N=110 rpm までの最大相当応力は材料の許容応力136MPa以下であり、



全固定の翼端面を除けば、最大回転数のN=120 rpm においても、許容応力を下回る結果となっている.

CFD で計算された*Q* 値の等値面($Q = 5 s^2$)を $\lambda = 5.5$ の場合を例として図3 に示す. 図B より翼の曲線部から翼端偽に 相当する渦が抜出されていることがわかる. 図4 は出力係数*Cp* の先端電速比依存性である. CFD の結果 (シンボル: □)に加 え、翼素運動量理論(BEM)に基づく結果も実線で示してある. CFD による予測*Cp* は $\lambda=5$ において0.18 を示し、出力と しては1062 W に相当する. BEM と CFD の予測は定性的には一致している. しかし、過去の実験値で調整したパラメー タを用いたBEM 予測に比べて、CFD 予測の*Cp* はその約58 %であり小さい. 原因として計算格子が粗い可能性がある. 現状の計算コストを考えると、計算格子密度を広い領域でさらに密にすることは現実的ではないが、今後、不一致の要因や改善な どを検討していく必要がある.

【研究組織】

原豊	代表者	鳥取大学大学院	准教授	男	52 歳
奥谷将裕	協力者	鳥取大学大学院	修士2 年	男	24 歳
田川公太朗	協力者	鳥取大学・地域学部	准教授	男	45 歳
住 隆 博	協力者	佐賀大学大学院	准教授	男	43 歳
秋元博路	協力者	大阪大学大学院	特任教授	男	49 歳
吉田茂雄	所内世話人	九州大学応用力学研究所	教授	男	50 歳

【成果報告】

- Masahiro Okutani, Yutaka Hara, Kazuki Mishima, Kotaro Tagawa, Shigeo Yoshida, AStudy on Triangular Blade Butterfly Wind Turbine with Mechanical Over-Speed Control System, The 6th Joint Symposium on Mechanical and Materials Engineering (JSMME 2016), B3-6, 2016. 9. 24-27, 鳥取大学.
- (2) Masahiro Okutani, Yutaka Hara, Kazuki Mishima, Kotaro Tagawa, Shigeo Yoshida, PERFORMANCE PREDICTION OF TRIANGULAR-BLADE BUTTERFLY WIND TURBINE WITH MECHANICALOVER-SPEED CONTROL SYSTEM, The 15th World Wind Energy Conference and Exhibition (WWEC2016 TOKYO), D-5-1, 2016.10.31-11.2, 東京大学.
- (3) 奥谷 将裕, 原 豊, 田川 公太朗, 吉田 茂雄, 佐野 貴聡, 三角翼/ ジフライ風車の構造と流体力に関する数値解析, 日本 機械学会 中国四国支部第55 期総会・講会; Paper_No.409, 2017.3.7, 広島工業大学(発表予定).

ガウス関数を用いた水平軸風車後流速度分布の表現

三重大学 大学院工学研究科 機械工学専攻 前田 太佳夫

1. 要旨

変動流入風に対する風車後流モデルの構築のため,主流風の風向変動が風車後流の速度欠損領域に与 える影響に着目し,風向標準偏差の影響を考慮したガウス関数を用いた風車後流モデルの開発を行った.

2. 序論

ウィンドファームでは、上流側風車を通過することにより発生した後流が下流側風車の発電 量低下や疲労増加を引き起こす.したがって、ウィンドファームにおける最適な風車配置の提案や、 ウィンドファームの総発電量の予測のためには、風車後流の速度分布の正確な予測が求められ る.しかし、風車後流の速度分布は、主流の乱流強度や流入風向、ウィンドシアといった様々な流入風 条件に影響を受ける.

本研究では、水平軸風車の後流速度分布を正確に予測するために、主流の条件を考慮できる風車後流 モデルを構築することを目的とする.とくに、後流の回復は主流と後流の混合によるものであるため、自 然風況下では主流の乱流強度よりも風向変動が後流の回復に大きく影響していると考えられる.そこで、本申 請では主流の風向変動に焦点を当てた後流モデルの開発を行う.

3. 方法

水平軸風車後流モデルの基本形として、風車スケールモデルを用いた風洞実験を行い、定常流に適用で きるガウス関数後流モデルを構築する.この後流モデルでは、後流の最大速度欠損値と後流広がり幅の半値 (半値全幅)をパラメータとして用いる.次に、風車への流入風の風向(ヨー偏角)と風車後流の横方向へ の移動量の関係を明らかにする.ヨー偏角時の流入風と後流の速度三角形を風車軸方向の誘導速度係数を 考慮して仮定する.そのために、30kW風車を用いたフィールド実験の時系列データを用いて、流入風の風 向から予測される風車後流中心の横方向移動量および後流の横方向分布を比較する.また、主流の風向変動 が風車後流に与える影響をガウス関数後流モデルに組み込むため、後流風速分布の半値全幅を風向標準偏差の 関数として表す.さらに、風向変動を考慮したガウス関数後流モデルにより、風車後流の風速分布を計算し、30kW風 車のフィールド実験で計測された後流の速度分布と比較を行い、開発した後流モデルの妥当性を検証する.

4. 結果と考察

- 4.1ガウス関数を用いた風車後流速度場のモデル化
- (1) 斜め流入風状態では風車後流の風速欠損は正面流入風状態と比較し低下する.ガウス関数後流モデルにおいて、ロータ面に働く推力の減少をヨー偏角から見積もることにより、この影響の考慮を行った.
- (2) 斜め流入風状態において風車後流に偏向が生じる.風車後流中心の横方向位置 Yは風車ロータ回転 面通嘉直後の風向θ_{wake} で直線的に移動するものと仮定し,θ_{wake} を流入風向θおよびロータからの 主流方向距離 xの関数として次式のように表した.

$$Y = x \cdot \tan\theta_{\text{wake}} = x \cdot \tan\left\{\tan^{-1}\left(\frac{3}{2} \cdot \tan\theta\right)\right\} = \frac{3}{2}x \cdot \tan\theta$$

(3) 流入風向から予測した風車後流中心の横方向移動量と風車後流による速度欠損領域の横方向分布 を比較し、流入風向と風車後流の移動量は多くの時間帯でおおむね同様の変動を示し、風車後流が 流入風の横方向速度によって移動していることを確認した.

(4) 風向標準偏差 σ_{θ} に対する半値全幅 D_{r} の拡大率を一次関数で近似し、半値全幅 D_{r} を風向標準偏 差 σ_{θ} の関数として表した結果、次式が得られた.

 $D_{\rm r} = 0.0366 \sigma_{\theta} + 1.0784$

(5) モデルの簡易化のため、風車後流の分布形状およびロータ回転面に働く局所推力の分布の変化を無 視して、同心円状のガウス関数を用いた.風車後流速度分布は、流入風速にウィンドシアの速度分布 を考慮し、次式のように表した.

$$U_{\text{wake}}(r) = U_{\text{ref}}'\hat{U}_{\text{N}}(r) = U_{\text{hub}}\left(\frac{z+H}{H}\right)^{a_{\text{s}}}\left[1 - \hat{U}_{\text{D}}\exp\left\{-\frac{r^{2}}{2\hat{D}_{\text{r}}^{2}}\right\}\right]$$

- 4.2 フィールド実験結果との比較
- (1) モデルの計算結果と実験値の風速の最大欠損値および半値全幅はおおむね一致した.
- (2) 周速比が大きくなるにしたがってロータ推力および後流内主流方向無次元風速比の最大欠損量は 大きくなる.モデルはこの傾向をよく再現した.
- (3) 乱流強度別のデータセットを作成し、データセット中の風向標準偏差の平均値を算出し、間接的に 乱流強度と風車後流の速度分布の関係を示した.モデルの計算結果もフィールド実験結果も、乱流強 度が大きくなるにしたがい、後流風速の最大欠損値が減少する傾向がみられた.
- (4) 翼ピッチ角を変化させたときの風車運転状態における風車後流速度分布を抽出し、モデルとの比較 を行った.いずれのピッチ角においても、モデルの計算結果と実験値の風速の最大欠損値および半値全 幅はおおむね一致した.また、モデルはピッチ角が大きくなることによる、推力の低下や最大欠損値の減 少をよく再現した.
- 5. 研究組織

研究代表者 前田太佳夫(男・53 歳),三重大学大学院工学研究科機械工学専攻,教授 研究協力者 鎌田 泰成(男・48 歳),三重大学大学院工学研究科機械工学専攻,准教授 研究協力者 村田 淳介(男・35 歳),三重大学大学院工学研究科機械工学専攻,助教 研究協力者 藤原 惇嗣(男・25 歳),三重大学大学院工学研究科機械工学専攻,博士前期課程 研究協力者 松岡賢史朗(男・23 歳),三重大学大学院工学研究科機械工学専攻,博士前期課程 所内世話人 吉田 茂雄,九州大学応用力学研究所,教授



図1 ガウス関数による風車後流のモデル化



張架式風力発電装置の開発

研究代表者 江崎丈巳 福岡大学 名誉教授

研究協力者 烏谷隆 九州大学応用力学研究所 准教授

1. 要旨

支柱とワイヤーを用い空中で複数の風車を支持する張架式風力発電装置でワイヤーへの風車固定を 兼ねる複列前置フィンで集風器を構成、風車効率の向上を図る。本実験では、野外用に設計した集風 器効果を大型風洞により確認する。

2. 序論

最近 自然エネルギーは、風力やソーラー発電として急速に普及している。しかし、化石燃料などの 代替エネルギーとなり得るにはまだほど遠いものがある。モノつくりで科学技術に基づく新たな概念 発生は、社会の進歩に欠かせないことと言える。ここでは、図的手段による形状考察から測定データ ーをベースに装置の有効性を検討する。風力発電装置の開発は、搭上で大型の風車を回す方式が主流 である。この方式でわが国での国土情勢を見た場合、陸上では多くの発電量を見込めないのは明らか でオフショワーをはじめとし小型分散方式などの検討が必要と思われる。近年、太陽光発電に替わり

小型風力発電機(20KW未満)への関心が急速に高 まりつつある。張架式風力発電装置は、支柱間に平行 ワイヤーを張りその間に1.1Kw(11m/s)の小型・マイク ロ風力発電機を吊るすものでソーラーと同じように風 車の集合利用を行うものである。本法では、支柱にイ ンフラ普及を目的とした電柱を転用することで普及の 障害を極力取り除き以下のような効用を期待できる。 1)風車は、地面に垂直の直線構造なので陰影が僅か で空中利用のため耕作地などに影響を与えない。 2)風車は空中で帯状に配置するため各ローターで均一 のエネルギーが得られ、単機20KW風車に比べ効率 が良くなどである。

3. 実験方法

 Fig. 1 に示すように大型風洞内に風車と開発の集風

 器を設置し、風速 V=2~10m/sの範囲で測定を行った。風発電機は市販の出力 P=600W でローター

 径が 1300mm、翼型 SD2080 でレイノルズ数 Re=8×10⁵



Fig.1 風洞内装置概要



である。集風器は、Fig.1に示すように全長が2000mmを超えるため横置きとした。本実験では、性能 確認のために1)軸受換装品による風車出力、2)集風器吐出風速、3)風車との組み合わせによる

効果測定を予定した。しかし、3)については、風洞内で組 立て時に集風器の誤寸が判明、所定の性能が期待できないた め1)、2)についてのみの性能確認だけとした。集風器 は、吸い込み口が矩形の面積で0.32m²と吐出口が0.1m²で開 口比が約1:3.2の比率で前回より高目である。吐出口の形 状は、Fig.4 右に示すように上部は、直線状であるが下部は 山形になっていてローターの円弧の先端の方に近づくように している。本構造は、集風部の圧縮率を高めローター先端の 有効部へ吐出する構造となっている。

風速測定実験(江崎・松島)では、Fig.3に示す風洞備え 付けトラバーサー先端の熱線流速計の位置をコンピュータ ーに入力し自動測定を行った。測定点は、Fig.4 左図で気 流 X 方向に5, 6 点で、さらに右図で中心より Y 方向3 か 所とし、Z方向に中心から2か所を5点、右端のみを6点 とした。ここで a=445,b=340 で高さは C=220 である。

4. 実験結果

Fig.2は、供試風車の出力を示す。出力はメーカーカタ ログとほぼ一致する。また、集風器の吐出風速は、Fig.4 に

示すように吐出口上部からX軸方向に最大6点とし、またZ軸方向に中心部から右側のY軸方向に3 か所とし、最右翼だけZ軸方向に6点とした。Fig.5は、測定値を示す。

5. 考察

Fig.5は、前回最高風速を記録した吐出口 風下 X=140mm で V=10m/s での吐出口の風 速分布を示す。この状態は V=2m/s を除い て4~10m/sまでほぼ同じ状態であった。風 速は、吐出中間部 100mm 付近で最大になり 以降は少し下がる傾向にある。前回の基本 形状の結果に近い。吐出形状と開口比が高 いことが影響していると考えられる。



6. 成果報告

3次元形状の集風器に吐出口の下部を山





Fig. 3 トラバーサーと熱線流速計



Fig. 4 吐出後部の測定点

Fig.5 吐出口の風速分布

形にし、よりローター外周付近に吐出風が集中する構造を制作、その性能を計測した。吐出部高の中 間部付近では、約1.2倍の風速向上が認められた。この倍率は、風速4m/s~10m/sの範囲でほぼ一定で あった。この位置は、ほぼ前回の基本形状に近いものであった。本実験に当たり職員の松島、渡辺様 および烏谷、大屋先生方に謝意を表します。

新しい発想による風力発電の研究

(株) TMIT・研究開発部・所長 首都大学東京・システムデザイン学部・客員教授

藤井 裕矩

要旨

今後ますます我が国の再生エネルギー生産において重要な分野となると予想される風力エネルギー発電方法について、高空風力発電について研究集会を開催し、プロジェクトの遂行について議論 を行った。本課題は世界的にも先進的な高度なプロジェクトであるため、多方面からの新技術の開 発について研究発表と意見交換を行った。

1. はじめに

本研究では、最先端技術の総合による未踏技術の開発をめざし、具体的にはいまだ未開発の分野 として残され、海外でも米国、オランダなどで開発の端緒が開始されたところである高空における 風力発電技術を取り上げた。本研究グループは、大学・会社・研究所における航空宇宙技術ならび に風車技術に関して専門的な学識と経験を持つ研究者たちが高空風力を利用した風力発電の研究 を主軸にして結集したものであり、これを核としてフロンティア技術に携わる知的工学技術の集団 を構成した。

また、九州大学応用力学研究所における共同研究の大きな枠組みとして平成22年度より「新エ ネルギー力学」の分野が作られ、九州大学でも風力発電技術の研究開発にかかわっている。いま、 共同研究の特定研究「再生可能エネルギーの大規模導入技術に関する研究」の研究統括者である吉 田教授に参加いただき研究範囲を充実することにした。このため、九州大学応用力学研究所の共同 研究として研究集会を開催し、高空風力発電について議論を深め、我が国における本課題の進め方 についてまとめを進めた。

2. 高空風力を用いた発電に関する研究会議について、

研究会議は、今回九州大学筑紫キャンパスにおいて第4回全体会議を開催したほか、適宜 実 験終了時にメールにて報告した。

- ▶ 2016 年 9 月 15 日 九州大学 応用力学研究所において「第 4 回全体会議」開催、(西棟 6 F 多 目的研究交流室)
- ▶ 2017 年 3 月 17 日 東京理科大学葛飾キャンパスにおいて「第 5 回全体会議」開催予定、(研究 棟 4 階 工学部機械工学科会議室 2)
- ◎「高空発電研究会」第4回全体会議(2016年9月15日)
- * 場所:風洞と応用力学研究所、九州大学筑紫キャンパス
- * 〒816-8580 福岡県春日市春日公園6丁目1番地
- * W601:九州大学 応用力学研究所、西棟6F多目的研究交流室

出席者(順不同、敬称略):藤井裕矩、大久保博志、吉田茂雄、平川雅人、土屋光慶、原田恭輔、小川慎平、 佐藤強、相原浩司、Tarek Naem Dief, 関和市、高橋泰岳、近藤智行、遠藤大希、池田和泰、花田泰智、丸山 勇祐、黒崎保秀、以上 18 名。

議題:高空風力を用いた発電に関する研究について年度中間報告

10:00~10:40 全体計画の進捗状況報告

藤井裕矩 (TMIT研究開発部、首都大学東京名誉教授)

- 10:40~11:00高空風力発電システムPhase 1のまとめ(仮題)原田恭輔、大久保博志(神奈川工科大学)
- 11:00~11:20 敦賀での実験など福井大参加の行事報告(仮題)高橋泰岳、近藤智行(福井大学)、
- 11:20~11:40 Kite Power System

Tarek Naem Dief、Shigeo Yoshida (九州大学)、

11:40~12:00 Phase1.5における風車設計(仮題) 丸山勇祐(前田建設工業(株))

<昼食休憩90分>

- 13:30~13:50 軽量翼の製作方法(仮題) 遠藤大希(九州産業大学)
- 13:50~14:10 Phase1.5風洞試験用冶具を用いたトルク伝達特性試験(仮題)

相原浩司 小川慎平、大久保博志(神奈川工科大学)

14:10~14:30 係留式高層プラットフォーム研究の紹介(仮題)

佐藤 強、大久保博志(神奈川工科大学)

14:30~15:30 パネル討論(日本におけるエアボーン風車の今後)
 司会:吉田茂雄(九州大学)
 感想提供:黒崎保秀((社)日本再生可能エネルギー推進機構)、

【まとめ】 関 和市(東海大学)

◎「高空発電研究会」第5回全体会議(2017年3月17日)(予定)

* 場所:東京理科大学葛飾キャンパス研究棟4階 工学部機械工学科会議室2、

* 〒125-8585 東京都葛飾区新宿 6-3-1

出席者(順不同、敬称略):藤井裕矩、大久保博志、原田恭輔、小川慎平、相原浩司、佐藤強、草谷大郎、山本 広樹、関和市、近藤智行、遠藤大希、丸山勇祐、中台 章、大渡 賢治、以上14名。

- 議題:高空風力を用いた発電に関する研究について年度最終報告
- 10:00~10:40 テザー型高空風力発電の研究-2016年度進捗報告

藤井裕矩(TMIT研究開発部、首都大学東京名誉教授)

10:40~11:00 連凧浮体利用型高空風力発電に関する実験的研究(仮題)

遠藤大希(九州産業大学)

11:00~11:20 連凧を用いた小型高空風力発電の試み(仮題)高橋泰岳、近藤智行(福井大学)、

- 11:20~11:40 高空風力発電用繋留テザーのためのトルク制御アーム付巻取装置モデル 山本 広樹
- 11:40~12:00 テザーを利用した高空風力発電装置の設備利用率に関して(仮題) 丸山勇祐(前田建設工業(株))

<昼食休憩90分>

- 13:30~13:50 Phase1.5モデルの風洞試験について 原田恭輔、大久保博志、小川慎平、相原浩司、佐藤強)
- 13:50~14:10 テザーを用いた動力伝達に関する検討一特に張力と巻き付け方に関してー 小川慎平、大久保博志、原田恭輔、相原浩司、佐藤 強
- 14:10~14:30 発電機を搭載したプラットフォームによる高空風力発電の概念検討 相原浩司、大久保博志、原田恭輔、小川慎平、佐藤 強
- 14:30~15:00 高空風力発電用繋留型インフレータブル飛翔体の検討

草谷大郎、藤井裕矩

15:00~15:30 パネル討論(非定常飛行を行う凧の運動)

司会:吉田茂雄(九州大学)

話題提供:中台 章(ジオスポーツ)、

【まとめ】 関 和市(東海大学)

3. 研究組織

研究組織は、表1に示す通り申請時から大幅に増加している。

表1

藤井 裕矩	TMIT、首都大学東京	所長
大久保博志	神奈川工科大学	教授
新川 和夫	九州大学	教授
関 和市	逢甲大学大学院	教授
内山 賢治	日本大学	教授
吉田 茂雄	九州大学	教授
Tarek Naem DIEF	九州大学	博士課程
野々山 登	神奈川工科大学	コーディネーター
吉野 和芳	神奈川工科大学	准教授
草谷 大郎	都立産業技術高専	准教授
真志取 秀人	都立産業技術高専	准教授
山本 広樹	都立産業技術高専	准教授

高橋 泰岳	福井大学	准教授
 山根 正睦	福井大学	特命准教授
渡部 武夫	帝京大学	講師
中嶋 智也	大阪府立大学	講師
金子憲一	大阪府立大学	助教
遠藤 大希	九州産業大	助手
丸山 勇祐	前田建設工業	研究員
岩原 誠	(有) ザクシス	代表取締役
浅生 利之	THK 株式会社	専任部長
咲山 隆	THK 株式会社	研究員
会田 智幸	THK 株式会社	研究員
栗田篤	(有) トライアス	代表取締役
大渡 賢治	(株)コスモテックス	
笹原雄二郎	(株) スーパー・サイエンス・テクノロジー	
Rob Stroeks	オランダ大使館 科学技術部	シニア・アドバイザー
佐藤強	神奈川工科大学	学生
原田 恭輔	神奈川工科大学	学生
相原 浩司	神奈川工科大学	学生
池田 和泰	九州産業大	学生
田村剛志	九州産業大	学生
花田泰智	九州産業大	学生
近藤 智行	福井大学	
平川 雅人	日本大学	学生
土屋 光慶	日本大学	学生

4. 研究成果報告

*学会論文

1) Hironori A. FUJII, Masahito HIRAKAWA, Mitsuyosi Tuchiya and Kenji UCHIYAMA, Space tether technology and its application to air borne wind energy generation, Proceedings of the 26^{nd} Workshop on JAXA Astrodynamics

and Flight Mechanics, Yoshinodai, Kanagawa, 2016, pp.TBD.

2)藤井裕矩,平川雅人,内山賢治,渡部武夫,草谷大郎、「凧型テザー風車の動力伝達テザーとテ ザー形状の検討」、ブイヤント航空、Vol. 43, No. 1, 2016 年 6 月, pp. 39-46.

3) 草谷大郎,藤井裕矩,川崎天揮,冨田匠,黒田将茂,角舘李果、「高空風力発電用の繋留型オールインフレータブル構造航空機の検討」、ブイヤント航空、Vol. 43, No. 1, 2016 年 7 月 18 日, pp. 47-54.

*学会発表

1)藤井 裕矩、渡部 武夫、草谷 大郎、小島 広久、「スーパー・テザー展開性能の飛行後検討」、(社) 日本航空宇宙学会第47期定時社員総会/年会講演会、2016年4月14[~]15日、東京大学山上会館。

2) 草谷大郎、藤井裕矩、渡部武夫、「係留気球式高空発電装置の動向と取り組み」、ブイヤント航 空懇談会、東京都立産業技術高等専門学校、2016(平成28年)年6月20日。

3)藤井裕矩、渡部武夫、草谷大郎、内山賢治、「走行するテザーを持つ凧型風車の運動の定式化について」、第2回ブイヤント航空懇談会、東京都立産業技術高等専門学校、2016(平成28年)年6月20日

4) 土屋光慶、藤井裕矩、平川雅人、草谷大郎、内山賢治、「近年のインフレータブル・カイトプレ ーンの形式とオーバービュー」、第3回ブイヤント航空講演会、東京都立産業技術高等専門学校、 2016年7月18日。

5) 草谷大郎、藤井裕矩、川崎天揮、冨田匠,角舘李果,黒田将茂、「高空風力発電用のインフレー タブル航空機の検討」第3回ブイヤント航空講演会、東京都立産業技術高等専門学校、2016年7月 18日.

6) 大久保博志, 佐藤 強, 原田恭輔, 渡辺大誠, 藤井裕矩、「高空プラットフォームを利用した風力発電に 関する研究」、第 60 回宇宙科学技術連合講演会講演集, JSASS-2016-4187, 2016.9.7

7)藤井裕矩,大久保博志,丸山勇祐、栗田 篤, Zxivanovich Sava、「テザーシステムによる再生可能エネ ルギーの伝達について」日本機械学会 2016 年度年次大会、J0550404、2016 年 9 月 11~14 日、九州大学伊都 キャンパス.

8) 丸山勇祐,藤井裕矩,大久保博志,岩原 誠,佐藤 強,原田恭輔,松井 正宏,関 和市、「テザーを活 用した浮遊風車への縦軸直線翼風車の特性について」、日本機械学会 2016 年度年次大会、J0550405、2016 年 9月11~14日、九州大学伊都キャンパス

9) 遠藤大希、「複合高空発電プラットフォームの基礎研究」、日本機械学会 2016 年度年次大会、J0550407、 2016 年 9 月 11~14 日、九州大学伊都キャンパス

10)近藤智行,高橋泰岳,小島令子「カイト型テザー係留飛行ロボットを用いた小型 風力発電システムの 試み」日本機械学会 2016 年度年次大会、G1500401、2016 年 9 月 11~14 日、九州大学伊都キャンパス

1 1) Hironori A. FUJII, Hiroshi Okubo, Yusuke Maruyama, Tairo Kusagaya, and Takeo Watanabe,"Air Borne Wind Energy Generation on Tethered System," *Proceedings of WWEC2016 TOKYO* C-3-6,(2016), 2 November 2016, University of Tokyo, Japan.

12) 草谷 大郎、冨田 匠、藤井 裕矩、「高空風力発電用カイツーンの検討」第38回風力エネルギー利 用シンポジウム、2016年11月30日・12月1日,科学技術館、千代田区、東京, B5-4.

13)藤井 裕矩、丸山 勇祐、大久保 博志、草谷 大郎、「テザーを用いた風力発電について(機能試験)」、 第38回風カエネルギーシンポジウム、第38回風力エネルギー利用シンポジウム、2016年11月30日・ 12月1日,科学技術館、千代田区、東京, C4-6.

14)藤井裕矩、丸山 勇祐、大久保 博志、草谷 大郎、「テザー型高空風力発電の研究-2016 年度進捗報告」、日本機械学会関東支部第23期総会・講演会 0S0201-01、2017 年3月 16-17 日、東京理科大学.

15) 真志取秀人、伊藤 香織、井上 美潮、「垂直軸風車のための曲率翼に関する予備研究」、日本機械学会

関東支部第23期総会・講演会0S0201-02、2017年3月16-17日、東京理科大学。

16)原田恭輔、佐藤 強、相原浩司、小川慎平、大久保 博志、藤井 裕矩、遠藤 大希、丸山 勇祐、「テザ 一型高空風力発電の研究-直線翼風車モデル(Phase1.5)の風洞試験」、日本機械学会関東支部第23期総会・ 講演会 0S0201-03、2017 年 3 月 16-17 日、東京理科大学.

17) 花田 泰智、遠藤 大希、高橋 泰岳、田村 剛志、「連凧浮体利用型高空風力発電に関する実験的研究(Iot 計測機器の有用性に関する報告)」、日本機械学会関東支部第23期総会・講演会 0S0201-04、2017 年3月16-17日、東京理科大学. 0S0201-04、

18)近藤智行、高橋泰岳、遠藤大希、「連凧を用いた小型高空風力発電の試み」、日本機械学会関東支部第23期総会・講演会 0S0201-05、2017 年 3月 16-17 日、東京理科大学.

19)山本広樹、草谷大郎,、「高空風力発電用繋留テザーのためのトルク制御アーム付巻取装置モデル」、 日本機械学会関東支部第23期総会・講演会 0S0201-06、2017 年3月16-17日、東京理科大学.

20) 丸山勇祐、藤井裕矩、大久保博志、遠藤大希、草谷大郎, 関和市、「テザーを利用した高空風力発 電装置の設備利用率に関して」、日本機械学会関東支部第23期総会・講演会0S0202-01、2017年3月16-17 日、東京理科大学.

21) 大久保博志、小川慎平、相原浩司、原田恭輔、佐藤強、藤井裕矩、岩原誠、丸山勇祐、「テザー型高空 風力発電の研究-テザーによる動力伝達について」、日本機械学会関東支部第23期総会・講演会0S0202-02、 2017年3月 16-17日、東京理科大学.

22)藤井裕矩、平川雅人、土屋光慶、内山賢治、「テザー型飛翔体の運動特性の基礎研究」

草谷 大郎、「高空風力発電用繋留型インフレータブル飛翔体の検討」、日本機械学会関東支部第23期総会・ 講演会 0S0202-03、2017 年3月16-17日、東京理科大学.

23) 草谷大郎, 富田匠, 藤井裕矩, 丸山 勇祐、渡部武夫「高空風力発電用繋留型インフレータブル飛翔体の 検討、日本機械学会関東支部第23期総会・講演会 0S0202-04、2017 年 3月 16-17 日、東京理科大学.

5. まとめ

再生可能エネルギーにおける風力発電の将来的な手法として、高空の強い恒常的な風力を利用 する手法を含め、新しい発想による風力発電の研究について本年は全体集会として2回、いずれも 東京の科学技術館と東京工業大学で開催し、学際領域における研究として本課題のメンバー間での 理解を深めプロジェクトとしての可能性についてのまとめを進行した。

謝辞

本研究は、九州大学応用力学研究所の共同利用研究(研究集会)の助成を受けたものである。

OpenFOAM による風車ウエイクの数値風況解析と気流性状の把握

東京大学生産技術研究所 加藤 千幸

九州大学応用力学研究所 内田 孝紀

東京大学生産技術研究所 鵜沢 憲

要旨

最適周速比で稼動する風車単体を対象に、代表的なオープンソースソフトウェアであるOpenFOAMによる風車ウエイクのシミュレーションを行った。その結果、ブレードの回転を伴う風車ウエイクの長時間 積分が数値的に安定して実施できることを確認した。

序論

我が国の自然エネルギー利用を推進するため、2020年代に複数機の洋上ウィンドファームの建設計画が予定 されており、現在シミュレーションの立場からウィンドファームの高効率化を実現するための解析技術の研究開発 が進められている[1]。ウィンドファームの性能向上には、風車間の干渉によるウィンドファーム全体の電力量低下 を避けるための高精度のウエイクモデルを開発する必要があり、これまでにアクチュエータディスクやアクチュエ ータラインなどのモデルに基いた風車ウエイクの気流性状解析結果が報告されている[2,3]。本研究では、高精度 のウエイクモデルの開発に資するため、まずは第一歩として、代表的なオープンソースソフトウェアである OpenFOAM(Open Field Operation And Manipulation)[4]を用いて最適周速比で稼動する風車ウエイクのシミ ュレーションが可能かどうかの数値的な基礎検証を実施するとともに、定性的なウエイクの気流性状を 把握することとした。

方法

ブレードの回転を伴う風車の数値シミュレーションには境界適合座標系を用いた重合格子法が採用されることがあるが、本研究では保存性の精度が高い利点を有するスライディングメッシュ法を採用することとした。計算領域を図1に示す。ロータ直径をD(=2.5[m])とすると、主流(x)方向・スパン(y)方向・地面鉛直(z)方向の大きさはそれぞれ12.5D,5D,3.5Dであり、x-面から一様流入風速U(=2.0[m/s])を与えた。動粘性係数はv=2.5×10⁻⁵ [m²/s]であり、DとUに基づいたレイノルズ数は2×10⁴である。計算格子は、まず計算領域をx,y,z方向にそれぞれ128,64,64分割した基本格子を作成し、ブレード近傍には snappyHexMesh により自動生成した細分化格子を配置した。細分化格子の格子幅は基本格子の格子幅の 1/4 であり、総格子点数は約 108 万点となる。風車の回転数は R=611[rpm]であり、最適周速比の4 に設定した。乱流モデルはLESを、SGSモデルは標準スマゴリンスキーモデル(スマゴリンスキー定数:0.1)を用いた。速度と圧力の連成解法には同時緩和手法である SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations)法の収束性を改善した PISO(Pressure Implicit with Splitting of Operators)アルゴリズムを用いた。線形ソルバは代数的マルチグリッド(GAMG)法、時間方向の離散化は2次精度後退差分で最大クーラン数が 0.1 を超えないように時間刻み幅を設定し、空間方向の離散化は2次精度後退差分で最大クーラン数が 0.1 を超えないように時間刻み幅を設定し、空間方向の離散化は2次精度の1.05)した。

265



図1 計算領域

結果と考察

計算開始直後(t=0.2[s])の主流方向瞬時速度ベクトルを図 2 に示す。一般に計算直後はクーラン条件の観点から計算が不安定になりやすいこと知られているが、問題なく計算が実施できることを確認した。



図2 計算開始直後(t=0.2[s])の主流方向瞬時速度ベクトル

図3は(a)t=1[s]および(b)t=30[s]の主流方向瞬時速度成分(x-z 断面図)を示す。現時点で統計的定常 状態に至っていないために定量的な評価は今後の課題だが、t=1[s]において x=5D 付近で上下方向に分か れた主流は時間とともに中央部に収束することを確認した。同様に、t=30[s]において x=7.5D 付近で3方 向に分裂した流れも過渡的な現象であり、現時点までの時間平均を行うことで先行研究[5]と同様の流れ 場が取得できる見通しを得た。また、全シミュレーション時間において、数値的な不安定性を起こすこと なくウエイクの計算が実施できることが確認できた。



図 3 (a) t=1[s] および(b) t=30[s]の主流方向平均速度(x-z 断面図)

結論

最適周速比で稼動する風車単体を対象に、代表的なオープンソースソフトである OpenFOAM による風車 ウエイクのシミュレーションを実施した。その結果、ブレードの回転を伴う風車ウエイクの長時間積分 が数値的に安定に実施できることを確認した。今後は、統計的定常状態に至るまで計算を継続し、ロータ 直径 D の 10 倍下流の地点における主流方向平均速度欠損量などの定量的評価を実施したいと考える。

論文と学会発表のリスト

特になし

謝辞

本研究は平成28年度九州大学共同利用研究の助成を受けたものです。本研究で議論頂いた九州大学応 用力学研究所の内田孝紀先生に感謝致します。

[1] ポスト「京」で重点的に取り組むべき社会的・科学的課題に関するアプリケーション開発・研究開発 重点課題⑥「革新的クリーンエネルギーシステムの実用化」サブ課題 C:洋上風力発電.

- [2] 内田孝紀, 大屋裕二, 杉谷賢一郎, 第19回風工学シンポジウム論文集, pp. 187-192, 2006.
- [3] 内田孝紀, 大屋裕二, 第 21 回風工学シンポジウム論文集, pp. 233-238, 2010.
- [4] http://www.openfoam.com/
- [5] 内田孝紀,九州大学応用力学研究所所報第150号, pp. 25-33, 2016.

レンズ風車翼のブレーキによる衝撃ひずみ測定

鹿児島工業高等専門学校 機械工学科 小田原 悟

要旨

風車翼にはブレーキ時に回転力と制動力によって曲げ荷重が生ずる.この曲げ荷重によって風車翼根元に圧縮,引張応力 が生じき裂が発生する問題の原因を明らかにする.そして、ブレーキの安全性を向上させることを本研究の目的とする.実験 方法は風車翼の根元にひずみゲージを貼り付ける.そして、回転している風車翼のひずみの計測を行う.計測結果から風車翼 の破損にはブレーキの制動時間が影響していることが明らかになった.制動時間が極端に短いとき、風車翼には引張応力と圧 縮応力の両方が作用した.一方、制動時間が長い場合,圧縮応力のみが作用した.引張り応力と圧縮応力が繰り返し作用した ときに疲労破壊が生じる.測定に使用している風車翼にもこの作用が適用されると考えられる.そのため、ブレーキは引張り 応力と圧縮応力の両方が作用しない制動時間において使用する必要がある.しかし、今回の実験から得られたひずみは疲労限 度におけるひずみの大きさを超えていなかった.そのため、き裂発生には圧縮、引張応力以外の要因が影響していることが考 えられる.

1. 緒言

2003年に低速域でも発電可能であり、風向の変化に追従できる小型風車として「風レンズ風車」が九州大学の研究グルー プによって開発された.図1に示すようにこのレンズ風車においてブレーキの影響による疲労き裂が確認された.過去の研 究では過回転および風向の急激な変化で風車翼に負荷がかかり破損する事故を受け、風レンズ風車翼の実働ひずみ計測と疲 労強度計測が行われている.これによりき裂発生の原因を調査した.しかし、ブレーキ時の風車翼のひずみに関しては計測さ れた例がない.そこで、本研究ではブレーキ時のひずみ計測を行いき裂発生の原因を明らかにし、レンズ風車翼の安全性、信頼 性の向上を目指す.九州大学では 3kW の風車翼に関して機械式ブレーキを用いた 0.2 秒で静止する急制動でのひずみの計測 が行われた.本校では同出力の 3kW 風車翼の実験機を準備することは困難であったために 1kW 風車翼で回転数によって制動 力が変化する短絡ブレーキの実験機を製作した.この実験機を用いてひずみ計測を行い、ブレーキ時に大きなひずみ変動が生 じることを明らかにする.さらに、得られた計測結果からき裂発生の原因、およびブレーキの安全性を検討する.



Fig. 1 Fatigue crack initiation.

2. 実験方法

図2 に示すように九州大学応用力学研究所で 3kW の風車翼を用いて実験を行った.回転速度が 100rpm, 300rpm, 500rpm の際の反復制動試験であり,ひずみゲージを回転している風車に取り付け,実験的にひずみが測定された.図3 に示すよう にひずみゲージは風車翼の根元の回転方向側にハブでより強く支えられている内側と蓋に抑えられているだけの外側の2 ヶ 所に取り付けられた.回転方向に対して平行な面の計測を行っていないのは,垂直な面に生ずるひずみの大きさと比較して 1000 分の1 にも満たない非常に小さい値であったため,ブレーキ時のき裂の発生に影響はないものと仮定したためである.反復制動試験は風車翼にき裂が発生する,もしくは 1800 回まで行われた.この研究ではブレーキがかかってからの制動 時間が 0.2 秒と非常に短い時間で静止する急制動のブレーキであった.そのため 32 回と少ない回数でもき裂が発生して しまう風車翼も確認された.

本研究では短絡ブレーキを用いてひずみを実験的に計測する.ひずみゲージの取り付け位置は九州大学の実験との同様の 位置に取り付けている.これは風車翼にき裂が発生した部分を基準に貼り付けられている.まずモータの短絡ブレーキのみ で静止させる実験機を製作した.モータに回転速度を制御するモータコントローラを接続し,電磁接触機により短絡ブレー キをかける.電磁接触器は電源を入れることでモータとモータコントローラを接続し,電源が切れることで短絡ブレーキを かけることができる単純な実験機である.

しかし、制作した実験機はプレーキ開始から完全に静止するまでに約 30sec.を要した. これは本校に設置されている風 レンズ風車翼が静止までに要した約 4 秒と比較にならないものであった. また、計測されるひずみもほとんど確認できなか った. そこでインバータを介することで風車翼の速度を制御し、十分に回転速度が小さくなった時に短絡ブレーキをかけるこ とで、擬似的に強い制動力を有する短絡ブレーキを再現する. 図 4 に使用した実験機の外観を示す. 600rpm で回転しているモ ータを 1 秒で約 10rpm にまで減速させた後にモータによる短絡ブレーキを行うシステムを構築した. しかし、実際に一秒では 減速しきれておらず約 2 秒を減速までに要していた. この操作により実験機の風車翼を約 7 秒で静止に近づけることができ るようになった. また、回転数の制御によって制動時間を変更することも容易となった.



Fig. 2 Experimental equipment of RIAM, Kyusyu- Univ.



Fig. 3 Position of strain gauges.



Fig.4 Test equipment of NIT, Kagoshima College.



Fig. 5 Wind turbine blade appearance.

3. 実験結果

図5 に九州大学の3kW の実験機と鹿児島高専の1kW の実験機の計測結果を示す.図5(a),(b)は九州大学の実験機に て計測されたひずみの計測結果である.(a)はき裂発生前の通常運転時のひずみで,(b)はき裂発生直前の回転のひずみをそれ ぞれ計測しており,共通点としてはどちらも引張り,圧縮ひずみが生じていることである.また,(b)は引張りひずみが 100µɛ, 圧縮ひずみが 200µɛ と通常運転時の約2 倍のひずみが生じている.

図 5(c), (d)は鹿児島高専の実験機にて測定されたひずみの波形である.ともに圧縮ひずみしか生じておらず, (c)は最大ひずみから直線的にひずみが小さくなっている.最大圧縮ひずみはどちらも 70µε 程度であった.

4. 考察

今回実験に使用した風車はそれぞれ大きさが異なるためひずみ変動の大きさに関して単純比較を行うことはできないが制 動時間とひずみの波形の関係について考察する.2 つの実験機はブレーキシステムも異なるものを採用している.常に一定 の制動力を加え続ける機械式ブレーキ、回転数の大きさによって制動力が変動する短絡式のブレーキである.最大制動力が 同じであれば制動時間が短くなるのは機械式ブレーキであり多くの風車のブレーキに用いられている.制動時間が 1 秒以内 と極端に短い場合,制動力を加える時間は一瞬である.従って,実際に短絡ブレーキを用いて一瞬で風車翼を静止させること は困難ではあるが二つのブレーキに差異はなくなる. 今回は実験を行い確認することはできなかったものの制動時間が極端 に短くなれば 1kW の風車翼にも引張り,圧縮ひずみが生じることが予測される.結論としてブレーキ時の風車翼のひずみの 波形を決定する大きな要因のひとつは制動時間であると考えた.制動時間が短くなれば引張り,圧縮ひずみが生じることから 繰り返し作用すると疲労破壊が起きる可能性が大きくなるため危険である.静止まで圧縮のみが作用する制動時間のブレーキ を使用することが安全性を高める方法の一つである.

鹿児島高専で測定された実験機のブレーキによるひずみは図 5(c),(d)のグラフのものであるが材料が大きく圧縮されていることは明らかである.そこで回転数,減速時間からひずみの理論値を算出し,測定値と理論値の比較を行うことで風車翼破損の可能性を考察する.

ブレーキ時のモーメントによる曲げ応力 ob は次の式で求められる.

$$\sigma_b = \frac{M}{Z}$$

Z は断面係数[mm³]である. モデル化した寸法を b=30mm, b=80mm を代入して計算すると Z=15.7×10³mm³ となる.

したがって、曲げ応力 $\sigma_b=0.32$ MPa であるまたこれによりひずみ振幅 $\Delta \epsilon$ を求めることができる.

$$\Delta \varepsilon = \frac{2\sigma_b}{E}$$

縦弾性係数 E=70GP とすると、Δε=9.14µε が求められた.

ここで疲労限度の値に相当するひずみの計算を行う. CFRP の疲労限度を 514MPa とすると,疲労限度に相当するひず み振幅は14.7×103µe となる. このひずみの値を超えた時に疲労限度より大きい応力が生じたと判断できるが,今回の測 定されたひずみは最大でも 190µe であった. したがって,今回計測に用いたブレーキシステムは安全に使用できる範囲内 で作動していたことになる. ただし,今回平均応力は 0 としたときの疲労限度である. 疲労限度は大きめに見積もってい ると考えるべきである. 計算結果ではブレーキは安全に使用できる範囲で作動していたとされたが,実際には 3kW の風車 翼を 0.2 秒で静止するブレーキではき裂が発生している. 今回は引張り,圧縮のみに注目し計測を行ったが,き裂発生に は風車翼の複雑な形状からねじれが生じている可能性がある. き裂発生に関わる引張り,圧縮応力以外の要因の発見を今後 の課題としたい.

5. 結論

現在世界中で注目されている風力発電システムにおいて従来よりも発電効率に優れた風車「風レンズ風車」が開発された. 過去に過回転によるブレードの破損事故が発生したことをきっかけに実働ひずみの測定を行い,破損の原因を調査した.本 研究ではブレーキによる破損が起きた報告を受けブレーキ時のひずみ測定を行いブレーキの安全性について検討した.次に その結果を述べる.

- (1) テレメータ式無線ひずみゲージを用いて風レンズ風車翼のブレーキ時のひずみ測定に成功した.
- (2) 九州大学で3kW の風車翼の実験機を用いてひずみを測定した.制動時間が0.2 秒と極めて短いブレーキの場合引張りひ ずみが30µɛ, 圧縮ひずみ 70µɛ が生じた.
- (3) 鹿児島高専で 1kW の風車翼の実験機を用いてひずみの計測を行った. 制動時間が 4sec.以上と長い場合静止するまで圧 縮のひずみのみが生じた.
- (4) 計測したひずみの波形からひずみ振幅を読み取り,発生するひずみの理論値と比較した.計算結果ではブレーキが安全に 使用できる範囲内でひずみは生じていた.
- (5) ブレーキ時にき裂が発生していることから引張り、圧縮以外のき裂発生の要因があると予測された.

垂直軸風車のエネルギーハーベスティングへの応用研究

鳥取大学大学院 工学研究科 機械宇宙工学専攻 原 豊

1. はじめに

本研究では身近に存在するエネルギーから発電を行うエネルギーハーベスティングの1つとして、小形垂直軸風車による発電 への応用を様々に検討している. これまでに排気ダクトから噴出する流体エネルギーを回収する

「ダクト発電」の有効性を実験と数値解析の両面から示し、翼端形状の出力への影響を数値解析してきた本年度はそれらの研究結果の取りまとめを実施するとともに、より小さな風車による発電の可能性を示すことを目的として、3D プリンタで製作したミニチュア風車の小型風洞実験とCFD 解析を実施した。

2. 方法

3D プリンタで製作したミニチュアバタフライ風車を図1 に示す. ロータ高さH は 60 mm, ロータ最大直径D は 80 mm である. 翼 ジテーパー状であり, 赤笛の最大翼弦長は30 mm である. 赤道面における翼断面形状は図1に示すようにキャンバー翼となっている. 実験装置模式図を図2 に示す. 風車モデルの回転軸は床面に対して水平に設置し, 微小トルク計に 接続した. 回転数は可変速モータで段階的に変化させてトルクを計測した. 風車モデルは小形吹出型風洞の出口から0.5 m の 位置に設置し, 風速まピトー管で計測した.

本研究ではSTAR-CCM+ ver.11.02 を使用してRANS により実験風車の3 次元数値解析を実施した. 乱流モデルにはSST $k-\omega$ を選択し、 γ - $Re\theta$ 遷移モデルのオプションを用いた. 計算条件は回転数N = 1200 rpm, 風速は6 m/s とした(先端周速比: 0.8378).



図1 ミニチュアバタフライ風車モデル(D = 80 mm, d = 30 mm)



3. 主な結果と考察

図3 に風速が 5.7 m/sの場合の実験で得られた出力特性を示す. 回転数が1200 rpmの状態で最大軸出力30.5 mW が得られている. 図4 は 同じ回転数におけるCFD 解析の結果であり、Q 値(速度勾配テンソルの第2不変量)の







図 4 Q 値(2500s⁻²)の等値面(5.5833 回転時)

等値面(Q=2500s²)を示している. CFD 解析で得られた出力は21.1mW であり、実験値と数値解析の間でオーダ的に妥当な一致が得られた 本風車の特徴に合う発電効率の高い、例えば効率50%のミニチュア発電機が開発され るならば、風速6m/s において発電効率:約2.4%(発電電力:約15mW)が期待される.

【研究組織】

原 豊	代表者	鳥取大学大学院	准教授	男	52 歳
川 西 誠	協力者	鳥取大学大学院	修士2 年	男	26 歳
山中勇弥	協力者	鳥取大学・工学部	学部4 年	男	23 歳
山本柊	協力者	鳥取大学・工学部	学部4 年	男	22 歳
住 隆 博	協力者	佐賀大学大学院	准教授	男	43 歳
吉田茂雄	所内世話人	九州大学応用力学研究所	教授	男	50 歳

【成果報告】

- (1) 原 豊, 高垣雄大, 住隆博, 吉田茂雄, 垂直軸風車によるダクト排気流体エネルギー回収に関する2次元数値 解析, 日本機械学会2016年度年次大会, J0550205, 2016.9.11-14, 九州大学.
- (2) Makoto Kawanishi, Yutaka Hara, Katsuhiro Takagaki, Takahiro Hara, Kazuya Hori, Shigeo Yoshida, Effects of Relative Rotor Location to Duct Exit on Energy Recovery from Duct-Exhaust Flow Using a Butterfly Wind Turbine, The 6th Joint Symposium on Mechanical and Materials Engineering (JSMME 2016), B3-5, 2016. 9. 24-27, 鳥取大学.
- (3) Makoto Kawanishi, Yutaka Hara, Katsuhiro Takagaki, Takahiro Hara, Kazuya Hori, Shigeo Yoshida, EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECTS OF RELATIVE ROTOR LOCATION TO DUCT EXIT ON ENERGY RECOVERY FROM DUCT-EXHAUST FLOW USING A BUTTERFLY WIND TURBINE, The 15th World Wind Energy Conference and Exhibition (WWEC2016 TOKYO), D-4-4, 2016.10.31-11.2, 東京大学.
- (4) Yutaka Hara, Yuuki Furukawa, Takahiro Sumi, Hiromichi Akimoto, Shigeo Yoshida, NUMERICAL ANALYSIS OF FLOW FIELD AROUND AN ENDPLATE OF STRAIGHT-BLADE VERTICALAXIS WIND TURBINE, The 15th World Wind Energy Conference and Exhibition (WWEC2016 TOKYO), D-5-2, 2016.10.31-11.2, 東京大学.
- (5) 原 豊, 堀和也, 川西誠, 山中勇弥, 山本 柊, 吉田茂雄, エネルギーハーベストへの応用を目指したミニチュア 風車の研究, 日本機械学会 第94 期流体工学部門講演会, Paper_No. 621, 2016.11.12-13, 山口大学.
- (6) 原 豊,川西誠、山中勇弥、山本柊、堀和也、吉田茂雄、ミニチュアバタフライ風車のトルク計測とCFD 解析、第38 回風力エネルギー利用シンポジウム, pp. 482-485, 2016.11.30-12.1, 科学技術館(東京).
- (7) Y. Hara, K. Hori, M. Kawanishi, Y. Yamanaka, S. Yamamoto, S. Yoshida, POTENTIAL OF MINIATURE BUTTERFLY WIND TURBINE FOR APPLICATION TO ENERGY HARVESTING, International Symposium on Micro-Nano Science and Technology 2016, SuP1-A-2, 2016.12.16-18, 東京大学.
- (8) Yutaka Hara, Shohei Kogo, Katsuhiro Takagaki, Makoto Kawanishi, Takahiro Sumi, Shigeo Yoshida, Experimental and Numerical Studies on the Possibility of DuctFlow Low-power Generation Using a Butterfly Wind Turbine International Journal of Fluid Machinery and Systems, Vol. 10, No. 1, pp.19-29, 2017.01. [査読有].

八代海の潮流場に及ぼす長島海峡での潮流エネルギー抽出の影響について

鹿児島大学理工学研究科(工学系) 山城 徹

1. はじめに

鹿児島県は長島海峡と黒之瀬戸(図-1)を潮流エネル ギーの実証フィールドに提案し,2015年7月には利用者 の確定が確認された時点で実証フィールドに選定する ことが決まった.一方,これらの海峡,瀬戸の背後には 八代海が存在し,昔から鹿児島県,熊本県のノリやブリ の養殖漁業の拠点となっている.したがって,長島海峡 や黒之瀬戸での潮流発電装置の設置が八代海の流況に 与える影響を評価しておくことは重要である.本研究は, 長島海峡や黒之瀬戸に複数の発電装置を設置したとき の抽出可能なエネルギーと周囲の潮位,潮流への影響を 明らかにすることを目的とする.

2. 数値計算と現場観測

本研究は、八代海、有明海を含む図-2 に示す海域を 計算領域とし、数値実験は非構造系三角系格子を用い た3次元有限体積法数値モデル Finite Volume Coastal Ocean Model (FVCOM) (Chen et al., 2006年)で 実施した.長島海峡以外の領域については、日本水路 協会が出版した水深データを、長島海峡については本 研究で測定したデータを利用した.メッシュ幅は最大 6km、最小 180m とし、鉛直座標は o 座標 20 層に分割 した.開境界では海洋潮汐予測モデル NAO.99Jb

(Matsumoto et al., 2000 年)の主要8分潮(S2, M2, N2, K2, K1, P1, O1, Q1)を与えた.また, 発電装置の設置による潮流場への影響については,
Yang et al. (2013 年)によって提案された外力項をモ デルの運動方程式に加えることとした.

長島海峡に最も近い阿久根における潮位変動の観測 結果と計算結果の相関を図-3 に示す.計算結果は観測 結果と強い正の相関関係(相関係数:0.99)を示し,観 測結果を良く再現できていると言える.長島海峡の潮

流については、大潮期下げ潮時に海峡で最も幅の狭い赤島付近で、東シナ海に向かう流速 2m/s 以上の強い流 れが鹿児島県によって観測されており(図-4),このような流速分布は数値計算でも定性的には再現されて いる.図示はしないが、大潮期上げ潮時においても赤島付近で分布する強流域を再現できている.図-5 は、 鹿児島県が長島海峡と黒之瀬戸で実施した 15 昼夜以上の定点連続観測で得られた流速散布図(赤丸)に、同



図-1 長島海峡,黒之瀬戸と検潮所(赤丸),測流点 (青丸)の位置



図-3 阿久根の観測潮位と計算潮位の相関



時期の数値計算の流速散布図(青丸)を重ねたものであ る.長島海峡については、上げ潮、下げ潮共に流向、流 速の分布が良く一致し、再現性の高いことが示されてい る.黒之瀬戸については、上げ潮では流速、流向とも概 ね一致しているが,下げ潮時では計算流速が最大で 1.5m/s ほど過小に見積もられ、流向が南に若干ずれてい る結果となった、図示はしないが、三角ノ瀬戸と大戸ノ 瀬戸については再現性があまり良くなく,使用した海 岸・海底地形データだけでは測流点近傍の複雑な地形を 充分に反映できなかったかもしれない.





黒之瀬戸では下げ潮時の再現性は必ずしも良くない

が、長島海峡と黒之瀬戸4m深の15昼夜平均を求めると(図-6)、長島海峡では赤島と長島との間で2.0kW/m²、 黒之瀬戸では 6.0kW/m²のパワーポテンシャルがあることが分かった.さらに、ポテンシャルの高い場所(図 -7 の黒丸) に直径 18m のブレードを有する発電装置 20 機を設置すると,長島海峡では日平均して 447MW, 黒之瀬戸では 540MW のエネルギーポテンシャルを抽出できることが示唆された.発電装置を 20 機設置した 場合でも、潮位への影響はほとんど確認されなかったが、潮流については、長島海峡、黒之瀬戸とも、その 周辺に流速低下がはっきりと確認され(図-7),長島海峡では最大で10cm/s,黒之瀬戸では最大で15cm/s の流速減少が発電装置の下流域に発生することが示唆された.

研究組織 研究代表者 鹿児島大学/山城 徹(男,59歳)

研究協力者 鹿児島大学/小牧弘幸(男, 26 歳) 堀田正資(男, 24 歳), 九州大学/胡 長洪

130.1°E

32.12ºN

(c) 上げ潮の場合

130.15°E

流速値を引いた残差の水平分布

黒之瀬戸 黒之瀬戸 0 32.08°N 32.08°N -5 -10 130.15°E 130.2°E 130.15°E 130.2°E 図-7 長島海峡 [(a), (b)] と黒之瀬戸 [(c), (d)] において、20機の発電装置を設置したときの絶 対流速値から発電装置を設置していないときの

32.12°N

130.1°E

(d) 下げ潮の場合

10

5 0

-5

-10 15

15

10

5

[cnh/s]

130.15°E

洋上発電機器開発のための材料強度評価

琉球大学工学部 真壁 朝敏

1 緒 言 自然エネルギーによる発電手法が確立され、大型の発電設備が設置されることが望まれ る.海洋の面積が広い我が国においては、洋上発電の展開についても検討する必要があると思われる. また、近年、沖縄トラフに海底資源が存在することが分かり、金属鉱物の発生源であるチムニーが発見 されている.そのような背景から海洋に関連した新産業の発掘の可能性があり、洋上での電力供給も関 連産業として展開すれば幸いに思うが、洋上の発電システムにおいては、潮風と塩水のしぶき等による 材料の腐食の問題を解決する必要がある.そのようなことに関連し、本研究室でも海洋で使用される材 料の腐食の問題を基礎的な観点から検討している.まず、腐食の機構に関することを検討するため、炭 素鋼を用いた検討を行っている.本報においては3%食塩水を噴霧した場合の炭素鋼の腐食について検 討した結果を報告する.腐食の進行には溶存酸素の問題や乾燥・湿潤環境の影響等 Dを検討する必要が ある.本研究では腐食の促進と疲労寿命の観点から検討し、塩水を間欠的に噴霧した場合の効果につい て検討した.また、基本的な観点から平滑試験片の寿命低下の傾向とスリット試験片におけるき裂進展 挙動に関して実験を行っている.

2 素材および実験方法 用いた材料は炭素鋼 S35Cである.素材を 830℃で1時間焼きなまし試験片 を製作し表面仕上げを行った.その後に 600℃で1時間真空焼きなましを行っている.実験は引張圧縮 方式で,応力比 *R* は・1 と0に設定した.それらの定性的な結果はほぼ同じであったので,本報告では *R*=・1 の場合の結果を示す.周波数は腐食環境下では 3~5Hz,大気環境下では 10Hz とした.腐食環境 下の実験においては,試験片の試験部のみを腐食させるためのチャンバーを用いて,試験機が腐食で損 傷しないように工夫した.塩水噴霧はある一定応力繰返し毎に行うことを基本とし,試験片に布を巻き つけて噴霧した場合や一定期間の中断後に腐食疲労試験を再開する等の条件で行っている.Fig.1に試 験片形状の例を示す.各タイプで試験部と試験片端部の形状は同じであるが,腐食疲労試験のためにチ ャンバーを用いる場合は,試験片の長さが 260mmであり,それを用いない大気中での試験片の場合が 140mm である.丸棒試験片では平滑と小穴を加工した場合の実験を行った.平板部を有する試験片は 両端にスリットを加工している.塩水噴霧は霧吹きを利用して,手動で約 35mm 離れた位置から試験 片に噴霧している.噴霧量は片面あたり約 2cc / 回である.なお,室温はほぼ 25℃に調整して実験を 行っている.



Fig. 1 Geometry of the specimen (mm)

3 実験結果および考察 まず,基本的な疲労寿命の低下傾向について説明する.間欠腐食による基本的な疲労寿命の低下について考察するため,丸棒試験片(Fig.1(a))を用いて得られた S-N 曲線を Fig. 2 に示す. 平滑試験片および小穴を加工した試験片(穴径 d,穴深さ h)において,当然の結果で あるが,腐食によって寿命が低下する.そして,平滑試験において,応力振幅 199MPa の場合の本実 験での塩水噴霧の条件は寿命の低下にほとんど影響せず,3000回毎の応力繰返し後の噴霧の場合も約 1週間の実験停止による乾燥期間をおいた場合も結果はほぼ同じであった.また,小穴を加工した場合, 大気環境下では,穴の寸法が大きくなると寿命が低下するが,腐食環境下においては本実験範囲という 条件下では,平滑試験片と小穴を加工した試験片の寿命に大きな差は見られない.っまり,本実験条 件の範囲内では応力集中の差は腐食の作用にほとんど関係しない結果になっている.また,観察した破 面では試験片表面の腐食が激しく,内部での腐食損傷は大きくなかった.この結果から,本実験条件で は表面の腐食が破断寿命に大きな影響を及ぼしていると考察される.



Fig. 2 S-Neurves of smooth specimens

Fig. 3 S-N curves of slit specimens

長いき裂の進展傾向について平板試験片(Fig.1(b))を用いて検討した.き裂長さの計測を行う際,腐食 によってき裂先端が確認できなくなることから,試験片の片面のみを腐食させ,他の面はセロハンテー プを貼り表面を保護して実験を行った.つまり,本実験ではき裂の観察し易い片面からのき裂長さの測 定を行っている.Fig.3 はスリット試験片の応力振幅と破断寿命の関係である.Fig.4 はき裂進展曲線 である.き裂長さはスリット両側の長さの平均値 a を示している(その長さはスリットの長さを含ん でいる).



Fig.4 Crack growth curve of corrosion specimen

Fig. 4(a) は、応力振幅が120MPa の場合の結果である. 全体的傾向としては、大気環境下と腐食環 境下でのき裂進展曲線(破断寿命)に大きな差はないように見える. 表面での腐食が最も激しい、布(ガ ーゼ)を試験片に巻きつけて腐食させた場合には、途中のき裂進展速度が他の場合に比べて遅くなった

(矢印の位置で表面の酸化部分を削り取っている).この場合,最終的には不安定的にき裂が進展して, 腐食なしの場合とほぼ同じ破断寿命となった.Fig.4(b)では,応力振幅が低い(103MPa)ので,腐食さ れる時間が長いという条件になる.Fig.3から分かるように,その応力振幅の場合,間欠的に塩水を噴霧した場合の破断寿命が大気中の場合よりも長くなることが明瞭である.Fig.4(b)に示したき裂進展 曲線から分かるように,ある腐食時間の経過後にき裂進展がほぼ停止するような状態になっている.矢

印の時点で実験を中断し表面の腐食部分を 削り取ったが、それは実験結果にほとんど 影響を及ぼしていない.試験片の破断直前 には、スリット先端から黒っぽい粉が噴出 し流れ出たが、それはき裂の不安定進展に よって錆部が剥離したものである.

Fig.5 は腐食疲労試験において,試験片 表面の状態が変化していく状況を観察した ものである.テープを貼り付け表面を保護 した部分を観察している.Fig.5 から時間 の経過によって徐々にき裂面が腐食されて いくことがわかる.



Fig. 5 Example of observation of crack growth (σ_{max} =120MPa, a_{R} = length from slit bottom to crack tip)

Fig.6は、Fig.4(b)の矢印の時点で試験を中断し試験片表面を観察したものである。Fig.6(a)は試験中 断直後の表面状態であり、腐食が激しいことが分かる.Fig.6(b)は試験中断後に試験片の表面を研磨し た際の状態である.この表面状態から、酸化物の生成がき裂先端の開閉口挙動に影響したことが分かる. そして、き裂閉口挙動によって、き裂進展が一時的に遅延したことが考察される.平滑試験片において、 応力振幅が高い場合に腐食環境下の実験の方が大気中の場合よりも寿命が長い場合がある.その場合に おいても、すべり帯での酸化物の形成がすべり挙動を妨げてき裂の発生を遅らせるという可能性もある. 今後、き裂発生とピット発生を比較し、そのことを検討する予定である



(a) Before removing corrosion surface layer (Arrows show the slit bottoms)



(b) After removing corrosion surface layer (Arrows show the crack tips) Fig.6 Observation of corrosion surface in the case of slit specimen

4 結言 本研究においては,間欠腐食作用を受ける炭素鋼の疲労特性の例について検討した.特に, スリットを加工した試験片での長いき裂の進展について検討しており,腐食生成物がき裂先端に蓄積す る場合はき裂進展が遅延する場合があることを示した.

参考文献 1) P. P. Milella, Fatigue and Corrosion in Metals, 2012, Springer, New York.

Surface Review and Letters, Vol. 24, No. 1 (2017) 1750011 (10 pages)
© World Scientific Publishing Company
DOI: 10.1142/S0218625X17500111



EFFECT OF NaCl SOLUTION SPRAYING ON FATIGUE LIVES OF SMOOTH AND SLIT SPECIMENS OF 0.37% CARBON STEEL

CHOBIN MAKABE^{*,§}, MD. SHAFIUL FERDOUS^{†,¶}, AKIMICHI SHIMABUKURO^{†,∥} and ANGGIT MURDANI^{‡,**} *Department of Mechanical Systems Engineering, Faculty of Engineering, University of the Ryukyus, 1 Senbaru, Nishihara, Nakagami-gun, Okinawa 903-0213, Japan

[†]Visiting Researcher at Faculty of Engineering, University of the Ryukyus, 1 Senbaru, Nishihara, Nakagami-gun, Okinawa 903-0213, Japan

[‡]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Politeknik Negeri Malang, Malang 65141, Indonesia [§]makabe@tec.u-ryukyu.ac.jp ¶munazeer_218@yahoo.com ^{||}akimichi@neo.ie.u-ryukyu.ac.jp **anggitmurdani@yahoo.com

> Received 11 February 2016 Revised 18 May 2016 Accepted 26 May 2016 Published 5 July 2016

The fatigue crack initiation life and growth rate are affected by experimental conditions. A corrosive environment can be created in a laboratory by means of dropping salt water onto the specimen surface, spraying chloride mist into the experimental chamber, etc. In the case of smooth specimens of some metals, fatigue life is shortened and the fatigue limit disappears under such corrosive experimental conditions. In this study, the effects of intermittent spraying of 3% NaCl solution-mist on corrosion fatigue behavior were investigated. The material used was 0.37% carbon steel. This is called JIS S35C in Japan. Spraying of 3% NaCl solution-mist attacked the surface layer of the specimen. It is well known that the pitting, oxidation-reduction reaction, etc. affect the fatigue strength of metals in a corrosive environment. We carried out corrosion fatigue tests with smooth specimens, holed specimens and slit specimens. Then the effects of such specimen geometry on the fatigue strength were investigated when the NaCl solution-mist was sprayed onto the specimen surface. In the case of lower stress amplitude application in slit specimens, the fatigue life in a corrosive atmosphere was longer than that in the open air. It is discussed that the behavior is related to the crack closure which happens when the oxide builds up and clogs the crack or slit.

Keywords: Corrosion fatigue; smooth specimen; holed specimen; slit specimen; 3% NaCl solution.

1. Introduction

When constant stress amplitudes are applied to smooth specimens of steel, the fatigue limit can be obtained in the natural atmospheric conditions or in the open air. For example, this behavior is summarized in books by Murakami,¹ McEvily,² Nishida,³ Milella,⁴ etc. Usually, the fatigue limit is defined by the maximum stress level in which the specimen does not break even after 10^7 times of stress repetition. However, the fatigue limit becomes unclear or disappears when constant stress amplitudes are applied in a corrosive environment.^{5,6} The number of cycles and time of applied stress are related to the accumulation of fatigue damage. Such corrosive damage can be somewhat detected in paint, electric protection and so on,⁷ because corrosive damage is surface behavior which includes cracked surface. In a corrosive environment, the initiation of fatigue cracks is affected by the growth of corrosion pits. $^{8-13}$ The crack growth behavior is affected by the oxidization conditions of the metal used. The behavior of oxide induced crack closure was examined by Endo et al.¹⁴ and Ritchie et al.¹⁵ Also, it is explained by Staehle¹⁶ and Kawagoishi et al.¹⁷ that the behavior of hydrogen is important to understand corrosion damage.

In the present study, the effect of spraying NaCl solution-mist (salt water-mist) on the fatigue lives of smooth specimens, and slit specimens was investigated. Also, a holed specimen was used to compare its experimental results with that of smooth specimen. To investigate the effect of a corrosive atmosphere on the fatigue behavior of a structural material, 0.37% carbon steel was chosen for testing material. That material has been widely used for machine elements and structures in Japan. For the limitation of experimental conditions, continuous spraying was not done but intermittent spraying was performed. The period of spraying would affect the fatigue life of the specimen. However, from the view point of the basic study of corrosion fatigue, the spraying interval was fixed with definite cycles, and the effects of the spraying on the fatigue life and crack growth were discussed. Especially, the crack growth behavior is discussed in this paper. The fatigue life of a slit specimen in a corrosive environment was longer than in the open air. This is related to the crack growth rate. Environmental conditions are expected to affect the crack opening and oxidization behavior in a specimen with a cracked surface.

2. Material and Experimental Procedure

The material used for the specimens was a round bar of 0.37% carbon steel. Pieces of bar were annealed at

870°C for 1 h. and then machined on a lathe and a milling machine. The chemical composition and mechanical properties of the material are shown in Tables 1 and 2, respectively. The material used was supplied by Sumikura Steel Co. Ltd. in Japan. The data of mechanical properties were obtained by tensile test after annealing. The geometries and sizes of specimens are shown in Fig. 1. The length of the specimen in the case of testing in the open air was 140 mm, and that in the case of testing in corrosive conditions was 260 mm.

Figure 1(a) is the geometry of a smooth or holed specimen. Figure 1(b) is that of a slit specimen, and it is shown that the slits were cut at both edges of the plate test section. After drilling a hole or cutting the slit, the specimen surface was polished again. Then, the specimen was annealed at 600° C in an electric vacuum furnace.

The mist of 3% NaCl solution was sprayed onto the specimen surface at every 3000 cycles in most cases of corrosion fatigue tests. Two cc of the mist (3% NaCl solution) were sprayed at a time. A chamber as shown in Fig. 2 was used to protect the testing machine from corrosion. Push-pull tests were performed with stress ratios (minimum cyclic stress/ maximum cyclic stress) R was -1 and 0. The frequency of testing was 10 Hz in the case of an open air fatigue test and 3–5 Hz in the case of corrosion fatigue test. In corrosive conditions, the fatigue life is affected by the frequency. When the frequency is lower, the effect of corrosive conditions on fatigue life is severer. So, we chose 3–5 Hz in the cases of testing with NaCl solution. On the other hand, the fatigue life is hardly

Table 1.		Chemica	al compo	osition (v	ition (wt.%).		
С	Si	Mn	Р	S	Fe		
0.37	0.1'	7 0.7	0.019	0.016	Bal.		

Table 2. Mechanical properties of the material $(\sigma_S: \text{Yield stress}, \sigma_B: \text{Tensile strength}, \sigma_T: \text{True fracture stress}, \varphi: \text{Reduction of area}).$

Yield strength σ_S (MPa)	Tensile strength $\sigma_B ~({ m MPa})$	True fracture stress σ_T (MPa)	Reduction of area φ (%)
292	493	975	62

Effect of NaCl Solution



Fig. 1. Geometry of the specimens: (a) Specimen with test section of hour-glass type and (b) slit specimen with test section of plate type (thickness = 4 mm).

(b)



Fig. 2. Testing apparatus: (a) A chamber to protect the machine from corrosion and (b) a microscope for measurement of the crack length.

affected by the frequency in the cases of testing with open air. So, 10 Hz was chosen in the cases of testing with open air to get the data faster. Now, testing was performed by using an electrohydraulic servo-type material testing machine which was made by Shimadzu Co. Ltd. in Japan. The capacity of applied load in this testing machine is 49 kN.

Detailed observation of the crack growth was performed in the case of slit specimens. The initial cracks were introduced in the slit bottoms and cellophane tape was taped to one face of the plate section of the specimen to observe the crack growth. Thus, the corrosion was prevented at that face and spraying was carried out only on the opposite side of that face.

3. Experimental Results and Discussion

3.1. In the cases of smooth and holed specimens

Figure 3 shows the S N curves or the relationships between maximum cyclic stress σ_{max} and number of cycles to failure $N_{\rm f}$ in the cases of smooth specimens and holed specimens. The hole diameters d were 0.1 mm and 0.2 mm and hole depths h were 0.1 mm and 0.05 mm, respectively. The fatigue tests were performed with R = -1. Table 3 shows the relationship between experimental conditions and fatigue life.

In the cases of open air fatigue tests or ordinary fatigue tests, the fatigue life of a holed specimen with $d = 0.1 \,\mathrm{mm}$ and $h = 0.05 \,\mathrm{mm}$ was shortened



Fig. 3. S N curve of smooth specimens.

compared to that of a smooth specimen. Because of small stress concentration at hole edges, there was small difference between either fatigue lives as shown by symbol * in Table 3. Also, in the cases of corrosion fatigue tests, the fatigue lives of smooth specimens and holed specimens were almost the same. Also, the small effect of the spraying manner on fatigue life was confirmed. In some specimens, after the corrosion fatigue test was stopped for one week at a definite number of stress applications, that test was restarted. In that case, the fatigue life was almost the same as for the nonstopped corrosion fatigue tests. In those cases, the spraying was carried out after every 3000 cycle stress application. Therefore, the effect of stopping the test on fatigue life of the smooth specimen was small in the present corrosion fatigue tests. In the case of the corrosion fatigue test of a holed specimen, the effect of drying conditions on fatigue life was examined. After spraying, hot dry air was blown onto the holed section. The effect of this on

fatigue life was very small. Therefore, the tendencies of fatigue lives for both the smooth specimen and holed specimen with d = 0.1 mm and h = 0.05 mm are almost the same in the present study.

In the case of smooth specimens, when the specimen surface was attacked under a corrosive atmosphere, the cracks initiated from the corrosion pits from the surface and fatigue life became shorter. That behavior is important to understand that the fatigue life in a corrosive atmosphere is shorter than that in the open air. Also, it is expected that the fatigue lives of smooth specimens and holed specimens were affected by the initiation stage of a crack from the corrosion pit or hole. Thus, the tendency of corrosion fatigue in the present study in the cases of smooth specimens shows the crack initiation behavior from the surface defect (pit) is important for evaluation of fatigue life, and the stress concentration at the defect in the case of smooth specimens is related to the crack initiation as well as in holed specimens. Also, it is expected that the crack growth behavior of small cracks in a corrosive atmosphere 18-20 is important to evaluate the fatigue life. It is shown that the material used in the present study behaves normally in the corrosion fatigue conditions, that is, the fatigue life of a smooth specimen in the present carbon steel is strongly related to the pit initiation and the surface crack growth behavior.

Figure 4 shows examples of the fracture surface. From the view from inclined direction on the right side of Figs. 4(a) and 4(b), it is understood that the surface area was damaged by corrosion, but the inside area was not so much damaged by corrosion. It shows that the fatigue lives of those were determined by

Fatigue in open air			Corrosion fatigue, 3% NaCl solution				
Symbol	in Fig. 3	$\sigma_{\rm max},$ MPa	$N_{ m f}$	Symbol	in Fig. 3	$\sigma_{\rm max}, { m MPa}$	$N_{ m f}$
BS	0	277	$3.7 imes 10^4$	\mathbf{S}	Δ	200	$2.1 imes 10^5$
\mathbf{BS}	0	250	$7.6 imes10^4$	\mathbf{S}	Δ	250	$5.2 imes 10^4$
\mathbf{BS}	0	215	$3.0 imes10^5$	\mathbf{S}	∇	200	$1.8 imes10^5$
\mathbf{BS}	0	200^{*}	$6.3 imes10^{5*}$	Η	T	200	$1.7 imes10^5$
н	Φ	200^{*}	$5.2 imes 10^{5*}$	\mathbf{H}	$\mathbf{\Delta}$	200	$1.5 imes10^5$
н	\oplus	200	$3.5 imes10^5$	Η	Δ	250	$4.1 imes 10^4$
Н	0	200	$2.0 imes10^5$	\mathbf{H}	•	200	$1.9 imes10^5$

Table 3. Testing result in the case of Fig. 3.

Note: BS: Base (Smooth specimen), H: Holed specimen, S: Smooth specimen, σ_{\max} : Maximum cyclic stress, $N_{\rm f}$: Number of cycles to failure.


Fig. 4. Top and inclined view of smooth specimen at $\sigma_{\text{max}} = 200 \text{ MPa:}$ (a) Corrosion fatigue, $N_{\text{f}} = 187870$ and (b) open air fatigue, $N_{\text{f}} = 639730$ (In each case, left side shows the top view and right side shows the view from inclined direction).

damage to the surface area during the initiation and growth stages of very small cracks and pits. Next, we will discuss the results of slit specimens. The tendency of corrosion fatigue behavior was different from that in the smooth specimens, and the behavior of long cracks was interesting for us.

3.2. In the cases of slit specimens

Figure 5 shows the S–N curves of slit specimens with R = -1 and R = 0. When relatively high stress was applied, the number of cycles to failure was almost the same in the cases of open air and corrosion fatigue tests in the case of R = -1. On the other hand, the fatigue life in corrosive conditions was shorter than that in the open air in the case of R = 0. In the case of some corrosion fatigue tests in R = -1, the test section was enveloped by cloth, then the spraying was done. The fatigue damage in this case was severe than in other cases. It is shown that the fatigue life in those tests was not so much different. From that result, we expected that the surface damage by corrosion would not much affect the fatigue lives when higher stress

amplitude was applied to the slit specimen. The reason for this will be shown in a later section.

In the cases of lower applied stress, when R = -1and 0, the fatigue life in a corrosion fatigue test was longer than that in an open air fatigue test, clearly. This behavior is very interesting because the fatigue life is shortened in a corrosive atmosphere in general cases. To understand those tendencies of fatigue lives, we examined the crack growth behavior of slit specimens.

Figure 6 shows the crack growth curves when the maximum cyclic stress σ_{max} was 120 MPa and 103 MPa when R = -1. In the case of Fig. 6(a), the crack growth curves for open air fatigue tests and corrosion fatigue tests were almost the same. Small differences in behavior were observed in the corrosion fatigue tests, but this did not so much affect the fatigue life.

In some cases, the test was stopped and the surface layer was polished at the arrowed point in Fig. 6, then the test was restarted. This process did not affect the crack growth behavior. In the case of Fig. 6(b), the applied stress was lower, and the crack growth



Fig. 5. S N curve and effect of corrosion on slit specimens: (a) R = -1 and (b) R = 0.



Fig. 6. Crack growth curves in the case of R = -1: (a) $\sigma_{\text{max}} = 120 \text{ MPa}$ and (b) $\sigma_{\text{max}} = 103 \text{ MPa}$.

behavior was different for both the open air fatigue and corrosion fatigue tests. Due to the corrosion behavior, a kind of crack-bridging effect²¹ and an oxide crack closure^{14,15} are expected to have worked, and then the crack opening displacement was decreased. However, even if the crack-bridging happens, its effect on the crack growth behavior is very small. Because, only corrosion products were formed in the crack wake and those could not connect the upper and lower crack faces during the cyclic loading. On the other hand, those corrosion products could strongly induce crack closure. The crack closure is related to the compressive residual stress in front of the crack tips. Therefore, the crack closure affected the fatigue crack growth rate and life in the case of longer fatigue life in the present cases. Now, the left side crack length a_L and right side crack length a_R measured from slit edge were different. So, we defined average

crack length a, which includes 2 mm of slit length. Thus, $a = 2 \text{ mm} + (a_L + a_R)/2$. In the early stage of crack growth in the case of corrosion fatigue test, the crack growth rate was almost the same level as that in the case of ordinary fatigue test. However, after spending time in corrosion conditions, the crack growth rate in corrosion test was getting smaller and smaller. Also, it is interesting that there is a noncrackgrowth period.

Figure 7 shows the crack growth curves in the case of R = 0. The situation of crack growth between the ordinary and corrosion fatigue tests at lower stress application is similar to that of the case of R = -1. In the cases of Figs. 6(b) and 7(b), the specimen surface was removed by polishing at arrowed point; then the tests were restarted. Before and after the surface removal, the crack growth tendencies of those cases were not so different. This means that the cause of the delay



Fig. 7. Crack growth curves in the case of R = 0: (a) $\sigma_{\text{max}} = 124 \text{ MPa}$ and (b) $\sigma_{\text{max}} = 103 \text{ MPa}$.



Fig. 8. Cyclic fatigue crack growth rate, da/dN vs stress intensity K_{max} for both side slit specimens: (a) R = -1 and (b) R = 0.

of crack growth by corrosion was not limited to the damage to the surface layer. Thus, the behavior of oxide into the crack and slit was important to understand the delay of crack growth in the present study.

Figure 8 shows the relationship between the crack growth rates da/dN and K value at maximum cyclic stress $\sigma_{\rm max}$. Results are compared with two stress value of $\sigma_{\rm max}$: 120 MPa (or 124 MPa) and 103 MPa in the cases of R = -1 and 0. Crack growth behavior in Figs. 6 and 7 was confirmed from Fig. 8. When the maximum stress was higher, the tendency of crack

growth rate under corrosive conditions is almost the same as that of the base. The reduction in the crack growth rate is clear in the case of low stress levels in corrosive conditions.

Figure 9 shows a photograph of the specimen surface in the case of the corrosion fatigue test with $\sigma_{\rm max} = 103 \,{\rm MPa}$ and R = -1. The fatigue test was stopped once and the specimen surface was polished. Then the fatigue test was started again. Before the specimen surface was polished, the surface was fully damaged by corrosion. After polishing the specimen



Fig. 9. Surface conditions of the specimen before and after surface polishing at a = 4.3 mm in the case of $\sigma_{\text{max}} = 103$ MPa: (a) Before polishing specimen surface and (b) after polishing specimen surface.

surface, the slit sites became clear. It was observed that oxide was clogging the slits. Therefore, the crack growth would be delayed because the crack opening behavior was prevented by the clogging oxide. After Elber²² discussed that the crack opening stress is an important factor to evaluate the crack growth rate, that factor has been applied to many cases of fatigue crack growth. It was discussed that the surface deformation in the vicinity of a crack tip after overloading related to the crack closure by Bao and McEvily.²³ Endo et al.¹⁴ and Ritchie et al.¹⁵ showed that the behavior of crack closure appeared under corrosive conditions. The retardation of crack growth happened after observation of some crack growth. The obvious reduction in the crack growth rate was observed in the present experimental case. When the crack opening displacement is reduced by creating compressive residual stress in front of cracks due to the crack closure, the crack growth rate becomes low. We would like to investigate the detailed mechanism of crack closure under corrosive conditions and clarify the relationship between variations in crack opening stress and the creation-processes of corrosion products at cracked surface in the future.

Figure 10 shows an example of observation of crack growth behavior. Observation of the specimen

surface was performed on the surface taped by cellophane tape. It was observed that the clogging oxide was expected to develop in the crack when the enough time was spent for cyclic loading. In the case of N = 0, initial crack length of the right side edge was 1.61 mm. This crack grew with the application of stress cycles. After $N = 2.4 \times 10^4$, some dark marks appeared on the specimen surface, clearly. Those were marks showing the appearance of clogging oxide from inside the crack. Therefore, it is expected that the crack growth rate would be affected by the clogging oxide after the crack length reached a critical length. Also, it is expected that the critical length is different depending on experimental conditions. Until a crack length is shorter than a critical length, the corrosion attacking is not so severe. Therefore, the crack opening level under NaCl spraying is not so different from that under open air, and there is little effect of corrosion on the crack growth rate. However, after time is spent for cyclic stress under NaCl spraying, clogging oxide accumulates in the cracked surface. Then the crack opening level becomes higher and the crack growth rate becomes lower after the crack reaches a critical crack length.

Figure 11 shows the observation in the vicinity of the crack tip in the case of R = -1. When the crack



Fig. 10. Example of observation of crack growth in corrosion fatigue test in the case of R = -1, $\sigma_{\text{max}} = 120 \text{ MPa}$ (a_R is the length from slit bottom to crack tip at the left-hand side edges of plate section of the specimen).



Fig. 11. Observation of crack growth with R = -1: (a) $\sigma_{\text{max}} = 120 \text{ MPa}$, N = 52000 and crack length was 2.6 mm and (b) $\sigma_{\text{max}} = 103 \text{ MPa}$, N = 80350 and crack length was 2.7 mm.



Fig. 12. Fracture surface at R = -1: (a) Ordinary fatigue test of $\sigma_{\text{max}} = 103$ MPa and $N_{\text{f}} = 112830$ and (b) corrosion fatigue test of $\sigma_{\text{max}} = 103$ MPa and $N_{\text{f}} = 2481920$.

growth rate was higher, the crack tip clearly opened at maximum stress point in the case of the maximum cyclic stress $\sigma_{\text{max}} = 120 \text{ MPa}$ as shown in Fig. 11(a). However, the crack opening displacement at maximum stress point was smaller when the clogging oxide was in the slit in the case of $\sigma_{\max} = 103$ MPa as shown in Fig. 11(b). When the maximum cyclic stress was 120 MPa, it was expected that the development of clogging oxide in the slit was not enough to delay the crack growth rate for the extension of fatigue life more than for an open air fatigue test. On the other hand, when the maximum cyclic stress was 103 MPa, the crack growth rate and crack opening displacement were so small that the oxide could work to cause a closure effect. The salt water flow was prevented by the cellophane tape which was on one surface of the plate section. This method may affect the crack growth behavior. In the future, we will measure the crack closure point to understand the delay of crack growth when oxide is in the crack face in the vicinity of the crack tip. Also, the bridging effect will be investigated by using a specially shaped specimen. Figure 12 shows the fracture surfaces of slit specimens. It is observed that the condition of the cracked area in the case of a corrosion test is different from that in the case of an ordinary fatigue test. The condition of fracture surface in the case of corrosion test of slit specimens is also different from that of smooth and holed specimens which are shown in Fig. 4. The fracture surface shows that the delay of crack growth is related to the development of oxide in the crack surface. It is discussed that the effect of oxide on the fatigue life is dependent on the crack size, the crack opening displacement and loading conditions. In the future, we will investigate the detailed mechanism of crack growth behavior in corrosive conditions by observing the crack closure behavior.

4. Conclusions

Ordinary fatigue tests in the open air and corrosion fatigue tests in salt-water conditions were performed. Salt-water mist was sprayed onto the specimen surface when the corrosion fatigue test was performed. Smooth, holed and slit specimens were used. The main results obtained are as follows:

(1) In the cases of smooth and holed specimens, fatigue life was shortened when salt mist was sprayed. This is a general phenomenon for the fatigue test with environmental effects.

- (2) In the case of lower stress amplitude application in slit specimens, the fatigue life in a corrosive atmosphere was longer than that in the open air.
- (3) The crack growth rate became lower when oxide clogged the slit or crack. This phenomenon made the fatigue life longer in the case of the corrosion fatigue test of a slit specimen. This behavior is strongly related to the crack closure.

Acknowledgment

This work was supported in part by the Collaborative Research Program of the Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University. Also, the authors are grateful to Prof. R. Ebara at Fukuoka University and K. Arakawa at Kyushu University for their aid in the present study. Also, we are grateful to Mr. Tada for his aid in the present experiment.

References

- Y. Murakami, Metal Fatigue, Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions (Elsevier Science, Netherlands, 2002).
- A. J. McEvily, Metal Failures: Mechanisms, Analysis, Prevention, 2nd edn. (John Wily & Sons, US, 2013).
- S. Nishida, Failure Analysis in Engineering Applications (Butterworth Heinemann, UK, 1992).
- P. P. Milella, Fatigue and Corrosion in Metals (Springer, Verlag, 2013).
- 5. R. Ebara, Eng. Fail. Anal. 13 (2006) 516.
- C. Laird and D. J. Duquette, Nat. Assoc. Corros. Eng. 2 (1973) 88.

- R. P. Gangloff, Corr. Fatigue Available at: http:// www.virginia.edu/ms/facultygangloffASTM_CH_26. pdf (accessed on 21 September, 2015).
- Y. Nakai, D. Shiozawa and S. Okada, 4D Observation of Fit and Crack Initiation under Corrosion Fatigue of High-Strength Aluminum Alloy by Micro CT Imaging Ultra-bright Synchrotron Radiation, Int. Conf. Advanced Tech. in Engg. Mech. 2015, The 14th Asian Conf. on Exp. Mech. (ACEM14), ATEM 15 (Toyohashi, Japan, 2015).
- 9. Y. Kondo, Corrosion 45 (1989) 7.
- 10. M. Goto, Eng. Fract. Mech. 42 (1992) 893.
- B. R. Crawford, C. Loader, Q. Liu, T. J. Harrison and P. K. Sharp, Int. J. Fatigue 61 (2014) 304.
- H. Noguchi, H. Nishitani and T. Ogawa, *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.* 55 (1989) 386.
- K. M. Perkins and M. R. Bache, Int. J. Fatigue 27 (2005) 1499.
- K. Eudo, K. Komai and Y. Matsuda, Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. 46 (1980) 1337.
- R. O. Ritchie, S. Suresh and C. M. Moss, J. Eng. Mater. Tech., A. 102 (1980) 293.
- R. W. Staehle, A. J. Forty and D. Rooyen (eds.), National Association of Corrosion Engineers (Texas, 1969).
- N. Kawagoishi, K. Kariya, Y. Nu, S. Furumoto and E. Kondo, *Key Eng. Mater.* **452 453** (2011) 745.
- Y. Nakai, K. Tanaka and R. P. Wei, *Eng. Fract. Mech.* 24 (1986) 433.
- R. Perez-Mora, T. Palin-luc, C. Bathias and P. C. Paris, Int. J. Fatigue 74 (2015) 156.
- Y. Horose and T. Mura, Eng. Fract. Mech. 22 (1985) 859.
- 21. G. Bao and Z. Suo, Appl. Mech. Rev. 45 (1992) 355.
- W. Elber, Am. Soc. Test. and Mat., Philadelphia. 486 (1971) 230.
- H. Bao and A. J. McEvily, Metall. Mater. Trans., A 26 (1995) 1725.

波浪中浮体の圧力場の面分布計測技術に関する研究

広島大学大学院工学研究院エネルギー・環境部門 教授 岩下 英嗣

1. 研究目的

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 圧力などの局部的な物理量であり、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、水槽実験において船舶や浮体の圧力分布の新しい計測技術を構築 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·実験解析
伊藤 悠真	広島大学大学院工学研究科 輸送・環境システム専攻	博士2年	実験補助
片野 彬	広島大学大学院工学研究科 輸送・環境システム専攻	修士1年	実験補助
胡 長洪	九州大学応用力学研究所	教授	実験指導

3. 実験の概要

3.1. 供試模型について

実験で使用したバルクキャリア船型を Fig. 1、Table 1 に示す。



Fig. 1: Bulker

Table 1: Bulker 主要目					
$L_{pp}[\mathbf{m}]$	2.4000	$x_B(=x_G)[\mathbf{m}]$	0.0510		
$B[\mathbf{m}]$	0.4000	$KB[\mathbf{m}]$	0.0662		
$d[\mathbf{m}]$	0.1280	$BM_T[\mathbf{m}]$	0.1016		
$\nabla[\mathbf{m}]$	0.0983	$BM_L[m]$	3.2135		
\hat{C}_b	0.8000	$KG[\mathbf{m}]$	0.1080		
$A_w[\mathrm{m}^2]$	0.8354	κ_{yy}/L	0.2500		

3.2. 圧力計について

FBG センサーの仕組みを Fig. 2 に示す. FBG(Fiber Bragg Gratings) とは光ファイバーの中に回折 格子を刻んだものである。入射光が FBG を通過する際、回折格子 (グレーチング)の間隔によって変化 するブラッグ波長と呼ばれるある特定の波長を持った反射光を生じる。センサーが圧力や温度変化など によりたわみ変形すると、回折格子の間隔が変化し、ブラッグ波長も変化する.この原理を利用して圧 力の測定を行う。

今回の実験で使用した歪みゲージ式圧力計を Fig. 3、FBG センサーを Fig. 4に示す。FBG センサー の計測部が小さく薄いため、データの伝達も髪の毛ほどの細さの光ファイバーで行われる。Fig. 5 に FBG センサーの設置位置を示す。そのため、船を巨大化させることなく、従来のひずみゲージ式圧力セ ンサーでは取り付けが困難であった船首尾のような曲率の大きな場所での計測を可能にしている。また、 1本の光ファイバーに複数の FBG を設置できるため、少ないケーブルで多点同時に計測が行える。本研 究では1本の光ファイバーに13 個の FBG センサーを設置したものを使用した。また、FBG センサー との比較用として、ひずみゲージ式圧力センサーを Ord. 9.5、9.0、5.0 に設置した。31 断面で FBG セ ンサー 220 点、ひずみゲージ式圧力センサー 18 点の計 238 点で圧力計測を行った。貼り付け位置は各断 面ごとに船体表面の水線面を 90 degs. 船底を 0 deg. として角度ベースで表している。



Fig. 2: FBG 圧力計計測原理 Fig. 3: 歪みゲージ式圧力計 Fig. 4: FBG 圧力計



Fig. 5: 圧力計設置位置

3.3. 水槽試験

運動計測試験については、速度なしの状態で向かい波、速度あり ($F_n = 0.18$)の状態で向かい波と追い波について、それぞれ波条件 $\lambda/L = 0.3 - 2.0$ の範囲で 8 パターン計測した。強制動揺試験については速度ありの状態で 6 パターン、追い波と向い波の λ/L で 1.0、1.25、1.5 に相当する波条件で行った。波強制力試験についても速度ありの状態で 6 パターン、追い波と向い波の $\lambda/L=1.0$ 、1.25、1.5 で行った。 船体運動はポテンショメータ、抵抗増加は歪みゲージを用いて計測している。解析位置は船体表面圧力が船体中央、船体運動、抵抗増加を船体中央から x_G 離れた重心周りとしている。運動計測装置設置図を Fig. 7 に示す。

運動計測試験システム図を Fig. 8に示す。船体表面に取り付けられた FBG センサーは、光ファイバー を通してデータを伝達し、測定器に集約され PC2 で記録される。ひずみゲージ式センサー、船体運動 (surge, heave, pitch)、抵抗、波振幅の計測値はそれぞれアンプ、フィルターを経由して A/D 変換器へと 集約される。水槽の中心付近のトリガーポイントを曳航電車が通過した際に両方の系にトリガーが入る ようになっている。データを PC1 に集めた後トリガーを基準に時刻合わせを行い計測値の解析を行う。



Fig. 8: 計測システム図

4. 結果·考察

4.1. 正面向い波

本実験において数値計算の手法は、無限遠条件をパネルシフト法 (PSM) と簡易結合法 (SCM) によ り満足させたランキンパネル法 (RPM(PSM+SCM)) を用いている。速度なしの場合には定常流場を一 様流とし、加えてグリーン関数法による計算結果も示してある。速度ありの場合は定常流場を一様流と 二重模型流れ (2 種類) としている。

4.2. 船体運動

Fig. 9 に速度なし、Fig. 10 に速度ありの船体運動を示す。左から surge, heave, pitch の運動のグラフ で、横軸に λ/L をとり、上段の縦軸にそれぞれの運動の振幅を入射波振幅で除した無次元値をとり、下 段の縦軸は入射波に対する位相を取っている。速度なしの状態では良く一致している。速度ありの結果 は heave 運動において $\lambda/L = 1.25$ 付近に同調点が見られ、計算結果が大きく推定されている。



4.3. 船体表面非定常圧力

 $\lambda/L = 1.25$ の速度なし ($F_n = 0.0$)、速度あり ($F_n = 0.18$) で試験した時の非定常圧力の等高線図を Fig.11 にそれぞれ示す。速度なしと速度ありの両方とも計算結果と計測値の傾向が良く一致しているこ とがわかる。これを細かく見るために Ord. 0.5, 1.0, 5.0, 9.0, 9.5 での断面非定常圧力を Fig.12、Fig.13 に示す。グラフの縦軸は圧力の振幅を ρg と入射波振幅 A で除した無次元値をとり、横軸はセンサーの 位置 θ をとっている。速度なしについて見ると、それぞれの断面で計測値と計算結果がほぼ一致してい る。一方、速度ありの場合は船尾側では一致が見られるが、船首側で圧力の大きさに差があることがわ かる。この原因として、 $\lambda/L = 1.25$ は同調点付近であるため船体運動が大きくなり、運動が圧力値に影響を与えているものだと考えられる。





Ord. = 0.500 Ord. = 5.000 Ord. = 9.000 Ord. = 9.500 Ord. = 1.000 P/pgA Ρ/ρgΑ P/pgA P/pgA P/pgA RPM(GFM) EXP. 4 3 3 ٥ļ 0 ٥L 0 0 90 ³⁰θ (degs.) θ (degs.) arg(P) ³⁰θ (degs.) θ (degs.) θ (degs. arg(P) arg(P) arg(P) arg(P) 180 90 000 90**¢** . 90 0 -90 -90 -180 Fig. 12: 非定常圧力分布 (F_n =0.00, λ/L =1.25, β = 180 degs.)

Fig. 11: 非定常圧力分布 ($\lambda/L=1.25$, $\beta = 180$ degs.)



290

4.5. 船体運動影響

計測値と計算結果にはそれぞれで静水圧変動項が含まれているが、Fig.10の heave 運動を見てもわかるように、計測値と計算結果には船体運動の相違がある。静水圧変動項 $-\rho g(X_3 - xX_5)$ を両者から除いた圧力の等高線図を Fig.14 に示す。計測値と計算結果の一致度は良くなっていることが確認できる。



Fig. 14: 静水圧変動項を除いた非定常圧力分布 ($F_n = 0.18, \lambda/L = 1.25, \beta = 180$ degs.).

4.6. 波浪中の定常圧力分布

 $\lambda/L=1.25$ における強制振動試験、波強制力試験から得られたデータをもとに線形重ね合わせを行ったものを Fig.15 に示す。これを Fig.11 の速度ありの結果と比べると、船首船底付近で計測値とは傾向が似ているが、計算結果とは傾向が異なる。重ね合わせ解は非線形影響が小さいことを考えると、船首船底付近での数値計算での推定精度があまり良くないと考えられる。各波条件について定常成分を抽出し、別途行った定常試験で得られた定常圧力と差を取ったものを Fig.16 に示す。船首部分を拡大しレンジも細かくしている。同調点付近である $\lambda/L=1.25$ では定常成分が大きくなり、船体動揺に起因する液や波の撹乱が波浪中抵抗増加に影響していると考えられる。



Fig. 15: 線形重ね合わせによる非定常圧力分布 ($F_n = 0.18, \lambda/L = 1.25, \beta = 180$ degs.).



Fig. 16: 波浪中の定常圧力分布 (F_n=0.18, β=180 degs.)。

5. まとめ

本研究で得られた成果を以下に示す。

- (1) FBG センサーを用いて船体表面非定常圧力分布の多点同時計測に成功した。このレベルの多点計 測は世界初である。また、歪式圧力センサーで計測された値との比較を通じて、FBG センサーに より得られた計測値の精度が十分であることを確認している。
- (2) 計測で得られた船体表面非定常圧力をランキンパネル法による理論数値計算結果と比較すること で、得られた計測値が理論数値計算の検証用データとして極めて有用であることを例示した。
- (3) 今後は、追試を行い、計測値のばらつき具合等について統計的な調査を行い、計測精度をより詳細に評価する予定である。また、取得したデータを用いて理論数値計算法の改善を図ることも今後の課題となる。

参考文献

- 1) 柏木正、岩下英嗣:船体運動 耐航性能編、船舶海洋工学シリーズ、成山堂書店、2012.
- 2) 澤田俊紀、波浪中を航走する船舶の船首近傍非定常波動場に関する研究、修士論文、2012.
- 3) 若原正人、谷上明彦、新郷将司、中島円、深沢塔一、金井健、FBG を用いた表面貼付型多点圧力 センサの開発、日本船舶海洋工学会論文集第7号、2007.
- 4) 日本造船技術センター、SRC NEWS No.97 DEC 2015
- 5) 岩下 英嗣;周波数領域ランキンパネル法における無限遠条件の数値処理について、日本船舶海洋 工学会論文集第 24 号、2016
- 6) 岩下 英嗣、柏木 正、伊藤 悠真、関 裕太;周波数領域ランキンパネル法による低速/低周波数域での耐航性能計算,日本船舶海洋工学会論文集第24号、2016

高効率輸送のための地面効果翼機の翼空力に関する研究

広島大学大学院工学研究院エネルギー・環境部門 教授 岩下 英嗣

1. 研究目的

現在、世界の物流の99%は低速大量輸送機器の船舶であり、高速少量輸送機器の航空機は旅客や高付 加価値物の輸送に限られて利用されている。昨今、航空機を用いた高速かつ大量輸送を高効率で実現す るための次世代の特殊航空機の研究開発が各国で進められている。それは地面効果を利用した地面効果 翼機(WIG)と称される特殊航空機であり、韓国では実用機を開発建造して将来、国際線として黄海上を 飛ぶ計画であり、国際法の整備も含めた開発計画が進行中である。地球温暖化問題を抱えた将来におい て有望な輸送機器であると期待されている。本研究では、これまで当方で進めてきた前翼式の新形式地 面効果翼機に関して、その主翼の風洞試験を行い、地面効果内圧力分布や空力性能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科 地球環境工学講座	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3年	実験補助
片野 彬	広島大学大学院工学研究科 輸送・環境システム専攻	修士課程1年	実験補助
大屋 裕二	九州大学応用力学研究所	教授	実験指導

3. 風洞実験の概要

本研究では、地面効果内での翼表面圧力分布と空力特性の同時計測を行い、ポテンシャル理論を用いた 境界要素法の理論計算と比較を行うことで、計算結果の推定精度の検証、並びに地面効果が翼表面圧力 に及ぼす影響について明らかにする。まず、九州大学応用力学研究所の大型境界層風洞を使用する前に、 広島大学所有のゲッチンゲン型風洞装置を用いて仮試験を行った。広島大学の風洞ノズルは一辺 2.0 m の正方形断面であり、テストセクションの長さは 4.0 m、最大風速は 25 m/s である。

3.1. 供試模型

Figure 1 に実験に使用した供試模型の外観 を示す。供試模型は、これまで当方で進めて きた前翼式の新形式地面効果翼機に搭載さ れる翼端板付き主翼である。本主翼のテー パー比は 0.4、後退角は 4.0 degs. であり、 8.0 degs.の下反角がついた翼形状である。翼 型は NACA3409を用いており、主翼の翼端 板部分には対称翼型である NACA0006を使 用している。翼の投影面積 (S) は 0.15 m² で



Fig. 1: Experimental model of main wing with end-plates with 126 holes for measuring pressure distributions.

ある。Figure 2 に翼端板付き主翼の圧力計測部を示す。圧力の計測位置は、翼中央から左翼端にかけて y/(b/2) = 0.300, 0.600, 0.900 の 3 断面、翼端板高さ h_E の 1/3 の間隔で 2 断面の圧力計測部を有している。計測孔の数はそれぞれ、Section A (32 点)、Section B (32 点)、Section C (30 点)、Section D (16点)、Section E (16 点)の合計 126 点である。計測孔の位置 <math>x/c は、翼中央後縁を原点として基線上に取 られた x 座標として Fig.2 中の表の様に設定している. 断面部のピースは紫外線硬化型アクリル系樹脂 を用いて九州大学応用力学研究所所有の 3-D プリンター (Project 3500 HDMax) で製作されており厚み は 7 mm である (圧力計測断面自体はその中央)。その表面には直径 0.8 mm の圧力計測孔が設けられて おり、圧力は計測孔から樹脂ピース内部に配された直径 0.8 mm のホースラインを通って、断面ピース側 面のステンレスチューブへと誘導される。ステンレスチューブには直径 1.5 mm のポリウレタンチュー ブを差し込み、翼内部を通って微差圧式圧力センサーへと接続される。樹脂ピース以外の部分はケミカ ルウッド材 (サンモジュール) であり、大きめに製作された樹脂ピースをケミカルウッド材に接着後、全 体を 5 軸 NC で切削加工して仕上げている。



Fig. 2: Wing sections for measuring pressure distribution of a main wing with end-plates.

3.2. 実験セットアップ及び計測システム

Figure 3 に実験の概略図を示す。3 軸トラバーサーに 6 分力計 (日章電機製 LMC-6124) とストラット を取り付け、最下部に翼模型を取り付ける。翼中央の後縁部分に取り付けられたネジで迎角を変更し、3 軸トラバーサーで飛行高度を設定する。

ストラット前方に取り付けられたピトー管では、全圧と静圧から流速を計測すると同時に、ピトー管の静圧孔から出るチューブを分岐させ、微差圧式圧力センサー (Chell Instruments 製 µ DAQ 32DTC) の基準静圧計測用ポートに入力する。また、翼表面圧力計測用のポリウレタンチューブはストラット後部を通し µ DAQ 32DTC の計測圧力入力ポートへと接続する。

Figure 4 に実験システムを示す。デジタルファンクションジェネレータ (NF 製 DF1906) で外部トリ ガーを発信させ、6 分力計と µ DAQ 32DTC を用いた計測を同時刻、同サンプリング周波数 (500 Hz) で 行う。6 分力計で得られた歪みはストレインメーター (日章電機製 DSA-100A) で電圧に変換され、ユニ バーサルレコーダ (共和電業製 EDX-200A-4H) を経て LAN ケーブルでノートパソコンに出力される。µ DAQ 32DTC についても同様に LAN ケーブルでデータ出力させ、6 分力と風速、圧力 (一度に最大 32 点) を合わせ、合計 39 チャンネルの計測を行っている。

地面効果内での計測を行うに際し、境界層を低減させる手法として、風洞床面に底上げ板(地面板)を 設けている。発達した境界層を板前縁で再スタートさせることで境界層を低減させた結果、計測位置 Point 3 において、約 2 cm (コード長の 6.7%)の厚さまで境界層を低減できている。前縁形状や床の高 さ、板厚などは地面板中央位置における境界層が小さくなる様に2次元 CFD を用いて設計しており、地 面板前縁断面は sin 関数形状にしている。

飛行高度は、翼後縁から地面板までの高さhをコード長cで除した値であるh/cを定義し、翼の飛行高度h/cと迎角 α (degs.) を変化させて実験を行っている。風洞の流速はU = 20 m/sに設定し。 $Re = 4.0 \times 10^5$ の領域で実験を行っている。



Fig. 3: Experimental setups of wind tunnel experiment.



Fig. 4: Experimental system for measuring aerodynamics and pressure distributions simultaneously.

4. 理論計算

非圧縮非粘性の空気場を速度U(m/s)、高度h(m)で定常飛行する翼を考え、Fig.5に示した物体固定座標系を取る。流れは非回転であるとする。x軸は翼の進行方向を正、z軸はz = 0を静水面に取り鉛直上向きを正とし、図中の S_H 、 S_F 、 S_W はそれぞれ、物体表面、自由表面、後流面を表している。各境界面上に取られた法線ベクトルnは流体内向きを正とする。後流面は翼後縁から



Fig. 5: Body fixed coordinate system.

主流に沿って静水面と平行に流出し、自由表面は平らな剛体壁として扱うことができるとする。なお、 この仮定が精度良く成立することが論文[1]において確認されている。

任意の点 $\boldsymbol{x} = (x, y, z)$ において空気の速度ポテンシャルを $\Phi(\boldsymbol{x}) = U[-x + \phi(\boldsymbol{x})]$ と表す。このとき、 攪乱速度ポテンシャル ϕ はラプラス方程式と次の境界条件を満足しなくてはならない。

$$[H] \quad \frac{\partial \phi(\boldsymbol{x})}{\partial n} = n_x \quad \text{on } S_H \tag{1}$$

$$[F] \quad \frac{\partial \phi(\boldsymbol{x})}{\partial n} = 0 \quad \text{on } S_F \tag{2}$$

$$[K] \quad p^+(\boldsymbol{x}) - p^-(\boldsymbol{x}) = 0 \quad \text{on } S_W \tag{3}$$

(3)式はKutta条件であり、 $p^+(x)$ 、 $p^-(x)$ はそれぞれ後流の上下面における圧力を表している。流体領域にGreenの第二定理を適用すると、次の積分方程式が得られる。

$$\frac{\phi(P)}{2} - \iint_{S_H} \frac{\partial G(P,Q)}{\partial n_Q} \phi(Q) \, dS - \iint_{S_W} [\phi(Q_T^+) - \phi(Q_T^-)] \frac{\partial G(P,Q)}{\partial n_Q} \, dS = -\iint_{S_H} \frac{\partial \phi(Q)}{\partial n_Q} G(P,Q) \, dS$$

where, $G(P,Q) = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'}\right), \quad \frac{r}{r'} = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z \mp z')^2}$ (4)

ここで、P = (x, y, z), Q = (x', y', z')である。また、 $\phi(Q_T^+) \ge \phi(Q_T^-)$ は翼後縁上下位置における速度 ポテンシャルを表している。一定要素の仮定に基づき離散化した後、境界条件 (1), (3) 式の下で数値的 に解くことができる。このとき、 S_H 上の圧力は

$$\frac{p(\boldsymbol{x}) - p_0}{\rho U^2/2} = 2\frac{\partial \phi(\boldsymbol{x})}{\partial x} - \nabla \phi(\boldsymbol{x}) \cdot \nabla \phi(\boldsymbol{x})$$
(5)

により求めることができる。ここで、p₀は大気圧、ρは空気密度である。(5)式中の速度ポテンシャルφ の偏微分は、翼表面上の速度ポテンシャル分布を2次元のスプライン関数で表して数値微分により求め ている。こうして得られた圧力を S_H 上で積分することにより、i 方向に作用する力とモーメントが

$$F_{i} = -\iint_{S_{H}} \{p(\boldsymbol{x}) - p_{0}\} n_{i} dS \quad (i = 1 \sim 6)$$
(6)

により得られる。ただし、 $(n_1, n_2, n_3) = n, (n_4, n_5, n_6) = x \times n$ である。

5. 結果と考察

5.1. 迎角、飛行高度の変化による翼表面圧力分布

Figure 6 に α = 3.0 degs. における翼端板付き主翼の断面圧力分布を示す。飛行高度による影響を調査 するため、h/c = 0.35 と 1.00 について比較している。ストラットと翼との空力干渉影響を考慮して計算 した結果も図中点線で示している。矩形翼と同様に、翼幅中央近傍の Section A の翼上面においてスト ラットと翼との空力干渉影響による負圧の絶対値の増加が確認できる。また、Fig. 7 にh/c = 0.35 で迎 角を変化させた時の圧力分布の結果を示す。図中 (a) ~ (c) に示す主翼本体上の圧力分布は、 α = -1.0 の時に翼下面前縁部においても負圧を生じる特徴的な分布になっており、理論計算は実験結果の特徴を 良く捉えている。また、複雑な形状である翼端板周辺の Section C~Eにおいても実験と計算結果が良好 に一致していることが分かる。翼端でコード長がゼロになる様な、翼端が閉じている翼の場合には、本 報告書で使用している理論計算を用いて、翼全域での高精度な圧力分布の推定が可能であると言える。



Fig. 6: Sectional pressure distributions on the main wing with end-plates at $\alpha = 3.0 \text{ degs}$. ($Re = 4.0 \times 10^5$ in wind tunnel experiment).



Fig. 7: Sectional pressure distributions on the main wing with end-plates at h/c = 0.35 ($Re = 4.0 \times 10^5$ in wind tunnel experiment).

5.2. 翼端板に作用する圧力分布

次に Fig.6の(d)、(e) に示す翼端板の圧 力分布に着目する。翼端板に使用した翼型 は対称翼 NACA0006 であるが、主翼本体部 との空力干渉影響により非対称な圧力分布 が形成されている。飛行高度が低くなると、 翼端板の内側に働く正圧が大きくなってい るが、翼端板外側へ作用する負圧は飛行高



Fig. 8: Split force and thrust coefficient acting on the end-plates ($\alpha = 3.0 \text{ degs.}$).

度にほとんど影響を受けていない。同じ飛行高度における、迎角変化による翼端板断面圧力分布を比較 するために、Fig. 6、h/c = 0.35 ($\alpha = 3.0$ degs.)の結果と、Fig. 7 の $\alpha = 5.0$ degs. (h/c = 0.35)に着目 してみる。 $\alpha = 5.0$ degs.のときは翼端板の内側に働く正圧、外側に働く負圧の絶対値が共に大きくなっ ていることが分かる。特に、内側に働く正圧の相違は顕著である。一方で、揚力係数が小さくなる Fig. 7 の $\alpha = -1.0$ degs. (h/c = 0.35)においては、主翼本体周りの循環流も小さくなり、翼端板の内側と外側 の圧力分布の差はほとんどなくなることが分かる。つまり、対称翼のゼロ迎角の圧力分布に近くなって いる。各飛行高度で翼端板表面のみで圧力積分した結果を Fig. 8 に示す。飛行高度が低くなるにつれ翼 の内側から外側に働く y 方向の力と推力成分が大きくなっていることが分かる。飛行高度変化時におけ る推力成分の増加が翼端板付き主翼の揚抗比向上に寄与していると考えられる。

5.3. 翼端板付き主翼の空力特性

Figures 9、10 に圧力と同時計測された翼端板付き主翼の空力特性を示す。図中、点線及び一点鎖線は、 ストラットと翼との空力干渉を考慮した計算結果である。理論計算結果と実験結果を比較することで、 ストラットと翼との空力干渉影響は無視できないことが分かる。

Figure 10 からは、地面効果を確認することができる。翼端板付き主翼の C_L は h/c = 1.00 から 0.35 にかけて約 15% 向上し、 C_D については約 9% 減少している。その結果、揚抗比は約 26% 向上しており、地面効果による著しい空力性能の向上が確認できる。 C_P については、高高度 h/c = 1.0 から低高度

h/c = 0.35 への変化でコード長の約1.2%前縁側に移動している。このように、飛行高度変化、迎角変 化のいずれにおいても、翼表面圧力分布と空力特性の同時取得に成功している。本論文で用いた理論計 算はこれらの実験結果を的確に推定できており、形状が複雑化する翼端板付き主翼の場合であっても、 翼の細部にわたる最適設計等において活用できるものと期待される。



Fig. 9: Aerodynamic properties of the main wing with end-plates at h/c = 0.35 ($Re = 4.0 \times 10^5$ in wind tunnel experiment).



Fig. 10: Aerodynamic properties of the main wing with end-plates at $\alpha = 3.0 \text{ degs}$. ($Re = 4.0 \times 10^5$ in wind tunnel experiment).

6. まとめ

本研究により得られた成果を示すと以下のようになる。

- (1) 翼表面圧力と空気力の同時計測を行う実験システムの構築、3-D プリンターで製作した圧力計測断 面を組み込んだ模型を設計・製作し、精度の高い翼表面圧力及び空力特性の取得に成功した。
- (2) 圧力分布において、地面効果は翼下面側の正圧の増加となって現れることが確認された。翼上面の圧力分布にはほとんど影響を与えない。また、主翼本体と翼端板と間の空力干渉により、翼端板の圧力分布はその内側と外側で非対称となることが分かった。翼端板表面で圧力を積分すると、 翼端板から発生する推力成分が地面効果内での揚抗比向上に寄与していることが分かった。
- (3) 本研究で用いた境界要素法は、翼端が閉じた翼であれば、圧力といった局所量においても良好に 推定できることが分かった。翼端板付き主翼のような複雑な翼に対しても、圧力レベルで推定精 度が良好であったことから地面効果翼の設計ツールとして有用と言える。

参考文献

 Yuma Ito, Hidetsugu Iwashita : Influence of the Wake Deformation and the Free-Surface on Steady Aerodynamics of Wings in the Ground Effect, Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol.24, pp.87 - 105, 2017

OVPE 成長条件下における安定な GaN(0001)表面構造の検討

三重大学大学院工学研究科 河村貴宏

研究背景・目的

窒化ガリウム(GaN)の気相成長法の1つである Oxide Vapor Phase Epitaxy (OVPE)法は 固体副生成物が無く,原理的には連続成長が可能であることからバルク GaN 結晶成長法と して期待されている[1].しかしながら,酸素(O)を含む原料を用いるためO不純物量の制御が 課題となっている.エピタキシャル成長は結晶表面で起こる現象であるため,その理解にはまず 成長条件下における結晶表面構造に関する知見が必要である.そこで本研究では第一原理計算 を用いて OVPE 成長条件下における GaN(0001)表面構造について解析を行い,安定な表面構造 と O 不純物の取り込みについて考察した.

計算方法

計算には第一原理分子動力学プログラム"STATE-Senri"を用 いた[2]. 図1に GaN(0001)の基準表面構造モデルを示す. 表 面積は約 6.3×5.5 Å²であり,4分子層の wurtzite 構造と 15 Å の真空層で構成されている.また底面は原子番号が 0.75 の仮 想的な H 原子で終端されている.この結晶表面に Ga, N, H, O で構成される原子・分子を吸着させた表面構造モデルに ついて解析を行い,その結果をもとに表面生成エネルギー



図 1 GaN(0001)表面 構造の計算モデル

 $E_{f} = E_{tot} - E_{ref} - n_{Ga}\mu_{Ga} - n_{N}n_{NH_{3}} - \left(\frac{1}{2}n_{H} - \frac{3}{2}n_{N}\right)\mu_{H_{2}} - n_{O}\mu_{O}$

を計算した[3]. ここで, *E*_{tot} と *E*_{ref}はそれぞれ検討した表面構造モデルと基準表面構造の 全エネルギー, *n*_(*Ga,N,H,O*)と*µ*(*Ga,NH3,H2,O*)はそれぞれ吸着原子数と温度・圧力を考慮した各 原子・分子のケミカルポテンシャルである[4]. 各表面構造モデルの表面生成エネルギーを 比較して,温度・Ga 圧力と安定な表面構造の関係を表面状態図にまとめた.

結果および考察

図 2(a)と(b)にそれぞれ O 原子種を考慮した場合と考慮しなかった場合の表面状態図を示 す.ここで、NH₃圧力と H₂圧力は両方とも 0.1 atm、O 圧力は Ga 圧力の半分とした.図 中の Ga decomposition は GaN が成長しない範囲を示しており、その境界線は Akiyama ら の論文[5]を参考にして描いた.OVPE 成長条件を温度 1500 K, Ga 圧力が 1×10⁻³ atm と仮 定すると、図 2(a)の結果から OVPE 成長条件下では最表面の Ga 原子に OH と H₂O が吸着 した 3OH+H₂O モデルの表面構造(図 3)が安定であることが分かった.次に、GaN(0001) 面から OH と H₂O を取り除くために必要な脱離エネルギーと、反応速度式k = Aexp $\left(\frac{-E}{k_BT}\right)$ (*A*=1×10¹³ 1/s, *T*=1500 K, *k*_Bはボルツマン定数, *E*は活性化エネルギー)を用いて評価し た脱離頻度を表1にまとめた.この結果から、OH は脱離し難いが、H2O は容易に脱離すると考えられる.結晶表面に吸着した OH がO 不純物の原因の1つと考えられるので、O 不純物量の低減には成長温度を上げることでOH を脱離しやすくする、またはH2ガスによりOHをH2Oに還元することで脱離させることが有効であると考えられる.



図 2 GaN(0001)の表面状態図: (a) 酸素を考慮した場合と(b)考慮しなかった場合. 等 高線は表面生成エネルギーを表しており,値が小さい方がより安定なことを示す.



図 3 "3OH+H2O"の表面構造モデル

表 1 1500K での OH と H2O の脱離 エネルギーと脱離頻度

	Desorption	Desorption
	energy [eV]	rate [1/s]
OH	5.31	1.14×10^{-5}
H ₂ O	1.63	3.34×10^{7}

[1] M. Imade et al., J. Cryst. Growth **312**, 676 (2010).

[2] Y. Morikawa, Phys. Rev. B 51, 14802 (1995).

[3] C. G. Van de Walle et al., Phys. Rev. Lett. 88, 66103 (2002).

[4] Y. Kangawa et al., Surf. Sci. **493**, 178 (2001).

[5] T. Akiyama et al., J. Cryst. Growth **318**, 79 (2011).

研究組織

研究代表者 河村貴宏(三重大) 研究協力者 柿本浩一(九大応力研),寒川義裕(九大応力研)

研究成果報告

"First-principles study of the surface phase diagrams of GaN(0001) and (000-1) under oxide vapour phase epitaxy growth conditions", <u>T. Kawamura</u>, A. Kitamoto, M. Imade, M. Yoshimura, Y. Mori, Y. Morikawa, <u>Y. Kangawa</u>, and <u>K. Kakimoto</u>, Physica Status Solidi B, accepted.

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、富永姫香、今井正人、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、Cu₂ZnSn(S, 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り、S/Se 比をコントロールす る事でバンドギャップも 0.9~1.5 eV と制御可能であり、光吸収係数も Si の 10 倍程度大きい という観点から低毒素低コスト材料として注目を浴びている。現在 CZTS 系太陽電池は、 CZTS:8.8%¹⁾、CZTSe:11.6%²⁾、混晶である CZTSSe:12.6%³⁾という変換効率が達成されている。 しかしながら、実用化に向けて更なる変換効率向上のため応用研究が活発に報告される一方 で、正確なバンドギャップや光級数係数の値など基礎物性に関する報告は非常に少ない現状 がある。工業分野において技術的な問題は、時代経過とともに解決されることが多く、対象 とする物質の本質を理解し更なる発展のために基礎研究から議論することは必要不可欠であ 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 伝導メカニズムを中心とした報告を行ってきた^{4,5)}。

現在 CZTS 系太陽電池の変換効率向上の制限要因となっているのは、開放端電圧 Voc が理 論値(バンドギャップ値)の半分程度(Voc 達成率 42-50%)しか得られていない事である。他の化 合物太陽電池のワールドレコードと比較すると、変換効率 22.3%を達成している Cu(In, Ga)Se₂ (CIGS)において Voc 達成率 60-65%、21.5%を達成している CdTe 太陽電池において Voc 達成率 55-60%であり、CZTS 系は 10%程度低い値となっているが同じ課題を抱えている^の。Voc の制 限要因としてキャリアの再結合によるもので、主に①吸収層バルク内、②空乏層内、③PN 接 合界面、④裏面電極近傍の 4 つが挙げられる。特に材料自体の物性に依存する①から③の再 結合を改善する必要があり、キャリア濃度をコントロールする事が重要である。キャリア濃 度をコントロールするためにドーピング技術は有効的であり、特に CIGS 太陽電池において Na は高効率を達成するために必要な不純物である。そこで本研究では、Na-doped CZTS 単結 晶を作製し、Na ドーピング量とキャリア濃度を含む電気物性の相関性の基礎研究面と既に得 られている良質な CZTS 単結晶を用いた単結晶太陽電池デバイス作製の応用研究面から Voc 向上へアプローチを行った。

2. 実験方法

Na₂S をドーパントとして高純度原料と一緒に石英管に真空封入後、1100℃ で溶融させ Feed となる CZTS 多結晶へドーピングし、CZTS-Sn 擬二元系状態図から成長温度 900℃、80 mol% CZTS-20 mol% Sn 溶液、成長速度 4 mm/day の条件で移動ヒーター法(THM)を用いて Nadoped CZTS 単結晶を成長させた。結晶構造は、粉末 X 線回折(XRD)と X 線ロッキングカーブ (XRC)測定を用いて解析を行った。組成分析は、高周波誘導結合プラズマ発光分光法(ICP-AES) を用いて行った。電気的特性はホール効果測定を用いて測定温度 20~300 K、磁場 0.55T の条 件下で行った。サンプルサイズは、5 mm×5mm×0.5 mm とし、表面は粗さ 0.01 μ m の Al₂O₃粉 末で研磨した。直径 1 mm、厚さ 300 nm の Au 電極をサンプルの四角に真空蒸着法を用いて 形成した。Au 電極はオーミック特性を示し、各電極間の抵抗値は磁場と電流を反転させ均一 であることを確認している。



Fig. 2 Na-doped CZTS 単結晶サンプル

3. 結果と考察

Fig.1に3ゾーンからなる THM 炉内の温度プロファイルを示す。中心ヒーター温度は900℃ で液相温度より 50℃ 程度高く設定して液相を形成している。中心 - 下部ヒーター間(過飽和 領域)の温度勾配は 45℃/cm に設定することで溶液ゾーンの長さを 1 cm 程度にコントロール している。Fig.2に Na-doped CZTS 単結晶ウエハーを示す。インゴットサイズは直径 10 mm、長さ 40 mm 程度で 5 mm 以上の単結晶が得られた。

ICP-AES から得られた Na-doped CZTS 単結晶サンプルの組成分析結果は、全てのサンプル において金属組成比[Cu]/([Zn]+[Sn])=0.92–0.98、[Cu]/[Zn]=1.73–1.86、[Zn]/[Sn]=1.06–1.15 で あり Cu-poor、Zn-rich 組成を示した。Na 濃度は、0.04–0.13 at%を示した。



Fig. 3 Na-doped CZTS 単結晶粉末 XRD

Fig. 4 Na 0.13 at%サンプル(112)面 XRC

Table 1 室温ホール効果測定結果

Na [at%]	Carrier concentration [cm-3]	Conductivity [Q ⁻¹ cm ⁻¹]	Mobility [cm ² V ^{.1} s ^{.1}]
0	8.80×1016	2.22×10-2	8.35
0.04	2.03×1017	1.46×10-2	13.9
0.13	7.42×1017	1.07×10-1	15.4

各組成の Na-doped CZTS サンプルの粉末 XRD パターンを Fig. 3 に示す。結晶構造は、 kesterite タイプの正方晶を示し、全ての主要な回折ピークは ICDD データ(#01-075-4122 kesterite CZTS)と一致した。Kesterite 相は、Cu/Zn の配置が違う disordered kesterite 相を形成す る場合もあるが、disordered 相では観察されない 2 θ =18.3 のピークが観察されたため kesterite 相と判断した⁷。Fig. 4 に Na 0.13 at% CZTS サンプル (112) 面における XRC 結果を示す。半 値幅は 152 arcsec を示し、これは同じ多元系材料である CIGS 単結晶と同程度の値であった。 これらの結果から高品質の単結晶サンプルが得られたと判断した。

Table 1 に室温のホール効果測定結果を示す。得られたキャリア濃度、伝導率、移動度は Na 濃度が増加するにつれて向上した。第一原理計算によると Cu サイトの Zn(Zncu)が CZTS 中の 支配的なドナー性欠陥である⁸。Na ドープによってこの支配的なドナーが置換され(=Nacu)、 ドナーによるキャリア補償の減少によってキャリア濃度が向上したと考える。さらに XRD 測 定結果から Na 濃度増加とともにユニットセル体積が増加するので Na の置換の影響は確認で きる。Fig. 5 に移動度温度変化を示す。低温側と室温付近においてそれぞれ T^kに比例してお り、これらは不純物散乱と格子散乱に起因している。特に低温側において指数 k の値が Na 濃 度増加により減少しているため不純物散乱の減少によって移動度が増加していると考える。 この結果はドナー性欠陥 Zncu が Na の置換によって中性欠陥 Nacu へ変化する推察と良い一致 をする。

Fig. 6 に CZTS 単結晶太陽電池 IV カーブを示す。CZTS 単結晶上に Chemical bath deposition (CBD)法で n 型 CdS を製膜し pn 接合形成後にスパッタリング法で透明電極と電極を形成した。変換効率 3.2%、フィルファクター35.1%、開放端電圧 Voc 0.66 V、短絡電流 J_{SC} 14.1 mA/cm の結果が得られた。



効率は報告されているものよりも小さいが初めて CZTS 薄膜太陽電池が 6%を超えたセル⁹と比較す ると Voc の値が大きいことが分かる。これは点欠陥が少なく結晶性の良い単結晶の特性が反映してい るからだと考える。

4. まとめ

本研究は、CZTS 系太陽電池の変換効率向上のために開放端電圧 Voc 改善に注目し Na-doped CZTS 単結晶を作製し、Na ドーピング量とキャリア濃度を含む電気物性の相関性の基礎研究面と既に得られている良質な CZTS 単結晶を用いた単結晶太陽電池デバイス作製の応用研究面からアプローチを行った。①Na ドーピング量増加とともに変換効率向上に関わるキャリア濃度や移動度の向上が確認された。②CZTS 単結晶セルにおいて初期の CZTS 薄膜太陽電池よりも大きな開放端電圧 VOC が得られた。

5. 謝辞

This work was supported in part by the Collaborative Research Program of Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University.

引用文献

- 1) S. Tajima et al., Appl. Phys. Express. 8 (2015) 082302.
- 2) Y. S. Lee et al., Adv. Energy Mater. 5 (2015) 1401372.
- 3) W. Wang *et al.*, Adv. Energy Mater. **4** (2014) 1301465.
- 4) A. Nagaoka et al., J. Crystal Growth 423 (2015) 9.
- 5) A. Nagaoka et al., Appl. Phys. Lett. 103 (2013) 112107.
- 6) M. A. Green et al., Prog. Photovolt: Res. Appl. 24 (2016) 3.
- 7) A. Ritscher et al., J. Solid State Chem. 238 (2016) 68.
- 8) S. Chen et al., Adv. Mater. 25 (2013) 1522.
- 9) H. Katagiri et al., Appl. Phys. Express 1 (2008) 041201.

血管内治療用カテーテルにおける耐久性と操作性の検証

九州大学病院消化器·総合外科 松本 拓也

1. 緒 言

バルーンカテーテルとは、カテーテルの先端部のバルーンを膨張させることで、狭くなった動脈の内腔を 押し広げ、心臓や腎臓および下肢への血行を改善し、狭心症、高血圧、および壊疽のような動脈硬化性の疾 患を軽減する治療に使用するカテーテルの一種である⁽¹⁾. バルーンカテーテルによる経皮的冠動脈形成術 (percutaneous transluminal coronary angioplasty: PTCA)は、すでに 20 年以上の歴史を持ち、現在で は虚血性心疾患における主要な治療法となっている. 狭心症例の 30~40%は PTCA の適応があるといわ れているが、その施行数は近年爆発的に増加しており、日本では年間 4~5 万件、米国および欧州ではそれ ぞれ約 50 万件のPTCA が行われていると推定されている⁽²⁾.

しかし、PTCA の安全性および成功率はバルーンカテーテルの改良などによって著しく高まってはいる ものの、血管挿入時におけるバルーンの破裂例^{(3),(4)}やシャフトの破損例^{(5),(6)}が報告されている. そのため、 カテーテルの力学的特性を定量的に把握しておく必要があるが、そのような力学特性を詳細に 評価した研究 はほとんど行われていない. そこで本研究では、実際に臨床で使用されているカテーテ ルの引張試験を行い、 接合部とシャフト部の荷重-変位挙動を評価した. さらに、バルーンカテーテ ルは 2 層構造を形成するが、 その外筒と内筒についてそれぞれ引張試験を行い、応力-ひずみ挙動を求めるとともに、塑性の全ひずみ理 論に基づいて力学挙動のモデリングを試みた.

2. 実験方法

臨床で世界的に広く利用させているPTA バルーンカテーテルを 2 本試験体として使用した. バルーン カテーテルは2層構造を形成しており,内部をガイドワイヤーが通る内筒と空気を注入しバルーン を膨張さ せる外筒から構成されている. 強度的に弱いとされるのはバルーンの根元の部分の接合部で あるため,本研 究では,1 本の試験体は接合部を含む部分(接合部と呼ぶ)とそれ以外の部分(シャフト部と呼ぶ)に2分 割し,それぞれ引張試験を行った. もう1 本の試験体は,内筒と外筒のそれぞれの基本的な応力–ひずみ 挙動を得るために,内筒と外筒に分解して引張試験を行った.

引張試験には小型卓上試験機(島津製作所(株))を使用し,負荷速度 600mm/min,引張部分の長さ 30mm で試験を実施し荷重と変位の時間変化を記録した.試験の様子はビデオで記録し,破断までの様子 を確認した.また,内筒と外筒の試験ではビデオ撮影した画像を解析することで,ひずみを計測した.さ らに,内筒と外筒の断面を SEM 観察し,断面形状の観察と断面積の計測を行った.また,真応力-真ひず み関係を算出し,初期の線形弾性領域より弾性率を評価した.

3. 結果と考察

引張試験より得られたカテーテルの接合部とシャフト部の荷重-変位曲線をそれぞれ図 1 に示す.図 1(a)より,接合部では変位が 52.3mm となったときに外筒が破断して荷重が大きく減少し,その後内筒 のみの変形により再び荷重は増加するが,変位が 100mm のときに内筒も破断に至った.また,外筒の破 断点に至るまでに降伏点と思われる変曲点が存在している.このような荷重-変位曲線は,2層 構造のバ ルーンカテーテルにおいて外筒が先に破断する場合の典型的な挙動であり,我々が提案した 単純なモデル がよく一致する⁽⁷⁾.内筒と外筒の弾塑性荷重-変位挙動をそれぞれ2段階に分けて直線近似すると,カテー テル全体の荷重-変位挙動はそれらの組み合わせとして次のように4段階に分けて表現でき

- 1) 内筒と外筒が一緒に弾性変形する
- 2) 外筒が塑性変形し内筒は弾性変形する
- 3) 外筒,内筒ともに塑性変形する
- 4) 内筒のみ塑性変形する(外筒破断後)

さらに、各変形様式に対して荷重-変位関係は次式で表される.

$$F = \begin{cases} (k_{1e} + k_{2e})d \\ (k_{2e} + k_{1p})d + (k_{1e} - k_{1p})d_{1y} \\ (k_{1p} + k_{2p})d + (k_{1e} - k_{1p})d_{1y} + (k_{2e} + k_{2p})d_{2y} \\ k_{2p}d + (k_{2e} - k_{2p})d_{2y} \end{cases}$$
(1)

ここで, *k_e*, *k_p* はそれぞれ剛性係数と硬化係数であり,1は外筒を2は内筒を表している. d_y, d_f はそれ ぞれ降伏点と破断点における変位である.このモデルを用いて予測した結果を図1 に点線で示す.接合部 において実測値と力学モデルがよく一致することが確認された.

一方,図1(b)に示したシャフト部では,接合部とは異なり内筒が先に破断した.内筒破断後の変位 が 90-150mmの領域では,外筒の塑性変形により荷重がほとんど増加することなく変形した.その後,再 び荷重が増加するが,この現象は,外筒の変形により内筒に作用する圧縮力が増加して内筒が強く拘束され るために,再び外筒と内筒が一体化して変形を開始することに対応していると考えられる.このように,バ ルーンカテーテルでは,外筒と内筒のどちらが先に破断するかで,その引張変形挙動が異なることが明ら かになった.



Fig.1 Load-displacement curves; (a) joint, (b) shaft.

内筒と外筒の断面の SEM 画像を図 2 に示す. この画像から分かるように,外筒の厚さは内筒の2倍 程度であり,強度的により高いことが予測される. この画像を元に断面積を算出し,応力の算出時に利用した.

得られた真応力-真ひずみ曲線を図 3 に示す.内筒,外筒ともにポリマーでみられる典型的な弾塑性の応力 -ひずみ挙動を示している.初期の線形弾性領域より弾性率を算出したところ,内筒は 113MPa, 外筒 は 258MPa であり,外筒の方が高い弾性率を示した.内筒と外筒はともにポリアミド系の樹脂であること が分かっているが,同じ材質ではなく共重合化により材質を変えていることが予想される.次に内筒と外筒の 弾塑性挙動を全ひずみ理論を用いて表すことを試みた.全ひずみ理論では、塑性域でのひずみは、弾性ひずみ と塑性ひずみの和として表される.

 $\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p$

(3)

応力と弾性ひずみの関係は、弾性率 Eを用いてフックの法則で表される.

$$\sigma = E\varepsilon_e$$

また、応力と塑性ひずみの関係には、次式のような指数関数的な関係が成り立つと仮定する.

$$\sigma - \sigma_y = k \varepsilon_p^n$$

ここで ovは降伏応力であり, k, nは定数である. (2)式に(3)式と(4)式を代入して整理すると, 弾塑性域で の応力—ひずみ関係は次式で表される.

(4)

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma - \sigma_y}{k}\right)^{1/n} \tag{5}$$

(3)式と(5)式を用いて予測した結果を図4に破線で示しており、実験値と理論値がよい一致を示してい ることが分かる.

文 献

- ジェイムズ・E・ワスコ, 医学最前線からの報告, 24-28 (1978) (1)

- (1) ジェイムへ・E・ワヘコ, 医子取回版がつらの下下口, 24 26 (1976)
 (2) 鈴木 紳, 心臓カテーテル, 115-123 (2000)
 (3) C.J. Tegtmeyer, et al., Radiology, 139 (1981), pp. 231–232
 (4) T. Katayama, et al., J. Cardiol., 1 (2010), pp. e17–e20
 (5) V. Trehan, et al., S., Catheter. Cardiovasc. Interv., 58 (4) (2003), pp. 473–
 (6) J.H. Kim, et al., J. Invasive Cardiol., 24 (2012), pp. 74–75
- (7) Mitsugu Todo, et al., Journal Mech. Behav. Biomed. Maters, Vol 62, (2016), pp. 236-239





(b) Outer tube

Fig.2 SEM images of the cross-sections of inner and outer tubes.





CT-FEM を用いた大腿骨頭壊死症による骨頭圧潰メカニズムの解明

横浜市立大学医学部整形外科 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、圧潰変形を生じることで痛みをもたらす 難治性疾患である.大腿骨頭壊死による圧潰の進行状態が深刻な場合は、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.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というメカニズムが提唱されて いるが、壊死発症後の圧潰の力学的メカニズムは明らかになっていない.

これまで大腿骨頭壊死症に対して有限要素解析 (FEA) が行われてきた.しかし大腿骨頭に直接荷重を 与えており,軟骨,骨盤との接触が考慮されていない,また骨を等質材料として扱っており,骨強度の大部 分を担保するアパタイトの影響が考慮されていない.これまでに大腿骨頭壊死の病期によって治療法を決 定することを目的とした FEA が行われてきた[1][2]が,圧潰の力学的メカニズムは明らかになっていな い.

そこで本研究では、大腿骨頭壊死による圧潰メカニズムを明らかにすることを目的として、FEA を行い、 大腿骨頭壊死症による圧潰現象の再現を試みた. CT 画像から損傷モデルを組み込んだ FEA モデルを作 成し、そのモデルに対して力学試験により得られた壊死および軟骨の材料特性を適用することで、 解 析を行った.

2. 方法

成人女性(79歳,体重 60kg) 左股関節,成人女性(61歳) 左股関節,成人男性(55歳) 右股関節のCT 画像を Mechanical Finder ver.8.0 で読み込み,骨盤,軟骨,大腿骨からなる股関節モデルの作成を行った.股 関節モデルの全体像を Fig.1 右図に示す.次に,Solid Works 2008 を用いて長径 24mm,短径10mm からな る楕円体の壊死部を作成し,正常大腿骨モデルに挿入することで,大腿骨頭壊死モデルとした.壊死部は骨 頭の表面に沿って挿入した.3種類の骨頭モデルを Fig.1 左図に示す.Table 1 にそれぞれのモデルの骨盤 の体積と大腿骨の体積を示す.また,Fig.1 で示す 79歳女性モデルを①とし,①の壊死の位置を基準に 2mm, 4mm, 6mm 下方へ移動させていくことで作成したモデルを②,③,④とする.

大腿骨と骨盤のヤング率,最大応力,降伏応力はKeyak らの計算式を用いて骨密度より算出した. 壊死 部と軟骨の弾性率はこれまで実際に大腿骨頭壊死症患者から人工股関節術の際に摘出した大腿骨頭から試 験片を作製し,力学試験を行うことにより算出した平均値 0.017MPa, 0.52MPa を使用した. Table2 に本研 究で使用した材料特性を示す. また骨損傷を再現するために,要素単位で破壊が進行する損傷モデルを導 入した. 引張り破壊は主応力基準, 圧縮降伏変形は Drucker-Prager 相当応力基準, 圧縮破壊は主ひずみ基 準で生じるものとした. 拘束条件としては, Fig.1 右図に示すように,大腿骨骨端部を完全拘束し,腸骨と 恥骨の一部を左右方向に拘束した. 荷重条件として,骨盤近位より 1800N の分布荷重を10 分割して与え た.

3. 結果と考察

Fig.2 に180N の分布荷重を与えた際の壊死部の最小主応力分布図を示す.+の値は引張応力,ーは圧縮応力を示す.いずれのモデルでも壊死部と正常組織の境界部に高い圧縮応力が分布していることが分かる.これは正常組織と壊死部の弾性率の差により応力集中が生じたためだと考えられる.

Fig.3 に 79 歳女性モデルに骨盤近位より 1800N の分布荷重を 180N→360N→・・・→1800N と 10分割して与えた際の破壊要素分布状態を示す. 黄色の要素は圧縮塑性変形, 赤い要素は圧縮破壊, 青い

要素は引張破壊が生じた要素を示している.低荷重を与えた際に楕円体形壊死部と正常組織の境界部から 破壊が発生し、荷重を増加させていくと、壊死部と正常組織の境界部に破壊領域がドーナツ状に形成され、 次第に破壊領域が楕円体形壊死部の中心部へと進行していった.

Fig.4 に79 歳女性, 61 歳女性, 55 歳男性のモデルの破壊要素数の比較を示す. 破壊要素数は 79 歳女 性>61 歳女性>55 歳男性の順に多く, Table.1 に示した大腿骨全体の体積および骨盤の体積に比例してい ることがわかる. 荷重を与えた際に, 骨盤や大腿骨が大きいとより広範囲で荷重を受けることで, 壊死に加わる荷重が軽減されるため, 壊死部の破壊要素数の減少につながったと考えられる.

4. 圧潰メカニズムの提唱

Fig.5 に大腿骨頭壊死発症後の圧潰をもたらす力学的メカニズムを示す.荷重は軟骨を介して大腿骨頭の 正常組織及び壊死に加わる(I).壊死に荷重が加わるとポワソン効果により,荷重と垂直方向に広がろうとす る(Ⅱ).壊死は広がろうとするが壊死周囲に存在する正常組織は剛性が高く,広がることができないため壊死 部と正常組織の境界面で高い圧縮応力が生じる(Ⅲ).境界面から徐々に破壊が生じ(Ⅳ).最終的に圧潰にい たる(V).

参考文献

- [1] Yang J.W., et al., Mechanics of femoral head osteonecrosis using three-dimensional finite element method, Arch Orthop Trauma Surg, Vol.122(2002), p88-92
- [2] Volokh K.Y., et al., Prediction of Femoral Head Collapse in Osteonecrosis, J Biomech Eng, Vol.128(2006), pp467-470



Fig.1 Hip joint model and three different femoral head models with elliptical necrosis.

Table.1 Pelvis and femur volume

Table.2 Material property

	79 year woman	61 year woman	55 year man
Pelvis volume (cm ³)	262	292	350
Femur volume (cm ³)	344	408	544

Tissue	Young's Modulus (MPa)	Poisson's Ratio	Critical Stress (MPa)	Yield Stress (MPa)	Density (g/cm3)
Necrosis	0.013	0.4	1(kPa)	1(kPa)	0.01
Cartilage	0.52	0.4	20.6	20.6	2.4
Femur& Pelvis	Keyak (1998)	0.4	Keyak (1998)	Keyak (1998)	Keyak (1998)



a.79 year woman model b.61 year woman model c.55 year man model

Fig.2 Minimum stress distribution of necrosis on 180N





Fig.4 Fracture elements of 3 model



Fig.5 Mechanism of compressive crushing

CT-FEM を用いた腱板腱骨付着部のバイオメカニクス解析

金澤 知之進

要旨:正常な腱組織が骨に付着している部位(腱骨付着部)は、物理的剛性の全く異なる 骨組織と腱組織を連結しており、運動において強大な力学的負荷がかかる部位である。こ のような特殊な環境から、整形外科領域において腱骨付着部は炎症性疼痛を引き起こし、 その治療に難渋することが知られている。正常腱骨付着部組織は、線維軟骨を介した特殊 な構造をしているが、運動時においてどのような応力分布をなしているのか不明である。 本研究では、CT-FENを用いて、正常と腱板縫合モデルそれぞれの応力分布を定量的に解 析し、腱骨付着部障害の治療に資する、基盤的な知見を得ることを目的とする。

序論:整形外科領域において、腱骨付着部はその構造の特性上、運動時に強大な力学的ス トレスがかかる為、炎症性疼痛が遷延し、治療に難渋することが広く知られている。この 様な組織構造は、腱が骨につく身体の各所に存在しており、つまるところ過度な力学的負 荷がかかる状況下におかれれば、身体のあらゆる部位に、難治性の炎症性疼痛を生じ得る ものである。その結果、スポーツ選手のスポーツ活動はもちろんのこと、正常人において も ADL を著しく低下させてしまう。しかしながら、腱骨付着部障害がどのような構造/メ カニズムによって発症するのか、また、過度なストレスが加わった場合、超微形態レベル において、どのような組織形態変化が起こっているのかは依然として不明であり、それが 腱骨付着部症治療を難渋させている要因の1つとなっている。

方法:実験1)正常骨・靭帯付着部における応力分布の検討

ラットを用い、出生直後から出生後1か月まで1週ごとに、正常骨・靭帯付着部を摘出し、CT-FEMにより正常骨・靭帯付着部の応力分布を解析する。

実験2)ラット靭帯再建モデルを用いた、骨・腱間固着の応力分布の検討

正常骨・靭帯付着部の構造が、実際の靭帯再建手術を行った後に生じる骨・移植腱間の応 力分布がどのように異なっているのか検討する。

結果・考察:現在応用力学研究所スタッフとともに、棘上筋腱付着部の応力分布解析に必要な、ラット上腕骨の CT 情報から、シュミレーションソフトのセッティング調整中である。

論文と学会発表のリスト:なし

CT-FEM を用いた人工股関節置換術後の大腿骨折のバイオメカニクス的検討

I. INTRODUCTION

Total hip arthroplasy (THA) and Resurfacing hip arthroplasty (RHA) are two common approaches for hip osteoarthritis treatment. Issues of long term stability of implant and bone growth are part of the debate in promoting both procedures. Biomechanical factors such as bone absorbtion, bone fractures and prosthesis loosening are to be considered for primary and long term successful. Also, clinical and patient-reported outcomes have to be taken into account, including return to function, pain relief and increase mobility.

Computational biomechanical analysis had widely implemented to promote the primary and long term prediction. Different loading behavior for daily activities such as walking and stair climbing were demonstrated in predicting stress behavior, potential of failure and implant stability [1]. In addition, patients with hip osteoarthritis and hip arthroplasties were also at risk of bone fractures especially to elderly. Instead of having weaker bone, they are more likely to fall due to imbalance, medication side effects and difficulty avoiding environmental hazards [2]. The external loading created during sideway falls will initiate to sudden and high impact loading to the hip contact. Risks of falling for hip arthroplasties patients are higher due to gait adaptation and instability [3].

The purpose of the current study are (i) to develop inhomogeneous 3D model of intact femur and femur with arthroplasties (THA and RHA) based on CT-based data and (ii) to examine the bone fractures mechanism of intact, RHA and THA femurs under different loading configuration of sideway falls.

II. MATERIALS AND METHOD

A. Development of Inhomogeneous Bone Model

A 3D femur model was constructed from computed tomography (CT) based images of 54-years old male. The models are designed using tetrahedral solid element with a size of 3 mm for the whole bone. The mechanical properties of the bone element are computed by Hounsfield unit value to determine inhomogeneous model. Young modulus and yield stress of each element are calculated based on Keyak et al. [4] while Poisson ratio for each element is set as 0.4. Distribution of young modulus in the inhomogeneous model was illustrated in Fig. 1.

B. Material Properties

CAD data of hip resurfacing and total hip arthroplasty are imported and implanted into femoral bone and presented as

九州大学医学研究院 中島康晴

RHA and THA femur models, respectively. The femoral head is resurfaced and implanted with arthroplasty in RHA while it is cut off in THA femur, as illustrated in Fig. 2. Prosthesis stem of THA is modeled as Ti-6Al-4V material while femoral ball as Alumina properties. Meanwhile, RHA implant is assigned as Co-Cr-Mo material. Details of material properties for each component are summarized in Table 1 [4]. Contact between both implants and bone are considered to be perfectly bonded at the interface.



Fig. 1. Distribution of young modulus in inhomogeneous femur model.



Fig. 2. 3-dimensional models of intact, RHA and THA femurs

TABLE I: MATERIAL PROPERTIES OF HIP ARTHROPLASTIES

Properties	Ti6Al4V	Alumina	Co-Cr
Elastic Modulus (GPa)	114	370	230
Poisson Ratio	0.34	0.22	0.30
Critical Stress (GPa)	0.88	0.40	0.94
Yield Stress (GPa	0.97	3.00	2.70
Density (g/cm3)	4.43	3.96	8.28

C. Loading and Boundary Conditions

Four different types of loading and boundary conditions are assigned to demonstrate different sideway falls [5]. Each configuration exhibits different loading directions at angle α (with reference to the long axis of femur in frontal plane) and β (with reference to femoral neck axis in horizontal plane) as proposed in Bessho et al [5]. Fig. 3 and Table 2 described the different angle α and β for each configuration. The variety of falling configurations (FC) are labeled as FC1, FC2, FC3 and FC4 and illustrated in Fig. 4.

Experimental study to measure the impact forces at the hip during sideway falls was previously conducted by Groen et al [6]. The study concluded that proper fall techniques (eg. Martial arts) will reduce impact velocity and loading. Hip impact force (normalized to body weight, BW) may reduce from 3.9BW to about 2.8BW in proper fall techniques. In this study, different loading magnitudes are assigned for each configuration to predict sudden impact of falls. Increments of loading from 1BW to 5BW are considered to predict the fracture patterns and stress behavior during falls with different configurations. Finite element analyses combined with a damage mechanics model are performed to predict bone fractures in both arthroplasty models and intact femur.



Fig. 3. Definition of different loading direction α and β at coronal (left) and axial (right) views

TABLE II: DESCRIPTION OF DIFFERENT ANGLE DEGREE

Configuration	α	β
FC1	120	0
FC2	60	0
FC3	60	15
FC4	60	45



Fig. 4. Loading & boundary conditions for different falling configurations

III. RESULTS AND DISCUSSION

Risk of femoral fracture in all femurs is predicted computationally using commercial biomedical software, Mechanical Finder, v6.1 in corresponding to damage formation criterion. Fracture mechanism of femurs was calculated based on prediction by Keyak et al. [7]. The load bearing strain was set to 3000micron which representing bone loading that leads to bone formation. The test tensile strength was set to 80% of the yield strength determined from the CT images [8,9].

A. Changes in the distribution and numbers of element failure

Increments of failure elements by increasing of body weight (BW) loading are presented in Fig. 5 for different configurations. Total of elements failure are considered for both tensile and compressive direction. Patterns of changes for failure element are increased exponentially for all configuration and femur models. Configuration FC1 shows less numbers of failures as compare to other configurations which range up to 1700 elements at 5BW.

Configuration FC1 indicates that risk of bone fractures are high in THA femur followed by RHA and intact femurs. But, the intact femur shows higher number of element failures when the loading exceed 5BW as projected in Fig. 5(a). Differs to other configurations, fractures or failure element of bone are expected to be dominant in RHA femurs while minimum in THA femurs. The patterns are almost



Fig. 5. Changes of element failures by increasing of body weight (BW) loading for different failing configurations (a) FC1, (b) FC2, (c) FC3 and (d) FC4 between intact, RHA and THA femurs

comparable between configuration FC2, FC3 and FC4 along the increasing body weight loading as shown in Fig. 5(b), 5(c) and 5(d), respectively. Nevertheless, the elements of failures are expected to be peak up to 8000 element in intact femur at5BW in configuration FC4 (Fig. 5d). The incidence may be occurred due to collateral damage of the femoral bones caused by the high impact.

Changes of element failure distribution in increased body weight loading contribute to the pattern of bone fractures in intact, RHA and THA femurs. Fig. 6 illustrated the changes in the distributions of the elements failure for configuration FC4 for all femur models at posterior-anterior (P-A) view. Tensile fractures are indicated in red while compression fractures in yellow. No sign of fractures are expected at lower impact loading at 1BW. The failures of elements are expected to initiate at 2BW and 3BW for RHA and THA models, respectively. While fractures of the intact femur are clearly indicated at 5BW and dominated at the upper neck of femoral.

Fractures of RHA femur are expected to occur at femoral neck when the load reached 3BW. In higher load at 5BW, the additional fractures location is pointed out along the inter-trochanteric crest region. For THA femur model, the bone fractures are projected to locate at proximal medial and lateral region of femoral cutting. The direction of hip loading during fall may lead to lateral-medial bending effects to the prosthesis stem and replicate force to the proximal cut of the femur. Fall area at lesser trochanter region may also contribute to stress concentration and continue to fail.

B.Prediction of bone fracture location in intact, RHA and THA femurs

Damage formation of bone fractures occurred in all configurations with different locations. Fig. 7 illustrated the different predicted locations of bone fractures for configurations FC1-FC4 at 5BW loading. In general, loading direction and boundary condition which differentiate the falling configurations contribute to the fracture locations. FC1 and FC2 configurations defined similar loading angle (0°) of β but contrast in α (120° and 60°). Different β angle of loading direction are applied in FC2, FC3 and FC4 configurations at 0°, 15° and 45°, respectively.

Bone fractures occurred at the area of impact loading and boundary conditions due to high stress concentrations. In addition, direct impact hip loading to the femoral head of intact femur give high stress concentration. Fractures in tensile direction are designated in red element while yellow element shows compression failures. At 5BW of hip loading, fractures are projected to occur in all falling configurations and all femur models.

Consequently, the proximal resection area of the femur is reflected and stresses are dominated. Higher stress concentrations at low elastic modulus material are tended to fracture. Damage formation that occurred inside the proximal canal femurs may lead to prosthesis loosening and decrease implant stability. Bone fractures also projected at the greater trochanteric region for all configurations at the higher hip loading (5BW).



Fig. 6. Patterns of bone fractures in intact, RHA and THA femurs in increasing body weight from 1BW to 5BW loading (left to right) for configuration FC4

IV. CONCLUSION

The inhomogeneous FE models of femurs are well developed in this study to predict bone fractures for intact, RHA and THA femurs during sideway falls. Different locations of fracture are predicted in each configuration due to different loading direction and boundary conditions. Predicted fractures for intact and RHA femurs are dominant at femoral neck region in all configurations. While, trochanteric region and proximal canal for THA femurs and expected to lead for stem loosening and instability.

REFERENCES

- Speirs A.D., Heller M.O., Taylor W.R., Duda G.N. and Perka C., Influence of changes in stem positioning on femoral loading after THR using a short-stemmed hip implant, *Clinical Biomechanics*, vol. 22 (2007), pp. 431-439.
- [2] Brunner L.C., Eshilian-Oates L., Kuo T.Y., Hip fractures in adults, *Am Fam Physician*, vol. 67-3 (2003), pp. 537.

- [3] Beaulieu M.L., Lamontagne M. and Beaule P.E., Lower limb biomechanics during gait do not return to normal following total hip arthroplasty, *Gait and Posture*, vol. 32 (2010), pp. 269-273.
- [4] Keyak J.H., Skinner H.B., Fleming J.A., Effect of force directionon femoral fracture load for two types of loading conditions, *J Orthop Res*, Vol. 19 (2001), pp. 539-544.
- [5] Bessho M., Ohnishi I., Matsumoto T., Ohashi S., Matsuyama J., Tobita K., Kaneko M., Nakamura K., Prediction of proximal femur strength using a CT-based nonlinear finite element method: Differences in predicted fracture load and site with changing load and boundary conditions, *Bone*, Vol. 45 (2009), pp. 226-231.
- [6] Groen B.E., Weerdesteyn V., Duysens J., Martial arts fall techniques decrease the impact forces at the hip during sideways falling, J Biomech, Vol. 40 (2007), pp. 458-462.
- [7] Keyak J.H., Rossi S.A., Jones K.A., Skinner H.B., Prediction of femoral fracture load using automated finite element modeling, J *Biomech*, Vol. 31 (1998), pp. 125-133.
- [8] Kaneko T.S., Pejcic M. R., Tehranzadeh J., Keyak J.H., Relationships between material properties and CT scan data of cortical bone with and without metastatic lesions, *Med Eng & Phy*, vol. 25 (2003), pp. 445-454.
- [9] Taylor D., Hazenberg J.G. and Lee T.C., The cellular tranducer in damage-stimulated bone remodeling: a theoretical investigation using fracture mechanics, *J Theo Bio*, vol. 225 (2003), pp. 65-75.

3D プリンターを利用した骨再生用多孔質足場材料の開発

大阪大学未来医療センター 名井 陽

Introduction.

Polylactic acid (PLA) has been used as scaffold and bone plate in the medical field because of its biodegradable characteristics. 3D printing (3DP) is one of the rapid prototyping methods and has ability to control matrix architectures, construct biomimetic structures, ^[1,2].In this study; three different structures of porous PLA cylinder were fabricated using a 3DP machine. Compressive properties and morphology were then examined.

Material and Method.

The raw material used in the 3DP was PLA filament (Kenbill Co), with diameter 1.75 mm and natural color. A commercial 3D printer (Scoovo X9) with the minimum thickness layer of 50 μ m was used. Porous structures were designed using a 3D-CAD software. 3 designs introduced were A. conetube, B. spherical and C. octahedron cylinders as shown in Fig.1. The designs were exported as a rapid prototyping stereolithography format and uploaded to the 3DP software (Slic3rTM v. 0.9.10b). A G-code file was created and sent to the 3DP machine. The printing temperature (220°C) and layer height were controlled during 3DP process. Finally, 2D sliced layers were built layer by layer by the printer. The nozzle travel speed was set at 60 mm/s. The printed samples are also shown in Fig.1

Compression tests were conducted using a conventional machine at a crosshead speed of 1 mm/min. The microstructures were also examined using a FE-SEM.



Fig.1: Desings and printed structures of three different porous cylinders (a)cone, (b) sphere, and (c) octahedron

Result and Discussion.

Table 1 shows that the theoretical porosity ranges between 88~90%. However, the experimental value showed lower porosity for A and B. The theoretical value agrees well with the experimental in C. It was found that the printed structures did not perfectly coincide with the original designs because of the nature of 3DP in which melted PLA filaments were used to construct the structures. Heterogeneous micro structures were actually observed by FE-SEM.

The compressive moduli are shown in Fig.2. It is seen that C had the highest modulus of 836 MPa, suggesting that the octahedron structure created the stiffest structure of three designs.
Table 1: Porosity values of porous cylinders

Cylinder	Designs	Theoretical	Experimental
Α	Cone.	90 %	67 %
В	Sph.	89 %	61 %
С	Octa.	88 %	86 %



Fig.2: Compressive moduli of porous cylinders

Conclusions.

3D printing technique was used to fabricate three different porous structures of PLA. Those structures could be used as scaffolds in tissue engineering field. The theoretical porosity was different from the experimental, suggesting that the printed microstructures could be different from the original designs. Such structural change should be considered in the designing process. The modulus of the octahedron cylinder was the highest, indicating that the mechanical properties can be controlled by changing the porous structure with use of 3D printing.

References.

(1)C.X.F. Lam, X.M. Mo, S.H. Teoh, D.W. Hutmatcher; Mater. Sci. and Engineering C20(2002) 49-56.

(2)Supia, J. Kundu, S.C. Kundu (2010); Tissue Engineering, Daniel Eberli(Ed.), ISBN:978-953-307-079-7.

骨粗鬆化脊椎における骨損傷メカニズムに関する研究

順天堂大学医学部整形外科 米澤郁穂

1. 緒 言

日本は超高齢化社会を迎え,特に女性高齢者の骨粗鬆症が社会的問題となっている. 骨粗鬆症になると骨密度 が大幅に減少し骨強度が大きく低下する. その結果,骨折が容易に生じることになる. 骨折を含めた骨関節障害 は,現在脳卒中に次ぐ寝たきり原因の第2位であり,高齢者の寝たきりはQOL (Quality of Life)を大きく低下させる(1). 骨粗鬆症に関連した骨折は,大腿骨頚部や脊椎椎体で多く見受けられるが,特に椎体の圧迫骨折は,た とえば椅子への着席等の低レベルの 圧縮荷重の作用下でも生じることがあるので注意を要する. さらに連続して 他の椎体に骨折が生じる続発性圧迫骨折も 重要な問題となっている. 比較的新しい椎体圧迫骨折の手術方法とし て,骨折部をバルーンで拡張後骨セメントを注入す るバルーン椎体形成術 (BKP: Balloon kyphoplasty)が行われている. しかし,この BKP 後の脊椎においても続発性圧迫骨折 が生じることが問題となっているが,このような現象をバイオメカニクス的に解析した研究はほとんど見受けられない.

そこで本研究では、実際に椎体圧迫骨折が生じ、BKP を行った患者の手術前後のCT 画像から、骨折が生じた椎体及びその上下の椎体の計 3 つの椎体からなる 3D-FE モデルを作成し、損傷モデルを導入した FEA をおこなった. BKP 前後の応力分布状態と隣接する椎体での損傷の発生状態を比較することで、BKP が及ぼす力学的影響について検討した.

2. モデル作成と解析方法

78 歳女性の脊椎のCT 画像をMechanical Finder ver.8.0 で読み込み,骨の輪郭を抽出し,その輪郭線を結合 することで脊椎モデルを作成した.今回の患者は,T12 に手術を行っていたため,その上下のT11 と L1 の 3 つの椎体からなる脊椎モデルを作成した.作成した脊椎モデルを図 1 に示す.骨部の材料特性は Keyak の 計算式を用いて骨密度より算出した(2). BKP 後のモデルの中央椎体の内部には骨セメントの存在を仮定して いる.各組織の材料特性値を表 1 に示す.骨損傷を再現するために,要素単位で破壊が進行する損傷モデル を導入した.引張破壊は最大主応力,圧縮降伏は相当応力,圧縮破壊は最小主ひずみで制御される損傷モデ ルを用いている.境界条件 として,椎間板に 850N,椎間間節に 150N の合計 1000N の分布荷重を 10 分 割にして加えた.また,モデル底部は完全拘束とした.

DR. ER	Table 1 Material properties				
	Tissue	Young's Modulus (MPa)	Poisson's Ratio	Critical Stress (MPa)	Yield Stress (MPa)
	Bone cement	3700	0.37	30	110
	Intervertebral disk	8.4	0.45	20.6	20.6
	Facet joint	11	0.2	20.6	20.6

Fig.1 3D spine models

3. 結果と考察

図2 に3 段階の分布荷重((A)100N, (B)500N, (C)1000N)における相当応力の分布状態を示す. それぞれ左側がBKP 前、右側が BKP 後である. BKP 前に比べて BKP 後の方が全体の相当応力の値が減少する傾向にあることが分かる. この現象の要因として,手術前は圧潰していた T12 がBKP を行うことによって形状がある程度復元され,応力が BKP 前よりも均等に分散されるようになったことが考えられる. また,内部に充填した骨セメントの影響によりT12 の剛性 が上昇したことも要因の一つであると思われる.



Fig.2 Equivalent stress distribution before and after BKP.

図 3 に 1000N の負荷での損傷要素数の分布状態を示す.また,図 4 に 2 種類のモデルにおける損傷要素数の増 加挙動を示す. BKP 前のモデルの方が損傷要素の発生が多く,特に T11 において多くの損傷要素が生じている.また,損傷形態としては引張破壊が最も多く,圧縮破壊の 2 倍程度生じていた. BKP 後のモデルでは,損傷要素の発生数は大きく減少しており,BKP により続発性圧迫骨折が抑制される可能性があることを示唆している.



4. 結 言

圧迫骨折が生じた患者のBKP 手術前後でのCT 画像より2 種類のFE モデルを作成し,損傷モデルを導入した FEA を行った.解析結果より,BKP により手術後の力学的安定性が向上し,続発性圧迫骨折が生じる危険性を低 減できることが示唆された.

文 献

(1) 森 論史, "骨粗鬆症患者の椎体圧迫骨折,脊柱変形と ADL 低下の関連",日本腰痛会誌,8(1):58-63,2002
 (2) Keyak JH, et al. Prediction of femoral fracture load using automated finite element modeling, J Biomech, 31, 1998,125-133.

歯根膜における3次元超微形態およびバイオメカニクス解析

中村桂一郎

要旨

歯根膜はその機能として歯牙の固定、咬合圧の緩衝等があげられる。また、歯根膜は咬合 力や矯正力による力学的負荷により、歯根膜線維の改変が行われ、歯槽骨およびセメント質 のリモデリングに関わるとされている。歯根膜の機能や組織構築は咬合力(力学的負荷)と 密接な関わりを持つ。

本研究は、歯根膜の組織構築における線維と細胞との関わり、力学的負荷に対する歯根膜 線維の配向性、ひいては歯根膜恒常性維持のメカニズムを、機能形態学的及び力学的に解明 することを目的とする。

マウスの歯牙-歯根膜を含む顎骨のµCT撮影を行い、歯牙-歯根膜-歯槽骨の3次元モデル を構築し、有限要素法にて解析する。解析対象組織が複雑な形態をしているため、µCT撮 影後の画像処理により効率的な3次元モデル構築が今後の課題である。

序論

歯根膜はその機能として歯牙の固定、咬合圧の緩衝等があげられる。また、歯根膜は咬合 力や矯正力による力学的負荷により、歯根膜線維の改変が行われ、歯槽骨およびセメント質 のリモデリングに関わるとされている。さらには歯根膜中には幹細胞が存在し、歯周組織に おける恒常性維持の中心的役割を担っていると考えられている。歯根膜の機能や組織構築 は咬合力(力学的負荷)と密接な関わりを持つ。

本研究は、歯根膜の組織構築における線維と細胞との関わり、力学的負荷に対する歯根膜 線維の配向性、ひいては歯根膜恒常性維持のメカニズムを、機能形態学的及び力学的に解明 することを目的とする。

方法

組織解析用サンプルの採取前にマウスの歯牙-歯根膜を含む顎骨のμCT撮影を行い、歯牙-歯根膜-歯槽骨の3次元モデルを構築する。その後、有限要素法を用いた歯根膜における力 学的解析を行う。組織学的解析およびμCT撮影は久留米大学医学部動物実験センターにて 行う。得られたμCTデータを九州大学 応用力学研究所へ持参し、歯牙-歯根膜-歯槽骨に おける力学的解析(応力分布、程度)を行う。

結果・考察

歯根膜線維の組織学的評価と細胞の3次元再構築は達成できたが、歯牙-歯根膜-歯槽骨

320

は組織学的に複雑な形態をしており、歯牙-歯根膜-歯槽骨の3次元モデル構築は実験中で ある。解析対象組織が複雑な形態をしているため、µCT 撮影後の画像処理より効率的な3 次元モデル構築が今後の課題である。

論文と学会発表のリスト

なし

金属フタロシアニンを吸着したグラファイト表面における電子状態の観測

宇部工業高等専門学校電気工学科 碇智徳

1. 目的

金属フタロシアニン(MePc)は機能性色素であり、有機半導体や色素増感太陽電池への応用が期待され ている。グラファイト等の炭素材料は、様々なエネルギー貯蔵デバイスの電極として活用されている。また、 MePcとフラーレン(C60)により pin 型やバルクヘテロ型の構造をした有機薄膜太陽電池の開発が行われて いる。エネルギー貯蔵デバイス分野における課題として、高効率化や小型化が挙げられる。そのため、炭 素材料表面上での有機分子の振舞を構造的及び電子状態的見地の両面から解明することで、その解決 の一助となると考えた。ここでは、有機分子の配向や原子・分子層界面及び表面状態の情報抽出を試みた。 そのため、本研究では、グラファイト及びグラフェン表面上或いは界面中でのアルカリ金属原子の吸着位 置や挿入される過程の解明について、準安定原子誘起電子分光法(MIES: Metastable-atom Induced Electron Spectroscopy)や紫外線光電子分光法(UPS: Ultraviolet Photoelectron Spectroscopy)などを用いて 観測し、電子状態により評価することを目的とした。

2. 実験方法

炭素材料表面として 4H-SiC(0001)基板上に表面分解法によって形成したグラファイトと高配高熱分解黒 鉛(HOPG)基板を選び、MePc 原子として中心金属(Me)が銅である CuPc を選んだ。また、SiC 基板では表 面分解後の表面を、HOPG 基板ではテープ剥離法により劈開後の表面を加熱することで清浄表面を得て、 低速電子線回折(LEED: Low Energy Electron Diffraction)により表面構造を確認した。試料温度は非接触 放射温度計で測定した。MIES 及び UPS 測定では、励起したヘリウム準安定原子(He*)を生成する際にパ ルス電圧による放電を行い、エネルギー分析器で検出する試料からの放出電子を飛行時間により区分す ることで、同時に測定した。MIES 測定では、入射粒子として He*を用いることで、最表面の局所的な電子 状態を非破壊で抽出することができ、吸着した有機分子の配向や吸着形態の観測に適している。

3. 実験結果と考察

図1に graphite/4H-SiC 基板上に CuPc 分子を蒸着した表面及びその表面の加熱時の MIES 測定を行った結果を示す。graphite/4H-SiC 表面での MIES スペクトルでは、3[eV]及び 7.5[eV]付近にグラファイトの 特徴を示す σ^* 軌道と π 軌道による電子放出のピークが確認できる[1,2]。さらに、LEED により(1×1)構造を 示すスポットを観察できたことから、SiC 表面上にグラファイトが形成されていることが分かった。この表面に CuPc を 2340[sec]までの蒸着を行った。各ピークの帰属については、他研究者らによる CuPc 単分子層で の電子状態密度の理論計算結果を参考に行った[3]。まず、360[sec]蒸着した表面では、6[eV]付近と 14.3[eV]に CuPc 分子中に含まれるベンゼン環とピロール環からの電子放出に起因する新たなピーク P₁ と P_{Pc} が出現した。MIES では、最表面の局所的な電子状態を反映するため、これらの電子放出は入射粒子 である He*と CuPc 分子中のフタロシアニンとの作用によるものであることが分かる。そのため、低蒸着量で は CuPc 分子が基板に対して垂直に立つような吸着形態をとったと考えられる。蒸着時間 720[sec]では 13.4[eV]に中心金属の Cu に起因する P_{cu}が現れ、2340[sec]では 12.2[eV]に CuPc 中のそれぞれの状態

322

密度を反映した P_{CuPc}が現れた。中心金属 Cu の状態 に起因した電子放出強度が増加したことから、CuPc 分子は基板に対して水平方向へ横たわるような吸着 形態へと変化したと考えられる。

CuPc/graphite/4H-SiC 表面を 600[°C]で 1[min]の 加熱を行った際の MIES スペクトルでは、CuPc を 120[sec]蒸着したスペクトル形状と近似しており、基板 表面より CuPc 分子が脱離していることが分かった。さ らに 1000[°C]までの加熱を行った際には、5[eV]付近 に Cu-C の結合に起因するピークが出現した。よっ て、中心金属である Cu は 1000[°C]の加熱温度でも 表面から完全には脱離せず、基板表面の C 原子と結 合することで表面に残ることが分かった。

HOPG 表面においても、CuPc 蒸着及び基板加熱 と言った同様の実験を行った。CuPc 分子の HOPG 表 面上の吸着初期としては、基板に対して立つような配 向を示し、蒸着量の増加に伴って水平方向へ横たわ るような結果を得ることができた。加熱時にも、Cu は HOPG 基板上に残存することを確認できたことから も、グラファイト表面からは加熱温度 1000[℃]では完 全に脱離しないことが分かった。



今回の研究成果では、グラファイト表面上での CuPc 分子の蒸着量変化及び加熱温度時の挙動を確認 することができたが、膜厚測定や面直方向の詳細な配向に関する検討までは至らなかった。そのため、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、中心金属を変えた際の MePc 分子配向や脱離メ カニズムに関するモデルを提案したいと考えている。

4. 参考文献

- [1] S. Kera et al., Surf. Sci., 566–568 (2004) 571–578.
- [2] S. Masuda et al., Phys. Rev. B, 49, 6 (1990) 3582.
- [3] B. Białek et al., Thin Solid Films, 436 (2003) 107-114.
- 5. 学会発表
 - [1] 平山楓、中村拓人、村岡幸輔、石井純子、寒川義裕、黒木伸一郎、内藤正路、碇智徳;
 「4H-SiC 再構成表面における初期酸化過程に関する研究」,九州表面・真空研究会 2016 (兼第 21 回九州薄膜表面研究会), 2016 年 6 月 11 日,九州大学筑紫キャンパス

6. 謝辞

本研究は、九州大学応用力学研究所の共同利用研究(28ME-17)の助成を受けたものです。

ダイヤモンドおよび酸化ガリウム半導体結晶の欠陥構造の解明と 電力素子特性との関連に関する研究

佐賀大学大学院工学研究科 嘉数 誠

1. 緒言

ダイヤモンドは 5.47eV のバンドギャップや高い絶縁破壊電界(>10MV/cm),高いキャリア移動度(電子:4500cm²/Vs,正孔:4500cm²/Vs),高い熱伝導(22W/cmK)など優れた物性値から次世代のパワーデバイスとして期待されている.しかし,基板中の結晶欠陥はデバイス応用時に耐圧低下やリーク電流の発生など,素子特性劣化に繋がるため課題である.これまで Sumiya らによって無欠陥の(001)HPHT 単結晶が報告されてきたが[1],最近では高品質の(111)HPHT 単結晶が報告されている[2].そこで今年度は我々は,低欠陥密度の(111)HPHT ダイヤモンド単結晶のシンクロトロンX線トポグラフィー観察を行った.

2. 実験

試料は(111)面の種結晶から成長させた(111)面 IIa型 HPHT ダイヤモンド単結晶である.これまで超高 純度,高品質結晶が報告されているが[2],本研究では欠陥の観察の為,比較的欠陥密度の高い試料を用 いた.寸法は4.5×8.0×0.4 mm³である.X線トポグラフィー観察は九州シンクロトロン光研究センター (SAGA-LS)のビームライン BL09 で行った.入射X線は,二つのSi単結晶を平行に配置した分光器を用 いて単色化した後,ブラッグ配置に設置した試料で回折させ,X線フィルムを用いて反射像を撮影した.

3. 結果

図1に(111)面 HPHT ダイヤモンド単結晶のX線トポグラフ像を示す.回折条件はそれぞれg=220,022, 202 である.主に積層欠陥が観察され,それぞれの向きからSF-A,SF-B,SF-C と分類した.g=220のト ポグラフ像ではSF-A が観察されるが,SF-B とSF-C はコントラストが消滅している.同様にg=022の トポグラフ像ではSF-B が観察されるが,SF-A とSF-C はコントラストが消滅しており,g=202のトポ グラフ像ではSF-C が観察されるが,SF-A とSF-B はコントラストが消滅している.これは積層欠陥の すべり面を示す欠陥ベクトルf と回折ベクトルgの消滅則によるものと考えられる.従って,SF-A は g=022,202の時f·g=0を満たしている.同様に,SF-B はg=220,202の時f·g=0を満たし,SF-C はg=220, 022の時f·g=0を満たしている.これらの結果よりSF-A,SF-B,SF-C のすべり面をそれぞれ(111),(111),(111),(111)と同定した.

また積層欠陥像が消滅しているトポグラフ像には,積層欠陥端部に部分転位が観察された.これらの 部分転位はバーガーズベクトルからショックレー部分転位であることがわかった.従ってこれらの積層 欠陥をショックレー型と同定した.

324

4. 結論

(111)面 HPHT ダイヤモンド単結晶のシンクロトロン X 線トポグラフィー観察を行い,結晶欠陥を評価した.主に積層欠陥が観察され,欠陥ベクトルfと回折ベクトルgの消滅則から,それぞれのすべり面を同定した.また,積層欠陥の部分転位を観察し,これらの積層欠陥をショックレー型積層欠陥と同定した.

謝辞

本研究は、九州大学応用力学研究所の共同利用研究の助成を受けて行われました.本研究で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.

参考文献

- [1] H. Sumiya, K. Tamasaku, Jpn. J. Appl. Phys. 51 (2012) 090102.
- [2] H. Sumiya, K. Harano, K. Tamasaku, Diam. Relat. Mater. 58 (2015) 221.



Fig.1 X-ray topography images of (111) HPHT diamond single crystal for $\mathbf{g} = 220, 022$ and 202.

レーザドップラ流速計を用いた風車翼近傍流れの計測

三重大学 大学院工学研究科 機械工学専攻 前田 太佳夫

1. 要旨

水平軸風車の回転翼周りの流れ場を解明するため、風洞において風車スケールモデルを運転し、レーザ ドップラ流速計により翼近傍の速度分布を測定した.測定した速度場から、翼の失速特性、循環および翼端 渦について考察した.

2. 序論

水平軸風車の翼は,一般に翼素遀動量理論によって設計される.翼素遀動量理論は,二次元翼の空気力 学的特性を用いる設計手法であり,数値流体解析と比較して計算負荷が少ない.しかし,風車周りの流れ は三次元であり,実測される風車出力と翼素運動量理論に基づいて計算される風車出力に差を生じる.こ れの解決策として,翼素運動量理論に三次元効果の補正が導入されているが,正確な補正に必要な風車翼 近傍の三次元速度場を示した例は少ない.

本研究の目的は、風車翼近傍の三次元的な速度場を実験的に明らかにすることである. そのためにレーザドップラ流速計を用いて、翼近傍の三次元速度場を明らかにする.

3. 方法

本研究ではスケールモデル風車を風洞内で運転し、速度場に外乱を与えないように静止系に設置され たレーザドップラ流速計により三次元速度を計測する.レーザドップラ流速計による測定体積は約 0.15mm の球形状であり、翼近傍の速度を高い空間分解能で計測する.静止系に設置されたレーザドッ プラ流速計の検査体積は空間的に固定されているため、翼回転中のアジマス角ごとの速度データを取得 することより、翼に対する相対位置での速度を計測し、得られた速度データから回転速度を差し引くこ とにより翼に対する相対速度を算出する.また、回転中の翼は振動し、翼面と速度測定点との距離が変 化するため、レーザ変位計により翼面に対する相対的な測定位置を正確に計測する.

- 4. 結果と考察
- (1) 無次元半径位置 r/R=0.70, 0.80, 0.85, 0.90, 0.95 では、前縁付近で流れは増速し、後縁にかけて減速 していく.これは順圧力勾配、逆圧力勾配によるものである.また、半径位置が翼端に向かうに従い、前縁におけ る増速領域は減少する. 翼端位置 r/R=1.00 での翼前縁付近では、他の半径位置と比較すると増速領域が減少 するとともに減速領域も生じている.この理由として、翼端渦により翼断面の循環量が大きく低下したためと 考えられる.
- (2) 翼周りの流れの三次元性について、r/R=0.70の半径位置では、流れの翼幅方向速度は、前縁から後縁の 全体にわたり翼端方向流れとなる. これよりもやや翼端寄りのr/R=0.80の位置では、流れの翼幅方向速度 は、無次元翼弦位置 $0 \le x/c \le 0.4$ で緩やかな翼端方向流れとなる. 一方、最大翼厚位置よりも後縁よりの $0.5 \le x/c \le 1.0$ の翼面近傍では、翼根方向流れとなる. さらに翼端に近いr/R=0.85の場合、 $0 \le x/c \le 0.7$ で翼端 方向流れを持つ. また、 $0.7 \le x/c \le 1.0$ で翼近傍において翼根方向流れとなる. また前縁から後縁の全体にわ たり翼端方向流れとなる. 翼端に近いr/R=0.95の場合、 $0 \le x/c \le 0.7$ て翼端方向流れとなる. 実端に近いr/R=0.95の場合、 $0 \le x/c \le 0.7$ て翼端方向流れとなる. これよりでこれ、これのこれを見合いた。 これのこれを見合いた。

- (3) 翼近傍の速度場から翼断面の循環量分布を計算すると、無次元半径位置 r/R=0.70, 0.80 では、循環量 は概ね一定の値を示す. r/R=0.80 から翼端に向かうにしたがい循環量は低下する. この理由として、翼端 から生成される翼端渦の影響によるものと考えられる.
- (4) 翼端よりも半径外側の速度ベクトルの計測から、翼端位置 r/R=1.00 付近で渦コアを確認でき、翼端渦の 発生を可視化することができた 発生した翼端渦は、下流力向で半径外側へ移動していく.なお、翼端船の循環量は翼端からの 距離の増加こしたが、低下する.また、翼端寸近では正日面と負日面の圧力差を埋めるために、翼の外側から気流の流れ込み が発生するため、翼端匠傍の負圧面で半径内向きの流れが生じている.
- 5. 学会発表

N.Sugimoto, Y.Kamada, T.Maeda, J.Murata, S.Ito, Wind tunnel study on the flow characteristics of a rotating blade of a horizontal axis wind turbine in three-dimensional analysis, Proceedings of 15th World Wind Energy Conference and Exhibition, Website, 4p., 2016.

6. 研究組織

研究代表者 前田太佳夫(男・53歳),三重大学大学院工学研究科機械工学専攻,教授 研究協力者 鎌田 泰成(男・48歳),三重大学大学院工学研究科機械工学専攻,准教授 研究協力者 杉本 規彰(男・24歳),三重大学大学院工学研究科機械工学専攻,博士前期課程 研究協力者 伊藤 駿平(男・23歳),三重大学大学院工学研究科機械工学専攻,博士前期課程 所内世話人 吉田 茂雄,九州大学応用力学研究所,教授



図1 最適周速比 6.0 におけるロータ翼面上の速度ベクトル (r/R=1.00)



図2 翼端近傍における速度ベクトルと翼端渦

ドップラーライダを用いた水平軸風車の制御

三重大学 大学院工学研究科 機械工学専攻 前田 太佳夫

1. 要旨

流入風変動に対して,時間遅れのない風車制御を構築することで,風速変動による出力変動を抑制する風車制御手法の開発を行う.そのため,風計測ドップラーライダにより風車上流の風速を観測し,風 車翼のピッチ角を操作することにより予測値と実測値の比較を行った.

2. 序論

風力発電の導入課題として、自然風に起因する出力変動が挙げられる.そのため、風車の出力変動の 抑制に注目が集まっているが、従来の方法としては、風車の発電量を監視することにより、風車の出力 を制御しているため、風の変動に対して出力制御に遅れが生じる.また、従来の風車制御にはカットイ ン、カットアウト等の限られた運転制御に対して風速の観測値が使われ、常用運転時の出力制御には風 速は活用されていない.

本研究は、風車上流の風速をドップラーライダにより計測し、計測した風データを風車の空力制御に反映し、風速変動に対して出力変動を抑制することを目的とする.そのためにライダの観測結果を用いたフィードフォワード制御を構築し、その制御をフィールド風車に適用して実証試験を行う.

3. 方法

3.1 テストサイトおよび実験装置

本実験は三重大学生物資源学邪附属紀伊・黒潮生命地域フィールド・サイエンスセンター附帯施設農 場にあるテストサイトにて行った.本サイトは三重県津市高野尾町に位置する.実験設備は 100kW ア ップウィンド式水平軸風車(ロータ直径 21m, ハブ高 30m),9ビーム式ドップラーライダ,風況観 測マストに取り付けられた各種風況測定機器等の実験装置で構成されている.なお,供試風車から見た 風況観測マストの方位は 303°,ライダの観測方位は 296°である.供試風車と風況観測マストおよびライ ダ間の距離はそれぞれ 19.69,184.8m である.本サイトで,初秋から春先まで,日本海側から琵琶湖, 鈴鹿山脈 を越えて吹き降ろす通称「鈴鹿おろし」と呼ばれる季節風が吹くため,実験結果は主として冬季のデータを整理 した.

3.2 制御方法

本研究では、ライダで観測した風速を用いて、ピッチ角操作のフィードフォワード制御を構築する. 出力変動抑制を目的としたフィードフォワード制御は、ライダで観測された流入風速およびそのときの 風車運転状態に対応して目標出力を導くようにピッチ角を操作する.流入風速の観測は、ナセル搭載ライ ダが望ましいが、実証試験用風車のナセルスペースの都合上、風車後方の地表面に設置されたライダにより行 う. ピッチ角の指令値は、空力解析コード FAST、加速度ポテンシャル法 APM または蓄積した運転データから 作成したデータベースを参照し決定する.また、ピッチ角は風車上流で観測された風がロータ面に到遉する時に指 令ピッチ角になるよう操作する.このピッチ制御により、風車翼の迎角を変化させ、ロータトルクおよび出力を制 御する.ピッチ角操作を伴うフィードフォワード制御の出力変動抑制効果を、通常制御時の出力変動と比較・評 価する.

4. 結果および考察

- (1) ライダにより取得された風速を超音波風速計により取得された風速と比較した. その結果,両者で取得された風速は良く一致し,ライダを流入風観測機器として使用できることを検証した.
- (2) 空力弾性モデルFASTと加速度ポテンシャル法APMを用いた定常数値解析結果を風車性 能試験結果と比較した.数値解析結果と実験値は広範囲の風速,ピッチ角でよく一致した.そ

の結果から数値解析の妥当性を検証した.また,数値解析により,風速およびピッチ角の風車 出力との関係を示すデータベースを構築した.

- (3) 出力変動抑制を目的としたライダ支援のフィードフォワード制御およびフィードバック 制御の導入により、風変動により、風車の設定出力よりも実際の出力が高くなることが予測され るときには、導入した制御により風車出力を抑制することができた。
- (4) ライダ支援制御およびフィードバック制御において参照する風速とピッチ角と風車出力の関係を示すデータベースの変数に風車回転数を加えた.そのデータベースを参照することにより、より設定出力に近い出力を得ることができた.
- (5) ライダ支援制御とフィードバック制御から得られた結果を,設定出力からの差に対する 出現頻度で表すことにより,ライダ支援制御の方がフィードバック制御よりも出力変動 を抑制できることを示せた.
- 5. 学会発表

A.Sawaki, Y.Kamada, T.Maeda, J.Murata, K.Morimoto, Experimental studies on load suppression of wind turbine by Lidar associated control, Proceedings of 15th World Wind Energy Conference and Exhibition, Website, 4p.,2016.

6. 研究組織

前田太佳夫 (男·53 歳), 三重大学大学院工学研究科機械工学専攻, 教授 研究代表者 研究協力者 鎌田 泰成 (男·48 歳), 三重大学大学院工学研究科機械工学専攻, 准教授 研究協力者 村田 淳介 (男・35 歳), 三重大学大学院工学研究科機械工学専攻, 助教 研究協力者 (男・24歳), 三重大学大学院工学研究科機械工学専攻, 博士前期課程 澤木 淳 研究協力者 昂太 (男・23 歳), 三重大学大学院工学研究科機械工学専攻, 博士前期課程 森本 吉田 茂雄,九州大学応用力学研究所,教授 所内世話人



図1 ライダ支援制御(B)または従来型制御(B_M)を適用したときの風車出力変動の出現頻度

AIN 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 地域イノベーション学研究科) 所内世話人: 寒川義裕(九州大学 応用力学研究所)

<u>背景</u>

窒化物アルミニウム(AIN)厚膜(テンプレート)の開発を目的とする。AIN 基板および関連材料(AIGaN 薄膜)を用いたデバイスの応用例として、電子線励起および LED(Light Emitting Diode) による深紫外光源が挙げられる。この光源では AlGaN 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、AIN、GaN 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。 本研究は継続課題であり、今年度は AlGaN/AIN の成長条件について熱力学解析を基にした理論解 析手法により検討した。

研究方法

本研究では、AlGaN/AlN 薄膜の高品質化・組成制御を目的としている。AlGaN 薄膜は一般に有機 金属気相成長(Metalorganic Vapor Phase Epitaxy: MOVPE)法により作製される。ここで、AlGaN の エンドメンバーである AlN と GaN の分解温度を比較すると後者の方が低く、この材料特性に起因 して成長温度の上昇とともに Ga 取込み効率が低下することが知られている。また、Al-N 結合長よ りも Ga-N 結合長の方が長いため、AlN 基板上にコヒーレント成長した AlGaN は基板面に平行な 2 次元の圧縮応力を受けている。ここで「コヒーレント成長」とは、下地基板の格子定数を引き継 いで成長することである。本研究では、(1) 2 次元の圧縮応力を受けた AlGaN の有効混合エンタ ルピーを原子間ポテンシャル計算により求め、(2) その物性値を用いて熱力学解析を行うことに より基板の格子拘束を考慮した気相一固相関係の相図を作成した。

研究結果および進捗状況

図1に計算モデルの模式図を示す。本理論解析では、AIN 基板上にコヒーレント成長した Al_xGa_{1-x}N 薄膜について、ガス原料供給比 ($R_{AI} = p_{AI}/(p_{AI} + p_{Ga})$) と固相組成 x の相関を解析する。上述のように、AI-N 結合長よりも Ga-N 結合長の方が長いため、AlGaN/AIN は 2 次元の圧縮応力を受けている。ここで、一般的なバルク結晶(混晶)の混合エンタルピーは 2 次関数により近似できることが知られている。この場合、理想系と実存系の間の誤差を修正するための物理量(活量)は次式により求められる。

$$a_{\text{AIN}} = x \exp\left[\frac{(1-x)\Delta H}{xRT}\right] , \qquad (1)$$

$$a_{\text{GaN}} = (1-x) \exp\left(\frac{x\Delta H}{(1-x)RT}\right) . \qquad (2)$$

しかし、AlGaN/AlNは2次元の圧縮応力を受けているため混合エンタルピーはxの2次関数では近似できず、n次の多項式で近似することになる。(紙面の都合により原子間ポテンシャル計算により求めた有効混合エンタルピーの結果は省略する。)この場合、式(1)、(2)を使用することはできないので以下のように式変形を行った。

$$a_{AlN} = x \exp\left[\frac{(1-x)\frac{d}{dx}\Delta H + \Delta H}{RT}\right] , \qquad (3)$$

$$a_{\text{GaN}} = (1 - x) \exp\left[\frac{-x\frac{d}{dx}\Delta H + \Delta H}{RT}\right] \,. \tag{4}$$

式(3)、(4)を用いて行った熱力学解析の結果を図2に示す。横軸は R_{AI} (= $p_{AI}/(p_{AI} + p_{Ga})$)、縦軸は固相組成xである。図から、成長温度を1200°Cから1300°Cに上げると、Gaの取込み効率が低下し、AI組成xが増加することがわかる。例えば、 R_{AI} = 0.4において、1200°Cでは $x \sim 0.4$ であるのに対し、1300°Cではx > 0.5となっている。ここで得られた知見を実験にフィードバックし、高品質のAlGaN/AIN テンプレートの開発を推し進めて行く。



図2 熱力学解析により求めた、AlGaN/AlN MOVPE における気相一固相関係の一例。

浮体式洋上風力発電システムのモデル予測制御による出力変動と浮体動揺の安定化

大阪府立大学 大学院工学研究科 涌井徹也

1. 序論

風力発電の世界的な普及を推進するためには洋上風力発電の導入が不可欠である.特に,大水深海域 の広大な日本では浮体式洋上風力発電への期待が高まっている.浮体式洋上風力発電システムでは高風 速域において定格出力を保持するために翼ピッチ操作を行うと,風力タービンによる負性減衰効果の影 響を受けて浮体動揺が増大する.これまでに,トレードオフ関係にある出力変動と浮体動揺の抑制を両 立するための制御方策に関する研究が行われてきた.しかし,風速や波高変化が浮体式洋上風力発電シ ステムに対して外乱として作用するため,システムの出力に応じたフィードバック制御のみでは,出力 変動と浮体動揺の抑制が十分に行えない場合がある.そこで本研究では,有限時間先の制御対象システ ムの推定挙動に基づいた多変数制御動作を最適化するモデル予測制御に着目し,空力弾性解析を通して 浮体式洋上風力発電システムの出力変動と浮体動揺をともに安定化しうる制御手法を開発した.

2. モデル予測制御手法

開発した浮体式洋上風力発電システムのためのモデル予測制御手法のブロック線図を図1に示す.モ デル予測制御では、予測区間において、現在のシステム出力(制御量)の計測値とその設定値、現在の 制御入力(操作量),さらには予測区間における外乱入力予測値を与条件として、システムの制御挙動を 評価するコスト関数が最小となるように制御区間の制御入力を決定する最適化問題を解く.この際に、 内部モデルによるシステムの状態および出力の推定挙動、システム出力および制御入力の変化範囲など を制約条件として考慮する.得られた最初の時間ステップの制御入力のみを実際に適用し、次の制御周 期において新たな与条件の下で最適化問題を解いていく後退ホライズン手法を採用する.

予測区間におけるシステム出力の推定値は状態空間方程式で表す内部モデルより算出する.状態空間 方程式は平衡点でシステムの挙動を線形化することで得られ,離散的な風力タービンアジマス角の下で 得られた値を平均化する.また,内部モデルにおける状態変数は、システム出力計測値,制御入力,外 乱入力計測値よりカルマンフィルタを用いて推定する.システム出力に対しては、その上・下限値制約 を考慮する.また、制御入力には上・下限値制約に加えて、一制御周期経過後の変化量の上・下限値制 約を考慮する.さらに、現在のシステム出力の測定値および制御入力を初期条件として入力する.また、 ライダによる風速場の計測より算出した予測区間における外乱入力予測値も初期条件として入力する.

最小化すべきコスト関数は,予測区間に おけるシステム出力の設定値に対する追従 誤差と制御入力の変化量のノルム,および スラック変数の2乗値の重み付け和とし, 多目的の制御性能評価を行う.

定式化した各時間ステップにおける最適 化問題は二次計画問題に帰着し, MATLAB Model Predictive Control Toolbox を用いてコ ード化して解いた.



図1 モデル予測制御のブロック線図

3. 空力弾性解析による動特性評価

対象とする浮体式洋上風力発電システムの空力弾性解析には NREL が開発した FAST を使用した.風 カタービンには NREL で設計された 5 MW 機を,また,浮体にはスパー型の OC3-Hywind spar-buoy モ デルを用いた.モデル予測制御におけるシステム出力は,ローター回転数,タワー上部の前後・左右変 位ならびにその速度,浮体のサージ,スウェイ,およびヒーブの変位ならびにその速度,ロール,ヨー, およびピッチの角度ならびにその角速度の 17 つとした.その内,ローター回転数と浮体ピッチ角速度 に設定値を与えて制御量とした.制御入力は同期翼ピッチ操作と発電機トルクとした.状態空間方程式 の線形化は流入風速 18 m/s,ローター回転数 12.1 rpm (定格値),および静水下で行った.

乱流変動風況および不規則波高変化に対する浮体式洋上風力発電システムの挙動解析例を図 2 に示 す. ローター回転数のフィードバック制御のみを行った場合に比べて,モデル予測制御を行った場合に は発電出力と浮体ピッチの変動が減少することを明らかにした.また,ハブ高さへの流入風速もしくは ローターへの流入平均風速を予測値として用いることで,発電出力と浮体ピッチの変動抑制効果が向上 することを明らかにした.



図2 乱流変動風況および不規則波高変化時の浮体式洋上風力発電システムの挙動

4. 論文と学会発表のリスト

- T. Wakui, D. Miyanaga, M. Yoshimura, R. Yokoyama, "Model Predictive Control for Reducing Power Output Fluctuations and Platform Motions in a Floating Offshore Wind Turbine-Generator System", Proceedings of the 15th World Wind Energy Conference, Paper No. PS-B-3, 4 pages.
- (2) 涌井徹也, 宮長大輔, 横山良平, モデル予測制御を用いた水平軸型風力発電システムの出力変動抑制, 第 38 回風力エネルギー利用シンポジウム, pp. 380–383, 2016.11.30-2016.12.1, 科学技術館.

風レンズ風車用の炭素繊維強化複合材(CFRP)の衝撃圧縮特性の 負荷方向依存性

岡山理科大学 工学部 中井 賢治

1. 緒 言

原子力発電所の事故以降、国内外において再生可能な新エネルギとして風力発電が注目されている。 九州大学では、エネルギ効率を高めた次世代風車「風レンズ風車」を開発し、山間部や海上に設置して、 様々な性能実験を行っている。今後、エネルギ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金属材料に代わっ て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変換工 学分野では、真空樹脂含浸製造(Vacuum assisted Resin Transfer Molding: VaRTM)法による 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、台風や大波・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。また、風レンズ風車を設置する場 所によっては、直射日光などの影響により風車の温度が上昇することもあるため、設計する際には温度 の影響も重要である。

本研究の目的は、VaRTM 法により成形した直交積層カーボン/エポキシ複合材の主軸 3 方向すなわ ち繊維(1-),面内横(2-),板厚(3-)方向における静的・衝撃圧縮応力−ひずみ特性を、実験的に評価 することを目的とした。高ひずみ速度(最大 10³/s)での圧縮応力−ひずみ関係を、ホプキンソン棒法に より決定した。また、インストロン試験機及び恒温槽を用いて、低および中間ひずみ速度(10⁻³~10⁻¹/s) における圧縮応力−ひずみ関係の温度依存性(*T* = 20,60,80 °C)を求めた。これらの結果を比較する ことにより、ひずみ速度と温度が主軸 3 方向における圧縮特性(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)に及ぼす影響について考察した。

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 10 mm の直交対称積層([0/90]₈₈)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。この積層複合材から、最上・下面での繊維方向(1-d),面内横方向(2-d),板厚方向(3d)に対して機械加工により直径 d=8 mm の円柱状の静的および衝撃試験片を採取した。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 E9-89a¹⁾規格で推奨されている細長比 $h/d=1.5\sim2.0$ となるように厚さ(h=12 mm) を決定した(3-d についてのみ、板厚の制限により h=8 mm とした)。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($0.5 \leq h/d \leq 1.0$)²⁾に入るよ うに、厚さ(h=4 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)及び恒温槽を用いて、室温・高温下(T = 20,60,80 ℃)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。また、繊維(1-),面内横(2-)方向の圧縮試験(図 1参照)では、試験片端面での帚状変形(end brooming)に引続き縦割れが生じて非常に低い極限圧縮 強度しか得られないので、この破壊モードを阻止するために円形(*d*=8 mm)の孔をあけた高強度鋼リ ング(直径 30 mm,厚さ 3 mm,インコネル鋼 625 製)を試験片両端に取り付けている(図2参照)。



図1 直交積層複合材の繊維(1-),面内横(2-) 方向における静的圧縮試験の様子



図2 直交積層複合材の繊維(1-),面内横(2-) 方向における静的試験に使用した鋼製リング

3・2 ホプキンソン棒法による衝撃圧縮試験 図3に示す標準型ホプキンソン棒装置を使用して、 衝撃圧縮試験を室温にて行った。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、著者らの文献³⁾を参照されたい。



図3 圧縮型ホプキンソン棒装置の概略図

4. 試験結果および考察

4・1 室温におけるひずみ速度の影響 繊維(1-),面内横(2-),板厚(3-)方向における静的お よび衝撃圧縮応力–ひずみ関係(室温)の比較を、図4に示す。実線が衝撃試験,破線が低ひずみ速度 試験の結果を示している。どの方向においても、ひずみ速度の上昇と共に極限圧縮強度(最大圧縮応力 値)はわずかに増加しているが、極限圧縮ひずみは顕著に低下していることがわかる。極限圧縮強度 σ_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5に示す。ど の負荷方向においても、極限圧縮強度は正のひずみ速度依存性を示している。また、ひずみ速度に関係 なく、板厚(3-)方向における極限圧縮強度は、他の2方向におけるそれよりも非常に高い。これは、 板厚(3-)方向では、母材であるエポキシ樹脂の固有の粘弾性特性による影響が大きいためである。



図4 直交積層複合材の繊維,面内横,板厚方向に おける静的・衝撃圧縮応カーひずみ関係(室温)



図5 直交積層複合材の極限圧縮強度の ひずみ速度及び負荷方向依存性(室温)

4・2 静的負荷下における温度の影響 面内横 (2-),板厚 (3-)方向における、低ひずみ速度 (10⁻³/s) での圧縮応力ーひずみ関係の温度依存性を、図 6,7に示す (繊維 (1-)方向については、面内横方向と同じ傾向のため、省略する)。面内横 (2-)方向では、温度の上昇とともに極限圧縮強度 σ_c 及び極限圧縮ひずみ ε_c は低下していることがわかる。一方、板厚 (3-)方向では、温度 Tが 60~80 ℃の範囲において σ_c 及び ε_c はほとんど変化していないことがわかる。









低ひずみ速度(10⁻³/s)及び中ひずみ速度(10⁻²~10⁻¹/s)での極限圧縮強度 σ_c を温度 Tに対してプロットした結果を、図 8,9に示す。ひずみ速度に関係なく、繊維(1-)及び面内横(2-)方向における極限圧縮強度の温度依存性は、板厚(3-)方向におけるそれよりも非常に高い。



5. 結 言

直交積層カーボン/エポキシ複合材の繊維(1-),面内横(2-),板厚(3-)方向の圧縮応力-ひずみ特性(極限圧縮強度,極限圧縮ひずみ,吸収エネルギ)のひずみ速度・温度依存性を、標準型ホプキンソン棒法及びインストロン試験機を用いて評価した。その結果、次のような結論を得た。

- (1) 負荷方向に関係なく、ひずみ速度が上昇するにつれて、極限圧縮強度はわずかに増加するが、極限圧縮ひずみは顕著に低下する。
- (2) どのひずみ速度においても、繊維(1-)及び面内横(2-)方向における極限圧縮強度の温度依存性は、板厚(3-)方向におけるそれよりも非常に高い。

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.
- (4) 横山 隆,中井賢治,稲垣智也:一方向強化カーボン/エポキシ積層複合材の衝撃圧縮破壊挙動:直 交異方性材料の主軸3軸における特性,材 料, Vol.58, No.11 (2009), 887–894.

謝辞

本研究は、九州大学応用力学研究所の共同利用研究の助成を受けたものである。ここに記して、感謝の意を表する。

研究組織

- 研究代表者 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 横山 隆(岡山理科大学 名誉教授)
- ・研究協力者 ABUSREA, M. Ramadan (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)

風力エネルギーの効率的利用に資するメソ気象モデルによる 局所風況場の再現・予測特性に関する研究

東京農工大学農学研究院

辰己 賢一

1. 目的

自然エネルギーの効率的な利用に資する技術開発は、持続可能かつ再生可能なエネルギーの安定的供給に向 けて国内外で重要度を増している.特に、風力エネルギーは、コストが相対的に低く、自然環境にも優しい再 生可能エネルギーとして近年注目されており、その利用量は少しずつ増えてきている.このため、風力エネル ギーの導入量予想増加を見込み、風車を効率的に配置し、その性能を客観的に評価し予測するための技術が求 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、特に複雑地 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、メソ領域気象モデル WRF と RIAM-COMPACT®を用い、国見山ウィンドファームを対象に風 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、両モデルにより得られた再現計算結果 等の実測値との比較・分析により、局地風解析を実施する上での最適手法のあり方と課題を明らかにすること を目的とした.

2. 計算方法・設定

本研究では、メソ領域気象モデル WRF および RIAM-COMPACT®を用い、数値風況シミュレーションを実施した.図1に計算領域を示す.第1領域(最外側の領域)は九州南部を含む格子点数49(東西方向)×55(南北方向)で水平格子間隔は9km、第2領域(第1領域の内側)は格子点数61×61で水平格子間隔は3km、第3領域は薩摩半島を含む100×100で水平格子間隔は1km、第4領域は国見山ウィンドファームを含む格子点数82×61で水平格子間隔は333mとした.いずれの領域も鉛直層数レベルは地表から50hPa面までの28層とし、

各レベル面は下層では蜜に,上層では粗に設定し た.

解析対象期間は、2012年12月9日12時から2012 年12月12日18時(UTC時刻)とし、時間ステッ プは、第1領域が27秒、第2領域が9秒、第3領 域が3秒、第4領域が1秒と設定した.また、シミ ュレーションのための初期値・境界値には気象場に は米国環境予測センターNCEP/NCARの全球客観 解析データを用いた.

なお、本研究で使用した雲微物理・地表面過程・ 大気放射・大気境界層に対する物理過程オプション を表1に示す.前節で示した第1領域では、雲微物 理を用いて積雲を陽に表現できない格子スケール であるため、積雲パラメタリゼーションを併用し た.以上のWRF計算設定により、国見山ウィンド ファームを対象とした風況再現計算を実施した.



図1 本研究で設定した計算領域

雲微物理スキーム	WSM5 (WRF-Single-Moment-MicroPhysics class 5)
積雲パラメタリゼーション	New Kain-Fritsch (第1領域), None (第2, 3, 4領域)
境界層乱流	Mello-Yamada-Janjic scheme
地表面スキーム	Thermal diffusion scheme
大気放射スキーム	RRTM scheme (longwave), Dudhia scheme (shortwave)

表 1 WRF 計算において採用した物理過程オプション

3. 結果および考察

図 2 に, WRF による再現計算により得られた第 4 領域における地上高 70m の地上水平風速(2012 年 12 月 12 日 00 時(UTC 時刻))を示す.図より,ウィンドファームのほぼ全領域で南よりの 10m/s を超える強風域 が再現された.

本研究では、WRFによる国見山ウィンドファームにおける再現計算に加え、RIAM-COMPACTによる風況 再現計算を行っている.今後は実測値、両モデルによる風速・風向再現計算結果を比較することにより局地 風解析を定量的に実施し、適切な風力エネルギーの持続可能な利用と風車の効果的な配置に資する風況予測 システムの高精度化を図っていく予定である.



OUTPUT FROM WRF V3.6.1 MODEL WE = 82 ; SN = 61 ; Levels = 45 ; Dis = 0.333333km ; Phys Opt = 3 ; PBL Opt = 1 ; Cu Opt = 0

図2標高値と風速分布(2012年12月12日00時(UTC時刻))

多層接結構造を有する多次元カーボン織物複合材料の開発

信州大学繊維学部

機械・ロボット学科 倪 慶清 九州大学応用力学研究所

汪 文学

1. 目的

炭素繊維強化プラスチック(CFRP)は、比強度および比剛性において金属材料よりも優れ ており、軽量かつ高強度な材料である.それらの優れた特徴により、自動車、航空機およびス ポーツ用品等に広く使用される.また、CFRP は繊維方向に弾性率および強度が高いので、材 料設計の際に繊維の配置方法を変えることによって、自由な設計が可能である.従来のCFRP は炭素繊維を一方向に揃えて配置されたものや、一重の炭素繊維織物に樹脂を含浸させ、必要 な厚みの分だけ積層して製造される.しかし積層構造であるため、板厚方向の強化が不十分で あり、さらに、層間は樹脂の硬化による接着のため、層間じん性が低いという問題がある.

そこで本研究では、接結糸を含む多重織物に着目した.接結糸とは、織物の組織内に含まれる、層と層を繋ぐ糸のことである.その織物を利用して CFRP を作製すれば、一層あたりの厚みを増加させることができる.その結果、設計した CFRP の板厚にするために必要な層数を減らすことができる.また、接結構造を有する CFRP の層間じん性は、単純な多重織物を用いた CFRP より大幅に向上されることが予想されており、新しい高じん性の積層板の開発が期待される.

2. 実験手法

◆多重織物 多重織物は特注の高強度繊維対応型小幅織機を用いて製織した。層間の接結箇所 を変えた四重織物を5種類作製した。炭素繊維はT300 3000-40Bを用いた.四重織物の一番上を一 層目とし、その次を二層目、同様に三層目、四層目とした.一層目と四層目を接結させた四重織 物を1-4接結織物とした.また、一層目と四層目を接結し、二層目と三層目を接結させた四重織 物を1-4・2-3接結織物とした.その他に1-2・2-3・3-4接結織物、1-2・3-4接結織物を作製した.代 表例として1-4接結織物の繊維配向をFig.1に示す.経糸および緯糸をそれぞれ、円および実線で 示す.



Fig. 1. Fiber orientation pattern for four-layer fabric.

Fig. 2. Load-COD curves of DCB test.

◆CFRP作製 作製した多重織物を用いてVaRTM 成形によりCFRPを作製した.本研究では成形型を使わずに,2枚の離型フィルムの間に積層させた織物を配置し作製した.エポキシ樹脂および硬化剤はナガセケムテックス株式会社製のDENATITE XNR 6815およびDENATITE XNH 6815

を用いた.作製した四重織物を中央に配置し,その上下に東レ株式会社製トレカクロスC06343 を4枚ずつ積層し計12層とした.作製した四重織物の中央がき裂進展面となる.初期き裂導入の ため,6層目と7層目の間にフロン工業株式会社製のテフロンPFAフィルム(厚さ25µm)を50mm挿 入した.予き裂長さを変化させる試験片はテフロンPFAフィルムを70mm挿入した.1-4接結織物 を用いて作製したCFRPを1-4試験片とし,同様に1-4・2-3試験片,1-2・2-3・3-4試験片,1-2・3-4試験片を作製した.予き裂長さ70mmの試験片をそれぞれ1-2・3-4(70)試験片および1-4・2-3(70) 試験片とした.

◆破壊じん性評価 JIS K 7086に基づきDCB(Double Cantilever Beam)試験を株式会社島津製作所 製の万能材料試験機オートグラフAG-20kNDを行った. DCB試験により各試験片のき裂進展過程 のモード I 層間破壊じん性値を求めた. モード I 層間破壊じん性値G_{IR}はJIS K 7086に基づく式(1) を用いて得た.

$$G_{IR} = \frac{3}{2(2H)} \left(\frac{P}{B}\right)^2 \frac{(B\lambda)^2}{\alpha_1}$$
(1)

ここで, *P*(N)はき裂進展過程の荷重, λ(mm/N)はき裂進展過程のCODコンプライアンス, *B*(mm), 2*H*(mm)は試験片幅および厚さ, α₁(N^{1/3}/mm^{2/3})は近似直線の傾きである. 各試験片につき5本ずつ 測定を行い, 5本の試験片の結果を平均してJIS Z 8401によって有効数字2桁に丸めた.

3. 結果および考察

3.1 DCB 試験結果 Fig.2 に予き裂 50mm の場合, 1-4 接結試験片, 1-4・2-3 試験片, 1-2・2-3・ 3-4 試験片および 1-2・3-4 試験片の荷重-COD 曲線を示す. この結果から, 1-4 接結試験片, 1-4・ 2-3 試験片および 1-2・2-3・3-4 試験片は最初のき裂進展による荷重低下後も次のき裂進展時の 限界荷重が低下していないことがわかる. これは層間にある接結糸により開口に必要な荷重が 上昇しているからだと考えられる. 一方, 1-2・3-4 試験片(き裂進展面に接続糸がない) はき裂 進展が起こるたび限界荷重が低下していることを示している.

各試験片のき裂進展過程のモード I 層間破壊じん性値G_{IR}は,き裂進展面に接結糸が入っていない1-2・3-4接結試験片のG_{IR}の平均値が2.7 kJ/m²であるのに対し,き裂進展層に接結糸が入っている試験片は2.7 kJ/m²を上回る数値となった.中でも四重織物の層間すべてを接結している1-2・2-3・3-4接結試験片は,1-4・2-3試験片(き裂面接結糸がない)の破壊じん性値G_{IR}2.7 kJ/m²と比べ,それの2倍強5.6 kJ/m²であり,著しい破壊じん性値の向上が発現された.

4. まとめ

本研究では,層間じん性を向上させる方法として多重織物に着目し,複数の層を連続的な接続 糸を介して層間を接合した織り方で一体化した多層構造の開発を行った.また,接結組織と構造 を変えた5種類の多重織CFRPを作製した.その結果,多重織技術を用い,層間の接合効果のある 接結糸を入れた多重織物を創製することができた.また,き裂進展面に入れた接結糸は、CFRP のモード I 層間破壊じん性値に対して非常に効果的であり,き裂進展量を抑制することが出来 る.き裂進展面に接結糸が入っていない試験片に対し,最も効果があった接結糸では2倍強の層 間破壊じん性値の向上が確認できた.

5. 研究組織

研究組織	1.	信州大学繊維学部機械・ロボット学科	倪	慶清	(研究代表者)
	2.	九州大学応用力学研究所	汪	文学	

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

代表者 神戸大学大学院海事科学研究科 橋本 博公 所内責任者 九州大学応用力学研究所 末吉 誠

はじめに

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うるため、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によ る波浪外力の推定と係留索の動的解析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法を構築してきた。今年度は、推定法の妥当性 を検証するための模型実験実施に向けて、神戸大学が有する長さ 60m の浅水槽に送風装置を新たに設置 し、その送風特性について調査を行った。

送風装置の概要

神戸大学の浅水槽は、完全排水状態から水深 1.5m までの範囲で水深を自由に変更可能であり、係留 を要する洋上浮体の実験に適している。また、既設の造波装置にて一方向の規則波、不規則波の発生が 可能である。浮体式洋上風力発電の水槽試験を実施するためには、新たに送風装置の設置が必要であり、 本研究では送風装置の浅水槽への設置方法を検討した。なお、送風装置の設置に際しては、対象浮体や 実験条件に応じて設置位置や高さを変更できるように自由度を持たせた。具体的には、図 1 のように、 単管パイプで組み上げた設置台の上に、整流箱と送風機 3 台を設置することとした。送風機は複数枚の 羽根を回転させることで造風するため、ハニカム構造の整流箱を送風機の前面に設置することで回転流 を非回転流に変換している。さらに、整流箱の前面に細かな目の金網を張り、整流箱を通過した風を分 散させて分布の一様性を高めている。また、インバータを介して送風機の駆動周波数を変更することに より、風速の調整が可能である。



図1 送風装置の設置

風速分布の計測

縮尺浮体・風車模型を使用した水槽での送風実験では、最大風速が限られているため、10 m/s 以下の 低風速に対して高精度な計測が可能な熱線式風速計を風速計測に使用した。風速計固定用の C チャンネ ル鋼を水槽のレール上を移動可能な鉄製ビームに一定間隔で固定し、ビームの移動および C チャンネル への取り付け位置を系統的に変更しながら風速計測を実施した。上下方向の計測点は、送風機の半径を 基準として、送風機上端(水面から113.4cm)、送風機中心(水面から77.8cm)、送風機下端(水面から 42.2cm)、水面付近(水面から6.6cm)である。計測距離は、整流箱の前面から7か所とし、2m、5m、 8m、10m、12m、15m、17m である。左右方向の計測点は、送風機間距離を基準として、8mの距離に対 してのみ計測を行った。送風機の駆動周波数は10Hz、30Hz、50Hzの3種類とし、いずれの条件でも3 分間の計測を行い、計測開始後1分から3分までの平均値を採用した。

駆動周波数 30Hz における整流箱の前面からの距離 x に対する風速変化を図 2 に示す。計測距離 5m をピークにゆるやかに風速が下がっていることが見て取れる。また、計測距離が 2m と 5m では 水面からの高さによって風速値の差が大きい。したがって、平均風速の低下が少なく、上下方向の 風速差が小さい距離 8m の位置に浮体模型を設置すべきである。

計測距離 8m、駆動周波数 50Hz の場合の yz 平面の風速分布を図 3 に示す。水槽幅中心では高さ 方向に風速の変化がほとんどなく、幅方向の一様性も良好である。この分布に従えば、均質な風速 が必要な実験を行う際には左右位置 -94cm~+94cm、水面からの高さ 6.6~95.0cm 程度の範囲内で 行うと良い。また、±141cm の範囲であっても、高さが 70cm 程度以下であれば一様性が確保され ているため、横長の連結浮体であっても実験は可能であるといえる。

図4に、計測距離8m、中央の送風機中心位置での駆動周波数と平均風速の関係を示す。今回計 測を行った10Hz~50Hzの範囲では、線形近似が可能となっており、任意の風速を容易に設定する ことができそうである。



まとめ

神戸大学・浅水槽での送風装置使用についての検討を行い、 風速分布などの浮体式洋上風力発電の模型実験実施に必要と なる基礎的なデータを取得することができた。今後は、係留浮 体模型を用いた水槽試験の実施により、数値シミュレーション の精度検証を行っていく予定である。

成果報告

なし



図4 駆動周波数と風速の関係 (距離 8m、中央送風機の中心位置)

3D 造形を用いたテーラーメイドの骨造成法に関する研究

ー骨造成におけるインプラントのリスクに関して-

九州大学病院再生歯科・インプラントセンター 松下恭之

九州大学応用力学研究所 東藤 貢

緒言

歯科インプラントの臨床を行いながら、臨床での成功や失敗について力学的に解析・ 考察をおこなっているが、多くの臨床家から受ける相談の一つに「下顎の臼歯部で骨造 成した部位に3本のインプラントを埋入、連結すると、中央のインプラントがやられや すくないですか?」といったことがある.インプラントの機能当初はどのインプラント の骨レベルも問題のない状況であったが、機能開始から13カ月後、右側の3本のうち の中央のインプラントに骨吸収が認められた.こうした症例は多く目にする状況にある ものの、疫学調査されたことはないため.統計的に有意な差があるものかどうかは明ら かではない.

造成骨部に3本を連結すると、中央のインプラントが力学的に厳しい状態にさらされるのであろうか? 3本インプラントの問題を力学的にとらえてみることにした。

材料と方法

まずは3点支持による連続梁の曲げとして作図的に考えてみると,後方:中央:前方 で反力の相対比は3:10:3となり、中央のインプラントの負担過多の傾向が認めら れた.

次に有限要素法ではどうだろう. MF を用いて, 骨吸収が生じた下顎骨に対して、造成した骨の状態を CT から数値モデル化した. 機械的物性を表1に示す. Tada らの報告に基づき,造成骨の弾性率を臨床的に硬い骨から柔らかい骨まで4段階を設定した. チタニウム製のスレッドインプラント(径4mm 長さ10mm)3本をそれぞれ2mm離して,埋入を行った.なおインプラントと骨とは完全に骨と接着が得られたとして,連続体としての取り扱いとした.上部構造はチタン製の平板と仮定した.臨床で使われるのと同様,上部構造がインプラントよりもやや大きくせり出している.底面の緻密骨を完全拘束し,上部構造の咬合面に面圧を負荷して,解析を行った.

次に MF を用いて, ヒト下顎骨の CT データから有限要素法モデルを作成し, 小臼歯 部から大臼歯部にかけての範囲に3本のインプラントを埋入した. チタン製の平板を上 部構造として設置し, ここでは上部構造の咬合面と を拘束し, 咬筋付着部に咬合力 を負荷して, 解析を行った.

結果

歯列モデルでの相当応力分布では、硬い海綿骨より柔らかい海綿骨において、インプ ラントネック部周囲緻密骨の応力が大きくなっているのが認められる.しかしながら、 インプラントに生じた応力は中央よりも端の2本のほうが大きい様子が認められた.さ らに下顎骨全体をモデル化してシミュレーションしたが、この場合、中央よりも端のイ ンプラント周囲、どちらかといえば、後方に大きな荷重負担が認められる.

考察と結論

有限要素法解析では、中央のインプラントが端のインプラントよりも大きな荷重負荷 を受けている様子は認められなかった.下顎骨として筋肉の走行を考えた拘束を行った 場合には、むしろ後方のインプラントでの大きな荷重を負担する様子が認められた.こ れは三級の梃子による影響と思われる.実際の症例では、後方の場合が多いわけでもな く、前方インプラントに骨吸収が認められる症例も散見される(図 9).

インプラント自体が完全な点支持となっているわけではないため,理論モデルと FEM の結果は異なった荷重分担となったものと考えられる.今後は,実際口腔内で機 能している3本のインプラントのケースで,ひずみゲージを貼って実測してみることで 最終的な結論を出したいと考えている.

本研究は、九州大学応用力学研究所の共同利用研究の助成を受け、平成 28 年 11 月 MF 研究会において発表した。

極低レイノルズ数翼の革新的空力向上の為の基礎研究

同志社大学 理工学部 平田 勝哉 同志社大学 理工学部 大西 一希 同志社大学 理工学部 髙橋 江梨香 同志社大学 理工学部 井上 達哉 九州大学 応用力学研究所 内田 孝紀 九州大学 応用力学研究所 杉谷 賢一郎

目的

低レイノルズ数領域における翼の空力特性の把握は,無人航空機 UAV/超小型航空機 MAV の開発や 昆虫/鳥/種子の飛行システムの解明,小型風力/水力発電機の開発などにおいて重要である.しか し,その様な低 Re 領域での翼の空力特性についての理解は,層流-乱流遷移などと関係した複雑かつ無 視できない Re 数効果の為,未だに充分ではない.現象の強い非線形性が,解析および数値計算,実験 の精度や信頼性に様々な技術的困難さをもたらす為である.本研究では水槽を用いた可視化実験を行 い,得られた画像に PIV 解析をし,数値解析で得られた流れ場の可視化図との比較を行う.

実験方法

本実験では,翼モデル周りの流れの可視化として,作業流体に直接トレーサー粒子を混ぜる手法を行った.トレーサー粒子はポリエチレンビーズを用いて,それにエタノールや洗剤,染料などを塗布し, 比重を水に近いものを作成した.トレーサー粒子の径は充分小さく,流れによく一致する.測定面は, 翼モデルに対して断面方向からと,スパン方向から撮影した2種類である

● 翼断面から見た流れの撮影

台車に設置したアクリル板は水面に対して平行であり,翼モデルは,そのアクリル板と水面に直角にな るように取り付ける.この時,水中に沈んでいる部分は,水面から水底より1cm高くなるようにした. カメラは台車上部に取り付けた.また,光源にはスライドプロジェクターを利用し,自作のスリットによ って光を収束させ,シート光になるようにした.この光源を2台用いることによって,翼モデルを挟むよ うに光を照射し,影ができないようにした.尚,この光源も翼モデルを取り付けた台車に固定されてお り,撮影時は台車と同期して動く.シート光は翼モデルの中心に当たるようにし,さらに水中に浸かって いる部分を長くすることで,撮影する流れが翼の端や水面の影響が極力出ないように留意した.



(a) $\alpha = 24$ [deg.] (in experiment) (b) $\alpha = 24$ [deg.] (in computation)

Fig.1 Streamlines for FP at $Re = 8.0 \times 10^2$ and $\alpha = 24$ [deg.] The color represents speed of flow



結果と考察

図 1(a)は、本実験で撮影した動画をもとに作成した PIV 解析画像の一例である.また、図 1(b)は数値計算の結果から得られた速度ベクトルの図である. どちらの図も $Re = 8.0 \times 10^2$, $\alpha = 24$ deg.である.

図1の(a), (b)を比較してみると、とても類似していることがわかる. どちらの図共に翼上部の流れが 乱れている為、渦が出来ており、翼下部の流体が流れ込んでいることが確認できる. (実験の際に翼の上 部に渦が出来ている事は目視でも確認できた.) よってこの2つの流れは定性的に同じ流れだと考えられ る. これらの結果から、定性的な観点では実験と数値解析共に正しいことを示している.

図2は,各翼型における流れの定常/非定常性と二次元/三次元性で分類した図である. NACA0015は, FPやiNACA0015とは,かなり異なる特性を示すことがわかる.

まとめ

極低レイノルズ数での基本的翼型の空力特性と流れの可視化に関する実験と計算を実施した.その結果は *Re*=10¹程度でも翼形状により空力特性や流れが,かなりかなり異なることを示唆している.この事実は,流れの強い制御能力を示唆しており,今後の研究により有効な応用可能性が期待できる.

第9回九大 2D 物質研究会(主催:応用力学研究所(28ME-S1))

「2D物質の形成と物性」

日時:2017年1月27日(金)13:00 - 17:00 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)

島根大学院工 影島 博之 教授

「二次元物質の原子空孔の物性」

二次元物質 MoS₂の原子空孔の安定性と電子状態を第一原理計算によって検討した。その結果、負に 帯電した原子空孔ほど形成されやすいことがわかった。これは同じ二次元物質である h-BN とよく似 た性質である。ただ、MoS₂の場合は S-rich の時、大きな原子空孔が形成されてしまう可能性がある ことが明らかとなった。

3. $13:35 \sim 14:05$ (30分)

関西学院大理工 日比野 浩樹 教授

「グラフェンのドメイン構造の LEEM 観察」

2 層グラフェンは電界によってバンドギャップを形成できるため、スイッチング素子応用への期待 が高いが、電気伝導特性向上にバンドギャップ内準位の低減が求められている。バンドギャップ内 準位の起源として、AB 積層と BA 積層による多結晶性が考えられており、本講演では、様々な手法で 合成されたグラフェンの積層ドメインを、低エネルギー電子顕微鏡で観察した結果を報告する。

4. $14:20 \sim 14:50$ (30分)

NTT 物性科学基礎研究所 佐々木 健一 氏

「電荷ドーピングにより反転するカーボンナノチューブ光吸収の偏光依存性」

通常カーボンナノチューブは軸に並行な偏光しか吸収しないことが知られているが、我々はドープ することにより垂直な偏光しか吸収しなくなることを提案している。今回、久保公式を用いて動的 伝導度を計算し、光吸収スペクトルのドーピング依存性とカイラリティー依存性を明らかにした結 果について報告する。

5. 14:50~15:20 (30分)

九大院総理工 水野 清義 教授

「超高真空中における SiC(0001)上の Si405N3 層の作製」

SiC(0001) 基板を 1300℃以上で大気圧の水素エッチング後、同じ温度で水素を窒素に置換してから 冷却して取り出すと、表面に Si405N3 層が形成する。この表面にはグラファイトのような不純物が 生じてしまうことがあり、その制御が困難である。そこで、超高真空中での Si405N3 層の作製を試 みている。まず、シリコン吸着表面を用意し、N0を導入して 950℃に加熱すると Si20N3 層が形成す る。その上にシリコンを蒸着して 800℃で酸化させると Si405N3 層を形成させることができた。 6. 15:35~16:05 (30分)

名古屋大院工 乗松 航 助教

「SiC 上グラフェンの課題と界面制御」

SiC 上グラフェンのキャリア移動度は、グラフェンの品質、キャリア濃度、界面構造、および SiC 基 板の種類と面方位に依存する。しかしながら、これらを全て考慮に入れても、六方晶窒化ホウ素上 グラフェンの移動度には及ばない。本講演では、その状況と原因を議論し、最近取り組んでいる界 面制御の一例について報告する。

7. 16:05~16:35 (30分)

東大物性研 小森 文夫 教授

「SiC ファセットに形成したナノリップルグラフェンの局所電子分光」

微傾斜 SiC(0001)基板のマクロファセット上に形成したグラフェンの STM/STS 測定を行った。この グラフェンは、下地マクロファセットの構造を反映して、周期が数 nm で凹凸の高さが 0.1nm 程度の 波状になっている。その結果、凹凸の周期と一致する電子格子相互作用の変調をみいだした。

8. 16:35~17:00 (25分)

九大院工 林 真吾 (D2), 田中 悟

「SiC(0001)上の Sn 原子層の形成」

SiC(0001)上には Si が様々な超構造で吸着する. Si 吸着量に応じて $(\sqrt{3} \times \sqrt{3}) \rightarrow (2\sqrt{3} \times 2\sqrt{13})$ 13) $\rightarrow (3 \times 3)$ と変化し,その上の Sn の成長様式は影響を受ける.特に $(2\sqrt{3} \times 2\sqrt{13})$ 上では (3×3) を経て (4×4) 構造を呈し,原子層形成の可能性がある.グラフェン/SiC への Sn インターカレーションについても議論する.