共同利用研究成果報告 第22号



平成 30 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 22 年が経過しました。こ の間,毎年 100~130 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,2018 年度も特定研究 27 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,2019 年 6 月 6 日 - 7 日に開催される「RIAM フォーラム 2019」 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 (https://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 2018 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、25 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 5 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 研究所として位置づけられ,重要な役割を与えられています。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。

> 2019年3月 九州大学応用力学研究所 所長 花田 和明

平成30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					
_	日;	本近海予報モデリングの改新	統括責任者 広瀬 直毅		
30特1-1		若狭湾における定置網漁業の急潮対策に関する研 究	福井県立大学 兼田 淳史	千手 智晴 5名	1
30特1-2		日本沿岸の海峡通過流に与える潮汐の影響	気象庁気象研究所 坂本 圭	広瀬 直毅 3名	3
30特1-3	+	超高解像度湾モデルの精度向上にむけたモデル間 相互比較	東京大学 川崎 高雄	広瀬 直毅 3名	5
30特1-4	ブテ	沿岸海洋環境予測モデルにおける精度向上にむけ た相互比較	海洋研究開発機構 石川 洋一	広瀬 直毅 3名	8
30特1-5	 7	粒子追跡モデルを用いた奄美海域産スジアラ卵仔 魚の輸送過程と最大着底率の推定	鹿児島大学 加古 真一郎	広瀬 直毅 3名	11
30特1-6		海洋モデルを用いた、淡水供給の富山湾の海洋構 造に対する影響の推定	富山県農林水産総合技術センター小塚 晃	広瀬 直毅 3名	13
30特1-7		対馬海峡から日本海南西海域にかけての海洋環境 モニタリングー数値モデルとの比較データの収集 -	長崎大学 滝川 哲太郎	千手 智晴 7名	15
一般研究		·			
30A0- 1	全: 射:	球雲解像モデルを用いた雲エアロゾル相互作用の放 強制力	名古屋大学 佐藤 陽祐	竹村 俊彦 2名	17
30A0- 2	海底資源探査用グライダー型海中ビークルの開発		九州大学 山口 悟	中村 昌彦 3名	19
30A0- 3	日	向灘における流況変動特性の解明	宮崎県水産試験場 渡慶次 力	広瀬 直毅 6名	21
30A0- 4	ハ. 関 [.]	イブリッド式自律型海中ロボットの運動性能評価に する開発	大阪府立大学 有馬 正和	中村 昌彦 4名	23
30A0- 5	海吹	洋環境シミュレーション水槽とループ法を使用した 送距離延長法の確立	兵庫県立大学 高垣 直尚	磯辺 篤彦 2名	25
30A0- 6	衛ゴ	星・地上ライダ/レーダ解析のための粒子散乱アル リズム開発	気象研究所 石元 裕史	佐藤 可織 2名	27
30A0- 7	C1の と・	oudSat/CALIPSOプロダクトを用いた氷雲の地理分布 その気象要素との関係	長崎大学 河本 和明	岡本 創 2名	29
30A0- 8	衛め	星搭載雲レーダと降雨レーダによる降水量抽出のた のアルゴリズム開発	情報通信研究機構 井口 俊夫	岡本 創 2名	31
30A0- 9	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	33
30A0- 10	東解	シナ海陸棚-黒潮間混合域における物質輸送過程理 のための国際共同研究体制の構築	富山大学 張 勁	遠藤 貴洋 2名	35
30A0- 11	洋 び	上や海中を航走するビークルに働く流体力解析およ 軍動制御に関する研究	海洋研究開発機構 百留 忠洋	中村 昌彦 9名	37
30A0- 12	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	遠藤 貴洋 2名	38
30AO- 13	地 的 [:]	上・衛星観測及びモデルを使ったエアロゾルの光学 特性の時間・空間変動特性	富山大学 青木 一真	竹村 俊彦 2名	40
30A0- 14	逆度	推計手法による東アジア域排出量データベースの高 化に向けた研究	電力中央研究所 板橋 秀一	弓本 桂也 3名	42
30AO- 15	内	部波特有の共鳴現象に関する解析	神戸大学 中山 恵介	辻 英一 2名	44

30AO- 16	微細規模から惑星規模にかけての海洋力学過程と規模 間相互作用の研究	大分大学 西垣 肇	磯辺 篤彦 16名	46
30AO- 17	インドネシア多島海の海洋循環とその気候に及ぼす影響	海洋研究開発機構 佐々木 英治	木田 新一郎 3名	48
30A0- 18	大阪湾に出現するフロント構造の解析	神戸大学 林 美鶴	磯辺 篤彦 1名	50
30A0- 19	北東アジアにおける粒子状物質の輸送・変性過程のモ デル表現に関する研究	神戸大学 山地 一代	弓本 桂也 4名	52
30A0- 20	黒潮大蛇行を引き起こす膠州海山における傾圧不安定 の発達過程	東京大学 田中 祐希	大貫 陽平 2名	54
30A0- 21	雲粒子センサによるlarge-sparse雲の観測	防衛大学校 岩崎 杉紀	岡本 創 1名	56
30A0- 22	沿岸波浪と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 2名	58
30A0- 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	60
30A0- 24	浅海域用水中グライダーの動作試験と運用に関する研 究	長崎大学 森井 康宏	中村 昌彦 12名	63
30A0- 25	CloudSat地表面データによる衛星搭載雲レーダプロダ クトの評価手法の開発	名古屋大学 高橋 暢宏	岡本 創 2名	65
30A0- 26	衛星搭載ライダーデータを用いたエアロゾル・雲プロ ダクト推定アルゴリズムの高度化と地上検証に資する 観測研究	国立環境研究所 西澤 智明	岡本 創 3名	67
30A0- 27	日本沿岸域における高解像度海表面塩分マッピング手 法の開発	国立環境研究所 中田 聡史	千手 智晴 3名	69
30A0- 28	富山湾沿岸域における対馬暖流水の流入に関する研究	富山高等専門学校 福留研一	千手 智晴 1名	74
30A0- 29	領域海洋モデルによるGNSS-R技術の海洋観測への応用 の高度化	東京大学 小平 翼	市川 香 2名	76
30A0- 30	多波長ミー・ラマンライダーを用いたエアロゾルの動 態把握とデータ同化への応用に関する研究	国立環境研究所 西澤 智明	原 由香里 2名	80

	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	-		·			
	波 グ	・流れ・乱流のセンシング・マイニング・モデリン	統括責任者 稲垣 滋			
30特2-1		直線磁化プラズマにおける乱流構造の解析	九州大学 山田 琢磨	稲垣 滋 3名	107	
30特2-2		流体波動の局所分離解析に関する研究	九州大学 大貫 陽平	稻垣 滋 2名	109	
30特2-3		乱流輸送の促進と抑制機構の理論・実験的解明: ヘリシティ効果	東京大学 横井 喜充	稻垣 滋 1名	111	
30特2-4	サ	振幅変調反応性プラズマのナノ粒子量ゆらぎの相 互相関解析	九州大学 古閑 一憲	稲垣 滋 2名	113	
30特2-5	ブテー	医療用CT・MRI技術を応用したプラズマ乱流計測	島根大学 荒川 弘之	佐々木 真 3名	115	
30特2- 6	7	デジタル分光を用いたECE計測の解析手法に関する 研究	核融合科学研究所 土屋 隼人	稲垣 滋 1名	117	
30特2-7		東シナ海黒潮域における乱流混合過程の解明	沖縄科学技術大学院大学 森 康輔	遠藤 貴洋 5名	119	
30特2-8		統計モデルと複雑ネットワークの手法を融合した 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	
30特2-9		直線ヘリコン波プラズマ内で誘起される電子密 度・温度揺らぎの非接触計測	九州大学 富田 健太郎	稻垣 滋 2名	123	

30特2- 10		分野融合研究会	九州大学 稲垣 滋	藤澤 彰英 20名	141
30特2- 11	サブニ	流れベクトル量測定のためのマイクロ波センシン グ技術の開発	核融合科学研究所 徳沢 季彦	稲垣 滋 2名	144
30特2-12	 	CFD手法による液体金属熱流動の解析	九州大学 胡 長洪	稻垣 滋 2名	146
30特2-13		レーザー光波面の乱れを利用したプラズマの乱流 計測手法とデータ処理方法の開発	核融合科学研究所 秋山 毅志	稲垣 滋 7名	148
一般研究					
30FP- 1	直	線装置PANTAにおけるITG乱流輸送シミュレーション 究	量子科学技術研究開発機構 矢木 雅敏	糟谷 直宏 4名	150
30FP- 2	タ 響	ングステン合金の熱負荷特性に及ぼす添加元素の影	京都大学 徐 虬	徳永 和俊 2名	152
30FP- 3	直法	線プラズマ装置PANTAにおける音速分子ビーム入射 置を用いた密度プロファイル制御	核融合科学研究所 小林 達哉	佐々木 真 2名	154
30FP- 4	電視を	磁的ジャイロ運動論解析結果に基づく乱流輸送係数 用いたダイナミクスシミュレーション	核融合科学研究所 登田 慎一郎	糟谷 直宏4名	159
30FP- 5	金) 互 [/]	属間化合物合金における空孔型欠陥と水素原子の相 作用に関する研究	大阪府立大学 堀 史説	大澤 一人 4名	161
30FP- 6	多果	層グラフェン膜の水素吸収特性に対する窒素添加効	名城大学 土屋 文	徳永 和俊 4名	163
30FP- 7	ジ, 原:	ルコニウム合金中の水素同位体の挙動に関する第一 理計算	琉球大学 岩切 宏友	渡辺 英雄 4名	165
30FP- 8	構	造材料中の水素挙動に及ぼす水素導入方法の影響	茨城大学 車田 亮	渡辺 英雄 3名	167
30FP- 9	P	ングステンの熱負荷特性に及ぼす再結晶の影響	茨城大学 車田 亮	徳永 和俊 4名	169
30FP- 10	収満	差補正機能付き分析電子顕微鏡による構造材料の高 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	171
30FP- 11	デ 輸	ータ駆動的手法に基づいたトロイダルプラズマの熱 送特性の理解	核融合科学研究所 横山 雅之	稲垣 滋 3名	173
30FP- 12	運動	動論的プラズマ・シミュレーションと実験との直接 なValidation解析	核融合科学研究所 沼波 政倫	糟谷 直宏3名	174
30FP- 13	LII よ	Fを用いた直線装置PANTAにおける高精度中性粒子お びイオン流速計測	九州大学 寺坂 健一郎	小菅 佑輔 3名	176
30FP- 14	タ 水	ングステンにおける複合イオン照射下の欠陥形成と 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 10名	178
30FP- 15	結 ワ/	晶性固体材料における析出物の加工誘起高速オスト ルド成長	東北大学 松川 義孝	渡邉 英雄 1名	180
30FP- 16	Fe- ズ	-Mnモデル合金における特異な照射硬化とナノサイ のMn析出物形成の相関	京都大学 木村 晃彦	渡辺 英雄 2名	182
30FP- 17	高質	エネルギーイオン照射法を用いた新奇二次元層状物 の創製	量子科学技術研究開発機構 圓谷 志郎	渡邉 英雄 2名	184
30FP- 18	磁	化プラズマの簡約化MHDシミュレーション	法政大学 西村 征也	糟谷 直宏1名	186
30FP- 19	中' シ	性粒子風由来のブロッブの発生と輸送特性に関する ミュレーション	中部大学 杉田 暁	小菅 佑輔 1名	188
30FP- 20	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	190
30FP- 21	金 の	属、合金および酸化物セラミックス中の水素同位体 溶解、拡散、放出挙動に関する研究	九州大学 橋爪 健一	渡辺 英雄 5名	192
30FP- 22	高総	温プラズマ曝露炉内機器の表面変質と損傷に関する 合的研究	九州大学 吉田 直亮	渡辺 英雄 6名	194
30FP- 23	高構	エネルギーイオン照射された酸化物絶縁被覆の微細 造における熱処理による回復挙動	核融合科学研究所 菱沼 良光	渡邉 英雄 4名	196
30FP- 24	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 4名	198

30FP- 25	鉄合金の照射劣化挙動に関する基礎的検討	東芝エネルギーシステムズ (株) 鹿野 文寿	渡辺 英雄 4名	200
30FP- 26	種々の熱入射法による材料表面の高エネルギー密度入 射損耗解析法の開発	応用ながれ研究所 糟谷 紘一	徳永 和俊 3名	203
30FP- 27	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	205
30FP- 28	水素プラズマスパッタ法で形成される多孔質金属膜へ の水素蓄積と透過挙動	九州大学 片山 一成	渡辺 英雄 4名	207
30FP- 29	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 2名	209
30FP- 30	プラズマ乱流現象に関する可視化手法の開発と応用	有明工業高等専門学校 竹内 伯夫	稲垣 滋 3名	212
30FP- 31	長時間放電におけるタングステン壁排気の物理素過程 の解明と制御	九州大学 中村 一男	徳永 和俊 4名	214
30FP- 32	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	216
30FP- 33	逃走電子の超高感度計測法の検討	核融合科学研究所 秋山 毅志	稲垣 滋 2名	218
30FP- 34	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 4名	220
30FP- 35	安定化元素を添加したオーステナイト系ステンレス鋼 の照射特性評価	(株)日立製作所 王 昀	渡辺 英雄 1名	222
30FP- 36	タングステンの水素同位体吸蔵特性に対する複合照射 効果に関する研究	筑波大学 坂本 瑞樹	渡辺 英雄 6名	225
30FP- 37	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 3名	227
30FP- 38	QUESTにおける水素原子密度空間分布の分光計測	京都大学 四竈 泰一	花田 和明 4名	231

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					
	自 び 	然エネルギー有効活用に資するエレクトロニクス及 関連材料技術	統括責任者 西澤 伸一		
30特3-1		次世代パワーエレクトロニクス信頼性・設計技術	首都大学東京 和田 圭二	西澤 伸一 1名	242
30特3-2		振動発電マルチフェロイック薄膜における3D応力 解析	物質・材料研究機構 木村 秀夫	西澤 伸一 2名	244
30特3-3	サ	次世代パワーエレクトロニクスシステム用受動部 品	九州工業大学 長谷川 一徳	西澤 伸一 1名	246
30特3-4	ブテー	高耐圧パワーデバイス用電極の接合信頼性	北九州市環境エレクトロニ クス研究所 宍戸 信之	西澤 伸一 2名	251
30特3-5	7	シリコン結晶中の不純物評価	明治大学 小椋 厚志	西澤 伸一 3名	253
30特3- 6		ダイヤモンドパワーデバイスのシミュレーション に関する研究	東京工業大学 角嶋 邦之	西澤 伸一 1名	255
30特3- 7		小形風力用パワーコンディショナの単独運転検出 における回転機負荷の影響	東京理科大学 近藤 潤次	吉田 茂雄 1名	257
一般研究					
30ME- 1	ド 領	ローンやMAVへの応用を意図した極低レイノルズ数 域での翼の空力特性の革新的向上の為の基礎研究	同志社大学 平田 勝哉	内田 孝紀 4名	259
30ME- 2	高	品質多元系熱電材料の単結晶成長と特性評価	宮崎大学 永岡 章	柿本 浩一 2名	261

30ME- 3	風レンズ風車用の炭素繊維強化複合材(CFRP)の衝撃圧 縮特性に及ぼす負荷方向と温度の影響	岡山理科大学 中井 賢治	新川 和夫 2名	263
30ME- 4	波浪中の浮体・船舶に関する革新的EFD技術に関する 研究	広島大学 岩下 英嗣	胡 長洪 6名	267
30ME- 5	高効率海上輸送用地面効果翼機の機体形状に関する研究	広島大学 岩下 英嗣	吉田 茂雄 3名	273
30ME- 6	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 2名	280
30ME- 7	予見風速に基づくフィードフォワード制御による大型 垂直軸風力発電システムの出力・荷重変動抑制	大阪府立大学 涌井 徹也	吉田 茂雄 3名	282
30ME- 8	風・波併存時の係留浮体に関する模型実験およびシス テム同定	神戸大学 橋本 博公	末吉 誠 4名	285
30ME- 9	高空風力発電の有効な方式の検討	(株)TMIT・首都大学東京 藤井 裕矩	吉田 茂雄 19名	287
30ME- 10	CT画像を利用した数値解析法の脳神経外科への応用	京都府立医科大学 梅林 大督	東藤 貢 1名	291
30ME- 11	インプラントオーバーデンチャーの義歯床下の顎骨吸 収を防止する設計は可能か?	九州大学 松下 恭之	東藤 貢 2名	293
30ME- 12	心筋組織のエネルギー変換メカニズムに関する研究	国際医療福祉大学 松本 拓也	東藤 貢 3名	295
30ME- 13	CT画像を利用した数値解析法の脊椎外科への応用	佐賀大学 馬渡 正明	東藤 貢 2名	297
30ME- 14	骨密度分布を利用した骨の力学特性予測法の構築	千葉大学 松浦 佑介	東藤 貢 2名	299
30ME- 15	バイオセラミックスとポリマーの複合化による骨組織 再生用材料の開発	大阪大学 名井 陽	東藤 貢 2名	301
30ME- 16	大気乱流による気圧変動の直接測定のための円盤型プ ローブの性能評価	海上保安大学校 近藤 文義	内田 孝紀 1名	303
30ME- 17	IR-FZ法による単結晶育成における集中加熱条件の最 適化	山梨大学 綿打 敏司	柿本 浩一 1名	305
30ME- 18	波浪中を低速航行する船舶に働く流体力と動的応答に 関する研究	広島大学 肥後 靖	胡 長洪 3名	307
30ME- 19	大島海峡における潮流パワーポテンシャルの季節変動	鹿児島大学 山城 徹	胡 長洪 3名	321
30ME- 20	強制動揺試験による円筒型OWC装置のエネルギー変換 特性に関する研究	九州大学 安澤 幸隆	胡 長洪 4名	323
30ME- 21	垂直軸風車の主要コンポーネントに作用する空力荷重 の研究	三重大学 前田 太佳夫	吉田 茂雄 4名	326
30ME- 22	津軽海峡フェリーの船体が風速計の出力に及ぼす影響	弘前大学 本田 明弘	内田 孝紀 1名	328
30ME- 23	帆布を用いた小型風車のトルク特性に関する実験的研 究	弘前大学 久保田 健	内田 孝紀 4名	330
30ME- 24	垂直軸風車の3次元効果の数値解析	鳥取大学 原 豊	吉田 茂雄 4名	332
30ME- 25	バタフライ風車の翼に作用するツイストモーメントに 関する研究	鳥取大学 原 豊	吉田 茂雄 4名	334
30ME- 26	集流装置付き潮流発電装置の性能に及ぼすタービンハ ブ比の影響	佐賀大学 村上 天元	胡 長洪 3名	336

平成30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
30A0- S1	海洋力学理論の研究会	北海道大学 三寺 史夫	木田 新一郎 5件・13名	応用力学研究所	2018. 09. 10- 2018. 09. 11	82
30A0- S2	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 13件・69名	応用力学研究所	2018. 12. 12- 2018. 12. 13	87
30A0- S3	東シナ海と日本海の海水循環と生物化 学過程	名古屋大学 石坂 丞二	千手 智晴 19件・23名	応用力学研究所	2019. 01. 25- 2019. 01. 26	90
30A0- S4	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 12件・76名	応用力学研究所	2018. 08. 02- 2018. 08. 03	94
30A0- S5	地球流体力学研究集会「地球流体にお ける波動と対流現象の力学」	東京大学 伊賀 啓太	和方 吉信 15件・30名	応用力学研究所	2019. 03. 07- 2019. 03. 08	97
30A0- S6	海洋・海岸における波動の解析モデル の比較	鹿児島大学 柿沼 太郎	辻 英一 8件・20名	応用力学研究所	2018. 12. 15- 2018. 12. 16	100
30A0- S7	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	富山高等専門学校 福留 研一	広瀬 直毅 13件・40名	応用力学研究所	2018. 12. 13– 2018. 12. 14	104

核融合力学分野						
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
30FP- S1	第16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 19件・27名	応用力学研究所	2018. 11. 29- 2018. 11. 30	233
30FP- 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 8件・25名	応用力学研究所	2018. 05. 21- 2018. 05. 23	238

新エネルギー力学分野						
No.	研究課題	代表者名	所内世話人 講演数・参加者数	開催場所	開催日	頁
30ME- S1	第11回 九大2D物質研究会	九州大学 田中 悟	寒川 義裕 11件・18名	九州大学 西新プラザ	2019. 02. 22	338
30ME- S2	高空風力発電の技術動向の検討	(株)TMIT・首都大 学東京 藤井 裕矩	吉田 茂雄 17件・22名	日本大学駿河台 キャンパス 国立極地研究所	2018. 12. 06 2019. 03. 19	343

平成30年度 若手キャリアアップ支援研究一覧(目次)

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	
若-1	磁プラズマ中での乱流・非線形揺動のローカルトモグ ラフィを用いた詳細計測	九州大学 山﨑 広太郎	稲垣 滋 3名	347	

若狭湾における定置網漁業の急潮対策に関する研究

【研究の目的】

九州大学が開発した日本海沿岸域海況予報システムの計算 結果や京都府および福井県の水産研究機関、福井県立大学が取 得する海況観測データは、若狭湾の沿岸域では定置網の急潮対 策の精度向上を目的として利用され始めている。本研究は2018 年度の観測データおよび数値モデルの予測結果を用い、当年度 に発生した急潮の特徴を分析するとともに、急潮対策の検証お よび改善を目的して実施した。

【観測および解析】

福井県水産試験場、福井県立大学、京都府海洋センターは若 狭湾および越前海岸の定置網近傍で流れや水温を計測してい る(図1)。2018年度においても、それぞれの測点で電磁流速 計や ADCP(超音波多層流向流速計)を用いて流れを計測すると ともに、複数個の水温センサーを設置して水温を計測した。本

福井県立大学 海洋生物資源学部 兼田淳史



図1 若狭湾および測点図.2018年 に京都府海洋センター、福井県水産 試験場、福井県立大学が流速計を設 置していた観測点の一例.

研究では流速が 50cm/s を超える突発的な強流を急潮と定め、それぞれの海域における急潮の発生状況 やその特徴について調べ、研究打ち合わせ時にはその情報を共有して今後の対策について考察した。

【結果および考察】

分析結果の一例として、鷹巣における流れの観測結果を図2に示す。図から、2018年は7月上旬から 8月中旬まで流れは一時的に弱くなった後、8月下旬に急潮が発生し、その後9月中旬にかけて50cm/s を超える強流が継続的に発生した。また、9月末から10月上旬には台風や低気圧の通過時に急潮が発生 したことがわかる。そこで過去の鷹巣の流れの観測データと比較したところ、他の多くの年は7-8月 に流れが強くなり高い頻度で急潮が発生していたのに対して、2018年は7月上旬-8月中旬に流れが弱 く、例年よりも遅い時期にあたる8月下旬以降に急潮が発生したことが特徴であることがわかった。



図 2 2018 年 5-10 月の鷹巣の流れの時系列(上) と 8-9 月の孤天図 (ト). 上の横軸の青線は、7 月上旬から 8 月中旬まで流れが弱かった期間を示している.

そこで、2018 年 7-8 月は例年よりも流れが弱く急潮が発生しなかった理由と、8 月末の急潮の発生過程 について考察した結果について考察した。若狭湾沿岸域の流れは、外洋に対して解放的であるため対馬 暖流の影響を強くうける。そのため 7-8 月の弱い流れの発生は、対馬暖流の変動に起因している可能性 があると考えた。高解像度モデルの結果を利用して沖合いの流動構造について調べたところ、鷹巣で流 れが弱くなっていた時期(図3左)は丹後半島沖で対馬暖流が北上し、若狭湾湾ロ中央部から東部では 対馬暖流が離岸していた。鷹巣沖で 7-8 月に例年より流れが弱くなって急潮が発生しなかった理由は、 対馬暖流が若狭湾沖で離岸していたためであると考えられた。

次に、8 月下旬に発生した急潮の発生過程について高解像度モデルの結果を利用して検討した。図 3 (中央および右)には、急潮が発生する前の8月21日と急潮が発生した8月29日の計算結果を示して いる。8月13日と21日の計算結果から、13日には丹後半島沖で北上していた対馬暖流は21日になる と次第に北東方向へ流路を変え、越前岬へ近づくようになった。そして、急潮が発生した8月29日に は対馬暖流は越前岬沖で接岸し、急潮していたことがわかった。今までの鷹巣の急潮研究で対馬暖流の 接岸に起因して急潮が発生したことが報告されていることから(Kaneda et al., in press)、2018年は 例年よりも遅れたものの、同様の発生過程で8月末に急潮が発生したと推察された。



図3:2018年8月13日(左)21日(中央)、29日(右)の高解像度モデルの計算結果(海面下10m)

また、研究打ち合わせでは、京都府の丹後半島・蒲入(図1)の2018年の観測データは既に多くの知 見がある台風の通過に起因する急潮のみならず、穏やかな天気のもとで発生する急潮の発生を示したこ とが報告された。急潮の発生頻度や発生要因は地域ごとに異なっているため、海域ごとの急潮の特徴や その特徴を踏まえた急潮対策の開発を引きつづき進める必要がある。

【関連の成果発表】

Intensification of current in coastal waters around Cape Echizen in summer (2019), A. Kaneda, K. Ayukawa, N. Hirose, T. Senjyu, Y. Kumaki, Y. Igeta, K. Fukudome, T. Watanabe, J. Oceanogra. 【研究組織】

【研究代表者】	福井県立大学海洋生物資源学部	兼田	淳史
【所内世話人】	九州大学応用力学研究所	千手	智晴
【研究協力者】	九州大学応用力学研究所	広瀬	直毅
	福井県水産試験場・漁場環境研究グループ	桂田	慶裕
	京都府農林水産技術センター	舩越	裕紀
	福井県立大学大学院生物資源学研究科	大西	徹

高解像度日本沿岸モデルを用いた海峡通過流の再現

気象研究所 海洋·地球化学研究部 坂本圭

要旨

気象研究所で開発された高解像度日本沿岸モデルについて、対馬海峡、津軽海峡、宗谷海峡の通過流の 再現性を検証した。その結果、過去の研究と比べた平均流量の差が 7%以下となるなど良い再現性が示 された。この再現性には、データ同化による現実的な初期値の作成が貢献していた。瀬戸内海で見られ た潮汐による通過流の抑止効果は、これらの海峡では見られなかった。

序論

気象研究所では、気象庁の現業システムに向けて、約2kmの水平解像度で日本沿岸全域をカバーする海 洋モデルを開発してきた。昨年2017年度の本共同利用研究では、瀬戸内海の海峡における通過流の再 現性を潮汐の導入によって改善したことを報告した。しかし一方で、日本海につながる対馬海峡、津軽 海峡、宗谷海峡の通過流については、日本周辺の海況に強く影響するため重要でありながら、検証が課 題として残っていた。本研究では、これら海峡の通過流量の再現性を潮汐の影響も含めて調べる。

モデルと実験方法

開発したモデルは、気象研究所共用海洋モデル「MRI.COM」を基盤モデルに採用することで、潮汐を はじめ主な沿岸物理過程が組み込まれている。実験の大気強制にはJRA-55 較正データ(辻野博之が開発) を、沿岸海況に重要な河川流入には気象庁流域雨量指数にもとづくデータ(浦川昇吾が開発)を使用し た。側面境界には双方向結合された北太平洋モデル(主に中野英之が開発)を用いた。実験は、データ同化 によって作成された 2008 年 12 月 2 日の場を初期値に用いて実行し、 2009 年の結果を解析した(ケー ス CTL)。加えて、データ同化を使わずにモデルのスピンアップのみで作成した場を初期値に用いた ケース(SPINUP)と、初期値は CTL と同じだが潮汐を与えないケース(NOTIDE)も比較実験として 行った。どのケースも実験中はデータ同化しない、いわゆるフリーラン実験である。

実験結果

ケース CTL で再現された海峡の通過流量を図(a)に示す。対馬海峡の流量は1月から増加し5月に2.5 Sv、夏に3 Sv に達し、秋に減少した。津軽海峡では1年を通して変化が小さかった。宗谷海峡では1 月から増大し8-10月に1Svを超えた。これらの特徴は、通過流量に関する最新の知見である Han et al. (2016, Ocean Dyn.)のマルチ・モデル・アンサンブルの結果とよく一致する。年平均の流量は対馬海峡 2.34Sv、津軽海峡 1.69Sv、宗谷海峡 0.67Sv であり、これも先行研究の値、2.40Sv、1.68Sv、0.72Sv に 近かった(差は 3%、1%、7%)。フリーラン実験でも、本モデルは通過流量を現実的に再現したと言え る。

3

図: (a)実験 CTL(実線)と SPINUP(破線)における対馬海峡(緑)、津軽海峡(赤)、宗谷海峡(青)を横切る流量。2009 年の 月毎の時系列であり、縦軸は Sv(= $10^6 \text{ m}^3/\text{s}$)を示す。(b) 破線は実験 NOTIDE の結果を示す。その他は(a)と同じ。



データ同化による初期値の作成がこの良い再現性に寄与したことが分かった。実際、ケース SPINUP の通過流量は年を通じて小さく(図 a 破線)、平均で対馬海峡 2.03Sv、津軽海峡 1.53Sv、宗谷海峡 0.53Sv と先行研究の値に対して 15%、9%、16%も過小だった。一般に、沿岸海洋の主要な物理過程の時間ス ケールは外洋と比較して小さいため、沿岸モデルのスピンナップにはあまり注意を払われてこなかった。 しかし日本沿岸全域ほど大きい領域では、沿岸モデルでも初期値がモデル再現性に重要であることが示 唆された。一方で、図(b)に示すケース NOTIDE の通過流量は、月によって若干の差はあるもの、平均 で CTL と変わらなかった(差は 1%以内)。今回の実験結果は、瀬戸内海とは異なり、潮汐が通過流を抑 制する効果は小さいことを示す。

考察

データ同化による初期値作成が、対馬海峡、津軽海峡、宗谷海峡の通過流の再現に重要であることを示 す結果は予期しておらず、これからその具体的な要因を調べる必要がある。また、瀬戸内海では作用し ていた潮汐の抑止効果がこれらの海峡では見られなかった原因の解明も今後の課題である。

成果報告(1:論文、2,3:学会発表)

- Sakamoto, K., H. Tsujino, H. Nakano, S. L. Urakawa, T. Toyoda, N. Hirose, N. Usui and G. Yamanaka, Development of a 2km-resolution ocean model covering the coastal seas around Japan for operational application, (submitted to Ocean Dynamics)
- 坂本圭, 辻野博之, 中野英之, 浦川昇吾, 豊田隆寛, 山中吾郎, 解像度 2km ネスト・モデルを用いた 日本沿岸海況の再現 2: 沿岸潮位の再現性, JpGU Meeting 2018, AOS17-01, 2018/5/21, 幕張メッ セ
- 3. Sakamoto, K., H. Tsujino, H. Nakano, S. L. Urakawa, G. Yamanaka, T. Toyoda, N. Hirose and N. Usui, Reproduction of coastal sea-level variations around Japan using a nested 2-km resolution model, AGU Fall Meeting, OS41D-2050, 2018/12/10-14, ウォルター・E・ワシントン会議場

超高解像度湾モデルの精度向上にむけたモデル間相互比較

東京大学 大気海洋研究所 川崎 高雄

・目的

九州大学応用力学研究所で開発されている海洋大循環モデル RIAMOM は、日本近海の海況予測の実用レベル での運用に使用されており、その精度は非常に高いレベルにある。東京大学大気海洋研究所では海洋大循環モデ ル COCO および非静力海洋モデル KINACO を用いて、超高解像度の湾スケールモデリング研究を行っている。 COCO では多重ネスティング手法によって、水平格子幅 500m の日本沿岸モデルと 1/4 度の全球海洋モデルをシー ムレスにつなげ、日本近海の海況予測システムとして活用できる海洋モデルを開発中である。両研究所で用いられ ている海洋モデルの精度向上のために、COCOとRIAMOMの結果の相互比較を行う。高度化した COCOとRIAMOM の結果を我々が開発中の湾モデルに利用し、過去の特殊事例の再現や将来予測等に役立つモデル開発を推進す る。

・実験方法

海洋大循環モデル COCO を用いて、日本近海の海流や水温・塩分 場等が再現可能なモデル設定を行った。水平格子幅 1/4 度の全球海 洋を最も低解像度の外側のモデル(L0)とし、3 種類の水平格子幅を持 つ緯度経度座標領域モデルを段階的に設定することで、水平約 500m 格子の日本沿岸モデル(L3)を構築した(図 1)。まず L0、L1 モデルで構 成される 2 重ネストモデルを水温・塩分の同化データに緩和して、2000 年 1 月 1 日から 2013 年 9 月 1 日まで積分した。その後 L1 モデルの結 果を L2 モデルに補間し、L0~L2 で構成される 3 重ネストモデルを 9 月 1 日から 9 月 2 日まで駆動した。最後に、L2 モデルの結果を L3 モデル に補間し、L0~L3 で構成される 4 重ネストモデルを 9 月 1 日から 9 月 2 日まで駆動した。今後の湾モデルとの接続も視野に入れ、4 重ネスト モデルでは潮汐も考慮した。



一方、非静力海洋モデル KINACO を用いた水平格子幅約90m の超高 解像度の湾モデルの構築を行った。最終的には上記の外洋モデルの結果

図 1: ネスティング手法を用いた 外洋モデルの水平格子設定

を境界条件としたモデル駆動を目指すが、トライアルとして湾モデル単体による実験を行った。若狭湾の西端である 丹後海全域をモデル領域として設定し、2013 年 9 月の大雨時の由良川の河川水大量流出イベントについてシミュレ ーションを行った。河川水として淡水に加えて、泥・砂など陸起源の懸濁物質の循環に対する影響を調べるために、 懸濁物質をラグランジュ粒子としてモデルに組み込んだ。現実的な風や地形を考慮した Realistic シミュレーションと、 地形や背景場をシンプルにした Idealized シミュレーションの二種類の設定でモデルを動かした。前者は本シミュレー ションがある程度現実の湾状況を再現できているかを確かめるため、後者は多くの感度実験を行うためにシンプル な設定で懸濁物の影響にフォーカスする目的で行った。

・実験結果

外洋モデルは、黒潮・親潮・対馬海流など日本周辺海域での主要な海洋循環を良く再現した。水平格子幅を500m に設定したことで、黒潮など流量の大きい海流の一部が小さい島や海底地形を通過する際に形成される渦、沿岸域 での上昇流などがよく表現された。潮流をモデルに取り入れたことで、日本沿岸に多く分布する検潮所での海面高 度変動が概ね再現された。モデルで表現された黒潮の主要流路であるトカラ海峡で島の下流側にみられるカルマン 渦のような構造、沿岸域における上昇流にともなう海面での冷水露出などについても、気象衛星観測「ひまわり」の 海面水温データからもその存在が確認され、水平スケールや生成数についても概ね良く再現されていることが明ら かになった。

湾モデルでは、河川水の大量流出に伴ってエスチュアリー循環が形成され、これは従来の理論および観測と整合 的であった。そのエスチュアリー循環が、懸濁物粒子が大きい場合(すなわち懸濁物の滞留時間が短い場合)は弱く なり、表層と亜表層水の交換もまた弱化した。一方で懸濁物粒子が小さい場合(すなわち滞留時間が長い場合)は 鉛直的な密度成層構造が不安定となる効果が支配的になり、表層—亜表層間の鉛直混合が強くなった。懸濁物が 河川水プルームやエスチュアリー循環に与える影響は、仮定する懸濁粒子の大きさや流出量に大きく依存すること が明らかになった。

・考察

外洋モデルでは、足摺岬・室戸岬南方沖での浅い地形を黒潮の一部が通過する際に生じる海面での強い収束流 が表現されたが、ALOS-2 合成開ロレーダによってその存在が示唆された。潮流が地形に作用することで、島の周 辺に継続的に渦が生成される興味深い物理プロセスも表現されたが、この現象については今後さらに衛星観測との 比較を継続して検証をし、海洋モデルの改善に役立てたい。

湾モデルにおいては、懸濁物―沿岸物理相互作用の効果がある程度明らかになってきたが、それが海底堆積物の分布や、海洋生態系にどのような影響を及ぼすか不明な部分が数多く残っている。これらを沿岸域、移行域や外 洋域相互作用の解明に向けた発展題材としたい。

·研究成果報告

O 論文(査読有)

- (1) Yasuhiro Hoshiba, Yoshimasa Matsumura, Hiroyasu Hasumi, Sachihiko Itoh, Satoshi Nakada, Keita Suzuki (in revision): A simulation study on effects of suspended sediment through high riverine discharge on surface river plume and vertical water exchange Estuarine, Coastal and Shelf Science.
- (2) Yasuhiro Hoshiba, Takafumi Hirata, Masahito Shigemitsu, Hideyuki Nakano, Taketo Hashioka, Yoshio Masuda, Yasuhiro Yamanaka (2018): Biological data assimilation for parameter estimation of a phytoplankton functional type model for the western North Pacific JOcean Science, 14, 371-386, https://doi.org/10.5194/os-14-371-2018.

〇 学会発表

- "Physiological parameter estimation of a phytoplankton functional type model for the western North Pacific", Hoshiba Y., T. Hirata, M. Shigemitsu, H. Nakano, T. Hashioka, Y. Masuda, Y. Yamanaka, Ocean Science Meeting, Feb 2018, Portland, poster.
- (2) "Simulation on the Effects of Suspended Sediment Matters Induced by High Riverine Discharge on Vertical Mixing in a Hypopycnal Plume", Hoshiba, Y., Y. Matsumura, H. Hasumi, S. Itoh, S. Nakada, Asia Oceaniea Geosciences Society 15th Annual Meeting, Jun 2018, Honolulu, oral.

(3) "Effects of suspended sediment matter's input by high riverine discharge on surface river plume and vertical water exchange: a simulation study for the Tango Bay, Japan", Hoshiba, Y., Y. Matsumura, H. Hasumi, S. Itoh, S. Nakada, American Geophysical Union 2018 Fall Meeting, Dec 2018, Washington D.C., poster.

・研究組織

氏 名	所属	職名	役 割
川崎 高雄	大気海洋研究所	特任助教	研究代表者
松村 義正	大気海洋研究所	助教	研究協力者
干場 康博	大気海洋研究所	特任研究員	研究協力者
羽角 博康	大気海洋研究所	教授	研究協力者

沿岸海洋環境予測モデルにおける精度向上にむけた相互比較

海洋研究開発機構・地球情報基盤センター 石川洋一

研究目的

九州大学応用力学研究所で開発・利用されている海洋大循環モデル RIAMOM と海洋研 究開発機構で開発・利用されている海洋大循環モデル OFES,MRI.COM および COCO の高 度化のために、結果を相互比較することによりそれぞれのモデルの特性を明らかにすると ともに、各モデルの改良点を洗い出す。本年度も昨年度に引き続き、九州大学応用力学研 究所が得意とする日本海などの縁辺海や沿岸域を対象とした比較を行うことにより、海洋 物理研究における活用に加え、海洋気象、水産、海上交通などの分野での実利用にむけた 海洋モデルの改良をすすめる。また昨年度の成果を踏まえ、九州大学応用力学研究所で開 発・利用されている海洋大循環モデル RIAMOM と海洋研究開発機構で開発・利用されて いる海洋大循環モデル OFES,MRI.COM および COCO のモデル結果に関して、日本海をは じめとする日本周辺海域における再現性を比較することにより、モデルの設定やパラメタ リゼーションの違いに起因する差異を明らかにする。

8

縁辺海や沿岸域を対象とした数値モデルの比較のために、数値モデルの高解像度化の取 り組みを昨年度に引き続き行なった。北太平洋全域を対象とした高解像度モデルとしては 1/108度でカバーした設定で計算することを目標としているが、MPI通信の最適化を行い 地球シミュレータでも 1/36度の設定で十分に動くことが示された。 また、次の 3 つか ら構成される MRI.COM を用いた日本沿岸モデル(単方向ネスティング)を構築した。

LO: 1/4° x1/6° 格子全球モデル

L1:1/12°x1/18°格子北西太平洋モデル

L2:1/60°x1/90°格子日本近海モデル

このモデルを用いて FORA-WNP30 の水温・塩分を IAU で取り込んだ積分(初期値化)を 1 ヶ月行い、その後予測 run を 1 ヶ月行うとともに、L2 の内側にさらに日本沿岸全域を含 む水平約 500m 格子(1/180° x1/270°)の L3 モデルも作成した。

RIAMOM と MRI.COM の比較に関しては、それぞれのモデルを用いて気候変動に伴う日 本海の海洋循環の将来予測実験をそれぞれのグループで行った結果についての情報交換を 行った。MRI.COM を用いた将来予測計算では異なるシナリオ・外力を用いたケースを複 数行なっており、外力によってかなり異なる予測結果が得られていた。RIAMOM を用い た将来予測は1ケースのみであったが、MRI.COM で得られた結果の一つと定性的によく 似た結果となっていた。このことは気候変動に伴う将来予測実験を複数のシナリオ・外力 で行うことの重要性を示唆するものである。また、それぞれのモデルで得られたプロセス の解析を進めることで、将来変化のメカニズムをより高い信頼性で得られることが期待で きるとともに、モデルの改良にむけた課題の抽出を行うことができると考えられる。

成果報告

西川 史朗・石川 洋一 (JAMSTEC), 若松 剛 (NERSC):日本周辺海域の気候変動に関 する将来予測.九州大学応用力学研究所研究集会「日本周辺海域における海況のモニタ リングと波浪計測に関する研究集会」 2018 年 12 月 13 日.

研究組織

石川洋一(代表)地球情報基盤センター・グループリーダー 研究のとりまとめ

- 佐々木英治 アプリケーションラボ・主任研究員 モデル計算および解析
- 小守信正 アプリケーションラボ・主任技術研究員 モデル計算および解析
- 小室芳樹 北極環境変動総合研究センター・ユニットリーダー モデル計算および

解析

粒子追跡モデルを用いた奄美海域産スジアラ卵仔魚の輸送過程と最大着底率の推定

鹿児島大学 理工学域工学系 加古真一郎

1.はじめに

西太平洋から東インド洋の熱帯〜亜熱帯域に棲息するハタ科魚類であるスジアラは、国内外を問わず高級 食材として高値で取引されている(宍道,2016)。我が国の南西諸島海域の沿岸漁業者にとっても、本種は最も 重要な水産資源の一つである。実際、奄美海域ではこの資源保護のため、過去20年以上にわたって、人工種 苗生産や稚魚の放流が鹿児島県水産技術開発センターなどによって実施されている。加えて、一部の漁協で は、小型魚の漁獲を禁止する漁獲体重制限などの対策にも取り組んでいる。しかしながら、奄美海域におけ るスジアラの漁獲量は1998年をピークに年々減少し、近年も低位横ばい傾向が続いているため、その資源減 少が懸念されている。上記以外の資源保護対策の一つとして産卵期・産卵場の保護が想定されるが、その効 果は一切不明である。そこで本研究は、高解像度の海洋循環モデルと粒子追跡モデルを組み合わせ、奄美海 域産スジアラ卵仔魚の輸送過程とその着底率を推定し、資源保護の有効性を検証した。

2. 使用モデル・実験設定

本研究は、奄美群島周辺を対象海域(126°E-132°E, 26°N-30°N)とし、Kako et al. (2014)と同様の粒子 追跡モデルを用いて数値実験を行った。この粒子追跡実験では、主に表層を漂流するスジアラ卵仔魚 (Doherty et al., 1994)の輸送過程を推定するため、九州大学応用力学研究所で開発された Data assimilation Research of the East Asian Marine System Energy (DR_E; Liu et al., 2017)の表層流速 場を用いた。両モデルの空間解像度は緯度方向に 1/60°、経度方向に 1/75°、時間解像度は 1 時間である。 スジアラは、5-7月における新月の大潮期に産卵し(Ebisawa, 2013)、次の大潮期にその仔魚は稚魚とな

って着底する (Doherty et al., 1994)。この知見を踏まえて、粒子追跡実験の開始日は2007 - 2015 年の当 該日とし、着底までの期間を 31 日と仮定して計算を行った(全 27 ケース)。スジアラは、サンゴ礁周辺で産 卵するので(Samoilys and Squire, 1994)、粒子の初期位置は奄美群島各島の湾口付近などの 27 地点とし、 各地点から粒子を 1000 個ずつ放流した。スジアラ仔魚の着底域は、サンゴ礁内側の"ガレ場(死んだサンゴ が積み重なった場所)"とされている(Light and Jones, 1997)が、空間解像度が約 1.5km である DR_E で は、ガレ場内における卵仔魚の漂流・着底プロセスを詳細に再現することはできない。そこで本研究は、計算 期間の最後の 4 日間に、陸に最も近いモデル格子に一度でも侵入した粒子は、そこで着底する可能性があっ たとみなし、その粒子数を最大着底率として見積もった。

3. 結果

図には示さないが、31日後であっても、奄美群島周辺海域には多くの粒子が存在することが実験を通して 明らかとなった。これは、奄美大島と喜界島の間に存在する南向流や、黒潮内側域の高気圧性渦によって粒 子が海域内に捕捉されることに起因する。モデル海域内の粒子数に経年・季節変化はあるものの、全ての粒 子がモデル海域外へと輸送されることはなかった。図1は、奄美群島の各島における仔魚の最大着底率を月 ごとに積み上げ棒グラフで表したものである。最大着底率は、2013年5月のように約50%に達するケースが 存在する一方で、2014、2015年の6月のように数%程度のケースもある。この経年変化の理由を明らかにする

11

ため、最大着底率の偏差がその標準偏差よりも高い年と低い年に分け、各月の流速とその回転場のコンポジ ット平均を計算し、それぞれの全平均場との比較を行った(図2)。その結果、流速場が最大着底率の年変動 に与える要因が2つ存在することがわかった。一つ目は、奄美大島北西側の高気圧性渦の強度である。最大 着底率が高いケースでは、奄美大島北西沖の流速が強く(図2g, 2i)、負の回転成分が大きい(図なし)。これ は、黒潮が例年よりも南下することにより(図2g, 2i: 黒線参照)、この海域周辺の時計回りの渦が強化され ることに起因する。そして、この渦に多くの粒子が捕捉されるため、同海域の粒子数は増加する。二つ目は、 琉球海流の存在である。最大着底率が低いケースでは、北東向きの流れとして特徴づけられる琉球海流が強 いため(図2e, 2f)、多くの粒子がモデル海域外へと流される。一方、図2(h)の様に、琉球海流が弱化すると、 黒潮内側域の渦の強度に関わらず、粒子の着底率は上昇する。

4. まとめ

本研究は、海洋循環モデルと粒子追跡モデルを組み合わせ、奄美群島周辺海域におけるスジアラ卵仔魚の 輸送過程とその稚魚の最大着底率を推定し、資源保護に対する産卵期・産卵場の保護の有効性を調べた。そ の結果、稚魚の最大着底率は、奄美大島北部の高気圧性渦と琉球海流の強度に起因して数%から 50%程度まで 年変動することがわかった。このことから、産卵期の保護の有効性は、年ごとに大きく異なることが示唆さ れるが、流速場の予測が可能であれば、産卵期の保護のあり方を毎年きめ細やかに検討できる可能性も示さ れた。



平均場 着底率が高い 着底率が低い f - -x5月 $\int d = \int d d = \int d d = \int d d = \int$

図2. 流速の全平均場(左)と流速のコンポジット平均値の全平均値 からの差。正の値はコンポジット平均の方が平均値と比べて流速 が強いことを示す。黒線は各ケースの黒潮の平均流軸位置を示す。

6. 研究体制

代表者	鹿児島大学理工学域工学系	助教	加古	真一郎
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	学術研究員	高山	勝巳
協力者	鹿児島県水産技術開発センター	研究専門員	宍道	弘敏

海洋モデルを用いた、淡水供給の富山湾の海洋構造に対する影響の推定

富山県農林水産総合技術センター水産研究所 小塚 晃

1. 目的

富山湾では、定置網漁業を主体とした沿岸漁業生産が盛んである。漁獲物は、秋から冬にかけて日本 海を南下する際に富山湾に来遊する種が多く、漁獲量は魚群の来遊状況と滞留時間による影響を受けて いると考えられる。魚群が来遊し湾内に滞留する理由として、南下経路が能登半島によって物理的に遮 断されているだけでなく、避寒行動を示す水産生物にとっては水温等の海洋環境も影響していると考え ている。

富山県農林水産総合技術センター水産研究所では富山湾とその周辺海域の海洋観測を毎月実施して いる。この結果から、冬期の湾奥部では、湾口部に比べて約 0.5℃程度温かい暖水域が形成されること がわかっている。この原因として、湾奥部では河川水の影響を受けて海面冷却が遅れるためと考えてい るが、そのメカニズムは不明である。本研究では、河川水の富山湾に対する影響を調べるために、海洋 同化モデル DREAMS_M において海洋物理環境が再現できているかを確認し、暖水域の形成過程を解 明する。

2. 方法

本研究では、DREAMS_M から日別の水深 1~200 m(17 層)のデータを使用した。

冬期に富山湾奥部に暖水域が形成される様子が再現されているかを確認するために、1992年から2017 年の9月1日~翌年3月1日について、月単位の海洋観測結果とDREAMS_Mのデータから平均水温 場を作成した。

DREAMS_M における湾口部(北緯 37.4 度、東経 137.5 度)と湾奥部(北緯 36.867 度、東経 137.083 度)の2地点において水温・塩分の鉛直分布の時間変化を作成した。

3. 結果および考察

実測値と DREAMS_M の平均水温分布から、両者とも 12~3 月にかけて湾口部より湾奥部の方で水 温が高くなっていた。水深 100 m における湾口部と湾奥部の水温差は 1 月に最高となり、実測値の水温 差は 0.50℃(図 1)、DREAMS_M では 0.71℃であった(図 2)。実測水温の方がやや低めであるが、 DREAMS_M で概ね湾奥部に暖水域が形成される様子が再現されていた。

水温・塩分の鉛直分布の時間変化の例として、2016 年 9 月 1 日~2017 年 3 月 1 日の期間の湾口部、 湾奥部における DREAMS_M の結果をそれぞれ図 3,4 に示した。等温線が 5℃ごとに太線で描かれて おり、水深 100 m が 15℃を下回る時期は、湾口部では 12 月中旬(図 3)、湾奥部では 12 月下旬(図 4) で、湾奥部の方が水温の低下が遅くなっていた。また、12 月中旬から 2 月中旬にかけて、湾口部では 等温線が垂直であるのに対し、湾奥部では右に凸の曲線を描いている。湾奥部の凸部分には上層部より も水温が高く、極大となる水塊が存在していることを示している。塩分も合わせて見ると、上層部は低 温低塩分からなる低密度水で、その下に高温高塩分の高密度水が存在し、成層を保っていることが分か る。

冬期の富山湾奥部に暖水域が形成されるメカニズムは、河川水と海水が混合し低密度水が上層にとど まることによって、高塩分の対馬暖流水の鉛直混合および冷却を遅くする効果があるためと考えられた。 今後、対馬暖流の塩分や、河川流入量などの要素がどの程度、暖水域の形成に影響するのか検討する必 要がある。



図 3. 湾口部の水温・塩分の推移



4. 発表等実績.

なし

5. 研究組織

研究代表者	富山県農林水産総合技術センター水産研究所	小塚	晃	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	九州大学応用力学研究所	千手	智晴	准教授

対馬海峡から日本海南西海域にかけての海洋環境モニタリング

-数値モデルとの比較データの収集-

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,当海域の数値モデルと比較しうる観測データの収集を目指ざす。

2. 観測

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。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。同海域で,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。

数値モデルに同化する観測データを得るために,漁業者が操業中に観測しやすい CTD として smart-ACT (JFE アドバンテック社製)を開発している。多くの漁業者が観測を行えば、同化モデルにと って、時空間的に密なデータが得られると考えられる。長崎大学水産学部附属練習船「長崎丸」を用い、 対馬海峡において、この smart-ACT の動作テストを行った。ここで、長崎丸の CTD (SBE 911plus)と smart-ACT の同時観測を行った。smart-ACT データは、タブレット端末(またはスマートフォン)のア プリケーション (いであ株式会社の開発) で収集できる。タブレット端末が一旦インターネットに接続 されれば、自動的に陸上研究室から観測データを取得できる。本報告では、長崎丸 CTD と smart-ACT で得られた水温・塩分分布を示す。

3. 結果

2018 年 9 月 15 日における水温と塩分の鉛直断面をそれぞれ図 1 と図 2 に示す。長崎丸 CTD と smart-ACT の観測結果には、大きな差異はなかった。ただし、smart-ACT の塩分分布は、長崎丸 CTD の それと比べ、小さいスケールの構造が確認でき、観測ノイズの可能性も残された。

博多ー対馬間の東水道中央部の表層は高温の対馬暖流水であった(図1)。対馬以北の西水道表層は低 塩化しており、長江希釈水の影響を受けていると考えられた(図2)。東水道・西水道ともに、下層(約 100 dbar 深)には、低温・高塩分水が分布していた。

謝辞

CTD 観測では、長崎丸の船長をはじめとする乗組員の皆様の協力が不可欠でした。ここに感謝の意を表します。



図1. 対馬海峡横断線における水温の鉛直断面(上図:長崎丸 CTD,下図:smart-ACT)。



図2. 対馬海峡横断線における塩分の鉛直断面(上図:長崎丸 CTD,下図:smart-ACT)。

研究組織

長崎大学 大学院 水産・環境科学総合研究科	滝川哲太郎(研究代表者)
九州大学 応用力学研究所	千手智晴 (所内世話人), 広瀬直毅 (研究統括者)
福岡県 水産海洋技術センター	森 慎也,林田宜之(研究協力者)
山口県 水産研究センター	渡辺俊輝,廣畑二郎(研究協力者)
島根県 水産技術センター	金元保之(研究協力者)
愛媛大学 沿岸環境科学研究センター	森本昭彦(研究協力者)

全球雲解像モデルを用いた雲エアロゾル相互作用の放射強制力

名古屋大学工学研究科 佐藤陽祐

<u>1、目的</u>

本研究ではエアロゾル輸送モデル(SPRINTARS[1])と全球雲解像モデル(NICAM[2])を結合した NICAM-SPRINTARSの全球実験とその結果の解析によって、気候予測の最大の不確定性要素であるエア ロゾル・雲相互作用の理解の深度化を目指した。従来気候予測に用いられてきた大循環モデル(GCM)はその 解像度の粗さから雲を直接計算することができず、エアロゾルが雲に及ぼす影響も直接できないため、エアロゾ ル・雲相互作用の見積もりには大きな不確実性が伴っている[3]。この不確実性低減に向けて、平成29年度よ り、雲を全球スケールで直接解像することができる全球雲解像モデル NICAM-SPRINTARSの計算を行って いる。本年度は平成29年度までに終了した計算結果を詳細に解析し、エアロゾル・雲相互作用の不確実性を 評価した。

2、数値モデルと解析方法

本年度は平成 29 年度までに計算が終了した NICAM-SPRINTARS [4]の、全球 14km 解像度で1年間の積 分の計算結果を解析した。エアロゾル・雲相互作用の指標として、平成 29 年度と同様に、Cloud Susceptibility (λ [5])を用い、雲頂温度が 273 K よりも高い暖かい雲を対象として解析を行った。本年度は NICAM-SPRINTARS の結果から求めたんと、Nakajima and Schulz(2009) [6]を参考に、2000 年代から 様々な方法によって求められているんを比較した。

3、実験結果

図1は2000年代から先行研究によって求められたλ(図1の上から3番目以降)と、本研究で平成29年度ま でに求めたNICAM-SPRINTARSから算出したλの値(図1の上から2番目)である。2000年代前半の研究 では、多くの先行研究がλを正の値と報告している一方、本研究で求められたNICAM-SPRINTARSのλは負 の値となっている。近年の衛星観測から得られたλ[6]や、また近年報告されている理論的な考察[7]ではλは負 の値になるとされており、本研究の結果は近年の報告を支持するものになっている。

しかしながら、衛星観測を用いた最新の結果では、λは 2000 年代に考えられていたよりも 2~3 倍程度大きな 正の値になると報告されており(図 1 の一番上[8])、λの見積もりの不確かさは大きく、エアロゾル・雲相互作用 の不確実性は依然として大きいことが示された。

4、今後の課題

本研究の目的である放射強制力の議論をするにあたっては、本研究で明らかになったエアロゾル・雲相互作用 の指標(λ)のばらつきの理由を明らかにしなければならない。そのため、本年度は放射強制力の見積もりまで至 ることができなかった。このようなλのばらつきの要因は、Rosenfeld et al. (2019) [8]が指摘しているように、図1 に提示したそれぞれの文献で報告されているλの求め方が必ずしも一致していないことにも起因している可能性 がある。そのため、今後は先行研究で求められたλの算出方法を検証して、同じ条件でλを算出するなどして、λ の違いを生む要因を明らかし、その上で、放射強制力の評価を行って行く必要がある。

17



図1:本研究で求めたん(上から2番目)と、先行研究で求めたんの見積もり。

(Sato and Suzuki, 2019 [9]から引用)

5、研究成果報告

本研究で得られた成果は Science 誌の一般向けの記事 (Perspective)として発表された[9]。また Nature

Communication 誌から、成果として発表された(昨年度の報告書作成時には未発表であった)[10]。

参考文献

- 1. Takemura T et al., J Geophys Res. 2005;110: D02202. doi:10.1029/2004JD005029
- 2. Satoh M et al., Prog Earth Planet Sci. 2014;1: 18. doi:10.1186/s40645-014-0018-1
- 3. Stocker TF et al. IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. IPCC. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press; 2013.
- 4. Suzuki K, Nakajima T, Satoh M, Tomita H, Takemura T, Nakajima TY, et al. Global cloudsystem-resolving simulation of aerosol effect on warm clouds. Geophys Res Lett. 2008;35: L19817. doi:10.1029/2008GL035449
- 5. Ghan S et al., Proc Natl Acad Sci. 2016; 201514036. doi:10.1073/pnas.1514036113
- 6. Nakajima T, Schulz M. What do we know about large-scale changes of aerosols, clouds, and the radiation budget? In: Charlson JH, Robert J, editors. Struüngmann Forum Report: Clouds in the Perturbed Climate System Their Relationship to Energy Balance, Atmospheric Dynamics, and Precipitation. Cambridge: MIT Press; 2009. p. 597.
- 7. Stevens B., J Clim. 2015;28: 4794–4819. doi:10.1175/JCLI-D-14-00656.1
- 8. Rosenfeld D et al., Science. 2019;363: eaav0566. doi:10.1126/science.aav0566
- 9. Sato Y, Suzuki K. Science. 2019;363: 580-581. doi:10.1126/science.aaw3720
- 10. Sato Y, et al. Nat Commun. 2018;9: 985. doi:10.1038/s41467-018-03379-6

海底資源探査用グライダー型海中ビークルの開発

九州大学大学院工学研究院 山口 悟

1. 研究の目的

近年,日本近海の海底資源の開発が注目を集め,海底資源の賦存量や賦存場所を把握するための様々 な調査方法が提案されている。本研究では、OBEM (Ocean Bottom Electromagnetometer)を用いた調査 方法に注目し、グライダー型水中ビークルに OBEM を搭載し、自律的に観測・移動を実施するための観 測機材の開発を試みた。本装置の実用化により、OBEM 計測において現在問題となっている船舶による 投入・回収・移動のための作業時間およびコストの増大が解消され、OBEM による広範囲、長時間の連 続調査が効率的に実施可能になると考えられる。

本年度の研究では、特に潜降・浮上装置の開発とその制御系の設計を実施した。すなわち、水中重量調節 装置の開発と特性の把握、これに基づく制御系設計に 取り組み、九州大学応用力学研究所における水槽試験 等を実施した。開発中の機体の写真を Fig.1 に示す。



Fig.1 Underwater glider

2. グライダー型海中ビークルの概要

開発中のグライダー型海中ビークルは装着された翼により滑空することで目的の海底計測点に移動 し、着底後調査を行う。その後、適当な高度まで浮上し、再び次の調査地点へ滑空により移動する。OBEM による計測を行うため、本機体はセンサー用電極を装着した十字形のアームを有しているが、滑空中の 流体抵抗を減少させるために、アームを覆うように翼面を形成している。翼面下には、前後に2つの耐 圧容器を有し、前方容器には水中重量調節装置、後方容器には運動制御装置(重心移動装置)やセンサ ー、コンピュータが搭載される。Fig.2に機体の内部構造を示す。



Fig. 2 Construction of the vehicle

3. 水中重量調節装置の特性調査と運動制御系の開発

これまでの研究で実施された実海域試験結果に基づき運動制御系を設計した。ここでは、制御系を機体に実装するために運動制御用の重心移動装置と水中重量調節装置のハードウェアを開発し、これらの動特性を実験により求め、運動モデルを構築する。Fig. 3 に水中重量調節装置と重心移動装置の写真を示す。また、水中重量調節装置の水槽実験の様子と重量変化の時刻歴を Fig. 4 に示す。図には理論値、空中および水中における実験結果が合わせて示されている。



Fig. 3 Buoyancy control and weight shift devices



Fig.4 Experimental results for buoyancy control device

調査結果に基づき,着底動作における運動制御系の検 討を行った。PID 制御によるシミュレーション結果の一 例を Fig.5 に示す。図は上より,着底時の機体位置を示 す軌跡,深度時刻歴およびピッチ角,重心移動装置,前進 速度,潜降速度の各時刻歴を示す。本条件における滑空 比は約 1:4 である。図中の3 種類の結果はそれぞれ,海 底からの高度 3m, 4m, 5m で着底用運動制御系を作動さ せた場合の結果であり, 4m, 5m で始動した場合には着底 時に前進速度がほぼ0となっていることが分かる。

4. まとめ

海底資源探査用グライダー型水中ビークルの機体開 発と潜降・浮上用運動制御系の開発を行った。すなわ ち,水中重量調節装置の動特性を調査するため,水槽 実験を実施した。また,数値シミュレーションにより 着底時の機体運動を調査し,重心移動装置を PID 制御 系により制御することで適切な着底動作が可能となること を確認した。

5. 成果報告

- 1) Yamaguchi, S et. al. (2018), "Gliding Performance of an Underwater Glider for Ocean Floor Resources Exploration", *Proceedings of the Twenty-eighth (2018) International Ocean and Polar Engineering Conference*, 405-409.
- Yamaguchi, S (2018), "Landing Point Control of an Underwater Gliding Vehicle for Ocean Floor Resources Exploration", *The 16th IAIN World Congress 2018.*



Fig.5 Landing controlled by a PID controller

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、日向灘における 表層流況変動の把握を目的に、海洋レーダによる試験観測を実施している。本報は、両局で取得した流 速値の精度を検証した。

2. 使用したデータ

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「宮崎局」)に、2017年3月に野島漁港(以下「野島局」)に設置した(図1)。この うち、2017年3月~2018年1月末までのデータを使用した。短波海洋レーダのシステム構成及びレー ダ局並びにデータ処理は既報に準じた(藤井、2001)。解析では、両局のレーダで計測された視線方向 流速を、時刻補正してベクトル合成した、2時間毎の二次元格子点の表層流を使用した(図2)。 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



●は表層型浮魚礁うみさち4号の位置を示す。

★は表層型浮魚礁うみさち4号の位置を示す。

(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、両データが取 得されていた約7ヶ月間で解析した。

3. 結果

移動平均時間に対するレーダ流速と4号流速の相関係数を比較すると(図3, 左図), どの移動平均時間に対しても東西流速は南北流速より高い相関係数であった。各成分を詳細に見ると, 東西方向は移動

平均時間によらず相関係数 0.8 以上と高いが,南北成分は移動平均が 24 時間前後の約 0.7 を境に,24 時間未満で低く,それ以上で高くなっている。これらを反映して,1日平均したレーダ流速と4号流速 の相関係数は,東西流速で 0.92 と高く(図 3,中図),南北成分が 0.62 と低い(図 3,右図)。両レーダの 視線方向流速を合成した流速ベクトルの精度は,両レーダのビーム交差角が 90°の時に最も高精度とな り,それより小さい角度になるにつれて精度が低下することが知られている。両局のビーム方向は主に 東西方向に向いていため、レーダ流速と4号流速の東西成分の相関係数は高いが、ビーム方向と直角し て交差角 28.4 と低い南北成分の相関係数は低くなったと考えられる。以上のことから、海洋レーダに よる流速ベクトルデータを使用する際の留意点として、流速ベクトルの南北成分は東西方向に比べて低 精度であることに加えて、高精度となる1日平均値を使用したほうがよいと考えられる(図 4)。今後は、 1日平均の流速値を解析して、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。



図3 レーダ流速と4号流速の移動平均時間に対する相関係数(左図),1日平均のレーダ流速と4号流速の東方成分(中図)と北方成分の散布図(右図)



図4 4号近傍における HF レーダによる日平均流速ベクトルの時系列

4. 論文等 なし

5. 研究組織

代表者	宮崎県水産試験場	主任技師	渡慶沙	、 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	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	琉球大学工学部	教授	藤井	智史
協力者	琉球大学工学部	修士1年生	池原	日向

ハイブリッド式自律型海中ロボットの運動性能評価に関する開発

□研究目的

本研究の目的は,海洋環境生態系の モニタリングを行うためのハイブリッド式 自律型海中ロボット(HAUV:Hybrid-type Autonomous Underwater Vehicle) KAUBE-1500の運動性能を明らかにする ことである。この機体は,小型高圧海水 ポンプを用いた浮力調整装置と重心移動 装置,4基の水中スラスターを装備し,水中 グライダーとしての推進性能と通常のAUV としての運動性能を持ち合わせている。 また,浮力調整装置と重心移動装置を適切 大阪府立大学・大学院工学研究科 有馬 正和



Fig.1 ハイブリッド式自律型海中ロボット KAUBE-1500

に制御することによって、鉛直姿勢での潜入および浮上を実現することができる。

グライディングから水中(海底)での水平移動への遷移および鉛直姿勢への円滑な運動 を実現するためには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、 海中ロボット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。また、貴研究所・海洋大気力学部門・海洋流体 工学分野は、海中ビークルの運動制御に関する研究において極め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自律型海中ロボットに係る研究の飛躍的 な進展が図れると期待した。

□研究の成果

本研究では、九州大学応用力学研究所の深海機器力学実験水槽においてハイブリッド式 自律型海中ロボット KAUBE-1500の水槽試験を実施し、その潜航性能を明らかにすること ができた。KAUBE-1500の仕様を Table 1 に、水槽試験の様子を Fig.2 に示す。水槽試験 では、遠隔操縦によって浮力調整装置および重心移動装置を制御して機体の姿勢を変化 させて垂直の潜入と浮上を実現できることを確認した。また、水中スラスターを駆動させて 円滑な姿勢変化ができることを確かめることができ、本機体が所期の目的を果たすことの できる潜航性能を備えていることが明らかとなった。この水槽試験を経て、12 月初旬に 鹿児島湾において実海域試験を実施することができたことを附記する。

Length	2.650 m
Breadth (wing span)	1.560 m
Height (including upper rudder)	1.060 m
Diameter of fuselage	0.262 m
Mass	abt. 232 kg
Volume of ballast tank	10.0 <i>l</i>
Cruising speed	0.17 m/s
Maximum operational depth	1,500 m

Table 1 Specifications of KAUBE-1500.



Fig.2 ハイブリッド式自律型海中ロボット KAUBE-1500の潜航試験の様子 (右より,潜入時・水平潜航・浮上時)

□研究組織

氏名	所 属	職 名	役割・担当分野
有馬 正和	大阪府立大学・ 大学院工学研究科	教授	代表者・総括、システム計画
太田 稔宏	永光産業(株) 大阪府立大学大学院	代表取締役社長 社会人ドクター	実験の解析・評価
村山 豊	永光産業(株)	技術部	実験補助
山下 清司	神戸市産業振興財団	顧問	水槽試験の助言
中村 昌彦	九州大学・応用力学研 究所	准教授	所内世話人

□研究成果の報告について

共同研究先との協議により、現在、知的財産権の関係で公表を見合わせています。

海洋環境シミュレーション水槽とループ法を使用した吹送距離延長法の確立

兵庫県立大学大学院工学研究科機械工学専攻 高垣直尚

・要旨

海洋や河川上で風シアが生成要因となって発生する風波の発達は、大気海洋間の運動量・熱・物質輸送 に影響を及ぼすことから、この各種の輸送量を計測し正確にモデル化するためには、外乱を除去可能な 風波水槽を使用することが重要である.今年度は、共同利用施設である九州大学応用力学研究所の風波 水槽を使用して、(1)風波の発達区間に関する解析、(2)高風速対応水槽への改修工事および準備実験、 を行った.その結果、(1)の解析および(2)の改修工事等を予定通り実施することが出来た.

・序論

海洋や河川上で風シアが生成要因となって発生する風波の発達は、大気海洋間の運動量・熱・物質輸送 に影響を及ぼすことから、この各種の輸送量を計測し正確にモデル化するためには、外乱を除去可能な 風波水槽を使用することが重要である.しかし、風波水槽では、水槽長さの 100 m 程度までしか風波を 発達させることは出来ず、実際の海洋での風波(30 km 程度発達し続ける)を、現在の風波水槽で生成す ることは不可能である.そこで本研究では、九州大学応用力学研究所の海洋シミュレータ水槽を使用し て、波の持つ性質を示す統計量が同じ波を風波水槽入口から何度も送ることで長い吹送距離で発生する 波を再現する、いわゆるループ法の確立を目的とする.今年度は、風波の発達区間、いわゆる吹送距離、 に関する解析および高風速対応水槽への改修工事および準備実験を行った.そこで、以下では高風速対 応水槽への改修工事の内容・結果について報告する.

・実験方法および実験結果

昨年度までの大型風波水槽を用いた実験では、高風速時にテストセクション末端部で砕波が水槽外部 に漏れ出すことや、天板が強風により吹き飛んでいくといった問題があったために、高風速下での風波 実験が不可能であった.今年度は上記の問題点を解決すべく対策として、液滴除去装置の設置および風 波水槽上部の天板強化を行った.同時に、より高風速を実現するため、ファン回転効率を上げるためのグ リス注入および整流胴のメッシュ除去も行った.その結果、海水面上高さ風速であるU10が33.6 m/s以上の 高風速を実現可能となり、九州大学の大型風波水槽において、台風シミュレーション水槽を作製するこ とに成功した.

・成果報告(論文、学会発表リスト等)

- Takagaki, N., K. Takane, H. Kumamaru, N. Suzuki, and S. Komori (2018), Laboratory measurements of an equilibrium-range constant for wind waves at extremely high wind speeds, Dynamics of Atmospheres and Oceans, 84, 22-32, doi:10.1016/j.dynatmoce.2018.08.003.
- 2. 高垣直尚,高根慧太,高畑俊作,岩野耕治,鈴木直弥,小森 悟,強風速下における抗力係数と風波

スペクトルの評価,日本流体力学会 年会 2018,大阪大学 豊中キャンパス,2018 年 9 月 2~6 日 3. 磯川橘花,高根慧太,高垣直尚,高風速時の気液界面を通しての運動量輸送量の測定,日本機械学会 関西支部学生発表会,立命館大学,2019 年 3 月 10 日

・研究組織

研究代表者:高垣直尚 研究協力者:高根慧太 研究協力者:髙畑俊作 研究協力者:磯川橘花



Fig. 1: Schematic of droplet removal system.



Fig. 2 : Relationship between rotation speed N and wind speed at 10 m height U_{10} .

衛星・地上ライダ/レーダ解析のための粒子散乱アルゴリズム開発

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

氷雲の生成や雲微物理特性を明らかにするには、雲粒子の形状等による光学特性の違いに敏感なライ ダ/レーダ観測を地上と衛星の両面から行い複合的に解析する事が有効である。本課題では九大応力研 大気物理研究室が主体となって開発している多重散乱ライダ及び、衛星ライダ/レーダの解析に適用可 能な多重散乱物理過程モデルの検証等のための技術支援を行った。また気象研究所で開発した氷晶モデ ル及び散乱特性計算手法により、大気物理研究室で開発しているレーダ・ライダ複合解析による氷雲解 析アルゴリズムの基礎部分である散乱理論計算データの拡充を図った。

·研究方法

ライダ多重散乱計算では、これまでに開発した Backward Monte Carlo 法による多重散乱コードに加 え、計算効率と汎用性をより高め Forward Monte Carlo 型に改良したものを開発する。氷晶散乱特性 については、粒子形状や大気中での配向の設定、散乱計算手法を精査し、散乱特性計算を実施する。

·研究結果

衛星・地上ライダの観測条件で、開発したモンテカルロ法を用いたライダ多重散乱コードと国際的に 開発されている複数のモンテカルロ手法との相互比較を行った結果、計算結果に良い整合性が得られた [1]。また、本課題の世話人である大気物理研究室 佐藤助教が開発したベクトル型のライダ多重散乱物 理過程モデル[1][15]では、モンテカルロ手法に対して良い精度で初めて高速に衛星ライダの偏光成分 を取り扱うことが可能となった([9]-[11])。これらの研究成果は国際学術誌 Optics Express において Editor's Pick に選出された[1]。

氷晶のライダ後方散乱特性については、これまでの研究により気象研で開発した改良型幾何光学近似法(Geometrical Optics-Integral Equation: GOIE)と、Borovoi 教授(V.E.Zuev Institute of Atmospheric Optics)による Physical-Optics approximation (PO)法がほぼ同じ後方散乱特性を算出できることが明らかとなった。これを受けて、PO法での計算が困難であり、また HIMAWARI8 号データ解析にも用いられている複雑形状粒子のモデルであるボロノイ型凝集体氷晶モデル[3][5]について、GOIE法によるライダ3波長での後方散乱特性の計算を実施し、その結果をライダ解析アルゴリズムの基本データとして提供した[14]。

ライダ/レーダによる大気観測の今後の発展を見据え、内部混合を考慮したエアロゾル形状モデル[2] や、X線マイクロ CT による積雪断面画像の解析から開発した雪粒子モデル[6][16]、また雪粒子の融解 を考慮した2成分系粒子の可視からマイクロ波における散乱計算手法の開発を行った[7][8]。これら粒 子モデルのライダ/レーダ散乱特性を計算してデータベースに加えることにより、より高度な解析アル ゴリズム開発の実現が期待される。

・成果報告

査読付き学術論文

 Sato, K., H. Okamoto, H. Ishimoto, 2019: Modeling the depolarization of space-borne lidar signals. Optics Express, 27, A117-A132.

[2] Ishimoto, H., R. Kudo, and K. Adachi, 2019: A shape model of internally mixed soot particles derived
from artificial surface tension. Atmospheric Measurement Techniques, 12, 107-118.

- [3] Letu, H., T. M. Nagao, T. Y. Nakajima J. Riedi, <u>H. Ishimoto</u>, A. J. Baran, H. Shang, M. Sekiguchi, and M. Kikuchi, 2018: Ice cloud properties from Himawari-8/AHI next-generation geostationary satellite: Capability of the AHI to monitor the DC cloud generation process. IEEE Transactions: Geoscience and Remote Sensing, 1-11.
- [4] Hara, Y., T. Nishizawa, N. Sugimoto, K. Osada, K. Yumimoto, I. Uno, R. Kudo and <u>H. Ishimoto</u>, 2018: Retrieval of Aerosol Components Using Multi-Wavelength Mie-Raman Lidar and Comparison with Ground Aerosol Sampling. Remote Sensing, 10, 937.

- [5] <u>Ishimoto, H.</u>, K. Masuda, Development of particle optical models for satellite remote sensing, CARE-2018, 2018 年 8 月, 中国, 北京
- [6] <u>Ishimoto, H.</u>, T. Tanikawa, S. Adachi, and K. Masuda, Shapes and Light Scattering Properties of Snow Particles Estimated from X-ray Micro-CT Imagery and Geometrical Optics Method Calculations, PIERS2018 Toyama, 2018 年 8 月, 富山県富山市
- [7] <u>石元裕史</u>、増田一彦、谷川朋範, 近赤外波長でのぬれ雪粒子の光散乱計算, 日本気象学会 2018 年度秋季 大会, 2018 年 10 月, 宮城県仙台市
- [8]石元裕史, 足立アホロ, 安達聖, レーダー反射特性解析のための融解雪片モデルの開発, 日本気象学会 2018 年度春季大会, 2018 年 5 月, 茨城県つくば市

- [9] <u>Sato, K., H. Okamoto, H. Ishimoto</u>, Development and Application of a physical model-based active sensor retrieval scheme, JpGU Meeting, 2018 年 5 月
- [10] <u>Sato, K., H. Okamoto, H. Ishimoto</u>, Physical model approach (PM) for the analysis of active sensor systems, 19th Coherent Laser Radar Conference, 2018 年 6 月
- [11] <u>Sato, K., H. Okamoto, H. Ishimoto</u>, S. Katagiri, EarthCARE L2 cloud/precipitation algorithms, 7th International EarthCARE Science Workshop & 1st ESA EarthCARE Validation Workshop, 2018 年 6 月
- [12] <u>Okamoto H., K. Sato, H. Ishimoto</u>, S. Katagiri, Analysis of cloud and precipitation microphysics: From A-train to EarthCARE, JpGU Meeting, 2018 年 5 月
- [13] <u>Okamoto H., K. Sato</u>, S. Katagiri, E. Oikawa, <u>H. Ishimoto</u>, Observations of cloud- and precipitationmicrophysics and vertical motion, 7th International EarthCARE Science Workshop & 1st ESA EarthCARE Validation Workshop, 2018 年 6 月
- [14] <u>岡本創,佐藤可織</u>,及川栄治,月原健太郎,長谷川奏一,<u>石元裕史</u>,菊池麻紀,CloudSat-CALIPSO, Aeolus, EarthCARE と GPM による雲・降水解析,日本気象学会 2018 年度秋季大会,2018 年 11 月

- [15] <u>Sato, K., H. Okamoto, H. Ishimoto</u>, 2018: Physical model for multiple scattered space-borne lidar returns from clouds. Optics Express, 26, a301-a309.
- [16] <u>Ishimoto H.</u>, S. Adachi, S. Yamaguchi, T. Tanikawa, T. Aoki, and K. Masuda, 2018: Snow particles extracted from x-ray computed microtomography imagery and their single-scattering properties. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 209, 113-128.

・研究組織

研究代表者 気象研究所 石元裕史

研究協力者 九州大学応用力学研究所 佐藤可織

研究協力者 九州大学応用力学研究所 岡本 創

学会発表(主著)

学会発表(共著)

参考文献

CloudSat/CALIPSO プロダクトを用いた 氷雲の地理分布とその気象要素との関係

長崎大学大学院水産・環境科学総合研究科 河本和明 東京大学 大気海洋研究所 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, ユーラシア大陸東部 (40-80N°,60-120E°)とユーラシア大陸西部(40-80N°,0-60E°)の雲特性の季節変動について明らか にした。ユーラシア大陸の全天雲量は冬季に明瞭な差が発生し,ユーラシア西部で雲量が大きくなる。 また,冬季(DJF)の雲頂温度-40℃以上の雲内部の雲温度-25~0℃域における雲の氷相割合に違いがあり, ユーラシア大陸東部ではユーラシア大陸西部に比べ,氷相割合が多く,水相割合は少ないことを明らか にした。これらの雲層内熱力学的相割合の東西差は季節変動があり,夏季(JJA)で最小,冬季で最大にな ることを明らかにした。このことは,冬季のユーラシア大陸東部では,ユーラシア大陸西部に比べて, 氷相の形成が促進している可能性を示唆している。

・序論

雲や降水は、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 が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。Oreopoulos et al. (2017)では、雲の鉛直分布の違いによって大気の放射特性が 大きく変化することを指摘している。Yamauchi et al. (2018)では、2007年1月を北半球冬季の代表例 として、ユーラシア大陸東西間の雲層内熱力的相割合に大きな違いがあることを明らかにしたが、本研 究では季節変動に着目し、ユーラシア大陸東西間の比較を行った。

・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ー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、 水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 2D 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、雲層内でライダーシグナル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7程度までの雲を対象としている。

・結果と考察

図1はユーラシア大陸東部(赤色)とユーラシア大陸西部(青色)での各月毎の全天雲量と雲層内氷 相発生割合を示している。ユーラシア大陸西部の雲量は夏季で最小になり,冬季に最大になる。ユーラ シア大陸西部の雲量は夏季と冬季では約30%異なることを示している。一方で,ユーラシア大陸東部の雲 量は60-70%と年間を通して大きく変化しない。これらの雲量は4月と10月付近で逆転することを示し

ている。また,雲層内氷相割合は4月から9月では5%程度の違いしか発生しないが、10月から2月では 最大で 20%程度ユーラシア大陸東部で大きくなっている。氷相発生割合の違いはユーラシア大陸西部で 雲量が大きくなる季節とよく対応しており,雲量を含む気象場の違いが氷相発生割合を変化させている ことが示唆される。今後はユーラシア大陸間の気象場や、氷晶核となるエアロゾル特性の違いにも着目 し,氷相発生割合に変化を与える原因について解明を行う予定である。

本研究の結果は,数値モデル出力結果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。



図1.各月毎の(a)ユーラシア大陸東部(赤色)とユーラシア大陸西部(青色)における全天雲量, (b)雲層 内氷相発生割合,黒色実線は氷相割合の差を示す(ユーラシア大陸東部-西部)。

・成果報告 学会発表リスト

Asia Oceania Geosciences Society (アジア-オセアニア地球科学連合)

Contrast of the Ice Cloud Fraction Between Eastern and Western Eurasia Using Calipso Data in Winter Time,

K. Kawamoto and Yamauchi, A.,

2018. June, 5, Honolulu, HI, USA (招待講演)

American Meteorological Society radiation cloud physics meeting(米国気象学会 放射と雲物理会合) Distinction of the Winter-Time Ice Cloud Fractions between Eastern and Western Eurasia Viewed from CALIPSO.

K. Kawamoto and Yamauchi, A.,

2018. July, 11, Vancouver, Canada(ポスター発表)

Photonics & Electromagnetics Research Symposium(光工学と電磁気学の研究シンポジウム) Examining the contrast in the ice cloud fractions between eastern and western Eurasia in winter with CALIPSO data, K. Kawamoto and Yamauchi, A.,

2018. August, 2, Toyama(口頭発表)

衛星搭載雲レーダと降雨レーダによる降水量抽出のためのアルゴリズム開発

研究代表者: 情報通信研究機構 特別招へい研究員 井口俊夫

要旨: 全球降水観測計画 (GPM 計画)の主衛星に搭載されている二周波降水レーダ(DPR)のデータ処理 アルゴリズムでは二周波での降水からのレーダエコーを用いて固体降水と液体降水の判別を可能とする アルゴリズムの開発を行っている。典型的な場合については良好に判別できるアルゴリズムが開発され ている。この共同研究では岡本教授らが携わっている雲レーダとライダーによる観測データに、DPR で 用いられているのと同様の手法が適用可能性を吟味し、可能ならばどのような場合にどの程度可能かを 検討した。また、DPR では用いられていないドップラー情報など他の情報の利用可能性についても検討 した。今年度は特に、DPR で観測された強い固体降水の全球での分布と CloudSat 搭載の雲レーダ(CPR) のデータを用いて岡本教授らが推定した降雪粒子の分布を比較し、比較的良くあっていることを確認し た。

序論: 全球降水観測計画 (GPM 計画)の主衛星に搭載されている二周波降水レーダ (DPR)の大きな 課題の一つは二周波のレーダ反射因子の情報を用いて雪、霰、雹などの固体降水の世界的な分布を捉え ることである。そのため、この共同研究の研究代表者は固体降水と液体降水の判別を可能とするアルゴ リズムの開発を行ってきた。他方、共同研究者である九州大学応用力学研究所の岡本創教授らは CloudSat 衛星搭載の雲レーダ(CPR)のデータから降雪の分布を推定するアルゴリズムを開発してきてい る。これらのアルゴリズムはどちらも開発途上であり、不確定要素を多く含んでいて、今後の改良が期待 されている。この共同研究では、両者による固体降水の分布を比較し、それの結果を吟味することによ り、それぞれのアルゴリズムの改良を目指す。

また、降雨に関しては、DPR では降雨強度を正確に推定可能であるが、雲レーダでは減衰や雪による散 乱の影響が大きく、正確な推定が困難である。研究代表者は DPR のアルゴリズム開発に長年携わってお り、その中で用いられている減衰補正方法などが CPR のデータを用いた降雨強度推定に利用可能かを CPR データの扱いに詳しい岡本教授らと議論し、その可能性を検討することもこの共同研究の課題であ る。

方法: CloudSat の雲レーダ(CPR)による降雪推定では、レーダのデータのみを用いた推定方法(C1)と、 それにライダーの情報を加えた推定方法(C4)の二つを開発し、両者の比較を行った。C1 では基本的に気 温のデータを用いて雲粒子の種類を判別しているが、C4 ではライダーによる後方散乱の情報を用いてそ の判別をしている。DPR による固体降水の推定は、二周波での見かけ上の反射因子の違いを基にした判 別方法であり、DPR の検出感度の関係から、強い固体降水しか検出できない。したがって、絶対量の分 布の比較はできないが、全球での相対的な分布を比較することは可能であるので、その分布を CPR を用 いた降雪分布を比較した。

結果: GPM/DPR と CloudSat/CPR のそれぞれを用いて季節別に推定した地表面に到達している降雪分 布を比較したところ、両者の分布パターンは良く似ていることがわかった。特に、北半球の冬季(12月、

1月、2月)の分布図で北大西洋のグリーンランド付近で他の地域に比べてはるかに多くの頻度で降雪か 観測されている点などでよくあっていた。CPR を用いた降雪の分布推定は米国の他の研究者なども行っ ているが、彼らが出した降雪分布よりも、岡本教授らのグループが出した降雪分布のほうが、DPR の強 い固体降水の分布とよく合っていた。

熱帯の海上における上空の降雪分布に関しては、CPR による推定頻度のほうが DPR によるものより相対的な分布頻度が多くなっていた。

CPR の場合、固体相と液体相が混ざった霙を雪と分離して推定することが可能である。霙の相対的な頻度分布が雪の頻度より高緯度地域では大きいことがわかった。この情報は DPR による固体層と液体層の境界高度を推定するアルゴリズムの開発に役立つものと思われる。

考察: CPR は DPR よりはるかに雪に対する感度が良く、降雪の検出に関しては、ほとんどすべて検出 可能である。ただし、多重散乱や減衰の影響で降雨システムの背が高い場合などその下部での降雪の定 量的な推定に関しては困難な点がある。他方、DPR では弱い降雪は検出されない。今回比較に使った DPR の指標は、特に強い固体降水(雹、霰および大きな雪粒子)の分布である。全固体降水の中で、DPR に より検出可能な強い固体降水(雹、霰および大きな雪粒子)の占める割合は、各降水システムや地域、季 節などにより違っていると思われるから、DPR と CPR による相対的な固体降水の頻度分布の比較は、 必ずしも同じ基準での比較とはいえないが、今回の比較により全固体降水の頻度と強い固体降水の頻度 の割合が地域的にも季節的にも極端に違っていることはないということが推定される。同時に、DPR に よる強い固体降水の検出アルゴリズムの妥当性がある程度確認されたことになる。また、雹や霰などの 大きな粒子に対しては、CPR のデータは多重散乱や減衰の問題だけでなく反射強度そのものに飽和する 傾向があり、データの扱いが難しい。DPR のデータとの比較によりどのような対処が可能か検討する価 値がある。これは残された課題である。

論文と学会発表のリスト

H. Okamoto, K. Sato, S. Ishii, Y. Ohno, H. Horie, T. Nishizawa, M. Kikuchi, Y. Sakai, T. Iguchi, N. Takahashi, and E. Oikawa, 2018: "Cloud and precipitation microphysics from A-Train and EarthCARE," SPIE, Asia-Pacific Remote Sensing 2018, Hilton Hawaiian Village, Honolulu, Hawaii, 24 September 2018.

T. Iguchi, R. Oki, and N. Kawamoto, 2018: "GPM's Dual-frequency Precipitation Radar (DPR) algorithm and measurement of ice precipitation," European Conference on Radar in Hydrology and Meteorology (ERAD) 2018, Ede, Netherlands, 2-6 July 2018.

T. Iguchi, K. Kanemaru, and A. Hamada, 2018: "Possible improvement of the GPM's Dualfrequency Precipitation Radar (DPR) algorithm," SPIE, Asia-Pacific Remote Sensing 2018, Honolulu, Hawaii, 27 September 2018. 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.また,特に定置網等の沿岸漁業において,流況は海況と密接に関係していると考えら れ,基本的な漁況の変動についてよく理解することは,流況と漁況の関係性を考える上で必要不可欠である. そこで今年度は,定置網の漁況に注目し,その長期的な変動について解析を行った.特に,多変量解析手法を 用いることで,各魚種の個別の変動だけでなく,魚類相全体としての漁況の変動について整理することを目 的とした.

方法

長期的な漁獲データとして、北陸農政局発行『石川県農林水産統計年報』より、1970年から2014年までの定置網による海面漁業生産量データを用いた.上記の期間にわたって漁獲データの存在した魚種のうち、11 魚種(まぐろ類、まいわし、うるめいわし、かたくちいわし、あじ類、さば類、ぶり類、たら、まだい、すずき、するめいか)の漁獲量(重量、単位:t)を、log(x+1)の形に対数変換して利用した.

上記の漁獲データについて主成分分析を行い,魚類相の変動の主成分を抽出した.続いて,主成分分 析で得られた,上位主成分の各年の主成分得点を応答変数とし,環境変数を説明変数とした重回帰モデ ルを作成することで,魚類相の変動に影響する環境要因の検討を行った.重回帰モデルについては,AIS によるモデル選択を行った.使用した環境変数は,下段の通りである.

環境要因データ: 石川県調査船白山丸による海洋観測データ (沿岸の観測点における0m深, 50m深 の年平均水温), 気象庁が HP^{*}上で公開している日本海・東シナ海・北太平洋の海面水温データ, 太平洋 十年規模振動指数 (PDOI: Pacific Decadal Oscillation Index), アリューシャン低気圧指数 (NPI: North Pacific Index), 南方振動指数 (SOI: Southern Oscillation Index)を用いた. なお, 本解析では上記環境要因 データについて, 全て年平均値を用いた. 環境要因データについては, 標準化を行ったうえで下記の統 計解析に利用した.

結果

第四主成分までの累積寄与率が 76%と高かったため,解析には第一~第四主成分までを利用した. 第一主成分に対してはまいわし,たら等の比較的冷水系の魚種が正の値を示し,ぶり,するめいか等の 暖水系の魚種が負の値を示した.また,第一主成分および第二主成分の主成分得点を散布図にしたのが 図1であり,第一~第四主成分の各時系列主成分得点を示したのが図2である.重回帰分析結果は表1 の通りとなった.第三主成分以外に対しては,5%水準で有意な変数が採択された.

^{*} 気象庁 HP (<u>http://www.jma.go.jp</u>)

考察

主成分分析の結果から、第一主成分については水温の変動が大きいことが示唆された.しかし、第二 ~四主成分に対しては、魚種ごとの主成分負荷量の共通性等については読み取ることができなかった. 重回帰分析では、石川県周辺の海水温の影響は第四主成分の説明変数として採択されたが、相対的に他 海域の水温よりも影響が小さいという結果が得られた.特に第一~第二主成分は長期的な変動が大きい (図 2)ことから、長期的な魚類相の変動に対しては、比較的長周期な資源量の変動等の影響が大きく評価 されていると考えられる.しかし、第四主成分に石川県沿岸水温が採択されたことからも、短期的な漁 況に対しては、より漁場近くの海況の影響が大きいことも推察される.今後は、能登半島沿岸流況の変 動のほか、対馬海峡等のより上流の海況と漁況の関係についても検討を加えていきたい.



図2 第一~四主成分得点時系列図

表1 重回帰分析結果

		説明変数				-2	ATC
	ECSS	NP	ISK 0 m	PDOI	SOI	R ²	AIC
PC1	+***	+***	-	+	+	0.61	154.6
PC2	+	-	-	+***	-	0.27	150.0
PC3	-	+	-	-	-	0.03	142.3
PC4	-	+*	+**	-	-	0.15	126.3

モデル選択に利用した変数のうち、いずれかの主成分の説明変数として採択 されたものを示した.略語はそれぞれ以下の通りである.

ECSS: 東シナ海南部水温, NP: 北太平洋水温, ISK 0 m: 石川県沿岸 0 m 深水温 採択されたものは"+", 採択されなかったものは"-"で示しており, 添字は次の 通り有意確率を表す.

***: p <0.001, **: 0.001< p <0.01, *: 0.01< p <0.05

研究組織

石川県水産総合センター	原田	浩太朗	:研究代表者
	大慶	則之	:研究協力者
九州大学応用力学研究所	千手	智晴	: 所内世話人
	広瀬	直毅	:研究協力者

東シナ海陸棚-黒潮間混合域における物質輸送過程理解のための 国際共同研究体制の構築

富山大学 大学院理工学研究部 張 勁

Establishment of international cooperative research group to understand the material transport between the boundary area of the East China Sea shelf region and Kuroshio

1. International cooperative research framework establishment

Research activities are categorized into five groups, considering the locations of the marginal seas, that is, Okhotsk Sea (OS), Marginal Seas surrounding Japan, Korea and Russia (MSJKR), East China Sea (ECS), South China Sea (SCS) and material exchange and transport with the Kuroshio, eddies and mixing (ETK), during the first workshop of working group-06 under the IOC Sub-Commission for the Western Pacific (WESTPAC-XII). The second workshop was held in Qingdao, China, on 17-18 December 2018, where twenty-eight experts from five countries in the East and Southeast Asia gathered along with a remote participant from US. Two international

cooperative research programs in ESC area have been approved. 1) US/Japan cooperative study on mixing processes in the Kuroshio south of Japan was funded by US/NSF, 2) **Bilateral Joint Research Project** between Japan



 Sub-group 1: Okhotsk Sea (OS)

 Russia, Japan

 Reginal GEOTRACES, interdisciplinary studies

 Sub-group 2: Marginal Sea surrounding by

 Japan, Korea, Russia (MSJKR)

 CREAMS+20, interdisciplinary studies

 Sub-group 3: East China Sea (ECS)

 - time series area

by China, Japan, Korea - interaction with Kuroshio

Sub-group 4: South China Sea (SCS) stratification, circulation hypoxia, heavy metal pollution, continental run off, SGD etc.

Sub-group 5: material Exchange and Transport with the Kuroshio and eddies, and mixing (ETK) biogeochemical proxies, material exchanges, transport via the Kuroshio, eddies, mixing processes

and China for the cooperative researches in the ECS was also funded by JSPS, Japan and NSFC, China.

2. Material transport approaching using physico-chemical parameters

Large amount of materials is transported between the boundary area of the ECS shelf region and Kuroshio. High-nutrient bottom water was identified on the central ECS shelf; however, it is difficult to clarify the various sources solely by estimating the potential temperature (PT) and salinity. Zhang et al., (2018) indicates that the rare earth elements are a good tracer for analyzing water masses. The heavy rare earth elements suggest the important contribution of Kuroshio intermediate water (KIW) in this bottom water. As shown in Figure. 1, the PAAS-normalized REEs pattern which can be distinguished in different endmembers, and the similar calculation result using T and S, and four HREEs, respectively, indicates that REEs series can be used as a tracer for analyzing the fraction of different water masses. The result calculated using four HREEs shows good consistency with the fraction calculated by PT and Salinity, so the rationality of using REEs as a tracer was confirmed. By utilizing PT and

salinity together with four HREEs, we estimated the mixing of four water masses (MSW, KSW, KTW, and KIW), with KIW and KTW accounting for 39±14% and 49±18%, respectively, of the central shelf bottom water in the northernmost research area. This study demonstrates that HREEs, in combination with conventional temperature and salinity, effectively increase the number of available tracers so that water mass analysis can be done with more robust results achieved.



Figure. 1 PAAS-normalized REEs pattern and the calculation result using T and S, and four HREEs, respectively

3. International cooperative research cruises in 2018

Various international cooperative research cruises were carried out in the MSJRK, ECS and Kuroshio region. Nagasaki Maru cruise and Kagoshima Maru cruise were conducted around the area of ECS shelf region and the Kuroshio in summer and winter 2018 (Figure. 2), in which the physical and chemical parameters were measured via sensors. Samples for chemical tracers such as REEs and Nd isotopes were preserved after acidifying, and turbulence profile was analyzed using TurboMAP. Some meaningful phenomena were discovered after the analysis using both chemical tracers and physical turbulence data, and further detailed study is expected to be conducted in the future.



Figure. 2: Stations in Nagasaki Maru cruise (A) and Kagoshima Maru cruise (B)

洋上を航走するビークルに働く流体力解析および運動制御に関する研究

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:

自律型無人潜水機の普及や多種多様化にともない、さまざまな観測形態が求められるようになってきた。本件では、今後海中ビークルによりセンサを曳航して観測する手法について、曳航物を曳航電車で引っ張ることでその挙動の撮影や張力計測を行い、AUV 運動解析に資する

方法:

実験の模様を図1に示す。使用した曳航物は、ロッド状、ケーブル状、チューブ状の3 種類であった。海中ビークルを想定した速度にて引っ張り、その際の曳航物の挙動をビデ オ撮影した。また、速度を数種変化させて、曳航時の張力を計測した。この計測により、 AUVの運動方程式に曳航物のダイナミクスを加味させ、運動解析の研究に資することがで きる。



図1 ロッド状曳航物の実験風景

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

夏季から秋季にかけて発生する急潮と底入り潮は、瀬戸内海と豊後水道の海洋構造と栄養塩動態に大きな 影響を与えていることが知られている。急潮と底入り潮の発生は潮汐の大潮・小潮に関連しており、潮汐混合が それらの発生過程に重要であることが明らかにされているが、瀬戸内海と豊後水道においてどれくらいの潮汐 混合がどのように起こっているかは不明な部分が多い。その実態を明らかにすることを目的として、これまでに応 用力学研究所との共同利用研究によって実施した乱流観測によって、瀬戸内海の伊予灘における海底地形 (サンドウェーブ)による乱流混合の強化、豊後水道における地形性水平渦と内部潮汐に起因する乱流混合の 発生を明らかにしてきた。H30 年度は伊予灘のより広域における乱流強度分布を明らかにする観測を実施した。 研究内容

2018年の5月と8月に愛媛大学沿岸環境科学研究センター研究船「いさな」を用いて伊予灘における海洋観 測を実施した. 佐田岬半島北部の伊予灘の22点(図1)において,応用力学研究所所有の微細構造プロファ イラと「いさな」搭載の音響ドップラー流速計を用いて,乱流強度の指標である乱流運動エネルギー散逸率 *ε* と流れを計測した. 観測は5月と8月それぞれの大潮・小潮に計4回実施した. 結果

8 月の小潮(8/4)と大潮(8/11)に南側断面(測点 I5s-I8s, 図 1)において実施した観測結果を.図 2 に示す。 8/4 は上げ潮時、8/11 は下げ潮時での観測であった。以前の観測では中央断面(測点 I5-I8)の測点 I7~I8 付近 に顕著なサンドウェーブが存在していたが、今回の観測でも存在しており、加えて南側の断面においても測点 I6s-I8s 間の海底に最大高低差 30 m の巨大なサンドウェーブの形成が認められた。なお、北部断面(測点 I5n-I8n)においては、サンドウェーブの高低差は 10 m を下回っていた。小潮・大潮の両方において、断面東部の平 坦な海底上では、流れは比較的鉛直的に一様であり、乱流が海底付近の境界層内部においてのみ発達してい た一方で、測点 I6s より西部の海底起伏が発達する海域では、流れは傾圧的となり(特に 8/4 は底層に強い流 れが見られた)、乱流運動エネルギー散逸率が 10⁻⁶ から最大 10⁻⁴ W kg⁻¹ にまで強化されていた。このような 強い乱流が捉えられた海域では、傾圧流速ベクトルは表層から底層に向かって半時計回りに回転しており、エ ネルギー(位相)が鉛直上向き(下向き)に伝搬する内部潮汐が生じていたことを示唆している。実際に、このよう な内部潮汐と考えられる鉛直シアーに対応するように中層または亜表層で乱流運動エネルギー散逸の極大が 見られた。観測海域の乱流混合には海底地形が重要な役割を果たしていると考えられるが、これまで考えてき たサンドウェーブのような数百メートルスケールの地形と、内部潮汐を生じるようなより大きなスケールの地形のど ちらがどのように観測された強大な乱流を生じているかを明らかにすることが今後の課題である。

研究組織

郭 新宇(愛媛大学沿岸環境科学研究センター、研究代表者)、遠藤 貴洋(九州大学応用力学研究所、所内 世話人)、堤 英輔(九州大学応用力学研究所、研究協力者)

38



図1 西部伊予灘における乱流観測点(海底地形は JTOPO-30 による).



図2 南観測断面(測点 I5s-I8s)における流速の絶対値|U|(中段)と乱流運動エネルギー散逸率 ε (下段)の観測結果.上段は松山における潮位. 左列は 8/4(小潮),右列は 8/11(大潮)の結果を示す.

地上・衛星観測及びモデルを使ったエアロゾルの光学的特性の時間・空間変動特性

富山大学大学院理工学研究部(理学) 青木 一真

要旨

九州大学応用力学研究所の屋上にて、大気中に浮遊するエアロゾル粒子の気候影響を研究 するため、2003年から太陽放射観測を行っている。エアロゾルの気候影響解明はもちろん、 数値モデルや衛星観測の精度向上など利用している。エアロゾルの季節変化は、4年間(2015 年から2018年)同じような傾向にあったが、粒子の大きさの季節変化に違いが見られた。ま た、2017年12月に打ち上げられた「しきさい」(GCOM-C/SGLI, JAXA)とのエアロゾルの光学 的厚さの比較結果は概ね相関が良く、打ち上げ1年後の目標数値をクリアした。

1. はじめに

大気中に浮遊する微粒子(エアロゾル)の気候影響は、「PM2.5」をはじめとする社会問題 にもなり、様々な角度から研究が進められている。本研究の対象領域である九州北部地方に ある福岡県(九州大学応用力学研究所)や長崎県(長崎大学)などは、大陸から越境する大 気汚染物質、黄砂粒子、森林火災などの影響を受け、大気環境の監視に注意が必要な地域で ある。本研究は、1996年から長崎大学おいて、2003年から九州大学応用力学研究所おいて、 太陽光と周辺光の放射輝度を用いたスカイラジオメーターを使った連続観測を行い、エアロ ゾル光学的特性の解析を行っている。また、エアロゾル粒子の発生源や輸送過程を知ること は、越境大気汚染として、定量的で精度の良い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、大陸から日本へ輸送されてくるエアロゾルをいち早くモニタリングし、それらを同化デ ータとして組み入れ、次世代の大気化学・気象結合モデルの開発や応用、モデルの精度向上 につなげる。また、2017年12月に打ち上げられた「しきさい」(GCOM-C/SGLI, JAXA)の地上 検証データと使い、衛星観測の精度向上にもつなげる。

2. 観測·解析概要

観測は、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、世界約100カ所において観測が行われている。この観測から解析されたエ 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 れらのデータをモデルや衛星観測の地上検証として用いてSPRINTARSを改良し、放射強制力の さらなる精度向上を目指している。

3. 結果及び、考察

Fig.1は、2015年1月から2018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(AOT(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、3年間(2015年から2018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の季

節変化の特徴は、他の日本各地での観測結果と違う部分もあることが、他の地点と同様に若 干であるが減少傾向にある。オングストローム指数の季節変化を見てみると夏に高い傾向が あるが、2018年は8月以降、高い傾向が見られなかった。また、2017年12月に打ち上げられた 「しきさい」(GCOM-C/SGLI, JAXA)とのエアロゾルの光学的厚さの比較結果は概ね相関が良 い結果が得られ、打ち上げ1年後の目標数値をクリアした。今後も継続した観測を行うこと により、モデルや数値モデルの精度向上しながら、気候影響の解明につなげていきたい。



Kasuga_KSG_RIAM_V42L2A_2015_2018

Fig. 1 2015年1月から2018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

4. 研究成果

- Kawase, H., A. Yamazaki, H. Iida, K. Aoki, W. Shimada, H. Sasaki, A. Murata, and M Nosaka, (2018):Simulation of extremely small amounts of snowobserved at high elevations over the Japanese NorthernAlps in the 2015/16 winter, SOLA, 14, 39-45, https://doi.org/10.2151/sola.2018-007.
- Aoki, K., : Long-term measurements of aerosol optical properties in Japan. (17th AeroCom & 6th AeroSAT workshop 2018, NOAA, Washinton DC, USA, 2018.10.15 2018.10.19)

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)

30AO-14

逆推計手法による東アジア域排出量データベースの高度化に向けた研究

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

急速な経済発展に伴って中国における窒素酸化物(NOx)排出量は増加の一途をたどっていたが, 近年の排出規制等の対策効果により,その排出量が減少傾向に転じているが示されてきている(Li et al., 2017).一般に排出量データは,経済統計資料等をもとに構築されるが(ボトムアップ法),その 推計までには数年を要するという問題点がある.これに対し,準リアルタイムの衛星観測データを 拘束条件とすることで排出量を逆推計する手法(トップダウン法)も近年では進展してきている. 本共同利用研究では,激変する中国の排出量データを把握するため,逆推計手法を構築し,NOxを 対象に排出量データベースを近年まで更新することを目指した.

2. 手法

アジアスケールの化学輸送モデル CMAQ(Community Multi-scale Air Quality)に、既存のアジア域 排出量データ REAS version 2.1 を入力データとして 2005 年からモデル計算を実施した.衛星観測で は大気柱総量(カラム量)が観測でき、これには Aura 衛星に搭載された OMI センサーによる NO₂ カラム量を用いた. REAS では 2008 年までの排出量が推計されており、例えば 2009 年については、 2008 年の排出量データを用いてモデル計算を行った際には、衛星観測データと大きな差が生じるこ とが想定される.逆推計手法は弓本ら(2015)に準じた。REAS version 2.1 が整備されている 2008 年を基準年とし、2009 年以降は 2008 年の排出量を、2005 年から 2008 年までは各年の排出量を先見 情報とし、2005 年から 2016 年までの 12 年間の逆推計を実施した。モデルと衛星観測間の系統的な バイアスの影響を逆推計から排除するため、2005 年から 2008 年までの 4 年間の計算結果からは、 衛星観測データに対するモデルバイアスを求め、逆推計の仮定から除外した。また、2009 年から 2011 年までの急激な排出量の増加を適切に再現するために、前年の逆推計結果を翌年の先見情報として 利用する逐次法を新たに開発し、導入した。

3. 結果と考察

図1には逆推計された2016年までの中国の衛星観測データおよび排出量推計値を示す. 拘束条件と した衛星観測データは2011年にピークとなる変化を示し, 逆推計値も同様に2011年度に最大で29.5 Tg となった. 図1にはアップデートされている REAS や中国を対象としたボトムアップ法による排 出量データ MEIC (Li et al., 2017; Zheng et al., 2018) も合わせて示す. 近年の中国の NOx 排出量の傾 向についておよそ一致する結果となった.表1に示すように20Tg程度であった2005年からピーク となった2011年まで,およそ4-5割排出量が増加したが,2011年から2015年にかけては1-2割程 度減少したことが明らかとなった.



図1. 2005 年から 2016 年までの NO₂ カラム量および NOx 排出量の経年変化.

表1. 本研究の逆推計した結果とボトムアップ法による NOx 排出量推計値の変化率の比較.

	本研究	REAS (updated)	Li et al. (2017)	Zheng et al. (2018)
2005-2011 年	+42.7%	+54.5%	+42.9%	_
2011-2015 年	-13.4%	-16.6%	-6.7%	-17.4%

4. まとめ

OMI 衛星観測データを拘束条件とし, 中国の NOx 排出量を逆推計した. 逆推計された排出量は 2011 年に最大となるような山型の変動を示すことが明らかとされ, ボトムアップ法による排出量データ と比較し, 概ね整合する結果を得た. 本逆推計手法では近年まで更新を行うことを主目的としたが, 例えば, 空間解像度が向上した最新の TOPOMI センサーを用い高解像度化を図ることが期待できる.

・参考文献

Kurokawa, J et al. (2013), *Atmos. Chem. Phys*, doi:10.5194/acp-13-11019-2013 Li, M et al. (2017), *National Science Review*, doi:10.1093/nsw/nwx150 弓本ら (2015), 大気環境学会誌, 50 (5), p199-206 Zheng, B et al. (2018), *Atmos. Chem. Phys*, doi:10.5194/acp-18-14095-2018 30 AO-15

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

これまでの共同研究において、2 層流体において KdV 方程式から得られる critical depth が、2 波の干渉により発生するソリトン共鳴の振幅増幅率を抑制することが分かってきた. その後、実海域における内部ソリトン共鳴に関する検討を行った結果,地形の変化がソリト ン共鳴の振幅の増幅率に影響を与えることが示された.示された結果は、下層水深が浅くな ることにより振幅増幅率が増大するというものであり、Miles により示された 4.0 を超える 可能性が示唆された.しかし、その検討は1ケースのみであり、本当に地形の変化が内部ソ リトン共鳴による振幅増幅率を増大させるかどうかは不明である.そこで本研究では、2 層 システムにおける解析を行うため、これまでに利用してきている強非線形強分散内部波方 程式を利用し、地形を指数関数的に変化させた上でソリトン共鳴の解析を行い、内部ソリト ン波の振幅の増幅率がどのように変化するかを検討することを目的とする.

研究の方法

干渉する 2 つの内部ソリトン波を対象とし,地形変化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した.

- 1. 解析において critical depth がソリトン共鳴を抑制する効果を除外し、地形変化による 純粋な振幅増幅率の解析を実施するため、critical depth から離れた位置に密度界面が 存在する条件下における解析を行うこととする.
- 2. 地形の変化による効果を解明することが出来た後, critical depth の影響を検討するため, 1.と同様な検討を実施する.

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) 下に凸の共鳴内部ソリトン波が進行する際,地形が盛り上がり,全水深が小さくなることで,初期の変形として浅水変形が卓越し,共鳴内部ソリトン波の振幅が大きくなることが分かった.
- (2) しかし、全水深が小さくなることは波速を減少させることとなり、その結果、安定的に存在する内部ソリトン波へと変形することが分かった.つまり、最終的には初期の状態に比較して小さな振幅の共鳴内部ソリトン波へと変形し、安定して進行することが分

かった.

(3) 研究の方法 2 に書かれた critical depth に関する検討については,現時点で重要な変化・影響を見つけることができていない.そのため,今後の検討課題であると考えられる.

研究成果報告

- K. Nakayama, T. Kakinuma, H. Tsuji, Oblique reflection of large internal solitary wave, European Journal of Mechanics (B), Vol.74, pp.81-91, (2018)
- K. Nakayama, T. Sato, K. Shimizu, L. Boegman, Classification of internal solitary wave breaking over a slope, Physical Review Fluids, Vol.4, 014801, (2019)
- 佐藤 啓央,中山恵介,清水健司,Leon Boegman, 二層システムにおける内部ソリトン波の斜 面上での砕波形態と物質輸送,土木学会論文集 B2(海岸工学),Vol.74, No.2, pp. I_655-I_660 (2018)
- 越智直人,柿沼太郎,中山恵介,水深が変化する水域を伝播する内部波の数値解析,土木学 会論文集 B2(海岸工学), Vol.74, No.2, pp. I_25- I_30 (2018)

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

微細規模から惑星規模にかけての海洋力学過程と規模間相互作用の研究

大分大学 理工学部 西垣 肇

目的

海洋現象についての知見は近年飛躍的に増えている。これには観測技術,計算機パフォーマンス,数 値計算技術の発展の貢献が大きい。しかし,海洋現象についての力学理論の進歩はその知見の増大に追 いついていない。微細現象から惑星規模に至る海洋現象は,それぞれが独立の過程に見えながら相互に 干渉する場合も多い。したがって,多角的かつ包括的な海洋力学理論の再構築が必要である。

このような大目標に近づくため、さまざまな課題に携わっている研究者が集まり、海洋力学過程についての議論を集中的に行い、ブレーンストーミングを経て情報交換と議論の深化を行う。

手法

2018 年 11 月に研究会を開き,後記の話題提供とそれに対する議論を行った。限られた時間内で行われる学会大会の発表と異なり,特に議論の時間を十分に取った。会は寝食を共にする合宿形式で行い, 正規のセッションの時間外にも多角的な情報交換や議論を繰り広げた。

提供された話題とその提供者は以下のとおりである。

- (1) Virtual wave stress の直接数値計算,藤原泰(京大理)
- (2) モノドロミー行列の直接計算による内部波ビームの安定性解析,大貫陽平(九大応力研)
- (3) 四国海盆暖水渦の諸特性, 蓮沼啓一(海洋総合研究所)
- (4) 親潮海域における平均流の力学,西垣肇(大分大理工)
- (5) 続流ジェットの再循環 数値実験と概念モデルの比較,水田元太(北大地球環境)
- (6) LGM 以降の日本海の変遷に関する海洋力学モデル,磯辺篤彦(九大応力研)
- (7) 海底地形の逆推定に関する取り組み、広瀬直毅(九大応力研)

結果と議論

提供された話題の概要は以下のとおりである。

(1) Virtual wave stress の直接数値計算,藤原泰(京大理)

Langmuir 循環は、海洋表層の流れと水面波が相互作用して形成される鉛直循環で、表層混合にとって 重要な過程である。その過程において、水面波が粘性減衰するとき、水面波が持つ運動量は表層流に渡 される。その際の運動量輸送を virtual wave stress という。その物理過程を再現・解明するためには、vitual wave stress を正確に表現することが重要である。ここでは新たに有限振幅の水面波を扱うことができる 数値モデルが開発された。モデルは高精度の数値スキームを用いて高い運動量保存性を実現し、virtual wave stress および Langmuir 循環の強さが正しく表現されていることが確認された。

(2) モノドロミー行列の直接計算による内部波ビームの安定性解析,大貫陽平(九大応力研)

内部潮汐は、その散逸が海洋の深層水湧昇と深層大循環の形成・維持に大きく寄与する。内部潮汐は 順圧潮流が海底地形を通過する際に発生し、まずはビーム波の構造をとる。そのビーム波は parametric subharmonic instability による不安定モードを持つことが指摘されているが、そのメカニズムは不明瞭で ある。その解明のため安定性解析が行われた。周期的に変動する有限振幅の背景場を扱うため、Floquet 理論とモノドロミー行列が用いられた。Parametric subharmonic instability のメカニズムは、逆方向に進行 する波束の重ね合わせで生じるうなりによって説明できることが示された。

(3) 四国海盆暖水渦の諸特性, 蓮沼啓一(海洋総合研究所)

四国沖の断水渦およびその変動は、黒潮の大蛇行などの変動や流量と密接に関連する。歴史的観測デ ータおよび最新の同化モデル MOVE/MRI.COM-NWP の結果を用い、黒潮および黒潮暖水渦、遠州沖冷 水渦のふるまい、および黒潮流量との関連が議論された。

(4) 親潮海域における平均流の力学,西垣肇(大分大理工)

北太平洋北西部の親潮は,南方に進入する親潮貫入や沖合を北東向きに流れる亜寒帯海流を伴う。再 解析データの長期平均場を用い,これらの流れ場の力学が議論された。準地衡理論に基づく傾圧ロスビ 一波の特性曲線の適用で,亜寒帯海流と親潮貫入の存在が診断的に説明できることが示された。

(5) 続流ジェットの再循環 ― 数値実験と概念モデルの比較,水田元太(北大地球環境)

黒潮や湾流は、その下流側で離岸して続流ジェットとして東方に流れ、そのジェットの南北に再循環 を伴う。続流ジェットと再循環は中規模渦が作ることが知られているが、その力学過程は十分に解明さ れていない。ここでは理想化数値実験が行われ、東向きジェットが再循環を作る過程が表現・解析され た。Enstrophyの発生と移流および eddy-eddy 相互作用でこの過程を説明できることが示唆された。

(6) LGM 以降の日本海の変遷に関する海洋力学モデル,磯辺篤彦(九大応力研)

最終氷期 (LGM) 以降の2万年前以降の日本海の海洋構造と循環について検討された。海底コアなど から見積もられている塩分の鉛直構造と海面水位の変遷をもとに、日本海の海洋力学モデルが構築され た。その結果、以下のことが示唆された。2万年前は海面水位が低く、日本海には顕著な塩分成層があ ったが、そのころの日本海はほぼ孤立状態だった。1万7千年前からその後の数千年間に鉛直混合が進 んだが、それは津軽海峡から高密度の親潮水が流入したことに伴うものである。

(7) 海底地形の逆推定に関する取り組み、広瀬直毅(九大応力研)

現存の海底地形データは精度が不十分で、そのため海洋モデルでの海況の再現・予報は精度を欠く。 しかし、すべての海底地形を直接観測することは困難である。そこで、潮流や海流と海洋モデルを用い て地形を逆推定する方法が考えらえる。ここでは、対馬海峡の地形を逆推定するための基礎的情報とし て、理想化された海底地形が流れに与える影響が、数値モデルを用いて検討された。海山・海盆型の地 形について、その高さと半径とに対する流れの依存性が調べられた。振動流と定常流では、後者のほう が地形に対する感度が高く、海底地形の逆推定にはより有利であることが示唆された。

研究組織

研究代表者 西垣肇 (大分大)

研究協力者 磯辺篤彦(九大応力研),広瀬直毅(九大応力研),水田元太(北大地球環境), 運沼啓一(海洋総合研究所),大貫陽平(九大応力件),藤原泰(京大理)ほか

インドネシア多島海の海洋循環とその気候に及ぼす影響

海洋研究開発機構アプリケーションラボ 佐々木英治

1. 研究目的

西太平洋とインド洋の間に存在し、多くの島々と海が混在するインドネシア多島海域は、海面水温が高 く、大気の深い対流が直上で発達するため、多量の降水があり、その地域の気候のみならず全球規模の 気候に重要な役割を担っている。また、インドネシア通過流は多島海域を通過して西太平洋からインド 洋に流れ、多量の熱を輸送するため、海洋循環場にも重要な役割を担っている。多島海域を含む縁辺海 では内部潮汐が大きいため、この海域で起こる鉛直混合は海洋循環場に多大な影響を及ぼすと考えられ ている。

インドネシア通過流を駆動する力学過程を再現するには、全球規模の海洋モデル、かつ海峡・混合 過程を精緻に再現できる高解像度のモデルが必要である。これまで海洋研究開発機構にて地球シミュレ ータを用いた高解像度海洋大循環モデル OFES2 が開発されてきた。一方、九州大学応用力学研究所で は、沿岸域や縁辺海を対象とした力学過程の研究が盛んに実施されている。そこで本共同研究では、研 究代表者が実施した OFES2 の出力を用いた研究と、九州大学応用力学研究所が得意とする理想化され たモデル研究を組みあわせながら、インドネシア通過流を含むインドネシア多島海域の海洋循環の研究 を実施する。さらに、多島海域の海洋循環が大気海洋相互作用を通じて太平洋、インド洋の広範囲の気 候およぼす影響を検討する。

2. 解析手法

OFES2 では全球規模の海洋大循環モデルに潮汐混合スキームが新たに導入された.そこで、その効果を 明らかにするため、スキームの 0N/0FF 感度実験を実施した。本研究ではこの二つのモデル出力の 1995 年1月~2016年12月間の月平均値を22年平均し、比較することで潮汐混合がインドネシア通過流及 びインドネシア多島海に与える影響を明らかにする。Sasaki et al. (2018)では、潮汐混合スキームが導入 されることでインドネシア通過流の流量が大きくなることを明らかにしたことから、本研究ではさらに 詳細にモデル解析を行うことで、局所的におこる潮汐混合がインドネシア通過流の流量増加へとつなが るメカニズムを検証することにした。まずは太平洋規模で生じた海面高度の上昇の要因、海洋内部の水 温と密度・流れ場の変化、そしてインドネシア多島海へと流入するインドネシア通過流の変化に焦点を あてて解析を進めた。

3. 解析結果

太平洋の赤道域全体で起きていた海面高度の上昇に応答するように、水温躍層付近に相当する水深 200 mで水温が上昇していることが確認できた(図1)。26 σ_θの等密度線の深さも、水温の変化と同じよう な個所で深くなっている。海底海山が存在する箇所から、水温上昇のシグナルは強くなっており、海山 のような傾斜が急な個所で強い潮汐混合が起きていることが示唆される。このような水温上昇のシグナルは Sasaki et al. (2018)でも北緯 5-10N にて確認されている。等密度線によって強いシグナルが生じてい る海山が異なり、太平洋に存在する多くの海山で潮汐混合、そして躍層の変化が起きていると思われる。

次に、経度方向の流れ場の 15N
 変化を検証すると、赤道域
 を中心に大きく変化してい
 ることが明らかになった。
 躍層の変化が赤道潜流等の
 赤道の循環場に大きな変化
 が生じたと推測される。水
 温の変化が強く表れた海山
 上では、流れの向きが東向 30S
 きから西向きへと逆転して
 いることがわかり、β-plume 図
 のような現象が起きている 水
 ことが考えられる。



図1: 潮汐混合スキームを導入したことによって生じた水深 200mの 水温差(On minus Off の 22 年平均; 松原 2019 より)

Sasaki et al. (2018)ではインドネシア通過流の流量を見積もっていたため、流量増加がいったいどの 海峡・深さで起きていたのか不明だった。そこでインドネシア多島海へとインドネシア通過流が流入す る海峡で起きた流れ場と水温の変化を調べた。その結果、流量増加は特に Makassar Strait を中心に起き ていることが明らかになった。Makassar Strait はインドネシア通過流の 80%の流量がある主要なルート に位置する海峡である。さらに解析を進めると主に水深約 200~500mの流れが強くなっていることが わかった。この深さはちょうど水温躍層付近に相当することから、増加したインドネシア通過流の流れ は主に太平洋の水温躍層付近の海水をインドネシア多島海へと運んでいることを示している。

4. 考察

潮汐混合スキームを海洋大循環モデルに導入したことによって生じるインドネシア通過流の流量増加 は太平洋赤道域の躍層付近の水温・循環場の変化がカギを握っていることが明らかになった。躍層付近 の変化がインドネシア多島海の海峡に伝わり、流れの強化と流量増加へと繋がっている。今後、潮汐混 合による湧昇の強さをさらに検証することでインドネシア通過流の流量増加の起因となっている箇所 を特定する必要がある。

5. 研究成果

学会発表

2018 年海洋学会秋季大会,インドネシア多島海および周辺海域における潮汐混合の影響,松原孝平・ 木田新一郎・佐々木英治・古恵亮

6. 研究組織

代表者	海洋研究開発機構・アプリケーションラボ	主任研究員	佐々木 英治
協力者	海洋研究開発機構・アプリケーションラボ	主任研究員	野中 正見
協力者	海洋研究開発機構・アプリケーションラボ	主任研究員	古恵亮
世話人	九州大学・応用力学研究所	准教授	木田新一郎

大阪湾に出現するフロント構造と海洋環境の解析

神戸大学内海域環境教育研究センター 林 美鶴

1. 目的

風や淡水流入の空間偏差はないと仮定する時、瀬戸内海では成層・混合指標=2.5~3.0 に潮汐フ ロントが形成されると言われている。大阪湾では、西宮環流と沖ノ瀬環流の境界に潮汐フロントが 形成されるが(藤原ら、1994、中辻・藤原、1995)、河川影響がなければ潮汐フロントは成層・混合 指標=3.0~3.5 に形成され(Yanagi and Takahashi, 1998)、大潮時にはフロント位置は海峡から離れ且 つ変動が大きい(湯浅ら、1996)、などが言われている。これらは、大阪湾に形成されるフロントは 明石海峡での鉛直混合により形成されるだけでなく、淀川からの淡水流入による成層も寄与し、か つ潮汐の状態によって時間変動することを意味している。フロントは視認しやすい海面での現象で、 研究においても主として海面を対象にしてきた。しかし実際には海水の収束発散場として立体構造 を持ち、その機能が沿岸海域の生物生産、水質汚染や漂流ゴミなど、各種の環境テーマに大きな影 響を与えている。本研究では、大阪湾の潮目形成域で ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler: 超音 波ドップラー多層流向流速計)により流動構造を、CTD(Conductivity Temperature Depth profiler)により 成層構造を観測し、潮目の鉛直構造の把握を試みた。

2. 方法

神戸大学大学院海事科学研究科付属連取船深江丸で図1に示す通り、34°-32'Nを、135°-01'~20'E

の間で往復した。往復の間、ADCP による流向・流速測定と、CTD に よる表層水の水温・塩分測定を行い、復路では測点①~⑥に停船し て CTD による水温・塩分鉛直分布即手を行った。14 時 50 分に明石 海峡の下げ潮流が最大になることから、この時刻を挟んだ時間 帯で観測を行った。ADCP は、TELEDYNE RD INSTRUMENTS 社製ワー クホースマリナーの 300kHz で、第一層深度 5.9m、層厚 1m、90 層測 定に設定した。鉛直分布測定に用いた CTD は、アレック電子社(現、 JFE アドバンテック社) 製クロロテック AVL220-RS で、0.2 秒毎の 測定値を深度 10cm 毎に平均した。表層水測定に用いた CTD は JFE ア ドバンテック社製 AAQ-H11 で、界面から約 3m の船底からのインテ イク水を計測した。



3. 結果

浮遊物質や泡などが筋状に伸び、海面が収束しているのを目視で確認した。図2は表層水温と塩

分の時間変動で、青及び赤の縦線の時刻(位置)で収束を確認した。この前後で、往路では水温が1.2℃、塩分が0.6、復路では水温が1.1℃、塩分が0.9急変していることから、これがフロントであると思われる。またフロントの位置は、往路では測点③の西側だったが、復路では東側にあった。すなわち98分間にフロントは東に1.6mile移動した。



図1 測点位置(紫色の+)と20m 等深線(黄色の線)

図3に鉛直流、東西流、南北流の鉛直断面を示す。フロントの西側に鉛直流が見られ、明石海峡

での強潮流による鉛直混合域になっている。東西流は全体に東流で、フロントの西側で速く、この 下げ潮流によりフロントが移動したと考えられる。南北流は、フロントの西側では南流で、東側で は弱かった。図4に水温、塩分、密度の鉛直断面を示す。密度は、水温と塩分から算出した。フロ ントの東側には、深度5m程度の高温・低塩・低密度水が分布し、海底にかけて成層化していること が伺える。一方、西側では、深度2m程度まで、それより底層と比較してやや高温・低塩・低密度の 海水が見られるが、それより底層では海底まで均一である。

以上の測定から、フロントの西側では強い南西の下げ潮流が卓越して鉛直混合し、東側では弱い 東流により成層化していること、及びフロント位置は移動することが確認された。

5. 成果公表

なし

6. 研究組織

林 美鶴 神戸大学 准教授 磯辺篤彦 九州大学 教授



図 3 ADCP による鉛直流(上)、水平流の東西成分(中)と 南北成分(下)の鉛直-時間(空間)断面

図 4 CTD による水温(上)、塩分(中)、密度(下)の鉛直空間断面

北東アジアにおける粒子状物質の輸送・変性過程のモデル表現に関する研究

神戸大学大学院海事科学研究科

山地一代

1. 目的

海洋研究開発機構(JAMSTEC)と神戸大学などの調査を通して、長崎県福江島にて観測されている PM2.5、お よび、その主要成分、さらに、それらの前駆物質の大気中濃度を大気質モデルが十分に表現できていない点 が指摘されている。我々は、アジア大陸から日本への輸送中の物理・化学過程のモデル表現に焦点をあて、 このモデルと観測間の不一致点の原因解明と、その結果を反映させたモデル表現の向上に取り組んでいる。 このために、北東アジアを中心にエアロゾルモデル研究を展開する気象庁気象研究所、神戸大学、さらに、 その技術を応用利用しエアロゾル再解析マップを開発した応用力学研究所の研究者にて共同研究を進めて行 くことが重要である。さらに、大陸からの移流の入口である九州北西部にてエアロゾルの高精度観測を実施 している応用力学研究所、JAMSTEC との共同研究を発展させ、九州を基盤とする共同研究の構築が待たれる。 我が国にて広く利用されている、大気質モデル(CMAQ: Community Modeling and Analysis System)による 北東アジア地域における粒子成分濃度のモデル表現向上のために、複数の異なるモデル結果と九州北部の観 測データとの比較を通して、各モデルにて扱われている反応・輸送プロセスとの比較・検証を行なう。得ら れた差異に基づき、CMAQ の要改良個所を特定し、モデル表現向上のために重要なプロセスを CMAQ へ導入す ることを検討する。本研究では、可能な限り入力データを統一した、2 種類の大気質モデル(CMAQ・NHM-Chem) による PM2.5、および、その関連物質の再現性を調査した。

2. 比較実験のための物質輸送モデル設定

我が国の広範囲にて、断続的に大気中 PM2.5 濃度の上昇が観測された 2016 年 12 月を対象としたモデル実 験を実施した。モデルの格子条件(D1: アジア域/45km/207×157grids、D2: 日本域/15km/ 147×141grids)、気象データ(WRF/NCARFNL, ds0833(0.25degree))、広領域側面境界条件(全球モデ ル: CHASER)、および、排出量データは共通とし、Chatani et al(2018, Atmosphere)に準ずるモデル設定に て比較実験を行った。

3. 結果および考察

図1は、長崎県五島における、2016年12月6-26日、モデルと観測によるPM2.5濃度の1時間値を示す。 CMAQ、NHM-Chemともに観測されたPM2.5濃度の変動をよく捉えていた。特に、12月9日正午頃にピークとな

る PM2.5 濃度の上昇を両モデルともに非 常に良く再現できていたが、一方で、 CMAQ が PM2.5 の観測濃度を $20 \mu g/m^3$ 程 度過大評価する傾向が見られた。この 際、CMAQ による硝酸塩濃度が大幅に増大 しており ($30 \sim 40 \mu g/m^3$ 、全 PM2.5 濃度 の 40% に お よ ぶ)、Shimadera et al. (2018)にて指摘されているように、



CMAQによる寒候期の硝酸塩濃度の過大評価の影響が考えられる。12月9日の日平均値について、PM2.5成分を比較すると、CMAQは硝酸塩の割合が大きい(全PM2.5濃度の約30%)が、NHM-Chemによる硝酸塩の割合は 全PM2.5濃度に対して約15%であった。他方、NHM-Chemは、OCの割合が大きく(全PM2.5濃度の約20%)、またCMAQの約1.3倍であった。今後、両モデル表現を詳細に比較することで、よく知られているCMAQの寒候期の硝酸塩の過大評価と OC の過小評価の改善を進める予定である。12月17-19日、両モデルともに観測を 過小評価しており、その成分濃度もモデル間に大きな違いが見られなかった。12月15-16日、および、12月 11日において見られるNHM-Chemの過大評価に関して、CMAQでは僅かしか確認できていない、PM2.5中のNa、 C1の成分濃度の上昇によるもの可能性が高い。さらに、12月24-25日、CMAQは硝酸塩、NHM-ChemはNa、C1 の各成分の上昇が見られたが、両モデルともにPM2.5の過小評価(観測の40~60%程度)を示した。Na、C1成 分濃度の違いは、各モデルの中で発生させる海塩粒子の生成過程や粒径分布の違いに起因する可能性が考え られる。

4. 研究組織

研究代表者	山地一代	神戸大学准教授		
所内世話人	弓本桂也	九州大学応用力学	研究所	准教授
研究協力者	平山友基	神戸大学 博士前期	課程2年	
研究協力者	金谷有剛	海洋研究開発機構	主任研究	員
研究協力者	梶野瑞王	気象研究所	主任研究	員

黒潮大蛇行を引き起こす膠州海山における傾圧不安定の発達過程

東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻 田中祐希

1. 本研究の背景と目的

日本の南岸を流れる黒潮には、「非大蛇行流路」と「大蛇行流路」という二つの安定した流路 が存在することが広く知られている。黒潮の非大蛇行から大蛇行への遷移は、(1)トカラ海峡に近 づいてくる高気圧性の中規模渦と黒潮との相互作用による九州南東沖での小蛇行の励起とその東 への伝播、(2)紀伊半島の 200 km ほど南に位置する「膠州海山」上を通過する際のこの小蛇行の 急激な増幅、を経て引き起こされる(Endoh and Hibiya 2001 など)。

Tanaka and Hibiya (2017)は、二層準地衡流モデルに膠州海山を模した海底地形を組み込むこ とで、黒潮の非大蛇行流路から大蛇行流路への遷移、特に、海山上における小蛇行の急激な増幅 過程を再現できることを示すとともに、この増幅が海山上に捕捉された傾圧不安定によるもので あることを、線形安定性解析を通じて明らかにした。実際、数値モデルで再現される小蛇行は、 その発達の初期段階においては、線形安定性解析で得られる不安定モードと空間スケール・構造 ともよく類似している。

しかしながら,発達が進むにつれて,数値実験で再現される小蛇行は線形安定性解析で得られ る不安定モードからずれていく。すなわち,小蛇行は増幅するにつれて,徐々にその成長速度お よび伝播速度が遅くなるとともに空間スケールが大きくなり,100 日程度で海山全体を占めるよ うなほぼ定常の大蛇行状態に至るという特徴を示すが,このような特徴は線形理論では説明でき ない。

この不一致は、小蛇行の発達の後期段階においては非線形効果が重要になることを示唆してい る。そこで本研究では、小蛇行が定常な大蛇行状態に至るまでの非線形な発達過程を明らかにす るため、その第一歩として、海山上の不安定モードの発達に非線形効果を考慮することで実際に このような小蛇行の発達後期の特徴を再現できるのかを調べる。

2. 方法

Tanaka and Hibiya (2017)と同じ二層準地衡流モデルを用いる。東西方向に周期境界条件,南 北方向に直交流ゼロの境界条件を課したf面上の水路中に海山を置き,背景流として上層に一様 な東西流を仮定する(図1a)。この背景場に線形安定性解析で得られた海山上の不安定モードを小 振幅の初期擾乱として与え(図1b),その後の時間発展を「非線形項なし(線形実験)」と「非線 形項あり(非線形実験)」の2ケースで比較する。

3. 結果と考察

図2に「非線形項なし」と「非線形項あり」の各ケースにおける擾乱の時間発展の様子を示す。 計算開始から一週間後程度までは、「非線形項なし」と「非線形項あり」の両ケースで大きな違いはなく、初期に与えた擾乱はどちらのケースにおいてもほぼ線形安定性解析で予測される通り に増幅していく(図2a vs. 2b)。 ところがその後、「非線形項なし」の場合には擾乱はそれまでと同様に成長を続けるのに対し、 「非線形項あり」の場合には擾乱の成長は止まり、ほぼ 100 日程度で大蛇行に類似した定常状態 へと達する(図 2c)。このように、海山上の傾圧不安定モードの発達において非線形項まで考慮す ることで、線形理論では説明できなかった小蛇行の発達後期の特徴、すなわち成長速度や伝播速 度が遅くなるとともに、空間スケールが大きくなって海山全体を占めるようになるといった特徴 が再現可能であることが示された。



図 1. 二層準地項流モデルを用いた本実験において仮定された,(a)背景場と(b)初期擾乱。 コンター(×10⁴ m² s⁻¹)は上層の流線関数,カラーは下層の流線関数をそれぞれ表し,緑線は 海山の縁を示す。上層の流線関数は背景場と擾乱を足し合わせたものを表示している。



図 2. (a)線形実験における 5 日後, (b)非線形実 験における 5 日後, (c)非線形実験における 100 日後の流線関数。コンター(×10⁴ m² s⁻¹),カラ ーはそれぞれ上層,下層の流線関数を表し, 緑線は海山の縁を示す。上層の流線関数は背 景場と擾乱を足し合わせたものを表示してい る。





雲粒子センサによる large-sparse 雲の観測

防衛大学校 地球海洋学科 岩崎杉紀

目的

本研究の目的は、Large-and-Sparce particle Cloud (LSC)と我々が名付けた雲を、衛星データの解析を行いその性質を明らかにすることである。LSC は衛星搭載ライダ CALIOP では観測しづらく、衛星搭載雲レーダ CloudSat では有意に観測できる、通常の雲とは逆の性質を持っている(図1参照)。LSC に対応するであろう雲の先行研究は、Hughes (1960, MWR)と Hagihara et al. (2014, JGR)の2例しか確認できず、どちらもそれ以降は研究されていない。LSC にどのような役割があるか全くわかっていない。本研究では、これを衛星データから明らかにする。



図1 2007年1月8日のド レーク海峡(南極とパタゴニ アの間)で観測された CALIOP の後方散乱係数 β と CloudSat のレーダ散乱因子 Z の緯度高度断面。南緯 67 度 から 72 度で高度 5km から 10km の間に CloudSat では有 意に信号があるのに CALIOP ではノイズレベルとなってい ることが分かる。

方法

解析には、CloudSat と CALIPSO のデータを複合的に用いた A-train 解析プロダクト(九州大学 データ、以降 KU データ)を用いた。KU データには、雲粒の特性や(水雲、過冷却の水雲、氷晶、 など)、粒径分布情報(粒子の大きさや個数密度など)の情報が CALIOP と CloudSat の軌道ごと (緯度経度)・高度ごとにリトリーバルされている。

LSC を KU データから取り出すため、(1) 波長 1064nm の β が 10⁻⁵ m⁻¹ str⁻¹以下、(2) Z が-15 dBZ 以上、(3) 積算した往復のライダの消散係数が 0.1 以下、これらを満たす信号が 500 m以上 続くものを LSC とした。(1) と(2) は図 1 の状態を表しており、LSC の性質を表している。これ らのしきい値は図 1 と同様のいくつか事例から選ん

だ経験値である。(3) はライダの減衰を無視し信 号を公平に扱うための便宜的なしきい値である。 LSC の性質とは無関係である。(1) と(2) から、 LSC の粒子半径は 50 μ m 以上で個数密度が 10⁻⁴ m⁻³以 下であることが推測できる。

結果

図2に、しきい値(1)から(3)を用い、2006年 11月から2007年10月のKUデータから緯度経度1 度ごとの、すべての雲の出現に対するLSCの出現頻 度分布を示す。この解析期間はCALIOPのライダ送 光方向が真下方向に向いている。送光方向はこの間 の一時期に0.3度真下からずれているときもあるが、 それらは解析から省いている。これは、氷晶が整列 している場合、KUデータのリトリーバル結果が異 なる可能性があるからである。

図2から、LSCは北極海や南極大陸の海沿いに出現しやすいことが分かる。同様の解析から、LSCの



図2 LSC の出現頻度分布。

出現頻度は春先に若干上がることも分かった(図 示していない)。

次に、LSCの出現確率と過冷却の水雲の出現確率 の積に対する、LSC と過冷却の水雲が同時に出現確 率の比を求め、これをR_{LSCNSC}とした。同様に氷晶 のものをR_{LSCN2D}とした。しきい値(3)から、LSC が上にあり、過冷却の水雲や氷晶がその下にある 状態である。もしLSCと過冷却の水雲(氷晶)が 1以下となる。図3は北緯60度から90度で平均し た月ごとの $R_{LSC \cap SC}$ と $R_{LSC \cap 2D}$ である。これより、LSC と過冷却の水雲は共存せず($R_{LSC \cap SC}$ が常に1以下) LSCと氷晶は共存しやすいことが分かる(RLSCO2Dが 常に1以上)。





LSC は光学的に薄いため、それ自体では放射や水 循環に影響を与えないはずである。しかし、過冷 却の水雲を消す作用があることが図3から分かる。 過冷却の水雲は世界中に存在しているが、LSC は高緯度に多く存在している。このため、LSC は高 緯度の気候を調整している可能性があることが分かった。

まとめ

衛星ライダより1桁以上感度の良い地上ライダ観測を数十年にわたり行っている研究者に本結 果を見てもらったとき「目に見えないが雲らしい信号があることは以前から知っていた。しかし 単に薄い雲であろうという認識だった。」とのことだった。ライダ単体では粒径分布が推定でき ないのでその雲の特殊さが分からないためである。

北極での地上ライダと地上雲レーダの同時雲観測も珍しくはない。両データを組み合わせれば 粒径分布の推定ができる。筆者もそのデータを見たことがあるが、LSCが存在する可能性があると いう事実を知っていても、そのデータを見つけることは困難であった。極域は下層雲に覆われて いることが多いためである。

CALIOP と CloudSat の両方があり、それらによる粒径分布や雲粒情報がリトリーバルできている KUデータがあって初めて、今まで存在すら認識されていなかったLSCが高緯度の気候に影響を及 ぼす可能性を示すことができた。

次年度に向け、LSC のその場観測の手はずや、それを解析するためのパーセルモデルの開発を 行っている。LSCの生成過程の解明につながる研究が出来ればよいと考えている。

成果報告

学会発表

岩崎杉紀、岡本創、佐藤可織、片桐秀一郎、藤原正智、柴田隆、坪木和久、小野貴司、杉立卓治、可視では 判別できないほど薄い雲が他の雲に与える影響、日本気象学会春季大会、つくば市、2018年5月16日。 瀬口貴文、**岩崎杉紀**、鴨川仁、岡本創、石元裕史、牛山朋來、積乱雲の雲頂から飛び上がる巻雲:Jumping Cirrus の観測と定量的解析による特徴、日本気象学会春季大会、つくば市、2018年5月17日。 瀬口貴文、**岩崎杉紀**、鴨川仁、岡本創、石元裕史、牛山朋來、Jumping Cirrusの地上観測と衛星・ラジオ ゾンデ・地上レーダーによる定量的解析、日本気象学会秋季大会、仙台、2018 年 10 月 29 日。

岩崎杉紀、藤原正智、柴田隆、内野修、森野勇、岡本創、佐藤可織、片桐秀一郎、坪木和久、小野貴司、杉 立卓治、Large-Sparse Cloud (粒径大きく個数密度少ない雲)のCPS ゾンデとライダの同時観測結果、日 本気象学会秋季大会、仙台市、2018年10月31日。

投稿論文

Seguchi, T., S. Iwasaki, M. Kamogawa, T. Ushiyama, and H. Okamoto, 2019: Observation of jumping cirrus with ground-based cameras, radiosonde, and Himawari-8. J. Meteor. Soc. Japan, 97, https://doi.org/10.2151/jmsj.2019-033.

Iwasaki, S., T. Seguchi, H. Okamoto, K. Sato, S. Katagiri, M. Fujiwara, T. Shibata, K. Tsuboki, T. Ono, and T. Sugidachi, Large-and-Sparse-particle Cloud (LSC): subvisible clouds detected by space-borne cloud radar above supercooled clouds at high latitudes, Polar Science, revised. # 瀬口 (Seguchi) が筆頭著者のものは、2017 年度に共同利用で支援して頂いた成果。

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

平成 28 年度に実施された文部科学省国家課題対応型研究開発推進事業宇宙航空科学技術推進委託費で は、沿岸波浪と GNSS 反射波の関連性を調査するための基礎的な観測を実施し、検証のための波浪ブイ の観測精度や沿岸や外洋の波浪の統計的な性質の抽出の信頼性の検討を行った.これまでに実施した、 GNSS レシーバを用いた観測結果を踏まえ、波浪が GNSS 反射波に与える影響についての反射波信号 と波浪の状況の比較検討を行う.また,既存の波浪観測データを用いて、2 次元スペクトルや波浪スペ クトルの高次モーメント量などから風波とうねりの分離と風波発達に対するうねりの影響評価を行う. さらに、新たに海面直下の乱流観測を実施するための試験観測を行い、GNSS 観測による波浪の影響評価の拡張の可能性を検討する。

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:京都大学大学院理学研究科 助教 研究協力者:花房秀哉:京都大学大学院理学研究科 修士2年 所内世話人:市川香:応用力学研究所 准教授

手法と結果の概要

本研究では,波浪と GNSS 反射波の関連性を調査するための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(2017年9月まで)と水 資源機構琵琶湖開発総合管理所が所轄する安曇川沖総合自動観測所(2017年3月まで)に GNSS レシ ーバーを設置した連続観測を行ってきた.今年度は,2017年1月7日に琵琶湖北西岸の安曇川河口に おいて実施した試験観測データを用いて GNSS 反射波を用いて海面高度を算出した結果について投稿 論文にまとめ、受理された.解析した経路差に現れた摂動は,その周期や大きさから湖面の波浪の波形 勾配が影響しているという結果が得られ、波浪の状況の重要性が示唆される.

波浪の状況は、それによる海面の状態変化が経路差に影響する一方で、その影響を評価することがで きれば、海面表層の波成乱流の評価につながる可能性がある。このことから、昨年度から継続している うねりと風波の分離観測の解析に加え、今年度は波浪と海表面乱流の同時観測を試みた。

まず、昨年度研究で行った、うねりと風浪の分離手法の高度化により 2014 年 2 月から 3 月にかけて北 西太平洋において実施された白鳳丸研究航海(KH-14-1)で行われ

た波浪観測データを中心とした波浪データを解析した.波浪観測 にはこれまで本研究で利用してきたゼニライトブイ(株)社製の GPS 波浪ブイを用いた.昨年までの解析では,Kalma and Calkoen (1992)が提唱した擬無次元波浪エネルギーを利用して, うねりの存在下での風浪の発達度について調査したが,波浪観測 データに性質の良くないデータが含まれることや外洋域でのフェ ッチをどう推定するかが課題であった。そこで観測された波浪か ら風波成分を抽出し、波浪エネルギーの尺度である equilibrium spectral range parameter と波齢との関係を調べることで異常デ ータを検出し(図1)、Mitsuyasu and Rikiishi (1978)などによる フェッチと吹走時間の関係を考慮して無次元フェッチを求めた。 この結果を用いて比較すると、既往研究の通り、無次元風波エネ ルギーと非常に良い対応関係を得た(図2)。これにより外洋域に ついても妥当なフェッチを計算可能であることが確認できた。



図1: KH-14-1 で得られた equilibrium spectral range parameter と逆波齢の関 係。図中(a)は対数空間での回帰直線から の偏差の度数分布を示す。(b)は回帰式か らの2倍の範囲外の値を除いた場合の分 布であり、(b)の方が標準分布に近い。

得られたフェッチを用いて Kalma and Calkoen (1992)が提唱した擬 無次元波浪エネルギーを利用して,うねりの存在下での風浪の発達 度について調査したところ、うねり成分を抽出して得られた有義波 の波形勾配との関係はより明瞭になり(図 3)、うねりの存在によっ て波浪発達へ影響があることが確認された.

今年度はさらに、波浪と波成乱流の同時観測を目指して、Nortec 社製の慣性センサー付き精密3次元流速計(Vector)を本研究の経費で 購入・作成した浮体システムに装着し、新青丸航海 KS-18-13 (代表: 小松幸生博士) において海面乱流フラックスの直接観測と波浪観測 の同時観測を実施した(図4). Vector 内部に装着した慣性計の観測 データを用いて Edson et al.(1998)が開発した船上における大気乱流 の渦相関法の計算手法を応用して, 流速計の動揺による見かけ上の 観測成分を除く方法を開発した。この方法で海面直下1.4mの62.5Hz での3 次元流速変動を復元したところ、波浪に伴う流速変動ととも に高周波流速変動を得ることに成功した。その結果の周波数スペク トルから、表面波に伴う流速変動に相当する周波数帯のパワーは時 間的に安定しているものの、散逸過程にある周波数帯の流速変動は 時間的に変化していることが分かった(図5)。今後はここから得ら れた流速データから、水位変動に伴う流速成分と乱流成分とを分離 し、波数スペクトルを求めることが課題である。



図3:疑似無次元エネルギーとうねり の波形勾配の関係,点の色はうねりと 海上風のなす角度を表す

本研究の成果を含む研究発表

原著論文

 Ichikawa K., T. Ebinuma, M. Konda, K. Yufu (2019): Low-Cost GNSS-R Altimetry on a UAV for Water-Level Measurements at Arbitrary Times and Locations, Sensors (accepted on Feb. 20, 2019)査読有

口頭発表

- Konda M., K. Kutsuwada, N. Suzuki, K. Ichikawa, 2018: The change of the energy of wind wave under the influence of swells observed by the GPS wave buoy, JPGU2018, ATT32-P06, 2018 年 5 月 21 日, 千葉県千葉市
- 市川香,海老沼拓史,李梓原,堤英輔,根田昌典(2018): Error budget of GNSS-R altimetry on a multicopter, JPGU2018, ATT32-P02,2018 年 5 月 21 日,千葉県千葉市
- 奥村立樹,市川香、海老沼拓史,李梓原,根田昌典,吉川裕,馬場 康之 (2018): Wind-independent periodic variations of signal intensity of a geostationary GNSS satellite observed at an ocean observation tower, JPGU2018, ATT32-P03, 2018 年 5 月 22 日,千葉県 千葉市
- 根田昌典,矢島啓,市川香,由布圭,馬場康之,水谷英朗,久保輝 広,(2018):波浪に伴う海面直下の3次元流速場の変化の観測,名 古屋大学 ISEE 共同利用研究集会「大気海洋相互作用に関する研究集 会」、2018年12月16日、京都市左京区
- 根田昌典,矢島啓,市川香,由布圭,馬場康之,水谷英朗,久保輝 広(2019):外洋域における海面直下の3次元流速変動の観測につい て,名古屋大学 ISEE 共同利用集会 海洋波および大気海洋相互作用 に関するワークショップ,2019年3月4日−5日、名古屋市千種区



図 **4**:Vector 観測システム の外観



図 5: Vector によって観測された鉛直 流速のスペクトルを示す。各色は 1 観測を約 2 分間毎に分割した部分デ ータを表す。水面変異は約 0.25Hz で ある。1Hz から 10Hz 程度までは時間 的なパワー変動がみられる。

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東北部は、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 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。

昨年度は収集・整理したデータを用い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を解明したので、今年度は複数年における対流不安定性と物質輸送の観点に基づく 解析を実施した。

3. 結果

今年度は、2005~2013年の全球雷データ、降水強度、対流不安定を用いて、本研究対象領域を中心 に解析を試みた。降水強度の指標としてTRMM 3B42を、対流不安定の指標としてERA Interimの 500hPa 面の飽和相当温位と925hPa 面の相当温位の差(つまり、θe*_500-θe_925で計算され、差が小 さいほど不安定であることを示す。)を用いた。まず東経87.5~92.5度平均の緯度時間断面図を、上記 の3つについて示す。なお、年々変動が大きいため、代表として2007年を示す(図1)。対象地域におけ る雷の数はプレモンスーン期に間欠的に活発化し、モンスーン期に入ると7月中旬までは周期的に活発 であるがその後収束していく。昨年度の解析では月単位での解析だったためこのような季節内変動をえ ることはできなかった。一方、降水強度はプレモンスーン期の間欠的な降水現象と一致している。また 9月中旬~下旬まで活発な降水活動が見られ、その後も10月まで周期的な降水現象が見られている。 このポストモンスーンの降水活動はこれまであまり研究されておらず、今後取り扱っていきたい。大気 の安定度を見ると、プレモンスーン期に不安定で、その後モンスーン循環が卓越すると非常に安定した 場が継続していることが明瞭にみられる。5月初旬までは大気が不安定になると降水が見られ、雷も発 生しているが、モンスーン期になるとそのような関係がまったく見られなくなる。このことはこれまで の解析で得られた、擾乱の特性の違いが関係していると考えられる。

大気の安定度は降水活動によって解消されると考えられるため、時間分解能を上げた解析が必要である。そこで、ERA Interim の時間分解能である1日4回(00,06,12,18UTC)等に解析を分け、さらに対象領域内における地形の複雑性を除くため、インド・西ベンガル州の一部を含むバングラデシュ低地に領域を絞って、日変化について解析した(図 2)。雷回数ではプレモンスーン期には夕方にピークが明瞭に出ている一方、6月や10月には朝方にもピークが見られる。降水強度は、09UTC(早朝)と18UTC(お昼)にピークを持つ。対流不安定については、12UTC(朝)にピークが見られており、これらのことから対流活動がどのように発達するか、さらに解析を進めることで明らかになる道筋を得ることができた。

つづいて、雷発生数、降水活動、大気の安定度の関係を調べるために、上述した日変化を用いてそれ ぞれの事例を散布図に示した(図2(右下))。1mm以上の雨を対象として、対流不安定と雷回数との関 係を調べた。大気が比較的安定している場合でも雷の回数は多く、関係性が明瞭に見られなかった。対 流不安定の指標そのものを改めて検証する必要があると考えられる。



33N

図2:(左上) 雷の回数(LT)、(右上)降水強度(UTC)、(左下)対流不安定の指標(UTC)の、領 域平均(北緯22.5~25度、東経87.5~92.5度)の日変化。(右下)対流不安定(横軸)と雷回数(縦 軸)の各降水強度ごとの散布図。

4. まとめ

今年度は、複数年における対流不安定性と物質輸送の観点に基づく解析を実施した。その結果、プレ モンスーン期の大気が不安定な時期に間欠的に雷回数が増加し、その結果、降水強度も増加している関 係が明瞭に見られた一方、モンスーン期がプレモンスーン期に比べて大気が安定しているにもかかわら ず雷の回数が多かった。さらに、擾乱の発赤メカニズムの解明に迫るため、日周期についても検討した。 その結果からは、年を通じて同じ高さの大気の状態の差を対流不安定の指標としていることが、明瞭な 関係を示すことを妨げていることが考えられ、実際の鉛直構造をより詳細に解析する必要があることが 分かった。

今後は、これらの季節内変動や経年変動を、ERA-interim、JRA55といった再解析データによる環境 場や地上気象観測データやレーダデータによる発生機構を明らかにし、その積雲対流の発生する場の鉛 直構造を総合的に解析する。「プレモンスーン期における大気不安定度の季節内変動」、「バングラデシ ュにおける降水システムの発生・発達機構の解明」、「夏季アジアモンスーンにおける微量気体成分の季 節内変動と年々変動」の結果をそれぞれ論文として出版することを最終的な目標とする。また、ポスト モンスーン期の降水活動はこれまでサイクロンに注目が集まり、総観場からの解析が少なかったので、 今後の課題としたい。

5. 研究組織

研究代表者	木口 雅司	東京大学生産技術研究所 特任准教授
研究協力者	江口 菜穂	九州大学応用力学研究所 助教
研究協力者	村田 文絵	高知大学理工学部 講師
研究協力者	林 泰一	京都大学東南アジア地域研究研究所 連携教授

浅海域用水中グライダーの動作試験と運用に関する研究

長崎大学·水産学部 森井 康宏

1. はじめに

環境変化の予測,環境保全に関する研究のため には、深い海域だけでなく沿岸の水深 50m 以浅の 超浅海域の海洋データも必要である。従来の手法 としては係留ブイや観測船による観測が考えられ るが多点観測に時間がかかりコストも非常に高い。 そこで、浅海域で使用可能な水中グライダーを開 発し、観測コストの低減を図りたい。水中ビーク ルの開発には模型による水槽試験のみならず実機 を使用した水槽試験や実海域試験が不可欠であり、 開発を行うビークルの運動性能や制御性能に関す る試験を共同で実施する。

本年度は、円盤型水中グライダーに取り付けた 垂直尾翼が発生する流体力の計測、深海機器力学 実験水槽において実施された直尾翼付き円盤型水 中グライダーの針路保持制御実験、水中ドローン に関する情報収集、水中ビークルの運用に欠かせ ない母船のオートパイロットに関する情報収集に ついて報告する。

2. 円盤型水中グライダーに取り付けた垂直尾翼が 発生する流体力の計測

浅海域でのバーチャルモアリングを可能とする には既存のバーチャルモアリング用円盤型水中グ ライダーに垂直尾翼を取り付けビークルの旋回性 能(針路保持性能)を格段に向上させる必要がある。 そこで、運動シミュレーションや運動制御コントロ ーラを設計するのに必要な垂直尾翼が発生する流 体力の計測を1/4スケールの模型を使用して行った (Fig. 1)。



Fig.1 垂直尾翼が発生する流体力の計測

計測結果の一例として垂直尾翼のラダー角度に対 する回頭モーメント係数を Fig. 2 に示す。舵角 25 度程度までは失速せず、回頭モーメントは舵角に比 例することがわかる。ただし、本係数値は垂直尾翼 を矩形翼に近似して得られる推定値より小さい値 となることがわかった。



Fig. 2 計測された流体力係数

3.水槽における垂直尾翼付き円盤型水中グライダ一(実機)の針路保持制御実験

2 章で得られた流体力係数を使用して針路制御 LQI コントローラを設計し水槽で性能検証試験を 行った(Fig. 3)。



Fig. 3 垂直尾翼付き円盤型水中グライダー(実機)

ラダー角を0度とし、ビークル内に搭載された重 心移動装置によりビークルの重心を左右に移動し、 ビークルをヒールさせることにより針路保持制御 を行った結果を Fig.4 に示す。ビークルに取り付け た安全索を引っ張ることにより発生する回頭モー メントを外乱とした。

垂直尾翼がなく制御を行わない場合は外乱によ り針路(ビークルの回頭角)が大きくずれてしまう
が、垂直尾翼と制御の効果により外乱に対して針路 保持が行われていることがわかる。



Fig. 4 垂直尾翼付き円盤型水中グライダーの針路 保持制御実験結果

4. 水中ドローンに関する情報収集

2019年2月21日、横浜・大桟橋ホールで開催さ れたブルーアース・テク2019に参加し、水中ドロ ーン (Fig. 5) に関する情報を収集した。



Fig.5 水中ドローンのオペレーションデモ



Fig.6 ビークルに搭載されたソナー映像

ビークルに搭載されたソナー(Fig. 6)は障害物 を避ける上でビークルの運用に非常に有用である ことや、小型の ROV では流れに対するホバリング 性能を確保することが困難であることなどがわか った。また、小型ビークルの母船からの位置情報の 確保手法について情報を得ることができた。

5. オートパイロットに関する情報収集

2019年2月22日に東京計器を訪問し、水産学部 漁業練習船「長崎丸」に搭載されているオートパイ ロットに関する詳細情報を収集した。



Fig. 7 東京計器におけるオートパイロットに関する情報収集

PID 制御における荒天時のゲイン調整方法やア ダプトモード時の制御方法について質問し、モード 切替時には PID 制御とアダプト制御間の連続性は ないこと、旋回時の切り替えは推奨しないこと、ア ダプトモードはいわゆる適応制御を行っているわ けではないことなどがわかった。水中ビークル運用 時やビークル投入・回収時の操船に有用な情報を得 ることができた。

- 6. 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(長崎大学水産学部)ほか9名 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)

CloudSat 地表面データによる衛星搭載雲レーダプロダクトの評価手法の開発

名古屋大学宇宙地球環境研究所 高橋 暢宏

目的

本研究は2019年度に打ち上げ予定のEarthCARE衛星に搭載される雲レーダやさらに将来に計画される衛星 搭載の雲・降水レーダのミッションに向けて、地表面(特に海表面)の散乱断面積の推定手法の検討を行う ものである。応用力学研究所の岡本教授のグループと連携し、同研究グループが開発している雲レーダアル ゴリズムの高度化にこの知見を生かすことを目的とする。

研究の具体的方法

衛星搭載雲レーダからの降水量や雲水量を定量的に推定するためには、雨や雲による電波の減衰を考慮する 必要がある。衛星では、上空から下方に向かって観測を行うため、地表面(海表面)からの散乱強度は減衰 補正のための格好の境界条件として用いられるが、地表面の散乱強度は地表面状態に依存しており、その特 性を正確に把握する必要がある。本研究では、人工衛星搭載雲レーダの利用を想定して、これまであまり研 究がなされていない雲レーダで用いられている周波数(94GHz)における地表面(特に海表面)の散乱断面積 に関する研究を行う。

具体的には、CloudSat 衛星搭載雲レーダが実際に観測したデータを用いた解析を行う。雲や雨の減衰の影響 を除去した地表面散乱断面積を推定するために、標準プロダクトにある(雲や雨の減衰の影響をうけた)規 格化散乱断面積と雲の有無判定フラグを用いることで減衰の影響を受けたものとそうでないものに分類し、 統計的な比較を行う。さらに、衛星や再解析データによる地表付近の風のデータを用いたデータベースを構 築することにより、汎用性の高いプロダクト作成に結び付ける。

研究成果報告

1. AMSR2 海上風速と CloudSat 地表面散乱断面積(σ0)の関係

GOM-W 衛星と CloudSat 衛星は同じ A-TRAIN 軌道で観測している ため、GCOM-W 搭載のマイクロ波放射計 (AMSR2) と CloudSat 衛星搭 載雲レーダ (CPR) は時間を置かず、同じ領域を観測可能である。そ こで、AMSR2 から得られる海上風速 (JAXA 標準プロダクト) と CloudSat からの海表面の σ 0の関係を調べた。方法は、同じ軌道で の両センサのマッチアップをとり、海上風速と散乱断面積を CPR の liquid water path (LWP) により分類した。

雲なしの条件での海上風速とσ0の関係は、非常に高い相関 (0.84)を示した。また、両者の関係はσ0=-3.5*ln(U)+13.5 と



図 1. 海上風速と CloudSat の σ 0の関係 (雲なし時)

いった関係式で表すことができることがわかった。標準偏差は約 1.2 d B であり、これは LWP の値がおよそ 150 gm⁻² (Sassen and Liao, 1996 の関係式に基づく) に時に対応するため雲レーダの減衰補正に活用するた めには、それよりも十分大きな LWP の時のみに使えることがわかる。また、風速がおよそ 4m/s 以下では標準 偏差が大きくなり、大きな誤差要因となることがわかった。さらに、CloudSat の標準プロダクトにある LWP の大きさでσ0と風速の関係を分類すると、LWP によるトータル減衰量を推定でき、LWP の推定の評価できる。

2. GPM 二周波降水レーダ (DPR) による統計的な雨滴粒径分布推定手法の開発と衛星搭載雲レーダへの拡張

DPRの雨滴粒径分布推定アルゴリズムの評価のために、統計的な手法で解析を行った。この手法は、Ku-band のレーダ反射強度因子 Z (mm⁶m⁻³) と Ka-band の Z の差が Mie 散乱の効果の差に依っていることを利用して、 両者のヒストグラムを比較することにより雨滴粒径分布のモデルを推定できる。ここでは、雨滴粒径分布の モデルパラメータとして、k = $\epsilon \alpha Z^{\beta}$ 関係を規定するパラメータ ϵ を用いる。ここで、k は減衰係数 (dB/km), Z は、 α 、 β は定数である。それぞれのヒストグラムを作成し、両者のヒストグラムの差を説明できる ϵ を 探すというものである。この手法によって ϵ を決定する。この ϵ を用いて w-band の Z のヒストグラムも再 現できる。また、DPR では Ku-band と Ka-band が同時に同じターゲットを観測していることから、統計的な 手法と瞬時データによる ϵ の比較が容易である。なお、今回の解析では、exceedance probability を用いた。

統計的な手法による平均的な ϵ と瞬時データの ϵ の平均を比較したところ、両者に高い相関があること確認でき、統計的な手法による ϵ の推定が可能とあることがわかった。Ku-band のヒストグラムから,様々な ϵ に対して雲レーダの周波数である w-band でのヒストグラムを再現した。再現した w-band のヒストグラムを見ると、Ku-band のヒストグラムと w-band のヒストグラムはほぼ交わることなく、平行移動で近似できることがわかった。この結果は、例えば CloudSat と TRMM の組み合わせにより ϵ の推定可能性を示しており、2 周波観測がない TRMM 時代における雨滴粒径分布パラメータの検証・高精度化にも寄与できる。



図 1. GPM/DPR の Ku と Ka のヒストグラ ムとW におけるヒストグラムの範囲

参考文献:

Sassen, K., & Liao, L. (1996). Estimation of Cloud Content by W-Band Radar. Journal of Applied Meteorology (1988-2005), 35(6), 932-938. Retrieved from http://www.jstor.org/stable/26187910 研究成果報告:

Takahashi, N., Overview of the TRMM/EOM experimental data analysis, PMM Science team meeting, Phoenix, Oct. 2018.

Takahashi, N., Statistical validation of drop size distribution estimated by GPM/DPR, JpGU 2019, May 2019. 衛星搭載ライダーデータを用いたエアロゾル・雲プロダクト推定アルゴリズムの高度化と 地上検証に資する観測研究(30A0-26)

> 国立環境研究所 西澤智明 九州大学応用力学研究所 岡本創 九州大学応用力学研究所 佐藤可織 九州大学応用力学研究所 藤川雅大

<u>要旨</u>

衛星搭載ライダーデータを用いた大気粒子プロダクトを生成する解析アルゴリズムの高度化やそれら プロダクトの地上検証に資するデータ解析技術や観測技術の開発・改良を主眼とし、多視野角・多重 散乱ライダーの改良技術の考案及び試験を行った。偏光信号を独立した受信望遠鏡で個別測定する現 行のシステムを改良し、それらを一体化して測定する受信システムを考案した。試験測定により良好 な結果を得ている。また、本考案の受信システムは波長 532nm だけではなく波長 355nm においても同 様な測定が可能であり、多波長測定化が可能である。

<u>序論</u>

温暖化をはじめとする地球気候への大気粒子(エアロゾルや雲)の影響評価を主目的の一つとして、 大気粒子の時間・水平分布と共にその鉛直構造も測定可能な能動型センサー「ライダー」を搭載した 衛星観測が進行している。2006年打ち上げ後、現在も運用中の CALIPSO 衛星搭載の2波長偏光ミー散 乱ライダーCALIOP (NASA) による全球大気粒子観測の後継として、欧共同地球観測プロジェクト EarthCARE では高スペクトル分解ライダーATLID による全球観測が 2021年から開始される。光学的に 厚い粒子層(雲や発生域での鉱物ダスト層など)からのライダー信号には、粒子からの一次散乱成分 と共に多重散乱成分が多く含まれ、多重散乱成分の取り扱いは今尚難しい。よって、雲・エアロゾル パラメータの推定アルゴリズムにおいて多重散乱成分をどう考慮するべきかは重要な研究課題となっ ている。特に、衛星搭載ライダー信号に対する多重散乱の影響は地上ライダー計測に比して大きいた め、衛星搭載ライダーデータの解析ではより重要となる。この問題に対し、科研費 A 課題(H25-H28, 課題代表:岡本教授)にて、CALIOP のレーザー波長である 532nm での単波長レーザーを用いて多重散 乱成分を独立測定するライダー(多視野角・多重散乱ライダー)を九大・環境研で共同開発し、地上 観測研究を実施した。そして、この観測研究の発展として科研費 S 課題(H29-H33,課題代表:岡本教 授)が立ち上がり、そこでは ATLID の解析・検証を念頭にして、波長 355nm での多視野角・多重散乱 ライダーが情報通信研究機構(小金井市)の構築が計画された(九大・環境研で共同開発)。

上記背景を踏まえ、本研究では、衛星搭載ライダーデータを用いた大気粒子プロダクトを生成する 解析アルゴリズムの高度化やそれらプロダクトの地上検証に資する観測技術やデータ解析技術の開 発・改良を行う。

実施方法

昨年度の共同利用研究にて(課題番号 29A0-20)、波長 532nm での多視野角・多重散乱ライダーの受信システムの改良手法を考案し(旧システムでは偏光測定を独立した受信系(受信望遠鏡)で行っているが、これを一つの受信望遠鏡で測定する一体化技術)、試作・試験測定を行い、本改良手法が有効であることを示した。そこで、今年度は上記改良手法の実装とその評価を進めた。また、多視野角・多重散乱ライダーの多波長化を企図して波長 1064nm での測定についての検討を進めた。

<u>結果と考察</u>

現行の波長 532nm 多視野角・多重散乱ライダーシステム(国立環境研究所構内に設置)に本改良手 法を適用した新システムを構築し、連続測定を開始した。多視野角・多重散乱ライダーシステムでは、 直線偏光したレーザーを鉛直上方に送信し、大気粒子による散乱光を小型望遠鏡で集光し、集光した 光の強度を検出器(PMT)で測定するシステムとなっている。旧システムでは、小形望遠鏡1つに検出 器を 1 つ搭載した一体化構造とし(以下、受信望遠鏡)、全10本の受信望遠鏡を用いた(全10ch 測定)。送信レーザー(直線偏光)の偏光に対して水平な成分を5つに受信望遠鏡で計測し、また垂 直な成分を5つの受信望遠鏡で測定する。水平成分と垂直成分を測定する受信望遠鏡を1セットとし、 1 セットずつ鉛直上向き方向から5つの角度(θ)で傾けて測定する(θ =0, 0. 6, 1. 2, 1. 8, 2. 4 度)。 結果として、本システムではθ=0以外の受信望遠鏡では多重散乱光を測定し、θ=0の受信望遠鏡では 多重散乱光に加えて一次散乱光も測定することになる。各受信望遠鏡には偏光シートが小形望遠鏡上 端部に取り付けられ、これにより偏光選択(水平か垂直か)がなされている。改良システムでは、1 つの小型望遠鏡に水平成分と垂直成分を測定する検出器を取り付け一体化する(計5本の受信望遠鏡 を用いて全10ch での計測を行うため、旧システムと同じ測定チャンネル数となる)。ここでは偏光 シートは用いず、偏光ビームスプリッターキューブを使用する。旧システムでは、個々受信望遠鏡は 独立して設置されるため、個々受信望遠鏡の傾斜や偏光(偏光シートの回転角)の精緻な調整と保持 が必須となる。特に偏光チャンネル間での傾斜角や偏光のズレは致命的な測定バイアスを生んだ。改 良システムではこれらの点が改良されており、調整も簡便でかつ安定・精緻なシステムとなっている。 多視野角・多重散乱ライダーシステムの校正では、全ての受信望遠鏡を鉛直上方に向けて計測するこ とで、個々チャンネル間の相対校正(例えば、ch10/ch1 など)を行い、その後絶対校正を行う(絶対 校正の方法については省略する)。波長 355nm での多視野角・多重散乱ライダーシステムの校正デー タの解析から、相対校正値の時間安定性が確認されている。

上記の多視野角・多重散乱ライダーシステムの改良として、光ファイバーを用いたシステムも検討 した。本ライダーシステムでは受信望遠鏡を傾けるため、安定性の確保から、受信望遠鏡は軽量が望 ましい。そこで、偏光ビームスプリッターで光分岐したのち、光ファイバーによって検出器へ送るこ とで、受信望遠鏡と検出器を一体化する必要はなくなり、軽量化が望める。また、同時に受信望遠鏡 自体の小型化も図れる。波長1064nmの多重散乱ライダーシステムでは検出器としてアバランシェフォ トダイオード(APD)を用いる。ライダー計測で広く用いられている市販のAPD モジュールは大型(かつ 重い)の物が多い。よって、波長1064nmへの拡張においては、光ファイバーを用いたシステム構築が 有効と考えられる。

成果報告

1) Nishizawa T., Kudo R., Oikawa E., Higurashi A., Okamoto H., Current status on algorithm developments for Japanese L2 products of the EarthCARE mission, CloudSat/CALIPSO Annual Science Review, 2018. 4., Boulder, USA.

2) Okamoto H., Sato K., Ishii S., Aoki M., Nishizawa T., Sugimoto N., Jin Y., Ohno Y., Horie H., Next-generation-synergetic-observation-system for the unified analysis of CALIPSO, ADM-Aeolus, and EarthCARE-ATLID, 19th Coherent Laser Radar Conference, 2018.6, Okinawa, Japan.

3) Okamoto H., Sato K., Katagiri S., Fujikawa M., Nishizawa T., Sugimoto N., Jin Y., Shimizu A., Ishimoto H., Application of multiple-scattering polarization lidar for the evaluation of space-borne lidar algorithms, EPJ Web of Conferences, 176, 10.1051/epjconf/201817602014, 2018. 4) 藤川雅大、岡本創、佐藤可織、片桐秀一郎、西澤智明、杉本伸夫、神慶孝、MFMSPLを用いた雲相識 別手法の検証、日本気象学会 2018 年度春季大会、113, pp63-63, 2018.5、茨城県つくば市

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 国立環境研究所地域環境研究センター

1. 目的

河川から沿岸海洋生態系への栄養塩パスとして機能する河川プリューム(低塩分水)を空間 的かつ定量的に把握することは重要である。将来、特に気候変動による台風凶暴化や豪雨激 化が予想されており、それらによる海洋環境への影響を把握することの重要性は増している。 近年、海面塩分(Sea Surface Salinity: SSS)測定センサーが搭載された衛星(例えば、 SAC-D/Aquarius 等)により、SSS データが面的に入手できるようになり、SSS マップからア マゾン川といった世界的な大河川からのプリュームを可視化できるようになった。しかし、 このような衛星 SSS プロダクトの水平分解能は数十 km であるため、日本沿岸域において形 成されるプリュームを観測するには分解能が粗く観測エラーも大きいため困難である。

これまで我々は、河川プリュームに含まれる有色溶存有機物(CDOM)と SSS との間に高い 相関関係があることに注目して、静止海色衛星「千里眼」GOCI-COMS プロダクト(水平解像 度約 500 m)から得られた CDOM マップデータを使って SSS マップを推定する手法の開発を 進めてきた。本プロジェクトの最終目的は、静止海色衛星によって日本沿岸域全域をカバー できる高空間分解能の衛星 SSS データセットを整備することである。現段階では、比較的現 場塩分や CDOM データが多く得られている海域、対馬海峡沿岸域、厚岸湾や噴火湾を含む北 海道沿岸親潮域、若狭湾や富山湾といった対馬暖流域、大阪湾・紀伊水道等における SSS マ ップが整備されてきた。

今年度は、解析領域を瀬戸内海全域に加えて日向灘およびその黒潮域にも拡張した。また 解析期間もさらに延長し2018年まで収集できる観測データも用いて比較検証を実施した。昨 年12月末に海色衛星「しきさい」のプロダクトの利用も開始した。昨年は、平成30年7月 豪雨や台風21号といった気象災害による洪水が多発した。本報告では、これらの洪水出水に より海洋環境へどの程度影響があったのかを検討するために実施した衛星SSSマップの解析 結果を報告する。その一例として、瀬戸内海全域と日向灘および黒潮域における解析結果を 紹介する。

2. 方法

一昨年度より関係機関(各府県の水産試験場や大学)に表層海水の採水を依頼して、瀬戸 内海や日向灘における海水分析を実施、現場塩分および CDOM データが収集されている。そ れらのデータに基づいて、SSS—CDOM 推定式を湾灘毎に作成した。そして、GOCI-COMS プロダクトから CDOM マップを作成し、SSS—CDOM 推定式に基づいて対象海域における SSS マップを作成・整備した。そして、平成 30 年 7 月豪雨前後の期間(6/20~7/14)や台風 21 号襲来前後の期間(9/3~9/5)における SSS マップに基づき河川プリュームの動態を解析した。

3. 結果と考察

図1は平成30年7月豪雨前の期間(6/20~6/27)と豪雨後の期間(6/28~7/14)におけるSSSマ ップである。豪雨前後を比較すると瀬戸内海および日向灘においては塩分が大きく低下して いるのがわかる。特に瀬戸内海西部では、豪雨前に高塩分水塊が豊後水道から伊予灘を経由 し広島湾や周防灘にまで分布していたが、豪雨後には分布が大きく南に移動しており、広島 湾における塩分低下が顕著となった。一方、瀬戸内海東部では、大阪湾、播磨灘、紀伊水道 における塩分が概ね30以下となり塩分低下が顕著にみられた。日向灘や土佐湾では河川プリ ュームが沖合にまで大きく発達していた。

図2は豪雨前から豪雨後にかけての塩分変化と陸上に降った累積降水量を示している。塩 分変化マップと累積降雨量マップを合成することで、どの地域に降った雨がどのような河川 プリューム(塩分低下域)を形成させたか、すなわち豪雨で大きく影響を受けた海域が一目瞭然 に把握できる。例えば、豪雨によりほぼ西日本全域で 300mm 以上の降雨量を示しているが、 特に四国山地南側に降水が多かったことがわかる。その結果、土佐湾の塩分低下域が示す河 川プリュームが形成されたことが図から読み取れる。同様な見方で、広島湾や日向灘南部海 域、豊後水道、伊予灘西部、播磨灘、大阪湾、紀伊水道も豪雨により塩分が3以上低下して いることがわかる。このように衛星 SSS マップを用いて豪雨により塩分が3以上低下して いることがわかる。このように衛星 SSS マップを用いて豪雨による塩分低下域を描画するこ とで豪雨の影響を受けた海域を示唆することが可能となった。また図3のように、高解像度 データセットの特徴を生かし、大阪湾において形成された淀川と大和川からの河川プリュー ムをクローズアップして、プリュームの空間的特徴を他の衛星画像と比較することも可能で ある。図3(右)は、衛星軌道上に100機以上展開されている DOVE 衛星が撮影した 7/10 に おける可視画像であり、淀川からの濁水により河川プリュームが可視化されている。図3(左) の海面 SSS マップと比較すると、低塩分域が濁水の分布域とほぼ一致しており、海面 SSS マ ップに現れる河川プリューム分布の妥当性が示されている。

二つ目の解析事例として、平成 30 年台風 21 号が日本列島上陸した時の海面塩分変化を捉 えた結果を図4に示す。台風 21 号は、主に瀬戸内海中部や西部、日向灘、土佐湾において塩 分低下域を形成しながら通過したことがわかる。図4(上)をみると豪雨後の塩分分布(図1下) と一見よく似ているが、図4(下)をみると大阪湾や播磨灘の一部の海域では逆に塩分が高くな っており、台風による鉛直混合により高塩化したことを示唆している。本研究では衛星 SSS マップのほかに、クロロフィル a や光消散係数、懸濁物質の衛星マップも整備している。今 後これらを用いて豪雨による海洋環境への影響評価も可能だろう。

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 原田浩太朗(石川県水産総合センター)共同研究者



図1(上)平成30年豪雨前(6/20-6/27)と(下)豪雨後(6/28-7/14)における期間平均海面塩分マップ。



図2 (陸側)豪雨期間における累積降雨量(国土交通省出典)。(海側)豪雨前後における塩分変化(豪雨前 6/20-6/27 の平均塩分値から豪雨後 6/28-7/14 の平均塩分値を引いた差分値)。



図3 (左)大阪湾における豪雨直後(2018/7/10)における海面塩分マップ。(右)DOVE 衛星が撮影 した同日の可視画像。



図4 (上)台風 21 号襲来後(2018/9/5)における SSS マップ (下)台風襲来前後における塩分変化 (9/5 から 9/3 の海面塩分値を引いた差分値)。

富山湾沿岸域における対馬暖流水の流入に関する研究

富山高等専門学校 商船学部 福留研一

目的

富山湾の季節内の変動に関しては、近年になって、沿岸部の表層では冬季に時計回りの循環、春季から夏季に反時計回りの循環があることが、定置網に設置された流速計による長期のモニタリングより報告された.ただし、沖合も含めた流動構造の季節変動の姿については、現在もよくわかっていない.昨年度は、限られたシップタイムや悪天候時にも観測が可能なXBTを導入することで、春季と夏季に湾内の広範囲における流れ場と水塊構造の同時調査を実現し、春季の対馬暖流の流入の過程や、夏季から秋季にかけての湾西部の渦構造の消長に伴って、沿岸の流れ場が反転する様子を捉えることができた.本研究では、対馬暖流の流入過程や渦の経年変動を同様の観測により調査するとともに、過去13年におよぶ若潮丸 ADCP による富山湾奥の流速観測結果を用いて、渦構造が顕著な時期や対馬暖流の勢力や流路との関係について調べた。

観測・データ

富山高等専門学校では実習船「若潮丸」を用いて海洋観測も実施しており、富山湾のやや湾奥の水深 約700mの地点に設定した CTD 観測点(36.53N, 137.10E)では、10 年超に渡っておおよそ毎月の CTD 観測および観測点までの往復 ADCP 観測を行なっている.この観測に加えて、対馬暖流の流入や 流路変化が予想される時期には湾内広範囲において CTD 観測を行った.その他随時行われる実習航海 における CTD・ADCP 観測も用いて解析した.

結果・考察

2018年の5月31日、8月21日、11月6日および、2019年1月22日4回において、図1に示した 測点において CTD 観測を行った。図2に示した湾奥のst06及びst08の水温鉛直プロファイルからは 2018年度は春季の海水温上昇が鈍く、対馬暖流の流入のタイミングが例年より遅かった可能性が考え られる。こういった季節的な変化のタイミングのずれは湾内の生物環境等に影響することが考えられる ため、流動場の観測や表層クロロフィルa濃度の衛星観測とあわせて、その経年変化のインパクトを調 べる必要がある。

富山湾の流動構造においては、富山湾奥の沿岸流の季節変化と海底地形が及ぼす影響に注目し、2005 年からの長期の観測データを用いた解析を行った。13年間で春・夏・秋・冬それぞれ26・44・25・17 回の若潮丸 ADCP 観測で得られた流速データを季節平均し、海底地形の変化の大きい海域で区切って 水平流れ場を見積もることで、富山湾奥沿岸の表層から中層にかけての流れ場における季節変化と、海 底地形が及ぼす影響を評価した。図3に2005年から13年間の ADCP 観測結果を用いて作成した、水 深 16m における季節毎の流動場を示した。図中の水平ベクトルは、富山湾奥で海岸から急激に海底水 深が深くなって 400m に達するあたりの緯度である36°49′に境界を設け、境界から沿岸までと境界か ら沖合の36°53′までの間で観測された流速データをさらに経度1°ごとに区画を設けてそれぞれ平均 し、算出している。水深16mの水平ベクトル図からは、季節平均した流速は春季と冬季に相対的に大 きく、岸に平行に流れている様子が確認できる。夏季や春季に季節平均流速が小さくなっているのは、 流軸が安定せずに上下していたり、渦など湾のスケールに比べて相対的に小さいスケールの流動が卓越 していることが理由として考えられる。沖合と岸近くの流れの関係に注目すると、春季には沖合と岸近 くの双方で東向きの流れであるのにたいして、冬季には沖合で東向きであるが岸近くでは西向きの流れ が卓越するという違いが見られた。次に海底地形と流速場の関係を見ると、東経 137°9-10′あたりに かけて海底水深が浅い領域が沖合に張り出している領域を境に、流れの向きが変化している様子が見て 取れる。この傾向は海底水深が 400m より深い沖合の海域で特に顕著であり、水深が深いにもかかわら ず、海底地形に沿うように流れの向きが変化していることがわかった。これらが海底地形の影響を受け たものか、それとも湾の西部と東部で夏季から秋季に観測されるような数十キロスケールの渦や対馬暖 流沿岸分枝の蛇行などに影響を受けたものなのか、あるいはその両方なのかといったことは今回の解析 からは判断が難しい結果となった。湾内沖合に現れる渦や対馬暖流の蛇行といった流動構造の変動が沿 岸の流動場ならびに河川水の影響を強く受けた沿岸表層水の輸送にも大きく影響を与えている可能性が あるため、これらの変動の経年変化を調べる必要が示唆された。





図 2. (左) st06 及び(右) st08 における海水温度の鉛直分布



成果報告

福留研一,千葉元,金山恵美「2017 年の富山湾奥の沿岸流と沖合の流動場 の関係について」,日本航海学会講演 予稿集,6巻1号2018年5月2日

研究組織

研究代表者:富山高等専門学校 商船 学科 福留研一

所内世話人:九州大学応用力学研究所 千手智晴

図3 長期 ADCP 観測による富山湾奥における水深 16m の流速ベクトル図

2019年度 応用力学研究所 一般研究 「領域海洋モデルによる GNSS-R 技術の海洋観測への応用の高度化」 共同利用研究成果報告書

東京大学 新領域創成科学研究科

海洋技術環境学専攻 小平翼

1 要旨

相模湾内の平塚海洋観測棟では GNSS-R 技術を用いた海面高度、海上風速等の物理量の 観測の試みが行われており(GROWTH プロジェクト)、GNSS-R 技術は常時全球モニタリン グシステムへと発展する可能性を秘めている。本研究では昨年度に引き続き観測条件の詳 細な把握を目的に相模湾における流況特性を解析した。データは主に海上保安庁が保守・ 運営する海洋短波レーダーであり、流速が水平方向に非発散であるという制約を設けた変 分法によって品質管理を試みた。また、HF レーダと領域海洋モデルのデータ同化の実施に 向け、海洋再解析データを初期値・境界値としたダウンスケーリングモデルを構築した。

2 序論

相模湾は南北方向に約 60km、東西方向に約 55km の大きさを持つ。南部の湾ロが北太平 洋に面している為、湾の流況は黒潮からの影響を強く受ける。大都市圏近郊立地のため、 ヨット競技の実施や海水浴場での海洋レジャー活動に多く利用されている。2020 年東京オ リンピックのセーリング競技会場にも指定されている。海洋レジャーに加え、漁業も盛ん である一方で、定置網が急潮によって被害を受けることが知られている。

このような相模湾内には数少ない海洋観測塔である平塚海洋観測棟が存在し、海洋観測 研究にも活用されてきている。加えて、伊豆大島と三浦半島荒埼には海上保安庁が設置し た海洋短波レーダー(24MHz)が存在し、水平1.5km 改造での表層流速の1時間毎の変化 を考察することが可能である。湾内の流れ場の変動は南岸を流れる黒潮に影響されること が知られており、大蛇行期である現在は、大島北側に高気圧性の循環流が生まれ、相模湾 内には低気圧性の循環が生まれるていると考えられる(Kawabe and Yoneno, 1987)。

本研究では、相模湾の中でも沿岸に近い海域を対象として、短波レーダーと数値海洋モ デルを活用して流況特性を考察し、GNSS-R 技術の海洋観測への応用に貢献することを目標 とする。短波レーダーを用いた既存研究には日向ら(2003)の研究があるが、対象領域は平 塚・江ノ島等の沿岸部から離れているため、平塚海洋観測棟付近の流動場の特性について は明らかになっていない。、また、数値海洋モデルについても黒潮流路によって湾内の流 れが変動することが考えられるため、現実的な流動場の再現については湾内のみならず、 黒潮流路についても注意を向けることが必要だと考えられる。

3 方法

3.1 短波レーダ

伊豆大島と三浦半島荒埼には海上保安庁が設置した海洋短波レーダー (24MHz)が存在している。観測は1時間毎に行われ、取得したデータは空間分 解能1.5kmの格子点に内挿され、インターネットを通じて公開されている。 HF レーダーは海面付近の流速に限定されるが、面的に流速データを取得できる 貴重な海洋観測手法であり、活用できれば相模湾内の流れの理解に大きく貢献 する。しかしながら、データの品質管理は行われていない。昨年度は2017年11 月1日から12月18日にかけて江ノ島沖に設置したADCP ブイによる流速データ と比較することでHF レーダーの精度についての検討を行った。本年度は三次元 変分に基づいてレーダデータに変分 QC を施すことで物理的な整合性を持つ流速 場の構築を試みた。

より具体的には、連続の式を満たした上で、次のコスト関数 Jを最小化する ように表層流速の推定値u_e, v_eを求める。

$$J = \sum_{i} \sum_{j} (u_{e(i,j)} - u_{o(i,j)})^{2} + (v_{e(i,j)} - v_{o(i,j)})^{2} + \lambda (\frac{u_{e(i,j+1)} - u_{e(i,j-1)}}{2\Delta x} + \frac{v_{e(i+1,j)} - v_{e(i-1,j)}}{2\Delta y})^{2}$$

なお、*u_o, v_o*はHF レーダにによる観測値である。第一推定値として年度平均 値を使用し、探索手法として最急降下法を用いて計算を行った。

3.2 数値海洋モデルの活用

台風襲来による急潮の発生など、特定のイベントに関する力学的考察には数 値海洋モデルの利用が効果的である。考察対象は相模湾であるが、既存研究よ り湾内の流れは黒潮というより大きなスケールを持つ流れに影響を受けると考 えられる。そこで、海洋再解析値 JCOPE2 の現実的な流れ場からのダウンスケー リングを実施する。

利用するモデルは海洋大循環モデル MITgcm である。支配方程式の圧力項に静水 圧近似を施さないことも可能であるため、非線形性と分散性を考慮することによ り沿岸捕捉波の再現精度向上などに利用できると考えられる。本研究では、水平 解像度 1/24 度での第一ネスティンを 2015 年-2018 年の 4 年間にかけて実施し た。また、これらの結果を元にした水平解像度 1/96 度での第二ネスティングを 実施した。

初期境界条件として海洋再解析値 JCOPE2 を利用することに加え、モデル格子点 に内挿し、時空間スケールの大きな変動は JCOPE2 再解析値に沿うように時間ス ケール 10 日間のナッジングをモデルに課した。

4 結果

4.1 短波レーダ

変分 QC を適用することで岸向きの発散を生むような流れを減らすことはでき たが、沿岸付近の流れ場は沖合に比べて不連続であった(Fig. 1)。昨年度の解析 で利用した 2018 年 ADCP 観測結果の比較からは変分 QC を実施すると、行う前 よりも相関が僅かに小さくなるという結果になった(Fig. 2)。しかし、RMSE は 東西流速、南北流速ともに減少する結果を得た。



QC後



Fig 1 2017 年 9 月平均流速に対する変分 QC の適用



Fig 2 QC 前後の東西方向流速の ADCP との比較

4.2 数値海洋モデル

2015 年から 2018 年にかけてダウンスケーリングを実施した。水平解像度とし ては、1/12 度である JCOPE2 の倍の 1/24 とした。第一段階のネスティング結果 としては JCOPE2 の物理モデルと大差なく、より高解像度な空間分布が得られた (Fig. 1)。海面高度計を用いた詳細な評価が望ましいが、黒潮流路に関してはダ ウンスケーリング前後に明確な差がないことから、さらなるダウンスケーリン グにより相模湾内の詳細な流れ場を考察できるものと考えられる。2017 年 1 月 という限定された機関であるが、第二段階のダウンスケーリングの試験実験を 行った。さらなる詳細な検討が必要だが、湾内に低気圧性が確認できる日も存 在した (Fig. 3)。



Fig 3 海面付近の水温と流速分布の日平均値, JCOPE2(左), MITgcm(右)



Fig 4 海面付近の水温と流速分布の日平均値, JCOPE2(左), MITgcm(右)

5 まとめと課題

HF レーダの解析に関して、変分 QC を適用することで岸向きの発散を生むような流れを 減らすことはできたが、ADCP データとの時系列での比較では、精度の改善が見られる部分 と悪化する部分が混在していた。今後、同化の際に観測誤差を考慮すること(大きさや分 散、性質など)、境界値を考慮する(現在は1次精度に落とした差分を使用、岸に沿うよう な方向にすることは考慮していない)といったことに着目することが考えられる。また、 発展的な課題として並行して実施しているダウンスケーリングモデルを用いて4次元変分 法を実施することなどが考えられる。

多波長ミー・ラマンライダーを用いたエアロゾルの動態把握とデータ同化への応用 に関する研究(30A0-30)

国立環境研究所 西澤智明

九州大学応用力学研究所 原由香里

九州大学応用力学研究所 弓本桂也

【要旨】

福岡における多波長ミー・ラマンライダーによる観測・解析を主体とした様々なエアロゾル種の光学特性やその 時間変動の把握、そしてデータ同化やモデル検証への応用に向けたライダープロダクトの整備・高度化に資する 観測研究を主眼とし、先行研究で開発された解析手法を発展させ、多波長ミー・ラマンライダーデータから4種 エアロゾル(大気汚染、黄砂、海塩、煤)の重量濃度の高度分布を算出する手法を考案し、実データへ適用した。 ライダー観測から算出された PM2.5 や PM10、エアロゾル種毎の重量濃度の時間変動は、地上サンプリング観測と概 ね整合した。一方で、重量濃度の絶対値に対しては、ライダー算出値が過大評価となる傾向が見られた。その過大評価 の要因の考察から、内部混合を考慮したエアロゾル光学・微物理モデルの重要性が示され、モデルの精緻化は今後の 重要な研究課題の一つとなる。

【序論】

福岡県は、アジア大陸からの越境大気汚染の影響を強く受けると共に、春期には黄砂も合わせて飛来する。日本海からの海洋性エアロゾルの移流も合わせると、福岡では東アジア域における代表的なエアロゾル種を一通り 計測できることになる。様々なエアロゾル種が大気中で混在する、大陸からの長距離輸送中に変質する、といった複雑さはあるが、東アジア域でのエアロゾルの物理的・化学的な特性観測を行うのに適した観測地点の一つといえる。また、大陸からの様々なエアロゾル種の通過地点となることから、観測により得られたデータはエアロ ゾルの輸送情報を有しており、エアロゾル化学輸送モデルの検証やデータ同化に際して極めて有用な観測情報となる。

2013-2017 科学研究費基盤 S 研究「多波長ライダーと化学輸送モデルを統合したエアロゾル 5 次元同化に関す る先導的研究」において、福岡(九州大学応用力学研究所)および、沖縄、富山に多波長ミー・ラマンライダー を導入し、黄砂・越境汚染粒子等の光学特性の解析、そしてライダーデータ等のデータ同化による東アジア広域 のエアロゾルの動態解析や再解析データ構築が試みられた。福岡における多波長ミー・ラマンライダーによる観 測は、2014 年から現在まで連続稼働しており、データの蓄積が進められている。また、この課題では、この多波 長ミー・ラマンライダーデータを用いて、大気中の代表的なエアロゾル種(大気汚染、黄砂、海塩、煤)の時間・ 高度分布を推定するアルゴリズムも開発され(Nishizawa et al., 2017)、観測データへの適用も進められてい る。

上記の背景をもとに、本研究では、福岡における多波長ミー・ラマンライダーによる観測・解析を継続し、様々 なエアロゾル種の光学特性やその時間変動の把握、そしてデータ同化やモデル検証へ向けたライダープロダクト の整備・高度化に資する観測研究を行う。科研費基盤S研究で構築された観測基盤や解析・モデル技術をもとに、 その高度化・発展に資する研究でもある。

【実施方法】

応用力学研究所に設置された多波長ミー・ラマンライダーのデータ解析用にエアロゾル種推定手法(Nishizawa et al. 2017)が開発された。そこで、この推定手法から推定された4種エアロゾルの波長 532nm での消散係数 の高度分布データを用いて、エアロゾル種毎の重量濃度および全エアロゾルの重量濃度(PM2.5や PM10)の算出 を行うと共に、地上サンプリングデータとの比較を行う。この研究はライダープロダクトの高度化に相当する。 数値モデルで直接的に再現されるパラメータは重量濃度であることから、ライダー等のリモートセンシング計測 から重量濃度への変換はモデル検証やデータ同化において有用な技術開発ともなる。

【結果と考察】 重量濃度の算出

エアロゾル種推定手法では、4種エアロゾルの消散係数を推定する際に、エアロゾル種毎の粒径分布や粒子の 形状(球か回転楕円体)を仮定する。そこで、この仮定した粒系分布と形状に沿ってエアロゾル種毎に体積濃度 を算出しそれに文献値によるエアロゾル種毎の密度を掛け合わせることで、単位消散係数辺りの重量濃度を決定 することができる(以下、重量換算係数)。エアロゾル種毎の重量換算係数を適用することで、エアロゾル種毎 の重量濃度、そして全てのエアロゾル種の重量濃度を足し合わせることでエアロゾル全体の重量濃度を算出した。 また、粒径分布に応じて、直径2.5µm以下のみの粒子、ないしは直径10µm以下のみの粒子(PM10)を重量計算 に入れることで、PM2.5およびPM10の算出も行うことにした。エアロゾル種毎の重量換算係数の算出では、吸湿 成長を考慮し、黄砂以外の粒子に対しては相対湿度に応じた重量換算係数を用意した。実際の重量濃度算出では、 相対湿度としてモデル出力データを用いた。また、煤粒子に対しては、従来型の黒色炭素のみで構成された粒子 ではなく、内部混合型粒子(硫酸塩等の水溶性の大気汚染成分が黒色炭素成分をコーティングしている粒子)と し、より現実的なモデルを採用した。

地上サンプリング計測との比較

科研費基盤 S 研究では、エアロゾル連続自動分析装置や黒色炭素測定装置による地上エアロゾルサンプリング計測 も実施された。そこで、2014 年9月から1年程度のデータを用いて、上記の方法でライダー計測から算出された重量濃度 と地上のサンプリング計測結果の比較も行った。算出された PM2.5 や PM10、エアロゾル種毎の重量濃度の時間変動は 概ねライダー算出値とサンプリング値間で整合的となった。

一方で重量濃度の絶対値に対しては違いが見られ、ライダー算出値の方が過大評価となる傾向が見られた。その要因としては、エアロゾル種毎の重量濃度換算係数の不完全さと共に、エアロゾル種の誤推定(例えば、黄砂を海塩粒子と誤推定する)も示唆された。これらの共通した問題としては、エアロゾル種推定や重量算出におけるエアロゾルの内部 混合の考慮の不完全さが挙げられる(例えば、水溶性粒子によりコーティングされた内部混合型の黄砂粒子は本解析では考慮されていない、など)。煤粒子の推定においては内部混合が考慮された。従来型の黒色炭素のみの粒子モデルで推定された黒色炭素成分の重量濃度は、内部混合型の煤粒子モデルで推定された黒色炭素成分の重量濃度に対して5倍以上もの過大評価となった。このことは、ライダーによる黒色炭素成分の重量濃度の算出において、内部混合を 考慮することは極めて重要であることを示している。内部混合を考慮したエアロゾル種毎のモデル(光学特性や重量濃度換算係数など)の高度化が今後より重要な課題と考察される。

成果発表

- Hara Y., Nishizawa T., Sugimoto N., Osada K., Yumimoto K., Uno I., Kudo R., and Ishimoto H. (2018) Retrieval of Aerosol Components Using Multi-Wavelength Mie-Raman Lidar and Comparison with Ground Aerosol Sampling. Remote Sens., 10, 937; doi:10.3390/rs10060937.
- Nishizawa T., Higurashi A., Shimizu A., Jin Y., and Sugimoto N., Current status and progress on AD-Net and ISDC. 5th International SKYNET workshop (New Delhi, 2019.2)
- Nishizawa T., Hara Y., Uno I., Yasunaga K., Kudo R., Shimizu A., Sugimoto N., Ground-based network observation of aerosols and clouds using Multi-wavelength Mie-Raman lidars. SPIE Asia-Pacific remote sensing 2018 (Hawaii, 2018.09).
- 西澤智明,杉本信夫,清水厚,鵜野伊津志,原由香里,工藤玲(2018)"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",光アライアンス,29(10),1-6.
- Nishizawa T., Higurashi A., Kudo R., Irie H., Yasunaga K., Katsumata M., Yumimoto K., Ishii S., Okamoto H., Sato K., Katagiri S., Nakajima T., Validation of the EarthCARE ATLID and MSI products using ground-based lidar and sunphotometry measurements in East Asia. 1st earthcare validation workshop (Bonn/German, 2018.06).

共同利用研究集会

海洋力学理論の研究会

Workshop on theoretical physical oceanography

研究代表者 北海道大学低温科学研究所 三寺史夫

研究集会の目的

海洋力学はこれまで地球流体力学を中心に発展してきた。しかし海盆スケールの海洋循環場の理論が整理され、理解が進んでいくに連れ、近年の海洋力学はより沿岸スケールとの相互作用、高解像で起きている乱流・波との相互作用、大気との相互作用、そして生態系・土砂との相互作用、と一つの理論体系では閉じることの出来ない現象への発展が急速に進みつつある。これまでとは違う研究手法・理論展開が必要となっている一方、個々人で多岐にわたる理論体系の発展の動向・新展開を全て把握することは困難であり、その理論体系の汎用性・特異性に対する議論が不足している。そこで当研究集会では、様々な分野との相互作用を理論的に進めている研究者が集まり、それぞれの研究者が進めている理論体系や高解像度モデル・大気海洋結合モデル・観測データを用いた解析手法を幅広く議論し、「海洋学としてのBig Question はなにか」をテーマに、新しい海洋力学の理論体系の構築を目指す。

研究集会の概要

研究集会名:海洋力学理論の研究会 日時:平成30年9月10日(月)13:00 - 11日(火)12:00 場所:九州大学応用力学研究所W501

海洋力学のこれまでの歴史的変遷とともに未解決なまま宿題となっている課題を参加者の一人に具体 例を示してもらい、それについての考察を参加者とともに疑問点を理解・解決しながら議論を進めてい くという形で研究集会を開催した。研究成果そのものには焦点をしぼらず、研究テーマの発展軸、位置 づけを俯瞰的な視点から議論した。今回は、風成循環に関しては亜寒帯域に形成される海洋フロントの 形成メカニズム、混合過程に関しては海底地形を起因とする乱流混合のメカニズム、深層循環に関して は熱塩循環の駆動メカニズム、そして海洋の素過程を検証するツールとして粒子追跡モデル、と4つの テーマを中心にプログラムを構成した。それぞれの具体例として、磯ロジェット・黒潮・内部重力波・ 鉛直混合と循環強度・水循環、を中心に議論が進んだ。1トピックにつき1時間近く時間をかけたこと により参加者間で疑問点を共有することができ、有意義な研究集会となった。

出席者

13名(参加者名簿参照)

議論テーマとその概要

13:00-13:30 趣旨説明

三寺史夫(北海道大学)·木田新一郎(九州大学)

海洋力学の課題についての考察を参加者の一人に具体例を示してもらい、それを参加者間でお互いに 疑問点を解決しながら議論を進めていくことを確認した.また学会発表とは異なり一つのテーマを十 分な時間をかけて議論し、今後の海洋物理学が注目すべき研究テーマの芽を作り出すことを目的とし て研究集会を進めることを確認した。

10日(月)

13:30-14:30 亜寒帯域に形成される海洋フロントの形成メカニズム

話題提供:三寺史夫(北海道大学)

Discussion のリード:浮田甚郎(新潟大学)

衛星を通じて海面水温場の観測が進んだことで海洋フロントの実態が明らかになってきている。海洋 フロントは、大小さまざまなスケールで存在することが知られているが、その中でも亜寒帯域に形成 される磯ロジェットは表層近くにフロントが形成されるにも関わらずその位置が大きく変動しないと いう特徴を持つ。海底地形が JEBAR を通じて Barotropic から Baroclinic な場へ作用することの重要 性が指摘され、理論とともに数値モデル結果が紹介された。また大西洋・南極海など他の海域での理 論の適応性についても議論が進んだ。

14:30-14:45 休憩

14:45-15:45 海底地形を起因とする乱流混合のメカニズム1

話題のリード:長井健容(東京海洋大)

Discussion のリード:田口文明 (東京大学)

海流が海底地形に作用した結果、強い鉛直混合が起きることが近年明らかになりつつあるが、その混 合の強さや空間分布の現場観測に基づいた検証はまだ不足している。黒潮が琉球列島を通過する海域 における最新の乱流観測結果とともに、高解像度で乱流強度を観測する手法が紹介された。海底地形 がその近傍で混合を引き起こす不安定メカニズムについての仮説が提示され、さらに黒潮上における 鉛直混合が局所から海盆スケールの海洋循環に果たす役割について議論が及んだ。

15:45-16:00 休憩

16:00-17:00 海底地形を起因とする乱流混合のメカニズム2

話題のリード:大貫陽平(九州大学)

Discussion のリード: 相木秀則(名古屋大学)

背景場が変動する中での不安定性解析に関してモノドロミー行列を用いた新たな解析手法が提案された。これまで海洋内部波が引き起こす混合について Far-field における理論が発達してきた一方、 Near-Field における理論の構築が進んでいないことが指摘され、それが新手法によって解決できる可能性が示された。成層が地形に作用する際に生じるビーム内部で不安定を引き起こす波の特性が抽出できることが示され、解析結果と適用範囲について議論が行われた。 11日 (火)

9:30-10:30 熱塩循環の駆動メカニズム

話題提供:吉川裕(京都大学)

Discussion のリード: 浦川昇吾 (気象研)

深層循環を駆動する主要素である熱塩循環は、これまでSandstrom, Stommel and Arons, Munkらの仮 説が基点となってその理解が進んできた。海洋学における深層の鉛直混合への興味もこれらの研究が 重要な役割を果たしている。ただ、鉛直混合と循環の強度の関係性についての議論は、解釈が混乱し た形で議論が進んでいることが指摘された。理想実験による過去の研究の検証結果が紹介され、これ までの理論で欠けていた視点や熱塩循環の駆動要因の解釈方法を中心に議論が行われた。

10:30-10:45 休憩

10:45-11:45 淡水循環を抽出するツールについて

話題提供:木田新一郎(九州大学)

Discussion のリード: 古恵亮 (JAMSTEC)

海洋循環を議論する際、密度場と循環を一体的に議論・解析することが多いが、水循環に代表されるよ うに、海洋循環は密度ととともに、塩分、窒素、炭素、とそれぞれの物質特性・起源に応じて循環が存 在しているはずである。そこでラグランジアン粒子追跡モデルを用いて淡水に着目した水循環を追跡す る手法が紹介された。インドネシア多島海を例に降水起源の淡水を追跡した結果が紹介され、時空間が 大きく変動する場でも適応可能なことが示された。オイラー的手法との差・同位体を用いた手法につい て議論が進んだ。

11:45-12:00 閉会挨拶

木田新一郎(九州大学)

近年、海洋で注目されている現象を中心に、最新の検証方法・視点が紹介された。昨年度と比べ、混合 過程に関する発表が多く、別の視点から見た海洋学としての Big Question が提示され、議論が活発に 進んだ。疑問点をその都度、解決しながらディスカッションを進めたことで、時間をかけながら参加者 内で理解を共有することができた。

発表論文および学会発表

無し

研究組織

研究代表者

三寺 史夫(北海道大学・低温科学研究所・教授)

研究協力者

- 浮田 甚郎 (新潟大学・自然科学系・教授)
- 田口 文明(東京大学・先端科学技術研究センター・特任准教授)
- 古恵 亮(海洋研究開発機構·主任研究員)
- 勝又 勝郎(海洋研究開発機構・主任研究員)
- 吉川 裕 (京都大学・理学部・准教授)
- 相木 秀則(名古屋大学・宇宙地球環境研究所・准教授)
- 長井 健容(東京海洋大学・学術研究院海洋環境学部門・助教)
- 松村 義正 (東京大学・大気海洋研究所・助教)
- 浦川 昇吾 (気象庁気象研究所・海洋・地球化学研究部・主任研究官)

所内世話人

木田 新一郎(九州大学・応用力学研究所・准教授)

研究集会名:海洋力学理論の研究会 場所:九州大学応用力学研究所 W501 日時:2018年9月10日13:00-11日12:00 代表:三寺史夫、世話人:木田新一郎

プログラム

13:00-13:30 木田新一郎(九州大学)

趣旨説明

13:30-14:30 風成循環のメカニズムに関する数値モデル・観測・理論の発展について

三寺史夫(北海道大学)

浮田甚郎(新潟大学)

14:30-14:45 休憩

14:45-15:45 海洋の鉛直混合に関する考察 I 長井健容(東京海洋大) 田口文明(東京大学)

15:45-16:00 休憩

16:00-17:00 海洋の鉛直混合に関する考察Ⅱ 大貫陽平(九州大学) 相木秀則(名古屋大学)

9:30-10:30 熱塩循環のメカニズムに関する数値モデル・理論について 吉川裕(京都大学) 浦川昇吾(気象研)

10:30-11:00 休憩

11:00-12:00 海洋の素過程を検証する数値・観測・理論的ツールについて 木田新一郎(九州大学) 古恵亮(JAMSTEC)

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:	2018年12月12日(水) 午後(14:00~17:30)
	13日(木) 午前(9:30~10:45)
開催場所:	九州大学 応用力学研究所西棟6階 多目的研究交流室(W601号室)
参加者:	12日 33名
	13 日 36 名

3. 発表概要

研究集会では計13件の研究発表が行われた。

1日目は、趣旨説明の後7件の講演があった。琉球大学の藤井がNICT沖縄センターとともに実施している地上波デジタル放送の電波を用いたパッシブバイスタティックレーダでの流速観測の可能性を論じた。三菱電機の高橋はアダプティブアレイ信号処理を用いてドップラスペクトルに混入する干渉波の影響を低減する手法の提案を行った。愛媛大学の尾方は、リアルタイム津波検出法について仮想津波実験を用いて検証した。水深と背景波高により検知性能が大きく変わることを示唆した。JAMSTEC むつ研究所の佐々木らは、CODAR/SeaSonde レーダの流速計測に影響を与えるアンテナパターンとして、AIS 情報を用いたアンテナパターン計測を適用し、係留観測との比較を行った。大畑局のアンテナパターンが課題であることが分かった。琉球大学の久木は、海洋レーダを用いた波浪研究のレビューを行うともに、和歌山観測データを用いて波浪計測の初期結果を示した。電力中央研究所の岡田は、海洋レーダで観測できない沿岸近傍に対してデータ同化の手法を使って流速を求める方法を提案した。遠州灘の観測に対して同手法を適用し電磁流速計との比較からRMSE が58%低下したことを示した。JAMSTEC の石川は、北海道大学低温科学研究所の江渕らが作成した宗谷海峡におけるミズダコカレンダーに触発され、津軽海峡東部海域を観測している

87

レーダを用いて同海域のナウキャストを試みた。調和解析から潮流成分とそれ以外の成分の短期予 測を行い半日程度の予測可能なことを示した。

1日目最後の情報交換の時間に、宮崎県水産試験場の渡慶次は、宮崎県が設置中の日向灘観測用の13MHzレーダの整備状況と予備免許が下りたことを報告した。また、10月にスペインで行われた海洋レーダワークキャンプに参加したことに触れ、EU共通のレーダのデータ処理やQCの内容とユーザの視点でのツール開発、普及活動の重要性を述べた。琉球大学の藤井からは、6月に那覇にて開催された第4回ORCA(Ocean Radar Conference for Asia-Pacific)は、発表件数42件、12か国63名の参加があり、盛会であったことが報告された。

2日目は、6件の講演があった。北海道大学低温科学研究所の江渕は宗谷海峡およびオホーツク 海観測の海洋レーダの 2003 年から 16 年分の観測データを俯瞰し、宗谷暖流の季節変動が大きい ことを明らかにした。また、ADCP の鉛直プロファイルも用いて流量を推測するとともに、季節変 化はオホーツク海の潮位差との相関が高いことも示した。JAMSTEC むつ研究所/北海道大学水産 の阿部は、津軽海峡東部観測の海洋レーダで観測された流速と練習船うしお丸の 10m 深の ADCP での流速とを比較した。正の相関がみられるがノイズが大きく更なる処理の必要性を述べた。風強 制に対する応答についても言及し南北方向にのみ流速と風速が相関を持つことを示した。東京大学 新領域の小林は、相模湾内の循環流の挙動を知るために、海上保安庁の相模湾海洋レーダで得られ た表層流速を調和解析し、係留 ADCP と比較した。比較に際し異常値除去や移動平均により QC を 行うとともに変分法による空間 QC も行い、データの信頼性を向上させた。九州大学の青谷は、15 年間の対馬海峡観測のデータを用いて経年変化の解析を行った。吹送流成分の推定から地衡流成分 を抜き出した。その結果、2009~2010 年に約 20%流速が上昇する現象がみられた。宮崎県水産試 験場の渡慶次らは、2016 年から琉球大学との共同研究で実施している日向灘観測の概略とその成 果をもとにしたまき網漁場の形成や急潮指標の可能性について述べ、整備中の 13MHz レーダ稼働 後に発信される予定の総合漁場情報の計画を解説した。海上保安庁海洋情報部の藤岡は、海洋状況 把握(MDA)の能力強化に向けての取り組みとして、海洋レーダデータの表示を各機関と調整中で あることを報告した。

4. 研究集会プログラム

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

 (代表者:藤井智史、九大応力研世話人:市川香)

 開催日: 2018年12月12日(水)午後~13日(木)午前
 会場:九州大学筑紫キャンパス

応用力学研究所西棟6階多目的研究交流室(W601号室)

12月12日(水)

14:00-14:05 趣旨説明

藤井智史(琉球大)

14:05-14:30 地デジパッシブレーダによる沿岸流の検出

永江要・浜比嘉正峻(琉球大工)雨谷純・新垣吉也(NICT 沖縄)、藤井智史(琉球 大工)

- 14:30-14:55 アダプティブビーム形成による干渉波抑圧と Bragg 散乱エコー明瞭化 高橋龍平・小柳智之・鈴木信弘・若山俊夫(三菱電機)
- 14:55-15:20 仮想津波観測実験に基づく海洋レーダによるリアルタイム津波検知手法の検討 尾方浩平(愛媛大院)、門廻充侍(東北大災害科学国際研)、藤良太郎(愛媛大院/国 際航業)、高橋智幸(関西大)、日向博文(愛媛大院)
- 15:20-15:45 AIS 情報由来のアンテナパターンによる流速データ品質の向上について
 佐々木建一(JAMSTEC むつ)、橋向高幸(マリンワークス)山本秀樹・高田信・脇
 田昌英・渡邉修一(JAMSTEC むつ)
- 15:45-15:55 休憩
- 15:55-16:20 海洋レーダによる波浪研究の現状と和歌山県沖観測の初期解析 久木幸治(琉球大理)、片岡智哉(東京理科大理工)
- 16:20-16:45 視線方向流速を活用した 4 次元変分法による沿岸近傍の流動場推定 岡田輝久・坂井伸一・坪野考樹(電中研)
- 16:45-17:10津軽海峡 HF レーダーの調和解析とナウキャスト手法の開発石川洋一・田中祐介 (JAMSTEC)
- 17:10-17:30 情報交換
- 12月5日(火)
- 9:30-9:55 海洋レーダで観測された宗谷暖流表層流速場の経年変動 江淵直人・深町康・大島慶一郎・高塚徹・石川正雄・白澤邦男・若土正曉(北大低温研)
- 9:55-10:20 津軽海峡 HF レーダーデータを用いた基礎的な解析と今後について
 阿部泰人(JAMSTEC むつ/北大院水産)、安井智美・平譯享(北大院水産)、佐々
 木建一(JAMSTEC むつ)
- 10:20-10:45 HF レーダーによる相模湾表層流の分析 小林諒也・早稲田卓爾・小平翼(東大新領域)
- 10:45-10:55 休憩
- 10:55-11:20 対馬海洋レーダーで観測した 15 年間の流況長期変化 青谷裕史・磯辺篤彦・上原克人(九大応力研)、岩崎慎介(寒地土木研)
- 11:20-11:45 水産振興を目的とした宮崎県における海洋レーダの活用について 渡慶次力(宮崎水試)、藤井智史・池原日向・大城弘貴(琉球大工)
- 11:45-12:10 海洋の今を見るために ~海上保安庁における海洋状況把握(MDA)の能力強化に向けた取組~ 藤岡ゆかり(海洋情報部)
- 12:10-12:30 総合討論

共同利用研究集会

「東シナ海と日本海の海水循環と生物化学過程」

"Water Circulation and Chemical-Biological Processes in East China Sea and Japan 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・日本海の生物生産には、それらの海域の流動や混合による栄養塩の流入や供給が欠かせな い。特に東シナ海からの日本海への海水・淡水・物質の流入は、日本海の生態系に大きな影響を与えて いると考えられる。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 る研究を長年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、名古屋大学や長崎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。これまでこの数年は東シナ海に焦点を当てた研究集会を行ってきたが、平成 29 年度からは東シ ナ海と日本海の両海域を含め、流動や混合などの物理環境と、生物化学過程との関係を明らかにする研 究集会を開催していくこととした。この内東シナ海に関しては、新学術領域研究「新海洋混合学」の A2-4 班の班会議と合同で行った。

出席者は、名古屋大学1名、長崎大学1名、愛媛大学2名、富山大学1名、鹿児島大学3名、東北 水研1名、石川県水産総合センター1名、富山県農林水産総合技術センター水産研究所1名、国立台 湾大学5名、および九州大学7名であった。本研究集会では、長崎大学練習船長崎丸での東シナ海観 測に関連して遠藤貴洋(九大)、吉江直樹(愛媛大)、張勁(富山大)、市川香(九大)、郭新宇(愛媛 大)から、トカラ海峡観測に関連して、仁科文子(鹿児島大)、堤英輔(九大)、長谷川大介(東北水 研)、吉江直樹(愛媛大)、小針統(鹿児島大)、張勁(富山大)、松野健(九大)、中村啓彦(鹿児島 大)から、その他に関して、武田重信(長崎大)、石坂丞二(名古屋大)、郭新宇(愛媛大)、原田浩太 朗(石川県水産総合センター)、千手智晴(九州大学)、張勁(富山大)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

研究集会は、2019年1月25日(金)から1月26日(土)にかけて、九州大学応用力学研究所で行った。

まず、長崎丸を中心とした東シナ海の観測について5名が発表した。遠藤は、東シナ海陸棚縁辺部に おいて、2017年7月に鉛直第一モード、2018年7月に鉛直第二モードの内部ソリトン波列が観測した 結果について報告した。陸棚斜面の等深線に直交する北西方向に加えて、南西・西北西方向に伝播する 波列もみられ、その速度は方向によらず、第一モードは約1.2m/s、第二モードは約0.34m/sであった。 内部ソリトンの通過に伴う鉛直変位は10~20m、水平(鉛直)流速の変動は潮汐流に匹敵する0.2(0.1) m/sに達し、最大振幅は北西に伝播する波列で観測された。波列は各伝播方向ともに約1日間隔で到来 する傾向にあり、その発生過程に日周潮の影響が示唆された。吉江は、2018年7月24,25,26日の断 面観測について報告し、24・26日は沖側、25日は沿岸側に渦があり、中層の栄養塩とクロロフィル a が増加していた。多波長励起蛍光光度計で測定した植物プランクトンでは、珪藻類(褐色藻類)の中層 での変動が大きく、表層で藍藻、亜表層で緑藻系の植物もいることが示されたが、今後検証予定である。 張は、堆積物間隙水の栄養塩分布からその水中への供給の可能性について述べた。また、2017年白鳳丸 での観測結果からセシウムが太平洋、ルソン海峡、東シナ海の中層にあるも示した。市川は、東シナ海 の内部波の SAR 観測について述べ、Seninel-1A で 2015年3月14日にきれいなデータがあり、他にも 80 画像ぐらいはあり、潮時をあわせることも可能であるかもしれないが、風の影響等があり簡単ではな いこと、3月14日は内部波以外にも長い波長や黒潮フロント域周辺でざわつきがあることを報告した。 郭は、ルソン海峡から黒潮続流域での有光層(100m)への栄養塩の流入の計算を行った。ルソン海峡で は当密度面の変化(湧昇)など、日本南岸は地形や渦での沿岸湧昇、続流域ではミアンダリングによる 渦度の保存による影響が考えられた。また、台湾東部の栄養塩の季節変化では、夏に流速が強くなり栄 養塩も高くなるが、観測とは分布が異なることを報告した。

次に、鹿児島丸でのトカラ海峡から九州東部の観測に関して8名から発表があった。仁科は2018年 11月17-25日の航海の概要について述べ、屋久島沖から室戸沖 TS では黒潮系と内側域の水がはっ きりと分かれていることを報告した。堤は、トカラ海峡での黒潮による混合の研究の現状をまとめた。 海山や海嶺等の地形と黒潮の関係で強い混合が起きており、モデルでも再現が可能であること、強い混 合は海山の1~2倍程度の距離にトラップされているものが多く、少し弱い混合は伝搬することを報告 した。長谷川は、LISST-200X での粒子計測について述べ、現状ではまだデータの吟味が必要であるこ とを報告した。吉江は、断面観測に沿った、植物プランクトン、光合成活性、栄養塩の変化について述 べ、トカラ海峡を通過した後2日ぐらいたった点で増加しているようにも見えるが、ラインによって陸 の影響などが入り込んでいるようであること、サイズとしては、ナノ・ピコプランクトンが多いことを 報告した。小針は、クロロフィル極大の下の硝酸塩フラックスのピークで採水した水の培養実験につい て述べた。栄養塩の少ない水で栄養塩供給に対して植物・動物が応答していること、ピコ・ナノ・マイ クロプランクトンいずれも増加するが、ナノプランクトンに対する摂餌圧が高く食べられていること、 それによって動物が増えているを報告した。ラグランジ観測でもトカラ以降に植物が増加し、中型・大 型動物も増加しているが、増殖しているには速すぎるため、沿岸から入ってきている可能性が指摘され た。張は、鹿児島丸 2018 年での航海での希土類の速報について述べた。鉛直混合と等密度混合が必要 であることはわかったが、どのような時間スケールで混ざるかはこの方法では難しいのではないか議論 があった。松野は、ルソン海峡から四国沖にかけての、黒潮流域における乱流混合の研究状況について まとめた。特に、地形と流れ(黒潮+潮汐)でどのように鉛直混合が起こるかを、エネルギーバランス の観点から見ていく必要性。この乱流がエネルギー減衰、栄養塩の供給、生物生産への影響など、何に どう寄与しているかを明らかにすることが大切であることを報告した。中村は、来年度からのワシント ン大学と共同研究について述べた。ワシントン大学では EX-FLOAT を 10 台平瀬に流して乱流を面的 に測定し、日本側は係留系を設置したいと考えていることを報告した。

15日には、その他の研究について報告があった。武田は、窒素固定を行なうトリコデズミウムとリケ リアに関して、東シナ海での調査した結果について述べた。2018年の長崎丸航海では後半にトリコデ ズミウムが多く、MODISのクロロフィルも19日より26日が増加していること、リケリアは珪藻と一 緒にいるため、深いところリンの比較的多いところに多く、トリコデズミウムはリンが必要でブルーム が島回りに多い可能性を報告した。石坂は、海色衛星データを利用した東シナ海黒潮フロント域とトカ ラ海峡域のクロロフィル変動観測について述べた。2018年の長崎丸観測時のひまわり8号での連続ク

91

ロロフィル画像では、長崎丸観測ラインに多くの表面クロロフィル変動が黒潮に沿って流れてきており、 長崎丸観測との対応を今後詳細に調べる必要があること、トカラ海峡にも多くのクロロフィル変動が見 られ、平瀬周辺では6月の MODIS 画像ではクロロフィルが高くなっているが、4月の SGLI データで はむしろ低くなっていることについて報告した。郭は、黒潮本流域における栄養塩輸送に関する観測デ ータとモデル結果の解析について述べ、栄養塩の輸送は第1モードは大蛇行の影響、第2モードは属流 の安定・不安定と考えらえる 10 年近いゆっくりした変動で決まっていることを報告した。原田は、石 川県沿岸の定置網における魚類相の変遷に関して主成分分析を行い、その変動要因について述べた。多 くの魚種が石川県周辺の沿岸水温変動よりも東シナ海の長期変動と関連しており、産卵場との関係や対 馬暖流との関連などの可能性があること、2017年1-3月は史上最低の大不漁であったこと、3月4日・ 5日に富山湾研究会「富山湾の不漁の原因を探る(仮)」が開催されることが報告された。千手は、以前 行った伊豆小笠原海嶺付近の深層循環の西岸境界流に関する回転水槽実験に関して、地形が日本海に似 ていることから、日本海の深層循環との比較を行った結果を報告した。張は、WESTPAC の GG06 (PEACE)について述べ、2019年5月20-21日にソウル大学で会合が行われること、2020年からの第 2期には黒潮グループとの連携する可能性があることを報告した。

すべての発表ののちに、総合討論を行った。遠藤を中心に、名古屋大学宇宙地球環境研究所の共同利 用・共同研究での研究集会に応募し、7月に予定している新長崎丸での航海の計画を詰めることとなっ た。また、来年度の九州大学応用力学研究所の共同利用・共同研究での研究集会は、東シナ海・日本海 にとどまらず、広く東アジア縁辺海を対象とすることとなった。

九州大学応用力学研究所 共同利用研究集会 「東シナ海と日本海の海水循環と生物化学過程」

場所:九州大学 応用力学研究所

日時:2019年1月25日 09:30~17:30 大会議室(本館2F、玄関ロビーの上)

1月26日09:30~12:30 3階301講義室

プログラム

1月25日(金)

- 1. 長崎丸の観測(09:30~12:00)
 - (1) 遠藤貴洋(九大): 東シナ海陸棚縁辺部でのこれまでの観測結果(物理)
 - (2) 吉江直樹 (愛媛大): 東シナ海陸棚縁辺部でのこれまでの観測結果(化学・生物)
 - (3) 張勁(富山大): 東シナ海陸棚縁辺部でのこれまでの観測結果(化学)
 - (4) 市川香(九大): 東シナ海や南シナ海の観測海域の過去の SAR 画像解析
 - (5) 郭新宇 (愛媛大): 台湾東部海域の栄養塩濃度の季節変化
- 2.6月と11月のトカラ海峡観測(13:00~17:30)
 - (1) 仁科文子(鹿児島大):かごしま丸航海の概要と海洋構造
 - (2) 堤英輔(九大):トカラ海峡におけるこれまでの乱流観測とその取りまとめに向けて
 - (3) 長谷川大介 (東北水研): KG1815 における LISST-200X による粒子観測について
 - (4) 吉江直樹 (愛媛大): トカラ海峡から四国南岸にかけての栄養塩および植物群集組成の変遷
 - (5)小針統(鹿児島大):薩南海域に特異的な海洋混合に対するプランクトン群集の応答:

培養実験およびラグランジュ海洋観測による評価

- (6) 張勁(富山大): かごしま丸 KG1815 航海の速報: 水塊混合について
- (7) 松野健(九大):黒潮流域における乱流混合:ルソン海峡から四国沖まで
- (8) 中村啓彦(鹿児島大): 来年度の UW とのかごしま丸の観測計画
- (9) 総合討論

1月26日(土)

 $09:30 \sim 12:30$

- (1) 武田重信ほか(長崎大):東部東シナ海における窒素固定藻類の分布と環境要因の関わり
- (2) 石坂丞二(名古屋大):「しきさい」で見た黒潮
- (3) 郭新宇 (愛媛大):黒潮本流域における栄養塩輸送に関する観測データとモデル結果の解析
- (4) 原田浩太朗(石川総水セ):石川県沿岸の定置網における魚類相の変遷とその要因
- (5) 千手智晴(九大):日本海の深層循環に関する一考察:回転水槽実験からの示唆
- (6) 張勁(富山大): WESTPAC WG06の活動報告と関連情報の紹介

総合討論

「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、2018 年 8 月 2 日から 3 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 4 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 12 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、講演時間を大幅に 超過することもあった。

今回も、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、太平洋沿岸に関する発表が6題、日本海に関する発表が5題、日本 周辺全体を対象とした発表が1題だった。沿岸で起きる短期的な環境変動に代 表される、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。高知県では、水産試験研究機関の担当者が精力的に流動等 のモニタリングを展開し、大量のデータから問題となっている現象を数多く抽 出した一方、その研究とリンクするようなモデル研究結果の発表もあり、これ まで未解明だった紀伊水道~高知県沿岸の急潮の研究が大きく進む期待が持て る会合となった。その他にも、急潮に限らず、沿岸の海洋環境を大きく変える 暖水波及や、駿河湾、富山湾、若狭湾等における海水循環、渦形成に関する研 究発表がなされ、今後の発展が期待された。また、本会合では、短周変動に限 らず、海洋環境の平均場や経年変動に関する発表、議論もなされ、急潮等の極 端現象を議論する上でのそれらの重要性が認識された。

総合討論では、これまで、急潮被害という認識に乏しかった長崎県からの、 急潮被害の報告があり、急潮被害に関する定置網漁業者への啓蒙をどう行うか、 また長崎県における今後の急潮研究の端緒を開くための議論が行われた。これ らの議論に基づき、参加者同士の懇親を深め、水産を背景にする研究者と海洋 物理をバックグラウンドにする研究者の相互理解が進んだ。今後も、生物、水 産系にも積極的に間口を広げ、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。 プログラム

月2日(木) 13:30~13:40 趣旨説明

13:40~14:05

高知県内における 2017 年から 2018 年にかけての急潮発生経過 猪原 亮(高知水試)

14:05~14:30

高知県東岸の急潮

〇寄高博行(高知大黒潮圏/農林海洋)・猪原亮(高知水試)

14:30~14:55

SET0 システムを用いた高知県沿岸での急潮事例の調査 坂元 賢治(大阪管区気象台)

14:55~15:05

休憩

15:05~15:30

日本周辺海域をターゲットとした海洋過去将来予測・ダウンスケーリングデータセットの構築 〇西川史朗(海洋研究開発機構)・ 若松剛(Nansen Environmental and Remote Sensing Center)・ 石川洋一(海洋研究開発機構)・ 石崎廣(海洋研究開発機構)・ 田中裕介(海洋研究開発機構)・ 坂 本圭(気象研究所)・ 辻野博之(気象研究所)

-8

15:30~15:55

駿河湾フェリー搭載 ADCP を用いた長期流動観測 -湾奥海域の顕著な季節変動-〇勝間田高明(東海大学・NPO 法人 海洋環境保全協会)・仁木将人(東海大学)・田中昭彦(東海大 学)・髙嶋恭子(東海大学)・杉本隆成(東京大学名誉教授)・丹佑之(東海大学・一般社団法人 無 人機研究開発機構)

15:55~16:20

日本南岸沿岸域に影響を与える黒潮からの暖水波及の観測と発生機構の推定 〇清水勇吾(水研機構中央水研)・伊藤大樹(水研機構中央水研)・安倍大介(水研機構中央水研)・ 岡崎誠(水研機構国際水研)

16:20~16:45

豊後水道の底入り潮

〇森本昭彦・浅原貫太・前谷佳奈(愛媛大)・滝川哲太郎(長崎大)

8月3日(金)

9:15~9:40

台風が対馬海峡へ連行してきた高潮位に起因する山陰沿岸の急潮 〇伊藤雅・井桁庸介(水研機構日水研)

9:40~10:05

富山湾周辺海域の海洋環境の経年変動パターン 〇小塚 晃 (富山水研)・千手知晴(九州大学応力研)

10:05~10:30

2017年の富山湾奥の沿岸流と沖合の流動場の関係について 〇福留研一(富山高専),千葉元(大島商船高専),金山恵美(富山高専)

10:30~10:40

休憩

10:40~11:05

若狭湾環流形成と丹後半島への対馬暖流接岸との関係 〇井桁庸介(水研機構日水研)・兼田淳史(福井県大)・伊藤雅(水研機構日水研)・福留研ー(富山 高専)・熊木豊(京都府海洋センター)・鮎川航太(福井県庁)

11:05~11:30

若狭湾における ADCP 搭載ブイの反射強度データの利用に向けた取り組み 〇兼田淳史(福井県大)・桂田慶裕(福井県水試)

11:30~11:45 総合討論 (研究集会)

地球流体における波動と対流現象の力学

研究代表者

伊賀 啓太(東京大学 大気海洋研究所)

研究集会の目的

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

研究集会の日時・場所

日 時: 2019年3月7日(木)~3月8日(金)

会 場: 九州大学筑紫キャンパス 応用力学研究所 本館6階 多目的研究交流室(W601)

研究集会の概要

本集会は応用力学研究所と東京大学大気海洋研究所の間で交互に開催される研究集会であり、今回 は20回目にあたる。

発表内容は大別して、地球流体力学に関し回転成層流体の室内実験や理論的研究、地球大気海洋に 関して、数値モデリングの改善や諸現象の力学的理解、惑星大気に関し金星や木星大気についての発 表があった。発表は15件あり、30名の参加者があった。学部学生から名誉教授の発表まであり、 情報交換や教育の場として重要な機会であった。これまで九大で世話人を努めてこられた和方教授が 今年度定年退職を迎えられることになるが、この貴重な研究集会が今後とも引き継がれることが望ま れる。

室内実験では、回転した水槽内の流体運動に関する議論があった。その一つは、海底深層流を模し た実験で、水槽中に設置した部分的な仕切りにより流れの流動特性がどの様に変わるかの報告があっ た。また、高速で回転した水槽中に形成される軸対称流れの循環に関し理論解を導出し、さらにその 流れ場の中に発生する不安定波動の線形安定解析についての報告があった。地球大気の研究では、台 風に関連した2件の発表があった。台風の周りで波数2程度の強風域が台風の目の周りを旋回する現 象が報告され、その観測データの解析と、数値モデルによる再現、エネルギー解析の報告があった。 もう一件は、LESによる数値シミュレーションより、台風下層に2種類のロール状の風分布が存在す ることを示し、エクマン境界層解による鉛直シアー風の線形固有値問題から、その発生維持機構を議 論した発表があった。

大気の局地循環に関し、ゲリラ豪雨の同化実験について報告があった。その予報には、時間的に非 常に密な観測が必要であり、30分程度の間隔でのデータ同化の必要性が指摘された。その際、雷の データも取り入れる事により雲中の霰分布の改善に役立つとの興味ある発表があった。この雷と荷電 の発生域の違いをどの様に考慮したら良いか議論があった。また日本海の海面水温の局地気象への影 響について報告があり、日本海の海水温の重要性が指摘された。またブロッキング高気圧の小規模渦 の選択的吸収と予報可能性の関連に関する報告があった。次に対流圏の気象状況の再現性に関し、成 層圏の影響に関する報告があった。気象数値モデルの上端境界を高くした(成層圏の計算精度をあげ た)場合と低くした場合では対流圏の降雨にも変化があり、上端境界を高くした場合北極圏の極夜ジ ェットの再現性が大きく改善されることが報告され、気象予報の向上には、成層圏を正確に計算する 必要性の提言があった。 海洋循環に関し、3層海洋モデルを風応力で駆動した際、海底に海山がある場合、その影響域がロ スビー波として西方に伝わり西岸境界流へ影響するとの報告があった。その海山の水平スケールに依 存する波動の群速度の違いにより、東方への伝播の可能性がないかなどの議論があった。

惑星大気では、金星スーパーローテーションの再現性に関する議論があり、鉛直渦粘性係数が大きい場合、スーパーローテーションの再現が難しいとの報告があった。また、金星には対称不安定の存 在が可能ではないかとの指摘があった。最後に、木星大気についての話題もあり、アンモニア密度が 増加した場合、湿潤対流が禁止される仕組みについての発表があった。

講演プログラム

3月7日(木)

- 12:50-13:00 代表者挨拶 伊賀 啓太(東大 AORI)
- 13:00-13:25 河田 裕貴(東大 AORI),伊賀 啓太(東大 AORI),横田 祥(気象研究所), 栃本 英伍(東大 AORI) 台風の内部コア領域に見られる非軸対称構造に関する観測的・数値的研究
- 13:25-13:50 寺西 修二(京都産業大),高谷 康太郎(京都産業大) 位相依存性のない pseudomomentum の新たな定義について
- 13:50-14:15 千手 智晴(九大・応研),吉田 次郎(東京海洋大)
 回転水槽実験による Stommel-Arons 型深層循環に対する鉛直壁の効果の検討
 :日本海深層流分布の解釈への応用
- 14:15-14:40 野口 尚史,小山 志穂里,松野 友樹(京大・工) 乱流により駆動される粒子群の流動
- 14:40-15:00 Break
- 15:00-16:30 和方吉信教授 最終講義 大気海洋力学の研究を振り返って

場所:九州大学筑紫キャンパス 事務棟(共通管理棟)3F 大会議室

19:00-21:00 **退職記念祝賀会**

3月8日(金)

- 9:00-9:25 伊藤 純至(東大 AORI),伊賀 啓太(東大 AORI),新野 宏(東大 AORI) エクマン層とLES で再現した台風境界層の不安定解析
- 9:25-9:50 伊賀 啓太(東大 AORI) 円筒水槽内の回転する底面上の軸対称流の波の共鳴
- 9:50-10:15 加瀬 有理(富山大·理),松浦知徳(富山大) 強流域に与える海底地形(海山・海嶺)の影響と中規模擾乱の発生
- 10:15-10:35 Break

- 10:35-11:00 前島 康光(理研), 牛尾 知雄(首都大), 三好 建正(理研) ゲリラ豪雨予報高度化に向けた高頻度・高解像度データ同化実験
- 11:00-11:25 飯塚 聡(防災科研) 海面水温の誤差バイアスが豪雨に及ぼす影響
- 11:25-11:50 山崎 哲 (AMSTEC) 2010 年夏ブロッキングの持続と予測におけるのストームトラックの寄与
- 11:50-12:15 河谷 芳雄(JAMSTEC), Kevin Hamilton(Univ. Hawaii), Lesley Gray(Univ. Oxford), Scott Osprey(Univ. Oxford), 渡辺 真吾(JAMSTEC), 山下 陽介(JAMSTEC) 成層圏が対流圏循環に及ぼす影響:MIROC-AGCM モデルを用いた考察
- 12:15-13:20 Lunch
- 13:20-13:45 松田 佳久(学芸大) 金星の大気大循環再考
- 13:45-14:10 杉本 憲彦(慶大),高木 征弘(京産大),松田 佳久(学芸大) 東西平均加熱による高速な金星スーパーローテーションの発生
- 14:10-14:35 高木 征弘(京産大·理),杉本 憲彦(慶大),樫村 博基 (CPS/神戸大), 安藤 紘基 (京産大),松田 佳久(学芸大) 金星大気における対称不安定の可能性
- 14:35-15:00 中島 健介(九大・理), 福之上 嘉刀(九大・理) 木星型惑星における湿潤対流の禁止条件について

発表15件、参加者30名
海洋・海岸等における波動の解析モデルの比較

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、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、研究の更なる発展を目指し、様々な視点から海洋・海岸等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年度より、応用力学研究所共同利用研究集会を開催している.研究集会では、質疑応答が大変活発に行なわれ、本研究集会の重要性が、参加者によって益々強く認識されている.そこで、平成30年度には、応用力学研究所共同利用研究集会として、波動モデルに関する最新の研究成果を踏まえ、各分野における波動現象に対して開発されてきたモデルを比較検討し、議論を行なうことを目的とした.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.

また、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す.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ている研究者、そして、応用物理学者並びに数学者を迎え入れ、 多様な角度から流体の波動問題に関して議論を行なう.

以上のように、本研究集会は、海洋・海岸等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により問題意識を共有 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アを生み出す場とす る.こうした目的に照らせば、本研究集会は、共同利用研究拠点である応用力学研究所での開 催が相応しいと考えられる.

研究集会の内容

本研究集会は、2018年12月15日(土)14:00~16日(日)12:20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は、土木学 会海岸工学委員会波動モデル研究会のメンバであり、主催を土木学会海岸工学委員会波動モデ ル研究会としたが、本研究会のメンバは、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.こうした分野横断的な活動を進めるにあたり、本研 究集会の継続的な開催は、大きな意味を有している.参加者数は、両日とも、10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.

まず,第1日の第1セッションにおいて,津波の数値解析に関する2件の口頭発表及び質疑応答が行なわれた.すなわち,全球津波伝播解析 Python モジュールの構築と,分裂を示す河川 津波の数値解析に関する発表がなされた.

次に,第2セッションでは,沿岸域における流体運動の数値解析に焦点が当てられ,2件の 口頭発表及び質疑応答が行なわれた.すなわち,没水堤周辺での不規則波の波高及び周期の変 化とその再現計算と,超巨大台風による伊勢湾湾奥部における高潮浸水解析に関して発表された.

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

100

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3セッションでは,波・流れの解析モデルに関して議論された.すなわち,渦層モデルを用いた自由境界流れの解析と,磯部-柿沼モデルの数学解析に関する,2件の口頭発表及び質疑応答が行なわれた.

更に、第4セッションでは、波動モデルの新展開に関して2件の口頭発表及び質疑応答があった. すなわち、KdV-Burgers 方程式の格子ボルツマン法による数値計算(第2報:新しい定式化と計算結果)と、多層波動方程式の固有関数系グリーン関数の多段ステップ散乱問題への適用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・海岸等における波動の解析モデルの比較」

- 日 時 2018年12月15日(土)14:00~16日(日)12:50
- 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 波動モデル研究会

2018年12月15日(土)

開会の挨拶(14:00~14:10)

柿沼太郎(土木学会海岸工学委員会波動モデル研究会主査)

第1セッション ー津波の数値解析ー (座長: 辻)

「全球津波伝播解析 Python モジュールの構築」(14:10~14:40)

新谷哲也(首都大学東京·都市環境学部)

沿岸の小領域から全球に至るまでのスケーラブルな津波伝播解析を目的として,重心ボロノ イ図と TRiSK スキームに基づく非線形長波シミュレーターを開発した.シミュレーターは Python によって制御可能であり,既存の解析解との整合性の確認,及び津波伝播解析のテスト 計算の実施を行うことができた.

「分裂を示す河川津波の数値解析」(14:40~15:10)

柿沼太郎(鹿児島大学学術研究院·理工学域)

河川を遡上する津波が有する基礎的な特性を把握することを目的として、3次元数値解析を 行なった.河川幅及び静水深が一定の単断面河川においても、ソリトン分裂の発生に伴い、津 波の伝播につれて津波高さが増加する場合があった.また、複断面河川において、位相速度に 河川横断方向の成分を有する津波を確認した.

休憩

101

第2セッション -沿岸域における流体運動の数値解析-(座長:新谷)

「没水堤周辺での不規則波の波高及び周期の変化とその再現計算」(15:20~15:50)

平山克也(港湾空港技術研究所・海洋研究領域)

暫定利用する港湾の安全性や更なる被災リスクを評価するために,被災し水没した防波堤に 残存する防波性能を把握する断面模型実験及びブシネスクモデルによる再現計算を実施した. その結果,成分波間の非線形干渉により不規則波が短周期化する条件を見出し,不透過潜堤は, 特にうねりによる荷役障害が懸念される離島港湾では新たな静穏度対策となり得ること等を示 した.一方,透過潜堤では波の分裂に比べ抵抗による減衰が卓越した.

「超巨大台風による伊勢湾湾奥部における高潮浸水解析」(15:50~16:20)

川崎浩司(ハイドロ総合技術研究所)

昨今,地球温暖化に伴う海面上昇と台風の強大化が懸念されている.したがって,1959年の 伊勢湾台風を上回る巨大台風が及ぼす影響について検討することは重要である.本研究では, 伊勢湾湾奥部を対象に,室戸台風級の超巨大台風時,および現在/将来気候から予想される最 大高潮条件における高潮浸水計算を行い,超巨大台風による浸水特性について議論した.

懇親会

2018年12月16日(日)

第3セッション 一波・流れの解析モデルー (座長:金山)

「渦層モデルを用いた自由境界流れの解析」(10:00~10:30)

松岡千博(大阪市立大学大学院・工学研究科)

界面と水上あるいは水中にあるバルク渦との相互作用が渦層モデルと点渦近似を用いて計算 された.その結果,バルク渦はその渦度が小さくても,界面に大きな影響を与え,安定な界面 を大変形させてケルビン・ヘルムホルツのような不安定性を引き起こすことが確かめられた.

「磯部-柿沼モデルの数学解析」(10:30~11:00)

井口達雄(慶應義塾大学・理工学部)

水の波の基礎方程式系に対する変分構造を利用して導出される磯部 - 柿沼モデルについて数 学解析を行い,波高水深比の小ささを仮定しない強非線形波に対しても成立する高次浅水波近 似モデルになっていること,更に,これまでに知られている高次浅水波モデルよりも多くの点 で優位なモデルであることを報告した.

休憩

第4セッション - 波動モデルの新展開- (座長: 松岡)

「KdV-Burgers 方程式の格子ボルツマン法による数値計算(第2報:新しい定式化と計算結果)」 (11:10~11:40) 辻 英一(九州大学・応用力学研究所)

非線形分散波動方程式である KdV-Burgers 方程式に関して,格子ボルツマン法を用いた,ある数値計算法を提案する. Burgers 方程式を解くのに有効であった Entropic LBM を用いて近似的に定式化し,先行研究と比較する.

「多層波動方程式の固有関数系グリーン関数の多段ステップ散乱問題への適用」(11:40~12:10)

金山 進(日本大学・工学部)

多層波動方程式の線形分散関係式から導かれる固有関数系を用いて離散化を伴うことなく波 動流速場の解析を行うことができる.昨年度はグリーン関数の概念を導入することによって解 析の際に扱われる代数方程式を系統的,効率的に解く手法を示したが,本研究においては境界 が領域の両端に置いて与えられる場合にも拡張し,複数領域を対象とした境界値問題,すなわ ち多段地形における散乱問題への適用方法を紹介した.

総括及び今後の活動・展望等に関する議論(12:10~12:40)

柿沼太郎

閉会挨拶(12:40~12:50)

辻 英一(九州大学応用力学研究所共同利用研究集会世話人)

「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

富山高等専門学校商船学科 福留研一

2018 年 12 月 13 日から 12 月 14 日にかけて,九州大学筑紫キャンパスにおいて,応用 力学研究所共同利用研究集会「日本周辺海域の海況モニタリングと波浪計測に関する研究 集会」が開催された.本研究集会は、1998 年度の「対馬・津軽海峡の海況モニタリングと 日本海の波浪計測に関する研究集会」に始まり、3 回の研究集会名の変更を経て、2009 年 度よりは「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」と して開催されてきた.21 回目を迎えた今年度は、より対象海域を広げる意図でタイトルを 「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」と変更し、日本周辺海 域に関する最新の海況モニタリングと波浪計測結果はもちろん、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広く募集した.

今年度の研究集会には、大学および試験・研究・開発機関を中心に、現場観測に携わっ ている多くの方々にも継続してご参加頂いて、40名の参加者と13題の講演があった.対 象とする海域を広げたことで,講演では日本周辺海域を対象とした高解像度の気候変動予 測データセット作成の取り組みや波浪再解析データの検証,日本沿岸の太平洋側における 波浪モニタリングとモデリング、沖合津波の流れの計測と即時予測といった海域を日本海 に限らない最新の成果が報告された.加えてグライダーやロボットといった新しい手法を 用いたモニタリングと海況予測への取り組み、新しい海況計測機器を用いた旧計測機器デ ータの検証、水産資源や生物環境への影響を理解・予測して情報提供することまで視野に 入れた海況モニタリングの報告もあった. さらには、本研究集会の開催のきっかけともな った対馬海峡の海況モニタリングに関する再解析結果や、東シナ海における長期の水塊構 造の変動、海象と気象の相互作用についても成果が報告されるなど、幅広い海域における 様々な角度からの現場観測,力学研究,数値シミュレーションに関する研究発表と活発な 議論が行われた.今後とも,日本周辺海域の海況・波浪の研究に携わる研究者・関係者が 一堂に会する集会となり、活発な議論と情報交換の場と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 話して頂いた広瀬直毅教授をはじめとする諸氏に感謝する.

「日本周辺海域の海況モニタリングと波浪計測に関する研究集会」 日程: 平成 30 年 12 月 13 日 (木) 午後~14 日 (金) 午前 *13 日の夜、懇親会を行います

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 (<u>http://www.kyushu-u.ac.jp/access/map/chikushi/chikushi.html</u>)

研究代表者: 福留研一(富山高専) 所内世話人: 広瀬直毅(九大応力研)

-----12月13日(木)------13:50-14:00 趣旨説明

14:00-14:25 日本周辺海域の気候変動に関する将来予測 西川史朗・石川洋一(JAMSTEC)、若松剛(NERSC)

14:25-14:50 日本周辺海域の漂流波浪ブイデータによる再解析データの検証 久木幸治(琉球大理)

14:50-15:15 岩手県大槌湾の波浪モニタリングとモデリング 藤井孝樹・小松幸生(東大院新領域/大気海洋研)、田中 潔(大気海洋研)

15:15-15:40 船舶の航行(AIS)データによる沖合津波の流れの計測と即時予測への利用 稲津大祐(東京海洋大)

15:40-15:55 休憩

15:55-16:20

水産研究・教育機構における海洋モニタリングと海況予測への水中グライダー利用の取り組み 清水勇吾(水研機構中央水研)、奥西 武・筧 茂穂・長谷川大介(水研機構東北水研)、和川 拓・井桁庸介・本多 直人・久賀みづき(水研機構日水研)、瀬藤 聡・赤松友成(水研機構中央水研)、黒田 寛(水研機構北水研)、 伊藤進一(大気海洋研)

16:20-16:45 四胴ロボット船による七尾西湾の観測 原田浩太朗(石川水総セ)

16:45-17:10 ローター式流速計と超音波ドップラー流速計の比較実験 千手智晴(九大応力研)

17:10-17:30 情報交換

-----12月14日(金)----- 09:00-09:25
 宮崎県の沿岸資源変動における豊後水道の重要性
 渡慶次力・中西健二・外山寛隆(宮崎水試)

09:25-09:50 九州西方沿岸域における気象津波の発生・増幅機構 105 福澤克俊・日比谷紀之(東大院理)

09:50-10:15 初夏の黒潮上における深い対流発生時の環境場 万田敦昌(三重大学生物資源科学部)

10:15-10:25 休憩

10:25-10:50 対馬海峡水温の日周変動に対する大気応答 趙 寧・劉 天然・広瀬直毅(九大応力研)、岩崎慎介(寒地土木研)

10:50-11:15 対馬海峡通過流量の再推定 内海勇哉(九大総理工)、髙山勝巳・広瀬直毅(九大応力研)

11:15-11:40

気象庁東シナ海 PN 線にみられる長期変化・十年規模変動 ~長期再解析データの整備~ 小嶋 惇・村上 潔・中野俊也(気象庁 地球環境・海洋部)

11:40-12:10 総合討論

直線磁化プラズマにおける乱流構造の解析

九州大学 基幹教育院 山田 琢磨

プラズマ乱流中に発生するメゾスケール構造の一種であるストリーマー構造について、その媒介 波と搬送波の非線形結合を解析した。従来までの方法では、時間方向と周方向の2次元計測によっ てまず揺動を周方向モード数に分解し、各モード数がマッチング条件を満たす組み合わせを抽出し てから周波数方向のバイスペクトル解析を行っていたが、本研究ではある時刻でのタイムスライス を抜き出し、周方向のバイスペクトル解析を行った。結果、従来では分からなかった周方向モード 数内での非線形結合の詳細が明らかになり、周方向モード数の組み合わせによってはストリーマー 構造の形成に寄与しないような成分があることが判明した。

1. 目的

ストリーマーはゾーナルフローと同様に、プラズマ乱流中のミクロスケール構造であるドリフト波が 非線形結合することで発生するメゾスケール構造であり、その存在は径方向輸送に大きな影響を与える ため、発生機構や制御・抑制を研究することは核融合プラズマの輸送を理解するうえで非常に重要であ 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のような直線プラズマはトロイダルプラ ズマに比べて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点において有利 である。LMD-U ではその利点を活かし、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。計測は周方向静電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、また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 がこれまでの解析方法では、時間方向と周方向の2次元計測を行った後、揺動を周方向のフーリエ変換 によって周方向モード数に分解し、各モード数がマッチング条件を満たす組み合わせはその周方向モー ド間に非線形結合が当然あるものとみなして抽出し、周波数方向でのバイスペクトル解析のみを行って いた。そこで本研究では逆に、ある時刻でのタイムスライスを抽出し、その中での周方向モード数間の 非線形結合を詳細に調べるために周方向のバイスペクトル解析を行った。一例として、媒介波とストリ ーマー構造の包絡線の位相差をバイフェーズ解析により求めた。

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、静電プローブアレーでイオン飽和 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)を観測し、両者の間に存在する非線形結合を明らかに 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、半径 *r* = 40 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。 このプローブにより揺動を時間方向と周方向に詳細に観測し、特に精度の良い乱流の周方向モード数を 観測することを可能にした。ストリーマー構造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い、バイフェーズを計算すればよい。この時、 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。本研究では周方向 での非線形結合を確認するため、ある時刻でのタイムスライスを抜き出し、周方向空間での各モード数 間のバイフェーズを計算する。隣り合うタイムスライスではバイフェーズの計算結果がほぼ似通ったも のになるため、十分に時刻が離れたタイムスライスをいくつも抜き出し、その平均を取ることでバイフ ェーズの計算結果とした。

3. 実験結果と考察

LMD-U のストリーマー発生放電(磁 場 0.09 T、圧力 1.5 mTorr) で周方向 64 チャンネルプローブにより電子密度揺 動を測定し、ストリーマーの包絡線構造、 媒介波、搬送波を観測した。媒介波は周 方向モード数 *m*₁=1, *f*₁=-1.2 kHz で、最 も振幅の大きく媒介波との結合が強い 搬送波は、m₂=2, f₂=7.8 kHzの波と m₃= 3, f3 = 6.6 kHz の波であった。図1は密度 揺動のタイムスライスを抜き出し、周方 向モード数 (1, m, m+1) 間のバイフェ ーズ値を計算したものである。初めの1 は媒介波の周方向モード数を示し、mと m + 1 は隣り合う周方向モード数を持 つ媒介波である。結果は、(1, 1, 2)の 結合のバイフェーズ値のみ他の結合と 大きく異なる値となり、他の結合はバイ フェーズ値がほぼ変わらなかった。

この結果の妥当性を確認するために、 実際に密度揺動の時空間構造から媒介 波成分を消去し、隣り合う周方向モード



図 1. 媒介波と搬送波間のバイフェーズの値、すなわち媒介 波とストリーマー構造の包絡線との位相差。横軸が m の場 合、媒介波(周方向モード数 1)と、搬送波(周方向モー ド数 m および m + 1)間のバイフェーズ値を示す。(1,1,2) の結合のバイフェーズ値のみ、他のバイフェーズ値と離れ た値を持つことが分かった。

数のみを抜き出して重ね合わせたところ、*m*=1 & 2 以外の重ね合わせの結果は媒介波の山の位置にほ ぼ揺動が収束して存在しストリーマー構造を形作っていることが確認できたが、*m*=1 & 2 を重ね合わ せた場合は、揺動の収束する位置が他と全く異なり、ストリーマー構造の形成に全く貢献していないこ とが分かった。今後、この現象の詳細をさらに解析することで本研究を発展させる。

4. 研究成果報告

- [1] 山田琢磨, "閉じ込めを左右するメゾスケール構造~乱流内の非線形結合~", 東京大学 先端電力エネルギー・環境技術教育研究センター(APET)特別講演会 (Aug 27, 2018).
- [2] 山田琢磨他, "PANTA における乱流の三次元構造", 日本物理学会 2018 年秋季大会, 11aC101-2, 同志 社大学 (Sep 9-12, 2018).

[3] T. Yamada *et al.*, "Three Dimensional Structure of Streamer in Drift Wave Fluctuations (Invited Talk)", 2nd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics, CD-I20, Kanazawa (Nov 12-17, 2018).

5. 研究組織

<u>研究代表者</u>:山田琢磨(九大) <u>研究協力者</u>:稲垣滋、佐々木真(九大)、小林達哉(核融合研)

流体波動の局所分離解析に関する研究

九州大学応用力学研究所 大貫陽平

大気海洋(一般に地球流体)中の波動は、エネルギーおよび運動量のキャリアとして、惑星 規模の物質循環の駆動に深く関わっている。計算機の発達に伴い、地球流体システムの再現 を目的とした数値シミュレーションの精度は年々向上しており、そこから生み出される膨 大なデータから各種波動成分の伝搬情報(フラックス)を解析して循環場へ与える影響を検 証する作業が、世界中の研究グループによって進められている。既往研究においては、慣性 重力波およびロスビー波をひとまとめにしてフラックスを解析する手法が提案されて来た (例: Kinoshita et al. 2013, J. Atmos. Sci., Aiki et al. 2017, Prog. Earth Planet. Sci.)が、地球 流体システムのさらなる理解のためには、異なる種別の波動成分を分離して解析する手法 の開発が望まれている。そこで代表者はこれまで、量子力学や音響学の分野で利用されてい る Wigner 変換の手法を導入することで、地球流体における新しい波動分離解析技術の開発 を進めて来た。

興味深いことに、地球流体力学とプラズマ物理学には様々な類似性がある。例えば、地球 自転に伴う渦度の南北勾配を復元力としたロスビー波は、プラズマ中に存在するドリフト 波と共通の方程式によって記述でき、そのため同一の分散関係を持つ。さらに、時間スケー ルの異なる波動成分が共存し、相互にエネルギーをやり取りする過程が大きな関心を持っ て研究されている。これらのことから、地球流体波動を対象とした解析手法が、プラズマ波 動にも応用できる可能性が期待される。そこで本研究では、地球科学と核融合科学の分野融 合課題として、流体波動に普遍的に適用可能な波動の局所分離解析理論とそれを用いたデ ータマイニング技術について検討を行った。

理論の概要と数値データへの適用

一般に、流体波動は放物型の偏微分方程式によって記述され、特に時間定常解からのわず かなずれについて線形化された方程式を用いて議論されることが多い。初等的には、方程式 の係数が空間に依存しなければ、フーリエ変換と行列の対角化作業を組み合わせることで 系に含まれる各種波動成分を固有モードとして分離することができる。しかし、空間的に変 動する場においては、媒質の振動方向を規定する固有ベクトルや周波数が波数と位置座標 の関数として変化するため、通常のフーリエ変換の方法を当てはめることができない。

本研究では、方程式の係数作用素を、Wigner 変換によって擬微分作用素の形式へ書き換 えてから漸近解析を行うことで、従来のフーリエ変換の方法を拡張して流体波動の分離解 析が可能なことを理論的に示した。分離によって得られた各種成分の信号から Wigner 分布 関数を定義することで、エネルギー密度の時間変化が radiative transfer equation:

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \nabla_p \omega \cdot \nabla_x w - \nabla_x \omega \cdot \nabla_p w = S$$

によって記述できることを提案し、一連の手法を海洋波動の数値シミュレーションデータ に当てはめることで、慣性重力波とロスビー波を明瞭に分離することに成功した(図1)。こ の成果は現在学術誌に投稿中である。

背景



図 1: モデルデータから分離したロスビー波の信号、エネルギー密度およびフラックス.

検討内容

所内の研究セミナーおよび報告会で、核融合プラズマ分野の研究者に向け、前節で述べた Wigner 変換を用いた波動分離解析技術についての研究報告を行った。その中で、大気海洋 分野で radiative transfer equation として認識されている理論モデルが、核融合分野では wave kinetic equation と呼ばれ、その利用法に著しい類似性があるという情報を得た。

報告会終了後、プラズマ波動の wave kinetic equation に詳しい佐々木真氏と個別に研究 打ち合わせを行い、複数種の不安定モードが共存する系への本研究手法の適用可能性につ いて議論した。具体的には、Sasaki et al. (2017, Phys. Plasmas)によって考察の対象となっ ていたシア流中プラズマの乱流生成過程において、ドリフト波と D'Angelo モードの分離お よび wave kinetic equation の立式に Winger 変換の利用が有効ではないかという結論に達 した。ただし、この系は複数種の不安定モードが縮退するという特殊な状況をはらんでお り、Wigner 分布関数の非対角成分の評価という、新たな課題が立ち上がっている。次年度 は、背景密度勾配や流速シアを伴うプラズマ中の不安定波動の解析を中心テーマに位置付 け、特に背景流成分が乱流成分から受けるレイノルズ応力の評価に関して、本解析手法の有 効性についての検討を重ねていく予定である。

研究組織: 大貫陽平, 稲垣滋, 小菅佑輔, 佐々木真(九大応力研)

成果報告: <u>大貫陽平</u>,「流体波動の局所分離解析に関する研究」,応用力学研究所研究集会 "波・流れ・乱流のセンシング・マイニング・モデリング",2019/2.

九州大学 応用力学研究所 2018年度共同利用研究 成果報告書

サブテーマ研究代表者: 横井 喜充(よこい のぶみつ) 東京大学 生産技術研究所 基礎系部門 助教

課題:

乱流輸送の促進と抑制機構の理論・実験的解明:ヘリシティ効果

Theoretical and experimental explorations of turbulent transport enhancement and suppression, with special emphasis on effects of helicities

要旨:

輸送促進と抑制のダイナミクスに基づいて統一的な非一様プラズマの乱流輸送モデルを理 論的に構築し,諸ヘリシティの計測を含む実験によって検証し発展させた.

序論:

乱れが存在すると一般に系の輸送が大きく促進する(渦粘性,渦拡散,乱流磁気拡散など).しかし,系の幾何構造・回転,密度変動,不均一流れ,大規模磁場などを伴う現実の 乱流では,対称性の破れによって系統的にエネルギー以外の乱流統計量(運動・磁気・クロ スなどの諸へリシティ)が生成される.それらの効果で輸送が抑制され,乱れによる輸送促 進と輸送抑制のダイナミクスが系の発展を支配する.

サブテーマ研究代表者(横井)は、促進と抑制のダイナミクスに基づく乱流輸送モデルを 提唱してきた.その発展には、プラズマ中の諸ヘリシティの実験的計測による検証・議論が 不可欠である.応用力学研究所のPANTAをはじめとする実験装置は、プラズマ中のマクロ な流れ・波動とヘリシティを含む乱流相関の時空発展の同時計測を可能とする.輸送促進と 抑制のダイナミクスに基づく非一様乱流の統一的乱流輸送モデルの研究を理論と実験の両面 から強力に推進していく.

方法:

横井の理論モデルに基づき,輸送と直結するゆらぎ場の相関の時空分布と平均場の非一様 性とを同時に測定する.ゆらぎ相関としては,ゆらぎ強度の情報である,密度,速度,温度 の自己相関に加えて,ゆらぎ構造の情報である諸ヘリシティ[運動ヘリシティ(速度=渦度 相関),磁気ヘリシティ(磁場=電流密度相関),クロス・ヘリシティ(速度=磁場相 関)]などの時空分布を稲垣が計測する.諸ヘリシティの時空分布の直接計測は世界的にも 例が限られており,それ自体として高い価値がある.その結果と平均場の分布と組み合わせ ることで,レイノルズ応力,乱流起電力,乱流熱流束などの実際の分布とモデル表現とを横 井と稲垣で比較検討する.さらにヘリシティ自体とその生成率(別の乱流相関と平均場の非 一様性の結合やプラズマ波動の伝搬)の時空分布とを比較することで,測定や観測が難しい 場合に用いる代替観測量(proxy)の情報を得る.実験との比較結果を用いて,横井は乱流 輸送モデルを発展させる.

結果:

測定する物理量の特定と、そのための実験設定の確認を行った。速度と磁場の同時測定を 同じ制度で行うためには観測装置の開発も必要であるため、そのための検討を行った。

考察:

今回の研究を通じて、モデルの検証のためにどのような物理量をどのような時空分布で測定するかについての理解が深まった。乱流質量流束やエネルギー流束に関するモデルの検証には、速度と磁場の相関を非圧縮部分と圧縮生部分に分ける必要があることもわかり、今後の研究方針が明確になったと言える。

論文:

- Valery V. Pipin and Nobumitsu Yokoi, Generation of a large-scale magnetic field in a convective full-sphere cross-helicity dynamo, Astrophysical Journal, 859, 18-1-11 (2018/05)
- [2] Dmitry Sokoloff and Nobumitsu Yokoi,
 Path integrals for mean-field equations in nonlinear dynamos, Journal of Plasma Physics, 84, 735840307-1-7 (2018/06)
- [3] Nobumitsu Yokoi,

Turbulent dynamos beyond the heuristic modeling: Helicities and density variance, AIP Conference Proceedings **1993**, 020010-1-10 (2018/08)

[4] Nobumitsu Yokoi,

Electromotive force in strongly compressible magnetohydrodynamic turbulence, Journal of Plasma Physics, 84, 735840501-1-26 (2018/10)

[5] Nobumitsu Yokoi,

Mass and internal-energy transports in strongly compressible magnetohydrodynamic turbulence, Journal of Plasma Physics, **84**, 775840603-1-30 (2018/12)

[6] Valera Titov, Rodion Stepanov, Nobumitsu Yokoi, Mahendra Verma, and Ravi Samtaney,

Cross helicity sign reversals in the dissipative scales of magnetohydrodynamic turbulence, Magnetohydrodynamics, 55, 1-7 (2019/02)

学会発表:

[1] Nobumitsu Yokoi,

Multiple-scale analysis of turbulent transport in strongly compressible magnetohydrodynamic flows, European Geosciences Union General Assembly Meeting 2018, EGU2018-12095 (2018/04)

[2] Nobumitsu Yokoi,

Effective mass and energy fluxes in strongly compressible magnetohydrodynamic turbulence: Density-variance and compressive cross-helicity effects, American Geophysical Society Fall Meeting 2018, NG23A05, (2018/12)

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

半導体デバイス製造の前工程において、プラズマプロセスは必須の技術である。近年の半導体デバイスの高性能化では、微細化から、3次元スケーリングと呼ばれる多段積層化が進められている。このような3次元スケーリングにおいてもプラズマプロセスは必要であり、3次元のナノ構造体を精密に加工する必要があり、プラズマとナノ構造体の界面との相互作用ゆらぎの抑制は重要課題である。この課題の解決には、プラズマとナノ界面の相互作用ゆらぎを解明する必要がある。本研究では、プラズマとナノ界面の相互作用を解明するため反応性プラズマ中のナノ粒子成長をナノ界面のモデルとして、プラズマとナノ粒子の相互作用ゆらぎをプラズマ乱流物理の視点から解析することを目指している.これまでに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、以下の成果を得ている。

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バイスペクトル解析を適用し、ラジカル

とナノ粒子の非線形結合を確認した。

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と相互作用ゆらぎの伝播を評価することに成功した[3,4]。

ここでは, 放電空間中のナノ粒子のサイズを計測し、これらのゆらぎ構造との相関につい て検討した。

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[2]。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)



図1. 実験装置図。

で撮影した[5,6]。

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。例えば100Hzを抜き出す場 合、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。図2に電極中央(r=0mm)と電極の外周部 (r=27mm)における相互作用ゆらぎの時空間分 布を示す。電極外周部の法が、相互作用ゆらぎ が顕著に表れる放電開始からの時間が早く、z 方向(電極間距離方向。z=0 が放電電極、z=20mm が接地電極を示す。)全体にゆらぎ構造が存在し ている。

上述した相互作用ゆらぎとナノ粒子成長の相 関を明らかにするため、各半径方向における放 電開始後8秒におけるナノ粒子のサイズ分布を 調べた。結果を図3に示す。ゆらぎ構造が強く 発生しているエッジ部分では、7nmと10nm に ピークを持つ分布であったが、電極中央11nm に ピークを持つ分布であり、ゆらぎ構造が強い領 域では、ナノ粒子成長が抑制されていることが 示唆される。

今後は、ゆらぎ構造とナノ粒子生成の相関に ついて変調周波数依存性などから明らかにした 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] T. Yamada, et al., Nature Phys. 4 (2008) 721.

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

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

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

投稿論文:3件、学会発表:国際会議5件、国内会議2件



図 2. 変調周波数 100Hz, 変調度 30%時の LLS 強度の 100Hz 成分の相 互作用ゆらぎ。(上図)r=0mm, (下 図)r=27mm



図3.変調周波数100Hz,変調度 30%、放電開始後8s時の各半径位置 におけるナノ粒子サイズ分布。

医療用 CT・MRI 技術を応用したプラズマ乱流計測

島根大学学術研究院理工学系 荒川弘之

背景と研究目標

応用力学研究所直線磁化プラズマ発生装置 PANTA では, 乱流の時空間構造を高速に測 定することが必要とされ、近年では、乱流への摂動がない、CT 技術を応用した手法や レーザーによる乱流測定手法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。この際、医療分野で急速に開発が進んでいる、少ない点か ら効率的に対象を測定可能な『圧縮センシング MRI』や『圧縮センシング CT』の手法を 適用することで新たな乱流観測手法の開発が期待できる。本研究では、医療分野で開発 が進められている圧縮センシングによる MRI・CT 手法を、レーザーによるプラズマ乱流 計測に適用を行うための基礎的な検討を行う。

方法と検討結果

プラズマイオン流れ測定の基礎的な検討のため、(i)数値シミュレーション結果を用 いたベクトルトモグラフィーの検討と、(ii)レーザー吸収分光による信号強度の測定実 験を行った。この際、医療用の CT 技術をそのまま適用する場合、レーザーを様々な方 向から照射する必要がある。このため、本研究では、ラングミュアプローブを用いて開 発されたプラズマ二次元揺動再構成手法(H. Arakawa Sci. Rep. 2016)を応用して、一方向 のみのレーザー照射で行う形とした。

(i) 数値シミュレーション結果を用いたベクトルトモグラフィー模擬

九州大学で開発されている、円筒形プラズマ中での乱流解析コード Numerical Linear Device (NLD)による乱流シミュレーション結果を用いて、計測模擬による検討 を行った。イオン温度は、過去の実験で得られている、0.3eV とした。得られたポテン シャル情報を元に、2次元周方向速度分布、2次元径方向速度分布の導出を行った。

これらを踏まえて、ベクトルトモグラフィーによる測定実験の模擬を行った。円柱状 プラズマの下方から磁場に垂直にレーザーを照射するとし、プラズマの回転は、プラズ マの端における乱流揺動の位相変化から見積もった。イオンは、アルゴンイオンの 3d4F72準位から4p4D522 準位への励起の際の、レーザー光の吸収または蛍光を利用する とした。イオンの流れと温度により、吸収される波長のドップラーシフトとドップラー 広がりが起こる為、668.6138nmを中心波長として10GHz程度の掃引を模擬した。得ら れた波長ごとの線積分情報を元に、2次元密度分布、2次元周方向速度分布、2次元径 方向速度分布を再構成した。結果、元の2次元分布をおおよそ再現できることを確認し た。

(ii) レーザー吸収分光実験

これまで開発しているレーザー誘起蛍光法では、アルゴンイオンの4p⁴D_{5/2}への励起 後に、4s⁴P_{3/2}への準位へ遷移する際の蛍光(442.6nm)を測定するための集光光学系を別 途設置している。レーザー吸収分光法を用いた手法では、レーザー光の吸収量を測定す るための光検出器を新たに設置するだけで大掛かりな集光光学系は必要なく、位置調整 も容易である。このため、計測装置の簡易化ができる可能性がある。本研究では、線積 分した吸収量の測定により、レーザー誘起蛍光法と比較した、本手法の可否を検討した。

レーザーは、円柱プラズマ中心を通過するように設置した。レーザー波長は、アルゴ ンイオンの3d⁴F_{7/2}準位から4p⁴D_{5/2} 準位への励起の際の吸収波長である、668.6138nm とした。プラズマを透過した光は、光ファイバにより伝送後、アバランシェフォトダイ オードにより光強度を検出した。

得られた結果として、プラズマによるレーザー光の吸収量が非常に少なく、吸収量の 測定には、数十回の繰り返し測定を行う必要があることがわかった。S/Nの改善には、 プラズマの円柱の軸方向へレーザー径を拡大し、吸収量の増加を行う方法が考えられる。 一方で、現状のレーザー誘起蛍光による局所的な蛍光測定を用いた場合のS/Nの方が良 いため、蛍光の線積分を測定する形とした方が、本研究には適していると考えられる。

今後は、以下の検討により、本乱流測定手法の開発を行う。(a)本研究によるシミュ レーションの結果を元に、医療用圧縮センシングMRIやCTの技術を適用して、その画 質やノイズの評価により、どこまで測定点を減少させ、効率的に測定できるかを検討す る。(b)新たな集光光学系設置により、レーザー誘起蛍光による線積分データを測定し、 S/Nの測定を行う。

成果報告:

本検討に関する論文を査読付き論文へ投稿準備中である。

デジタル分光を用いた ECE 計測の解析手法に関する研究

核融合科学研究所 土屋 隼人

1. 要旨

デジタル相関 ECE 計測は高速デジタイザーのシーケンシャルモードを開発し LHD で 運用されている。同計測をドイツの W7-X の ECE 計測に適応可能性を検討した。高速デジタイ ザーを W7-X の ECE 計測器に試験的に接続し、初期結果を得た。

2. 序論

様々な実験研究の計測にとって、高空間分解能かつ高時間分解能で現象を観測する ことは一つの夢である。大抵の場合、空間分解能や時間分解能は測定器のハードウェアの性 能で決まり、実験準備の段階でそれらは決められてしまう。実験後に解析を進めていくうち に、時間分解能を高めたいことや空間分解能を高めたいことがあるが、実験準備で見積もっ た分解能以上は実現できない。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観測する計測器が望まれている。

3. デジタルコリレーションECE原理とLHDとW7-Xへの適応

電子温度計測の有効な手段として、電子サイクロトロン放射(ECE)計測が有効であることはよく認知されている。ECEの周波数帯は装置の磁場強度に比例し、テスラマシンの場合数十ギガから数百ギガヘルツである。かつカットオフ密度との関連を考慮すると、ECEは高磁場装置で有効で、LHDの場合 50GHz 以上の ECE が計測に利用できる。

ECE を検波するためにヘテ ロダイン検波を行うと、その 中間周波数帯(IF: Intermidiate Frequency)は 通常ギガヘルツ帯であるの で、従来はアナログ周波数フ イルター(BPF)を使って周 波数分離を行い、分離した各 周波数のパワー検波してい た(図1. 左側① conventional block)。本提 案手法では、IF を直接デジ タイジングし、IF 波形をデ ータとして保存する。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)[1,2]。 核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)においては高磁場領域から発せられる ECE を従 来の BPF を使ったラジオメータとデジタル分光を使って検波している。今年度は同様のシス テムをドイツのマックスプランク研究所(IPP)のWendelstein 7-X(W7-X)のECE 計測に試 験的に導入し初期的な結果を得た。W7-X は超伝導ステラレータ実験装置であり、2015 年に実 験を開始し、ECE 計測は電子温度分布と電子温度摂動を観測する主幹計測して稼動している。 今回は低磁場側 ECE がスーパーへテロダインで周波数変換された IF をデジタル分光用に分 波しデータ取得を行った。図2は高速デジタイザーに分波接続した様子である。図3に測定

機器の熱ノイズ((a),(b))とあるプラズマ放 電からの ECE 信号((c),(d))の IF 波形とその スペクトルを示す。(b)より機器からノイズに 特徴的な周波数がいくつかあることが分か る。(a)(b)よりプラズマからの信号は十分有 意な振幅であることが確認された。そのスペ クトルはブロードであるが、機器からの特徴 的な周波数ピークよりおおきなスペクトル強 度ではないため、解析の際には機器の特徴的 なピークを取り除く必要がある。このことを 踏まえ今後解析を進めていく。



図 2.W7-X ECE デジタル分光接続の様子



図 3.W7-X IF 波形とそのスペクトル a)プラズマがない場合の測定器の熱 ノイズの波形 b) 測定器の熱ノイズのスペクトル c)プラズマからの ECE の波形 b) ECE の IF スペクトル

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)
*2 Hayato TSUCHIYA, Shigeru INAGAKI, Tokihiko TOKUZAWA, Naoki TAMURA, Yoshio NAGAYAMA, LHD Experiment Group, Plasma and Fusion Research Volume11, 2402072 (2016)

東シナ海黒潮域における乱流混合過程の解明

沖縄科学技術大学院大学

沖縄マリンサイエンスサポートセクション

森 康輔

1. 目的

海洋における鉛直混合は、風や潮流によって励起される近慣性周期の内部波が大きく寄与 しているが、特に風起源の内部波が深海に伝わり、強鉛直混合域を形成する過程には不明 な点が多い。そこで本研究では、乱流の鉛直伝播メカニズムを解明するため、乱流微細構造 プロファイラーを用いて定点における乱流連続観測を実施し、乱流構造の時間変化を調べ た。

2. 観測

カナダ Rockland Scientific 社製乱流 微細構造プロファイラーVMP-500 を 用いて,日本海の観測点 PM5 におい て(図 1),2018 年 10 月 9 日午前 8 時頃から 24 時間連続で,長崎大学水 産学部付属練習船長崎丸による乱流 観測を実施した。観測範囲は表層から 水深約 500m まで,キャスト数は 39 回 である。VMP-500 には様々なセンサ が付属しているが,本研究で用いたパラ メータは,鉛直シア・水温・圧力である。





得られたデータからスパイク成分を取り除き,5 dBar のセグメントで 2.5 dBar 毎に,乱流エネ ルギー散逸率 ε [W/kg]を算出した。乱流計は,海面から一定速度で降下しながら計測すると いう特徴を持つ。降下速度が安定しない表層付近(海面から水深数十 m まで)は,ε の算出 が困難となるため欠測扱いとした。

3. 結果

 ϵ と水温の鉛直プロファイル時系列を図 2 に示す。18 時頃以降から表層付近で $\epsilon \sim 10^{-7}$ W/kg と比較的大きくなっており、これは、夜間の冷却による表層混合によるものと考えられる。鉛直方向に注目すると、10~30 dBar の間隔で 1 オーダ程度大きな ϵ が離散的に分布するところがある(例えば、20 時頃の 70 dBar、90 dBar、110 dBar、140 dBar 付近など)。また、水温躍層よりも下層において、 ϵ 極大層が数時間にわたり存在していることがわかる(例え ば,16時~19時の200 dBar 付近,1時~5時の250 dBar 付近など)。

今後は、本航海で得られた流速や風などの他のデータを解析し、鉛直方向の ϵ の離散的な 分布や、中層の ϵ 極大、さらにそれらの時間変化の要因について調査する予定である。



4. 研究組織

研究代表者	沖縄科学技術大学院大学	森 康輔
所内世話人	九州大学応用力学研究所	遠藤 貴洋
研究協力者	九州大学応用力学研究所	千手 智晴

30 特 2-8

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ためには、プラズマ流体の 圧力・密度・温度・電位等の物理諸量が生み出す膨大な時系列データを詳しく解析しなければならない。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、時系列データを統計 モデル化した後、ネットワークとして視覚化することによって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解析に適用することによ り、膨大な多次元時系列データから物理的情報を抽出する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 $\varepsilon(t)$ を用いて

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

と線形モデル化する。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 $x(t - l_1), x(t - l_2), \ldots, x(t - l_w)$ から最適な部分集合を選び 出すものとして決められる。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。

この RAR モデリングは多変数の時系列データにも有効であることがわかっている [2]。多変数に拡張された RAR モデルは,

$$x_i(t) = a_{i,0} + \sum_{j=1}^N \left(\sum_{k=1}^{w_j} a_{i,j,k} \; x_j(t-l_k) \right) + \varepsilon_i(t) \quad (i = 1, 2, \dots, N)$$
(2)

で表わされる。ここで, *j* = 1,2,...,*N* はチャンネル数である。本年度は,この多変数 RAR モデリングの方 法を 64 チャンネルのプラズマ乱流データに適用し解析を行った。まず 64 チャンネル中の一つのチャンネルに 注目し,ターゲットチャンネルとする。そのターゲットチャンネルを中心とする両側 15 チャンネルずつ,合 計 31 チャンネルを探索範囲とし,最大ラグを 25 として多次元 RAR モデルを構築した。ここでラグは 10[µs] を単位とする。用いた時系列データ数は 1 チャンネルあたり 10000 点である。

結果の一部を列挙すると以下の通りとなる。

Ch 10:
$$x_{10}(t) = 0.00012x_8(t-1) + 2.26x_{10}(t-1) - 1.88x_{11}(x-2) + 0.51x_{12}(x-3)$$

Ch 20: $x_{20}(t) = 0.025x_{19}(t-1) + 1.96x_{20}(t-1) - 0.90x_{21}(t-2)$ Ch 30: $x_{30}(t) = 0.078x_{28}(t-1) + 1.79x_{30}(t-1) - 0.87x_{31}(t-2)$ Ch 40: $x_{40}(t) = 0.31x_{38}(t-1) - 0.26x_{39}(t-2) + 1.65x_{40}(t-1) - 0.67x_{41}(t-2)$ Ch 50: $x_{50}(t) = 1.81x_{50}(t-1) + 0.071x_{50}(t-2) - 0.87x_{51}(t-2)$ Ch 60: $x_{60}(t) = 0.013x_{58}(t-1) + 2.34x_{60}(t-1) - 1.60x_{61}(t-2) + 0.23x_{63}(t-4)$

これらの結果を見ると、ターゲットチャンネルのデータはそのターゲットよりも番号が1~2大きいチャンネルのデータによって予測され、番号の大きいチャンネルから小さいチャンネルに向かって、その影響が伝播されている可能性が示唆される。

3 今後の研究の方向について

本年度の研究により,RAR モデルによる多次元時系列データ解析が全チャンネルについて,コンシステン シーを持つ結果となることがわかってきた。来年度は,,本手法が新たなデータ解析手段として実用化できる ように,この結果をさらに精密化し定量的に理解を深めていきたい。その際,多チャンネルであることで最適 モデルを選び出すために多くの計算時間が必要となるため,高速な計算機の使用やアルゴリズムの最適化等が 必要となる。また,その適用範囲を広げていくために,チャンネル数,ノイズレベル,非線形性等に対する手 法の頑強性の考察も重要となると考えられる。

4 研究成果発表

- Toshihiro Tanizawa, Tomomichi Nakamura, Fumihiko Taya, and Michael Small, "Constructing directed networks from multivariate time series using linear modelling technique," Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, Vol. 512, 437-455 (2018).
- Tomomichi Nakamura, and Michael Small, Toshihiro Tanizawa, "Long-range correlation properties of stationary linear models with mixed periodicities," Physical Review E, Vol. 99, 022128 (2019).

参考文献

- Tomomichi Nakamura and Toshihiro Tanizawa: "Networks with time structure from time series," Physica A, Vol. 391, 4704-4710 (2012).
- [2] Toshihiro Tanizawa, Tomomichi Nakamura, Fumihiko Taya and Michael Small, "Constructing directed networks from multivariate time series using linear modelling technique," Physica A, Vol. 512, 437-455 (2018).

平成 30 年度 応用力学研究所 特定研究(2) 申請 報告書

研究課題名

直線ヘリコン波プラズマ内で誘起される電子密度・温度揺らぎの非接触計測 Non-intrusive measurements of fluctuated electron density and temperature in a linear helicon plasma

平成31年2月28日

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

プラズマの応用研究が多岐にわたる中、プラズマの巨視的な学理は著しく進展した。しか しプラズマ中のミクロな構造、例えば電子密度や温度の揺らぎ、中性粒子との相互作用等は、 必然的に高空間・時間分解能かつ非接触なセンシング技術を必要とし、十分に把握されてい るとは言い難い。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 では、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 を多数のプローブや発光観測により進めている。ミクロな構造を定量的に評価するために は、プラズマの電子温度と電子密度の径方向分布の時間変化(ゆらぎの位相に対応した変化) 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。レーザートムソン散乱法はプラ ズマに与える擾乱が小さく、かつ高い空間(~0.1 mm)・時間(~10ns)分解能での計測が可 能である。本研究ではトムソン散乱法を主軸として、プラズマ中のミクロな電子密度・温度 構造を、揺らぎの位相情報を含めた時間・空間多次元計測として達成することを目指す。今 年度は電子密度・温度の実空間(プラズマの径方向)分布を、磁場強度・ガス圧力を変えつ つ、多点計測により、詳細に明らかにした。その結果について報告する。



はじめに

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。さら に PANTA では運転条件により、特定の周波数でのプラズマ揺らぎが増大することが観測さ れており、その場合の *n*_e, *T*_eを得ることも求められている。

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。すでに行われているプローブ計測の結果から、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。これまでに PANTA プラズマに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^[1]。 さらにプラズマ揺らぎに対応した *n*e, *T*e 計測まで拡張可能であることを、これまでに示して きた。本年度は、プラズマ径方向分布の詳細な計測・解析を行ったので、その結果について 報告する。

実験方法(レーザートムソン散乱法)

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 光器は実験用光学台の上に、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 PIMAX4, 波長 532 nm における量 子効率は 45%程度)を用いた。使用したプローブレーザーは移設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。

本年度の計測では、ne, Te の詳細な径方向分布の計測を目指した。例えば温度勾配の変化を 計測するには、10点以上の多点計測が必要となる。また、1eV 程度の温度領域で、±0.1eV の温度決定精度は、実験環境上、困難を伴う。そこで計測点を増やすことで、温度決定精度 を高めることとした。温度の検出下限として 0.1eV の分光システムで、100点超の多点計測 を行い、温度の径方向分布の計測を行った。



Tomita et al. PFR (2017)

図 5. 電子密度・温度の位相データ取得のための同期系統図

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ていることを確認したのち、トムソン散乱計測を行った。プラズマ生成条件は以下のとおりである。

 ・ プラズマ生成時の Ar ガス圧は 1mTorr, 3mTorr, 5mTorr, 磁場強度は 600 Gauss, 1200Gauss, 1500 Gauss とし、合計9条件での計測を行った。

2次元(波長・空間)計測であり、ある程度の空間範囲は同時に計測可能。



→生成9条件、各空間位置で計測・解析

図 6. トムソン散乱計測例

計測レーザーの繰り返し周波数は 10Hz で、3000 ショットの積算計測を行った。プラズマとの同期は取らず、Duty 比 1:1 より、半数の 1500 ショットが実際の積算回数と考えた。計測データの例を図 6 に示す。横軸は ICCD カメラのピクセル(1 ピクセル=13 μ m)である。分光器の仕様で決まる逆線分散は 1.35nm/mm であり、1 ピクセルあたり 0.0176nm の波長幅となる。装置関数は 0.27nm であった。計測レーザー波長(波長 532 nm, $\Delta \lambda = 0$)付近の信号は、迷光除去のために差分散型分光器に設置したレーザー波長ストップ(逆スリット)によりカットされており、正しい計測値ではない。グラフ縦軸は信号強度であり、単位は Analog-to-digital unit である。画像の縦方向は空間分布そのものであり、空間幅 0.5mm の散乱スペクトルを抜き出したもの、そのフィッティングを例として示した。



図 7. 径方向分布解析例

空間幅を 0.5 mm として、全データを解析した例を示す。それぞれにフィッテイング、絶対 値較正を行うことで、径方向の 12mm 幅の空間分布が得られることがわかる。



図8. 径方向分布計測のための各受光位置での感度特性

一度の計測視野や 10mm 程度である。これに対して PANTA でのプラズマ半径は、およそ 50mm である。そこで、空間方向視野は、計測位置を変化させることで補った。



電子密度(5mTorr固定,磁場依存)

図 9. 電子密度の径方向分布の磁場強度依存性

電子密度の径方向分布を示す。ガス圧は5mTorrで固定した場合である。磁場強度の上昇に 伴い、電子密度は増加していくことがわかる。また、プラズマ中心から周辺部に行くにつれ、 密度は減少していることがわかる。一方で、密度勾配は単調でない。密度勾配の変化位置も、 磁場圧力により変化していくように思われる。



電子密度(1500G固定, 圧力依存)

図 10. 電子密度の径方向分布の圧力依存性

ガス圧力を低下させると、単調に電子密度は低下した。この場合も、密度勾配は一定ではな く、プラズマ条件により、勾配変化点も移動しているように感じられる。





図 11. 電子温度の径方向分布の磁場強度依存性

電子温度の径方向分布について示す。圧力が 5mTorr 固定、磁場強度による電子温度の違い を示す。電子密度とは異なり、中心部での電子温度は、磁場強度の増加と共に低下していっ た。周辺部に行くにつれ電子温度は減少した。温度勾配の変化は、どの磁場圧力でも中心か ら 30mm (r=30mm) で共通して見られた。この点も電子密度とは異なる傾向を示した。
電子温度(1500 G, 圧力依存)



図 12. 電子温度の径方向分布の圧力依存性

同じ磁場強度では、圧力の上昇とともに電子温度は減少する傾向となった。5mTorr 圧力の時のみ、プラズマ中心付近での勾配がみられる。温度勾配は、共通して r=30mm で大きく変化している。



図 13. 各電子温度でのトムソン散乱スペクトル計測例

本計測では高い電子温度の決定精度が求められる。各温度でのトムソン散乱スペクトル例 を示す。明確なスペクトル形状変化がみられることがわかる。



電子圧力(n_e × T_e)



得られた電子密度・電子温度から、電子圧力の径方向分布を求めた。r=25mm 付近から、磁場強度の増加と共に、明確な電子圧力の違いが得られた。r=25mm 付近で、磁場圧力でプラズマ状態が変化している可能性がある

図 14. 電子圧力の径方向分布の磁場強度依存性



压力·磁場依存(電子密度)

図 15. 各条件での電子密度・温度の径方向分布

全9条件での電子密度・電子温度の径方向分布を示す。

まとめと今後の展望

本共同研究の本年度の成果を以下に示す。

- PANTA 装置における異なる9条件のプラズマに対して、径方向分布の電子密度・電子温度をレーザートムソン散乱法で計測した。計測箇所を100点以上とすることで、 詳細な密度・温度の空間変化を観測可能とした。
- 勾配長の分解能は 5mm 程度であり、特に温度の勾配変化観測の強力な計測手段となりうる。

今後の展望として、径方向分布で得られた精度での計測を、位相空間まで拡大させることを 考えている。

論文発表

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, Vol. **12**, 1401018 (5pages) (2017).

分野融合研究会

応用力学研究所 稲垣 滋

本研究は「特定研究 2: 波・流れ・乱流のセンシング・マイニング・モデリング」における個別課題の成果の統合を議論する。

目的と背景

応用力学研究所は3つの研究分野から構成されている。そこで本研究所ならではの分野 融合領域研究の開拓が求められている。プラズマ、大気海洋、新エネルギーに共通したキ ーワードとして流体力学が挙げられる。特に多くの流体(多成流。多相流、反応流を含む) で普遍的に観測され、エネルギーや物質の輸送に大きな影響を与える波・渦・流れに着目 する。本研究では、それぞれの領域で発展してきたこの波・渦・流れ、を観測(センシング), 解析(データマイニング,可視化),物理過程の抽出(モデリング)に関する情報交換及び議 論を行う場を提供する事を目的とする。更には他分野で共通の手法となり得るデータサイ エンスの導入についても議論する。そのため研究集会を開催し、特定研究2のサブテーマ リーダー及び流体を扱う多方面からの研究者が一堂に会して議論する機会を設ける。個別 のアプローチを統合することで、研究手法そのものに新たな展開がもたらされることが期 待できる。

研究集会の開催

2019 年 1 月 31 日から 2 月 1 日にかけて応用力学研究所 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

分野融合型共同研究としては初年度にあたる本年度は特に海洋・大気及びプラズマの分 野融合について、お互いのシーズとニーズの確認を行った。分野融合研究は理論・シミュ レーション研究がやり易く海洋・大気及びプラズマ分野から乱流と波に関する理論と解析 手法についての発表があった。海洋分野における Wigner 変換を用いた微分方程式の解法 はプラズマ乱流現象において現在進めている解析と非常に類似しており、海洋乱流現象と プラズマ乱流現象に共通の物理がある事を示している。また、乱流の計算から求まる乱流 強度と実際に観測される物質輸送との関係が複雑である事も共通していると認識された。 乱流強度と物質輸送の関連はプラズマ分野では実験観測されている。この点はプラズマ分 野の利点と考えられる。そこで先ほどの Wigner 変換をプラズマ過渡輸送実験のデータ解 析へ適用できないか議論された。

また、近年盛んなデータサイエンスの手法を取り込んだデータ解析の紹介があった。医 療用 CT・MRI はデータ処理技術によって支えられており、近年は圧縮センシングという手 法を用いることで臓器の明瞭な像を得る事ができる。これをプラズマ CT に応用し、乱流解 析を行うアイデアが示された。また、ソーシャルネットワーク科学の時系列データ解析手 法が紹介された。自己回帰モデルでは全てのタイムラグに対し結合係数が決められるが、 そこにスパース性を導入し結合係数 0 を許す解析(縮小自己回帰モデル)を行うことで、影 響のあるなしを明確にすることができる。更にこのモデルを多変数系に拡張した。相関解 析からは元のモデルを推定することができないが、本手法ではモデルを与える事ができる。 この手法は時系列データのモデリングに対して非常に有効であると期待できる。これらデ ータ解析手法の進展について、それぞれの分野における適用性について討論した。

センシングに関して多くの話題が提供された。レーザーとマイクロ波を用いた先進的な 乱流及び乱流駆動輸送の観測法が紹介された。トリプルグレーティング分光器を用いたト ムソン散乱により様々な実験条件における PANTA プラズマの温度、密度の径方向勾配が得 られた。PANTA プラズマの周辺では大きな温度勾配が形成されている事が明らかになった。 更に統計的平均法と組み合わせる事で温度揺動の推定が行われた。マイクロ波計測に関し ては、周波数コム、超短パルス、高速周波数掃引技術を用いた様々なタイプの反射計が紹 介された。先述の時系列データ解析チームから、信号のトレンドを除去したノイズライク な成分の解析可能性が指摘された。反射計はプラズマの平衡分布や比較的大きな揺らぎを 計測対象としているが、データ解析により極ミクロな揺らぎの情報が手に入る可能性があ る。海洋分野ではプローブによる直接計測が行われているが、プローブを海面から海底に 掃引する際に有限の時間がかかるため、その間の乱流構造の変化が指摘され、参照用のプ ローブを加える事が議論された。

MHD を考慮した液体金属のシミュレーション結果が示された。液体金属流動はまさし く電磁流体と中性流体との融合領域である。このシミュレーションではまだ熱輸送が含ま れていないが、外部や内部の入熱による温度の非一様性を考慮できれば液体金属ダイバー タや地球ダイナモの理解につながると期待される。

142

2019.01.17版 稻垣 滋

応用力学研究所研究集会

"波・流れ・乱流のセンシング・マイニング・モデリング"

日時: 2019年1月31日-2月1日

場所: 応用力学研究所2F大会議室

プログラム

1月31日(木)

13:30-13:40

はじめに (稲垣)

13:40-14:10

医療用CT・MRI技術を応用したプラズマ乱流計測 (荒川)

14:10-14:40

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) 14:40-15:10

CFD手法による液体金属熱流動の解析(胡, Jabir Al Salami)

休憩

15:30-16:00

直線ヘリコン波プラズマ内で誘起される電子密度・温度揺らぎの非接触計測(富田)

16:00-16:30

流れベクトル量測定のためのマイクロ波センシング技術の開発(徳沢)

16:30-17:00

全体討論

懇親会予定

2月1日(金)

9:30-10:00

日本海における乱流観測(森)

10:00-10:30

流体波動の局所分離解析に関する研究 (大貫)

10:30-11:00

振幅変調反応性プラズマのナノ粒子量ゆらぎの相互相関解析 (古閑)

11:00-11:30

乱流輸送の促進と抑制機構の理論・実験的解明:ヘリシティ効果(横井)

11:30-12:00

全体討論

流れベクトル量測定のためのマイクロ波センシング技術の開発

核融合科学研究所・ヘリカル研究部 徳沢季彦

1. 目的

乱流は、自然界において普遍的に観測される物理現象であるが、磁場閉じ込め核融合プラズマ研究におい ても種々の乱流による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、タングステン・白金などの重金属をも溶かしてしまう高温高密度プラズマ実験に おいては、その計測手段が非常に限られている。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。特に、乱流の流れる方向と強 度を精度よく観測することを主目的として、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。このドップラー反射計を実験装置に多数取り付け、相関計測が可能 となると、物理研究の理解に大変有用である。そのためには計測システムのコンパクト化省コスト化が重要 となるため、今回、Dual comb 方式を用いたドップラー反射計システムの開発を行った。結果について以下 に報告する。

2. Dual comb Doppler 反射計

プラズマ中の密度揺動による後方散乱波を計測することで、プラズマ密度揺動強度とそのフロー速度を調べることができるドップラー反射計であるが、空間分解能を高めるためには、プラズマ中へ入射する電磁波の周波数の数を増やす必要がある。そのため、マイクロ波帯の周波数コムを用いたドップラー反射計を開発し、 PANTA装置およびLHD装置に適用しているが、これまで、信号検出には入射した各周波数に対応したマイクロ波帯のフィルタバンクとその位相変化を測定するIQ検出器が必要であった。これらのマイクロ波検出回



図1: Dual comb Doppler 反射計システムの概略図

路は、各素子を SMA コネクタでケーブル接続する必要 から、コンパクトなサイズにすることが困難でかつコス トも必要となり、せっかく多周波数を同時発生できるコ ムジェネレータを用いても、フィルタバンクの数で利用 できる周波数に制限が発生していた。そこで今回、二つ の周波数コムを用いて、IF(中間周波数)を劇的に低減し、 観測周波数を増大させるための省コスト化を目指した。 システムの概略を図 1 に示す。発振周波数をわずかに (20MHz)ずらして、2 つの周波数コムを動作させると、 IQ 検出器に入力される、IF 周波数列は、n x 20 MHz の周波数コムとなる(nは整数)。これまでの 10 GHz を超える周波数帯域からの大幅な低減ができ、表面実装 型のフィルタやアンプ、ミキサ等の素子を利用すること ができる。これらを用いて作成した、IQ 検出回路基板



図 2: IQ 検出基板の例。これで、4ch 分の IQ 出力が得られる。

を図2に示す。新計測システムの導入により、長距離相関など新たな知見が得られるようになった。

3. 論文と学会発表

- T. Tokuzawa, H. Tsuchiya, T. Tsujimura, M. Emoto, H. Nakanishi, S. Inagaki, K. Ida, H. Yamada, A. Ejiri, K. Y. Watanabe, K. Oguri, T. Akiyama, K. Tanaka, I. Yamada, and LHD Experiment Group *"Microwave frequency comb Doppler reflectometer applying fast digital data acquisition system in LHD"* Review of Scientific Instruments 89, 10H118- 1-5 (2018); doi: 10.1063/1.5035118
- T. Tokuzawa, K. Oguri, S. Kubo, K. Tanaka, H. Yamada, K. Y. Watanabe, A. Ejiri, S. Inagaki, J. Kohagura, T. Saito, and LHD Experiment Group "Developments of Millimeter Wave Backscattering Systems for Fusion Plasma Turbulence Measurements" Proceedings of 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves Sep. 9 - 14, 2018@Nagoya Congress Center Nagoya, Japan [Th-P2-R2-1]

また、次の学会にて発表を行った。

- T. Tokuzawa, H. Tsuchiya, T. Tsujimura, M. Emoto, H. Nakanishi, S. Inagaki, K. Ida, H. Yamada, A. Ejiri, K. Y. Watanabe, K. Oguri, T. Akiyama, K. Tanaka, I. Yamada, and LHD Experiment Group *"Microwave frequency comb Doppler reflectometer applying fast digital data acquisition system in LHD"* 22nd Topical Conference on High Temperature Plasma Diagnostics (HTPD2018) @April 16-19, 2018 @Paradise Point Resort & Spa, San Diego, California, USA [8.56]
- T. Tokuzawa, M. Kobayashi, S. Masuzaki, S. Inagaki, K. Ida, H. Tsuchiya, H. Yamada, K. Y. Watanabe, K. Oguri, K. Tanaka, I. Yamada, and LHD Experiment Group *"Turbulence rapid reduction in the stable detached LHD plasma with magnetic perturbation application"* 8th Asia-Pacific Transport Working Group (APTWG) International Conference, June 12 – 15, 2018 @ETCCUT, SWIP, Leshan, Sichuan, China [C-O1]
- T. Tokuzawa, K. Oguri, S. Kubo, K. Tanaka, H. Yamada, K. Y. Watanabe, A. Ejiri, S. Inagaki, J. Kohagura, T. Saito, and LHD Experiment Group "Developments of Millimeter Wave Backscattering Systems for Fusion Plasma Turbulence Measurements" 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2018) Sep. 9 - 14, 2018@Nagoya Congress Center Nagoya, Japan [Th-P2-R2-1]
- 4. T. Tokuzawa, S. Inagaki, N. Tamura, R. Sakamoto, K. Ida, T. Tsujimura, M. Emoto, C. Suzuki, H. Tsuchiya, A. Ejiri, H. Yamada, K. Y. Watanabe, K. Oguri, K. Tanaka, G. Motijima, I. Yamada, and LHD Experiment Group; "*Rapid Radial Propagation of Momentum Change and Flow Oscillation Associated with the Pellet Injection*", 27th IAEA Fusion Energy Conference (FEC-2018) @2018.10.22-10.27 Mahatma Mandir, Gandhinagar, Gujarat, INDIA [EX/P3-7]

CFD手法による液体金属熱流動の解析

九州大学応用力学研究所 胡 長洪

1. Introduction

The divertor is an essential component of tokamak fusion reactors not only to extract the energy from the plasma to generate electricity, but also to expel reactor byproducts, also known as fusion ash, which adversely affect the quality of plasma confinement and temperature. One of the main challenges facing divertor design is the tremendous energy fluxes ($\sim 10^7 \text{ W/m}^2$) that divertors are projected to experience in electricity-producing scale reactors¹. At such thermal loads, even Tungsten, the material of choice for the divertors in ITER and DEMO, can sustain cracks due to thermal shock and fatigue in addition to high rates of sputtering due to plasma influx². Also, the ductile-to-brittle transition temperature (DBTT) for tungsten increases with neutron irradiation, which may cause cracking of tungsten plasma facing components (PFCs)³. Such limitations of solid PFCs have motivated the consideration of liquid metals as viable alternatives for future tokamak designs. The operation of a liquid metal (LM) divertor involves phenomena spanning multiple disciplines of physics such as fluid dynamics, electromagnetism, thermodynamics and plasma physics. The evaluation and refinement process of engineering designs of such a device must involve numerical simulations to avoid the prohibitive costs and durations of experiments.

Computational fluid dynamics (CFD) methods have been widely used in many industrial applications. CFD method for magnetohydrodynamics (MHD) has also been studied and applied to simulation of liquid metal flows⁴, which is called CMHD (computational magnetohydrodynamics) method. Due to multi-physics nature of the LM flows in the diverter, directly application of an existing CFD code will not be effective. The purpose of the present research is develop an new CMHD code that is capable of LM divertor simulations. Among the existing well-established CFD methods, we chose SPH for numerical simulation of liquid metal flows. SPH is a mesh-free, Lagrangian method that is well-suited for multiphysics applications such as the problem associated with the liquid metal divertors.

2. Development of SPMHD Method

The development of a hydrodynamics version of the SPH code has been completed. Figure 1 shows a recently obtained dam-break simulation to demonstrate the ability of capturing the complicated and highly non-linear free-surface phenomena by our code.



Figure 1: Dam-break simulation using SPH

The above mentioned SPH features have motivated us to choose SPH for simulation of liquid metal divertor. However, since SPH for MHD has not be well studied yet, in this research at first we extend the hydrodynamic SPH code to the SPMHD (smoothed particle magnetohydrodynamics) code.

Governing equations for MHD can be described as follows.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0$$
$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{1}{\rho} \nabla \tau + \frac{1}{\rho} (\mathbf{j} \times \mathbf{B}) + \mathbf{g}$$

2.

where τ is the viscous stress tensor, **j** is the current density and **B** the magnetic field vectors. The latter two are governed by the following Maxwell equations.

 $\nabla \times \mathbf{B}_i = \mu_0 \mathbf{j}, \qquad \mathbf{j} = \sigma \left(\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B} \right), \qquad \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}_i}{\partial t}$

In the SPH framework, the fluid is discretized into material particles that in addition to carrying the fluid properties, serve as interpolation nodes for the discretized fields. In this work, the weakly compressible formulation of SPH is adopted.

As the first result of our SPMHD development, a 2-dimensional simulation of a Hartmann flow versus the analytical solution for Hartmann numbers ($Ha = BL\sqrt{\sigma/v\rho}$) of 8, 25 and 50 are presented in Figure 2, where the Hartmann number is a non-dimensional number signifying the ratio of electromagnetic forces to viscous forces. Comparison between the SPMHD result and the analytical solution is satisfactory.



Figure 2: Hartmann Flow simulation using SPH for Ha = 8 (blue), Ha = 25 (red) and Ha = 50 (magenta)

This research has just been started. Future work includes extending the present 2D code to 3D, comprehensive comparison between ϕ and B formulations for liquid metal flows, implementation of turbulence model and surface tension model, extending the present model to non-uniform, time varying magnetic field, etc.

REFERENCES

- 1 S.V. Mirnov, V.N. Dem'yanenko, E.V. Murav'ev, J. of Nuclear Materials, Vol. 196–198, (1992).
- 2 T. W. Morgan, P. Rindt, G. G. van Eden, V. Kvon, M. A. Jaworksi and N J. Lopes Cardozo, Plasma Physics and Controlled Fusion, Volume 60, N. 1 (2017).
- 3 P. Krautwasser, H. Derz, Kny, E, Plasma Physics And Fusion Technology (1995)
- 4 T. Yanagisawa, et al., Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys. (2013)
- 5 J. Monaghan, Reports on Progres in Physics, vol. 68 (2005)
- 6 H. Kumamaru, J. of Nuclear Science and Technology, Vol 54, No.2 (2017)

研究組織

九州大学応用力学研究所:	胡 長洪 (サブテーマ代表者)
九州大学大学院総合理工学府:	Jabir Saif Said (大学院生)
九州大学応用力学研究所:	稲垣 滋 (所内世話人)

レーザー光波面の乱れを利用したプラズマの乱流計測手法とデータ処理方法の開発

核融合科学研究所・ヘリカル研究部 秋山毅志

目的

プラズマの閉じ込め性能を向上させるためには、乱流の物理機構を理解することが重要である。その計 測に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長がある。

経緯と実験方法

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。当 初利用した市販のシャックハルトマン波面センサーでは有意な波面の変化は観測できなかったことから、プ ラズマ計測に最適化したシャックハルトマン波面センサーを自作した。撮像素子の画素数、シャックハルト マンセンサーを構成するマイクロレンズアレイのレンズアレイ数・焦点距離などを最適化した結果、プラズマ の揺動によると考えられる波面変動を捉えることができた。

一方、課題として明らかになったのは、波面としては比較的平面成分に近い非揺動成分(直進光成分) が揺動成分よりも極めて大きいため、それらが僅かにでも変動すると揺動成分がマスクされることである。平 面成分の変動は、機械振動やレーザー光直径より構造が大きい空気の揺らぎが原因となっている。そのた め、平成 30 年度は断熱性の高い素材で光学系を覆う風防を製作し、外部からの気流や温度変化を極力 抑制した実験系とした。また、それでも残る緩やかな気流の変化による波面変動については、プラズマが無 い時の波面形状を参照信号とし、プラズマがある時の信号から差し引くことで変化分をプラズマによる波面 変動とした。以前から参照信号の取得は行っていたが、トリガー系の制約から、プラズマ有りの条件で100 フレーム取得した後、プラズマ無しの条件で参照信号を100 フレーム取得していた。そのため、10 分程度 の時間差があり、気流の状態も変化するため、参照信号としての質が十分でなかった。そこで、トリガー系 の改良を行い、PANTA でプラズマがオン・オフするタイミングに合わせてプラズマ有り・無しの波面を取得 できるようにした。プラズマ有りのフレーム直後のタイミングで参照信号を取得して差し引くため、気流の変 化を精度よく抑制することが可能になった。

開発·実験結果

図1 にデータ処理方法を模式的に示す。PANTA のプラズマオン後 300 ms、プラズマオフ後 400 ms に 撮像し、両者の差分を取ってハルトマンスポットの広がりを得る。ただし、スポットの変化は微小であるため、 これを 100 組連続で取得し、それらを重ね合わせてランダムノイズを低下させる。更に、空間分解能は失わ れることになるが、個々のハルトマンスポットを更に重ね合わせて平均のサンプル数を増やし、スポットの広 がりをより見えやすくした。

今回の実験条件で取得したハルトマンスポットの広がりを図 2(1)に示す。(a)は図 1 のデータ取得をプラ ズマ無しで実施し、プラズマ無しのデータから無しのデータを差し引いたものである。理想的にはスポットの 広がりは無いことになるが、(a)で示されている変化の程度は、本実験条件でのノイズレベルに相当する。加 熱パワーを3 kW から5 kW まで変化させた時のハルトマンスポットの広がりの様子を(b)-(d)に示す。加熱 パワーを増大させるに従い、ハルトマンスポットの広がりが強くなっていることが示唆されている。図 2(2) は(b)-(d)と同条件でプラズマを生成した時の、静電プローブのイオン飽和電流である。加熱パワーを上げ るほど、揺動の振幅が大きくなっていることが分かる。今回のハルトマンスポットの広がりの加熱パワー依存 性は、静電プローブでの計測結果と定性的に良く合致していると言える。





図2 (1)得られたハルトマンスポット。加熱パワーを変えた時のハルトマンスポット変化(b-d)、(2)(b-d)と同条件で計測したイオン飽和電流。

<u>まとめ</u>

(1)

基本的には以前のシャックハルトマン波面センサーの光学系と一緒であるが、平成30年は風防とトリガ ー系の整備により、気流の影響を更に低減させた条件で波面計測を実施した。ハルトマンスポットの広がり は加熱パワーが大きいほど強くなり、同条件で静電プローブで計測した揺動振幅の加熱パワー依存性と定 性的に一致した。この結果はハルトマンスポットの広がりが揺動を反映していることを強く支持するものであ り、本研究で提案しているハルトマンスポット幅に注目した揺動計測の妥当性を示していると考えている。 研究組織

研究代表者:秋山毅志(核融合研)、早野裕(国立天文台)、服部雅之(国立天文台)、村上尚史(北海道 大学)、玉田洋介(基生研)

研究協力者:居田克巳(核融合研)、稲垣滋(応力研)

直線装置 PANTA における ITG 乱流輸送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。前回の共同研究においては、ジャイロ流体モデルに基づく線形解析コードを開発し、ITG モードが不安 定になるパラメータ領域を探索した。本研究では、非線形モデルへと拡張し、コードに実装する。これにより 直線装置における ITG 乱流輸送のシミュレーション研究を行い、実験に向けた提言を行うことを研究目的 とする。

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、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 不安定性の解析が検討されている。ITG 不安定性はイオンの温度勾配と 密度の比η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。そのため、有限ラーマ半径(FLR)効果を考慮したモデルによる解析が必要となる。ジャイロ流体 モデルを用い、ITG 不安定性の径方向分布を含む固有関数を解くための初期値コードを開発し、PANTA における ITG 不安定性の線形成長率のモード構造とパラメータ依存性を明らかにした[1-4]。その一例を 示す。電子とイオンの温度比τ = T_e/T_i を導入すると、τが小さな極限において閾値は



$$\eta_c = \frac{2}{3} + \frac{5}{9}b\tau$$

と評価できる。ここで $b = -\nabla_{\perp}^2$ は有限ラーマ効果を示す。図1に (τ, η) パラメータ空間における成長率の依存性を示す。

図1 (a)大局モデルによる成長率の依存性、(b)局所モデルによる評価(有限ラーマ効果あり)、(c)局所モデルによる評価(有限ラーマ効果なし)

この結果より、閾値は大局モデルと局所モデルでほぼ一致していることを確認した。また、有限ラーマ効果 が閾値を決める上で重要なパラメータになっていることも確認できた。

さらに非線形コードを開発する上で、r=0におけるm=1モードの境界条件を検討した。密度の発展方程

式は円柱近似では

$$\frac{dn}{dt} + \nabla_{\parallel} u_{\parallel} + \left(1 + \eta_{\perp} \frac{\widehat{\nabla}_{\perp}^2}{2}\right) \frac{1}{L_n} \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} = 0$$

と与えられる。r = 0の近傍において $\Psi \sim r^m$ とするとm = 1に対し、 L_n が空間的に一定の場合、左辺第3項は有限の値を持ってしまうことが判明した。その状況を図2に示す。



図2m = 1の場合の固有関数を示す。上段左: T_{\perp} 、上段右: T_{\parallel} 、下段左:n、下段右: v_{\parallel}

従って、 L_n が空間的に変化し、r = 0において $1/L_n \rightarrow 0$ とならない限り、左辺第3項は有限の値にとどまってしまい、 n, u_{\parallel} の境界条件と整合しなくなる。次年度に向けた課題として、自己無撞着な境界条件を導入するとともに、非線形項の評価するための数値スキームを検討することが考えられる。

参考文献

[1] T. Ohno, N. Kasuya, M. Sasaki, M. Yagi, 'Global Mode Analysis of Ion-Temperature-Gradient Instabilities Using the Gyro-Fluid Model in Linear Devices', Plasma Fusion Res. 13, 1401081 (2018).

[2] N. Kasuya, T. Ohno, M. Sasaki, M. Yagi, 'Comparison of reduced sets of a gyro-fluid model for iontemperature-gradient instabilities in cylindrical plasmas', Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (Kanazawa, Japan, Nov. 12-17, 2018) BP-12

[3] 糟谷直宏, 大野友嗣, 佐々木真, 矢木雅敏, 基礎実験装置のプラズマ不安定性に関するシミュレーション研究、第16回統合コード研究会(春日市、2018年11月29日-30日)3-5

[4] 糟谷直宏, 大野友嗣, 佐々木真, 矢木雅敏, 円筒プラズマにおけるイオン温度勾配不安定性に対する有限ラーマ半径効果,日本物理学会第74回年次大会(福岡市、2019年3月14日-17日)17aK310-3

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)

タングステン合金の熱負荷特性に及ぼす添加元素の影響

京都大学複合原子力科学研究所 徐 **虬** 九州大学応用力学研究所 徳永和俊

1. 目的

一般的に、タングステンは低温脆化、再結晶脆化及び照射脆化などの弱点で核融合炉プラズマ対向材 として問題がある。近年、W-Y2O3合金が良い力学特性を示したため、注目されている。本研究では、 W-Y2O3合金を用いて、重水素保持特性を調べた。

2. 実験方法

液相ドーピング法及び放電プラズマ焼結する方法(SPS)でタングステン合金 W-Y₂O₃を作製した。作製途中に 50%の冷間加工の工程を入れた。この合金から厚み 0.2mm、直径 5mm 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。比較のため、1773K で 1 時間焼鈍した市販の純タングステンも使われた。核融合炉の中性子照射を模擬するために、両者に対して、京都大学大学院工学研究科附属量子理工学教育センターに設置されたタンデム型静電加速器を用いて、室温で Fe イオン照射を行った。Fe イオンエネルギーは 1MeV であった。損傷ピーク所の照射量は 0.3dpa と 1dpa であった。その後に、Fe イオンの未照射試料と照射した試料に対して、更にマグネットセパレータ付重水素イオン銃(オメガトロン社製)を用いて 5keV で重水素を注入した。重水素の照射量は 1.0×10²⁰ から 1.0×10²² D⁺/m² であった。注入後、1073K まで昇温脱離ガス分析法(TDS)により重水素の放出を調べた。昇温速度は 1K/s であった。

3. 実験結果と考察

図1にFeイオン未照射した純WとW-Y₂O₃合金における重水素照射による重水素放出の照射量依存 性を示す。比較のため、SPS で作られたタングステンの重水素放出の特性も示す。図1(a)、(b)と(c)は それぞれ市販の純タングステン、SPS の純タングステン及びW-Y₂O₃合金の重水素脱離スペクトルであ る。すべての試料においては、放出された重水素の量が照射量の増加と共に増加した。SPS のタングス テンの重水素放出量が最も多かった。このことからドープされたY₂O₃粒子がタングステン中の重水素 の蓄積を抑制したことが分かった。市販の純タングステンにおいては、1.0×10²² D⁺/m²まで照射しても重 水素放出ピークは1つしかなかった。その放出ピークの温度は430K であった。これは、試料表面の照 射によって形成された欠陥にトラップされた重水素だと考えられる。一方、SPS の純タングステンは照 射量の増加につれて、600K で新たに放出ピークが現れた。W-Y₂O₃ 合金においては、SPS の純タング ステンと同様に700K で新たに放出ピークが現れた。この放出ピークは試料中に既存の欠陥によるもの だと思われる。

図2にFeイオンで損傷ピークの所に0.3dpaまで予照射した純WとW-Y₂O₃合金における重水素照射による重水素放出の照射量依存性を示す。Feイオンの予照射がない試料と同じように、放出された重水素の量が重水素照射量の増加と共に増加した。予照射した純Wの重水素放出量が予照射ない純Wより高かった。また、Feイオンの予照射で欠陥を形成したので、750K付近で二つ目の重水素放出ピークが現れた。W-Y₂O₃合金においても、同様な結果が得られた。すなわち、予照射した試料の重水素放出量が予照射ない試料より高かった。また、予照射した試料の二つ目の重水素放出ピークも高かった。これは、欠陥密度は高い方が重水素をトラップ可能性は高いことを示している。一方、図1に示したように、W-Y₂O₃合金が純Wより重水素放出量が高かったのに対して、Feイオン照射したW-Y₂O₃合金においては、純Wに比べ、トータル重水素放出量がほとんど変わらなかった。特に、試料表面の欠陥にトラップされた重水素放出量が抑えられた。従って、Y₂O₃粒子を添加した合金の耐照射性が向上された。Feイオン予照射の照射量を増加しても同じ結果が得られた。

4. まとめ

液相ドーピング法及び放電プラズマ焼結する方法を用いて、W-Y₂O₃合金を作製した。この合金に 対して、重水素照射を行い、重水素保持特性を調べた。また、中性子照射を模擬するため、Feイオン照 射を行い、重水素保持特性に及ぼすFeイオン照射効果を調べた。ドープされたY₂O₃粒子がタングステン 中の重水素の蓄積を抑えただけではなく、W合金の耐照射性も改善された。



図20.3dpa(損傷ピーク)までFeイオン予照射したWとW-Y203合金の重水素放出の温度依存性

直線プラズマ装置 PANTA における音速分子ビーム入射装置を用 いた密度プロファイル制御

核融合科学研究所 小林達哉

1. 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 を入射 し、密度揺動パターンの応答を観測することを本研究の目的とする. また、揺 動パターンの変化の要因を同定することを最終的なゴールとする. 本年度は乱 流状態のアルゴンプラズマにヘリウム、ネオン、アルゴン SMBI を入射した際の 密度・電位プロファイルの変化や、揺動の応答を観測した.

2. SMBI 実験

2.1 実験条件

図1(a)に PANTA の schematic view (top view)を示す. 円筒の真空容器の片 側底面で RF により生成されたプラズマを軸方向磁場で閉じ込める. 反対側 の底面ではプラズマがターミネートされており,中性化したガスを排気する ためポンプが取り付けられている. 円筒側面にはプラズマを取り囲む計測ポ ートが配置されている. 本研究では,主に 64-channel 周方向プローブアレ イ 5-channel 径方向プローブアレイ (tip 間隔 1cm)を用いる. プラズマ生 成部から 1375mm 離れた位置に図1(b)に示す SMBI 装置が取り付けられている. 本研究では, SMBI 特有の局所的にフォーカスした入射特性は積極的に用い ず, むしろ長時間パルス入射で装置全体にガスを行き渡らせることを目的と する (ガスパフ装置として用いる). パフするガス種は, He, Ne, Ar を用い る. 1回のガスパフで, 装置内に満たされている中性ガスと同程度の粒子数 が供給される.



図 1. (a) 直線装置 PANTA の schematic view. (b) SMBI 装置.

2.2 実験結果

図 2 は典型的な放電波形を示す. t=0.3s でガスパフを開始し, 50ms 継続す る. ガスパフが行われている間 He I 発光強度は増加し, ガスパフ終了後も 微減はするが維持される. プラズマ密度を主に反映していると思われるイオ ン飽和電流はガスパフ後もほとんど変化がない. このことから, 入射された ヘリウムはほとんど電離されず, 中性のまま装置内に留まっていることが考 えられる. 図 2(c)のスペクトルの変化をみると, Gas puff 後, 高周波成分 (f>5 kHz)が減り低周波成分(f<5kHz)が増える.

図3に、He, Ne, Ar パフ時の、イオン飽和電流と浮遊電位の変化を示す. イオン飽和電流に関しては、Ne 入射でほぼ変化なし、He 入射は勾配が微減、 Ar は全体的に増える傾向にあった. 一方浮遊電位に関しては、He で勾配増、 Ne で微増、Ar は勾配減となった. これらの変化が Gas puff の直接的影響に よるものか、Gas puff が揺動を変化させたことによる影響かを議論する必要 がある.



図 2. 放電の時間発展. (a) RF 入射パワー, 反射パワー, ガスパフトリガ及び He I 発光ライン強度, (b)5-channel probe を用いて計測した r=2-6cm の平均イ オン飽和電流波形, (c)r=4cm で計測されたイオン飽和電流揺動スペクトルの時 間発展



図 3. (a) He, (b) Ne, (c) Ar ガスパフ入射前後のイオン飽和電流プロファイ ル及び(d) He, (e) Ne, (f) Ar ガスパフ入射前後の浮遊電位プロファイル



図 4. (a) He, (b) Ne, (c) Ar ガスパフ入射前のイオン飽和電流 2D スペクトル 及び(d) He, (e) Ne, (f) Ar ガスパフ入射後のイオン飽和電流 2D スペクトル

図 4 には、ガスパフ入射前後の周波数—周方向モード数スペクトルの比較を示 す. He ガスパフでは、4kHz のモードパワーが増え、高周波成分が減る. また、 m=-1 の Mediator のパワーが減る. Ne ガスパフは、その前後でイオン飽和電流 のスペクトルにほとんど変化が見られない. Ar のケースでは、全体的にスペク トルピークが低周波側にシフトしている. ガスパフ後のスペクトルは、単純に ソースガス圧を上げた際の放電のスペクトルと良い一致を示す.

He と Ne を比較すると、中性ガス数、プロファイルの変化はよく似たものである のにも関わらず、He では乱流スペクトルに有意な変化が見られ、Ne では見られ なかった. 今後は入射ガス量のスキャンを行い、入射ガス種の違いが揺動スペ クトルにどの様に影響を及ぼすかを議論する.

3. まとめ

直線プラズマ装置 PANTA において中性ガスパフ装置を開発した. He, Ne, Ar パフ 実験を行い,次に列挙する変化を得た.

1. He gas puff:

・イオン飽和電流プロファイル:勾配が微減

- ・浮遊電離プロファイル:勾配が増
- ・揺動スペクトル:低周波数揺動のパワー増
- 2. Ne gas puff:
 - ・イオン飽和電流プロファイル:ほとんど変化なし
 - ・浮遊電離プロファイル:勾配が微増
 - ・揺動スペクトル:ほとんど変化なし
- 3. He gas puff:
 - ・イオン飽和電流プロファイル:密度が全体的に増えた
 - ・浮遊電離プロファイル:勾配が減

・揺動スペクトル:ガス入射後は、ソースガス圧を上げた際の揺動スペクト ルとよく一致した.

研究組織

稲垣滋(九大応力研),佐々木真(九大応力研)

電磁的ジャイロ運動論解析結果に基づく乱流輸送係数を用いたダイナミクスシミュレーション

核融合科学研究所 登田慎一郎

磁気核融合エネルギーを実現するためには、乱流輸送の定量的な予測は最も重要な課題の一つで ある。最近、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的シミュレー ションが行われている。トカマク、ヘリカルプラズマにおけるジャイロ運動論的解析結果は実験観 測結果と比較されている。トカマクプラズマでは、時刻ステップごとに直接ジャイロ運動論的解 析と結合させる輸送シミュレーションが大域的にされている。ヘリカルプラズマにおけるジャイ ロ運動論的シミュレーションはトカマクプラズマと比べて、はるかに大きい計算資源を使う。なぜ なら、前者はヘリカルリップル構造を捉えるために、磁力線に沿った多くのメッシュ点を必要とす る。特にヘリカルプラズマでは、非線形ジャイロ運動論的シミュレーションを統合輸送シミュレー ションコードと結合させるのは簡単でないので、高速に非線形解析結果を近似することができる 予測モデルが望まれている。乱流輸送に関する予測モデルは、大型ヘリカル装置 (LHD) での統合 輸送コードの中で他のシミュレーションコード (例えば新古典輸送コード) と、低計算資源を用い て、結合することができる。LHD においてジャイロ運動論的シミュレーションのイオン乱流時間 スケール~10µs と輸送シミュレーションの時間スケール~100ms は大きく違うので、ジャイロ運 動論的輸送モデルを用いた動的輸送シミュレーションを行うのはチャレンジングな研究課題であ る。

本研究では、粒子、熱輸送の拡散係数や流束をモデル化するために、数値シミュレーションによ り、電子とイオンの両方のジャイロ運動論的方程式を解析した [1]。最初に、イオン温度勾配 (ITG) モードが不安定化しているときに、LHD の高イオン温度放電において、非線形シミュレーション から電子、イオン熱拡散係数を概算した。乱流ポテンシャル揺動と帯状流ポテンシャル揺動に関す るモデル関数を電子、イオン熱拡散係数について示した。次に、線形成長率と帯状流の線形応答に 関する特徴的な量(帯状流崩壊時間)を評価するために、線形ジャイロ運動論的シミュレーション を行う。モデル関数の二つの量(乱流ポテンシャル揺動と帯状流ポテンシャル揺動)は、混合長概 算に関係する線形量と帯状流崩壊時間で近似される。線形シミュレーション結果を熱拡散係数モデ ルに用いることにより、電子、イオン乱流拡散係数に対する非線形シミュレーション結果を再現す ることができた。密度勾配が、LHD プラズマでは径方向の数点で、ゼロに近くなるので、粒子輸 送に関する信頼できる拡散係数モデルは示すことができなかった。非線形シミュレーション結果を 定量的に再現するために、電子、イオン熱輸送に関する準線形流束モデルを提唱した。非線形シ ミュレーション結果である電子、イオン熱流束は、熱拡散係数のモデルの正確さと同程度で、準線 形流束モデルにより再現される。さらに、LHD での平坦化した密度分布でさえも適用できる準線 形粒子流束モデルを提唱した。したがって、ジャイロ運動論的解析結果に基づく、熱拡散係数モデ ルと準線形流束モデルのような輸送モデルを示した。粒子輸送に関する準線形流束モデルは提唱 することができたが、粒子拡散係数モデルは提唱することができなかった。一方、拡散係数モデル は、2つの線形ジャイロ運動論的シミュレーション結果で評価される。準線形流束モデルが非線形 解析結果を再現するために概算されるとき、線形解析結果である流束と揺動ポテンシャルの比が、 混合長概算に関係する線形量と帯状流崩壊時間に加えて必要である。輸送シミュレーションコード に流束と揺動ポテンシャルの比を取り入れるのは現在のところ困難である。輸送コードにイオン の熱拡散係数モデルを取り入れる方法はすでに報告している [2]。

乱流輸送について、ジャイロ運動論的解析結果に基づいた熱拡散係数モデルや準線形流束モデルを 用いて、動的な輸送シミュレーションを行った [3]。新古典輸送については DGN/LHD データベー スを用いている。イオン温度に関する動的シミュレーションの際に、イオンの熱輸送を評価する ために、イオン熱拡散係数モデルを用いた。電子運動についてもジャイロ運動論的方程式の解析 を行うと、LHD でのショットナンバー 88343 での高イオン温度プラズマの実験結果と矛盾しない、 イオン温度分布に関するシミュレーション結果が得られることがわかった。また、乱流輸送が新 古典輸送よりも優位である。そして、実験結果のイオン温度分布と比べると、輸送について硬直 性 (stiffness) が強いことを示した。低イオン温度プラズマについても同様の解析を行い、イオン 温度分布の実験結果が、シミュレーション結果と矛盾しない。この時、イオン温度勾配不安定性 による乱流輸送が新古典輸送より小さい領域が広い。また、電子熱拡散係数モデルと電子準線形 熱流束モデルを用いて、高イオン温度プラズマと低イオン温度プラズマについて、電子温度分布 に関するシミュレーションを行い、実験結果と比較できるシミュレーション結果を得た。この時、 電子準線形流束モデルは、イオン熱拡散係数モデルを用いて、電子準線形熱流束とイオン準線形 熱流束の比から評価される。電子熱輸送モデリングの際、イオン温度勾配不安定性に対しての電 子温度勾配を含める研究は今後行われる。ジャイロ運動論的乱流輸送モデルを輸送シミュレーショ ンに、低計算機資源で取り入れる方法 [2] を用いた。非線形結果を再現する簡約化モデルを用いた 時に、輸送シミュレーション結果である温度分布は、実験結果と矛盾しないことがわかった。

- [1] S. Toda et al., *Phys. Plasmas* Vol. 26 012510 (2019)
- [2] S. Toda et al., Journal of Physics: Conference Series 561, 012020 (2014)
- [3] S. Toda et al., Plasma and Fusion Research submitted (2019); The 27th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research and The 13th Asia Pacific Plasma Theory Conference, November 19-22, 2018, P1-26

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

大阪府立大学工学研究科 堀史説

はじめに

物質中の水素の材料への影響は様々な分野で重要な問題である。特に水素脆化や水素貯 蔵などの観点から重要な課題の一つである。核融合炉など大量の放射線に晒され結晶とし て損傷を受けるような特殊な環境下では、その挙動がプラズマの安定化、熱伝導および強 度などの材料特性劣化を促進するなど密接な関係を有しており、これらの相互作用につい て様々な研究が進められている。このような材料中の水素の状態は他の元素に比べて非常 に難しく、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。加えて合金中の格子欠陥も必ずしも単純な状態で存在するわけではない。こ のような格子欠陥に対して陽電子消滅法は原子レベルでの空孔の検出に優れ、対消滅時の 局所的な電子密度分布を簡便に詳細な評価が可能である。

一方、現実問題として体心立方格子(bcc)からなる金属では水素同位体の貯留が大きな問題になっている。例えばタングステンに照射によって空孔型欠陥が導入されると、多量の水素が捕獲されるという報告がある。しかし bcc 金属が必ずしも同様の水素捕獲が起こる訳ではない。我々のこれまでの研究で同じ bcc 構造を有する金属間化合物でも空孔当りに複数の水素原子が捕獲安定化する合金系があることが計算によって求められている。B2型規則構造を有する Fe-Al 合金での多量水素捕獲と考えられる空孔挙動を陽電子でも捉えてきた。同様に B2 型構造を有する Fe-Rh 合金においては鉄とロジウムの弾き出し閥エネルギーが大きく異なるため欠陥種の制御が容易であると考え、これまでは電子線照射前後の陽電子寿命測定と水素放出の実験を行い、Fe-Al 同様に空孔への水素捕獲が確認された。 今年度はさらに同時計数ドップラー測定などを積み重ね、照射による空孔種生成の比率およびそれらへの水素捕獲についてより詳しく検討した。

実験方法

アーク溶解にて作成した等比組成(化学量論組成)のFe-Rh合金インゴットをおよそ10 mm×10mm×1mmの板状に切出し表面を鏡面研磨した。この試料を3×10⁻⁴ Paの真空 中で600℃、120時間の焼鈍を行均一化熱処理したものを用い、エックス線回折によりB2 単相で特に今回は未照射でできるだけ残留空孔のない試料を事前に陽電子消滅測定で確認 した試料を用い電子線照射に供した。電子線照射は京都大学複合原子力研究所(KURRI)に て線形型電子線型加速器を用いて8MeVの電子線を照射温度35~40℃で照射量1×10¹⁸ e⁻ /cm²の照射を行った。照射後の試料にチオシアン酸アンモニウム溶液を用いた電解水素チ ャージによる水素の注入を0.3A/cm²で10時間行った。これらの試料に対して、X線回折、 陽電子消滅寿命測定、同時計数ドップラー広がり測定(CDB)定を行った。今回はCDB曲線 の最小二乗によるフィッティングにより空孔の電子状態から空孔周囲の元素比の解析を試 みた。



図1 電子線照射後に水素チャージした Fe-Rh合金の陽電子寿命の経時変化

図1は各試料の陽電子寿命測定結果を示す。 照射によって空孔が導入されていることが わかるが、これまでの寿命計算との比較でロ ジウム空孔ではないかと考えられている。図 2にこれらの試料の同時計数ドップラー拡が りスペクトルの比率曲線を示す。この曲線で は電子線照射後の比率曲線において低運動量



図2 電子線照射および水素チャージした Fe-Rh合金のCDB比率曲線

表 電子線照射前後のCDBから求めた空孔比率

	Fe 空孔:Rh 空孔		
照射前			
電子線照射後	9 : 1		

領域が上昇しており空孔が導入されていることが陽電子寿命の結果と一致している。一方、 高運動量領域に純鉄の電子分布に対応するプロファイルが確認できる。そこで、このプロ ファイルから純鉄及びロジウムの電子運動量分布とのフィッティングにより空孔種の同定 と存在空孔種の比率を求めた。表にその比率を示す。この結果を見ると鉄空孔が多く導入 されいることがわかる。この結果はこれまでの陽電子寿命測定でロジウム空孔が導入され たとの結果に対し整合していないような結果であるが、電子による弾き出し損傷を計算し たところ、8MeV の電子ではおよそ 8:2 の割合で鉄原子の弾き出しが多く起こり、空孔の比 率もこれに従うことがわかった。そのため、ロジウム空孔も導入されるが、この照射では 鉄空孔が優先的に導入されていたことが明示された。一方、水素注入後は陽電子寿命が減 少しており、比率曲線においても低運動量領域が減少していることから、空孔中に水素原 子が捕獲されたことが確認された。以上より、捕獲された水素原子は主に鉄空孔への捕獲 であり、第一原理計算で予想されていた結果と良い一致を示した。

謝辞:本研究を実施するにあたり、共同研究により議論いただきました大澤先生に感謝致 します。また、実験を実施するにあたり、電子線照射にご協力頂いた京大複合研の徐准教 授及び阿部尚也技師に感謝いたします。

研究組織: 堀史説(大阪府大工学研究科)、角倉優雅(大阪府大院生)、鷹野陽弘(大阪府 大院生)、Xu Qiu(京大原子炉)、大澤一人(九大応力研)

核融合力学分野 一般研究

多層グラフェン膜の水素吸収特性に対する窒素添加効果

Effect of doped nitrogen of hydrogen absorption characteristic for multilayer graphene films

名城大学理工学部 土屋 文

Bun Tsuchiya

Faculty of Science and Technology, Meijo Univ.

目的 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。本研究室では、多層グラフェン薄膜を水素(H)供給源とした水素酸素マイクロ燃料電池の開発に取り組んでいる。これまで、本研究室では、ミスト化学蒸着法を用いて作製した多層グラフェン膜は多量の水(H₂O)および Hを吸収し、その吸収された H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、このマイクロ燃料 電池の開発を目指すためには、より低い温度で H を解離する H 供給源を必要とする。本研究では、窒素(N)ドープに より点欠陥を形成させ、H 貯蔵量の増加および H 解離温度の低下を目指すため、イオンビーム分析の一つである反跳 粒子検出(ERD)法を用いて、N ドープされた多層グラフェン薄膜内に蓄積された H 濃度を測定し、また、昇温ガス脱 離(TDS)法により、H の解離温度を調べ、H 吸収・貯蔵・放出特性に対する N ドープの効果について明らかにするこ とを目的とした。

実験方法 ミスト化学蒸着法を用いて、1.3×10⁻³ Pa の真空排気および 1198 K に加熱された石英管内にミスト状のメ ラミンを含んだメタノールおよび 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。N ドープ量を変えるために、メラミンを加熱する温度を 423 および 473 K にした。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 297~303 K 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 573 K までの各温度において 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、空気暴露 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 室温から 573 K 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 N ドープ多層グラフェン膜の ERD スペクトルを測定した。ERD スペクトルから求めた作製後の N ドープ多層グラフ ェン膜中の水素濃度は、多層グラフェン膜中の水素濃度とほぼ同様で H/C=0.74 であり、NRA 法により求めた結果と 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 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、N ドープ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。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った。 加熱温度に対する N ドープ多層グラフェン膜中の捕捉 H 濃度の変化より、N ドープ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 673 K まで全く減少しないことに対して約 373 K 以下の低温で除々に減少し、573 K で約 3 割程度まで減少することがわかった。この結果は、多層グラフェン膜中の水素濃度の変化とほぼ同様であっ た。グラファイトの場合、捕捉 H は 673 K 以上で CH4 の形状で放出されることが報告されているが、多層グラフェ ン膜中の捕捉 H は、H₂O あるいは H₂の形状で放出されていることが推測された。

TDS 法を用いて、N ドープ多層グラフェン膜を室温から 773 K まで 4 K/min の温度上昇速度で加熱し、N ドープ 多層グラフェン膜から放出されるガス種の判別を行った。バックグランド(試料の無い場合)、チタン水素化物(TiH1.99)、 Cu 板のみ、N ドープ多層グラフェン膜および Cu 板から得られた TDS スペクトルをそれぞれ図 1(a)~(d)に示す。図 1(a)および(b)より、H₂、CH₄、H₂O、CO、CO₂がバックグランドとして存在するが、773 K までの加熱により増加 しないこと、H₂が約 500 K で TiH_{1.99}から放出されることを確認した。次に、図 1(c)より、H₂O および H₂が Cu 板 から放出されないが、CO₂および CO がそれぞれ約 500 K および 600 K から放出されることを確認した。図 1 (d)よ り、CO₂、CH₄および H₂が N ドープ多層グラフェン膜および Cu 板からそれぞれ約 400 K、423 K および 623 K か ら放出された。CH₄および H₂の放出は、N ドープ多層グラフェン膜表面から脱離および層間を占有した H 原子同士 の再結合により生じたと考えられる。従って、ERD 法によって得られた 573 K 以下における捕捉 H 濃度の減少は、 歪んだ形状の表面および層間に占有された H が CH₄の形状で放出され、それ以上の温度では C·C 間の欠陥と結合し た H 原子同士の再結合により生じたと考えられる。従って、ERD 法によって得られた 573 K 以下における捕捉 H 濃 度の減少は、歪んだ形状の表面に結合された CH₄の脱離によると考えられる。

まとめ NRA 法、ERD 法および TDS 法を用いて、真空内で約 573~773 K まで加熱された N ドープ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において、多量の H₂O が表面に吸着され、微量の H が層間に占有されていることがわかった。また、これらの捕捉 H 濃度は約 373 K 以下の低温から除々に CH₄の形状で放出され、573 K で約 3 割程度まで減少し、それ以上の温度では H₂の形状で放出されることがわかった。



図1 (a) バックグランド(試料の無い場合)、(b) チタン水素化物(TiH_{1.99})、(c) Cu 板のみ、(d) N ドープ 多層グラフェン膜および Cu 板を室温から 773 K まで加熱したときに得られた TDS スペクトル。

ジルコニウム合金中の水素同位体の挙動に関する第一原理計算

- 琉球大学教育学部 岩切宏友
- 若狭湾エネルギー研究センター 安永和史
- 京都大学エネルギー理工学研究所 森下和功
- 九州大学応用力学研究所 渡邊英雄,吉田直亮

【研究の目的】

ジルコニウム合金は燃料被覆管として非常に優れた特性を有し、多くの軽水炉で利用されている。燃料 被覆管として使用を続けていると、水素吸蔵量が増加していくとともに、c軸方向への収縮ひずみが発生す る。これは、ジルコニウム合金中における転位ループの生成が一因となっていると考えられているが、具体 的なメカニズムは明らかにされていない。そこで、本研究では第一原理計算により、ジルコニウム合金中に おける水素の基礎的な挙動や、転位ループとの相互作用等を調べることを目的とした。本年度は燃料被覆 管での使用は見込まれていないが、ジルコニウムを含んだ合金の一種であるBe2Zrを試行的な研究対象と し、水素との基礎的な相互作用に関する研究を実施した。

【研究方法】

本研究では、電子状態を考慮した量子力学計算手法として SIESTA コードを使用した。SIESTA では各原子に帰属する実在波動関数を基底関数として用いており,格子欠陥周辺などの局所的な電子状態を知るための効果的手法である。まず、構造最適化された Be₂Zr 結晶を作成し、この構造の格子間位置に水素を付与することで Be₂Zr 中における水素の捕獲位置の解明や全体的な構造の変化,捕獲エネルギーの計算等を行った。k 点サンプリングは Monkhorst-Pack 法で 4×4×4、擬ポテンシャルのカットオフ半径は 300 Ry である。さらに、各原子に作用する力が 0.005 eV/Ang 以下になるまで構造最適化計算を実施した。

【研究結果および考察】

Be₂Zr 中における水素の固溶状態を調べるために,Be₂Zr の格子間位置に水素を配置し,水素を 含めた構造最適化及びエネルギー計算,分子軌道計算を行った。第一原理電子状態計算における構 造最適化計算は「準安定状態」を探索する手法のため,原子の初期配置の影響を受ける場合がある。 特に,本研究で用いた Be₂Zr は複雑な結晶構造を有する為,水素の初期配置の影響を受けやすい。

そこで、Be₂Zr における結晶構造の対称性を考慮し、結晶構造の性質を代表し得る規約領域内に おいて9パターンの初期配置を設定し、それぞれについての計算を行った。その結果、格子間位置 における6種類の存在位置(サイト)を発見した。各サイトにおける水素の固溶エネルギーを表1 に示す。もっとも安定なサイト(Site-1)は2個のBeと3個のZrが形作る6面体(三方両錐体) の中心であり、このときの固溶エネルギーは-0.929 eV であった。このことは、Be₂Zr は水素に対 して発熱型の合金であることを示しており、大量の水素を固溶しうることが第一原理計算により示 された。

次に、Be₂Zr 中における水素のペアリング効果についての計算を実施した。隣接する格子間サイトに水素が複数存在する場合,近接効果により結合力や反発力が生じ,場合によっては分子化する。

これは Be₂Zr における水素吸蔵量の上限に影響を与える。ここでは,格子間位置で隣接した 2 個の 水素についての計算を行った。水素は表 1 で示したサイトのうち、近接したものを 2 か所選択して 配置し、構造最適化計算を実施した。その際、ありうる限りの近接した格子間水素の組み合わせを 考慮し、合計 9 パターンについての計算を行った。これを表 2 に示す。その結果、原子間距離が 2.0 Å以下の組み合わせは構造最適化計算の際に水素同士が強く反発し、安定なペアとして存在す ることができなかった。この結果により、Be₂Zr 中の格子間位置においては水素同士のブロッキン グ効果が作用することが明らかとなった。この結果より、Be₂Zr 中における水素の最大固溶量の導 出を見積もると Be₂Zr のユニットセル中に最大 4 個の水素が固溶できることになり、Be₂Zr 中にお ける水素の最大固溶量は 3.53 wt%であることが示された。

Site-1	Site-2	Site- 3	Site- 4	Site- 5	Site-6
(Be_2Zr_3)	(Be_4Zr_2)	(Be_4Zr_2)	(Be_2Zr_2)	(Be_2Zr_4)	(Be ₆ Zr ₂)
6面体	8面14	8面体	4面14	8面14	12面体
-0.929 eV	-0.688 eV	-0.641 eV	-0.540 eV	-0.099 eV	-0.008 eV

表1 各格子間サイトにおける水素の固溶エネルギー

			. ,,	
2個の水素配置	原子間距離(Å) (計算前)	原子間距離(Å) (計算後)	固溶エネルギー(eV)	水素1個当たりの固溶 解エネルギー(eV)
Site1-Site1	2.39	2.44	-1.85	-0.92
Site1-Site2	1.46	解離(反発による)	-	-
Site1-Site3	1.19	解離(反発による)	-	-
Site1-Site4	2.30	2.29	-1.43	-0.72
Site2-Site2(第1近接)	1.68	解離(反発による)	-	-
Site2-Site2(第2近接)	2.07	解離(反発による)	_	-
Site3-Site3	2.07	解離(反発による)	_	-
Site4-Site4(第1近接)	2.07	2.09	-1.10	-0.55
Site4-Site4(第2近接)	2.73	2.60	-1.06	-0.53

表2 Be₂Zr 中の格子間水素のペアリング効果

(成果発表)

特になし

構造材料中の水素挙動に及ぼす水素導入方法の影響

Influence of Charging Methods on Hydrogen Behavior in Structural Materials

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照射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(ステンレス鋼やアルミニウム合金等)中の 水素の透過・放出挙動が、水素導入方法(電解水素チャージ法、水素プラズマチャージ法等)の違いに よりどのように変化するかを調査することを目的とする。そのために、茨大の電解水素チャージ装置や 水素プラズマチャージ装置と、九大応力研の高エネルギーイオン発生装置や SEM・TEM の微細組織観察 装置を共同研究に利用する。その結果、材料に関する豊富な知識と経験を共有しながら核融合実験装置 等の構造材料の高性能化研究を推進するものであり、両者にとってメリットが大きい。

2. 実験方法

2.1 水素プラズマチャージ法

本年度はまず、研究の第一段階として、茨大の水素プラズマチャージ装置(イオンプレーティング装置)により、材料への水素導入を試みた。水素導入の有無については、アルミニウム基板上の酸化アル ミニウムが水素プラズマにより、純アルミニウムに還元されたことで確認する。

本研究では、非平衡の反応を低温で発生させることが期待できるプラズマを利用して、酸化アルミニ ウムの水素プラズマによる還元を試みた。

試料としては、表面を硫酸法による陽極酸化したアルミニウム板を用いることにした。アルミニウム が基板となることによりプラズマ処理時に電位を印加しやすいうえに、厚い膜を生成することができ、 結果を容易に評価できるためである。まず、0.5mm 厚に圧延した 4Nの純アルミニウム板から縦 15mm、 横 50mmの試料を切り出し、陽極酸化およびプラズマ照射を行う面に#400から#2000までの湿式研磨を 施した。その後、試料表面に付着している汚染物などを除去するため、アルカリ洗浄とデスマット処理 を行った。アルカリ洗浄には、10%水酸化ナトリウム水溶液を用いて、室温で1分間の条件で洗浄を行 い、さらに、10%硝酸水溶液を用いて、室温で1分間の条件でデスマット処理を行った。また、アルカリ 洗浄の前後とデスマット処理後には、水道水による超音波洗浄を十分に行った。

その後、10%硫酸水溶液を用いて、室温で10分間の条件で陽極酸化処理を行った。陽極酸化皮膜のついたアルミニウム基板について、イオンプレーティング装置(AOT-IP-500W)を用いて、水素プラズマを 照射した。陽極酸化前後およびプラズマ照射前後の各段階において、試料表面の SEM/EDX 分析を行い、 陽極酸化により生成した酸化アルミニウムが、水素プラズマ照射により、純アルミニウムに還元された かどうかを確認する。また、水素プラズマを照射した後、基板温度が 35℃以下まで低下した段階で、真 空中で金プローブを基板に接触させ、金プローブと基板が接触してから、試験片の中心に向かって 40 μm地点と 50 μm地点間(10 μm)を照射面に沿って移動させ、接触抵抗や電圧電流特性を測定し、酸 化アルミニウムが還元されたかどうかを確認する。

3. 実験結果及び考察

図1に水素プラズマの照射原理を示す。真空状態で、直流電圧により、チャンバー内の水素ガスを イオン化し、試料にマイナス電荷を印加することで、試料表面に水素プラズマを導入させる。

図2に水素プラズマ照射前後のEDX分析結果を示す。水素プラズマ照射前後において、原子数濃度 分布の変化が認められず、SEMによる表面の膜厚の変化も確認できなかった。したがって、今回の実験 では、材料表面への水素の導入はできなかった。今後の対策として、試料温度を上げての再実験や他のプラズマ照射装置(UBMS: UnBalanced Magnetron Sputtering)での実験を再検討する必要がある。



図2 水素プラズマ照射前後の EDX 分析結果

4. まとめ

本研究は、核融合実験装置等の構造材料中の水素挙動が、水素導入方法によりどのように変化するか 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ことを目標に、構造材料(アルミ ニウム合金)の表面を鏡面仕上げした後、水素プラズマチャージ装置(イオンプレーティング装置 AOT-IP-500W)を用いて、材料表面に水素原子の導入を試みた。しかし、材料表面への水素の導入が出来なか ったので、今後の対策として、試料温度を上げての再実験や他のプラズマ照射装置(UBMS:UnBalanced Magnetron Sputtering)での実験を再検討する必要があった。

参考文献

(1) 井上泰一, 伊藤吾朗, 佐藤直幸, 池畑 隆, 中村雅史, 第134 回春期大会講演概要集, 軽金属学会, 熊本大学, (2018.5.26-27), pp. 71-72.

タングステンの熱負荷特性に及ぼす再結晶の影響

茨城大学工学部 車田 亮

【目的】プラズマ閉じ込め装置のダイバータ板の表面材料としてスパッタリング特性や熱特性が良好な タングステン(W)が使用されている。しかし、Wは低温脆化、再結晶脆化、照射性化の問題がある。特 に、高熱負荷を受けるタイバータ板では、再結晶脆化が問題である。このため、再結晶温度が高く、さ らに、高温強度が高い K や La ドープW合金が試作されている。しかし、これらのW合金は、ディスラ プションや ELMs 時のパルス熱負荷より突沸等が発生し損耗量が大きいことが明らかとなっている。こ れに対して、研究代表者らは、熱間等方圧加圧法(HIP)により製作されたW(HIP-W)について研究を進め、 最も普及している粉末焼結Wとは組織が異なるためその特性も大きく異なり、たとえば、溶融接合用の 電極に使用した場合特性が良好なことを明らかにしてきた。また、粉末焼結Wのような圧延組織を持つ Wとは異なり残留歪みも小さいと考えられることから再結晶した際の結晶粒の粗大化の影響も少ない ことが予想される。本研究では、粉末焼結Wと共に、HIP-Wの再結晶挙動やこれらが熱負荷特性に及ぼ す影響を明らかにし、ダイバータ板の表面材料としての性能を評価することを目的とする。

【実験及び解析】本年度は、W 圧延材、及び再結晶 W 材に対する電子ビーム熱負荷実験について報告 すると共に、昨年度報告した強度試験結果との対応について考察した。試料はアライドマテリアル製の W 圧延材、及びこの W 圧延材を再結晶処理した再結晶 W 材を使用した。試料サイズは 10mm×10mm ×1mm である。電子ビーム熱負荷装置を用い、試料は Cu 製の試験台に 5mm ¢ の孔が開いた W 製の押 さえ板で機械的に固定した。温度測定には低温、高温用の2台の二色放射温度計を使用し、ビーム照射 部の温度を測定した。電子ビーム熱負荷装置の加速電圧は 20kV でビームサイズは約 3mm ¢ である。ま た、試料に 100V の電圧を印加し、2 次電子や熱電子の放出を抑えた状態で試料電流を測定し熱流束を 求めた。2秒間の照射で電子ビームの照射部の最高到達温度が約 1300℃に達するようパワーを調節した。 2 秒間のビーム照射の後、冷却時間として 7.5 秒間保持することで、1 サイクルのトータルの時間を 9.5 秒とした。このようなサイクルを、各試料に対し計 200 回繰り返した。また、損傷過程を確認するため 適宜取り出し、走査型電子顕微鏡 (SEM)を用いて表面観察を行った。さらに、これらの実験結果を引 張試験における応力・歪み曲線の温度依存性を元に考察した。

【結果】図1に繰り返し熱負荷実験時のビーム電流と試料温度を示す。ビーム電流を調節することで、 最高到達温度が約1300℃となる温度変化を繰り返すことができた。また、表面温度は照射から2秒後に 最高温度に達し、ビーム OFF後、表面温度は下降し、次の照射開始と共に上昇している。図2に繰り返 し熱負荷を行った試料の SEM 像を示す。繰り返し熱負荷前では、W 圧延材の表面は滑らかで粒界部に 凹凸などは識別できない。再結晶W材では、表面は滑らかであったが、SEM 像の明暗により粒界が確 認できた。これは、再結晶材であるため、結晶方位の違いによる入射電子線のチャンネリングにより発 生する SEM 像の明暗がはっきりしているためであると考えられる。熱負荷を20回繰り返し(20サイク ル)後の観察では、試料表面が変形していた。W 圧延材では結晶内に白線が確認でき、塑性変形による 転位の移動により生じたすべり線であると考えられる。また、結晶粒界にも変形が生じていることがわ かる。再結晶W材ではW圧延材よりも、表面の変形が大きい。結晶粒内はW圧延材より多くのすべり 線が見られ、結晶粒界も凹凸が生じていた。40サイクル後では、W圧延材、及び再結晶W材共に新た なすべり線や結晶粒界部分の凹凸に大きな変化は見られなかった70サイクル後では、W 圧延材では多 少凹凸が激しくなっているが、大きな変化は見られなかった。また、再結晶W 材も同様に顕著な変化 は確認できなかった。200サイクル後では、特にW 圧延材の損傷が急激に進み、表面の凹凸は激しくな り、結晶粒内、結晶粒界共にミクロなき裂が確認された。

【考察】図2に示されたように20サイクル後のW圧延材では結晶内と結晶粒界で変形が見られたが、 再結晶W材ではより大きな塑性変形によると思われる表面形状変化が確認された。また、引張試験の 結果、再結晶化により降伏応力が約1/3に低下すると共に、延性が発現する高温では、W圧延材では約 10%の伸びに対して、再結晶W材では約60%近く伸びることができることが分かった。従って、再結 晶 W 材では低い応力で塑性変形し、さらに伸び量も大きいため W 圧延材と比較し大きな表面形状変化 が発生したものと考えられる。一方、さらに繰り返し熱負荷を加えた 200 サイクル後では、W 圧延材で 微細な表面形状変化やミクロなき裂が発生している。これは、W 圧延材の場合は延性が発現する高温で

も伸びは10%と再結晶材に比べて小さいため、ミクロ なき裂等の破壊が発生したものと考えられる。また、 20サイクルから70サイクルまでは、W 圧延材、及び 再結晶 W 材共に大きな表面形状変化は見られなかっ た。これは、初めの数回で塑性変形を起こした後硬化 し、塑性変形による表面形状変化が起こりにくいため であると考えられる。しかし、W 圧延材ではさらに繰 り返し熱負荷による熱疲労により欠陥が蓄積され、同 じ応力でもき裂発生による破壊につながったものと 考えられる。また、延性が発現する高温では、再結晶 W 材では、粒界における破壊応力よりも粒内での降伏 応力が小さいため、粒界破壊は発生しなかったものと 考えられる。



電流と表面温度変化(W 圧延材)



図2 W 圧延材、及び再結晶 W 材の電子ビーム照射による表面形状変化(SEM 像)

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

昨年度は、重イオン照射されたジルカロイ2(Zry-2)試料中の損傷及び非損傷領域の微細組織を比較することにより、 製造時からの存在と考えられる水素化物の弾き出し環境下での挙動を調査した。その結果、弾き出し損傷により150 nm 未満のサイズの水素化物の密度が低下する現象が確認され、水素化物と弾き出しにより生じた空孔との反応により水素 (H)がZr母相中に再固溶したと考察した。

ジルカロイ4(Zry-4)は、加圧水型の軽水炉(PWR)の燃料被覆管材料として用いられている。Zry-4のZry-2と異なる特徴は、成分元素にNiを含まないこと及び製管時の加工に伴う転位が残存していることである。本年度は、Zry-4に元来存在する析出物について、その構成元素・サイズ・体積密度を調査した結果について報告する。

実験方法

試料は、Zry-4の厚板をダイヤモンドワイヤーソーで六方晶の a 面に平行に切断後、ダイヤモンドシートで手研磨した 100 µm 厚の板状試料である。板状試料は 3 mm ϕ の円盤形に打ち抜き、電解研磨法 (ツインジェット法) やイオン研磨 法を併用して TEM 観察用に薄膜化した。ツインジェット電解研磨には九州大学応用力学研究所の TenuPol-5 を、イオン 研磨には若狭湾エネルギー研究センターの PIPS (PRECISION ION POLISHING SYSTEM、Model 691、Gatan) を それぞれ用いた。ツインジェット法による薄膜化条件は、電解液としてメタノール 950 ml、過塩素酸 50 ml の溶液を用 い、25 V、-40°Cである。イオン研磨による薄膜化条件は、円盤試料の中心領域が開孔するまで試料表裏を複数回反転し ながら 6 kV の Ar イオンを照射、入射角は 6°である。さらに、仕上げ加工として 2 kV の Ar イオンを入射角 6°で 10 min 照射した。ION BEAM MODULATOR は DOUBLE、2 つのイオン源配置は共に TOP である。このイオン研磨によ り、ツインジェット研磨では得にくかった極薄領域を開口部周辺にもつ TEM 観察に適した試料が作製された。試料の微 細組織観察には透過型電子顕微鏡 (TEM、JEM-3000F、JEOL)を用い、STEM-BF (Scanning Transmission Electron Microscopy-Bright Field) 像及び STEM-EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) マッピングにより元素分析した。電 子の加速電圧は 300 kV である。

2. 結果および考察

図1左は Zry-4 薄膜の STEM-BF 像(a)、Fe 及び Cr の分布を示す STEM-EDS マッピング(b、c)、これら全てに Zr の分布を重ね合わせた像(d)である。厚膜(電子線の透過強度が低く黒く観察される領域)から試料端の極薄膜(透 けて観察される領域)を含む領域について特性 X 線分析を試みた。STEM-BF 中の黄色破線の矩形領域がそれで、白矢 印方向に X 線の発生しない真空領域を終端に含めた。厚膜領域には、緑および赤の強度が強い点が観察され、それらの 位置関係も一致していることから、Fe 及び Cr を含む析出物が存在していることが分かる。厚膜領域の析出物は STEM-BF 像では電子線透過量が低いため確認できなかったが、長時間の電子線の走査により発生した特性 X 線の積算による元素 分布像により確認可能となった。体積密度が低い対象物の場合、その存在を多数捉えるためには、当然ながら観察すべき 体積が増大する。そこで、TEM の拡大率としては比較的低倍率の 25 k で広範囲かつ十分な厚みも有する領域で観察し た。今回用いた特性 X 線の積算による低密度の微視的対象物の撮像手法は、厚膜試料中の微視的組織に元素分布の局所 的なゆらぎがある際には、その可視化及び定量化に有効な手段となり得ると考える。図1 右は Fe、Cr、Zr の特性 X 線 強度の位置依存性を示すグラフである。試料端には Zr の特性 X 線強度が低くかつその増加が緩やかな領域が存在してい る。一方、試料端から厚膜領域の方向には急激に特性 X 線強度が増加している。膜厚評価には 0002 ブラッグ反射時に生 じる等厚干渉縞を用いた。300 kV 電子の Zr 中での消衰距離は 45 nm である。また、Zr の特性 X 線強度変化も厚み評価

171
に利用した。まず、粗大析出物については d の点線で囲まれた領域(2 μm 四方)に存在する析出物の個数から面密度を 算出、その後、楔形を考慮にいれた厚みで除して体積密度を導出した。厚膜領域には体積密度 8.3x10¹⁸/m³の Fe および Cr を含む析出物が存在していると評価された。粗大析出物のサイズ(長軸の測定値)は 47~330 nm の範囲に分布し、 平均サイズは 130 nm と評価された。

図2は試料端の極薄領域において観察された微小析出物を示す STEM-BF 像である。微小析出物は近傍のもの同士が 合体して成長する傾向があり、例として白破線で示した。微小析出物の体積密度は、2.4x10²³/m³と評価された。また、 微小析出物のサイズは 4~33 nm の範囲に分布し、平均サイズは 14 nm と評価された。サイズは粗大析出物と同様に長 軸の測定値である。微小析出物の元素の組成については、現時点では不明である。微小析出物は粗大析出物の体積密度及 びサイズを比較すると、体積密度は 4 桁高く、サイズは 1 桁小さい値をもつことが明らかとなった。

3. まとめ

試料端近傍の極薄膜及び数百 nm 厚の厚膜を共に一視野に含む Zry-4 を TEM 観察することにより、サイズ及び数密度 が顕著に異なる析出物の存在を明確にした。粗大析出物は Fe-Cr 系、微小析出物の成分は現時点で不明である。

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:島袋瞬、牟田口嵩史(九州大学応用力学研究所技術職員)



図1 Zry-4の微細組織のSTEM明視野像及び元素マップ(左図)。試料厚さを示す特性X線強度(右図)。



表1 Zry-4に含まれる析出物のサイズ及び体積密度。

	サイズ (nm)	体積密度 (m ⁻³)
粗大析出物	130	8.3x10 ¹⁸
微小析出物	14	2.4x10 ²³

図2 試料端の極薄領域において観察された微小析出物。

データ駆動的手法に基づいたトロイダルプラズマの熱輸送特性の理解

核融合科学研究所 ヘリカル研究部 横山 雅之

トロイダルプラズマの熱輸送モデリングを、多数の実験や熱輸送解析結果をデータベースとして、統計的手法 や、いわゆる「データ駆動科学」的手法によって行う試みを行っている。現在の実験での熱輸送特性を説明しう るモデリングを行うとともに、新規の装置や将来の核融合炉の運転制御において、データベース作成のための"学 習実験"を経て同様のデータ駆動的モデリングを行うことで、到達温度などを簡便かつ短時間で予測する上での 有望な手法として確立することが期待される。

統計手法の端緒として、LHD プラズマにおけるイオン熱輸送係数の回帰式導出を行った [Ref: M.Yokoyama, Plasma and Fusion Res. 9 (2014) 1302137, A Statistical Approach for Predicting Thermal Diffusivity Profiles in Fusion Plasmas as a Transport Model.] 際のデータベース (イオン温度 2~7 keV の多数の実験結果に対して、 LHD 実験解析型の統合輸送解析スイート TASK3D-a による熱輸送解析を行った結果:およそ 3000 のイオン熱 輸送係数解析データが含まれる)を九州大学の共同研究者との間で共有した。このようなデータベースの共有は、 データ駆動手法の核融合研究への今後の展開にとって重要なステップである。

赤池情報量規準(AIC)を用いた説明変数の選択、洗濯された変数でのモデルのあてはめ(goodness of fit)の 向上などによって、拡散描像を仮定した際のイオン熱輸送係数が、それぞれのローカルな位置でのイオンのラー マー半径(プラズマ小半径で無次元化)、電子温度とイオン温度の比、イオン温度勾配スケール長(プラズマ大半 径で無次元化)などで決定係数 0.93 というあてはまりの良さで記述できることが最近示された。イオン温度勾配 の情報をモデルのあてはめに用いることができる点が、従来のゼロ次元のエネルギー閉じ込め時間のスケーリン グ則と質的に異なっている特長であり、これにより、イオン熱輸送係数が温度勾配にも依存しているという特性 も浮かび上がっている。

従来の理論的議論に基づく理解と相補的に、このようなデータ駆動手法を応用していくことで研究の進展が図 られていくものと期待している。

運動論的プラズマ・シミュレーションと実験との直接的な Validation 解析

核融合科学研究所 ヘリカル研究部 沼波 政倫

研究の目的

磁場閉じ込め系におけるプラズマ輸送機構の解明と輸送予測は核融合研究における最重要課題 の一つである。プラズマの位相空間分布関数の時間発展を扱うことが出来る運動論的な数値解析 手法は、このプラズマ輸送現象を第一原理的に評価し得る強力な手法として広く用いられている。 近年のプログラムコード開発の進展と大型計算機の性能向上によって、詳細な計算結果を与えら れるようになってきたが、一方で、より定量的な解析や輸送予測、そして、計算結果の妥当性確 認といった数値計算の信頼性に関する課題が重要になってきている。こうした背景の下、本研究 課題では、ジャイロ運動論的シミュレーションによるプラズマ乱流解析と、ドリフト運動論的シ ミュレーションによる新古典輸送解析に対して、これまでに実施した数値計測技法 [1] を用いた実 験計測模擬を行い、実際のプラズマ実験での観測結果と直接的な比較を行うことで、数値シミュ レーションの定量的な Validation の実現を目指す。特に、前年度までの共同研究で進めてきた位 相コントラスト・イメージング(PCI)による数値計測模擬や、重イオンビームプロープ(HIBP) を模擬した電場測定などを実際のプラズマ配位等を対象に実施した運動論的シミュレーションの 計算結果に適用し、運動論的シミュレーションの Validation 手法を発展させる。

研究方法

本研究課題では、局所フラックス・チューブ配位上でのプラズマ乱流現象を扱う局所ジャイロ運 動論的コード「GKV」[2]による磁場閉じ込めプラズマ乱流輸送シミュレーションと、ドリフト運 動論に基づいて大域的な取り扱いが可能な新古典粒子コード「FORTEC-3D」[3]による新古典輸 送シミュレーションの計算結果を対象にして進める。ここで得られ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や、新古典シミュレーションでの粒子密度分布データを計測モジュー ルへ渡し、それを実際の観測手法を模擬しながら計測できるよう、下記に挙げる解析を進める。

• 乱流揺動の模擬計測と磁力線ラベル依存性の解析

前年度までの研究で課題となっていた単一の磁力線ラベルのフラックスチューブにおける乱 流シミュレーションを拡張し、異なる磁力線ラベルに対するフラックスチューブを用意し、 その上で GKV シミュレーションを実行し、そこで得られた乱流揺動分布データ (3 次元空 間上の密度揺動分布データ) に対して、PCI 計測モジュールを用いて揺動スペクトルを取得 する。この結果を実験で観測されたデータと直接比較し、より正確で定量的な輸送解析を進 める。

新古典シミュレーションと電場計測模擬
 FORTEC-3D コードによる新古典粒子シミュレーションでの密度分布データを利用し、重イオン・ビーム・プローブ(HIBP)計測モジュールでの電場計測を目指す。特に、近年、その重要性が指摘されている磁気面上のポテンシャルの磁気面平均からのずれの効果を反映したシミュレーション・データに関する計測模擬を目指し、対象となる新古典輸送シミュレーションの実行と、計測モジュールに渡すべきポテンシャル分布を計算する。

今年度の成果

平成 30 年度に実施した乱流揺動の計測模擬研究では、LHD 配位において異なる磁力線ラベル を持つ別々のフラックスチューブ上での GKV による乱流シミュレーションを実行し (図1)、そこ から得られる乱流揺動分布データに対する揺動計測模擬を実施した。線形計算による予備解析で は、不安定性成長率等に磁力線ラベル依存性は殆どないことが確認されていたが、今回の非線形 乱流シミュレーションでも、乱流揺動の波数スペクトルや帯状流成分の時間発展等について、磁 力線に対する明確な依存性は確認されなかった。この乱流シミュレーションで得た揺動分布デー タに対する PCI 模擬計測結果についても、同様に磁力線ラベル間に差異はなく、ほぼ同一の計測 結果を得た。従って、少なくとも LHD 配位においては、磁力線ラベルを区別することなく、乱流 揺動の計測模擬を実施できることが示された。

次に、FORTEC-3D コードによるドリフト運動論的粒子シミュレーションを実行し、新古典輸 送解析で得られる粒子分布から、HIBP 数値計測模擬ツールに適応可能なポテンシャル分布の計算 を進めた。ここでは、磁気面平均量ではなく、磁気面上で変異分布を持ち、かつ径方向にも分布 を持つ3次元分布としてポテンシャル分布データを計算する。これは、上述のように、粒子輸送 研究の分野でその重要性が指摘されている磁気面上のポテンシャル分布の磁気面平均からのずれ の効果をダイレクトに取り入れられたデータに対応している。また、ここで取得した3次元ポテ ンシャル分布のデータにより、HIBP 計測ツールへの適用が可能になる。



図 1: LHD 配位における磁力線。フラックスチューブ乱流シミュレーションでは、ある特定の磁 力線ラベルの近傍における局所乱流を扱っている。

まとめ

我々はこれまでに、プラズマ輸送の現象に対して、ジャイロ運動論やドリフト運動論に基づい た第一原理シミュレーションを用いて、定性的な議論のみならず、実験結果の定量的な再現をも 目指し、研究を進めてきた。近年の計算機性能の大幅な向上にも助けられ、径方向の輸送フラッ クスなど1次元的な物理量に対しては、実験結果を再現し得る計算結果も得られてきた。しかし、 実験との定量的な比較や再現には、詳細な実験観測データに対して、シミュレーション結果につ いても同等のデータ解析を行う必要がある。その中にあって、実験と対等な条件下で行う数値計 測模擬は、計算機シミュレーションと実際の生の実験データとを、ダイレクトに比較できる最終 的な Validation 手法の一つである。本共同研究課題では、PCI 計測と HIBP 計測の数値模擬に着 目し、定量的な数値計測模擬を進めてきたが、今年度では、局所乱流シミュレーションの磁力線 ラベル依存性に対する評価を行い、計測模擬についての妥当性を確認した。さらに、HIBP 計測模 擬に対応できるよう、新古典シミュレーションからポテンシャルの3次元分布データを取得した。 これを電場計測模擬に適用し、電場計測についても、実験観測との定量的な比較および Validation 解析を進めていきたいと考えている。

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).
- [3] S. Satake, et al., Plasma Fusion Res. 3, S1062 (2008).

LIF を用いた直線装置 PANTA における境界領域の高精度中性粒子計測

九州大学 総理工学研究院 寺坂健一郎

目的

本研究の目的は、直線装置 PANTA における中性粒子の温度や速度を計測し、流 れ場の構造形成における役割を検討することである。近年の研究から、乱流プラ ズマ中の最終的な流れ場の分布を決めるためには、減衰力や境界条件が重要な 情報となる。こうした効果をもたらす重要な自由度として中性粒子がある。本研 究では、高精度レーザー誘起蛍光ドップラー分光システムを PANTA に導入し、 イオンや中性粒子の速度や温度を計測し、プラズマ流形成に対する中性粒子効 果(すなわち減衰力や境界条件)を実験定量的に調査することを目的とする。ま た、九州大学の直線装置 HYPER-II における装置間比較実験を行うことで、流れ 形成の物理素過程に関する普遍性を抽出する試みに着手した。

結果

本年度の研究では、中性粒子計測用のレーザー誘起蛍光 (LIF) システムを直線 装置 PATNA に実装することを目指したシステムの開発を行った。初めに、LIF 計測に実績のある九州大学の HYPER-II 装置において入射系や測定条件の最適

化を行った。プラズマ自発光に埋もれ た微小な LIF 信号を抽出するためにロ ックイン検出法を用いることで、定常 プラズマ中の準安定アルゴン原子の LIF スペクトル (速度分布関数)を得 ることに成功した。飽和吸収分光スペ クトル [図 1(a)]を用いて計測系の精 度を評価したところ、10 m/s 程度の流 れを識別可能であることが明らかとな った。図 1(b)は、 HYPER-II および PANTA 装置で典型的な実験領域とな る導入ガス圧力 0.1 Pa の場合の LIF スペクトルで、流速 30±5 m/s、中性粒



子温度 0.045 eV であり、中性粒子の運動量密度や圧力がプラズマの運動量密度 や圧力に匹敵することが明らかとなった。

次に、本システムを PANTA に 導入するために、図2のように既 存のイオン計測用のLIF システム に中性粒子計測用のユニットを 組み込んだ。中性粒子計測用に 772 nm の波長可変半導体レーザ ーを用いた。従来のシステムと光 軸を合わせることで、電気光学変 調器 (EOM)を用いた振幅変調や 波長計や Fabry-Perot 干渉計によ る波長較正をミラー1 枚の切り替 えで可能にし、効率的な計測が可 能なシステムを構築した。また、 径方向や周方向に加え、軸方向に



図 2. PANTA に構築した LIF システムの概観。中性粒子計測用のシステムを新たに導入。

もビーム入射が可能なシステムを整備した。

PANTA における中性粒子 LIF 計測の初期実験として、吸収分光計測を行った ところ、準安定アルゴン原子の吸収波長で有意な吸収が確認できた。LIF 信号に ついては信号-ノイズ比の改善が必要であり、今後はビームの集光や受光シス テムなどの最適化を行うことで乱流プラズマや過渡現象中の中性粒子の速度分 布関数計測を順次進める予定である。

成果報告

[1] 安部瑛美夏、寺坂健一郎、他3名、「HYPER-II 装置におけるイオンと中性粒子の流れ構造形成」、第35回プラズマ・核融合学会年会、大阪大学 2018.12.4
[2] 青木大輔、小菅佑輔「エンストロフィーを最小化する流れ構造に対する中性粒子の影響」 プラズマ核融合学会 九州沖縄山口支部 第22回支部大会2018.12.15

研究組織

代表者: 寺坂健一郎 (九大総理工) 所内世話人:小菅佑輔 研究協力者: 稲垣滋(九大応力研) 荒川弘之(島根大学) タングステンにおける複合イオン照射下の欠陥形成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、中性子等の高エネルギー粒子が入 射し、水素同位体の捕捉サイトとなる照射欠陥が形成される。そのため、核融合炉における水素 リサイクリングを理解する上で、照射欠陥形成と水素同位体・滞留挙動を関連付けることが重要 となる。しかし、核融合生成物であるヘリウム(He)や炉内不純物である炭素(C)がWに入 射すると、HeバブルやC-W混合層が形成するため、中性子や重イオンの単独照射に比べて、水 素同位体滞留挙動が複雑化することが予想される。そのため、本研究では鉄イオン(Fe²⁺)照射 によって欠陥を導入したWに対して、C⁺・He⁺同時照射を行い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った。また、重水素(D) イオン照射・昇温脱離法(TDS)によってD滞留挙動評価を行うと共にX線光電子分光法(XPS) 分析を行い、欠陥導入W中のC⁺・He⁺同時照射が水素同位体滞留挙動に及ぼす影響を評価した。

【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。量子科 学技術研究開発機構(QST)高崎量子応用研究所の 3 MV タンデム加速器(TIARA)を用いて、室温 にて 6 MeV Fe²⁺照射を 0.3 dpa まで行った。その後、Fe²⁺照射 W 試料に静岡大学にて三種イオン 同時照射システムを用いて、イオンエネルギー10 keV C⁺および 3.0 keV He⁺をイオンフラックス 1.0×10¹⁷ C⁺ (He⁺) m⁻² s⁻¹ にて、1.0×10²¹ C⁺ (He⁺) m⁻² まで室温にて C⁺ · He⁺を同時に照射した後、 九州大学応用力学研究所の透過型電子顕微鏡(TEM)を用いて欠陥形成について観察した。また、 C⁺ · He⁺照射 W に対してイオンエネルギー1.0 keV D²⁺をイオンフラックス 1.0×10¹⁸ D⁺ m⁻² s⁻¹ に て、1.0×10²² D⁺m⁻² まで室温で D⁺照射を行い、昇温速度 0.5 K s⁻¹ にて室温から 1173 K まで TDS を行った。さらに、XPS にて炭素の化学状態の評価も行った。

【結果・考察】

図1に Fe²⁺- C⁺・He⁺同時照射試料および、C⁺・He⁺同時照射試料、He⁺単独照射試料における TEM 写真を示す。各試料において、転位ループ及び直径1~2 nm 程度のヘリウムバブルが形成 していた。C⁺照射および He⁺照射によって形成した転位ループの密度は、Fe²⁺照射によって形成

する密度よりも高いため、Fe²⁺照射後に 各イオン照射をした試料においても大 きな変化は見られなかった。一方で、C⁺・ He⁺同時照射試料では、各イオン単独照 射試料と比較して、さらに転位ループが



図1 各イオン照射試料における TEM 写真

高密度になっていることがわかる。これは、C⁺および He⁺照射の欠陥密度が大きく、照射範囲が重なってい るため鉄イオン照射を付与したものと比べて変化し たと考えられる。He バブルに注目すると、バブルの 大きさや密度は炭素濃度に依らず同程度であり、He バブルの形成では、C⁺照射に依らず He⁺照射フルエ ンスに依存することがわかった。

図2にC⁺・He⁺同時照射WおよびC⁺単独照射W におけるClsのXPSスペクトルを示す。どちらの 試料においても284.5 eV及び283.0 eVにピークが 見られることから、C⁺照射によりW中にC-C結合 及びC-W結合が形成していることが分かった。C⁺ 単独照射では、最表面ではC-C結合が多いのに対し て、C⁺・He⁺同時照射試料では最表面にC-C結合お よびC-W結合が見られた。これらの結果から、同時 照射試料では、照射中にHe⁺照射によってWに照射 されたCがスパッタリングされることによりC濃 度が減少したと考えられる。また、C⁺照射に関係な く同程度のHeバブルの形成が起こったことから、 Cに比べてHeの方がW中で安定に存在すること がわかった。

図3にFe²⁺照射後、各フルエンスにてC同時照射 したW試料における重水素TDSスペクトルを示 す。TDSスペクトルは400K、600K、780Kの三 つのピークからなることがわかった。C⁺・He⁺同時 照射フルエンスの増加に伴いPeak1の重水素滞 留量が増加している。これはC⁺照射およびHe⁺照 射によって表面付近に高密度の転位ループが形 成したためである。また、C⁺・He⁺同時照射によっ てPeak2およびPeak3のD滞留量は減少してい る。これは、He バブルが形成することでHe⁺単独



図 3 Fe²⁺照射後、C⁺・He⁺同時照射した
 W 試料における重水素 TDS スペクトル

照射時と同様にDのバルク方向への拡散が抑制されるためだと考えられる。

以上の結果より、Fe²⁺- C⁺・He⁺同時照射試料では、表面付近で高密度の転位ループの形成に よる D 滞留量の増加が起こる。一方で、He⁺照射による寄与が大きいため、C⁺非照射時と同様に He バブルを形成し、拡散抑制効果によって試料中の全 D 滞留量が減少することが明らかとなっ た。

結晶性固体材料における析出物の加工誘起高速オストワルド成長

東北大金研、熊本大 松川義孝 九大応力研 渡辺英雄

1. 背景

金属材料の強度や、高温クリープ変形(本来塑性変形が起こる臨界応力よりも低い応力で徐々に変形 してしまう現象)に対する耐性、中性子照射損傷に対する耐性は、材料に含まれる析出物の種類や分布 状態によって大きく変化する。後者については例えば、析出量(つまり析出物の総体積)が一定の条件 で比較すると、析出物粒子のサイズが小さいほど数密度は増大し、数密度が大きいほど材料特性は向上 する。析出物のサイズと数密度のバランスは温度に依存して変化する。ある程度高い温度まで加熱する と、系内の自由エネルギーを低下させるために、析出物の表面積を減らす方向に組織が変化する。その 結果、析出物の平均サイズは増大し、数密度は減少する。元々大きい析出物はより大きく成長し、小さ い析出物は消失することになる。これはオストワルド成長と呼ばれる現象であり、熱力学的な駆動力の 下で、析出物同士が原子の授受をすることで発現する。原子の授受は、析出物を構成する原子が一旦マ トリックスに再固溶し、拡散し、別の析出物に辿り着き、吸収されることで達成される。本研究では、 拡散モードの違いが析出物のオストワルド成長に及ぼす影響について検討する。具体的に着目した拡散 モードは、転位を介した高速原子拡散(パイプ拡散)である。転位とは、結晶の内部で nm オーダーの 局所的な原子配列の乱れが線状に連なった、nm から mm オーダーの長さを有する線欠陥である。その 乱れた構造故に、転位においては原子の拡散が容易に起こり、その場合の拡散係数は通常の格子拡散(バ ルク拡散)よりも3桁以上大きいことが知られている[1]。透過型電子顕微鏡を用いたその場観察によっ て、転位で連結された2つの析出物粒子が成長・収縮する速度から、転位1本当たりのパイプ拡散係数 が導出されている[1]。連結する転位が2本の場合は、拡散経路が2つになるという意味で、拡散速度(こ の場合は"ある時間内に授受される原子の数"として検出される)が2倍になる可能性があるが、転位 の本数が拡散に及ぼす影響を定量的に検証した例はない。また、パイプ拡散がオストワルド成長に関与 することで、析出物の平均サイズが最終的にどのように変化するのかを検討した例もない。平均サイズ が変化するのであれば、材料が高温でクリープ変形する際に、耐クリープ特性がダイナミックに変化す るということになる。この情報はまた、材料プロセッシングにおける微細組織制御技術の高度化にも有 用である。本研究はこれらの未解決問題を念頭に置いて開始した萌芽的基礎研究である。

2. 実験方法

試料は軽水炉の燃料被覆管材料として最近開発された Zr-2.5Nb 合金である。これは実機材でありな がらモデル合金並みにシンプルな組織を有しており、マトリックス(hcp 構造の Zr)に1種類の析出物 (bcc Nb)のみが分散している。析出物の平均サイズは 56.8±0.8 nm、数密度は 10²⁰ m⁻³のオーダーであ る。これは完全焼きなまし材であり、マトリックスには転位が殆ど含まれない。完全焼きなまし材に含 まれる転位の数密度(線密度)は一般に 10¹⁰ m⁻³のオーダーである。この合金をそのまま加熱し、種々 の温度でそれぞれ 3 日間熱処理した結果、析出物の平均サイズが増大する臨界温度は 580℃であり、平 均サイズは 64.4±1.2 nm まで増大することが明らかとなった。本研究では、転位を冷間加工(室温にお ける圧延)によって導入してパイプ拡散の影響を検討した。転位の本数は圧延率で調整し、圧延率 5、 10、20、50、90%の 5 条件について検討した。平均サイズ導出に用いた析出物粒子の数は、各条件につ いてそれぞれ 500~2,000 個である。

3. 結果及び考察

圧延率が10%の試料を上述した手順で熱処理した結果、平均サイズが増大する臨界温度は100℃であ り、それ以上の温度で熱処理しても平均サイズはそれ以上殆ど変化しないことが明らかとなった。この ときの平均サイズは約 61 nm であり、転位を含まない試料を 580℃で熱処理した場合の平均サイズより も小さい。平均サイズの増加量を同じ温度で比較するために、580℃で 10%圧延材を熱処理することも 試みたが、それより低い 450℃まで加熱した時点で転位組織が消失し始め、580℃に達したときには完全 焼きなまし組織になってしまい、この温度では転位の影響を検討できないことが明らかとなった。拡散 係数は、通常の拡散の場合、拡散長(拡散係数と時間の積)を温度に対してアレニウスプロットしたと きの傾きから導出される。パイプ拡散の場合は、拡散長の代わりに平均サイズについてプロットするこ とになるが、本研究ではサイズの温度依存が顕著でなかったため、計算の前提が満たされない。この問 題は想定外であり、今後要検討である。本研究では、これ以外にも予想外の発見がもう一つあった。圧 延率の増加に伴って、析出物の平均サイズが増大することが明らかとなった。加工後に試料に残留する 転位の数密度には上限があり、この上限(10¹⁵ m⁻²のオーダー)は一般に圧延率20%程度で達するが、 析出物のサイズはそれ以上の圧延率でも増大し続けることが明らかとなった。これはパイプ拡散が(室 温で) 圧延中に起ったことを意味する。平均サイズは 50%圧延材で 64.2±0.9 nm、90%圧延材で 65.8±1.2 nm であった。これは非圧延材を 580℃で熱処理した際の平均サイズと同等かそれ以上である。Zr 中の Nbの拡散係数は、室温と 580℃では 15 桁異なる。580℃における熱処理が 3 日間(26 万秒)であるの に対し、室温における圧延に要した時間はせいぜい3秒であり、時間の差は5桁ということになる。し たがって、拡散長で比較した場合の差は 20 桁である。本実験データの信憑性については、少なくとも 電子顕微鏡観察におけるアーティファクトの影響は考えにくい。圧延材は転位を多数含むため、転位の コントラストに小さい析出物が隠れ、見落としてしまう可能性が考えられるが、20%以上の圧延では残 留転位密度が増加しないため、20~90%圧延材における見落としの可能性は同程度ということになり、そ れによってサイズに差が生じることはないと期待される。

参考文献

[1] M. Legros et al., Science 319 1646–1649, 2008.

4. 本年度 発表リスト

[口頭発表リスト]

1) Y. Matsukawa, "The theory of precipitation hardening revisited: the effect of crystal structure on the obstacle strength." 8th Forum on New Materials, 2018.6.4-14, Perugia (Italy). (招待講演)

2) 松川義孝、大熊一平、阿部弘亨、"冷間強加工中の析出物のオストワルド成長 :動く転位を介した超高速 パイプ拡散の可能性について"、日本金属学会秋期大会、2018.9.20-21 仙台(口頭) [論文リスト]

1) [Book chapter] Y. Matsukawa, Crystallography of precipitates in metals and alloys: (1) Analysis of crystallography. in: M. Ali (Eds), Crystallography, IntechOpen, published online on 2019.2.21. (DOI: 10.5772/intechopen.82693)

2) [Book chapter] Y. Matsukawa, Crystallography of precipitates in metals and alloys: (2) Impact of crystallography on precipitation hardening. in: M. Ali (Eds), Crystallography, IntechOpen, published online on 2019.2.21. (DOI: 10.5772/intechopen.84273)

Fe-Mn モデル合金における特異な照射硬化とナノサイズの Mn 析出物形成の相関

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、図1に示すようなモデルが提唱され ているが、実験的な確証はまだ得られていない。



図1 純 Fe と Fe-Mn 合金における中性子照射損傷組織生成モデル

2) 照射実験

中性子照射(290℃、5x10²⁰n/cm²)により、Fe-1Mn および Fe-1Ni 合金は、顕著な照射硬化を示し、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 30 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、a<100>型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。溶質原子クラスターの形成の素過程に関しては、クラス ターの核生成サイトが空孔型欠陥なのか格子間原子型欠陥なのかについては、不明であるが、TEM で観 察された a<100>型の転位ループの形成が Mn 原子の存在により促進される様子を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 特になし。

高エネルギーイオン照射法を用いた新奇二次元層状物質の創製

量子科学技術研究開発機構 高崎量子応用研究所 圓谷 志郎

1. はじめに

グラフェンはスピン散乱の要因であるスピン-軌道相互作用が小さく,無機 半導体を超えるキャリア移動度を示すことから,理想的なスピントロニクス・エ レクトロニクス材料として注目されている[1]。一方でグラフェンは,半金属的 な電気伝導特性を示すことから,素子応用を実現するためには,バンドギャ ップの導入の必要性が指摘されている。この有効な方法の一つにグラフェ ンへのヘテロ原子のドーピングによるグラフェン化合物の作製がある。化学 的手法を用いたドーピングによる酸化グラフェンや水素化グラフェン(グラフ ァン)などが報告されているが,同手法ではドープ可能な原子種が限定され ることに加えて位置選択的なドーピングが困難であるという問題がある。 我々は高エネルギーイオンをグラフェンとヘテロ原子との接合領域に照射 する新しいグラフェン化合物の創製法を探索している[2]。同方法では,電 子励起相互作用が支配的なエネルギー領域(数 MeV)のイオンビームをグ ラフェンに照射することで,電子励起後の緩和過程で空間的に近接し同様



パターン化した

に励起状態にあるヘテロ原子との間で結合の組換え(置換)を生じさせ化合物を作製する(図 1)。本研究では, フッ化リチウムとグラフェンのヘテロ構造に高エネルギーイオンを照射することで,フッ化グラフェンを作製した。 さらに同手法を用いた局所パターンドーピングの可能性を探索した。

2. 実験

多結晶 Cu 基板上に化学気相蒸着法によってグ ラフェンを成長した。さらに同グラフェン上に 100nm のフッ化リチウム層を成膜し,真空中において同へ テロ界面に高エネルギーイオン(2.4 MeV ⁶³Cu²⁺)を 照射することでフッ化グラフェンを作製した。局所パ ターンドーピングについては,図 2 に示すプロセス により行った。はじめに,微細加工によりグラフェン の素子構造を作製する。次にレジストをマスクとして ヘテロ原子層となる LiF のパターンをグラフェン上 に作製する。レジストを除去した後にイオン照射を 行うことで,グラフェン上の任意の場所へのフッ素ド ーピングを行った。イオン照射後のグラフェンの電 子状態や原子構造は顕微ラマン分光や X 線光電

子分光(XPS), 放射光を用いた X 線吸収端微細構造(XAFS)などにより評価した。

3. 結果および考察

図 3 にグラフェンへの高エネルギーイオン照射によるラマンスペクトル の変化を示す。イオン照射量の増大に伴い、LiF 層の有無にかかわらず グラフェンへの欠陥生成に起因する D バンドが増大することが分かっ た。一方で LiF/グラフェンへのイオン照射では、LiF 層の無いグラフェン への照射に比べて D および 2D バンドが、それぞれ 20 および 40 cm⁻¹ 以上も低波数側へとシフトすることが分かった。D, 2D バンドのエネルギ ーはグラフェンの電子状態を反映するため[3]、LiF/グラフェンへのイオン 照射では、グラフェンの電子状態が変調されていることが示唆された。そ こで LiF/グラフェンについてイオン照射後のグラフェンの電子状態を C K-edge XAFS によって調べたところ、グラフェンのπ*由来のピークが減少 するとともに、σ*(C-F)由来の構造(P2)が新たに現れることが分かった。 さらに X 線が斜入射の際の P2 構造の強度は垂直入射に比べて大きい





ことから, C-F 結合はグラフェンシートの面 に対して垂直方向に配向していることが 分かった(図4)。XPSによる炭素およびフ ッ素原子の化学状態の解析結果も合わ せると, LiF/グラフェンへの 10¹⁴ ions/cm² のイオン照射によって 20 atom%ものフッ 素原子がグラフェンシート上に化学結合 (フッ化グラフェン)を形成することが明ら かになった。

一方で LiF 層の無いグラフェンへのイオン照射では、D バンドのピーク強度がLiF/グラフェンへの照射に比べて小さい(図 3)。D バンドとG バンドの強度比から欠陥間距離を見積もると照射量 10¹⁴ions/cm²の場合で 10 nm であり、欠陥密



図 3 イオン照射に伴うグラフェンのラマンスペクトルの変化。LiF 層は純 水リンスで除去した。

 (i) イオン未照射グラフェン/Cu。(ii,iii) 10¹³, 10¹⁴ ions/cm² 照射グラフェン/Cu。(iv,v) 10¹³, 10¹⁴ ions/cm² 照射 LiF/グ ラフェン/Cu。(vi) 10¹⁴ ions/cm² 照射 LiF/グラフェン/Cu を Cu から剥離し SiO₂上に転写。

度が 1%程度であることが分かった。このことは、ヘテロ原子層で被覆されていないグラフェンへのイオン照射で は、欠陥生成が限定的であるということを示している。このため本研究では、フッ素原子の局所パターンドーピン グの実施の際には、LiF 層を形成しない領域のグラフェンに対してもシャドーマスクを用いることなく試料全面へ のイオン照射を行った(図 2)。

図 5 にフッ素原子の局所パターンドーピングを行ったグラフェンの SEM 像およびラマンスペクトルを示す。イ オン照射の際の LiF 層の有無により SEM 像にコントラストが観察された。未照射のグラフェン, 10¹⁴ ions/cm² の イオンを照射した LiF/グラフェンおよび LiF 無しグラフェンのシート抵抗を測定したところ, それぞれ 33, 240, 1.2 × 10³ Ω/sq. であったことから, 同コントラストはフッ素原子のドーピングに伴うグラフェンの電気伝導特性の変化 に起因することが示唆される。一方で, 上述のようにグラフェンのラマンスペクトルにおける D バンドの増大や低 波数シフトはフッ素原子のドーピングを反映しているため, 顕微測定により局所的なドーピングの成否が評価で きる。LiF 層を形成した領域(図 5: a,b,f,g) においては D バンドの顕著な増大や低波数シフトが観察されている。

一方で LiF 層を形成しない領域(図 5: c,d,e)では同変化は観察されない。これにより、フッ素原子のグラフェンへの局所パターンドーピングを実証することができた。

本研究の成果によって,高エネルギーイオン照射による局 所ドーピング法は,従来の化学的手法では実現困難なグラフ ェンのドーピング状態の幅広い制御に加えて,グラフェン上の 微小領域に位置選択的なドーピングが可能であることが明ら かになった。本技術を発展させることで,局所構造制御により 電子・スピン機能を構築したグラフェンデバイスの実現を可能 にし,ナノエレクトロニクスやスピントロニクスの技術に新たな進 歩をもたらすことが期待される。

参考文献

[1] K. S. Novoselov, Nobel Lecture, 106 (2010).

- [2] S. Entani, et al., RSC. Adv. 6, 68525 (2016).
- [3] A. C. Ferrari, et al., Phys. Rev. Lett. 97, 187401 (2006).

研究組織

研究代表者: 圓谷 志郎 所属:量子科学技術研究開発機構 研究協力者: 水口 将輝 所属:東北大学金属材料研究所 所内世話人: 渡邊 英雄 所属:九州大学応用力学研究所

成果報告

1) 圓谷 志郎, 水口 将輝, 渡邉 英雄, 滝沢 優, 楢本 洋, 境 誠司, 「高エネルギーイオン照射法によるグラ フェン化合物の作製」2018年日本物理学会秋季大会, 10a-C11S-11



図 5 局所パターンドーピングを行ったグラフェン /SiO2の SEM 像。LiF 層は純水リンスに より除去した(左)。グラフェン上の任意 の位置におけるラマンスペクトル(右)。

磁化プラズマの簡約化 MHD シミュレーション

法政大学 理工学部 電気電子工学科 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(MHD)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、トロイダルコイルの設置誤差や外部コイルによって磁場摂動が発生するが、有理面と共鳴するようなものを共鳴磁場摂動(RMP)と呼ぶ。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。

近年、RMPを周辺局在モード(ELM)の制御に用いる手法の研究が盛んに行なわれている。トカマ クにおける ELM はバルーニングモードによって駆動される。バルーニングモードは高い波数領域 において不安定性を示すため、これを数値シミュレーションによって扱うには、数値安定性に優れ たスペクトル法を採用する必要がある。共同研究の継続4年目である本年度においては、円形断面 のトカマクプラズマに対する簡約化 MHD モデルのスペクトルコードを構築することを目的とした。

【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。渦度、ベクトルポテンシャルの 磁力線に平行な方向の成分、電子圧力が未知数であり、流れ関数と電流の磁力線方向の成分は渦度 の定義式(ポアソン方程式)とアンペールの法則によって定まる。

コードの概要は以下である。各変数はポロイダル方向とトロイダル方向に複素フーリエ級数展開 されており、振幅は時間と小半径方向の位置のみの関数である。複素フーリエ級数展開されたモデ ル方程式に対して、小半径方向の微分を有限差分法で処理し、時間微分項に予測子・修正子法を適 用する。ポアソン方程式をLU分解を用いた手法によって解く。非線形項の計算においては擬スペ クトル法を適用して実空間において評価する。実空間と波数空間の変換においてはFFTを用いる。

次に、シングルコアに対して開発されたコードに対して、MPIを用いて並列化を行った。波数空間に対して2次元の領域分割を行い、時間積分の処理を行う。非線形項の計算においては、実空間における小半径方向の1次元の領域分割を行う。その際、allgathervを用いて振幅の空間微分のローカル変数をグローバル変数にし、波数空間と実空間での情報のやり取りを行う。

【研究結果】

本年度実施した研究について、以下の内容を報告する。

<u>1. テアリングモードのテストシミュレーション</u>

古典テアリングモードが線形不安定な平衡に対してシミュレーションを行った。図1にテアリン グモードの線形成長率の電気抵抗依存性を示す。低い電気抵抗の値に対しては、成長率は解析解が 示す 3/5 乗のスケーリングに従うことが分かる。高い電気抵抗に対してこのスケーリングから逸脱 する性質は、const-ψ近似の破れとして一般的に知られている性質である。テアリングモードの非



図1 成長率の電気抵抗依存性

図2 ヘリカル磁束関数の等高線図

線形シミュレーションを行った結果、磁気島幅の成長の時間依存性が指数関数的から代数的へと変 化するラザフォード領域が観察され、その後非線形飽和状態に至った。図2に磁気島が非線形飽和 した時刻におけるヘリカル磁束関数の等高線図を示す。以上のシミュレーション結果から、テアリ ングモードが正確にシミュレーションできることが確認された。

2. バルーニングモードのテストシミュレーション

トカマクプラズマにおけるトロイダル曲率の効果をコードに実装し、抵抗性バルーニングモード が線形不安定な平衡に対してシミュレーションを行った。シミュレーションにおいては、ポロイダ ルモード数の最大値を20、トロイダルモード数の最大値を10とした。図3に渦度揺動の等高線図 を示す。図3(a)はバルーニングモードの線形成長段階であり、悪い曲率領域である左半面において 強い揺動が発生していることが分かる。図3(b)は非線形飽和段階であり、渦度揺動がポロイダル周 方向に広がっていることが分かる。また、小半径方向の内側にも広がっていることが分かる。図4 に非線形的に修正された平衡圧力の径分布を示す。線形成長段階においては放物型であるが、非線 形飽和段階においては内側の圧力が減少し、外側に輸送されていることが分かる。以上より、バル ーニングモードが正確にシミュレーションできることが確認された。



図3 渦度揺動の等高線図

図4 圧力の径分布

【まとめ】

本共同研究を通して、簡約化 MHD 方程式に基づくスペクトルコードの開発を行った。開発されたコードを用いた物理研究が今後の課題である。

研究者情報: 西村征也

中性粒子風由来のブロッブの発生と輸送特性に 関するシミュレーション

中部大学 国際GISセンター 杉田暁

目的

本研究の目的は、中性粒子風に由来する荷電分離およびブロッブの生成・伝搬が発 生する条件を数値実験により明らかにし、直線装置 PANTA による核融合周辺領域 (SoL 領域)の模擬実験の可能性を探ることにある。トロイダルプラズマを対象とした研 究から、不均一磁場に由来する荷電分離とその結果生じるブロッブの輸送特性が研 究されている[1,2]。これはトロイダルプラズマに特有の磁場不均一性や曲率に由来 する遠心力から生じる効果であるが、同様の効果が中性粒子流の効果を考慮するこ とで得られることが報告されている[3]。本研究では、トロイダルプラズマを対象として 申請者が開発したコードをベースに、中性粒子流を取り入れたモデルとの対応を明ら かにし、直線装置でブロッブの発生を許す中性粒子の密度や流速のパラメータサー ベイを行うことを目的とする。

結果

今年度は、これまで数値実験を行っていた環境を応用力学研究所から中部大学 国際GISセンターに移行することにより、ハンドリング性の向上と高速化を 図った。中部大学の計算機クラスタにGCC8のGFortranとOpen MPIによる並列 計算環境を構築し、高速フーリエ変換ライブラリFFTW-3を並列化コンパイル・ 準備した。また、データ解析・可視化環境としてGSAFを導入した。応用力学研 究所に設置している計算機クラスタと、中部大学の計算機環境を応用力学研究 所のVPN (Virtual Private Network)を経由して接続し、数値実験コードを移行 した。

結果、数値実験コード、及びデータ可視化の環境が中部大学で可動することを 確認し、以前の環境と比較して非線形の計算の速度が約 1.5 倍に向上すること が確認できた。これは、CPU の性能及びメモリの帯域幅に加えて、数値コード中 で IO のオーバーヘッドがかかっていた部分が SSD の環境に移行したことにより 高速化されたことに依ると考えられる。

188

今後の展開

今年度構築した計算機環境を用いて、応用力学研究所の直線プラズマ実験装置 PANTA においてブロブが発生する特徴的なパラメタを念頭においたパラメタス キャンを行う予定である。磁力線方向波数がゼロに近い揺動も PANTA で観測さ れており[4]、交換型不安定性との比較が今後ますます重要となる。数値コード を整備することにより、直線装置 PANTA 実験との比較などをより迅速に進める ことが可能となる。

謝辞

本研究は、九州大学応用力学研究所平成30年度共同利用・共同研究 30FP-19 の助成を受けたものです。

参考文献:

[1] D.A. D' Ippolito, et al., Phys. Plasmas 9 222 (2002)
[2] S. Sugita, et al., J. Phys. Soc. Japan 79 044502 (2010)
[3] S. I. Krasheninnikov and A.I. Smolyakov, Phys. Plasmas 10 3020 (2003)
[4]福田郁未、他7名、「直線磁化プラズマにおける軸方向不均一性の観測」プ
ラズマカンファレンス、23p-20、2017.11.20-24 姫路

研究組織

代表者:杉田暁(中部大学 国際GISセンター) 所内世話人:小菅佑輔

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、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。本年度は、前年度から引き続き行っている機械学習を用いた解析を行 った。

研究方法:

本研究の推進に当たっては、それぞれの研究グループが理論的・数値的に発展させた結果について、定期的に筑紫キャンパスに参集して議論を行うことを基本としている。

研究成果:

本年度は、前々年度から用いている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の時系列データに対し、機械学習の一手法であるランダムフォレス ト[1]を用いて回帰モデルを作成した。これまで同様に、32 本配置されている PANTA のプロ ーブのある一つのプローブの観測データを目的変数、他の6本のプローブが観測したデー タを説明変数とした。ランダムフォレストの計算には、統計ソフト R[2]の randomForest パッケ ージ[3]を用いた。randomForest のパラメータは mtry=2、ntree=1600 とした。本年度は、説明 変数となるプローブの間隔(粗視化スケール)と予測性能の関係を、近隣モードからの単純 平均による予測(補間)との比較を通じて議論した。これまでと同様、ある時間帯のデータで 学習を行い、別の時間のデータを用いて性能の評価を行った。計算の結果、プローブ間隔 が大きくなるにつれて単純平均による予測が急激に悪くなる一方で、ランダムフォレストの予 測性能はプローブ間隔が大きくなっても良い精度を保っていることが分かった。時系列とし ての解析を行わない単純な機械学習で良い予測ができるのは、明確な局所構造を含まな い統計的定常状態のデータを周期境界(周方向のプローブ)で扱っているためである。同じ PANTAのデータでも、局所構造が卓越する場合(solitary wave state[4])は同様の取り扱いが 出来ない可能性があることに注意されたい。一方で、今回用いたデータにおいては、狭い プローブ間隔の場合は近隣モードの単純平均でも良い予測になることが分かった。

次に、予測データが再現している観測データの性質を議論するため、波形と周波数スペクトルの比較を行った。Figure 1、Figure 2 はそれぞれ観測データ(灰色線)、ランダムフォレストによる予測(黒実線)、単純平均による予測(黒破線)を示している。予測はプローブ間隔が 4 本の際のものである。Figure 1 が示すように、ランダムフォレストによる予測は観測データの位相とよく一致していることが分かる。周波数スペクトル上でこの性質を見た場合、エネルギーの大きな周波数モード(7[kHz]付近)の再現として現れる(Fig.2)。これらの結果について、現在投稿論文を準備中である。



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.R-project.org/. [3] A. Liaw and M. Wiener (2002). Classification and Regression by randomForest. R News 2(3), 18-22. [4] T. Kobayashi et al, Plasma and Fusion Res., 12, 1401019 (2017).

公表状況:なし

研究組織:

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

研究課題名:金属、合金および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 A study on dissolution, diffusion and desorption of hydrogen isotopes in metals, alloys and oxide ceramics

> 九州大学大学院総合理工学研究院 エネルギー理工学部門 橋爪 健一

1. 目的

核融合炉では、ダイバータ材としてタングステンのような高融点金属あるいは黒鉛のような耐熱性材 料が候補材料である。ダイバータでは、核融合炉の燃料の水素同位体が高いエネルギーを持ったまま照 射されるため、水素同位体の照射挙動とともに溶解、透過、リサイクリングなどが重要である。本年度 の共同研究では、高融点材料で水素の溶解熱が異なるタングス

テン(W)とタンタル(Ta)について(表1参照)、水素同位体 (重水素、D₂)をグロー放電プラズマによりそれらの金属に注入 し、水素の高温放出挙動につい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)を用いて調べた。さらに、拡散解 析ソフトである TMAP-4 を用いて、それぞれの金属からの水素 の放出挙動をシミュレートし、実験結果と比較した。

表1 WとTaへの水素の溶解熱[1]

Metal	$\Delta H_{\rm s} ({\rm eV})$
W	+ 1.1
Ta	-0.39

2. 実験

円板状の金属 W および Ta (ϕ 6,0.05 mm^t)を試料とした。W と Ta 試料を 10⁻⁵Pa 以下の圧力で真空焼 鈍 (800℃、0.5 h) して、これを焼鈍試料とし、また、比較のために焼鈍を行わない試料を受入材試料と した。これらの試料に、重水素を AC グロー放電注入法[2]により室温で注入した。注入条件を表 2 に注 入装置を図 1 に示す。重水素注入を行った試料について TDS 装置(図 2、QMS: Inficon H200M) にて、 昇温速度 0.5 ℃/sec で 1000℃まで試料を加熱し、D2のスペクトルを測定した。

表2 グロー放電注入	、条件
------------	-----

D ₂ 圧力	10 Torr
放電電圧	1.2 kV
周波数	60 Hz
放電注入時間	30 min
試料温度	室温



3. TMAP-4

TMAP4(Tritium Migration Analysis Program ver.4)を用いて、Wからの重水素の放出挙動を計算した。試料の厚さは実験に用いた試料と同じ 0.05 mm とし、1%の水素が均一に金属に溶解しているという初期 条件で計算した。境界条件としては、表面水素濃度をゼロとして拡散律速で水素放出が起こる場合を基 準として水素の放出スペクトルを計算し、また、水素の表面再結合を考慮した。

<u>4. 結果と考察</u>

図3と4に、Ta(受入材と真空焼鈍) 試料のTDS 放出スペクトルを示す。真空焼鈍材では、水素の溶解熱を反映して、図4のように大量の重水素放出すなわち大量の水素溶解が見られる。一方、受入材で

は、焼鈍材の 1/100 以下の放出量となっている。これは、受入材では Ta 表面に自然酸化物が存在し、注入された重水素が酸化被膜中から気相に再放出され、酸化膜内にはほとんど残らず、また Ta 金属中へ 拡散溶解もわずかであったためと考えられる。Ta の酸化物は安定であり、水素の注入の抑制効果がある ということがわかる。ただ、何れにしても水素の放出温度は 500℃以上と高くなっており、水素同位体 の回収に高温加熱が必要なことがわかる。一方、W では、図5と6に示すように、受入材と真空焼鈍試 料で TDS 放出スペクトルに明確な違いは見られず、W の場合酸化物の影響はほとんど見られない。水 素の溶解熱を反映して Ta に比べ溶解量も低い。また、放出温度も 200℃程度と低く、比較的低い加熱温 度で水素同位体の回収ができることを示唆している。よく知られているように、水素同位体のリテンシ ョン、インベントリーの視点からも核融合炉ダイバータ材として適した性質を有することがわかる。



図3 受入材 Taの D₂ 放出 図

図4 TaのD2放出



図7に、TMAP-4 による表面での水素濃度を0とした TDS 放出の解析結果(赤)を示す。100[°]C程度に小さなピ ークがあるが、図5、6に示したように実験結果では重水 素の放出ピークが200[°]C程度であり必ずしも一致していな い。そこで実験結果を再現できるように、金属表面での水 素の再結合を考慮した計算を行った。具体的には再結合速 度が水素の表面濃度 C_{surf} の二乗に比例し(= kC_{surf}^2)、そ の再結合係数 k が下記の式で表せるものとして、その活 性化エネルギー E_{rec} を変化させて計算を行った。

$$k = 3.4x10^{-15} \exp(-\frac{E_{rec}}{RT})$$
 (1)



図7 TMAP-4 による水素放出解析

その結果、再結合の活性化エネルギーが80~100kJ/mol程度で実験データを説明できることがわかった。

<u>4. まとめ</u>

W および Ta 中にグロー放電注入した重水素の TDS により以下の結果が得られた。(1) Ta では水素が 大量に溶解し得るが、表面酸化物は注入量の抑制に役立つ。(2) W では表面酸化物の影響は小さく、ま た、溶解量は小さい。(2) W からの水素放出挙動は、拡散と水素の表面での再結合が支配している。

5. 研究組織

九大総理工:橋爪健一 大学院生:岩佐匡浩、浦部雄大、川口要人 九大工:岩松孝紀、田中勇渡、 田村元、藤啓太、桃谷紀広 九大応力研:渡辺英雄

参考文献

[1] Y. Fukai, "The metal-hydrogen system", Springer-Verlag (1993).

[2] K. Hashizume et al., J. Nucl Sci. Technol., 31 (1994) 1294.

高温プラズマ曝露炉内機器の表面変質と損傷に関する総合的研究

九州大学応用力学研究所 吉田直亮

1. 研究目的

核融合炉の開発を目指す高温プラズマ閉じ込め装置のプラズマ対向表面は、プラズマとの強い相互作 用によって様々に変質し、その性能や寿命のみならずプラズマの特性や制御にも少なからぬ影響を及ぼ すことが知られている。この現象は特に長時間放電下で顕在化し、放電の持続を妨げる重大な原因の一 つであることも明らかになってきた。この現象を司るメカニズムを明らかにすることによって定常放電 実現への対応策を見出すことは、核融合炉開発の基礎研究として重要な課題である。

本年度はこれまでに引き続き長時間放電実験が頻繁に行われている QUEST および LHD(核融合科 学研究所)の真空容器内に多くのプローブ試料を設置し、高温プラズマとの相互作用等によってもたら されるプラズマ対向壁表面の変質とそれが水素の吸蔵・熱放出に与える影響について調べた。また、直 線プラズマ装置 NAGDIS-II(名古屋大学)を用いて W 再堆積層形成に及ぼす同時 He プラズマ照射効 果についても共同研究を開始した。LHD や NAGDIS-II を用いての研究でも多くの興味深い成果が得 られたが、紙面の制限もあり本稿では QUEST に関連する研究成果に絞り報告する。

2. 実験結果及び考察

QUESTにおける 2018 年度の放電実験(2018S/S, 2018A/W)では CHI 放電実験及び 28GHz 高出力 入射電流駆動実験の短パルス放電(数秒以下)に加え、超長時間放電実験(2018S/S:放電時間=30~56 分、壁温度=200°C、2018A/W:放電時間=30~60分、壁温度=120,200,150°C)が一年ぶりに再開さ れた。2017 年度は長時間放電実験が行われなかったこともあり、壁表面に新たに堆積した不純物は僅 かでその殆どは C であったが、長時間放電実験が再開された 2018 年度のキャンペーンでは再び金属元 素を多く含む堆積層が形成されるようになった。図1に上部壁(T)、赤道壁(E・)及び下部壁(B)に 設置し 2018A/W の全放電に曝露したプローブ試料(Mo)の GD-OES 分析結果を示す。例えば、上部 壁(T)の Fe, Cr, Ni, W の原子濃度はそれぞれ 24, 6, 3, 1.8 at%程度と評価でき、金属元素の濃度が 35at%を超えた(残りの大半は C, O)。これらの元素は主に近傍の壁面から弾き出された元素が再堆積 したものであることから、軽元素ではスパッタ率が高くなることを考慮すると、実際の上部壁(APS-W 被覆 SUS316L 板)を覆う堆積層の組成は金属元素が 50at%を超えているものと思われる。

図2に2017A/W 終了後に取り外したプラズマ対向壁パネル(APS-W 被覆 SUS316L)から切り出し た断面薄膜試料のTEM 写真を示した。APS-W の直上には先ず2014-2015 年度に積もった C を主成分 とする隙間の多い非晶質堆積層(白い像の部分)が形成され、その上に超長時間放電が頻繁に行われた 2016S/S と 2016A/W で堆積した金属元素を多く含むナノ結晶粒子の集合体(黒い像の部分)が積もっ ている。1017 年度は長時間放電実験が無く上下壁への再堆積(ほとんどが C)が非常に少ないことか ら、2018 年度のキャンペーンは2016 年度に形成された堆積層をプラズマ対向面として放電実験が行わ れたものと考えられる。即ち、超長時間放電で問題となる水素の粒子バランスを議論するには上下壁の 場合厚さ 30~50nm の金属原子と C, O が混合したナノ結晶の集合体で表面が覆われた APS-W との水 素のやり取りを議論する必要が有ることが明らかになった。

赤道壁には上下壁とは異なり SUS316L 板材が使用されている。図3に 2016-2018 年度の3年間(6 実験キャンペーン)赤道壁面上に固定されプラズマに曝した SUS316L 板材の GD-OES 分析結果を示 す。堆積層の厚さは 40-60nm 程度で上下壁より少し厚い。堆積層中の Fe, Cr, W の原子濃度は深さに よって、即ち、堆積した時期によって変動が大きいが、最大濃度はそれぞれ 35, 10, 12 at%程度で上下 壁と比べ更に金属元素が高い堆積層になっている。

QUEST における超長時間放電の停止は、真空容器壁からの水素の再放出速度が徐々に増加し適切な

194

プラズマ密度を保てなくなったことによって起こる。この現象を抑制し安定な放電を持続させるために は、壁のどの場所で水素の大きな再放出が起こっているのかを突き止める必要がある。そのためには、 先ず、それぞれの場所での水素の吸蔵能と放出温度特性を知る必要がある。すでに報告しているように 2016年度以降の金属元素を多量に含む堆積層は水素吸蔵能は低く、室温で注入した重水素は190°Cま での加熱でその大半が熱放出される。従って壁温度 200°C での放電実験では堆積層内に蓄積される水 素量は少なくそれらが異常再放出現象に直接関与することは考え難い。堆積層を通り抜けた水素は下地 の APS-W または SUS316L 中に侵入し更に内部へと拡散する。SUS316L は 100°C 以上になると H を 殆ど捕捉・保持できないのとは対照的に、APS-W はその欠陥の多い構造が原因となって大量の H を捕 捉でき、しかも室温から 800°C までの広い温度範囲で放出が起こる。プラズマ対向面の水素吸蔵能の観 点からは APS-W を被覆した上下壁面が粒子バランスを支配している可能性が高い。

水素の捕捉・再放出は温度に敏感であるため、放電の途中で温度が上昇すると思わぬ再放出が起こる 可能性もある。また、入射する水素粒子のフラックスが高い場所では再放出のタイミングも早く、粒子 バランスへの寄与も大きくなる。粒子バランスを支配している場所についての最終的な結論を得るため には、プラズマ対向面の精密な温度測定、各場所での入射水素粒子フラックスの測定などについても合 わせて調べる必要がある。

QUEST では今後壁温度を 300-500°C に上げての超長時間放電実験が計画されており、現在の APS-W にかわる水素リサイクリングを制御し易い W 材料とその被覆法が検討されている。十分圧延加工したタングステン薄板材(例えば、プランゼー社製 0.1mm 厚板材)では、200°C で注入した重水素は全く内部に残留せず、室温で注入しても 250°C までには全てが熱放出されることも判ってきた。この課題についても今後集中的に取り組んでいく予定である。



図1 2018A/W における GD-OES 測定。各元素の深さ分布。スパッタ速度; 40nm/s 程度





図2 2017A/W後に取り出した APS/被覆壁パネルの表面の 断面組織

図3 2016-2018 年度に赤道面 プラズマ曝露した SUS 板 の GD-OES 分析

高エネルギーイオン照射された酸化物絶縁被覆の微細構造における 熱処理による回復挙動

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り、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、酸化物被覆層の中性子照射効果の研究については、国内 的に原子炉が停止している事情も然ることながら、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とともに、実際の中性子照射における加速試験に相当するものである。このように、酸化物被覆材の中性子照射効果を検討する上で、イオン照射実験からの知見は先進ブランケット設計に重要であると言える。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主目的とし、本研究ではイオン照射後の酸化物被覆層の微細組織における熱処理による回復挙動を検討する。

2. 実験方法

SUS316 基板(基板温度 500℃)に Y₂O₃ 層を成膜した後、核融合研の MOCVD 装置にて Er₂O₃/Y₂O₃/SUS 二 重被覆膜を成膜した。MOCVD 被覆は直径 10 mm、厚さ 1 mm の SUS 基板上に成膜し、その成膜条件は 500 ℃の 3 時間とした。MOCVD 成膜後の Er₂O₃ 及び Y₂O₃ 被覆の膜厚はおよそ 800nm 及び 500nm であっ た。製作した Er₂O₃/Y₂O₃/SUS316 二重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 Transport of Ions in Matter (TRIM)コード にて Er₂O₃/Y₂O₃/SUS における照射損傷速度を計算した。 TRIM 計算結果を基にして、本研究における照射損傷速 度は Er₂O₃ 層の中心付近である 1.44×10⁻⁵ dpa/sec とし

(図1参照)、室温にて1.5 dpa 相当の Cu²⁺イオン照射を 実施した。現在、照射損傷領域の微細組織の回復を目的 とした種々の熱処理を実施している。

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を実施した。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



図 1 Er₂O₃/Y₂O₃/SUS 二重被覆層の Cu²⁺イオン 照射損傷速度の深さ依存性

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。

一方、酸化物被覆層及び被覆層と SUS 基板界面の微 細組織における Cu²⁺イオン照射前後の変化については、 集束イオンビーム加工機(FIB:日立製 NB-5000)にて サンプリング及び薄片化加工を行い、走査型透過電子 顕微鏡(STEM:日本電子製 JEM-2800)観察をもって検 討した。

3. 結果と考察

室温での Cu²⁺イオン照射前後の Er₂O₃/Y₂O₃/SUS 層界 面における断面微細組織を図2に示す。図2(a)はイオ ン照射前試料を、(b)は 1.5dpa のイオン照射後試料をそ れぞれ示す。図 2(a)の TEM 像からは、Y₂O₃中間層の上 に MOCVD にて Er₂O₃層を成膜中に、Y₂O₃中間層と SUS 基板の界面に 20nm 厚さ程度の Fe-(Y)-O 相が生成して いることが分かる。これは、MOCVD 過程での Fe 原子 と Y 原子の相互拡散によって生成したものと考えられ る。図 2(b)に示すイオン照射後の界面では、照射によ って Fe-(Y)-O 相が厚くなる傾向が見られた。これは、 図1に示す Cu²⁺イオン照射損傷速度の深さ依存性から も分かるように、界面付近の損傷速度は酸化物被覆層 よりも大きいために、Y2O3中間層への Fe 原子の拡散が 促進されたためであると考えられる。また、イオン照 射前後の Fe-(Y)-O 相の制限視野電子回折(SAED)パタ -ンを比較すると、イオン照射によって、非晶質(ア



(a) イオン照射前



(b) イオン照射後(1.5dpa 相当)

図 2 室温での Cu²⁺イオン照射前後の Er₂O₃/Y₂O₃/SUS 二重被覆層における断面 TEM 像 (a) イオン照射前試料及び(b) 1.5dpa 相当のイオン 照射後試料を示す。

モルファス)化が進行していることが明らかになった。以上のことから、イオン照射の影響は、酸化物 被覆層よりも酸化物/金属界面に強く表れることが分かった。

一方、イオン照射損傷量の増加に伴って密着強度は単調に低下する傾向が観測された。そして、1.5 dpa の照射損傷では、未照射と比較して約 70%の強度まで低下した。Cu²⁺イオン照射による密着強度の低下 要因としては、図 2 に示すように、イオン照射によって Fe-(Y)-O 相の生成促進及びアモルファス化等の 層界面での微細構造変化によって界面付近の強度が低下したためであると考えられる。

研究成果: Y. Hishinuma et al. "Microstructure and peeling behavior of MOCVD processed oxide insulator coating before and after ion beam irradiation", Nuclear Materials and Energy, vol.16, (2018), p.123-127

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

中性子照射環境下での鉄系遷移金属合金の磁性に与える照射効果の解明が重要とされている。例え ば Fe-Co-Ni 系合金の場合、キュリー温度以上で常磁性に変態する性質に着目し、第四世代原子炉の自 己作動型炉停止機構の電磁石としての利用が期待されている。磁性が照射により変化すると安全上問題と なるため、照射効果の把握が必要である。その種の実験では中性子照射の実施が不可欠であるが、原子 炉とホットラボが必要なため系統的な実験は難しい。代替実験として中性子と同様にカスケード損傷を起こ すイオン照射が考えられるが、損傷領域が表面 1µm 以下のため、バルク材試料では損傷部のみの磁性を 評価することが難しい。それに対して薄膜試料を使うと損傷領域のみの磁性評価が可能となる。ここで、鉄 系 3d 遷移金属の磁性は結晶構造と密接な関係があると言われている。本報告では、Ni 濃度を変えて結晶 構造を制御した Fe-Ni 合金薄膜を作製し、照射前後の構造・磁性を調べた研究成果を紹介する。なお、並 行して実施した熱時効した Fe-Cr 合金のスピノーダル分解の研究成果については省略する。

実験方法

良質な薄膜作製のため、まず基板の前処理条件を調べた。MgOは潮解性があり、長期保管で表面に変 質層が生じ得る。本研究では、Ar イオンミリングと酸素雰囲気中 1000℃熱処理を組み合わせ、AFM 及び XPS で表面状態を調べて前処理条件を決めた。その基板上に超高真空蒸着法により合金薄膜を作製した。 500℃で16,24,29,36%Ni 合金を電子ビームで200nm 蒸着し、600℃熱処理した。さらに、高真空ランプ加 熱炉で 1000℃熱処理した。結晶成長の様子を RHEED でその場観察し、EBSD 及び XRD で構造解析を 行った。イオン照射は、九州大・応用力学研究所のタンデム型加速器を用いて室温で2.4MeV の Cu²⁺を照 射した。その際の損傷量は SRIM コードより 0.9dpa と見積もられた。磁気特性は VSM により評価した。

結果及び考察

最適化を行った MgO 基板の表面は、AFM よりテラスと原子層ステップが見られ、XPS より水酸化物がほとんど無いことを確認した(Fig.1)。その上に蒸着した合金薄膜の構造を調べたところ、600℃熱処理後の結晶構造及び成長方位は、基板の MgO(001)[100]に対して以下の通りであった。

16,24%Ni:bcc(001)[110],29%Ni:fcc(001)[100]+bcc(001)[110],36%Ni:fcc(001)[100] 29%Ni については、1000℃熱処理後に fcc 単相となった。さらにイオン照射後、その fcc 相の一部が bcc 相に変化した(Fig.2)。続いて、照射前後で磁気測定を行ったところ、16,24,36%Ni では、磁化の変化は見 られなかった。一方で、29%Ni では照射による磁化の増大を確認した(Fig.3)。

次に 29%Ni 合金で照射により飽和磁化が増加した原因を考える。照射前は fcc 相のみで飽和磁化は 125 emu/cm³、照射後は fcc と bcc 相の混相で 701 emu/cm³であった。新しく形成した bcc 相の飽和磁化が 24%Ni の値(1535 emu/cm³)と同じと考え、元々存在した fcc 相の磁化が変化しないと考えた場合、試料全 体の磁化は 294 emu/cm³となり、実験値を説明できない。一方、fcc 相の飽和磁化が照射により 584 emu/cm³まで約 5 倍増加したとすると実験値を再現できる。

ここで、fcc相の磁化が照射により増加した原因を考える。Ni組成が30%前後の所謂 fcc-Fe-Niインバー

合金の磁性は、原子配列(規則・不規則状態)や原子間距離に強く依存すると言われている。本研究の Fe-29%Ni薄膜では、カスケード損傷による短距離秩序化や照射で導入された空孔による Fe-Fe 原子間距 離の増加が起こり、飽和磁化が増加した可能性が考えられる。

まとめ

結晶構造の異なる Fe-Ni 合金薄膜を作製し、磁性に与える照射効果を調べた。16,24,36%Ni では照射後、磁化は変化しなかったが、29%Ni では増大した。これは、fcc 相の一部が照射により bcc 相に変態したことに加え、fcc 相の磁化が約5倍増加したことによると考えられる。磁性が結晶構造に敏感な鉄系合金の場合、照射により磁性が大きく変化することを明らかにした。

成果報告(学会発表):

・生内幸亜,鎌田康寛,村上武,小林悟,渡辺英雄,"Fe-Cr 二元合金の組織、硬さ、磁気ヒステリシス特性に与える熱時効効果",日本金属学会 2018 年秋期講演大会,東北大,仙台,2018.9.19

• T. Oyake, Y. Kamada, T. Takahashi, T. Murakami, S. Kobayashi and H. Watanabe, "Ion Irradiation Effects on Magnetic Properties of Fe-Ni Alloys", JCS-14, Sep.26, 2018, Tohoku Univ., Sendai

研究組織 : 鎌田康寛, 小林悟, 村上武, 小宅智樹 : 岩手大・理工、渡辺英雄 : 九大・応力研



Fig. 1. MgO の AFM (上)、XPS (下) の結果 (a) 処理なし (b) 酸素雰囲気中 1000℃熱処理後



Fig. 2. Fe-29%Ni 薄膜の EBSD 解析結果 (a) 成膜後 (b) 1000℃熱処理後 (c) 照射後



Fig. 3. 照射前後のMH曲線

鉄合金の照射劣化挙動に関する基礎的検討

東芝エネルギーシステムズ 鹿野文寿

1. はじめに

原子炉の高経年化対策では、交換が困難である原子炉圧力容器の照射脆化への対応が必要である。照射脆化 による材料劣化について、運転年数の短い低照射領域では最近の研究で理解が進んでいるが、高照射領域での振 る舞いやメカニズムは、まだ十分に理解されていない。照射脆化は、Cu 等のクラスタ(析出物)とマトリクス欠陥(主 に照射による転位ループ)に起因すると考えられており、特に Cu クラスタの寄与が大きい。一方で高照射領域では Cu クラスタが飽和傾向にあり、その他の脆化因子の寄与が顕在化するという指摘がある。

本研究は、中性子照射による Cu クラスタ密度が飽和した高照射領域での照射挙動を知るため、模擬的に Cu ク ラスタを作り、そこにイオン照射し高照射領域での照射挙動を評価することを目的とする。本報告は、その第一ステップ として、Cu クラスタ模擬材を準備し、Cu イオン照射を行ったものである。

2. Cuクラスタ模擬材の作製

Fe中のCuは、析出強化元素として知られており、熱処理を活用することで、自動車をはじめとして、一般的に産業利用されている。このような知見を活用し、熱処理で、模擬脆化材を作ることを試みた。これまでの検討で、実用材程度のCu量(0.1%以下)では、熱処理でCu析出物を作るのは容易でないため、規格上限である0.4%のCuを含む低合金鋼で、熱処理を行った。熱処理条件は、温度450℃で、熱時効時間は0、98、120、132時間である。

熱処理後の試験片のCu 濃度分布について、透過電子顕微鏡観察・元素マッピング分析を行った。TEM観察・分析は、応用力学研究所(馬出アイソトープ実験センター内実験室)の200kV原子分解能顕微鏡を用いた。組成分析(マッピング)は電子線プローブ径0.2nmで、1ドットのビーム滞在時間20m秒、画素数256×256ドットで実施した。その結果、Cuクラスタの平均サイズ2~3 nm、数密度~1×10²³ m⁻³であり、40 年程度経過した原子力プラントの圧力容器鋼におけるCuクラスタ分布を概ね模擬できていることを確認した。その測定結果を図1に示す。

3. イオン照射試験

Cu クラスタ模擬材は、切断・研磨により 0.13 mm の薄板に加工した。イオン照射に供するため、その薄板をディス クパンチで 2 mmφに打ち抜き、あらかじめ準備しておいた SUS316 製の外径 3 mmφ、内径穴 2 mmφのドーナツ 形の枠に押し込み固定した。これは低合金鋼が強磁性体であり、TEM 内での磁性の影響を低減するための対策であ る。その円盤型試験片を、両面から電解ジェット研磨により円盤中央部を薄膜化した。TEMで観察したところ、膜厚は 100nm であった。ここまでの流れを図 2 に示す。

イオン照射試験は、九州大学応用力学研究所研究棟に設置されているハイボルテージ・エンジニアリング社製重イ オン照射システムを利用した。加速電圧 2.4MeV で Cu²⁺イオンを照射した。照射速度は 1 × 10⁻⁴dpa/s で、照射 量は 0.5 および 0.33dpa の 2 水準とし、照射温度は 80℃とした。このとき薄膜は場所によって厚さが異なるが、TEM での観察領域である 100nm 厚さの場所で照射評価を行うこととし、Cu イオンは貫通するため、観察時に自己イオン である Cu イオンが組成的な影響を示すことはなく、生成された照射欠陥のみの影響が見られることとなる。

4. まとめ

高照射領域での低合金鋼の組織挙動を模擬するため、模擬CuMnNiクラスタが分布した低合金鋼にイオン照射を 最大0.5dpaまで実施した。0.5dpaは、これまで300℃でのイオン照射で明瞭な転位ループが観察されている照射量 である。

5. 今後の予定

中性子照射脆化した低合金鋼におけるマトリクス欠陥の寄与を明らかにするため、TEM観察をすすめ、高照射時の 挙動予測の検討を進めていきたい。

6. 研究成果報告

平林潤一、藤田敏之、鹿野文寿、渡邊英雄ら、「照射脆化因子の形成に伴う低合金鋼の電磁気特性変化」、日本金属学会2019年春期大会、東京電機大



図1 熱時効材の電子顕微鏡観察・分析結果

201



図2 イオン照射試料の作成の流れ

- 研究代表者:鹿野文寿
- 研究協力者:藤田敏之

平林潤一

片山義紀(東芝エネルギーシステムズ)、

渡邊英雄(九大応研)

30FP-26

種々の熱入射法による材料表面の高エネルギー 密度入射損耗解析法の開発 応用ながれ研究所、レーザー技術総合研究所 糟谷紘一

九州大学応用力学研究所 徳永和俊 東京工業大学フロンティア材料研究所 川路 均

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、下記の諸項目についてその概要を述べる。(1) 複合材料と厚さ計による損耗破壊監視計測法の設計 と検討、(2)関連分光分析のための計測器の整備と 初期テスト、(3)放射のアップコンバージョン法を利 用する新しい計測法の予備試験、(4)関連調査項目。

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)等を測定する。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。本研究では、近く再開する電子ビーム照射のために、関連計測装置の準備と新規な方法の調査・提案を行った。

複合材料と厚さ計による損耗破壊監視計測法の設 計と検討 極限状態に対向するタングステン箔と 透明 SiC 薄板の組み合わせヘッド背後から、SiC 板 の厚さを監視する方法については、厚さ計を新規に 用意すれば実現可能であることが確認できた。高低 額いずれかの厚さ計を用意するために、経費獲得の 努力を、現在引き続き継続中である。

放射のアップコンバージョンと関連分光分析を含 む、新しい計測法開発のための計測器の整備と予 備実験結果前項とは少々異なるアイデアとし て、高温固体壁等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 案しているが、ここでは、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ための準備結果を示す。 計測用検出ヘッド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越しに観測し、薄板そのもの の温度を測りたい。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できることになれば、新しい 方法論的成果が得られることになる。

まず初めに、東京工業大学・ファインセラミック ス研究所の小型真空蒸着装置(日本真空アルバック 社製)により、タングステン箔やアルミナ薄板を加 熱し、応用ながれ研究所の既有溶融石英ファイバー と、九州大学・応用力学研究所の小型分光器(Ocean Optics 社・HR2000CG 高速ブロードバンド分光器) により、発光スペクトルを測定した。初期の結果例 を、文末の参考資料1-2 に書いた。

その後に、米国品の代わりの中国産のアップコン バージョン材料を用意し、さらに分光測定関連の追 加用品の整備を進めたが、これらと小型真空蒸着装 置を併用する実験では、現在までのところ、明るい アップコンバージョン光の計測には至っていない。

放射の変換による温度測定のための先進方法の模

索 熱放射光によるアップコンバージョンの場
 合、レーザー光に比べて輝度が低いので、多光子吸
 収アップコンバージョン過程のみに頼る(コヒーレント)アップコンバージョン光の発生効率は低い。
 そこで、将来の高輝度熱放射が利用できる前の低輝
 度熱放射による変換光を得るためには、より高変換

効率の先進材料を探す必要がある。利用できそうな 材料の調査結果を以下に述べる。

インコヒーレントアップコンバージョン材料の調 査と応用のための準備 文献調査により、下記 の波長変換効率の高い3種のインコヒーレントアッ プコンバージョン材料を見つけた。開発担当者にサ ンプル提供を依頼したが、3件とも、現在までの所 提供許可は得られていないが、インターネットのリ ンク先を参考資料3-5 に示す。現在、最終例につい て素材を購入し、試しに自作する用意をしている。

関連の深いその他の技術情報収集 上記と異なる方法として、2件の新しい提案を附記する。
1 新しい熱電変換材料の発見とその応用が、ごく最近参考資料6 に公表されている。
2 モスアイ材料の利用可能性の検討本研究への応用が期待される、蛾の眼(モスアイ)の構造に習った、光反射率低下・無反射コート層の、SiC,サファイア、ダイヤモンド、タングステン材料表面処理が、参考資料7 に記載されている。
2019/02/19 に市販品の見積書送付を電子メールにて依頼したが、応答はまだない。

極短波長ナノ秒EUVレーザー光による材料損耗

研究の詳細結果は参考資料8 にあるので、紙面の都 合により、ここでは繰り返し述べない。

参考資料

1. 糟谷紘一、徳永和俊 ほか、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、九州大学応用力学研究所共同利用研究成果 報告書、平成 29 年度(第21号) pp. 196-197, 2018.

2. 精谷紘一、徳永和俊、本越紳二、川路 均、 J. Straus K. Kolacek、et al, 井澤靖和、藤田雅 之、砂原 淳、本越伸二、島田義則、谷口誠治、中 井光男、波長変換による高熱流束測定、「原子分子 過程研究と受動・能動分光計測の高度化のシナジー 効果によるプラズマ科学の展開」、「原子分子データ 応用フォーラムセミナー」合同研究会、平成30年 12月19日-12月21日、核融合科学研究所.

3.

http://www.spring8.or.jp/ja/news_publications/ press_release/2017/170130/

4.

https://www.titech.ac.jp/news/2017/039848.html
5. K. Yoshihara, M. Sakamotol, H. Tamamitsu,
M. Arakawa, K. Saitow, Extraordinary Field
Enhancement of TiO2 Porous Layer up to 500fold, Advanced Optical Materials
DOI:10.1002/adom.201800462, 2018.
6. M. Sakamoto, T. Kawawaki, M. Kimura, J. Jhon,
M. Vequizo, H. Matsunaga, C. Sampath,
K. Ranasinghe, A. Yamakata, H. Matsuzaki,
A. Furube, T. Teranishi, Clear and Transparent
Nanocrystals for Infrared-Responsive Carrier
Transfer, Nat. Commun., Article ASAP, January
24, 2019, DOI <u>https://doi.org/10.1038/s41467-</u>
018-08226-2.

7. http://elseed.com/jproducts/jmpss/
8. J.Straus, K.Kolacek, K.Kasuya et al, Response of plasma-facing materials to nanosecond pulses of extreme ultraviolet radiation. Laser and Particle Beams 1-15, https://doi.org/10.1017/S0263034618000332
Cambridge Univ. Press, 2018.

謝辞 この研究は、九州大学応用力学研究所の国内共同研究費(分類番号30FP-26)及び東京工業大学フロンティア材料研究所一般B共同研究費(採択番号22)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、拠点事務室)、東京工業大学フロンティア材料研究所(川路均教授、共同利用推進室)、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の各位などの方々にお世話になった。 2019/02/28 報告

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

高ベータ LHD プラズマは、プラズマ周辺部にて磁気丘が存在するため、理論的には MHD 不安定 である。しかしながら、LHD 実験では、体積平均ベータ値が約 5%の高ベータプラズマが得られおり、 MHD 不安定ではあるものの、その飽和レベルは閉じ込め性能に大きな影響を及ぼしていないことを 示唆している。これまでに行ってきた MHD モデルに基づくシミュレーション研究では、高ベータ LHD プラズマはプラズマ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、非線形段階にお いて不安定性の影響がプラズマ中心部まで及ぶことにより、中心圧力が大きく減少することを示して きた[1]。この MHD モデルに基づくシミュレーションは、LHD 実験結果を再現するに至っておらず、 計算モデルの改良が必要であることを示唆している。そこで、本年度においては熱イオンを運動論的 に取り扱うように計算モデルを拡張し、熱イオンの運動論的効果が抵抗性バルーニングモードに対す る影響について調べた。本研究では、拡張された MEGA コードを用い、熱イオンをドリフト運動論、 電子は断熱モデルを仮定した流体モデルで取り扱っている。MHD 平衡は HINT コードにより構築し、 中心ベータ値が約 7.5%のプラズマを仮定した。この平衡はプラズマ周辺部にてメルシエ不安定な領 域が存在する。初期平衡においては、電子圧力とイオン圧力は等しいと仮定し、HINT 平衡により得 られた圧力の半分で与えている。簡単のために密度の初期分布は一様であると仮定した。また、イオ ンの分布関数はマクセル分布を仮定した。

トロイダルモード数が n=10 の抵抗性バルーニングモードに対して解析を行なった結果、運動論的 MHD モデルから得られた線形成長率は、MHD モデルより得られる成長率の約 60%程度であること がわかった。この時の n=10 モードの電子圧力、および、イオン圧力の摂動成分の固有関数を図 1 に 示す[2]。電子圧力の揺動レベルに対してイオン圧力の揺動レベルが減少しており、特に、磁力線に垂 直方向のイオン圧力の揺動成分が著しく抑制されている。この原因を調べたところ、歳差ドリフトに より、捕捉イオンがモード構造を横切るように運動するため、MHD 不安定性に対する応答が著しく 弱くなるからであることがわかった(図 2)。今後は、非線形飽和レベルへの熱イオンの運動論的効果 の解析を進めていく予定である。



図 1. n=10の抵抗性バルーニングモードの揺動 圧力の固有関数分布。黒線は電子圧力(P_e)、緑 線は磁力線方向のイオン圧力(P_{ill})、赤線は磁力 線に垂直方向の電子圧力(P_{il})を示している。 振幅は電子圧力の(m,n)=(13,10)モードの振幅 で規格化されている。



図2. 磁気面上の電子圧力の揺動成分の等値面、 および、捕捉イオンの軌道。赤、青の領域は、電 子圧力の揺動成分が正、負の領域に対応する。 捕捉イオンは、モードの振幅が正、負の両方の 領域を通過する。

先に述べた LHD プラズマの解析の他、トーラス装置 PLATO に対する MHD 不安定性の解析のため、PLATO の磁場平衡の構 築も行った[3]。磁場平衡の評価には、統合輸送解析コード TASK の平衡解析モジュール EQU を使用した。EQU モジュールでは、 ポロイダルコイル電流を含めた自由境界プラズマの平衡計算を 行うことができる。このモジュールを用いて、ポロイダルコイ ル電流変化に対応したプラズマ形状パラメータ(楕円度 κ や Z 0.0 三角度 δ)を評価した。図 3 に EQU モジュールを使用した PLATO 装置における平衡磁場配位の計算結果を示す。ここで は、プラズマ電流 75kA、三角度 0.5 程度、楕円度 1.7 程度を 仮定しており、PLATO 装置で標準的な条件での平衡磁場配位 に対応する。次に、三角度と楕円度を変化させた計算結果を図4 に示す。(A)は、図3に示す標準的な平衡磁場配位のコイル電流 のうち OH コイルを-45kA turn に下げることで三角度と楕 円度を大きくした計算結果である。一方、(B) は反対に OH コイ ルを-70kA turn に上げることにより三角度と楕円度を抑えた 計算結果となっている。今後は、これらの MHD 平衡に対して MIPS コードを用いた MHD 安定性の解析を進めていく予定で ある。



図 3. EQU モジュールより得られた、標準平衡配位である $\kappa = 1.7$, $\delta = 0.5$ とした時の平衡磁場配位。



図 4. (A) 楕円度と三角度を大きくした場合 (κ =2.0, δ =0.79) と(B) 楕円度 と三角度を小さくした場合 (κ =1.5, δ =0.36) の平衡磁場配位。

- [1] M. Sato et al, Nuclear Fusion 57 (2017) 126023.
- [2] M. Sato et al, 27th IAEA Fusion Energy Conference (2018), TH/P5-25.
- [3] 富松修平他, プラズマ・核融合学会 九州・沖縄・山口支部 第22回支部大会 (2018), P-17.

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蓄積と透過挙動

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、成膜過程での水素挙動については十 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膜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。反跳水素が膜表面に衝突 した後、プラズマ中に反射するもの、表面層に蓄積するもの、内部へ浸透するものが想定されるが、未だ明らかに されていない。昨年度の応用力学研究所との共同研究において、成膜過程で膜を透過する水素挙動を観測するため の実験装置を作製した。本研究では、作製した実験装置を用いて、成膜過程での水素透過フラックスを測定すると ともに、温度の効果について調べた。

【実験方法】

昨年度実施した共同研究において、既設の RF 水素プラズマスパッタリング装置の接地電極を改造し、膜及び基 板を透過した水素を質量分析計で測定できるようにした。本年度は温度効果を評価するために、側面石英窓に赤外 線ランプを設置し、外部から透過部を加熱する仕組みを追加した。Fig.1 に改良した装置概略図を示す。

真空チャンバー下部フランジから 1/2 インチステンレス管を挿入し、金属ジョイントを介して ICF34 フランジ が溶接された 1/4 ステンレス管を取り付けた。ターゲットからの距離を変更することができるよう、金属ジョイン トに挿入した 1/4 ステンレスは O リングにより固定し、可変かつ気密性が保持される構造とした。ICF34 フランジ に、銅ガスケット、ニッケル基板を乗せ、最後に ICF34 穴あきフランジで挟み込んで締め付けた。ニッケル基板に

よってスパッタリング装置内の空間と接地電極内 の空間とが物理的に隔絶されている。RF 電極に は、タングステン板を設置した。ICF フランジ近傍 にプローブを設置し流入する電流値を測定した。

ターボ分子ポンプによりプラズマ側及び透過側 の真空排気を十分に行い、プラズマ側の真空ポン プをロータリーポンプに切り替えた。透過側に設 置された四重極質量分析計(QMS)を立ち上げて、 信号の安定待ちを行った。その後、プラズマ側にマ スフローコントローラーを介して水素ガスを導入 しガス圧を調整した。また、この際供給した水素の 透過側へのリークがないことを確認した。その後 RF 電極に 13.56MHz の RF 電力を印加して電極間 にプラズマを点火し、ニッケル基板上への薄膜の 形成をはじめた。標準的な放電条件は、RF 電力 100W、水素圧力 10Pa、ニッケル基板厚み 20µm、 電極間距離 6.5cm とした。



Fig.1 RF 水素プラズマスパッタリング装置
【結果及び考察】

標準放電条件において、赤外線ランプによる外部 加熱を行った場合と行わなかった場合の水素透過フ ラックスとニッケル基板温度の経時変化を Fig.2 に 示す。本実験により成膜過程において水素が W 膜及 びニッケル基板を透過していることが明確に示され た。このことは、膜の成長過程において膜表面層に 入射された水素同位体は、入射位置付近に留まるだ けではなく、80℃程度と比較的低温条件においても 膜中を拡散移動していることを示す。

プラズマからの熱負荷のみでは、ニッケル基板温 度は80℃程度まで緩やかに上昇した。赤外線ランプ による加熱を追加することで、140℃程度まで温度 を上昇させることができた。温度が高い方が透過フ ラックスの立ち上がりが急峻であり、最大値も大き い。ある時間から透過フラックスは減少に転じ、時 間に比例して低下を続けることがわかった。

放電開始後の急峻な増加は、ニッケル基板に直接入射さ れた水素が、プラズマ側表面に形成される W 膜によって プラズマ側への再放出を妨げられることに生じたものと 考えられる。ニッケル中の水素拡散係数は、温度の上昇と ともに増加することから、外部加熱を行った方が、透過開 始時間が早く、透過フラックスも大きくなったと考えられ る。時間とともに膜厚が増加し、水素の入射飛程を超える と、水素は W 膜に入射され、その一部は、ニッケル基板 へ拡散・浸透し透過する。W 膜中の拡散はニッケル中の拡 散に比べて遅いことから、水素の直接入射によってニッケ ル中に高い濃度で存在していた水素が透過側へ拡散・放出 されることで、透過フラックスがピークを示した後、徐々 に減少すると考えられる。10000sec 以降は、時間ともに 一定速度で透過フラックスが低下していることから、W 膜厚の増加に比例して透過フラックスが減少していると 考えられる。

プラズマ駆動透過による透過速度を決定するパラメー タは、単純には拡散係数と再結合係数による。W 膜中の水 素拡散係数については、これまでの研究においてW 膜付 きニッケル基板を試料とするガス駆動透過実験を通じて 定量済みである。そこで、水素挙動解析コード TMAP を 用いて、再結合係数をパラメータとする、実験結果へのフ ィッティングを行った。TMAP では膜厚の時間変化を模擬 できないことから、ある時間での実験結果に対するフィッ ティングを行った。なお、ニッケル中の水素拡散係数、溶 解度定数は Robertson らの値[1]を用いた。Fig.3 に示すよう に再結合係数の値によって透過フラックスが大きく異な り、プラズマ駆動透過速度を評価する上で、再結合係数が 重要な物質移動パラメータであることがわかる。得られ



Fig.3 水素透過フラックス実験結果とTMAPを用いたフィッティング結果の一例



た再結合係数をタングステンバルク材[2]およびニッケルの報告値[3]と比較して Fig.4 に示す。W 膜の再結合係数 は、温度が高い方が小さな値となることがわかった。今後、温度範囲を拡張して実験データを取得する予定である。 参考文献

- [1] W.M. Robertson, Z. Metallkde. 64 (1973), 436.
- [2] R.A. Anderl, et al., J. Nucl. Mater. 176&177 (1990) 683-689.

[3] M.A. Pick, K. Sonnenberg., J. Nucl. Mater. 131 (1985) 208-220. 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。 九州大学 応用力学研究所 平成30年度共同利用·共同研究 成果報告 30FP-29

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島根大学

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2 6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XR AIN等を活用することで実現されている。本年は、この大規模データを用いて名古屋地区(緯度 136.5~137.9,経度34.4~35.8)、期間(2016年8月21日~9月11日)について、突発的降雨 の時空間構造の抽出を行い、その統計解析を行った。

結果

2次元空間における空間分布を伴う降雨の時間発展から閾値を超える降雨の時空間構造を抽出した。閾値には強い降雨である 7mm/h を選択した。図1のように、空間2次元構造の閾値を超える 降雨領域の時間発展について時間・空間の3次元的な「塊」としてその等値面を得た。抽出した時空 間構造の一例を図2に示す。この3次元構造の起点の位置が、突発的降雨の発生した場所に対応し、 この構造の時間発展から突発的降雨の伝播方向やその速度を知ることができる。図2の例では、太 平洋側で発生した突発的降雨が伝播速度は 20km/h 程度で北方向へ伝播し、その寿命が 100 分程度 であったことが分かる。



展望

本研究の成果として得た伝搬の性質(伝搬方向・伝搬速度)を、地理空間と統合して解析すること により、具体的な応用を検討する。例えば、当該地域住民へのゲリラ豪雨対応のリードタイムを評 価し、アラートに役立てることや、アメダス観測点等をモニタリングポイントとして、そこで大雨 が観測された場合のその後の時間発展の予測を考慮したハザードマップ策定などに貢献することが 考えられる。

謝辞

本研究は、九州大学応用力学研究所平成30年度共同利用・共同研究30FP-29、中部大学問題複 合体を対象とする共同利用・共同研究IDEAS201831、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).

プラズマ乱流現象に関する可視化手法の開発と応用

【研究目的】

核融合プラズマ研究において、プラズマの揺 動・乱流の現象を理解することは核融合発電実現 のための重要な課題の1つである。現在、応用力 学研究所では乱流プラズマ実験装置において、プ ローブや超高速度カメラを用いた測定およびシ ミュレーションにより揺動・乱流の解析が進めら れており、プラズマは3次元に複雑に動いている ことが判明している。平成29年度の共同利用研 究において、ライトフィールドカメラを用いた画 像解析によるプラズマの揺動解析の手法の開発 を始め、x-y 平面の2次元においてプラズマの位 置を求める画像解析プログラムを作成した。本年 度はライトフィールドカメラの性能を確認し、画 像から奥行きであるz方向の位置情報を得ること を検討する。この手法が確立できればライトフィ ールドカメラの1枚の撮影画像からプラズマの 位置情報(3次元座標)を得ることができる。プ ラズマの乱流現象解析手法の1つとしての可能 性を検証する。

【ライトフィールドカメラについて】

ライトフィールドカメラは、被写体からの光線 を、三次元的な情報も含めて記録することが可能 であり、イメージセンサーの前面にマイクロレン ズアレイを配し、光線の明暗だけでなく、光線の 入射方向に関する情報も記録するカメラである [1]。撮影後にピントを自由に移動させたり、被 写体深度を変えたりした画像を出力することが できる特徴を有している。本研究で使用したライ トフィールドカメラは 2014 年に発売された LYTRO 社の「LYTRO ILLUM」である。ライトフィ ールドカメラはその構造から市販されている商 品は限られていたが、LYTRO 社は 2017 年にライ

有明工業高等専門学校・一般教育科 竹内伯夫

トフィールドカメラに関するサービスおよび製 造を終了した。現在は公式サイトも閉鎖し、オン ラインヘルプや本体および LYTRO ILLUM 専用の P C ソフトウェアの操作マニュアルなども使用で きない状況にある。

【検証方法】

本研究において、ライトフィールドカメラの特 性およびPCソフトウェアを理解し、奥行きに相 当するz方向を特定する方法ついて検証する。図 1に検証実験の様子を示す。



図1 検証実験の様子

ライトフィールドカメラの主レンズの先端か ら5.0cm、10.0cm、15.0cmにある位置に被写体を 置き、カメラでそれぞれの被写体にピントを合わ せた際にカメラの液晶に表示される「スポット深 度」の情報を調べる。その後、撮影した写真をパ ソコンに転送し、それぞれの画像に対してソフト ウェアで3つの被写体にピントを合わせた「フォ ーカス」の値を調べる。カメラ本体に表示される 「スポット深度」はソフトウェア上では表示され ず、逆にソフトウェアで表示される「フォーカス」 はカメラ本体には表示されないため、その関係に ついても調べることにした。

【検証結果および考察】

本検証で撮影した画像の例として、ピントを 一番手前の被写体に合わせて撮影した写真を 図2に示す。今回、3つの被写体に対して定点 のライトフィールドカメラでピントをそれぞ れ合わせた写真を撮影した。図の中の矢印はピ ントを合わせた位置を示す。前述の通り、それ ぞれの画像は後からピントを合わせることが 可能であり、初めにカメラでピントを合わせた 画像と、後からその場所にピントを合わせた画 像はまったく同じになることを確認した。



図2 ライトフィールドカメラの撮影画像

また、被写体のカメラ主レンズの先端からの 位置、スポット深度、フォーカスの値(それぞ れ3回の測定の平均値)をまとめたものを表1 に示す。

表1 被写体位置、スポット深度、フォーカスの 関係

被写体	スポッ	フォー	フォー	フォー
位置	ト深度	カス 1	カス 2	カス 3
5. Ocm	16cm	-3. 07	-16. 10	-21.04
10. Ocm	21cm	9. 53	-3.66	-8. 79
15. Ocm	27cm	14.80	1.64	-3.85

カメラの液晶に表示されるスポット深度は 被写体の奥行きを示すものである。主レンズの 先端からの位置に約 11cm を足した値となって いることが分かり、カメラで奥行き位置がほぼ 正確に測定できることを確認できた。ソフトウ ェアで表示されるフォーカスの値はピントを 合わせた位置が-4.0 であり、その値はピントを 手前にすると小さく、奥にすると大きくなるこ とが分かっている。スポット深度とフォーカス の間には相関はあるが、直接の関係は今回の測 定では見つけることができなかった。

【まとめと今後の予定】

昨年度の研究によりライトフィールドカメラ で撮影した画像から x-y 座標を、本年度の取り組 みにより z 座標を特定、すなわち1枚の画像から 対象となる物体の3次元位置情報を得ることが できることを示した。今後は、座標特定の精度、 実際のプラズマの画像での適用について検証し ていく予定である。一方でフォーカスについては カメラに関する正しい知識も必要であることを 感じた。また、LYTRO 社のライトフィールドカメ ラ事業終了に伴い、別の3次元位置情報取得方法 についても模索していく予定である。

【研究体制】

- ·代表者 有明高專 一般教育科 竹内 伯夫
- ・協力者 有明高専 一般教育科 鮫島 朋子 有明高専 技術部 森田 恵一
- ·世話人 九州大学 応用力学研究所 稲垣 滋

【謝辞】

昨年度に続き、ライトフィールドカメラについ て共に調査した有明高専電気工学科 4 年の西村 勇輝氏と宇都隆史氏に感謝申し上げる。

【参考文献】

 [1] 蚊野 浩「ライトフィールドカメラ Lytro の 動作原理とアルゴリズム」第 127 回微小光学 研究会, Vol.31, No.1, pp.17-22, 2013. http://www.cc.kyoto-su.ac.jp/~kano/pdf/paper/201 3%20MOC%20Lytro.pdf 長時間放電におけるタングステン壁排気の物理素過程の解明と制御

九州大学応用力学研究所 中村一男

目的:QUEST および LHD における長時間放電を支配する壁排気について、タングステンに特化して その物理過程の解明と制御を目的とする。LHDにおけるヘリウム長時間放電では、Phase1において高 い正の排気率を示し、Phase 2 において負の排気率に転じ、Phase 3 において再び正の排気率が復活す る。壁飽和と堆積層で解釈されている。QUESTにおける水素長時間放電では、Phase 1において高い 正の排気率を示し、粒子供給は時間とともに減少する。Phase 2 において粒子供給は停止したり再開し たりを繰返す。Phase 3 において粒子供給は全く行われなくなり、H_α一定制御不可となる。高温壁にお ける APS-W の壁排気で解釈されている。本共同利用研究では、APS-W の壁排気の物理素過程を解明 するとともに、その制御の方法の探索を目的とする。

序論:タングステン(W)は高融点、高熱伝導度、低熱膨張率、高質量密度を有する耐熱材料である。 Wコーティングは核融合炉における冷却配管、熱シールドなどの表面特性の改善に利用される。Wコー ティングの技術として APS (Atmospheric Pressure Spray)と VPS (Vacuum Plasma Spray)がある[1]。 溶射Wの壁排気の物理素過程を解明するには、溶射過程の解明、溶射Wの特性評価が必要である。溶射 Wの熱的特性評価として、電子ビームを熱源とした熱負荷装置を用いた熱負荷実験、市販ソフトウェア

ANSYS を用いた熱解析が共同利用研究でなされている[2]。ま た、タングステン(W)を ITER や原型炉のダイバータ板とし て使用する計画である。その使用に際しては破壊靭性の評価が 必要である[3]。タングステン(W)の非等方性が破壊方向に及 ぼす影響について調査・検討したので、その内容について報告 する。

調査内容:身近な破壊の例としては、昨年9月6日に起きた「平 成 30 年北海道胆振東部地震」の際の土砂崩れがある。土とい う等方性材料に鉛直方向の重力が加重されれば、その重力は土 砂内に仮定した斜面に直角方向の圧縮応力度σと平行方向のせ ん断応力度 aに分解される。圧縮応力度 oに比例した摩擦力(せ ん断抵抗力) σtanθがせん断応力度と逆方向に働く。せん断応力 度がせん断抵抗力 σ tan θ を上回ったとき土砂崩れが起きると考 えられる。そのクーロンの破壊基準をモールの応力円とともに 図1に示す。土の場合はせん断応力度が0でも、何らかのせん 断抵抗力(粘着力)cが働く。したがって、モールの応力円がク ーロンの破壊基準と接するとき、すなわち、鉛直方向から45度 の方向より少し大きな角度ので、土がせん断破壊して、土砂崩れ が発生する。

金属の場合も、等方性金属材料に圧縮応力を加重すると、圧 縮方向から 45 度の方向に、せん断破壊による縞模様が見られ る(図2)[4]。金属内に仮定した斜面に働く垂直応力度および せん断応力度の角度依存性を図3に示す。45度の方向でせん断 応力度が最大となり、その角度でせん断破壊すると考えられ る。すなわち、延性材料の降伏条件としてよく用いられるトレ 図2. せん断破壊による縞模様



図1. クーロンの破壊基準とモール の応力円.



スカの最大せん断応力説「最大のせん断応力度 がある値に達すると降伏が起きる」と一致する。

検討内容:タングステン(W)のように非等方 性がある場合、破壊方向はどのように影響され るかを考える。ヤング率は非等方性を有してい る。しかし、その非等方性は応力・ひずみ関係式 に影響を与えるが、モールの応力円には影響を 与えない。すなわち、線形弾性論の範囲では、 破壊強度(降伏強度)の非等方性に影響を与え るのみと考えられる。せん断破壊強度(降伏強 度)が非等方性をもち、加重方向のせん断破壊強 度が直角方向のせん断破壊強度の半分の場合を 考える。せん断応力度の平行、直角のいずれかの 成分がせん断破壊強度に達したときその方向に 破壊すると考える。

$$\tau_{y} = \min(\frac{\tau_{\perp}}{\cos\phi}, \frac{\tau_{\parallel}}{\sin\phi}) = \min(\frac{\tau_{\perp}}{\cos\phi}, \frac{\tau_{\perp}}{2\sin\phi})$$

この破壊条件をモールの応力円とともに図4に 示す。クーロンの破壊基準と似ているが、土砂崩 れと逆に、加重方向から45度の方向より少し小 さな角度 Øで破壊すると考えられる。参考までに 身近な破壊の例として、木柱を繊維方向に圧縮し た場合のせん断破壊写真を図5に示す。

非線形弾性論については今後の検討課題である。

- O. Kovarik, P. Hausild, J. Siegl, T. Chraska, J. Matejicek, Z. Pala, M. Boulos: The influence of substrate temperature on properties of APS and VPS W coatings, Surface & Coatings Technology 268 (2015) 7-14.
- [2] K. Tokunaga, T. Hotta, K. Araki, Y. Miyamoto, T. Fujiwara, M. Hasegawa, K. Nakamura, A. Kurumada, M. Tokitani, S. Masuzaki, K. Ezato, S. Suzuki, M. Enoeda, M. Akiba: Thermomechanical Behavior of Plasma Spray Tungsten Coated Reduced-Activation Ferritic/Martensitic Steel, Journal of IAPS, Vol.24, No.2 (2016) 73-78.
- [3] 徳永 和俊, 松尾 悟, 栗下 裕明, 外山 健, 長谷川 真, 中村 一男: ITER-grade タングステン圧延材に おける疲労予き裂導入と破壊靭性評価, 原子力学会, 茨城大学水戸キャンパス (2019).
- [4] J. M. Gere, S. P. Timoshenko: Mechanics of Materials, Third SI Edition, Chapman & Hall (1995) 87.



図3.垂直応力度およびせん断応力度の角度依存性



図4. 非等方性材料の破壊条件のモールの応力円



図5. 非等方性材料のせん断破壊例

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(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環境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(U0₂)は軽水炉燃料としての実績があり、立方晶安定化ジルコニア(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、イオン飛跡に沿って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、U0₂の模擬材料として同一の結晶構造と類似の物性値を持つCeO₂中に形成さ れる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、直径 2 nm 程度の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^{(1),(2)}。一 方、YSZ は蛍石構造を呈する酸化物であるが、酸素副格子位置に構造空孔が存在し、また、室温 から 1400 ℃にかけて熱伝導度は約 1.7 W/(m・K)と、UO₂ と 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はUO₂ と CeO₂とは異なる構造や形成効率を示すことが考えられるが、 YSZ 中のイオントラック構造と蓄積過程に関する知見は十分ではない。本研究では核分裂片を摸 擬した高速重イオンを照射した YSZ の微細構造を透過電子顕微鏡法により観察し、YSZ 中イオン トラック構造とイオントラック蓄積過程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 mo1%添加した板面(001)面の YSZ 単結晶、および 8 mo1%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 μ m 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 μ m にした。この試料に日 本原子力研究開発機構のタンデム加速を用いて 340 MeV Au²⁶⁺イオン、200 MeV Xe¹⁴⁺イオン、100 MeV Kr⁸⁺イオンを室温にて 1×10^{11 ~} 1×10¹⁵ cm⁻²まで照射した。ディンプラーにより照射試料の中心 領域を厚さ約 20 μ m 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。

3. 結果および考察

100 MeV Xe¹⁴⁺イオン、200 MeV Xe¹⁴⁺イオン、340 MeV Au²⁶⁺イオンを照射したYSZ中のイオントラ ックは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中イオントラックの中心領域において、原子数密度がCeO₂と同様に低下していることを 示している。図1 (a)[~](c)は340 MeV Au²⁶⁺イオンを(a) 1×10¹¹ cm⁻²、(b) 5×10¹¹ cm⁻² (c) 2×10¹² cm⁻²まで照射したYSZのTEM明視野像である。観察はイオントラックがスクリーンと平行になる方向 から、+1.0 μmのデフォーカス条件で行った。イオントラックは黒いドット状のコントラストと して観察され、その平均直径は1.8 nmであった。100 MeV Kr⁸⁺イオンと200 MeV Xe¹⁴⁺イオンの場合、 イオントラック直径はそれぞれ

1.3 nmと1.5 nmであり、CeO2のイ オントラック直径に比べ小さい値 となった。図1 (d)に100 MeV Kr⁸⁺ イオン、200 MeV Xe¹⁴⁺イオン、340 MeV Au²⁶⁺イオンを照射したYSZ中 のイオントラック数密度と200 MeV Xe¹⁴⁺イオンを照射したCeO₂中 のイオントラック数密度(1)の照射 量依存性を示す。100 MeV Kr⁸⁺イオ ンの結果を除き、イオントラック 数密度は低照射量において照射量 にほぼ比例して増加しており、こ のことはイオントラックが電子励 起損傷から直接的に形成されてい ることを示している。また、イオ ントラックの形成効率が1以下で あることが分かる。100 MeV Kr⁸⁺ イオンをYSZに照射した条件にお いては、イオン照射による点欠陥 が蓄積することによりYSZの熱伝 導度が低下し、ダメージ領域にお



図1 (a)~(c)340 MeV Au²⁶⁺イオンを照射した YSZ の TEM 明 視野像、および(d) YSZ と CeO2⁽¹⁾中イオントラック数密度の照 射量依存性

ける形成効率は非ダメージ領域における形成効率よりも大きくなることが考えられる。一方で、 すべての照射条件において、イオントラック数密度は高照射量域において飽和しており、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。

図1の結果に基づいて、蓄積過程のモデリングを行った。その結果、イオントラック形成効率 と回復影響領域は電子的阻止能値の増加に従って増大すること、およびYSZ中のイオントラック 形成効率と回復影響領域の値はCeO₂に比べて著しく小さい値を示した。以上の結果は、YSZ中の イオントラックでは溶融状態から回復が効率よく起こっていることを示唆している。

逃走電子の超高感度計測法の検討

核融合科学研究所・ヘリカル研究部 秋山毅志

目的

プラズマディスラプション時に発生する逃走電子は、真空容器内構造物に重大な損傷を起こしうる。その ため、ITERでも発生の抑制、または発生時の速やかな散逸方法などが求められ、様々なトカマク装置で 研究がなされている。散逸方法を確立するうえで必要なのは、高感度でかつ応答時間が速い逃走電子の 計測である。本研究では、逃走電子の高感度計測法としてプラズマからの RF 放射計測を提案し、その有 用性を検証する。

経緯と研究の重要性

LHD では浦項工科大学との共同研究でイオンサイクロトロン放射(Ion Cyclotron Emission (ICE))やホイ ッスラー波の領域に相当するプラズマから数十 MHz~数 GHz の放射を計測し、高エネルギー粒子の研 究を実施してきた。LHD にてポロイダルコイル電流を掃引する特殊な運転をした際、イオンサイクロトロン 加熱及び中性粒子ビームの入射無しに、極めて強い RF 放射が観測された。一方で、磁気計測には大き な変化が観測されておらず、プラズマ電流としては計測不可能なほどごく少数の逃走電子でも、強い RF 放射を誘起していることが推測される。本観測結果は理論的な検討を要するものの、RF 計測は逃走電子 に対して感度が高く、RF 放射計測は逃走電子の初期の成長段階で感知し、ペレットやガスパフの入射を 速やかに行うことに資する可能性がある。更に、RF 放射計測は簡易な金属製アンテナでも感度良く観測 でき、設置場所の制約も少ないという利点がある。そのため、ITER のように一般的な計測器でも設置が困 難で、極めて高い放射線環境下にある装置でも容易に設置ができる。

現在、QUEST では稲垣教授を中心に Ion Cyclotron Emission (ICE) 計測の計画が進められており、それの一環として逃走電子の計測手法としての RF 放射計測の妥当性や有用性を検証する。

RF 放射計測は、ITPA Diagnostic Topical group meeting にて Action item の1 つとなっている。RF 計測 が LHD や KSTAR でなされているような高エネルギー粒子研究だけでなく、逃走電子の高感度検出も可 能になれば、物理研究のための計測という位置付けだけでなく、装置運転のための計測という大きな価値 も持つことになり、計測の重要、設置の優先度が高まる。特に ITER のファーストプラズマでは、ECH 加熱 入射時に逃走電子の発生を抑えるため、干渉計で測定する電子密度が一定値以下であれば、ECH 入射 を停止するというシナリオが考えられている。もし、高感度の逃走電子の計測が容易に行うことができれば、 RF 放射強度を直接的な制御信号とすることができるため、ITER 運転や計測器検討に対するインパクトは 大きいと考えられる。

<u>検討結果</u>

図1に、LHDでコイル電流スイープをした際に発生した RF 放射の観測結果を示す。この時の中心磁 場強度は0.917 T であり、QUEST の4倍程度である。LHD での RF 放射計測は、フィルタバンクによる周 波数毎の強度計測(図1右側)と、図2に示す高速サンプリングによる周波数スペクトル計測からなる。150 ~250 MHz 程度の周波数帯がt=3秒程度から観測されている。3.3秒には中性ガスの増加がみられる が、これは逃走電子が真空容器壁をスパッタしているためと推測される。図2(1)の周波数スペクトルは0, 150,280,430 MHz の大きな構造に、4 MHz の高調波が重畳した構造になっている。4 MHzはプラズマ周 辺での磁場強度に対応した、重水素の ICE 基本周波数である。QUEST にて同様な運転を行うとすれば、 磁場構造の違いはあるにしろ、概ね1 MHz 程度の高調波が観測されるものと考えられる。LHD では、図2 (2)観測に電流導入端子の先端にかぎ型の長さ30 cm の無酸素銅製ダイポールアンテナを用いている。 高調波成分の計測も考え、LHD と同様のアンテナで十分計測可能であると考えている。プラズマへの距 離が LHD よりも近くなることから、プラズマへの影響も懸念されるため、これを回避するのであれば、DIII-D の ICE 計測と同様に、絶縁体 (DIII-D ではカーボンタイル、QUEST ではセラミックを検討)の裏側にループアンテナを設置することでも計測が可能と思われ、より設置が容易になる。



図 2(1) 図 1 の放電で観測した RF 放射の周波数スペクトル, (2) LHD でのダイポールアンテナ

<u>まとめ</u>

LHD での観測結果、及びアンテナ設計を参考に、QUEST での RF 放射計測系の検討を行った。LHD での 0.9 T 低磁場運転で強い放射が観測されているため、逃走電子発生時には概ね同じオーダーの周波 数帯で放射が予測され、同様の計測系を設置することで、通常の放電時の ICE に加え、逃走電子に関連 すると推測される放射を観測可能と考えられる。

研究組織

研究代表者:秋山毅志(核融合研)、Gunsu Yun(浦項工科大)、稲垣滋(応力研)

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

1. 目的

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 な影響を及ぼす因子である。本研究では、タングステン基板に蒸着したタングステン膜を、プラズマ対 向壁における堆積層の模擬試料として、イオンを注入した蒸着膜における重水素のリテンションを実験 的に調べた。

2. 方法

試料は九州大学片山先生に提供いただいた、タングステン板に水素プラズマ RF スパッタ法によって タングステン蒸着膜を生成した試験片である。試料の性状などを表1に示す。W や He イオンのエネル ギーは、蒸着膜中に損傷が生成するように選んだ。W と He が生成する損傷が最大となる深さは、それ ぞれ、0.22 μm と 0.35 μm である。

試料名	寸法	蒸着 W 厚さ	照射イオン	平均損傷量	照射時温度
W-W01		0.84 µm	_	0 dpa	_
W-W02	$15 \mathrm{x} 15 \mathrm{x} 1 \mathrm{mm}^3$	0.75 μm	4.8MeV-W	0.3 dpa	常温
W-W03		0.97 µm	0.4MeV-He	1.1 dpa	250°C

表1 試料一覧

実験では、蒸着膜を重水素プラズマに曝し続けた状態で³He イオンを照射し、核反応を利用して蒸着 膜中の重水素濃度の深さ方向分布を測定した。この測定方法では定常状態での重水素のリテンションを 測定することができる。重水素のエネルギーは 1eV 程度であるため、蒸着層に損傷は生成させない。

3. 実験結果

図1にWを注入したW-W02試料における重水素の深さ方向分布の例を示す。横軸は表面からの深 さ、縦軸は重水素濃度である。深さ0に濃度のピークがあるのは表面に重水素が吸着しているためであ

る。120℃での測定は2回行ったが、常温から 120℃に加熱した状態での濃度は図1に示すよ うにかなり低かった。次に280℃に加熱すると濃 度は増加し、その後120℃に戻してから測定する と最初の状態よりもはるかに濃度が高くなって いた。濃度が高くなった深さはイオンが照射損傷 を生成させた領域とほぼ一致した。これはイオン 注入によって欠陥が生成し、加熱によって欠陥が 水素のトラップとなったためと考えられる。蒸着 膜中の平均重水素濃度は400℃までほとんど変 化せず、トラップは比較的深いことが分かった。 また、400℃でアニールしてもトラップは消滅し



図1 120℃のW注入W-W02における重水素 の深さ方向分布

なかった。

非照射の W-W01 試料でも He イオンを注入した W-W03 試料でも加熱によってトラップが生成した が、W-W03 試料の重水素濃度は他の2 試料よりも高く、300℃まで加熱すると一部の重水素は脱トラップし、400℃のアニールによって一部のトラップが消滅した。

4. 考察

生成したトラップの性状を表2に比較して示す。これらの情報と、空孔の移動温度、複空孔や転位の アニール温度などから総合的に考察した結果、次の結論を得た。

試料	照射	トラップ		平均トラップ密度		
		生成温度	深さ	アニール前	400°Cアニール後	
W-W01	無し	280°C	深い	$2 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$	$0.8 \times 10^{20} \mathrm{cm}^{-3}$	
W-W02	W	280°C	深い	$1.4 \times 10^{20} \mathrm{cm}^{-3}$	$1.4 \times 10^{20} \mathrm{cm}^{-3}$	
W-W03	He	250°C	比較的浅い	3.3×10 ²⁰ cm ⁻³	1.6×10 ²⁰ cm ⁻³	

表2 生成したトラップの比較

(1) トラップは単空孔の移動によって生成する。

(2) 空孔型の欠陥の安定性から判断すると、全ての試料について複空孔がトラップとして働いている。

(3) He は空孔と複合体を形成してトラップとして働く。このトラップは複空孔よりも浅く、400℃で消滅する。

今年度の申請書に記載したように、1eV 程度の低エネルギー水素原子の反射に関する実験も行った。 詳細は省略するが、今までは、ある仰角と方位角に反射された水素のみを検出していたために全体の反 射係数を得ることが困難であったのに対し、今年度の実験では反射された水素原子を反射率の高い円筒 管で集めてから検出する方法を採用することによって、水素に覆われたホウケイ酸ガラス表面における 粒子反射係数が 0.93 という非常に高い値であることが分かった。

論文・学会発表リスト

学会発表

中野晋太郎、中川雄貴、高木郁二、「RF 放電管から飛来する水素原子の径方向分布」、日本原子力学会 秋の大会 1N18、2018/9/5-7、岡山市.

研究組織

代表者	高木郁二	京都大学大学院工学研究科	教授
研究協力者	花田和明	九州大学応用力学研究所	教授
研究協力者	井上大起	京都大学大学院工学研究科	修士2年
研究協力者	中野晋太郎	京都大学大学院工学研究科	修士2年
研究協力者	中川雄貴	京都大学大学院工学研究科	修士1年
所内世話人	花田和明		

2019年2月28日

株式会社 日立製作所 研究開発グループ 王昀

「2018年度 九州大学共同利用研究成果報告書」

題目:安定化元素を添加したオーステナイト系ステンレス鋼の照射特性評価

1. 目的

沸騰水型原子炉(BWR)の炉内構造材を適用対象として,耐食性,耐応力腐食割れ(SCC)性並びに 耐照射性を向上した材料の開発に取り組んでいる.本研究の一環として,安定化元素 Ta 添加を施した 高 Cr 高 Ni のオーステナイト系ステンレス鋼の開発を進めている.本開発材の照射誘起粒界偏析(RIS) や照射硬化などの照射特性に及ぼす構成元素の影響を理解するために,重イオン照射後の試験片を対象 に,照射欠陥の定量評価を実施した.

2. 開発材の化学成分

耐照射性への添加元素影響を明確化することを目的として,安定化元素 Ta を添加した開発材を試作 した.また,比較のため,現行材 SUS316L と市販の冷間圧延材 SUS310S を用意した.表1にこれらの 開発材と比較材の化学組成を示す.

表1 開発材の化学成分 (mass%)

照射試験	開発材	С	Si	Mn	Р	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Nb	Та	Al	Ν	0	Base material
0	H23-3	0.013	0.52	0.93	0.025	0.001	0.29	14.30	17.57	2.2	0.07	< 0.002	0.43	0.039	0.020	0.003	SUS316L
0	H23-4	0.013	0.49	0.93	0.022	0.002	0.28	18.94	25.03	< 0.01	0.08	< 0.002	0.21	0.047	0.021	0.004	SUS310S
0	H23-5	0.013	0.50	0.92	0.023	0.002	0.29	19.36	25.03	< 0.01	0.08	< 0.002	0.40	0.030	0.020	0.007	SUS310S
0	H23-6	0.013	0.51	0.93	0.024	0.001	0.28	21.52	20.94	2.2	0.08	0.00	0.41	0.047	0.019	0.004	γ相安定化
0	SUS310S	0.050	0.58	0.74	0.020	< 0.001		19.22	25.41								
0	SUS316L	0.009	0.60	0.89	0.018	0.005		12.26	16.31	2.1							

3. 照射試驗片

上記の各供試材から、φ3mm×0.2mm^Tの円盤試験片を作製して、「エメリー研磨→ダイヤモンドペース ト研磨→コロイダルシリカ研磨→電解研磨」の順に、表面を仕上げた.代表例として、SUS316Lの照射 試験片の外観と組織を図1に示す.

4. 照射欠陥の観察と定量評価

温度 300°で照射量 1dpa の Fe²⁺イオンで照射した各供試材を対象に,照射欠陥の観察を実施した.照 射試験片から厚さ 100 nm 前後の電子顕微鏡観察用試験片を製作した.照射欠陥の観察は,収差補正走 査・透過電子顕微鏡 (STEM) JEM-ARM200F を用いて行った. STEM の電子線を照射表面近傍の断面に 入射させ,深さ方向で微細組織分布を観察した.また,照射欠陥の数密度を求めるために,同 STEM 装 置に搭載された電子エネルギー損失分光 (EELS) 装置を用いて,損傷ピーク深さ近傍領域での試験片の 厚さを測定した.

代表例として, SUS310S と 0.4Ta+SUS310S (H23-5)の WBDF (Weak Beam Dark Field) 像を図 2 に示す. 照射欠陥は白いコントラストで観察された.また, EELS により両試験片の損傷ピーク深さ近傍領域で

222

得られた試験片厚さの評価結果を図3に示す.両者の厚さは100 nm以下となり,ほぼ同等であった. 図4に上記6つの供試材から得られた深さ方向の照射欠陥数密度分布を示す.Taを添加した開発材は, 全体的に照射欠陥の数密度の最大値は4×10²²/m³~7×10²²/m³となり,SUS316LとSUS310Sに比べて低 かった.

5. まとめ

Ta を添加した開発材を対象に実施した照射欠陥の定量評価結果から,Ta 添加により照射欠陥の数密度が低減し,優れた照射特性を得ることが実証された.

6. 今後の課題と対応

今後は拡散理論に基づき,今回得られた照射欠陥の定量評価結果から開発材の耐RIS性,さらにIASCC 性向上のメカニズムを検討する予定である.



(a) 照射試験片の外観



(b) 照射試験片の表面観察(SUS316L)

図1 照射試験片の外観と組織観察



図2照射試験片断面のWBDF像



⁽b) 0.4Ta+SUS310S (H23-5)





複合照射環境下におけるタングステンの水素同位体吸蔵特性に関する研究

筑波大学数理物質系 坂本瑞樹

1. はじめに

プラズマを取り囲む材料の表面状態は、照射損傷、スパッタリング、再堆積、バブル形 成等の様々なプラズマ・壁相互作用 (PWI) 現象に起因して変化する。さらに核融合炉にお けるプラズマ対向材料は、中性子、水素同位体、ヘリウムの複合照射環境下に置かれるこ とになる。このような複合照射環境下における材料の水素吸蔵特性に関するデータは数少 なく、今後データベースを構築していく必要がある。本研究では、核融合炉のプラズマ対 向材料の最有力候補であるタングステン材料に注目し、中性子を模擬した重イオンによる 表面改質及び重イオンとヘリウムや水素同位体の複合照射による材料の表面改質が水素吸 蔵特性へ与える影響を明らかにすることを目指した。本年度は、ヘリウムプラズマ照射が 材料表面改質に与える影響に注目して実験を行った。

2. 実験結果及び考察

今回実験に用いた小型プラズマ生成装置 APSEDAS は、真空容器の周りに 2 個の磁場コ イルが設置されており、真空容器中心で最大約 0.05T の磁場を発生させることが可能であ る。真空容器上部のヘリカルアンテナに 13.56MHz の高周波を印加することによって直径 約 50mm のプラズマが生成される。APSEDAS の向かい合ったポートを用いて、キセノン ランプ光源、ロッドレンズ、偏光子、試料、回転検光子、ズームレンズ、分光器となるよ うに光学系が組まれ、分光エリプソメトリーシステムが構築されている。直線偏光光の入 射角はタングステンの擬ブリュースター角に近い 75°である。また、偏光子の前後にスリッ トを設置し、キセノンランプ光が試料にのみ照射されるようになっている。さらに、プラ ズマ照射中のその場測定を行うため、プラズマ発光とキセノンランプ光源由来の試料反射 光を区別できるよう、ロッドレンズと偏光子の間に光学シャッターが導入されている。試 料を反射した p 偏光と s 偏光の位相差と振幅比を角度で表した Δ と Ψ を測定する。

今回実験に用いた試料は ITER 仕様タングステン($10 \times 10 \times 1 \text{ mm}^3$)で、プラズマ照射領 域は中央の $8 \text{mm} \phi$ である。照射したヘリウムプラズマの電子密度は約 $1.3 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ であ り、試料へのイオンの入射エネルギーは約 37 eV である。照射フラックスは約 $1.5 \times 10^{21} \text{ m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であり、フルエンスが $5.5 \times 10^{24} \text{ m}^{-2}$ までプラズマ照射した。放射温度計で測 定した照射中の試料表面温度は約 575-610K であった。

図 1(a)及び(b)に、He プラズマ照射前と照射中の波長 450-800nm における $\Delta \geq \Psi$ のスペ クトルをそれぞれ示す。He プラズマ点火後、450-800 nm の波長範囲において Δ は減少し、 Ψ は増加し続けた。また、プラズマ点火後約 400 秒で $\Delta \geq \Psi$ の変化量は飽和し一定とな り、 Δ は約 6°下降し、 Ψ は約 1.5°上昇することが明らかとなった。今回のヘリウムプラズ マ照射ではヘリウムイオンのエネルギーと試料表面温度が低いため、これまでの結果から 表面形状等の変化は見られないが、材料表面では改質が起きていることが示された。今後、 このような試料に重イオン照射を行い、複合効果について調査していくことが課題である。



図1ヘリウムプラズマ照射前及び照射中における試料を反射した p 偏光と s 偏光の(a) 位相差 Δ と(b) 振幅比 Ψ のスペクトルの時間変化

3. 研究組織

研究代表者:坂本 瑞樹(筑波大学・数理物質系・教授) 所内世話人:渡邉 英雄(九州大学・応用力学研究所・准教授) 共同研究者:坂本 隆一(核融合科学研究所・教授、微細組織解析) 共同研究者:時谷 政行(核融合科学研究所・助教、微細組織解析) 共同研究者:寺門 明紘(筑波大学・数理物質科学研究科・D3、表面計測) 共同研究者:野尻 訓平(筑波大学・数理物質科学研究科・D3、プラズマ計測) 共同研究者:鈴木 佑(筑波大学・数理物質科学研究科・M2、材料表面解析)

4. 成果報告

- (1) Y. Suzuki, M. Sakamoto, S. Ino, N. Ezumi, Y. Nakashima, "Diagnostics for Surface of Tungsten Exposed to Deuterium Plasma by Spectroscopic Ellipsometry", 12th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement (2018.8.27-31, Tsukuba, Japan) P35.
- (2) 鈴木佑、坂本瑞樹、他8名、「プラズマ照射によるタングステン表面変化の分光エリ プソメトリー測定」第35回プラズマ・核融合学会年会 (2018.12.3-6,大阪大学吹田キ ャンパス) 4Pp79.

平成 30 年度 応用力学研究所 共同研究 報告書

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 Modeling of particle recycling and collisional radiation for edge plasmas in QUEST

慶應義塾大学大学院理工学研究科 畑山明聖,星野一生,巽瞭子,坪谷友香 九州大学応用力学研究所 花田和明

1. 研究背景·目的

これまで、核融合炉のプラズマ対向材料として炭素 材が考えられてきたが、トリチウムの長時間吸蔵による 装置の早期放射化が問題となり、現在では金属材の使 用が見込まれている。

しかしながら、長時間運転の際に、金属材が持つ燃料粒子の短時間吸蔵(動的吸蔵)特性によって、炉心 への粒子放出が起こり、プラズマ密度制御が妨げられ るという問題が生じる.

核融合炉長時間運転の実現にはプラズマ密度の制 御が必要であるため,動的吸蔵特性が炉心プラズマ密 度に与える影響を解析し,炉心プラズマとプラズマ対向 壁間の粒子循環(水素リサイクリング)を理解すること が重要である.

球状トカマク QUEST 装置はプラズマ対向材に金属 が用いられ、プラズマ密度が比較的低いため、動的吸 蔵が支配的であるという特徴がある[1,2]. そのため、長 時間運転時の動的吸蔵特性に伴う水素リサイクリング の解析に適していると言える.

以上を踏まえ、本研究では、1)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 構築を行い、2)実験と比較することによりモデル妥当 性を検討し、よって、最終的には、3)今後の核融合炉 の長時間定常運転に向けた水素リサイクリングおよび 炉心プラズマ密度制御手法の検討に寄与することを目 的とする.

2.モデルの概要

上で述べたように、本共同研究では QUEST 装置周 辺プラズマとプラズマ対向壁との相互作用(Fig.1)を考 慮したプラズマ0次元モデルおよび周辺プラズマからの 発光線強度計算モデルを構築し、水素リサ



Fig.1 Overall concept of the present model (cited from Ref. [3])



Fig.2 Schematic drawing of the model geometry including the main plasma. (cited from Ref. [3])

イクリングの解析を行い, 球状トカマク QUEST 装置に おける実験との比較を行う.

より具体的には、QUEST 装置をFig.2に示すように三 つの特徴的な領域, すなわち, 1) 炉心プラズマ領域, 2) 周辺プラズマ領域(SOL 領域), 及び, 3) プラズマ対向 壁(第一壁およびリミタ)に分ける. さらに, 各々の領域 に対して空間的な平均密度を支配する, いわゆる0次 元粒子バランスの式を基礎方程式とする. すなわち, 以下に示す, 0次元粒子バランスの式から, 各領域の 平均粒子密度を計算する: 1) 炉心プラズマ領域

$$\frac{d\overline{n}_M}{dt} = -\frac{\overline{n}_M}{\tau_M} + \overline{S}_M, \ \tau_M \equiv \frac{a^2}{2\alpha_M D_M}$$
(2.1)

ここで、 \bar{n}_{M} 、 τ_{M} 、a、 D_{M} 及び \bar{S}_{M} は、各々、炉心プラズ マ平均密度、閉じ込め時間、プラズマ小半径、及び、イ オン化粒子ソースを表す、また、 α_{M} は平均密度とプラ ズマ表面密度との比を表す空間分布ファクターを表す、

2) 周辺プラズマ領域(SOL およびリミタ領域)

$$\frac{d\overline{n}_{SOL}}{dt} = (1 - f_{wall})\overline{S}_{Diff} - \frac{\overline{n}_{SOL}}{\tau_{//}} + \overline{S}_{SOL}, \quad \tau_{//} = \frac{L_{//}}{2\alpha_{SOL}C_s}$$
(2.2)

ここで、 \bar{n}_{SOL} , f_{wall} , $\bar{S}_{diff} = \bar{n}_M / \tau_M$, $\tau_{||}$, $L_{||}$, C_s , 及 び \bar{S}_{SOL} は, 各々、周辺プラズマ平均密度、炉心プラズ マから流出しプラズマのうちでプラズマ対向壁に輸送 されるプラズマの割合、周辺プラズマ領域の磁力線 方向のプラズマ閉じ込め時間、 周辺プラズマ領域 の磁力線の長さ、イオン音速及びイオン化粒子ソー スを表す. また、 α_{SOL} は空間分布ファクターを表す.

また, 上記, 領域1), 2) でプラズマ粒子種としては, 電子(e), 水素イオン(H⁺), 水素分子イオン(H₂⁺,H₃⁺)を 考慮する.

3) プラズマ対向壁

$$\frac{d\overline{n}_{Wall}}{dt} = \frac{\Gamma_{Wall}}{d_{Wall}} - \frac{2k_{Wall}}{d_{Wall}}\overline{n}_{Wall}^2$$
(2.3)

ここで、 \bar{n}_{wall} 、 Γ_{wall} 、 d_{wall} は、各々、第一壁(あるいは、 リミタ)における水素原子平均密度、壁へのプラズマ粒 子束密度、及び、粒子が吸蔵される壁(再堆積層)の厚 さを表す.また、 k_{wall} は壁における水素原子の再結合 係数を表す.

モデルでは、プラズマ粒子に加えて、中性粒子(分子 H₂, 原子 H)についても以下の 0 次元粒子バランスの 式を解く. ただし、中性粒子は磁力線には束縛されない ため、 炉心プラズマ領域と周辺プラズマ領域とを区別 しない.

a)中性分子

$$\frac{d\overline{n}_{H_2}}{dt} = \overline{S}_{H_2}^{Gas-\text{Puff}} + \overline{S}_{H_2}^{Wall/Lim} + \overline{S}_{H_2}^{gain} - \overline{S}_{H_2}^{loss} - \overline{S}_{H_2}^{Pump} - \frac{\overline{n}_{H_2}}{\tau_{H_2}}$$

$$(2.4)$$

$$\Xi\Xi\overline{C}, \ \overline{n}_{H_2}, \ \overline{S}_{H_2}^{Gas-\text{Puff}}, \overline{S}_{H_2}^{Wall/Lim}, \ \overline{S}_{H_2}^{gain}, \ \overline{S}_{H_2}^{loss}, \ \overline{S}_{H_2}^{Pump} \ \overrightarrow{L},$$

各々,真空容器内の中性水素分子の平均密度,ガ スパフによる粒子ソース,第一壁(あるいはリミタ)から の中性粒子リサイクリングソース,気相中における反 応による分子生成ソース,同様に反応による分子損 出(解離反応,分子イオン生成など),排気による粒 子損出を表す.また, τ_{H_2} は分子の真空容器内の閉 じ込め時間を表す.

b) 中性原子

$$\frac{d\overline{n}_{H}}{dt} = \overline{S}_{H}^{gain} - \overline{S}_{H}^{loss} - \overline{S}_{H}^{CX} - \frac{\overline{n}_{H_{2}}}{\tau_{H}}$$
(2.5)

ここで、 \bar{n}_{H} , \bar{S}_{H}^{gain} , \bar{S}_{H}^{loss} ,及び, \bar{S}_{H}^{cx} は,各々,真空 容器内の中性水素原子の平均密度,気相中における 反応による原子生成ソース、同様に反応による原子 損出(イオン生成など),及び、荷電交換反応による 低温原子の損出を表す.また、 τ_{H} は原子の真空容 器内の閉じ込め時間を表す.

さらに、式(2.4)、(2.5)の基底状態の水素分子、原 子密度に加えて、振動励起分子や励起原子をも考慮し た衝突輻射モデル(CRモデル)を構築した.上のプラズ マ及び壁に対するO次元モデルとこのCRモデルとを結 合することで QUEST 装置における分光計測実験との 比較が可能となる.すなわち、本研究で構築したモデ ルにより、実験で観測されるHα線の強度と中性粒子の イオン化量、炉心プラズマ密度やプラズマ対向壁への 粒子入射束との関係を考察することが可能となる.

3.結果

2.で構築したモデル,及び,QUEST 装置パラメータを 用いて計算した結果を次頁,Fig.3 及び Fig.4 に示す [3][4]. ただし,計算にあたっては,簡単のため,①第一 壁とリミタの材料及び再堆積層の厚みは等しい,②リ ミタ前面でのリサイクリングによるイオン化ソースを無視 する,③壁からの粒子放出係数 k_{wall} をパラメータとして, 二つの場合(k_{wall} = 0.2×10⁻³⁸ m⁴/s,

1.0×10⁻³⁸ m⁴/s)について,計算結果を実験結果[4]と
 比較した.その他の解析条件,考慮した気相中での反応過程などの詳細については,文献[3]を参照されたい.
 Fig.3(a) と(b)との比較からわかるように,初期



Fig. 3 Time evolution of the H atom wall-inventory. (Left: Experimental result [4], Right: Simulation result). Difference of the wall temperature in the experiments (Red: room temperature, Blue: 373K) is treated with difference of the k_{wall} in simulation. (cited from Ref. [3])



 H_{α} intensity observed in the experiment (Left) [4] and calculated with QSS-CR model (Right). (cited from Ref. [3])

的には壁への吸蔵粒子数には、差はみられない.しか し、長時間経過すると、実験では壁温度が高い程、計 算では粒子放出係数 k_{wall} が大きいほど、吸蔵粒子数の 飽和が早い.壁温が高い程、粒子放出係数 k_{wall} が大き いと考えられるから、実験と計算とは定性的に良い一致 が得られている.また、吸蔵粒子数飽和レベルは、粒子 放出係数 k_{wall} の値に依存するが、計算で用いた粒子放 出係数 k_{wall} の値は、非現実的な値ではなく、他の実験 から示唆される現実的なオーダーの範囲にある[5].

実験では、プラズマからの Hα 線発光強度がある閾 値を下回ったら外部からガスパフを行うことによってプ ラズマの密度制御を行っている[4]. Fig.4(a)と(b)との比 較から、計算結果は Hα 線発光強度に関する実験結果 を定性的によく再現していると考えられる. すなわち、 放電時間が長くなるにしたがって、Hα 線発光強度のピ ーク間の周期が長くなること、 **また, 壁の温度が高い程**(粒子放出係数 k_{wall} が大きい) ほど, **この傾向が顕著に現れている**.

以上のように本研究で構築したモデルは、定性的に は、実験と概ね良い一致をみている.しかしながら、定 量的には壁が飽和に達するまでの時間が実験結果に 比較して、短いなどの問題もある.

上で述べたように、上記、文献[3]の解析では、①実 質的に第一壁とリミタの区別をせず、壁全体を同一に 扱っていた、また、②リミタ前面でのリサイクリングの効 果を無視してきた、最近、これらの簡単化を行わず、さ らに、プラズマ及び中性粒子の空間分布の効果を表す ファクターをより現実的な値にすることで、定量的にも 実験により近い値を得ることが可能になってきている [6].

4.結論と今後の課題

本研究で構築したモデルは,上で説明したように

QUEST 装置における粒子リサイクリング特性の理解に 役立つことは、もちろん、今後の核融合炉長時間運転 におけるプラズマ対向壁への粒子吸蔵特性を含むグロ ーバルな粒子リサイクリング特性の理解や、炉心プラ ズマ密度制御についての知見を得るための有用な解 析ツールになり得ると考えられる.

今後は、ASDEX-U、JET などの、さらに大型かつ高密 度プラズマ条件下における長時間放電に対しても、本 研究で構築したモデルを適用する.よって、さらなるモ デル妥当性検証とモデル改善を継続するとともに、ITE Rや原型炉クラスの核融合炉の長時間運転、炉心密度 制御の検討に寄与していきたい.

参考文献

- K. Hanada, *et al.*, Plasma Science and Technology 18, 1069 (2016).
- [2] K. Hanada et al., Nucl. Fusion 57, 126061(2017).
- [3] K. Okamoto, *et al.*, Contrib. Plasma Phys. **58**, 602(2018).
- [4] T. Honda, Department of Advanced Energy Engineering Science, Kyushu University, Master's thesis (2014).
- [5] T. Murakami, *et al.*, Int. Conf. Fusion Reactor Material (ICFRM2017), Aomori, Japan, Nov. 5-10, 2017 (poster presentation).
- [6] S. Kitaoka, Department of Applied Physics and Physico-Informatics, Keio University, Graduation Thesis (2019).

本研究に関連する成果発表

- 1. 学術論文(査読有)
- K. Okamoto, R. Tatsumi, K. Abe, A. Hatayama and K. Hanada, "Modeling of Plasma and Its Wall Interaction for Long Term Tokamak Operation", Contributions to Plasma Physics, 58, 602-607 (2018).
- (2) Y. Tsubotani, R. Tatsumi, K. Hoshino, and A.Hatayama, "Analysis of Molecular Activated Recombination in Detached Divertor Plasmas", Plasma and Fusion Research, (2019) in Press.
- 2. 国内学会発表
- (1) 坪谷友香, 巽瞭子, 星野一生, 畑山明聖, 「非接触ダイバータプラズマにおける ELM 発生時の

分子活性化再結合の解析」,第12回核融合エネ ルギー連合講演会,ピアザ淡海(滋賀県立県民交 流センター),2018年6月.

QUESTにおける水素原子密度空間分布の分光計測

京都大学大学院工学研究科 四竈 泰一

目的

トカマク周辺部のイオン流れは、プラズマ不安定性や粒子輸送等の制御因子であること が明らかになっている.このためイオンのトロイダル・ポロイダル速度の空間分布計測に もとづく流れの駆動・散逸機構の解明に向けた研究が世界的に進められている.このよう な状況の中で、QUESTでは電子サイクロトロン共鳴加熱(ECH)単独で維持された、イオ ンへの直接の運動量入力が無いプラズマにおける流れの研究が進められている.

代表者等は、多視線分光を用いた C²⁺、O⁺不純物イオン速度の空間分布計測システムを 開発し、流れの駆動・散逸機構の研究を進めてきた.本課題では、散逸の一因と考えられ ている、プラズマ中に侵入した水素原子とイオンの荷電交換による運動量損失を実験的に 明らかにするために、水素原子発光線強度を空間分解計測し、原子の励起発光過程のモデ リングを用いて水素原子密度の空間分布を算出した.

方法

QUEST の 28 GHz ECH 放電(#35787, プラズマ 電流-80 kA)を用いて実験を行った. MH16 ポー トを利用し,中央平面上に設置したトーラス中心 からの距離が 0.25-0.96 m の範囲の 16 視線を用い て水素原子バルマー γ 線(主量子数 n = 2-5, 波長 434 nm)の発光を集光した.集光した光は光ファ イバで伝送し,既設の分光器(Andor AM-510; 焦 点距離 1 m,回折格子 1800 本/mm)により分光し, CCD でスペクトルを計測した.スペクトルの波長 範囲は約 12 nm,波長分解能は視線に応じて変化 し,約 20-40 pm であった.スペクトル強度は標準 光源を用いて絶対感度校正した.電流が立ち上が る途中の t = 2.25-2.55 s(フレーム 2), 2.7-3.0 s(フ レーム 3)の 2 つの時間帯のデータを解析した.

結果

バルマーγ線スペクトルから放射輝度を求め,平 滑化スプライン関数で補間した後にアーベル逆変 換を用いて放射率の径方向分布へと変換した.フ レーム3のデータに対する逆変換結果を図2に示 す.

次に,放射率から励起上準位の水素原子密度を 求め,トムソン散乱計測で得られた電子温度・密 度を入力とする衝突輻射モデル計算(K. Sawada and T. Fujimoto, J Appl. Phys. 78, 2913 (1995))を行 って基底準位の水素原子密度を求めた.この際, 水素イオンの再結合および水素分子の解離により 生成する励起原子は無視した.後者の寄与は不明 だが,主量子数が大きくなるほど小さくなる.

水素原子密度の径方向分布を図3に示す.エラ ーバーは発光強度および電子温度・密度の誤差を 考慮して評価した.センタースタック近傍では電



図 1. 観測視線



図 2. バルマーγ線放射率の径方向 分布 (フレーム 3)

子温度・密度のデータが無いため解析を行っていないが、水素原子密度はセンタースタッ クに向かって増加していると考えられる. 求めた水素原子密度の妥当性を確認するために、フレーム3の解析結果を真空容器壁に

設置されている高速電離真空計で 計測した水素分子圧力と比較した. 温度 300 K を仮定して圧力を水素 分子密度に換算した値,また,最 も外側の位置 (R = 0.92 m) で求 めた水素原子密度を2で割った値 を図3中に実線で示す.これらの 値はファクター2 程度で一致して おり, プラズマ中の水素分子密度 が不明なため定量的な議論はでき ないが, 求めた水素原子密度のオ ーダーは妥当だと考えられる.ま た、フレーム2の水素原子密度は 周辺部で1桁程度小さくなってお り,時間変化のメカニズム解明が 求められる.



図3の結果から、フレーム3の時間帯では R > 0.7 m の領域に水素イオンと同程度の密度で水素原子が存在しており、荷電交換による水素および不純物イオンの運動量損失が有意になっている可能性があることが分かった.

成果報告

- N. Yoneda, <u>T. Shikama</u>, H. Zushi, *et al.*, "Spectroscopic measurements of impurity ion toroidal and poloidal flow velocities and their dependence on vertical magnetic field in QUEST toroidal ECR plasmas" *Plasma Fusion Res.* 13, 3402087 (2018).
- [2] <u>T. Shikama</u>, K. Hanada, K. Nii, *et al.*, "Measurement of the ion species dependence of the intrinsic edge rotation in spherical tokamak QUEST", 23rd Plasma Surface Interaction in Controlled Fusion Devices No.297, 2018/6 (ポスター).
- [3] <u>四竈 泰一</u>,「QUEST における不純物イオントロイダル回転の発光分光計測」RIAM フ オーラム 2018 2018/6(招待).
- [4] 米田 奈生, 四竈 泰一, 花田 和明, 他,「QUEST ECH プラズマにおける不純物イオン トロイダル流れの磁場配位依存性」第 35 回 プラズマ・核融合学会年会 5p72 2018/11 (ポスター).

共同利用研究集会

第16回トロイダルプラズマ統合コード研究会

16th 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(http://p-grp.nucleng.kyoto-u.ac.jp/bpsi/)。このプ ロジェクトは、科研費「核燃焼プラズマ統合コードによる構造形成と複合ダイナミクスの 解析」(2004~2006)、「統合コードによる ITER プラズマのマルチスケール物理に関する総合 的研究」(2007~2010)、「トロイダルプラズマの運動論的統合シミュレーションコードの開 発」(2008~2012)等によって部分的に支援されてきた。各年度の活動状況および次年度の活 動計画を含めて研究会を毎年開催している。今回で第 16 回目となるが、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ている。第 2 回 ~第 8 回と第 11 回~第 15 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。

2. 開催日時

開催日程: 2018 年 11 月 29 日 (木) - 30 日 (金) 開催場所: 九州大学応用力学研究所 2 階大会議室 講演数: 19 件、参加者数: 27 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。外国(韓国)からの参加 者も含めて講演19件の申し込みが集まった。件数は前年度と同程度であり、他の学会も同 様な時期に集中しているので参加を見合わせた研究者がいたことを考慮するとまずまずの 件数といえる。初日午前の核融合フォーラムサブクラスターとの合同会合で内外の研究情 勢の報告と今後の研究方針の議論の後、午後よりこの一年の研究進展を紹介する講演を行 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5件、加熱3件、輸送モデリン グ3件、高エネルギー粒子1件、乱流6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。統合コードスキー ムにビックデータ解析などの新たな手法を適応することで研究の幅が広がってきている印 象がある。今回のプログラムの特徴は初日午後に統合シミュレーションを設けたことである。ま た、乱流、運動論効果、材料特性などに関して、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。 さらに本年はポスドク・学生による講演が7件あり、例年以上に若手の活躍が見られたこ とも印象的である。以下に講演内容を抜粋して説明する。

本年度の研究講演最初のセッションは統合シミュレーションにおける各要素についての 横断的な構成とした。林はコア輸送について、2020年より稼働予定のJT-60SAトカマク装 置の運転シナリオ統合モデリングの成果を報告した。日欧共同でコードのベンチマークを 行い、さらにトロイダル回転制御の各要素を取り入れながらモデルを進展させた。そして JT-60SAの高ベータ定常運転シナリオについて、回転制御と不純物パフによりダイバータ 熱負荷も規定内に収めた形で提示した。矢本は周辺輸送について、SONICコード開発の進 展を報告した。複数種の不純物輸送を扱えるようにすることで、JT-60SAにおけるネオン・ アルゴン混合注入効果の定量的評価を行い、ダイバータ熱負荷低減への有効性を示した。 本多はコア輸送の大域的解析について新しい数値手法を提示した。遺伝的アルゴリズムを 用いて方程式の定常解を求めるコードを発展させプラズマ分布の定常解を得た。そして統 合コードスキームに組み込み、JT-60SAの高ベータ放電解の高速算出を可能とした。福山 は加熱解析について、運動論効果を含む波動コード開発の進展について報告した。積分形 の誘電テンソルを用いて、電子サイクロトロン波のモード変換における有限ラーマ半径効 果を評価した。

2日目午前は外国からの参加者も含めて、乱流輸送に関する英語セッションを構成した。 矢木は密度分布が中心でくぼみを持つ場合の、勾配が正となる領域で起こる粒子ピンチ効 果について報告した。イオンミキシングモードと電子ドリフト波の競合について、理論解 析を含めて説明した。小菅はストリーマの引き起こす密度変動が周波数変動を通じて乱流 に作用し、ストリーマ成長をもたらす機構について報告した。ストリーマと帯状流の選択 性に言及した。Choi は電磁的ジャイロ運動論シミュレーションを行い、磁気揺動熱流束の 向きと大きさについてモード構造の対称性に着目した分類を行った。非線形流束が準線形 流束を凌駕して熱流束の向きを変える場合があることを示した。

その他にも多くの課題について、様々な観点からの研究が報告された。登田はジャイロ 運動論コードより導出した熱拡散係数および準線形粒子流束モデルを用いて LHD プラズ マにおける輸送解析を行った。成田はジャイロ運動論コードよりニューラルネットワーク を用いた粒子輸送モデルを構築し、輸送計算の高速実行を可能とした。そして、JT-60U プ ラズマの解析を行った。村上は電子サイクロトロン加熱により非軸対称プラズマで生じる トロイダル流についてドリフト運動論コードを用いた評価を行った。磁場リップル捕捉電 子の径方向運動がトルク生成に寄与する。リップル構造と熱電子捕捉時間の関係からトル クの大きさが決まる。続いて山本は HSX ヘリカル装置での電子サイクロトロン加熱による トロイダル流生成について評価した。準ヘリカル対称配位とミラー配位時の比較を行い、 実験と傾向の一致を見た。大澤はタングステン中の空孔存在下の水素吸蔵に関して報告し た。第一原理計算により、それぞれの水素原子個数時の結晶構造中における水素位置を示 した。沼波は LHD における複数種粒子を含む粒子輸送に関する研究成果について報告した。 乱流および新古典不純物粒子フラックスのパラメータ依存性を示し、粒子バランスについ

234

て議論した。奴賀は中性子発生量の評価を通じて LHD における高エネルギー粒子の閉じ込 めについて議論した。前田は LHD の熱フラックスに関するニューラルネットワークモデル の構築について報告した。凌は LHD 型核融合炉の輸送解析結果について報告した。森下は データ同化手法を LHD の輸送解析に適用した結果について報告した。佐々木は円筒装置に おける密度勾配駆動及び流れシア駆動不安定性の競合とその結果現れる流れパターンの分 岐について報告した。糟谷はジャイロ流体モデルを用いた円筒プラズマにおけるイオン温 度勾配モードの不安定化条件とトーラス装置の統合乱流シミュレーション計画について講 演した。

来年度も第 17 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、プロジェクト内での共同研究を活性化すること、来年度の研究会形式や日程等を議 論して、閉会した。

4. 研究集会プログラム

(18 min talk+7 min discuss or (15 or 10) min talk+5 min discuss)

- 11月29日(木)
 - 9:10-12:30 核融合エネルギーフォーラムサブクラスターとの合同会合
- 12:30-13:30 昼休み
- 13:30-13:40 はじめに 村上 (京大)

(座長:村上)

13:40-14:05 講演 1-1 林 (量研)

Predictive integrated modelling of plasmas and their operation scenarios towards exploitation of JT-60SA experiment

14:05-14:30 講演 1-2 矢本 (量研)

Extension of SONIC code toward mixed-impurity seeding capability

14:30-14:55 講演 1-3 本多 (量研)

Development of the integrated model with the iterative solver GOTRESS

14:55-15:20 講演 1-4 福山 (京大)

Progress in kinetic full wave analyses in fusion plasmas

- 15:20-15:40 休憩
- (座長:林)
- 15:40 16:05 講演 1-5 登田 (核融合研) Modeling of turbulent particle and heat transport in helical plasmas based on gyrokinetic analysis
- 16:05-16:30 講演 1-6 成田 (量研)

Particle transport modeling based on gyrokinetic analyses of JT-60U plasmas

16:30-16:55 講演 1-7 村上 (京大) Simulation study of toroidal flow generation by ECH in non-axisymmetric tokamak plasmas

16:55 – 17:15 講演 1-8 山本 (京大) Effects of electron cyclotron heating on the toroidal flow in HSX plasmas

17:15 散会

18:30-21:00 懇親会 (炙り炉端 山尾 博多駅前にて)

11月30日(金)

9:30- 9:35 事務連絡

(座長:糟谷)

- 9:35 10:00 講演 2-1 Yagi 矢木 (量研) Revisit ion-mixing mode
- 10:00 10:25 講演 2-2 Kosuga 小菅 (九大)

How pattern is selected in drift wave turbulence: role of parallel flow shear (tentative)

- 10:25 10:45講演 2-3Gyung Jin Choi (Seoul Univ.)Gyrokinetic simulation study of parity dependence of magnetic transport
- 10:45-11:05 休憩
- (座長:登田)
- 11:05-11:30 講演 2-4 大澤 (九大)

Stable structure of hydrogen in tungsten di-vacancy and its isotope effect

11:30-11:55 講演 2-5 沼波 (核融合研)

Kinetic simulations for particle transport of multi-species plasmas in LHD

- 11:55-12:20 講演 2-6 奴賀 (核融合研)
 - Analysis of energetic particle confinement in LHD using neutron measurement and Fokker-Planck codes
- 12:20-13:30 昼休み

(座長: 矢木)

13:30-13:50 講演 3-1 前田 (京大)

Modelling of heat transport in LHD using neural network with non-dimensional input parameters

- 13:50 14:05 講演 3-2 凌 (京大) Integrated simulation study of LHD type fusion reactor by TASK3D
- 14:05 14:20 講演 3-3 森下 (京大) Integrated transport simulation of LHD plasma using data assimilation
- 14:20-14:45 講演 3-4 佐々木 (九大)

Chirality of helical flows in plasma turbulence

14:45-15:10 講演 3-5 糟谷 (九大)

Study of plasma instability by numerical simulations in basic experimental devices

- 15:10-15:30 まとめ 糟谷(九大)
- 15:30 散会

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。一例として流れと乱流揺動との関連 の理解、イオンサイクロトロン放射(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ーシップが強化され、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。今回はヨーロッパとの交流を主眼に置いた。

研究集会の開催

開催日時:2018.5.21-23

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

Max-Planck 研究所からの1名(Hallatschek), Warwick 大学からの1名(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。今回は更に招聘者の所属先(Warwick 大学)への派遣についても議論した。

研究集会のまとめ

本研究集会では乱流,MHD,高速粒子の相互作用の理解をテーマとし、これらに深く関わる測地線音波モード(GAM),ICE,ドリフト波について議論を行った。以下に具体的な課題と議論の内容を示す。

1. Progress of GAM simulation

ジャイロ運動論コード CGYRO と2流体コード NLET を用い、同一のパラメータで得られ る輸送を比較し、流体近似の検定を行った。衝突パラメタが大きい場合は衝突性バルーニ ング乱流を、低い場合はコア・エッジ境界領域のイオン温度勾配乱流の領域を考えた。こ の中で、例えば GAM の周波数特性の違いにも着目し、乱流と GAM の相互作用を含めた 輸送について、流体モデルの適用範囲を明らかにした。

2. Particle-Wave Interaction

ICE は高エネルギー粒子とプラズマとの相互作用により生じる。この理解には波動と粒子 との相互作用の観測が重要である。応用力学研究所に今年度着任された池添准教授は、ア ルフベン波とイオンの相互作用に関する実験観測を筑波大学の GAMMA10 装置で行って きた。その成果を発表し、ICE の専門家の Dendy 教授と議論を行った。並せて、JT-60U における ICE 計測結果についての検討も行われた。

また、期間が別となるが Dendy 教授の共同研究者である Chapman 氏の来日に合わせ、 ICE bursts during ELM in KSTAR tokamak と題したセミナーを行うとともに、本ワー クショップの続きとしてデータ解析を行った。

3. Turbulence Intermittency

ドリフト波乱流が示す突発性について議論を行った。近年用いられるようになったハースト数をPANTAプラズマについて求め、その結果を議論した。ハースト数は解析の時間窓の長さに対して依存性を持つ結果が得られ、短時間の解析では値が十分収束していない可能性が指摘された。時間窓を比較的長く設定し、ハースト数の半径方向分布を求め、乱流揺動が長期記憶を持つ領域を観測した。今後、この解析を進めドリフト波乱流の突発的現象との対応関係をまとめることとなった。

来年度は佐々木助教がWarwick大学に半年ほど滞在する予定であり、この間に国際的なデータ解析のネットワーク作りに着手する予定である。

International Workshop for Advanced Data Analysis of Plasma (May 21st- 23rd at RIAM Kyushu Univ.)

5/21 (Mon.)

10:00 Inagaki: Welcome and Introduction

10:15 Scientific session:

30 min. Inagaki: Recent Progress of PANTA Experiment

- 30 min. Hallatschek: Progress of Gyro-simulation of GAM
- 30 min. Sasaki (presented by Inagaki): Theoretical progress on GAM

Lunch

13:30 Scientific session:

30 min. Kosuga: Phase Space Turbulence

14:00 – Working session: Hallatschek, Inagaki, Kosuga technical aspects of ICE, PANTA tour, etc.

5/22 (Tue.)

10:00 Scientific session:

30 min. Boyu: Hurst analysis of turbulence in PANTA30 min. Dendy: Simulation of ICE in a tokamak/LHD plasma I30 min. Discussion

Lunch

13:30- Working session: Hallatschek, Dendy, Inagaki

Scientific stay at Warwick Univ., future research plan

5/23 (Wed.)

10:00 Scientific session:

30 min. Dendy: Simulation of ICE in a tokamak/LHD plasma II

30 min. Ikezoe: Interaction between wave and high energy particles in magnetized plasmas

30 min. Discussion

Lunch

13:30- Working session: Ikezoe, Dendy, Inagaki

Technical aspects of ICE, QUEST tour, budget application etc.

特定研究報告書

タイトル: 次世代パワーエレクトロニクス信頼性・設計技術

研究代表者: 首都大学東京 理工学研究科 和田圭二

所内世話人: 西澤 伸一

1. 緒言

本研究では、パワーエレクトロニクス技術の信頼性向上とそれを実現する回路設計技術の確立を目的とする。特に、 次世代のパワーデバイスとしての利用拡大が期待されている SiC (シリコンカーバイド)パワーデバイスの利用を前提とし た検討を行う。パワーエレクトロニクス回路は、パワーデバイスのスイッチングにより電力の変換を行う。この技術は、太 陽光・風力で発電した電気エネルギーを有効利用するためには必須の技術であり、さらには EV(電気自動車)にも必 要不可欠な技術である。

本研究では、現在利用が想定されている 1,200V 耐圧のパワーデバイスを対象として、実際に産業用途で使用され る動作環境下でパワーデバイスのスイッチング試験および連続動作による試験を行い、デバイスの劣化性能を評価検 証する。さらに、動作制限値近傍(電圧・電流・温度)条件下におけるスイッチング試験を行い、SiC パワーデバイスの劣 化性能評価を行う。これらの研究成果により、既存の SiC パワーデバイスの い弱点''を明確にする。さらに、この研究成 果から、SiC パワーデバイスの劣化を防ぐための回路設計と制御範囲の制約条件について検討を行う。

2. 研究方法

既存のSi(シリコン)パワーデバイスを対象とした耐量評価試験法を参考にして、SiCパワーデバイスを対象とした評価 回路を設計・製作する。なお、SiCパワーデバイスの特長の一つとして、従来素子よりも高速にスイッチングできるため に、電気的特性を評価するための電圧・電流計測技術が重要となる。そのため、測定手法を考慮した評価回路試作が 必須となる。また、現在SiCパワーデバイスは国内外の複数のメーカより販売されているが、それぞれの電気的特性が 異なるために代表的なメーカ 3 社程度を抽出し、性能評価試験を行う。このとき、パワーデバイス周辺にはインダクタ・ キャパシタの受動素子も必須となるので、これらの電気的なパラメータによる違いも評価する。

3. 実験結果

図1に評価回路を、図2に評価時のテストパターンを示す。また、表1に試験したデバイスを、表2に評価回路パラメータを示す。図3に JFET の評価欠陥一例を示す。繰り返し評価試験として、5000 回のスイッチング 試験を行い、初期および 5000 回スイッチング後の IV 特性の変化を実測した。その結果、JFET では繰り返し試験前後の抵抗変化は初期抵抗値に対して数%増加し、MOSFET では 30~70%と大きく抵抗値が増加 することがわかった。つまり MOSFET は動作に伴い特性劣化を呈する。この差異が、MOSFET のゲート酸化 膜の劣化に起因するのか、JFET と MOSFET のデバイス物理の差異に起因するのかは、今後、評価を進め ていく予定である。あわせて、シリコンパワーデバイスとの比較を行う。



図2 評価テストパターン

1.7 kV

- 1.2 kV

デバイスパラメー	·タ
Device Paramet	ers
SIC-MOSFET	SIC-JFET
1200 V	1200 V
10 A	38 A
1200 V	1200 V
280 mJ 💥	
	デバイスパラメー Device Paramet SiC-MOSFET 1200 V 10 A 1200 V 280 mJ ※

 $W_{in} = 50 \text{ V}, I_{D} = 6 \text{ A}$

	表2	評価回路パラメータ
--	----	-----------

Circuit parameters						
Input voltage V _{in}	400 V					
Inductance L	1.4 mH & 10 mH					
Gate resistor R _G	47 Ω					

Oliver it managements

DC Voltage V _{in}	400 V	Inductor L	1.4 mH
ON period Ton	75 µs	Current I _{AS}	22.2 A



✓ The avalanche energy is 448.9 mJ in each test
 ✓ 5000 times repetitive test

図3 JFET 評価結果の一例
振動発電マルチフェロイック薄膜における 3D 応力解析

物質・材料研究機構・機能性材料研究拠点 木村秀夫

目的

マルチフェロイック体は、電気・磁気・力学特性を結びつけるものとして注目を集め、電気磁気効果を 中心に基礎的研究が進められている。研究代表者は早くからマルチフェロイック体の振動発電応用を進 め、マルチフェロイック体薄膜に走査プローブ顕微鏡のカンチレバーを通して応力を加えることで、強 誘電性ドメイン、強磁性ドメインがスイッチできることを明らかにし(Sci. Rep., 6, (2016), 31867; NPG Asia Mater, 9, (2017), e349)、自然振動エネルギーの発電応用を目指している。しかしながら、応力印加効 果を詳細に明らかにすることは困難で、実験的には応力印加とドメインスイッチの関係を明らかにでき ず、シミュレーションにより応力印加状態を調べる必要がある。応用力学研究所は結晶に関するシミュ レーションに実績があるため、共同研究により応力印加ドメインスイッチの応力状態シミュレーション を実施したい。ドメインスイッチのシミュレーションにより、どのように 3D で応力が伝達されるのか、 結晶成長において欠陥が発生した場合の影響を明らかにして実験結果と比較することで、最終的な振動 発電へと繋げる。

実験方法

マルチフェロイック体薄膜は、レーザー堆積法(PLD 法)にて研究代表者機関で作製する(研究代表 者)。作製条件を変えて成膜し、作製条件と欠陥との関係及び走査プローブ顕微鏡によるドメインスイッ チの条件を実験的に明らかにしておく(研究協力者)。応用力学研究所では、スーパーコンピューターシ ステムを用いて、有限要素法等による応力印加シミュレーションを実施する(所内世話人)。走査プロー ブ顕微鏡のカンチレバーを通しての応力印加は、ナノメートルオーダーの局所領域への応力印加になる ため、カンチレバー周辺での応力状態はシミュレーションでなければ明らかにすることができない。さ らに、ドメインスイッチについての新しい概念として、応力勾配によるフレクソエレクトリック効果の 影響が議論され始めているため、本共同研究においても、シミュレーションで応力勾配の程度を 3D で 明らかにし、実験結果と比較する。



応力印加強誘電ドメインスイッチ、強磁性ドメインスイッチの概念図【NPG Asia Mater, 9, (2017), e349】

実験結果

まず、3Dシミュレーションと比較する実験を実施した。実験に使用する薄膜は Bi₄Ti₃O₁₂-nBiFeO₃ (BTFO: n = 1–3, 5) で、PLD法により膜厚350mmとなるようにPt/Si基板結晶上に成膜した。すでに化学 溶液法により作製した0.5Ba(Z_{0.8}Ti_{0.2})O₃-0.5(Ba_{0.7}Ca_{0.3})TiO₃ ファイバー結晶を用いて応力勾配Flexoelectric 効果によるセルフポーリングを検討しており、それをベースとして研究を進めた。

薄膜については、走査プローブ顕微鏡により微細な表面、ポーリング状態を観察するとともに、マク ロなポーリング状態観察には強誘電体テスタを使用するが、強誘電体テスタが故障したため、マクロ観 察は実施できなかった。

今年度が共同研究の初年度であったため、3Dシミュレーションの条件設定までができた程度で、3Dシ ミュレーション実施までには至らなかった。



ファイバー結晶による Flexoelectric 効果セルフポーリングの概念図【Nano Energy 50, (2018), 97】

今後の展開

マルチフェロイック体に関する研究は基礎研究にとどまっていたが、本研究により応力のファクター を考慮することが可能となり、マルチフェロイック体の応用研究への展開が期待される。マルチフェロ イック体は、応力センサー、振動発電デバイス、セルフチャージングパワーセルへの展開が期待でき、 センサー材料研究に貢献することができる。

これまでは 14nN から 1300nN の応力印加を行ってきたが、デバイス応用、時間経過後の再ポーリング を考えると、できるだけ小さな応力であることが望ましい。10nN 応力印加を目指す。その応力評価には 3D シミュレーションの実施が必要不可欠である。走査プローブ顕微鏡の圧電応答顕微鏡 (PFM)、磁気 力顕微鏡 (MFM)を利用して、カンチレバーを介して応力印加を行ってきたが、カンチレバー先端の曲 率半径 (50µm) はカンチレバーの種類ごとに異なるため、今後は異なる曲率半径のカンチレバー (20µm, 7µm)を用いることで応力勾配を変化させ、Flexoelectric 効果利用に必要な応力勾配の値を明確にする。

研究成果報告

発表論文:無し

学会発表: (1) Domain switch by multi-field in multiferroic thin films using SPM, Hideo Kimura, Tingting Jia, Hongyang Zhao, Zhenxiang Cheng, The 2019 International Symposium on Future Materials, No. T4.4, (30th January -1st February, 2019, Wollongong).

研究組織

物質・材料研究機構:木村 秀夫 グループリーダー JIA Tingting NIMS ポスドク研究員 応用力学研究所:西澤 伸一 教授 次世代パワーエレクトロニクスシステム用受動部品

九州工業大学 大学院生命体工学研究科 長谷川 一徳

要旨

省エネルギーに必要不可欠であるインバータ回路の構成要素であるキャパシタ(コンデンサ)は 他の部品に比べ低寿命であり、キャパシタの寿命がインバータ回路自身の寿命を決定している。研 究代表者はこれまでに、加速劣化試験により電解コンデンサ劣化の直流バイアス依存性を実験的に 検討し、劣化の進行に伴なう ESR 増加率とキャパシタンス低下率では異なる傾向を有することを 確認した。これは、電解コンデンサの劣化診断には ESR・キャパシタンス双方のモニタリングが必 要であることを示している。本研究では、回生の必要ないモータドライブにおいて広く利用されて いるダイオード整流器・三相 PWM インバータを用いたシステムにおける直流リンクコンデンサの モニタリング手法を提案し、実リプル電圧・電流から ESR とキャパシタンスを独立に抽出できるこ とを確認した。

1. 序論

インバータにおける直流リンクコンデンサは信頼性低下の大きな要因であることが指摘されて いる。コンデンサの健康状態の診断のため、コンディションモニタリングが注目されている。コン デンサの劣化は等価直列抵抗(ESR: Equivalent Series Resistance)の増加率またはキャパシタンスの低 下率で判断される。

研究代表者らは先に,加速劣化試験により電解コンデンサ劣化の直流バイアス依存性を実験的に 検討し,劣化の進行に伴なう ESR 増加率とキャパシタンス低下率では異なる傾向を有することを 確認した。これは,電解コンデンサの劣化診断には

ESR・キャパシタンス双方のモニタリングが必要で あることを示している。

本研究では、回生の必要ないモータドライブに おいて広く利用されているダイオード整流器・三 相 PWM インバータを用いたシステムにおける直 流リンクコンデンサのモニタリング手法を提案す る。これは、コンデンサの実リプル電圧・電流から ESR とキャパシタンスを独立に抽出できる点に特 長がある。



図1 ダイオード整流器・三相 PWM インバータ実験回路図



図2 被測定キャパシタ等価回路



図3 ESR/キャパシタンスモニタリング提案法のブロック図

2. 実験回路構成

図 1 に電源側にダイオード整流器を用いた三相 PWM インバータの回路構成を示す。ダイオード整 流器は電源周波数の6倍成分(6ωs)のリプル電流を理 論的に発生する。これに加え,実際には三相電源電 圧のわずかな不平衡に伴い電源周波数の倍成分成 分(2ωs)も生じることがある。一方で,三相 PWM イ ンバータはキャリア周波数成分とその整数倍成分 のリプル電流を発生する。そのため,直流リンクコ



図4 インピーダンスプロファイルの変化

ンデンサのリプル電流には数10Hzから数10kHzにわたる広い周波数成分が含まれる。

後述の ESR/キャパシタンスモニタリングにあたっては,直流リンクコンデンサ電圧のリプル成 分の検出が必要であるが,ダイオード整流器・三相 PWM インバータシステムにおいてはリプル成 分よりも直流電圧成分の方がはるかに大きな振幅を有する。本論文では Fig. 1 中に示す直流ブロッ クフィルタを導入し、リプル成分*v*_{cur}のみを検出する。これは一次のハイパスフィルタで構成され ており、カットオフ周波数は次式で与えられる。

$$\omega_F = \frac{1}{C_F R_F} \qquad [rad/s] \tag{1}$$

ここで, *C*_F と *R*_F はそれぞれ一次ハイパスフィルタを構成するキャパシタンスと抵抗である。実験では,ダイオード整流器が発生する 2ω_S以上の周波数成分を通過させるため,カットオフ周波数 を 33 Hz とした。一方で,リプル電流検出はコンデンサの負側に電流センサを挿入している。

3. ESR/キャパシタンスモニタリング法

リプル電流は多数の周波数成分で構成されており、次式で表される。

$$i_{C} = \sum_{k=1}^{n} I_{CUT}(\omega_{k}) \sin(\omega_{k}t + \varphi_{k})$$
⁽²⁾

ここで、 $I_{\rm cur}(\omega_k)$ と φ_k はそれぞれ各周波数成分の振幅と初期位相を表している。図2に解析で用いる被測 定キャパシタの等価回路を示す。 $R_{\rm s}$ はESR値を表している。直流リンクコンデンサのリプル電圧 $v_{\rm cur}$ は 次式で与えられる。 $v_{CUT} = \frac{1}{c} \int i_c dt + R_s i_c$ $= \frac{1}{c} \int \sum_{k=1}^n I_{CUT}(\omega_k) \sin(\omega_k t + \varphi_k) dt + R_s \sum_{k=1}^n I_{CUT}(\omega_k) \sin(\omega_k t + \varphi_k)$

$$=\sum_{k=1}^{n} I_{CUT}(\omega_k) \left\{ -\frac{1}{\omega_k c} \cos(\omega_k t + \varphi_k) + R_S \sin(\omega_k t + \varphi_k) \right\}$$
(3)

(3)式から各周波数成分の振幅は次式で与えられる。

$$V_{CUT}(\omega_k) = I_{CUT}(\omega_k) \sqrt{\left(\frac{1}{\omega_k C}\right)^2 + R_s^2}$$
(4)

(4)式を(3)式で除算すると、各周波数におけるインピーダンスが次式で得られる。

$$Z_{CUT}(\omega_k) = \frac{V_{CUT}(\omega_k)}{I_{CUT}(\omega_k)} = \sqrt{\left(\frac{1}{\omega_k c}\right)^2 + R_s^2}$$
(5)

(5)式は被測定コンデンサの電流・電圧波形の各周波数成分を,FFT を用いて抽出することでインピー ダンスプロファイルを作成できることを示している。実験から得られるインピーダンスプロファイルに フィッティングカーブを導入することで,複数の周波数成分を含む波形からも ESR・キャパシタンスを 算出できる。

図3にモニタリング手法のブロック図を示す。FFTを用いてリプル電流・電圧の各周波数成分*I*_{CUT}(ω_k) と*V*_{CUT}(ω_k)を抽出し,各周波数におけるインピーダンス*Z*_{CUT}(ω_k)を算出する。*Z*_{CUT}(ω_k)のプロットにより インピーダンスプロファイルを作成し,最小二乗法を用いてフィッティングカーブを描くことで ESR と キャパシタンス値を独立に算出する。図4に ESR 増加・キャパシタンス低下時のインピーダンスプロフ ァイルの変化を示す。ESR 増加時は高周波域のインピーダンスが増加し、キャパシタンスの低下は低周 波域の傾きが増加する。

4. 実験結果と考察

Table I に実験回路の定格と回路定数を示す。本研 究では ESR とキャパシタンス値の変化を模擬するた め以下の3条件で実験を行った。

- Condition A: $C_{\rm UT} = 1100 \ \mu F$
- Condition B: C_{UT} = 1100 μF, 150 mΩの抵抗を直列
 に挿入 (ESR 増加を模擬)
- Condition C: C_{UT} = 1000 μF (キャパシタンス低下を 模擬)

図 5 にコンデンサのリプル電圧波形 \hat{v}_{cur} を示 す。(b)では(a)の結果に比べ ESR 増加に伴いインバ ータのキャリア周波数成分が増加している。一方, (c)ではキャパシタンスの低下に伴いダイオード整 流器の 2ωs と 6ωs 成分が増加している。

表1 実験回路の定格と回路定

System Power rating	Р	1.5 kVA
AC current rating	Is	5.8 A
AC voltage rating	Vs	150 V
Line frequency	fs	60 Hz
DC inductor	$L_{\rm DC}$	2.5 mH (6.3%)
Load inductor	$L_{\rm L}$	4 mH (12.5%)
Load resistor	$R_{\rm L}$	10 Ω
Carrier frequency	fc	10 kHz
Output frequency	fo	50 Hz
Capacitors under test	$C_{\rm UT}$	1100 or 1000 μF
Unit capacitance constant	$H_{\rm CUT}$	15.0 ms (1100 μF)
of the capacitors		13.7 ms (1100 µF)



図 5 リプル電圧 *v*_{cut}実験波形



図 6 にコンデンサのリプル電流波形を示す。

Condition A~C ともほぼ同一の波形であった。これはインバータが発生するリプル電流がリプル電 圧に依存せず電流源と見なせるためである。ダイオード整流器からのリプル電流も DC リアクトル の影響でほぼ変化しない。

図 7 にインピーダンスプロフィルを示す。これは図 5 のコンデンサ電流波形と図 6 の直流リンク 電圧波形それぞれの FFT 結果を用いて作成している。フィッティングカーブは(5)式を用いてモデ リングしている。図 7(a)においてキャパスタンス値は使用したコンデンサの公称値 1100 μF とほぼ 一致している。図 7(b)では ESR が 261 mΩに増加しており、この変化は直列接続した抵抗値におよ そ一致している。図 7(c)ではキャパシタンス低下し、使用したコンデンサの公称値にほぼ一致して いる。

5. まとめ

本研究では、ダイオード整流器を電源側に使用した三相 PWM インバータにおける直流リンクコ ンデンサのモニタリング手法を提案した。実験により、提案法はコンデンサの実リプル電圧・電流 波形から ESR とキャパシタンス値を独立に抽出できることを実証した。

提案法では、コンデンサを取り外すことなく、かつ検出用の電流なども必要としないため、コン デンサの実動作環境におけるオンラインのモニタリングが可能である。 研究代表者:長谷川 一徳 所内世話人: 西澤 伸一

成果報告

K. Hasegawa, S. Nishizawa, and I. Omura, "ESR and capacitance monitoring of a dc-link capacitor used in a three-phase PWM inverter with a front-end diode rectifier," *Microelectron. Rel.*, vol. 88-90 pp. 434-437, Sep. 2018.



図7 インピーダンスプロファイル

特定研究報告書

タイトル: 高耐圧パワーデバイス用電極の接合信頼性

研究代表者: 北九州市環境エレクトロニクス研究所 宍戸 信之

所内世話人: 西澤 伸一

1. 緒言

パワーデバイスは電力有効利用のためのキーデバイスである。安心安全なエレクトロニクスシステムの実現には、そのパワーデバイスからなるパワーモジュールの高信頼性・長寿命化が必須となる。特に、次世代高耐圧パワーデバイスは高温下での動作が要求されるため、異種材接合部であるデバイス電極実装部での熱疲労による破壊が深刻な問題となる。標準的な電極接合技術としてワイヤボンディングが多用されているが、次世代パワーエレクトロニクスで想定される200度以上の高温環境下での寿命の定量予測には至っていない。高温下での材料の変形は弾塑性のみならずクリープまでもが複雑に絡み合うが、現状ではこのような過酷な環境下での材料物性データの蓄積が乏しいために、そこでの寿命も定性的な予測ないしは実機試験による事後評価が主体となっている。本研究では、材料物性データを正しく反映した数値シミュレーションによって、熱疲労における損傷モデルの構築を目指す。また、あわせて高温動作に並列する技術として抜熱技術(冷却技術)の定量的検討を行う。これにより、次世代パワーエレクトロニクスにおいて求められている超高パワー密度モジュールを実現するための、接合形態・材料の探索、抜熱技術の定量的予測評価を行うことで、次世代パワーエレクトロニクスの開発・普及を加速する。

2. FS 検討

図1にパワーデバイスモジュールの故障モードの模式図を示す。



主な機械的故障モードは、

図1 パワーモジュールの構造、および故障モードの例

現状のパワーモジュールは、図1に示すように、パワーデバイス下部は絶縁基板などの複数層接合により形成され、またパワーデバイス上部は、メタルワイヤーボンディングにより形成されている。パワー半導体動作に伴い、損失に伴う発熱が発生し、モジュール温度が上昇する。その際、図1に示すような複合構造系では、熱膨張係数の差異により、各部位に大きな応力、変形が発生し、亀裂故障などが誘発される。主な故障モードは、1)ワイヤーボンディング接合部での温度変動、それに伴うシリコンパワーデバイスおよびワイヤーの熱膨張係数の差異に伴う変形、その結果として生じる疲労亀裂、(2)絶縁基板とベースプレートの接合部に代表されるはんだ系材料により接合されている異種材料接合部での熱膨張係数の差異に伴う変形、はんだ・ベースプレート界面などに生じる疲労亀裂、(3)モジュール内に充填されているレジンなどの封止材料とモジュール構成部材の熱膨張係数際に伴う疲労亀裂、がある。

図2にワイヤーボンド部の疲労解析モデルの例を示す。図2のモデルを用いて有限要素法により、弾性ひ



図2 ワイヤーボンディング疲労解析モデル



図3 冷却技術毎の熱抵抗

ずみの定量的解析を行った。その結果、(1)式で表される相当非弾性ひずみ成分は最大温度に対して単調 に増加する傾向が示すことが分かった。

$$d\overline{\varepsilon}^{in} = \sqrt{\frac{2}{3}} d\varepsilon_{ij}^{in} d\varepsilon_{ij}^{in}$$
(1)

しかしながら、一般に報告されている実験結果では、 室温から温度が上昇するにしたが、疲労故障の発生 頻度が上昇するが、200℃を超えると発生頻度は一定 である。そこで、疲労亀裂は界面近傍に発生すること から、(2)式により、界面近傍の非弾性ひずみエネル ギーを評価した。すると、200℃までは温度上昇とともに 非弾性ひずみエネルギーが上昇し、200℃を超えると 上昇がおさまり変曲することがわかった。そのため、界 面近傍の塑性ひずみに注目することで、ワイヤーボン ディングの疲労亀裂を定量的に評価できる可能性があ ることがわかった。

$$\Delta w^{in} = \sum \int \sigma \, d\varepsilon^{in} \quad (2)$$

図3に抜熱技術に関しる定量的推算結果を示す。横軸 はパワーデバイスに対する熱拡散面積効果を意味す る。図3から、小型パワーモジュールでは、パワーデバ イスからの発熱を小面積で抜熱する必要があるため、熱

抵抗が大きくなることがわかる。また冷却技術として、空冷、水冷、二相流の順で、熱抵抗が小さくなり抜熱 効果が大きいことがわかる。

補足:

本研究の一部は、PCIM Europe 2019(Nuremberg(独)、2019年5月)において発表を行う予定である。

Si 絶縁ゲートバイポーラトランジスタによる少数キャリアライフタイム

劣化に関する研究 明治大学 理工学部 小椋 厚志

Œ

1. 背景および目的

Si 絶縁ゲートバイポーラトランジスタ(Si-IGBT)は高耐圧パワーデバイスとして今後の 主流になると期待され様々な開発が進められ ている[1]。その中でも耐圧を維持したまま、 キャリアの注入効率を上げることでキャリア の蓄積量を増やし、ON 抵抗を低減させる IE(Injection Enhancement)効果の発見および向 上は Si-IGBT 高性能化の大きなきっかけとな った。IGBT の更なる高性能化のためにはドリ フト層により多くのキャリアを蓄積させるこ とが必要であり、IE 効果に加えて高キャリア ライフタイムが必要になる。しかしキャリア ライフタイムは IGBT 作製プロセスの際に劣 化してしまう。そこで、本研究では IGBT 作 製プロセスがキャリアライフタイムに与える 影響について評価を行い、キャリライフタイ ム劣化の要因を特定することを目的とした。

2. 実験手法および測定試料概要

図1に本研究で評価した IGBT 作製プロセ スの一例を示す。図1のプロセスは IGBT の ゲート形成プロセスである。本研究では特に ゲート酸化膜作製及びトレンチゲート形成と その後の活性化熱処理プロセスに着目してキ ャリアライフタイムの評価を行なった。試料 はn型のFZ-Si(Floating Zone-Si),抵抗率55 Ω cmの3 inch ウエハを用いた。測定試料はDry 酸化,Wet酸化のみを施した試料(Dry酸化,Wet 酸化)、トレンチ形成後に Dry酸化,Wet 酸化 をそれぞれ施した試料、Dry酸化,Wet 酸化 をそれぞれ施した試料、Dry酸化,Wet 酸化後 にそれぞれ活性化熱処理を施した試料の合計 6 種類の試料と未処理ウエハ(As-grown)を用 いた。これらの試料のキャリアライフタイム を測定することで IGBT ゲート作製プロ



図 2. 酸化膜除去前(a)と除去後(b)の Si 基板の 断面状態

セスにおけるキャリアライフタイムへの影響 を評価した。また、本測定ではゲート酸化膜 がついている状態と酸化膜除去後にキンヒド ロンメタノールパッシベーションを行った 2 種類の状態でキャリライフタイムの測定を行 った。図2に酸化膜除去前後における Si 基板 の断面状態を示す。図2より酸化膜除去前は 酸化膜中の固定電荷や Si/SiO₂の界面準位と バルク欠陥などにキャリライフタイムは影響 されるのに対して酸化膜除去後は終端されな かったダングリングボンドとバルク欠陥によ りキャリライフタイムは影響されることにな る。



図 3. キャリアライフタイム測定結果

3. 結果及び考察

3.1 キャリライフタイム測定結果

図3に各試料のキャリアライフタイム測定 結果を示す。図3よりDry酸化,Wet酸化の双 方ともゲート酸化プロセスによりキャリアラ イフタイムは劣化しているが、酸化膜除去後 はキャリライフタイムがほぼ同等の値まで大 きく向上していることが分かる。この結果よ りゲート酸化プロセスにおけるキャリライフ タイムの劣化はSiバルク中ではなく酸化膜に 起因していると考えられる。また、Dry酸化, Wet酸化の双方ともトレンチ形成によってキ ャリライフタイムが劣化しているが同様に酸 化膜除去後にキャリライフタイムは回復して いる。トレンチ形成によるキャリアライフタ イムの劣化はトレンチ形成により酸化膜部分 の密度が増えたからだと考えられる。

3.2 C-V 特性とキャリライフタイムの関係

図4にDry酸化,Wet酸化,及びその後活性 化熱処理を行った試料の高周波C-V特性の測 定結果を示す。また、表1に同試料の界面準 位密度、固定酸化膜電荷、キャリライフタイ ムの関係を示す。図4よりWet酸化プロセス では活性化熱処理後にC-V特性が理想曲線に 近づくのに対して、Dry酸化プロセスでは活 性化熱処理前後でほとんど変化がみられない。 また表1よりWet酸化プロセスでは活性化熱 処理後にキャリライフタイムは向上するが Dry酸化プロセスでは活性化熱処理前後でほ とんど変化がみられない。この結果も酸化膜



表 1. 界面準位密度, 固定酸化膜電荷, キャリアライフタイムの関係

Process	Interface State Density (cm ⁻² eV ⁻¹)	Fixed Oxide Charge (cm ⁻²)	Lifetime (µs)
Dry	6×10 ¹⁰	3.1×10^{10}	1280
Wet	3×10 ¹¹	5.6×10 ¹⁰	63
Dry/Anneal	7×10^{10}	4.1×10^{10}	1320
Wet/Anneal	6×10 ¹⁰	3.0×10 ¹⁰	1190

がキャリアライフタイム劣化の要因であるこ とを示している。更にn型の場合において酸 化膜固定電荷は上昇することで電界効果パッ シベーションの効果をもたらし、キャリライ フタイムは向上すると報告されているが表1 ではその傾向は見られない。しかし表1より 界面準位密度の大きさによりキャリライフタ イムは依存していることが分かる。以上より ゲート形成プロセスでは酸化膜の中でも特に Si/SiO₂界面準位密度がキャリライフタイムの 劣化要因であると考えられる。

参考文献

[1] K. Kakushima et al., IEDM2016, 268 (2016).

特定研究報告書

タイトル: ダイヤモンドパワーデバイスのシミュレーションに関する研究 研究代表者: 東京工業大学工学院 角嶋 邦之

所内世話人: 西澤 伸一

1. 緒言

半導体ダイヤモンドは、広いバンドギャップと高い絶縁耐圧を示すため、高電圧用の高効率電力変換パワ ーデバイスとして期待されている。同じくワイドバンドギャップとして研究がされている SiC や GaN と比較する と、電子・正孔共に高い移動度を示し、更に高い熱伝導率を示す利点がある。特に良好な pn 接合が形成で きるため、バイポーラ動作のならず、アバランシェによる高電圧印加時の保護機能など、デバイス設計の自 由度が高い利点もある。近年のダイヤモンドの成長技術の進展により、高品質な p,i,n 層の形成が可能とな っており、不純物濃度も広い範囲で実現することができるようになっている。しかし、ダイヤモンドデバイス設 計に関しては、Si パワーデバイスを模倣した報告が多く、ダイヤモンドならではのデバイス構造が提案されて いるわけでは必ずしもない。この要因は、電子・正孔のキャリア輸送が Si のそれとは異なっており、適切にシ ミュレーションができていないことが要因である。

本研究の目的はダイヤモンドのキャリア輸送をモデル化し、汎用デバイスシミュレータの中にパラメータを 取り込み、ダイヤモンドデバイスの特性を示すことである。高濃度ドーピングを行ったダイヤモンドで発現す るホッピング伝導、低キャリア注入でみられるエキシトン形成など、極低温 Si でみられる現象が室ゴンでも起 こるため、これらの効果をデバイスシミュレータ中に取り込み、報告されている実デバイスを再現することを試 みる。応用力学研究所の西澤教授で有するダイヤモンド物性の知見とパラメータ、新しい基板構造を有効 にシミュレーションに取り込むことで、迅速にシミュレータを立ち上げることを試み、ダイヤモンドならではのデ バイス構造の創出につなげる。

2. 基本方程式の導出

電子および正孔の連続式は以下で記述できる。

$$-\frac{\partial n}{\partial t} = divJ_n + R_n \qquad (1)$$
$$-\frac{\partial p}{\partial t} = divJp + Rp \qquad (2)$$

ここで、(1)、(2)右辺第 2 項が、キャリア生成と再結合を表している。ダイヤモンドでは、シリコンと異なり、 エキシトン生成による再結合を考慮する必要がある。しかし、エキシトンに関する定量的理論式はいまだ成 立していない。そこで、今回は、エキシトン生成を含めた総合キャリア生成・消失過程として、これまでに報告 されている実験結果を用いることとする。

また、電子および正孔の電流方程式は以下で記述できる。

255

$$Jn = q\mu_n nE + qD_n gradn \quad (3)$$

$$Jp = q\mu_p pE + qD_p gradp \quad (4)$$

ここで、(3)、(4)の右辺第1項が、バンド伝導およびホッピング伝導を総合的に考慮したドリフト電流を表し ている。またホッピング伝導の物理に関しては、n型ダイヤモンドでは nearest-neighbor hopping (NNH)が優 勢であり、p型ダイヤモンドでは variable-range hopping (VRH)が優勢である。そのため、n型およびp型ダイ ヤモンドのホッピング伝導の移動度は以下で記述できる。

$$\mu_{H} = \frac{1}{6} \cdot \frac{qR_{H}^{2}}{kT} \exp\left(-2\alpha R_{H}\right) \cdot v_{ph} \exp\left(-\frac{W_{H}}{kT}\right), \quad (5)$$

$$\mu_{m} = \frac{qR_{m}^{2}}{kT} v_{ph} \exp\left(-2\alpha R_{m} - \frac{W_{m}}{kT}\right)$$

$$= \frac{qR_{m}^{2}}{kT} v_{ph} \exp\left\{-\left(\frac{T_{m}}{T}\right)^{m}\right\}, \quad (6)$$

さらにポアソン方程式は、以下で記述できる。

$$\vec{E} = -gradV \qquad (5)$$

$$divgradV = -\frac{q}{\varepsilon}(p - n + N_D - N_A) \quad (6)$$

なお、ポアソン方程式は通常のシリコン半導体での式と同一であり、ダイヤモンド固有の記述はない。

3. 今後の計画

上述の通り、本年は、ダイヤモンドパワーデバイスを記述する半導体基本方程式の導出を行った。今回は ダイヤモンド特有の物理であるホッピング伝導およびエキシトンに関して、前者はn型およびp型の場合のホ ッピング伝導モデルを特定した。また後者は現段階で定量的理論式の報告がなく、新たな構築も困難であ ることから既に報告されている実験結果から総合値としての参照値を用いることとした。

今後、これらの半導体基本方程式を連立、数値解析を行うことで、ダイヤモンドパワーデバイスの構造およ び動作の定量的な検討を行っていく。なお、数値解析対象とするパワーデバイスは、先行的に実験結果が 報告されているダイオード、および JFET などのトランジスタ構造を考えている。

小形風力発電用パワーコンディショナの単独運転検出における回転機負荷の影響

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

系統連系規程(1)により分散型電源のパワーコンディショナ (PCS: Power Conditioning System) は停電時に 0.2 秒以内に PCS の運転を 停止する単独運転防止機能を具備しなければならないと定められてい る。定格 10kW の小形風力発電用パワーコンディショナを用いて小形 風車の系統連系に関する暫定対応方法⁽²⁾,PV用 PCSの認証試験方法⁽³⁾を 参考に,単独運転試験を行ったところ,定格 200Vの回転機負荷を接続し た場合に、判定基準である 0.2 秒以内に単独運転を検出できない場合が 見られた。そこで、試験に用いる回転機負荷の種類を変えて実験を行い、 何が検出時間に影響を与えるのかを調べた。その結果,回転機負荷が消 費する無効電力が大きい程,検出時間が長くなる結果を得た。またこの 傾向が, 共振回路の特性を用いて定性的に説明できることを示した。ま た、単独運転防止試験においては測定結果に大きなばらつきが出る が、このばらつきの要因を特定するため、任意の位相で系統模擬電源 から遮断可能な遮断器を作成し遮断位相の固定を行った。さらに、回 転機負荷の無効電力が周期的に変動するので、その値を参照しタイミ ングを計り遮断を行うことで、遮断時の無効電力を従来よりも高い精 度で一致させることでばらつきを低減することを試みた。

2. 実験概要

単独運転試験を行うにあたり、図1のような回路を用いた。また、負 荷装置としては, 回転機負荷(定格 200V および定格 100V 駆動), 共振負 荷を用いた。試験した PCS に搭載された単独運転検出方式は, ステッ プ注入付き周波数フィードバック方式である。まず、共振負荷のみの 場合と共振負荷と回転機負荷の両方がある場合(回転機負荷はAとB の2種類を用意し、かつ前段に絶縁変圧器を付けた場合と付けない場 合を実施)について、それぞれ単独運転事件を計測する実験を行っ た。次に、単独運転時間のばらつきを提言する手段として、任意の位 相で系統模擬電源から遮断可能な遮断器を作成し遮断位相の固定を行 ったこと、および回転機負荷の無効電力が周期的に変動するのでタイ ミングを計り遮断を行うことの効果を調べた。

3. 回転機負荷と単独運転時間の関係

単独運転状態になるローカル回路から系統への潮流(図1内のΔPと △Q) を PCS 出力電力 PPCs=2.5kW の-10%, -5%, 0%, 5%, 10%とした場 合の単独運転時間の実験結果を表 1~3 に示す。表 1 より, 共振負荷の みの場合は単独運転時間が常に 0.1 秒未満であった。これに対し、共振 負荷と回転機負荷 A の両方があり,回転機負荷の前段に絶縁変圧器を 付けない場合は、表2のように単独運転時間が長くなり、かつ単独運転 が維持されやすいAP=0, AQ=0 では認証試験の判定条件⁽²⁾である 0.2 秒 を超えた。しかし表3より、回転機負荷の前段に絶縁変圧器を付けた場



表1 単独運転時間(回転機負荷無)

		ΔP				
		-10%	-5%	0%	5%	10%
	-10%	54ms	58ms	54ms	56ms	53ms
	-5%	56ms	55ms	64ms	64ms	65ms
ΔQ	0	75ms	70ms	76ms	76ms	79ms
	5%	70ms	65ms	60ms	63ms	61ms
	10%	55ms	59ms	59ms	63ms	60ms

表2 単独運転時間(回転機負荷有・変圧器無)

		ΔP				
		-10%	-5%	0%	5%	10%
	-10%	173ms	124ms	113ms	120ms	95ms
	-5%	180ms	159ms	129ms	115ms	107ms
ΔQ	0%	150ms	166ms	213ms	134ms	123ms
	5%	127ms	143ms	168ms	187ms	151ms
	10%	118ms	124ms	140ms	161ms	176ms

表3 単独運転時間(回転機負荷有・変圧器無)

		ΔP				
	-10% -5% 0% 5%				5%	10%
	-10%	94ms	90ms	80ms	80ms	77ms
	-5%	107ms	101ms	96ms	97ms	80ms
ΔQ	0%	126ms	101ms	175ms	141ms	114ms
	5%	99ms	106ms	115ms	140ms	168ms
	10%	92ms	94ms	99ms	109ms	112ms

合は、ほぼすべての条件において付けない場合より単独運転時間が短くなった。

絶縁変圧器の有無が何に影響するかを考えると、まず絶縁変圧器と回転機負荷が定常状態で消費する有効・無効電力が変 わる。絶縁変圧器には巻線抵抗や漏れインダクタンスがあるので、絶縁変圧器を付けるとそれらの連系点から見たインピー ダンスが大きくなり,有効・無効電力消費が減る。別の回転機負荷 Bを使って実験したところ,その定常状態での無効電力 消費が一番小さかったが、単独運転時間も短かった。以上より、単独運転時間の長い順に定常状態での消費無効電力も大き いと言える。

この理由を、図2の共振回路での消費無効電力と周波数変動 の関係に着目して説明する。図2の回路は単独運転状態のローカ ルな回路を単純化したもので、交流電源がPCS, CとLが回転機負荷 を含む共振負荷を表す。簡単のため、抵抗負荷を省略している。 電源電圧を,V,電源周波数をf, LとCの無効電力をそれぞれQL, Qc とする。この時、電源が供給する無効電力40は(1)式となる。

$$\Delta Q = Q_L - Q_C = \frac{V^2}{2\pi f L} - 2\pi f C V^2 = \frac{V^2}{2\pi f L} \left(1 - \frac{f^2}{f'^2}\right)$$
(1)

ここに、共振周波数 $f' \equiv 1/(2\pi\sqrt{LC})$ を用いた。(1)式において、 V=200V, 共振周波数 $f' \equiv 50$ Hz (単独運転試験において $\Delta Q = 0$ の 実験時の状態)を代入した時の無効電力 ΔQ と周波数fの関係を図 3 に示す。Lには表 6 に示した 3 種類の回転機負荷の消費無効電力 と同じ Q_L になるLを代入した。図 3 からわかる通り、50Hz 付近で は、回転機負荷の無効電力消費の大きい順に傾きが緩やかになっ ている。つまり Q_L が大きいほど電源(単独運転試験時の PCS) が無効電力 ΔQ を供給した際の定常的な(最終的に落ち着く)周波数 のずれ |f - f'|が小さいことを意味する。これより、ステップ注 入付き周波数フィードバック方式により PCS が無効電力を注入 しても、回転機負荷の無効電力消費が大きいと周波数変動が小さ く、単独運転検出に時間がかかると考えられる。

4. 単独運転時間のばらつき低減

使用した回転機負荷の消費無効電力の測定結果を図4に示す。な お、図4の無効電力は図1中の矢印のように回転機負荷から出て いく向きを正としているため負の値となっている。図4から今回 使用した回転機負荷の消費無効電力は2秒ほどの周期で振動する 20 var 程度の変動成分を含むことが確認できた。

 $\Delta P=0, \Delta Q=0$ の条件において、UV 相間電圧の遮断時の位相を IGBT を用いたスイッチで設定し、かつ回転機負荷の無効電力の 時間変化を考慮したタイミングでの遮断を行った際の単独運転時 間を図5に示す。なお、図5の直線は各位相の平均値を最小二乗 法で直線近似したものである。図5より遮断時の系統電圧の位相 により単独運転時間の平均値に20ms程度のずれが生じることが 確認できた。これは、PCS が移動平均値を求めるために行う系統 周波数の演算を日本電機工業会の規格^[4]により1サイクルごとに していることに起因すると考えられる。同様に270°において20 msほど遅くなった結果が1回生じているのは、何らかの理由で 検出が1サイクル遅くなってしまったものと考えられる。また、 図5の全結果に関して単独運転時間の平均値は224.87ms、標準 偏差は10.00msであった。これは位相の固定および無効電力の調 整を行わない場合と比べ、標準偏差が40%程度減少した。

参考文献

- [1] 日本電気技術規格委員会:「系統連系規程」, JEAC9701-2012, (2012)
- [2] 日本小形風力発電協会:「小形風車の系統連系に関する暫定対応方法」, https://www.jswta.jp/
- [3] 電気安全環境研究所:「多数台連系対応型太陽光発電システム用系統連 系保護装置の個別試験方法」, JETGR0003-4-3.0, (2014)
- [4] 日本電機工業会:「低圧配電線に連系する太陽光発電用三相パワーコ ンディショナの標準形能動的単独運転検出方式(ステップ注入付周波 数フィードバック方式)」, JEM1505, (2015)



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 髙橋 江梨香 同志社大学 理工学部 髙田 稜一 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.トレーサー粒子は比重が水に近い,ナイロンパウダーを用いた.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,翼スパン方向である

● 翼スパン方向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 lcm 高くなるようにした. カメラは台車と同期運動するように取り付けた.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.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後方に進行方向に対し て平行な面に当たるようにし,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.

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 $Re = 8.0 \times 10^2$ 、 $\alpha = 18 \deg$.である.

図1の(a)と(b)を比較すると、数値計算による可視化図では、翼の後方で流れが収束または広がるよう に振る舞う場所が見られ、実験による可視化図でもそれを部分的に確認できる.また、どちらの画像で も翼の後縁付近で、流れが翼に巻き込まれる形で逆流しているのが確認できる.

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,異なる特性を示すことがわかる.



(a) $\alpha = 18[\text{deg.}]$ (in experiment)

(b) $\alpha = 18[\text{deg.}]$ (in computation)

Fig.1 Streamlines for FP at $Re = 8.0 \times 10^2$ and $\alpha = 18$ [deg.] The color represents speed of flow



Fig.2 Stability diagram for each airfoil

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,異なることを示している.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.

高品質多元系熱電材料の単結晶成長と特性評価

宮崎大学 工学部 環境・エネルギー工学研究センター 永岡章 宮崎大学 工学部 電子物理工学科 竹内 麻奈人、吉野賢二

1. はじめに

多元系 I-III-VI₂ 族や I₂-II-IV-VI₄ 族化合物は、熱電変換材料や太陽電池材料といっ たエネルギー変換材料として期待されている。実際に CuInTe₂多結晶焼結体は 823 K において無次元性能指数 ZT=1.61、Cu₂ZnSnSe₄多結晶焼結体は 850 K において ZT= 0.95 が達成されている[1, 2]。これまで報告されている化合物サンプルは多結晶焼結 体であり、粒界がフォノン散乱を促進するという利点もあるが、同時にキャリア輸 送のバリアとなり電気的特性を低下させている。また、構成元素やドーパントにレ アメタルである In や Ga を使用しているため環境負荷の点で問題がある。本研究で は環境調和した CuSbS₂ や Cu₂ZnSnS₄ に注目し、これらの材料が持つカチオン元素の 不規則構造によって固有の低熱伝導度を有していると考え、電気的特性を向上させ るために独自の結晶成長による良質な単結晶サンプルを熱電材料に応用した。これ までに Cu-poor 組成 Cu₂ZnSnS₄ 単結晶で、400 K において関連する I₂-II-IV-VI₄ 化合物 より 1.5-45 倍大きな ZT = 0.2 を示すことを報告している[3]。更なる熱電特性の向上 のために結晶の高品質化、組成制御やドーピングによって格子欠陥によって物性制 御し、環境調和した高効率熱電材料開発を目指す。本報告では、CuSbS₂ 単結晶の結 晶成長と熱電特性について述べる。

2. 実験方法

高純度原料(5N: Cu, Sb, S)を石英管に真空封入後、1100 \mathbb{C} で溶融させ Feed となる CuSbS₂多結晶を作製し、成長温度 600 \mathbb{C} 、温度勾配 40 \mathbb{C} /cm、成長速度 4 mm/day の 条件でゾーンメルト法を用いて CuSbS₂単結晶を成長させた。得られた単結晶を用い て電気的特性と熱電特性評価としてキャリア濃度 p、移動度 μ_h 、電気伝導度 σ 、熱伝 導度 κ 、ゼーベック係数 Sを測定した。

3. 結果と考察

Figure 1に3ゾーンからなる結晶炉内の温度プロファイルを示す。中心ヒーター温度は600℃で融点より50℃程度高く設定して液相を形成している。中心 - 下部ヒーター間の温度勾配は40℃/cmに設定することで液相ゾーンの長さを1 cm程度にコントロールしている。Figure 2 に得られた CuSbS₂単結晶を示す。インゴットサイズは直径10 mm、長さ30 mm程度である。

エネルギー分散型 X 線分析(EDS)から得られた組成分析結果は、インゴット全体に おいてに均一であり、平均組成として Cu: 25.7 atm.%, Sb: 24.8 atm.%, S: 49.5 atm.%で あり、わずかに Cu-rich 組成を示した。サーモプローブ測定から伝導型は P 型を示し た。これらの結果と第一原理計算による報告 [4]より、Sb サイトの Cu (Cu_{Sb})置換欠 陥が支配的であると考えられる。

Table 1 に室温における電気的特性と熱電特性を示す。ホール移動度 μ_h は、これま で報告されていた多結晶サンプル 32 cm²/Vs より 2 倍大きな 65 cm²/Vs を示した [5]。



Fig.1 結晶成長炉内の温度プロファイル

Fig.2CuSbS₂単結晶インゴット

40

		2 1 11 144		
<i>p</i> [cm ⁻³]	σ [S/cm]	$\mu_h [\mathrm{cm}^2/\mathrm{Vs}]$	<i>S</i> [µV/K]	κ [W/mK]
8.08×10 ¹⁶	0.85	65.7	490	0.92

Table 1 室温における CuSbS。単結晶の電気的特性と熱電特性

熱伝導度 κ =0.92 W/mK は、ZT > 1 を達成している CuInTe₂の 3.5 W/mK at 300 K より も小さな値を示し [1]、熱電材料として高いポテンシャルを有する事を示した。この 固有の低熱伝導度は、CuSbS₂中の電子のローンペアによる electrostatic repulsion のた めと考えられる。

4. まとめ

本研究は、環境調和型 CuSbS₂ 材料の熱電特性に注目し、高品質な単結晶サンプル を用いて熱電材料としてのポテンシャルについて調査を行った。電気特性と熱電特 性において、これまで報告されている CuSbS₂ 多結晶サンプルよりも優れた結果を示 した。特に室温における熱伝導度 κ =0.92 W/mK は、ZT >1 を示す同系統の多元系材 料よりも 3 分の 1 程度の小さい値を示し、熱電材料として大きなポテンシャルを持 つ事を明らかにした。

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] Y. Luo et al., Adv. Energy Mater. 6, 1600007 (2016).
- [2] X. Y. Shi et al., Appl. Phys. Lett. 94, 122103 (2009).
- [3] A. Nagaoka et al., Appl. Phys. Express 11, 051203 (2018).
- [4] B. Yang et al., Chem. Mater. 26, 3135 (2014).
- [5] L. Wan et al., J. Alloys Compd. 680, 182 (2016).

30ME-3 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 に及ぼす負荷方向と温度の影響

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 部材を製作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 度の影響も考慮する必要がある。

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-ひずみ特性の温度依存性を、 実験的に評価することである。高ひずみ速度(最大 10³/s)での圧縮応力-ひずみ関係の温度依存性(T = 20,40,60,80 °C)を、ホプキンソン棒法¹⁾及び電気炉により決定した。また、インストロン試験機 及び恒温槽を用いて、低ひずみ速度(10⁻³/s)における圧縮応力-ひずみ関係の温度依存性を求めた。 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 (3-d)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(長さ1/直径 d)の制約上、以下のように形状寸法を決定した。静的圧縮試験片の 形状について、ASTM E9-89a²⁾規格で推奨されている細長比1/ $d=1.5\sim2.0$ となるように長さ(l=12mm)を決定した(3-dについてのみ、板厚の制限によりl=8 mm とした)。一方、衝撃圧縮試験片の形 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($0.5 \le l/d \le 1.0$)³⁾に 入るように、長さ(l=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 $V_{\rm f}$	0.56

3. 試験方法及び手順

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、室温及び高温 (T = 20,40,60,80 °C) 下にて低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 mm/min で試験片が破壊するまで圧縮負荷を行なった。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⁴⁾ (直径 30 mm,厚さ 3 mm,ステンレス鋼 304 製) を試験片両端 に取り付けている (図 2 参照)。また、試験片温度を正確に計測するため、試験片に直接熱電対 (ST-23E-100-GW2-ASP,安立計器株式会社)を取り付けている。



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及び電気炉を 使用して、室温及び高温下にて衝撃圧縮試験を行った。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。棒/試験片間の摩擦の影響を軽減するため に、試験片の両端面には二硫化モリブデンを塗布している。試験手順及び測定理論の詳細については、 著者らの文献⁵⁾を参照されたい。また、静的試験と同様、試験片に直接熱電対を取り付けている。





4. 試験結果及び考察

面内横(2-),板厚(3-)方向における、室温(T=20°C)及び高温(T=60°C)での静的・衝撃圧縮応力–ひずみ関係の比較を、図4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)。どの負荷方向,温度においても、ひずみ速度の上昇と共に初期の傾き(初期係数),極限圧縮強度(最大圧縮応力値) σ_c は増加しているが、極限圧縮ひずみ ε_c は低下していることがわかる。また、ひずみ速度に関係なく、両負荷方向とも温度の上昇と共に σ_c は低下しているが、 ε_c は負荷方向により傾向が異なっている。静的及び衝撃における σ_c を、温度に対してプロットした結果を図5に示す。 どの負荷方向,どの温度においても、 σ_c は正のひずみ速度依存性を示している。また、温度,ひずみ速度に関係なく、板厚方向における圧縮特性値は、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。さらに、低ひずみ速度(10^{-3} s)において繊維,面内横方向では、温度Tが60~80°Cの範囲において σ_c の急激な低下が認められる。また、板厚方向では、同温度範囲において σ_c はほとんど変化していないことがわかる。これは、母材が軟化しても、直交している繊維に支えられているためであると考えられる。

以上の結果を考察するために、面内横方向及び板厚方向における静的圧壊モードの温度依存性を調べた。それらの写真を、図 6,7 に示す。面内横方向では、温度が 20~60 °C の範囲では母材内でのせん断破壊が生じている。一方、温度が 80 °C では、図 6 中の試験片側面の走査型電子顕微鏡 (SEM) 写真に示すように、繊維の座屈が生じている。これは、試験片温度が母材であるエポキシ樹脂 (XNR/H 6815)のガラス転移点 ($T_g = 90$ °C) に近づいたため、母材が著しく軟化したためである。また、板厚方向では母材内でのせん断破壊が生じており、温度が上昇するにつれてクラッシングも認められるが、基本的には破壊形態に大きな違いは認められない。

図 5 より、高ひずみ速度(約 10³/s) での σ_c は、どの方向でも温度上昇による急激な低下が認められない。これは、衝撃試験では、試験片内を荷重ではなく応力波が作用するため、繊維の座屈が生じる前に完全に圧壊したと推測される。



図4 直交積層複合材の室温及び高温下での 面内横,板厚方向における静的・衝撃圧縮 応力-ひずみ関係



図5 直交積層複合材の静的・衝撃極限圧縮 強度の温度及び負荷方向依存性



静的圧壊モードの温度依存性



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) どの負荷方向,温度においても、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、極限圧縮ひずみ及び吸収エネルギは低下する。また、ひずみ速度,温度に関係なく、板厚 方向の圧縮特性値は繊維・面内横方向のそれよりも非常に高い。
- (2) 低ひずみ速度では、繊維及び面内横方向における極限圧縮強度の温度依存性は板厚方向における それよりも非常に高い。これは、繊維及び面内横方向では、高温下にて繊維座屈が生じたためであ る。しかし、高ひずみ速度では、極限圧縮強度の温度依存性は負荷方向による影響はほとんど認め られない。

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。

参考文献

- 1) H. Kolsky: An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading, *Proceedings of the Physical Society*, Vol. B62 (1949), 676–700.
- 2) ASTM E9-89a: *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 03.01, American Society for Testing and Materials, Philadelphia (1995), 98–105.
- 3) G. T. Gray III: ASM Handbook, Vol. 8, Mechanical Testing and Evaluation, ASM International, Materials Park, OH (2000), 462–476.
- 4) J. Lankford: Compressive damage and failure at high loading rates in graphite fiber-reinforced polymeric matrix composites, *Advanced Composite Materials*, Vol. 19 (1991), 553–563.
- 5) 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.

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 福島 翼(岡山理科大学大学院 工学研究科 機械システム工学専攻)
- ・研究協力者 氏峰 大地(岡山理科大学 工学部 機械システム工学科)
- ・ 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)

波浪中の浮体・船舶に関する革新的 EFD 技術に関する研究

広島大学大学院工学研究科輸送・環境システム専攻 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。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確立 することを目的としている。 昨年度までの共同利用研究を通じて、既に世界初となる表面全域での非 定常圧力分布計測に成功しており、今年度からはその成果をベースに計測精度の更なる向上を目的とし た研究を展開する。

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 輸送・環境システム専攻	教授	代表者・実験解析
柏木 正	大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻	教授	実験指導
大西 宏尚	広島大学大学院工学研究科 輸送・環境システム専攻	修士2年	実験補助
福本 隆央	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
伊藤 勇介	大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻	修士2年	実験補助
三浦 颯馬	大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻	修士1年	実験補助
胡 長洪	九州大学応用力学研究所	教授	CFD 解析

3. 実験の概要

圧力分布計測試験に加えて船側波形の計測を行うことで時々刻々の水面位置 (圧力が0の瞬間)を把握 できるため,高解像度な圧力分布を得ることができる. 革新的な EFD 技術を導入したこの2つの試験に より船体表面非定常波動場の可視化を行う.

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 に,主要目を Table 1 に示す.



Fig. 1: Bulker

Table 1: Bulker 主要目						
$L_{pp}[m]$	2.4000	$x_B(=x_G)[m]$	0.0510			
B[m]	0.4000	KB[m]	0.0662			
d[m]	0.1280	$BM_T[m]$	0.1016			
$\nabla[m^3]$	0.0983	$BM_L[m]$	3.2135			
C_b	0.8000	KG[m]	0.1080			
$A_w[m^2]$	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(それ以外の波長の光は透過する).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.

本試験で使用した FBG 圧力センサーの特徴として,以下の 3つが挙げられる.

小さく,薄い

計測部は長さ 15mm,幅 9mm, 光の特性を活かした WDM(波長 厚さ 0.6mm , データを伝送する 光ファイバーは直径 0.155mm と センサー自体が小さいため,船 首船尾のような局率の大きい箇 所での計測も可能となっている.

多点同時計測

分割多重伝送) 方式により, 一本 の光ファイバーに複数のFBGを 刻むことが可能である.これによ り計測システムが簡素化し,多 点同時計測を行うことができる.



Fig. 2: FBG 圧力計計測原理

温度影響の補正

1つの圧力センサーには圧力用と 温度用の2つのFBG が刻まれて いる. この温度用の FBG は計測 点近傍で温度影響を計測し,圧 力の計測値から取り除くことを 目的としている.

Fig. 3と Fig. 4 に本試験で使用した FBG 圧力センサーとひずみゲージ式圧力センサーを示す. Fig. 5 には FBG センサーの設置位置を示す.本研究では,抵抗増加に寄与する喫水線より上部にも計測点を設 け, FBG センサーは全 30 断面 333 点で計測を行う. 比較用として, ひずみゲージ式圧力センサー 19 点 埋め込み,合計 352 点で圧力計測を行う.



Fig. 4: 歪みゲージ 式圧力計



Fig. 5: FBG 圧力センサー設置位置

船側波高計について 3.3.

容量式波高計を応用して作成した波高計を計測断面のガースに沿って設置する.船体側面全域と船首 部の合計 29 断面で計測を行う.Fig. 6 に波高計の設置位置を示す.計測位置ごとに断面形状が異なるた め、キャリブレーションによって沈下量に対する出力電圧を算出しておき、曳航試験の計測値を解析す る際はその値を利用する.



Fig. 6: 船側波高計の設置位置

3.4. 水槽試験

圧力分布計測試験と船側波形計測試験は同じ波条件で行う.

1) 運動計測試験

運動計測装置設置図を Fig. 7 に示す. 速度あり ($F_n = 0.18$)の向かい波状態で波条件 $\lambda/L = 0.3 \sim 2.0$ の範囲で 8 パターン計測する.船体運動はポテンショメータ,抵抗 (F_x)は歪みゲージで計測する. $\lambda/L = 0.5, 0.8, 1.25$ の波条件については反復試験を行い,平均と標準偏差を算出する.

2) 強制動揺試験 (Heave & Pitch) & 波強制力試験

強制動揺装置設置図を Fig. 8 に示す.速度あり (Fn = 0.18)の向い波状態で $\lambda/L = 0.50, 0.80, 1.25$ に 相当する動揺周期で 3 パターンをそれぞれ計測する.3 分力検力計で F_x, F_z, M_y を計測する.

船体表面圧力と船側波形は解析時の位相基準を船体中央とし,船体運動,抵抗は船体中央から x_G離れた重心周りとしている.



圧力分布計測の運動計測試験時のシステム図を Fig. 9 に示す.光ファイバー系の FBG 圧力センサー は測定器を介して PC2 で収録される.電気系のひずみゲージ式圧力センサー,船体運動 (surge, heave, pitch),抵抗,波振幅の計測値は¹⁾EDX(ユニバーサルレコーダ)で収録される.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り,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.全 360 チャンネルで同時計測を行う. 船側波高計測では電気系のシステムのみで計 37 チャンネルで計測する.



Fig. 9: 計測システム図

¹⁾ EDX · · · アンプ, フィルター, A/D 変換を一括で行うことができる収録機器

4. 試験結果と考察

試験結果と比較する数値計算手法として,ストリップ法,Enhanced-Unified Theory,ランキンパネル法の結果を示している.ランキンパネル法は岩下³⁾により提案された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))を用いる.

4.1. 船体運動

Fig.10 に 2 つの計測試験で得られた船体運動の結果と数値計算による結果を示す. 左から Surge, Heave, Pitch の運動の無次元値とそれ に対応した位相を示しており, 横軸は波長船長 比 λ/L である. 圧力分布計測時と船側波形計 測時との船体運動の結果はよく一致しており, 再現性も高い. 同波条件での結果を入射波を基



Fig. 10: 船体運動 (F_n =0.18, β = 180 degs.).

準として位相修正することで,時々刻々の水面位置を圧力計測に反映することが可能だと判断できる. Heave 運動の計測値には $\lambda/L = 1.25$ 付近に同調点が見られ, RPM と EUT では大きく推定している. Pitch 運動では $\lambda/L = 1.6$ に同調点が見られるが,数値計算による推定の誤差が大きい.

4.2. 船体表面非定常圧力

 $\lambda/L = 0.80$ で試験した時の非定常圧力のコ ンター図を Fig.11 に示す.計測結果と計算結 果 (RPM)を sin 項と cos 項に分けて描いてい る.計測結果の赤い長手方向の実線は喫水面を 表しており,喫水より上部の広域でデータが得 られている. Fig.12 には Ord. 1.25, 5.0, 9.0, 9.5 の断面での非定常圧力の振幅の 1 次成分を 無次元化した値と位相について示している.横 軸はセンサーの設置位置 θ (degs.)で,0 deg.が



Fig. 11: 非定常圧力分布 ($\lambda/L=0.80, \beta = 180$ degs.)

船底,90 degs. が喫水面を表している. 船尾では RPM の計測結果は計測値とよく一致しているが,船 首部では水面付近で大きな誤差が見られる. これはセンサーが水面を出入りすることが原因だと考えら れる.



Fig. 12: 非定常圧力分布 (F_n =0.18, λ/L =0.80, β = 180 degs.)

4.3. 船側波形

λ/L=0.80の向かい波条件における船側波形の結果を Fig.13 に示す. 縦軸に波振幅を入射波で無次元 化下値をとり,横軸は計測位置を半船長で無次元化した値である.上の図は船体表面上での波振幅の1 次成分について,実線で計測値,破線でランキンパネル法による計算結果を示している.船首付近で計 測値と計算結果との差が大きい.下の図は船体中央から 300mmの位置での波形を示している.船体近傍 と比較して,数値計算による推定精度が高いことがわかる.



Fig. 13: 船側波形 (F_n =0.18, λ/L =0.80, β = 180 degs.)

4.4. 非定常圧力線形重ね合わせ

 $\lambda/L=0.80$ 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非定常圧力の線形重ね 合わせを行ったものを Fig.14 に示す.これを Fig.12 のと比べると,船首船底付近では運動自由の計測値 と傾向が似ているが,船首水面付近では重ね合わせ解が少し小さくなっている.重ね合わせ解は非線形 影響が小さいことを考えると,船首水面付近では運動自由計測時の結果には非線形影響が含まれている と考えれられる.





Fig. 15: 線形重ね合わせによる非定常圧力分布 (F_n =0.18, λ/L =0.80, β =180 degs.).

5. おわりに

本研究で得られた成果を以下に示す.

- 1. FBG 圧力センサーの導入や波高計の改良などで EFD 技術を向上させ, これまでにない広範なデー タの取得に成功した.
- 2. 高解像度な圧力分布と船側波形から船体表面非定常波動場の可視化が可能である.
- 3. 計測結果をいくつかの数値計算法と比較し,その有用性も確かめられた.

REFERENCE

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) 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
- 3) 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
- 4) 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.

高効率海上輸送用地面効果翼機の機体形状に関する研究

広島大学大学院工学研究科輸送・環境システム専攻 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、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地面効果翼機を離れて、より地面効 果が確保できる高高率な機体形状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 輸送環境システム専攻	教授	代表者
大西 宏尚	広島大学大学院工学研究科 輸送環境システム専攻	修士2年	実験補助
新田 皓平	広島大学大学院工学研究科 輸送環境システム専攻	修士1年	実験補助
吉田 茂雄	九州大学応用力学研究所	教授	実験指導

3. 理論計算

非圧縮,非粘性,非回転の理想流体と仮定し,空気場 を一定速度U (m/s) で進む翼を考える.Fig.1 に物体固 定座標系を示す. S_H は物体表面, S_W は後流面, S_F は 自由表面を表している.法線ベクトルn は流体内向きと し,自由表面は剛体壁,後流面は主流に沿って平行に流 れると仮定する.空気の速度ポテンシャルを $\Phi(x, y, z) =$ $U[-x + \phi(x, y, z)]$ と表し,空気の攪乱速度ポテンシャル ϕ は次の境界条件を満足する.



Fig. 1: Body-fixed coordinate system.

$$\begin{bmatrix} L \end{bmatrix} \quad \nabla^2 \phi = 0 \tag{1}$$

$$[H] \quad \frac{\partial \phi(x, y, z)}{\partial n} = n_x \qquad \text{on } S_H \tag{2}$$

$$[F] \quad \frac{\partial \phi(x, y, z)}{\partial r} = 0 \qquad \text{on } S_F \tag{3}$$

$$[K] \quad p^{+} - p^{-} = 0 \qquad \text{on } S_{W} \tag{4}$$

流体領域に Green の第2定理を適用すると,次の積分方程式が得られる.

$$\frac{\phi(P)}{2} - \iint_{S_H} \frac{\partial G(P,Q)}{\partial n} \phi(Q) dS - \iint_{S_W} \frac{\partial G(P,Q)}{\partial n} [\phi(Q_T^+) - \phi(Q_T^-)] dS$$
$$= -\iint_{S_H} \frac{\partial \phi(Q)}{\partial n_Q} G(P,Q) dS \tag{5}$$

ただし,

$$G(P,Q) = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'}\right), \quad \frac{r}{r'} = \sqrt{(x - x') + (y - y') + (z \mp z')}$$
(6)

ここで, $\phi(Q_T^+) \ge \phi(Q_T^-)$ は後縁上下面での速度ポテンシャルを表している.一定要素の仮定に基づき離散化した後,境界条件(2),(4)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,

$$\frac{p(\boldsymbol{x}) - p_0}{\rho U^2/2} = 2\frac{\partial \phi(\boldsymbol{x})}{\partial x} - \nabla \phi(\boldsymbol{x}) \cdot \nabla \phi(\boldsymbol{x})$$
(7)

により求めることができる。ここで、 p_0 は大気圧、 ρ は空気密度である。(7) 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

$$F_i = -\iint_{S_H} \{p(\boldsymbol{x}) - p_0\} \, n_i \, dS \quad (i = 1 \sim 6)$$
(8)

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。

4. 実験の概要

4.1 供試模型について

本実験に用いた模型を Fig.2 に示す.ノーズ部,前翼部,尾翼部及び主翼部の圧力計測部は紫外線硬化型の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 3D プリンター (Project 3500 HDMax) で製作した.主翼は,翼中央部から左翼端への長さを $y \ge 0$,無次元値 $y/b/2 \ge 2$ の.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,SectionA(32 点),Secti on B(32 点),Section C(29 点),Section D(16 点),Section E(16 点), の合計 125 点ある.計測孔の位置は翼後縁からコード長を除した値 (x/c)は,Fig.2 中の表のように設定している.表面には直径 0.8mm 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直径 1.5mm のポリウレタンチューブが差し込まれており,翼内部を通って微差圧式圧力センサーへと接続されている.圧力計測部以外の部品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をケミカルウッド材で接着後,切削加工により表面を滑らかにしている.



Fig. 2: Experimental model.

4.2 風洞試験

Fig.3 に実験システムを示す.3軸トラバーサーに3分力計(日計電測製Y113M1型)とストラットを取り付け,その下部に供試模型を取り付ける.ストラット前方に取り付けられたピトー管は,全圧と静圧

により, 流速を計測するとともに,静圧計測用チューブを途中で分岐させ, 微差圧式圧力センサー (Cell Instruments 製 μ DAQ 32DTC)の基準静圧入力ポートに接続する.計測静圧入力ポートには,供試模型の表面圧力計測用ポリウレタンチューブををストラット後方を通して接続する.

発信機 (NF 製 DF1906) に信号を送り,外部トリガーを発信させ,μDAQ 32DTC と3分力計の計測 を同サンプリング周波数 (500Hz),同時刻で行う.3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) により電圧に変換され,ユニバーサルレコーダー (共和電業製 EDX-200A-4H) を経 由して LAN ケーブルで計測用パソコンに出力される.μDAQ 32DTC に関しても同様にデータを LAN ケーブルで出力させ,3分力と風速,圧力を合わせて 36 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,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,計測位置において,約20mmの厚 さまで境界層を低減できている.

飛行高度は,翼前縁から地面板までの高さhを主翼のコード長cで除した値であるh/cを定義し, 主翼単独と全機で飛行高度h/cを変化させて実験を行っている.風洞の流速はU = 20m/sに設定し, $Re = 4.0 \times 10^5$ の領域で実験を行っている.





5. 実験結果と考察

5.1 飛行高度変化時の全機空力特性

まず,機体迎角 0.0deg. に固定し,前翼迎角を α_F ,主翼迎角を α_M ,尾翼迎角を α_T と定義し、前翼迎角と飛行高度 h/cを変化させた時の全機空力特性の計算結果と風洞試験の実験結果を Fig.4 に示す.実線が計算結果,プロットが実験結果である.

各前翼迎角において, 揚力及びピッチングモーメントが実験結果は計算結果よりも高くなっている. この原因は尾翼に揚力が発生していないためではないかと考えられる.ここで,同時に計測した尾翼の 翼断面 section G, Hにおける表面圧力分布を Fig.5 に示す.本来,水平尾翼には,主翼による吹き降ろ しの影響により,相対迎角が負となる流速が作用することで,下向きの揚力が発生している.しかし, Fig.5 の水平尾翼表面圧力を見ると上面と下面の圧力差がほとんど生じていないことが分かる.これは, 実験システム上尾翼部の風上側にあるストラットが影響しているものと考えられる.これらのことより, 尾翼に働くはずであった負の揚力が発生せず,結果として,全体の揚力が上昇し,機首下げ方向のピッ チングモーメントが増えたものと思われる.



Fig. 4: Aerodynamic properties of the Canard-Configuration WIG with different angle of attack of front wing at $\alpha_B = 0.0 \text{ deg.}$ ($\alpha_T = 0.0 \text{ deg.}$, $\alpha_M = 3.0 \text{ degs.}$).



Fig. 5: Pressure distribution of horizontal tail wing ($\alpha_T = 0.0 \text{ deg.}, \alpha_F = 9.0 \text{ degs.}, h/c = 0.35, \alpha_B = 0.0 \text{ deg.}$).

5.2 前翼の有無における全機での翼表面圧力分布の比較

主翼の風上側には,前翼が存在しているため,主翼の翼表面圧力に対しての干渉影響は存在すると思われる.そこで,主翼の翼表面圧力分布における,前翼ありとなしの結果を比較することによって,前翼と主翼の干渉影響を見ていく.飛行高度h/c = 0.35における前翼あり(前翼迎角 $\alpha_F = 9.0$ degs.)と前翼なしの結果をFig.6 に示す.Section AからEにかけて,前翼ありとなしの結果にほとんど相違が見られないことが分かる.したがって,前翼が主翼の風上にあることによって主翼の翼表面圧力に対しての干渉影響はほとんど無いということが分かる.



Fig. 6: Sectional pressure distribution on the main wing with end-plates of the Canard-Configuration WIG (h/c = 0.35 , $\alpha_F = 9.0$ degs.).

5.3 主翼単独時と全機における圧力分布の比較

ここで, Fig.7 に計算で得られた主翼単独及び WIG 全機における主翼の翼表面圧力分布を示す.主翼単独は,主翼迎角 $\alpha_M = 3.0 \text{ degs.}$ の結果, WIG 全機は機体迎角 $\alpha_B = 0.0 \text{ deg.}$,前翼迎角 $\alpha_F = 9.0 \text{ degs.}$ の結果である.横軸には翼後縁からの距離をコード長で除した値を取っている.Section A, B, C において翼下面の正圧,及び, Section D, E において翼端板内側の正圧が,主翼単独時に比べ全機時の方が減少していることが分かる.



Fig. 7: Pressure distribution on the main wing for two conditions of main wing only $(h/c = 0.35, \alpha_M = 3.0 \text{degs.})$ and whole airframe $(h/c = 0.35, \alpha_F = 9.0 \text{degs.}, \alpha_B = 0.0 \text{deg.})$.

5.4 胴体幅を小さくしたモデル

次に,胴体幅のみを小さくした計算格子モデルを作成し,その計算結果を比較する.現在の形状の胴体幅を基準 (100% として,胴体幅を 95%,90%,85%,80%に変更した時の全機における空力特性を Fig.8 に示す.現状の形状よりも胴体幅を変更した形状では,揚力係数が約 15%,抗力係数は約 10%の 上昇が見られ,揚抗比を見ると h/c = 0.35 では約 5%減少している.また,h/c が上昇すると約 3%の減少になっている.



Fig. 8: Aerodynamic effect of the fuselage at h/c = 0.35, $\alpha_F = 9.0$ degs..

6. おわりに

本研究で得られた成果を示すと以下のようになる.

- (1) 前翼式地面効果翼機に対し,前翼,主翼,尾翼,胴体間の空力干渉を圧力レベルで詳細に示した.
- (2) 全機という複雑なモデルにおいても,境界要素法を用いた理論計算により,機体全体に働く空力 及び主翼の翼表面圧力分布の推定が可能であることが確認された.
- (3) 主翼単独時に比べ,全機では主翼下面における正圧が減少し地面効果が損なわれていることが理 論計算及び実験結果に見られており,その原因として胴体との干渉影響が大きいことが明らかに なった.地面効果の損失を小さくする機体形状として、中翼式、主翼の位置変更などの検討が必 要である.

REFERENCE

- 1) 伊藤 悠真;地面効果内を飛行する3次元翼の空力に関する研究,卒業論文,2011
- 2) 伊藤 悠真;地面効果内を飛行する3次元翼の空力に関する後流影響と自由表面干渉影響について, 修士論文,2013
- 3) 片野 彬;前翼式地面効果翼の圧力分布に関する研究,修士論文,2017
- 4) Jaspa PORANANONT ; Asymmetric Aerodynamics of a Wing Flying in the Ground Effect , Master's Thesis , 2015

- 5) 小頭 康孝; 地面効果翼の水中曳航試験における自由表面影響に関する研究, 2013
- 6) 田端 貴明,村上真貴;広島大学新型風洞の性能評価に関する研究,2015
- 7) Ahmed, M.R., Takasaki, T. and Kohama Y. ; Aerodynamics of a NACA4412 Airfoil inGround Effect, AIAA JOURNAL, Vol. 45, No. 1 , 2007
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。今回は接結点と接結構造を 最適化するため、4種類の多重織物を作製した。炭素繊維はT300 3000-40Bを用いた.製織した構造の一例 はFig.1に示す.図1に示す4種類の四重織物の組織を設計し、構造材としての性能を比較検討する.織物A では接結構造のない四重織物である.織物Bでは各2層間を接結糸を6本用いる四重織物である.織物Cでは2 層と3層を接結糸を4本用いる.



Fig.1. Four kinds of textile structures with different connecting patterns of yarns.

◆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.

◆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GIRはJIS K 7086に基づく式(1)を用いて得た.

$$G_{IR} = \frac{3}{2(2H)} \left(\frac{P}{B}\right)^2 \frac{(B\lambda)^{2/3}}{\alpha_1}$$

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)、2H(mm) は試験片幅および厚さ、 $\alpha_1(N^{1/3}/mm^{2/3})$ は近似直線の傾きである.

3. 結果および考察

3.1 モードI 層間破壊じん性値 開発された構造材料の力学的性能評価に曲げ試験と DCB(Double cantilever beam)試験を行った. 各試料の DCB 試験の荷重-COD 曲線を図 2 に示し, 階段状の曲線を示している. 最初のき裂進展による荷重低下及びさらなるき裂進展に伴い, 層間におけるき裂進展抵抗の様子がわかる. き裂進展過程のモードI層間破壊じん性値を Table 1 に示す. 接結構造をもつ試験片 B,C,D が接結構造を持たない試験片 A よりも高い破壊靭性値を有していることが明らかである.接結構造をもつ試験片 D が最も高い破壊靭性値を示し, 従来構造に比べ 3 倍弱増大している.CFRP 立体構造における接結糸によるき裂進展抵抗の向上は著しいことがわかる.



Fig.2. The load-COD curves of four kinds of textile structures with different connecting patterns of yarns.

Table 1 Mode I fracture toughness of four kinds of textile structures (kJ/m²)

	1	2	3	4	5	average
А	0.205	0.326	/	0.444	0.478	0.363
В	0.912	0.845	0.879	0.842	0.669	0.869
С	0.961	0.566	1.033	0.777	0.913	0.850
D	1.128	0.900	1.200	0.762	0.963	0.990

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、接結組織を変えた多重織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

予見風速に基づくフィードフォワード制御による 大型垂直軸風力発電システムの出力・荷重変動抑制

大阪府立大学 大学院工学研究科 涌井徹也

1. 序論

大水深海域の広大な日本では浮体式洋上風力発電に期待が寄せられている.水平軸型タービンを用いた だ浮体式洋上風力発電システムの研究・開発は国内外で進められているが,垂直軸型タービンを用いた システムの研究も行われている.垂直軸型タービンは,増速機や発電機などの重量物を低位置に設置で きること,さらにはジャイロ効果による復元効果が期待できるなど浮体式洋上システムに用いた場合の 利点を有している.風力発電システムでは,定格発電出力の制約を満たし,かつ設備利用率を向上させ るために高風速域で出力制御を行う.浮体式システムに用いるような大形垂直軸型タービンでは,翼ピ ッチを操作することが技術的に困難である.したがって,タービン翼をストラットに固定し,一定回転 数下でのタービン翼の空力(失速)特性を利用して出力制御を行う必要がある.この場合,定格発電出 力が得られるのは定格風速が流入した場合のみとなり,それ以外の風速域では発電出力が低下して設備 利用率の低下を招く.そこで本研究では,陸上設置式大形垂直軸型風力発電システムの高風速域での設 備利用率を向上させることを目的とした出力制御方法を提案した.これまでに構築した回転数フィード バック制御を拡張し,風力タービン流入風速の予見値に応じて回転数フィードバック制御系の設定値を フィードフォワード操作することで発電出力を定格値に制御した.さらに、乱流変動風況下での動的シ ミュレーションを行い、構築した出力制御方法の有効性を明らかにした.

2. 回転数設定値のフィードフォワード操作に基づく出力制御

出力制御を行う垂直軸型風力発電システムの応答を表すブロック線図を図2に示す.この出力制御方 法では、まず、発電機トルク操作に基づく回転数のフィードバック制御系を構築し、その設定値を流入 風速予見値に応じてフィードフォワード操作する.流入風速予見値に対して定格発電出力が得られるロ ーター回転数は、垂直軸型タービンの空力特性に基づいて関数化する.ローター回転数の応答は慣性モ ーメントに起因する遅れ特性を有しており、その時定数はシステムが大型化するほど長くなる.したが って、回転数設定値を流入風速予見値に応じて逐次操作した場合には回転数偏差が増大し、発電機トル



図1 出力制御を行う垂直軸型風力発電システムのブロック線図

クや発電出力の変動が顕著になる.そこで、一次遅れフィルタを介した回転数設定値を回転数フィード バック制御系に入力することとする.発電機トルク操作に基づく回転数フィードバック制御には比例積 分動作を採用する.ローター回転数の応答には、回転周波数の翼枚数倍で変動するタービントルクに起 因した変動が重畳するため、一次遅れフィルタを介したローター回転数を制御量とすることでタービン トルクの変動に伴う発電機トルクの過剰な操作を抑制する.

3. 乱流変動風況下での出力制御挙動分析

3·1 計算条件

3 枚翼の直線翼垂直軸型風力タービンを用いた陸上設置式システムを対象とする.構築した連成解析 モデルを浮体式洋上システムに適用することを視野に入れ,直径 86 m,翼長手方向長さ 103 m の大型風 カタービンを想定した.主要諸元は複数の設計荷重ケースにおける空力荷重解析に基づいて決定した. 定格発電出力は 3000 kW に設定した.対象システムは,出力運転中に流入風速に応じて 3 通りの運転モ ード(定周速比運転,定速運転,定出力運転)を有する.まず.定周速比運転から定出力運転に切り替 える流入風速を 8 m/s に設定する.流入風速 8 m/s でのローター回転数は 7.648 rpm となり,これを定速 運転下での回転数設定値とする.発電出力が定格値に到達するのは流入風速 11.8 m/s であり,これより 高風速において定格発電出力を保持するように回転数設定値を変化させる.回転数設定値フィルタのカ ットオフ周波数は回転数制御系の共振周波数よりも低く設定し,流入風速の予見値は風力タービン受風 面内の空間平均値が誤差なく計測できるものと仮定した.

3・2 定常特性分析

空力-弾性-制御連成シミュレーションを用いて算出したシステムの定常特性として,流入風速に対す る発電出力およびローター回転数を図2に示す.本研究で構築した出力制御の比較対象として,回転数 制御のみを行う場合の結果も併せて示している.流入風速8m/s以下の定周速比運転および流入風速8 ~12m/sの定速運転ではどちらの制御方法でも同一の定常特性となる.しかし,流入風速12m/s以上の 高風速では,出力制御を行う場合には定格発電出力が保持されるのに対して,回転数制御のみを行う場 合には流入風速13m/s付近で最大値3500kWに到達する.これは,一定回転数下で風速が上昇すると 周速比とパワー係数がともに低下するのに対して,流入気流動力が風速の3乗で増加することによる. 出力制御を行う場合のローター回転数は,定格発電出力に到達した後に一度減少する.その後は風速の 上昇に対してパワー係数の減少と流入気流動力の増加が相殺するようにわずかに増加する.以上の分析 を踏まえ,風速変動下では回転数設定値を流入風速1m/s刻みで離散化し,流入風速予見値に応じて内 挿することとした.





3・3 乱流変動風況下での制御挙動分析

TurbSim で作成した乱流変動風況(平均風速 15, 18 m/s)下での動的シミュレーション結果を図 3, 4 に示す.出力制御および回転数制御のみを行う場合の流入風速(タービン受風面平均値),ローター回転 数,および発電出力を取り上げており,出力制御に関しては回転数設定値も併せて示す.出力制御を行 う場合には,回転数設定値が流入風速予見値に応じて変化する.回転数設定値フィルタのカットオフ周 波数を回転数制御系の共振周波数よりも低く設定しているため,いずれの平均風速においてもローター 回転数は設定値の変動に良好に追従し,発電出力は定格値(3000 kW)付近で変動する.一方,回転数 制御のみを行う場合は,平均風速 18 m/s の乱流変動風況下では出力制御を行う場合とほぼ同様の運転挙 動になる.これは出力制御時の回転数設定値が回転数制御における回転数設定値(7.648 rpm)近傍で変 動することによる.しかし,平均風速 15 m/s の場合には発電出力が定格値から大きく外れて変動してい ることがわかる.以上より,予見風速に基づくフィードフォワード制御を用いることによって,幅広い 風速範囲において定格発電出力を良好に保持できることを明らかにした.発電出力の制御性能は流入風 速の予見精度に依存するため,今後は予見誤差の影響を明らかにすることが課題となる.



4. 論文と学会発表のリスト

- T. Wakui, T. Nishoka, R. Yokoyama, "Dynamic Load Analysis of a Large-Scale Vertical Axis Wind Turbine-Generator System Using Aero-elastic-control coupled simulation", Proceedings of the Grand Renewable Energy 2018, Paper No. P-We-21, pp. 1–4.
- (2) 涌井徹也, 西岡拓哉, 横山良平, 回転軸動揺下での大形垂直軸型風力タービンの空力特性解析, 第 40 回風力エネルギ ー利用シンポジウム, pp. 273-276, 2018.12.04-2018.12.05, 科学技術館.
- (3) 涌井徹也, 西岡拓哉, 横山良平, 回転数設定値のフィードフォワード操作に基づく大形垂直軸型風力発電システムの 出力制御, 第40回風力エネルギー利用シンポジウム, pp. 409-412, 2018.12.04-2018.12.05, 科学技術館.

風・波併存時の係留浮体に関する模型実験およびシステム同定

代表者 神戸大学海洋底探査センター 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確保が重要な課題となる.洋 上再生可能エネルギー利用の実現には、長期にわたる運用の安全を保障するための安全性評価の確立が 欠かせない.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、アンカーの把駐力や係留索の挙動を踏まえた浮体動揺の推定が重要となる.しかしながら、浮 体動揺は係留系と複雑に連成するため、安全評価のための数値シミュレーションモデルの構築は容易で はない.こうした背景を踏まえて、本研究では係留浮体模型に対する波・風併存時の水槽実験を実施し、 このデータを用いたシステム同定を行うことで、複雑な連成影響を取り扱うための数学モデルの確立を 目的としている.

今年度は、線形ばねで係留されたセミサブ浮体を対象に、水槽試験により水平方向の自由減衰振動の 運動時刻暦を取得し、運動方程式中に含まれる付加質量および減衰力係数のパラメータ同定を行った.

模型実験の概要

セミサブ浮体を用いた模型実験は、神戸大学の浅水槽にて行った.本水槽は長さ 60.0 m,幅 6.0 m であり、水位は 0.8 m に設定した.排水量調整のためのバラスティングを行った後に、浮体の両端にばねを取り付けた.ばねはL字アングル材を用いて両端を固定した.ばねの取り付け上下位置は、連成運動が誘起されないように、浮体の重心と同じ高さに調整した.さらに、水槽壁による反射波の影響を避けるため、浮体は水槽幅方向の中央に浮かべ、浮体の振動方向が水槽長手方向となるように曳航電車の副台車を利用してL字アングル材を固定した.浮体とばねの取り付け状況を図1に示す.

1 自由度の自由振動試験については、水面が落ち着くまで待った後、浮体を水平に手で引くことで変 位を与え、この状態から静かに浮体を離した.浮体運動については、2 台のカメラを用いて浮体に取り 付けた複数のマーカーの動きを録画し、株式会社ディテクト社製 3 次元運動解析ソフトウェア DIPP-Motion V/3D を用いて取得した.



図1 セミサブ浮体とばねの取り付け状況

なお,事前にばねの検定を行った結果,95 mm の変位まで線形性が確認されており,検定結果を用いて算出したバネ定数は *k*=0.409 N /mm であった.

パラメータ同定結果

本研究では寺田*によって提案された逐次型のデータ同化手法をセミサブ浮体の自由減衰振動に適用 した.その詳細については参考文献を参照されたい.模型実験は水平方向の1自由度運動であり,他の 運動との連成は考慮せず,式(1)で与えられる運動方程式中の付加質量 a および減衰力係数 b の推定を行 った.なお,復原力係数 c にはばね定数 k を既知として与えている.m は浮体の質量であり 39.5 kg であ る.

$$(m+a)\ddot{x} + b\dot{x} + cx = 0 \tag{1}$$

パラメータ同定における再現波形と実際の観測波形との比較を図 2, 逐次パラメータ同定結果を図 3 に示す.推定されたパラメータの最終値は,付加質量 *a*=12.9 kg,減衰力係数 *b*=7.23 N·s/m であった.再 現波形は観測波形を高精度に再現できており,パラメータ同定が正しく行われたものと考えられる.た だし,本来は固有周波数に対して一定値と考えられる付加質量と減衰力係数が時間の経過に伴って変化 しており,ビデオカメラを用いた 3 次元の運動計測精度に問題があるように思われる.



図2 観測波形と再現波形の比較

図3 パラメータ同定結果

* 寺田大介,時系列解析による動揺パラメータの直接推定法 - 一自由度モデルによる検証 -, 日本船舶 海洋工学会論文集,第9号, pp. 127-137, 2009.

まとめ

セミサブ浮体模型を用いた水平方向の自由減衰振動の計測を行い、この時系列を用いた逐次データ同 化の結果、観測波形と再現波形が良好に一致することが確認された.今後は模型実験の運動計測精度を 向上させるとともに、6自由度運動方程式のパラメータ同定へと発展させていきたい.

成果報告

なし

高空風力発電の有効な方式の検討

(株) TMIT・研究開発部・所長、 首都大学東京名誉教授

藤井 裕矩

要旨

風力エネルギー発電方法について、安定した豊富な風力が得られる空中風力発電について要素技術を含 む基礎研究を行っている。世界的にも先進的な高度な技術が要求されるため、現在4つのタイプ:1) ポンピング型、2)テザー伝達型、3)ねじれ伝達型、4)フライゲン(発電機浮揚型)を念頭に置き、 それらの重要な要素技術について検討を行っている。そのうち、テザー型についてはその基礎的な部分 である軽量風車を改良し風洞実験の上、本年度は昨年に続きフィールドテストを行い所期の性能が得ら れることを検証した。

研究開発

風力発電においては風況の良いとこ 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ているが、 海外でも米国、オランダなどで開発され つつあり実用開発も近いと思われる。本 研究は、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。高空風力発 電手法として現在4つのタイプ:1)ポ ンピング型、2)テザー伝達型、3)ね じれ伝達型、4)フライゲン(発電機浮 揚型)を念頭に置き、それらの重要な要 素技術について検討を行っている。この



Fig.1 妻沼グライダー滑空場におけるフィールドテスト (2019年1月24-27日)

うち2)のテザー型は、断続的な発電がおこなわれる主流に対して連続的な発電を継続することを目標 とした極めて独創的なものである。このために用いられる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り、一昨年度九州大学大型境界層風洞を用いたデモンストレーションによって伝 達性能を実験的に調べた。昨年度は凧によって風車を浮上させて行うデモンストレーションを計画し実 施したが、浮上させた風車の風向を安定させることが出来なかった。本年度は、風車の更なる改良とと もに、昨年度に続いて凧によって風車を浮上させて行うフライトテストを行った(Fig.1)。これにより 風車の風向の安定を得ることが出来るとともに。凧のように高度や位置が振れる場合の伝達機構を合わ せた検討を行い、定格30W発電機により31Wの発電を得るなど所期の結果を得ることが出来た。 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おり、 この分野の研究者である吉田教授の参加によ り研究を進めている。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の継続を行 っている。



実験日程と経過

フェーズ 1.5 (0.2 k W 級) の垂直軸風車を 試作し (Fig. 2)、本年度は実験研究フィールド Fig. 2 風車モデル (フェーズ 1.5) テストを加えて以下のように実施した。

- ▶ 2018年6月17-22日 GRE2018に参加し下記のように発表した。 Hironori A. Fujii, Hiroshi Okubo, Yusuke Maruyama, Tairo Kusagaya, Yasutake Takahashi, Takeshi Akasaka, and Hiroki Endo, "TETHERED HIGH SKY WIND ENERGY GENERATION (HSWG) PROGRESS REPORT IN 2018," a90570. Grand Renewable Energy 2018 International Conference and Exhibition、2018, June 17 (Sun) -22 (Fri), Pacifico Yokohama, Yokohama, Japan
- ▶ 2018年11月13日 空中風力発電の手法についてカイトによる発電システムを開発した。(福岡県奈多海岸)
- ▶ 2018年12月5、6日 第40回風力エネルギーシンポジウム(科学技術館(千代田区))に「エ アボーン風力発電・新コンセプト」のセッションを構成して6件の研究発表を行った。
- 2018年12月6日 「第7回高空風力発電研究会全体会議」を科学技術館(千代田区)で開催した。(出席者22名)
- ▶ 2019年1月24-27日 空中風力発電の手法について軽トラックによる走行実験を用いてフィールド試験を実施した。(埼玉県妻沼グライダー滑空場)
- ▶ 2019年3月19日 「第8回高空風力発電研究会全体会議」を極地研究所(立川)で開催予定。

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、2)のようにフィールドテストによる デモンストレーションを行った。

1)高空風車において、軽量であることとともに、ブレードが十分な空力特性を持つこと、さらに、必要な強度を持つことが必要である。本年度においてはフェーズ1.5(0.2kW級)の直線翼風車をモーターで回転させてトルク特性を風洞で測定し風車性能の試験を行った。

2)風車の更なる改良とともに、風車を浮上させて行うフライトテストを行い、凧のように高度や位置 が振れる場合の伝達機構を合わせた検討を行った上で、定格30W発電機により31Wの発電を得るな ど所期の結果を得ることが出来た。

4)風車モデルの性能実験については、風力エネルギー利用シンポジウムなどの学会、さらに、フィールドテストの成果については(日本機械学会関東支部第25期総会・講演会、18E14,2019年3月18-19

日、千葉工業大学)、ならびに第8回全体会議で研究成果としてまとめた。

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、もしくは全体会議で発表し、議論した。(「研究成果報告」の項参照。) 研究組織

氏名	所属	役職
藤井 裕矩	ТМІТ	所長
大久保博志	神奈川工科大学	教授
永尾 陽典	神奈川工科大学	教授
佐藤 強	神奈川工科大学	博士課程1年
新川 和夫	九州大学	教授
吉田 茂雄	九州大学	教授
赤坂 剛史	金沢工業大学	講師
関 和市	東海大学	教授
内山 賢治	日本大学	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
冨田 匠	首都大学東京	学部4年
髙橋 泰岳	福井大学	准教授
近藤 智行	福井大学	修士課程2年
中嶋 智也	大阪府立大学	講師
遠藤 大希	TMIT	客員研究員
丸山 勇祐	前田建設	研究員
岩原 誠	(有)ザクシス	代表取締役
中台 章	ジオスポーツ(株)	代表取締役

研究成果報告(主なもの)

1)藤井裕矩,遠藤大希,草谷大郎,内山賢治、「テザー係留型飛行体の運動に関する基礎研究」、第49 期日本航空宇宙学会年会講演会、2E051C09、平成30年4月19-20日、東京大学。。

2) Hironori A. Fujii, Hiroshi Okubo, Yusuke Maruyama, Tairo Kusagaya, Yasutake Takahashi,

Takeshi Akasaka, and Hiroki Endo, "TETHERED HIGH SKY WIND ENERGY GENERATION (HSWG) PROGRESS REPORT IN 2018," a90570. Grand Renewable Energy 2018 International Conference and Exhibition、2018,June 17 (Sun) –22 (Fri), Pacifico Yokohama, Yokohama, Japan 3)藤井裕矩、赤坂剛史,大久保博志,草谷大郎,丸山勇佑,中嶋智也,高橋泰岳,遠藤大希,中台章,菊池 雅行「高空風力発電の極地での有効活用手法の研究」、「第15回南極設営シンポジウム」2018年6月4日 (月)、国立極地研究所

4) 草谷大郎、黒田茂将、冨田匠、藤井裕矩、「一体型オールインフレータブル飛行機モデルの無人展開から飛行まで」、第5回ブイヤント航空講演会、平成30年7月16日、東京都立産業技術高等専門学校

5)近藤智行、形川雅文、高橋泰岳、長尾晃一朗、東浦邦弥、「高空風力発電のためのヒステリシス制 御によるカイト飛行の検証」第40回風力エネルギー利用シンポジウム、日本風力エネルギー学会、2018 年12月4-5日,科学技術館、千代田区、東京,C3-2.

6)丸山勇佑、原田恭輔、大久保博志、藤井裕矩、佐藤強、遠藤大希、岩原誠、関和市「直線翼風車を 用いた高空風力発電システムの開発―風洞実験とフィールドテストー」第40回風力エネルギー利用シン ポジウム、日本風力エネルギー学会、2018年12月4-5日,科学技術館、千代田区、東京,C3-3. 7)大久保博志,畠山凌,小野寺未,佐藤強,藤井裕矩,丸山勇祐、「直線翼風車を用いた高空風力発

電システムの開発」日本機械学会関東支部第25期総会・講演会、18E14, 2019年3月18-19日、千葉工業大学.

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。

CT 画像を利用した数値解析法の脳神経外科への応用

京都府立医科大学脳神経外科 梅林大督

1. 緒 言

超高齢社会の到来とともに、骨粗鬆症患者が急増している.骨粗鬆症になると大腿骨の頸部骨折や椎体の圧迫 骨折(図1)が容易に生じるようになり、骨折とともに患者のQOLは大幅に低下する.高齢者の場合に骨折の治 癒が容易でないと、そのまま寝たきりの原因となることも多い.臨床における骨粗鬆症の判断は、主にDEXA法 等による骨密度の測定値から算出されるYAM値に基づいて行われるが、YAM値は骨密度の平均的な値であるた め、力学的な指標である骨強度に必ずしも対応しているとは言えない.骨強度を評価するためには、骨密度分布 に加えて骨の形状や構造をも考慮することが必要である.そこで本研究では、脊椎疾患を有する79名の患者の脊 椎 CT 画像より、178 個の椎体を抽出して3D 数値モデルを作成し、損傷力学を導入した FEA により椎体強度を 求めて、YAM 値との相関関係について調査した.

2. 解析方法

脊椎疾患で稲沢市民病院脳神経外科を受診した 79 名(男性 24 名,女性 55 名,年齢 39 歳~96 歳)の脊椎 CT 画像より計 178 個の椎体を抽出し、3D 数値モデルを作成した(図2).作成したモデルは、皮質骨に相当する表 面をシェル要素、内部を4面体要素で分割し、底面を完全拘束、上面に分布荷重を与えることで椎体の圧縮状態 を模擬し解析を行った.骨の力学モデルとしては、引張変形は線形弾性、圧縮変形は弾塑性を用いた.さらに、 引張応力下での要素の損傷は、最大主応力が臨界値に達したときに発生し、一方、圧縮応力下での要素の損傷は、 まず相当応力が降伏強度に達すると塑性変形が生じ、その後、最小主ひずみが臨界値に達すると圧潰が生じると した.また、表面のシェル要素のひとつが損傷したときの荷重値を骨強度と定義した.CT 画像を用いたモデル作 成と骨強度の評価までの一連の作業は、臨床用に開発された骨強度解析ソフトウェアの Mechanical Finder CLINIC (RCCM 社)を用いて行った.



Fig.1 Vertebra compression fracture



Fig.2 Procedure of 3D-modeling and strength analysis

各患者の YAM 値と CT-FEM により評価した椎体強度から、それぞれ次の式で定義される骨密度に基づく骨粗 鬆症評価指標 OPI_{BMD} と骨強度に基づく骨折危険性評価指標 OPI_{BS}を求めた.

$OPI_{BMD} = YAM/70$ and $OPI_{BS} = Bone strength/2500$

ここで、70%と 2500N はそれぞれ YAM 値と骨強度の基準値であり、YAM 値が 70%より低いと骨粗鬆症と診断 され、骨強度が 2500N より低いと骨折の危険性が高いことを示している⁽¹⁾. したがって、OPI_{BMD}<1 の場合は、 骨粗鬆症と診断される可能性が高く、一方、OPI_{BS}<1 の場合は、骨折の危険性が高いことに対応している.

3. 結果と考察

図3に79名の患者の大腿骨のYAM 値と腰椎のYAM 値の相関関係を示す.相関係数は0.679であり正の相関 があることがわかり、大腿骨の骨密度が高いと腰椎の骨密度が高いことを示している.しかし、一部の患者では、 腰椎のYAM 値が正常(70%以上)であるにも関わらず、大腿骨のYAM 値は40%より低い値を示しており、大腿 骨頸部骨折が生じる可能性があることを示唆している.このように、データ全体としては正の相関はあるものの、 患者によっては一方のYAM 値が低い場合もあるので、大腿骨と腰椎の両方でYAM 値を評価する必要があると 考えられる.

図4にOPI_{BMD}と OPI_{BS}の相関関係を示す.ここで,L1,2,3 はそれぞれ第1,2,3 腰椎,T12 は第12 胸椎を示している.OPI_{BMD}<1 は骨粗鬆症と診断される可能性が高い領域であり,OPI_{BS}<1 は骨折の危険性が高い領域を示している.OPI_{BMD}<1 の領域内に存在していても OPI_{BS}>1 を示している椎体が少なからず存在し,低骨密度でも強度的には問題がない椎体が存在することが分かる.一方,OPI_{BMD}>1 であり骨粗鬆症とは診断されないが,OPI_{BS}<1 となっている椎体が複数存在している.このことは,骨密度測定の結果では骨粗鬆症が認められないが,突然椎体が骨折する危険性を有していることを示唆している.今回の調査では,79 名中 10 名の患者が,正常骨密度・低骨強度の椎体を有していた.特にある患者は,OPI_{BMD}=1.36 であり十分に高い YAM 値を示していたが,L2 の OPI_{BS}は 0.54 でありかなり低い骨強度を示していた.なお,この患者のL3 の OPI_{BS}は 1.4 であり強度的には問題なく,椎体によっても強度が大きくばらつくことが分かった.



文 献

 Imai, K., et al., "Assessment of vertebral fracture risk and therapeutic effects of alendronate in postmenopausal women using a quantitative computed tomography-based nonlinear finite element method", Osteoporosis International, 20 (2009), pp.801-810.

Mechanical influence of implant number on the mucosal tissue under implant-retained overdentures using a combination method of mechanical reaction analysis and Finite Element Analysis.

Yasuyuki Matsushita, Kyushu university

Summary

Stress in the mucosal tissue under the denture base was evaluated using a combination of mechanical reaction analysis and FEM analysis.

Differeces in the mucosal stress distribution were detected among CD, 1-, 2-, 3- and 4-IOD.

3- and 4-IOD reduced the mucosal stress in posterior part more than in 1- and 2-IOD did.

Purpose:

This study was performed to investigate and compare the mechanical influence of implant number on the mucosal tissue under implant retained-overdentures using a combination method of mechanical reaction analysis in experiment model and finite element analysis.

Methods:

Five implants were placed between left and right mental foramina in edentulous mandibular experiment model. Following four types of implant overdentures (IOD) were established. 1-IOD; retained by single mid implant. 2-IOD; retained by two implants. 3-IOD; retained by mid and left and right most distal implants. 4-IOD; retained by four implants except for mid implant. Locator attachment was chosen as overdenture retainer. Complete denture (CD) was established as a control model. A 50N load was applied onto the right first molar position of the overdenture, and the bending moment on each implant and the overdenture displacement were measured.

Additionally, a FEA model was prepared based on DICOM data of the experiment model. The interface between the denture base and mucosal tissue was assumed to be a contact interface and the interface between bone and mucosal tissue was assumed to be continuous interface. Displacement data measured by the experiment model analysis were inputted into the FEA model, and the stress distribution and maximum stress value in the mucosal tissue under the posterior part of the denture was evaluated.

Results:

1. Displacement

The vertical displacement of the posterior part of denture base in loaded side showed the greatest, there was no difference in vertical displacement among CD, 1- and 2-IOD. However, the displacement of denture base significantly decreased in 3- and 4-IOD.

- 2. Mucosal stress
 - 1) Loaded side

Higher stress distribution was shown in posterior part in CD. Moderate stress distribution in loaded side was shown in 1- and 2-IOD. In addition, the lowest stress distribution in loaded side was observed in 3- and 4-IOD.

2) Non-loaded side

Except for CD, maximum stresses in unloaded side were lower than those in loaded side.

The highest stress value was shown in CD. The highest stress peak value was observed in 4-IOD, followed in order by 3-, 2- and 1-IOD.

From standpoint of mucosal stress reduction, 3- and 4-IOD were better for stress distribution than 1- and 2-IOD. Additionally, from standpoint of minimum intervention and economical effect, 3-IOD was better plan.

Conclusion:

Within this limited study, stress in the mucosal tissue under the denture base was able to be evaluated using a combination of mechanical reaction analysis and FEM analysis.

Differeces in the mucosal stress distribution were detected among CD, 1-, 2-, 3- and 4-IOD.

3- and 4-IOD reduced the mucosal stress in posterior part more than in 1- and 2-IOD did.

心筋組織のエネルギー変換メカニズムに関する研究

国際医療福祉大学 医学部 松本拓也

1. 緒言

疾患や欠損した組織・臓器を治療する技術として、再 生医療技術が注目されており、三次元組織体の活用が期 待されている。中でも特に注目が集まっているのが細胞 シート工学である。細胞シート工学は細胞-細胞間およ び細胞-ECM 間の接着を保持できる。細胞シート工学は、 臨床において心臓疾患の治療に応用されている。患者の 細胞から作製した骨格筋細胞シートを心臓に移植する ことにより拡張型心筋症の治療に成功したという報告 がなされている。また、自己複製能と多分化能を有する



人工多能性幹細胞(iPS 細胞)の樹立により再生医療分野は著しい発展を遂げている。このヒト iPS 細胞から心筋細胞への分化誘導が確立されつつあり、再生医療や創薬研究における重要な細胞源として期待されている。そこで本研究の発想は図1のようにスキャホールドとヒト iPS 細胞由来心筋細胞(hiPS-CM)を組み合わせることにより心筋組織の拍動を動力とするポンプ様デバイスの作製を目指した。まずは、hiPS-CM による組織体の構築と足場材の評価を行うことを目的とした。今回スキャホールドの材料としてポリジメチルシロキサン(PDMS)に着目した。PDMS とはガス透過性、透明性が高く、加工が容易な生体適合性材料である。よって、hiPS-CM の拍動挙動と PDMS の力学的特性について検討を行った。

2. 実験方法

1) hiPS-CM による組織体形成

心筋組織を構築するために使用された hiPS-CM は、Carmy A であった。Carmy A は、Myorige によって iPS 細胞から心筋細胞に分化した細胞である。細胞組織体を調製するために使用した培養基板は、温度応答性 24 ウェル平底プレート (CellSeed) であった。 hiPS-CM を 1.0×10^6 cells / well で播種し、37℃、湿度 100%、5%CO₂-95% air のインキュベーターで培養した。このとき、培地としては、 10μ MRock inhivitor を添加した解凍用培地 (Myorige) を用いた。培地は毎日交換し、初日は全量交換し、その後半量交換した。このとき使用した培地は維持培地 (Myorige) であった。 7日後に培地を4℃に冷却した培地に交換して細胞組織体を調製した。作製した細胞組織体を毎日撮影し、拍動を観察した。

2) PDMS の作製

今回用いた PDMS (Dow Corning Toray) は主剤と副剤の 2 つの液剤からなるものであった。主剤 と副剤を混合後、脱気を行い 3 日間静置させた。このとき主剤と副剤の混合比を 5:1、10:1、15: 1、20:1 と変化させた。作製した PDMS に対し引っ張り試験を行った。

3) PDMS 上での hiPS-CM の培養

主剤と副剤の混合比が5:1のPDMSと一般的な細胞培養に用いられるポリスチレン製ディッシュ 上でhiPS-CMを1.0×10⁶ cells ずつ播種し1)同様培養を行った。このとき、各条件では、材質の 違いにより、表面の組成が異なる可能性があるため、コラーゲンコートを行い、基板の表面物性の 均一化を図った。

結果および考察

1) hiPS-CM 組織体の評価

hiPS-CM 組織体は作製後7 日間培養を行った。図2に hiPS-CM 組織体の形態を示す。hiPS-CM 組織体のサイズは 徐々に減少し、そして凝集しているように見えた。これは 細胞間の結合が増加することにより細胞間の距離が縮まっ たためであると考えられる。図3に心筋細胞の拍動振動数 を示す。拍動振動数は、BV Workbenchを使用してアニメー ションを分析することによって得た。1日目から4日目に 拍動振動数が減少し、4日目から7日目にかけて増加する ことが示唆された。組織体形成後初期はそれぞれの細胞が 局所的に拍動することで安定せず振動数が減少しそれから 細胞間のギャップ結合形成により組織体全体が同調し拍動 が安定したと考えられる。

2) PDMS の力学的特性

図4は、作製した PDMS の引っ張り試験から得た応力一ひ ずみ線図である。ヤング率は図4のグラフの傾きから求め られ、得られた弾性率は、5:1-1100[kPa]、10:1-860[kPa]、 15:1-530kPa 20:1-75kPaとなった。、このことから異な る弾性率を持つ PDMS の作製に成功したことを確認した。

3) PDMS 上での hiPS-CM の 拍動挙動

図5に培養7日目の輝度の変化を示す。このグラフをBV Workbench により解析した拍動振動数は TCP-0.146[Hz]、 PDMS5:1-0.391[Hz]となった。TCP のヤング率は約2[GPa] といわれており、作製した PDMS のほうがヤング率が低く生 体環境により近いため拍動周期が短くなったと考えられ る。また、ヤング率の低い基板上では細胞の進展が抑制さ れることにより、立体的になり細胞間の接地面積が増加す ることで細胞間の情報伝達が促進されたことも考えられ る。

4. 結言

本研究では、温度応答性培養プレートを用いた iPS-CM 構造体の作製と混合比を変化させることによる硬さの異なる PDMS の作製、PDMS 上での hiPS-CM の培養と拍動挙動の観察に成功した。hiPS-CM は凝集や基板の硬さによって拍動 挙動が変化することが示唆された。

[1]Okita K, Yamanaka S. Induction of pluripotency by defind factors. EXPERIMENTAL CELL RESEARCH 316: 2565-2570, 2010



図5.PDMS 上の輝度変化

CT 画像を利用した数値解析法の脊椎外科への応用 ~びまん性特発性骨増殖症のバイオメカニクス解析~

佐賀大学整形外科 馬渡正明, 森本忠嗣

1. 緒 言

背骨を支える靭帯には、椎体の後方を縦に走る後縦靭帯、前面を走る前縦靭帯、椎弓をつなぐ黄色靭 帯等があり、後縦靭帯と黄色靭帯は椎骨と共に脊柱管を形成している.これらの靭帯(とくに前縦靭帯 を中心に)に骨化を生じ、広範囲に脊柱が癒合し強直化する病態はびまん性特発性骨増殖症(diffuse idiopathic skeletal hyperostosis; DISH)と称される。近年の高齢者外傷の増加とともに、DISH例の 骨折は増加している。DISH例では、軽微な外傷で骨折を生じ、癒合していない脊椎とは異なる骨折形 態を呈する。さらに、不安定が強く骨癒合不全や遅発性麻痺を生じることも問題となっており、その病 態の解明は喫緊の課題である。

本研究では、胸椎の DISH 例 2 名の患者の CT 画像から椎体モデルを作成し、圧縮と引張負荷が作用した場合の微視的骨損傷の発生について、正常椎体モデルとの比較検討を試みた.

2. 解析方法

61 歳と 75 歳の男性 DISH 症例の脊椎 CT データより,5 個および6 個の胸椎と椎間板で構築される脊 椎モデルを構築した.また比較のために 56 歳の女性の CT 画像を基に骨化を含まない正常脊椎モデルを 構築した.以下,61 歳骨化症モデルを First case,75 歳骨化症モデルを Second case,56 歳正常モデ ルを Third case と略記する.これらのモデルを図1に示す.CT 値から骨密度を推定し,さらに keyak の式を用いてヤング率を計算した.底部を固定し,上部に圧縮と引張荷重を最大 2000N まで加えて応力 解析を試みた.また,要素単位で破壊が生じる骨損傷モデルを用いて逐次的に生じる骨破壊現象を再現 した.

3. 結果および考察

図2に T8-T10 でのヤング率の平均値の分布状態を示す.56 歳の女性(Third)が最も低いヤング率分 布を示しており、3人の内で平均的骨密度が低いことに対応している.一方、First と Second では T8 と T9 の境界領域で高いヤング率を示しているが、これは靭帯の骨化による骨密度の上昇を示している.



First Second Thrid 図1 骨化症モデル(First&Second)と正常モデル



図2 ヤング率の分布状態(T8-T10)

モデル上面に 2000N の圧縮荷重(左図)と引張荷重(右図)を負荷したときの破壊した要素の分布状 熊を図3に示す.圧縮と引張の両条件ともに、骨化した靭帯と椎体の接合部から破壊が生じていること が分かる.また,破壊要素の累積状態をFirst case とThird caseの場合について図4に示す. 横軸は step 数を表しており、1 step は 200N に対応している. DISH 例の First case では圧縮よりも引張りの 方が破壊要素の発生数が多く、荷重の増加とともにその差も広がっていく.一方、正常モデルの Third case の場合,破壊要素の発生数は圧縮と引張でほとんど同じであり,負荷形態の差が生じていない.こ れらの結果より、DISH 例は骨折が生じる負荷形態に影響を及ぼすことが示唆される.なお、Third case の方が First case よりも破壊要素数が多いが、これは図2に示すように Third case の方が低骨密度を 示しており、今回用いた損傷モデルでは、低骨密度は低破壊条件に対応することに起因していると考え られる.



First case

図 3



Second Case







Third Case

図4 破壊要素の累積状態. 横軸は step 数を表し1 step は 200N に対応する.

3. 結 言

2500

2000

今回初めて DISH 例に CT-FEM の手法を応用し、靭帯の骨化が椎体骨折の形態に重要な影響を及ぼす 可能性があることが示唆された.次年度の研究では、症例数を増やして解析を行い、骨化が椎体骨折 に及ぼすメカニズムについてより詳細な検討を進めていく予定である.

骨密度分布を利用した骨の力学特性予測法の構築

千葉大学大学院医学研究院整形外科 松浦 佑介

1. 緒 言

整形外科分野における骨強度を評価する手法として,X線CT画像を用いた有限要素解法(CT-FEM)による骨 強度解析が行われている.患者自身の骨のX線CT画像から3D-CADモデルを作成するため,個人の骨とほぼ同 一の構造を有する3次元骨モデルを作成できる.また,CT画像から骨密度を推定し,骨密度からKeyakらが作 成した予測式により,ヤング率や降伏応力といった材料特性を推定することもでき,有限要素解析を行うことで 患者個別に骨強度の予測や評価が可能である.しかし,最近の研究からKeyakの式では実験結果を十分に表現で きないことが明らかになっている.そこで本研究では,KeyakやKellerの実験式を用いたCT-FEAと大腿骨の力 学試験結果を比較し,問題点を検討するとともに,新たな材料特性予測式の検討を行った.

2. 方 法

献体4名の大腿骨のCT 画像を Mechanical Finder ver.9.0 で読み込み、3 次元大腿骨モデルを 作成した.1人目の献体からは左大腿骨モデル(モデルA)を作成し、2、3、4人目の献体か らは右大腿骨モデル(モデルB, C, D)を作成している.実際の圧縮試験(以下実験)と同 様の条件を想定し、図1のように大腿骨の遠位部には骨固定用の樹脂の3D-CADモデルを作 成し、骨頭部には圧縮試験機の治具の3D-CADモデルを作成した.次に、大腿骨の骨密度を HU 値から推定した.さらに、ヤング率や降伏応力といった材料特性を予測式により骨密度か ら算出した.荷重拘束条件として、骨固定用樹脂の底面を完全拘束とし、治具の3D-CADモ デルの上面に10mmの強制変位を与えた.そして、破壊要素数が一定値を越え た時点で解析を終了した.



Fig.1 Distribution of bone density.

本研究では、現行の材料特性予測式や修正式(新たに提案した予測式)など、 複数の予測式ごとに解析を行っており、それぞれの解析結果と実験結果の荷重-変位関係を比較検討を行っている.

まず初めに,現行の材料特性予測式である Keyak, Keller-original (以下 Keller-o)を用いて有限要素解析を行った.これはモデル A, Bの2つで行い,現行の材料特性予測式と実験結果の整合性の確認を行った.

次に、複数の新たな材料特性予測式を定義し、それぞれの予測式ごとに材料特性を推定して解析を行った.低 骨密度領域 0.23 (g/cm³) 以下の要素数の割合が多いモデルで実験結果と解析結果の整合性が特に低く、さらに 解析結果の最大荷重が実験結果の最大荷重に比べ大きくなる傾向があることがわかっている.つまり現行の予測 式では低骨密度領域の要素数の割合の多いモデルの剛性が高く見積もられており、整合性が低く十分に表現でき ていない.そこで、このモデルの剛性を下げるために、低骨密度領域 0.23 (g/cm³) 以下のときヤング率を小さ くする必要があると考えられた.

これらを踏まえ Keller-o の式を基本に,指定範囲内($0 < BMD \le 0.23$)の骨密度からヤング率を算出する際にヤング率を 0.5 倍にした Keller-modified (0.5)(以下 Keller-m (0.5)), 0.25 倍とした Keller-m (0.25)を新たな材料特性予測式とした.この予測式と Keller-o の関係を図 2 に示す.骨密度 0.23 (g/cm³)以下で Keller-m のヤング率が 0.5, 0.25 倍に低下しているのがわかる.

なお、剛性の整合性を高めるために新たな材料特性予測式では非 破壊解析を行った.剛性値とその値が実験結果の剛性に対してどの 程度変化しているか(変化率)を比較検討することで、より実験結 果と解析結果の整合性を高める材料特性予測式について検討を行った.





3. 結果と考察

モデル A, B の実験結果と Keyak, Keller-o の式を用いた解析により 得られたモデルの荷重-変位曲線を図 3 に示す.モデル A と B の実験 結果を比較したところ,モデル A よりも B の方がより剛性が高く,最 大荷重も大きな差が生じている.Keyak での解析結果を比較すると, 2 つのモデルの解析結果はあまり差がなく,2 つのモデル共ほぼ同じ荷 重-変位関係を示した.実験結果と解析結果を比較した際,大きな差が 生じており,解析結果では剛性は非常に高いものの,実験では早い段階 で破壊が生じている.

実験結果と Keller-o での解析結果を比較したところ,全てのモデルについて Keyak の式よりも整合性が高いことが確認された.特にモデル B の整合性は高く,剛性や最大荷重は近い値となった.しかし,モデル A の実験結果と解析結果では整合性が見られなかった.

これらの結果より、実験結果と解析結果の整合性を高めるには



Fig.3 Compressive mechanical properties. (Experiment, Keyak and Keller-o)

ヤング率と降伏応力を骨密度より算出する際により低ヤング率で高降伏応力となる予測式を用いる必要があると 考えられる.

実験結果と Keller-m (0.5), Keller-m (0.25)の式を用いて解析により得られた剛性と変化率を表1に示す.変化率は最大でモデルAの Keller-m (0.5)の95(%)となったが,最小ではモデルCの Keller-m (0.5)の-2

(%) と非常に小さな値となった.全体で見ると、モデルB、C、D は変化率が小さいため、Keller-m は実験結果と整合性が高いと言える.モデルA は変化率が95、61(%) と大きくはなったが、図1のように現行の材料特性予測式と実験結果では Keller-m を用いた場合以上に整合性が低いことがわかる.これより、モデルA においても、Keller-m は整合性が高いと言える.

これらより、今回検討を行った新たな材料特性予測式 Keller-m は他の予測式と比べ実験結果と解析結果との 整合性がより高いものとなっており、実験結果を表現できていることがわかった.これはモデルの骨密度分布を 分析し、補正を行う骨密度の範囲を決定したためであると考えられ、新たに提案した材料特性予測式が実験と解 析の整合性を高めるのに有効であると考えられる.

4. 結 言

本研究では、献体大腿骨の実験結果とCT-FEAの結果を比較し、現行の材料特性予測式(Keyak, Keller-oの式) では、実験結果を予測することができなかったことを踏まえ、Keller-oを元にKeyakの式よりも低ヤング率、高 降伏応力な新たな予測式を提案し、実験と解析の比較検討を行った.その結果、指定範囲内の骨密度から算出さ れるヤング率を補正することで実験結果と解析結果の高い整合性が示され、提案する修正式の妥当性が示された.

Model	Prediction formula	Stiffness (kN/mm)	Rate of change (%)	Model	Prediction formula	Stiffness (kN/mm)	Rate of change (%)
	Experiment	0.56	_		Experiment	0.29	-
А	Keller-m(0.5)	1.09	95	С	Keller-m(0.5)	0.25	-2
	Keller-m(0.25)	0.90	61		Keller-m(0.25)	0.20	-5
	Experiment	1.71	-		Experiment	2.61	-
В	Keller-m(0.5)	1.46	-15	D	Keller-m(0.5)	2.04	-33
	Keller-m(0.25)	1.38	-19		Keller-m(0.25)	1.95	-38

Table.1 Stiffness and rate of change

バイオセラミックスとポリマーの複合化による骨組織再生用材料の開発

大阪大学附属病院未来医療センター 名井 陽

1. 緒言

大規模な骨欠損の治療には、自家骨やバイオセラミックス製人工骨を用いた骨移植治療が施される⁽¹⁾.しかし、人工骨は自家骨に比べて骨形成能が遅いことが問題として挙げられており、近年研究が進められている再生培養骨は、組織工学的手法を用いて多孔質構造の足場材料と細胞を組み合わせることで、骨形成能の向上が期待されている.再生培養骨の開発においては、足場材料が重要な役割を持っており、生体適合性と力学特性を有する足場材料について検討されている.原材料としては、ハイドロキシアパタイト(HA)やβ-リン酸三カルシウム(β-TCP)等のバイオセラミックスが中心であるが、最近では、力学的特性を向上させるためにバイオセラミックスと生分解性ポリマー等の生体適合性ポリマーを複合化した材料も検討されている⁽²⁾.また、生分解性ポリマーのポリL乳酸(PLLA)とポリカプロラクトン(PCL)はブレンドすることで力学特性の制御が可能であることが知られている.本研究では、HA 多孔体にポリマーブレンド PLLA/PCL 多孔質構造を導入した新規複合系足場材料を作製し、圧縮変形挙動と力学特性に及ぼすブレンド比の影響について調査した.

2. 実験方法

HA 多孔体はテンプレート法を用いて作製した. HA 粉末と PVA 溶液の混合溶液に PU(ポリウレタン)スポンジを含浸し乾燥させた後,電気炉を用いて 400℃,6 時間で PVA 溶液および PU スポンジを焼失させたのち,1300℃,4 時間で焼結させ HA 多孔体を得た. 次にペレット状の PLLA と PCL をジオキサン溶液に溶解して 3wt%の溶液を調整した. PLLA/PCL の混合比は 100/0, 80/20, 60/40, 40/60, 20/80, 0/100 とした.これらの溶液に HA 多孔体を浸漬し凍結乾燥を施すことで,複合多孔質構造体を作製した.以降,これらの複合多孔質構造体を H-L100/C0, H-L80/C20, H-L60/C40, H-L40/C60, H-L20/C80, H-L0/C100 と略記する.これらの複合多孔質構造体に関して,FE-SEM による微細構造の観察, XRD による結晶構造解析,小型材料試験機を用いた圧縮試験を行い力学特性の評価を行った.

結果および考察

作製した HA/PLLA/PCL 複合多孔質構造体の FE-SEM 画像を Fig.1 に示す.海綿骨に類似し た構造が HA により形成されており, HA 骨格構 造の内部に PLLA/PCL による多孔質構造が形成 されていることが確認できた.また, HA 多孔体 に PLLA/PCL 多孔体を複合化することで気孔率 は 97.9%から 90.9%程度まで減少した.平均 気孔径も約 333 µmから約 37 µmまで減少した. これは, HA 多孔体の空隙に PLLA/PCL の多孔質 構造が形成されることにより,気孔率および 気孔径が減少したものと考えられる.この結 果より,ポリマーブレンドは細孔形状に依存 しないと考えられる.

加熱による HA 粉末の結晶相の変化を Fig.2 に示す. 焼結前の HA 粉末では, HA 単一の結晶 相が認められた. この HA 粉末を加熱する と, 400℃では HA 単一の回折線が認めら



Fig.1 FE-SEM micrograph of HA/PLLA/PCL

れ,1300℃では HA の他にβ-TCP の回折線が認められた.こ のβ-TCP も HA と同様に人工骨に使用されるバイオセラミ ックスの一種で,徐々に患者自身の骨に置換する性質を 持つことで知られている.また,加熱温度の上昇ととも に,HA のピーク強度は増加している.

Fig.3にHA多孔体およびHA/PLLA/PCL複合多孔質構造体の圧縮試験の結果を示す.HA多孔体では,応力の増減を繰り返しながら圧縮変形が進んでいった.これは,変形過程においてHAの脆性破壊が支配的となり,HA骨格構造が局所的な破壊を繰り返したことによるものと考えられる.一方でHA/PLLA/PCL複合多孔質構造体では,ひずみ初期に弾性変形を示した(領域I)のち応力がほぼ一定のまま圧縮が進行するプラトー領域を示した(領域II).さらに圧縮が進行すると,多孔質構造が圧縮により緻密化し,応力が上昇していった(領域III).HA多孔体とHA/PLLA/PCL 複合多孔質構造体の圧縮変形挙動の違いは,HA多孔体の骨格構造内部に多孔質構造のポリマーが存在することで,HA多孔体の柱構造が破壊した後も全体の構造が維持されることにより変形の連続性が保たれ,形態安定性が向上したものによると考えられる.

HA/PLLA/PCL 複合多孔質構造体の力学特性を調べるた めに、応力-ひずみ曲線より、領域 Iの圧縮弾性率、ひずみ 0.4 までのエネルギー吸収量を算出した結果を Fig.4に 示す.PCL 含有量の増加に伴い圧縮弾性率およびエネルギ ー吸収量が減少する傾向を示した.ポリマー部分の多孔 質構造は、すべてのブレンド比において類似しているた め、細孔形状による力学特性への影響は小さいと考えら れる.PCL 含有量の多いH-L0/C100からH-L20/C80までは 圧縮弾性率および吸収エネルギーはほぼ一定の値を示す が、PLLA含有率の増加に伴いH-L40/C60からH-L100/C0ま では圧縮力学特性は直線的に増加する傾向を示した.こ れらの結果より混合比を変化させたPLLA/PCLポリマーブ レンドの導入により複合多孔質構造体の圧縮力学特性の 制御が可能であることが示唆された.

4. 結言

本研究では、新規骨再生用足場材料の開発を目指し、HA 多孔体と生分解性ポリマーブレンド PLLA/PCL の複合多孔



Fig.4 Mechanical properties of HA and HA/PLLA/PCL

質構造体の作製を行った.HA 多孔体の骨格構造内に PLLA/PCL ポリマーブレンドの多孔質構造を有 する複合多孔質構造体の作製に成功した.HA 多孔体にポリマー相を導入することで,HA 単体に比べ て圧縮弾性率および吸収エネルギーが増加した.力学特性は PLLA 100%において最大となり,PCL の 含有率が増加するにしたがって低下する傾向にあった.

- 参考文献
- (1) S. V. Dorozhkin, Biomaterials, 31(2010), pp. 1465-1485
- (2) P. Yos and M. Todo, Advanced Materials Research, 858(2014), pp. 96-102.

大気乱流による気圧変動の直接測定のための円盤型プローブの性能評価

海上保安大学校基礎教育講座 近藤文義

1. 実験目的

大気境界層内において乱流により生じる気圧変動を計測する際に問題となる、風が生む動圧について、 その影響を取り除くために用いられているプローブの性能評価を行うことを目的とした実験を行った。 本実験においては、市販されている2種の円盤型のプローブについて、任意の風速値に設定することの できる大型境界層風洞を利用し、風速と風向を変えることによって動圧の影響を円盤型プローブがどの 程度除去できているのか定量的に把握した。

2. 実験方法

図1のように、Paroscientific 社と Young 社の異なる形状の円盤型のプローブを水平固定時に両者の 高さが1.40m となるよう三脚を用いて風洞の左右に設置した。また風洞の中央には、測定感部が円盤型 のプローブと同じ高さになるよう3つのピトー管を水平に並べ、同じく測定感部が1.55mの高さになる よう超音波風速計をピトー管より風下側に設置した。超音波風速計より風上側にある円盤型プローブと ピトー管の設置位置については、それぞれが有る無しによって測定値に影響が出ないことを確認した。 さらに風洞の外には Vaisala 社の微差圧計を設置し、微差圧計の片側の測定部に円盤型プローブ、もう 片方の測定部にはピトー管の静圧測定部をブレードホースでそれぞれ接続した。ピトー管の静圧測定部 を風洞内の静圧(基準圧)とし、風洞内で風を起こすことで生じる動圧を除去した円盤型プローブ内の 圧力値との差を微差圧計で測定して、円盤型プローブによる動圧の除去程度を把握した。また風速値は 超音波風速計の出力値を用いた。

実験では先ず始めに、プローブの姿勢を水平に、かつ水平風向に対して正対にして、風速を 0~25 m/s まで 5 m/s 間隔で変えていき、それぞれの風速値に対して微差圧計の出力値を記録する。次に、各姿勢 に対する動圧の影響も把握するため、プローブの姿勢を鉛直方向に 5 度間隔で±45 度まで変えながら、 風速値を先と同様の間隔で変えた。さらに水平風向に対しても動圧の影響も把握するため、30 度間隔で プローブの水平方向の姿勢を 90 度まで変えて、先の正対時と同様に風速とプローブの鉛直方向の姿勢 を変えながら、動圧の除去程度が変わるのかといった実験も実施した。



図1 Paroscientific 社(左)と Young 社(中)の円盤型プローブの外観、および実験風景(右)

3. 実験結果

図2はParoscientific社(図左)とYoung社(図右)の円盤型のプローブを水平風向に対して、正対 (図上)もしくは直角(図下)に向け、プローブの姿勢を鉛直方向に+45度まで5度間隔で変えながら 風速を0~25m/sまで5m/s間隔で変えた時のピトー管の測定値(Pref)に対する円盤型プローブ内の 圧力値(Pmes)との差を示したものである。Paroscientific社のプローブ内の圧力測定値は水平風向に 対して正対した時、風速が増加するに連れて2次関数的にピトー管の静圧測定値よりも小さな圧力値を 示し、また鉛直風向が大きくなるほど小さな値をとる結果となった。この結果はYoung社のプローブに ついても同様の傾向であるといえるが、風速そのものの大きさに対する動圧の除去の程度は Paroscientific社の方が大きいことが分かった。一方で、プローブの姿勢を水平風向に対して直角に向 けたときも風速に対して2次関数的に変化し、ピトー管の静圧測定値よりも小さな圧力値を示したが、 鉛直風向の変化に対して依存性は、Paroscientific社とYoung社のプローブともにみられなかった。図 には示さないが、プローブの水平風向に対する傾き角が大きくなるにつれて鉛直風向の変化に対しての 鉛直風向の変化に対する依存性は小さくなっていた。この傾向は、プローブの姿勢を鉛直方向に-45度 まで変化させたときにも同様であった。



図2 Paroscientific 社(左)と Young 社(右)の円盤型のプローブの風速と風向に対する依存性

4. 研究成果報告

なし

5. 研究組織

研究代表者・近藤文義(海上保安大学校) 研究世話人・内田孝紀(九州大学) 九州大学 平成30年度 応用力学研究所 共同利用研究成果報告書 IR-FZ法による単結晶育成における集中加熱条件の最適化 山梨大学大学院 総合研究部 綿打敏司

緒言

赤外線加熱浮遊帯溶融(Infrared convergent floating zone: IR-FZ)法は坩堝不要の帯溶融法の 一つである。適切な組成の溶媒を用いることで偏析制御したり、分解熔融化合物の単結晶も 育成できたりする。しかし、育成結晶の大口径化が難しいため、育成結晶の大口径化技術の 確立も一つの研究課題である。代表者らが見出した回転楕円面鏡の傾斜効果はその1つであ る[1]。従来同一水平面内にあった回転楕円面鏡のランプが配置される焦点位置と加熱光が 集中する焦点位置を傾けることによりルチル単結晶の育成において固液界面の形状を制御 でき、20度傾けた条件で直径19 mmまで育成結晶を大口径化することができた。しかし、回 転楕円鏡の傾斜角度を大きくすると加熱効率が著しく低下した。また、20度傾けた条件では、 直径12 mm程度を超える大口径原料を利用した育成が困難であったため、育成結晶の大口径 化には原料供給速度を結晶育成速度に比べて3倍大きくする必要があった。その結果、育成 長が原料長に比べて著しく短くなった。

最近、代表者らは、IR-FZ法によるルチル単結晶の育成において回転楕円鏡の集光位置を 溶融帯表面近傍に近づける効果を調べた結果、集光位置を最適化することで回転楕円面鏡を 傾けなくても溶融帯が安定化されることがわかった[2]。原料供給速度と結晶育成速度を等 しくした条件で、従来、育成結晶と原料棒の回転軸上にあった集光位置を溶融帯表面に近づ く方向に2,4 mm移動させた条件で結晶育成すると直径16 mmの原料でも安定な溶融帯を形 成し、直径15 mmのルチル単結晶を育成できた。そこで本研究では、原料供給速度と結晶育 成速度を等しくした条件で、IR-FZの回転楕円面鏡の配置と原料径を系統的に変化させ、各 配置で利用可能な原料径と育成可能な結晶径の上限を調べた。

実験

TiO₂粉末を原料として使用し、ラバープレス法により25~37 mm ϕ ×70~80 mmLの円 柱状に原料棒を成形し、冷間等方圧加圧法(CIP)を用いて300MPaまで加圧した。空気雰囲 気中で1200℃,5時間焼結するなどして結晶育成に用いた。

回転楕円面鏡の集光位置を変化できる赤外線集中加熱炉を使用した。 集光位置が育成結晶 と原料の回転軸上にある場合

を0とし、溶融帯表面に近づく 方向を正と定義した。この装 置を用いて表1に示したよう に+4~+8 mmの異なる集光位 置で結晶育成に用いる原料径 を変化させ、育成可能なルチ ル結晶径の上限を系統的に調

Table I.	Summarv	of grow	th condition	of Rutile	crystals
	,				

M-L position /mm	+4	+6	+8
Feed dia. (sintered) /mm 16, 18 18, 21, 23, 25		23	
Rotation rate (upper/lower) /rpm 3~5/40		3~5/40	
Feeding rate /mm/h 5.0		5.0	
Growth rate /mm/h	5.0		
Atmospheric gas	Air, 3L/min.		

べた。表1には、原料と育成結晶の回転速度や移動速度、育成雰囲気についても記した。

結果と考察

図1に代表的な育成結晶の例として直径18mmの原 料棒を用いて集光位置を回転軸上から4mmと6mm 溶融帯表面近傍に近づけた条件で育成した結晶の写真を 示した。図1aに示した集光位置を4mmとした条件で の育成では、融液が垂れやすく、溶融帯を安定に保持す ることが困難であり、融液垂れなしに結晶育成を行うこ とは困難であった。一方、6mmとした条件での育成で は、図1bに示したように4回対称のファセットを示す 直径16mmの結晶を育成することができた。

異なる集光位置で様々な直径の原料棒を用いて育成した結果を丸印と十印で図2にまとめた。図2には文献2の結果を三角印と×印で合わせて記した。どちらの場合も塗りつぶした記号は安定な溶融帯を保持することが可能で育成結晶に良好な4回対称のファセットを確認できたことを示している。一方、白抜き記号は、育成中の溶融帯が不安定で育成結晶と原料棒との接触がしょうじやすかったことを示している。十印と×印は融液が垂れ易く溶融帯の形成すら困難であったことを示している。集光位置を6mmとすることで直径21mmの原料棒まで安定に溶融し、結晶育成を行うことができ、育成結晶径は20mmに達した。しかし、より一層大口径の原料棒を用いた育成では、集光位置を変化させても溶融帯を安定化させることができず、結晶育成は困難であった。

結論

集光位置を最適化することで直径21mmまでの大 口径原料棒を用いたIR-FZ育成が可能となり、育成結 晶を直径20mmまで大口径化することができた。

参考文献

[1] S. Watauchi et al., J. Cryst. Growth, 360 (2012) 105-110.

[2] S. Watauchi et al., J. Cryst. Growth, 496 (2018) 69-73.



b



Fig. 1. Rutile crystals grown using feed of 22 mm in diameter at the M-L system position of +4 mm (a) and +6 mm (b).



Fig. 2. Summary of the growth of rutile crystals using feed rods with various diameters at the various M-L system positions.

波浪中を低速航行する船舶に働く流体力と動的応答に関する研究 A Study on Hydrodynamics and Dynamic Responses of Vessel with Low Forward Speed in Waves

広島大学 肥後 靖

Summary

When we operate big ships like bulk carrier, we have no choice but to sail in rough weather for financial and environmental reason. Then, it is usual to slow down consciously. Research about ship performance of normal speed has been conducted a lot, but research in the case of low speed is very few.

The objectives of this research is to inspect the appropriateness of theory numerical calculation by theory formulation on the assumption of low speed and experiment on low speed using model ship (F_n =0.05).

In this study, it can be counted the term of U^2 as 0 on the assumption that the ship speed is extremely slow. Then, the author attempt to create the new calculation method that can be easily calculated the velocity potential at low speed.

In this year, an experiment on model ship at Kyusyu University was implemented, and those will be used for validation of numerical code which will be developed based on the new low speed approximation by using Green function method.

1. 緒言

タンカーやコンテナ船、貨物船のような大きな商船を運用する際、経済的或いは環境的理 由によって、荒天の地域を航行せざるを得ないことがある。この時、船舶は波浪による船速 低下を起こすが、さらに運行者が船舶の安全を考慮して意識的減速を行うのが通常である。 もし、船舶が荒天の地域を通常の速度で航行した場合、高波などにより船体が煽られ、スラ ミング現象やスクリューが露出し空転に近い状態になるプロペラレーシング現象や、甲板 冠水などを起こす。特に、スラミング現象は重大海難事故の主原因であり、船体の折損事故 に繋がる危険性がある。

これは船の運行上好ましくない状態である。これらを踏まえて、耐航性能の観点から船体 の構造および強度を考える場合には、定常航行の速度ではなく、荒天時の低速航行時の耐航 性を基に構造設計する方が実用的と考えられる。

低速航行時の耐航性能を基に構造設計することで、経済性が重要となる商船を安全に運

行させることが必要があると考えられるが、耐航性能研究では、*Fn*=0.2 程度の通常航行の 性能に関する研究は多く実施されているものの、低速時の耐航性能に関する研究は少ない。 そこで本研究では、船舶の速度が低速であることを前提とした理論定式化を行い、一般に ノウハウの集積である三次元有速境界要素法の簡便化を試みる。さらに、模型を用いた低速 航行試験(*Fn*=0.05 程度)を行い、理論数値計算の妥当性について検証することを目的とし て実施する。今年度は、将来、理論を定式化し、それに対応する数値計算コードを開発した 際の妥当性検証のために、九州大学応用力学研究所深海水槽で、低速条件下での模型試験を 実施する。

2. 水槽試験

本研究において、計測および定式化に用いた座標系は Fig.1 の通りである。実験は 2018 年 8 月に九州大学応用力学研究所の深海機器力学実験水槽(L×B×D=65m×5m×7m)にて (Photo 1)、運動計測試験を実施し、この実験により船体運動および波浪中抵抗増加の計測 を行った。



Fig.1 Coordinate system

尚、波入射角については、水槽形状の制限から、正面向い波(β=180 度)の場合のみ実施 した。



Photo 1 Tank of RIAM

2.1 供試模型

本実験で用いた供試模型はFig. 2に示す RIOS (Research Initiative on Oceangoing Ships) プロジェクトで使用したバルクキャリアー船型である。

RIOS の主要目を Table 1 に、Body plan を Fig. 3 に示す。



Fig. 2 Model

L_{pp} (m)	2.4000	Kyy/Lpp	0.2500
<i>B</i> (m)	0.4000	$x_B(\mathbf{m})$	0.0510
<i>d</i> (m)	0.1280	<i>KB</i> (m)	0.0662
∇ (m ³)	0.0983	<i>KG</i> (m)	0.1080
Cb	0.8000	$BM_{T}(\mathbf{m})$	0.1016
A_w	0.8354	$BM_{L}(\mathbf{m})$	3.2135

Table 1 Principal particulars of model



Fig.3 Body plan of RIOS bulker

2.2 運動計測試験



Fig.4 Test set-up

曳航電車に Fig.4 に示すような運動計測装置を設置し、当該装置に付属しているポテンシ ョメータにより surge、 heave、 pitch の計測を行った。また、前後のロッドに取り付けた 三分力計で抵抗増加の計測を行った。運動(surge、heave、pitch)、トリガー、波高計の計 測値はそれぞれ、アンプを経由して EDX 装置に集約され、PC に収録される。集められた データは後述する解析方法にて解析される。本実験の計測システムを Fig.5 に、計測データ 項目を Table 2 に示す。



Fig.5 Measurement system of motion-free test

チャンネル番号	計測項目	計測装置
Ch. 1	トリガー	
Ch. 2	出会い波	サーボ式波高計(電車固定)
Ch. 3	Surge	ポテンショメータ
Ch. 4	Heave	ポテンショメータ
Ch. 5	Pitch	ポテンショメータ
Ch. 6	抵抗 (<i>fi</i>)	三分力計
Ch. 7	抵抗 (<i>f2</i>)	三分力計
Ch. 8	入射波	容量式波高計(地上固定)

Table 2 Measurement items

ここで、出会い波高計は動的応答の位相差を求めるために使用し、入射波高計は同振幅比 を求めるために使用する。また、トリガーは船体と地上に固定した入射波高計の間に生じる 距離位相を補正するために、出会い波高計が入射波高計の真横を通過した際に加えられる 信号で、動的応答の位相差を補正する。

運動計測試験の入射波の条件及び実験条件を Table 3 に示す。

フルード数 <i>F</i> _n	λ /L
0.05	0.3, 0.5, 0.55, 0.7, 0.75, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.4, 1.8, 2.0,
	2.5, 3.0
0.10	0.3, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 0.95, 1.0, 1.1, 1.2, 1.4, 1.8, 2.0, 2.5,
	3.0

Table 3 Experimental condition

尚、入射波高 Hは、基本的に波岨度 H/Aが 1/30 以下になるように決定している。

2.3 解析方法

本実験においては、入射波を入力データとして、運動応答特性および抵抗増加などの出力 データを取得し、それらのフーリエ解析を介して最終的に各出力データの応答特性を得る。 その際、応答特性については、入力データとの振幅比および位相差(位相遅れ)でまとめら れる。すなわち、入射波の振幅を*ζ*_a、波長を λ、円周波数をω、出会い円周波数をω_eとし たとき、波入射角 βが 180 度であるので、入射波の式は

 $\zeta(x;t) = \zeta_a \cos(\omega_e t + kx)$

と書ける。ただし、*k* は波数で無限水深を考えているので *k= ω²/g* である。この入射波の中 で模型は

 $\begin{aligned} \xi \ 1(t) &= | \ \xi \ 1 | \cos(\omega_e t + \varepsilon \ 1) \\ \xi \ 3(t) &= | \ \xi \ 3 | \cos(\omega_e t + \varepsilon \ 3) \\ \xi \ 5(t) &= | \ \xi \ 5 | \cos(\omega_e t + \varepsilon \ 5) \end{aligned}$

で運動を行う。ここで、 *ξi*は *⊨*1,2,3 に対して、各々surge、heave、pitch が対応している。

各運動モードの応答特性は、入射波の振幅との比、 $| \xi 1 | | \zeta_a, | \xi 3 | | \zeta_a, | \xi 5 | | k \zeta_a \pm$ びに入射波との位相差 $\epsilon 1, \epsilon 3, \epsilon 5$ で示す。

また、抵抗増加については、予め平水中で各速度に対する造波抵抗 Foを計測しておき、 非定常造波抵抗 Fsから Foを差し引く方法で抵抗増加を求めている。従って、抵抗増加係数 RAWは

 R_{AW} =-(F_{O} - F_{S})/ $\rho g \zeta_{a}^{2}(B^{2}/L)$ で表される。

3. 結果と考察

3.1 運動の検証

Fig.6 に *Fn*=0.05 における船体運動の応答関数を示す。各運動モードにおいて、上図が振幅比、下図が位相差を表している。現段階では低速近似法による数値計算コードの開発が完了していないので、比較の対象として、EUT(Enhanced Unified Theory)と Strip 法の計算結果もあわせて示す。船体運動の応答特性は振幅、位相差共に計算結果(特に Strip 法)と良く一致しており、実験そのものの精度に問題はないと思われる。今後、低速近似法による計算方法を確立し、実験結果と比較考察するための対象とする。



Fig.6 Ship motion in F_n =0.05

一方で、 F_n =0.10における船体運動の応答関数を Fig.7に示す。 F_n =0.10の場合は、 F_n =0.05 の場合と異なり、実験結果にばらつきが見られる。特に、pitch においてはこのばらつきが 看過できない程度のため、その原因を調査するためにばらついた波周期で繰り返し実験を 実施したが、改善は見られなかった。後で判明したことであるが、実はこのばらつきは水槽 側壁の影響であることが分かった¹⁾。本実験で使用した模型船の船長、水槽の幅などの条件 が、柏木ら¹⁾が想定した条件と偶然ではあるが酷似しており、実験値がばらつく入射波長も 柏木ら¹⁾が予想した波長と一致しており、はからずも柏木ら¹⁾の計算の妥当性を証明する実 験結果を提供することになった。逆の言い方をすると、柏木ら¹⁾の計算方法の優秀さを証明 する実験となった。さわさりながら、実験としての精度には問題があると思われるので、本 実験結果は低速近似法の妥当性検証には使用しないと判断した。いずれにしても、 F_n =0.10 は想定している低速域(F_n =0.05 程度)とは大きく外れるので参考程度に止めることにした。



Fig.7 Ship motion in $F_n=0.10$

3.2 抵抗増加の検証

Fn=0.05 および *Fn*=0.10 における抵抗増加係数の実験結果を Fig.8、Fig.9 に各々示す。 運動と同様に *Fn*=0.05 の場合は、計算の妥当性検証の使用に耐える程度の精度と考えられ るが、*Fn*=0.10 の結果はばらつきが見られる。これは前述のように水槽側壁の影響と考えら れる。



Fig.8 Added resistance in $F_n=0.05$

Fig.9 Added resistance in *Fn*=0.10

4. 結言

低速航行に対する計算法を確立し、当該方法の妥当性を検証するための低速条件下での 水槽試験を遂行した。その結果、F_n=0.05 での運動応答試験は妥当性検証の使用に耐えると 考えられる程度の適正な精度で遂行されたことが確認された。 今回は、時間の関係上、運動計測試験のみを実施したが、今後流体力計測試験も実施し、 低速近似理論による数値計算コードによる計算結果との比較検討を行う必要がある。

尚、境界値問題の解法については、U²を高次の微小量として無視することによって、積 分方程式とその核関数である Green 関数を求める定式化は一応完了しており、その結果を 参考として本報告書に添付する。この定式化に沿った数値計算コードの開発が急がれる。

参考文献

柏木 正、大楠 丹、稲田 勝:波浪中を前進する船に働く流体力への水路側壁影響の研究、日本造船学会論文集、168 号、p. 227-242 (1990)
参 考

2.3 低速近似法を用いた数値計算法

本研究では前進速度を有する場合のグリーン関数法を用いて,規則波中での船舶に働く 流体力を求める低速近似法が提案されている.基本的な定式化の流れは船速を有する場合 と同様であるが,自由表面条件において,船速が低速であるという前提をもとに速度*U* の二乗の項は高次として無視するという方法を提案している.





Fig. 2.3.1: 座標系

Fig. 2.3.1 のような座標系を考え,船舶は速度*U*で*x*軸正方向に進んでいるものとし, ω_e は出会い円周波数で ω を入射波の円周波数,*K*を入射波の波数,*β*を追い波を 0deg.とし たときの入射波の入射角,としたとき $\omega_e = \omega - KU \cos \beta$ で表される.また,x = (x, y, z)とする.このとき,定常流場を一様流れとして近似する場合,j(1 ~ 6)モードの運動に より形成される波動場の速度ポテンシャル φ_j は Fig. 2.3.1 に示す流体を取り囲む境界面, すなわち自由表面 *S_F*,船体表面 *S_H*,無限水深の水底 *S_B*,無限遠方の検査面 *S*_∞の各境 界面上で次式の境界条件を満足しなくてはならない.

$$[F] \left(i\omega_e - U\frac{\partial}{\partial x}\right)^2 \varphi_j + g\frac{\partial\varphi_j}{\partial z} = 0 \quad \text{on } z = 0$$
(2.3.1)

$$[B] \quad \frac{\partial \varphi_j}{\partial z} = 0 \quad \text{on } z = -\infty \tag{2.3.2}$$

$$[H] \quad \frac{\partial \varphi_j}{\partial n} = n_j + \frac{U}{i\omega_e} m_j \quad (j = 1 \sim 6)$$
(2.3.3)

ただし,

$$\begin{array}{c} (n_1, n_2, n_3) = \boldsymbol{n}, & (n_4, n_5, n_6) = \boldsymbol{x} \times \boldsymbol{n} \\ (m_1, m_2, m_3) = (0, 0, 0), & (m_4, m_5, m_6) = (0, n_3, -n_2) \end{array} \right\}$$
(2.3.4)

である.このとき低速であることから、速度 U^2 の項は無視できるものとして、自由表面 条件の式 (2.3.1) を書き換えると、

$$\left\{-\omega^2 + 2\omega U\left(K\cos\beta - i\frac{\partial}{\partial x}\right)\right\}\varphi_j + g\frac{\partial\varphi_j}{\partial z} = 0$$
(2.3.5)

船体表面条件 (2.3.3) も同様に,

$$\frac{\partial \varphi_j}{\partial n} = n_j + \frac{U}{i\omega} m_j \tag{2.3.6}$$

ここで (2.3.6) 式の右辺第二項は

$$f(U) = \frac{U}{\omega - KU \cos \beta}$$

としたとき,

$$f(0) = 0$$

$$f'(0) = \frac{(\omega - KU\cos\beta) + KU\cos\beta}{(\omega - KU\cos\beta)^2} \bigg|_{U=0} = \frac{1}{\omega}$$

より

$$f(U) = f(0) + f'(0)U + O(U^2)$$

であることを考慮する.

2.3.2 グリーン関数

船速が低速であるという前提で積分方程式の核関数であるグリーン関数をG(P;Q), ただし P を field point, P = (x, y, z), Q を source point, Q = (x', y', z') とすると,

$$G(P;Q) = -\frac{1}{4\pi} \left[\frac{1}{r} - \frac{1}{r_1} \right] + \frac{1}{4\pi^2} T(X,Y,Z)$$
(2.3.7)

で表される. ただし,

$$\binom{r}{r_1} = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z \mp z')^2}$$
(2.3.8)

$$T(X,Y,Z) = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \left[\frac{1}{(1+2\hat{\tau}\cos\theta)\alpha} + \frac{1}{(1-2\hat{\tau}\cos\theta)\overline{\alpha}} \right] d\theta \\ - \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \left[\frac{I^{+}(X,Y,Z)}{1+2\hat{\tau}\cos\theta} + \frac{I^{-}(X,Y,Z)}{1-2\hat{\tau}\cos\theta} \right] d\theta$$
(2.3.9)

$$I^{+}(X,Y,Z) = K^{+}e^{K^{+}\alpha} \left[E_{1}(K^{+}\alpha) - 2\pi i \cdot H[-\operatorname{Im}(K^{+}\alpha)] \right]$$

$$I^{-}(X,Y,Z) = K^{-}e^{K^{-}\overline{\alpha}} \left[E_{1}(K^{-}\overline{\alpha}) - 2\pi i \cdot H[-\operatorname{Im}(K^{-}\overline{\alpha})] \right]$$
(2.3.10)

$$K^{+} = \frac{K_{0}\hat{\tau}(2\tau - \hat{\tau})}{(1 + 2\hat{\tau}\cos\theta)} = \frac{\omega}{g} \frac{2\omega_{e} - \omega}{1 + 2\hat{\tau}\cos\theta}$$

$$K^{-} = \frac{K_{0}\hat{\tau}(2\tau - \hat{\tau})}{(1 - 2\hat{\tau}\cos\theta)} = \frac{\omega}{g} \frac{2\omega_{e} - \omega}{1 - 2\hat{\tau}\cos\theta}$$

$$\left. \right\}$$

$$(2.3.11)$$

$$\alpha = Z + i(X\cos\theta + Y\sin\theta), \quad X = x - x', \quad Y = |y - y'|, \quad Z = z + z' \\ K_0 = \frac{g}{U^2}, \quad \hat{\tau} = \frac{\omega U}{g}, \quad \tau = \frac{\omega_e U}{g} \\ H(t) = \left\{ \begin{array}{cc} 1 & (t > 0) \\ 0 & (t < 0) \end{array}, \quad E_1(z) = \int_z^\infty \frac{e^{-t}}{t} dt \end{array} \right\}$$
(2.3.12)

ここで、H(t)はステップ関数、 $E_1(z)$ は積分指数関数、 τ は花岡のパラメータを表す.

2.3.3 積分方程式

速度ポテンシャル φ_i とグリーン関数G(P;Q)を用いると、グリーンの公式から、

$$\varphi_j(P) = \iint_S \left[\frac{\partial \varphi_j(Q)}{\partial n_Q} - \varphi_j(Q) \frac{\partial}{\partial n_Q} \right] G(P;Q) dS(Q)$$
(2.3.13)

が導ける. ただし $S = S_F + S_H + S_B + S_\infty$ である. さらに,

$$\left[-\omega^2 + 2\omega U\left(K\cos\beta - i\frac{\partial}{\partial x'}\right)\right]\varphi_j(Q) + g\frac{\partial\varphi_j(Q)}{\partial z'} = 0 \quad \text{on } z' = 0 \quad (2.3.14)$$

となることと、 グリーン関数の相反定理より

$$\left[-\omega^{2} + 2\omega U\left(K\cos\beta + i\frac{\partial}{\partial x'}\right)\right]G(P;Q) + g\frac{\partial G(P;Q)}{\partial z'} = 0 \quad \text{on } z' = 0 \quad (2.3.15)$$

となるので,

$$\frac{\partial \varphi_{J}(Q)}{\partial z'} = -\frac{1}{g} \bigg[-\omega^{2} + 2\omega U \bigg(K \cos \beta - i \frac{\partial}{\partial x'} \bigg) \bigg] \varphi_{j}(Q) \\ \frac{\partial G(P;Q)}{\partial z'} = -\frac{1}{g} \bigg[-\omega^{2} + 2\omega U \bigg(K \cos \beta + i \frac{\partial}{\partial x'} \bigg) \bigg] G(P;Q) \bigg\}$$
on $z' = 0$ (2.3.16)

と書ける. (2.3.1), (2.3.2), (2.3.3) の境界条件と発散波条件から (2.3.13) における S_B と S_∞ に関する積分の寄与はなくなり

$$\varphi_{j}(P) = \iint_{S_{H}} \left[\frac{\partial \varphi_{j}(Q)}{\partial n_{Q}} - \varphi_{j}(Q) \frac{\partial}{\partial n_{Q}} \right] G(P;Q) dS(Q) - \iint_{S_{F}} \left[\frac{\partial \varphi_{j}(Q)}{\partial z'} - \varphi_{j}(Q) \frac{\partial}{\partial z'} \right]_{z'=0} G(P;Q) dS(Q)$$
(2.3.17)

となるが (2.3.16) を用いて

$$-\iint_{S_{F}} \left[\frac{\partial \varphi_{j}(Q)}{\partial z'} - \varphi_{j}(Q) \frac{\partial}{\partial z'} \right]_{z'=0} G(P;Q) dS(Q)$$

$$= \frac{1}{g} \iint_{S_{F}} \left[G(P;Q) \left\{ -\omega^{2} + 2\omega U \left(K \cos \beta - i \frac{\partial}{\partial x'} \right) \right\} \varphi_{j}(Q) - \varphi_{j}(Q) \left\{ -\omega^{2} + 2\omega U \left(K \cos \beta + i \frac{\partial}{\partial x'} \right) \right\} G(P;Q) \right]_{z'=0} dS(Q)$$

$$= -\frac{2i\omega U}{g} \iint_{S_{F}} \left[G(P;Q) \frac{\partial \varphi_{j}}{\partial x'} + \varphi_{j}(Q) \frac{\partial G(P;Q)}{\partial x'} \right]_{z'=0} dS(Q)$$

$$= -\frac{2i\omega U}{g} \iint_{S_{F}} \frac{\partial}{\partial x'} [\varphi_{j}(Q)G(P;Q)]_{z'=0} dx' dy'$$

$$= 2i\hat{\tau} \oint_{C_{H}} \left[\varphi_{j}(Q)G(P;Q) \right]_{z'=0} dy' \qquad (2.3.18)$$

と書き換えられる. ただし, 最後の変形にはストークスの定理を用いており, 線積分の方向は Fig 2.3.1 に示す *C_H* の方向である. (2.3.18) を (2.3.17) に代入すると

$$\varphi_{j}(P) = \iint_{S_{H}} \left[\frac{\partial \varphi_{j}(Q)}{\partial n_{Q}} - \varphi_{j}(Q) \frac{\partial}{\partial n_{Q}} \right] G(P;Q) dS(Q) + 2i\hat{\tau} \oint_{C_{H}} \left[\varphi_{j}(Q) G(P;Q) \right]_{z'=0} dy'$$
(2.3.19)

となる. 点 P が船体表面 S_H 上にあるとき

$$\frac{1}{2}\varphi_{j}(P_{0}) = \iint_{S_{H}} \left[\frac{\partial \varphi_{j}(Q)}{\partial n_{Q}} - \varphi_{j}(Q) \frac{\partial}{\partial n_{Q}} \right] G(P_{0};Q) dS(Q) + 2i\hat{\tau} \oint_{C_{H}} \left[\varphi_{j}(Q) G(P_{0};Q) \right]_{z'=0} dy' \qquad (2.3.20)$$

で表される積分方程式となるので、(2.3.20)を解くことによって船体表面上の速度ポテン シャル $\varphi_i(P_0)$ が求められる.ただし、 P_0 は船体表面上の点である. 大島海峡における潮流パワーポテンシャルの季節変動

鹿児島大学理工学研究科(工学系) 山城 徹

1. はじめに

九州南方海上にある奄美大島周辺海域には潮流の強い海峡や瀬 戸が複数存在し,奄美大島と加計呂麻島の間にある大島海峡(図 -1)は九州離島の潮流発電の適地の一つとされている.國里ら

(2015年)によると、大島海峡の潮流パワーポテンシャルは海峡 東部の待網岬沖で約1.5kW/m²に達することが指摘されている.し かし、これは水温と塩分を一定とした数値計算の結果であるため、 密度成層を与えると、ポテンシャルはもっと小さくなることが予 想される.本研究の目的は、海水密度の鉛直構造の季節変化に伴 って、大島海峡の潮流パワーポテンシャルがどのように変動する か、明らかにすることである.

2. 数値計算

本研究では、図-2に示す海域を計算領域とし、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(FVCOM)(Chen et al., 2006年)によって、数値実験を実施した.モデルの海岸・海底地形については、日本水路協会と本研究室が収集したデータを使用した.メッシュ幅は開境界において最大(3 km)、大島海峡において最小(30 m)とし、鉛直座標はσ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.初期条件,境界条件で与える水温と塩分については、気象庁のFORA-WNP30再解析データを使用した.海面を通して与える熱フラックスは、東海大学のJ-OFURO3データセットを使用した.

第十管区海上保安本部が名瀬検潮所(図-1)において 2010 年 1~3 月に収集した実測潮位データと比較すると,計算結果が観測結果と強 い正の相関(相関係数:0.99)を示し(図-3),観測結果を良く再現し ている.第十管区海上保安本部が 2010 年 1~3 月に大島海峡 St.1 で 実施した定点観測で収集した流速データと比較すると,流れの向きに ついては,計算結果(図-4 中の青点)が上げ潮時で観測結果(図-4 中の赤点)よりもやや南寄り,下げ潮時でやや北寄りになり,両者に 若干の違いがみられるが,流れの大きさについては,計算結果が観測 結果にほぼ匹敵している.2010 年の大島海峡南方 St.2 における海水 密度(σ_t)の鉛直分布の季節変動を図-5 に示す. σ_t は 1~3 月では鉛 直方向に一様で,4~7 月にかけて σ_t の鉛直勾配は徐々に大きくなり, 8~9月に最大となっている.その後,10~11月で鉛直勾配は急激に小





図-2 計算領域







図-5 St.2 における_{σt}の鉛直分布 の季節変動(上:本研究の計算結果, 下:FORA-WNP30 再解析データ結果)

さくなり, 12 月ではσ_tが鉛直方向に ほぼ一様となっている. この結果は, 密度成層の一般的な季節変動を良 く再現している. FORA-WNP30 再 解析データでは夏季に密度の大き



な鉛直変化が出現し、これと比較すると、本研究の夏季の成層強度は若干弱い結果となっている.

3. 大島海峡における潮流パワーポテンシャルの季節変動

2010 年の場合について密度成層を考慮した潮流数値計算を実施し、奄美大島周辺海域表層の年平均 絶対流速の水平分布を図-6 に示す.強い潮流が奄美大島北部と大島海峡周辺に出現している.大島海峡 の強潮域は海峡東部に存在し、待網岬沖 St.3 (図-1)付近で最大流速を示している(図-7).

St.3 の海面における絶対流速の月別平均の時系列を図-8 に示す.流速は3月に最大値(0.84 m/s)を 持って冬季に大きく,8月に最小値(0.74 m/s)を持って夏季に小さくなっている.この流速変化に対 応して,潮流のパワーポテンシャルも3月に最大(0.61 kW/m²)と8月に最小(0.42 kW/m²)をとり

(図-9),冬と較べると、夏は約31%減少している.年平均すると、パワーポテンシャルは0.5 kW/m² で、國里ら(2015年)の結果と比較してかなり小さいことが示唆された.

4. 結論

FORA-WNP30 の水温と塩分データ, J-OFURO3 の熱フラックスデータを FVCOM に与えて, 奄美大島 周辺海域における密度成層を考慮した潮流数値計算を行った. 潮位, 潮流の計算結果は観測結果をほぼ再現 し, 計算結果の妥当性が確認された. そこで, 流速の計算結果を用いて大島海峡の潮流を調べ, 潮流が最強 となる地点が待網岬沖に存在することを示した. さらに, その地点の潮流パワーポテンシャルは季節によっ て変動し, 3月に最大, 8月に最小をとることを明らかにした.

5. 研究組織

研究代表者:鹿児島大学/山城 徹

研究協力者:鹿児島大学/小牧弘幸,鹿児島大学/濱添洸也,九州大学/胡 長洪

強制動揺試験による円筒型 OWC 装置のエネルギー変換特性に関する研究

九州大学大学院工学研究院 安澤 幸隆

1. 目的

著者らは波力発電の実用化に向けて、仕組みが単純で可動部が水中になく、広範な普及に有利である発 電用振動水柱(以下:OWC)カラムを有するマルチカラム型発電浮体の研究開発を行っている.先行研究に おいて複数 OWC カラムの相互干渉影響を含んだ波浪中応答を計算するプログラムを開発し、水槽サイズ においては広い波長域にわたって定性的・定量的にほぼ推定できることが確認されたが、実機サイズにな るとスケール影響があり、それを考慮した性能推定が必要であることを理論的に示した。そこで、そのス ケール影響を水槽試験で確認することと、当波力発電浮体が動揺したときの応答特性を明らかにすること を目的として、深海機器力学実験水槽で OWC 装置を鉛直方向に上下させる強制動揺試験を行った。

2. 中型 OWC 装置模型による鉛直方向強制動揺試験

本研究では OWC 装置の中型模型(想定している実機の 1/12 のサイズ)を使用している。OWC 装置は アクリル製である。また、今回 OWC 装置の中型模型を強制上下動させるための強制動揺装置に OWC 装 置の中型模型を適切な喫水で取り付けるために、冶具とフレーム構造を設計・製作した。OWC 装置模型が 強制動揺装置に取り付けられた状態を Fig.1 に示す。今回使用した OWC 装置の主要目とノズル比を Table2 に示す。



Fig.1 強制動揺装置の下に取り付けられた円筒形 OWC 装置

Table 1	円筒型 OWC 装置模型	(1/12 スケール)	の主要目
Table 1			×/ 1. × H

カラム直径 D	カラム高さ H	喫水 d	ノズル比 ε
500mm	1000mm	375mm	1/200

本研究で使用する模型は、Fig.2の左に示すような円筒形のOWC型装置の模型である。



Fig.2 円筒形 OWC 装置と等価空気ダンパ力学モデル

3. 水槽試験結果と考察

力学的には、波によって、円筒下部の水が上下方向に波強制力によって励振され、上部の空気室の体積 を変化させるときに、空気エネルギーになるエネルギーの一次変換を表している。この空気エネルギーが 最終的に電気エネルギーに変換されることになる。ここでは一次変換における力学を対象としている。空 気室の体積の変動と、圧力の変動を計測することによって、圧力と空気室高さ変動、またはその速度との 関係が得られる。

$$\Delta p = C_a \Delta \dot{z} + K_a \Delta z \tag{1}$$

ここに Δp: 空気室の圧力変動(圧力が大きくなる方を正とする)、Δz: 空気室高さ変動(空気室高さが小 さくなる方を正とする)。

これまでの研究により係数 Ca、Ka は、Δz の振幅の大きさや、周期に依存することがわかっている。また、Fig.2 右図の中の Cw は、流体(水)の造波減衰、粘性減衰、渦によるエネルギー散逸などが含まれる。

計測から得られた、空気室高さの変動を heave 運動の振幅で割って無次元化したものの振幅と位相の周 波数応答を Fig.3 に示す。



Fig.3 Heave 運動変位に対するカラム内水面の変動振幅(左)と位相(右)



Fig.3 空気室等価減衰係数の強制動揺周期による変化

その結果から、ノズル付き空気室の等価減衰係数を同定した結果を、Fig.4 に示す。グラフ中の実線は、 空気室を非圧縮性の理想流体と仮定して得られる次の理論式から計算した結果である。また、Fig.4 に、空 気室の空気エネルギー以外で消費されるエネルギーに関する等価粘性減衰を表す。周期1.75秒を最小とし て、周期の長い側、短い側に単調に増加していることがわかった。

$$C_a = \frac{8}{3\pi} \left(\frac{1}{2}\right) \rho_a \left(\frac{A_W}{A_N C_S}\right) A_W \Delta \dot{z} \tag{2}$$

ここに縮流係数 $C_s=0.72$ 、空気密度 $\rho_a=1.3$ (kg/m³)



Fig.4 空気室のエネルギー消費以外の等価減衰係数の周期による変化

5. 研究成果報告

OWC 装置中型模型の強制動揺実験を行うために強制動揺装置の冶具に合わせたフレームの設計を行い 空気室内圧力、空気室高さなどの計測を行った。その計測結果をもとに空気室の等価空気ばね定数と等価 減衰係数を動揺周期ごとに求めた。その結果、空気室の等価ばね定数の値については実験結果から有意な 値を得ることができなかったが、等価減衰係数については、空気室内空気を非圧縮性としたときの減衰係 数の理論値より、実験計測から導出した等価減衰に理論解の方が大きくなった。

また、強制動揺の周期の違いによって、OWC内の水位変動振幅はあまり変動せず、OWC装置の heave 変位とカラム内水面変動の位相差が大きく変化することが明らかになった。

今後、空気の圧縮性影響およびスケール影響が明確になるための実験を行う必要がある。

6. 研究組織

- 安澤 幸隆(九州大学大学院工学研究院 海洋システム工学部門 教授)
- 岡本 侑都(九州大学大学院工学部地球環境工学科4年)
- 木下 順次 (九州大学工学部 技術部)
- (九州大学応用力学研究所 教授) 胡 長洪

垂直軸風車の主要コンポーネントに作用する空力荷重の研究

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

垂直軸風車の主要部材として支持材に注目し、支持材の根元に作用する空力荷重を測定した.また、 支持材荷重を発生させるのは翼であるため、翼周りの流れの数値解析を行い、翼に作用する荷重につい て考察を行った.

2. 序論

垂直軸風車は水平軸風車とは異なり,主要部材として風車の回転軸と翼を接続する支持材を有する. 支持材には,翼の空力荷重に起因するモーメントに加えて,支持材自体に加わる空気抵抗も作用するう え,垂直軸風車特有の複雑な流れにより,複雑な力が作用する.そのため,垂直軸風車の導入を促進す るため,支持材に加わる荷重の測定とその要因となる翼の数値解析を行った.

3. 方法

垂直軸風車の支持材に加わる荷重の解明を目的とし、風洞実験により、直線翼垂直軸風車の支持材根 元に加わる荷重の計測を行い、翼枚数やロータ直径と荷重の関係を明らかにした.一方、実験結果には、 翼が回転していることで、流入風速と周速度から計算される幾何学的な迎角に基づいて予測される荷重 とは、異なる挙動も見られた.そのため、回転による影響が大きい空力中心まわりのモーメントに注目 し、モーメント変動の原因を解明するため、CFD 解析を実施した.

4. 結果と考察

- (1) 垂直軸風車の翼に流入する相対流れの角度(迎角)はアジマス角により大きく変動する.注目している翼がアジマス角90°のとき上流,180°のとき下流にあると定義すると,翼枚数3枚でロータ直径2mの風車の場合,翼の迎角はアジマス角35°と130°で正負が入れ替わる.そのため,翼で発生する半径方向力は1回転中に正負が入れ替わる.また,相対流れが半径外側から翼に流入する場合(迎角が負の場合),翼で発生する半径方向力は半径内側に働き,アジマス角70°で半径内向きの半径方向力は最大となる.
- (2) 翼に発生する接線方向力や単独翼トルクは, 揚力の向きと大きさにより最適な条件が決まる. 翼枚 数3枚でロータ直径 2m の風車の場合, アジマス角 90°で最大値を示す.
- (3) 風車1回転中,翼の空力中心まわりのモーメントは変動する.この変動は,翼の負圧面から正圧面 にまわり込む流れや,相対流入角および翼面の剥離によって発生した渦の影響を受け,アジマス角 に応じて複雑に変動する.
- (4) 半径内側の翼面では、剥離しかけた流れが遠心力を受けて、翼から剥離せず表面に沿って流れる. この流れは、失速の遅れおよび翼で発生する揚力の増加を引き起こすと考えられる
- 5. 学会発表
- (1) Keiichirou Kawai, Takao Maeda, Yasunari Kamada, Yuhei Hoshino, MEASUREMENT OF AERODYNAMIC FORCE ACTING ON SUPPORT STRUCTUREOF A STRAIGHT-BLADED VERTICAL AXIS WIND TURBINE, Proceedings of GRAND RENEWABLE ENERGY (2018), CD-ROM, 4p.
- (2) Yuhei Hoshino, Takao Maeda, Yasunari Kamada, Keiichirou, Kawai, EXPERIMENTAL STUDY ON LOAD IMPACT ACTING ON STRAIGHT-BLADED VERTICAL AXIS WIND TURBINE, Proceedings of GRAND RENEWABLE ENERGY (2018), CD-ROM, 4p.

6. 研究組織

Coefficient of moment around

研究代表者	前田太佳夫,	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,	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	河合慶一郎,	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	星野 雄平,	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	松田健太郎,	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	









津軽海峡フェリーの船体が風速計の出力に及ぼす影響

弘前大学·地域戦略研究所 本田 明弘

序論

筆者は洋上における風況に関する調査を行う簡便な方法の一つ として、図1に示す定期航行フェリーに設置された風向・風速計 の出力を分析する事を試みている。その中で風向・風速計の出力 が、船体によって歪められている可能性について実験的に調査を 実施した。

風速計の海面上の高さは 27.3m と比較的高いものの、ブリッジ の上方に位置しているために船体の影響を受けやすいものと想定 された。



本実験は、応用力学研究所の地球大気動態シミュレー ション装置(大型境界層風洞)で実施した。図2に風洞内 に設置した海面板の上に設置した船体模型(縮尺1/200、 発泡ウレタン製)と模型上部に設置した熱線風速計を示 す。なお熱線風速計は2成分のX型でありプローブの向 きは主流方向と鉛直方向の風速成分が測定可能なように 設置され、遠隔で高さ方向の位置が制御できるトラバー ス装置で支持されている。

風洞で発生する風速は 5m/s 程度として、海面板上の風 速の高度分布はほぼ一様流であることを確認し、各風向 において風向風速計の位置において船体模型の有無での 平均風速の比率を、高さ方向に求めた。



図1 観測を実施している定期航行フェリー



図2 実験に用いた船体模型(縮尺 1/200)

実験結果

図3は、風速約5 m/s における、各風向における測定結果を、縦軸対数目盛で示す。ここで風向角を0°における結果を見ると、風速計の設置されているデッキ上 10m 付近の風速は 10%程度増速していることを示している。まら風向角が30°~60°と増大するにつれて、風速の増速率はさらに大きくなる傾向にある。

考察

試験結果においては、デッキ上比較的低い位置から70m程度まで船体の影響で増速している結果となり、風向60°においては高さ方向の分布形状は風向0°、30°の形状と異なる傾向にある。

この結果は、今回の試験における模型上の風向風速計の計測位置が、大きな風向となるにつれて風路の側壁に近づく ことも影響しているものと考えられるが、ブリッジの上部における流れの剥離は比較的小さく抑えられ、増速域が広が っているためと考えられる。

いずれにしても、今回対象とした船舶に設置された風向・風速計で測定される風速は、10%程度の増速が生じている

ものと考えられ、評価に際しては考慮する必要があることが判明した。

謝辞

本実験の遂行に際し、データ解釈と討論でご議論頂いた九州 大学応用力学研究所の内田 孝紀准教授、大屋 裕二特任教授、実 験に際して格別のご助力を頂いた松島 啓二氏、渡邉 公彦氏、高 田 青氏に感謝いたします。

研究組織

代表者 本田 明弘 弘前大学地域戦略研究所·教授 協力者 久保田 健 弘前大学地域戦略研究所·准教授

参考文献

 本田 明弘, "津軽海峡フェリーの観測データを用いた洋 上風 況の調査", 第 25 回 風工学シンポジウム (2018)



図3 風向ごとの船体による風速歪

帆布を用いた小型風車のトルク特性に関する実験的研究

弘前大学·地域戦略研究所 久保田 健

序論

再生可能エネルギーの利用促進が叫ばれる中、風車は電力利用を目的とした大型機の高効率化・高性能化と社会実装 が進んでいる。小型の風力エネルギー利用機器については、エネルギー製造コストが大型のものに比して割高になるた め、一般的には商用化(系統連携しての売電)は難しい。この状況において、非電化地帯である海上や山岳部などにお いて、生成したエネルギーをその場で消費する局所完結型のシステムとしては利用価値が見込まれる場合がある。

我々は小型のローテーション・フロー・タービンと命名した抗力式垂直軸風車を用いたエネルギー利用システムの構築を目指している¹⁾。件の風車の回転原理はクロスフロー風車に類するも、上流側入力風の抗力による回転力、加えてタービン内部で形成される旋回流が翼の内側を多段に押すことで順方向の回転力を生じる。また、抗力式特有の低風速下でも機能すること、ならびに鳥や人間に害をおよび雄懸念の少ない低回転性(過剰に回転しないこと)に特徴をもつ。

本研究では、ローテーション・フロー・タービンの翼材に帆布を用い、帆布素材の利点(柔らかく容易に形状をアレン ジできる)を活かして、垂直軸風車の軸長を変えつつ、翼の弛み(サグ)を調整した場合の風車性能を調査した。

実験方法

本実験は、応用力学研究所の地球大気動態 シミュレーション装置 (大型境界層風洞) で実施した。図1に垂直軸風車:ローテーション・ フロー・タービンの仕様 (左〜鉛直断面) と実 験時の外観図を示す (中央、右)。タービンは 直径 1000 mm、周均等化位置 8 枚の帆布製直 線翼で各翼の外端と回転中心のなす角を 35° とした。帆布自体の縦長さは 755 mm であっ て、基準軸長 750 mm のときに直線翼、軸長 を 610 mm まで短縮することで弛み割合 (サ グ率=翼全長/弛み長) を変えた。帆布材質は、 ポリエステル系ゴム引布 (厚み:0.53mm)を用いている。



図1 実験に用いたローテーション・フロー(垂直軸抗力式) タービンの断面形状(左)と、実験時の構成機器の外観写真(中央:サグ率0%(L:750mm)の直線翼、右:サグ率19%(L:610mm).

風洞で発生する風速は 3, 5, 7m/s としたが、低風速下では帆布の重力由来の下弛みがみられることを考慮し、本稿で は、帆布がカテナリー曲線形状と認識される風速 7m/s の結果のみを考察した。また、周速比の制御は、減速機付きサ ーボモータ(オリエンタルモータ製 NX94MS-PS10)を回転数制御モードにて用い、トルクと回転数計測にはトルクメ ータ(UNIPALSE 製 UTM2-10Nm)を用いて計測した。トルクデータは 2000 Count/sec で取得し、30 秒間の平均値につ いて、サーボモータ駆動のインバータノイズを除去して評価した。得られたトルク値と周速比から、トルク係数一周速 比 (*C*0-*A*)曲線を見積もった。

実験結果

図2は、風速7m/sにおける帆布製垂直軸風車の翼長別トルク係数の周速比依存性を示す。直線翼となるL:755mm では周速比に対して直線的な挙動を示し、 λ =0.1 で約0.28のトルク係数が得られ、 λ =0.55でトルクは消失する。翼長 が短くなるとトルクが消失する周速比は低下する傾向がみられ、L:610mmでは λ =0.32でトルク係数は消失、すなわ ち回転力が消失することがわかった。一方、 λ <0.2の低周速比域におけるトルク係数は翼長に単調に依存しない。尚、 各計測点で若干の計測値のばらつきがみられるが、この原因は低速運転におけるサーボモータの剛性パラメータの設定 が必ずしも最適ではなかったことに起因して時折スムーズに回転しないバックラッシュの影響と考えている。 **2**=0.1 におけるトルク係数について翼長依存性としてまと めた結果を図 3 に示す。総じて低周速域におけるトルク係数 は、帆布翼の翼長を短くすることで顕著に変化することがみ てとれるが、直線状態からわずかに弛ませることでトルク係 数は増大する。一方、過剰に弛ませるとトルク係数は低下する 傾向がみられ、今回の風車仕様ではサグ率で 3%付近が極大値 となる。

考察

2=0.1 において最高値を示した L:730 mm の風車では、風 速7 m/s にて 3.8 Nm のトルクを生じている。風速5 m/s では、 実測、理論値ともに約2 Nm であって矛盾しない結果が得られ ている。また直線翼(L:755 mm)の場合は風速7 m/s にて約3 Nm のトルクを発生していることが確認された。

本研究の風車を用いたエネルギー利用機器として、ピストン ポンプを組み込んだ風力直動式の送気ポンプシステムが既に実 証試験に供されており(図4)、ピストンポンプであるためにク ランク機構を介するが、回転角に依存したトルク変動が生じる。 仔細は割愛するも、現仕様のシステムでは送気時に要求される 最大トルクは3Nmであって、直線翼で運転していることを踏 まえると、システムは風速7m/s 程度で機能していることがわ かった。翼長を増長することでトルクは増大するため、低風速 でも対応する仕様とできるが、コストに直結するため好ましい とは言えない。今回得られた、僅かなサグ率の設定による20% 強のトルク向上は、システムコストの低減、設計風速の改善に 寄与するものであって、有用な知見が得られたと考える。



図3 え=0.1 におけるトルク係数の翼長依存性.



図4 青森県北部沿岸域に設置し た風力式送気ポンプシス テム実証機の外観写真.

謝辞

本実験の遂行に際し、データ解釈と討論でご議論頂いた九州大学応用力学 研究所の内田 孝紀准教授、大屋 裕二特任教授、実験に際して格別のご助力 を頂いた松島 啓二氏、渡邉 公彦氏、高田 青氏に感謝いたします。

研究組織

ł

代表者	久保田	健	弘前大学地域戦略研究所・准教授
協力者	本田 月	围	弘前大学地域戦略研究所・教授
	桐原 悼	<u>美二</u>	弘前大学地域戦略研究所・教授
	志田	崇	弘前大学大学院理工学研究科・博士後期2年
	沈	健	弘前大学大学院理工学研究科・博士後期3年

参考文献

1. 南條 宏肇, "抗力型風力発電の力学的モデルと発電出力の最適化評価", Journal of JWEA, Vol. 32, pp. 102-108 (2008).

垂直軸風車の3次元効果の数値解析

鳥取大学 工学部機械物理系学科 原 豊

1. はじめに

揚力型の垂直軸風車では、多くの場合に翼を回転軸に結合するアームが必要であり、その断面形状によっては 大きな損失が発生する.本研究では、昨年度、CFD解析によってアームが風車性能に及ぼす3次元効果について 調べたが、物体表面に垂直に作用する圧力しか考慮しなかった.本年度は、表面せん断応力の解析を主として行 い、アームおよび翼面上に作用する摩擦力に起因する抗力と圧力起因の抗力の比較を行った.

2. 方法

計算対象は昨年度と同様の2枚翼H型ダリウス風車DU-H2-5075(直径:D=0.75 m,高さ:2H=0.5 m)である(図 1参照). 直線翼の翼型はNACA 0018 であり,翼弦長はc=80 mm である. この風車に,図2に示す3種類の断 面形状のアームを仮定しCFD 解析を行った.翼型アームの断面はNACA 0018,アーム弦長はb=40 mm とした. 翼型アームの最大厚みはa=7.2 mm である.矩形アームの断面は縦をa=7.2 mm,横をb=40 mm の長方形とし, 円形アームの直径はd=7.2 mm である.最大厚みa(または直径d)を基準とした各アーム断面の抗力係数は,翼 型が $C_d=0.055$,矩形が $C_d=0.9$,円形が $C_d=1.2$ である.アーム長Lはいずれも0.355 mとした.計算ソルバーに STAR-CCM+を使用した.計算は3次元非定常非圧縮を仮定した RANS であり,SST $k-\omega$ を乱流モデルとして採 用した.計算設定は昨年度と同じであり,主流風速 U_{ω} は7 m/s,先端周速比($\lambda=R\omega/U_{\omega}$, Rはロータ半径, ω は 角速度)は最大出力状態($\lambda=2.9$)にほぼ相当する $\lambda=3$ とした(N=535 rpm).直線翼の翼弦長cに基づくレイノル ズ数は $Re_b=1.1\times10^5$ である.

本研究では、CFD で計算した物体表面の圧力およびせん断応力の分布から、翼やアームの局所に作用する抗力 を求める.図3に抗力の計算に用いた相対座標系(記載はないが x 軸は翼およびアームの弦方向を向いており, y 軸は r 軸と同じ方向を向く),および圧力と表面せん断応力を抽出した断面位置(図中の赤色の点線)を示す.アー ムは半径方向(r 方向)に5 mm 間隔の70 断面を選択し、翼については、赤道面(z=0)を基準として、1/2 翼(長さ: H)について5 mm 間隔で50 断面を選んで、各断面まわりの圧力および表面せん断応力の分布を計算した.表面 せん断応力の抽出断面と同じになるように、圧力の抽出断面は、昨年度の研究より個数を増やして解析を行った.



3. 主な結果と考察

図 4(a)にロータ1回転にわたって平均した圧力に起因する抗力係数のアームスパン方向分布を示す. 同様に図 4(b)は平均圧力抗力係数の 1/2 翼スパン方向分布である. 図 4(a)に示されるように,アーム断面形状に依らず,翼 との接合部(r/R = 1)に近づくほど相対風速が増加するため圧力抗力が増す傾向にある. 図 4(b)からは,翼とアームとの接合部(z/H = 0.5)付近において翼の回転力減少すなわち翼の圧力抵抗の増加が見られる. 図 5(a)にロータ



1回転で平均した表面せん断力に起因する摩擦抗力係数のアームスパン方向分布を示す. 同様に図 5(b)は平均摩 擦抗力係数の 1/2 翼スパン方向分布である. 図 5(a)に示すように,矩形アームのみアーム上の摩擦抗力係数がマ イナスになっているが,これはアームの前縁角部からはく離が起こり,矩形アームの上下両面の前方部で逆流が 発生し,それによって表面せん断応力が抗力ではなく,回転力として働いているためである. 図 5(b)を見ると, アームが存在することによって,翼面上の摩擦抗力も増加する傾向があることがわかる. 翼とアームとの接合部 (z/H=0.5)付近において,局所的に摩擦抗力係数の落ち込みがあるが,これはアームと翼の接合部の面積に相当 する摩擦力が計算に含まれないためである.

アーム(図4(a))と翼(図4(b))を統合した圧力抗力は、矩形アーム>円形アーム>翼型アームの順で大きく、 図5(a),(b)を統合した摩擦抗力は、翼型アーム>円形アーム>矩形アームの順で大きい.圧力と摩擦力で傾向が異な るが、圧力抗力に比べて摩擦抗力が1桁以上小さいため、両者を合わせた総合抗力は、矩形アームを持つ風車が 最大となる.これは、各アームを持つ3種類の風車の出力係数(λ=3の場合)の大小関係と符合する傾向である.

【研究組織】

原 豊	代表者	鳥取大学	准教授
堀田直希	協力者	鳥取大学	修士2年
住 隆博	協力者	佐賀大学	准教授
秋元博路	協力者	大阪大学	特任教授
吉田茂雄	所内世話人	九州大学応用力学研究所	教授

【成果報告】

- (1) Naoki Horita, Yutaka Hara, Chiasa Harada, Shigeo Yoshida, Hiromichi Akimoto, Takahiro Sumi, Numerical Analysis on the Effects of Arm on the Straight Blade of a Vertical Axis Wind Turbine, Grand Renewable Energy 2018 (GRE2018) International Conference, O-We-13-2, 2018.6.17-22, Yokohama, Japan
- (2) 堀田直希, 原 豊, 吉田茂雄, 秋元博路, 住 隆博, 直線翼垂直軸風車のブレードとアームの粘性摩擦分布に関 する数値解析, 日本機械学会 2018 年度年次大会, J0510303, 2018.9.10-12, 関西大学
- (3) 堀田直希, 原 豊, 吉田茂雄, 秋元博路, 住 隆博, 直線翼垂直軸風車の異なる断面形状の水平アームに働く流 体力分布とその翼への影響に関する数値解析, 第40回風力エネルギー利用シンポジウム, pp. 397-400, 2018.12.4-5, 科学技術館
- (4) 堀田直希, 垂直軸風車特性へのアームの影響に関する数値解析, 2018 年度修士論文, 50 ページ, 2019.2.15 公 聴会, 鳥取大学

バタフライ風車の翼に作用するツイストモーメントに関する研究

鳥取大学 工学部機械物理系学科 原 豊

1. はじめに

鳥取大学を中心とする研究グループは、小形風力発電の低コスト化を目指して、過回転抑制機構を備えた直径 7 mのバタフライ風車(図1)を開発している.しかし、図1の試作機に搭載した過回転抑制機構は、翼が遠心 力で半径方向に移動して翼軸まわりに傾斜(ツイスト)する機構であり、耐久性に懸念がある.そこで空気力すな わち翼を傾斜させる作用を持つツイストモーメント(以後 TM)を利用し、翼が半径方向に移動せずに過回転抑 制動作が可能な機構を考案した.本研究では、この新しい機構における翼の TM を翼素運動量理論(以後 BEM)と 数値流体力学解析(以後 CFD)を用いて予測し、両解析の比較から BEM による予測の妥当性を検討した.

2. 方法

図2は新たに考案した空気力で翼をツイストする過回転抑制機構の模式図である.図2では模型サイズ(ロータ 直径約38 cm;3枚翼)を仮定した模式図となっており,翼は1枚のみ図示している.初期状態として翼には初期 傾斜角(η₀)を設定しており,回転数が増加すると翼軸まわりに作用する TM が大きくなって翼は傾斜し,空力ブレ ーキとなる.翼軸は2つのベアリングで回転可能に保持され,半径方向には移動しない.翼軸の端には傘歯車(小) が取付けてあり,ロータ回転中心の傘歯車(大)と結合されている.この傘歯車の組み合わせによって,図2には 図示されていない他の翼と同調した動作を可能とする.傘歯車(大)にはねじりバネ(定数:k)を取付けてあり,回 転数が減少した場合には,そのねじりバネの復元力によって翼を元の状態に戻す.本過回転抑制機構の特性を決 定する重要なパラメータには,ねじりバネ係数と初期傾斜角の他に,翼の翼軸への取付位置(xa)がある.

本研究では、図1の7mバタフライ風車に、図2の新過回転抑制機構を取付けた仮想的な風車ロータを仮定する. この仮想ロータにおいて、現在の試作機で使用している5 kW 発電機の特性に合った最適な設定値として、ねじりバネ係数: k = 38 Nm/deg, 翼取付位置: xa = 57 % c, 初期傾斜角: $\eta_0 = 2 \deg e$ BEM 計算によって見出した. 図3はその最適設定値を仮定した場合の*TM*, 傾斜角(η), ロータ回転トルク(Q), ロータ回転数(N)の風速依存である. 図3に示すように、風速26 m/s以上では、ロータ回転トルクQと回転速度Nが減少しており、高風速における過回転が抑制されることが予測されている. この BEM 予測結果の妥当性を調べるために、汎用計算ソフトウェア STAR-CCM+ ver.13.0 を使用して、URANS による CFD 解析を行った(乱流モデル:SST $k - \omega$). ただし、図1の実機は5枚翼ロータであるが、計算コストの問題から、CFD 解析の対象は、ロータ直径:D = 7 m, ロータ高さ: H = 2.7 mの三角状の翼1枚から構成される1翼ロータとした. 翼弦長はc = 242.3 mmであり、翼断面はNACA0018 である. 図3の中から、9つの風速状態(V = 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60 m/s)を選択し、これらの状態における回転数Nと翼傾斜角(ツイスト角) η を条件として与えて CFD 解析を行い、各状態における TM とロータ回転トルクQを計算した. 各状態において収束が早かったため、計算は3回転まで行い、最後の1回転のデータを解析した.



3. 主な結果と考察

図4はCFD解析の一例であり、Q値等値面(Q=5s²)と等値面上の渦度(カラー表示)によって、翼からの渦 放出を示している.図4の状態は、風速V=20m/s、傾斜角η=13.1 degであり、翼の上部と下部から放出される 渦サイズが大きく異なっている.この差によってTMが生じると推測される.図5は図4と同じ状態におけるロ ータ1回転中のTMの変化に関するBEMとCFDの比較である.図5からわかるように、TMの変動の局所ピー クについては、その大きさや位相がBEMとCFDで異なっているが、大局的には風車1回転のTMの挙動につい ては、両者は定性的に一致している.1枚翼ロータが1回転する間の平均TMの風速依存性について、BEM予想 とCFD解析の比較を図6に示す.図6より、V=10~30m/sの範囲では、平均TMはBEMよりもCFDが上回り、 V=40m/s以上では逆転する結果となっている.V=10~25m/sの範囲でBEMとCFDの差が大きいが、この範囲 では回転数が100mm前後まで大きくなっており、ロータを横切る流れ場が広がることが推測される.したがっ て、流れの広がりを考慮していないBEMと、流れの広がりが考慮されるCFDとの間で差が生じたと考えられる. それでも、TMについてのBEM予測はCFD解析とオーダー的に一致し、定性的にも良く合っていると言える.



【研究組織】

原 豊	代表者	鳥取大学	准教授
山本 柊	協力者	鳥取大学	修士2年
田川公太朗	協力者	鳥取大学	准教授
住 隆博	協力者	佐賀大学	准教授
吉田茂雄	所内世話人	九州大学応用力学研究所	教授

【成果報告】

- (1) Yutaka Hara, Kotaro Tagawa, Shigenori Saito, Keisuke Shioya, Takeshi Ono, Kenji Makino, Kazutoshi Toba, Takakazu Hirobayashi, Yousuke Tanaka, Kazuo Takashima, Susumu Sasaki, Kengo Nojima, Shigeo Yoshida, Development of a Butterfly Wind Turbine with Mechanical Over-Speed Control System, Designs, 2(2), 17, 2018.06. published, https://www.mdpi.com/2411-9660/2/2/17
- (2) 原 豊, 瀧本翔太, 三浦卓也, 田川公太朗, 吉田茂雄, バタフライ風車翼のツイストモーメントの数値解析, 日本機械学会流体工学部門講演会, OS6-6, 2018.11.29-30, 蓬峽殿(室蘭市)
- (3) 三浦卓也,原 豊,田川公太朗,吉田茂雄,傾斜する三角状の風車翼に働くツイストモーメントの数値流体力 学解析,日本機械学会中国四国学生会第49回学生員卒業研究発表講演会,612,2019.3.6,山口大学(宇部市)
- (4) 箕田充志, 原 豊, 上代良文, 「スッキリ!がってん!風力発電の本」, 146ページ, 電気書院, 2018.8.27 出版, ISBN: 978-4-485-60034-4
- (5) 特許出願:特願 2018-157631, 【発明者】原豊, 斎藤栄徳, 塩谷啓介, 【出願日】2018.8.24

集流装置付き潮流発電装置の性能に及ぼすタービンハブ比の影響

佐賀大学 海洋エネルギー研究センター 村上 天元

【要旨】

表題研究の予備段階として,以下の相反転方式潮流タービンを用いた曳航実験を実施した.具体的に は、浮体の動揺状態における発電の可能性を調査するため、双胴フロートにタービン模型を設置し、こ の浮体モデルを種々の波周期および波高の向かい波条件において係留索で曳航し、浮体挙動を計測した. 【序論】

本研究の潮流発電装置には,前後二段のプロペラ(ランナ)が内外二重回転電機子をそれぞれ駆動する"相反転方式"を採用した.本相反転方式は,二重の回転電機子が互いに逆方向にトルクを釣り合わせながら回転し,両プロペラは流れの角運動量変化が相殺されるように相反回転する.すなわち,磁界を切る速度が速くなるので,発電機径の縮小,起電圧の増加,極数の減少,回転速度の減少(キャビテーション対策に有利)を可能にする.また,前後のプロペラ間および内外の回転電機子間で回転トルクが相殺され,外部に反作用が働かないので頑強な据え付けベッドやパイルを必要としない.本研究では,この相反転発電ユニットモデルを浮体に搭載し,波浪中における発電性能を実験的に検討した.

【実験方法】

Fig. 1 は曳航装置内の模型の配置を示す.実験は、九州大学応用力学研究所の深海機器力学実験水槽 (全長 65 m,幅 5 m,水深 7.5 m)で行った.規則波の波高は、0.028 m,0.056 m,0.084 m の 3 通り、 浮体と波の出会い周期は、0.464 s,0.541 s,0.788 s の 3 通り変化させて、向かい波の条件で計測を行っ た.タービン模型は、想定実機(プロペラ直径 7 m,流速 4 m/s の場合、出力 500 kW)の1/35 スケール モデルであり、ハブ比は 0.25 である.実験では、浮体模型の左舷船首側に取り付けたモーションセンサ (MicroStone 社製 MVP-RF8-HC-500)によって角速度を計測し、Fig. 2 に示す浮体側面の光学式運動計



Fig.1 浮体式潮流発電ユニットモデルの配置

測用マーカ 2 点の高速度カメラ

(DITECT 社製 HAS-U2)による撮影お よび画像解析により,変位,速度,加 速度のデータを取得した.また,右舷 船首に設置したロードセル (Tokyo Measuring Instruments Lab.社製 TCLN-1KNA)によって張力を計測した.なお, 実験では,まず造波機で波を発生させ, その後曳航装置の走行を開始し,曳航 装置が 0.756 m/s 一定速度に達した時 点から計測を開始した.

【実験結果】

性能評価指標である出力比 P/P₀は以下の式で定義される.

 $P/P_0 = Cp/Cp_0(Vt/V_0)^3$

ここで、Cp/Cp0、Vt、V0はそれぞれ



Fig. 2 光学式運動計測用マーカ(P1 および P2)

出力係数比, Surge および Heave 方向速度の合成速度, 曳 航速度を表す. なお, Fig. 3 は従前の実験結果であり, 出 力係数比 Cp/Cp₀の Yaw 角による変化を表している. Fig. 3 の Yaw 角は本実験における浮体の Surge および Heave 方向速度の合成速度ベクトルと Surge 方向速度ベクトル とのなす角に相当する.

Fig. 4 は実験結果の一例であり,波高 H = 0.056 m 一定 で、出会い周期が T = 0.464 s, 0.541 s, 0.788 s の 3 通り の場合の出力比を比較している. T = 0.464 s および 0.541 s の場合、最高出力比は P/P₀ = 1.1~1.2 程度であり、T = 0.788 s の場合は最高出力比が P/P₀ = 1.5 と高い値を示し た.浮体の運動においては、周期 T = 0.464 s, 0.541 s, 0.788 s いずれの場合も Surge 方向と比べて Heave 方向の 運動が顕著であった.また、出会い周期 T = 0.464 s 一定 で、波高を H = 0.028 m, 0.056 m, 0.084 m の 3 通り変化 させた場合は、波高がいずれの場合も P/P₀の最大値は 1.2 程度であり、出力比に及ぼす波高の影響は殆ど見られな かった.

【成果報告】

なし

【研究組織】

研究代表者 村上 天元 佐賀大学 研究協力者 永田 修一 佐賀大学 研究協力者 今井 康貴 佐賀大学



Fig.3 Yaw 角による出力係数比の変化







Fig. 4 出力比 P/P0

第11回九大2D物質研究会

(主催:応用力学研究所(30ME-S1)、共催:日本表面真空学会九州支部) 「2D 物質の形成と構造・物性評価」

日時:平成31年2月22日(金) 13:00~17:10

場所:九大西新プラザ 大会議室 A

0. 13:00~13:10

九大院工田中悟教授

「研究会について」

1. 13:10~13:30

九州大応力研 教授 寒川 義裕 教授

「窒化物半導体成長モデリングの進展:不純物混入機構の考察」

GaN(窒化ガリウム)は、電力変換システムに実装されるパワーデバイス用の次世代半導体として注目されている。例えば、電気自動車のモーター駆動用に応用される場合、デバイスには 1200Vの耐圧が要求される。要求特性を実現するには、結晶材料中のキャリアー濃度を 10¹⁶ cm⁻³以下に制御する必要がある。一方、GaN 結晶成長に用いられる有機金属気相成長では、Ga 原料のトリメチルガリウムに炭素(C)原子が含まれているため、薄膜成長中に意図しない C 混入が生じることが知られている。n-GaN 結晶中の C 原子はアクセプターとして働くため、キャリアー濃度を 10¹⁶ cm⁻³以下に制御するには、C 不純物濃度も 10¹⁶ cm⁻³以下に制御する必要がある。本講演では、GaN 有機金属気相成長における C 混入機構を第一原理計算に基づく理論解析により考察し、C 不純物濃度の低減方法を議論する。

2. 13:30~13:50

京都大院工 船戸 充 准教授

「GaN/AIN 極薄量子井戸構造の光学特性」

分子層レベルで薄い GaN 量子井戸構造を Al (Ga) N 障壁層でサンドイッチした構造は,高い内部量 子効率を持った紫外光源として有望な構造である.加えて,偏光特性を利用した光取り出しの改善 や直線偏光光源への応用も期待される.われわれは,GaN の結晶成長において GaN 膜厚の分子層レ ベルでの自己停止機能を見出し,それに基づいて GaN/AIN 極薄量子井戸構造を作製することに成功 した.また,その光物性を効率および偏光に着目して評価している.それら結晶成長と光物性評価 について報告する.

3. 13:50~14:10

九州大院総理工 水野 清義 教授

「電界放出低速電子回折装置の開発」

表面構造の解析には表面敏感な低速電子線を用いた低速電子回折が用いられることが多く、これ までに SiC(0001)上の Si₄0₅N₃ 層をはじめ、数多くの表面構造を決定してきた. しかし、長周期構造 の場合、回折スポット間隔が狭くなり、強度測定ができなくなるという問題がある. そこで、コヒ ーレント長の長い電界放出電子線を用いることにより、回折スポットをシャープにすることを試み ている. 電界電子放出源は電解研磨により作製したタングステン針を、電界イオン顕微鏡を用いた ガスエッチングによってさらに先鋭化し、1 kV 以下の低い引出電圧を達成している.得られた電界 電子放出源を真空中を移動させて低速電子回折装置の電子源とし、シリコンや SiC 表面からの回折 パターンを観察したところ、熱電子源の場合と比較して、回折スポットの広がりを半分以下に抑え ることができるようになった.

4. 14:10~14:30

筑波大院数理物質 神田 晶申 教授

「層状超伝導体原子層膜を用いた渦糸量子状態操作」

層状物質には磁性や超伝導を示すものもあり、グラフェンと同様、劈開によって薄膜化すること ができる. 我々は最近,層状超伝導体に着目している.

超伝導体は完全導電性の他に完全反磁性を示すが,第2種超伝導体では磁場中で磁束量子Φ₀を単 位とした磁束が貫く渦糸状態が出現する.この磁束と周りの環状電流を渦糸という.渦糸はバルク の超伝導体では三角格子を組むのに対し,微小な超伝導体中では試料形状に依存した配置をとる. 我々は以前,独自の手法(微小トンネル接合法)を用いて微小なアルミニウム蒸着膜における少数 渦糸の検出と配置の制御に成功した.この際,渦糸配置間の転移が巨視的量子トンネリングによっ て起きていることを示唆する結果を得たが,異なる試料間の再現性が悪く,厳密な議論ができなか った.これは蒸着膜の表面凹凸が原因であると考えている.そこで今回,表面凹凸が原理的には存 在しない,層状超伝導体劈開膜を用いて,同様の実験を行うことを計画した.発表では,原理の説 明と初期的な実験結果を報告する.

5. 14:30~14:50

宇部高専 碇 智徳 教授

「MIESによる異種原子吸着したSiC再構成表面上の電子状態観測」

アルカリ金属及び酸素を吸着した際のSiC 再構成表面を準安定原子誘起電子分光法(MIES)と低速 電子線回折法(LEED)により観測した. MIES では、He 準安定原子をプローブとすることで表面構造を 非破壊で再表面の電子状態を抽出できる. Si 基板表面において、アルカリ金属は触媒として酸素原 子の表面への吸着を促進することが分かっている.その効果を利用して、アルカリ金属を前吸着し、 酸素を曝露した後に基板加熱を施すことで SiC 再構成表面での酸化膜形成を試みた. 同時に、この 表面上でのアルカリ金属原子による挙動を調べた.

<u>休憩 14:50~15:10</u>

6. 15:10~15:30

富士電機 藤井 氏

「金属/グラフェン/SiC界面の電気特性とその制御」

単原子層の炭素材料であるグラフェンはこれまでの基礎・応用を含めた多くの研究により、グラフェンの適応先は広がりを見せている。その一つとして半導体の接合制御が挙げられ、金属/グラフェン/n型SiC 接合では一般的な半導体の描像に従わずオーミック接触が形成されることが報告され[1]、さらに、水素インターカレーションによりショットキー接合へと劇的に変化することも示された。そこで今回、このメカニズム解明を目的に金属/グラフェン/p型SiC の界面特性を評価し、n型の場合と比較することで界面での相互作用と界面のバンド構造について考察を行った結果、グラフェン/SiC 界面におけるバッファ層を介したダイポール生成と、その消失による現象が示唆された。 今後、さらなる最適化による大きな変調が期待できる。

7. 15:30~15:50

名古屋大院工 乗松 航 准教授

「SiC 上エピタキシャル炭化物からのグラフェン成長」

我々はこれまでに、SiC に加えて炭化チタン、炭化アルミニウムの熱分解によるグラフェン成長 について報告している.本研究では、炭化ホウ素薄膜および炭化タンタル薄膜の熱分解によって成 長したグラフェンについて報告する.炭化ホウ素薄膜から得られたエピタキシャルグラフェンは、 高濃度にホウ素ドープされることがわかっている.今回は特に、格子ミスマッチの大きいグラフェ ン/B4C および B4C/SiC 界面の原子配列について詳細に報告する.一方、炭化タングステンが特異な 電子構造を持つトポロジカル半金属であることが最近報告されており、類似の構造を有する第三遷 移金属炭化物である炭化タンタルもまた、トポロジカル物質としての新規物性が期待される.炭化 タンタル表面に成長するグラフェンの構造的および電子状態を明らかにすると共に、大気中での炭 化タンタル表面酸化抑制効果について議論する.

8. 15:50~16:10

九州大 GIC Pablo Solís-Fernández 氏

「Synthesis of AB-Stacked Bilayer Graphene on Cu-Ni Films」

Physical properties of graphene greatly depend on the number of layers and on their relative orientation. In particular, a tunable band gap can be obtained in bilayer graphene (BLG) by the application of a vertical electric field. This is interesting for a variety of electronic and optoelectronic applications for which the lack of a band gap of monolayer graphene is an issue. However, an almost perfect AB-stacking of the two layers is required, with misalignments below 0.1°. This demands efficient direct synthesis methods suited for large-scale production, unlike methods relying on layer-by-layer transfer.

Here, we will introduce our recent progress on the CVD growth of BLG on Cu-Ni alloy thin films. The precise mixing of the two catalysts results effective for tuning the number of layers of the graphene, allowing to growth large-areas of BLG. Moreover, by controlling of the CVD synthesis parameters we could to increase the ratio of AB-stacked BLG from ~70 % to over ~99 %, with virtually no twisted areas. This highly-ordered BLG occurs during the CH₄ supply, in contrast to our previous work in which low AB/twist ratio BLG grows during the cooling down step of the CVD process. This new growth mechanism is expected to contribute to the realization of large-area semiconductor arrays based on AB-stacked BLG.

9. 16:10~16:30

島根大院工 影島 博之 教授

「層状物質で覆われた Cu 表面でのグラフェン成長素過程の理論検討」

表面がグラフェンや h-BN といった層状物質で覆われた場合, Cu 表面上でのグラフェンの成長は どのように影響を受けるのだろうか?我々は,成長の素過程を第一原理計算を使って調べることで, この問題について検討を行った.まず C 原子は,表面がグラフェンや h-BN で覆われていようと,グ ラフェンや h-BN 上よりも Cu 表面上に吸着しやすい.このため,グラフェン成長は Cu 表面上で起こ ることに変わりは無いと考えられる.この他,吸着サイトとその安定性を調べ,表面拡散パスを同 定,拡散の障壁高さと障壁を越える遷移確率が表面を覆う層状物質によってどのように影響を受け るのかについても計算を行った.

10. 16:30~16:50

九州大院工 田中 悟 教授

「グラフェン直接転写によるモアレ系積層グラフェンの形成」

グラフェンシートを2枚重ねた二層グラフェンは、面方位を互いに回転させることでモアレ系を 形成し、そのモアレ超格子が電子状態に大きな影響を与える.しかし、積層グラフェンの作製は精 密な回転角制御が困難であることや角度分解光電子分光(ARPES)などによる電子状態観察に必要な 大面積化が難しい.そこで、本研究では剥離が容易なSiC-CVD法によるグラフェンの真空中直接転 写および反射高速電子線回折(RHEED)によって回転角を制御した大面積の二層グラフェンを作製し た結果について報告する.

11. 16:50~17:10

東京大物性研 小森 文夫 教授

「ツイスト2層グラフェンの電子状態」

ッイスト2層グラフェンでは、ツイスト角度に依存した層間の相互作用のために、パイバンドが 大きく変化することが知られている.しかしながら、自然に形成されたツイストグラフェンや剥離 グラフェンを張り合わせた試料は面積が狭く、層間相互作用にも一様でなくがあり、角度分解光電 子分光(ARPES)による系統的な研究が困難であった.そこで、我々はグラフェン直接転写による大面 積なツイストグラフェンを用いて ARPES による研究を行っている.4度ツイストした2層グラフェ ンでは、層間相互作用によるパイバンドの変形が観測された.

> 主催者:田中 悟(九大院工) 世話人:寒川義裕(九大応研)

第11回九大 2D 物質研究会 主催:応用力学研究所,共催:日本表面真空学会九州支部 「2D 物質の形成と構造・物性評価」

平成31年2月22日(金) 13:00~20:00 於 九大西新プラザ (発表15分+質疑5分=20分) 0. 13:00~13:10 九大院工田中悟教授 「研究会について」 1. 13:10~13:30 九大応力研 教授 寒川 義裕 教授 「窒化物半導体成長モデリングの進展:不純物混入機構の考察」 2. 13:30~13:50 京大院工 船戸 充 准教授 「GaN/AIN 極薄量子井戸構造の光学特性」 3. 13:50~14:10 九大院総理工 水野 清義 教授 「電界放出低速電子回折装置の開発」 4. 14:10~14:30 筑波大院数理物質 神田 晶申 教授 「層状超伝導体原子層膜を用いた渦糸量子状態操作」 5. 14:30~14:50 宇部高専 碇 智徳 教授 「MIES による異種原子吸着した SiC 再構成表面上の電子状態観測」 <u>休憩 14:50~15:10</u>

6. 15:10~15:30 富十電機 藤井 氏 「金属/グラフェン/SiC 界面の電気特性とその制御」 7. 15:30~15:50 名古屋大院工 乗松 航 准教授 「SiC 上エピタキシャル炭化物からのグラフェン成長」 8. 15:50~16:10 九大 GIC Pablo Solis-Fernández 氏 [「]Synthesis of AB-Stacked Bilayer Graphene on Cu-Ni Films」 9. 16:10~16:30 島根大院工 影島 博之 教授 「層状物質で覆われた Cu 表面でのグラフェン成長素過程の理論検討」 10. 16:30~16:50 九大院工 田中 悟 教授 「グラフェン直接転写によるモアレ系積層グラフェンの形成」 $11, 16:50 \sim 17:10$ 東大物性研 小森 文夫 教授 「ツイスト2層グラフェンの電子状態」 $12. 17: 10 \sim 20: 00$

総合討論

高空風力発電の技術動向の検討

(株) TMIT・研究開発部・所長 首都大学東京名誉教授

藤井 裕矩

要旨

風力エネルギー発電方法の新しい手法である高空風力発電について、国際会議において成果を公表する とともに研究集会を全体会議として2回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 界的にも先進的で高度なプロジェクトであるため、種々の調査・研究発表と意見交換を行った。

1. はじめに

本研究グループは、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、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を核 として構成して種々の技術調査と研究開発を行っており、これらを検討するために全体会議を適宜開催 している。

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風力発電技術の研究開発にか かわっている。いま、九州大学応用力学研究所「新エネルギー力学」の分野の研究者である吉田教授の 参加とともに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、第7回全体会議を2018年12月6日に日本大学駿河台キャンパス「船橋共通会議室」 で開催したほか、第8回全体会議を2019年3月19日に国立極地研究所において開催する。 さらに、高空風力の最先端の研究成果が発表される国際会議においても研究検討状況を公表した。

▶ 2018 年 6 月 17-22 日 GRE2018 に参加し下記のように発表した。

Hironori A. Fujii, Hiroshi Okubo, Yusuke Maruyama, Tairo Kusagaya, Yasutake Takahashi, Takeshi Akasaka, and Hiroki Endo, "TETHERED HIGH SKY WIND ENERGY GENERATION (HSWG) PROGRESS REPORT IN 2018," a90570. Grand Renewable Energy 2018 International Conference and Exhibition、2018,June 17 (Sun) –22 (Fri), Pacifico Yokohama, Yokohama, Japan

- ▶ 2018年12月6日第7回全体会議(日本大学駿河台キャンパス)
- ▶ 2019年3月19日第8回全体会議(国立極地研究所)

◎「高空発電研究会」第7回全体会議(2018年12月6日)

「第7回高空風力発電研究会全体会議」 &「第5回東京工芸大学・風工学共同研究拠点・共同集会」 2018年12月6日(木)10時より16時30分まで、場所:日本大学駿河台キャンパス「船橋共通会議室」 10:00-10:05 趣旨説明【藤井裕矩(TMIT)】

10:05-10:20 「高空風力発電研究会」活動中間報告【藤井、丸山勇佑(前田建設)】

・JWEA内に設置する研究会(空中風力発電研究会について)

・極地研との共同研究

- ・その他 全体スケジュールなど
- *技術検討課題【司会:大久保 博志(神奈川工科大)】
- 10:20-10:35 高橋 泰岳(福井大)「第2回フィールドテストに向けて」
- 10:35-10:50 丸山「直線翼風車風洞実験とフィールドテスト(仮題)」
- 10:50-11:05 草谷 大郎(都立産技高専)「空中風力発電実験の改善技術(仮題)」
- 11:05-11:20 遠藤 大希 (TMIT) 「高空風力発電用地上発電システムの実験的研究(仮題)」
- 11:20-11:35 葉山 清輝(熊本高専)「可変カイト翼付きマルチコプター(仮題)」
- 11:35-12:50 吉田 茂雄(九大) 「九大における風力発電について(仮題)」
- 12:50-13:00 藤井「JWEAに設置する研究会について(仮題)」

〈昼食〉

*高空風力発電I 【司会:草谷】

13:30-14:30 パネル:風車浮揚技術の課題その1【高橋、草谷、岩原 誠(ザクシス)、中台 章(ジ オスポーツ)】

・プラットフォーム制御技術・プラットフォーム改善技術・発電要素技術

高橋、草谷、岩原、中台「フィールドテストの問題点と対策(仮題)」

<休息>

14:40-15:50 パネル:風車浮揚技術の課題その2【大久保、高橋、草谷、山本】都立産技高専)、丸山、藤井、赤坂剛史(金沢工業大学)、栗田篤(トライアス)、黒崎保秀(BS-Tech)】

・動力伝達技術・地上基地技術・性能/安全性等評価

大久保、高橋、赤坂「次回フィールドテストに向けて(仮題)」を中心に

<休息>

- *高空風力発電II 【司会:丸山】
- 16:00-16:30 パネル「高空風力発電:今後の展開」

以上

◎「第8回高空風力発電研究会全体会議」(2019年3月19日)

「九州大学応用力学研究所共同利用研究集会」&「第6回東京工芸大学・風工学共同研究拠点・共同集 会」&「第1回極地研空中風力発電研究会」

2019 年 3 月 19 日 (火) 10 時より 1 7 時 30 分まで、大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構 国 立極地研究所 5 階会議室 (National Institute of Polar Research)

■第一部. 空中風力発電研究会

司会【丸山(前田建設)】

- 10:00-10:15 趣旨説明【藤井裕矩(TMIT)】
- 10:15-11:30 空中風力発電研究会について
- (1). 日本風力エネルギー学会 空中風力発電研究会の設置について検討
- (2). 空中風力研究会 会則 の承認について検討
- (3). 日本風力エネルギー学会誌 空中風力発電特集号 発行について検討
- (4). 空中風力発電研究会の活動内容の検討

調査研究

- (4-1)世界と日本の空中風力発電動向調査研究の進め方 藤井、遠藤、草谷
- (4-2) 寒冷地(北海道や極地研との共同研究)における
 - 風力発電の実現に向けた調査研究の進め方 遠藤、佐藤
- (4-3) 空中風力発電用の飛翔体調査研究の進め方 草谷、高橋、赤坂、葉山
- (4-4)空中風力発電用の風車調査研究の進め方 丸山、遠藤、関
- (4-5)空中風力発電のマーケットリサーチの進め方 黒崎、遠藤

〈昼食〉

- ■第二部. 高空風力発電に関する技術研究
- 12:30-12:50 趣旨説明【藤井裕矩(TMIT)】
- (1) 高空風力発電の基礎技術【司会:】(今年度のフィールド試験や風洞実験活動を中心に)
- 12:50-13:10 話題提供:大久保博志(神工大)「神工大における風量発電について(仮題)」
- 13:10-13:30 話題提供: (九大) 「九大における風力発電について(仮題)」
- 13:30-13:50 話題提供:高橋泰岳(福井大)「福井大における風力発電について(仮題)」
- 13:50-14:10 ディスカッション: 岩原(ザクシス)、大久保(神奈川工大)

フライゲン、テザー関連、

- (2) 高空風力発電に向けた発電機の検討【司会:】
- 14:10-14:40 パネルディスカッション

Grougen: 遠藤、大久保、 fligen: 中台、大渡

- (3) 高空風力発電に向けた飛翔体の検討【司会:】
- 14:40-15:00 話題提供:葉山「空中風力発電用カイトの研究(仮題)」

15:00-15:20 パネルディスカッション

- ・プラットフォーム制御技術・プラットフォーム改善技術・発電要素技術
 高橋、赤坂、藤井、中台、遠藤、葉山
- (4) 高空風力発電に向けた風車の検討【司会:】
- 15:20-15:50 話題提供: 丸山 「風車用の翼の検討(仮題)」
- 15:50-16:10パネルディスカッション

コメンテーター 黒崎、中嶋

- (5) 高空風力発電に向けた飛行制御の検討【司会:】
- 16:10-16:30 話題提供:赤坂 「ドローンにつて(仮題)」
- (6) 航空風力発電のマーケティングリサーチ 【司会:丸山】
- 16:30-16:50 話題提供:黒崎「小型風車の市場について(仮題)」

ディスカッション、関、

- (7) まとめ 【司会:丸山(前田建設)】
- 16:50-17:20 藤井「空中風力発電研究会と今後の進め方(仮題)」

4. 研究成果報告(主なもの)

1)藤井裕矩,遠藤大希,草谷大郎,内山賢治、「テザー係留型飛行体の運動に関する基礎研究」、第49 期日本航空宇宙学会年会講演会、2E051C09、平成30年4月19-20日、東京大学。。

2) Hironori A. Fujii, Hiroshi Okubo, Yusuke Maruyama, Tairo Kusagaya, Yasutake Takahashi, Takeshi Akasaka, and Hiroki Endo, "TETHERED HIGH SKY WIND ENERGY GENERATION (HSWG) PROGRESS REPORT IN 2018," a90570. Grand Renewable Energy 2018 International Conference and Exhibition、2018,June 17 (Sun) –22 (Fri), Pacifico Yokohama, Yokohama, Japan

3)藤井裕矩、赤坂剛史,大久保博志,草谷大郎,丸山勇佑,中嶋智也,高橋泰岳,遠藤大希,中台章,菊池 雅行「高空風力発電の極地での有効活用手法の研究」、「第15回南極設営シンポジウム」2018年6月4日 (月)、国立極地研究所

4) 草谷大郎、黒田茂将、冨田匠、藤井裕矩、「一体型オールインフレータブル飛行機モデルの無人展 開から飛行まで」、第5回ブイヤント航空講演会、平成30年7月16日、東京都立産業技術高等専門学 校

5)近藤智行、形川雅文、高橋泰岳、長尾晃一朗、東浦邦弥、「高空風力発電のためのヒステリシス制 御によるカイト飛行の検証」第40回風力エネルギー利用シンポジウム、日本風力エネルギー学会、2018 年12月4-5日,科学技術館、千代田区、東京, C3-2.

6)丸山勇佑、原田恭輔、大久保博志、藤井裕矩、佐藤強、遠藤大希、岩原誠、関和市「直線翼風車を 用いた高空風力発電システムの開発—風洞実験とフィールドテスト—」第40回風力エネルギー利用シン ポジウム、日本風力エネルギー学会、2018年12月4-5日,科学技術館、千代田区、東京,C3-3. 7)大久保博志,畠山凌,小野寺未,佐藤強,藤井裕矩,丸山勇祐、「直線翼風車を用いた高空風力発 電システムの開発」日本機械学会関東支部第25期総会・講演会、18E14,2019年3月18-19日、千葉工業大

5. まとめ

学.

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 であり、世界的にも先進的な高度なプロジェクトであるため、種々の調査と研究発表と意見交換を行っ た。また、高空風力発電について研究集会を全体会議として2回開催し、国際会議において成果を公表 するとともにプロジェクトの遂行について議論を行った。

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。

磁化プラズマ中での乱流・非線形揺動のローカルトモグラフィを用いた詳細計測

九州大学 応用力学研究所 山﨑 広太郎

磁化プラズマ中で生じる乱流・非線形揺動の時空間構造をより詳細に観測し解析すること を目的として、トモグラフィを用いた揺動の二次元計測手法の開発を進めている.本研究で は、現在開発しているトモグラフィ計測システムのプラズマ中心部での分解能を更に向上さ せることを目的として、ローカルトモグラフィ導入の検討を行った.ローカルトモグラフィ 導入の検討を行うために、トモグラフィ計測により得られたデータから空間構造の特徴量を 抽出する解析手法の開発と、視線配置を変えた場合に得られる再構成画像の空間分解能の比 較を行った.トモグラフィ計測データから乱流・非線形揺動の時空間構造を定量的に評価す ることを目的として Fourier-Bessel 級数フィッティングを用いた揺動の空間分解能の大域的 な特徴量の抽出と、径方向に矩形関数を用いることによる揺動の局所的な振幅・回転速度お よびねじれの定量的な評価方法を考案した.また、これまで用いてきたトモグラフィ計測器 とほぼ同じ本数の計測視線をプラズマ周方向6点に分配し、観測領域での視線密度を向上さ せた場合におけるトモグラフィ計測の空間分解能の変化を検証した.同じ観測視線数でも周 方向に視線を分配した方がより高い空間分解能を実現できることが判明したため、ローカル トモグラフィを行うためには従来の視線と反平行な視線ではなく異なる周方向角度からの観 測視線の追加を行う方が分解能向上に効果があることを示唆する結果が得られた.

·研究目的 (i) 二次元データから空間構造の特徴量抽出 (ii) 視線密度向上によるト モグラフィ計測の空間分解能比較

本研究の目的は、ローカルトモグラフィを用いることによる磁化プラズマ乱流現象の詳細 な計測・解析である.トモグラフィを用いた乱流揺動計測の初期結果は出ていたため、計測に より得られた二次元再構成画像の時系列データから乱流揺動を解析する上で重要な物理量を 抽出する手法を確立する必要がある.また、この解析手法を用いることで、トモグラフィ視 線の改良を行った際に得られる解像度の評価を行う.そのため本研究では(1)Fourier-Bessel 級数フィッティングおよび矩形関数を用いた空間構造解析手法の開発(2)トモグラフィ計測 視線の視線密度を向上したトモグラフィ計測の実施および既存のトモグラフィ計測器との解 像度比較を行った.

(i) トモグラフィ再構成画像から空間構造の特徴を抽出する手法の開発

トモグラフィ計測により得られた再構成画像からプラズマの二次元空間構造を定量的に評価することを目的として,再構成画像にFourier-Bessel 級数をフィッティングする手法がこれまで用いられてきた.しかし Fourier-Bessel 級数は基底関数が無限個存在するため,空間構造を解析する上で必要な基底関数のみを選択する方法が必要になる.そこで Fourier-Bessel 級数フィッティングを行う前に適切な基底関数の組を選択する手法を考案した.この手法では以下の手順で基底関数を選択する.

- (1) 候補となる基底関数と再構成画像の内積を計算し,内積の値が大きい順に基底関数を 選定する.
- (2) フィッティングに用いる基底関数の数を (1) で選んだ順番に増やしていき,その都度 赤池情報量基準 (AIC) を計算する.ここで AIC はフィッティング誤差 χ²,再構成画 像のピクセル数 N とフィッティングに使用した基底関数の数 M を用いて以下のよう に定義した.

$$\xi(M) = N\log(\chi^2) + M$$

(3) AIC 最小となる位置での基底関数の組を採用する.

再構成画像の時系列データに対してフィッティン グを行う前にこの操作を行うことで,不必要な基底 関数を用いることなく空間構造の定量化を行うこ とが可能になった.再構成画像の時系列データに 対して Fourier-Bessel 級数フィッティングを行うこ とで,発光量分布の対称・非対称構造の抽出や揺動 がプラズマ断面全体で示す平均的な周方向モード 数 (m)の抽出など,揺動が示す大域的な特徴を抽 出・定量化することが可能になった.トモグラフィ により得られた揺動の二次元構造の時系列データ (図1(a1-3))から抽出した (m)の時間発展を図1(b) に示す.この手法についてまとめた論文は Review of Scientific Instruments に投稿し受理されている (成果報告 論文1).





図 1: (a1-3) トモグラフィ計測で得 られた揺動の空間構造の時間変化. (b) 平均的な周方向モード ⟨m⟩ およ び (c)m=1 揺動のねじれ ΔΘ の時間 発展

矩形関数 $h_n(r)$ を採用した基底関数 $h_n(r)\cos(m\theta)$ を用いた解析手法を考案した.この手法 では再構成画像 $\varepsilon(r,\theta)$ を $\varepsilon(r,\theta) = \sum_{m,n} (a_{m,n}\cos(m\theta) + b_{m,n}\sin(m))$ のように展開し係数 $a_{m,n}, b_{m,n}$ を用いることで,ある径方向位置 n における揺動の回転角 Θ を以下のように定義 できる

$$\Theta_{m,n} = \frac{1}{m} \arctan(\frac{b_{m,n}}{a_{m,n}}).$$
(1)

再構成画像の時系列データに対してこの展開を行えば回転角 $\Theta_{m,n}$ の時系列データが得られるので、 $\Theta_{m,n}$ の時間微分をすることで揺動の角速度 $\omega_{m,n}$ を得ることができる.また、異なる径方向位置での回転角の差を計算することで揺動が示す空間構造のねじれを定量化することが可能になる.m=1揺動の空間構造のねじれを評価したものを図1(c)に示す.この手法についてまとめた論文を Plasma Physics and Controlled Fusion に投稿するために現在執筆を進めている.

これらの手法を用いることで,磁化プラズマ中で生じる揺動の空間構造が示す大域的.局 所的な特徴をトモグラフィ計測データから定量化することが可能になった.

(ii) 視線密度を向上したトモグラフィ計測器を用いた乱流揺動計測

本研究の目的はローカルトモグラフィを用いることによりプラズマ中心部での現象をよ り詳細に観測することである.これまでの計測器では発光量の視線積分量を観測する直径 3mmのコリメータを既に5mm間隔で配置しており,これ以上コリメータの密度を高める ことは困難である.そこで,これ以上コリメータを密に配置するのではなく周方向に観測 視線を分配することで分解能を高める方針を採用し検討を行った.検討を行うために既存 のトモグラフィ計測器 (図 2(a))と同程度の視線数を周方向6点に配置することで観測領域 での視線密度を高めたトモグラフィ計測器 (図 2(b))を新たに導入し,これまで用いてきた トモグラフィ計測と同時に計測を行うことでプラズマ部分で観測される揺動の空間構造の 比較を行った.同じ時間における発光量分布の揺動成分を従来のトモグラフィと新たに導 入したトモグラフィで比較した例を図3に示す.新たに導入したトモグラフィ計測器でも これまで用いてきたトモグラフィ計測器でも同様の揺動空間構造が観測されることが確認



図 2: (左) これまで用いてきたトモグ ラフィ計測器 (右) 新たに導入したトモ グラフィ計測器の視線配置



図 3: (a) これまで用いてきたトモグラフィ計測 器を用いて得られた揺動の空間構造 (b) 新たに導 入したトモグラフィ計測器を用いて得られた揺動 の空間構造

できた.また,(i) で紹介した矩形関数を用いた画像解析法を用いて r=4cm における揺動の 周方向スペクトルを抽出したものを図4に示す.これまで用いてきたトモグラフィ計測器 でも新たに導入したトモグラフィ計測器でも同じ周方向スペクトルが得られていることか ら,これら2つのトモグラフィ計測器で同じ現象が観測されいることが分かる.また,新 たに導入したトモグラフィ計測器ではこれまで用いてきたトモグラフィ計測器に比べてプ ラズマ中心部により多くのピクセルを配置し再構成できていることから,新たに導入した トモグラフィではより詳細に揺動の空間構造を観測することが可能であることが判明した.

·考察

今回行った再構成画像の比較および周方向スペ クトルの比較により,観測視線を周方向に分配し観 測領域における視線密度を向上させることでトモ グラフィの空間分解能が向上することが判明した. この結果は,ローカルトモグラフィを行うために はこれまで用いてきた視線の反対側から反平行な 計測視線を導入するのではなく,反対側の視線と 並行にならない観測視線を導入する必要があるこ とを示唆している.

· その他成果

これまで発光量分布再構成には MLEM 法と呼ば れる反復法を用いてきた.アルゴリズムの性質上, この手法を用いてプラズマ発光分布の時系列デー タを生成するには長い計算時間が必要になる.そ こで,重み関数を用いたマトリックス法と呼ばれる 再構成手法を用いることで MLEM 法により生成し た再構成画像に近い画像を出力する方法を考案し た.この内容をまとめた論文を Plasma and Fusion Research に投稿し受理されている (成果報告 論文 2).



図 4: (a) これまで用いてきたトモ グラフィ計測で得られた r=4cm にお ける周方向スペクトル (b) 新たに導 入したトモグラフィ計測で得られた r=4cm における周方向スペクトル

また,新しいトモグラフィ計測器の導入して解像度比較実験を行った際に,直線プラズマの軸方向3箇所で同時にトモグラフィ計測を行い揺動の三次元空間構造計測も行った. 揺動

の三次元空間構造計測に関する結果についても論文投稿準備を進めている. ・成果報告 論文

- <u>K. Yamasaki</u>, A. Fujisawa, and Y. Nagashima "A proposal of Fourier-Bessel expansion with optimized ensembles of bases to analyse two dimensional image", Review of Scientific Instruments 88, 093507 (2017), doi: 10.1063/1.5000744 (査読あり)
- 2. <u>Kotaro YAMASAKI</u>, Akihide FUJISAWA, Yoshihiko NAGASHIMA, and Shigeru INAGAKI, "Fast Algorithm for Tomographic Reconstruction for Plasma Emission", Plasma and Fusion Research, **12**, 1201045 (2017), doi: 10.1585/pfr.12.1201045 (査読あり)

発表

- 1. <u>山﨑 広太郎</u>, 藤澤 彰英, 永島 芳彦, "トモグラフィによるプラズマ乱流の空間構の観 測-Fourier-Bessel 関数フィッティングを用いた画像解析-", 画像研究会, 核融合科学研 究所, 岐阜県土岐市, 2017 年 9 月 21-22 日, (口頭発表, 査読なし)
- 山崎 広太郎,藤澤 彰英,永島 芳彦,佐々木 真,稲垣 滋,糟谷 直宏,小菅 佑輔, 荒川 弘 之,山田 琢磨,金 史良,狹間田 一誠,多和 航希,元吉 喬望,松尾 士,上原 耀,"トモグ ラフィを用いた磁化プラズマ乱流の三次元空間構造観測", Plasma Conference 2017, 21P-37, 姫路商工会議所,兵庫県姫路市,2017 年 11 月 20-24 日 (ポスター発表,査読 なし)
- 山崎 広太郎,藤澤 彰英,永島 芳彦,佐々木 真,稲垣 滋,糟谷 直宏,小菅 佑輔,荒川 弘 之,山田 琢磨,金 史良, Zhang Boyu,挾間田 一誠,松尾 士,上原 耀,荒木 健,丸井 一 生,星野 智, "PANTA における構造非対称性と孤立波振動との相互作用の二次元観測" 第 35 回プラズマ・核融合学会 年会, 3p-21,大阪大学吹田キャンパス コンベンション センター,大阪府吹田市, 2018 年 12 月 3-6 日, (ポスター発表,査読なし)
- 山崎 広太郎,藤澤 彰英,永島 芳彦,佐々木 真,稲垣 滋,糟谷 直宏,小菅 佑輔,荒川 弘之,山田 琢磨,金 史良, Zhang Boyu,挾間田 一誠,松尾 士,上原 耀,荒木 健,丸井 一生,星野 智,"直線磁化プラズマにおける構造非対称性と孤立波振動の二次元観測", 日本物理学会 第74回年次大会,17aK310-6,九州大学 伊都キャンパス,福岡県福岡市, 2019年3月14-17日,(口頭発表,査読なし)