共同利用研究成果報告 第23号



令和元年度 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 23 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,2019 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。 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 2019 年度は 10 件行われ,それぞれについてまとめられ ています。2011 年度から実施されている国外在住の外国人研究者が代表者となる国際 化推進共同研究は 20 件が実施され,研究所の国際化に大いに貢献しています。この中で 国際ワークショップが6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。

> 2020年3月 九州大学応用力学研究所 所長 花田 和明

令和元年度 共同研究一覧(目次)

国際特定研究						
No.		研究課題	代表者名	所内世話人 協力者数	頁	
特定研究4						
	海洋 の t	羊マイクロプラスチック研究に関わる国際連携体制 溝築	統括責任者 磯辺 篤彦			
2019特4- 1		ドローンと機械学習を用いた海岸漂着ごみ定量化 手法の構築	鹿児島大学 加古真一郎	磯辺 篤彦 3名	1	
2019特4- 2	++	タイにおけるプラスチックマテリアルフロー分析	中央大学 佐々木 創	磯辺 篤彦 3名	3	
2019特4- 3	- ブテー フ	東南アジア海域における海洋マイクロプラスチッ ク汚染研究の拠点形成」に係る、タイ湾における 漂流プラスチックごみの現存量推定の日・タイ共 同海洋調査	東京海洋大学 荒川 久幸	磯辺 篤彦 5名	5	
2019特4- 4	Y	タイとミャンマーにおけるマイクロプラスチック の発生源検証	熊本大学 中田 晴彦	磯辺 篤彦 3名	7	
2019特4- 5		海洋マイクロプラスチック研究に関わるタイ南部 の国際連携拠点の構築	京都大学 田中 周平	磯辺 1名	9	

分野融合						
No.		研究課題	代表者名	所内世話人 協力者数	頁	
特定研究1						
	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			
2019特1-1		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	稻垣 滋 2名	11	
2019特1-2		日本周辺海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 3名	13	
2019特1-3		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 5名	15	
2019特1- 4		機械学習を用いたマイクロ波イメージング再構成 手法の研究	核融合科学研究所 土屋 隼人	稻垣 滋 3名	17	
2019特1- 5	サブテ	 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	19	
2019特1- 6	 	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 3名	21	
2019特1-7		時系列データに見られる短期的な不規則変動の分 析	兵庫県立大学 中村 知道	稻垣 滋 1名	23	
2019特1-8		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	稻垣 滋 3名	25	
2019特1- 9		分野融合研究会	九州大学 稲垣 滋	藤澤 彰英 20名	27	
2019特1-10		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 3名	30	
特定研究2						
_	マ <i>/</i> 究	ルチスケール物理現象のデータ統合・解析技術の研 開発	統括責任者 寒川 義裕 稲垣 滋 広瀬 直毅			
2019特2-1		窒化物半導体材料における形状および物性のマル チスケールデータ解析手法の構築	三重大学 秋山 亨	寒川 義裕 3名	32	
2019特2-2		東アジア縁辺海が暖候期における集中豪雨に及ぼ す影響	三重大学 万田 敦昌	広瀬 直毅 2名	34	
2019特2- 3	サブテ	結晶表面荒さと微斜面マクロステップのダイナミ クス:分子スケールから表面張力に支配されるス ケールへ	大阪電気通信大学 阿久津 典子	寒川 義裕 2名	37	
2019特2-4	 マ	機械学習を用いた相界面における相互作用の解析	学習院大学 久保山 哲二	寒川 義裕 3名	39	
2019特2- 5		沿岸海洋循環場の予測にむけた高解像度数値モデ ルとデータ統合手法の開発	海洋研究開発機構 石川 洋一	広瀬 直毅 4名	42	
2019特2- 6		直線ヘリコン波プラズマ内で誘起される電子密 度・温度の空間・位相分解計測	九州大学 冨田 健太郎	稻垣 滋 2名	45	

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		
一般研究						
2019A0- 1	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 高垣 直尚	磯辺 篤彦 3名	61		
2019A0- 2	パーセルモデルによるLSCの生成過程の解析とCPSゾン デによるその観測	防衛大学校 岩崎 杉紀	岡本 創 1名	64		
2019A0- 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	66		
2019A0- 4	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	68		
2019AO- 5	多数ソリトン波の共鳴現象に関する解析	神戸大学 中山 恵介	辻 英一 2名	70		
2019A0- 6	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	大阪府立大学 有馬 正和	中村 昌彦 4名	72		
2019AO- 7	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	76		
2019A0- 8	洋上や海中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	海洋研究開発機構 百留 忠洋	中村 昌彦 3名	78		
2019A0- 9	波浪とGNSS反射信号との対応関係の観測	京都大学 根田 昌典	市川 香 1名	79		
2019AO- 10	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	81		
2019AO- 11	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	電力中央研究所 板橋 秀一	弓本 桂也 3名	83		
2019AO- 12	高スペクトル分解ライダー技術を用いたエアロゾル高 度分布観測システムの構築	国立環境研究所 神 慶孝	弓本 桂也 3名	85		
2019AO- 13	七尾湾における水温急変に関する研究	能登の森里海研究会 大慶 則之	千手 智晴 2名	87		
2019A0- 14	等密度面モデルを用いた陸域海洋統合物質循環モデル の構築	京都大学 山敷 庸亮	木田 新一郎 3名	89		
2019AO- 15	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	91		
2019AO- 16	沿岸海洋の密度躍層における乱流混合の定量化	東京大学 堤 英輔	千手 智晴 2名	93		
2019AO- 17	九州北部地方における日射とエアロゾルの関係につい て	富山大学 青木 一真	竹村 俊彦 2名	95		
2019AO- 18	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	長崎大学 滝川 哲太郎	千手 智晴 5名	97		
2019AO- 19	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 川畑 達	千手 智晴 3名	99		
2019A0- 20	粒子散乱モデルと衛星・地上ライダ/レーダ解析技術 の高度化	気象研究所 石元 裕史	佐藤 可織 2名	102		
2019AO- 21	数値モデルによる対馬海峡の栄養塩濃度の経年変化に 関する研究	愛媛大学 森本 昭彦	広瀬 直毅 3名	104		
2019AO- 22	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	106		
2019AO- 23	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	110		
2019A0- 24	高潮・洪水時の海洋環境変動	神戸大学 林 美鶴	磯辺 篤彦 3名	112		
2019A0- 25	能動型衛星データによるエアロゾル特性と雲相の関係	長崎大学 河本 和明	岡本 1名	114		
2019A0- 26	東アジアモンスーンが励起するマルチスケール黒潮変 動	鹿児島大学 中村 啓彦	遠藤 貴洋 4名	116		
2019A0- 27	双方向粒子追跡実験による奄美海域産スジアラ卵仔魚 の産卵場推定	鹿児島大学 加古 真一郎	広瀬 直毅 3名	118		
2019A0- 28	GPM主衛星搭載2周波降水レーダとEaethCARE衛星搭載 雲レーダの相互活用のための研究	名古屋大学 高橋 暢宏	岡本 創 3名	120		

2019A0- 29	海洋モデルを用いた、河川水の変動が富山湾の海洋構 造に及ぼす影響のシミュレーション	 富山県農林水産総合技術センター 小塚 晃 	広瀬 直毅 2名	122
2019A0- 30	国際共同研究体制の構築:地球温暖化に起因する東シ ナ海の成層構造と物質循環の変化に関する研究	富山大学 張 頸	遠藤 貴洋 2名	124
2019A0- 31	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 3名	126
2019A0- 32	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 5名	128

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		
一般研究						
2019FP- 1	タングステン合金の熱負荷特性に及ぼす添加元素の影響	京都大学 徐 虬	徳永 和俊 2名	130		
2019FP- 2	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	渡邉 英雄 4名	132		
2019FP- 3	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 3名	134		
2019FP- 4	トカマクプラズマにおけるジャイロ運動論解析による 乱流輸送の定量化研究	核融合科学研究所 登田 慎一郎	糟谷 直宏 3名	136		
2019FP- 5	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	糟谷 直宏 4名	138		
2019FP- 6	金属間化合物合金における空孔型欠陥と水素原子の相 互作用に関する研究	大阪府立大学 堀 史説	大澤 一人 4名	140		
2019FP- 7	収差補正機能付き分析電子顕微鏡による構造材料の高 精度定量分析	若狭湾エネルギー研究セン ター 安永 和史	渡邉 英雄 3名	142		
2019FP- 8	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	渡邊 英雄 4名	144		
2019FP- 9	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	渡邉 英雄 4名	146		
2019FP- 10	LIFを用いた直線装置PANTAにおける高精度中性粒子お よびイオン流速計測	九州大学 寺坂 健一郎	小菅 佑輔 3名	148		
2019FP- 11	水素プラズマスパッタ法による多孔質金属膜形成過程 での水素移行挙動のモデル化	九州大学 片山 一成	渡邉 英雄 4名	150		
2019FP- 12	降着円盤と乱流輸送	九州大学 町田 真美	小菅 佑輔 1名	152		
2019FP- 13	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 大矢 恭久	渡邉 英雄 9名	154		
2019FP- 14	第一原理プラズマ輸送シミュレーションにおける揺動 分布とポテンシャル分布の計測模擬	核融合科学研究所 沼波 政倫	糟谷 直宏 3名	156		
2019FP- 15	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	九州大学 橋爪 健一	渡邉 英雄 5名	158		
2019FP- 16	磁気島とプラズマ乱流の非線形相互作用に関する研究	法政大学 西村 征也	佐々木 真 3名	160		
2019FP- 17	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 圓谷 志郎	渡邉 英雄 2名	163		
2019FP- 18	高温プラズマ曝露炉内機器表面の変質と損傷に関する 総合的研究	九州大学 吉田 直亮	渡邉 英雄 7名	165		
2019FP- 19	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	佐々木 真 2名	167		
2019FP- 20	準2次元乱流の統計力学的研究	岡山大学 小布施 祈織	小菅 佑輔 1名	169		
2019FP- 21	確率項を含むプラズマ乱流モデルの解析	富山大学 成行 泰裕	佐々木 真 2名	171		

2019FP- 22	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	173
2019FP- 23	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 2名	175
2019FP- 24	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	177
2019FP- 25	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	180
2019FP- 26	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	渡邉 英雄 3名	182
2019FP- 27	ジルコニウム合金の水素吸収に及ぼす照射損傷の影響 評価	日本核燃料開発(株) 高橋 克仁	渡邉 英雄 2名	184
2019FP- 28	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	渡邉 英雄 1名	186
2019FP- 29	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	渡邉 英雄 6名	188
2019FP- 30	窒素ドープされた多層グラフェン膜の水素吸収・貯 蔵・放出特性	名城大学 土屋 文	徳永 和俊 3名	190
2019FP- 31	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 車田 亮	徳永 和俊 5名	192
2019FP- 32	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 木村 晃彦	渡邉 英雄 1名	194

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						
	自須び	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			
2019特3- 1		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	196	
2019特3-2		次世代パワーデバイス駆動用の非接触多重伝送 ゲート駆動技術	茨城工業高等専門学校 成 慶珉	西澤 伸一 1名	198	
2019特3- 3	サブー	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	199	
2019特3- 4	アーマ	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	208	
2019特3- 5		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 2名	210	
2019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	212	
一般研究						
2019ME- 1	大気	気乱流による気圧変動の直接測定のための注射針型 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	214	
2019ME- 2	極位礎	低レイノルズ数翼の革新的空力特性向上のための基 研究	同志社大学 平田 勝哉	内田 孝紀 3名	216	
2019ME- 3	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 3名	218	
2019ME- 4	小	形風車における可変ローターの開発・研究	福岡大学 江崎 丈巳	内田 孝紀 4名	221	
2019ME- 5	波河研究	限中の浮体・船舶に関する革新的EFD技術に関する 究	広島大学 岩下 英嗣	胡 長洪 5名	224	
2019ME- 6	ヘム解	テロエピタキシャルダイヤモンドおよび酸化カリウ 半導体の走査型電子顕微鏡による結晶欠陥の構造の 明	佐賀大学 嘉数 誠	東藤 貢 9名	235	

2019ME- 7	発電細胞を模擬した積層ハイドロゲル電池の起電力に関する理論的研究	九州情報大学 荒平 高章	東藤 貢 1名	237
2019ME- 8	長島海峡周辺海域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	239
2019ME- 9	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	241
2019ME- 10	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	243
2019ME- 11	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	245
2019ME- 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	247
2019ME- 13	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	大阪大学付属病院 名井 陽	東藤 貢 1名	249
2019ME- 14	風車後流の可視化に係る基礎研究	弘前大学 本田 明弘	内田 孝紀 3名	251
2019ME- 15	垂直軸風車システムの動力利活用に向けての検証	弘前大学 久保田 健	内田 孝紀 4名	253
2019ME- 16	浮体式垂直軸風力発電システムの空力-弾性-水力-制 御連成シミュレーションによる運転性能解析	大阪府立大学 涌井 徹也	吉田 茂雄 3名	255
2019ME- 17	風速と波高変化に対する動特性同定モデルを用いた浮 体式洋上風力発電システムの予見制御	大阪府立大学 涌井 徹也	吉田 茂雄 3名	257
2019ME- 18	発電細胞を模倣した高性能積層ハイドロゲル電池の創 製と評価	九州大学 高原 淳	東藤 貢 3名	259
2019ME- 19	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	261
2019ME- 20	空中風力発電に用いる自立離着陸可能な可変カイトの 研究	熊本高等専門学校 葉山 清輝	吉田 茂雄 2名	263
2019ME- 21	バイオミティクス技術を用いたブレードの翼端形状の 空力設計	沖縄工業高等専門学校 森澤 征一郎	吉田 茂雄 2名	265
2019ME- 22	積層ハイドロゲル電池を用いた機械的エネルギー変換 システムの構築	崇城大学 中牟田 侑昌	東藤 貢 2名	267
2019ME- 23	強非線形境界要素法を用いた複数波力発電装置の挙動 解析	秋田大学 平川 知明	胡 長洪 2名	269
2019ME- 25	低コストかつ高効率の潮流発電装置の開発研究	長崎大学 経塚 雄策	胡 長洪 3名	272
2019ME- 26	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 3名	274
2019ME- 27	機械式過回転抑制機構による低コストバタフライ風車 の開発研究	鳥取大学 原豊	吉田 茂雄 3名	276

令和元年度 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	
2019A0- S1	アジア域の化学輸送モデルの現状と今 後の展開に関する研究集会	電力中央研究所 板橋 秀一	鵜野 伊津志 12件・21名	応用力学研究所	2020. 02. 21- 2020. 02. 22	278	
2019A0- S2	非線形波動研究の多様性	津田塾大学 永井 敦	辻 英一 30件・77名	応用力学研究所	2019. 10. 31- 2019. 11. 02	280	
2019A0- S3	海洋・海岸等における波動の解析モデ ルの発展	鹿児島大学 柿沼 太郎	辻 英一 6件・7名	応用力学研究所	2019. 12. 08- 2019. 12. 09	287	
2019A0- S4	海洋レーダを用いた海況監視システム の開発と応用	琉球大学 藤井 智史	市川 香 14件・86名	応用力学研究所	2019. 12. 02- 2019. 12. 03	291	
2019A0- S5	東アジア縁辺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 24件・30名	応用力学研究所	2020. 02. 02- 2020. 02. 03	295	
2019A0- S6	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 9件・67名	応用力学研究所	2019. 08. 07- 2019. 08. 08	301	
2019A0- 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・41名	応用力学研究所	2019. 12. 03- 2019. 12. 04	305	

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
2019FP- S1	第17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 26件・32名	応用力学研究所	2019. 12. 05- 2019. 12. 06	308
2019FP- 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・24名	応用力学研究所	2019. 11. 11- 2019. 11. 13	314

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
2019ME- S1	第12回 九大2D物質研究会	九州大学 田中 悟	寒川 義裕 8件・8名	コープイン京都	2020. 01. 24	318

令和元年度 若手キャリアアップ支援研究一覧(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	
若手	全球エアロゾル気候モデルにおける降水過程の高度化	九州大学 道端 拓朗	竹村 俊彦 3名	322	

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					
若手	窒化ガリウム結晶成長プロセスの理論データベース構 築とデータ科学への応用	学習院大学 草場 彰	寒川 義裕 3名	326					

ドローンと機械学習を用いた海岸漂着ごみ定量化手法の構築

鹿児島大学 加古真一郎

1. はじめに

主に沿岸付近に暮らす人々を苦しめる海岸漂着ごみは、早急に対策が必要な地球環境問題の一つ である。しかしながら現状では、効率的な漂着ごみ回収作業の策定や重点的なごみ回収海岸の選定 に資する様な海岸漂着ごみ定量化手法は確立されていない。これまで多くの研究者や地方自治体等 によって漂着ごみ量の調査が行われてきたが(例えば、Derraik, 2002)、そのほとんどは人手によ るごみ回収作業に基づいたものである。これらの手法は、多大な経済的負荷や人的資源の制約によ り高頻度の調査は困難で、人の手に頼る以上、精度の向上にも限界がある。そこで本研究は、広範 な海岸をカバーする機動性、海ごみ判定の客観性、そして誰でも利用できる汎用性をキーワード に、ドローン空撮と機械学習による画像解析を複合させ、過去の研究とは異なった観点から、海岸 漂着ごみの7割を占めるとされる(Derraik, 2002)プラスチックごみの総体積量を推定する新し い海岸漂着ごみ定量化手法を構築することを目的とした。

2. 観測機器·方法

2-1. ドローンによる海岸の三次元航空測量

本研究は、鹿児島県日置市吹上浜にて、DJI 社製のドローン 「Phantom 4」を用いて海岸の一括観測を行った。高解像度の 4K カメラを搭載したこのドローンは、付属の iPad アプリケ ーションを用いることで、指定範囲の自動飛行・撮影が可能 である。この機能を用いて海岸の撮影をした後、得られた位 置情報を用いて、空中三角測量の原理(Schenk, 2004)を元に、 三次元点群、それに面を持たせたデジタルサーフェスモデル (Digital Surface model; DSM: 海岸を立体化したモデル)、 さらにはオルソ画像(真上から補正したように幾何補正した 画像)の作成を行った。ただし、ドローンに搭載されている GPS は、様々な条件によりその精度が大きく変動することが



図1ドローン空撮から得られた海岸画像。赤丸 は対空標識を示す。地上画素寸法は5mm(上空 17mから撮影)。

知られているため(Kako et al., 2010)、ドローン空撮から得られた位置情報は、基準点(任意) から対象物の周りに 10 点程度設置した対空標識(図 1 赤丸)までの距離をトータルステーション (TS)で現地測量し、その結果を元に補正した。

2-2. 画像解析による漂着プラスチックごみの抽出

本研究では、Python 用のディープラーニングフレームワークである Keras (https://keras.io)を 使用してディープラーニングモデルを構築し、プラスチックごみの自動検出を行った。図2に本モ デルの構成図を示す。3層のニューラルネットワークからなる本モデルは、それぞれ16の隠れ層を 持つ二つの中間層と、ひとつの出力層で構成され、中間層ではReLUが、出力層では予測値のスコア (0から1の間の値)を出力するためにシグモイドが活性化関数として適用されている。損失関数と オプティマイザは、Chollet (2017)に従い、二値交差エントロピーと RMSprop をそれぞれ用いた。学 習データとしては、海岸の HSV 値画像(色相:Hue、彩度:Saturation、明度:Value of Lightness; 図2参照)を二値ベクトルデータ(0 or 1)に変換したものを使用し、そのラベリングは海岸と漂着 ごみを2色(白or黒;図2)に分けることで行った。

本研究では、この学習データを任意に一万個 ずつの訓練データと検証データに分け、ディー プラーニングモデルの構築に供した。学習過程 では、ディープラーニングモデルを 512 サンプ ルのミニバッチで 20 エポックの訓練をすると 同時に、検証データを使ってモデルの損失率と 精度(正解率)の確認を行った。最後に、オル ソ画像から抽出された漂着ごみのエッジを Canny 法 (Canny, 1986)によって検出し、それを



図2 ディープラーニングモデルの構成図

DSM に入力することで、エッジに囲まれた範囲の底面積と高さ(すなわち、体積)を推定した。

3. 結果と考察

あらかじめ体積が既知である擬似プラスチックごみを吹上浜に設置し、その体積を上述の方法で 推定した結果を表1に示す。この表が示すように、本手法が持つ誤差は4-16%程度であり、画像解 析と現地観測を組み合わせた既往研究(誤差±35%; Nakashima et al., 2012)よりも高精度である ことがわかる。ドローンによる海岸観測は自動飛行・撮影機能が充実しているため、地方自治体や NPO 等でも容易に参画できる。今後、地方自治体等と共同して、このようなドローン観測を全国各 地の海岸で実施し、その結果を我々のサーバ上に転送した後、画像解析を施すシステムを構築すれ ば、自治体などが精度良く海ごみ漂着量をモニターできるようになるだろう。加えて、今まで知る ことができなかった全国的な漂着ごみ現存量を推定することも可能となる。また、本手法を用いて プラスチックごみ堆積量の正確かつ迅速な推定が可能となれば、重点的なごみ回収海岸の選定や効 率的かつ経済的なごみ回収事業の策定に資することもできるだろう。

	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	6回目
実測値	0.87	0.87	0.69	0.89	0.89	1.04
画像解析	0.98	1.01	0.71	0.98	0.94	1.08
誤差	0. 11 (+13%)	0.14 (+16%)	0. 02 (+3%)	0.09 (+10%)	0.05 (+6%)	0. 04 (+4%)

表1 実測値と推定値の比較(単位はm³)

●研究組織

加古真一郎 鹿児島大学	
協力者	
種田哲也 鹿児島大学	
Voranop VIYAKARN	チュラロンコン大学
Suchana Apple Chavanich	チュラロンコン大学

タイにおけるプラスチックマテリアルフロー分析

中央大学 佐々木創

背景および目的

タイにおいては、中国廃棄物原料輸入規制により自国で発生した廃プラの輸出先を失ったと同時 に、日本や欧米など先進国からの輸入も急増したため、2018年中頃に廃プラスチック問題が注目を 集めた。2018年6月2日に、プラスチック袋を飲み込み死んだクジラの写真をタイ海洋沿岸資源局 (DMCR) が SNS に発表し、折しも、毎年6月5日に国連環境計画(UNEP)が主催する世界環境 デーのテーマが「Beat Plastic Pollution)」であり、廃プラスチック問題は注目され、社会問題化した。 Jambeck ら(2015) が推計した「陸上から海洋に流失した廃プラ発生量(2010 年推計) ランキング」 において、タイは年間最大で41万トンと世界で6番目に多い発生量であると指摘されている¹。銅 推計では、散乱ごみの発生量を総都市ごみ発生量の2%として一律に推計している。タイでは2018 年に野焼きや野積みなどの不適正処理量が736万t(発生総量26%)と報告されている²ことからも 過少推計の懸念がある。同様に海洋への流出率においては、低位 15%、中位 25%、高位 40% を推 定値として全世界に一様に適用している。タイの野焼きや野積みで流出するマクロ・マイクロプラ スチックの流出量を実測することは、同様の問題を抱える途上国の海洋プラ問題で重要なデータに なると考えられ、タイにおけるプラスチックマテリアルフロー分析が基礎データとして重要となる。 SATREPS 「東南アジア海域における海洋プラスチック汚染研究の拠点形成(代表:磯辺篤彦教授)」 において陸域の廃プラスチックモニタリング手法の開発を担当することとなり、現在、タイのマテ リアルフロー研究拠点の整備を進めている。本研究では、タイにおけるマテリアルフロー研究の現 状を整理し、適切なカウンターパートを関係構築することを主目的とした。

研究の方法

まず、共同研究の実績がある Sujitra 講師の協力でタイ語文献も含め先行研究の評価を実施した。 タイにおいて、廃プラスチックのマテリアルフローの先行研究は主に下記の3研究者の研究室によって主導されている。

- 1. Asst. Prof. Manit Nithitanakul, The Petroleum and Petrochemical College, Chulalongkorn University
- 2. Dr. Kavinda Gunasekara, Geoinformatics Center, Asian Institute of Technology
- 3. Asst. Prof. Chart Chiemchaisri, Faculty of Engineering, KASETSART University

次に、2020 年 1 月に日本国・環境省とタイ王国・天然資源環境省が共催した Thailand-Japan Environmental Solutions Week において、研究代表者がコーディネーターを務め、上記の 3 研究者を招聘しセッションで発表してもらった。その後、ディスカッションや意見交換を実施した。

結果および考察

タイにおける廃プラスチックのマテリアルフローの研究に実績のある3研究者の特徴、カウンターパート、SATREPS との親和性などを整理すると表1のようになる。

¹ Jambeck, J. R., R. Geyer, C. Wilcox, T. R. Siegler, M. Perryman, A. Andrady, R. Narayan, and K. L. Law (2015) , "Plastic waste inputs from land into the ocean", Science, 347, 6223, 768–771, DOI: 10.1126/science.1260352.

² http://www.pcd.go.th/public/Publications/print_report.cfm?task=pcdreport61

研究者	研究内容	主なカウンターパート	SATREPS と関連		
Manit	タイ全国のマテリアルフロー解析	Pollution Control	基礎データを収集済で		
	クイ 王国のマイ リアルクロー 所物	Department (PCD)	あり、PCD の委託先		
Kavinda	メコン川流域のプラスチック流出量	UN Environment	ドローンによる計測		
	の推計	Programme (UNEP)			
Chart	バンコク都の運河のプラスチック流	National Institute for	陸域から水域への流入		
	出量の推計	(NIES), Japan	量の実測		

表1 タイにおける廃プラスチックのマテリアルフローの研究概要

上記3研究者の研究とSATREPS との関係は、一長一短があるものの、タイの都市ごみ管理の所 管官庁である PCD から委託されてマテリアルフロー分析を実施していること、また、PCD の担当 官が研究代表者と既にコネクションがあったこと、Manit によるマテリアルフローの短所である実 測の部分を SATREPS の研究者で補完することで相互にメリットが享受できること(図1)から、 タイにおけるマテリアルフロー研究の適切なカウンターパートとして関係を構築している。なお、 他の2研究者からも SATREPS との意見交換・協力は前向きである。



図1 マテリアルフロー分析におけるトップダウンアプローチとボトムアップアプローチ

研究組織

佐々木創 中央大学 協力 Sujitra Vassanadumrongdee チュラロンコン大学 Voranop VIYAKARN チュラロンコン大学 Suchana Apple Chavanich チュラロンコン大学 タイランド湾における海洋プラスチックの採捕および検出に関する研究

東京海洋大学 荒川久幸・内田圭一

タイランド湾における海洋マイクロプラスチック(MPs)の分布を知ることを目的として、タイ における予備調査、調査に用いる採取法および検出法を検討し、さらにタイ SEAFDEC (東南アジ ア漁業開発センター)との調査の打ち合わせを行った。調査は①~③である。①タイにおける予備調 査では、ニューストンネットおよびマンタネットの比較試験、および研究者トレーニングを行った。 採取法・検出法では、②化学処理の効果の検討、③偏光を利用した MPs の検出法の検討を行った。 ①タイにおける予備調査: タイランド湾における海洋 MPs の現存量を知るためには、船舶を使用 した調査が不可欠である。タイランド湾を網羅的に調査するために、チュラルンコン大学とあわせ て調査船を有する SEAFDEC との協力体制を構築する。東京海洋大学では、2018 年に SEAFDEC か ら研究者を招聘し、日本で海洋プラスチックごみの調査手法の研修や情報交換を行った。また、2018 年と 2019 年に東京海洋大学から研究者が SEAFDEC の調査船 (SEAFDEC2) による海洋プラスチ ックごみ調査の航海に同行し、MPs のサンプリングや漂流ごみの目視調査の指導と情報交換を行っ た。この取り組みを通じて、SEAFDECと東京海洋大学はタイランド湾での MPs のサンプリング手 法についてニューストンネットとマンタネットの比較調査を行った。この結果は、現在解析中であ るが、現場での本調査の実施時までに、最適なサンプリングネットを決定する予定である。また、 あわせて目視観測による漂流プラスチックごみの調査を実施し、マイクロ化する前の漂流プラスチ ックの現存量推定も進める。



SEAFDEC が所有する SEAFDEC2





マンタネット(左)とニューストンネット(右)による MPs のサンプリング比較試験

漂流ごみの目視観測のトレーニング(2019年12月)





②化学処理の効果の検討: MPs 調査では、その分析法が規格化されていない点が問題点として挙 げられる。この分析法の例として、方法(1); MPs の含まれたネットサンプルを蒸留水で希釈しな がら、実態顕微鏡による目視によって捕集する方法(例えば Isobe et al. 2014)、方法(2); 夾雑物を 過酸化水素により除去し、密度分離後にフィルターに捕集する方法(Masura et al. 2015) などがある。 分析法の違いがどの程度結果に影響を及ぼすのかを調べるために、方法(1)と方法(2)の結果を 比較した。

ニューストンネットで採集した MPs 数は、5mm 以上のマクロプラスチックに比べて多かった。 この傾向は、同海域の既往の調査結果とよく一致していた。最大の MPs 数は他の海域に比べ非常に 多かったが、流れ藻などに MPs が絡まっていた可能性が示唆されていることや、実際のサンプル中 の生物量が多かったことなどから、本サンプルにおいて流れ藻の影響があったと考えられた。また その種類はポリエチレン (PE)、ポリプロピレン (PP)、ポリスチレン (PS) がほとんどを占めてい た。また、1 粒子ではあるものの、NaI 水溶液による密度分離により、ポリエチレンテレフタラート (PET) も検出された。

これらのことから、沿岸域で得たニューストンネットサンプルに関しては、2 日間以上のフェントン反応により酸化処理を進めることで、夾雑物を効果的に除去できることがわかった。また方法 (1)を用いた場合、同海域のサンプルの分析にかかる時間はおよそ1ヶ月である。方法 (2)の場合、測定までの時間は、1 サンプルあたり 4 日から 1 週間程度であったことから、並行して作業進めることができれば、作業時間の大幅な短縮につながると考えられた。

③偏光を利用したプラスチックの検出法: 近年、MPs の生物や環境への影響が懸念されており、 早急な実態把握が必要である。しかし、現状の調査手法は、ニューストンネット (目合; 330 µm) を使用して MPs を捕集するため、採取時の粒子の損壊やネットの目合以下の粒子を捕集できないな どの問題点を抱えている。本研究では、非接触で 330 µm 以下の MPs を観測する手法の開発を目的 として、MPs の後方散乱の偏光特性を Mueller Matrix (4x4 要素) 画像(以下 MM 画像)によって調 べた。作製した後方散乱偏光特性測定装置は、He-Ne レーザー(無偏光)、反射鏡、第一偏光素子 (PSG)、第二偏光素子 (PSA) (ともに水平、垂直、±45°、時計回り、反時計回りおよび無 偏光) と CCD カメラ等から成る。MPs 懸濁液に入射する光点問囲の偏光散乱像を撮影し、MM 画 像要素を算出した。試料として、ポリスチレン (PS) 標準粒子(球形、粒径 100 nm~10 µm) 粒 子を用い、体積濃度は $1.0 \times 10^{-1}\%$ ~ $3.3 \times 10^{-3}\%$ とした。

MM 画像の要素 M12 は、小粒径で大きく、大粒径で小さかった。濃度が変化しても光強度の分布 は変らなかった。また、M22 を無偏光 M11 で基準化した、要素 m22 は粒子濃度が高いほど小さく、 偏光解消度が大きい事が示された。すなわち、粒子サイズは M12 の強度で、粒子濃度は基準化され た m22 で検出できると考えられる。今後は非球形粒子について測定する予定である。

2020 年1月29日、タイ SEAFDEC において2020 年度-2024 年度の SATREPS における海域調査の打ち合わせを行った。今後の東京海洋大学海鷹丸を使った調査や SEAFDEC の調査船 SEAFDEC2 を使った調査の期間や申請などについて議論した。

●研究組織

荒川久幸 内田圭一 東海 正

都市淡水域における底泥・魚類中マイクロプラスチックの濃度分布と起源推定 —江津湖と大濠公園池を例に—

熊本大学大学院先端科学研究部 中田 晴彦

【緒言】

近年、マイクロプラスチック(MP)による環境汚染への関心が高まっている。粒径 5 mm 以下のプラ スチック片と定義される MP は、主に流出したプラスチックごみ(以後プラごみ)の微細化によって発 生する。プラスチックごみの大量流出が今後も維持された場合、2066 年には太平洋表層中の MP は、海 洋生物への影響が懸念される 1,000 mg/m³に達すると試算され³⁾、早急な対策が求められている。しか しながら、海洋を対象とした調査は多い一方で、プラごみの発生源に近い都市淡水域を調査した例は少 ない。調査を通じて発生源や流入経路に関する知見が得られれば、より効率的な汚染対策が可能になる。

そこで本研究は、都市淡水域である江津湖(熊本市)と大濠公園池(福岡市)を対象に底質および魚 類中の MP の汚染状況を調査し、MP 発生源を明らかにすることを目的とした。

【試料と方法】

2017年7月~2019年11月にかけて、熊本市内の江津湖(上江津湖と下江津湖)とその流入・流出河 川(n=26)および福岡市内の大濠公園池(n=10)から底質試料を採取した。底質約50g(湿重)をオー ブンで乾燥後、目開き100µmのふるいに通した。得られた粒径100µm以上の底質約10gに30%過酸 化水素溶液または10%水酸化カリウム溶液を添加し、2~3日静置して有機物の分解を行った。その後、 試料を60%ヨウ化ナトリウム水溶液で重液分離を行い、浮遊粒子を濾過して乾燥後、実体顕微鏡(LEICA S9、ライカ製)と極微細ピンセットを用いてプラスチックと思われる粒子を手選別により分離した。

また、2019年10~11月に江津湖でカムルチー8匹、オオクチバス10匹、ナイルティラピア9匹の計 27匹を採取した。各魚類の胃を摘出し、切開して胃内容物を取り出した。胃内容物に 30%過酸化水素 溶液を添加し、50℃条件下でオーブン内に3~5日間静置した。得られた残渣は底質と類似の処理を行 った。MPの定性定量は、回収した全ての粒子を対象に、フーリエ変換赤外分光光度計(FT-IR、IR Affinity 1S島津製作所製)を用いて行った。成分同定は一致率 75%を基準とした。また、一部の MP 試料は有 機溶媒で抽出後 GC-MS に導入し、含有化学物質の定性を試みた。

【結果と考察】

分析に供した江津湖と大濠公園池の底質 36 試料のうち 32 試料から MP が検出され、この種の汚染が 広域拡散している様子が示された(Fig. 1)。ボート乗り場の 2 地点(後述)を除いた上江津湖底質中の MP 濃度(中央値)は 1,034 個/kg(乾重あたり)であり、全般に湖の東側で高く北側と南側で低い様子 が窺えた。一方、下江津湖の底質中 MP 濃度(中央値)は 725 個/kgで、濃度範囲は 0~1,269 個/kgで あった。おおむね北側で高く、南側で低い傾向が示され、上江津湖から湖水とともに MP の流入が示唆 された。下江津湖は上江津湖より全般にやや濃度が低く、この理由として周辺河川からのプラスチック 流入が少ないことが考えられた。河川底質中の濃度範囲は流入河川では 21~25 個/kg、流出河川でも 27 ~228 個/kg と江津湖内部に比べて明らかに低値だった。

上江津湖の底質中 MP の材質はポリエチレン(PE)が 50%と最も多く、次いでポリプロピレン(PP, 13%)、 ポリエチレンテレフタラート (PET, 12%)の順であった (*n*=134)。下江津湖も類似の結果が得られ、PE (58%)、PP (15%)、ポリ酢酸ビニル (PVA, 7%)、PET (5%)の順に高い割合を示した。その一方で流 入河川においては PE や PP は検出されず、比重 1.0 以上のポリメタクリル酸メチル (PMMA,比重:1.18 ~1.19)やエポキシ樹脂 (EPO,比重:1.11~1.23)が検出された。その理由として、湖と比べ水流の速 い河川では比重の小さな PE・PP は速やかに湖へ移動するのに対し、比重の大きな PMMA・EPO は相対 的に移動性が低いため河川底質へ沈降する傾向があるためと考えられた。 ボート乗り場の1地点(後述)を除いた大濠公園池の底質中の MP 濃度は、中央値で 61 個/kg、濃度 範囲は 0~191 個/kg であった。これは江津湖の底質に比べ 1 桁以上低い値であり、同池に設置された 凝集濾過式浄水施設がプラごみや MP の回収に寄与したためと考えられた。

一方、他の地点と異なる特徴を示した底質も確認された。上江津湖のボート乗り場直下で得られた底

質から平均36,086 個/kgの高濃度のMPが検出された。 プラスチックの組成は他地点と異なり PMMA が 22% と多く、次いで PE (17%)、PET (12%)、ポリアミド (PA,11%)の順であった。大濠公園池のボート乗り場 直下で採取された底質 1 試料においても 2,794 個/kg と他地点より濃度が 1 桁以上高く、その組成は上述の PMMA (27%) と同じアクリル系樹脂のポリメタクリ ル酸ブチル (PBMA,18%) が支配的であった。ボート 乗り場周辺の底質から高濃度の MP が検出された点は、 江津湖と大濠公園池で共通しており、また両地点とも



塗料にも利用されるアクリル系樹脂が多く確認されていることから、娯楽用ボートが特異な発生源になっていることが考えられた。そこで江津湖および大濠公園池で採取したボート塗料の断片を FT-IR で分析したところ、ともに底質中 MP と同じ PMMA であることが判明した。以上の結果は、ボート塗料が 紫外線劣化や物理的破損によって剥がれ底質に移行している可能性を示しており、類似の結果は韓国沿岸の環境調査でも報告されている²⁾。またボート塗料からは添加剤のフタル酸ジイソオクチル(CAS#: 27554-26-3)が検出されたが、塗料由来と思われる MP 片からは不検出であり、当該物質の水環境中への流出の可能性が示された。

江津湖の魚類胃内容物を調べたところ、MP が検出された (Fig. 2)。検出頻度はナイルティラピアが9

検体中8検体(89%)と最も高く、次いでオオクチバス が10検体中2検体(20%)であり、カムルチー8検体か らは不検出であった。オオクチバスの胃内容物中MPの 濃度範囲は1~3個/検体であり、ナイルティラピアにつ いては濃度の中央値が11個/検体、濃度範囲が1~38個 /検体であった。また、ナイルティラピアから検出された プラスチックの成分組成はPET(37%)、PE(29%)、PP (12%)の順に多かった。ナイルティラピアの方が検出 頻度と濃度の中央値がともに高く、その理由としてオオ クチバスやカムルチーが魚食性であるのに対し、ナイ ルティラピアはデトリタスや水草等 MP が付着しやす



い餌を食べる雑食性であるためと考えられた。また、ナイルティラピアの胃内容物中のプラスチック組成は、採取地点である上江津湖および流出河川の底質中のものと比べ、PE や PET といった成分が共通するが成分比は異なっていた。よって、ナイルティラピアの MP 摂食経路は、底質中のデトリタスよりも水草や浮遊物からの寄与が大きいと考えられた。

以上の結果から、江津湖および大濠公園池における MP 汚染は進行していると判明した。またボート 塗料が MP 発生へ寄与しているとみられ、塗料流出による環境負荷を今後評価していくべきである。一 方で、環境中から魚類への MP 移行の可能性は示唆されたが流入源の特定には至っておらず、今後は生 物影響の評価も含めて更なる調査が必要であろう。

【参考文献】1) Isobe A., et al. (2019) Nat. Commun. 10, 417. 2) Young K. S. et al. (2019) Environ. Sci. Technol. 48, 9014-9021.

【研究組織】

研究代表者 熊本大学大学院先端科学研究部(理) 協力者 熊本大学大学院自然科学研究部(理)

准教授	中田	晴彦
大学院生	恵良	要一

海洋マイクロプラスチック研究に関わるタイ南部の国際連携拠点の構築

京都大学 田中周平

背景および目的

私たちの身の回りにはプラスチック製品があふれている。毒性が疑われる化学物質の多くは疎水 性であり、環境中の有機物質などを吸着し移動する。従来、Natural Organic Matter が微量化学物質の 輸送体として注目されていたが、代表者は水環境中のマイクロプラスチックがそれに代わると着眼 してきた。既存研究の大部分は 300 µm 以上を対象に分析していたが、より微小なマイクロプラス チックの分析に成功し、底質中にマイクロファイバーやタイヤ屑などが蓄積していることが分かっ てきた。大阪湾や琵琶湖のマイクロプラスチックの表面には、肺がんの要因のひとつである塩素化 アントラセンが水中と比較し 600 万倍濃縮されていることが示された。サンゴは数 µm レベルの極 微小なマイクロプラスチックを取り込んでいる。SATREPS「東南アジア海域における海洋プラスチ ック汚染研究の拠点形成(代表:磯辺篤彦教授)」においてサンゴ礁を担当することとなり、現在、 タイ南部における研究拠点の整備を進めている。本研究では、サンゴ礁周辺におけるマクロプラス

研究の方法

タイ南部の Walailak 大学の Jira Kongpran 博士と協力し、Walailak 大内でのマイクロプラスチック 分析拠点の整備を進めた。2019 年 9 月に Walailak 大学を訪問し、京都大学地球環境学堂と Walailak 大学 Environmental Health 学部との間で、学生交流協定を締結した。学生交流協定締結時の写真を図 1 に示す。



図1 京都大学地球環境学堂とWalailak 大学 Environmental Health 学部との学生交流協定

その後、Wlailak 大内の化学物質分析のラボを訪問し、マイクロプラスチック分析に必要な消耗品 をピックアップした。化学物質分析のラボでの写真を図2に示す。本助成を用いて、目開き 100 µm のプランクトンネット、有機物分解、比重分離のための試薬類などを購入し、タイ南部におけるマ イクロプラスチック分析拠点の準備を進めた。



図2 Walailak 大学 Environmental Health 学部の化学物質分析のラボの様子

結果および考察

タイ王国南部サムイ島周辺のサンゴ礁の周りの海水中のマイクロプラスチックを図3に示す。10 µm メッシュのステンレスろ紙上に、多くのマイクロプラスチックが検出された。一部の海域では、 100 µm よりも大きなマイクロプラスチックが個数密度 5,000 個/m³で検出され、高濃度に汚染され ていることが示唆された。



図3 タイ王国サムイ島周辺のマイクロプラスチック

●研究組織 田中周平 Jira Kongpran

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。今回、開発を行っている Dual comb 方式を用いたドップラー反射計システムを用 いた初期実験を行いデータが得られたので、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。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、観測可能な空間点 を増大することができかつ省コスト化も図れる新しいシステム(Dual Comb Doppler 反射計)の開発とプラズマ実験 への適用を行った。図1に示すように、発振周波数をわずかに(10MHz)ずらして、2 つの周波数コムを動作させると、 IF 周波数列は、n x 10 MHz の周波数コムとなる(n は整数)ため、従来の IF 周波数帯域(>10 GHz)からの大幅な 低減ができ、かつ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、省コスト化が図れる。



図1: Dual comb Doppler 反射計の基本概念。10MHz 差をつけた二つの発振器を基準に作成した周 波数コム信号を混合する(左図)と、ミキシングした IF 周波数は、右図のように 10MHz の整 数倍となって表れる。

この新計測システムをプラズマ計測に導入する前に、プラズマ回転を模擬した装置(図 2)を用いて、回転速度計測試験を行った。回転円筒(直径 500mm, グリッド間隔 10mm)の回転速度を 500rpm から 3,000rpmまで変化させたときの反射波のドップラーシフト周波数は図3のようになり、 $f_{\rm D} = \frac{kV}{2\pi} = \frac{kr\omega}{2\pi}$ の関係を満たしていることが確かめられた。さらに、このシステムを LHD 装置に適用し、図4のようにイオン反磁性方向にプラズマが回転していることを示すようなデータを取得することができた。



図2:回転速度計測試験のための装置



図3:回転速度を変えた時のドップラーシフト周波 数の変化。線形に比例していることがわかる。

3. 論文と学会発表

次の学会にて発表を行った。

- <u>T. Tokuzawa</u>, S. Inagaki, A. Ejiri, H. Idei, R. Imazawa, N. Oyama, M. Yoshida, K. Tanaka1, H. Tsuchiya, K. Ida, K. Y. Watanabe, and H. Yamada "Dual-Comb Microwave Doppler Reflectometer System in LHD and Feasibility Study for a JT-60SA Doppler Reflectometer" :14th International Reflectometry Workshop (IRW14) 22nd – 24th May 2019@ Swiss Plasma Center of the Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland (出 席・口頭発表)
- <u>T. Tokuzawa</u>, M. Kobayashi, S. Masuzaki, S. Inagaki, K. Ida, H. Tsuchiya, H. Yamada, K. Y. Watanabe, K. Tanaka, I. Yamada, and LHD Experiment Group, "Observation of turbulence response from attached to detached phases in LHD" 27th ITPA meeting of TG SOL and divertor physics @IPP, Garching, Germany, 02.07.-05.07.2019(出席、口頭発表)



図4:27GHzRF信号の反射信号の周波数スペクトル。イオン反磁性方向へのシフトが観測された。

- 3. <u>T. Tokuzawa</u>, S. Inagaki, H. Idei, A. Ejiri, R. Imazawa, N. Oyama, M. Yoshida, H. Tsuchiya, and K. Tanaka, "Feasibility study of Doppler Reflectometry", 8th JT-60SA Research Coordination Meeting (RCM-8) 24nd – 26th June 2019 @ QST, Naka, Japan (出席・口頭発表)
- 4. <u>T. Tokuzawa</u>, K. Tanaka, H. Yamada, S. Inagaki, K. Ida, M. Nakata, T. Tsujimura, M. Yoshinuma, K. Y. Watanabe, H. Tsuchiya, A. Ejiri, and LHD Experiment Group, "STUDY OF ISOTOPE EFFECTS FROM THE VIEWPOINT OF TURBULENCE OBSERVATION IN LHD", 22nd International Stellarator & Heliotron Workshop 2019, @Memorial Union, University of Wisconsin, Madison, WI, USA, Sep. 23 27, 2019 (出席・招待講演)
- 5. <u>**T. Tokuzawa**</u>, M. Kobayashi, S. Masuzaki, S. Inagaki, K. Ida, H. Tsuchiya, H. Yamada, K. Y. Watanabe, K. Tanaka, I. Yamada, and LHD Experiment Group, "Observation of turbulence response in detach transition and similarity to H-mode transition in LHD", 17th International Workshop on H-mode Physics and Transport Barriers @Shanghai, China @9-11 October, 2019 (出席・ポスター発表)
- 6. <u>T. Tokuzawa</u>, K. Tanaka, H. Yamada, S. Inagaki, K. Ida, M. Nakata, T. Tsujimura, M. Yoshinuma, K. Y. Watanabe, H. Tsuchiya, A. Ejiri, and LHD Experiment Group,「プラズマ乱流計測から見た水素同位体効果検証実験」,日本物理学会 2019 年秋季大会 [物性]@岐阜大学 2019.9.10-13 (招待講演)

日本周辺海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た。本稿では、乱流構造の時間 変化を記述した前年度の結果に加え、CTD・SADCP データを用いて、成層構造や流速構造 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・塩分・圧力である。



図 1: 観測点

流速データは,長崎丸付属の Shipboard ADCP (75kHz)による観測結果を用いた。

3. 結果

本稿では、昨年度の結果に示された 21~5 時の 200~300 dBar 付近にみられる乱流エネ ルギー散逸率 ϵ [W/kg]の極大層に注目する(図 2(a)の黒楕円)。図 2(b)は、成層状態の安定 度の指標となるリチャードソン数 $Ri = N^2/(\partial u/\partial z)^2$ の時系列を示す。ここで、 $N[s^{-1}]$ はブラン ト・バイサラ振動数である。Riの時系列をみると、 ϵ 極大層と同じ水深域において、その数時 間前に Riの極小域が存在していることがわかる。すなわち、この水深域において、成層が不 安定化した後に、乱流混合が発生したことが示唆される。図 2(c)は、水平流速の鉛直シア du/dzの時系列図である。まず、鉛直シアの上向き位相がみられることから、エネルギーは下 向きに伝播していたと考えられる。また、位相は慣性周期(約19.5時間)で変化している。 以上のことから定性的に考察すると、海上風によって励起された近慣性重力波が下向きに 伝播して、成層の不安定化とそれに伴う乱流混合に寄与していることが示唆される。今後は、 他のデータも考慮し、さらに定量的な評価を行う予定である。









図 2: (a)乱流エネルギー散逸率 ε [W/kg], (b)リチャードソン数 *Ri*, (c)水平流速の鉛直シア *du/dz* それぞれの時系列。

4. 成果報告

Akie Sakai, Tomoharu Senjyu, Kosuke Mori and Takahiro Endoh: Observation of vertically propagating near-inertial internal waves into the Japan Sea proper water. Ocean Sciences Meeting, 20 February 2020.

5. 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

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(コンピューテッド・ト モグラフィー)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。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。これまでの研究で、ベクトル CT 技術を用いることで、プラズマ流れの2 次元流れ観測が可能であることがシミュレーションにより確認された。本年度は、これ を踏まえて、数値シミュレーションからの乱流応力評価と、九州大学プラズマ発生装置 PANTA において計測原理実証を行った。

方法と検討結果

磁化プラズマ中の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 CT による乱流応力評価と、(ii)レーザー誘起蛍光法による平均 流れベクトル測定実験を行った。

(i) 数値シミュレーション結果を用いた応力評価

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、668.6138 nmを中心波 長として10 GHz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。得られた速度分 布から乱流応力の評価を行い、周方向流れに対する乱流応力を得た。この結果は、数値 シミュレーション結果から直接求めた乱流応力と比較した値と僅かな違いがあるがよ く一致した。僅かな違いは、半径方向位置の測定間隔や波長掃引間隔による影響である と考えられる。

本研究結果を元に2019年度第36回プラズマ核融合学会において口頭発表を行った。

(ii) レーザー誘起蛍光法による平均流れベクトル測定実験

レーザー誘起蛍光法を用いた平均流れベクトルの観測は、S/N改善の為、ベクトルト モグラフィーの技術を適用して行った。レーザーは、直径約10cmの円柱プラズマを磁 場に垂直に貫くように設置した。レーザー波長は、アルゴンイオンの3d⁴F₇₂準位から 4p⁴D_{5/2} 準位への励起の際の吸収波長である、668.6138 nmから±5 GH z とした。通常 のレーザー誘起蛍光法では、プラズマ中の局所的な蛍光を測定するが、本研究ではレー ザーのプラズマを貫く線に沿った蛍光をまとめて集光する(線積分)ことにより、S/N の改善を目指した。442.6 nmの蛍光を直径150cmのレンズ 2 枚により、1/2以下に縮小 後、光ファイバにより集光・伝送後、光電子増倍管により電流増幅・電圧変換した。そ の後、ロックインアンプにより予め強度変調したレーザーの200 kHzと同期した散乱光 強度を検出した。

得られた結果として、周方向流れの平均分布を得るとともに、径方向流れを評価した。 周方向流れの平均分布は、別途計測した内側(半径3cm以下)の局所流れ計測の分布とほ ぼ一致した。また線積分データを用いることで、S/Nが改善し、これまでできなかった プラズマ周辺(半径4-5 cm)の周方向流れも観測できた。径方向流れにおいては、磁化プ ラズマ条件であるため、ほぼ0の結果となり、予想と一致した。

今後はさらなるノイズ低減を行い、線積分データからの局所的な流れベクトル観測を 目指す。次の改善案が考えられる。(1)光ファイバーとレンズ系の最適化による集光光 学系の改良、(2)データ収集系の最適化による長時間流れ測定、(3)圧縮センシング解析 の適用。以上により、詳細な局所流れ構造測定を目指す。

成果報告:

第36回プラズマ・核融合学会年会、ロ頭発表、01Ap07 「ベクトルトモグラフィーによるプラズマ乱流中の準秩序構造観測」 荒川弘之,佐々木真,稲垣滋,藤澤彰英,寺坂健一郎,山崎広太郎 機械学習を用いたマイクロ波イメージング再構成手法の研究

核融合科学研究所 土屋 隼人

<u>1.</u>要旨

機械学習で、マイクロ波測定で得られた2次元の複素振幅分布からプラズマ中の カットオフ面を模した反射面の凹凸を予測する手法を紹介する。荒い複素振幅分布から、詳 細な分布図を得るには光路を計算し逆問題を解く必要があるが、その計算コストが大きいた めに動画の解析には向いていない。一方、様々なシンセティック画像を多数用意できれば、 適切なネットワークを用いることで高速に像を再構成することができることが示された。

2. 序論

プラズマの画像診断は研究に頻繁に活用されるようになった。ガスパフイメージン グなどの可視光測定には、市販の CCD カメラまたはその高速カメラを使用して簡単に実装で きるという利点がある。ただし、よく知られているように、取得された画像には線積分効果 が含まれるため、厳密な空間解像度での再構成は容易ではない。一方、反射計などのマイク ロ波/ミリ波診断には、反射面を容易に同定できるという利点があるが、波長の関係上、空間 分解能とイメージングアンテナの数は一般的に制限されてしまう。イメージングアンテナ数 以上の解像度を実現するために、フォーカス光学システムを使用せずに測定する複素振幅か らの再構成法を研究している[1]。

<u>3. レンズレス2次元反射計</u>

想定するマイクロ波イメージングとして、次のような系を考える。プラズマに向けて一 つの送信アンテナからマイクロ波(平面波または球面波)を送り、その反射波を1平面上の複数 アンテナで受信する。アンテナとプラズマの間にあえて光学系を設けず、受信された複数個の複 素信号(振幅と位相)からカットオフ面の形状を再構成計算でもとめることで、広範囲かつ用意 したアンテナ数以上の画素をもつ画像の取得を試みる。カットオフ面の形状を f とし、観測でき た反射波の分布をgとするとf とgは光路に関わる伝搬行列Hにより下記のように表される。



Fig.1 CNNの概念図。本研究のネットワークの構成は、畳み込み層とプーリング層をそれぞれ2層と全結合層3層とした

$\mathbf{H} \mathbf{f} = \mathbf{g} \quad (1)$

プラズマの反射計で使える電磁波はいわゆるマイクロ波領域で、波長が mm から cm のオーダーだる。そのためアンテナの小型化は原理的に不可能であるため、設置できるアンテナ数は限られる。 つまり g の要素数は観測アンテナの数であるので、g の要素数は f の要素数の方が大きいことが 通常である。その場合、行列 H の逆行列は存在しないので、適当な正則化を施して逆問題を解く ことになるが、1 つの画像に対して多くの計算時間が必要になるため、動画 (アニメーション) の分析は現実的ではない。そこで、 $f \ge g$ は ある行列 H'による写像の関係になる。あらかじ め $f \ge g$ の組を予備実験もしくは数値計算で数多く用意できれば、上式(1)の H'を学習するこ とで、高速で再構成像 fを予測できるようになる。ここで観測量 g が複素数であることに着 目しつつ、畳み込みニューラルネットワーク(CNN: Convolutional Neural Network, Fig.1)に応用 を試みた。

マイクロ波伝搬を計算することで入力画像と教師画像の組を 15000 組用意し、その うちランダムに 5000 組を使い学習させた。教師画像は画面上で縦横方向にそれぞれモード数 が 0-5 の波面(f)を想定し、それより反射したマイクロ波複素振幅分布に測定誤差を加えたも のを入力画像(g)とした。通常 CNN の入力画像には単色画像の他にカラー画像として 3 チャ ンネルないし4 チャンネルの画像を選ぶことができるが、今回の入力画像は複素振幅画像で あるので、「実数部・虚数部」、「絶対値」、「絶対値・位相角」というチャンネル構成を試 みた。図2は入力画像を「実数部・虚数部」の 2 チャンネル構成の場合の再構成画像(予測

画像)である。「絶対値・位相角」の チャンネル構成では学習が収束しに くいが、「実数部・虚数部」の2チャ ンネル構成が一番よく教師画像と予 測画像が一致する傾向にあるが、「絶 対値」のみの1チャンネル構成での予 測画像と教師画像のエラー値におお きな差はないことが分かった。



反射波の複素振幅分布





Fig.2 学習がよく収束した場合の教師画像の予測画像の例(入力画像は絶対値のみ表示されている)

学会発表等

- 1. イノベーションジャパン 2019, 番号 361,「結像光学系のないマイクロ波カメラ」 土屋隼人
- 2. 第36回 プラズマ・核融合学会 年会,01Ap06「複素振幅計測によるマイクロ波イメージング 計測手法の開発」土屋隼人 他
- 3. マイクロ波ウェーブ展 2019, 「マイクロ波イメージング研究グループ」共同出展
- The 28th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research, P1-45 "Study of reconstruction of microwave reflectometry image by machine learning", H.Tsuchiya et.al.,

参考文献

*1. Hayato TSUCHIYA, Naofumi IWAMA, Soichiro YAMAGUCHI, Ryota TAKENAKA, Mayuko KOGA, Plasma and Fusion Research Volume14, 3402146 (2019)

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

サブテーマ代表者:高知工業高等専門学校ソーシャルデザイン工学科 谷澤俊弘

1 研究目的

超高温のプラズマを安定して閉じ込めるためには、プラズマが生み出す膨大な時系列データを解析し、その物理的性質を 理解しなければならない。本研究は、磁場によって閉じ込められたプラズマ中のドリフト波乱流が生み出す大容量時系列 データを、統計モデル化し、さらにそれをネットワークとして視覚化することによって、膨大な多次元時系列データから物 理的情報を抽出し、直観的に理解する新しい手法を開発することを目的とする。解析対象は、九州大学応用力学研究所の直 線磁化プラズマ実験装置(PANTA)内の周方向 64 チャンネルプローブアレーによって計測されたプラズマ乱流が生成する 時系列データである。

2 現在までの研究結果のまとめ

2.1 1チャンネルデータの統計モデリング

まず,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] を個々のチャンネルに適用する。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 $x(t-1), x(t-2), \ldots$ 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 a₀, a₁,..., 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、時間 遅れ項 1 から最大時間遅れまでのすべての時間遅れ項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。例として、第1 チャンネルを RAR モデルによりモデル化した 結果を表 1 に示す。時間遅れの単位は 10[µs] であり、最大時間遅れを 120 として、モデル化を行った。

a_i	0.0020	2.53	2.22	0.48	0.28	0.16	0.056	0.0077	0.0064	0.0046	0.0081	0.0047
l_i	0	1	2	3	4	6	7	31	48	55	104	112
表1 第1チャンネルの時系列データを RAR モデルしたときのパラメータと時間遅れ												

この表1から, RAR モデルには直近の時間遅れ (1~7)の他に, 非自明な時間遅れ 31, 48, 55, 104, 112 が含まれることがわかる。図1は, 全64 チャンネルの時系列データを RAR モデル化して得られた時間遅れ項の度数分布である。非自明な時間遅れとして顕著なものは, 31, 50, 104, 111.5 で, これらは実時間に直すとそれぞれ, 310[µ], 500[µs], 1040[µs], 1115[µs] に対応し, この時間周期を振動数に直すとそれぞれ, 3.2[kHz], 2.00[kHz], 0.962[kHz], 0.897[kHz] となる。

2.2 多チャンネルデータの統計モデリング

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。この多変数 RAR モデリングの方法を全 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



図1 全64 チャンネルの RAR モデルに現れる時間遅れの度数分布

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。ここでも時間遅れの単位は 10[µs] である。結果の一部を列挙すると以下の通りで ある。

 $\begin{array}{ll} {\rm Ch} \ 10: & x_{10}(t) = 0.00012x_8(t-1) + 2.26x_{10}(t-1) - 1.88x_{11}(x-2) + 0.51x_{12}(x-3) \\ {\rm Ch} \ 20: & x_{20}(t) = 0.025x_{19}(t-1) + 1.96x_{20}(t-1) - 0.90x_{21}(t-2) \\ {\rm Ch} \ 30: & x_{30}(t) = 0.078x_{28}(t-1) + 1.79x_{30}(t-1) - 0.87x_{31}(t-2) \\ {\rm Ch} \ 40: & x_{40}(t) = 0.31x_{38}(t-1) - 0.26x_{39}(t-2) + 1.65x_{40}(t-1) - 0.67x_{41}(t-2) \\ {\rm Ch} \ 50: & x_{50}(t) = 1.81x_{50}(t-1) + 0.071x_{50}(t-2) - 0.87x_{51}(t-2) \\ {\rm Ch} \ 60: & x_{60}(t) = 0.013x_{58}(t-1) + 2.34x_{60}(t-1) - 1.60x_{61}(t-2) + 0.23x_{63}(t-4) \\ \end{array}$

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,図2に示されるように,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,その影響が伝播する ことがわかる。



図 2 全 64 チャンネルの時系列データの RAR モデルによる解析のまとめ。青色のノードがターゲットチャンネルで, 茶色のノードがターゲットチャンネルのデータに大きく寄与するチャンネルである。矢印方向に影響が伝搬する様子が わかる。

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).

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

大気海洋モデルのデータ分析に有用な新手法の開発を目的とし、ゆるやかに変動する媒 質中における波動伝搬の一般的な漸近解析理論である Wentzel-Kramers-Brillouin-Jeffreys (WKBJ)近似について再考した。線形作用素を関数へと写す Wigner 変換を用いることで、 流れ場のデータを相互に独立した波動信号へと分離することができる。この方法は、偏光関 係の空間変化を適切に考慮できる点が既存研究よりも優れている。ここで言う偏光関係と は、それぞれの波動の運動学的な特徴を決める固有ベクトルである。算出した偏光関係に基 づき、物理量を各波動の固有空間へと準局所的に射影することで、波動成分の分離が可能に なる。特定の波動成分の時間発展は、単一の波動方程式によって支配される。各波動方程式 の性質は、媒質の空間変化を漸近展開の高次成分まで組み入れた分散関係式によって特徴 付けられる。一連の数学的考察を流体の数値シミュレーションデータに適用し、それを輸送 理論に組み合わせることで、様々な状況下で各種波動が持つエネルギーやその他保存量の 伝達の検出を行うことができる。

目的

大気や海洋中の波動は、エネルギーや運動量を遠方へ運ぶことによって、惑星規模の物質 循環の駆動に関わっている。長年にわたる計算機性能の向上により、数値モデルによって大 気海洋中を伝わる波動を再現することが可能となった。モデルから出力される膨大なデー タから、各種波動成分の伝搬情報(フラックス)を解析し、循環場へ与える影響を検証する作 業が重要性を増している。一般に、地球自転と重力の影響を受ける流体中には、慣性重力波 やロスビー波といった複数種の波動が共存する。既往研究では、そうした波動をひとまとめ にしてその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.)。しかし、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、独立に解析する手法の開発が望まれている。

方法・結果

波動伝搬の数学的扱いは輸送理論と呼ばれる。この理論では、物理-波数空間(相空間)で 定義された波のエネルギー密度の時間発展を、輸送方程式によって記述する。相空間内にお ける波動の伝搬経路は、各波に固有な分散関係式によって決定付けられる。単一の波動のみ が存在する系では、輸送方程式の導出と解析は難しくない。一方、複数の波動成分が存在し、 かつ媒質が空間的に変動するような状況においては、輸送方程式の導出が可能であるかは 自明ではない。これは、(1)局所的な媒質振動の固有ベクトルである偏光関係が空間に依存 して変化するため、通常のフーリエ変換の方法では波の分離ができない、(2)媒質の空間勾 配の影響によって分散関係に摂動が生じ、それが時に群速度に大きな影響を及ぼす、といっ た理由によるものである。この問題に対し、本研究では、量子論や音響学で知られる Wigner 変換と呼ばれる手法を用いることで、従来よりも広い条件下で波動を分離し、輸送方程式を 導出・解析する方式を確立した(図)。

要旨



図:本研究で開発した手法を用いてモデルデータから分離した(a)慣性重力波および(b)ロ スビー波の信号と、(c, d)それらの波が持つエネルギー密度とフラックス。

本年度の進展

昨年度投稿した論文の改訂・出版作業を進めた。改訂の過程では、査読者からのコメント を受けて量子論やプラズマ物理学の文献を洗い直し、既存研究との関連性と相違点を明確 にした。本研究の地球科学的な位置付けについて考察を深め、プラズマ現象への応用可能性 も検討した。

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:**

(査読論文)

<u>Onuki, Y.</u>, 2020, Quasi-local method of wave decomposition in a slowly varying medium, *Journal of Fluid Mechanics*, 10.1017/jfm.2019.825, 883, A56.

(研究発表)

大貫陽平, 「大気や海洋に見られる各種波動の局所分離と分布関数計算」. 九州大学応用力 学研究所 RIAM フォーラム 2019, 2019/6.

<u>Onuki, Y.</u>, Quasi-local method of wave decomposition in a slowly varying medium, The 16th Japan-Korea Joint Seminar on Ocean Sciences, 2020/1.

<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", 2020/1.

時系列データに見られる短期的な不規則変動の分析

サブテーマ代表者:兵庫県立大学大学院 シミュレーション学研究科 中村 知道

1 研究目的

超高温の磁場閉じ込めプラズマ中には密度・温度勾配が普遍的に存在し、それによって乱流が形成される。プラズ マを安定して閉じ込めるためには、この乱流の物理的性質を理解することが必要不可欠である。乱流は、プラズマ流 体の密度、温度、電位等の物理諸量の不規則な振動として観測される。そのため、プラズマ流体が持つ性質を詳細に 理解するためには、観測によって得られる時系列データを詳しく調べる必要がある。本研究課題代表者(中村 知道) は、時系列データの特徴を統計的に分析する手法を開発している。本研究は、磁場閉じ込めプラズマ中のドリフト波 乱流の大容量時系列データの解析にこの方法を応用し、新たな知見を得ることを目的とする。

2 現在までの研究結果

本研究は、中村によって開発されたデータの隠れた情報を統計的に分析する small-shuffle surrogate (SSS) 法 [1] を、直線プラズマ装置におけるプラズマ乱流の実験データ解析に適用する。これにより、プラズマ現象の未知の部分 をあぶり出し、得られる結果の物理的意味を理解しながら、プラズマ現象のより深い理解につなげていくものである。 この SSS 法は、データに中・長期的なトレンドがあったとしても、そのデータに含まれる短期的な不規則な変動に相 関構造が存在するかどうかについて分析を行うことができる。本年度は、SSS 法を用いて、end-plate biasing 実験で 観察されたプラズマ密度とプラズマ電位の間に、高周波な結合 (high frequency coupling) が存在するかどうかにつ いて調査した。その結果、印加電圧が低いときも高いときも、プラズマ密度とプラズマ電位の間には、高周波な結合 が示唆された。現在、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。

本研究は単なる既存手法の適用ではなく、ミクロ乱流についての理解も必要となるため、応用力学研究所のスタッ フと議論を重ねながら、更なる分析を進めていく予定である。

3 今後の研究の方向について

ミクロ乱流はプラズマ乱流スペクトルの高周波成分に主に対応すると考えられているが、プラズマ乱流のスペクト ルからミクロ乱流の特徴を知ることは容易ではない。SSS 法は、データの順番を局所的に入れ替えることで、元の データが持つ相関構造とは異なる人工的なデータ(サロゲートデータ)を生成する。データを入れ替える範囲は、大 きくすることも小さくすることも可能である。SSS 法はデータの周波数の特徴を直接操作する方法ではないが、デー タを入れ替える範囲を大きくすれば、より広い高周波成分が変わることになり、データを入れ替える範囲を小さくす れば、より狭い高周波成分が変わることになる。このようにデータを入れ替える範囲を変えながら分析を行い、ミク ロ乱流の相関構造の有無について更なる調査を行うことで、ミクロ乱流の理解が深まると共に、新しい知見を得るこ とが出来ると考える。

4 研究成果発表

・ 中村 知道, "サロゲート法を用いたプラズマ乱流のミクロ構造の統計的分析~プラズマ密度とプラズマ電位間の高周波な結合の検証~", MHD 理論関連の研究会(プラズマの複雑現象を対象としたデータマイニングの活用), 2019 年 12 月 12 日, 13 日, 核融合科学研究所, 岐阜県.

5 研究組織

研究代表者 兵庫県立大学大学院 シミュレーション学研究科 中村 知道 所内世話人 九州大学 応用力学研究所 稲垣 滋

参考文献

[1] Tomomichi Nakamura and Michael Small: "Testing for correlation structures in short-term variabilities with long-term trends of multivariate time series," Physical Review E, Vol. 74, 041114 (2006).

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

直線プラズマ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、エンドプレートにバイアス電圧をかける実験によってその構造が破壊される様子を観測した。ストリーマーは径方向に伸びた構造を持つが、対となって発生するストリーマーの媒介波は径方向に節を持つ構造を持つ。エンドプレートバイアス実験によって、ストリーマー構造が破壊されて周期的な孤立波へと変化していったが、それと同時に媒介波の径方向にある節の位置がプラズマの中心に向かって移動することも観測された。これは軸方向に流れる電流がバイアスによって増加したことによってピンチ効果でプラズマが圧縮したのではないかと考えられる。

1. 目的

メゾスケール構造としてゾーナルフローが有名であるが、ストリーマーも同様にプラズマ乱流中のミ クロな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る。ストリーマーはゾーナル フローと違って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。

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 基礎的理解を進める目的において有利である。九州大学応用力学研究所の直線プラズマ実験装置 PANTAではその利点を活かし、ストリーマーや、その構造形成に重要な役割を果たす媒介波の特性を調 査する研究を行っている。さらに、エンドプレートにバイアス電圧をかける実験を行うことで、ストリ ーマー構造の抑制や制御を目指し、プラズマの閉じ込めを改善することができるかを研究している。

これまでの PANTA におけるバイアス実験から、バイアス電圧をかけることでストリーマー構造が破壊され、乱流状態から周期的な孤立波構造に変化していくことが観測されていたが、今回はその時に媒介波がどのように変化していくかを観測した。ストリーマー構造がバイアスによってどのように破壊されていくのか。例えばプラズマ全体にわたって消失していくのか、存在する位置を変化させながら消失していくのかなどを知る手掛かりとなる。

2. 実験方法

直線プラズマ実験装置 PANTA を用いてストリーマー実験を行い、エンドプレートバイアス実験によって周方向に揺動が局在した構造であるストリーマーと、径方向に節を持つ構造である媒介波の空間構造がどのように変化するかを観測した。

PANTA は軸方向の長さが z = 4 m、内径 r = 0.45 m の筒状の直線装置である。ソース部に付けられた内径 95 mm のガラス管にアンテナで 3 kW/7 MHz の RF 波を印加し、ヘリコンプラズマを発生させている。 軸方向の磁場は 0.01–0.15 T まで変化させることができるが、磁場を 0.09 T に設定し、内部に封入した アルゴンの圧力を 0.8 mTorr に調整すると、ドリフト波乱流が非線形結合によってストリーマー構造を 形成する。中心部の密度は 10^{19} m⁻³程度、電子温度は平坦で 3 ± 0.5 eV である。軸方向 z = 1.885 m の位 置に周方向 64 チャンネル静電プローブが設置されている。このプローブにより、半径 r = 40 mm の位置 での詳細で精度の良い乱流の時空間構造を観測することが出来る。また、軸方向 z = 1.625 m もしくは 3.625 m の位置には径方向 5 チャンネル静電プローブが設置されており、プラズマの電子密度や浮遊電 位分布を測定する事ができる。また、周方向 64 チャンネルプローブと径方向 5 チャンネルプローブを 同時に用いることで、相互相関解析によって媒介波の空間構造が、三波相関解析(バイスペクトル解析) によってストリーマーの空間構造が、プラズマの二次元断面において求めることができる。

エンドプレートの近傍のz=3.95 mの位置に、プラズマの直径のほぼ半分となる直径 50 mmの電極が

あり、50Vまでの電圧をかけることができる。このエンドプレートにバイアス電圧をかけることで、ストリーマー構造の破壊を試み、その変化の様子を調べる。



2D structure of mediator

図 1. ストリーマー状態、Biased 1、Biased 2 での媒介波(周方向モード数 1)の位相構造。径方向に 存在する節の位置が徐々にプラズマの内側へと移動していることが分かる。

3. 実験結果と考察

ストリーマーが発生している状態(実験条件:磁場 0.09 T、圧力 0.8 mTorr)のエンドプレートにバイ アス電圧を最大 50 V まで印加した。電圧 20 V 程度までは、バイアス電流は線形に増加し、5.5 A に達す ると増加しなくなった。電子密度はバイアス電極の内側では徐々に大きくなり、外側では小さくなり、 やはり 20 V 以上では変化が止まった。ところが 50 V になると、突然バイアス電流が 2 つの値を取るよ うになり、バイアス中に 2 状態間で遷移を繰り返した。バイアス電流が 20 V の時とほぼ変わらない 5.5 A の状態を Biased 1、8.5 A に増加した状態を Biased 2 と呼ぶことにする。Biased 1 ではストリーマー構 造のような自己収束構造をわずかに残しつつ、周期的な孤立波の特徴が強い状態へと移行していた。さ らに Biased 2 ではほぼ自己収束構造は消失し、周期的孤立波構造を強めていった。

図1は、ストリーマー状態、Biased 1、Biased 2 それぞれでの媒介波(周方向モード数1で、ドリフト 波乱流と逆方向に回転)の位相構造を相互相関解析で求めたものである。ストリーマー状態では径方向 r=30 mmの位置に位相が反転する節が存在するが、Biased 1 では節の位置はr=20 mmの位置に移動し、 さらに Biased 2 ではr~15 mmの位置に移動している。このことから、ストリーマーから孤立波への遷 移は、中性粒子ガス圧を変化させていく場合は節の位置が変わらず遷移するのに対し、バイアス実験で は媒介波の節の位置がプラズマの中心方向に移動しながら遷移していくことが分かった。このことは、 バイアス電流が増加したことによるピンチ効果でプラズマが圧縮したのではないかと予想されるが、詳 細を掴むためにはさらなる追加研究が必要である。

4. 研究成果報告

[1] 山田琢磨他, "直線プラズマにおける非線形結合とストリーマー", 日本物理学会 2019 年秋季大会, 10aK22-1, 岐阜大学 (Sep 10-13, 2019).

[2] 山田琢磨他,"直線プラズマにおける非線形結合の研究",日本物理学会 第75回年次大会,16pD13-10, 名古屋大学 (Mar 16-19, 2020).

5. 研究組織

研究代表者:山田琢磨(九大) 研究協力者:稲垣滋、佐々木真(九大)、小林達哉(核融合研)
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 1: 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1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

2020 年 2 月 4 日、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第2年度にあたる本年度は、参加者の日程が合わず、最大 の参加者が期待できる日程で行なったが、前回より短期間での開催となった。前回に引き 続き海洋・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う と共に、近年活発となっているデータサイエンス分野との融合について議論した。 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。これらの議論の内容が、共同研究"流体波動の局所分離解析に 関する研究"(大貫)から、Quasi-local method of wave decomposition in a slowly varying medium, Y. Onuki, J. Fluid Mech. 883 (2020) A56. として出版された。その内容についての講演と更な るステップについての説明があった。

近年盛んなデータサイエンスの手法を取り込んだプラズマ乱流データ解析の紹介があっ 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、影響のあるなしをネットワークト ポロジーとして可視化する事ができる。乱流データの場合、このトポロジーが時間的に変 動することが指摘され、乱流の特徴づけに関して議論された。更にこのモデルを多変数系 に拡張し、ダイアグラムとしてまとめることで相関の伝搬図のようなものを得た。この図 に関して計測器の設置精度の影響などが議論された。いずれにせよ、相関からこれまで取 り扱ってこなかった非常に短波長のモードの検出が示唆されており、手法の有効性につい て期待が高まった。この成果はプラズマ核融合学会等で報告され現在論文執筆中であり、 来年度の出版が期待できる。

プラズマセンシングに関してマイクロ波反射計を用いた2次元イメージングの話題が2 件提供された。マイクロ波の反射率をホログラフィで取得しようとする試みとドップラー シフトを用いてプラズマフローの3次元ベクトルを求める試みが紹介された。軸方向プラ ズマフロー計測は九州大学のPANTA装置でも計画されているが、軸方向のマイクロ波の反 射(後方散乱)強度は磁力線方向の乱流空間構造に依存し、乱流構造は磁力線方向には均一 と考えられるため困難であると予想していた。しかしトカマクでの予備実験では予想に反 して強い後方散乱信号が得られ、軸方向フローの計測の可能性が示された。今後 PANTA装置において追試を行うこととなった。

また、今回の講演にはなかったが、プライベートコミュニケーションを通じ、前回報告 された海洋分野でのプローブ計測結果について、集中豪雨解析やプラズマ乱流解析で行わ れてきた突発性のクラスタリング解析やバイスペクトル解析を適用する事が議論されてい る。

このようにデータ解析をキーワードにいくつかの分野融合が進展している。

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: 2020年2月4日

場所: 応用力学研究所2F小会議室

プログラム

10:00-10:10

はじめに (稲垣)

10:10-10:40

流体波動の局所分離解析に関する研究(大貫)

10:40-11:10

プラズマ乱流時系列データを用いた局所的構造とミクロ乱流の分析 (中村)

11:10-11:50

機械学習を用いたマイクロ波イメージング再構成手法の研究 (土屋)

休憩

13:00-13:30

直線磁化プラズマにおける乱流構造の解析(山田)

13:30-14:00

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)

14:00-14:30

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) 14:30-15:00

全体討論

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 古閑一憲、鎌滝晋礼、白谷正治、稲垣滋

IoT の普及などを背景に近年の半導体デバイスの高性能化のために、従来の微細化の進展が鈍 化する一方で、3 次元スケーリングと呼ばれる積層化が進められている。微細化及び積層化にお いても、プラズマプロセスにおけるナノ粒子及びラジカルの堆積技術の高精密化が強く求めら れている。そのような中で、プラズマ気相中のナノ粒子成長制御法の一つとして、振幅変調(AM) 放電法がある。プラズマ CVD において放電電圧に AM 変調を行うと、ナノ粒子サイズが減少し、 粒子密度が増加することが報告されている。加えて得られたナノ粒子量の揺らぎにプラズマ乱 流解析を適用し、プラズマとナノ粒子の相互作用揺らぎについて理解を進めてきた。そこで本研 究ではAM変調を活用した堆積膜の高品質化を目指し、TEOS (Si(OC2H5)4)ガスを用いたプラズ マ CVD において、無変調及び AM 変調を印加した場合の電極間のナノ粒子量を表すレーザー散 乱光(LLS)強度とプラズマ密度やラジカル密度に関連するプラズマ発光強度分布を詳細に計測し、 それぞれの分布の関係及び膜質に与える影響を調べた。

実験は、半導体集積回路の製造で一般的に用いられる平行平板容量結合型プラズマ CVD 装置で行った。図1に装置の概略を示す。装置は内径 260mm、高さ 230mm の SUS 製で、 装置内部は、 鉛直方向に設置した平行平板電極(直径 60mm、間隔 45mm)の間でプラズマを 生成した。用いたガスは、Si(OC2H5)4 (TEOS), Ar 及び O2 であり、圧力を 3Torr とした。こ

のとき、放電電圧に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 6mm、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 6mm)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 速度カメラで撮影した[1,2]。

初めにレーザー散乱光(LLS)強度の空間分布





の変調周波数依存性を調べた。パラメータを放電開始からの時間とした結果を図2に示す。 LLS 強度はナノ粒子サイズの6乗と密度に比例する量であり、ここでは気相中のナノ粒子 量とする。放電時間とともにナノ粒子量は増加し、AM 変調印加によりナノ粒子量が減少す る。変調なしで規格化した空間中の総ナノ粒子量(図2の空間分布の積分値)は変調周波数 に依存し、変調周波数 100Hz でナノ粒子抑制量が最大である。これに対して ArI(750nm)の 発光強度では、変調による影響はすくなく、プラズマ密度やラジカル密度に対する AM 変 調の効果は少ないことを明らかにした。この結果は、ラジカル密度に変化なく AM 変調に よりナノ粒子の成長が抑制されていることを示す。

次に変調周波数 1kHz で堆積した膜 の膜質を、無変調の 場合と比較した。製 膜速度と膜の屈折率 については、AM 変 調による変化は見ら れない。これに対し て、AM 変調により、 表面ラフネスの減少 と膜中O-H結合が減 少した。AM 変調に よるナノ粒子量の減 少では、ナノ粒子サ イズの減少が主な原 因であると考えられ る。したがって、膜 堆積時に混入した ナノ粒子のサイズ の減少により、屈折 率に変化なく、表面



図 2. 放電開始からの時間をパラメータとした、ナノ粒子からのレ ーザー散乱光強度の空間分布。

ラフネスや膜中 O-H 結合などの膜 の緻密性にかかわる特性が変化し たと考えられる。

今後は、ゆらぎ周波数とナノ粒子 成長抑制機構を解明することが重 要な課題である。。

参考文献

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

学会発表:国際会議2件、国内会議3 件



図 3. 原子間力顕微鏡を用いて計測した表面 ラフネスの比較。

^[2] S. Nunomura, et al., J. Appl. Phys.,**99** (2006) 083202.

窒化物半導体材料における形状および物性のマルチスケールデータ解析手法の構築

三重大学大学院工学研究科 秋山亨

1. 研究目的

省エネルギー社会の実現に寄与する光デバイスおよび電子デバイスに用いられる窒化物半導体では、 その物性を制御する方法として混晶や超格子を作製することが行われている。しかしながら、これらの 材料および構造の自由度は膨大であり、実験的に検証することは困難である。本研究課題では、これら の系に対してデータ解析の手法を用いて、所望の物性を得るための条件を高スループットで抽出するこ とが出来るデータ解析手法の構築を目指す。また、窒化物半導体デバイスの作製において出現するナノ (マイクロ)スケールでの形状制御に対して、量子論にもとづくナノスケールでのデータをもとにマイク ロ〜ミリスケールでの材料形状予測を行うための解析手法の構築も行う。上記研究を遂行するために、 寒川教授と共同研究を行うことで、同教授の研究室の持つマルチフィジックス・マルチスケール結晶成 長シミュレーション技術のノウハウを本研究課題に対して適用させる。さらに得られた結果をもとに、 窒化物半導体における物性制御および結晶成長に向けた諸現象の統合的理解を目指す。

2. 計算方法

本研究課題では以下の2つの研究項目に対する計算データの蓄積および解析手法の構築を行う。

1. 物性制御のためのデータ解析(担当:河村・中村・寒川)

三重大学で得られた量子論にもとづく計算(第一原理計算)データをもとに、三重大学および九州大学に おいてデータ解析手法の構築を行う。特に窒化物半導体デバイスにおいて重要となるバンドギャップ値 に対して、ベイズ最適化を用いた機械学習を行うことで、効良く行うための手法の構築を行う。得られ た成果に対して九州大学において研究打ち合わせを行い、その妥当性の検証を行う。

2. 形状制御のためのデータ解析(担当:秋山・寒川)

三重大学で得られた半導体表面および各種欠陥のエネルギーデータをもとに、マイクロ~ミリスケール での結晶形状予測を行う。各種エネルギーにデータに対して機械学習による予測を行うとともに、これ らのデータを用いた形状予測手法の構築を行う。得られた成果に対して九州大学において研究打ち合わ せを行い、その妥当性の検証を行う。

本年度は主に計算データの蓄積に関する研究を 実行し、以下に記すような研究成果を得ている。な お計算は、密度汎関数理論に基づく全エネルギー電 子状態計算によって実行し、計算コードとして Tokyo Ab-initio Program Package (TAPP)に本計算用に 改良を施したプログラムによって実行した。また第 一原理計算プログラムパッケージとして Quantum Espresso を利用した。これらの電子状態計算に加え 全電子 FLAPW 法による全電子計算も実施した。

3. 研究成果

3.1 物性制御のためのデータ解析

窒化物半導体における物性制御に関する研究と して、InN/AINおよびInN/GaN超格子におけるバン ドギャップ値の計算を行った。図1は $Al_{1,x}In_xN$ 混晶 および mInN/nAIN 超格子におけるバンドギャップ の In組成 x に対する変化を示したものであり、 mInN/nAIN 超格子において mおよび n はそれぞれ



図 1. Al_{1-x}In_xN 混晶および *m*InN/nAlN 超格子の計算 モデルおよびバンドギャップ値の In 組成 x 依存性。 ●および■のプロットは Al_{1-x}In_xN 混晶での実験値で ある。



図 2. Wulff の作図により得られる GaN(0001)面における(a) [11-20]および(b) [1-100]方向に対する平衡形状、および これら平衡形状を得るために用いた(c) 各面方位における GaN 表面エネルギーの Ga 化学ポテンシャル依存性。

InN および AIN の層数を示している。この図から同じ組成においても超格子のバンドギャップは混晶で のバンドギャップとは異なることが解る。また、x=0.2 において超格子のバンドギャップは最大で 2.56 eV となり、x>0.5 においては InN の層数に依存して最大 1.72 eV までとり得る。これらのバンドギャッ プの InN 層数依存性は AIN 層の増大による内部電界の効果に起因していると考えられる。InN/GaN にお いてもバンドギャップの In 組成に対して同様の傾向が見られることを見出している。

3.2 形状制御のためのデータ解析

ナノ材料形成に関する研究として、GaN に対する平衡形状の解析を行った。図2は密度汎関数計算に よる全エネルギーを用いて得られる表面エネルギーにもとづき、Wulffの作図(結晶の平衡形状を各面方 位での表面エネルギーを用いて計算する手法)により得られた GaN(0001)面上に形成する平衡形状を示 したものであり、この作図に用いた表面エネルギーを図2(c)に示している。図2(c)に示す表面エネルギ ーの Ga 化学ポテンシャル(成長条件)依存性に起因して、温度に依存して各面方位の表面エネルギーが 変化し、それに対応して図2(a)および2(b)に示す平衡形状が変化することを、経験的パラメータを一切 用いること無しに得ることに成功している。またこれらの平衡形状に対して、有機金属エピタシャル成 長でのキャリアガス依存性に対する検討を行い、これら平衡形状のアスペクト比の温度依存性がキャリ アガスによって変化し、水素キャリアガスにおいては温度上昇に伴いアスペクト比が増大するのに対し て窒素キャリアガスにおいては減少することも見出している。

4. 研究業績

- "Equilibrium morphologies of faceted GaN under metalorganic vapor phase epitaxy condition -Wulff construction using absolute surface energies", Y. Seta, A.-M. Pradipto, T. Akiyama, K. Nakamura, T. Ito, Phys. Status Solidi B, 1900523 (2019).
- "First-Principles calculation of bandgaps of Al_{1-x}In_xN alloys and short-period Al_{1-x}In_xN/Al_{1-y}In_yN superlattices", T. Kawamura, Y. Fujita, Y. Hamaji, T. Akiyama, Y. Kangawa, I. Gorczyca, T. Suski, M. Wierzbowska, S. Krukowski, Phys. Status Solidi B, 1900530 (2019).
- "Thermodynamic analysis for nonpolar III-nitride surfaces under metalorganic vapor phase epitaxy conditions", T. Shimizu, Y. Seta, T. Akiyama, A.-M. Pradipto, T. Akiyama, T. Ito, A. Kusaba, Y. Kangawa, Jpn. J. Appl. Phys. 59, 028003 (2020).
- "有機金属気相エピタキシー成長条件下での GaN ナノ構造の形状評価: Wulff の作図法による検証", 瀬田 雄基, Abdul-Muizz Pradipto, 秋山亭, 中村浩次, 伊藤智徳, 2019 年秋季第 80 回応用物理学会学術講演会 (2019年9月18日-9月21日) 札幌
- 5) "InN/AIN 超格子構造のバンドギャップと格子歪みの関係", 濱地祐矢, 河村貴宏, 秋山亨, 寒川義裕, 2019 年秋季第80回応用物理学会学術講演会(2019年9月18日-9月21日) 札幌

5. 研究組織

研究代表者	秋山亨 (三重大学大学院工学研究科・准教授)
所内世話人	寒川義裕 (九州大学応用力学研究所·教授)
共同研究者	河村貴宏 (三重大学大学院工学研究科·助教)
共同研究者	中村浩次 (三重大学大学院工学研究科·教授)

アジア縁辺海が暖候期における集中豪雨に及ぼす影響

三重大学 生物資源学研究科 万田敦昌

【研究の目的】

地球温暖化が最近の豪雨事例にどの程度影響を及ぼしているか定量化するための一つの 方策として,温暖化に伴う熱力学的効果の変化に焦点を絞った解析手法が最近提案されて いる。そのなかでも特に大気の境界条件となる海洋温暖化の影響を評価することの重要性 が指摘されている。日本近海は全球規模で見ても海面水温の上昇率が前世紀 100 年間で最 も大きかった海域であり,日本近海の温暖化が豪雨の長期変化傾向に及ぼす影響を明らか にすることは,地球温暖化が極端気象に及ぼす影響を明らかにする上で重要である。 暖候 期の日本ではしばしばメソ対流系と呼ばれる組織化した積乱雲群によって甚大な豪雨災害 が引き起こされる。本研究では平成 29 年7月九州北部豪雨をこのようなメソ対流系による 集中豪雨の典型例とみなし,近年の海面水温の上昇傾向が集中豪雨に及ぼす影響を調べる。 最近の研究において海面水温データセットの差異が豪雨の再現性に及ぼす影響が指摘され ている。 海面水温が豪雨に及ぼす影響について調べた既往の研究の多くは,大気の成層の 効果や海面水温データセットの差違の影響について検討していない。 本研究ではこれらの 二つの影響も併せて検討した。

【手法】

Weather research and forecasting model (version 3.7.1)を用いた数値実験を行った。 3つの 入れ子の計算領域をとり,水平格子間隔は外側から順に9,3,1 km とし,鉛直層数は30 と した。一番内側の計算領域は,組織化した積乱雲群を再現するのに十分な格子間隔とした。 大気データは NCEP FNL,海面水温データは米国 Naval Oceanographic Office (NAVO)に よるものを使用した。 計算期間は 2017 年 7 月 3 日の 12 時 (UTC)より同年同月 5 日 18 時までである。 この実験を再現実験 (CNTL)と称する。 次に衛星海面水温データセット の存在する 1980 年代における水温・気温分布が豪雨に及ぼす影響を調べる目的で,以下の 感度実験を行った。 海面水温 5 種 (MGDSST, ERSST, HadISST, OISSTv2, COBE)と大気 再解析 5 種 (NCEP1, NCEP2, JRA55, ERA-Interim, ERA5)に関して 1982 年から 2017 年ま での線形トレンドを計算し,これらのトレンドを CNTL で用いた海面水温と気温データか ら差し引いたデータを作成した。 これらに FNL, NAVO を合わせた合計 36 通りのデータ の組み合わせについて CNTL と同様の数値実験を行い,雨量への影響を調べた。 降水帯に 流入する気塊の流入経路にそった海面水温の平均値を計算し,2017 年 7 月 5 日 1:00~13:00 (UTC)の 12 時間雨量の 33-34N, 130-132E の範囲における領域平均値と比較した。

【結果および考察】

図 1 は 12 時間雨量の CNTL からの変化率を示している(CNTL の方が大きい場合を正と する)。 ここで, A80, AO80, O80 は,それぞれ気温のみを 1980 年代の値とした実験群,気 温と水温の双方を 1980 年の値とした実験群, 海面水温のみを 1980 年代の値とした実験群 を意味する。降水量の変化は水温のみを変化させた場合(O80)で最大となり, その変化率は 平均で 20%となった。一方, 水温・気温を変化させた場合 (AO80)の降水量の変化率は平均 で 7%となり, 気温のみを変化させた場合 (A80)の変化率は平均で-5%となった。可降水量 の変化を比較したところ, 最も降水量の変化が大きかった O80 は最も可降水量の変化が小 さく, 可降水量の変化だけでは, 降水量の変化は説明できない (図は省略)。AO80 における 降水量の変化率は水温 1 K あたりの変化率に換算すると 11%/K となるが, これはしばしば 用いられる飽和蒸気圧の温度依存性をもとにした理論的予測値 (~6%/K)を上回る値であ り, このことから, 降水量の変化には温度変化に伴う可降水量の変化だけでなく, 降水過程 に変化が影響していることが示唆される。



図1 (上)12時間雨量と(下)海面水温の CNTL からの変化率。A80, AO80, O80 はそれぞ れ,気温プロファイルのみ,気温プロファイル・海面水温の両方,海面水温のみを 1980 年 代の値とした実験群を示している。正の値は CNTL の方が感度実験よりも値が大きいこと を意味する。海面水温は気塊の流入経路に沿ってサンプリングした。下向き三角(▼),上向 き三角(▲),棒はそれぞれ最大,最小,標準偏差を示す。アスタリスク(*)は CNTL と 12 時 間雨量の差が有意(危険率 5%)であることを示す。

そこで時間雨量の変化を調べたところ, AO80 では相対的に強い降水の割合が増えているこ とが分かった(図 2)。さらにこの変化は気温変化(A80)よりも水温変化(O80) とよい対応 を示すことから, 主に水温変化によって生じていると考えられる。相当温位の鉛直分布を比 較したところ, A80 では対流圏全体でほぼ一様に相当温位の値が増加しているのに対し, O80 と AO80 では対流圏下層での値の増加が顕著であり, O80 と AO80 では対流不安定性 が強化されていることが分かる。このことは, AO80 と O80 で見られた強い降水の増加傾向 と整合的である。次に, 対流有効位置エネルギー (CAPE)を比較したところ, A80 では東シ ナ海南方から九州に向かうにつれて CAPE の値が小さくなるのに対し, O80 では CAPE の 値は増加していた。一方, AO80 では CAPE の減少は顕著ではなく, 南方からの暖湿気流が その不安定性を保持したまま九州に流入していることが分かった。以上の結果は, 海面水温 変化に伴う対流不安定度の変化が, 降水量の変化に大きく寄与するという Manda et al. (2014)で指摘された降水変化のメカニズムが本事例でも重要な働きをしていたことを示唆 している。



図 2 時間雨量の度数分布。(上段) CNTL,(第 2 段) CNTL と A80 の差,(第 3 段) CNTL と AO80 の差,(下段) CNTL と O80 の差。正の値は CNTL の方が感度実験よりも値が大 きいことを意味する。赤は増加,青は減少を意味し,細い実線は標準偏差を示す。

【研究組織】

- 【研究代表者】三重大学大学院生物資源学研究科 万田敦昌
- 【所内世話人】九州大学応用力学研究所 広瀬直毅
- 【研究協力者】海洋研究開発機構 趙寧

[2019 特 2-3] 結晶表面荒さと微斜面マクロステップのダイナミクス: 分子スケールから表面張力に支配されるスケールへ

大阪電気通信大学工学部 阿久津典子

研究目的

低電力デバイスに利用される SiC や GaN といった半導体結晶について、不連続な表面張力に支配されるマクロステップのダイナミクスを、分子の着脱という量子力学現象と関連付けて制御することを 目的とする。

研究方法

低電力デバイスに利用される SiC や GaN といった半導体結晶について、結晶表面における分子の着脱 を寒川先生の第一原理計算で検討する。そこで得られた分子結合の値を基に格子模型を作成し、結晶育 成温度付近におけるステップ諸量をランダムウォーク法で計算し、不連続な表面張力を申請者の統計力 学計算手法、すなわち密度行列繰り込み群法とモンテカルロ法、でエントロピーも含めて計算する。不 連続な表面張力に支配されるマクロステップのダイナミクスを分子の着脱という量子力学現象と関連 付けて理解、および制御できるようにする。

共同研究特別講演会の開催

2019年7月17日(水)17:00~18:30に大阪電気通信大学寝屋川学舎 J号館 J-402 教室に於い て、大阪電気通信大学エレクトロニクス研究所主催、九州大学応用力学研究所共催で共同研究 特別 講演会を実施した。講師は(株)東京システムリサーチの古屋 正氏であり、講演題目は「企業のAI 導入現場で起きていること」であった。講演の概要は以下のとおりである。GAFA と呼ばれる Google、 Amazon、Facebook、Apple などが提供する翻訳や音声テキスト変換サービスは、一般消費者に浸透し て何気なく利用されるようになっている。ただ、このようなサービスは、一般に公開されているデー タや、GAFA 内に蓄積されたデータをもとに、AI が学習したことを利用しているにすぎない。一方、一 般の企業現場では、企業内の業務省力化や知識承継に AI を利用したいというニーズはあるが、なかな か AI の採用を決定する企業の数が少ないのが現状である。AI を導入した企業と AI の導入を断念した 企業の比較から見えてくる「認識の違い」について講演を行った。

考察

大阪電気通信大学大学院修士課程の杉岡良樹君とともに、GaN や SiC などの 2 成分定比化合物半導体 について、平衡状態における結晶微斜面の表面(界面)荒さを理論的に調べた。(001)面から(111)面に向 かって傾いた面である微斜面について、スタガード制限 solid-on-solid 模型に基づくモンテカルロ法に より、表面荒さの環境相成分比依存性を調べた。その結果、小さいスケールと大きいスケールでは振 る舞いが異なり、atomically smooth but globally rough であることを発見した。また、表面荒さを記 述するミクロなエネルギーは量子力学計算の単位格子半分当たりの表面自由エネルギーであることを 示した。

上記の成果は、杉岡良樹君の修士課程学位論文となり、Crystals という国際誌に掲載が 2020 年 2 月 21 日に決定した。

成果報告

出版物

Noriko Akutsu} and Yasuhiro Akutsu, "Density-matrix renormalization-group study of lattice gas on the surface of a wurtzite crystal structure", ed. Nadia V. Danielsen, in "*Understanding Density Matrices*", (Nova Science Publishers, Inc., New York, 2019), Ch.6 197--227. (ISBN: 978-1-53616-252-3).

発表論文

- 1. 杉岡良樹、「平衡状態における表面(界面)荒さの環境相成分比依存性:二成分定比化合物」、大阪電気 通信大学工学研究科修士論文、2020年4月.
- 2. Noriko Akutsu, Yoshiki Sugioka, Naoya Murata, "Surface Roughness Changes Induced by Stoichiometric Deviation in Ambient Phase for Two-Component Semiconductor Crystals", Crystals, in press.
- 3. Noriko Akutsu, "Driving force dependence of the height of a faceted macrostep in non-equilibrium steady-state crystal growth", J. Phys.: Conf. Ser. **1290** (2019), 012015. doi: 10.1088/1742-6596/1290/1/012015
- 4. Noriko Akutsu, "Relationship Between Macrostep Height and Surface Velocity for a Reaction-Limited Crystal Growth Process", Cryst. Growth & Design, **19** No. 5 (2019), 2970--2978. doi: 10.1021/acs.cgd.9b00168
- 5. Noriko Akutsu(査読無し), "Faceted Macrostep- Height Dependence of the Surface and the Step Velocities: Reaction-Limited (Interface-Limited) Crystal Growth"Conference proceedings, **22p-2-7**, 1--6. *The 12th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices 19* (ALC 19).

口頭発表

- Noriko Akutsu, "Disassembly of Faceted Macrosteps in Non-Equilibrium Steady State: the Cases in the Step-Faceting Zone or in the Step Droplet Zone", *BIT's 7th Annual Conference of AnalytiX-2019*, (April 2019, Singapore, Singapore).
- 7. Noriko Akutsu, "Macrostep-Height Dependence of Surface Velocity for a Reaction- (Interface-) Limited Crystal Growth", *International Conference on Crystal Growth and Epitaxy--18*, (July 2019, Keystone, Colorado, USA).
- 8. 阿久津典子,「"AI vs 人間" 良い結晶を創るの は どっち?」、第42回結晶成長討論会ランプセッション,(2019 年 8 月 箕面観光ホテル、大阪府箕面市).
- 9. 阿久津典子,「学ぶ AI から使う AI ~—「AI と化学」の時代の情報教育—」,分子科学研究所所長招聘 会議「化学の近未来:化学と情報科学との融合」,(2019 年 5 月 分子科学研究所、 岡崎).
- 10. 阿久津典子,「ファセット化したマクロステップのダイナミクス part1」,北海道大学低温科学研究所ワ ークショップ(2020年1月23日・24日、北海道大学低温科学研究所、札幌市)
- 11. .杉岡良樹、阿久津典子,「AB 化合物の平衡状態における表面荒さ:環境相成分比依存性」,大阪電気通 信大学エレクトロニクス基礎研究所ワークショップ(2019年11月30日・12月1日、大阪電気通信大 学寝屋川学舎、寝屋川市、大阪府).
- 12. 杉岡良樹、阿久津典子,「平衡状態における表面(界面)荒さの環境相成分比依存性:二成分定比化合物」,第48回結晶成長国内会議(2019年10月、大阪大学銀杏会館、大阪大学吹田キャンパス、吹田市、大阪府).
- 13. 阿久津典子,「プリズム面のファセティング転移温度から求めた氷表面・界面の実効結合エネルギー」, 第48回結晶成長国内会議(2019年10月、大阪大学銀杏会館、大阪大学吹田キャンパス、吹田市、大 阪府).
- 14. 阿久津典子,「素ステップのカイネティック係数とファセット化したマクロステップ高さの関係」,第
 48回結晶成長国内会議(2019年10月、大阪大学銀杏会館、大阪大学吹田キャンパス、吹田市、大阪府).
- 15. 阿久津典子,「反応(界面)律速結晶成長における表面(界面)成長速度とファセット化したマクロス テップ高さの関係」,第48回結晶成長国内会議(2019年10月、大阪大学銀杏会館、大阪大学吹田キャ ンパス、吹田市、大阪府).
- 16. 阿久津典子,「カイネティック係数のファセット化したマクロステップ高さ依存性2:ステップ・ファ セティング・ゾーン」,日本物理学会2019年秋季大会(物性)(2019年9月、岐阜大学伊都キャンパス).
- 17. 阿久津典子,「カイネティック係数のファセット化したマクロステップ高さ依存性1:ステップ・ドロ プレット・ゾーン」,日本物理学会 2019 年秋季大会(物性)(2019 年 9 月、岐阜大学伊都キャンパス).
- 18. 杉岡良樹、阿久津典子,「2成分定比化合物における表面荒さの環境成分比依存性」,第42回結晶成長 討論会(2019年8月、箕面観光ホテル、大阪府箕面市).
- 19. 阿久津典子, "Crystal Dissolution in a Reaction- (Interface-) Limited Process on a Vicinal Surface with Self-Assembled Faceted Macrosteps",日本地球惑星科学連合 2019 年大会(2019 年 5 月 26 日 - 30 日、幕張メ ッセ、千葉市).

機械学習を用いた相界面における相互作用の解析

学習院大学・計算機センター・教授 久保山 哲二

1. 研究目的

本研究では「マルチスケール物理現象のデータ統合・解析技術の研究開発」の一環として、相界面に おける非線形現象のデータ駆動解析を行う。特に、半導体材料プロセスにおける気体-固体相界面での 物理現象や核融合プラズマ・実験室プラズマにおける電離気体(プラズマ)-固体相界面での物理現象に 対して、それぞれの相互作用の主要因を読み解くことを目的としている。具体的には、実験室プラズマ において計測された時空間データからの特徴的構造抽出に取り組み、上述の目的に役立つデータ駆動解 析手法の確立を目指す。

2. 研究方法

近年、流体解析分野において提案された時空間データ解析手法の他分野への適用が広がりを見せてい る。その代表的な手法である固有直交分解(Proper Orthogonal Decomposition, POD)は、瞬時場(各 時刻の空間データ)をサンプルとして主成分分析を行い、サンプルの分散が大きい軸の方向に対応した 幾つかの空間パターンに流体流れを展開する。しかし、POD ではサンプル間の時系列を考慮できてい ない。この問題は、最近活用が進んでいる動的モード分解(Dynamic Mode Decomposition, DMD)に よって解決される。DMD では瞬時場間の線形的な遷移を仮定し、時空間データを一定の振動数と増幅 /減衰率をもつ空間パターン(DMD モード)に分解する。DMD の典型的アルゴリズムでは、線形遷 移行列の固有分解に基づき次のように DMD モードを計算する。

$z_t = A^t z_0 = \Phi \Lambda^t \Phi^+ z_0$

ここで、 z_0 および z_t はそれぞれ初期時刻および時刻 tの瞬時場ベクトル、Aは線形遷移行列、 $A = \phi \Lambda \phi^+$ は行列Aの固有分解である。 ϕ は時刻によらない空間パターンのセットを、 Λ^t は時間発展のセットを、 $\phi^+ z_0$ は DMD モードの重ね合わせ係数のセットを表している。行列Aは、時系列データに最もフィット するように求められる。典型的な DMD ではモード数は時空間データ行列のランク数だけ算出される が、その数が膨大になると物理的解釈が困難になることが多い。そこで、重ね合わせ係数についてのペ ナルティ項を加えて最適化 (L1 正則化) することで、重要な少数のモードを選択するスパース動的モー ド分解 (Sparsity-promoting Dynamic Mode Decomposition, SP-DMD) が提案されている。

本研究では、実験室プラズマ(直線乱流プラズマ)の計測から得られた時空間データに対して、SP-DMD の適用を行った。データは 64ch の周方向プローブアレイにより 1 µ s 間隔で計測され、解析には 1ms の窓を用いた。すなわち、データ行列のサイズは時間方向に 1000、空間方向に 64 となる。

3. 結果と考察

図1(a)は計測されたイオン飽和電流の時空間パターンである。SP-DMD には正則化項パラメータあ

り、ここではモード数と再構成誤差のトレードオフを解析してパラメータを決定した。その結果、計測 データは7つの DMD モードに分解された。そのうちの3モードを図1(b)(c)(d)に示す。(b)のモード はドリフト波(周方向伝播構造)を示している。(c)のモードでは、特定の周方向において大きい振幅が 確認された。さらに、スライディングウィンドウ解析からは、その大きい振幅を示す周方向が変化して いく様子が確認され、周方向バンチング構造との関連が示唆された。これらの構造は、先行研究で報告 されていたストリーマー構造の特徴と整合している。また、(d)のモードは 1ms 以下の時間スケールで の減衰構造を示しており、乱流を通した非線形なエネルギー輸送による過渡的な励起との関連が示唆さ れた。



図1 (a) 計測パターン、 (b)(c)(d) DMD により抽出された特徴的パターン。

4. おわりに

本研究では、実験室プラズマの時空間データに SP-DMD を適用した。その結果、ドリフト波構造・ 周方向バンチング構造・短時間スケール構造といった特徴的構造の抽出に成功し、ストリーマー構造を 捉えるとこができた。今後は、半導体材料プロセスにおける相界面現象の時空間データ(ステップダイ ナミクス等)に対しても DMD 解析の適用を進める。また一方で、本解析では一定の成果が得られたが、 DMD は非線形な隠れ状態の発展に対して、その観測量に線形遷移の仮定を課している。これは強い仮 定であり、高い非線形性をもつ対象や状況によっては不適切である。そこで現在、線形遷移の仮定を課 さない時空間データ解析手法の開発を進めている。

5. 研究成果報告

発表論文

[1] Sparsity-Promoting Dynamic Mode Decomposition of Plasma Turbulence, Akira Kusaba, <u>Tetsuji</u> Kuboyama, Shigeru Inagaki, *Plasma and Fusion Research* **15** 1301001 2020 年 1 月

学会発表

- [2] DMD 法を用いた PANTA プラズマ乱流データの非定常解析,草場彰, NIFS 共同研究(研究会)
 「プラズマの複雑現象を対象としたデータマイニングの活用」 2019 年 12 月 12 日
- [3] スパース動的モード分解によるプラズマ乱流データの解析, 草場彰, <u>久保山哲二</u>, 寒川義裕, 稲垣滋, *第 36 回プラズマ・核融合学会年会* 2019 年 12 月 1 日
- [4] 動的モード分解におけるモード数低減手法の実験的比較,草場彰, <u>久保山哲二</u>, *人工知能学会第 110 回人工知能基本問題研究会* 2019 年 9 月 24 日
- [5] プラズマ乱流データの動的モード分解,草場彰, NIFS 共同研究(研究会)「プラズマインフォマテ

ィクス研究会」 2019年9月18日

6. 研究組織

研究代表者	久保山 哲二	学習院大学・教授
研究協力者	草場 彰	学習院大学・PD
研究協力者	稲垣 滋	応用力学研究所・教授
所内世話人	寒川 義裕	応用力学研究所・教授

沿岸海洋循環場の予測にむけた高解像度数値モデルとデータ統合手法の開発

海洋研究開発機構・付加価値情報創生部門 情報エンジニアリングプログラム プログラム長 石川洋一

研究の目的

沿岸海洋における海洋循環は複雑な地形に支配された小さなスケールのローカルな変動 から、海盆スケールの大きなスケールの影響をリモートに受けた変動までさまざまなスペ クトルを持つことがよく知られている。このような重層的なスケールにまたがる変動を高 精度で予測することは科学的に挑戦的な課題であるだけでなく、海運・水産など沿岸にお ける活動へ有益な情報を提供することができるので社会的にも重要な課題の一つである。 このような課題に対して本研究では、沿岸域を対象とした高解像度海洋大循環モデルの開 発および観測データと組み合わせたデータ同化手法の開発を行う。特に本研究では、沿岸 域において重要となる海流場を面的に観測することが可能な HF レーダーデータを有効活 用することを目的として、高解像度数値モデルと組み合わせたデータ同化手法や予測手法 に関する研究開発を行う。

研究の方法

本年度は、HF レーダーデータのデータ同化にむけた数値モデルとの比較および HF レー ダーデータのみから統計的な手法で短時間予測を行う手法、沿岸海洋循環場の統合的な予 測にむけた要素技術の開発を行った。

数値モデルとの比較としては、海洋研究開発機構が「東北マリンサイエンス拠点形成事 業」の中で開発している東北沖高解像度モデル(THK50)と海洋研究開発機構が津軽海峡東部 で観測を行っている HF レーダーデータの比較を中心のその他の観測データも併せてデー タ同化にむけた数値モデルの検証を行う。東北沖高解像度モデルの解像度はおよそ 1.7km であり津軽海峡の流れはある程度再現可能であることが期待できるとともに、海面境界条 件としては大気再解析データセット JRA55、側面境界条件としては海洋再解析データセッ ト FORA-WNP30 を用いることにより、現実的な条件での計算を行ったものであるので、観 測データと直接比較することが可能である。

また、津軽海峡東部 HF レーダーデータの解析をもとに、統計的な関係から数時間程度の 短期間予測を行う。これはいわゆるナウキャストと呼ばれている手法に類似するものであ り、時系列データセットに対する自己相関や移動平均を組み合わせることで時間的な外挿 を行うことで流速データの予測を行うものである。

42

研究の結果

沿岸域の流速場を解析するためにまず HF レーダーデータの調和解析を行い、潮汐成分 の分離を行うことを試みた。調和解析を行う際に分潮数やデータ期間などを変えながら最 小二乗法によって行ったところ、期間としては3ヶ月程度である程度安定した結果が得ら れ、8分潮の時の結果が4分潮にくらべ良いフィッティングが得られ、またこれ以上分潮 数を増やすと安定な解が得られないケースが増えた。そこで HF レーダーの各点での観測 値の時系列に対し3ヶ月毎に8分潮の調和解析を行い、潮汐成分とそれ以外の流動場を分 離し、潮汐成分以外の流速時系列に対し統計モデルを適用することにより、数時間程度の 予測を行うことができる手法を開発した。統計モデルとしては古典的な ARMA モデル(自己 相関移動平均モデル; Auto-Regression Moving-Average model)を用いて、その予測可能性を 調べたところ、潮汐周期よりも少し短い5~6 時間程度までは気候値・パーシステントモ デルと比べて高い予測性能を示したものの、それ以降では気候値と比べても同程度の予測 精度となってしまった。これは、海上風によって駆動される流れなど単純な時系列解析で は考慮されていない成分が重要になってくることによるものだと考えられ、モデルの拡張 が必要であることが示唆された。

一方で数値モデルを用いた予測にむけて HF レーダーによる流速観測との比較の結果で は、季節変動など比較的ゆっくりとした大規模な変動については数値モデルがよく再現で きているので、データ同化による初期値化により1ヶ月程度の予測が可能ではないかとの 結果が示されたが、より短く細かな津軽海峡内の暖流変動などはその流動構造・変動特性 などが観測とモデルで異なっており、数値モデルの解像度向上などの改良の必要があるこ とが示唆された。

まとめと今後の課題

今回の解析結果を踏まえ、6 時間以内の変動予測および季節スケールでの津軽暖流の概 観については既存の技術の応用である程度再現・予測ができそうな見込みが見られてきた。 一方でその間の変動についてはさらなる研究開発が必要であることが明らかになってきた。 今後は、まず統計モデルを拡張する形で半日から 1,2 日程度の海峡内の詳細な変動予測に 挑戦するとともに、その先の予測についてもデータ同化手法の改良と併せて取り組んでい きたい。

研究組織

石川洋一(代表) 情報エンジニアリングプログラム・プログラム長 レーダーデータ の解析および研究のとりまとめ

佐々木英治 アプリケーションラボ・気候変動予測情報創生グループ・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・気候変動予測情報創生グループ・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・北極域気候変動予測研究グループ・グルー プリーダー モデル計算および解析 平成 31 年度(令和元年度) 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・温度の空間・位相分解計測 Phase and space resolved measurements of electron density and temperature in a linear helicon plasma

令和2年2月29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

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。プラズマの詳細な構造、例えば電子密度や温度の詳細な 空間変化や周期的揺らぎ、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する。プラズマの径方向分布については申請者らによる100 点以上の計測点、かつ高い精度でのトムソン散乱計測により、電子密度・温度のわずかな空 間勾配の変化が明らかにされつつある。詳細な径方向分布計測(空間分解計測)に加え、プ ラズマの特長的周期での位相分解計測を行った。プラズマソースと輸送についての考察を 深めるため、拡散係数や電離周波数、電子圧力の径方向分布、圧力依存性を求めた。

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。

トムソン散乱計測における視野範囲(レーザー進行方向における計測範囲)や波長分解能、 絶対波長較正、絶対密度校正を行うため、窒素ガスからのレイリー散乱および回転ラマン散 乱スペクトルを計測した。図5にその結果を示す。



図 5. 窒素ガスからのレイリー散乱および回転ラマン散乱スペクトル計測

実験結果と考察

レイ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。

r>30mm では電子温度が低く、中心部で生成されたプラズマが、周辺部に拡散していると考 えられる。得られた密度や温度分布から、生成源や輸送を考察するため、磁場に垂直および 平行方向の両極性拡散係数を求めた。(図13)



 $D_{A\perp} \sim 10^{-3} \sim 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ $D_{A//} \sim 10^2 \text{ m}^2/\text{s}$ $D_{A\perp} << D_{A//}$

両グラフの縦軸の値は 大きく異なるので注意。

拡散係数は以下の式から導出した。

磁場に平行方向の両極性拡散係数:D_{A//}

$$D_{A//} \sim D_i [1 + (T_e/T_i)]$$

磁場に垂直方向の両極性拡散係数:D_A」

$$D_{A\perp} \sim D_{e\perp} [1 + (T_i/T_e)]$$

 $D_{e\perp} \sim D_e [1 + (\omega_c/\nu_{me})^2]^{-1}$
 $D_e = kTe/m\nu_{me}$ 磁場なしの拡散係数

図 13. 磁場に垂直及び平行方向の拡散係数



電離周波数の算出方法: <u>Bolsig</u>+(Boltzmann eq. solver)を用いて 計算。電子分布はMaxwellianだと仮定 してrate coefficientを算出後、ガス密 度・電子密度を乗じてionization freq.と した。

高い電離周波数がある径方向範囲は、 r=30mmまで(600Gaussの場合)。磁場 が強くなると、高電離周波数領域は、 明確に狭くなる。(r=15mm@1500Gauss)

図 14, 電離周波数と電子圧力

ソースおよび輸送の考察のため、電離周波数を求めた。併せて、電子圧力(ne×Te)も示す。 どの圧力においても、r=30mmを境に、電離周波数に大きな変化があることがわかる。

今後の課題として、追加計測が実施できなかった、詳細な位相分解計測や、ne, Teの勾配長の考察がある。

論文および学会発表

無し

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、高風速時の風波の発達過程および風波気液界面を通しての運動量輸送機構の解明を行 った.

・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、ループ法を用いない場合の、高風速下 における、風波の発達過程および風波気液界面を通しての運動量輸送機構の解明を行った.

・実験方法および実験結果

表1に、昨年度の風波水槽改造により得られた最高風速の変化の程度を示す.表より、海上風速に換算 した場合に風速23m/sから37m/sに増速することに成功したことが分かる.図1に、テストセクション入り 口部での、主流方向平均流速の鉛直方向分布を示す.図中において、赤および黒プロットは、それぞれ整 流部に気流安定化装置を設置する前後の値である.図より、整流部に気流安定化装置を設置したことに より、側壁部(z=0mおよび0.7m)近傍における境界層の発達を抑制できていることが分かる.さらに、 このような最高風速までの風速レンジにおいて、差圧測定を行った.図2a、2bにそれぞれ、上流測定点に おける圧力P1、下流測定点における圧力P2、大気圧P0に関する差圧とファン回転数の関係を示す.図2aよ り、ファン回転数が増加するに従い、つまり風速が上昇するに従い差圧は増加し、また、吹送距離が長く なるに従い差圧は減少することを示している.さらに、ファン回転数が1000回転あたりから、差圧の風速 依存性が変化していることが分かる.これは、高風速において風波の発達の傾向が変化し、運動量輸送量 の風速依存性が変化している可能性を示唆している.図2bより、ファン回転数が増加するに従い、つまり 風速が上昇するに従い差圧は増加し、また、吹送距離が長くなるに従い差圧は減少することを示してい る.これは、風波水槽内の気流がファンにより加圧されていること、また、風波水面や水槽内部壁面にお いてエネルギを損失するために、徐々に圧力が低下する様子を示している。今後は、風波気液界面を通し ての運動量の高精度測定法を確立することが重要である.

61

・成果報告(論文、学会発表リスト等)

- 1. 高垣直尚,招待講演,台風下の海水面を通しての運動量・スカラ輸送現象,第2回先進的ながれ研究 会,京都大学 吉田キャンパス,2019年8月24日
- 高見健大朗,高垣直尚,高風速下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,同志社大学,2020年3月10日

・研究組織

- 研究代表者:高垣直尚
- 研究協力者:鈴木直弥
- 研究協力者:高畑俊作
- 研究協力者:大西天真
- 研究協力者:高見健大朗
- 研究協力者:田中健太
- 研究協力者:合田総一郎

Tuble II. While Velocity.				
	N	U_∞	U_{10}	
	[rpm]	[m/s]	[m/s]	
Takagaki et al. (2017)	1300	14.0	22.8	
Present study	1700	22.2	36.8	

Table 1: Wind velocity.

Fig. 1: Comparison of the maximum values of the fan rotational speed N, freestream wind speed U_{∞} , and 10-m height wind speed U_{10} at x = 0 m, measured in the present study with those measured by *Takagaki et al.* (2017).



Fig. 2: Vertical distribution of streamwise wind speed at x = 0 m (N = 600 rpm).
•: before setting the settling chamber and •: after setting the settling chamber.


Fig. 3: Relationship between rotational speed N and differential pressures (a) $P_1 - P_2$, (b) $P_2 - P_0$. P_0 : atmospheric pressure, P_1 : upstream pressure, P_2 : downstream pressure.

パーセルモデルによる LSC の生成過程の解析と CPS ゾンデによるその観測

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 Clouds (LSC)を、パーセルモデルと地上観測データを用 いてその性質を明らかにすることである。LSC は薄い巻雲の一種ではあるが、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。Iwasaki et al. (2019)では、岡本創九州大学教授らが開発した CloudSat と CALIPSO のデータ を複合的に用いた A-train 解析プロダクトを用い、LSC の雲粒の半径と個数密度は 50 µ m 以上で 10/L 以下であることや、LSC が過冷却の水雲と共存しにくく水平オリエンテーションをした氷雲とは共存し やすいことを示した。この結果は、LSC の雲粒が過冷却の氷雲に落下しそれを氷雲に変質させているこ とを示唆している。しかし、衛星観測だけでは、LSC がどのように発生しているのか理解することがで きない。そこで、本研究では、過去に行った LSC の地上観測の結果を説明できる LSC の生成過程を数 値実験で求めた。

観測結果

図1は2018年3月22日に北海道陸別町で行った Cloud Particle Sensor 搭載ゾンデ(CPS) とライダ の同時LSC 観測の結果である。厚さ1km の過飽和の層の下にLSC があることが分かる。CPS は1秒 ごとに計測される雲粒の個数から雲の個数密度を計測するが、個数密度が低くデータは1秒ごとに計測 されることはなかった。そこで、帰無仮説を「(おそらく風船に付着しているタルクによって) 成層圏で 計測される信号の頻度で対流圏でも粒子が計測される」とし、これを二項検定で有意水準 1%以下で帰 無仮説を棄却した場合のみを雲と判定した。



2018年3月22日に行っ 図 1 た(左) CPS と(右) ライダの 同時観測。CPS は 00:46 に放球 した。 高度 10-11km の対流圏界 面に氷に対し過飽和の層 (RH_i>100%) がある。高度 6-10km において、雲粒子の個数 はほぼ 10 個/L 以下、CPS やラ イダの信号から氷粒子と考えら れるが、氷に対しては未飽和で あった。ライダの信号から 1.4m/s で氷が落下しているよ うに見える。これは球形粒子な ら半径 130 µm の落下速度に対 応する。



図2 高度 10km の過飽和の層を 1km 落下させた 時の球形粒子または非球形粒子が落下にかかる 時間と粒子の半径。初期条件として、氷晶核から 半径 1µm の粒子形状を球形または非球形の氷粒 が生成したと仮定し、その個数密度を 1/L と 10/L とした。非球形粒子の終端速度は Heymsfield et al. (2013)を用いた。また、最初の氷に対する相対湿 度を 105%から 140%まで 5%間隔で変えた。粒子 は昇華によって成長をしている。

解析結果

解析には開発した鉛直1次元の超水滴法を用いた。超水滴法とは、1つ1つの粒子の大きさや位置を 計算していく方法である。よく用いられるビン法と異なり、連続的に粒子を取り扱うことができる。た だし、雲粒子をすべて計算することは個数が多くあまり現実的ではないので、計算上の1つの粒子で実 際の多数個の粒子を代表させる。

図 2 は、図 1 のように高度 10km の過飽和の層を 1km 落下させた時の球形粒子または非球形粒子が 落下にかかる時間と落下し終えたときの粒子半径である。上昇気流は無視した。計算の結果、球形粒子 では初期の氷に対する相対湿度 (RH_{i,init}) が 140%でも半径 50 μ m 以上の LSC 粒子になれなかった。不 規則形状粒子でも RH_{i,init} が 140%といった高い氷過飽和でなければ LSC の大きさになれないことが分 かった。この場合でも 1km 通過後には RH_i が 1 個/L では 129%前後、10 個/L では 102%と過飽和がす ぐに解消されることが分かった。また、RH_{i,init} が 105%であるとすると、不規則形状粒子でも 1km 落下 する間におよそ 30 μ m までしか成長できなかった。

これらの結果は、上昇気流によって LSC が生成され続けることを示唆する。つまり水蒸気が常に下 層から供給され続け、LSC 粒子の大きさまで粒子を成長させる時間が稼げるほど終端速度を遅くさせな ければならないことが分かった。

成果報告

論文

Iwasaki, S., T. Seguchi, H. Okamoto, K. Sato, S. Katagiri, M. Fujiwara, T. Shibata, K. Tsuboki, T. Ono, T, Sugidachi, 2019: Large-and-Sparse-particle Clouds (LSC): Clouds which are subvisible for spaceborne lidar and observable for space-borne cloud radar, Polar Science, https://doi.org/10.1016/j.polar.2019.05.003.

学会発表

- 岩崎杉紀、藤原正智、杉立卓治、柴田隆、内野修、宇賀神惇、森野勇、岡本創、坪木和久、小野貴司、 CPS ゾンデ・ライダの同時観測による粒形大きく個数密度少ない氷晶雲の生成過程の研究、日本気 象学会春季大会、東京、2019 年 5 月 16 日。
- Seguchi, T., S. Iwasaki, M. Kamogawa, T. Ushiyama, and H. Okamoto, An Observational Study of Jumping Cirrus with Ground-based Visible Cameras, 27th International Union of Geodesy and Geophysics General Assembly, Canada, 09 July 2019.
- Seguchi, T., S. Iwasaki, M. Kamogawa, T. Ushiyama, and H. Okamoto, An Observational Study of Jumping Cirrus with Ground-based Visible Camera and X-band Radar. 39th International Conference on Radar Meteorology, Nara, 17 Sep. 2019.

Seguchi が筆頭著者のものは、2016-2018 年度に共同利用で支援して頂いた成果。

海洋レーダーの運用と航行安全への利用

研究の目的

宮崎県水産試験場では、漁業者の操業の効率化を支援するため、漁 場の形成や操業の成否を左右する海況情報を高度漁海況情報サービス として提供している。令和元年からは、新たに「海洋レーダー」によ る流れと波高の情報提供を開始した。特に、「海洋レーダー」の波高情 報は、海の時化の状況を陸上で確認出来ることから、出漁判断の材料 となり、航行の安全に寄与することが期待される。本報では、宮崎県 が運用する「海洋レーダー」の概要及び水産業での利用と、航行安全 への利用について紹介する。

2. 「海洋レーダー」の概要と水産業での利用

宮崎県の海洋レーダー(13MHz帯)は、平成 30 年度に日向市美々 津(美々津局)と宮崎市郡司分(宮崎局)にそれぞれ整備し(図1)、 平成 31 年 4 月から、日向灘沖合 100km までの一時間毎の流れと波高の 情報配信を開始した(図 2)。水産業での海洋レーダー情報の活用につ いては、漁場形成の指標となる潮目情報や、速い潮流により網上げ作 業ができない大型定置網の急潮指標として活用できる可能性も示唆さ れた。

3. 「海洋レーダー」情報の航行安全の利用

日向灘で発生した小型漁船の海難事故を調べた既往知見(荒木ほか、 1963)によると、海難の大多数は風浪によるもの、近海の台風が存在

する時に加えて、低気圧や前線の接近時に、海難事故の発生が多くなっ ていることが報告されている。そこで、海洋レーダーの波高情報が、航行安全や出漁判断の材料として 活用できないか検討した。

まず、台風通過時の高い波高時に、海洋レーダーで計測された波高の精度を検証したところ、実用的 な精度で計測できていた(図 3)。次に、県北の中型まき網船が出漁した時と出漁しない時の有義波高を 比較した結果、波高 1m 前後が両者の境界であることが判明した(図 4)。海洋レーダーの波高情報に出 漁可否情報を加えることにより、船上や陸上から出漁可能な漁場や安全航行の判断材料として利用でき る可能性が示唆された(図5)。

4. 今後の展望と課題

水産利用を目的とした海洋レーダーの運用は全国初であり、水産試験場では、県内漁業者を対象とし て、普及活動と潜在的ニーズの把握に取組んでいる。一方、海洋レーダーの情報は、フェリーの航行安 全など海事産業にも広く活用できる可能性もあることから、他産業への周知も今後必要になってくると



図1 海洋レーダー局の写真



図2海洋レーダーの流れ情報

考えている。



図3 有義波高の時間変化(2019年8月)



5. 論文等 なし

6. 研究組織

代表者	宮崎県水産試験場	主任研究員	渡慶後	欠 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2年生	池原	日向
協力者	宮崎県水産試験場	技師	堀江	ひかり

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 海洋生物資源学部 兼田淳史

【研究の目的】

日本海沿岸では急潮と呼ばれる突発的な強流が発生するこ とがあり、定置網漁場で甚大な被害を及ぼしてきた。そのため、 九州大学が開発した高解像度モデル(DREAMS_C)やリアルタイ ムブイを利用した新しい急潮対策の研究が各地で進められて いる。本研究は若狭湾を研究対象エリアと設定し、急潮の特徴 の解明や新しい急潮対策の開発を目的として実施した。

【観測およびデータ解析】

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)。2019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。 また、急潮発生時の流れの時間変化の検討では、九州大学応用 力学研究所が開発した日本海沿岸高解像度モデルを用いた。



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.

解析にあたり本研究では流速が 50cm/s を超える突発的な強流を急潮と定め、2019 年度に新たに若狭 湾で取得された観測データや高解像度モデルの計算結果を用い、同年に発生した急潮の特徴や急潮対策 の改善方法について検討を進めた。

【結果および考察】

図2には、敦賀半島先端付近の丹生定置網漁場(図1参照)で取得した流れのデータおよび台風や低 気圧が襲来した日を示している。図から、8月以降は台風や低気圧の通過に伴い強流が繰り返し発生し ていたことがわかる。実際、漁業者からの聞き取り情報から、網の破損といった直接的被害や被害防止



図 2. 2018 年 5~10 月の丹生定置網漁場における流れの時系列

や被害修復のための休漁期間が発生するなど、定置網漁の 経営にとって難しい年であったことを把握している。なか でも台風10号と19号は複数の定置網で漁具被害を引き起 こしたため両台風の通過時の海況を分析したところ、当時 の海況の特徴は異なっていたことがわかった。

台風10号は8月15日に風速30m/sを超える強烈な南風 を伴いながら若狭湾に近づき、図2が示すように丹生定置 網では一時的に流速が50cmを超える南西方向の強い流れ が発生していた。また、図3に示した台風が通過した当時 の高解像度モデルの計算結果をみると、数値モデルは敦賀 半島の先端付近において南西方向の強い流れが局所的に 発生していたことを示した。これらのことから、このとき の定置漁具被害は急潮によるものと考えられた。

一方、台風 19 号は 10 月 12-13 日頃、若狭湾から遠く離 れた三陸沖を北上した。台風の勢力は非常に強かったもの の、図2をみて分かるように丹生定置網の流れは弱く、そ のときの高解像度モデルの結果も定置網に被害を及ぼす ような強流の発生を示さなかった。定置被害の要因は急潮 ではなかったため他の要因を調べたところ、台風通過時は 若狭湾の湾口にあたる経ヶ岬で「観測史上最大」となる 11.6mの有義波高が計測されており、丹生定置に設置した リアルタイム観測ブイも最大波高 5.65m を記録した(図 4 参照)。このことから、被害当時は高い波によって網全体 が水中深くに沈み、定置網を固定するロープ等の耐用条件 を上回る強力な張力が作用し、漁具が破損した可能性があ ることがわかった。現時点では急潮対策として波の予報を できる仕組みはないが、今後も当海域の定置網漁業に対す る波の影響や、波情報を設けたときの有効性について検討 する必要がある。

Bckgr: Mag of Sea Current at Model Level [m/s]+Sea Current at Model Level [m/s]



0.04 0.09 0.13 0.17 0.21 0.25 0.29 0.34 0.38 0.42 0.46 0.50 0.55 0.59 0.63 0.67 0.71

図3 台風10号が接近した8月15日の 高解像度モデルの計算結果.丹生定置網 がある敦賀半島先端付近で急潮が発生 することを示している.



図 4. 丹生定置のリアルタイム海洋観測 ブイが計測した最大波高.

【関連の成果発表(シンポジウム発表)】

「福井沿岸域の定置網漁場における IoT 活用」,兼田淳史ほか,「人、環境にやさしい「海からの情報づくり」」,日本水産学会・水産海洋学会日本海研究集会共催シンポジウム,2019年9月.

【研究組織】

【研究代表者】	福井県立大学海洋生物資源学部	兼田	淳史
【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

多数ソリトン波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層流体を対象とした内部ソリトン波の共鳴に関する検討の結果、O-typeと(3412)-typeが卓越する場において、critical depth が共鳴の抑制要因になっている可能性が分かった.その後、多数波の共鳴を対象とするため、まずは単層流体である表面波に関するソリトン共鳴の解析を行い、4 波の干渉により発生する特殊な共鳴状態を示すことができた.その結果、多数のソリトン波が与えられる場合に関して適用できる可能性が示されたが、本当に多数のソリトン波に対して適用できるかは不明である.そこで本研究では、6 波の干渉により発生する特殊なソリトン共鳴を調査・検討し、多数のソリトン 波による共鳴現象へ適用できる理論を構築することを目的とする.6 波によるソリトン共鳴の解析には、強非線形強分散内部波方程式を利用した数値計算を実施する.理論的な解析には、KPII 方程式のソリトン解を利用し、数値計算結果との比較検討を行う.

研究の方法

多数の内部ソリトン波の干渉解析を最終目的とし、まずは干渉する 6 つの表面ソリトン 波を対象とし、後方に発生する共鳴現象を検討するため、以下の研究項目を実施する.

- 6 つのソリトン波による共鳴現象を対象とするため、3 つのソリトン波を斜め境界に向かって進行させ、その共鳴現象を解析する.再現計算には、強非線形強分散内部波方程式を利用し、上層を空気、下層を水として扱う.
- 2. 強非線形強分散内部波方程式により再現された 6 波によるソリトン共鳴現象を理論的 に解析するため, KPII 方程式から得られる解を利用し,多数波による共鳴現象を再現 できる理論を提案する.

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) 複数のソリトン波が干渉する際, 過去の 2 波の干渉と同様に, 入力波として与えられ るソリトン波同士の干渉は, O-type もしくは(3142)-Type に分類されることが確認さ れた.
- (2) 入力波の共鳴が O-type である場合,反射波と入力波の共鳴は全て O-type であること が示された. 徐々に振幅が小さくなるようなソリトン波群を対象としても,全て O-type

であることが分かった.

(3) 入力波の共鳴が(3142)-type である場合,入力波の振幅が同じ場合においてのみ,反射 波と入力波の共鳴が(3142)-type および O-type となることが分かった. (3142)-type の 発生は,入射角度が小さく,κ < 0.06に限られることから,基本的には O-type である ことが示された. 徐々に振幅が小さくなるようなソリトン波群を対象とした場合,全て の反射波と入力波の共鳴は O-type であることが分かった.

研究成果報告

東川真也,藤田一郎,中山恵介,谷 昂二郎,粗配置桟粗度上の浅水流で生じる三角状水面 波列の共鳴特性について,土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.75, No.5, pp.I_445-I_450 (2019)

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

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 (Autonomous Underwater Vehicle : 自律型海中ロボット)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能が求められる 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

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



Fig.2 小型 AUV

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。

実海域で用いるAUVの試験は,実験施設や母船を使用できる機会が限定的であるため, 自律型海中ロボットの自律性能の向上を目指して,小型の水槽でも比較的容易に実験が できる小型 AUV の設計・開発を進めている。本研究では,Fig.2 に示す小型 AUV の潜航 性能を明らかにするための性能試験を実施する。

72

□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。2018 年度 の水槽試験では、遠隔操縦(ROV モード: Remotely Operated Vehicle)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ているので、今年度は完全自動で潜航ができるように改良を行い、その 自律性能を確認した。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、本機体が完全自動制御によって潜航できることが明らかとなった。 この水槽試験を経て、12 月中旬に鹿児島湾において実海域試験を実施し、完全自動での 潜航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 ℓ
Cruising speed	0.17 m/s
Maximum operational depth	1,500 m

Table 1 Specifications of KAUBE-1500.



Fig.3 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

また,小型 AUV の仕様を Table 2 に,潜航試験の様子を Fig.4 に示す。水深 7m での 耐圧性能を確認するとともに,深度計をはじめとするセンサーの校正を行い,スラスターに よる潜航ができることを明らかにした。

Length	1.3 m
Breadth (wing span)	0.52 m
Height (including upper rudder)	0.15 m
Diameter of fuselage	0.15 m
Mass	$16.95~\mathrm{kg}$
Displacement	16 l

Table 2Specifications of small AUV.



Fig.4 小型AUVの潜航試験の様子

この小型 AUV は, 2019 年 10 月 19~20 日に北九州市立浅生スポーツセンターで開催 された第 7 回水中ロボットフェスティバル (水中ロボフェス 2019) に出場した。その後, ROS (Robot Operating System) での制御プログラムを開発し, ライントラッキングや ゲート通過, ブイタッチ, マットランディングなどのミッションを遂行できるようになって いる。

□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
宮澤 佳奈	大阪府立大学大学院	修士1年生	小型 AUV の水槽試験
竹川 源太郎	大阪府立大学	学部4年生	小型 AUV の制御性能評価
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

ハイブリッド式自律型海中ロボットKAUBE-1500に関する研究成果は,共同研究先との協議により,現在,知的財産権の関係(出願準備中)で公表を見合わせています。

小型AUVの研究開発については、下記の卒業論文に纏めています。

竹川源太郎:自律性能評価のための小型AUVの研究開発,2019年度大阪府立大学 卒業論文(工学域海洋システム工学課程),2020.

以上

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、ラダー付き垂直尾翼やスラスターが 取り付けられた円盤型水中グライダー模型を使用 して深海機器力学実験水槽において滑空中の針路 保持試験、潜航浮上を繰り返す滑空航行試験、浮 上中の船首方位変更制御試験、総合性能評価試験 を実施した。また、海洋観測装置・ウインチ・水 中データ通信システム・水中ロボットなどについ て情報収集を行う予定であった。

2. 円盤型水中グライダー模型の概要

す。



円盤型水中グライダー模型の外観・構造を Fig.1 に示

Fig.1 円盤型水中グライダー模型の外観・構造

2. 円盤型水中グライダー模型の滑空航行試験

Fig.2 にビークルが潜航深度 4 m に達した時点で x-軸方向の重錘位置を $\delta_{mx} = -55$ mm・浮力調整体積 $\delta_{\nabla} = 165$ cc としてビークルを上昇させ、ビーク ルが潜航深度 2 m まで上昇した時点でx-軸方向の重 錘位置を $\delta_{mx} = 35$ mm・浮力調整体積を $\delta_{\nabla} = -165$ cc としてビークルを下降させる動作を繰り返した場 合の試験結果を示す。上昇率が下降率とほぼ同じに なるように錘の移動距離を設定している。針路(船 首方位)維持制御は数学モデル(運動方程式)を基 に設計される線形コントローラである LQ制御によ っている。針路維持性能が良好で、鋸歯状の下降・ 上昇の繰り返しによる航行(巡航)に成功している ことがわかる。また、計算結果が実験結果と良く一 致していることからシミュレータ(運動方程式や流 体力係数の値)の精度が良好であることがわかる。



Fig.2 円盤型水中グライダー模型の滑空航行

3. 浮上中の円盤型水中グライダー模型の船首方位 制御試験

船首方位制御試験結果を Fig.3 に示す。図は上から順に横揺れ φ 、縦揺れ θ 、船首揺れ(船首方位) ψ 、スラスター推力 F_T で、青線が実験結果、赤線が計算結果を示している。t = 10 sec において 90 度回転

のステップ指令が与えられている。使用したコント ローラは PID コントローラである。滑空中の針路 (方位)制御はロールとの連成が強いため LQ 制御 などの多入力多出力制御が非常に有効であったが、 水面浮上時の船首方位制御はビークルの回転とそ れ以外の運動の連成が小さいため、簡易な PID 制御 を採用した。また、スラスターの最大回転を使用し てビークルをできるだけ早く目標値まで回転させ たいため、I 動作(積分動作)は使用していない。 スラスターの最大推力が想定より小さかったため 整定までに時間を要しているが、最大推力を使用し てほとんどオーバーシュート無く 90 度の回転に成 功している。また、計算結果は実験結果と良く一致 している。



4. 株式会社 東陽テクニカにおける情報収集

2020年3月18日、株式会社 東陽テクニカ(東 京都中央区)を訪問し、水中ロボット・マルチビー ム測深機・音響測位装置・地層探査装置・水中デー タ通信システムに関する情報を収集する予定であ ったが、新型コロナウイルス感染症拡大防止のため 中止となった。

5. 株式会社 鶴見精機における情報収集

2020年3月19日、株式会社 鶴見精機(神奈川 県横浜市鶴見区)を訪問し、プロファイリングフロ ート (Deep NINJA)・海洋観測装置・ウインチなど に関する情報を収集する予定であったが、新型コロ ナウイルス感染症拡大防止のため中止となった。

6. 研究組織

・研究代表者

森井康宏(長崎大学水産学部)

研究協力者
山脇信博(長崎大学水産学部)
清水健一(長崎大学水産学部)
木下宰(長崎大学水産学部)
内田淳(長崎大学水産学部)
八木光晴(長崎大学水産学部)
青島隆(長崎大学水産学部)
合澤格(長崎大学水産学部)
6澤格(長崎大学水産学部)
眞角聡(長崎大学水産学部)
保科草太(長崎大学水産学部)
中村昌彦(所内世話人)、野田 穣士朗
(九州大学応用力学研究所)

洋上や海中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

研究プラットフォーム運用開発部門

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・行動形態が求めら れるようになってきた。本件では、水中光無線通信を用いることで水中ロボットによる他 装置との無線大容量通信が可能となる。このため、高輝度半導体レーザーを用いた全周囲 型の光送信モジュールを実現することを目標としている。

試験内容:

全周囲の通信エリアは光ファイバを複数配置することで実現する。受光ファイバ、発光 ファイバそれぞれ1つの通信エリアを確認することで、全周囲通信エリアに必要な通信エ リア設計情報を取得できる。本試験では、受光ファイバ、発光ファイバの通信エリアを水 中双方向通信により計測した。

この結果、受光ファイバ、発光ファイバの通信エリアについて設計通りの通信が可能で あることが確認できた。



図1 基地局(写真奥、緑色一点のみ発光状態)と移動局(手前側、青色発光状態)

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、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.(年齢は2019年4月1日付) 研究代表者:根田昌典:京都大学大学院理学研究科 助教 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

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、従来取り組んできたうね りと風波の分離観測の解析に加え、波浪と海表面乱流の同時観測を試みた.まず、2016年5月24日に 和歌山県田辺湾に設置されている田辺中島高潮観測塔(京大防災研)近傍で行った観測データを用いて 初期解析を行い、手法の信頼性を確認した.その後、2018年10月17日から18日にかけて実施した新 青丸研究航海 KH-18-13「海底地震計・陸上同時連携観測による黒潮域の大気・海洋短周期変動過程の 実態解明(代表小松幸生東大 AORI 准教授)」において、紀伊半島南方海域において波浪観測と同時に 実施した.今年度はさらに、2019年7月28日に松山沖において市川准教授とともにドローンを用いた GNSS 反射信号観測と Vector 観測の同時観測を実施した.また、長崎大学練習船長崎丸(2019年10 月18日-20日)に乗船し、豊後水道において高波高時の Vector 観測を試みた.

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た. Vector で取得されたデータは浮体に装着して いるため、その姿勢が常に変動するとともに姿勢変化の平行移動成分と回転成分によって見かけ上の流 速を含む.本研究では、観測された流速からこれらの影響を除去するために、Edson et al. (1998)によ る船上での渦相関観測手法を応用して、以下の式に従って地球座標系における真流速値を回復した.

 $V_{true} = TV_{obs} + \boldsymbol{\Omega} \times T(\boldsymbol{M} - \boldsymbol{S}) + V_{mot}$

ここで、V_{true} は真流速、V_{obs} は観測された流速、 V_{mot} は回転による見かけ上の接線流速、T は姿勢変 換行列、*Q*は Vector の角速度、*M-S*は IMU を起点 とする流速観測点の位置ベクトルである.各成分の 例を図1に示す.

白浜観測では,浮体に付けて姿勢が変化する状態 と観測塔から吊下げて水面に対してほぼ静止した状 態での観測結果を比較することで姿勢補正の手法の 妥当性を確認した.回復した真流速は波浪周期に対 応した流速変動と高周波数の流速変動成分が明瞭に 見られる.その後の実海域観測では,この方法を用 いて海面直下1.4mの62.5Hzでの3次元流速変動を 復元した.波浪に伴う流速変動とともに高周波流速



図1:真流速回復のための各成分(白浜観測におけるバースト26 の例). 横軸は時間(秒), 縦軸は流速成分. それぞれ観測流速 の姿勢変換(黒線), センサーの平行移動成分(破線), センサー の回転による成分(点鎖線)を示す.(上)北向き成分と(下)鉛直 成分を示す.

変動を得ることに成功した.同時観測した波浪 スペクトルと比較すると,回復した流速の周波 数領域では水位変動周期(0.1Hz 周辺)のピー クとおおよそ 0.5-10Hz における散逸領域とし て現れる(図 2).流速変動成分は波浪スペクト ル観測に現れた 2 つのピークを反映しており, 水面下の流速変動を正確に評価できていると考 えられる.

今年度に実施した松山沖の GNSS 信号との同 時観測では,海況がきわめて静穏であったこと から残念ながら波浪と GNSS 信号の関係につい ての有効な情報は得られなかった.しかし,このよ うな変異の小さい状況下においても非常に弱い水 位変動に伴う流速変化を捉えることができた.この ことは流速復元手法が精度良く行われていること の証左となる.また,長崎丸において実施した観測 では,回復した流速に断続的に不連続なジャンプが みられた(図3).これは観測設定項目における観測 流速レンジが実観測データに対して小さい時に現 れる現象である.今回は流速レンジを±1ms⁻¹と設 定したが,波高が高い場合は背景場の流速変化が大 きくなる可能性があり,レンジを超える流速が観測 された可能性が高い.波浪に伴う乱流観測を有意に



図 2:新青丸航海で観測した真流速のパワースペクトル密度.(左)鉛 直流速と(中)水平流速を示す.傾きが-5/3の直線が図中に挿入さ れている.右図は GPS 波浪ブイから得られた 2次元波浪スペクトルを 示す.



解析するためには、初期のデータ処理において観測された流速データに見られるこのような突発的なジャンプをより強力に修正する必要があることが分かった.また、長崎丸観測時には観測中一旦観測ブイを引き上げ、Vector 流速計の深度を変更して連続して再投入する観測を試みたが、再投入後2分程度でブイが転覆する事態となった.その間の観測データは得られたが、異なる深度での流速スペクトルの差異を議論するためのデータとしては不十分であり、観測システムの改善を含め今後の課題となった.

本研究の成果を含む研究発表

口頭発表・ポスター発表

- Kaoru Ichikawa, Takuji Ebinuma, Takuji Okumura, Masanori Konda, Yasuyuki Baba (2019): GNSS-R altimetry using a Geostationary Satellite, JPGU2019, MTT46-P03, 27, May, 2019, Chiba, Japan
- 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,小松幸生(2019):波浪に伴う海面直下の3次元流速変動の高周波数観測,2019年度日本海洋学会秋季大会,2019年9月27日,19F-10-P1,富山市
- 田中千晶,鈴木直弥,高垣直尚,根田昌典,(2019):風波水槽での大気・海洋間運動量輸送における表層流の影響の検討に向けた初期実験,海洋理工学会2019年度秋季大会,京都大学楽友会館,2019年11月20日,京都市
- Chiaki Tanaka, Naoya Suzuki, Naohisa Takagaki, Satoru Komori, Yuliya Troitskaya, Alexander Kandaurov, Maxim Vdovin, Masanori Konda, (2020): Effects of the sea surface current on the growth of wind wave in laboratory experiment, Ocean Sciences Meeting, Feb., 19, 2020, San Diego, CA, USA

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伊予灘と豊後水道の海洋構造と物質輸送に大きな影響を 与えていると考えられている. 急潮と底入り潮の消長には潮汐混合が関連することが示唆されているが, 瀬戸内 海と豊後水道の潮汐混合の実態には不明な部分が多い. そのため, 応用力学研究所との共同利用研究によっ て瀬戸内海・豊後水道において乱流観測を実施し, これまで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過程に注目してきた. 2019 年度は伊予灘における乱流観測データを拡充するとと もに, サンドウェーブ域におけるエネルギー散逸と海底抵抗間の関係を検討した.

研究内容

2019 年 6 月 3~5 日 (大潮期)と10-12 日 (小潮期)に愛媛大学沿岸環境科学研究センター研究船「いさな」を 用い伊予灘において乱流計測を実施した. 佐田岬半島北部の伊予灘に設定した 18 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, 乱流強度の指標であ る乱流運動エネルギー散逸率 *ε* と流れの断面観測を行うとともに, 海底に急峻なサンドウェーブが発達する測 点 I7s 付近において, 憩流時から流れが極大になるまでの約 6 時間に時系列観測を行った. 結果

6月3日に実施した北部断面(測点 I5-I8, 図 1)の観測結果を図2に示す. 憩流頃に測点 I5 から観測を始 め, I7 地点付近で下げ潮が最大となる潮時を迎えた. 観測時は I5 付近において底部冷水構造が見られるととも に、断面西側では潮汐混合により成層が弱くなる潮汐フロント構造が見られ、夏季伊予灘の典型的な成層構造 であった. 測点 I7 付近では、海底で発達するサンドウェーブに対応するように 10⁻⁶~10⁻⁵ W kg⁻¹ の極めて強い 乱流エネルギーの散逸が捉えられた. このようなサンドウェーブ上での強い乱流混合の発生は、南側の断面観 測においても、また小潮時における観測でも同様に見られた. 測点 I7s において実施した約6 時間の時系列観 測からは、半日周期潮汐流の変動に伴って乱流運動エネルギーが 10⁻⁸ から 10⁻⁵ W kg⁻¹ まで変動する様子が 捉えられた(図 3). 観測点では水柱はほぼ鉛直混合していたことから、乱流運動エネルギー方程式において 生成率と散逸率がバランスしていると仮定し、鉛直渦粘性係数 $A_v & A_v = \varepsilon [(\partial u/\partial_2)^2+(\partial v/\partial_2)^2]^{-1}$ によって推定し たところ、流れが強いときに $O(10^{-1})$ m² s⁻¹ の値が得られた. また、鉛直平均流に対する海底抵抗係数を $C_d = D/(\rho_0|U^3)$ として見積もり (D は鉛直積分エネルギー散逸率, U は鉛直平均流速ベクトル)、3.6 (2.7, 6.1) × 10⁻³ の値を得た(括弧内の値は 95% bootstrap 信頼限界). 海底地形が比較的平坦な測点 I5 付近において過去に 実施した乱流時系列観測からの C_d の見積もりは 6×10⁻⁴程度であったことから、サンドウェーブ域ではその起伏 に起因して極めて強い形状抵抗が働くことで大きなエネルギーの散逸と鉛直渦粘性が生じていると考えられた.

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(東京大学大気海洋研究所、研究協力者)

81



図1 瀬戸内海西部の伊予灘における乱流観測点(海底地形はJTOPO-30による).



図 2 6/3 に実施した北部ラインの断面観測結果. 横軸は測点 I5 からの航路に沿った距離(km). (a) 水温(b) 塩分(c) 流速の絶対値(d) 乱流運動エネルギー散逸率.



図3 6/4 に測点 I7s 付近で行った乱流の時系列観測結果. (a)船底 ADCP による流速の絶対値 (b) 海水 密度 (c) 乱流運動エネルギー散逸率 (d) 鉛直渦粘性係数. 図上部の▼印は観測を行った時刻を示す.

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

中国における窒素酸化物(NOx)排出量は,急速な経済発展に伴って増加の一途をたどってい たが,排出規制等により,その排出量は2011年あたりから減少傾向に転じている.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(ボトムアップ法)が,その推計には数年を 要するという問題点がある.この点に対して,準リアルタイムの衛星観測データを拘束条件と した逆推計(トップダウン法)が有用である.本共同利用研究では,東アジアスケールの排出 量推移を把握するため,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ている.継続2年目となる今年度は,中国と同じく発展の目覚ましいイン ドにも逆推計手法を適用することを試み,中国とインドの排出量推移の将来予測について考察 を行った.

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 (Kurokawa et al., 2013)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、2005 年から 2008 年まで は各年の排出量を、2009 年以降は 2008 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導 入した.

3. 結果と考察

昨年度の報告の通り,逆推計された 2016 年までの中国の排出量推計値は 2011 年に最大で 29.5 Tgとり,そこから減少傾向に転じた.一方で,インドの排出量推計値を見てみると,2005 年から 2016 年まで増加し続けた.このような対照的な傾向について考察するため,社会経済シナリ オに基づいた複数の将来推計の報告と比較を行った.中国における NOx 排出量の減少傾向は, シナリオで想定される排出政策が最も厳しいケースに,一方で,インドにおける NOx 排出量の 増加傾向は,シナリオで想定されるような施策がほぼ進展しないケースに対応していた.もし このような排出量傾向が継続すると仮定すると,2020 年代半ばごろには両者の NOx 排出量が ほぼ等しくなり,その後はインドが逆転して世界最大の NOx 排出国になる可能性が示唆された.



図1. 2005 年から 2016 年までの中国(青)およびインド(赤)の NOx 逆推計排出量と 最新のボトムアップ法による推計値の経年変化と将来予測との比較(Itahashi et al., 2019 より引用).

4. まとめ

OMI 衛星観測データを拘束条件とし、中国およびインドの NOx 排出量を逆推計し、将来推計シ ナリオと比較を行った.今後も衛星観測データの注視とともに、逆推計を通じて NOx 排出量の 推移を見ていくことが東アジア域の多様に変化する大気環境を考える上で不可欠であると考え られる.本逆推計手法では排出量の更新を行うことを主目的としたが、空間解像度が向上した 最新の TOPOMI センサーを用いることで逆推計の高解像度化を図ることを今後の課題としたい.

・参考文献

Itahashi, S. et al. (2019), *Environ. Res. lett*, doi:10.1088/1748-9326/ab4d7f Kurokawa, J. et al. (2013), *Atmos. Chem. Phys*, doi:10.5194/acp-13-11019-2013 弓本ら(2015), 大気環境学会誌, 50 (5), p199-206

高スペクトル分解ライダー技術を用いたエアロゾル高度分布観測システムの構築

国立環境研究所環境計測研究センター 神 慶孝

【本研究の目的】

応力研に既設のラマンライダーでは、極めて微弱なラマン散乱光を用いるため、背景光の強い日中 データから消散係数を推定することは極めて困難となる。そこで本研究では、昼夜連続でのエアロゾ ルの高度分布計測が可能なライダーシステムの実現を目的として、ラマンライダーと同様に消散係数 の独立測定を可能とし、かつ、より高感度なライダー技術である高スペクトル分解ライダー技術(以 下、HSRL 技術)を導入することで、応力研の多波長ラマンライダーを改良する。また、本改良によ って得られる昼夜連続エアロゾルデータを用いた同化研究を見据えている。

【方法】

図1に改良型ライダーのブロック図を示す。HSRL 手法では、大気分子からのレイリー散乱をエアロ ゾルからのミー散乱と分離して測定する。レイリー散乱とミー散乱は送信レーザーと同じ中心波長を 持つが、スペクトル幅が異なる。ミー散乱はレーザーとほぼ同じスペクトルを持つ一方で、レイリー 散乱はドップラー効果による拡がりが大きい。このスペクトル幅の違いを利用してレイリー散乱とミ ー散乱を分離する。両者を効率的に分離させるため、光源には既設のラマンライダーで使用してきた マルチモードレーザーではなく、シングルモードレーザーを導入する。また、ミー散乱をブロックし てレイリー散乱 (の一部)を透過させるための高分解能分光素子が必要となる。本研究では、波長 532 nm ではヨウ素吸収フィルターを、355 nm では走査型マイケルソン干渉計を分光素子として用い る。532 nm では、レーザー波長をヨウ素の吸収線の中心に合わせる。送信レーザーの一部を使ってレ ーザーの波長をモニターし、常に吸収線の中心と合うようにフィードバック制御を行う。本研究で は、従来よりも安定した波長制御手法を導入する。355 nm では、干渉計を1波長分だけ常時スキャ ンすることで、波長制御が不要なシステムとする。スキャンデータを解析することで、レイリー散乱 とミー散乱の信号成分を分離する。

【結果】

上記コンセプトに基づく HSRL の試験観測を国立環境研究所及び情報通信研究機構にて実施した。例 として、355nm の HSRL で測定されたエアロゾル消散係数の時間高度断面図を図2に示す。既設のラ マンライダーとは異なり、昼夜連続の消散係数の測定に成功している。355nm HSRL の開発について は、アメリカ光学会の雑誌に投稿中であり、波長 532nm の手法についても論文を執筆中である。来年 度には、九州大学にて改良型ライダーを運用する見込みである。

【研究成果】

1. 査読付き論文

 Y. Jin, N. Sugimoto, T. Nishizawa, T. Yoshitomi, A. Sawada, W. Sarae, A. Hattori, Y. Yamasaki, H. Okamoto, and K. Sato, "Measurement of water mist particle size generated by rocket launch using a two-wavelength multi-static lidar," Appl. Opt., 58(23), pp.6274–6279, doi:10.1364/AO.58.006274, 2019. [2] N. Sugimoto, Y. Jin, A. Shimizu, T. Nishizawa, and K. Yumimoto, "Transport of Mineral Dust from Africa and Middle East to East Asia with the Lidar Network (AD-Net)," SOLA, 15, pp.257–261, doi:10.2151/sola.2019-046, 2019.
[3] Y. Jin, T. Nishizawa, N. Sugimoto, S. Ishii, M. Aoki, K. Sato, and H. Okamoto, "Development of a 355-nm highspectral-resolution lidar using a scanning Michelson interferometer for aerosol profile measurement," Opt. Express, submitted, 2020.

[4] T. Nishizawa, Y. Jin, N. Sugimoto, K. Sato, M. Fujikawa, S. Ishii, M. Aoki, and H. Okamoto, "Development of a multiple-field-of-view multiple-scattering polarization lidar system at 355 nm for atmospheric particle measurements," Opt. Express, submitted, 2020.

2. 学会発表リスト

[1]°Y. Jin, T. Nishizawa, N. Sugimoto, H. Okamoto, and K. Sato, "Development of a wide-field-of-view high-spectralresolution lidar at 532 nm," 6th International Symposium on Atmospheric Light Scattering and Remote Sensing (ISALSaRS'19), June 2019, Hangzhou China.

[2] • Y. Jin, T. Nishizawa, N. Sugimoto, S. Ishii, M. Aoki, H. Okamoto, K. Sato, "Development of a high-spectralresolution lidar at 355 nm and 532 nm using a scanning interferometer," The 29th International Laser Radar Conference (ILRC29), June 2019, Hefei China.

[3]○神慶孝, 西澤智明, 杉本伸夫, 石井昌憲, 青木誠, 岡本創, 佐藤可織, "走査型干渉計を用いた二波長高ス ペクトル分解ライダーの開発(その2)", 第 37 回レーザセンシングシンポジウム, 2019 年 9 月, 千葉.

[4] • Y. Jin, T. Nishizawa, N. Sugimoto, S. Ishii, M. Aoki, H. Okamoto, and K. Sato, "Continuous measurement of particle backscatter and extinction profiles with a 355-nm high-spectral-resolution lidar," The 8th International EarthCARE science workshop, November 2019, Fukuoka.



図1 改良型ライダーのブロック図



Hour [UTC]

図2 2019年10月2日に小金井市にて測定されたエアロゾル消散係数の時間高度断面図

七尾湾における水温急変に関する研究

能登の森里海研究会 大慶則之

目的

七尾湾は日本海側最大の閉鎖的内湾である。七尾湾では古くからカキ養殖が営まれて日本海側で最 大の生産量を誇っているほか、新たな特産品を目指したトリガイ養殖も進められている。七尾湾北湾 では、成層の発達する夏季に1日に最大で5℃に達する水温の急変がしばしば観測される。これらの 変動は養殖貝類の生育に影響を及ぼすと考えられ、その発生機構の解明は水温変動の予測や七尾湾の 環境変動の理解にとって重要である。ここでは、2019 年 8 月に台風 10 号が能登半島沖を通過した直 後に発生した水温の急低下について、台風通過前後の現場観測データと気象データから海洋構造の変 動を整理し発生要因を検討した。

観測および観測資料

水温の連続観測データは、図1に示す北湾のSt.Aに設置された昇降式観測装置で、HYDROLAB多項 目水質計により30分間間隔で観測された1m毎の水温データを用いた。定点観測データは石川県水産 総合センターが2019年8月7日に実施した定点観測データ(St.45~St.18の12点)と、台風10号 通過前の8月14日と通過後の18日に実施した北湾の横断観測データ(St.A~St.Fの7点)を用いた。 観測にはJFE7ドバンテック RINKO-Profilerを使用した。風データは七尾湾周辺の観測点から、海上風を 良く代表していると思われる伏木と舳倉島のデータを用いた。伏木の風データと台風の経路データは 気象庁ホームページ、舳倉島の風データは海洋保安庁ホームページより引用した。

結果と考察

石川県では2019年7月末から8月中旬にかけて晴れて厳しい暑さが続き、St.Aでは8月中旬に各 層の水温が30℃以上に達していた。台風10号は8月15日に中国地方を縦断して日本海を北東に進み、 翌16日に能登半島沖を通過した。台風通過前後の風とSt.Aの水温構造の変化を図2に示した。舳倉 島では 16 日朝方から 15m/s を超える南南西~南西の強風が連吹した。伏木では 15 日夜半頃に南寄り の風が強まり、16日昼前から夕方には 6m/s 前後の南西~西の風が観測された。St.A では 16日未明 から17日にかけて、各層の水温が底層から表層へと変動を繰り返しながら低下した。変動幅は底層で 大きかった。台風の通過前後に実施した横断観測の結果をみると(図3)、台風通過後(18日)は20 m以深の層が台風通過前(14日)に観測されなかった低温・高塩分水で占められ、等温線の分布水深 はおよそ 15m 上昇した。また、台風通過前に海面から 15m 深付近までに分布した水温 29℃以上、塩分 33.7以下の高温低塩分水は、台風通過後には分布域が表層数メートルに減少し、層の厚みは観測線北 西側で薄く、南東側で厚くなっていた。これらの結果から、以下のとおり水温変動の機構を推察した。 台風の能登半島沖通過にともなって、七尾湾付近は15日夜半から16日夕方にかけて、風向が南から 西へと時計回りに変化する強風の影響下にあったと推察される。St. A が位置する七尾湾北湾の海岸線 は南南西から北北東に伸びていることから、横断観測で台風通過前に表層に分布した高温低塩分水は、 岸にほぼ平行な南から南西の強風が引き起こすエクマン輸送とその後の西風により沖合から湾外へと 移送されたと考えられる。この結果、沿岸湧昇が生じて底層の低温高塩分水が上層に移行し、湾外の 低温高塩分水が底層に進入したと考えられる。湾外の水塊の流入は、8月7日に実施した定期観測時 の湾内の水温、塩分分布で、水温 24℃以下塩分 34.0 以上の水塊が St. 18 の位置する湾口部に分布し ていることからも裏付けられる。七尾北湾では、成層期に陸岸に沿った風が引き起こす沿岸湧昇が、 顕著な水温低下を引き起こす要因と推察された。



(a):水温、(b):塩分

等密度面モデルを用いた陸域海洋統合物質循環モデルの構築

京都大学・総合生存学館 山敷 庸亮

1. 研究目的

本課題では陸域から沿岸域にかけて起こる水循環、つまり河川から海洋への流れ・物質輸送が再現でき る数値モデルの構築を目指す。豪雨に伴う河川流出は陸域環境での洪水や濁流増加とともに沿岸域の海 洋環境を激変させる。山岳地域から平地、そして干潮水域を経て海洋に至る領域でそれぞれ流れを支配 する力学レジームが劇的に変化するため、河川モデルは通常それぞれの領域の流況に特化したモデルを 別々に使用している。特に河川海洋接合部は、モデルにおける擾乱の伝搬速度の違いによりこれまで十 分な解析ができなかった領域である。また豪雨時は土地利用形態ごとに異なる濃度の懸濁物質流出が発 生しており、懸濁物質に伴って栄養塩そして農薬や汚染物質などが流出している。これらの物質輸送は 沿岸、そして海洋環境に大きな影響を与える。流出イベントによる淡水輸送・物質輸送を予測するには 流況モデルに懸濁物質流出モジュールを融合することで、河川沿岸環境に影響を与える水循環・物質循 環のどちらをも追跡するモデルを開発する必要性がある。さらに懸濁物質の影響を河口から沿岸域へと 運ぶ過程を追跡できる粒子追跡モデルが組み込まれた海洋モデルの開発を進めることで、陸起源のもの が沿岸から海洋へと放出するプロセスを明らかにできる。

2. 解析手法

陸域から海域を繋ぐ海洋河川一体型モデルとして等密度面モデル(Kida & Yamashiki, 2015)をベースに、 土地利用モジュールを導入することで、陸域の土地利用変化による透水係数や粗度、貯留量などについ てパラメータを導入可能なものとし、一般的な水文モデルと同等の発展的構築を進めている。

本年度は領域スケールの河川海洋一体型物質循環モデルの構築を目指し、九州に焦点をあてたモデル の構築と再現性を検証する。観測データや河川モデルの出力結果を比較するとともに、同時に複数の河 川、そして集中豪雨・台風時など複数の降雨シナリオに対する再現性の精度検証を進める。

流出イベントとして 2015 年の 7・8・9 月の降雨イベントに着目し、降雨量・降雨の起きる時間スケール、が異なる際のモデルの再現性を検証した。出力結果は国交省による観測流量データ(www.river.go.jp) が存在する一級河川を中心に比較し、河川モデルとの比較も行う。河川モデルは 9 月のイベントに最適 化したものを用いる。さらに現実的な流量・物質循環の再現を目指すため、河川モデルで用いられてい るような陸面過程モデルをモデルコードに導入する。

3. 解析結果

2015年7月17日~23日、8月23日~27日、9月4日~8日の3つの流出イベントを再現した。出力 結果は国交省の観測データとの比較が可能な6本の一級河川(嘉瀬川・菊池川・肝属川・六角川・筑後 川・大淀川)のピーク流量・ピーク時間、そしてこれらと流路延長・流域面積・河川勾配との関係性を 検証した。

再現されたピーク流量とピーク時間は観測値とくらべ100~150%、そして0~8時間ほどの違いがあるものの、降雨に伴う河川流量の増加と減少を6つの河川で同時に再現することに成功した。再現性は一部のイベントを除き、全ての河川で同程度であった。降雨イベントの違い(強い雨、豪雨、数日間にわたる強い雨)による再現性の違いは確認できなかった。モデルで再現された全河川の平均流速を検証したところ、観測値にはダムによる流量操作など自然に生じた流速とは考えにくい要素も含まれている

ことが明らかになった。例えば嘉瀬川で8月の降雨イ ベントー回に対して二回の流出イベントが観測され ている。これはおそらくダムなどによる流量操作の結 果であろう。河川モデルで行われているチューニング は、このような人為的な要素が含まれた観測データに 基づいて行われている可能性があるため、出力結果が 物理法則にどこまで忠実かは注意が必要である。より 詳細な検証は流路に沿って進める必要がある。

再現性が高かったのは熊本県の菊池川と鹿児島県 肝属川である。2回に分かれた発生した降雨イベント への応答も再現できていた。一方、筑後川のように洪 水がおきやすい地形をもつ河川ではモデル内で洪水 が発生しており、本来は川に沿って流れるはずの水が 陸面へと溢れていた。今後、一体型モデルの再現性を 高めるには堤防や流路幅の変化など、より現実的な地 形を解像する必要性を示唆している。



河川海洋一体型モデルで再現された流出イベントはピー ク時間が観測より遅れる傾向がすべての川で確認され



図1.2013年9月8日0時の河川水の流出 ベントの再現。色は淡水層の厚みを示してい る。陸域では流路に沿った河川の形成、そし て海域では河口付近にプリュームが形成さ れている様子がわかる。(堤 2020)

た。これは流速に大きな影響をもつ底面摩擦係係数・流路幅・河川の最大水深の値に改善が必要なことを示している。流路延長や流域面積とモデルの再現の関係の解析によりモデルの再現値が物理的に不自然ではないことも確認できたことから、河川海洋一体型モデルが多様な陸面過程をシームレスに再現することができていることを示唆している。本年度は高度化された陸面過程も実装した。今後、現実的に土地利用データを用いて再度数値実験を行うことで陸面過程が流出イベントに与える影響を明らかにする予定である。

5. 研究成果

学会発表

日本地球惑星科学連合大会,2018,「九州の河川海洋一体型モデル開発」,堤隆浩・木田新一郎・黒木龍 介・山敷庸亮

海洋学会秋季大会,2018,「九州の河川海洋一体型モデル開発」,堤隆浩・木田新一郎・黒木龍介・山敷 庸亮

九州の河川海洋一体型モデルの開発、堤隆浩、九州大学総合理工学府、修士論文

6. 研究組織

代表者	京都大学総合生存学館	教授	山敷庸亮
協力者	東京大学大気海洋研究所	助教	松村義正
協力者	東京大学大気海洋研究所	特任研究員	干場康博
世話人	九州大学・応用力学研究所	准教授	木田新一郎

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。 昨年度の本調査では、冬季長崎県福江島にて、複数の領域モデルが PM2.5の総量を過小評価(観測濃度を 40~ 60%程度過小評価)することが示された。さらに、国内外のモデル間相互比較実験(MICS-Asia や J-stream)を とおして、多くの参加モデルが、その前駆物質濃度の再現性が良い場合でも、PM2.5やその成分濃度を過小評 価する可能性が示された(Chen et al., Atmos. Chem. Phys., 2019; Yamaji et al., Atmosphere, 2020)。本研 究では、これらの結果に基づき、排出量や気象モデルの入力値、降水過程のパラメタリセーション、同化設 定を改善したモデル設定にて、同地域の PM2.5シミュレーションを実施し、PM2.5やその成分濃度の再現性評 価を行なった。

2. 領域大気物質輸送モデルの設定

本研究では、2018 年 1-4 月(助走期間を含む)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)、広領域側面境界条件(全球モデル: CHASER)は昨年度と同じ設定である。気象データ(WRF/NCARFNL, ds0833(0.25degree))に関しては、積 雲パラメタリゼーションには Grell-Devenyi ensemble、雲微物理には Thompson graupel をそれぞれ利 用し、また、同化強度の感度実験を行い、昨年度の設定より変更を加えている。排出量データは、 Chatani et al(2018, Atmosphere)の改良設定を利用した。

結果および考察

図1は、2018年2-4月、長崎県福江島にお ける、モデルと観測によるPM_{2.5}濃度の1時 間値を示す。モデルは観測された濃度変動を 凡そ捉えることができていたが、観測濃度を 過小評価する傾向にあった。特に、モデル は、4月中旬の濃度上昇を捉えることができ なかった。この間、黄砂が観測されており、 黄砂飛来をモデルにて表現できていない事が 考えられる。この間、モデル・観測ともに、 BC の濃度上昇は確認されておらず、この観測



された濃度上昇が燃焼由来以外の原因であることが考えられた。他方、モデルは、逆に、高濃度時の BC 濃度を過大評価していた。

表1は、各要素のモデル・観測間の再現性の統計指標を示す。PM_{2.5}、0₃、COのMean Bias(MB)は、それぞれ -9.8 μ g/m³(-49%)、-0.33ppb(-0.60%)、-49ppb(-24%)で、モデルが過小評価傾向であることが示された。他 方、モデルはBCを過大評価(MB: 0.20 μ g/m³, NMB: 59%)していた。相関係数(R)は0.75~0.91 と、いずれの 要素も高い値となった。Emery (2017, JA&WMA)の基準(Goal:上位 1/3, Criteria:上位 2/3)に対して、0₃ は、NMB と相関係数ともに Goal の範囲内であったが、PM_{2.5}は、相関係数のみが Goal の範囲内となっ た。PM_{2.5}の NMB や NME は、Criteria の範囲外となり、モデルによる PM_{2.5}やその成分濃度の定量的な再 現性についての問題が明らかになった。

	PM _{2.5}	BC	O_3	СО
MB	-9.8 μ g/m ³	$0.20\mu\mathrm{g/m^3}$	-0.33ppb	-49ppb
ME	$10\mu\mathrm{g/m^3}$	$0.24\mu\mathrm{g/m^3}$	8.1ppb	49ppb
RMSE	$12\mu\mathrm{g/m^3}$	$0.34\mu\mathrm{g/m^3}$	10ppb	56ppb
NMB	-49%	59%	-0.60%	-24%
NME	50%	70%	15%	24%
R	0.75	0.87	0.77	0.91

表1 モデル・観測間の再現性の統計指標

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	田渕将司	神戸大学 博士前期	課程25	Ē
研究協力者	金谷有剛	海洋研究開発機構	主任研究	究員
研究協力者	梶野瑞王	気象研究所	主任研究	究員

沿岸海洋の密度躍層における乱流混合の定量化

東京大学大気海洋研究所 堤 英輔

背景と目的

大陸棚上や内湾における乱流混合は熱や河川水、物質の輸送を通じて、海洋環境の形成に深く関わっている。特に密度躍層付近における鉛直混合は、栄養塩を有光層へ供給することで海域の基礎生産を維持したり、 底層へ酸素を供給し貧酸素水塊の消長に関わったりと海洋環境形成に果たす役割が大きいが、その定量化は 未だ十分でない。本研究では沿岸海洋の密度躍層における乱流混合の定量化を目的として、東シナ海と有明海に おいて過去 10 年以上にわたり実施されてきた乱流微細構造観測データを用いた解析を行う。本年度は、有明海に おける観測データ解析を実施した。有明海では内部潮汐に起因して密度躍層内で顕著な乱流混合が発生すること が報告されている[堤・松野 2014]。そのため、密度躍層における乱流混合を評価する上で内部潮汐流を適切に評価 することが重要となる。一般に沿岸海洋においては、強い外部(表面)潮汐流によって海底境界層が発達するため、鉛 直一様流を外部潮汐流として正味の潮流と外部潮汐流の差を内部潮汐流とする従来の考え方を適用できない場合 が多くあり、有明海もそのような例に当てはまる。そこで本年度は、沿岸海洋において外部潮汐流および内部潮汐流 を評価する手法について議論した。

研究内容

解析には 2008 年 11 月(弱成層期)と2011 年 6 月(強成層期)の 1-2 昼夜間に有明海諫早湾湾口付近の定点で 得られた乱流運動エネルギー散逸率と流速のデータを用いた。乱流データは微細構造プロファイラ(JFE Advantech 社, TurboMAP-5)を用いて 30 分毎に 3-4 プロファイルが得られている。また、流速は音響ドップラー流速計(Teledyne RDI 社 Workhorse Sentinel 300-kHz)を用い、鉛直ビン幅は 1m、ping rate が 0.5 または 1 秒で計測されている。本 研究では、外部潮汐流を順圧潮汐流(境界層の影響を受けない鉛直一様の流れ)とそれが形成する海底境界層流 の和として定義し、海底エクマンバランス

$$i(f + \omega_j)\mathbf{W}_j = \mathbf{G}_j + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial \mathbf{W}_j}{\partial z}\right)$$
(1)

に基づいて外部潮汐流の調和定数の計算を行った。*i* は虚数単位、*f* はコリオリ周波数、 a_j (*j* = 0,±1,±2,...: 正/負は 潮流反時計回り/時計回り周波数を指す)は使用する潮汐の周波数、 G_j は海面による圧力傾度力、 μ は鉛直渦粘性 係数、 W_j は潮流の複素振幅である。本研究では海面圧力傾度力を $G_j = i(f+\alpha_j)$ く W_j 〉+ τ_{bj} /($\rho_0 D$) として鉛直平均流の 調和定数 (W_j 〉と海底シア応力 τ_{bj} から求めた (ρ_0 は基準密度、D は水深)。(1)式を W_j について解くために必要とな る鉛直渦粘性係数プロファイル μ については、流速の調和定数を用いて(1)式に基づき最小二乗法により推定する Yoshikawa and Endoh (2015)の方法と、微細構造計測によって得られた乱流運動エネルギー散逸率 ε を用いて、乱 流運動エネルギー方程式における粘性散逸項とシア生成項および浮力生成項間のバランスから導かれる関係 $\mu =$ ($1-R_f$)⁻¹ ε / S^{-2} (S は水平流鉛直シアの絶対値)による推定から検討した。 R_f はフラックスリチャードソン数と呼ばれるシ ア生成項に対する浮力生成項の比であり、安定成層下における乱流に対しては、勾配リチャードソン数 Ri に対する 依存性が指摘されているが(例えば Venayagamoorthy and Koseff 2016)、本研究では $R_f = 0.17$ の一定値を用いた (Osborn 1980)。

結果

図1(a,e)にエネルギー散逸率から見積もった鉛直渦粘性係数の時間変動を示す。2008年の観測は11月の成層 が弱い大潮期に行われ、渦粘性係数は半日周期潮流の流速に対応して変動していた(図 1a)。一方 2011年の観測 は6月の成層が強い大潮期に行われ、渦粘性係数は流速よりも上げ潮・下げ潮に伴った成層構造の変化に対応して 変動しており、渦粘性係数が成層に強く依存することが示唆された(図 1e)。しかしいずれの観測でも、潮汐周期平均 の鉛直渦粘性係数は、乱流運動エネルギー散逸率から推定されたものと潮流の調和定数から推定されたものは図 1(b,f)に示すように比較的良く一致し、Yoshikawa and Endoh (2015)による手法により潮流調和定数から精度の良い鉛 直渦粘性係数の見積もりが得られることが確認された。本研究では、推定された渦粘性係数プロファイルを zexp(z/h₀)型の関数形で近似し(Long 1981)、研究内容で述べた外部潮汐流の見積もりに使用した。推定された半日周期 外部潮汐流は、2008年の成層が弱いケースでは振幅・位相とともにもとの調和定数と概ね一致するが(図 1c,d)、2011 年の成層が強いケースでは時計回り成分の振幅がもとの調和定数と大きく異なっていた。このことは、一般に北半球 において内部慣性重力波による流れが時間と共に時計回りに回転することを考えると(Gill 1982)、半日周期の内部 潮汐流が生じていることを示唆している。そこで、推定された外部潮汐流を正味の半日周期流速から除すことで半日 周期の内部潮汐流を見積もったところ、その流れは北北西一南南東成分が卓越しており、密度変動と位相が概ね 致していた(図 2 左)。このことは半日周期内部潮汐のエネルギーフラックス F = p'u' が平均的に北北西向きである こと、すなわち内部潮汐がこの向きに伝搬していることを示唆している。比較として、鉛直平均流を外部潮汐流として 内部潮汐流を計算する従来の手法で見積もった内部潮汐流を図 2 に示す。傾向としては本研究の手法と似た内部 潮汐流が見積もられるが、海底境界層を考慮していないため、海底付近において内部潮汐流が過大に評価されてい ると見受けられる。このような内部潮汐流の見積もり誤差は内部潮汐のエネルギー収支を議論する上で重要となるエ ネルギーフラックスの推定誤差となりうるが、実際に 2011 年のケースでは時間平均・鉛直積分エネルギーフラックスの 値として、本研究の手法による見積もり 9.8 W m⁻² に対して従来の手法では 16.0 W m⁻² と約 6 割程度と無視できな い違いとなった。今後はこの手法をベースとして、内部潮汐流シアと外部潮汐流シア間の相互作用の点から、密度躍 層における乱流混合の定量化を行う予定である。



図1 2008 年 11 月(上段)と2011 年 6 月(下段)における鉛直渦粘性係数と外部潮汐流の推定結果: (a,e) 乱流運動エネルギー 散逸率と流速の鉛直シアから推定した鉛直渦粘性係数の時系列. 黒実線は 0.2 kgm⁻³ 間隔の等密度線, 青実線は海面 (b,f) 潮 汐平均渦粘性係数. 青実線は乱流計測からの見積もり(カラーシェードは 95% bootstrap 信頼区間), 赤実線は調和定数からの見 積もり, 黒破線は μ~ze^{-zh}o による近似曲線. 半日周期調和定数の(c,g) 振幅 と (d,h) 位相. 実線と破線はそれぞれ観測された 正味の半日周期調和定数と推定された半日周期外部潮汐流の調和定数を示し、ACW と CW はそれぞれ潮流の反時計回り成 分・時計回り成分を意味する。





図 2 2011 年 6 月の内部潮汐流(卓越方向成分:北北西向きを正とする)の見積もり例:(左)本研究による手法(右)外部潮汐 流を鉛直平均流とした内部潮汐流の見積もり.実線は平均密度に半日周期変動を加えた密度の等値線.

成果発表

T. Matsuno, E. Tsutsumi, Investigating vertical mixing in estuarine pycnocline: a case study in the Ariake Sea, Japan. JpGU Meeting 2019, 2019.5.29, Chiba.

研究組織

堤 英輔(東京大学大気海洋研究所、研究代表者)、千手智晴(九州大学応用力学研究所、所内世話人)、松野 健 (九州大学応用力学研究所、共同研究者)

九州北部地方における日射とエアロゾルの関係について

富山大学学術研究部理学系 青木 一真

要旨

大気中に浮遊する微粒子の総称であるエアロゾルは、大気環境の悪化のみならず、喘息疾 患や心疾患をはじめ健康影響など多義にわたり我々の生活に影響を及ぼす。本研究対象であ る九州北部地方は、日本のみならず、大陸から越境する汚染物質、黄砂粒子、森林火災など の影響を受けやすい。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。本研究は、エアロ ゾルと日射の関係について研究を進める。

1. はじめに

大気中に浮遊するエアロゾルは、大気環境の悪化のみならず、我々の生活に影響を及ぼす。 本研究対象である九州北部地方は、日本のみならず、大陸から越境する汚染物質、黄砂粒子、 森林火災などの影響を受けやすく、九州大学応用力学研究所をはじめ、多くの観測や研究が 行われている。本研究の背景は、1996年から長崎大学おいて、2003 年からは九州大学応用力 学研究所おいて、太陽光と周辺光の放射輝度を観測するスカイラジオメーターを使った自動 測定を行い、エアロゾル光学的特性の解析を行っている。これらの長期観測データと地球観 測衛星や数値モデルとの比較を行い、エアロゾルの光学的特性の精度向上につなげている。 本研究は、それらの観測結果と太陽からの日射の関係について詳細に調べることを目的とす る。日本は南北に長く、例えば、北海道、本州、九州の各地点での日射量の経年変動は違う。 特に、同じような季節変化であるように見えるが、九州は他の地域に比べて、傾向が違う時 がある。もちろん、日射量に一番影響するものは、雲である。しかしながら、雲を生成する 過程に必要なエアロゾルが直接的、間接的に日射にどのような影響を与えるかについて地域 差があるようである。気象衛星「ひまわり8号」や2017年12月に打ち上げられた「しき さい(GCOM-C/JAXA)」から、今まで以上に精度の良い結果が得られてきているので、日射と エアロゾルの関係についても地上検証を行い、数値モデル(SPRINTARSなど)などの精度向上 につなげ、地球の気候影響の解明につながればと考える。

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 大応力研や長崎大学をはじめ、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特性を用いて、気候変動の影響を研究する。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、2019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)の月平均値と気象庁福岡管区気象台による日照時間と全天日射量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、例年と同じような季節傾向が

見られた。11月は観測機器の不良のため、一時、欠測した。エアロゾルの光学的厚さの季節 変化の特徴は、全国的にPM2.5のわずかな減少傾向と同様に、短期的な汚染がない限りは、少 しずつ改善されてきている。エアロゾルと全天日射量や日照時間は、気象条件や雲の影響が あり、明瞭な関係を示すことが出来なかった。全天日射量や日照時間との比較は、比較方法 が難しく、雲の影響も取り入れながら、今後詳細に解析していきたい。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ているが、違う場合もあるので、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とどのように違うのかを検証しながら、気候影響の解明に つなげていきたい。



Fig. 1 2019年1月から2019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)の月平均値と
 福岡管区気象台の日照時間と全天日射量の月平均値との関係

4. 研究成果

Aoki, K., : Local and long-range transport of dust aerosols over the Japan. (18th AeroCOM workshop nad 7th AeroSAT workshop, Barcelona, Spain, 2019.09.26)

Aoki, K.,: Remote sensing of spatial and temporal variability of aerosol optical properties in the around Japan. (27th IUGG 2019: Montreal, Canada, 2019.07.13)

5. 研究組織

代表者	青木 一真	(富山大学学術研究部理学系)
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)

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

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。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,東水道を通過した対馬暖流沿岸分枝は,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)。このため,数日スケール以上の対馬暖流の強弱や流路 の変化は,当海域の海況を変化させる大きな一因となっている。そして,カタクチイワシなどの浮魚類 の魚群も同様に数日の時間スケールで変動することから,漁業者から,短期間の海況予報が求められて いる。

本研究では、対馬暖流沿岸分枝が通過する福岡県から山口県までの山陰沿岸域の海況変動を捉えるため、離島等における水温・塩分の連続測定、山口県青海島-見島間の水位差観測、萩-見島間のフェリー「おにようず」(萩海運有限会社)を用いた航路上の表層水温測定を実施した。このなかで、青海島 -見島間の水位差観測は、2012年から継続的に行われている。本報告では、この水位差から見積もられた対馬暖流沿岸分枝の流量の変動を示す。

2. 観測・データ解析

青海島通と見島宇津に水圧式の小型水位計(Rugged TROLL100, In-Situ 社)を2012年8月下旬から設置し、10分間隔で2測点の水位を観測している(図1)。水位計設置時にDGPSを用い、東京湾平均海面(TP)を測量した。水位計のセンサードリフトを調べるために、半年から1年に1回程度、水位データ収集時に大気圧を測定している。平成29年度の報告(26 特 1-6)に従い、気象庁の萩の海面気圧を用い、水位計のセンサードリフトを補正した。ドリフト補正後、48時間のタイドキラーフィルター(花輪・三寺、1985、沿岸海洋研究ノート)を施した。その後、青海島から見島の水位を差し引き、両島間の水位差 Δη を求めた。

図1の東経131度15分線は山口県漁業調査船「かいせい」の観測定線であり、2016年9月から約1 か月に1回の航走ADCP観測が行われている。「かいせい」のADCPデータと、2011年からの水産大学 校練習船による航走ADCPデータ(主に24時間50分の4.5往復観測)と組み合わせて調和分解するこ とにより、この定線(北緯34度33分~35度00分)では潮流調和定数が既知となった(都倉,2020,長 崎大学大学院水産・環境科学総合研究科修士論文)。本研究では、都倉(2020)から使用ADCPデータ 期間を追加し(2012年10月~2019年8月)、この定線の青海島-見島間(北緯34度33分~34度46 分)を通過する4分潮(K₁, O₁, M₂, S₂)除去流の流量T(Sv \equiv 10⁶m³s⁻¹)と水位差 $\Delta\eta$ (cm)の以下の 関係式を求めた。

 $T = 0.0361 \Delta \eta - 0.474 \qquad \cdots (1)$

ここで,T は東向きに通過する流量を正とする。

3. 結果

式(1)によって推定された 2012 年 9 月からの 1 時間ごとの青海島--見島間を通過する流量を図 2 に示す。数日~数十日の流量の変化に比べ季節変動は小さかったが,夏季に流量が増加する傾向を示した。スペクトル解析を行うと,1/3 年や約 2 週間の周期の変動が卓越していた。

謝辞

水産大学校練習船「耕洋丸」・「天鷹丸」の ADCP データを使用させて頂きました。観測にご協力頂き ました船長をはじめとする乗組員の皆様に感謝いたします。



図1. 青海島(Ohmijima)と見島(Mishima)の位置(○)。太線はADCP 定線(北緯 34 度 33 分~35 度 00 分)であり、そのうちの赤線は流量を見積もった範囲を示す(北緯 34 度 33 分~34 度 46 分)。等値線は 20 m 間隔の水深を表す。



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)
福岡県 水産海洋技術センター	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)
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)
能登半島周辺海域における流況と漁況の関係性 ~日本海における海況と橋立沖ズワイガニ資源量の関係性~

石川県水産総合センター 川畑 達

目的

石川県の主要な漁業のひとつに「底びき網漁業」がある.この漁業においてズワイガニは漁獲 金額の約35%を占めており、最も重要な魚種となっている.しかし、近年、石川県ではズワイガ ニ漁獲量は減少しており、特に橋立地区では例年と比較して3~4割程度漁獲量が減少している. 特に雌のズワイガニ(メスガニ)漁獲量の減少が著しく、漁業者の経営を圧迫している.このよ うなズワイガニ漁獲量の増減の原因の一つとしてズワイガニが孵化してから着底するまでの浮 遊期の死亡率が関わっていると考えられる.過去に日本海区水産研究所は資源変動要因分析調 査を行い、幼生の浮遊時の流況が資源加入量に与える影響について検証した.ただし、この調査 では隠岐の資源加入量を推測しており、石川県沖の資源加入量と海況の関係は明らかではない. 本調査では浮遊期の水温環境が石川県の資源加入に関係するかどうかを明らかにするため、浮 遊期の水温と橋立地区のメスガニ漁獲量との関係を調べた.

方法

石川県水産総合センターで集計している橋立港のメスガニの日別漁獲量のうち1日1隻あた り1kg以上の水揚げがあった漁船の漁獲重量をデータとして採用した.また漁獲量は出漁状況 に影響されるため、本研究ではCPUE(隻日数当たり漁獲量)を資源量の指標として用いた.

メスガニが漁獲対象となる(漁獲加入する)年齢は9歳である.一方,ズワイガニの産卵期は 2~3月で浮遊期は約3カ月間と知られており,4月には多くの当歳個体が浮遊期にあると考えら れる.そこで,九州大学応用力学研究所の海況数値モデルをベースに開発されたJADE2の各格 子点について,4月1日の前後10日間の水深200mの平均水温を求め,9年後のCPUEとの相関 分布を調べた.次に上記から得られた,相関の高い海域の水温を海況の説明変数とし,日本海区 水産研究所が公表している日本海系群A海域のズワイガニ親魚資源密度指数を産卵親魚量の指 標として説明変数とし,橋立沖のメスガニの9年後のCPUEを目的変数とした重回帰分析を行 った.

結果

JADE2の各格子点の水温と9年後のメスガニの CPUE の相関分布を調べたところ(図1), 隠 岐周辺で正相関, 大和堆周辺で負相関になっていることがわかった. これから, 隠岐周辺をA海 域, 大和堆周辺をB海域とした. またA海域およびB海域の水温には相関関係は見られなかっ たため, 両者の変数間の多重共線性はないと考えられる.

上記の関係を参考に気象庁の水温分布図を参照し、どのような海況であれば9年後に好不漁

になるのかを調べたところ,鳥取沖に冷水塊があると9年後に橋立沖でメスガニが不漁になる 傾向がみられた(図2).

次に各海域の平均水温と、資源密度指数を説明変数として重回帰分析を行った結果、これらの変数により、9年後のメスガニの CPUE 変動をうまく予測できることが分かった(図3).重 回帰分析の結果を下記に示す.

 $Y = 20.70X_1 - 35.47 X_2 + 0.9796X_3 + 73.51 (R^2 = 0.7177)$

Y:メスガニ CPUE, X1: A 海域平均水温, X2: B 海域平均水温, X3: 資源密度指数

考察

本研究から隠岐周辺のA海域で冷水塊が発生すると9年後に橋立沖でメスガニが不漁になる 傾向があることが分かった.詳細なメカニズムについては不明だが,冷水塊が発生すると浮遊 幼生の生き残りが悪い,または橋立沖に稚ガニが着底しにくくなると推測される.一方,B海域 の負相関の原因については確認できなかった.今後,石川県の他地区におけるメスガニの漁獲 やオスガニについての解析も行い,県内ズワイガニ漁獲量を予測できるようにしたい.



図 1. CPUE と水深 200m 水温の相関関係 赤色が正の相関,青色が負の相関を表す. 色が濃いほど相関が高いことを示す.



図 2. 水温分布図(気象庁より) 赤丸は鳥取沖の冷水塊を表す.



図 3. CPUE および重回帰分析結果:漁期年は11月から翌1月とする.

粒子散乱モデルと衛星・地上ライダ/レーダ解析技術の高度化

気象研究所 気象観測研究部 石元裕史

・要旨および目的

氷雲の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に敏感なアクティブセンサ を用いた研究が有効である。本課題では氷晶散乱特性の理論的研究を通して,九州大学応用力学研究所・ 大気物理研究室が開発を行っている衛星搭載ライダ/レーダおよび地上アクティブセンサ複合観測シ ステム解析技術の高度化に貢献することを目指す。

·研究方法

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、散乱計算手法などを検討し,気象研究 所で開発した氷晶モデルおよび散乱特性計算手法により氷晶散乱特性計算を実施する。得られた氷晶散 乱特性を解析し,解析アルゴリズムに応用する事でレーダ・ライダ解析技術の向上と高度化を図る。

·研究結果

氷晶モデルによるライダ単散乱特性については、六角柱や六角板・ドロクスタル形状の氷晶に加えて、 [1,7]によるボロノイ型不規則形状粒子モデル(例:図 1)の大規模散乱計算を実施した。ボロノイ形状粒 子による 3 次元ランダム配向後方散乱特性を開発した改良型幾何光学近似法(Geometrical Optics-Integral Equation: GOIE) [8]を用いて計算しデータベース化した。また、新たに 2 次元配向を考慮し たボロノイ型粒子の散乱特性の初期解析結果を得ることが出来た。さらに、粒子サイズを延長した散乱 特性データベースの整備拡張を行った。これらの大規模散乱計算を行うために、様々なテスト計算を実 施した。粒子サイズが 200μm を超える巨大粒子においてレーザ照射角度や波長、粒子形状に対して後 方散乱の特徴を解析した。この結果から、大きな粒子サイズで十分な計算精度で後方散乱計算を行うた めに必要な入射光に対する粒子の配向数等、計算の収束基準を確定した。得られた結果から粒子形状と 観測量との関係を解析し、ライダ比と偏光解消度の情報が粒子形状と配向の抽出に有益である事などが 新たに分かった[2]。降雪に関しては、開発を進める積雪マイクロ CT 情報を使った雪片・霰粒子モデル [4,5]の研究を実施した。

これら得られた成果は、日欧共同衛星 EarthCARE に搭載予定の高分解スペクトルライダや地上設置型 多視野角多重散乱ライダなどを対象とした氷晶粒子の散乱特性解析研究に貢献し、それらを応用した研 究成果は国際学術誌に発表された[2,3]。



図1 ボロノイ型不規則形状粒子モデルの一例

Ζ

・成果報告

査読付き論文

- Letu, H., K. Yang, T. Y. Nakajima, <u>H. Ishimoto</u>, T. M. Nagao, J. Riedi, A. J. Baran, R. Ma, T. Wang, H. Shang, P. Khatri, L. Chen, C. Shi, J. Shi, 2020: High-resolution retrieval of cloud microphysical properties and surface solar radiation using Himawari-8/AHI next-generation geostationary satellite. Remote Sensing of Environment, 239, 111583.
- [2] <u>Okamoto, H., K. Sato</u>, A. Borovoi, <u>H. Ishimono</u>, K. Masuda, A. Konoshonkin, N. Kustova, 2019: Interpretation of lidar ratio and depolarization ratio of ice clouds using spaceborne high-spectralresolution polarization lidar. Optics Express, 27, 36587-36600.
- [3] <u>Sato, K</u> and <u>H. Okamoto</u>, 2020: Application of Single and Multiple-Scattering Theories to Analyses of Space-Borne Cloud Radar and Lidar Data, Springer Nature, Springer series in Light scattering, vol.5.

学会発表 (主著)

- [4] <u>Ishimoto, H</u>., M. Hayashi, Y. Mano, Development of fast radiative transfer model MBCRM for analysis of volcanic ash clouds measured by hyperspectral infrared sounder, 2019 年合同衛星会議, 2019 年 10 月, 米国
- [5] <u>Ishimoto, H</u>.,S. Adachi, K. Masuda, X-ray micro-CT imagery of deposited snow in optical modeling of atmospheric ice particles,第18回電磁気と光散乱会議(ELS-XVIII), 2019年6月,中国
- [6] 石元裕史, 足立アホロ, 安達聖, 積雪マイクロ CT データを用いた降雪粒子のモデル化とレーダー反射特性の計算, 日本気象学会秋季大会, 2019 年 10 月, 福岡

参考文献

- [7] <u>Ishimoto, H.</u>, K. Masuda, Y. Mano, N. Orikasa, A. Uchiyama, 2012: Irregularly shaped ice aggregates in optical modeling of convectively generated ice clouds, Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 113, 632-643.
- [8] Masuda, K., <u>H. Ishimoto</u>, 2017: Backscatter ratios for nonspherical ice crystals in cirrus clouds calculated by geometrical-optics-integral-equation method, Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 190, 60-68.

• 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 数値モデルによる対馬海峡の栄養塩濃度の経年変化に関する研究

愛媛大学沿岸環境科学研究センター 森本昭彦

1. 研究目的

東シナ海の陸棚上を流れ日本海へ流入する対馬暖流は、大量の栄養塩を水平的に輸送してお り、この栄養塩輸送は日本海南部海域の基礎生産の80%以上を支えている。2005年より継続し ている対馬海峡での横断観測の結果、栄養塩輸送量が大きくなる夏から秋の対馬海峡の栄養塩 濃度は経年的に大きく変化していることが分かっている(Morimoto et al., 2009; Kodama et al,, 2017)。この対馬海峡の栄養塩濃度の経年的な変化は、観測データの解析から黒潮系の水塊 と東シナ海陸棚上の水塊の混合比の変化によると推測されている(Morimoto et al., 2012)。し かし、水塊の混合比を変化させる要因については明らかになっていない。本研究では、東シナ海 から日本海西部を対象とした物理-低次生態系モデルにより、海域内の栄養塩の挙動を解析し、 夏から秋の対馬海峡の栄養塩濃度が経年的に変化する要因を明らかにする。

2. 使用モデル

九州大学応用力学研究所の DREAMS_M の出力を使い、愛媛大学で開発した低次生態系 モデルを駆動させるオフラインのモデルを使用した。モデルの再現性を確認するため、現場 観測データが最も多い 2006 年を対象に計算を行い、再現性の確認後、長江流量の変化と対 馬海峡底層水温の変化が多い年を対象に計算を実施した。なお、本モデルでは、台湾海峡、 黒潮、長江、黄河、大気からの栄養塩を個別に追跡するモデルを開発した。

3. 結果と考察

人工衛星による表層クロロフィル濃度と船舶観測による表層の溶存態無機窒素 (DIN) 濃 度との比較を行ったところ、本モデルはおおよそ両者の季節変化を再現していた。東シナ海 の物質循環プロセスを把握するため、太平洋、台湾海峡、長江、黄河、大気からのダスト、 東シナ海底層、それぞれから供給された栄養塩の分布を調べた (図1)。その結果、黄海の 栄養塩の 8 割程度は底層からの栄養塩供給であり、東シナ海については、台湾海峡、太平 洋、長江起源の栄養塩がおおむね同程度に分布していることが分かった。日本海の入口であ る対馬海峡においては、太平洋起源の栄養塩が 8 割以上を占め、長江起源の栄養塩は 1 割 以下と極めて少ないことが分かった。

長江流量の変化に伴う対馬海峡を通過する栄養塩量の変化を検討するため、長江流量が 多かった 1998 年、平均的だった 2003 年、少なかった 2006 年の計算結果を比較した。対馬 海峡における 1998 年及び 2006 年の長江起源の DIN は、対馬海峡西水道においてそれぞれ 0.39 μ M-N 及び 0.15 μ M-N、対馬海峡東水道においては 0.11 μ M-N 及び 0.06 μ M-N とほ ぼ 2 倍の差があることがわかった。一方で、2003 年と 2006 年の対馬海峡における DIN に はほとんど差はみられなかった。このことから、1998 年のような長江流量が極端に多い年 は成層の強化により遠方まで長江起源の栄養塩が輸送されるが、低塩水が済州島や対馬海 峡まで到達する程多くない 2006 年のような場合、殆どの長江起源の DIN は混合・拡散に より東シナ海外へと輸送されることが分かった。

次に、対馬海峡における底層水温が低い年・平均の年・高い年の3年分を抜き出した実験 を行なった。これら3年において対馬海峡を通過する栄養塩量には大きな違いは生じてい なかった。しかし、台湾海峡起源・底質起源の栄養塩の微増が確認できた。これは底層水温 の変動がどこで発生し、どのように対馬海峡へと輸送されているのかに起因する。対馬海峡 へ輸送される栄養塩の多くが黒潮起源、次いで台湾海峡起源のものであるが、その内の多く は一度東シナ海底層を経由して流入している。そのため同年の冬季~春季までの東シナ海に おける成層の発達するタイミングや過程の違いにより対馬海峡へと輸送される水塊の水温 が変化するため、栄養塩濃度には大きな変化が生じなかったものと考えられる。



図 1. 0m~150m の平均 DIN 濃度に対する太平洋、台湾海峡、長江、黄河、ダスト、底層 から供給される栄養塩の寄与率。

4. 研究成果報告

(査読論文)

Shibano, R., Morimoto, A., Takayama, K., Takikawa, T., Ito, M.(2019): Response of lower trophic ecosystem in the Japan Sea to horizontal nutrient flux change through the Tsushima Strait. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 229,106386.

(研究発表)

柴野良太・森本昭彦・高山勝巳・滝川哲太郎・伊藤雅(2019):日本海の生態系に対する対馬 海峡を経由する栄養塩輸送の影響.日本地球惑星科学連合 2019 年大会,千葉,5月.

5. 研究組織

- 研究代表者・森本昭彦(愛媛大学沿岸環境科学研究センター)
- 研究協力者・柴野良太(環日本海環境協力センター)
- 所内世話人・広瀬直毅(九州大学応用力学研究所)
- 所内世話人・高山勝巳(九州大学応用力学研究所)

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擾 乱現象が発現しているときとそうでないときの詳細な大気鉛直構造を明らかにする。さらに、擾乱現象 が発現しているときとそうでないときの総観気象場を、NCEP/NCAR や ERA40、JRA55 を用いて示 し、その大気鉛直構造がどのように形成されるのかを解明する。

昨年度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ので、今年度は、これまでの解析結果を取り纏め、「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」について総合的に明らかにすることを目指した。

3. 結果

今年度は、昨年度実施した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含めた、これまでの解析結果を取り纏め、「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」について総合的に明らかにすることを目指して進めた。

まず「プレモンスーン期における大気不安定度の季節内変動」について、結果を述べる。プレモンス ーン期の集中観測は、バングラデシュ・ダッカ(北緯 23.43 度、東経 90.23 度、標高 9m)にて Visala 社 RS-92-SGP を用いて 2007 年 4 月 20 日~5 月 15 日(計 26 日間)に 1 日 3 回(00、06、12UTC; なお、 00UTC については、おおよそ隔日でバングラデシュ気象局のオペレーショナル観測があったためバン グラデシュ気象局の持つ RS-80 を使用した)の要領で実施した。この観測期間は、対流が活発な時期(4/20 ~27、5/6~15)と不活発な時期(4/28~5/5)に大きく分けることができた。対流が活発な時期(4/20~27) と不活発な時期(5/6~15)で、それぞれ対流活動(OLR)、対流圏下層と上層の風の場(図 1a、1b)を調べた。 対流圏下層では、対流活発期には南西風が卓越し、対流圏上層では、対流活発期には南風成分が卓越し トラフの前面にバングラデシュが位置していることが示唆された。また、鉛直方向の大気を調べると(図 1c)、対流活発期(4月20~27日、5月6~14日)と対流不活発期(4月28日~5月5日)に分けられ、対 流活発期には下層で南西風、上層でトラフ前面による西~南西風が卓越している。一方、対流不活発期 には上層で北西風が卓越し、下層では南風が弱まる。これは、上層のトラフが西から東へ通過している ことを示しており、中緯度偏西風帯の影響を強く受けていることが分かった。高度 1km 付近の相当温 位が対流活発期に高くなっており、水蒸気量、相対湿度とも上昇している。また南西風が卓越しており、 ベンガル湾から湿った空気が流入している。この結果、潜在(対流)不安定が強化されている。このこと は、既存文献の統計的解析と一致する。以上の結果から、対流圏上層のトラフの接近によってトラフ前 面での上昇流の強化と対流圏下層での南西風の強化によって、擾乱が発達したと考えられる。



図 1a:925hPa 面の風の場。(a)対流活発期(4/20~27)、(b)対流不活発期(5/6~15)、(c)対流活発期と 不活発期の差。コンターは東西風、陰影部は南北風を示す。単位は m/s。



次に、「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」について、結果を述べる。 2010-2012 年の 3 年間の WWLLN による雷位置データを用いてバングラデシュに発生する雷をもたら す降水システムの特徴を調べた。雷位置は降雨レーダで観測される雷位置とよく対応していた(図 2a)。 そこで、一時間毎の雷位置の分布に対して、10km 以内にある雷位置の集団を1 降水システムとみなし て、3 時間以上持続したものついて各降水システムを追跡し、発生消滅の時間と位置を調べた。3 年間 に計 1715 個検出し、2010 年は約 170 個であったものが 2012 年には約 1000 個と 5 倍以上増加してい た。これは WWLLN の雷センサーの年々の増加によるものと考えられる。降水システム発生位置はメ ガラヤが最も多く他の雷センサーによる結果とよく一致していた。降水システム発生位置は夜間(21-00LT)にメガラヤで多い一方日中(09-14LT)は平野部で多いことがわかる(図 2b)。

続けて、「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」について、結果を述 べる。アジアモンスーン上空の水蒸気変動を定量的に理解するために、2007年バングラデシュの首都 ダッカにおいて高精度湿度計(SnowWhite@MeteolaborInc.)を用いたラジオゾンデ観測を実施した。プ レモンスーン期の6月の観測時期に西風ジェットが南にシフトした影響で上空の観測した空気がダッカ に南下した。その結果上空は相対湿度20%以下の乾燥した状態となり、またこの南下時期は積雲対流が 抑制されていた(図3a)。衛星観測データ(EOS MLS)との比較では、上層雲が存在するときは衛星デー

タは 50%以上の湿度の過大評価であったが、それ以外では±20%以内でゾンデ観測とよい一致を示していた (図 3b)。



図 2a: 2011 年 5 月 11 日における Kheppupara レーダで現地時間の 11:30,12:30,13:30 に観測された 反射強度と 11 時, 12 時, 13 時の各 1 時間に検知された雷位置の分布。



図 2b:降水システム発生位置の頻度分布を3時間毎に示す。時間毎にカラーバーの目盛が異なることに注意。

4. まとめ

今年度は、昨年度実施した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含めた、これまでの解析結果を取り纏めた。これらの成果を基に現在論文を3編執筆中であり、近々に投稿予定である。

インド亜大陸における長期の降水量データから北半球夏季インドモンスーンに伴う降水システムの 変化が報告され、アジアモンスーン域の対流活発地域が北進していることが明らかになっている。今後 は、インドモンスーンの下流に当たり準2週間周期変動やBSIS0などの季節内変動の始点にあたるインド シナ半島を含めた、長期的な気候変動による循環場の変化がこの地域の降水システムをどう変化させている か、またその影響が高緯度側の気象場や気候場にどのような影響をもたらしているのかを明らかにしていき 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



図 3a:(上段)150h Pa 東西風の時間緯度断面。 赤矢印がプレモンスーン期の高層大気観測に 対応。赤点線矢印は解析に適さない観測。(下 段)各高層大気観測の結果。相対湿度の高度分 布。左から 2007 年、4月27日、4月28日、 5月1日、5月3日。赤線、橙色線は高精度湿 度計(SnowWhite)の氷と水に対する相対湿度 値 [%]。青線、緑線は RS80 と RS92 の水に 対する相対湿度値 [%]。



図 3b: SnowWhite と EOS MLS の相対湿度の比較.赤線: SW,緑線: MLS,オレンジ: MLS の雲氷 量, 黒太線: RS80 の気温,黒細線:氷に対する相対 湿度の水に対する相対湿度比.(左)5月3日(プレモ ンスーン期)(右)7月6日(モンスーン期)

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、海洋力学および関 連する諸課題について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

2019 年 10 月 26 日~29 日に研究会を開き,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。

研究会では、以下の発表者と演題による話題提供があった。

- (1) 中野英之(気象研)理想実験における東西ジェットの南北遷移
- (2) 加瀬有理(名古屋大宇宙地球環境研)東シナ海の黒潮流軸上における海面高度偏差の伝搬特性
- (3) 大貫陽平(九大応力研)変形領域モデルを用いた成層乱流の直接数値シミュレーション
- (4) Chul-hoon Hong (Pukyong National University) 朝鮮半島の東岸と西岸における水温の気温への影響
- (5) 吉川裕(京大理) 鉛直混合と子午面循環とを繋ぐ力学についての考察
- (6) Yign NOH (Yonsei University) ラグランジュ的モデルを用いた春の植物プランクトンブルームの道筋
- (7) 豊田隆寛(気象研)海洋再解析における ENSO に関わるエネルギーフラックスの診断
- (8) 辻英一(九大応力研) 東シナ海で観測された大振幅内部波の数値モデリング
- (9) 水田元太(北大地球環境)再循環から生じるロスビー波
- (10) 西垣肇(大分大) 大槌湾沖の陸棚における海洋観測
- (11) 広瀬直毅(九大応力研)鉛直渦動粘性係数の逆推定
- (12) 磯辺篤彦(九大応力研)4粒子の追跡モデルを組み合わせた全球プラスチック循環の収支計算
- (13) 吉武珠穂(九大総理工)海洋浮遊マイクロプラスチックの鉛直分布に関する数値実験
- (14) 増田章(九大応力研) 深層循環に関する考察 海岸・海底地形の影響

結果と議論

提供された話題のうち,微細規模現象や混合層過程を扱うものとして (3)(6)(11)(12)(13) があげられる。(4) は混合層過程が大気や海洋に与える影響が主題である。後述 (5) は海盆規模の現象が主題だが, 微細規模現象と海盆規模現象をつなぐ課題でもある。

(3) は内部波が微細規模の乱流を伴って散逸する現象を対象とする。内部波に追随して変形する時間 変動座標に基づく数値モデルが,新たに構築された。パラメトリック不安定による乱流の生成の表現に 成功した。

(6) は混合層における春の植物プランクトンブルームを対象とする。プランクトンを粒子としてラグ ランジュ的に扱う数値モデルが構築された。その結果,プランクトンの成長・減少についての臨界層厚 で表されるブルーム発生条件が新たに提案された。

110

(11) は縁辺海の数値シミュレーションモデルにおいて,鉛直乱流混合・拡散などの諸パラメタを逆推 定する。この推定は,各パラメタに対して感度実験を行い,実況値とグリーン関数を使って諸パラメタ を最適化するものである。これによりモデルの改善がみられた。

(12) は海洋プラスチックごみの話題である。現在の状況と知見についての概説がされた。数値モデル におけるマイクロプラスチックの漂流量が計算されているが、それが観測と合わず、消失している可能 性がある。

(13) は (12) と関連するマイクロプラスチックの話題で、海洋混合層におけるラグランジュ的数値モ デルが作られた。前記の消失の成因として、生物過程によるマイクロプラスチックの凝集の可能性が検 討された。

(4) はエルニーニョが遠隔地の気候に与える影響を念頭に、海水温と韓国各地の気温との関連を解析 した。冬季は韓国東岸の気温が西岸のものよりも高い特徴があるが、その気温差には東鮮暖流の影響と みられる年々変動がある。

内部波規模の話題として (8)(10) があげられる。前述 (3) は微細規模現象と内部波との相互作用を扱うもので、関連がある。

(8) は観測された大振幅内部波を数値モデルで表現することを目指す。観測の結果が紹介され、モデルではその経過と非静水圧モデルの必要性が示された。再現にある程度成功した段階である。

(10) は陸棚上における観測の話題である。水温,塩分,流速の断面分布の観測が潮時をまたいで行われた。その結果,内部潮汐の存在と潮汐に伴う塩分躍層の上昇が示された。

中規模現象の話題として (1)(2)(7)(9) があげられる。

(1) は黒潮続流域にみられる数本の東向きジェット流の話題である。理想化された条件で数値実験が 行われた。ジェット流は時間とともに南に変位する性質がある。その性質は海山(シャツキー海膨)の 有無によらないことが示された。

(2) は東シナ海の黒潮を対象とし、流軸の小蛇行が発生・移動する現象を意識している。再解析デー タおよび数値モデルの海面高度を用い、流軸上の変動の伝播が解析された。結果を傾圧不安定理論で説 明できるかどうか、検討された。

(7) は海洋再解析データにおけるエネルギー収支の整合性を調べるため,エネルギー伝搬を診断する。 慣性重力波とロスビー波を統合的に扱うため,層モデルに基づく理論式を適用する。一定の整合性が得 られたが,さらに改善が必要である。

(9) は黒潮続流域を念頭においた,続流に伴う再循環から放射されるロスビー波の話題である。理想 化条件での数値実験が行われた。放射型順圧不安定による放射と,非ノーマルモード型放射の両者がと もに可能で,後者のほうが流入流出数値実験とよりよく一致した。

海盆規模の話題として (5)(14) があげられる。前出 (1)(7)(9)(11)(12) は海盆規模現象を含めて扱う もので,関連がある。

(5) は海盆規模の鉛直循環の話題である。鉛直循環は海面冷却に駆動されるのか鉛直拡散に駆動されるのか, との疑問を出発点に, 理想化数値実験による検討がされた。鉛直循環には両者が必要であること, 東西鉛直断面におけるトルクが重要であることが示された。

(14) 深層循環における海岸・海底地形の効果について、その統合的理解と知見の整理を指向した考察がされた。特性曲線法に基づき、各方向の緩やかな海底斜面がある場合について、深層循環の形態が分類・整理された。

全体として,議論に適した場を設け,以上の多岐にわたる話題提供と綿密な議論を行い,知見の共有 と深化を進めることができた。

高潮・洪水時の海洋環境変動

神戸大学内海域環境教育研究センター 林 美鶴

1. 目的

2018年に発生した西日本豪雨では瀬戸内海に濁水が流出し、漁業被害などが報告された。9月4日には台風21号(T1821, Jebi)が近畿地方を直撃した。四国東部をかすめて淡路島上空を通過した後、14時ごろに神戸市西部に上陸した。この経路は、過去最高潮位をもたらした第二室戸台風(1961年9月16日)と類似している。兵庫県や大阪府などの大阪湾沿岸に高潮警報が発令され、各地で最高潮位を記録した。高潮は、関西国際空港の浸水をはじめ、広範囲で被害をもたらした。神戸大学深江キャンパス内にある港(以降、深江港)でも防潮堤外の建物が浸水し、防潮堤を越波した。建物内には検潮儀が設置されているが、検潮井戸から海水が溢れて最高潮位は記録されなかった。一方、深江港での高潮の様子を写真と動画で記録しており、港外に設置してる水位計も稼働していた。

気候変動に伴う極端気象現象の増加により高潮や洪水も増加することが見込まれる。また海洋環境も、これらに影響を受けると考えられる。本研究では、高潮や洪水による海洋環境の変動を明らかにすることを目的とし、2019年度は、T1821による深江港での高潮を記録として残すことを目的として、高潮の状況を説明するとともに、最高潮位の推定を行った。

2. 高潮の記録

深江港は大阪湾奥に位置し、埋め立て地の間の水路の奥にある。深江港は防潮堤で区切られ、高潮 時は出入口の防潮扉も閉鎖されていた。深江港停泊中の深江丸から、13:55~14:21 にかけて、断続的 に写真と動画を撮影した。図1に撮影方向ごとの写真を、時系列に並べて示す。写真はスナップショ ットのため、以下では主に動画を元に状況の変化を説明する。いくつかの動画はサンテレビのニュー ス番組で放送され、YouTube サンテレビチャンネル「台風 21 号の高潮を船上から撮影」で視聴でき る。13:55 には港外から激しい水しぶきが飛び、海水が岸壁を洗って漂流物が流れ込んでいた。岸壁奥 では、撮影開始時は岸壁から海水が落ちていたが、1 分後には海から岸壁に流入する場合があり、水 位上昇の早さが伺える。この動画の目視では平均水位は岸壁には達しておらず、波浪による越波だと 推測される。14:05 には水位は岸壁を大幅に越えている。グラウンドに面した北側防潮堤では、港外か ら侵入した波浪が激突することによる断続的な越波が見られるが、岸壁と高橋川に挟まれた防潮堤内 への越波は確認できない。港外に面した南側防潮堤は他の箇所よりも高いため、この時点では越波に 至っていないが、14:10 までには越波し、14:13 には波浪が防潮堤に激しく打ち付けて越波していた。 14:16 には風は弱まっているが、北側防潮堤や深江丸東側防波堤では越波していた。目視では、この時 点の平均水位が最大だった。14:19 には波浪が小さくなり、平均水位も低下していた。

深江港では、検潮儀により1分毎の潮位を、深江港外で5分毎の水位を計測している。気圧は検潮 儀室で1分毎に記録している。風向・風速は気象庁のアメダスにより神戸空港で測定されており、前 10分平均値がウェブサイトで入手できる。国土交通省は神戸波浪観測所で波高を測定しているが、ウ ェブサイトでは公開されていないため、国土交通省近畿地方整備局が設置した「大阪湾港湾等におけ る高潮対策検討委員会」による一連の報告書に掲載されている 20分毎の有義波高のグラフからデー タを起こした。図2に実測潮位と予測潮位の時系列を示す。10:50頃から気圧が低下し、風が強くなり はじめた。風向は13:30に ENE から時計回りに変化し、潮位が急上昇した。13:40~14:20 は風が著 しく強く、14:00に平均風速 34.5m/s (風向 SSW)、最大瞬間風速 44.3m/s (風向 SSW)で最大を記録し た。気圧は13:58 に最低 960.2hPa を記録した。海水が検潮井戸から溢れたため、14:16~14:22の潮位 は 301cm で一定である。風向は14:20 に WSW になり、潮位は上下しつつも、17:49 に潮位偏差は無く なった。港外水位と検潮潮位との差(内外差)は、潮位上昇前後では±10cm 程度だが、13:30頃から 大きくなりはじめた。14:15 に港外最高水位 336cm を記録した。神戸波浪観測所での有義波高は、14:00

112

に急激に高くなり、14:20 に最大値 4.72m、周期 6.2 sec を記録した。

3.最高潮位の推定

高潮翌日以降に、深江港で被害状況の確認と測地を行った。検潮儀横の戸棚の扉をはじめ、数カ所 に水面の痕跡があり、これら測定から最高潮位は床から 73cm だった。検潮井戸上面は床から 71cm な ので、最高潮位において 2cm オーバーフローしたと考えられる。また、検潮井戸上面の標高は 303cm なので、最高潮位は 305cm と推定され、オーバーフローによる未検出(記録された最大値との差)は 4cm である。港外での水位は、検潮潮位が一定となった間の 14:20 時点よりも 14:15 時点(最高水位) の方が高い。また動画から、水位は 14:19 よりも 14:16 の方が高いと思われる。よって深江港の潮位

は、14:16~14:18 の間に最高値に達したと推定され る。この間の予測潮位は 51cm なので、最大潮位偏差 は 254cm である。大阪湾奥の複数地点に検潮儀があ り、最高潮位と発生時刻が委員会の報告書でまとめ られている。これらの値と比較して、深江港の推定値 は妥当である。

委員会報告書によれば、神戸市が高橋川に設置し ている深江橋水位計では、14:15 に 330cm を記録して いる。また、日本土木学会による高潮痕跡の調査で も、高橋川下流で浸水高 332cm が報告されている。 これらのことから、港外水位は妥当な値である。港外 最高水位は最高潮位より 31cm 高い(最大内外差)た め、港外最大潮位偏差は 285cm である。内外差を波 浪と考えると波高 62cm で、映像データから十分妥当 な値である。検潮儀室の床と地面との段差は 9cm あ るため、地面の標高は 223cm である。この値は、 Google Earth に表示される国土地理院による値、2.2m と一致する。よって図 1(a)に示した天端高の標高は、 最も高い南側の A で 433cm、最も低い北側の D で 364cm である。これらの最高潮位との高度差は、A で 128cm、Dで59cmとなる。波浪が防潮堤に激突する ことで、南側防潮堤では 1m 以上の高波が生じたと推 定される。



図1 高潮の時系列変化





5. 成果公表

・第141回日本航海学会講演会
 「神戸大学深江キャンパスで観測された 2018 年
 台風 21 号(T1821, Jebi)による高潮」

6. 研究組織

神戸大学	准教授
神戸大学	特命助教
大島商船高等専門学校	助教
九州大学	教授
	神戸大学 神戸大学 大島商船高等専門学校 九州大学

能動型衛星データによるエアロゾル特性と雲相の関係

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] エアロゾルタイプとしてダストに注目し、CALIPSOに搭載されたライダである CALIOP から推定された1年間のダスト消散係数と雲相データを用いて、北半球中高緯度においてダスト消散係数と雲相の関係を調査した。その結果、雲相は温度のみでなくダスト消散係数にも依存することがわかった。特に 250K 前後ではダスト消散係数の影響がより低い温度やより高い温度の場合に比べて大きいことが確認された。

[目的] 雲は降水・降雪を通して水循環に関係し、また太陽放射の反射や地球放射の吸収・射出など放 射過程によって気候に大きく影響している。特に雲の熱力学的相(以後は雲相と呼ぶ)は、例えば光学的 厚さや単一散乱アルベド、射出率などの放射特性に寄与することが知られている。エアロゾルは雲粒形成 時の核となるが、中でもダストは有効な氷晶核とみなされている。氷相割合は第一義的には温度の関数と 考えられ、ダスト量とともに氷水量といった物理量が増加することは報告されているが、雲相を決めるメカニ ズムは単純ではない。本研究では消散係数をダスト量の指標と考え、消散係数とともに氷相割合がどのよう に変化するのか調べる。

[方法] A-Train constellation の一つである CALIPSO に搭載されたライダである CALIOP から推定され たダスト消散係数と雲相(水滴か氷晶か)、また ECMWF 客観解析による気象場(高度、気圧、気温)デー タを用いた。このダスト消散係数と雲相を推定するアルゴリズムは、九州大学応用力学研究所の岡本教授 が中心となって構築されたものである。対象期間は 2006 年 12 月から 2007 年 11 月までの計 12 ヶ月とし た。これらのデータは JAXA が運営している EarthCARE 研究 A-Train プロダクトモニタのサイトからダウン ロードできる。このサイトから入手できるプロダクトにはダスト以外では水溶性および海塩エアロゾルの消散 係数が与えられているが、本研究ではダストの氷晶核能に注目するため、ダスト消散係数が 3 種類のエア ロゾルのそれの合計値の 7 割以上を占める場合のみを解析対象とした。雲相は近接するダストの存在に よって影響されると仮定し、ライダシグナルは減衰が大きいため、雲頂の雲相と、その直上のダスト消散係 数を比較した。

[結果と考察]

図1は横軸に温度、縦軸に氷相割合を取り、いくつかのダスト消散係数の値に対してプロットしたものである。 この図から氷相割合は温度の関数であるだけでなく、ダスト消散係数が大きいほど氷相割合が高いこと、 つまりダストが多ければより凍りやすいことが観測データから示された。また図2は横軸にダスト消散係数、 縦軸に氷相割合を取り、いくつかの温度の値に対してプロットしたものである。最低温ではほぼ横軸に平行 で、ダスト消散係数に依らず高い氷相割合を示しており、homogeneous nucleation が起こっていることが示 唆される。中程度の温度では、ダスト消散係数が大きい方がより高い氷相割合を示す傾向が顕著である。 量的な変数でない雲相のダスト消散係数への依存性について、今後は氷晶数濃度や氷晶粒径などの微 物理特性との関連性、海陸差や高度差、地理分布、ダストの化学的性質などから詳しく調べていく必要が ある。



・成果報告 学会発表リスト

International Symposium on Atmospheric Light Scattering and Remote Sensing '19(大気中の光散乱とリモートセンシングに関する国際シンポジウム),

Effect of Aerosol Species on the Cloud Phase with Active Satellite Products,

K. Kawamoto and A. Yamauchi,

2019. Jun. 17, Hangzhou, China (招待講演)

International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (写真測量とリモートセンシング国際学会), Relationship between dust amount and determination of the cloud phase,

K. Kawamoto and A. Yamauchi,

2019. Oct. 26, Nanjing, China (招待講演)

日本気象学会秋季大会 ダスト消散係数と氷晶活性の関係 河本和明、山内晃 福岡県福岡市(口頭発表)

American Geophysical Union Fall meeting (米国地球物理学連合秋季大会), Influence of dust extinction coefficient on the ice-cloud fraction over high-latitudes with CALIPSO, K. Kawamoto, A. Yamauchi, K. Suzuki and J. Li, 2019. Dec. 13, San Francisco, CA, USA (ポスター発表) 東アジアモンスーンが励起するマルチスケール黒潮変動

鹿児島大学水産学部 中村 啓彦

目的

黒潮流量は,夏季に多く,秋~冬季に少ないという観測事実がある。従来のスベルドラップ理論で予測さ れる流量の季節変動は,この観測事実と180度位相が異なるが,この矛盾は従来の理論の枠組みでは説明す ることができない。申請者は、黒潮の季節変動は,黒潮直上の風応力が黒潮の大・中規模現象を駆動する入 口の仕組みと,黒潮の運動エネルギーが乱流スケールで散逸する出口の仕組みで支配されており,入口と出 口の仕組み,そして双方を繋ぐエネルギー遷移の仕組みから統合的に調べる必要があると考えている。本研 究はこのエネルギー遷移から乱流散逸へと至る仕組みに関して、黒潮と急峻な地形間の相互作用で生じる乱 流混合過程に注目し、現場観測をベースとしてその詳細を明らかにすることを目的とする。

観測

2019年11月15日から24日まで実施された鹿児島大学水産学部練習船「かごしま丸」KG1915航海におい て係留観測を行った。九州南部のトカラ海峡において、平瀬と呼ばれる瀬の東側斜面上水深約350mの地点 (図1右中赤丸の点)に、九州大学応用力学研究所所有の2台の音響ドップラー流速計(ADCP, Teledyne RDI 社製 Workhorse Sentinel 300kHz)をボールブイの上下に取り付け、海底から立ち上げる形で係留した。ボー ルブイは深度約170mに位置し、その上下約5mずつを除いた深度60mから280mまでの流速プロファイル が11月17日13時から22日14時までの間に得られた(図2)。また、航海中に東京海洋大学の長井健容助 教の協力のもとで係留点の近傍において微細構造プロファイラー(VMP-250, Rockland Scientific 社製)によ る乱流強度の計測も行った。

結果

観測された流れは、時間平均的には180m深より浅い層に0.6 m s⁻¹程度の流速のコアを有する一方で200m 以深では0.1 ms⁻¹の程度の弱い流れであり、それらの境界部分に強い鉛直シアを形成していた(図2)。このよ うな流速構造は南東へ流れる黒潮が平瀬に衝突・変形することで形成されたと考えられる。この強い鉛直シ ア層以深の流れは半日周期で変動しており、内部潮汐の影響を受けていることが推察される(図2)。22 日の 12 時頃に係留点の近傍で行った乱流計測からは、シアの強い層である深度160m 付近において5×10⁵ W kg⁻¹ に達する極めて高い乱流運動エネルギー散逸率が得られた。これらの観測結果より、平瀬下流側ではシア 不安定により活発に乱流エネルギーの散逸が生じている可能性が示唆された(図3)。観測結果の解釈のため に現実的な地形と黒潮を組み込んだ高解像度(平瀬周辺で水平200m,鉛直5mの格子幅)の静水圧近似海洋モ デルによる数値実験を行った。潮汐を入力しない実験では、観測された強い鉛直シアを持った黒潮の構造は 再現できたものの、半日周期の変動は見られなかった。また、慣性振動も顕著ではなかった。一方、4 大分潮 の順圧潮汐で開境界から駆動した実験では、観測されたような半日周期の流速変動が再現されていた(図は省 略)。したがって、黒潮と半日周期潮汐流間の相互作用が係留点において観測されたシア不安定と乱流運動エ ネルギーの散逸に重要な役割をしていると考えられ、今後は数値モデル実験結果をベースとしてその詳細な 過程を明らかにする予定である。

研究成果報告

堤 英輔(東大),トカラ海峡と台湾東方 I-Lan Ridge 上における乱流の生成過程とエネルギー収支,九州 大学応用力学研究所共同研究集会「東アジア縁辺海の海水循環と生物化学過程」,2020.02.02.

研究組織

中村 啓彦 (鹿児島大学水産学部,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 (東京大学大気海洋研究所,研究協力者), 小針 統 (鹿児島大学水産学部,研究協力者), 仁科 文子 (鹿児島大学水産学部,研究協力者)



図1 (左)衛星海面高度計(AVISO)による係留期間中の平均的な絶対地衡流速場。矢印は流速ベクトル、 カラーシェードはその絶対値、等値線は海面高度を表す (右)係留系設置点(赤印)と等深線







図3 11月22日正午ごろに係留点近傍で行った微細構造観測結果: (a)係留系で計測された流速 (b)海水の密度 (c) 乱流運動エネルギー散逸率

双方向粒子追跡実験による奄美海域産スジアラ卵仔魚の産卵場推定

鹿児島大学学術研究院理工学域工学系 加古真一郎

1. はじめに

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おり、我が国の南西諸島の漁業者にとっても重要な水産資源の一つである(宍道,2016)。本種の資源保護のため、奄美群島など一部の漁協では人工種苗生産や稚魚の放流などを行っているが、漁獲量は近年も低位横ばい傾向が続き、その回復には至っていない。平成30年度の共同利用研究では(30 特 1-5)、今まで未検討であった資源保護対策の一つである産卵期・産卵場の保護の有効性を数値実験により示した。しかしながら、本種の生息域は台湾以南に及ぶため、上記研究の様な奄美群島からの卵仔魚の来遊を考慮したのみの解析だけでは不十分である。そこで本研究は、高解像度の海洋循環モデルを用いて双方向の粒子追跡実験を行い、奄美群島に着底するスジアラ稚魚の起源(産卵場)をトカラ列島〜台湾島周辺海域に拡大して推定した。加えて、各産卵場起源の稚魚が奄美群島へ着底する割合とその変動要因を明らかにすることで、より効果的な資源保護策の検討に資することを目的とした。

2. 使用モデル

本研究では、Kako et al. (2014) と同様の粒子追跡モデルを用いてスジアラの産卵場推定を行なった。 対象海域は、20°N-34°N, 118°E-133°E である。この粒子追跡実験では、主に表層に分布するスジアラ卵 仔魚 (Doherty, 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)及び Basin(DR_B; Hirose et al., 2013)の表層流速場を用いた。DR_E (DR_B) の空間解像度は緯度方向に 1/60°(1/4°)、経度方向に 1/75°(1/5°)、時間解像度は1時間(1日)である。粒子追跡モデルの空間解像 度は両モデルに合わせて海域毎に設定した。

3. 双方向粒子追跡実験(逆方向粒子追跡実験+順方向粒子追跡実験)

スジアラは、5-7 月の新月の大潮期にサンゴ礁周辺で産卵し(Samoilvs and Squire, 1994; Ebisawa, 2013)、翌月の新月期にその仔魚は稚魚となって、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)に着底する(Doherty et al., 1994; Light and Jones, 1997)。この知見を踏まえて、奄 美群島(奄美大島、喜界島、徳之島、沖永良部島、与論島)の沿岸域27 地点を粒子の初期位置として双 方向の粒子追跡実験を行ない、産卵場を推定した。本実験ではまず始めに、産卵場候補を決定するため、 初期位置に粒子を各 1000 個配置した後、表層流速を逆向きとして着底月から31 日間(≒仔魚の浮遊期 間)時間を遡る逆方向の粒子追跡実験を行なった。そして産卵期間内(実験最後の4 日間仮定)におい て、岸に隣接する格子内の粒子数を約20 km 間隔ごとに比較し、粒子が最も多く着岸した格子を産卵場 候補として設定した。

上記の逆方向粒子追跡実験には不可逆過程であるランダムウォークが含まれているので、次に、この 産卵場候補の全てから1000個の粒子を投入し、産卵期をスタートとした31日間の順方向の粒子追跡実 験を行った。そして、着底期間(実験最後の4日間と仮定)に岸に隣接する格子内に存在する粒子数を カウントし、その粒子数が初期粒子数(=1000)の5%を超える粒子群の起源を産卵場として定義した。こ の様な実験を 2007-2015 年のスジアラ産卵期において行なった(全 27 ケース)。

4. 結果

図には示さないが、双方向の粒子追跡実験から推定された産卵場は、そのほとんどが奄美群島および 琉球列島周辺に限られ、26°N以南が産卵場として推定されたケースは、27ケース中9ケースでしかな かった。図1に、数値実験から得られた7月の平均着底率とその標準偏差を島ごとに示す。各産卵場で 生まれた稚魚の奄美群島への平均着底率は、数%から30%程度であり、低緯度ほど低い傾向にある(他の 月も同様)。しかしながら、標準偏差は北部海域の方が大きいため、資源保護に有効な産卵場は年ごとに 大きく異なることが示唆される。そこで、各産卵場の定着率が大きく経年変動する要因を調べる為、ク ラスター解析(ウォード法)を用いて各島からの着底率をグループ化(図2)し、その変動特性を検討し た。但しこの解析では、奄美群島への平均着底率が低い26°N以南の産卵場を除いた10の島を対象とし て行った。各グループからの着底率が大きく経年変化する理由を粒子の移動経路と流速場を比較するこ とで調べた結果(図なし)、奄美大島北西部の高気圧生渦の存在や琉球海流の強度に加えて、低気圧性の 中規模渦による琉球列島東側の流路変動が、沖縄からの着底率の増減に対して影響していることがわか った。

5. まとめ

本研究は、奄美群島に着底する卵仔魚の起源を双方向の粒子追跡実験によって推定した。その結果、 26°N以南からの卵仔魚の来遊率は非常に低く、奄美群島(特に奄美大島、徳之島)からの着底率が高い ことがわかった。また、最大着底率の経年変動は、黒潮と奄美群島との距離、奄美群島北部の渦の強さ と位置、琉球海流の強度、琉球海流東側の中規模渦の存在の有無など複合的な要因に依存していること が示唆された。



図1.全27ケースの数値実験から得られた各産卵場産稚魚の奄 美群島への7月における平均着底率(青点)とその標準偏差



6. 研究体制

図 2. 着底率の月毎の経年変化。カラーバーの色は、クラスター 解析によって分けられたクラスターを示す(青枠内参照)。

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

GPM 主衛星搭載2周波降水レーダと EarthCARE 衛星搭載雲レーダの相互活用のための研究

名古屋大学宇宙地球環境研究所 高橋 暢宏

1. 目的

本研究は2021年度に打ち上げ予定のEarthCARE衛星に搭載される雲レーダ(CPR)の性能を最大限に引き 出すことを最終目標として、現在軌道上で観測を継続しているGPM衛星搭載二周波降水レーダ(DPR)の知 見を用いて、CPRによる雲物理量推定のための基礎的なデータの蓄積を目指すものである。加えて、今年度 はNASAが計画しているACCP(aerosol, cloud, convection and precipitation)において雲レーダと降水レ ーダの同時搭載が検討されることを踏まえて、CloudSatとGPM/DPRのマッチアップデータを用いて、シナ ジー観測について基礎的な情報の蓄積を目指した。

2. 研究の方法

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(規格化散乱断面積)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ため、地表面散乱の特徴について、調査した。降水 レーダについては、TRMMの end of mission (EOM)時の特別観測(90°ヨーマヌーバ実験)において詳細な データが得られているため(Takahashi 2020)、その知見を雲レーダの観測に活かす。また、ACCP時代を想定 して雲レーダ(W帯)と降水レーダ(Ku帯)を用いた2周波プロダクトの可能性について、CloudSat と GPM/DPR のマッチアップデータセット(Turk 2017)を用いて解析を行った。

2.1 地表面エコーの評価

Takahashi (2020) では、TRMM の EOM 時の 90° ヨー特別実験(以下「90Y」と呼ぶ)のデータを用いて地表面状 態を評価した。90Y では、1 つのターゲットに対して様々な入射角で観測することができるため、それぞれの ターゲットに対して入射角依存性の曲線を得ることができる。この曲線(実際には入射角 7 度以上の直線部 を用いて傾きと切片を計算した)の特徴が、地表面、特に海面、の状態を良く表し、GPM の走査幅の範囲で は、その特徴がそれほど変化しないことも明らかになったため、ここではその手法を応用して、CloudSat と ほぼ同時刻・同地域を観測した GPM/DPR のデータを用いて、地表面(主に海上)の規格化散乱断面積とその 入射角依存性を比較した。後述の Turk (2017)によるマッチアップデータプロダクト (2B. CSATGPM. COIN) で は、入射角依存性を推定するために必要なデータが備えられていないため、CloudSat と GPM/DPR のそれぞれ のデータからマッチアップするケースを抽出した。

2. 2 CloudSat と GPM/DPR のマッチアップデータの解析

Turk (2017) の CloudSat と GPM/DPR のマッチアップデータデータ (2B. CSATGPM. COIN) を用いて、両者の 相互観測の可能性を調査するとともに ACCP において提案している降水レーダの利用可能性について評価を 行った。2B. CSATGPM. COIN は NASA の STORM サイト (<u>https://storm.pps.eosdis.nasa.gov/storm/</u>) より入手 した。今回の比較では、減衰による効果を極力避けるために、中低緯度域における高度 5000m 以上の領域(雪を想定)について、それぞれの Z の特徴について比較した。

3. 研究成果報告

3.1 地表面エコーの評価

まず、GPM/DPRのKuPRのデータを用いて、それぞれのスキャンにおける入射角依存性の特徴を抽出した結 果として、それぞれの傾きと切片の関係を確認した。図1に示す通り、いくつかのケースを除いて非常によ り関係を示すことを確認した。この値は、一般的には海上風速に大きく依存することがわかっているが、直 下付近はそれ以外の要素も働き、偏差が大きくなっている。なお、例外的な領域は、おもに海氷域に対応し ていることを確認した。直下のみの観測である CloudSat のデータと入射角依存性のデータを比較すると(図 2)、CloudSat の規格化地表面散乱強度はおよそ 1.36dB の幅を持っていることが確認できた。この値は、 EarthCARE において地表面散乱を用いて減衰量を推定する場合における誤差としても使える。

3. 2 CloudSat と GPM/DPR のマッチアップデータの解析

CloudSat と GPM/DPR のマッチアップデータから CloudSat の-30dBZ の閾値を満たすもののうち KuPR が 15dBZ の閾値を満たす割合を計算した(図3)。ここから、KuPR を十分高感度化しないと2周波での解析がで きないことを示している。一方で、KuPR と KaPR の二周波比から推定した W バンドに対する二周波比を考え ると、KuPR の検出限界が下がると予想されたので、やや矛盾した結果となっている。また、マッチアップデ ータから DPR の KuPR の Z に対する CloudSat の Z の存在範囲の統計を取ると(図4)、W バンドの観測値は 3dBZ 付近で飽和していることがわかる(この時のダイナミックレンジは KuPR において十数 dB)。これらを総 合して考えると、ACCP を考えた場合に 30dB 程度のダイナミックレンジを確保するには KuPR の感度をこれま でより 10 dBZ 以上向上させる必要があることが分かった。

参考文献



Turk, J., 2017, CloudSat-GPM coincidence dataset, version 2A. NASA Tech. Memo., 23 pp. 発表論文

Takahashi, N., 2020, Analysis of Surface Cross-Sectional Data Taken During the 90° Yaw Experiment of the TRMM Precipitation Radar, IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, DOI 10.1109/TGRS.2020.2969192

海洋モデルを用いた、河川水の変動が富山湾の海洋構造に及ぼす影響のシミュレーション

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魚種が多く、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、能登半島が南下経路を物理的に遮断するだけでなく、避寒目的で南下する生物にとっては水温等の海洋環境も影響すると考えている。

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、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た。この原因として湾奥部は河川水の影響を受けて海面冷却が遅れるためと考え、海洋同化モデル DREAMS_M において実測結果と同様に湾口部と湾奥部において水温差が再現されることを示した。本研究では、富山湾奥の暖水域の出現に、河川水の流入の多寡が影響することを検証することを目的とした。

2. 方法

本研究では、高解像度海洋同化モデル DREAMS_K を作成し、富山湾内を水平解像度 500m、鉛直方向に水深 1~1092m (61 層)とし詳細に計算した。降水は気象モデルの降水量データを同化し、さらに河川の淡水流入量を変化させるため富山湾に流れ込む 5 つの一級河川(小矢部川、庄川、神通川、常願寺川、黒部川)に対して実際の日別河川流量データを同化した。モデルにおいて、各河口部の地形を南側に 0.5~2 km程度掘り込み、実際の河口での水の混合を再現した。

2017 年 9 月 1 日~12 月 31 日の期間に対して、①河川流量なし、②河川流量 1 倍、③河川流量 2 倍の 3 つの設定で計算を行い、暖水域の形成状況を比較し、湾奥部の 1 地点(北緯 36.867 度、東経 137.083 度)において水温鉛直分布の時間変化を調べた(図 1)。また、河川流量 1 倍のモデルにおいて、湾奥部

(北緯 36.78~36.87 度、東経 137.1 度以西)と湾東部(北緯 36.93~36.99 度、東経 137.3~137.4 度) の水深 100m における平均塩分の時間変化を調べた。

3. 結果および考察

富山県を流れる 1 級河川は、春の雪解け期と夏の梅雨前線や台風の時期に河川流量のピークがあり、 5 河川の合計河川流量は、2007 年~2016 年平均で 339 ㎡/秒であった。解析対象とした 2017 年は 402 ㎡/秒で、平均の 119%となり、河川流量の多い年であった。富山湾中央部に流れ込む神通川が 5 河川合 計の 51%で最も流量が多く、次に県西部の小矢部川が 16%、西部の庄川が 14%と、富山湾奥中央~西 部にかけて、河川流量が多い特徴がある。

河川流量の同化をしなかった場合と河川流量を1倍とした場合のモデルの差から、河川を同化しなかった場合、最大で1℃以上海面の水温が高くなった(図2)。これは、海水温よりも冷たい河川水の流入がなくなることによるためと考えられる。また、河川水の影響が直接は及ばない水深50m付近において、河川の同化をしなかった場合、11月上旬に0.5℃以上冷たくなった。これは、河川由来の安定した表層の低塩分層が薄くなったために、鉛直混合の進行が早まったためと考えられる。

河川流量2倍のモデルと河川流量1倍のモデルとの差は、表層の水温が低くなり、50~100mの対馬 暖流水の高塩分水の影響が強い部分では水温が高くなった(図3)。点線で示すように、10月から12月 に水温差が正となる層の厚さは50m程度から100mに深くなった。これは、海面冷却による鉛直混合 の進行と関連しており、河川流量2倍モデルの方がゆっくりと鉛直混同が進むことを示している。

湾奥部と湾東部の水深 100m の塩分を比較すると 11 月に湾東部は塩分が低下する一方で、湾奥部は 塩分の低下が起こらず、富山湾内においても場所の違いによって鉛直混合の進行に違いがあることがわ かった(図 4)。

冬期の富山湾奥部に暖水域が形成される過程において、河川の流量の多寡により河川由来の低密度水 の成層の状態が変化し鉛直混合の進行に影響することで、暖水域の水温が変化することがわかった。今 後、どの季節の河川流量が暖水域の形成に強く影響するかを検討する必要がある。



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	主任研究員
所内世話人	九州大学応用力学研究所	広瀬	直毅	教授
研究協力者	九州大学応用力学研究所	千手	智晴	准教授

国際共同研究体制の構築

地球温暖化に起因する東シナ海の成層構造と物質循環の変化に関する研究

富山大学 大学院理工学研究部 張 勁

Establishment of international cooperative research: changes in stratification and material cycle in the East China Sea relate to global warming

We organized various international meetings and joint cruises this year and discussed how to explore the direction of future international collaborative research.

1. Meetings and workshops for international cooperative research

1) The third workshop of WESTPAC WG06

We organized the third workshop of WESTPAC WG06 "A framework for

cooperative studies in the Western Pacific Marginal Seas: Energy and materials exchange between land and open ocean" in Seoul, Korea, on 10-11 June, 2019. Seventeen experts from five countries in the East and Southeast Asia gathered together. In the meeting, we shared current information on national scientific activities and international cooperative research



programs which are on-going or being planned for the future. Useful information was also exchanged about research cruises in the marginal seas and available berths for scientists conducting cooperative research. We started planning the future project which will contribute to the activities of WESTPAC focusing on the UN Decade of Ocean Science.

2) Asian GEOTRACES Workshop

We organized the Asian GEOTRACES Workshop in Qingdao, China, on 7-8 December 2019, where thirty-one experts from seven countries gathered. In this symposium, we conducted a comprehensive assessment of the research status of the source/sink distribution and internal circulation process of trace elements and isotopes, especially mercury and other contaminants in the Northwest Pacific. The participating experts conducted in-depth discussions on the future development of the GEOTRACES plan, sampling of trace elements, and international comparisons, and sorted out the key scientific issues, which need to be resolved in the study of trace elements and isotopes in the Northwest Pacific. The workshop has promoted the regional cooperation and accelerated the development of GEOTRACES in Asia.

3) The Decade Regional Planning Workshop for the North Pacific and Western Pacific Marginal Seas

Under the framework of the UN Decade of Ocean Science for Sustainable Development (2021-2030) proclaimed by the United Nations General Assembly (UNGA) in 2017, the Decade Regional Planning Workshop for the North Pacific and Western Pacific Marginal Seas was held in Tokyo, Japan from 31 July-2 August, 2019. We joined this workshop to introduce our work of WESTPAC WG06 and contributed to the sub-session 1 (A clean ocean) and sub-session 6 (A transparent and accessible ocean). Sub-sessions 1 aimed to identify, quantify and reduce the sources of pollution and remove pollutants from the ocean. Sub-session 6 aimed to share ocean research (data, information, and technologies) and inform all nations, stakeholders and citizens of their decisions.

4) International scientific meetings

Several oral and poster presentations regarding the ocean mixing,

ocean-atmosphere interaction and the ocean-river interaction, were given in the 2019JpGU meeting (Chiba, May) and 2019 JOS Annual meeting (Toyama, September). The quantification of several processes using multiple tracers was introduced, such as the atmospheric nitrogen deposition on the sub-tropic NWPO and its impact, the transport of the upper Kuroshio intermediate water from Northwest Pacific to the Sea of Japan, etc.

2. Quantification of oceanographic processes using multiple chemical tracers

In order to advance the research on ocean mixing and deeply analyze related oceanographic processes, characterization and quantification of water masses interaction between ECS, Kuroshio water, and adjacent marginal seas using multiple chemical tracers were conducted. From these researches, achievement is expected in these respects: 1) direct evidence for fluvial input, e.g. CDW to ECS, rivers along Japan to the ocean; 2) measure and quantify the various water masses mixing with the Kuroshio water, and their transport to the downstream; 3) estimate nutrient fluxes from atmospheric deposition; 4) identify and quantify the material (e.g. particulate matter) transport via shelf pump. The tracers are as follow:

1) As fingerprint:

δ¹⁸O (fresh-salt water mixing)
Sr isotope (terrestrial input)
Nd isotope (water masses)
2) Residence time estimation:

¹³⁷Cs (30.17 yr); ²²³Ra (11.4 d); ²²⁴Ra (3.7 d); ²²⁸Ra (5.75 yr); ²²⁶Ra (1600 yr)

3) Quantification and Qualification: REEs, Fe etc.



Fig1. Oceanographic processes and tracers

3. International cooperative research cruises in 2019

Various international cooperative research cruises were carried out in the MSJRK (sub-group 2), ECS (sub-group 3) and ETK (sub-group 5) region categorized in the first workshop of working group-06 under the IOC Sub-Commission for the Western Pacific (WESTPAC-XII). Nagasaki Maru cruise (NN27, NN33, NN40) from Japan and TAN KAH KEE cruise (TKK1903) from China were conducted around the Sea of Japan, the ECS and the Philippine sea in May, July and October 2019 (Figure. 2), in which the physical and chemical parameters were measured with sensors. Samples for chemical tracers such as REEs, Nd and Rn isotopes were preserved after acidifying, and turbulence profile was analyzed using TurboMAP. Some significant phenomena were discovered after the analysis using both chemical tracers and physical turbulence data, and further detailed study is expected to be conducted.



Fig.2 Stations in NN27, NN33, TKK1903 cruise

2020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

短波レーダーと数値海洋モデルの流況特性の把握への応用性を吟味したところ、短波レーダーは 沿岸域の推定精度が劣る可能性があり、また数値海洋モデルも湾外の黒潮に由来する変動の再現性が 低い可能性が示唆され、より段階的な検証が必要であると考えられる。

2 目的

相模湾は南北方向に約60km、東西方向に約55kmの大きさを持ち、南部が北太平洋に向けて開放され ている為、湾の流況は黒潮からの影響を強く受ける。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。本研究では、短波レーダーと数値海洋モデルの流況特性の把握へ の応用性を吟味し、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。

3 方法

3.1 短波レーダ

短波レーダーは湾内の流れを広域的に把握できる観測手法であるが、相模湾レーダーの場合 (Figure1., 左)は、25時間程度の移動平均を用いなければ ADCP 観測結果と良好な一致が見られないこ とが知られている。本年は、相模湾 HF レーダーを用いた流況推ののn 精度向上を目的としてエラーの 空間パターンの推定を行った。

3.2 海洋数値モデル

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。本研究では、海洋大循環モデル MITgcm を用いて水平解像度 1/24 度、1/96 度への二段階 の力学的ダウンスケーリングを実施した(Figure 1)。初期・境界境界条件は海洋再解析値 JCOPE2 を、 風応力等の表面境界条件に関しては MSM を用いた。2018 年 10 月 1 日未明に江ノ島沖にて定置網が急潮 被害を受けたとの情報を得たため、当時の流況推定を行った。



Figure 1 海洋数値モデルによる JCOPE2 再解析からの力学的ダウンスケーリング

4 結果

4.1 短波レーダ

2018 年 3 月から 2019 年 2 月の 1 年分のレーダー流速データを用いてそのヒストグラムと、同じ平均 分散を持つガウス分布との RMS 比較を行った(Fig. 1, 中央, 右)。東西流速は主に湾西部、南北流速は湾 北部で正規分布から離れていることが分かる。一般に HF レーダーデータは測定位置が遠ざかるにつれ 低下する傾向にあるため、得られた結果はレーダー基地局である大島、荒崎との位置関係に由来する ものと考えられる。



Figure 2 HF レーダー観測範囲と基地局(左)、東西方向流速の正規分布との RMS(中央)、南北方向流速の正規分布との RMS(右)

4.2 海洋数値モデル

海洋数値モデルにより推定された、江ノ島沖定置網設置地点における流速の時系列からは、急潮が発 生したと考えられる 10 月 1 日に北向き流速、東向き流速の双方が突発的に増加していることが確認で きる。一方で、別途過去に観測した ADCP 時系列で見られる卓越した 3 日から 4 日の周期の変動が確認 できない。湾外部の黒潮の再現性も不明であるため、相模湾内の局地的な風応力に対する応答以外の現 象がどれほど海洋数値モデルで再現できるかはさらなる考察が必要である。



Figure 3 海洋数値モデルにより推定された、江ノ島沖定置網設置地点における流速の時系列

5 考察

短波レーダーと数値海洋モデルの流況特性の把握への応用性を吟味したところ、短波レーダーは沿岸 域の精度が湾中央部に比べて劣る結果が確認できた・また、数値モデルに関しても突発的な風応力に 対する応答は確認できるが、湾外の黒潮に起因する循環の再現性には課題が残る。空間的な分布を知 るには空間的に密に表層ドリフターを配置する等、新たなアプローチが必要と考えられる。 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。一方で、資源探査にかかるコストが課題となっており、従来の方式とは 異なる効率的な探査機材の開発が望まれている。本研究では、OBEM (Ocean Bottom Electromagnetometer) を用いた調査方法に着目し、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 OBEM による計測において不可欠となる機体の着底動作に注目し,安全かつ 高い着底位置精度を有する機体の運動制御系の開発のため,海底面が機体の滑空性能に及ぼす影響につ いて CFD 計算により調査した。

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、機体上部に装着された翼により滑空することで目的の海底計 測点に移動着底しOBEMによる計測を実施する。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する。翼面 下には、前後に2つの耐圧容器を配置し、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)、各種センサー、機体制御用コンピュータを搭載する。Fig.1に機体の内部構造を示す。



Fig.1 Construction of the vehicle

3. 滑空性能に対する海底面の影響

グライダー型海中ビークルの滑空性能に対する海底面の影響を調査するために CFD 計算を実施した。 すなわち,海底面を想定した境界を計算領域の底面に設置し,一様流中の機体周りの流れと機体に作用 する流体力を,迎角と底面からの機体高度を変更して計算した。迎角は-30°から 30°まで 10°刻みに 変化させ,機体高度は 0.1m から 1.2m まで変化させた。CFD 計算には OpenFOAM を使用し, PIMPLE 法による計算を実施している。乱流モデルには SST k-ωモデルを採用した。計算領域は幅,高さ共に 5.0m である。計算領域および機体周りの格子構造を Fig. 2 に示す。計算に用いられた計算格子の数は 160 万 から 170 万である。

機体周りの流速分布の計算結果を Fig. 3 に示す。機体高度は底面より 0.6m, 一様流の速度は 0.1m/sec であり, 左より順に迎角が 0°, 30°, -30°の場合の結果である。計算結果から底面の存在が機体周り

の流れに影響を与えていることが確認できる。

次に、底面の滑空性能に対する影響を検討するため、機体表面の圧力を積分して機体に作用する流体 力を求め、これを整理して揚抗比を算出した。計算結果を Fig. 4 に示す。左図は迎角に対する揚抗比を 示し、右図には迎角が 0°の場合の揚抗比を底面からの機体高度について纏めている。底面の滑空性能 に対する影響は明らかに見られるが、その影響は底面のごく近傍に限られることが確認された。



Fig.2 Mesh constructions for the calculation



Fig.3 Calculated velocity distributions around the body (Side view)



Fig.4 Effect of bottom to lift-drag ratio

4. まとめ

海底資源探査用グライダー型水中ビークルの着底時の海底影響に注目し、機体の滑空性能について CFD 計算により調査した。その結果、海底面の存在により揚抗比が変化し、最大で約55%増加すること が確認された。正確で安全な着底動作を行うためには、海底付近における滑空性能の変化を考慮して運 動制御系を設計することが重要である。

5. 成果報告

1) Yamaguchi, S et. al. (2019), "Landing Motion Control of an Underwater Glider for Ocean Floor Resources Exploration", *Proceedings of the Twenty-ninth (2019) International Ocean and Polar Engineering Conference*, 1616-1621.

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、高温下でのヘリウムイオン照射による損傷組織の発達を調べた。

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 0.1mm、直径 3mm の試料を切り出した。ヘリウムイオン照射中の損傷組織の変化を追跡するために、薄膜試料を使った。電解研磨は 2%の NaOH 溶液で行った。電圧は約 10V であった。ヘリウムイオン照射は島根大学に設置されたイオン加速器一透過型電子顕微鏡システムで実施された。ヘリウムイオンのエネルギーは 5keV で、ヘリウムフラックスは約 1.5×10¹⁸ He/m² であった。照射温度は 773K、973K、1173K であった。SRIM 計算コードによるタングステン中に 5keV のヘリウムイオンの飛程は約 40nm で、損傷ピークは 10nm 程度であった。ヘリウム照射によって形成されたヘリウムバブルの密度の見積は平均厚さ 80nmの所で行った。その厚さはヘリウムの飛程が十分カバーできる範囲であった。

3. 実験結果と考察

773Kにおいては、ヘリウム照射量が 1.5×10²⁰ He/m² より低かったら、電子顕微鏡で観察ができる ヘリウムバブルの形成ができなかった。ヘリウム照射量がそれより高かったら、ヘリウム照射量の増加 と共に、ヘリウムバブルが形成され、バブルの密度が増加した。図 1(a)にバブルの密度、ヘリウム照射 によるスエリングとヘリウム照射量の依存性を示す。図の横軸はヘリウムの照射量で、縦軸の左はヘリ ウムバブルの密度、右はスエリングである。図 1(a)に示すように、ヘリウム照射量は 4.5×10²⁰ He/m² を超えると、バブルの密度は減少した。一方、ヘリウムバブルの形成によるスエリングがヘリウム照射 量の増加と共に増加した。図 1(b)に 973K でのヘリウムバブルの密度とスエリングの照射量依存性を示 す。ヘリウムバブルの密度変化が 773K での照射と同じように、ヘリウム照射量は 4.5×10²⁰ He/m² を 超えると、バブルの密度は減少した。一方、同じ照射量においては、973K での照射の方が形成された ヘリウムバブルのサイズは大きかった。この原因で、973K の方がスエリングの照射量は高かった。ヘ リウムの照射温度がさらに高くなっても、ヘリウムバブルの密度とスエリングの照射温度依存性が変わ らない。即ち、図 1 (c)に示すように、ヘリウムの照射温度が 1173K になると、ヘリウムバブルの密度 がさらに減少し、スエリングが増加した。また、1173K でヘリウム照射された純タグステンにおけるヘ リウムバブルの形成に比べ、W-Y₂O₃ 合金の方がスエリングは低かった。これはナノ粒子 Y₂O₃ がヘリウ ムバブル成長を抑えたことを示唆している。

高温度でヘリウム照射中に Y₂O₃ナノ粒子の成長、または縮小が観察されなかった。Y₂O₃ナノ粒子の 熱安定性がいいと考えられる。

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、5keVのヘリウムイオン照射し、ヘリウムバブルの形成とスエリングの温度依存性を調べた。ヘリウムの照射温度が高くなると、ヘリウム照射によって形成されたバブルの密度が減少し、サイズが増加した。その結果、スエリングが増加した。純タングステンに比べ、W-Y₂O₃合金の方がスエリングは抑制された。これは添加したY₂O₃ナノ粒子がヘリウムバブルをトラップし、バブルの成長を抑えたと考えられる。



図1 各温度でヘリウムイオン照射した W-Y₂O₃ 合金における 973 ヘリウムバブル密度、スエリングと照 射量の依存性

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。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。これまで、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された酸化物 被覆層の非晶質化とそれに伴う剥離強度の低下を明らかにした[1]。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°C)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 °Cの 3 時間とした。図 1 に MOCVD 装置にて成膜された Er₂O₃/Y₂O₃/SUS 二重被覆膜における代表的 な断面 TEM 像を示す。成膜された 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。また、SUS 基板と Y₂O₃ 中間層の界面には Fe と Y から構成される金属間化合物相(Fe-Y-O)の

生成が確認された。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) 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 2 参 照)、、室温にて 1.5 dpa 相当の Cu²⁺イオン照射を実施した。 照射損傷領域の微細組織の回復を目的として、Ar 雰囲気中 にて 300℃及び 500℃の 10 時間熱処理を実施した。



図 1 Er₂O₃/Y₂O₃/SUS 二重被覆膜における 代表的な断面 TEM 像

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。



図 2 TRIM コードにて算出された 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

3. 結果と考察

室温でのCu²⁺イオン照射後の酸化物層の剥離強度は照射前と比較して70%まで低下することが明らか になっている[1]。この剥離強度を回復させることは酸化物被覆層の長寿命化につながると考えており、 Cu²⁺イオン照射後の酸化物被覆層の後熱処理(ポストアニール)を実施した。図3にCu²⁺イオン照射後 のEr₂O₃/Y₂O₃/SUS 二重被覆試料のおける後熱処理後の剥離強度の比較を示す。イオン照射前後の剥離強 度値は参考文献[1]から引用した。Cu²⁺イオン照射後の剥離強度は単調に低下する一方で、後熱処理によ って若干ではあるが剥離強度は回復する傾向が見られた。しかしながら、300℃及び500℃にて後熱処理 を実施したが、熱処理温度による回復度合いの明確な違いは見られなかった。一般的に、金属材料にお ける照射損傷の回復は熱処理にて可能であると理解されているが、酸化物では熱処理以外の手法が必要 であると考えられる。一方、Cu²⁺イオン照射による密着強度の低下要因としては、Y₂O₃/SUS 界面でのイ

オン照射による Fe-(Y)-O 相の生成促進及びア モルファス化であると考えられている。現在、 300℃及び 500℃にて後熱処理後の Y2O3/SUS 界面の微細構造変化について調査している。

参考文献

[1] 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





プラズマに対向した堆積層の動的水素リテンションに関する研究

京都大学大学院工学研究科 高木郁二

要旨:プラズマに暴露された固体表面の水素の挙動に関する実験的な研究を2つ実施した。タ ングステンにイオンを注入する実験では再結合定数の温度依存性を得た。ホウケイ酸ガラスを 重水素プラズマに曝す実験では、重水素がガラス表面で鏡面反射していることが示唆された。

1. 目的

プラズマの長時間放電に大きな影響を及ぼす因子には、プラズマ対向壁からの水素放出現象や壁にお ける水素粒子反射現象がある。前者の評価のためには壁への水素リテンション(保持量)を定量的に評 価する必要があり、後者については基本的な反射の性質から調べていく必要がある。本研究ではそれぞ れの現象について実験的な研究を行った。

2. 水素リテンション

試料はニラコから購入した純度 99.5%、厚さ 0.1mm のタングステン板である。この試料を加熱し 2keV の重水素イオンを表面に対して 45°方向から照射した。イオン化断面積から推定したイオン種は D₂+であり、照射フラックス Fは 1.0×10¹⁹ m⁻² であった。次にイオンを照射している状態で、表面に対 して垂直に 1.7MeV の ³He⁺イオンビームを入射させ、核反応 D(³He,p)⁴He によって放出される陽子(p) のエネルギースペクトルから試料表面近傍の重水素深さ方向分布を得た。最大分析深さは 1.5 μm であ った。

核反応による測定は非破壊的な分析法であり、同一の 試料で 665 K → 555 K → 476 K → 416 K → 370 K と 温度を変え、それぞれ定常の状態で測定した。温度を変 える際は一旦 673 K に加熱して試料中の重水素を放出 させた。得られた重水素深さ方向分布は表面から 0.6 μ m までの濃度がほぼ一定であるため、この領域の平均濃度 を *C*₈ とした。

照射した重水素はほとんど裏面からは透過しないこ とが分かっているので、近似的に $F = k_{\rm u} C^2$ が成り立つ。 ここに $k_{\rm u}$ は再結合定数である。 $F \ge C_{\rm s}$ から直接求めた $k_{\rm u}$ の値を図1に示す。再結合定数の温度依存性は他のデ ータと似ているが、絶対値が著しく異なった。試料中に 重水素のトラップが存在すると、 $C_{\rm s}$ には捕捉された重水



図1 タングステンにおける重水素の再結合定数

素も寄与するため、再結合定数は過小評価される。従って、本研究の試料は他の研究例に較べてトラッ プが少なく、より確からしい値が得られた可能性が高い。また、温度依存性はアレニウス図上で直線と なっておらず、再結合が単純な1つの過程によるものではないことも分かった。

3. 水素の反射角度
ここでいう反射とは水素原子が原子のまま固 体表面で跳ね返る現象を言い、本研究では 1eV 程度の低いエネルギーの水素を対象としている。 表面が清浄な金属では水素は吸着し、反射する確 率がほぼゼロであることはよく知られているが、 プラズマ対向壁のように水素が既に吸着してい る表面での粒子反射係数は1に近いことが以前 の研究で分かっている。今回は、重水素プラズマ に暴露し続けたホウケイ酸ガラスにおける反射 角度分布を測定した。ホウケイ酸ガラスを選んだ 理由は、粒子反射係数が高く、現象を把握しやす いためである。



プラズマは円形のノズルから噴出して試料に入射し、反射した水素をプローブで検出する。試料表面 に対する法線とノズルの軸、及びプローブの軸とのなす角をそれぞれ、αとβとし、βを変えてプロー ブに到達する水素原子数を測定した。その結果を図2に示す。横軸はβ-αであり、0は入射角と反射 角が同じ、つまり鏡面反射であることを意味する。実験値はかなりばらつきが大きいが、少なくともラ ンダムは反射ではなく、ある指向性を持っていることが分かった。更に、鏡面反射を仮定してモンテカ ルロ計算で反射角度分布を求めた結果は実験値と整合しており、水素は鏡面反射していることが示唆さ れた。

4. まとめ

プラズマから飛来する水素粒子のエネルギーは幅が広い。イオン銃による実験でのエネルギーは 2keVであったが、今後は100eVかそれ以下のエネルギーで照射し、再結合定数のエネルギー依存性を 調べる必要がある。また、水素粒子の反射角度分布については、現時点では説明ができない。古典的な 剛体球の跳ね返りを考えると、表面が原子レベルで平滑ないと起こらないからである。今後は分子動力 学計算によるシミュレーションによって考察を深める必要がある。

学会発表

- 1) 中川雄貴、中野晋太郎、高木郁二、「水素に覆われたガラス表面における水素原子反射挙動に関する 研究」、日本原子力学会春の年会 1L19, 2020.3.16-18, 福島大学.
- Y. Nakagawa, S. Nakano, I. Takagi, "Reflection of eV-energy hydrogen atom on hydrogen-covered surface," 24th International Conference on Ion-Surface Interactions 2019, Aug. 19-23, Moscow, Russia.

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	中川雄貴	京都大学大学院工学研究科	修士2年
研究協力者	鈴木順也	京都大学大学院工学研究科	修士1年

参考文献

[1] I. Takagi, et al., J. Nucl. Mater. 417 (2011) 564.
[2] Y. Furuta, et al., Nucl. Instr. Meth. B315 (2013) 121.
[3] R. A. Anderl et al., Fusion Tech. 21 (1992) 745.

トカマクプラズマにおけるジャイロ運動論解析による乱流輸送の定量化研究

核融合科学研究所 登田慎一郎

高温トカマクプラズマにおいて, 乱流輸送を定量化するのが目的である。電磁的ジャイロ運動論 解析により、微視的プラズマ不安定性を考察する。線形計算から不安定性の種類を調べ、不安 定性の励起条件を評価する。そして非線形計算からその飽和レベルを求めることで, 乱流輸送 の絶対値を決める。対象とするプラズマ分布と磁場配位は、九州大学応用力学研究所で建設が 進んでいる PLATO 装置 [1] で想定されるものである。

統合コード TASK を使って、PLATO 装置でのプラズマ分布や磁場配位が、予測されている [2]。 安全係数 q の径方向分布は、q = 1 + 2 ρ^2 ($\rho = r/a$)とした。a は小半径である。このプラズマ 分布や磁場配位を、プラトー装置で想定される一例として、ジャイロ運動論解析を行った。こ こでは、GKV コード [3]を用いている。まず、径方向の点で、線形解析を行った。図.1 で、線 形成長率のポロイダル波数依存性を示す。ここで、 γ は線形成長率、 k_y はポロイダル波数であ る。それぞれ、 $v_{\rm ti}/R \ge \rho_{\rm i}^{-1}$ で規格化されている。 $v_{\rm ti}$ はイオン熱速度、R は大半径、 $\rho_{\rm i}$ はイオ ン旋回半径である。径方向に、非常に広い範囲で不安定性が励起していることが分かる。この とき、径方向の波数 $k_x \rho_i = 0$ であり、ポロイダル波数は 0.0 < $k_y \rho_i < 1.0$ の領域でとっている。 また、角周波数の実数部分が正であり、モードは電子の反磁性方向に回転している。そして、 密度勾配が大きいところで不安定性が起こっている。従って、捕捉電子不安定性が励起してい ると考えられる。 $\rho = 0.35$ のときだけは、角周波数の実数部分が負であり、モードはイオンの 反磁性方向に回転している。低ポロイダル波数領域で不安定性が起こっているので、イオン温 度勾配不安定性を励起していると考えられる。このように径方向で、違った種類のプラズマ不 安定性を見ることができる。

次に非線形解析を径方向の3点 ($\rho = 0.45$, 0.65, 0.81) で行った。 $\rho = 0.65$ での規格化した電子、 イオン衝突周波数は、 $\nu_{*e} = 0.21 \ge \nu_{*i} = 8.7$ である。また、規格化した電子、イオン旋回半径 は $\rho_e^* = 10^{-4} \ge \rho_i^* = 10^{-2}$ 程度である。静電ポテンシャル揺動の時間発展を調べた。このとき、 径方向の波数は 0.0 < $k_x \rho_i < 2.0$ の領域でとってある。一方ポロイダル波数は 0.0 < $k_y \rho_i < 1.0$ の領域でとっている。そして、非線形計算結果の妥当性を示すために、自由エネルギーや衝突 散逸項などからなるエントロピーバランス方程式 [4] をある程度満たしていることを示した。し かしながら、静電ポテンシャル揺動の時間発展をみると、間欠的に振動している場合があり、 明白な非線形飽和を見ることができない。



図 1:線形成長率のポロイダル波数依存性

今後、さらに多くの径方向の点や、解析の際の入力の密度、温度勾配を変化させ、ジャイロ運 動論解析を行う。また明白な非線形飽和を得るために、波数モードをこれまでよりも多くとる。 プラトー装置で想定される不安定性が励起しているときに、ジャイロ運動論解析結果に基づい た粒子、熱乱流輸送モデルを提唱することが目的になる。その構築の際には、線形成長率に関 係する量 (混合長概算)や帯状流の線形応答についての特徴的な物理量を用いる [5, 6]。線形計 算結果によって、非線形計算結果を再現するモデルであり、計算コストを大幅に削減できる。 また準線形モデルは、静電ポテンシャル揺動と温度(または密度)揺動の位相差を含んでいる。 このモデルはプラズマ分布が、平坦になっている場合や、勾配が正になっている場合にも適用 できる。そして、帯状流の励起条件や輸送に対する影響について、詳細に調べる。

参考文献

- [1] A. Fujisawa, AIP Conference Proceedings 1993, 020211 (2018)
- [2] N. Kasuya *et al.*, 第16回統合コード研究会 (2018)
- [3] T. -H. Watanabe and H. Sugama, Nucl. Fusion 46, 24 (2006)
- [4] A. Ishizawa et al., Nucl. Fusion 55, 043024 (2015)
- [5] S. Toda et al., Phys. Plasmas 26, 012510 (2019)
- [6] S. Toda et al., Plasma and Fusion Research 14, 3403061(2019)

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

今年度は、線形コードに対流微分項を導入し、擬スペクトル法を用いて解くための数値スキームの検討を 行ったので、その結果を報告する。Johnsonの論文(H. F. Johnson, Comp. Phys. Comm. 43 (1987)181)に 従って離散ハンケル変換(DHT)を考察した。ハンケル変換および逆変換は

$$F_{\nu}(R) = \int_{0}^{\infty} f(x) J_{\nu}(xR) x dx$$
$$f(x) = \int_{0}^{\infty} F_{\nu}(R) J_{\nu}(xR) R dR$$

で与えられる。

x > Tに対してf(x) = 0を仮定する。 $r = RT/j_N$, x' = x/Tとおくと(ここで、 $j_N \text{l} i j_v(j_N) = 0$ を満たすN番目のゼロ点とする)、DHT は以下の関係式で与えられる。

$$f(i) = \frac{1}{T^2} \sum_{m=1}^{N-1} Y_{\nu}(m, i) F_{\nu}(m), F_{\nu}(m) = \frac{T^2}{j_N^2} \sum_{i=1}^{N-1} Y_{\nu}(m, i) f(i)$$

 $\square\square\squareF_{\nu}(m) = F_{\nu}\left(\frac{j_m}{T}\right), f(i) = f\left(\frac{j_iT}{i_N}\right), Y_{\nu}(i,m) = \frac{2J_{\nu}(j_iJ_m/J_N)}{J_{\nu+1}^2(j_m)}$

GNU が提供している GSL ライブラリー(C ライブラリー)に DHT に関するライブラリーが提供されている (https://www.gnu.org/software/gsl/)。このライブラリーを利用して以下の例題をフォートランからCライブラ リーをコールするプログラムを書いて動作検証を行った。

$$f_1(\xi) = \begin{cases} 1, & \xi < a \\ 0, & \xi > a \end{cases}$$

 $\mathbb{LLC} \tilde{\xi}_n = n\Delta\xi, a = h\Delta\xi \mathcal{E} \mathsf{tht}$

$$f_1(\xi) = \begin{cases} 1, & n < h \\ 0, & n > h \end{cases}$$

となる。ここで $\Delta \xi = X/N$ で評価できるのでa = hX/Nとなる。 逆変換は

$$F(r) = a^2 \frac{J_1(ar)}{ar}$$

で与えられる。図1に数値計算結果と解析式の比 較を示す。ここでN = 20, h = 10, X = 2を用いた。 破線は解析解をシンボルは数値解を示す。GSL ラ イブラリーの動作は確認できたが、このグリッド数 ではかなり誤差が大きいことが判明した。

図1 GSL ライブラリーによる離散ハンケル変換の数値計算例

次に DHT を用いた擬スペクトル法を検討する。場の量を以下のように表現する。



$$\phi(\hat{r}_{i},\theta_{j},\zeta_{k}) = \frac{1}{\hat{a}^{2}} \sum_{l=1}^{L-1} \sum_{m=-M/2}^{M/2-1} \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} \bar{\phi}_{m,n}(j_{m,l}/\hat{a}) \frac{2J_{m}(j_{m,l}r_{*i})}{J_{m+1}^{2}(j_{m,l})} e^{im\theta_{j}} e^{in\zeta_{k}}$$

ここで、 $\hat{r} = \frac{r}{\rho_s}, r_* = \frac{r}{a} \in [0,1], \hat{r} = \hat{a}r_*, \hat{a} = a/\rho_s$ であり、 $r_{*i} = j_{m,l}/j_{m,L}$ で定義される。

$$\langle \dots \rangle_p \equiv \frac{\hat{a}^2}{j_{m,L}^2} \sum_{i=1}^{L-1} \frac{2J_m \left(\frac{J_{m,i}J_{m,p}}{j_{m,L}}\right)}{J_{m+1}^2 (j_{m,i})} (\dots)$$

とすると、 $\langle n \rangle_p = \bar{n}(\frac{j_{m,l}}{a})$ となる。円柱体系において以下の関係式が得られる。

$$\left(\frac{\partial}{\partial \hat{r}}\phi\right)_{i,j} = \sum_{m=-M/2}^{\frac{M}{2}-1} e^{im\theta_j} \frac{1}{\hat{a}^2} \sum_{l=1}^{L-1} \left\{ \bar{\phi}(\frac{j_{m,l}}{\hat{a}}) \frac{\hat{j}_{m,l}(J_{m-1}(j_{m,l}r_{*i}) - J_{m+1}(j_{m,l}r_{*i}))}{2J_m(j_{m,l}r_{*i})} \right\} \frac{2J_m(j_{m,l}r_{*i})}{J_{m+1}^2(j_{m,l})}$$

$$\left(\frac{1}{\hat{r}}\frac{\partial\phi}{\partial\theta}\right)_{i,j} = \sum_{m=-M/2}^{\frac{M}{2}-1} e^{im\theta_j} \frac{1}{\hat{a}^2} \sum_{l=1}^{L-1} \bar{\phi}(\frac{j_{m,l}}{\hat{a}}) \frac{im}{r_{*i}\hat{a}} \frac{2J_m(j_{m,l}r_{*i})}{J_{m+1}^2(j_{m,l})}$$

これらを用いて実空間で円柱座標系における対流微分項を評価し、逆変換によりスペクトル空間に戻せばよい。問題点としては空間点が非均質になるため($r_{*i} = j_{m,l}/j_{m,L}$)、補間が必要になる可能性がある。この点に関しては今後検討が必要である。

参考文献

[1] N. Kasuya, T. Ohno, M. Sasaki and M. Yagi, 'Finite Lamor Radius Effect on Ion Temperature Gradient Instability in Cylindrical Plasmas', Plasma Fusion Res. 14, 1401158 (2019).

[2] 石田雅信, 糟谷直宏, 矢木雅敏, '円筒プラズマにおけるドリフト波不安定性の非線形シミュレーション', プラズマ・核融合学会九州・沖縄・山口支部第23回支部大会、2019年12月21日-22日、大分県別府市

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)

金属間化合物合金における空孔型欠陥と水素原子の相互作用に関する研究

大阪府立大学工学研究科 堀史説

はじめに

原子力材料の中でも核融合第一壁での水素プラズマ相互作用は核融合炉実現に向けて最 も重要な問題である。特に金属の水素脆化やボイドスエリングなどの重大な劣化を引き起 こすからである。大量の放射線に晒される金属結晶の放射線損傷環境下では、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の挙動も合金種や 照射条件に敏感に依存し単純でなく、多くの場合水素は格子欠陥との相互作用も大きい。 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評価可能である。

近年、体心立方格子(bcc)を有する金属での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。もちろん bcc 金属が必ずしも同様の水素捕獲が起こる訳ではない。し かしながら我々のこれまでの研究で bcc を基本構造とする金属間化合物で空孔への水素原 子捕獲とその安定化が明らかになって来た。特に 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閾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。今年度は実際の水素捕獲を昇温脱 離測定実験などを用いて水素の捕獲挙動について検討した。

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×10 mm×1 mm の板状に切出し表面を鏡面研磨した。この試料を 3×10⁴ 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 8 MeV 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 0.3 A/cm² で 10 時間行った。これらの試料に対して、 X 線回折、陽電子消滅測定を行った試料を昇温脱離分析(TDA)測定により水素の等時焼鈍 による放出挙動を調べた。昇温速度は 1 K/s で行い、を用いて測定を行った。また欠陥と 水素を同時注入する目的で量子化学技術研究開発機構高崎量子応用研究所において 1.5 MeV のプロトン照射を最大 1×10¹⁷ ion/cm²まで照射し、低速陽電子により欠陥への水素捕 獲を確認した。



実験結果

図1は照射前後の試料にそれぞれ水素チャージした FeRh 合金の TDA スペクトルである。 照射の有無にかかわらず水素が導入され捕獲されているが、照射によって明らかに水素放 出ピークに変化が観測された。特に照射によって放出ピークが複数に増えていることから、 水素の捕獲サイトが増えていることがわかる。前年度までの陽電子の実験から照射後に水 素はほとんど空孔に捕獲されていることが確認されているため、これらのピークは照射に よって導入された空孔型欠陥由来のものであると考えられる。実際に水素と考えられうる 欠陥種との結合では転位がおよそ 30 kJ/mol、空孔が 40 kJ/mol 前後であることと、照射エ ネルギーから計算される空孔種はこの場合鉄空孔、ロジウム空孔の両空孔であること、更 に未照射での構造空孔は陽電子寿命測定からロジウム空孔と推測されており、3つの放出 ピークはそれぞれ転位型欠陥、ロジウム空孔、鉄空孔からの水素放出と考えられる。 次に図2にプロトン照射した試料の低速陽電子測定プロファイルを示す。ここでは、照射 量によって深さ方向に対する陽電子消滅ドップラーS パラメータの値が異なっている。こ の結果から、この際の欠陥構造は同定できていないが単純な空孔でない欠陥に対してもプ ロトン照射で注入される水素が捕獲されていることがわかる。各種欠陥への水素捕獲挙動 を更に詳しく調べる必要があるが、同様に他の金属間化合物での各種空孔型欠陥への捕獲

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。

挙動についても同様の傾向があるか今後検討を進める。

研究組織: 堀史説(大阪府大工学研究科)、杉田健人(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)

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

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。昨年度は、熱処理された Zry-4 試料中に存在する析出物について、その構成元素・平均直径・体積密度を調査した。その結果、Fe 及び Cr を含む析出物の存在を確認した。Fe の元素分布像の長軸を析出物の直径とした測定値は47~330 nm の範囲に分布し、平均直径は130 nm であった。また、体積密度は8.3x10¹⁸/m³と評価された。本年度は引き続き多数の異なる視野において Zry-4 に存在する析出物について、構成元素ごとに測定した長軸及び短軸の長さの詳細な比較、さらには巨視的な析出物の空間分布等を調査した結果について報告する。

2. 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 Øの円盤形に打ち抜き、真空中にて 630℃で 2h の熱処理を施した。熱処 理試料は電解研磨法 (ツインジェット法) により TEM 観察用に中心部を薄膜化した。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 を用いた。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℃である。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-EDS 法 (Scanning Transmission Electron Microscopy-Energy Dispersive Spectroscopy) により元素分布像を取得した。電 子の加速電圧は 300 kV である。

3. 結果および考察

図1はFe、Cr、Zrの分布を示すSTEM・EDS マッピング像(Fe、Cr、Zrの投影分布の重ね合わせ像)である。図1a には黄色及び緑色と色調の異なる2種類の析出物が観察され、各析出物の構成元素の分析から番号 1~3 は Zr(Fe_xCr_{1-x})₂ 系、番号 4~5 は ZrFe_x系と同定された。ZrFe_x系は図1a で観察されるように単独で存在するのみならず、図1b 中に白 矢印で示すように Zr(Fe_xCr_{1-x})₂系に隣接するものも存在した。今年度新たに確認された ZrFe_x系の Zr(Fe_xCr_{1-x})₂系に対 する存在割合は約4.7%(化学組成を同定した総析出物数127個に対して6個)と低く、熱処理された Zry-4 に存在する 主要な析出物は Zr(Fe_xCr_{1-x})₂系である。

図 2a は図 1b 中のある Zr(Fe_xCr_{1-x})₂系析出物中の Fe 及び Cr の分布を緑及び赤で表示し、元素ごとに長軸(Long Axis; LA)及び短軸(Short Axis; SA)の長さを測定した値を記入した図である。図 2b は図 1b 中に存在する 24 個の Zr(Fe_xCr_{1-x})₂ 系の析出物について、個々の析出物に割り振った番号(横軸)に対して長軸及び短軸の長さ(縦軸)を表示した図である。 多くの Zr(Fe_xCr_{1-x})₂系の析出物は、長軸、短軸共に Fe の元素分布像で計測した値の方が Cr のそれと比較して大きな値 を示す傾向があり、平均長軸長は Fe(80 nm)及び Cr(73 nm)、平均短軸長は Fe(61 nm)及び Cr(56 nm)とそれぞれ評価さ れた。これらの結果から Zr(Fe_xCr_{1-x})₂系の析出物は中心から外殻に向かい Fe 濃度が Cr 濃度に比べて相対的に高くなり、 特に最外殻の数 nm の領域においては Fe のみで構成されている可能性も指摘される。

図3はZry-4の母相中において多数の析出物がどのように空間的に分布しているのかを巨視的に把握するために、低倍率で広い領域を複数の視野について観察したSTEM・EDSマッピング像である。4つの視野全てにおいて析出物の空間分布は不均一で遍在していた。さらに図中の白矢印で示すように、ある方向に数マイクロメートルの長さにわたり、直線または緩やかな曲線に沿うように点列状に分布する傾向がみられる。点列の方向は熱処理前の冷間加工時の各結晶粒の主要な塑性変形の方向と対応関係があるのではないかと考えられる。

4. まとめ

熱処理された Zry-4 試料中には、Zr(FexCr1-x)2 系に加えて ZrFex 系の析出物が共存することが新たに確認された。ただし、化学組成を同定した析出物に占める ZrFex 系の存在割合は数%と低く、主要な析出物は Zr(FexCr1-x)2 系であった。多くの Zr(FexCr1-x)2 系の析出物において、長軸・短軸共に Fe の元素分布像で計測した方が Cr のそれと比較して大きな値を示したことから、最外殻の数 nm の領域においては Fe のみで構成されている可能性がある。また、析出物の巨視的な空間分布は不均一で点列状に並ぶ傾向が観察された。

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技師)

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 Fe、Cr、Zr 分布の重ね合わせ STEM-EDS マップ。



図 2 図 1b 中のある Zr(Fe_xCr_{1-x})₂系の析出物の Fe 及び Cr の元素分布像(a)、図 1b 中の個々の Zr(Fe_xCr_{1-x})₂系の析出物 の長軸及び短軸の長さの Fe 及び Cr の各元素分布像から得られた測定値(b)。



図3 Zry-4の析出物の不均一な空間分布。

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

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求められている。例えば鉄系合金が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での利用が期待されているが、照射により磁性が変化すると安全上問題となる。また、素粒子実験用の大型加速器では特殊なステンレス鋼(Fe-Cr-Ni 合金)が使われているが、照射損傷で透磁率が変化すると素粒子の衝突性能の低下につながるため問題となる。照射効果を中性子照射で調べる場合、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ことで損傷領域のみの磁性評価が可能となる。一般に、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。本研究ではFe-Cr-Ni 合金薄膜を作製し、イオン照射して結晶構造・磁性を調べ、照射効果について検討した。

実験方法

試料作製には超高真空蒸着法を用いた。基板はMgO(001)を酸素雰囲気中1000℃で熱処理した平坦基 板を用い、ターゲット材 SUS304 に電子ビーム蒸着で成膜した。薄膜の組成は Fe-25Cr8Ni で、これを3 通 りの方法で作製した(図 1)。試料1と2は先行研究に従い、MgO上に 500℃で 200nm 成膜した試料1と、 さらに 1000℃で熱処理した試料2を作製した。試料3は MgO上に Cu バッファ層を成長させ、その上に 80℃で100nm 成膜した。成膜中に反射高速電子線回折(RHEED)を用いて薄膜成長を観察した。イオン照 射は、タンデム型加速器を用いて、Cu²⁺を加速電圧 2.4MeV で照射し、損傷量は 0.9dpa とした。照射前後 の組織と結晶構造は EBSD, EDS, XRD, AFM で、磁化測定は VSM を用いて調べた。

結果及び考察

試料1では、成膜中のRHEED観察および成膜後のXRDとEBSD測定から、bcc相がエピタキシャル 成長していることを確認した。この試料を1000℃熱処理した試料2では、XRDとEBSDより、bccとfcc相 が共存する薄膜であることを確認した。試料3を作製するため、MgO上にCuを50nm室温蒸着後、300℃ で熱処理して平坦なバッファ層を得た。3元合金を成膜したところ、10nm程度までCuと同じ回折パターン を示し、その後に崩れた。成膜初期にRHEED強度振動が見られたことから、fcc相がエピタキシャル成長 したと考えられる。成膜後のXRD測定では、バッファ層のピークとともに(110)bccピークが見られた(図2)。 以上より、試料3は薄膜の下部(基板近く)がfcc、上部がbcc構造で、その比は約1:9と推測される。

次にイオン照射の結果に移る。図2に示す照射前後のXRDプロファイルを比較したところ、bccの回折 ピークに特に変化は見られなかった。それに対して、試料2の(220)fccピークが照射後に消えたことから、fcc 相が照射で減少したと考えられる。照射前後の磁化曲線を図3に示す。試料1では変化は見られないが、 試料2と3では飽和磁化が増加した。試料1はbccのみで、試料2と3はbccとfccが共存していることか ら、照射による磁性変化にfcc相が関係している可能性が考えられる。

以上の実験結果をもとに、次の3条件を仮定して飽和磁化の変化について考える。まず、①バルク研究

より fcc-Fe-Cr-Ni 合金は非磁性とし、②XRD の結果より fcc-Fe-Cr-Ni の量は照射により減少したと考え、③ VSM の結果より bcc-Fe-Cr-Ni の飽和磁化は照射前後で変わらないと考える。以上を前提に各試料の照射 前後の bcc と fcc の比を検討したところ、試料 2 では fcc 相の体積率は 16%で、照射後に 6%まで減少した と考えることで飽和磁化の変化が説明できた。他の試料も同様に検討し、照射による飽和磁化の増加は、 非磁性 fcc 相が強磁性 bcc 相に変態したことによると考えた。

まとめ

MgO(001)上に Fe-25Cr-8Ni 合金を 500℃で成膜したところ bcc 単相となり、1000℃熱処理で一部が fcc 相になった。銅バッファ層上の Fe-25Cr-8Ni 合金は、成膜初期は fcc 相が成長し、10nm 以上で bcc 相とな った。bcc 相の構造と磁気特性は照射で変化しないが、fcc 相を含む試料では飽和磁化が増加した。本研 究の結果は、fcc 相の Fe-Cr-Ni 合金は照射の影響を受けやすいことを示唆している。今後、様々な fcc 系 のステンレス鋼を模擬した薄膜をイオン照射し、照射効果を系統的に調べていく必要があると考える。

成果報告(学会発表):

• Y. Kamada *et al*, "Application of MHL measurement for assessment of microstructure modification of thermally aged and neutron irradiated Fe-Cr alloys", DMIUT2019, May 29-31, 2019, Gdansk, Poland

• Y. Kamada, T. Oyake, T. Murakami, S. Kobayashi and H. Watanabe "Ion Irradiation Effects on Magnetic Properties of BCC and FCC Fe-Ni Alloys", SMINS-5, Jul. 8-11, 2019, Kyoto

・小宅智樹, 鶴田華子, 村上武, 鎌田康寛, 渡辺英雄, "鉄ニッケル合金薄膜の磁性と結晶構造に与える重イオ ン照射効果", 日本金属学会 2018 年秋期講演大会(第 165 回), 岡山大, 岡山, 2019.9.11

研究組織:鎌田康寛,小林悟,村上武,鶴田華子:岩手大・理工、渡辺英雄:九大・応力研



Fig. 3. 照射前後の*MH*曲線

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

構造材料中の水素挙動に及ぼす水素導入方法の影響を究明する研究の第一段階として、茨大の水素プ ラズマ生成・エネルギー制御装置により、材料への水素導入を試みる。水素導入の有無については、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、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。

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。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す。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う。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う。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う。

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う。陽極酸化により約5 μmの酸化アルミニウム被膜が蒸着したアルミニウム基板について、プラズマ生成・エネルギー制御装 置を用いて、水素プラズマを照射する。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。

3. 実験結果及び考察

図1に示すプラズマ生成・エネルギー制御装置(概略図)を用いて、酸化アルミニウムへのプラズ マ照射を行った。水素ガス導入前の真空容器内の真空度は10⁻⁴ Pa 程度である。プラズマは電子サイク ロトロン共鳴(ECR)によりTE₁₀モードの導波管内部に生成する。そのため、主真空容器を取り囲む3 つの空芯磁場コイル(空芯直径370 mm、コイルの厚さ96 mmと48 mm)を安定化直流電源で励磁し、 導波管内部で0.0875 T、導波管下流部で0.1 Tの一様な磁場が形成されている。そして、水素プラズ マを生成させるために、真空容器内に99.9999%の高純度水素ガスを0.05 Pa 程度で10 sccm 導入し、 2.45 GHz のマイクロ波電力(100 W)を投入した。プラズマと試料との間にシャッターを設けており、シ ャッターの開閉により、試料へのプラズマ照射を制御した。試料は穴あき石英板で電気的及び熱的に 絶縁されている。また、試料とプラズマの間にマスク(5×5 mmの開口部)を設置することで、試料の バイアス電圧により荷電粒子を試料へ引き込む際に、プラズマが乱れるのを防いでいる^[1,2]。

図2に水素プラズマの照射実験後、試験片断面をEDX で面分析した結果を示す。20 min の水素プラ ズマ照射により、下部の赤線楕円で囲んだ部分内で試験片の表面側から酸化被膜が還元され、アルミ ニウムが生成されたことが確認できる。これは、水素プラズマ照射により、水素原子が酸化皮膜に侵 入して酸素と反応し、水蒸気として遊離していくことで還元(Al₂O₃+3H₂→2Al+3H₂O)されたためであ る。また、上部の青線楕円で囲んだ部分には、酸化被膜欠陥の発生も見られる。このことから、茨大 の水素プラズマ生成・エネルギー制御装置では、約5µmの深さまで、水素原子の導入が可能であるこ とが分かった。



図1 水素プラズマ生成・エネルギー制御装置

図2 20 min 水素プラズマ照射後の 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 ニウム板)の表面を鏡面仕上げした後、水素プラズマ生成・エネルギー制御装置を用いて、材料表面に 水素原子の導入を試みた。

その結果、20 min 以上の水素プラズマ照射時間では、試料の酸化被膜表面側から、約5µmのアルミ ニウムが生成されたことを確認できた。

以上の結果は、構造材料中に水素を導入する方法として、水素プラズマ生成・制御装置が有用である ことを示す知見であった。

参考文献

- (1) 井上泰一, 伊藤吾朗, 佐藤直幸, 池畑 隆, 車田 亮, 第 136 回春期大会講演概要集, 軽金属学会, 富山国際会議場, (2019.5.10-13), No.133.
- (2) 井上泰一, 伊藤吾朗, 佐藤直幸, 池畑 隆, 車田 亮, 第137 回秋期大会講演概要集, 軽金属学会, 東 京農工大学, (2019.11.1-3), P64.

LIF を用いた直線装置 PANTA における高精度中性粒子および イオン流速計測

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、高精度な光科学を用いて直線プラズマ中の中性粒子を直接計 測し、流れ場の構造形成における中性粒子の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 および HYPER-II に導入し、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 を用いて計測器開発を並行して行い、各装置におけ る流れ計測を行った。

結果

本年度の研究では、昨年度までに構築したレーザー誘起計測システムを用いて 実際に直線装置 PANTA 中のイオン計測および HYPER-II における流れ分布計測 の原理実証実験を行った。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、準安定アルゴン原子(励起: 696.735 nm, LIF: 826.679 nm) とイオン(励起: 668.614 nm, LIF: 442.724 nm)の LIF 計測を行った。特に、

今後の乱流計測を見据えてロックイ ン検出の高速化を行い、音響光学変 調器を用いて低周波領域の時間変化 を追従できるシステムを構築した。 図1は HYPER-II における中心軸上 の軸方向中性粒子流れの軸方向分布 である。中性粒子流れは軸方向に不 均一で、中性粒子とイオンの電荷交 換衝突が重要となる 0.083-0.17 Pa で は軸方向の反転流構造が形成される



図 1. HYPER-II 装置における軸方向中 性粒子流速の軸方向分布(中心軸上)。

ことが明らかになった。

次に、PANTA における LIF 計測の 実施例として周方向速度成分のイ オン速度分布関数の計測結果を図2 に示す。密度勾配が強くなるx = 30 mm まで有意な LIF スペクトルを得 ることに成功した。スペクトルのシ フトから流速を評価したところ、x= 30mmにおいてイオン反磁性方向に 460 m/s で回転していることが明ら かになった。また、イオン温度や軸 方向のイオン LIF スペクトルなどの 計測にも成功しており、装置間比較 を行う標準の計測手法として LIF シ ステムを整備することが出来た。本 システムは部分電離乱流プラズマ の普遍的な性質を調べる有効な計



図 2. PANTA におけるイオン LIF 計測の 例:周方向速度分布関数の径方向依存性。

測システムであり、本共同研究を通して中性粒子を含めた乱流プラズマの輸送 特性や構造形成を調べる先進的研究の礎を築く有益なものであったと言える。

成果報告

[1] K. Terasaka、「Inhomogeneous neutral gas flow field structure in a partially ionized ECR plasma」、3rd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics 2019.11.4-9
[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23回支部大会 2019.
12. 21-22

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) 水素プラズマスパッタ法による多孔質金属膜形成過程での水素移行挙動のモデル化

九州大学大学院総合理工学研究院 片山一成

【緒言】

水素は貯蔵可能なエネルギー媒体であり、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、様々な熱源を利用して水素を製造する技術や、安全に輸送・貯蔵する技術の開発研究が進めら れている。将来幅広く水素を利用する社会を想定し、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 成されるタングステン膜は、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、膜の成長と水素物質移動との関係性を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、それぞれの水素がタングステン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。過去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タングステン膜と水素捕捉 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。一昨年度の応用力学研究所との共同研究において、水素プラズマスパッタリングによ る成膜過程で、堆積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。昨年度は、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ことに成功した。本年度は、水素透過フラックスの経時変化 について数値解析を行った。

【実験方法】

水素プラズマスパッタリングによるタングステン膜成長過程における膜中での水素移動現象を明らかにするため、膜を透過した水素を測定できる装置を作製した。Fig.1 に装置概略図を示す。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たもので、膜及び基板を透過した水素を質量分析計で測定できる。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できる仕組みとなっている。

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(ニラコ、直径 21.17mm、厚み 20µm、純度 99%)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(ニラコ、50mm×50mm×1mm、純度 99.95%)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、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

【解析方法】

TMAP コードを用いてニッケル板とタングステン膜の二層一次元拡散を計算した。タングステンターゲットに 生じる陰極降下電圧を高電圧プローブで測定したところおよそ 800V であった。水素イオンが 800eV でタングス テンに衝突した際の反跳粒子の平均エネルギーを SRIM コードで求めたところ、およそ 380eV となった。ここで は、ターゲットから基板へ到達する間のエネルギー損失を無視小と仮定し、380eV で水素粒子が Ni 基板あるいは W 膜に入射しするした。入射水素の飛程分布は TRIM コードで求め、深さ方向の関数として TMAP コードに組み 込んだ。

タングステン膜中の水素拡散係数及び水素溶解度定数は、過去の共同研究にてガス駆動透過実験で求めた値を 用い、プラズマ側への再結合係数は、実験結果へのフィッティングパラメータとした。ニッケル中の水素拡散係数 及び水素溶解度定数は Robertson [1]の値を用い、再結合係数は、Pick ら[2]の値を用いた。

【結果及び考察】

Fig.2 に実験結果と計算結果を示す。プラズ マを点火すると熱負荷により徐々に温度が上 昇し、350K まで増加した。実線で示す水素透 過フラックスは、プラズマ点火約 20 分後に上 昇し始め、50 分後にピークを示した後、比較的 急峻に減少した。その後は、時間とともに緩や かな減少を続けた。後半の緩やかな減少は、タ ングステン膜厚の増加に起因するものと考え られる。透過フラックスにピークが見られた要 因は、プラズマ側の再結合律速・透過側の拡散 律速条件下での緩やかな温度上昇であると考 えている。低温条件で飛程領域に入射された水 素は、プラズマ側と透過側への拡散移動が遅 く、飛程領域の濃度が増加を続ける。濃度が上 昇する間は、透過フラックスは上昇を続ける。



Fig.2 水素プラズマスパッタリングによるタングステン膜 形成過程での水素透過フラックスと TMAP による計算結果

温度が高いほど再結合係数、拡散係数とも増大するため、プラズマ側及び透過側に脱離する水素と入射する水素が バランスすることで、透過フラックスが定常に達する。両側への脱離がともに拡散律速である場合、両側への脱離 フラックスの温度依存性が等しいため、基板の温度上昇とともに透過フラックスが上昇して定常に達する。しか し、プラズマ側が再結合律速、透過側が拡散律速である場合、各側への脱離速度の温度依存性が異なることになる。 温度上昇に伴う脱離速度の増加率が、プラズマ側で大きいと、入射された水素のプラズマ側への脱離速度が透過側 への脱離速度よりも増大し、結果的に透過フラックスが減少を始めると考えられる。Fig.2 中の〇は、タングステ ン膜表面の再結合係数をパラメータとしたフィッティングの結果である。実験結果を比較的よく再現できている。 Fig.2 には、ニッケル基板のみでの透過フラックスをシミュレートした結果も示す。ニッケルのみの場合は、透過 フラックスにピークは見られなかった。ニッケル表面の再結合係数は大きいため、プラズマ側、透過側ともに拡散 律速と想定される。両側への脱離速度の温度依存性が等しいことから、温度上昇とともに両側の脱離速度が上昇 し、ピークを示すことなく定常に達する。ニッケルのみに比べて、タングステン膜がある方が、透過フラックスが 大きいことがわかる。ニッケルに比べてタングステン膜からのプラズマ側への脱離速度が小さいため、成膜開始直 後の膜厚が薄く、水素が直接的にニッケル基板に入射される場合は、プラズマ側への脱離が抑制されるため、飛程 領域の水素濃度が増加し、結果として透過側への脱離フラックスが大きくなる。膜が成長し、水素の大部分がタン グステン膜に入射されるようになると、厚みに依存して透過フラックスが減少を続ける。以上のことから、水素プ ラズマスパッタリングによるタングステン膜成長過程で、水素はタングステン膜中に入射され拡散し、大部分は気 相へ脱離しており、その挙動は、膜中の拡散係数とプラズマ側表面での再結合係数に強く依存する。

参考文献

[1] W.M. Robertson, Z. Metallkde. 64 (1973) 436-443.

[2] 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。

降着円盤と乱流輸送

九州大学理学研究院 町田真美

目的

原始星やブラックホールに対して質量が流れ込む降着円盤では、角運動量の輸送が重要な問題となる。通常のケプラー回転では流体的に安定であるため、そのほかのメカニズムとして Magneto-Rotational Instability (MRI) 不安定性、オーム散逸やホール効果を含む非理想 MHD 効果などの影響が理論的に議論されており、その実験的検証が急務の課題となっている。本研究では、プラズマ中の種々の不安定性やその輸送への効果に関する研究について実績のある応用力学研究所のプラズマ乱流研究グループと協力し、MRI 不安定性やその他の非理想MHD 効果を含む不安定性を観測するために必要となるパラメーターの同定や、輸送フラックスの定式化などの研究を進めることを目的とする。

結果

本年度の研究では、速度不均一 性が駆動する乱流の一例として、 磁化プラズマ中における軸方向 速度勾配 (Parallel velocity gradient, PVG) 乱流の非線形発 展解析を進めた。PVG 乱流の発 達を特徴づける物理量として、 揺動流れ場のヘリシティの解析 を進めた[1]。その結果、揺動へ リシティを生み出す機構として、 磁場方向の対称性の破れが重要 となることがわかった。また、 磁化プラズマにおいてヘリシテ



ィを決める特徴的な量として、軸方向速度揺動と軸方向渦度から決まる成分が 卓越することがわかった(図1)。 次に、降着円盤に生じる MRI 乱流の持つ輸送特性について検討を進めた[2]。 空間5次精度を担保する CANS+コードを用い、半径方向と鉛直方向についてはシ ュバルツシルト半径の1/20、方位角方向には円周を512メッシュの解像度を保 ち時間発展を解析した。その結果、磁力線に垂直な方向にエントロピー及び密 度のジャンプが形成される可能性があることがわかった。また、この時の輸送 の特徴として、系の中心と周辺部を結ぶ揺動によって駆動される様相を捉える ことに成功し、核融合プラズマで報告されているストリーマーによる輸送との 類似性を見出した。

原始惑星系円盤では非 MHD 効果が重要となる。この場合、イオンと電子の2 流体(さらには中性粒子を含む3流体)を扱う2流体方程式が有効である。こ れらの系では流れヘリシティが保存されることがわかっている。流れヘリシテ ィを持つ乱流は運動量輸送を生み出す。こうした効果が惑星形成への応用へと つなげる成果を得ることができた。

成果

- 1. Y. Kosuga, M. Sasaki, Z.B. Guo: 'Flow helicity of wavy plasma turbulence' Phys. Plasmas **27** 022303 (2020)
- M. Machida, T. Kawashima, Y. Kudoh, Y. Matsumoto, R. Matsumoto, "Magnetic Energy Dissipation by Small Scale Turbulence in Accretion Disks", 14th Asia-Pacific Physics Conference, held at Kuching, Malaysia, 2019, Nov. 17-22

研究組織

町田真美(九大理学研究院)、小菅佑輔(九大応研)

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は、中性子を含む高エネルギー粒子に曝され、水素同位体 捕捉サイトとなる欠陥が材料中に導入される。そのため、複合粒子照射環境下におけるトリチウムダイナミ ックスの理解には、水素同位体滞留・放出挙動と材料中の照射欠陥挙動を関連づけることが必要不可欠であ る。特に近年注目されているのが高エネルギー粒子による照射損傷導入挙動とトリチウム滞留挙動を関連さ せた研究であり、核融合環境に近い条件で明らかにすることが重要である。しかし、核融合生成物であるへ リウムや炉内不純物である炭素がタングステンに入射すると、ヘリウムバブルや 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。これらの 基礎的な過程を明らかにすることにより、核融合炉における高エネルギー粒子複合照射環境での総合的なト リチウムダイナミックスを理解することができる。そのためには、照射欠陥密度と水素同位体滞留挙動を種々 の温度で関連づけて明らかにすることが必要である。本研究では、種々の条件で各イオンの分割照射や複合 イオンの同時照射等を行い、九州大学応用力学研究所の透過型電子顕微鏡(TEM)による表面状態観察を行う とともに、静岡大学にて重水素照射と昇温脱離実験を行い水素同位体滞留挙動の評価及び、複合イオン照射 下における欠陥形成とタングステン中の水素同位体滞留挙動について明らかにすることとした。

【実験】

試料としてアライドマテリアル社製歪取加工済多結晶 W (10 mm⁹, 0.5 mm¹) を用いた。高真空下 (< 10⁶ Pa)、1173 K で 30 分間加熱処理することで不純物除去を行った。この試料に対して京都大学エネルギー理工 学研究所のタンデム加速器施設 (DuET) を用いて、室温にて 6.4 MeV Fe³⁺照射と種々のエネルギーのヘリウ ムを照射した。バルク内での He 分布を欠陥分布に対して均一にするため、201、467、737、1000 keV で の He⁺照射を 22.4、14.6、12.3、9.0%の比率で行った。SRIM コードにより、Fe³⁺のフルエンスは 2.17×10¹⁸、 7.25×10¹⁸ m⁻² でそれぞれ 0.3、1.0 dpa の損傷量、He のフルエンスは 6.62×10¹⁸ – 2.20×10¹⁹ He⁺ m⁻² で He と の損傷量の比は平均で 100 appm He / dpa と見積もられた。照射後、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、静岡大学に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。

【結果・考察】

図1に各照射W試料におけるTEM写真を示す。鉄ヘリウム室温同時照射の試料で広範囲で見られる微小な白い点が欠陥の像である。このように室温照射試料では転位ループやボイドなどの欠陥が多く存在するが、加熱照射では表面が回復している様子が観察された。図中〇で示される部分のようにボイドが表面付近に存在していたことを示唆する像も観察された。ヘリウムを室温にて同時照射した試料は鉄単独試料と比べて表面の欠陥が増加しており、加熱照射では表面の回復が顕著であることが示された。また、1173Kでの鉄ヘリウム同時照射では試料全体が膨れ上がり、バブルが形成しており、重水素の拡散に大きな影響を与えることが考えられる。

1



図1 各照射試料表面の TEM 観察結果

図 2 に W2 (Fe³⁺, 0.3 dpa, R.T.), W3 (Fe³⁺, 0.3 dpa, 1073 K), W4 (Fe³⁺-He⁺, 0.3 dpa, 1073 K), W5 (Fe³⁺-He⁺, 1.0 dpa, R.T.), W6 (Fe³⁺-He⁺, 1.0 dpa, 1073 K)の TDS スペクトルを示す。390 K、570 K、800 K 付近に 3 つ の主要な脱離ピークが確認された。これまでの研究から、390 K 付近のピークは表面吸着および転位ル

ープに捕捉された重水素の脱離、570K付近のピークは 原子空孔に捕捉された重水素の脱離、800K付近のピー クはボイドに捕捉された重水素の脱離であると帰属し た。室温での Fe³⁺単独照射試料(W2)での主な放出ピー クは 663 と 771 K に位置しており、単欠陥が安定な捕 提サイトである空孔集合体やボイドに成長しているこ とを示している。しかし、高温照射試料(W3)では主要 な放出ピークは 580 K に位置しており、多くの D は空 孔に捕捉されていると考えられる。一方で、700K以上 でDの脱離が見られなかったことから、1073K照射時 のアニーリングにより空孔クラスターやボイドが回復 したことが示唆された。1073 K での Fe³⁺-He⁺同時照射 試料(W4)では、Fe³⁺単独照射試料(W3)と比較して 390 お よび 590Kにおける D の脱離が減少した。これは TEM 観察で確認された表面のバブル形成によるものと思わ れる。さらに、700-900KにおけるD脱離も見られなか ったことから欠陥が回復しており TEM 観察結果に見 られる欠陥の回復と矛盾しない。全D滞留量はそれぞ れ 1.5×10²⁰ D m⁻² (W3)、1.4×10²⁰ D m⁻² (W4)であり、高 温および Fe³⁺-He⁺同時照射によって単独照射と比べて 全D滞留量も減少した。これらの結果から、室温にて



図2 各種試料における D₂TDS スペクトル

留が減少し、加熱照射ではボイドはアニーリングにより回復され、原子空孔による滞留量が減少することが明らかとなった。

参考文献

[1] Y. Ueda et al., J. Nucl. Mater., **386** (2009) 72.

ヘリウム同時照射した試料はボイドにおける重水素滞

2

155

第ー原理プラズマ輸送シミュレーションにおける揺動分布と ポテンシャル分布の計測模擬

核融合科学研究所 ヘリカル研究部 沼波 政倫

研究の目的

磁場閉じ込め核融合研究において、プラズマの熱・粒子の輸送を定量的に予測することは、長 年の課題となっている。その目的のため、これまでに多くの第一原理に基づく数値シミュレーショ ン研究が実施されてきた。特に、位相空間上のプラズマ分布関数を直接扱える運動論に基づいた 数値計算は、膨大な計算量という難点を近年の計算機性能の幅な向上とプログラムコード開発の 進展によって克服することに成功し、動径方向の輸送フラックスなど1次元物理量の実験結果を 定量的に再現し得るようになってきた。一方で、より現実的な予測を行うには、実験での観測量 に対して、その計測を実施した様々な条件や測定方法にできる限り即しながら、シミュレーショ ン結果に対してデータ解析を行う必要がある[1]。これまで我々が進めてきた共同研究では、ジャ イロ運動論的シミュレーションの数値結果に対して、実際の乱流揺動計測で用いられる位相コン トラスト・イメージング(PCI)での手法を数値的に模擬し、実験観測環境に即したデータ解析を 行ってきた。2019年度では、乱流揺動の計測に加えて、ポテンシャル分布に対する重イオンビー ムプローブ (HIBP) 計測模擬についての手法開発も進めた。これは、ヘリカル系プラズマの重要 課題の一つである大型ヘリカル装置(LHD)における不純物ホール現象に関して、多粒子種プラズ マにおける運動論的シミュレーションが実現されるようになった現在、動径方向の電場構造が改 めて問題になっており、その電場と不純物ホールの形成メカニズムについての新たな可能性が指 摘されているため、炉心領域での計測が難しい HIBP を、シミュレーション結果に対して実施す ることを目的にしたものである。特に、最近の研究では、ポテンシャルの磁気面平均からの変動 量である Φ1 分布が、電場形成に大きな影響を与え得ることが指摘されており、この効果について も、第一原理シミュレーションからの定量的な結論を得ることを目指す。

研究方法

本研究課題では、ドリフト運動論に基づく大域的な新古典粒子コードである FORTEC-3D[2]を 用いて実施したシミュレーションの計算結果を対象にして進めた。新古典輸送に伴って形成され る粒子密度の3次元分布データに基づいて、ポテンシャルデータを取得し、そのデータに対して 実際の計測手法を模擬しながら、シミュレーションデータからの模擬計測結果を得る。

LHD 不純物ホールプラズマでの解析の前に、ここでは、基盤開発のため、FORTEC-3D コード で実施した LHD プラズマでのシミュレーション結果を対象にする。このシミュレーションでは、 磁気面の平均量としてのポテンシャルと、磁気面平均からの変動量としての Φ_1 分布を各磁気面 ごとに得られている。そこで、まずポテンシャルの磁気面平均分布のデータに対して、重イオン・ ビーム・プローブ (HIBP) 計測モジュールでの計測を実施し、次に、 Φ_1 分布を印加したポテンシャ ルデータに対して、同様の計測模擬を実施することで、問題となっている電場形成における Φ_1 効 果について、定量的な知見を得る。

今年度の成果

前年度までに実施した FORTEC-3D コードでのドリフト運動論的粒子シミュレーションで得られる粒子密度分布データから、HIBP 数値計測模擬ツールに適応可能なポテンシャル分布へのデー タ変換を行った。FORTEC-3D コードは、磁気座標系を用いたコードである。そのため、出力され るデータは、VMEC コードを用いた磁気座標系に基づいて構成されている。ここでは、磁気面平 均量および、磁気面上で変動分布を持ち、かつ径方向にも分布を持つ3次元分布を FORTEC-3D でのシミュレーションで用いた VMEC による3次元平衡磁場を対応させて求める。これにより、 実験ショットに対して実施したシミュレーションに対しても、その磁場配位ごとの3次元幾何デー タを再現することができるため、定量的なデータ解析を実施することができる。今年度は特に、 LHD 不純物ホールプラズマに類似した系での FORTEC-3D コードでのシミュレーションデータ への適用を試みた。図1は、FORTEC-3D の出力データから HIBP 計測模擬に適用できるよう再 構成した結果である。明らかに非一様な分布を持つポテンシャル分布が得られており、この分布 中での重イオン粒子の軌跡を、計測模擬手法を用いて解析することができるようになった。



図 1: (a)VMEC 平衡磁場データから再構成した磁気座標系。(b)FORTEC-3D のよる新古典計算 から得られたポテンシャルのある磁気面における磁気面平均量からの変動量分布。

まとめ

本研究課題では、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に対 しての定量的な Validation と予測解析のために、これまでに我々が進めてきた数値計測手法の拡 張を目指した。第一原理シミュレーション研究自体は、近年の急速な計算機性能の向上にも助け られ、径方向輸送フラックスや統合コードへの組み込みによるプラズマ分布予測など、実験結果 を再現し得る結果も得られ始めてきた。そこで改めて、実験結果との比較や将来のプラズマ性能 予測などを鑑みた場合、シミュレーションから得られるデータの解析に対する定量性の重要性は 増す一方である。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験の 生データとを直接的に比較できる最終的な Validation 手法の一つであるだけでなく、ITER 等の 将来の実験に対する予測研究を行う上でも、極めて有用な解析手法を提供する。本共同研究課題 では、これまでの PCI 計測に加えて、HIBP 計測の数値模擬に着目し、新古典シミュレーション からのポテンシャル 3 次元分布データに対する計測模擬を目指した。本手法によるポテンシャル 計測模擬から得られる電場構造は、定性的に議論されている不純物ホール構造の形成メカニズム の一つである電子ルート電場形成に対する定量的な結論を与えられることになり、これまで未解 明であった不純物ホール問題の解決にも大きく貢献できると考えている。

参考文献

- [1] N. Kasuya, et al., Plasma Sci. Technol. 13, 326 (2011).
- [2] S. Satake, et al., Plasma Fusion Res. 3, S1062 (2008).

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

エネルギー科学部門 橋爪 健一

1. 目的

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などが核融合炉ダイバータの候 補材である。ダイバータには、核融合炉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となる。また、水素の照射 と同時に炭素などのプラズマ中の不純物が水素とともにダイバータ及びその周辺部材に再堆積し、それ が水素同位体(トリチウム)のリテンションやトリチウムインベントリイに影響する。本年度の研究で は、高融点金属のタングステン(W)とタンタル(Ta)を試料とし、水素同位体(重水素、D₂)をDC グ ロー放電プラズマにより注入し、また、同時に形成する再堆積層中の水素の高温放出挙動について昇温 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、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。

<u>2. 実験</u>

円板状の金属 W および Ta (約 6 mm^{*}, 60 µm^t) を試料とし、10⁻⁵ Pa 以下の圧力で真空焼鈍(1000[°]C、0.5 h) した。これらの試料に、直流電源(メトロニクス HSV2K-30) を用いて低水素圧力(0.3 Torr)の 重水素を DC グロー放電 [1]により室温で注入するとともに、再堆積層を形成した。放電条件を表1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 °C/sec で 1000[°]Cまで試料を加熱し、D₂のスペクトルを測定した。

表1 D2 直流グロー放電条件

D ₂ 圧力	0.3 Torr
放電電圧	900~1000 V
放電注入時間	1 h
試料温度	室温



図1 DC グロー放電注入装置 図2 TDS 装置

3. TMAP-4

TMAP4 (Tritium Migration Analysis Program ver.4) を用いて、 D_2 の放出挙動を計算した。試料厚さを 60 μ m、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、また、境界条件として表面水素濃度を ゼロとして拡散律速で水素放出が起こるものとした。W 中の水素の拡散係数 ($D(m^2/s) = 4.1 \times 10^{-7} \exp(-E/RT)$ 、E = 37.68 kJ/mol)[2]を使い、さらに、実験を模擬できるように活性化エネルギー E をパラメータとして変化させて水素の放出速度を計算した。

<u>4.結果と考察</u>

図3に放電照射後の試料の写真を示す。WおよびTaともに表面に再堆積層が観察され、Wの方のほうが明瞭で堆積量が多いと思われる。図4、5に、それぞれの試料のSEM像(再堆積領域と未堆積領域)を示す。再堆積領域と未堆積領域で当該倍率(x1000、x5000)では明確な差がないことから、再堆積層が非常に微細な粒子であることが推察される。また、表2の元素分析(EDX分析)からは、再堆積層の主要元素が炭素であることがわかる。また、Wについては再堆積と未堆積領域ともにブリスターの

形成がみられたが、Taでは観察されなかった。図6に両試料からのD2のTDS放出スペクトルを示す。 両試料とも、700~800℃で放出が見られ、Wからの放出量が多かった。昨年実施したWとTa試料のD2 放電実験(再堆積層は未形成)では、Wからの放出ピークが200℃であり今回の結果とは異なること、 加えて、昨年の実験ではTaからの放出量が非常に多かった(Ta中の重水素溶解量が高い)ことから、 本実験で、重水素は試料にはほとんど溶解しておらず、D2は再堆積層から放出したものと考えられる。



図3 放電後試料表面(左W、右Ta)



図4 Wの表面(左: 再堆積層、右: 未堆積領域)

表 2 元素分析(EDX、mass%)結果

元素	w再堆積層	W表面	Ta再堆積層	Ta表面
С	28.4	3.7	36.2	5.8
0	3.0	2.5	2.8	2.2
W	68.6	93.8	-	-
Та	-	-	61.0	91.9

Acc. Vol. 20 kV, WD 11 mm



図5 Taの表面(左: 再堆積層、右: 未堆積領域)



図7に、TMAP-4によるD2放出の解析結果を示す。図6の実験結果では、D2放出ピークが800℃程度であるが、これは活性化エネルギーを~100kJ/molとした時にほぼ再現された。今回拡散律速を仮定して計算したが、得られた~100kJ/molは、再堆積層の炭素と重水素の結合エネルギーに相当していると思われる。

<u>4. まとめ</u>

W および Ta に低 D₂ 圧力下で DC グロー放電し、炭素を主成分とする再堆積層を形成させた。TDS 分析では D₂ 放出温度は両試料とも 700~800[°]C程度であった。W 試料ではブリスター形成も観察されたが、 D₂ 放出量、放出温度から、重水素は金属中ではなく主として再堆積層に存在していたと考えられる。5. 研究組織

九大総理工:橋爪健一 大学院生:川口要人、田平剛大、江副樹蘭、山本稜之 九大工:西原昂汰、 輪内純、古志泰滉、濱島達也 九大応力研:渡辺英雄

参考文献 [1] K. Hashizume et al., J. Nucl Sci. Technol., 31 (1994) 1294.

[2] R. Frauenfelder, J. Vac. Sci. Technol., 6 (1969) 388.

磁気島とプラズマ乱流の非線形相互作用に関する研究

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。これまでの研究においては、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の開発を進めてきた。

【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う。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。

【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。

1. 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1に圧力揺動の等高線図 を示す。図1の左図は抵抗性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右半 面において強い揺動が発生していることが分かる。図1の右は非線形飽和段階であり、圧力揺動が



図1 圧力揺動の等高線図(左:線形成長段階、右:非線形飽和段階)



図2 圧力の径分布

小半径方向の内側に広がっていることが分かる。

図2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。

2. 反磁性ドリフトおよび新古典粘性の効果の実装

RMP によって駆動される磁気島はポロイダルフローの効果を強く受けるため、シミュレーションコードにポロイダルフローの効果を適切に実装する必要がある。

はじめに、電子およびイオンの反磁性ドリフトの効果を導入するために、Hazeltineの4場簡約化 MHD モデルにおける反磁性ドリフトの効果を採用した。電子反磁性ドリフトの実装は比較的容易 である。一方で、イオン反磁性ドリフトは渦度方程式において多くの非線形項を生ずるため、実装 には手間を要する。

次に、ExB ドリフトの駆動源として、Gianakon の新古典粘性のモデルを採用した。このモデルは、 新古典粘性によってイオンのポロイダルフローが減衰することを表現するものである。すなわち、 ExB ドリフト速度、イオン反磁性ドリフト、平行方向速度のポロイダル射影成分の和がゼロになる ような方向へ発展する。本研究では平行方向速度はパラメータとして与えた。

3. 並列化効率の改善

研究手法の箇所で述べたように、我々のコードにおいては、波数空間に対して2次元の領域分割

を行って並列計算し、実空間における小半径方向に対して1次元の領域分割を行って並列計算している。これらの並列計算を順次実行するためには、プロセッサ間での通信が必要となる。これまでに開発したコードにおいては allgather を用いてこの処理を行なっていた。しかし、我々のコードのような擬スペクトル法を用いたコードに対しては、allgather よりも alltoall の方が通信効率の面で優れていることが知られている。allgather は全てのデータを集めて再分配するのに対して、alltoall は配列の転置の演算を応用することで必要最低限な通信にとどめることで、このような効率の改善が見込める。以上の理由から、alltoall を用いるコードへと拡張を行なった。その結果、計算速度は1.44倍となった。

さらに、我々のコードでは Numerical Recipes の FFT を用いているが、これを MPI の特性を活か して高速化することができる FFTW のルーチンを導入した。その結果、計算速度が 1.27 倍となっ た。

以上の拡張により、従来に比べておよそ2倍程度の速度で動作するようにコードをチューニング することに成功した。

【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 たコードを用いて、本来の目的である磁気島とプラズマ乱流に関する研究を推進することが今後の 課題である。

研究者情報: 西村征也

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. 目的

グラフェンや六方晶窒化ホウ素(*h*-BN)などの二次元層状物質は次世代 のエレクトロニクスやスピントロニクス材料として注目されている[1]。さらに, 欠陥導入やヘテロ原子のドーピングなどのナノ構造制御により,電子状態・ 物理的性質の制御が可能になると有望視されている。研究代表者らは,二 次元層状物質とヘテロ原子との接合領域に高エネルギーイオンを照射する ことによるヘテロ原子のドーピング法を探索している(図 1; [2,3])。本研究で は,フッ化リチウム(LiF)薄膜と h-BN のヘテロ接合への高エネルギーイオ ン照射を行い, *h*-BN にフッ素をドーピングすることを目的とした。



よる二次元層状物質へのヘテロ 原子ドーピングの概念図

2. 実験方法

多結晶 Cu 基板上にアンモニアボラン由来ガスを前駆体とする化学気相 蒸着法により h-BN を成長した。さらに同 h-BN 上に 100 nm のフッ化リチウ

ム層を製膜し,真空中において同ヘテロ界面に高エネルギーイオン(2.4 MeV⁶³Cu²⁺)を照射することで *h*-BN へのフッ素原子のドーピングを行った(照射量:10¹³ - 10¹⁴ ions/cm²)。イオン照射は九州大学応用力学研究所のタンデム加速器を用いた。照射後の未反応の LiF は純水リンスにより除去した。また,比較のため,LiF 層で被覆されていない *h*-BN へのイオン照射も行った。イオン照射後の *h*-BN の電子状態や原子構造は X 線光電子分光(XPS)や X 線吸収端微細構造(NEXAFS),低速電子エネルギー損失分光(LEELS),第一原理計算により評価した。

3. 結果および考察

図 2(a)-(d)に LiF/*h*-BN への高エネルギーイオン照射による BK 端および NK 端 NEXAFS スペクトルの変化 を示す。 α および β , γ ピークはそれぞれ *h*-BN の B 1s および N 1s $\rightarrow \pi^*(\alpha)$, B 1s および N 1s $\rightarrow \sigma^*(\beta, \gamma)$ に由



図 2 イオン照射を行った LiF/*h*-BN の B *K* 端(a,b)および N *K* 端(c,d)NEXAFS スペクトル。X 線の入射方向は 30°(a,c)および 90°(b,c)。 (e)10¹⁴ions/cm²のイオンを照射した LiF/*h*-BN および *h*-BN の LEELS スペクトル。入 射電子のエネルギーは 60eV。 来する。これらのピーク強度の入 射角依存性はイオン照射後もある 程度保持されていることから, *h*-BN 薄膜の2次元平坦性はイオン 照射後も維持されることが分かっ た。一方で、イオン照射により iii および iv の新しいスペクトル構造 が現れ、イオン照射量の増大に 伴いこれらのピーク強度が増大す ることが分かった。第一原理計算



図3 フッ素ドープされた h-BN の原子構造。フッ素原子は h-BN のホウ素原子 にイオンが入射された側のみに結合している。

の結果をあわせて考えると, iii ピークは *h*-BN と Cu との相互作用に起因し, iv ピークは, *h*-BN 中のホウ素原子 とフッ素原子の化学結合形成に起因することが明らかになった。また XPS の測定から, 10¹⁴ ions/cm² のイオン照 射により 6±2%のフッ素が *h*-BN に含まれることが分かった。これらの結果を踏まえて考察することにより, LiF/*h*-BN への高エネルギーイオン照射によって *h*-BN は図 3 に示す原子構造へと変化するということが分かった。*h*-BN は *sp*² 結合から *sp*³ 結合へと変化し, フッ化 BN を形成することでフッ素原子を化学吸着する。*sp*² から *sp*³ 結 合へと変化することで B-N 結合距離が変化することから, *h*-BN の片方のみにフッ素原子が吸着することで *h*-BN へと局所的に歪が誘起されるが, *h*-BN の窒素原子と同原子との間で新たに生じた結合により(図 2 ピーク iv), 同歪は緩和されていると考えられる。

図 2(e)に *h*-BN およびイオン照射 *h*-BN (LiF 層無し), フッ化 *h*-BN の LEELS スペクトルを示す。 すべてのス ペクトルで観察される 7.3 eV のピークと 15.8 eV 付近のブロード構造はそれぞれ, *h*-BN のπおよびπ + σ プラズ モンに由来する。 一方でフッ化 *h*-BN においては, *h*-BN のバンドギャップが変化し, 2.6 eV および 5 eV 付近に 新たな構造が観察された。 これらの構造は、 フッ化 *h*-BN 形成に由来するギャップ内状態 (NEXAFS スペクトル の iii, iv ピークに関係)に起因すると考えられる。 一方で、 0.5 – 1.5 eV の弾性散乱のテイル構造がフッ化 *h*-BN の形成の有無により変化しないことから、 フッ化 *h*-BN は金属的ではなく、半導体的な性質を保持していることが 示唆される。

本研究では、高エネルギーイオン照射下の非平衡励起反応場を利用することで、従来の化学的な合成手法 では得られない *sp*³ 結合を有する1原子層のフッ化 BN 薄膜を創出することができた。本技術を発展させること で従来の手法では実現困難な二次元層状物質のドーピング状態および電子状態の幅広い制御に加えて、直 進性の高いイオンビームの特徴を活かしてグラフェンや *h*-BN の微小領域に位置選択的なドーピングが可能に なることも考えられる。これにより、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] S. Entani, et al., Nanotech. 31, 125705 (2020).

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

 Shiro Entani, Konstantin V. Larionov, Zakhar I. Popov, Masaru Takizawa, Masaki Mizuguchi, Hideo Watanabe, Songtian Li, Hiroshi Naramoto, Pavel B. Sorokin, Seiji Sakai, "Non-chemical fluorination of hexagonal boron nitride by high-energy ion irradiation", Nanotechnology **31** (2020) 125705. 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。

本年度は下記の研究に取り組んだ。

課題① 継続課題として、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等の吸蔵・熱放出に及ぼす影響について調べた。

課題② タングステン(W)再堆積層形成に及ぼす He プラズマ同時照射効果について名古屋大学との共同研究を引き続き実施した。

課題③ QUEST プラズマ対向 W 壁を更に高温化するに当たって十分な性能が期待できる新しい W 接 合材の開発に着手した。

本報告では、課題②について得られた成果を述べる。

2. 実験結果及び考察

課題② W-He 共堆積層の微細構造と真空特性等に及ぼす影響

核融合炉におけるプラズマ対向壁は 773~1023K に加熱した W 材料で保護することが検討されている。壁面には 500eV 程度以下の水素同位体(D, T)や He が大量に飛来し W においてもスパッタリン グ損耗が起こるなど激しいプラズマ・壁相互作用(PWI)が予想される。スパッタされた W 原子の多く はプラズマ対向壁に再付着するため、その表面は W 再堆積層で覆われる。PWI によって起こるであろう対向面の変質がプラズマの特性や閉じ込めに及ぼす影響についてあらかじめ明らかにし、ネガティブ な影響については対応策を検討しておく必要がある。

Wの再堆積層は大量の水素同位体とHeが降り注いでいる環境で形成されるため、高真空状態で作られる一般的なW蒸着膜とはかなり異なる特性を持つことが考えられる。特に、金属中で極めて強い自己集合特性を持つHeが飛来する環境ではその影響は大きいことが予想される。従って、本研究では直線プラズマ装置NAGDIS-II(名古屋大学)を用いて 60eVのHe プラズマ照射下(3~7x10²¹He⁺/m²s、2.5x10²⁵He⁺/m²)において 300eVのHe プラズマによって弾き出されたW原子をW板材上に堆積させ、その微細構造とHe 及びDの吸蔵・放出特性について調べた。

図1及び図2に773KのW板材上に形成されたW-He共堆積層とあらかじめ真空蒸着したWにHe プラズマを照射した材料の典型的な断面組織(TEM写真)を示す。厚さ約450nmまで成長したW-He の共堆積層は平均直径100nm程度の微結晶と歪な形をした空洞の集合体であることがわかる。また、 微結晶の内部には大量のHeバブル(直径数nm~数10nmの球体)が発生している。Wが表面に付着 し結晶化するとすかさずHeが入り込み次々とHeバブルが作られる。Heバブルは安定でこの温度では 消滅しないため堆積層内には高密度の微細Heバブルが大量に残留することになる。EDS分析により堆 積層中のW密度はバルクWの60%程度であることが明らかになった。バブルや空洞が如何に多いかが 判る。結晶粒界や下地Wとの界面には微細なクラックがすでに発生しており、W-He共堆積層は非常に 脆く熱負荷等で発生する温度変動等で容易に剥離する可能性が危惧される。

一方、W を真空蒸着した後 He プラズマを照射した試料(図 2)や直接 He 照射した W 板材では表面

直下 30nm 程度の限られた領域にのみ He バブルが形成されており W-He 共堆積層とは対照的である。 組織の大きな違いは He や水素の吸蔵・放出にも大きな影響を与える。773K で He プラズマに曝され た 3 種類の W (W-He 共堆積層(A)、バルク W (B)、W 蒸着膜(@773K(C))からの He の昇温脱離 スペクトルを図 3 に示した。共堆積層全体に He バブルが形成されている A では、He プラズマの強い 影響領域が最表面に限定される B、C に比べ、1673K までの He 放出量が約 1 桁多い。特に、炉の運転 温度領域(700~1000K)で放出量が急増することは由々しい現象であり留意する必要がある。D の放 出量についても W-He 共堆積層は桁違いに大きい(図4)。W-He 共堆積層の形成により、D や He の 吸蔵・放出量が大幅に増加することは粒子バランスの維持が難しくなることを示唆しており、再堆積層 の成長をいかに抑制するかが今後の重要な検討課題になろう。

学会発表

第36回プラズマ・核融合学会年会、島袋瞬,吉田直亮,花田和明,出射浩,池添竜也,恩地拓己(九大 応力研)「QUEST 高温壁の新候補材料検討」

第 36 回プラズマ・核融合学会年会、浅井宏祐, 吉田直亮, 大野哲靖, 梶田信, 田中宏彦, 矢嶋美幸(名 大院工, 九大応力研, 名大未来研, 核融合研)「高密度ヘリウムプラズマ中で作成された He W 共堆積 層の試料温度依存性」

第 36 回プラズマ・核融合学会年会、矢嶋美幸, 吉田直亮, A・ウラジミール, 増崎貴, 時谷政行, 本島 厳(核融合研, 九大応力研, 東北大)「LHD 第一壁における He および水素同位体保持量評価」

発表論文

"Microstructure and Retention in He-W Co-Deposition Layer" K. ASAI, N. YOSHIDA, N. OHNO, S. KAJITA, H. TANAKA, M. YAJIMA, D. NAGATA, (Nagoya Univ., Kyushu U., NIFS), Plasma and Fusion Research, 15, 1201004 (2020)



図1 W-He 共堆積層の断面組織



図3 残留 He の昇温脱離スペクトル



図 2 773K で蒸着した W 層に Heプラズマを照射した試料の断面組織



図4 注入Dの昇温脱離スペクトル

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

九州大学応用力学研究所の直線プラズマ装置 PANTA では、抵抗性ドリフト不 安定性の非線形乱流発展則を明らかにするための基礎研究が実施されている. 制御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-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 させてしまうため、いずれか 1 つを独立に制御することのできる新たなコント ロールノブ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. アルゴンプ ラズマ中にヘリウムの SMBI を入射することで、電子密度分布を維持したまま中 性ガス圧のみを変化させることが可能となった. SMBI 入射後のプラズマ乱流の 変化を観測し、その非線形過程を解明することが本研究の目的である.

2. 実験結果

PANTA は軸長 4m, 半径 5cm の円筒型磁場閉じ込めプラズマである.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.64channel 周方向プローブアレイと 5-channel 径方向プローブアレイ (tip 間隔 1cm)を用いて乱流を計測する.プラズマ生成部から 1375mm 離れた位置に SMBI 装置が取り付けられている.1回の入射で,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はSMBI前後の、平均イオン飽和電流の径方向分布、軸方向分布(r = 4 cm),低周波数揺動(2.8-5.0 kHz)と高周波数揺動(5.4-13 kHz)の振幅の径方向分布を表す.ここでイオン飽和電流は電子密度に比例すると考える.SMBI前後で、イオン飽和電流の空間分布はほとんど変化しない.すなわち、He ガスを入射しても、電離エネルギーが高いためほとんど電離は起こらず、純粋な中性粒子 圧力の増加が起こっていると考えることができる.低周波数揺動振幅には SMBI



図 1. SMBI 前後の(a) イオン飽和電流の径方向分布, (b) 軸方向分布(r = 4 cm), (c) 低周波数揺動(2.8-5.0 kHz) と(d) 高周波数揺動(5.4-13 kHz)の揺動 振幅の径方向分布

後, 広範囲に渡っての増加が見られる. 一方で高周波数揺動振幅は r<4.5cm で は減少, r>4.5cm では増加となった. 中性ガス圧の増加により線形安定モードの 周波数が変化し, それが非線形的に作用して全体の揺動分布が変化したと考え られる.

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. 密度分布を一 定に保ったまま中性ガス圧を変化させることにより, 揺動の線形減衰機構がモ ードの非線形発展に与える影響を議論した.

研究組織

稲垣滋(九大応力研),佐々木真(九大応力研)

準2次元乱流の統計力学的研究

岡山大学 大学院環境生命科学研究科 小布施祈織

【研究の目的】

統計物理学分野において,系の保存量に着目しその系が最終的に実現する分布則を得る手法が知られてい る。たとえば2次元もしくは準2次元完全流体においてエネルギー保存の制約の下にエンストロフィー 最小化問題を考える最小エンストロフィー原理 (ME) または選択的減衰原理 (selective deacy) [1, 2] や 一般的なカシミール不変量保存の制約の下に Miller-Robert-Sommeria エントロピー最大化問題を考え る Miller-Robert-Sommeria (MRS) 理論 [3, 4] などがあり,様々な惑星大気モデルへの応用がなされて いる [5, 6]。

本研究課題では、これらの統計力学的手法の準2次元的プラズマ乱流への適用可能性について調査し、本格的議論の基盤となる定式化を行うことを目的とした。今回は特に、A. Venaille and F. Bouchet [7] を基とし、プラズマと中性粒子が結合した系に対する MRS-2 理論を考察した。

【中性粒子効果を取り入れた準2次元プラズマ乱流モデル】

本研究課題では、次の式で記述される中性粒子効果を取り込んだ準2次元モデルを考える。

$$m_i n_i (\partial_t \mathbf{V}_i) = -\nabla p_i + e n_i \left(\mathbf{E} + (\mathbf{V}_i \times \mathbf{B})/c \right) - m_i n_i \nu_{ie} (\mathbf{V}_i - \mathbf{V}_e) - m_i n_i \nu_{in} (\mathbf{V}_i - \mathbf{V}_n),$$

$$m_e n_e (\partial_t \mathbf{V}_e) = -\nabla p_e + e n_e \left(\mathbf{E} + (\mathbf{V}_e \times \mathbf{B})/c \right) - m_e n_e \nu_{ei} (\mathbf{V}_e - \mathbf{V}_i),$$

$$m_n n_n (\partial_t \mathbf{V}_n) = -\nabla p_n - m_n n_n \nu_{ni} (\mathbf{V}_n - \mathbf{V}_i).$$

この系ではエネルギー \mathcal{E} 、エンストロフィー S に加え, ポテンシャル渦度 $q = (1 - \rho_s^2 \nabla_{\perp}^2) (e\phi)/T_e - (\nu_*/c_s)(r/\rho_s)$ が保存する。ここで $\nu_* = c_s \rho_s (-(\nabla \langle n_i \rangle)/\langle n_i \rangle - P'_n/(\langle n \rangle T_e))$ であり,右辺第二項目 $-P'_n \langle n \rangle T_e$ は中性粒子の存在からの寄与である。以下ではポテンシャル渦度保存の式を一般的な形で書 き表し,次の方程式系を考えることにする。

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla q = 0, \ q = \Delta \phi - \phi/R^2 + h.$$
(1)

【中性粒子効果を取り入れた準2次元プラズマ乱流モデルにおける MRS-2 理論】

本研究課題では,式 (1) で書きあらわされる中性粒子効果を取り入れた準 2 次元プラズマ乱流モデルに 対する MRS-2 理論を考える。すなわち,エネルギー \mathcal{E} ,循環 $\mathcal{C} = \int_{d}^{r} \mathbf{r} q(: 1 次のカシミール不変量), エ$ $ンストロフィ <math>\mathcal{S}(: 2 次のカシミール不変量)$,保存の下での MRS エントロピー最大化問題を考える。こ れはエネルギーおよび循環保存の制約条件の下でのエンストロフィー最小化問題と同値となることが Naso *et. al.* [8] によって示されているため,実現される平衡状態は次の条件を満たす状態である。

$$S(E,\Gamma) = \max_{q} \left\{ \mathcal{S} \mid \mathcal{E} = E, \mathcal{C}[q] = \Gamma \right\}.$$

取り扱いを簡単化するため、ここで(2)を

$$F(\beta, \Gamma) = \min_{q} \left\{ F = S + \beta \mathcal{E}[q] \mid \mathcal{C}[q] = \Gamma \right\},$$
(2)

と書き直し, さらに $\mathcal{C}[q]$ の線形性を用いて $\tilde{q} := q - q_1 e_1, q_1 = \left(\Gamma - \sum_{i \leq 2} q_i \langle e_i \rangle\right) / \langle e_1 \rangle$ を定義する。 ここで e_i はラプラシアンの i 番目の固有モードであり, 〈 〉は考えている領域での空間積分を表す。本 研究では, q を用いて変分問題 (2) を書き直したものを考えることにより, 式 (1) で定義される準 2 次元 プラズマ乱流モデルの予想される平衡状態を考察した。

ラプラシアンの固有モードのうち, 空間平均がゼロとなる固有モードをその固有値の絶対値が小さい方 から順に e'_i , 空間平均がノンゼロとなる固有モードをその固有値の絶対値が小さい方から順に $e''_i, i \in \mathcal{N}$ とする。また, e'_i に対応する固有値および h の成分をそれぞれ $-\lambda'_i$, h'_i とし, $\mu'_i := \lambda'_i + R^{-2}$ を定義す る。さらに (2) を \tilde{q} を用いて書き直したものにおいて \mathcal{F} の 2 次の作用素部分に起因する線形作用素 Qを考え, $Q[e''_i] = 0$ を実現するモードのうち最小の固有値を有する固有モードとその固有値 μ^* を考える。

このとき, *E*, *S*, Γ 空間における平衡状態のフェイズダイアグラムには次の場合に対応する 3 つのクラ スが存在することが分かった。

(i) μ* < μ'₁: 平衡解の存在条件は {E_β | β > μ*}
(ii) μ* > μ'₁ かつ h'₁ = 0: 平衡解の存在条件は {E_{β=μ'₁} + α²/(2μ'₁) | α ∈ R}
(iii) μ* > μ'₁ かつ h'₁ ≠ 0: 平衡解の存在条件は {E_β | β > -μ'₁}
ここで E_β は f(β) := Σ_{i≥i} (μ_i⟨e_i⟩²/(μ_i + β)) を用いて次のように定義される。

$$E_{\beta}(\Gamma) := A_{\beta}[h] + B_{\beta}[h]\Gamma + \left(\left(1/2f(\beta)^2 \right) \right) \sum_{i \ge 1} \left(\mu_i \langle e_i \rangle^2 / (\mu_i + \beta)^2 \right) \right).$$

ただし $A_{\beta}[h]$ および $B_{\beta}[h]$ の詳細は本報告書のスペースの関係上省略する。

【参考文献】

- [1] F. P. Brethertona and D. B. Haidvogel, J. Fluid Mech., 78(1) pp.129-154, 1976
- [2] C. E. Leith, Phys. Fluids, 27 pp.1388-1395, 1985
- [3] K. Miller, *Phys. Rev. Lett.*, **65**, pp.2137-2140, 1990
- [4] R. Robert and J. Sommeria, J. Fluid Mech., 229, pp.291-310, 1991

 [5] H. Brands, P. H. Chavanism, R. Pasmanter, and J. Sommeria, *Phys. Fluids*, **11** pp.3465-3477, 1999

[6] F. Bouchet and A. Venaille, Zonal Jets, Ed. B. Galperin, Cambridge University Press, 2019

- [7] A. Venaille and F. Bouchet, J. Stat. Phys., 143, pp.346-380, 2010
- [8] A Naso, P. H. Chavanis, and B. Dubrulle, Euro. Phys. J. l B, 77, pp.187–212, 2010

【学会発表】

- ·青木大輔, 小菅佑輔 "Neutral effects on the structure of minimum enstrophy flows", The 28th International Toki Conference on Plasma and Fuion Research, P1-72, Nov. 6 2019, Ceratopia Toki, Toki City, Gifu, Japan
- ・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 合学会第23回支部大会、D-3、2019年12月22日, 別府国際コンベンションセンター B-ConPlaza

【研究組織】

研究代表者: 岡山大学 大学院環境生命科学研究科 小布施祈織 所内世話人: 九州大学 応用力学研究所 小菅佑輔
確率項を含むプラズマ乱流モデルの解析

Analysis of plasma turbulence model including stochastic terms

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。

本年度より、これまでの共同研究の成果を踏まえて、粗視化スケールの揺動を確率項 として含むプラズマ乱流モデルの解析を行う。本年度は、実験室プラズマ中のドリフト波の捕 捉モデル(M. Sasaki et al, 2017; 2018)などに対し確率項を導入し、実空間・波数空間のエネ ルギー輸送との関係を議論する。

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、実験室プラズマ中のドリフト波の捕捉モデル(M. Sasaki et al, 2017; 2018)[1,2]として用いられた wave-kinetic equation を用いて議論を行った。ただし、ここでは 実空間(x)・波数空間(k_x)における波の作用の移流を表す項を除くと、波数空間の拡散項の みが有効な状況を考える。また、ここでは wave-kinetic equation に対応する x,k_x の確率微分 方程式を数値的に議論する。数値積分には Eular-丸山法[3]を用いている。また、測地線音 波揺動は先行研究[1]と同様に単色で与えており、平均流は 0 としている。以下に示す計算 においては、初期値はすべての擬似粒子に対し $x=k_x=0$ とし、擬似粒子の数は 1000 個で ある。

Figure 1(a)(b)は $k_x \ge x$ の分散の時間発展を示している。 k_x の方程式には波数空間の拡 散項に対応するガウス白色ノイズを与える項があるが、xの方程式にノイズ項は含まれてい ないことに注意されたい。Figure 1(a)が示すように、拡散係数に対応するノイズ項の係数が 大きくなるほど、 k_x の分散の時間発展のトレンドが大きくなる。Figure 1(a)の振動は、測地線 音波揺動の振動周期に対応した k_x の平均値の振動に関係している。

一方で、Figure 1(b)が示すように x の分散もノイズ項の係数が大きくなるにつれて大きな時間変化を示すようになる。x の方程式にはノイズ項が含まれないため、この実空間の拡散は波数空間の拡散により駆動されたものといえる。このような現象は、ジャイロ角にノイズ項でモデル化されたランダム効果のある磁気流体波中のピッチ角散乱でも見られる[4]。た

だし、ここで見られる実空間の拡散は、時間に対し比例するブラウン運動的な拡散(古典拡 散)よりも大きな拡散係数を持っているが、この結果は位相空間上の捕捉が生じる系の場合 は自明なものではない。実際、ノイズ項の係数を大きくしていくと、実空間の拡散は減少に 転じる。今後は、初期値やパラメータに対する依存性等の精査を行い、詳細を明らかにする 必要がある。



Figure 1 (a) k_xと(b)x の分散の時間発展。図中のグラフはノイズ項の係数が大きくなるほど拡散も大きくなる。ノイズの影響がほとんどない場合は分散がほぼ 0 であるため、マーカーで表示している。

参考文献: [1] M. Sasaki et al, Sci. Rep., 7, 16767 (2017). [2] M. Sasaki et al, Phys. Plasmas 25, 012316 (2018). [3] D. J. Higham, SIAM REVIEW, 43(3), 525–546 (2001). [4] Y. Nariyuki, Phys. Plasmas 26, 112903 (2019).

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)

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 糟谷 紘一^{ヘ, B}, コチャエフ オレグ^B, 島田 義則^B, 井澤 靖和^B, 徳永 和俊^c, 川路 均^D [^]応用ながれ研究所, ^Bレーザー技術総合研究所, ^c九州大学応用力学研究所,

^D東京工業大学フロンティア材料研究所

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)これまでの表面損耗研究、(2)レーザ 一誘起超音波法による鋼管肉厚測定、(3)最近の 核融合炉関連材料表面の損耗に関する論文調査 結果、(4)今後進める予定の実験のための準備、 (4)その他の関連調査項目。

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。

これまでの表面損耗研究本研究に関係が深い筆者らの損耗研究結果の最近状況は、参考文献1から5と、さらに最新のものは、文末のURL に詳しく書いてある。

レーザー誘起超音波法による鋼管肉厚測定 レーザー励起超音波法については、筆者等 の所属する研究機関(レーザー技術総合研究所 の主な研究グループ構成員が、これまでに各種 インフラ整備を主目的として、長期間実績を積 み上げている(参考文献6から7に最新のもの)。 第1図は測定法の原理図である。これによるサ ンプル鋼管測定結果の1例を第1表に示す。

最近の核融合炉関連材料表面の損耗に関する論 文調査結果 筆者らが実験により表面損耗研 究を続けてきた一方で、極めて最近、ITER-BA グ ループが、DEMO 機におけるタングステンダイバ ーター表面の減損率(材料表面の損耗率から堆 積率を差し引いた値)評価の重要性を、むしろ 計算により明らかにした(参考文献 8 から 9)。

今後進める予定の実験のための準備 鋼管の 代わりにサンプルの種類(炉材料)を色々換えて 実験を行った。計測用オシロスコープの信号波 形の1例を第2図に示す。サンプルの実厚さと 計測厚さの一致は、予想通りであった。

その他の関連項目 (1)複合材料と厚さ計によ る損耗破壊監視計測については、より安価で高 性能な厚さ計が市販される状況になった。(2) 関連分光分析のための計測器の整備と初期テス トのために、より明るい近赤外半導体レーザー 等を用意した。(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に使える 可能性のある新たな材料(開発と市販)品を見 つけた。 あとがき今後、実験データの集積をさらに進め、測定可能厚さ範囲や精度について詳しく検討する。

参考文献

1)K.Kasuya et al., Proc. SPIE 8677-1, pp.1-12 (2013).

2)K. Kasuya et al., J. Plasma and Fusion Res.,8, pp. 3404054-1-4.

3)K.Kasuya et al., Fusion Sci. and Tech., 63,1T, pp. 364-366 (2013).

4)K.Kasuya et al., Proc. SPIE 9255, pp.925548-1-6, (2015).

5) 糟谷紘一, 鈴木哲, 電気学会研究会資料, PST-11-112[~]128/ /PPT-11-113[~]129, pp.65-70 (2011).

6)島田義則,オレグ コチャエフ,レーザー・ クロス, No. 376, 1 (2019).

7) 糟谷紘紘一, 川路均, J. Straus, K. Kolacek, 井澤靖和, 藤田雅之, 砂原 淳, 本越伸二, 島田 義則, 谷口誠治, 2018 年度 NIFS 素過程合同研究 会, Dec, 19-21 (2018).

8)本間裕貴ほか, NIFS 境界層プラズマダイナ ミックスのさらなる分野横断的研究会, 令和元 年8月6日(2019).

9)Y. Homma et al., Nuclear Material and Energy,12, pp. 323-328 (2017).

<u>URL:https://sites.google.com/site/kasuyako</u> uichihomupeiji/

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 2019FP-22)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 24)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



第1図 レーザー誘起超音波法による鋼管 肉厚測定法の原理

第1表 鋼管サンプルの 実肉厚とレーザー計測値の比較

実肉厚	多重反	射周波数	計測肉厚。	
(mm)	(計測値)	(kHz)	(mm)	
7.1	420		7.0	
5.0	610		4.8	
3.7	800		3.7	
	ª音速を	5.9 km/s	と仮定して計算	ĩ



第2図 計測用オシロスコープの信号波形例

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 一技術総合研究所の各位 などの方々にお世話に なった。

2020/02/28 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

本研究では、トーラス装置 PLATO における MHD 安定性解析ツールの整備を行った。本解析ツー ルでは、平衡モジュールである TASK/EQ と非線形 MHD シミュレションコードである MIPS コード を用いている。これらのコードを使用することにより、PLATO プラズマにおけるキンクモードとバ ルーニングモードの非線形シミュレーションを初めて行った[1-3]。

図1 では自由境界 MHD 平衡コードである TASK/EQU モジュールを用いて得られた平衡配位を 示している。ここでは、制御用コイルとして、D, H, Q コイルを使用し、プラズマ電流は 40kA、三角 度は 0.3、楕円度は 1.6 である。本研究では、図1の平衡配位の q=5.5 の磁気面を境界条件として、 固定境界平衡コードである TASK/EQ モジュールを用いて MIPS コード用の平衡データの作成を行っ ている。MIPS コードは、一流体モデルを初期値問題として数値的に計算するコードである。空間方

向には(r, ϕ , z)の円柱座標系を用い、4次 精度の有限差分法を用いて離散化されて いる。また、時間積分は4次精度のルンゲ クッタ法を用いて行っている。本解析で は、異なるq分布を持つ3つの MHD 平衡 を構築して解析した。図2にそれぞれの平 衡のq分布を示す。ここで磁気軸でのq値、 q_0 は、 q_0 =0.5, 0.8, 1.3 である。本計算では (128,64,128)のメッシュ数を用い、粘性係 数、抵抗係数、熱拡散係数はそれぞれv = $10^{-5}v_aR_0, \eta = 10^{-5}v_aR_0, \chi = 10^{-7}v_aR_0$ を 仮定した。ここで v_a はアルフヴェン速度、 R_0 =0.7[m]はトーラスの大半径である。



図 1. (左) PLATO 装置における MHD 平衡の磁場 配位。使用したコイルと電流値は右表に示した。

図3は、qo=0.8の平衡に対する非線形シミュレーションから 得られた、トロイダルモードごとの圧力揺動の時間発展を示し ている。図3の縦軸の Ep は内部エネルギーに相当する量であ

り、 $Ep = \int \sqrt{[P(r,z)_n^c]^2 + [P(r,z)_n^s]^2} dr dz$ で定義され、ここで、

 $P(r,z)_{n}^{c}, P(r,z)_{n}^{s}$ は、トロイダルモード数が n の圧力揺動の cos 成分および sin 成分である。図 4 では、ポロイダル断面におけ る全圧力分布と圧力揺動分布の時間発展を示している。最も線 形不安定なモードは n=14 のバルーニングモードであり、図 4(a,d)に示すようにトーラス外側において不安定性が発生して いる。t=200 τ_{a} までは、n=1 モードも線形成長を示しており、 これは(m,n)=(1,1)のキンクモードによるものである。200 τ_{a} < t < 300 τ_{a} では n=1 モードの成長は加速されている。これは、 異なるトロイダルモード数を持つバルーニングモード間のモー ドカップリングにより、n=1 のモードが非線形的に生成されて いる影響によるものである。t~300 τ_{a} においてバルーニングモ ードは飽和し始めるため、n=1 モードの成長も緩やかになる。



図2. 解析を行った MHD 平衡の q 分布。それぞれ磁気軸での q 値 は、0.5 (赤),0.8 (青),1.3 (黄 緑)である。



×10⁻² 1.2 (b) 1.0 oressu 0.8 0.6 0.0 Lugar Nor 0.2 0 $0.4 \ 0.6 \ 0.8 \ 1 \ 0.4 \ 0.6 \ 0.8 \ 1 \ 0.4 \ 0.6 \ 0.8$ ×10⁻³⊈ 0.4 (d) (f) (e) 0.2 Z 0.0 -0.2 -0.4 $0.4 \ 0.6 \ R \ 0.8$ 1 0.4 0.0 0.8 R 1 U.4 U.0 U.8 R

図 3. q₀=0.8 の平衡に対する内部エネル ギーEp のトロイダルモード毎の時間 発展の様子。

図 4. q_0 =0.8 の場合における、ポロイダル断面での(上段)全圧力分布、および、(下段) 揺動圧力分布の時間発展の様子。時刻はそれぞれ(a,d)t=300 τ_a , (b,e)t=500 τ_a , (c,f)t=600 τ_a で

しかしながら、t>400 τ_a では n=1 モードの成長率は大きくなり、最終的には n=1 モードの振幅が最 も大きくなる。これは、線形不安定な(m,n)=(1,1)モードが成長を続けているためである。図 4(b,e)に 示すように、コア領域において(m,n)=(1,1)のキンクモードのモード構造が明瞭に現れていることがわ かる。最終的には、図 4(c,f)が示すように、(m,n)=(1,1)のキンクモードによって中心圧力の低下が生 ずることになる。

 q_0 =0.5の MHD 平衡は、 q_0 =0.8の場合と比較して、周辺部での磁気シアーが強いため、バルーニン グモードは抑制される。一方、(m,n)=(1,1)のキンクモードの線形成長率は増加し、結果として、 q_0 =0.5 の平衡ではキンクモードのみが成長する結果が得られた。図5では、 q_0 =0.8、および、 q_0 =0.5の計算結 果から得られた、飽和状態における(m,n)=(1,1)モードと n=14 モードの圧力揺動の径分布を示してい

る。*qo*=0.5 では、(m,n)=(1,1)のモード構造 はプラズマ全体に広がった構造を持つの に対し、*qo*=0.8 においては、n=14のバル ーニングモードが現れている領域よりも 外側には広がっていない。これは、 (m,n)=(1,1)のキンクモードと n=14 等の バルーニングモード間の相互作用による 影響による可能性がある。今後、さらに詳 細な解析を進めていくことにより、異な る不安定性間の相互作用を明らかにして いく予定である。



^[1] S. Tomimatsu et al., The 28th International Toki Conference (Nov. 5-8, 2019, Toki, Japan)

- [2] S. Tomimatsu et al., Plasma and Fusion Research (submitted)
- [3] 富松修平他, 日本物理学会第75回年次大会 (2020)

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。これまで、複数年のデータを用いた統計解析を試みて 来たが、季節性通常の降雨については、そのトレンドを議論するために十年〜数十年の統計を用い ることが必要となる。本年の研究では、人々の生活に大きな影響を与えた近年の降雨イベントについて取り扱う対象とする。具体的には、前線型の降雨と台風型の降雨、台風・前線混在型の降雨のそれぞれについて、まず前線型と台風型のそれぞれの特徴を把握した上で混在型の解析を行うため、 以下のデータを準備した。

○前線型の降雨

■2019年 8月25~ 30日 九州北部地方
■2016年 6月18~ 7月 1日 九州~西日本
○台風型の降雨
■2019年10月 9~ 14日 関東~東北地方 「台風19号」
■2019年10月23~ 27日 千葉県・福島県
○台風・前線混在型
■2018年 6月27~ 7月 9日 西日本 「平成30年7月豪雨」
■2017年10月20~ 24日 西日本~東日本・東北地方
■2017年 9月12~ 19日 西日本・北海道
■2017年 6月29~ 7月11日 西日本~東日本 「平成29年7月九州北部豪雨」

以上のデータについて、気象業務支援センターの配信する GRIB2 形式から、解析を行うためのプリ プロセスとして、位置情報を含んだラスタデータ GeoTIFF 形式への変換処理を行った。特に、九州 北部地区(緯度 129.5~131.0,経度 32.6~33.8)、期間(2019 年 8 月 2 9 日)について、突発的降 雨の時空間構造の抽出を行い、その解析を行った。

解析では、時空間構造の成長時・減衰時の特徴の抽出に優れた「動的モード分解 (Dynamic Mode Decomposition: DMD)」手法を用いることとした。DMD は、近年潮流となっているデータ駆動科 学の手法のひとつであり、複雑な非定常データからその特徴的な構造と時間発展を抽出することが できる。プラズマ乱流物理学をはじめ、様々な分野でその有効性が検証されている [5]。今回は、 気候変動に伴い、激甚化している災害を引き起こす突発的な降雨現象、特に線状降水帯の原因とな っていると考えられている、風上で発生した積乱雲が風下の同位置で長時間に渡り激しい雨を降ら せる「バックビルディング現象」について解析を行い、連続的に発生する降雨の時空間スケールを 評価し、空間構造に地理的特性が現れるかを検証することとした。

結果

2019年8月29日深夜から8月30日未明の九州北部地方における降雨分布の時間発展に DMDを適用し解析したところ、熊本県水俣市から人吉市あたりに発生した線状降水帯において、支 配的なモードの波長が、八代海の東西方向の空間スケール程度となることがわかった。また、その 周波数は、およそ1時間程度の時間スケールとなることがわかった。

展望

本研究の成果として得た線状降水帯の時空間的特徴を、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2019年度共同利用・共同研究2019 FP-24、中部大学問題 複合体を対象とする共同利用・共同研究 IDEAS201931 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] S. Inagaki, et al., Nuclear Fusion 53 (2013) 113006.
- [2] N. Kasuya, et al., Plasma Phys. Contrl. Fusion 57 (2015) 044010.
- [3] S. Sugita, et al., Plasma Fusion Res. 9 (2014) 1203044.
- [4] S. Sugita, et al., 5th Digital Earth Summit (2014) and 6th Digital Earth Summit (2016).
- [5] M. Sasaki, et al., Plasma Phys. Contrl. Fusion 61 (2019) 112001.

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、Phase 1 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、Hα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]。熱 負荷実験後、破壊靭性実験後の試料の表面付着物の確認や損傷発生原因の推定のため、九州大学応用力 学研究所では昇温脱離ガス分析(TDS: Temperature Desorption Spectroscopy)装置が活用されている [4-6]。本 TDS 装置における昇温加熱制御、ガス分析データの入出力、データ解析、解析結果表示は DOSV パソコンにて実行されているので、Windows10パソコンに移行すべく調査・検討したので、その内容に ついて報告する。

調査内容: TDS 装置のハードウェアの構成を図1に示す。DOSV パソコンを Windows10 パソコンに更 新した場合、入出力カードのための PC カードバスが必要なことと、入出力カードの修理受付期限が既 に切れているので、メーカーの代替推奨品 AIO-16320FX-USB に移行する。また、パソコン〜入出力ユ ニット間の接続ケーブルもメーカーの推奨品 PCB96PS-P に更新する。



図1. TDS 装置のハードウェアの構成.

TDS 装置のソフトウェアの構成を図2に示す。昇温加熱制御、ガス分析データの入出力、データ解析、 解析結果表示のためのプログラムは Visual Basic 6.0 を用いてコーディングされている。入出力ユニッ トの更新に伴い、Visual Studio 2019 の Visual Basic.NET に移行する。

検討内容:Windows10パソコンにVisual Studio をインストールして、TDS 装置のソフトウェアの検 討を実施した。

(1) Form (画面) に関しては、全文ともエラーが発生する。

・TDS コントローラの Visual Basic は「Visual Basic Version 5.0」であり、今回インストールした Visual Studio は「Visual Basic.NET」であり、Form(画面)に関しては、全く互換性が無い。

・前者では、Form(画面)をテキストコードで作成し、後者では、Form(画面)をグラフィカルに作 成している。

・Form(画面)に関しては、既存の画面を参考にして作り直しが必要である。

(2) VB (ソースコード) に関しては、組込関数でエラーが発生する。

TDS コントローラの Visual Basic は「Visual Basic Version 5.0」であり、今回インストールした
 Visual Studio は「Visual Basic.NET」であり、ソースコードに関しては、概して一致している。
 VB(ソースコード)に関しては、組込関数の置き換えが必要である。

- 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 導入と破壊靱性評価, 原子力学会, 茨城 大学水戸キャンパス (2019).



- [4] Y. X. Zhang, X. Y. Tan, L. Ma Luo, Y. Xu, X. Zan, Q. Xu, K. Tokunaga, X. Y. Zhu, Y. C. Wu, Combined effect of laser thermal shock and helium ion irradiation on W-Y2O3 composites, Fusion Engineering and Design, 140 (2019) 102-106.
- [5] Y. X. Zhang, X. Y. Tan, X. Zan, L. M. Luo, Y. Xu, Q. Xu, K. Tokunaga, X. Y. Zhu, Y. C. Wu, A 6 MW/m2 High Heat Flux Testing Facility of Irradiated Materials Using Infrared Plasma-Arc Lamps, Fusion Science and Technology, 75 (2019) 690-701.
- [6] Y. X. Zhang, X. Y. Tan, X. Zan, L. M. Luo, Y. Xu, Q. Xu, K. Tokunaga, X. Y. Zhu, Y. C. Wu, Effect of annealing on the microstructure behavior of D+-irradiated W-2vol.%TiC composite prepared by wetchemical method, Fusion Engineering and Design, 140 (2019) 111321.

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式会社 平林潤一

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 等の溶質原子クラスタ(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。その第一ステップとして、これまでに Cu の含有量を規格上限である 0.4%まで高めた低合金鋼を用いて評価を進めてきた。第二ステップでは、評価対象を実際の原子炉圧力容器鋼に発展させる。本報告は、原子炉圧力容器鋼の未照射材の硬さ測定、金属組織観察および TEM 観察・元素マッピング分析の結果をまとめたものである。

2. 試験方法

供試材は2種類あり、低合金鋼A、低合金鋼Bと呼ぶこととする。いずれも、原子炉圧力容器に使用されている典型的な低合金鋼の未照射材である。供試材の化学成分を表1に示す。Cuの含有量は、低合金鋼Aが0.17 wt%,低合金鋼Bが0.06 wt%である。硬さに関しては、試験荷重300 gfで5点ずつビッカース硬さを測定し、平均値を算出した。金属組織に関しては、供試材を王水でエッチングし、100倍、400倍および1000倍で観察した。また、TEM観察・元素マッピング分析の試料作製においては、最初に供試材を0.13 mmの薄板に加工し、打ち抜きにより直径2 mmの円盤状の観察試料を採取した。次に、この試料を非磁性体であるSUS316製の外径3 mm、内径2 mmのリング形状の枠にはめ込み、固定した。この試料を非磁性体である観察試料の体積を小さくすることで、TEM内部で受ける磁場の影響を低減し、ホルダからの脱落を防ぐための対策である。枠に固定した観察試料の両面から電解ジェット研磨を行い、試料中央部を薄膜化してTEM観察に供した。この試料作製の流れを図1に示す。観察および元素分析は、200 kV原子分解能顕微鏡およびエネルギー分散型X線分析装置(EDS)を用いて実施した。

	С	Si	Mn	Ρ	S	Cu	Ni	Cr	Мо	Fe
低合金鋼 A	0.23	0.21	1.29	0.009	0.015	0.17	0.56	0.1	0.57	Bal.
低合金鋼 B	0.21	0.25	0.69	0.01	0.011	0.06	0.71	0.4	0.58	Bal.
1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.										
図1 観察試料作製の流れ										

表1 供試材の化学成分(wt%)

3. 結果

供試材の硬さ測定結果を表 2 に示す。低合金鋼 A よりも低合金鋼 B の方が 10 HV 高い値であった。次に、金属組織の観察結果を図 2 に示す。結晶粒径は、鍛造材である低合金鋼 B よりも圧延材である低合金鋼 A の方が 小さかった。最後に、TEM 観察・元素マッピング分析の結果として、典型的な明視野(BF)像および Cu、Ni、Mn 組 成マップ像を図 3 に示す。Cu 等のクラスタやマトリクス欠陥は確認されなかった。



表2 供試材の平均硬さ(HV)

図2 金属組織観察結果



図3 TEM観察・元素マッピング分析結果

4. まとめ

照射挙動評価に用いる原子炉圧力容器鋼の未照射材の組織や元素分布などを評価し、Cu等の溶質原子クラス タやマトリクス欠陥が形成されていないことを確認した。今後、Cuクラスタとマトリクス欠陥を形成させ、高照射領域での 挙動を評価する予定である。

5. 研究体制

研究代表者:東芝エネルギーシステムズ株式会社 平林潤 研究協力者:東芝エネルギーシステムズ株式会社 鹿野文寿、藤田敏之 九州大学応用力学研究所 渡邉英雄 2019年度 九州大学共同利用研究成果報告書

ジルコニウム合金の水素吸収に及ぼす照射損傷の影響評価

日本核燃料開発(株)研究部燃料グループ 高橋 克仁

1. 目的

本研究は現行軽水炉に比べて中性子照射量が大きくなる新型炉の燃料被覆管およびチャンネルボックス等 に使用される Zr 合金の水素吸収に関する。Zr 合金に吸収された水素は Zr と水素化物を形成して水素脆化を 起こす。Zr 合金は炉水環境にて水との反応により緩やかに腐食し、水素が生成される。腐食の初期では緻密な 酸化膜により Zr 合金側への水素吸収は抑制されるが、酸化膜の特性変化が生ずると水素吸収がし易くなると推 測される。また、実炉環境下では中性子照射のはじき出し損傷により照射欠陥が形成され、照射欠陥と水素は 相互作用しながら拡散すると推測される。しかしながら、中性子照射と水素吸収の関係性は明確になっていな い。本研究では、Zr 合金の水素吸収量に及ぼす中性子照射の影響の明確化を目的とした。

2. 実験方法

Zr 合金として、ジルカロイ2の板材を290 ℃の高温純水中に30 d 間浸漬して表面に酸化膜を形成した後、 はじき出し損傷導入のため、タンデム型重イオン加速器にて3.2 MeV Ni³⁺イオンを室温にて1 dpa 照射した。続 いて、炉水温度相当の300℃にて、軽イオン照射装置により5 keV に加速した重水素イオン(D₂⁺)を2×10²¹ atoms/m²まで注入した。この試料を昇温脱離分析装置により真空中にて室温から1000 ℃まで1 ℃/s で昇温 して放出される重水素(D₂, m/e=4)を測定し、照射欠陥と水素の相互作用を推定した。

3. 結果

図1にNi³⁺イオンを1 dpa 照射後に重水素を注入した試料および重水素注入のみ実施した試料(以下,それ ぞれ照射欠陥あり試料および照射欠陥なし試料と称する)での重水素の脱離挙動を示す。重水素の脱離速度 からは、いずれの試料でも 300 ℃および 500 ℃付近にピークが確認された。照射欠陥あり試料では、照射欠 陥なし試料に比べて脱離速度が大きくなる傾向がみられた。重水素は注入と同時に酸化膜から放出されている と考えており、この照射欠陥あり試料での脱離速度の増加は、重イオン照射により酸化膜中での重水素の拡散 係数が減少し、保持される重水素が増加したためと推測している。

図 2 に照射欠陥あり試料での重水素脱離曲線についてピーク分離した結果を示す。照射欠陥あり試料では 300℃および 500℃付近のピークの他に 400℃付近にも脱離ピークが確認され,照射による新たなトラップの形 成が示唆された。

4. まとめ

① 重イオン照射後に重水素注入した試料では重水素注入のみの試料と比較して重水素の脱離量が大きかった。照射損傷によりトラップサイトが増加して、重水素の注入と同時に起こる重水素の放出が抑制され、昇温時の脱離量が増加したと推測される。

② 照射欠陥なし試料では、重水素の脱離曲線は約 300 ℃および 500 ℃付近にピークを有する脱離ピークに 分離されたが、照射欠陥あり試料では 400℃付近にも脱離ピークが確認され、照射による新たなトラップの形成 が示唆された。

今回の照射量では,照射損傷による酸化膜中の新たなトラップの形成とトラップの増加により,水素拡散が抑制される可能性が示唆された。一方,高照射量条件では,酸化膜中での水素の吸蔵量が増加し,拡散挙動が変化することも考えられる。

5. 今後の課題と対応

微細組織観察等により脱離挙動に差異が生じた要因を検証する。また、今回は、比較的小さい照射量での実験であったため、より高照射量での検討を行いたいと考えている。得られた知見を新型炉の高照射量条件下での水素吸収挙動の推定に役立てる。



図1 重水素の昇温脱離挙動





「2019年度 九州大学共同利用研究成果報告書」

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

株式会社 日立製作所 研究開発グループ 王昀

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 を添加したオ ーステナイト系ステンレス鋼の開発を進めている.次世代原子炉の 80 年の運転期間を考慮して,現行 材 SUS316Lの照射誘起応力腐食割れ(IASCC)感受性が発現する閾値(約1.4 dpa)の3倍以上の5 dpa を,本開発材の目標閾値として,高照射量における照射誘起粒界偏析(RIS)に及ぼす構成元素の影響を 検討した.

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	Мо	V	Nb	Та	Al	Ν	0	Base material
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. 照射誘起粒界偏析分析

温度 300°で,照射損傷ピーク位置で 5 dpa の Fe²⁺イオンで照射した各供試材を対象に,RIS 評価を実施した.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.収差補正走査・透過電子顕微鏡 (STEM) JEM-ARM200F に搭載されたネルギー分散型 X 線 (EDX) 分析ユニットを用いて行った.分析位置は,最大照射損傷深さ 800 nm 近傍とした.

各試験片の粒界上における Cr 変化量の分析結果を図 2 にまとめた. Ta の添加量の増加につれて, ランダム粒界上の Cr 欠乏量が減少する傾向が確認された. また, 0.4% Ta を添加した場合は, 高 Cr 高 Ni の 21Cr+21.5Ni+0.4Ta 材で最も良い耐 RIS 性を示した.

5.まとめ

Ta を添加した開発材を対象に実施した EDX 分析の結果から, Ta 添加による照射誘起粒界偏析の低減 効果が実証された.この結果から, Ta 添加による耐 IASCC 性の向上が期待される.

6. 今後の課題と対応

今後は Nb 添加材を対象に,照射量 5 dpa での RIS を評価し,Ta 添加材と比較することにより成分最 適化を検討する予定である.

試験片サイズ Ø 3 × 0.2 mm



(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開発材における Crの照射誘起粒界偏析に及ぼす Ta 含有量の影響(5 dpa)

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 安田和弘, 塘中宏樹 (院), Seo Pooreun (院), 吉岡 聰, 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Ce02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、Ce02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。一方、 Bhuianら⁽¹⁾の研究により高密度電子励起損傷によって形成されたイオントラックを含む試料中に 電子照射を行うと、電子のみを照射した場合とは密度や性状の異なる照射欠陥が形成されること が報告している。この結果は、線質およびエネルギーの異なる放射線が存在する原子炉燃料の照 射下微細構造を理解する上で重要と考えられるが、微細組織の発達過程が異なる放射線によって 形成される欠陥のどのような相互作用によって起こるのかは理解できていない。そこで本研究で は高速重イオン照射によって損傷を受けた蛍石構造酸化物に透過型電子顕微鏡を用いて電子を照 射し、はじき出し損傷下での欠陥の形成・成長過程を明らかにすることを目的とした。

2. 実験方法

Zr0₂に Y₂0₃を 9.8 mo1%添加した板面(001)面の YSZ 単結晶、および 8 mo1%の Y₂0₃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 200 MeV Xe¹⁴⁺イオンを室温にて照射した。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超高圧電子顕微鏡 (JEM-1300NEF) 汎用電子顕微鏡 (JEM-2100HC)を用いて 200 keV および 1250 keV の電子照射を行いながら「その場」 観察した。電子線照射に伴う電子線束密度は TEM に装備されたファラデーカップを用いて測定し た。

結果および考察

図1(a)および(b)は、200 MeV Xe イオンを照射した CeO₂試料を同一視野にてフォーカス条件を 変化させて撮影した時の TEM 明視野像である。画面中央付近の線状のコントラストがイオントラ ックである。図1の(c)および(d)は 200keV 電子を 7.7×10²¹ (e/cm²) の照射量まで照射した時の TEM 明視野像であり、転位ループはイオントラックの上やその付近に形成されていることがわか る。また、電子照射によってイオントラックのコ ントラストが弱くなっていることもわかった。

図2は200 MeV Xe を照射した CeO₂試料に300 K で200 keV 電子を照射した際の微細組織の時間変 化であり、図3は同じ試料に300 K で1250 keV 電 子を照射した際の微細組織の時間変化である。形 成された転位ループの大きさを比較すると200 keV の電子を照射した試料に大きな転位ループが 形成されていることがわかった。転位ループの密 度に注目すると1250 keV の電子を照射した試料 の方が転位ループの密度は高くなっているとい うことが分かった。

以上より、電子照射によって形成された転移ル ープは、原子密度の低いイオントラック上に優先 的に形成され、そのサイズや密度は電子エネルギ ーに依存することがわかった。



図1 200 MeV Xe を照射した CeO₂ 試料に 200 keV 電子を照射する前後をフォーカス条件を 変化させて撮影した時の TEM 明視野像。 (a),(b):電子照射前、(c),(d):電子照射後

(1) AKM S.I. Bhuian, K. Kuwahara, T. Yamamoto, <u>K. Yasuda</u>, S. Matsumura, H. Yasuda, *Trans. of Mater. Res. Soc. Japan*, 41 (2016) 319.



図 2 200 keV 電子照射した CeO₂の TEM 明視野像。



図 3 1250 keV 電子照射した CeO2の TEM 明視野像。

2019FP-30

窒素ドープされた多層グラフェン膜の水素吸収・貯蔵・放出特性

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、 $1.3x10^3$ 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。メラミンを 423 および 473 K で加熱して N ドープ量を変えた。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 N ドープ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、多層グラフェンおよび N ドープ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、室温から 500℃まで4 K/min の温 度上昇速度で加熱し、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 約 24~30℃の室温および約 30-40%R.H.の相対湿度の雰囲気の条件で、長時間空気暴 露された多層グラフェン膜および N ドープされた多層グ ラフェン膜について測定された NRA スペクトルを図1に 示す。横軸は N+イオンの入射エネルギーであり、多層グラ フェン膜表面からの深さを表す。縦軸は、多層グラフェン 膜中の水素濃度を表す。図1から、N ドープされた多層グ

ラフェン膜最表面における C 原子に対する H 原子数比
 (H/C)はカーボンの原子数密度を1.76x10²³ C/cm³とすると
 約 1.09 であり、N ドープされていない多層グラフェン膜



図1 Cu上に形成された多層グラフェンおよびNド ープされた多層グラフェン膜中の水素濃度分 布(NRA スペクトル)。



の H/C の約 2 倍であった。多量の水(H₂O)が歪んだ多層グラフェン膜表面に吸着される以外に、N ドープにより形成 された欠陥と反応して解離吸着されたと考えられる。また、N ドープされた約 24 層 (インターカレーション)内の H/C は約 0.32 であり、N ドープされていない層内の H/C の約 4 倍と評価された。H₂O の解離により生成された原子状 H が多層グラフェン膜層間内を占有したと考えられる。

次に、室温から 300℃の温度までの各温度で 10 分間の等時加熱された N ドープ多層グラフェン膜の ERD スペク トルを図 2 に示す。図 2 から求めた N ドープ多層グラフェン膜中の H/C は約 1.91 であり、NRA 法により求めた結 果より高い値であった。ERD 法の深さ分解能は約 100 nm であるため、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、ERD 法で求めた H/C の値は、多層グラフェン膜表面および層間の合計の H 濃度を表す。また、ERD スペクトルの強度は、加熱温度の増加とともに減少することがわかる。加熱温度に対する 多層グラフェン膜、N ドープ多層グラフェンおよびグラファイト中の捕捉 H 濃度の変化を図 3 に示す。図 3 より、 多層グラフェンおよび N ドープ多層グラフェンと腹中の捕捉 H 濃度は、グラファイト中の H 濃度が 400℃まで全く減 少しないことに対して約 100℃以下の低温で除々に減少し、300℃で約 3 割程度まで減少することがわかった。グラ ファイトの場合、H は 400℃以上で CH4 の形状で放出されることが報告されているので、多層グラフェン膜からの H は、H₂O および H₂ の形状で放出されていることが推測される。このことを明らかにするために、TDS 法を用いて、 室温で空気暴露された N ドープ多層グラフェンを室温から 500℃まで 4 K/min の温度上昇速度で加熱し、試料から放 出されるガス種の判別を行った。得られた TDS スペクトルを図 4 に示す。H₂O および CH4 が約 150℃以下の低温か ら放出し、続いて H₂が約 350℃から急激に放出された。ERD 法により得られた放出温度と異なるが、H 放出は多層

グラフェン膜表面に吸着した H₂O および CH₄の形成、層 間を脱離した H 原子同士の再結合による H₂の形成によっ て生じると考えられる。

まとめ NRA、ERD および TDS 法を用いて、真空内で約 300~500℃まで加熱された N ドープされた多層グラフェ ン膜中の水素濃度変化について調べた。大気に放置された 多層グラフェン膜表面には N ドープ効果により多量の H₂O が吸着しており、H が層間に占有されることがわかっ た。また、これらの捕捉 H 濃度は約 100℃以下の低温から 除々に H₂O、CH₄ および H₂の形状で放出され、300℃で 約 3 割程度まで減少することがわかった。



191

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。本年度は、初年 度に実施した再結晶 W 材の強度試験により応力負荷を与えた試料に対して、その変形挙動を明らかに するため電子線後方散乱解析(EBSD)を用いてミクロ組織観察を行なった。

【実験及び解析】

引張試験片は、Wの圧延材から、圧延面に平行な表面をもち、圧延方向に平行な試験片(L-R type) と圧延方向に垂直な試験片(T-R type)を切り出し、全面を機械研磨した。また、真空中で1800℃、1 時間焼鈍することにより再結晶処理を行った。微小試験片の寸法は、平行部の長さ5.0 mm、幅1.2 mm、 厚み0.5 mm である。引張試験時の初期ひずみ速度は2x10⁴s⁻¹、2x10⁻³s⁻¹、及び2x10⁻²s⁻¹とした。試 験温度は、800 ℃、1300 ℃及び1600 ℃で、引張試験は真空中で行った。引張試験後、破断した試料の 破面や表面を走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて観察し、さらに、一部の試料については、電子線後方 散乱解析(EBSD)を用いてミクロ組織観察を行なった。。

【結果】

図1、及び図2にT-R typeの再結晶処理Wで初期歪み速度が2x10⁻²s⁻¹で、試験温度が800°の場合の試料のつかみ部、及び平行部の部分をEBSD観察した結果を示す。この場合の平行部の伸びが、50%程度である。つかみ部は応力が負荷されておらず、応力を受ける前の状態であるとみなすことができる。図1(a)に見られるように再結晶化により結晶粒が粗大化し、数10 μ mから100 μ 程度の粒径であることがわかる。さらに、図1(b)のIQ mapや図1(c)のKAM mapにより粒内の歪みは均一で、その歪みも小さいことがわかる。また、図1(d)に見られるように結晶粒界は15°以上の方位差を持っていることがわかった。図1(e)の極点図では、結晶面の方位は、ほぼ全方向に分布しているが、部分的に局所化していることがわかる。

一方、引張試験後の試験片では、図 2(a)の IPF map からわかるように引張応力による塑性変形のため 結晶粒が大きく変形し、同じ粒内でも方位が異なる部分が分布をもって存在している。これらのことは、 結晶が回転し、同じ結晶粒内でも部分的に格子が歪んでいるため方位が異なるものが存在していること を示している。また、結晶粒は引張方向である上下方向に比較的伸延している。図 2(b)の IQ map、及び 図 2(c)の KLM map は、結晶性や残留歪みの定性的な評価に用いることが可能であるが、凹凸の影響も 受けるため、すべり線の表面の凹凸の効果も入っているものと考えられる。特に、図 2(b)の IQ map の 黒部、図 2(c)の KLM map の赤部、図 2(d)の面積のある青部の領域は、図 2(a)の IPF map の砂粒部と対応 しており、IC 値が小さいために結晶のパターン得られていないことも考えられる。図 2(d)の結晶粒界 map では、結晶粒界の方位差が 15°以上の粒界の中に、2°から 5°の方位差が小さいものが多数形成 されていることがわかる。図 2(e)の極点図からは、方位が連続的に異なる領域が発生していることが見 て取れる。

【まとめ】

再結晶化の影響を調べるために、再結晶化した W 材の高温引張試験を行い、引張後の応力負荷を受けた試験片のミクロ組織観察を行なった。これにより、引張応力負荷による再結晶 W のミクロ組織変化や結晶の回転、及び結晶粒内外の方位変化の様子が明らかとなった。これらのデータは、熱負荷による材料損傷の基本過程を理解する上や再結晶脆化や材料開発の基礎データとして有用である。



図 1 つかみ部の EBSD 観察結果、(a)IPF map (ND 方向)、(b)IQ map、(c)KAM map、(d)結晶 粒界 map、(e)極点図

図 2 平行部の EBSD 観察結果、(a)IPF map (ND 方向)、(b)IQ map、(c)KAM map、(d)結 晶粒界 map、(e)極点図 引張応力は上下方 向である。

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した。

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(図1)。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。

2) 照射実験



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

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 31 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 の様になると考えられる。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。



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。

5. 成果発表 特になし。

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

次世代パワーエレクトロニクスシステム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、直流リンクコンデンサに適した評価回路を用いた ESR・キャパシタンスモニタリング 方法を提案する。

1. 序論

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。また、三相インバータに搭載される直流リンクコンデンサの評価に適 した回路構を提案しており、インバータが発生する実リプル電流と等価な電流波形をコンデンサに 供給できる試験環境を構築している。

本研究では, 直流リンクコンデンサに適した評価回路の ESR・キャパシタンスモニタリング手法 を提案する。

2. 実験回路構成

図1に直流リンクコンデンサに適した評価回路の 実験回路構成と定数を示す。三相インバータは 120 V 640 A 定格であるが, DC バイアス電圧供給用の 小型直流電源と組み合わせることで、被測定コン デンサに対しては 1200 V 6400 VA 定格のインバー タと等価な動作を実現する。

Power rating 【本 ٦Ľ 〔本 $L_{\rm LV} = 10 \text{ mH}$ - It $V_{\rm HV} =$ 1200 V $C_{\rm UT}$ CUT $\overline{\mathbf{m}}$ v_{DClink} _____ $V_{\rm LV} =$ 120 V $R_0 = L_0 = 80 \text{ m}\Omega 27 \text{ mH}$ 小人 (1%) (100%) 図 1 直流リンクコンデンサに適した評価回路の

 $v_{\rm by}$

C_{bypass} – 320 μF

 $L_{\rm HV} = 10 \text{ mH}$

 i_c



Carrier freq. = 3 kHz

Output freq. = 50 Hz

Modulation Index = 1

= 640 VA



図2 ESR/キャパシタンスモニタリング提案法のブロック図

3. ESR/キャパシタンスモニタリング法

図2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 Icut(ωk) と Vcut(ωk)を抽出し,各周波 数におけるインピーダンス Zcur(ω_k)を算出する。Zcur(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。

実験結果と考察

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 1: $C_{\rm UT} = 320 \ \mu F$
- Condition 2: C_{IIT} = 320 μF, 0.47 Ωの抵抗を C_{IIT} に直列接続
- Condition 3: $C_{\rm UT} = 20 \ \mu F$

図3にインピーダンスプロフィルを示す。これはコンデンサ 電流波形と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。図 3(a)においてキャパスタンス値は使用したコンデ ンサとバイパス用コンデンサ Cbypass =320 mF の直列値とほぼ一 致している。図 3(b)では ESR が 0.44 Ωに増加しており、この変 図3 インピーダンスプロファイル 化は直列接続した抵抗値におよそ一致している。図 3(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と Cbypassの直列 値にほぼ一致している。



(c)

実験結果

5. まとめ

本研究では, 三相インバータ用直流リンクコンデンサに適した評価回路を用いた ESR・キャパシ タンスモニタリング手法を提案した。インバータが発生する実リプル電流から ESR とキャパシタ ンス値を抽出できることを理論的に明らかにし、1200 V 6400 W 実験システムによりその有効性を 確認した。

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, "A Condition-Monitoring Method of DC-Link Capacitors Used in a High-Power Three-Phase PWM Inverter with an Evaluation Circuit," IEEJ Journal of Industry Applications, vol. 8, no. 3, pp. 480-487, May 2019.

次世代パワーデバイス用のアイソレーション・信号伝送技術

茨城工業高等専門学校 電気・電子系 成 慶珉

・目的

本研究では、次世代パワーエレクトロニクスの集積化のために非接触電力伝送(Wireless Power Transfer)方 法によるゲートドライブ方式の実現検証を行う。パワー半導体を駆動するためにはゲート駆動電力とスイッチ ングのオン・オフタイミング信号が必要である。その電力と信号のタイミングを同時に伝送できる非接触多重 伝送によって、今までパワー半導体をドライブするために必要であった複数の絶縁電源と信号絶縁のためのレ ベルシフト回路等が不要になり、電力変換装置の集積化を進めることができる。更に本提案方法のゲート回路 では、エネルギーバッファ素子としての少容量コンデンサで実現でき、MOSFETのゲート・ソース間(IGBT で はゲート・エミッタ間)端子に直接に接続し駆動できる回路である。本提案方式は次世代の SiC と GaN による パワーデバイスの高温動作時に問題となる周辺受動素子を極端に低減できるゲート駆動回路の実現が期待でき る。

・実験方法

図1のように送受信システムを構築し実験を行った。FPGA 制御器から正弦波 PWM 信号と1 MHz 高周波が多重 になった信号を生成し、高速動作の GaN - MOSFET を駆動させた。送受信コイルは次回共鳴結合になり、約1 MH z 付近で最大の電圧比が得られるように設計を行った。また、高周波信号伝送用のコイルはプリント基板で 作成する PCB スパイラスコイルを用いた。2つのマイクロインバータを駆動させ、2並列のパワーデバイスを駆 動する実験を行った。



図1. アイソレーション・信号伝送回路実験回路と実験の様子

・実験結果

50Hzの疑似正弦波 PWM 信号と WPT 用の1MHz の信号を多重にし、伝送実験を行った。更に受信側では受信した多重信号よりゲート駆動用の電力と PWM 信号をマイコンで分離できる回路を構築した。最終端の信号では、正弦波 PWM 信号と駆動用電源として入力10V で出力電圧15V 程度の直流電源を再生できた。今後実験結果をまとめ学会への報告を準備中である。以上。

次世代パワーエレクトロニクス信頼性・設計技術

2020年3月4日

氏名:和田圭二

1 まえがき

SiC パワー素子を使用した回路応用に関する研究・開発が近年活発に行われている [1]。Si 素子と比較し てスイッチング速度が向上する為,電力変換回路の効率改善に着目する論文が数多く存在する。また,SiC デバイスはオン抵抗が小さい為,直流遮断器が応用先として期待される。半導体直流遮断器の利点として, MCCB のような機械式の遮断器と比較して小型化・高速な遮断性能が挙げられる。

直流給電システムを対象とした半導体直流遮断器に関する研究が進められている [2]-[4]。半導体直流遮 断器の場合,遮断器の基本的な機能である直流電流の遮断は、ノーマリーオンまたはノーマリーオフ素子を 遮断器のように操作することにより可能となる。遮断器への応用において、ノーマリーオン素子はノーマ リーオン素子よりも低いオン抵抗を持つため望ましい素子である [3]。ノーマリーオン素子の応用例とし て、SiC-SIT を使用した遮断器においてゲート電圧を段階的に制御することでサージ電圧の低減手法 [2] や、 SiC-JFET を使用した遮断器 [3][4] が提案されている。しかし、半導体遮断器を対象とした素子の劣化評価 は不十分である。半導体素子を遮断器に適用する場合、ターンオフ操作に伴い発生する過大な電圧が印加さ れる可能性がある為、適用素子の詳細な劣化評価が必要となる。

Unclamped inductive switching (UIS) 試験はパワーデバイスを対象とした従来から存在する評価手法 である。非繰り返し UIS 試験ではデバイスシミュレーションによって SiC 素子の破壊原因の特定が行わ れている [5][6]。一方, 繰り返し UIS 試験によってパワーデバイスの寄生容量・閾値電圧の変化 [7][8] や, SiC-MOSFET 及び SiC-JFET の劣化 [9]-[13] が報告されている。UIS 試験動作は, インダクタに蓄えられ たエネルギーを半導体素子が吸収する為, 直流遮断器における緊急的な遮断状況を模擬することが可能であ る。それゆえ, 繰り返し UIS 試験動作は複数回の遮断によって劣化しない素子の選定のために必要である。

本論文では半導体直流遮断器適用を目的とした繰り返し UIS 試験による SiC パワーデバイスの劣化を議 論する。市販されている SiC-MOSFET や SiC-JFET など,計4 デバイスを対象とした。また,実験にお ける遮断環境は直流 400 V と設定した。非繰り返し UIS 試験から素子の破壊条件を実験的に獲得し,繰り 返し試験の条件は非繰り返し UIS 試験による素子の破壊条件を基に設定した。

繰り返しの UIS 試験によるデバイスの劣化を比較し, SiC-JFET が SiC 素子を適用した場合の直流遮断 器において有力な候補であることを実験的に確認した。

2 評価手法

図1に UIS 試験回路及び試験波形を示す。また、図2に実験に使用した UIS 試験回路を示す。実験において直流電源 V_{in} を400 V, ゲート抵抗 R_G を47 Ω に設定した。また空芯インダクタ L は 1.4 mH である。対象素子 (DUT) は全て 1200 V 定格で、SiC-MOSFET のプレーナ構造素子が1つ、SiC-MOSFET の トレンチ構造素子が2つ、SiC-JFET 素子が1つの計4種類を評価する。UIS 試験によってパワーデバイスに与えられるアバランシェエネルギーは以下の式で表される。

$$E_{\rm AS} = \frac{1}{2} L I_{\rm AS}^2 \frac{V_{\rm BR}}{V_{\rm BR} - V_{\rm IN}} \tag{1}$$

破壊条件は各素子で個別に定義されるため、直流電圧 V_{in} 及びインダクタ L は一定とし、オン期間 T_{ON} を変化させた。繰り返し試験におけるアバランシェ電流 I_{AS} は、素子破壊時の電流の約 10 % 程低い値に設



図2 実機試験に使用した UIS 試験回路

定した。パワーデバイスの劣化評価は試験前後の $I_{\rm D} - V_{\rm GS}$ 特性の変化によって評価を行い, 測定にはカーブトレーサー (Iwatsu, CS-3300) を使用した。

3 繰り返し UIS 試験

繰り返し UIS 試験においてドレイン電流 i_D がアバランシェ電流 I_{AS} に達するまでスイッチングデバイスにオン期間 T_{ON} が与えられる。アバランシェ電流 I_{AS} は以下の式によって表される。

$$I_{\rm AS} = \frac{V_{\rm IN} \cdot T_{\rm ON}}{L} \tag{2}$$

ターンオフ動作に伴い生じるサージ電圧 V_L はインダクタに蓄えられていたエネルギーに由来するもので ある。その為,ドレイン-ソース間電圧 v_{DS} はブレークダウン電圧 V_{BD} に達する。UIS 試験は図1に示すよ うに,アバランシェ期間 T_{AS} において発生するアバランシェエネルギー E_{AS} への耐久性を評価する試験で ある。本実験において,デバイスには強制空冷が実施され,素子の温度は室温であった。

デバイスタイプ		SiC-JFET		
デバイス名	C2M0280120D	SCT3160KL	IMW120R045M1	UJN1205K
デバイス構造	Planar	Trench	Trench	-
定格電圧 V_{DSS}	1200 V	1200 V	1200 V	1200 V
定格電流 $I_{\rm D}$	10 A	17 A	52 A	38 A

表1 繰り返し UIS 試験に使用するデバイス一覧

表 2 繰り返し UIS 試験の試験条件

デバイスタイプ		SiC-JFET						
デバイス名	C2M0280120D	SCT3160KL	IMW120R045M1	UJN1205K				
入力電圧 VIN	400 V							
インダクタ L	1.4 mH							
アバランシェ電流 $I_{ m AS}$	13.4 A	10.2 A	29.8 A	22.2 A				
$E_{\rm ASREP}/E_{\rm ASMAX}$	97.3~%	92.7~%	98.1~%	89.8~%				
繰り返し試験回数		5,000						
	+15 / 0 V	+15 / 0 V						
ゲート電圧 $v_{ m G}$	+15 / -5 V	+15 / -4 V	+15 / 0 V	0 / -15 V				
	+15 / -10 V	+15 / -10 V						

4 実験結果

4.1 繰り返し UIS 試験の実験条件

表1に試験に対象とする素子を,表2に繰り返し UIS 試験の実験条件を示す。本論文では繰り返し UIS 試験時に与えるアバランシェエネルギーを E_{ASREP} , 非繰り返し UIS 試験時において破壊現象が確認され た際のアバランシェエネルギーを E_{ASMAX} とする。図3に, Infenion 社製デバイス"IMW120R045M1"が 非繰り返し UIS 試験により破壊された際の v_{DS} と i_D の実験波形を示す。アバランシェ電流 I_{AS} は 31.3 A であり, ブレークダウン電圧 V_{BD} は 1,600 V 以上に達している。

4.2 SiC デバイスの評価

4.2.1 SiC-MOSFET を対象とした劣化評価

図 4(a)~(c) に SiC-MOSFET を対象とした繰り返し UIS 試験前後の $I_D - V_{GS}$ 特性を示す。なお、 $I_D - V_{GS}$ 特性は $V_{DS} = 20$ V と設定し測定を行った。また、繰り返し UIS 試験時のゲート電圧 v_G は +15 / 0 V である。 $V_{GS} = 10$ V で試験前後の $I_D - V_{GS}$ 特性を比較すると、CREE 社製素子"C2M0280120D"



図 3 IMW120R045M1 が非繰り返し UIS 試験により破壊された際の波形



図 4 SiC-MOSFET を対象とした繰り返し UIS 試験前後の $I_{\rm D} - V_{\rm GS}$ 特性

及び Infenion 社製素子"IMW120R045M1"の場合繰り返し UIS 試験によってオン抵抗が増加する傾向にあ るが, ROHM 社製素子"SCT3160KL"の場合減少する傾向にあることが確認された。オン抵抗の変化率は C2M0280120D 及び IMW120R045M1 の場合 +15 % 以上であり, 一方, SCT3160KL の場合 –18.7% で あった。

試験結果から,繰り返し試験後のオン抵抗増加のメカニズムは以下の様に考察される。アバランシェ状態 において,高い電界強度によって生成されるホットキャリアがゲート酸化膜とチャネル領域の間にトラッ プ,もしくは酸化膜に注入される。その為,後述するように試験後のオン抵抗の変化率は,オフ状態のゲー ト負バイアスによって増加する。*I*_D – *V*_{GS} 特性のシフト方向から C2M0280120D と IMW120R045M1 に おいて電子トラップが発生していると考えられる。

文献 [5] では、アバランシェ期間中において MOSFET の温度上昇によって閾値電圧 V_{th} が減少しチャネ ルに電子が流れる経路が発生することがデバイスシミュレーションによって示される。この時、アバラン シェ動作によって発生した高電界によってエネルギーを持った電子の一部が酸化膜に注入されると、酸化膜 の破壊につながる。C2M0280120D と IMW120R045M1 を対象とした試験中においては酸化膜が破壊され ずに、高いエネルギーを持った電子がアバランシェ期間中に酸化膜とチャネルの間にトラップされた可能性 がある。

一方, SCT3160KL では繰り返し UIS 試験によるアバランシェ動作によって酸化膜へのホールトラップ が発生した可能性がある。文献 [12] において, 繰り返し UIS 試験によりトレンチ酸化膜底部にホールのト ラップが発生しており, また, *I*_D – *V*_{GS} 特性が左にシフトしている。 今回の SCT3160KL を使用した場合 においても *I*_D – *V*_{GS} 特性が左にシフトしている為, 同様の現象が発生した可能性が高い。 ゲート酸化膜近 傍の電界強度はゲート構造及びサイズにより決まるため, 特性変化の差異は素子構造が原因であると考えら



図 5 SiC-MOSFET を対象とした繰り返し UIS 試験前後の試験波形

れる。

4.2.2 SiC-MOSFET のゲート劣化

図 5(a)~(c) に SiC-MOSFET を対象とした繰り返し UIS 試験前後の波形をそれぞれ示す。これらは図 4(a)~(c) に示す $I_D - V_{GS}$ 特性を測定した際に使用した素子から得られた波形である。ゲート電流 i_G は AC 電流プローブ (PC 6022: Tektronics) を回路基板に直接クランプさせ測定を行った。C2M0280120D 及び IMW120R045M1 を対象とした波形においてどちらもオン期間中のゲート-ソース間電圧 v_{GS} の低下 及びゲート電流の増加が確認された。

図 6(a)~(b) に繰り返し UIS 試験による素子劣化の前後の状態におけるゲートドライブ回路をそれぞれ 示す。素子が劣化した後の回路では、ゲート-ソース間の寄生容量と並列に存在する抵抗 R_{GS} が確認され た。実験結果から R_{GS} は 143.5 Ω と算出された。





図7 オフ時のゲート電圧を変化させた場合の繰り返し UIS 試験結果

表3 繰り返し UIS 試験前後の特性変化

デバイスタイプ		SiC-JFET		
デバイス名	C2M0280120D	SCT3160KL A	IMW120R045M1	UJN1205K
$I_{ m D}-V_{ m GS}$ 特性のシフト	Ē	負	正	正
$R_{ m dson}$ の変化率 *	+16.9~%	-18.7~%	+15.7~%	+3.60~%

* MOSFET の場合, ゲート電圧は v_G=+15 / 0 V

4.2.3 SiC-MOSFET のオフ時ゲート電圧による劣化評価

本章では UIS 試験において,オフ期間中のゲート電圧の劣化依存性について議論する。図 7(a)~(b) にオ フ期間のゲート電圧を変化させ,繰り返し UIS 試験を 1,000 回実施した後の試験結果を示す。縦軸はオン 抵抗の変化率を表し,横軸はオン期間中のゲート電圧の減少率を示す。図 7(a)~(b) において,原点に近い ほど素子の劣化が少ないことを示す。C2M0280120D を対象とした場合,ゲートオフ時に負電圧を印加す るとオン抵抗の変化率が大きくなり,オン期間中のゲート-ソース間電圧 v_{GS} の減少率はどの素子でも約 30 % 程である。IMW120R045M1 を対象とした場合,オン抵抗については同様の傾向であるものの,オン期間 中のゲート-ソース間電圧 v_{GS} は変化しない事が確認された。

4.2.4 SiC-JFET を対象とした劣化評価

図 8 に USiC 社製 SiC-JFET"UJN1205K"を対象とした繰り返し UIS 試験前後の $I_{\rm D} - V_{\rm GS}$ 特性を示 す。試験前後の特性はほぼ変化しておらず, 5,000 回繰り返し試験後のオン抵抗の変化率は 3.60% であっ た。この結果から破壊点付近での繰り返し UIS 試験において, SiC-JFET はほぼ劣化しないことが確認さ れた。JFET は MOSFET のような酸化膜を持たない。それゆえ, pn 接合中にホットキャリアが注入され たとしてもキャリアトラップは発生しない為劣化しにくいと考えられる。



図8 SiC-JFET を対象とした繰り返し UIS 試験前後の $I_{\rm D} - V_{\rm GS}$ 特性

5 繰り返し UIS 試験によるパワーデバイス劣化評価のまとめ

本論文では、現在市販されている 3 種類の SiC-MOSFET と 1 種類の SiC-JFET を対象に繰り返し UIS 試験により劣化評価を行った。表 3 に評価した 4 つの SiC 素子の $I_{\rm D} - V_{\rm GS}$ 特性のシフトと $R_{\rm dson}$ の変化率をまとめた。劣化特性は C2M0280120D 及び IMW120R045M1 でほぼ同様であった。加えて、 C2M0280120D の劣化特性はオフ期間中のゲート電圧 $v_{\rm G}$ に依存することを確認した。上記の 2 素子と比 較して SCT3160KL の劣化特性はわずかに異なっており、これはゲート酸化膜の特性によるものと考えら れます。また、UJN1205K は 5,000 回繰り返し UIS 試験を行ってもほぼ劣化しないことが確認された。

6 結論

本実験において採用した MOSFET は繰り返し UIS 試験により特性が劣化することが示された, その為 直流遮断器への適用は困難である。一方, SiC-JFET は特性の劣化が少ない為, 現状において, 直流遮断器 へ適用する素子として有力である。

7 発表論文

国際会議

- Mitsuhiko Sagara, Keji Wada, "Design and Implementation UIS Test Equipment for SiC Power Device", 5th Symposium on Semiconductor Power Conversion, JP6, (2018)
- Mitsuhiko Sagara, Keji Wada, Shin-ichi Nishizawa, "Degradation Characteristics of SiC Power Devices for DC Circuit Breaker by Repetitive Unclamped Inductive Switching Test", 30th European Symposium on Reliability of Electron Devices, Failure Physics and Analysis(ESREF), F2P-3, #121 (2019)
- Mitsuhiko Sagara, Keji Wada, Shin-ichi Nishizawa, "Evaluation of SiC-MOSFET by Repetitive UIS Tests for Solid State Circuit Breaker", International Conference on Silicon Carbide and Related Materials 2019 (ICSCRM2019), Tu-P-45 (2019)

国内会議

- 相良 光彦,和田 圭二,西澤 伸一,"繰り返し USI 試験による SiC スイッチング素子の劣化評価", 平成 30 年度産業応用部門大会,1-7 (2018)
- ●相良 光彦,和田 圭二,西澤 伸一, "SiC パワーデバイスを対象とした繰り返し UIS 試験による特性評価",電子デバイス・半導体電力変換合同研究会, SPC-18-148, EDD-18-054, (2018)

参考文献

- K. Yamaguchi, K. Katsura, T. Yamada, Y. Sato, "Comprehensive Study on Gate Driver for SiC-MOSFETs with Gate Boost," *IEEJ J.Industry Applications*, vol. 7, no. 3, pp. 218-228, 2018.
- [2] Y. Sato, Y. Tanaka, A. Fukui, M. Yamasaki, and H. Ohashi, "SiC-SIT Circuit Breakers With Controllable Interruption Voltage for 400-V DC Distribution Systems," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 29, no. 5, pp. 2597-2605, 2014.
- [3] Z. John Shen, Zhenyu Miao, "Wide-Bandgap Solid-State Circuit Breakers for DC Power System: Device and Circuit Consideration," *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. 62, no. 2, pp. 294-300, 2015
- [4] Alexander Wurfel, Johannes Adler, Anton Mauder, Nando Kaminski "Over Current Breaker Based on the Dual Thyristor Principle," International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD), pp. 143-146, 2016
- [5] A. Fayyaz, A. Castellazzi, G. Romano, and M. Riccio, "UIS failure mechanism of SiC power MOSFETs," *IEEE Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA)*, pp. 118-122, 2016
- [6] J. An, M. Namai, D. Okamoto, H. Yano, H. Tadano, N. Iwamuro, "Investigation of Maximum Junction Temperature for 4H-SiC MOSFET during Unclamped Inductive Switching Test," *IEEJ Trans. on Electronics, Information and Systems*, vol. 137, no. 2, pp. 216-221, 2017.
- [7] J. Marek, D. Donoval, M. Petrus, O. Stuchlikova, A. Chvala, M. Molnar, and P. Pribitny, "Degradation of the low voltage power MOSFET electrical parameters during multipulse UIS test," *International Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystem (ASDAM)*, pp. 183-186, 2012
- [8] O. Alatise, I. Kennedy, G. Petkos, K. Heppenstall, K. Khan, J. Parkin, A. Koh, and P. Rutter, "Repetitive avalanche cycling of low-voltage power trench n-MOSFETs," *European Solid State Device Research Conference (ESSDERC)*, pp. 273-276, 2010.
- [9] B. N. Pushpakaran, M. Hinojosa, S. B. Bayne, V. Veliadis, D. Urciuoli, N. El-Hinnawy, P. Borodulin, S. Gupta, and C. Scozzie, "Evaluation of SiC JFET Performance During Repetitive Pulsed Switching Into an Unclamped Inductive Load," *IEEE Trans. on Plasma Science*, vol. 42, no. 10, pp. 2968-2973, 2014.
- [10] L. Yang, A. Fayyaz, and A. Castellazzi, "Characterization of High-Voltage SiC MOSFETs under UIS Avalanche Stress," *IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives* (*PEMD 2014*), pp. 1-5, 2014
- [11] X. Zhou, H. Su, R. Yue, G. Dai, J. Li, Y. Wang, and Z. Yu, "A Deep Insight into the Degradation of 1.2kV 4H-SiC MOSFETs Under Repetitive Unclamped Inductive Switching Stresses," *IEEE*
Trans. on Power Electronics, vol. 33, no. 6, pp. 5251-5261, 2018

- [12] J. Wei, S. Liu, L. Yang, L. Tang, R. Lou, T. Li, J. Fang, S. Li, C. Zhang, and W. Sun, "Investigations on the Degradations of Double-Trench SiC Power MOSFETs Under Repetitive Avalanche Stress," *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. 66, no. 1, pp. 546-552, 2019.
- [13] S. Liu, C. Gu, J. Wei, Q. Qian, W. Sun, and A. Q. Huang, "Repetitive Unclamped-Inductive-Switching-Induced Electrical Parameters Degradations and Simulation Optimizations for 4H-SiC MOSFETs," *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. 63, no. 11, pp. 4331-4338, 2016.

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

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 ータの蓄積が乏しく、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る疲労予測・設計を目的として、まずは基本となる材料の非線形変形特性ならびに疲労寿命データを実測により評価した。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)の定量的検討を行った。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。

実験方法

- 引張り試験 パワーモジュール用アルミワイヤとして一般的な、直径400µmのアルミ太線ワイヤ(田中電子工業社製TANW)を供試材とし、温度制御槽付き万能試験機(INSTRON 社製)を使用した。このとき、試験機剛性に比べて試験片の剛性が極端に低いため、治具端間の距離をそのままゲージ長とみなし、そのひずみ速度がそれぞれ0.025%/sec、0.25%/sec、2.5%/secとなるようにクロスヘッド速度を制御することで3つの異なる速度で引張り試験を実施した。
- 2) 4点曲げ疲労試験 アルミ電極を上面に有する模擬チップ (10mm x 10mm x 0.725mm)に同ワイヤをウェッジボンドした試験体を作製し、機械的に曲げ負荷を繰り返し与える疲労試験を実施した。繰り返し4点曲げ負荷が可能な試験機の外観を図1に、試験体と機械的負荷の模式図を図2に示す。

実験結果

 アルミワイヤの塑性・クリープ特性 引張り試験によって 得られた変形速度の異なる応力-ひずみ関係から、図3に 示す材料の非線形変形挙動を得た。220℃以上の結果で は降伏応力の低下が顕著になり、さらに負荷時間に依存し た非線形変形であるクリープ変形が卓越することがわかる。





2) ワイヤボンドの疲労寿命 4点曲げ疲労試験後の試験体において、熱疲労試験やパワーサイクル試験と同様のき裂進展モードが観測された。また、破面観察により計測されたき裂進展量から、その破断寿命は 1.4x10⁸cycle 程度と見積もられた。この機械的疲労試験結果をもとに、同じ非線形ひずみ水準の熱サイクル 試験を数値シミュレーションにより模擬してその寿命を予測したところ、既存の熱サイクル試験結果と近い値 と示した。これは、ワイヤボンド部の疲労寿命が非線形ひずみ量によって統一的に記述でき、その試験方法 や負荷形態には依存しないことを示唆している。



考察

高温ではワイヤのクリープ変形に起因する応力緩和が結果として寿命の低下を抑制する。そのため、パワーサイクル試験で報告される高温動作条件でのモジュールの寿命劣化はワイヤボンド部というよりむしろダイアタッチ部での寿命に律速されていると考えられる。ダイアタッチ部の故障モードを生じさせるような比較的遅い負荷周期の長期信頼性試験は寿命 $N_f = A(\Delta T)^{\alpha}$ で整理されることが知られている。このとき熱抵抗の定義から $\Delta T = R_{th}P_0$ とみなせば、一般に $\alpha = -5$ 程度であるので熱抵抗 R_{th} が 40%低減できれば、モジュールの寿命が約 13 倍となると予測できる。例えばダイアタッチ材を既存のはんだからナノ粒子焼結体へ転換することで13 倍以上長寿命化を実現した報告がある。一方、図4に示す抜熱効果の試算において、モジュールの抜熱面積とチップサイズの比 $A_{sp}/A_0 < 10$ においてはヒートシンク性能の向上が熱抵抗低減に効果的であり、通常のPin-Fin 構造の水冷チャンバからマイクロチャネル構造を有するヒートシンクへの転換によって R_{th} 40%低減が可能である。

成果報告

 ・ 国際会議発表 1 件

ONobuyuki Shishido, Masanori Tsukuda, Shin-ichi Nishizawa, Trends in Thermal Resistance of Advanced Power modules, International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management (PCIM2019) Europe, The Proceedings of PCIM Europe 2019, pp.104-108, 7-9 May 2019, Nuremberg, Germany. (ISBN 978-3-8007-4938-6)

2019年度共同利用研究報告書

明治大学 小椋 厚志

[要旨]

九州大学新規開発のC z シリコン基板を信越化学工業株式会社製F Z シリコン基板 と比較研究を行った。

[序論]

パワーデバイス、特にSi-IGBTデバイスではキャリアライフタイムに100 µsec程度の大きな値が必要である。 現状では、そのキャリアライフタイムを達成する ためにFZシリコン基板を用いた研究開発が行われている。 しかしながら、FZシリ コン基板を用いる場合、コストが高くなる問題がある。

九州大学では、その課題解決を目的に、新規Czシリコン基板作製の研究開発を行っている。 従って。九州大学開発のCzシリコン基板の性能がどこまでFZシリコン基板に追従できているかを調べる必要がある。

[方法]

九州大学新規開発のCzシリコン基板(比抵抗:200 Ω ・cm、酸素濃度:7x1 0¹⁸ cm⁻³)と信越化学工業株式会社製FZシリコン基板(比抵抗:200 Ω ・cm、 酸素濃度:5x10¹⁵ cm⁻³以下)とを同じ熱処理炉に入れて、窒素雰囲気で110 0 $^{\circ}$ 、3時間アニールした試料、続けて窒素雰囲気で1100 $^{\circ}$ 、20時間アニールを 追加した試料の合計4枚を作成した。 これらの試料をシントンにてキャリアライフタ イムを測定した。

[結果]

上記実験で、得られた結果を図.1に示す。



図.1キャリアライフタイム vs. 注入量

図.1から判るように、窒素雰囲気で1100℃、3時間アニールした試料では、九大 Czシリコン基板のキャリアライフタイムは、信越FZシリコン基板のものと同程度で ある。 但し、追加の窒素雰囲気で1100℃、20時間アニール後では、九大Czシ リコン基板のキャリアライフタイムは、信越FZシリコン基板のものと比較し大きく劣 化している。

[考察]

さらなるCzシリコン基板の研究・開発が必要である。 しかしながら、Si-IG BTの総熱処理を「1100℃、3時間」に抑えるプロセスを開発できれば、九州大学 新規開発のCzシリコン基板は実用に耐える、とも考えることができる。 今後はその 両面をにらみながらの研究が必要であろう。

[発表論文]

なし

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

研究概要:

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. デバイスの特性評価

昨年度までに導出した半導体基本方程式を用いて、接合型電界効果型トランジスタ(JFET)の解析を行い、Si デバイスと比較した。図1に JFET モデルを示す。デバイス長 L を変化させて、Si とダイヤモンドの特性比較を行った。なお、300K で双方の高移動度条件下での比較となるよう、Si はn型、ダイヤモンドはp型 チャネルを選択している。また、絶縁破壊電界は、Si:0.3MV/cm、ダイヤモンド:10MV/cm とした。

その結果、図2に示すように、JFET 構造において、高耐圧領域において、ダイヤモンドはSi に対して低オン抵抗を示し、優位性のあるパワーデバイス応用が予見されることがわかった。



図2 Si-JFET とダイヤモンド JFET との特性比較

大気乱流による気圧変動の直接測定のための注射針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。 昨年度の円盤型のプローブに続き、流体工学分野の小型風洞実験で用いられている注射針型のプローブ を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り動圧 の影響を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

本実験に用いた注射針型プローブは外径 2.0 mm 内径 1.8 mm のシームレスパイプに刺入角が約 6 度 の注射針を接着した全長 70 mm のステンレス製のプローブである(図1)。注射針の先端から 25 mm の位置に直径 0.4 mm の静圧孔を設け、パイプ内の圧力を計測することでその場の静圧値を得ることが できる。実験では静圧孔を6つ設けたプローブ、また4つの静圧孔を注射針の先端から 20 mm もしく は 30 mm に位置を代えたプローブも用いて、これらの比較も行った。

注射針型プローブは水平固定時に高さが 1.20 m となるよう、また風洞中央のピトー管を挟んで左右 に設置した。風洞外には Vaisala 社の微差圧計を設置し、差圧計の一方の計測部に注射針型プローブを、 もう一方にはピトー管の静圧孔をブレードホースで接続した。本実験ではピトー管の静圧孔内を風洞内 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注射針型プローブ内の圧力値 との差を差圧計で測定し、注射針型プローブによる動圧の除去程度を把握した。昨年度の結果の再現性 を確認するため、円盤型プローブも風洞の両脇に設置し、注射針型プローブと同様に実験した。実験の 手順は昨年度と同様、またピトー管の設置位置を変えることよって実験結果に影響が出ないことも確認 している。



図1 注射針型プローブの設計図(左)と外観(右)



図2 注射針型(中)と円盤型(左右)の両プローブの風洞内での設置の様子

3. 実験結果

図3は先端から同じ位置に明けた静圧孔を6つ(図左)および4つ(図右)設けた注射針型プローブ を水平風向に対して正対させ、プローブの姿勢を0度から鉛直上向きに+45度(図上)、もしくは鉛直 下向きに-45度(図下)まで5度間隔で変えながら、角度毎に風速を0m/sから25m/sまで5m/s間隔 で変えた時のピトー管による測定値(Pref)に対する注射針型プローブによる測定値(Pres)との差を 示したものである。本実験においても昨年度の円盤型と同様に、静圧孔の数に関わらずプローブの鉛直 姿勢に対し風速を変数とする2次関数的な依存性を示した。また静圧孔が6つのプローブは25度程度、 4つのプローブは15度程度まではピトー管の測定値より大きな圧力値を示す結果となった。この差に ついては静圧孔の数によるものと思われる。また円盤型においてはプローブの姿勢に関わらずピトー管 の測定値よりも常に小さく、角度毎に異なる風速依存性を示したが、注射針型については0~15度まで は殆ど一致していた。この結果については、静圧孔の位置が注射針先端より離れるほど広い角度の範囲 で一致する傾向がみられた。しかしながら、静圧孔の位置が注射針先端より離れるほど広い角度の範囲 で一致する傾向がみられたくなり、注射針先端で剥離した風の流れによる影響が原因かもしれない。また、 プローブの水平方向の姿勢に関して、0と30度は鉛直方向の姿勢毎に異なる依存性を示したが、60と 90度については風速に対する依存性は異なるものの、鉛直方向の姿勢に関わらず一致した結果となった。



4. 研究成果報告

近藤文義ほか5名: 微気象学的手法を用いた外洋域における海面フラックスの直接測定,日本地球 惑星科学連合 2019 年大会, AOS19-04,幕張, 2019 年 5月(招待講演)他1件

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)

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 野口 尚史

同志社大学 理工学部 高田 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.本研究では翼周りの流 れの三次元構造について、水槽を用いた可視化実験を行い,得られた画像に PIV 解析を施す。ま た、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,主流及び翼スパンに垂直な方向である.

流れの撮影

翼モデルは、水面と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 5mm 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水中に取り付けた. また、光源にはスライドプロジェクターを利用し、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垂直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.実験の概略図を図1に示す.



Fig.1 Setting

結果と考察

図2に数値計算によって得られた平板翼に関する流れの分類を示す.図より平板翼では, Re=8.0×10²の時, α=22deg.付近で三次元構造が出現することがわかる.

図 3(a)は、本実験で得られた PIV 解析画像の一例である.また、図 3(b)は OpenFOAM の解 析により得られた図である.どちらも Re=8.0×10²、α=30deg.における渦度の等値面を表してい る.これらを比べると、両者ともに特徴的な三次元渦の列が確認でき、定性的によい一致が見ら れる.この渦列は時間とともに、翼を境に出現位置が反転したことから、カルマン渦列上に発生 しているものと考えられる.



Fig.2 Stability diagram on the Re- α plane for flatplate.





(a) $\alpha = 30$ [deg.](in experiment) Fig.3 Vorticity for FP at Re = 8.0×10^2 and $\alpha = 30$ [deg.]

まとめ

極低レイノルズ数での平板翼の流れの可視化に関する実験と計算を実施した.三次元構造に ついては確認が予想された条件に関して,計算と実験で定性的に良い一致が確認できた.今後, さらに定量的な比較を行うことで空力特性などに関する数値計算の結果についても整合性の検 討が期待できる.

謝辞

本研究は、九州大学応用力学研究所の共同利用研究の助成を受けたものです。

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 上水樽 昂樹、吉野 賢二

1. はじめに

多元系 I₂-II-IV-VI₄ 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 Cu₂ZnSnSe₄ (CZTSe)多結晶で、850 K に おいて熱伝導度 0.8 W/mK を示し、無次元性能指数 ZT = 0.95 を達成している[1]。 これまで報告されている I₂-II-IV-VI₄ 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。我々は、環境調和した Cu₂ZnSnS₄ (CZTS)がカ 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[2]。

本研究では Se 混晶によって電気的特性と熱電特性を向上させ、800 K において ZT >1 を達成し、Cu₂ZnSn(S_xSe_{1-x})₄(CZTSSe)が熱電材料として高いポテンシャルを 持つ事を報告する。

2. 実験方法

溶液成長である移動ヒーター法 (THM 法)を用いて Sn 溶媒から Cu₂ZnSn(S_xSe_{1-x})4 単結晶サンプルを作製した。 *c* 軸方向に沿って 300-800 K において基礎的な熱 電特性と電気的特性の評価を行った。得られた ZT の値は、複数回測定を行った平 均の値を用いた。

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

Fig.1 結晶成長炉内の温度プロファイル

Fig. 2 Cu₂ZnSn(S₀₅Se₀₅)4単結晶インゴット

	Cu (at.%)	Zn (at.%)	Sn (at.%)	S (at.%)	Se (at.%)
CZTS	23.65	12.86	11.32	52.12	-
CZTSSe S/Se=8/2	23.88	13.13	11.16	41.19	10.64
CZTSSe S/Se=5/5	23.96	13.77	11.42	24.63	26.22
CZTSSe S/Se=2/8	23.65	13.61	11.64	9.67	41.43
CZTSe	23.82	13.88	12.71	-	52.44

Table IICP 測定から得られた組成分析結果



温度は 900℃ で Sn 溶液 80 mol%の液相点より 50℃ 程度高く設定している。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 Cu₂ZnSn(S_{0.5}Se_{0.5})₄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。

Table I に ICP 測定から得られた組成分析結果を示す。本研究では、高い電気特性を実現するために、浅い欠陥準位である Cu 空孔(V_{cu})[3]を支配的にするために 10%の Cu-poor 組成でサンプルを作製している。インゴット全体において均一な 組成を確認出来た。

Figure 3 に CZTSSe の伝導率温度変化、Figure 4 にゼーベック係数温度変化をそれぞれ示す。CZTS から CZTSe へ Se 組成が増加するとともに、測定温度 800 K において伝導率は 80 S/cm から 210 S/cm へ向上した。これは、熱活性化エネルギーが 90 meV から 60 meV に減少したためであると考える。このためホール濃度も、 10^{17} cm⁻³オーダーから一桁向上した 10^{18} cm⁻³オーダーを達成した。ゼーベック係数は、ホール濃度が増加した事を考慮して 360 μ V/K から 230 μ V/K へ変化した。パワーファクター*PF* は、 1.06×10^{-3} W/mK² から 1.25×10^{-3} W/mK² へ向上した。特に CZTSe 単結晶の伝導率は、ZT=0.95 を示す In-doped CZTSe 多結晶焼結体より 200%向上している[1]。さらに CZTSe の *PF* 値は、ZT=1.65 @ 823 K を示す三元系 カルコパイライト化合物 CuInTe₂ 多結晶と同等の値を達成している[4]。



Fig.5 熱伝導率温度変化

Fig.6 室温における熱伝導率のSe 組成依存

Figure 5 に CZTSSe の熱伝導率の温度変化、Figure 6 に室温における熱伝導率の Se 組成依存それぞれを示す。多元系であるため固有のカチオン元素の不規則性を 利用することで単結晶サンプルにおいても 0.9-1.4 W/mK@800 K の低い熱伝導率 を実現した。透過型電子顕微鏡(TEM)を用いたナノオーダーでの組成分析により S/Se=5/5 のサンプルにおいて 5.0×10^{19} cm⁻³のカチオン不規則性と 3.2×10^{20} cm⁻³ のアニオン不規則性を確認した。混晶化による不規則性の増加によって S/Se=5/5 サンプルにおいて CZTS より 30%低い熱伝導率を示した。

電気伝導率、ゼーベック係数、熱伝導率から算出した無次元性能指数 ZT =1.25@800K を CZTSSe (S/Se =5/5)において達成した。これまでの CZTS 関連材料 の最高値 0.95 [1]より 130%高い結果となった。

4. まとめ

固有の元素不規則性を利用した CZTSSe 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。Se 混晶によって、電気特性の大幅な向上と低い熱伝導率を示し、これまで報告されている関連材料の ZT 値より 130%高い ZT=1.25 を 800 K において実現した。本研究は、九州大学応用力学研究所の共同利用研究の助成を受けたものである。ここに記して、感謝の意を表する。

5. 研究組織

・研究代表者 永岡 章(宮崎大学工学部 環境エネルギー工学研究センター 助教)

- ·研究協力者 吉野 賢二(宮崎大学工学部 電子物理工学科 教授)
- ・研究協力者 上水樽 昂樹 (宮崎大学大学院 工学研究科 修士1年)

·所内世話人 柿本 浩一 (九州大学応用力学研究所 教授)

参考文献

[1] X. Y. Shi *et al.*, Appl. Phys. Lett. **94**, (2009) 122103. [2] A. Nagaoka *et al.*, Appl. Phys. Express **11**, (2018) 051203. [3] S. Chen *et al.*, Adv. Mater. **25** (2013) 1522. [4] Y. Luo *et al.*, Adv. Energy Mater. **6** (2016) 1600007.

小形固定ハブ風車の可変ピッチ化に関する開発・研究

福岡大学名誉教授 江崎 丈巳

・目的:小形風力発電は、FIT の改正により発電事業が成り立たなくなった。原因は、エネルギー源 の選択にあり、改正後の発電単価 1/3 に対応するには現塔高(<30m)での風力エネルギー密度が あまりにも低く、採算に見合う発電量が得られないことにある。このような状況にもかかわらず開発 を継続理由は、エネルギー源追求と装置性能向上への可能性が存在することにある。エネルギー源の 気流は、粘性流体で地表に近づくと摩擦係数が増大、エネルギーが大きく減衰するが、逆に離れれば 減衰率が減り、増すことになる。高度は、山岳地形の利用で大形を超える高空の利用が、また従来 (旧 FIT で使用)の固定ハブ風車には、性能向上法に可変ピッチ化が残されていることなどである。

張架式風力発電は、わが国特有の山岳地形を利用して山頂間(500m高以下)に平行なワイヤー (1世紀以上の実績、完備 data)を張り、複数の風車を帯状に配し、高空での発電を可能にする方法 である。その高度では、大形を超える高度で1.3倍以上の風速が期待できることと、固定ハブの可変ピ ッチ化が本開発で可能になり、概ね、3倍以上の発電量が見込め、新 FIT 下でも十分発電事業成立が 期待できることにある。また設備は、大型と異なりローター上下の風速が均一で、発電効率向上と地 表条件に左右され難いことや風車高度に関係なく総設備重量がほぼ一定など、高空の高密度風エネル ギーによる発電量増で、廉価設備による大幅な発電が期待できる。現在、風力発電の開発は、1)翼 素理論による翼改良、2)付属機器よる増風速など、同一風速条件下での性能向上と好条件のエネル ギー源を求める3)設備の改変などに分けられる。

本方式は、洋上(新船舶+超高タワー)発電と同様の3)に属し、高空の高密度エネルギー風を利 用を目的とするものである。しかし、使用風車は、人の取り扱いを前提とする出力 P=2Kw、重量が W=20Kg前後で単純構造のため、固定ハブ方式でカットアウト風速も13m/s付近と可変ピッチの約 半分で、発電量が大きく劣るものであった。しかし、旧 FIT 下では、そのような状況でも事業が十分 成立していた。本開発では、上記問題を解決し小形風車の実用性を高める方法として、複数のハブを 用い固定ハブの可変ピッチ化を図り、固定ハブとの置換を視野に開発を行い、成果を得ることができ た。本方式は、将来高空発電において小形が中心になると考えられることから、現風車定義下での小 形の無効化を避け、最有効化の手段にでき、蓄積された小形風車の開発資源の活用を可能にするもの である。

・実験方法:可変ピッチ機構は、軸固定と遊動ハブで構成され、前後の固定ハブ間にピッチ回転軸受けを前後に取り付けた遊動ハブを反回転方向への与圧状態で取り付け、前後の固定ハブ外周のピン接触でピッチ軸に直角に水平上のレバーを回転しピッチ角を変えるものである。ピッチ角は、レバー構造(非対称形状とガイド溝)により起動・定格・過回転抑止と正・逆回転により制御される。テストは、試作の1号機であるため動作確認と基礎データーを得るに留めた。また実験風速は、プリテストとして6m/sまでとし0.5m/s間隔で測定、設定ピッチ角は、5°間隔で20°迄とした。

・実験結果:1)出力係数の変化を見ると、最大値はピッチ角10°が大きな値を示している。起動 を良くし、大きな出力を得るには起動後にピッチ角を小さくする必要がある。2)設定ピッチによる 起動風速と風起動時の最低風速は、V=0.65m/sと固定ハブの約1/3の風速で、その時のピッチ角はθ =15°であった。

・考察: 翼特性は、試験を規格化してまとめた結果(係数 vs 周速比)で次に示す。図1、図2はトル ク係数である。図3、図4は、出力係数に直した図である。図1は、風速による違いを示したものでレ イノルズ数依存がない領域で1本の曲線になることを描いたものである。図1の左右を比較すると、 左のピッチ角10°に比べ右図のピッチ角15°に風速が速くなることによる頭打ち傾向がみられる。

図2は、ピッチ角による違いをトルクで比較したものである。ピッチ角15°の方が低風速、低回 転でのトルクが大きくなっている。周速比をゼロに外挿した値が、起動トルクとなるのでピッチ角1 5°の方が起動風速は小さくなる。

・研究成果報告:な し

研究組織:

氏名	所属	職名・級号俸等 (院生は学年)	役割・ 担当分野	
江崎 丈巳	福岡大学	名誉教授	代表;装置設計・開発	
内田 孝紀	九州大学	准教授	風況分析	
烏谷 隆	九州大学	協力研究員	実験・分析	
大屋裕二	九州大学	特任教授	総合評価	
林長軍	福岡大学	准教授	装置の機械力学的検討	
合計 5 名				



風速によるトルク係数の変化 図1

7 _λ 8

6



図2 ピッチ角の違いによるトルク係数の変化



図3 風速による出力係数の変化



図4 ピッチ角の違いによる出力係数の変化

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
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2年	実験補助
神原 達哉	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
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2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

昨年度の333点の計測点に加えて新たにフレア部に10点を追加し、より高精度な圧力分布を計測する。 その際には昨年度同船型で計測した船側波形の結果を用いて圧力データの水面処理を行う。また、部分 模型を用いた予備実験を行い計測に使用したFBGセンサー (ver.6)の温度影響と適切な計測条件に関す る調査を実施する、

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: RIOS bulker model

Table 1: RIOS bulker model 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			
$ abla [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

多点同時計測

計測部は長さ 15mm、幅 9mm、 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 刻むことが可能である.これによ 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.

光の特性を活かした WDM(波長 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 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 圧力センサーと歪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 343 点で計測を行う. 比較用として, 歪式圧力センサー 22 点埋め込み, 合計 365 点で 圧力計測を行う。また、予備実験では Ord.9.0 の7 点に FBG センサーのみを設置してキャリブレーショ ンを行う。



Fig. 3: FBG 圧力計

Fig. 4: 歪みゲージ 式圧力計



Fig. 5: FBG 圧力センサー設置位置

3.3. 船側波高計について

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、波高と出力電圧は非線形の関係となる。キャリブレーションによって波高に対する出力電圧を算出 してキャリブレーションテーブルとして保存しておき、曳航試験の計測値を解析する際に使用する.

9.998 stem	9.00	8.00	7.00	6.00	5.00	4.00	3.00	2.00	1.00	
										5 =

Fig. 6: 船側波高計の設置位置

3.4. 予備実験

実験はバルクキャリア船型の Ord. 9.0 を中心に切り取った部分模型を用い,単軸昇降装置により模型 を基準点から上下させるキャリブレーションを行う。また,例年のデータのばらつきに計測時の光ケー ブルの曲率の変化が影響を及ぼしていることが懸念されるため、計測に使用するイントロゲータに偏波 を修正する DP(Deplarizer) なる装置の導入も検討する。用いた模型及び設置の様子をそれぞれを Fig.7, 8に示す。



Fig. 7: 部分模型



Fig. 8: 部分模型のセットアップ

3.5. 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.

運動計測試験

運動計測装置設置図を Fig.9 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 9 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。 $\lambda/L = 1.25$ の波条件については水温と気温の温度差が異なる条件下で反復試験を行い,温度影響について調査した.

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。



Fig. 9: 運動計測装置設置図

圧力分布計測の運動計測試験時のシステム図を Fig.10 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。電気系の歪式圧力センサー、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 370 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. 10: 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. 部分模型を用いた予備実験結果と考察

以降に部分模型を用いて行った予備実験で得られた結果を示す。Fig.11 に DP を用いた場合と用いて いない場合のキャリブレーションの比較結果を示す。グラフは横軸に基準点からの降下量,縦軸に圧力 値の変化量をとっている。図中の黒破線は DP を用いずに計測した結果,赤線は DP を用いた計測結果, 青線は理論値をそれぞれ示している。Fig.11 の結果から DP の有無はさほど結果に影響が無いと考えら れる。

しかしながら, FBG センサーによる圧力の時系列データを出力画面で確認しながら光ケーブルを揺ら したところ DP を搭載していないイントロゲータを用いた場合では圧力値のドリフトが確認されたが, DP を搭載したイントロゲータでは光ケーブルの曲率変化による偏波が修正され, ドリフトが抑制された ことから本実験では DP を搭載したイントロゲータを使用するに至った。

例年の実験データのばらつきについて気温と水温の温度差が影響を及ぼしていると考えられていたが, 計測時の船体の温度変化の影響については追究していなかった。そこで,計測直前まで船体を最上段の センサーから 30mm 上まで没水させて船体を冷却してから計測を行った。Fig.12 にその結果と船体を冷 却させずに計測した結果の比較を示す。図中の黒破線は計測前に冷却を行わずに計測した結果,赤線は 計測前に冷却を行った計測結果,青線は理論値をそれぞれ示している。

Fig.12の結果から計測前に船体の冷却を行うことで値のばらつきが顕著に小さくなっていることがわかる。このことから計測前に十分に船体を冷却することは有効であると言える。

試験結果と考察

試験結果と比較する数値計算の手法としてストリップ法及びランキンパネル法 (RPM) を用いる。ラ ンキンパネル法による計算について, 基礎流れを一様流と仮定した場合 (NK) と二重模型流れと仮定し た場合 (DBF) を用いる。

5.1. 船体運動

Fig.13 に運動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ぞれ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。Surge, heave, pitch 運動について数値計算から算出した値と十分な合致が確認できる。また, Heave 運動の計測

値には $\lambda/L = 1.25$ 付近に同調点が見られる。Pitch 運動では $\lambda/L = 1.6$ に同調点が見られるが、その波 条件近辺において数値計算による推定の誤差が大きい. Fig.15 に運動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。

5.2. 計測における温度影響

 $\lambda/L = 1.25$ の波条件において気温と水温の温度差 ΔT が異なるタイミングで計測を行った。例年の実験結果によると $|\Delta T| \ge 1.0$ の条件下では圧力値のばらつきが大きくなるため,計測を行っていなかった。しかし,予備実験により得られた結果から DP を搭載したイントロゲータを計測に使用し,計測前に船体を十分に冷却することで結果の改善が確認できた。そこでこれらの改善策を導入し,例年の閾値である $\Delta T = 1.0$ 以下の計測結果について平均値を求め, $\Delta T = 1.0$ を閾値として閾値以下の場合と以上の場合についてそれぞれ標準偏差を導出した。Ord.9.0 における圧力の平均値及び標準偏差を Fig.14 に示す。

Fig.14 より $\Delta T = 1.0$ 以下とそれ以上の場合では値のばらつきに顕著な差があることがわかる。この ことから DP の導入及び船体の冷却によって計測値の改善は成されたが, $\Delta T \ge 1.0$ の条件下では値のば らつきが大きくなるため $\Delta T \le 1.0$ で計測を行う必要がある。

5.3. 船体断面の圧力分布

Fig.15 は、FBG 圧力センサーにより計測さf れた圧力の定常成分と1次の非定常成分を断面ごとに示 している。Ord.9.0, 9.5 には歪式圧力センサーにより計測された値も図示している。船側波高の計測値 を用いて周期的正弦パルス波的な圧力の時系列を処理することで水面に向かい滑らかな圧力分布が得ら れていることが分かる。精度の良い圧力分布を取得するためには十分な数の圧力センサーに加えて船側 波高の計測が必須となる。

波浪中を曳航した場合の圧力のゼロ次成分から静水中を曳航した場合の定常圧力を差し引くことでい わゆる added pressure を得ることができる。Fig.16 は各断面におけるこれらの圧力の分布を示してい る。図中の赤色で示された曲線が added pressure であり、この圧力に n_x を乗じて船体表面上で積分す れば抵抗増加が得られる。図から分かるように、抵抗増加に寄与する箇所は、定常波面近傍であること が分かる。

5.4. 船体表面の圧力分布

計測された各 ordinate の圧力分布を補間することで船体表面上の圧力分布を得ることができる。その 圧力分布に n_x を乗じて積分することで抵抗増加が得られる。この圧力分布は計測した各時間ステップ ごとに時系列的に得ることができ、Fig.17 はそのうちt = 0における船体運動、船側波高と圧力分布を 示している。この船体運動、船側波高と圧力分布はフーリエ級数展開における5次のオーダーまでの非 線形項を含んでいる。

Fig.18 は added pressure の船体表面分布を示している。Fig.16 の赤色の曲線の船体表面分布である。 船体固定座標系上で示してある。この added pressure に船体固定座標系における法線ベクトルの $n_{\overline{x}}$ を 乗じて積分し、自重による補正項を加えることで空間固定座標系上の x 方向に作用する抵抗増加を得る ことができる。

5.5. 抵抗增加

歪ゲージにより直接的に計測された抵抗増加と圧力積分により得られた抵抗増加を Fig.19 に示している。 $\lambda/L = 1.25$ 近傍の同調点より入射波の波長が長いレンジにおいて圧力積分により得られた抵抗増加が直接計測された抵抗増加よりも大きくなっている。このレンジにおける有次元の抵抗増加の値は極め

て微量であり、計測精度の問題からズレが大きくなっているものと推察される。2次の微小量である抵 抗増加がこの程度の精度で直接計測された抵抗増加と合致するということが分かる。

6. おわりに

本研究で得られた成果を以下に示す。

- (1) 計測精度の高い圧力分布を得るためには、光ケーブルの揺れによる偏波を補正するための DP を インタロゲーターに装備する必要があることが判明した。
- (2) 部分模型を用いて FBG 圧力センサーの温度干渉影響について調査した。水温に対して気温が±1 度内で計測しなくては精度の高い圧力分布は得られないことが判明した。
- (3) 昨年度に引き続き、今年度もFBG 圧力センサーによる多点同時計測で高解像度の圧力分布を取得 した.
- (4) 計測された圧力分布を船体表面上で積分し抵抗増加を得た。それと歪ゲージで直接計測された抵抗増加を比べることで、圧力計測の精度を確認した。2次の微小量である抵抗増加も許容できる精度で計測できることが確認できた。

参考文献

- 1) 柏木正, 岩下英嗣:船体運動 耐航性能編,船舶海洋工学シリーズ,成山堂書店,2012.
- 2) 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.





Fig. 13: 船体運動



Fig. 14: Ord.9.0 における圧力の平均値及び標準偏差 ($F_n = 0.18, \lambda/L = 1.25, \beta = 180$ degs.)



Fig. 15: 船体断面上の圧力分布 ($F_n = 0.18$, $\lambda/L = 1.25$, $\beta = 180$ degs.)



Fig. 16: 船体断面上の added pressure 分布 ($F_n = 0.18, \lambda/L = 1.25, \beta = 180$ degs.)



Fig. 17: t = 0 における船体表面上の圧力分布 ($F_n = 0.18, \lambda/L = 1.25, \beta = 180$ degs.)



Fig. 18: 船体表面上の added pressure 分布 ($F_n = 0.18$, $\lambda/L = 1.25$, $\beta = 180$ degs.)



Fig. 19: 圧力積分により得られた抵抗増加 ($F_n = 0.18, \beta = 180$ degs.)

ヘテロエピタキシャルダイヤモンドおよび酸化ガリウム半導体の 走査型電子顕微鏡による結晶欠陥の構造の解明

佐賀大学大学院工学研究科 嘉数 誠

1. はじめに

ダイヤモンドは絶縁破壊電界、熱伝導率,キャリア移動度に優れ、SiC、GaN を越える高周波・高出力デ バイスが期待されている。大口径ダイヤモンドには MgO 基板や Si/YSZ 基板が報告されている。サファイ ア基板も幾つか報告されているが、ダイヤの結晶品質は十分ではなく、成長があるものの機構はよく分かっ ていなかった。今回,我々はサファイアの基板上に高品質ダイヤモンド成長を行い、その成長機構を調べ た。

2. 実験方法

本研究では、(1120)つまりA面サファイア基板上にIr膜を堆積し、その上にマイクロ波プラズマ CVD法 でダイヤモンド膜を成長した。

3. 実験結果と考察

まず X 線回折で φスキャンを行い、Al₂O₃、Ir、ダイヤの配向関係を調べた(図 1)。その結果、Ir、ダイヤ共 に(111)回折が Al₂O₃の[001]、[1010]方向に平行する形で現れており、Al₂O₃(1120)[0001]// Ir(001)[110]// Dia(001)[110]の配向関係になっていることがわかった(図 2)。次にダイヤ成長時間を変えてダイヤの成長 初期過程を調べたところ、図 2 に示すように{111}側面をもつダイヤの核が、{010}方向に融合していく様子 が明らかになった。

4. 結論

ダイヤモンドはIrの[110]方向に配向しながら成長するのがわかった。図3よりダイヤ成長時間300秒時、 幅:約300nmの大きさで[010]方向で核同士が合体していく様子が観測され、単一の膜を作っていた。

5. 発表、論文リスト

- [1] 嘉数 誠、「ダイヤモンド、酸化ガリウムのシンクロトロン X線トポグラフィー評価」、応用物理学会 先進パワー半導体分科会第17回研究会、2020年3月2日、東京(招待講演)。
- [2] 高谷亮太,川又友喜,小山浩司,金 聖祐,嘉数 誠、「サファイア基板上ダイヤモンドへテロエピ タキシャルの成長機構」、2020年春季応用物理学会、東京、2020年3月12-15日。
- [3] スダーン セイリープ, 佐々木公平, 倉又朗人, 嘉数 誠、「高感度エミッション顕微鏡による(001)β
 型酸化ガリウムショットキーバリアダイオードの漏れ電流の観察」、2020 年春季応用物理学会、東京、2020 年 3 月 12-15 日。



Figure 1 XRD ϕ scan of Diamond/Ir/Sapphire



300s

Figure 2 AFM images of Diamond nuclei Growth time 120s and 300s ($1 \times 1 \ \mu$ m scale)

ME-7 発電細胞を模擬した積層ハイドロゲル電池の起電力に

関する理論的研究

九州情報大学 荒平 高章

1. 緒言

現在、エネルギー分野、再生医療分野、機械工学分野などの様々な分野で生体構造や 生体機能を模倣した技術、すなわちバイオミメティクスに関する技術開発が活発に行わ れている。近年、特に生体構造と機能を複合化させた研究が注目を集めており、特にあ る特定の生体が持つ特有の機能をエネルギー駆動や医療デバイス、ロボットに付与する ことを目的としたものが多い。最近では、電気うなぎの体内発電機構に着目し、電解質 を含む積層化したハイドロゲルにより陽イオンと陰イオンの流れを制御したバイオ電 池が考案されている¹⁾. そこで本研究では、この種のバイオミメティック電池における 起電力発生のメカニズムに対する理論モデルを構築し,得られたモデルを用いて電池開 発に応用することを目的とする。

2. 方法

ハイドロゲル電池は、塩化ナトリウムを電解質として溶解させたゲルを想定し、アニ オン選択性ゲルとカチオン選択性ゲルを濃度勾配を持たせた塩化ナトリウム含有ハイ ドロゲル間に挿入したものとした(図 1).このハイドロゲル電池の起電力の測定結果 を考察するために理論モデルの構築を試みた.



図1 ハイドロゲル電池の模式図

3. 結果と考察

ハイドロゲル電池の構造は選択的に必要なイオンを透過させ、電子の流れを生み出し ているイオン交換膜と考えることができる.そこで、本研究では、膜電位を基礎とした 理論モデルの構築を試みた.

図2のように膜の左右にそれぞれ異なる濃度(C_1 , C_2)の電解質ゲルを挿入したと仮定すると、この膜に対する膜電位($\Delta \phi_M$)は、膜と外部ゲル界面で発生するドナン電位

 $(\Delta \phi_{Do})$, 膜内部で発生する拡散電位 $(\Delta \phi_d)$ を用いて次式で表すことができる.

$$\Delta \phi_M = \Delta \phi_{Do} + \Delta \phi_d$$

一般にドナン電位は,境界相電位とも呼ばれ,ドナン平衡という両相での電気化学ポテ ンシャルが等しくなった場合の電位を指す.ここで,ドナン電位 (ΔØ_{Do}) は陽イオン (ま たは陰イオン)のみを透過する膜の場合,

$$\Delta \phi_{Do} = \frac{RT}{F} ln \gamma_{Do}$$

で表すことができ,このときドナン比γ_{Do}は

$$\gamma_{Do} = \frac{C_1^+}{C_2^+} = \frac{C_2^-}{C_1^-}$$

となる.したがってドナン電位はゲルのイオン濃度,温度から求めることができる. 次に拡散電位 ($\Delta \phi_d$)は,膜内でのイオン濃度勾配を一定とする Henderson の式を適用 でき、1:1 型の電解質の場合は、イオンの移動度を u とすると

$$\Delta \phi_d = -\frac{RT}{F} \frac{u^+ - u^-}{u^+ + u^-} ln \frac{C_2}{C_1}$$

で表すことができる.したがって拡散電位も同様にゲルのイオン濃度,温度から求めることができる.拡散電位は,膜内におけるイオン移動によって誘起される電位であり,両相の濃度差の減少によって,電位は小さくなっていく.実際に,実験的に得られたゲル電池の起電力の経時変化は,わずかではあるが次第に減少している.この現象が拡散電位によるものだと考えられる.



図2 理論モデルの概念図

今後の課題としては、実際に作製したゲル電池の実験条件を理論モデルに適用し、実 験結果との比較を実施していく.また、本理論モデルに時間によるファクターを考慮す ることで、より実験結果を裏付けるものにしていきたいと考えている.

4. 結言

本研究では、バイオミメティック電池としてのハイドロゲル電池に関する理論モデル について膜電位を基礎として構築した.今後、実際に作製したハイドロゲル電池の実験 結果との比較検討を行っていく.

参考文献

(1) T. B. H. Schroeder et al., "An electric-eel-inspired soft power source from stacked hydrogels," Nature, vol. 552, no.7684, pp. 214–218, 2017.

長島海峡周辺海域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

長島海峡,黒之瀬戸は東シナ海と八代海を結ぶ海峡(図 -1)で、潮流が非常に強いため潮流発電に適した海域と して知られている.海水密度を一定とした場合、15昼夜 平均した潮流パワーポテンシャルが長島海峡の赤島周辺 海域で2.0 kW/m²,黒之瀬戸の梶折鼻沖海域で6.0 kW/m² に達することが数値計算から明らかにされている(堀田 他、2016年).冬季は海水密度が鉛直方向に一様になる ので、密度一定とした上記の計算と実際の結果がほとん ど違わないが、夏季は密度成層が形成されるので、上記





の計算結果が実際とかなり違うことが予想される.本研究では,長島周辺海域の 潮流パワーポテンシャルが成層強度の強弱によって,どのような季節変動をする かを明らかにしている.

2. 数値計算

図-2の海域を計算領域とし,非構造系三角系格子のFVCOM (Chen et al., 2006 年)を用いて,長島周辺海域の潮流計算を行った.計算領域内の水深は日本水路 協会の海底地形デジタルデータを基本的に利用し,本研究室が長島海峡と黒之瀬 戸で実施した観測結果も加えた.格子幅は開境界で5 km,長島海峡で180 m と し,鉛直座標はo座標 20 層に分割した.開境界では NAO.99Jb (Matsumoto et al., 2000年)の主要8分潮を与えた.外洋域は,JAMSTEC と気象庁が共同提供する FORA-WNP30 の水温,塩分の計算値を数値計算の境界条件,初期条件とした.



図−2 計算領域

八代海と有明海の内湾は,熊本県水産研究センターの浅海定線調査,内湾調査の水温,塩分実測値を初期条件として与えた.海面熱収支は東海大学のJ-OFURO3を利用した.

3. 長島海峡周辺海域における潮流の流速とエネルギーポテンシャルの季節変動

2012 年の長島海峡と黒之瀬戸の海面における年間平均絶対流速の水平分布を図-3 に示す. 潮流の強流域 が長島海峡で鳴瀬鼻沖,黒之瀬戸で梶折鼻沖に存在する.最大流速は鳴瀬鼻沖 St.1,梶折鼻沖 St.2 で出現し, それぞれ 1.22 m/s, 1.90 m/s を示している. 直径 18m のブレードを持つ潮流発電デバイスの設置水深と潮 流の鉛直分布を考え, St.1 は深さ 19m, St.2 は深さ 14m の月別平均絶対流速と 1 日当たりのエネルギーポ テンシャルを調べた. St.1 の流速は 2 月に最大 (1.29 m/s), 7 月に最小 (1.21 m/s), St.2 も 2 月に最大 (1.96 m/s), 7 月に最小 (1.90 m/s) をとっている (図-4). エネルギーポテンシャルは流速の 3 乗に比例するので, 流速と同様に, St.1 は 2 月に最大 (2.3 kWh), 7 月に最小 (1.8 kWh), St.2 も 2 月に最大 (6.7 kWh), 7 月に最小 (5.9 kWh) を示している (図-5).

密度一定(水温 20℃,塩分 30 psu)とした以外は2章に記載した条件で,2012 年の潮流計算を行い,密度成層が St.1 深さ 19m と St.2 深さ 14m のエネルギーポテンシャルに与える影響を調べることにした.図-6 は,密度成層を考慮しない場合と考慮した場合とのポテンシャル差を考慮しない場合で除したものである.



St.1, St.2 ともに成層強度の強い夏季にポテンシャル減少率が大きく, St.1 は 8 月に最大(13.2%), St.2 は 7 月に最大(6.9%)を示している.

4. 結論

FORA-WNP30 の水温,塩分,J-OFURO3 の熱フラックスのデータを FVCOM に与えて,長島周辺海域 における潮流のエネルギーポテンシャルの季節変動を調べた.流速の数値計算結果から,潮流の最強地点が 長島海峡では鳴瀬鼻沖,黒之瀬戸では梶折鼻沖に存在することを示した.さらに,これらの地点では,潮流 とそのエネルギーポテンシャルが成層強度に伴って季節変動し,エネルギーポテンシャルの減少率は夏に大 きく,冬に小さいことを示唆した.

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,ナカボーテック(株)/濱添洸也, 鹿児島大学/池田佳樹,九州大学/胡長洪

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·脳神経機能再生外科学 梅林大督

1. Introduction:

An ultimate purpose of osteoporosis diagnosis is to evaluate the fracture risk (FR) for a specific patient in most susceptive sites, such as vertebrae and femoral neck. The objectives of this study were to compare the correlation between YAM-based osteoporosis diagnosis and FEA-based BS evaluation to stress the importance of the latter one, then propose a possibly feasible method to combine the take advantages of these two technique clinically. Mechanical Finder Clinic (MFC) was performed to evaluate vertebral BS.

2. Method

Department of neurosurgery, Inazawa Community Hospital, Aichi supplied QCT images of 88 patients (23 males, 65 females), aged from 42 to 96. According to the available vertebrae in all of these CT images, this study selected the eleventh and twelfth thoracic vertebra (T11 and T12), the first to the third lumber (L1, L2 and L3) for the following finite element analysis. Totally, 247 vertebrae were analyzed. The vertebral strength assessment was performed in a CT-image based FEA software, Mechanical Finder Clinic. MFC can assess the bone strength for femur in stance or fall configuration, and for vertebrae in compression. The material properties were determined for every element, including elastic modulus, tensile and compressive yielding stress, by Keyak's research. Poisson's ratio was set as 0.4 for all materials. MFC applied a uniaxial compression load with uniform distribution on the upper surface of a vertebral body. Either all the elements or all the nodes was completely constrained at lower surface of vertebra at same time. A non-linear finite element analysis was conducted from 0 N. The load increased by 50 N in each iteration until at least one element failed. The load at that time was defined as vertebral BS. The linear regression analysis was conduct by least squares fitting. The Pearson's correlation analysis was used to evaluate correlation of BS with L2 aBMD. Finally, a FR assessment method was proposed based on lumber YAM and vertebral BS.

4. Results & Discussion

Fig. 1 shows linear regression curve and its correlation coefficient (R) between L2 aBMD and vertebral BS for T11, T12, L1, L2 and L3. The best correlation was found in L3, where R = 0.58 only, in Fig. 1 (e). Even BS of L2 only display a moderate correlation with L2 aBMD, R=0.5, in Fig. 1 (d). Lumber YAM was derived from aBMD of L2 to L4.

Fig. 2 demonstrates that corresponding to fracture rates, males' average value is about 25% higher than that of female on BS, but only 10% on YAM. The BS reflected a significant discriminatory power on sexes, while singe YAM failed. For the early-stage elderly (aged from 65 to 74 years-old) and the latter-stage elderly (aged over 75 years-old), although it was found that fracture rate of the male older elderly seemed to double than that of male younger elderly, there is no significant difference between them for both male and female. The result of BS failed to show the gap of fracture rate within two age stages in male. Although YAM value seemed to make a significant the gap, it may be subjected to the small sample sizes, n=6 for early-stage and n=11 for older-stage in male. For female, inversely, the latter-stage elderly even showed a relatively higher average YAM value than early-stage. It would be necessary for an evaluation system of vertebral FR to take densitometric variable and mechanically related factors into account together.

Fig. 3 illustrated the BS-YAM method that integrated two aspects as evaluation criterions. To unify units and order of magnitude, patients' YAM and BS of a vertebra should be operated by Equation (1) as below:

$$YAM_{OPI} = \frac{YAM(\%)}{70\%}$$

$$BS_{OPI} = \frac{BS(N)}{2500N}$$
(1)

Due to exclusion of vertebrae with any trauma history, the osteoporosis was proposed as equal to or below 70% of YAM in Japan. Accordingly, YAM_{OPI}<1 was defined as osteoporosis. $BS_{OPI}<1$ mean a low bone strength or high vertebral fracture risk no matter how high one's YAM_{OPI} is. Fig.3 was divided into four zones by two cutoff lines. They are High bone mass, High strength zone (YAM_{OPI}>1, $BS_{OPI}>1$); High bone mass, Low strength zone (YAM_{OPI}>1, $BS_{OPI}<1$); Low bone mass, High strength (YAM_{OPI}<1, $BS_{OPI}>1$) and Low bone mass, Low strength zone (YAM_{OPI}>1, $BS_{OPI}<1$); respectively. For patients whose YAM_{OPI}>1, when $BS_{OPI}>1$ of one's all FEM-assessed vertebrae, one was divided into Group A, otherwise into Group B. For patients whose YAM_{OPI}<1, when $BS_{OPI}>1$ of one's all FEM-assessed vertebrae, one was divided into Group C, otherwise into Group D. Therefore, group C and D was diagnosed as osteoporosis. Patients of Group B (listed in Table 3) still face to high risk of fragility fracture, due to low strength of one or more specific vertebrae, although undetectable from bone mass amount measured by DEXA. The yellow zone in Fig. 3 mean patients with low bone mass no matter how high BS is. These patients will be reminded to pay more attention in daily life or to receive corresponding therapy. However, for group

B patients, they would be ignored easily if only refer to conventional diagnosis based on YAM value, resulting in higher potential fracture risk due to less awareness of prevention. As a result, we considered the orange zone in Fig. 3 as "high risk zone". Vertebrae in this zone comprised 6.9% of all 247 vertebrae. Patients in group B accounted for 15.9% in all 88 patients and 25.9% in 54 patients whose $YAM_{OPI} > 1$ (group A & B). In other word, a quarter of so-called "normal bone density" patients still have high risk to encounter fragility fracture. Considering high fracture risk groups (group B & D), the percentage of group B is up to 41.2%. It agrees with the point that up to half of fractures occur in non-osteoporotic individuals. This proves the importance of involving BS evaluation again. It was believed that YAM-BS method can improve the sensitivity on evaluating FR.



Fig. 1 The correlation between BS (kN) and L2 aBMD for (a) T11, (b) T12, (c)L1, (d)L2 and (e) L3.



Fig 2. Average fracture rates (a) YAM (b) and BS (c) discriminated by sexes and age.



Fig. 3 Two-dimensional osteoporosis diagnosis method based on BSOPI and YAMOPI.
CT 画像を利用した数値解析法の脊椎外科への応用

佐賀大学大学院医学研究科 馬渡 正明

1.背景

びまん性特発性骨増殖症(Diffuse idiopathic skeletal hyperostosis: DISH)は前縦靭帯を中心として骨に付 着する腱や靭帯の骨化をきたす原因不明の非炎症性疾患であり,頸椎や下位胸椎に好発し,Resnickの診断基 準では4椎体以上の前住骨化の架橋があるものとされている.DISH例では脊椎の可動性が低下し,靭帯骨化 の連続性が途絶えている部位に応力が集中しやすい.また,罹病期間が長期に及ぶ高齢者では椎体内部では 応力遮蔽性の海綿骨骨粗鬆症が併発する.そのため,DISH例ではしばしば正常脊椎とは異なる椎体骨折の形 態を呈することがあるが,椎体骨折のメカニズムは解明されていない.DISH例の胸腰椎の椎体骨折の形態は, 転倒等の低エネルギー外傷により靭帯骨化の連続性が途絶えている部位への軸圧損傷と,いわゆる逆 chance 型の 3-column injury を呈する伸展損傷が多い.一方,胸腰椎の伸展損傷は一般的には稀であり,交通外傷等 の高エネルギー外傷により椎間板や終板から椎弓根へと損傷が及ぶと報告されている.本研究の目的は, DISH例における椎体骨折メカニズムを,三次元有限要素法を用いて明らかにする事である.

2. 方法

61歳男性(DISH例)と56歳女性(対照例)を対象にした.各々の症例で5個の胸椎と椎間板で構築され る有限要素モデル(T6-T10)を作成した(図1).CT-DICOMフォーマットにより保存された2mm間隔の CT 画像より,関心領域を抽出した.解析ソフトとして MECHANICAL FINDER を用いた.椎間板,椎間関節 の弾性率は8.4 MPa,11 MPaとした.椎体の弾性率に関しては,CT の Hounsfield Unit (HU)値を骨密度値に 変換し,Keyakの換算式に基づいて算出した.解析モデルは一辺が0.5 mmの4節点4面体要素とした.DISH 例は要素数323513,節点数56903,対照例は要素数171953,節点数31466となった.T6-T10を50等分した. 各高位の椎体と骨化靭帯の骨密度を計算した.シェル要素に破壊が起こり始める荷重値を本モデルにおける 骨折荷重と定義した.荷重条件は,T6前面に水平方向の伸展外力,上面に垂直方向の圧縮外力を加えた.転 倒による低エネルギー外傷を想定し,2000N(200N/step)とした.拘束条件は,T10椎体下面で完全固定とし た.DISH 例と対照例とで,1)椎体と骨化靭帯の骨密度,2)伸展外力によるDrucker-Prager 相当応力,3)伸展 外力による破壊状態,4)伸展外力と圧縮外力による破壊要素数を比較検討した.

3. 結果

椎体と骨化靭帯の骨密度(図1):椎体と骨化靭帯の骨密度に関して, DISH 例では対照例と比較し有意に骨 密度が大きかった(P<0.05).また,対照例では椎間板高位よりも椎体高位の方が有意に高骨密度であり (P<0.05),一方で DISH 例では椎体高位よりも椎間板高位の方が有意に高骨密度であった.相当応力(図 2):DISH 例では,伸展外力により骨化した前縦靭帯,椎弓根,椎間関節に応力集中を認めた.また,stepの増 加に伴って,骨化靭帯の最尾側から頭側へ応力集中が広がった.一方で対照例では,伸展外力により椎弓根 と椎間関節に応力集中を認めた.破壊状態(図2):DISH 例では,伸展外力により最尾側椎の前縦靭帯骨化の 薄い椎体前方の中央部を起点として,椎体中央部,椎弓根,椎間関節の 3-column が破壊された.一方,対照 例では,椎弓根と椎間関節が破壊された.

4. 考察

本研究では,対照例への低エネルギーの伸展外力により後方要素にのみ応力集中と同部位の破壊を認めた. 椎間板や椎体終板の破壊は認めておらず,過去の臨床疫学研究報告結果とは異なる結果であった.エネルギ ー量が低かったことが原因と推察した.本研究では,2000N で終板に破壊を伴わない弱い応力集中を認めて おり,更にエネルギー量を増加する事で椎体終板に破壊を認めると予想される.また,DISH 例では骨化した 前縦靭帯は椎体内部よりも骨密度が高く,伸展外力により骨化した前縦靭帯の尾側から頭側へ応力集中を認 め,尾側胸椎の骨化の薄い椎体中央部を起点としたいわゆる逆 chance 型の 3-column injury を認めた.先行研 究と同様の結果であり,過去の臨床疫学研究結果とも合致した.以上より,中高年の DISH 例では対照例と 異なる力学的特徴をもち軽微な伸展損傷で椎体骨折を生じる可能性が示唆された.臨床的に DISH 例では軽 微な外傷で椎体骨折をきたすが,CTFEM を用いて検討した本研究と遠藤らの研究でも同様の結果であり, DISH 例は転倒に対する注意をより喚起する必要がある.DISH 例の椎体骨折に対する固定術における,固定 椎体や隣接椎体への影響などのバイオメカニクス解析への応用が今後の課題である.

研究組織:

研究代表者	馬渡正明 佐賀大学医学	郭整形外科
研究協力者	小林孝巨, 森本忠嗣 佐賀	冒大学医学部整形外科
	東藤 貢 九州大学応用	力学研究所
	郭 墅 九州大学大学	完総合理工学府





図2 伸展外力による相当応力分布と破壊状態の比較

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 松浦 佑介

1. 緒 言

CT 画像を利用して患者ごとに骨の 3 次元数値モデルを作成し、有限要素法を用いて応力解析を 行うことで骨の力学的特性を評価する CT-FEM が整形外科を中心に広く用いられるようになって きている。また以前は実際の複雑な骨の力学的特性分布に反して、単純化されたモデル化が行われ ていたが、CT 値から骨密度値を予測し、さらに骨密度から弾性率を推定する方法が確立され、患 者ごとの骨密度分布を考慮した数値解析が行われている。しかし、最近、主に欧米諸国で確立され た骨密度と弾性率および降伏強度を関係づける実験式が、日本人の骨には適合しないことが指摘さ れている。そこで本研究では、より日本人の骨に適合した弾性率予測式を提案することを目的とし た。

2. 献体実験の結果と従来法との比較

図1に検体の大腿骨を用いた強度試験法の概要を示す。下部を固定し骨頭部の上方から負荷をかけて荷重一変位関係を記録した。図2に得られた荷重一変位曲線の一例を示す(緑線)。試験前に大腿骨のCT 画像を撮影し、Mechanical Finder を用いてCT 画像から3D数値モデルを作成した。この時、CT 値から骨密度を推定した。また、Keyak と Keller によりそれぞれ提案された弾性率予測式を用いて弾性率分布を求めた。次いで、強度試験を模擬した境界条件を設定し、強制変位を与ええて数値実験を行い、荷重一変位関係を取得した。得られた荷重一変位関係を図2に示す。一般的に広く利用されている Keyak の式では剛性が高くなり、実験とは大きく異なった結果になっていることがわかる。椎体に対して提案された Keller の式の方が、より実験値に近い剛性を示しているが、しかし実験値よりも高い値を示している。また、強度(最大荷重)については、Keller の方が Keyak より高い値を示す結果となった。

3. 弾性率予測式の提案と解析結果

図3に献体実験で用いた二つの大腿骨の有限要素モデル(シミュレーションモデル)における骨 密度分布を示している。有限要素モデルでは要素単位に骨密度が割り当てられているため、図3に は横軸に骨密度、縦軸に要素数をプロットしている。明らかにAとBは異なる骨密度分布を示して おり、Aの方が低骨密度の要素数が多い。一方、荷重一変位曲線で比較すると、Bの方が高剛性を 示し、強度においてはAの3倍以上高い強度を示していた。また、AとBの共通の内容としては、 Bについても低骨密度(特に 0.5 g/cm³以下)の要素数が多いことがわかる。以上の結果より、A とBの両方において、低骨密度領域が大腿骨の力学的特性に強い影響を及ぼすことが示唆される。 さらに、Keyak や Keller の式が剛性と強度の両方に対して実験値よりも高い解析結果を与えること から、特に低骨密度領域の予測に対して過大評価の可能性があることが示唆された。

そこで、まずは剛性のみについて、より実験値に近づけることを検討した。図4に示すように、 骨密度範囲として 0.23g/cm³以下が特に強い影響を及ぼしていると仮定して、この部分に対して低 下係数 K をかけることで弾性率を低下させ、0.23g/cm³以上については、直線的に弾性率は変化し 0.4g/cm³以上では keller のオリジナルの式の結果に一致するように設定した。図5に Keller の修正 式を用いて解析した結果を示す。K=0.25 のときに剛性は実験結果とほぼ一致している。また、B の 解析結果についても、実験値に近づくことが確認された。

今回の研究成果より、大腿骨の剛性に関しては、我々が提案した Keller 修正式を用いることで解析結果が 実験結果に近づくことが明らかになった。しかし、強度(最大荷重)については未検討であり、今後、強度 を一致させるような解析条件を検討していく予定である。

研究組織:

代表者 松浦佑介 千葉大学大学院医学研究院整形外科

協力者 東藤 貢 九州大学応用力学研究所

木佐木知裕 九州大学大学院総合理工学府



図5 新しい弾性率予測式による解析結果

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

心臓は、収縮と弛緩を繰り返すことで全身に血液を送るポンプとして重要な役割を果たしている.心臓を構築する心筋組織の拍動メカニズムは、心筋細胞内への Ca²⁺の流入によって筋原線維のサルコメアを構築するアクチンとミオシンが滑り運動を起こし、サルコメアが収縮と拡張を繰り返すものであり、 心筋組織は化学的エネルギーが機械的エネルギー変換される一種のエネルギー変換システムである.一 方、ヒト iPS 細胞から心筋細胞を作製する技術が確立し、ヒト iPS 細胞の臨床応用も検討されている. そこで、本研究では、ヒト iPS 心筋細胞から作製した細胞塊の拍動挙動をひずみ量として定量的に評価 するとともに、心筋組織の応力-ひずみ挙動を予測するための理論モデルの構築を試みた.

2. 実験方法

2.1 心筋組織の作製と評価

ヒト iPS 細胞由来心筋細胞(hiPS-CM, Myoridge)を7日間のプレカルチャー後, 温度応答性ディッシュ 24well-Upcell (CellSeed)で7日間培養を行うことにより,心筋細胞シートを作製した. 心筋細胞シ ートをさらに7日間培養し, 高速イメージングシステムによる拍動挙動解析と細胞内のカルシウム濃度 の計測を行った.次に, 高速イメージングシステムから得た動画をデジタル画像相関システム(GOM)に よって解析し変形量を計測した.

2.2 理論モデルの構築

心筋の能動的変形挙動を表す数理モデルを構築するために、まず能動的応力として Guccione らの モデル [1] により提案された次式を用いた.

$$\sigma_{act} = \sigma_{max} \frac{(Ca_0)^2}{(Ca_0)^2 + ECa_{50}^2} C_t \tag{1}$$

$$C_t = 0.5[1 - \cos\omega(t)] \tag{2}$$

ここで, *Ca*₀ はカルシウムイオン量と関連した定数, *ECa*₅₀ はカルシウムイオン量とサルコメア長に関係 した変数である.また, *C*₁は時間に依存する変数である.次に応力-ひずみ挙動を示す構成方程式を求め るために Maxwell モデルを利用した.能動的応力と主ひずみの関係は次式で示される.

$$\frac{d\varepsilon_{pr}}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma_{act}}{dt} + \frac{1}{\eta} \sigma_{act}$$
(3)

ここで, E は弾性係数, ηは粘性係数である.(1),(2)式を(3)式に代入し積分することで主ひずみを求めることが可能となる.

結果および考察

計14日間の培養により,自己拍動する心筋シートの作製に成功した(Fig1). 拍動に伴う輝度値の変 化と細胞内に組み込まれた蛍光カルシウムプローブの蛍光強度の変化を Fig.2 に示す. 両者の周期的挙 動に同一性が見られる事から,心筋シートの拍動が細胞内カルシウム濃度に依存する事が確認できた. また,培養日数に伴う細胞シートのサイズの縮小が確認されたが,この原因として細胞間距離の接近や 自己拍動力に伴う組織の変形等が考えられる.

デジタル画像相関法を用いて心筋シートの拍動による X 軸・Y 軸方向のそれぞれの変位を得た.変位 の経時変化を計測した後,細胞組織内で変位の大きい範囲を観測点として選択した.本研究では、そ の範囲を筋収縮力の強さから、細胞配向性の優れた点であると仮定した.得られた変位から材料にか かる最大の圧縮ひずみである最小主ひずみを算出した.

実験から得られた最小主ひずみと線形弾性モデルおよび粘弾性モデルから予測した最小主ひずみを Fig.3 に示す. ひずみの予測値については、線形弾性モデルと粘弾性モデルで大きな差はみられなかっ た. 次に能動的応力-最小主ひずみ曲線を Fig.4 に示す.実験結果は明らかに非弾性的ヒステリシスル ープを描いており、この挙動は粘弾性挙動に類似であり、線形弾性モデルでは応力-ひずみ挙動を予測 できないことが示唆される.このループは収縮と弛緩の際のエネルギー差を意味しており、心筋収縮は、 臓器・筋線維・ミオシン分子など各スケールでの振動挙動は異なり、スケールが大きくなるにつれて、 より高次の秩序運動を行う特性がある. ループの要因はサルコメアの能動的張力とひずみの位相差に依 存すると考えられるが、様々なスケールごとでの挙動変化を測定することで、エネルギー変化のより 深く理解する必要がある.

4. 結 言

本研究では, iPS 細胞由来心筋細胞シートを作製し, 拍動挙動の定量的評価に成功した. さらに, 応 カーひずみ挙動を予測するための理論モデルを構築し, 比較的単純な細胞シートの 2D 変形挙動につい て実験結果と粘弾性モデルとの良い一致が得られた.

5. **今後の方針**

博士課程進学後は、心筋細胞シートと足場材料を組み合わせることで拍動する 3D 構造体を作製し(ミニ心臓の開発)、拍動挙動の定量的評価を試みる.さらに、理論モデルを組み込んだ有限要素解析を行い、コンピュータシミュレーションによる拍動挙動の再現を試みる予定である.

参考文献

- [1] JM Guccione, LK Waldman, AD McCulloch : Mechanics of active contraction in cardiac muscle: Part II—Cylindrical models of the systolic left ventricle, Transactions of the ASME, Volume 115, Issue 1, 1 February 1993, Pages 82-90.
- [2] Shinichi Ishiwata, Yuta Shimamoto, Norio Fukuda : Contractile system of muscle as an autooscillator, Progress in Biophysics and Molecular Biology, Volume 105, Issue 3, May 2011, Pages 187-198May 2011, Pages 187-198



図1 細胞シート外観



図3 ひずみ変動の実験結果と理論の比較



図4 応力—ひずみ関係

研究組織:

研究代表者	松本拓也	国際医療福祉大学医学部
研究協力者	東藤 貢	九州大学応用力学研究所
	栗田寛子	九州大学大学院総合理工学府

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. INTRODUCTION

In this present work, we developed a HA based scaffold incorporating $Poly(L-Lactide-co-\epsilon-Caprolactone)$ (PLCL), focusing in the enhancement of the mechanical properties of the scaffold material. A beam type scaffold is introduced in this study to determine the ductility and fracture toughness of the scaffold by conducting the 3-point bending test. Further, the load-displacement relationship is expressed through the development of two theoretical models to predict the non-linear deformation behaviour of the material. Finally, the integration of HA material to the biopolymers matrix is analysed using the scanning electron microscopy (SEM) machine where the typical surface morphology is presented.

2. NON-LINEAR DEFORMATION MODEL

The mechanical behavior of a composite biomaterial scaffold is best understood using theoretical models, where the analysis of the deformation is possible. For fully describing the deformation of a beam, it is necessary to consider a simply supported beam at both ends subjected to a concentrated load, *P*. All of the parameters for the expression of deformation δ are denoted as *L*, *H*, *B*, *P*, *c*, *v*, and *x*, describing the half-length of the beam from the support span, thickness of the beam, width of the beam, load applied to the beam, the length of plastic deformation region, displacement in *y*-direction and displacement in *x*-direction, respectively. The nonlinear deformation behavior of a material is characterized as the elastic-perfectly plastic material and is given by,

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon & (\sigma \le \sigma_y) \\ \sigma_y & (\sigma \ge \sigma_y) \end{cases}$$
(1)

where σ is the stress (MPa), *E* is the modulus of elasticity (MPa), ε is the strain (-), while the subscript y describes the yield point. The relationship between *P* and the loading-point displacement, δ , is given by

for elastic deformation (
$$0 \le P \le P_y$$
):

$$\delta = PL^{3} / 6EI \qquad (2)$$

and for elastic-plastic deformation $(P \ge P_{y})$:
$$\delta = \frac{P}{12EI} \left(\overline{P}L\right)^{3} \left[10 - 6\left(3 - 2\overline{P}\right)^{1/2}\overline{P} - 2\left(3 - 2\overline{P}\right)^{3/2}\right] \quad \text{where} \quad \overline{P} = P / P_{y} \quad (3)$$

where I and P_v are the moment of inertia and yield-load.

Since Model I limits the value of P that can be applied, therefore we developed Model II to accurately express the nonlinearity. The stress-strain relationship of the material is assumed to be all non-linear and characterized by an exponential

function with F and n are the variable index: $\sigma = F \varepsilon^n$. Then the loading-point displacement δ of the three-point bending beam is given by:

$$\delta = K_n P^{1/n} [n(L-x)^{(2n+1)/n} + (2n+1)L^{(n+1)/n}x - nL^{(2n+1)/n}]$$
(4)
$$K_n = [n(n+2)2^n / (n+1)(N+2)H^{n+2}BF]^{1/n}$$

3. MATERIALS AND METHODS

In order to obtain the porous structure of scaffold with three-dimensional fully interconnecting pores, the HA porous material was first fabricated by employing the polyurethane sponge template method. Biodegradable synthetic polymers namely, poly Poly(L-Lactide-co- ϵ -Caprolactone) (PLCL) was employed to reinforce the HA porous scaffold by coating and using the freeze-drying method. The three-point bending test was conducted using the Shimadzu Compact Tabletop Testing Machine EZTest (EZ-S Series) with 10N load cell. This three-point bending test provided significant values for the load-displacement relationship, which determined the mechanical behaviour of the scaffold. The morphology of the fabricated scaffold was evaluated using the scanning electron microscopy (SEM)

4. RESULTS AND DISCUSSION

The SEM morphological structure of HA/PLCL porous scaffold is shown in Fig. 1. The scaffold produced a welldeveloped interconnecting pore structure, with two types of architectural pore arrangement, (i) initial pore formed by the HA structure, and (ii) honeycomb-like PLCL pore structure created due to the freeze-drying process which strengthen the mechanical properties of the scaffold. The average pore size and porosity were approximately 500-700µm and 82%, respectively. Pre-cracked was observed on the stem (HA material), which is due to the freezing process where the volume contraction of HA took place. According to William et al. and Phany et al., water exhibits expansion during freezing while other substances will experience the decrease in volume. Fig. 2 shows typical load-displacement curve of HA/PLCL scaffold obtained from the experimental work (three-point bending test). The load increased linearly showing the linearelastic behaviour, up to the yield point where the initiation of crack occurred at the HA framework (the large interconnecting pore). Nonetheless, the addition of polymer material (PLCL) has strengthen the HA structure by providing ductile property, thus creating a plastic deformation ligament. This slightly flattens the load-displacement curve after the yield point and increases uniformly due to the cell walls of HA and polymer that collapse before it completely fractured approximately at the displacement of 6.5mm.



Fig. 1. SEM image of surface morphology



Since the load-displacement curve obtained in Fig. 2 shows non-linearity, therefore it is somewhat hard to predict the stress-strain relationship of this material. In order to clearly express the load-displacement relationship, Model I has been developed (Eqn. (2) and Eqn. (3)). The major advantage of this model is that it contains both elastic and elastic-plastic deformation which accurately express the deformation behavior of the material (see Fig.3). By referring to the experimental curve in Fig. 3, the load-displacement curve in the elastic region predicted by Model I shows fairly accurate values. However, the elastic-plastic region does not show reasonable values where the displacement only takes up to approximately 1.1mm. This is due to the limitation of this model in which it can only predict up to $P=1.5P_y$. In comparison with Model I, Model II (Eqn. (6)) is developed in an attempt to accurately fit the experimental data as well as its non-linear deformation curve. The load-displacement curve of Model II is shown in Fig.4. Better fitting is observed in Model II where the curve shows somewhat similar to that experimental curve. The only drawback of this model is that the material is assumed to be all non-linear by neglecting the linear-elastic region.



Fig. 3. Load – displacement curve of Model I



5. CONCLUSION

The structural stability of brittle HA and its mechanical properties has been improved by introducing PLCL polymer as secondary phase fabrication. It is found that the porous structure of HA/PLCL contains two types of arrangement namely, the initial HA interconnecting porous structure and the honeycomb like PLCL layer within the HA pores. The mechanical behavior of this composite scaffold after the bending test shows that the brittleness of HA material has greatly improved with the introduction of the secondary phase polymer. Finally, the two models developed i.e. Model I and Model II shows fair advantage and limitation. These two models may be useful in predicting the stress-strain behavior of a non-linear deformation curve.

研究組織:

研究代表者 名井 陽 大阪大学附属病院未来医療センター 研究協力者 東藤 貢 九州大学応用力学研究所 Fatin Hazwani 九州大学大学院総合理工学府 風車後流の可視化に係る基礎研究(2019 ME-14)

弘前大学 本田明弘

<u>要旨</u>風洞内における風車後流の流れを PIV での評価が可能な可視化方法を模索し、スモークワイヤ によるトレーサ、スライドプロジェクターを用いた面状光源、高速度カメラによる画像を処理す

る事で、流速分布を得る事が出来、実機での計測にも適用できる目途を得た。

目的 PIV で評価が可能な風車後流の可視化方法を模索する事。

実験方法

・風洞内に設置したロータ直径 50cm の風車模型を、風速 1m/s、回転数 140rpm にて回転させ,ロータ 近傍に設置したスモークワイヤを通電してトレーサを発生させた。(右図)

・光源に関してはスライドプロジェクターにスリットを有する板を設置し、面状の光源を作成した。

・撮影は高速度カメラ(フォトロン社製 Nova-S12)を用いて撮影し、250fps の速度(0.004 秒)の結 果を用いた。

実験結果

当初、煙発生装置を用いたトレーサを試みたが、後流域全体にトレーサが行きわたらず、スモークワ イヤによるトレーサに、面状の光源を調整して照射する形での可視化が適切であると考えた。

(1) スモークワイヤの設置位置

風車ロータ面に対してスモークワイヤ張る位置は種々のバリエーションが考えられ、翼端渦を見る には水平方向にワイヤを設置した場合(図1左)がトレーサの発生する時間も長く良好であった。し かしながら今回は風車の横に設置した高速度カメラで後流域内のトレーサを追跡するため、ロータの 上流側に1本、下流側に1本のワイヤを鉛直に設置して得られた可視化写真を図1右に示す。





図1 左:水平のスモークワイヤ、右:鉛直のスモークワイヤ(上流1本、下流1本)

画像処理の段階で、明るさ、鮮明さを調整しているものの、ロータ下流に設置したスモークワイヤか らのトレーサが風車後流に拡散している様子が見て取れる。

(2) 半径方向の可視化断面

更にロータ下流のスモークワイヤを2本に増設し、可視化断面をロータ中央、r/2、翼端の3断面で可

視化した画像が図2である。



図2 左:中央断面、中央:r/2 断面、右:翼端断面(スモークワイヤ:上流1本、下流2本)

中央から翼端付近に移動するにつれて、後流幅が減少している様子が見て取れる。

考察

得られた動画(avi)をコマ撮りした画像(BMP)に変換し、MATLAB に image.processing.toolbox を追加 して、PIVLab 2.31 を用いて解析を試みた結果が図3である。



図3 中央断面の時間平均 PIV 処理結果(左:流速ベクトル、右:流速絶対値) 本結果から、トレーサに光源が照射できていない影の部分を除けば、翼端付近での風速増加および後 流での減速が評価可能であることが判明した。

更に、実機風車への適用を想定すると、実機の回転数は 10rpm 程度であり、20fps 程度の通常のカメ ラ撮影で可能と考えられる。ただし、撮影範囲が広くなるために複数台のカメラや広角レンズ及び PIV 処理での補正は別途必要となると考えられる。

なお、今回の実験では、渡邉公彦様、松島啓二様、高田青様にはお世話になり、感謝申し上げます。

成果報告

今後発表予定(現時点では未)

帆布翼を用いた垂直軸風車システムの動力利活用に向けての検証

弘前大学·地域戦略研究所 久保田 健

要旨

翼数の少ない垂直軸風車を運転する際に想定されるトルクの回転角度依存性の調査、ならびに風力式揚水システムとして低速運転した際のシステム設計面での技術的な課題を明らかにした。

目的

8 枚羽の垂直軸風車が運転状態にある時の回転に伴うトルクの脈動を把握すること、ならびに揚水ポンプ直動式風車 システムとしての性能評価を実施し、実証試験に必要な運転パラメータの基礎データを得ることを目的とした。

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に垂直軸ロー テーション・フロー風車の仕様(鉛直断面)と実機のポンプ実験時の外観図を示す。タービンは直径1000 mm、周均等 8 枚の帆布製直線翼で構成され、各翼外端と回転中心のなす角は35°である。帆布のz方向(縦)長さは740mmであ

って、上下面に天板は無い。揚水実験に用 いたポンプはアクアシステム社製 HRP-25Z で、仕切り板 2 枚をバネで容器内壁に 押し付ける回転ベーン式である。また風車 の基本性能確認には小倉クラッチ社製の 直流制御式電磁ブレーキ AMB-80 を負荷 として用い、風車の周速比を制御した。こ れらの他、ユニパルス社製トルクメータ UTMG-10Nm でトルク計測を、UTMII-0.1NmR で 2000pulse/cycle の回転信号をそ れぞれ 1000C/sec で 30sec 計測した。



図1 実験に用いたローテーション・フロー風車の断面形状(上),なら びに揚水実験時の構成機器の外観写真(下).

結果と考察

図2には、風速7m/s下における電磁ブレーキ負荷時のトルクの時間依存性として、周速比入=0.25 および0.15 として 計測したデータを示す。なお、データ精査の結果、それぞれが正確には0.261 および0.155 であった。図からいずれも が周期的で複雑な変動を有することがわかる。最も顕著な変動は矢印で示す1周期ごとのもので、これは電磁ブレーキ の周動摩擦力が周回変動することに起因している。また、1周期内に小さな変動(脈動)が複数存在することが認めら

れる。本研究では、8 枚羽垂直軸風車の周回運転時のトルク脈 動を把握することを目的としており、この小さな変動の原因に ついて分析するため、生データをそのままフーリエ解析した。

図3で示す波形は、図2でλ=0.25 とした脈動がやや明瞭に みられるデータに対して強度(パワー) ー周波数をプロットし ている。0.6Hz付近のピークは、風車の回転周波数(0.58Hz) に対応するもので、図2の1周期変動を表している。また、 4.61Hz に明瞭なピークが現れているが、この値は風車の回転 周波数のおよそ8倍(4.64)に相当する。このことから、垂直 軸風車の受風角の違いによって生じるトルクの脈動を捉える ことができたと言える。





図4は揚水実験時のトルク波形を示しており、呼び水した 状態を作ることで、ゆっくりではあるが風速 4.5m/s にて約 2mの揚水は可能であることが確認された。また、風速が増 すことで揚水のトルクは大きくなり、単位時間当たりの揚水 量が増えるが、これについての定量的なデータを取得するこ とができた。

ここで、風速 7m/s のデータには周当たり2回のトルク脈 動が認められるが、これらはベーンポンプの構造に由来す る。他方、4.5m/s の低速運転時のデータにも1回転を基本と した回転周期性がみられるが、およそ8回の脈動が確認でき る。これは図2、3 で示す結果とその考察を支持する補完的 なデータと予想されるが、回転軸の芯出しやベーンポンプの 摺動抵抗(2回の脈動)、風車の慣性モーメント等とも合わ

この他、風車回転周波数の2倍および4倍に相当する1.08Hz や2.29Hz に小さなピークが存在し、加えて全ての実験アレン ジで8Hz付近にピーク様の挙動を確認した。風車回転数1、2、 4、8倍のピークはいずれも測定時の周速比に依存するのに対し て、8Hz での挙動は大小程度の差はあるが固定とみられること から、風車架台の共振周波数と考えられる。他方、2、4倍にお けるピークの原因について過去に実施したCFD計算³⁾を参考に すれば、図1のタービン姿勢の1時および6時方向で生じる剥 離流れの発生頻度が、周当たりそれぞれ4回、2回と確認され おり、このウェイクによるものと予想される。ただし、実験的 に原因の特定には至ってはおらず、可視化実験やその他の方法 で調査する必要がある。



図4 揚水実験における必要トルクの時間波形.

せた精査が必要と考える。これと同時に、システムの最低起動風速の極小化までを考えれば、風車が最大トルクを発生 する姿勢角とベーンポンプの最大必要トルク回転角を合わせることが必要との知見が得られた。

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、また、松島 啓二氏、渡邉 公彦氏、高田 青氏には実験に際して格別のご支援を賜りました。この場 を借りて感謝申し上げます。

研究組織

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 明弘 弘前大学地域戦略研究所・教授
 桐原 慎二 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・博士後期課程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).
- 大坂 将史, 久保田 健, 志田 崇, 沈 健, 南條 宏肇, 桐原 慎二, 本田 明弘, "OpenFOAM を用いたローテーション フロー・タービンのシミュレーション",第 39 回風力エネルギー利用シンポジウム講演論文集, 452-455 頁, (2017).

浮体式垂直軸風力発電システムの

空力-弾性-水力-制御連成シミュレーションによる運転性能解析

大阪府立大学 大学院工学研究科 涌井徹也

1. 序論

洋上風力発電は構成部材の運搬や騒音の制約が少なく,海上の好風況を利用できる.特に大水深海域の多い日本近海では,浮体式洋上風力発電を導入することで設置コストの低減が期待できる.垂直軸型 風力タービンは発電機などの重量物を低位置に設置できるため,浮体式システムに用いた場合に利点を 有する.しかし,タービントルクや空力荷重が回転中に大きく変動することから,垂直軸型風力タービ ンの空力・弾性振動特性,浮体の動揺特性,および発電機トルク操作による回転数や浮体動揺の制御特性 が複雑に干渉する連成問題を取り扱う必要がある.そこで本研究では,浮体式垂直軸型風力発電システ ムの空力・水力・係留力連成シミュレーションモデルを構築し,システムの連成挙動を分析した.

2. 浮体式垂直軸型風力発電システム

対象とする浮体式垂直軸型風力発電システムの構成を図1に示す.垂直軸型風力タービン・発電機は スパー型浮体に接続され,浮体は係留ラインを介して海底に固定される.風速と回転数に応じた風力タ ービンの空力荷重,波力,および係留力が作用して浮体は動揺する.また,浮体動揺に応じてタービン への流入風速が変動することで空力特性が変化するため,浮体式システムは複雑な連成挙動を示す.

3. 空力-水力-係留力連成シミュレーションモデル

空力-水力-係留力連成解析モデルの概要を図2に示す.連成解析モデルは垂直軸型風力タービンの空 カサブモデル,浮体サブモデル,制御サブモデル,および動特性サブモデルより構成される.浮体動揺 に伴う回転軸の傾斜を表現するため,図3に示すように,空間上に固定された絶対座標系(*X*_A軸, *Y*_A軸, *Z*_A 軸)と,ローター回転軸長手方向をZ軸とする相対座標系(*X*_r軸, *Y*_r軸, *Z*_r軸)を定義する.ローター前方 風速が*X*_A軸方向より流入するものとすると,相対座標系は絶対座標系から浮体のロールおよびピッチ方 向変位だけそれぞれ回転させた座標系となる.

空力サブモデルでは、流入風速、風力タービンのアジマス角、および浮体変位に応じた準定常状態での空力特性を計算する.浮体変位に伴う風の流入方向変化に加えて、回転軸の傾斜速度をローター前方風速に加算することで、浮体動揺の影響を考慮する.大型垂直軸型風力タービンは回転数が低いことから、風力タービン内での風の減速を一段階とするように多流管理論を拡張して空力特性計算を行う.算出した空力荷重を流管ごとに積算し、Xr軸、Yr軸方向成分に分解する.分解したタービン翼の空力荷重とストラット翼からの支持力とのつり合いから、回転軸に作用する空力荷重を計算し、これを絶対座標系に変換することで浮体に作用する空力荷重を算出する.

浮体サブモデルでは、浮体変位に応じた準定常状態での浮体外力を絶対座標系基準で計算する.本研 究では係留力、粘性抗力、浮力を対象とする.回転数を制御するための発電機トルクは電力変換機器を



図1 連成シミュレーションモデル



介して制御周期ごとに離散的に操作できるものと仮定する.風力タービンの効率に相当するパワー係数 が最大となるように,発電機トルクは回転数の2乗に比例して操作する.動特性サブモデルでは,風力 タービンのアジマス角と浮体変位の動的変化を計算する.

サブモデル間の強連成解析を行う場合には、非線形連立微分代数方程式を解くことになり、計算負荷 が非常に高い.そこで、サブモデルの計算を個別に行い、変数をサブモデル間で引き渡す弱連成手法を 採用する.空力サブモデルおよび浮体サブモデルの連立代数方程式はニュートン-ラフソン法を用いて 数値的に解く.また、動特性サブモデルの微分方程式はルンゲークッタ法を用いて解く.

4. 連成挙動分析

垂直軸型風力タービンは3枚の直線翼を有し、ローター直径は86 m、ローター高さは103 mとする. 発電機の定格出力は3400 kWとする.スパー型浮体の諸元はOC3-Hywind spar-buoy モデルを基づいて 決定する.喫水は120 m、直径は9.4 mとし、静水面から深さ70 mの地点に3本の係留ラインが接続さ れているものとする.静水下において、流入風速が5 m/sから8 m/sにステップ状に変化した場合の浮 体式垂直軸型風力発電システムの連成挙動を図4に示す.風力タービンの空力荷重は回転周波数の翼枚 数倍で変動するが、ローターならびに浮体の質量と慣性モーメントが大きいことから、ローター回転数 と浮体のサージおよびピッチ方向変位にはその影響がほとんど現れていない.風速のステップ状変化に 対する過渡応答部分に着目すると、垂直軸型風力タービンの慣性モーメントが非常に大きいことから、 浮体変位に比べて回転数の応答時定数が長くなる.その結果、空力荷重はタービン回転数と同様の過渡 応答を示し、浮体のサージおよびピッチ方向変位にタービン回転数の過渡応答が重畳する.また、過渡 状態でも浮体のサージおよびピッチ方向変位には、定常状態と同様の固有振動が観察できる.垂直軸型 風力タービンへの流入風速は浮体変位によって変化するが、空力特性への影響は小さい.これは、浮体 変位に起因する流入風速変化よりもタービン回転中の迎え角変動の方が影響が大きいためである.

5. 学会発表のリスト

 涌井徹也,佐野祥太,横山良平,大形垂直軸型風力発電システムの年間運転性能に対する設計条件の影響分析,日本 機械学会 2019 年度年次大会講演論文集, J05308P, pp. 1–5, 2019.09.08-2019.09.11,秋田大学.



図2 静水下での風速ステップ状変化に対する浮体式垂直軸型風力発電システムの挙動

風速と波高変化に対する動特性同定モデルを用いた 浮体式洋上風力発電システムの予見制御

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. 浮体式洋上風力発電シス テムでは、風だけでなく波の影響を受けることで浮体の動揺が誘起され、出力変動や疲労荷重が増大す る. これまでに、出力変動と浮体動揺の抑制を両立するための制御方策に関する研究が行われており、 その多くではシステム出力に応じて翼ピッチや発電機トルクを操作する受動的な制御が行われている. しかし、ローター回転数や浮体の応答は大きな慣性要素(ローターや浮体)の影響を受けるため、受動 的な制御のみによって良好な運転挙動を得ることは困難である.本研究では、外乱入力である風速およ び波高の予見に基づいて制御挙動を最適化するモデル予測制御に着目した.これまでに、空力-水力-弾 性-制御連成シミュレーションを通して、予測区間の流入風速場を既知とした条件下でモデル予測制御 をスパー型浮体式洋上風力発電システムに適用した場合に、出力変動と浮体動揺を共に抑制できること を明らかにした.そこで本研究では、流入風速に加えて波高を予見外乱として利用したモデル予測制御 を構築するために、まず、浮体式洋上風力発電システムの動特性を推定する内部モデルを閉ループ下で の運転データより同定した.その上で、同定した内部モデルを用いて、風速と波高の予見に基づくモデ ル予測制御手法を構築した.さらに、高風速域での空力-水力-弾性-制御連成シミュレーションを通して、 予測区間の流入風速場と波高変化を既知とした条件下における回転数フィードバック制御や風速のみ を予見するモデル予測制御に対する優位性を明らかにした.

2. 風速と波高の予見に基づくモデル予測制御

高風速域におけるモデル予測制御のブロック線図を図1に示す.モデル予測制御では,予測区間において,現在のシステム出力(制御量)の計測値とその設定値,制御入力(操作量)とその設定値,さらに予測区間における外乱入力予見値を与条件として,制御挙動を評価するコスト関数が最小となるように,制御区間の制御入力を決定する最適制御問題を解く.得られた最初の時間ステップの制御入力のみを適用し,次の制御周期において新たな与条件の下で最適制御問題を解く後退ホライズン手法を採用する.コスト関数は,予測区間のシステム出力および制御入力の設定値に対する追従誤差と制御入力の変 化量の2-ノルム,および制約条件を緩和するためのスラック変数の2乗値の加重和とする.予測区間におけるシステムの状態および出力の推定値は状態空間方程式で表す内部モデルを用いて算出する.また,システム出力および制御入力の変化範囲などを制約条件として考慮する.

モデル予測制御において予測区間の制御挙動を推定するための内部モデルは、線形時不変の離散時間 状態方程式で表現する.学習データとする運転データでは、システムの入力に相当する制御入力と外乱



図1風速と波高の予見に基づくモデル予測制御

が持続的励振条件を満たす必要がある.しかし,開ループ下で制御入力を外乱に依存させずに操作すると,浮体式システムの挙動が不安定になりうる.そこで本研究では,閉ループ下での制御入力に M 系列 信号(疑似乱数信号)を重畳させた場合の運転データを学習データとする.閉ループ下での時系列データ に基づくシステム同定を行うために,部分空間同定法を適用する.

3. 空力-水力-弾性-制御連成解析による制御挙動分析

対象とする浮体式洋上風力発電システムの空力弾性解析には FAST を使用した.風力タービンには NREL 5 MW 機を,また,浮体にはスパー型の NREL OC3-Hywind spar-buoy モデルを用いた.モデル予 測制御において,ローター回転数と浮体ピッチ角速度に設定値(12.1 rpm および 0 deg/s)を与えて制御 量とし,制御入力は同期翼ピッチ操作と発電機トルクとした.乱流変動風況および不規則波高変化に対 する対象システムの連成挙動を図 2 に示す.ベースライン制御および風速のみを予見するモデル予測制 御を行う場合についての結果も併せて示す.モデル予測制御を行うことで翼ピッチの変化量はベースラ イン制御よりも大きくなるが,ローター回転数および浮体ピッチの変動はベースライン制御よりも小さ くなる.また,風速のみを予見したモデル予測制御では発電機トルクが予見風速に応じて大きく操作さ れるのに対して,波高の予見も行った場合には予見波高に応じて微小に変化する.翼ピッチの変化量も 小さくなる.外乱予見に応じて操作量が適切に操作されるため,ローター回転数および浮体ピッチの変 動は波高の予見を行う場合の方が小さくなり,特に浮体ピッチで顕著になる.また,発電機出力もロー ター回転数と同様の変動特性を示している.

4. 論文と学会発表のリスト

- T. Wakui, A. Nagamura, R. Yokoyama, "Model predictive control of floating offshore wind turbine-generator systems based on preview of wind speed and wave height", Proceedings of the WindEurope Offshore 2019, PO.040, pp. 1–13.
- (2) 涌井徹也,長村篤,横山良平,浮体式洋上風力発電システムの閉ループ挙動に基づく動特性同定,日本機械学会2019 年度年次大会講演論文集,J05309P, pp. 1–5, 2019.09.08-2019.09.11,秋田大学.
- (3) 涌井徹也,長村篤,横山良平,風速と波高の予見に基づく浮体式洋上風力発電システムのモデル予測制御,第 41 回 風力エネルギー利用シンポジウム, pp. 30-33, 2019.12. 04-2019.12.05,科学技術館.



図2 乱流変動風況および不規則波高変化時の浮体式洋上風力発電システムの挙動

発電細胞を模倣した高性能積層ハイドロゲル電池の創製と評価

九州大学先導物質化学研究所 高原 淳

1. Introduction

Among all the existing renewable energy sources, the one which currently is received a lot of attention is the reverse electrodialysis technology. The electricity is converted from the ionic concentration gradients across different ion-selective membranes⁽¹⁾. This system could be found in the electric eels which stack thousands of cells called electrocytes or electroplaxes in series to generate high voltages of over 600 V⁽²⁾. Imitating this electroplax cell of electric eels, a set of four different types of hydrogels have been used—namely, a high-salinity hydrogel, a cation-selective gel, a low-salinity gel, and an anion-selective gel, to generate 130-185 mV at open circuit⁽²⁾ as shown in Fig.1. By stacking these four gels repeatedly, higher-voltage could be achieved. Therefore, in this study, different types of electrolyte solutions and stacking connection techniques have been observed in order to understand the fundamental characteristics of the bioelectric cells.



Fig.1 Fundamental structure of bioelectric cell

2. Materials and Methods

For the electrolyte solutions—Sodium Chloride (NaCl), Potassium Carbonate (K_2CO_3), Potassium Phosphates (K_3PO_4) and Calcium Chloride (CaCl), were prepared by dissolving the desired solute in 40% (w/v) 37.5:1 acrylamide/N,N'methylenebisacrylamide solution. A precise scale was used to measure the mass of the electrolyte to be put into the solutions. We then put in 2-hydroxy-4'-(2-hydroxyethoxy)-2-methylpropiophenone before curing under a UV display lamp. As for the cation-selective solution, 2-acrylamido-2-methylpropane sulfonic acid was dissolved in the deionized water before adding the acrylamide/bis solution following by the photoinitiator. Similarly, the anion-selective solution was prepared by mixing (3-acrylamidopropyl) trimethylammonium chloride with deionized water, the acrylamide/bis solution and the photoinitiator. To fabricate the gel cells of each hydrogel types, we first pipetted 3 ml of each target gel solution into a 35 mm dish. We then cured the gel under the UV lamp for about 3 minutes each until the cross-linking completed and the gel became harden. After that, we peeled the gels from the dish and punched the gel in the circular size of about 1 cm in diameter. To get the measurement of voltage and current, each gel types are stacked repeatedly in sequence (high-salinity, cation-selective, low-salinity, anion-selective) into a tube. After getting the desired number of stacks in series, we could then do the measurement.

3. Results and Discussions

The open-circuit voltage increases when more stacked cells are introduced in series, from 0.51 V in 5 stacks to 0.86 V in 10 stacks as shown in Fig.1. Moreover, it becomes as high as 2.57 V when 4 sets of 10 stacked cells are connected in series (40 stacks). Similarly, the short-circuit current increases as the stacked cells are connected in parallel, from 26 μ A in 5 stacks to 89 μ A if 4 sets of 5 stacked cells are connected in parallel (5×4), and likewise, from 48 μ A to 148 μ A in 10 stacks and 10×4, respectively.

Fig.3 shows the open-circuit voltages comparison when NaCl stacked cells are increased and connected in series and parallel. In short, to achieve high voltage and current sources, the voltage and current of hundreds of stacked cells can be connected together in series and parallel. The more number of stacked cells are implemented, the higher the voltage and current are achieved.

Fig.4 shows the open-circuit voltages at 1 stacked cell of different electrolytes namely—NaCl, K_2CO_3 , K_3PO_4 , and CaCl. By comparing the obtained result, the open-circuit voltage from K_2CO_3 is around 293 V which is the highest compared to that of the other three electrolytes—165 V, 153 V, and 220 V from NaCl, K_3PO_4 , and CaCl, respectively. Therefore, it can be concluded that the optimum voltage could be achieved from K_2CO_3 electrolyte which gives the average open-circuit of 293 V.





Fig. 2 Open-circuit voltage and short-circuit current each of NaCl stacked cells

Fig. 3 Comparison of open-circuit voltage of NaCl stacked cells



Fig. 4 Open-circuit voltages of different electrolytes

4. Conclusions

In conclusion, this study shows the importance and potential of bioelectric cells as an alternative renewable energy source. Despite small value of voltage and current, by connecting thousands of cells as stacks in both series and parallel, required higher voltage and current could be potentially achieved, for instance, from 0.51 V to 2.57 V of open-circuit voltage in 5 stacks and 40 stacks, respectively. As for short-circuit current, the increase from $26 \,\mu\text{A}$ in 5 stacks to $148 \,\mu\text{A}$ in 4 sets of 10 stacked cells is obtained from parallel connection. Additionally, from the result of open-circuit voltages of different types of electrolyte solutions, it can be clearly seen that the K₂CO₃ electrolyte generated the highest average open-circuit voltage at 293 V.

References

- (1) Y. Mei and C. Y. Tang, "Recent developments and future perspectives of reverse electrodialysis technology: A review," *Desalination*, vol. 425, no. September 2017, pp. 156–174, 2018.
- (2) T. B. H. Schroeder *et al.*, "An electric-eel-inspired soft power source from stacked hydrogels," *Nature*, vol. 552, no. 7684, pp. 214–218, 2017.

研究組織

九州大学先導物質化学研究所	高原 淳
九州大学先導物質化学研究所	小椎尾 謙
九州大学応用力学研究所	東藤 貢
九州大学大学院総合理工学府	BOU Bendkolbot

九州大学 令和元年度 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

<u>緒言</u>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、低コストに有効な育成結晶の大口径化が難しいため、この 方法の工業的利用は限定できである。育成結晶の大口径化技術の確立も一つの研究課題とな っている。代表者らが見出した回転楕円面鏡の傾斜は育成結晶の大口径化に有効な手法の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 を制御できた。回転楕円鏡の傾斜角度をθとして、θ=20°の条件で直径19 mmまで育成結晶 を大口径化することができた。しかし、θを大きくすると加熱効率が低下した。また、θ=20° の条件では、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1/3程度と著しく短くなった。

最近、代表者らは、回転楕円鏡の集光位置をMPとして,従来のIR-FZ法で育成結晶や原料 棒の回転軸上にある場合の値を0,回転軸上から溶融帯表面近傍に近づく場合に正の値をと ると定義した。そして,IR-FZ法によるルチル単結晶の育成においてMPを変化させる効果を 調べた結果、回転楕円面鏡を傾けなくても溶融帯が安定化できることがわかった[2]。、従来、 育成結晶と原料棒の回転軸上にあった集光位置(MP=0)を溶融帯表面に近づく方向に2,4 mm 移動させた条件(MP=2,4 mm)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、θとMPの両方を系統的に変化させ、各条件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。

<u>実験</u> TiO₂粉末(純度>4N)を原料として使用し、ラバープレス法により円柱状の所定のサイズに成形し,空気中で1200 $\mathbb{C} \cdot 5$ 時間,焼結した。焼結試料の径を測定し,原料径とした。 19~28 mmの範囲で径の異なる原料棒を用意した。先ず,径が19 mm程度の原料棒を用い, θ =5.0°, MP=0 mmの条件で結晶育成を行い,育成可能な場合には,径が2~3 mm程度より大きな原料棒を用いた結晶育成を試みた。育成不可能であれは,MPを+2 mmあるいは θ を2.5°増加させた条件で結晶育成を行った。最終的に θ は5.0~10°, MPは0~+8 mmの範囲で変化させ,育成可能な結晶径の上限を調べた。

<u>結果と考察</u> $\theta = 5^\circ$, MP=0 mmの条件では, 径が22 mmの原料棒を用いた育成まで安定で, 育成結晶径は21 mmに達した。しかし, 径が24 mmの原料棒を用いた育成では, 融帯を保持 することはできたが, 原料棒と育成結晶の接触が多く, 原料棒を引き上げる操作が必要で実 質的に原料供給速度と結晶育成速度を等しくした条件での育成を行えなかった。 $\theta = 5.0^\circ$ に固 定したままMP=+2 mmとすると径が24 mmの原料棒を用いた場合でも安定した育成が可能で 育成結晶径は22 mmまで拡大できた(Table I 左)。25 mmの原料棒を使った育成でも育成長が

261

ほぼ30 mmになるま では安定して育成を 行うことができた が、原料と育成結晶 との接触が生じたと ほぼ同時に溶融帯の 融液のほぼすべてが 垂れて育成を継続す ることは困難になっ た。25 mmの原料棒

を使った育成では, MP=+4 mmと しても同様であった。MP=+6 mm とすると溶融帯を保持できた時間 がかえって短くなった。MP=+4 mmの条件で θ =7.5[°]に変更すると, 径が25 mmの原料棒でも安定な育 成に成功した(Table I 右)。この時, 育成結晶径は24 mmに達した。し かし, 28 mmの原料径を使用した 育成では融液が垂れやすく, θ =7.5[°]の条件でMPを+4~+8 mmの範 囲で変更しても育成は安定して育 成を行うことができなかった。更



成を行うことができなかった。更 Fig. 2. Summary of the growth of rutile crystals using feed rods $\ell = 10^{\circ}$ の条件でMP=+6, +8 mmの with various diameters at the various M-L system positions. 条件でも育成を試みたが,溶融帯の保持は困難であった。

様々な θ やMPの条件で異なる系の原料棒を用いて行ったルチル結晶の育成結果をFig. 2 にまとめた。Fig. 2には θ =0°での育成結果[2]も合わせて示してある。●印は安定した育成を示し、△印は、原料棒と育成結晶との接触が生じるなど育成が不安定であったことを示し、×印は溶融帯の保持が困難であったことを示している。θ=0°からθ=5°とわずかに回転楕円鏡を傾けるだけで利用可能な原料径を大きくすることができることがわかる。原料径の拡大に合わせてMPを調整することで一層大きな径を有する原料棒でも利用可能になることがわかった。

結論 ルチル結晶のIR-FZ育成において θ とMPの両方を最適化することで直径25 mmまでの原料棒まで利用可能となり、その結果、育成結晶径は24 mmにまで達した。

参考文献

[1] M.A.R.Sarker et al., J. Cryst. Growth, <u>317</u> (2011) 135.

[2] S.Watauchi et al., J. Cryst. Growth, <u>496</u> (2018) 69.

空中風力発電に用いる自立離着陸可能な可変カイトの研究

熊本高等専門学校 拠点化プロジェクト系 葉山清輝

要旨

空中風力発電のプラットフォームとして,離着陸のためのモーター・プロペラを有し,変形により空力特性を変えることができる可変カイトを考案し,試作と飛行試験を行った.翼の変形による操縦とローターによる浮上はできたが,機体の操作性と安定性が十分でなく,機体の改良を要した.大型化と軽量化により翼面荷重を下げ,安定化のために翼形状を変更した機体を試作した.

1. 目的

上空の地表より強く安定した風を利用する空中風力発電について、近年は欧州や米国にて空中風力発電の実証実験が進んでいる.カイト・グライダーなどの係留ウィンチの張力を用いる発電法は、強度限界時には地上に避難できるので、台風が来襲するわが国では有望な発電方法だと考えられるが、カイト、グライダーのいずれも安全な離着陸方法が課題となっている.

一方で,飛行の自由度の高いマルチコプター型や長距離飛行が可能な固定翼機型の無人航空機の技術が発達し,空撮, 測量など様々な用途が検討されている.以前我々は,省電力・ 長距離飛行を目的として両者の利点を組合わせ主翼を有する マルチコプターを開発してきた.取付角を可変できる固定翼 や,開閉可能なのカイトを主翼として用い,揚力を得て飛行でき るマルチコプターを提案し,省電力で飛行できるが分かった.



本研究では,空中風力発電のプラットフォームとして離着陸のためのモーター・プロペラを有し,変形により空 力特性を変えることができる可変カイトの研究を行う.従来にない独自の構造を持つカイトであるので,詳細な飛 行性能,操縦性と,自立した離着陸性能を検証する.

2. 実験方法

2-1 機体の製作

離着陸と操縦が可能で最小限の2個のモーター・プロペラとティルト機構により構成されるバイコプターを可変カイトに付加した機体を製作する.カイトは、CFRP ロッドのフレームをサーボモータにより摺動可動に結合され開閉等の変形が可能な構造とする.フライトコントローラ(FC)には、オープンプロジェクトにより開発され、ファームウェアが独自に改変できる Pixhawk4、APM2.8(Arducopter、http://ardupilot.org/copter/)や CC3D (https://www.librepilot.org/)等を用いる.

2-2 離着陸飛行及び風洞実験

上記により試作した機体の無風開放空間による離着陸飛行実験と、係留した状態での風洞実験により空力特性の変化を調べる.

2-3 屋外飛行

屋外での飛行実験により操縦性と飛行安定性について調べる. その後, FC に搭載された各種センサによる 段階的な自律自立飛行実験を行う.

3. 実験結果

図2に試作したマルチローター付き可変翼カイトの概略図を示す.図3は、センターロッドのスライドによる可 変翼カイトの形状の変化を示している。左右のリーティングロッドとセンターロッドに交差するスプレッダーによっ て形成されるデルタカイトであり、センターロッドとスプレッダーをサーボモータを用いてスライドさせることで形状 が可変である.図3(a)が発電状態である.巻き戻す時は図3(b)に示すようにセンターロッドを前方にスライドさ せてカイトを閉じる.センターロッドを左右にスライドさせると(図3(c)および図3(d))反対方向の翼面積が増加し 風力を受けて旋回をする.



試作した機体の飛行実験を行った.センターロッドを垂直方向にスライドさせてカイトを開閉すると、迎角が変化し、センターロッドを水平方向にスライドさせることで左右旋回を行うことができた.初期段階ではいったん姿勢を変化させた後の回復が困難なために安定に飛行させることができなかったが、重心位置、ラインの糸目位置の調整や機体の形状の変更などを行い安定性の改善が見られた.ローターの推力による自立離着陸の実験も行い係留状態での安定した飛行ができた(図4).表1に示すようにカイトの面積や迎角を変化させた状態でのテザー張力についても調べた.



図4 ローターで推力補助した係留飛行

表1 異なる飛行形態におけるテザーの張力	J
----------------------	---

カイトの状態	開いた状態	閉じた状態
面積	0.6 m ²	0.52 m^2
迎角	15°	25°
風速	5 m/s	6m/s
テザー張力	7.8 N	3.9 N



図5試作1号機(右)と改良した試作2号機(左)

	表 2	機体の比較	뉯(FC,口	ーター無)
--	-----	-------	--------	-------

機体	重量	翼面積	重量/翼面積
試作1号機	0.2kg	$0.4m^{2}$	$0.5 kg/m^2$
試作2号機	0.3kg	1.0m^2	0.3kg/m ²

4. 考察

考案した可変翼カイトはロッドの摺動により飛行姿勢を制御できることが確かめられた.しかし現状では安定性が十分でなく発電を行うにはテザー張力も小さい.そこでカイトの基本性能を向上させるために図5の試作2号機を製作中である.表2に示すように翼面積は倍以上で翼面荷重も小さいため性能向上が期待できる.今後はこの機体を用いてより詳細は飛行試験と風力発電に取り組む.

5. 成果報告(論文、学会発表等)

[1] Kiyoteru Hayama, Tomohiro Kudou, Hiroki Irie, "Prototype of Multirotor Attached Variable Wing Kite for Airborne Wind Energy Generation", The 15th International Conference on Intelligent Unmanned Systems (ICIUS2019), Beijing, China, August 27 30 2019, PaperID=90.

[2] 葉山清輝,工藤友裕,入江博樹,"空中風力発電に用いる自立離着陸可能な可変カイトの研究",第41回風 カエネルギー利用シンポジウム論文集,2019年12月4-5日.pp.142-145.

バイオミティクス技術を用いたブレードの翼端形状の空力設計

沖縄工業高等専門学校 機械システム工学科 森澤征一郎

1. 研究目的

ブレード性能は翼型と3次元断面の形状に依存し,特に後者は翼端より大きな空力抵抗(特に,誘導 抗力)や空力騒音を生み出す.これらの原因は翼端から生じる渦の影響が大きく,この渦を減衰させる 方法が必要となる.一方,鷹などの鳥類は飛行効率及び静粛性に優れており,この1つの要因に翼端部 が複数分岐した隙間のある翼形状(wing_grid)が重要であり,この隙間によって翼端からの翼端渦を弱め ていると言われている.このような自然界の形態や機能を模倣する技術をバイオミティクス技術と呼ば れ,様々な分野で注目を集めている.本研究ではこのバイオミティクス技術から派生した wing_grid の 空力特性及びその流れ場の関係を考察する.

2. 計算モデルとアプローチ方法

本研究で扱った計算モデルを図1で示す.計算モデルは wing_grid と同じ翼幅長さをもつ矩形翼の2 種類とし、これらに対して数値流体力学 (CFD) を実施した. CFD 用の計算ソルバーには、JAXA 宇宙 科学研究所(現、東京理科大)の藤井孝藏教授らが開発した LANS3D を用いた.計算条件は、レイノ ルズ数(翼弦長さ基準) 6.0×10⁶、迎角を1[°]刻みで - 5~6[°]とした.なお、計算コストを節約するため、半 裁モデルで計算を実施した.なお、wing_grid は上反角を設けていない平面形状の翼として扱った.



図1 wing_grid と矩形翼

3. 結果と考察

迎角(AoA)に対する揚力係数(C_L),抗力係数(C_D),及び C_L と誘導抗力係数(C_D)の関係を算出した結果を図2に示す.なお、図2(c)で算出した C_D は図2(b)の C_D 値を揚力が0となる際の C_D 値から引くことで求めた.

図2(a)より wing_grid の揚力傾斜が矩形翼より大きく,高迎角で C_L も大きな値を示した.これは鳥が大きな揚力を得るように高迎角時で翼端部付近の翼を広げて隙間を作った状態で飛行しているのと 似た効果を持つと考えられる.一方,図2(b)より C_D は全体的に大きな値を示した.しかし,図2(c)より誘導抗力という点では両翼で差が小さいことが確認できた.すなわち,翼端よりは流れ方向に対する wing_grid の形状そのものによる抗力の影響,すなわち圧力抗力によるものと考えられる.

次に、これらの結果(wing_grid の C_L 及び C_D 増加)を調べるため、迎角 6°と 0°での翼表面上の圧力分布 を図 3 に示す. 図 3(a)より、wing_grid の翼端部、特に複数分岐した上流側での 1 つ目の翼が全体的に

低圧領域となった.この低圧領域の存在が迎角 6°で wing_grid の大きな C_L 値を導いたと考えられる. 一方,図 3(b)より迎角 0°でも上流側での1つ目の翼で低圧領域を確認できる.しかし,低圧領域が翼の 後縁側であるため,前縁・後縁間で大きな圧力差が生じる.すなわち,これが圧力抗力として,図 2(b) で述べた高い C_D 値を示した要因と考えられる.そのため,複数分岐した翼間の干渉を解消するため, wing_grid に上反角を設けた検討が今後の課題となる.



5. 研究成果報告

<u>S. Morizawa</u> and S. Obayashi, "Effect on Wing Grid for the Aerodynamic Design," Sixteenth International on Flow Dynamics, CRF-68, Sendai, Japan, November 6-8, 2019.

6. 研究組織

沖縄工業高等専門学校 機械システム工学科 森澤 征一郎(研究代表者) 鳥取大学 工学部機械物理系学科 原 豊(研究協力者) 九州大学応用力学研究所 吉田 茂雄(所内世話人)

積層ハイドロゲル電池を用いた機械的エネルギー変換システムの構築

崇城大学工学部機械工学科 中牟田 侑昌

1. 緒言

生体内に埋め込むタイプの医療機器の中にはバッテリーが必要なものがあり,例 えば心臓ペースメーカーなどがあげられる(図1).しかし,そのバッテリーはリチ ウムイオン電池をチタン製の枠で覆ったものなどであり,生体組織と比較して非常 に硬く,電池の液漏れの危険性も抱えている.このように従来の生体用バッテリーは 柔軟性や生体適合性を考慮して設計されたものが少ないように思われる.そのよう な中,近年,Schroeder らが柔軟性と生体適合性を目的とし,電気ウナギの発電器官 を模擬した積層ハイドロゲル電池の開発に成功した¹.電気ウナギは生体内でありな がら 600 ボルトのピーク電位差と1アンペアの電流を実現することが可能である. 開発されたゲル電池の構造は4種類のハイドロゲルを順番に積層させ,接続させる ことで電位差が生じる仕組みであり(図2),指で曲げられるほど柔軟で十分な起電 力を有しており,医療機器の新たな電源としての可能性が示唆されている.そこで, 本研究では,積層ハイドロゲル電池を動力源とする機械エネルギー変換システムの 構築を目的とし,その基礎段階として,電池の高性能化及び力学特性の解明を行っ た.

2. 実験方法

2-1.4種類のゲルの作製方法

ゲル電池を構成する4種類のゲルの各成分を表1に示す.4種類のゲルともにア クリルアミド(東京化成工業(株))とアクリルアミドビス(=ビス、東京化成工業(株))が 含有されており、高塩分と低塩分ゲルにはNaCl(東京化成工業(株))、陽イオン選択性 ゲルには2-アクリルアミド-2-メチルプロパンスルホン酸(=AMPS、東京化成工業 (株))と蒸留水(高杉製薬(株))、陰イオン選択性ゲルには(3-アクリルアミドプロピル) トリメチルアンモニウムクロリド(74-76%水溶液)(=APTAC、東京化成工業(株))と 蒸留水が含有されている.各種類の混合溶液を作製後に光重合開始剤として2-ヒド ロキシ-4'-(2-ヒドロキシエトキシ)-2-メチルプロピオフェノン(和光純薬工業(株)) を添加し、シリコンゴムで作製した型に入れ、UV ランプ(KIYOHARA(株))によりゲ ル化させた.作製したゲルのサイズは直径が約6mm、厚さが約2mmまたは約3mmと なっている.そして、異なる作製方法として、光重合開始剤を添加した溶液をシャー レに入れ、UV ランプによりゲル化後、型抜きすることで直径約6mm、厚さ約1.5mm のゲルを作製した.以上の2種類の方法により、4種類のゲルそれぞれで直径がほぼ 均一(約6mm)で厚さが異なる(約1.5,2,3mm)試料を作製した.

2-2. 電力測定

作製したゲルを積層させることでゲル電池を作製した. ゲル電 池の模式図を図3に示す. 高塩分→陽イオン→低塩分→陰イオン→高 塩分を1セットとし,順番に3セット積層させ,両端に銅板で作製 した電極を取り付けた.ここで,ゲル電池に用いたゲルの厚みはほぼ 均一であり,異なる厚さ(約1.5,2,3 mm)ごとに3種類のゲル電池を作 製した. ゲル電池を作製後,マルチメーター(敬誠社製 AR-450)を用 いて,2分間ごとに最長30分間電圧を測定し,ゲルの厚さが電圧に 及ぼす影響について評価した.

2-3. 力学試験

ゲル化直後の4種類のゲルに対して、力学試験機(ブルックフィールド社製テスクチャーアナライザーCTX)を用いて圧縮力学試験 を行った. 直径6mm,厚さ3mmのゲルに対して、1mm/sの速度で直径 2mmの圧子を深さ2mmまで押し込み、応力-ひずみ関係、弾性率、最 大応力について評価した.



図2 ゲル電池の発電メカニズム

表1 各ゲルの成分

ゲルの種類	各成分
直 指公	NaCl(0.0877g),アクリルアミド(3.0ml),
	ビス(0.065M)
低伤公	NaCl(0.0026g),アクリルアミド(3.0ml),
低血力	ビス(0.065M)
阻イオン	AMPS(1.243g),蒸留水(0.98ml),アクリ
あイ オ イ	ルアミド(2.02ml),ビス(0.043M)
除くオン	APTAC(1.12g),蒸留水(0.32ml),アクリ
医ゴムイ	ルアミド(1.5ml),ビス(0.32M)

3. 結果と考察

3-1 電圧の時間経過

測定した電圧の時間経過を図4に示す。各ゲルの厚さが約3mmのゲル電 池において、電圧は測定開始から18分間ほぼ一定の値を示し、8分後の時 点で最大値 0.291V を示した. そして、18 分から 20 分にかけて電圧が大き く減少し、測定開始から 30 分後に 0.254V となった. 最大値と最小値の差 は0.038V である.次に,各ゲルの厚さが約2mmのゲル電池において,電圧 は測定開始から12分間はほぼ一定の値を示し、測定開始から10分後に最 大値 0.307V を示した、その後、時間と共に電圧は減少していき、30 分後 に最小値 0.275V を示した. 最大値と最小値の差は 0.032V である. 最後に, 各ゲルの厚さが約 1.5 mmのゲル電池において, 電圧は測定開始時に最大値 0.382V を示し、その後時間と共に電圧は減少していき、30 分後に最小値 0.255V を示した. 最大値と最小値の差は 0.127V である. 3 種類のゲル電池 を比較した際、各ゲル電池はいずれも時間と共に電圧が減少する傾向にあ った.これは、電池を構成するゲルが空気にさらされたことでゲルの乾燥 が進み、内部抵抗が上昇したためと考えられる.また、ゲルの乾燥が進ん だことにより、ゲルに含まれるイオン同士の結合力が強まり、イオンの移 動が抑制されたことも電圧減少の原因と考えられる. そして, 厚さが約 2 mmと約3mmのゲル電池において、電圧が緩やかに減少していたのに対し、 厚さが約 1.5 mmのゲル電池においては測定開始から時間と共に電圧が急激 に減少していた.これは、ゲルの作製方法が異なることにより、電圧の変 化に差が生じたと考えられる.各ゲル電池の電圧の最大値を比較した際, ゲルの厚さが薄いほど、高い電圧を示していた.これは、電池を構成する ゲルが薄いことにより、イオンの移動が容易となり、より高い電圧が生じ たためと考えられる.

3-2 圧縮試験

力学試験により得られた4種類のゲルの応力-ひずみ線図を図5に示 す. 圧子により各ゲルを押し込んだ際、いずれのゲルにおいてもひずみの 進行と共に応力は上昇したものの、厚さ3mmのゲルを深さ2mmまで押し込 んでも破断は生じなかった. 各ゲルの柔軟性が非常に優れていることを示 唆しており、生体内における力学的適合性も優れていると考えられる. 各 ゲルの弾性率を評価したところ、高塩分ゲルは1.1 MPa、低塩分ゲルは 1.0 MPa, 陽イオン選択性ゲルは 0.6 MPa, 陰イオン選択性ゲルは 0.5 MPa であった.塩分を含んでいる2種類のゲルが他のゲルよりも高い弾性率を 示している.これは、NaClを添加したことにより、イオン同士の結合が 強くなり、弾性率の向上に繋がったと考えられる.そして、各ゲルの最大 応力を評価したところ、高塩分ゲルは1.2 MPa、低塩分ゲルは1.5 MPa、 陽イオン選択性ゲルは 1.7 MPa、陰イオン選択性ゲルは 0.5 MPa であっ た. 塩分を含んでいるゲルはいずれも4種類のゲルの中では最大応力が高 い値を示しているものの、陽イオン選択性ゲルにおいては、ある一定のひ ずみを超えてから応力が急激に上昇し、最も高い最大応力を示している. これは、陽イオン選択性ゲルが他のゲルと比較し、高密度であったため、 ひずみの進行と共により高密度化し、応力の急激な上昇に繋がったと考え られる.



4. 結言

- ・本研究では、電気ウナギの生体組織を模倣した積層ハイドロゲル電池を開発し、それを動力源とする機械エネルギー変換シ ステムの構築を目的とし、基礎段階として、電池の高性能化及び力学特性の解明を行った。
- ・ゲルの厚さが異なる3種類のゲル電池を作製し、電圧の時間経過を測定したところ、ゲルの厚みが薄いほどより高い電圧が 生じることが示された.また、ゲルの作製方法や積層方法が電力に大きく影響することも示されており、今後は、よりゲル が薄く、高精度に積層させたゲル電池の開発を試みる予定である.さらに、得られた結果からより長時間高出力が持続する 電池の構造についても検討を行っていく予定である.
- ・厚さが約3mmの4種類のゲルに対して力学試験を行ったところ、良好な柔軟性が示され、生体内における力学的適合性の高 さが示唆された. 今後は、得られた結果から生体内におけるゲル電池の適用方法について検討を行っていく予定である.

参考文献

(1) Schroeder TBH, Guha A, et al. An electric-eel-inspired soft power source from stacked hydrogels. Nature. 2017;552:214–18.

強非線形境界要素法を用いた複数波力発電装置の挙動解析

秋田大学理工学部 平川知明

1 研究目的

持続可能な社会の実現・地方創生という観点から,波力発電(WEC)や洋上風力発電が期待されている.WEC に限らず浮体の揺動シミュレーションのために活発に研究開発されてきた計算手法の1つとして,直接境界要素 法(パネル法)がある.この方法では、3次元の問題を2次元の問題として扱い,数値的に解く連立1次方程式の 数を格段に減らすことで,方程式を速く解くことができるが,一方で,連立1次方程式を作ることに膨大な計算 時間を要するため,これが広い領域のシミュレーションの実現を妨げている.しかし,最近では,Fochesato and Dias (2006)が水面波シミュレーションにおいて,Fast multipole method によって,6022 節点の場合に6 倍程度 速く計算することに成功している.さらに,並列計算による高速化も有効な手段として考えられる.

他にも直接境界要素法の課題として、時間発展に伴い水面の補間精度が悪化することが挙げられる.補間精度を 高めるために様々な方法が提案されてきたが、確固たる方法はないように思われる (Grilli and Subramanya, 1996).

本研究の目的は,複数のWECの挙動解析を行うための,高効率で安定した浮体揺動シミュレーションプログ ラムを開発することに加え,さらには,それを用いてWECの適切な配置方法を調査することである.今年度は, 3次元水面波シミュレーションのプログラム開発および,その計算効率改善を行った.

2 境界要素法

水面波のシミュレーションのために,非粘性非圧縮渦なし流れを仮定し,速度ポテンシャルφに関するラプラ ス方程式とベルヌーイの式を解く:

$$\Delta \phi = 0,$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \nabla \phi \cdot \nabla \phi + gz + \frac{p - p_a}{\rho} = 0.$$
(1)

ただし、ラプラス方程式は、グリーンの定理 $\iiint_V (\phi \Delta G - G \Delta \phi) dV = \iint_S (\phi \nabla G - G \nabla \phi) \cdot \mathbf{n} dS$ と合わせ、 $G = 1/|\mathbf{x} - \mathbf{a}|$ として、次の境界積分方程式で置き換える.

$$c\phi\left(\mathbf{a}\right) = \iint_{S} \left(\phi\nabla G - G\nabla\phi\right) \cdot \mathbf{n}dS.$$
(2)

滑らかな境界面では定数は $c = -2\pi$ となる.境界面 S を、ディリクレ、ノイマンの境界条件別に分割した後、それら各境界面をさらに細かく要素で分割する.要素とは、境界面上のいくつかの節点からなるパラメトリック補間のことで、(2)の境界積分方程式は、この補間を適用することで離散化できる.例えば、境界 i の要素 j において節点が格子状に与えられており、各節点 k における速度ポテンシャルを $\phi^{(i,j,\mathbf{k})}$ とすると、パラメトリック補間 $\phi^{(i,j)}(\xi,\eta)$ は次のように表すことができる.

$$\phi^{(i,j)}(\xi,\eta) = \sum_{k_1=0} \sum_{k_2=0} \phi^{(i,j,\mathbf{k})} N^{(i,j,\mathbf{k})}(\xi,\eta).$$
(3)

ここでの N は形状関数である.これまでの研究では,比較的少ない数の節点からなる補間が用いられてきた.こ の方法は,補間に費やす計算コストが安く済むが,一方で,補間端点が境界面上に無数に存在することになるた め,境界面の補間精度が悪化する可能性がある.そこで,本研究では,Bスプラインを用いて,できる限り補間 の端点ができないように境界面を補間し,これに伴う計算コスト増加は,OpenMP による並列計算と数値積分の 効率を向上させることで抑えることにした.

ある変数 *s* の (ξ, η) のパラメトリック補間は, B スプライン基底 *B* を用いて次式のようにテンソル積で表される. 2 重和の上限はサンプル点の数で決まり, B スプライン基底の次数 *K*, *J* は任意に決めることができる.

$$s(\xi,\eta) = \sum_{k_1=1} \sum_{k_2=1} a_{k_1,k_2} B_{k_1,K}(\xi) B_{k_2,J}(\eta).$$
(4)

係数 a_{i,j} は,与えられた境界面上の節点の情報から,ステップ毎に計算する.

3 計算効率改善の結果と考察

3.1 並列計算

(2)の**a**を各節点の位置として1次方程式を作成していくことで,問題を解くのに十分な大きさの連立1次方程 式を得ることができる.並列化はこの異なる節点位置**a**に関して行う.

境界面を水底と水面に分け、全節点数が 3200, 1800 の場合の、並列計算の効率を調べた(図 1(a)).スレッド数が 20 以下の場合は、OpenMP による計算時間の短縮率は $c^{-3/4}$ で近似できる(AMD Ryzen Threadripper 2970WX 24-Core Processor を使用). つまり、スレッド数が 20 あれば、シングルスレッドの場合と比べて約 1/10 の時間で計算できる.また、全節点数 n が大きい、大規模な計算になる程、並列計算の効率は良くなる.しかし、スレッド数が 20 を過ぎると時間短縮は鈍化する傾向があり、さらに効率を上げるには、数値積分や補間の効率化が必要と考えられる.



図 1: OpenMP による計算時間の短縮率.シングルスレッドの計算時間を t₁,スレッド数 c の計算時間を t_c とする.

3.2 数值積分

パラメトリック補間のパラメタ (ξ , η) の範囲は, 簡単のために $-1 \le \xi \le 1$, $-1 \le \eta \le 1$ として,数値積分には ガウスルジャンドル求積を用いる.例えば, $G \circ \eta$ に関する積分は,次のようにガウス点 { $\eta_0, \eta_1, ..., \eta_N$ } とそこ での重み { $w_0, w_1, ..., w_N$ } を使って計算する.

$$\int_{-1}^{1} G(\eta) \, d\eta = \sum_{i=0}^{N} G(\eta_i) \, w_i \tag{5}$$

積分される関数の特異点付近で,ガウス点を密に取るように変数変換すれば積分精度は向上するので,次のよう に変数変換する.ここでβはガウス点の集中度合を調整するパラメタになっている.

$$\eta = f(u) = \eta_{\text{sig}} + \text{sgn}(u) |u|^{\beta}, \quad u = f^{-1}(\eta) = \text{sgn}(\eta - \eta_{\text{sig}}) |\eta - \eta_{\text{sig}}|^{1/\beta}.$$
 (6)

まず, $f^{-1}(\eta = -1) \le u \le f^{-1}(\eta = 1)$ でガウス点 $\{u_0, u_1, ..., u_N\}$ とその重み $\{w_0, w_1, ..., w_N\}$ を計算し, 次に, $\eta = f(u)$ を使って, ガウス点は η 空間に戻し, 重みには df(u)/du をかける.

$$\int_{u=f^{-1}(-1)}^{u=f^{-1}(1)} G(f(u)) \frac{df(u)}{du} du = \sum_{i=0}^{N} G(f(u_i)) \frac{df(u)}{du} w_i$$
(7)

表 1, 2 は,以上の方法による, $\int_0^1 \log(x) dx + 1 \ge \int_0^1 x^{-1/2} dx - 2$ の数値積分結果である.ガウス点の集中度を 表す β が大きくなるにつれて,積分される関数の特異的な変化を捉えられるようになり,積分精度が向上してい ることがわかる.特に, $\int_0^1 x^{-1/2} dx - 2$ の場合は,積分される関数が冪関数なので, β が 2 の倍数で特異性がな くなる.

以上の方法で数値シミュレーションした例が表 3.2 である.時間発展は 4 次のルンゲクッタを用いて,流体粒子 は Mixed Euler-Lagrange(MEL)を使った.また,数値積分におけるガウス点は 40 点, β は 2.0 に設定した.

	表	1: $\int_{0}^{1} \log(x)$	dx + 1 = 0			
		- 0		β		
number of Gauss points	1	1.5	2.0	2.5	3.5	4.0
20	1.50e-03	-1.86e-04	-5.70e-06	8.21e-07	-6.59e-09	-4.68e-10
30	6.79e-04	-6.28e-05	-1.16e-06	1.28e-07	-4.70e-10	-1.93e-11
40	3.85e-04	-2.88e-05	-3.74e-07	3.36e-08	-7.07e-11	-1.99e-12
	表 2: $\int_0^1 dx$	$x^{-1/2}dx - 2$	$= \left[2\sqrt{x}\right]_0^1 -$	$2 = 0$ β		
number of Gauss points	1	1.5	2.0	2.5	3.5	4.0
20	-4.25e-02	-4.12e-03	-4.44e-15	1.25e-04	5.53e-06	-4.00e-15
30	-2.85e-02	-2.27e-03	-6.22e-15	4.64 e- 05	1.38e-06	-6.66e-15
40	-2.15e-02	-1.48e-03	-1.82e-14	2.28e-05	5.10e-07	-1.80e-14
	0.5 0 y	I	(0. 0. -0. -(
(a) $t = 0.0$ (s)			0.0 0.0 0 0.0		(b) $t = 0$.	3 (s)

1

1

(d) t = 1.3 (s)

(c) t = 0.9 (s)

図 2: 3次元水面波シミュレーションの計算結果例

4 今後の課題

今年度は、3次元水面波のシミュレーションのプログラム開発および、並列計算と数値積分改善によるプログ ラムの効率化を行ったが、数値積分や補間の改善と調査がさらに必要である.また今後は、浮体の境界面を作成 し、その境界を浮体の運動方程式に従って平行移動・回転させるようプログラムを改良する必要がある.

5 成果報告

なし

参考文献

Fochesato, C. and F. Dias, 2006: A fast method for nonlinear three-dimensional free-surface waves. *Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, **462**(2073), 2715–2735.

Grilli, S. T. and R. Subramanya, 1996: Numerical modeling of wave breaking induced by fixed or moving boundaries. *Comput. Mech.*, **17**(6), 374–391.

低コストかつ高効率の潮流発電装置の開発研究

長崎大学海洋未来イノベーション機構 経塚雄策

1. はじめに

潮流発電は世界的には着実な発展を遂げている。特に、 スコットランドで実施中のMeyGen Project のPhase 1a においては、1.5MWの潮流発電装置4機が稼働率40%以上 の実績を上げており、商業発電も可能なレベルに到達し ていると伝えられている。潮流発電の大きな魅力は予測 可能であるということであり、我国においても電力会社 を含めて潮流発電への関心は高い。一方、我国は島嶼国で あり、多くの離島においては主としてディーゼル発電に よって電力を確保している現状があるが、離島は当然海 に囲まれており場所を選べば一定以上の流速の潮流が存 在する場合がある。そこではメガワット級の潮流発電は可 能であると考えられる。

そのような観点から、本研究では低流速潮流中におい ても使用可能な高効率な大型ディフューザー付きの潮流 発電装置と低コストを実現するために設置工事費および メンテナンス費を最少化する浮沈式潮流発電システムの 開発を実施してきた。このシステムの成立性を検証する ために水槽における模型実験および長崎県五島市の奈留 瀬戸において実施を計画している小型装置(定格出力 5kW)による実海域実験の準備状況について報告する。

2. 大型ディフューザー付きタービンの発電性能 2.1 最適設計によるタービンシステム

低速潮流中で発電可能な潮流発電装置として、風車に おいて既に実用化されている「レンズ技術」を導入し た。ただし、風車との大きな違いは、浮沈式潮流発電装 置の場合はディフューザーの肉厚を大きくすることによ って浮力を大きくし、海中では浮くようにできることで ある。最適化設計手法としては、VKI(Von Karman Institute for Fluid Dynamics)で開発された2レベルタイ プの最適化システムを用い、周速比え=2.0とえ=4.0にお けるパワー係数とし、これを最大化する問題を解いた。 設計パラメータは、タービンブレードに関するもの11

(ただし、翼断面はNACA4616)、ディフューザー形状 に関するもの4とし、一定条件下における15パラメータ を最適化した。

Fig.1が、このようにして決定された最適タービンお よびディフューザーである。ディフューザーの最大直径/ 最小直径の比は1.64となった。

2.2 模型実験結果

上記で求められた最適タービンについて、模型実験を 行った。Fig.2は、回流水槽に設置されたタービン直径 0.3m模型の写真である。実験では、流速を0.5, 0.7, 0.9m/sの3通りに変えて、それぞれの場合の回転トルク を測定し、タービン直径を用いて無次元化したパワー係



Fig.1 Optimized blade and shroud



Fig.2 Model setup in the circulating water channel



Fig.3 Power coefficient obtained by the model experiments in the circulating water channel

数を求めた。それらの実験結果をFig.3に示す。この結 果をみると、流速の違いによるパワー係数への影響はご くわずかであり、ほぼ同じ曲線に重なっていることがわ かる。ディフューザー付きのパワー係数の最高値はんが 3でCp=1.2位であることが分かった。この値について は、タービン単独の最高Cpが通常0.4ほどであるので、 このディフューザー効果により約3倍の効率になったと 言える。

3. 実海域実験模型

本実証実験用に定格出力5kWの小型装置を製作した。 タービンは直径0.64m、ディフューザーの最大直径は 1.047mとした。発電機は、風力発電用のアウターロータ 型永久磁石発電機で極数は56のものを用いた。この発電 機の定格回転数は600 rpmである。タービンブレードお よびボスはアルミ合金を用いて、NCマシーンで製作し た。ディフューザーについては、ステンレスの薄板 (3mm)で作り、外側に発泡スチロールを張り付けて厚く し、表面はFRPで整形した。ディフューザーを厚くする ことによる浮力増加は約100kgWと見積もられる。

Fig. 4は、回流水槽において実海域実験用装置の発電 性能を調べるために行った実験時の写真である。この実 験によって、パワコンの調整を行った。流速が1m/sまで の低流速での実験しかできなかったが、所要の発電性能 を確認した。

これらの実験結果を考慮して、発泡スチロールの厚さ と長さを変えて浮心位置を調整した。Fig. 5は、実海域 への設置直前の潮流発電装置の写真である。装置から出 て係留ロープ経由で陸上のパワコンに結線されるパワー ケーブルおよびコネクターの状況が見て取れる。

4 実海域実験計画

設置海域における潮流の特性を考慮して、実海域におけるアンカーをFig.6のように配置する。すなわち、上 潮時の平均流向は北西方向312°であり、下潮時は南方 向186°であるので、2組のアンカーをそれらの角度に合 わせて配置する。

本潮流発電システムは浮沈式で、憩流時には水面に浮 上する計画であったが、地元の漁協からの要請で憩流時 にも水面下3m以下に留めるようにした。ロープ係留の具 体案はFig.7のように、中間シンカーを用いる。

実海域実験では、流速、波浪、発電量、浮体深度、方 位角、トリム角、ヒール角および水温・ナセル内気温な どを計測する予定である。これらのうち実時間でモニタ ーするのは発電量のみで、その他についてはナセル内に 小型データロガーを用いて記録し、実験終了後に回収す る。発電量については、LTEを用いて遠隔地からモニタ ーする。

5. まとめ

現在進行中の浮沈式潮流発電システムの研究開発に関 して、近日中に実施予定の実海域実験の準備状況につい て報告した。実海域における潮流発電の実証は実用化の ためには不可欠なプロセスであり、本装置により目標の 1kWの発電を達成して次の段階に進めることを期待して いる。

発表論文リスト

Y. Kyozuka, D. Sakaguchi, M. Sueyoshi and C. Hu : A floating/submersible shrouded tidal current turbine system applicable in low speed tidal flow, 13th European Wave and Tidal Energy Conference, Napoli, 1st-6th September 2019

研究組織

研究代表者	経塚雄策
研究協力者	坂口大作、永滝拓己(M1)
所内世話人	胡長洪



Fig. 4 Demonstration generator in the circulating water channel



Fig.5 The demonstration power generator just before the installation



Fig.6 Anchor laying plan at the test site



Fig.7 Mooring line plan for demonstration test

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は比較的効率が高く、最近多くの研究が行われている.しかし、アームの影響は十分には 調べられていない.本研究グループでは、昨年度までに垂直軸風車におけるアームの影響を圧力抗力と摩擦抗力 の寄与に分解して詳しく調べたが、回転軸が鉛直方向を向いた状態を仮定していた.従来研究では、垂直軸風車 の回転軸傾斜によって出力が増加することや後流回復が早まることが知られているが、その場合のアームの影響 は調べられていない.本研究では、垂直軸風車が傾斜した場合の後流に対するアームの影響を数値解析によって 明らかにすることを目的として、数値流体力学(CFD: Computational Fluid Dynamics)解析を行った.

2. 方法

本研究では、デルフト工科大学の実験機である2枚翼H型ダリウス風車(DU-H2-5075)を計算対象とした(図1). 直線翼の翼型はNACA0018であり、翼弦長 c=0.08 m, ロータ直径 D=0.75 m, 翼スパン H=0.5 m である.計算 モデルとして設定したアームの断面形状はNACA0018 であり、アーム弦長は0.04 m とした.風車回転軸は主流 (x 方向)と平行な x-z 平面内で傾斜させた. ζ =0°, 10°, 25°の3つの傾斜角で計算を行ったが、本報告では主とし て ζ =25°の場合を示す.計算ソルバーはSTAR-CCM+を使用し、3次元・非定常・非圧縮の流れ場を仮定したレ イノルズ平均ナビエ - ストークス方程式と連続式を解いた.なお、乱流モデルはSST k- ω を用いている.計算領 域全体は、直径 48D、長さ 64D の円柱体積内であり、流入境界より 24D の位置に風車ロータモデルの中心を置い ている.生成した計算格子は非構造格子のポリヘドラルメッシュであり、アーム有りのモデルの総セル数は約 1112 万であった.主流風速はU=7 m/s、先端周速比は λ =3 (回転数:535 pm)とした.ロータ直径に基づくレイ ノルズ数は、Re=3.5×10⁵である.本研究では、風車ロータが6回転から7回転する間の1回転分の流れ場全体 における速度ベクトルの各成分について(時間)平均を行い、平均速度場を計算した.

3. 主な結果と考察

図2は、Q値の等値面($Q = 200 \text{ s}^2$)を用いて、傾斜角 $\zeta = 25^\circ$ の場合の渦放出の様子を示している. (a)はアーム無し、(b)はアーム有りの場合である.アームが存在する場合は、翼とアームの接続部近傍からも多くの渦が発生し、流れ場が複雑になっている.

図3は、傾斜角ζ=25°において、ロータ下端近くから試験粒子を流した場合の流跡線の様子である。初期位置 としてx=0m, z=-0.2m, y=-0.375m ~ 0.375mの範囲で直線状に50個の試験粒子を配置し、計算した平均速 度場に従って仮想的に流した結果である。ロータから十分に離れた後流において、アーム無しの場合は全ての試 験粒子がロータの中央断面を越えて上側領域にまで流れているが、アーム有りの場合は上側領域まで流入して



 F_{IOV} (a) アーム無し (b) アーム有り 図2 ζ=25°の場合の渦放出 (Q値等値面; Q=200 s²) いる試験粒子数は約半分程度である.

ロータ後方に主流方向と垂直に、*D*×*H*の大きさの仮想的断面を複数設置し、各断面における(時間)平均速度場の*x*成分(*u*_a)の分布を求めた.その一部の例(ζ=25°の場合)を図4に示す.図4から、軸傾斜がある場合の後流は上下非対称な速度分布になっていることがわかる.また、アームがある場合には、ロータ近傍の後流において、断面の上半分の速度がアーム無しの場合に比べて遅くなっている.

図5はζ=0°と25°の場合の各断面の(時間)平均速度場を,さらに断面内で平均した(空間)平均速度 uaveのx方向 変化を示している.図5から軸傾斜無しではアームの有無で後流の平均速度場に大きな差は無いことがわかる. 一方,軸傾斜が25°の場合はアームの存在によって後流の速度は減少することがわかる.明らかに,ロータ近傍 の後流においては,軸傾斜無しに比べて,軸傾斜がある場合の平均速度場の回復が早い.ただし,ロータから離 れた後流では,アーム有りで傾斜している場合は,その他の場合に比べて,後流回復が遅れる傾向がみられる.



【成果報告】

吉田茂雄

所内世話人

(1) Yutaka Hara, Naoki Horita, Shigeo Yoshida, Hiromichi Akimoto, Takahiro Sumi, Numerical Analysis of Effects of Arms with Different Cross-Sections on Straight-Bladed Vertical Axis Wind Turbine, Energies, 12(11), 2106, 2019.6.1, published, https://www.mdpi.com/1996-1073/12/11/2106

教授

九州大学応用力学研究所

- (2) 原 豊, 堀田直希, 吉田茂雄, 秋元博路, 住隆博, 直線翼垂直軸風車への異形断面アームの影響に関する数値 解析, RIAM フォーラム, 2019.6.6-7, 九州大学応用力学研究所
- (3) 原 豊,小泉丈太郎,吉田茂雄,住 隆博,秋元博路,回転軸が傾斜した直線翼垂直軸風車の後流に対するアームの影響の数値解析,日本機械学会第97期流体工学部門講演会, OS4-02,2019.11.7-8,豊橋
- (4) 宮下礼人,原 豊,吉田茂雄,住 隆博,秋元博路,軸傾斜のある直線翼垂直軸風車の後流平均場へのアームの影響,日本機械学会中国四国学生会第50回学生員卒業研究発表講演会,04b2,2020.3.5,広島大学

機械式過回転抑制機構による低コストバタフライ風車の開発研究

鳥取大学 工学部機械物理系学科 原 豊

1. はじめに

本研究グループは、小形風力発電の低コスト化と普及を目標として、これまでに機械式過回転抑制機構を持った7m直径のバタフライ風車の試作を行った.さらなる低コスト化と年平均風速3.5m/s程度の低風速地域への導入を可能とするため、図1に示すような、直径14mのバタフライ風車の開発を開始した.本報告では、14m級風車の翼型選定について実施した数値流体力学 (CFD: Computational Fluid Dynamics) 解析の結果を報告する.

2. 方法

図2に本研究で計算対象とした翼型形状を示す. (a)の NACA 0018 は7 m 風車で採用した厚み比 18%の対称翼 であり、ダリウス型垂直軸風車では良く使用される翼型である. しかし、14 m 級風車では翼の構造的強度を高め る必要から、当初、厚み比が 24% である(b)の NACA 0024 を採用する予定でいた. しかし、抗力増加による性能 低下が懸念されたため、デルフト工科大学が垂直軸風車用に開発した翼型(DU 06-W-200)の厚み比を 24%まで増 した(c)の DU_06-W-240、それを上下反転した(d)の DU_06-W-240 で下面を上下両面に採用 した新規の翼型(e) New_AF_1_UP, および DU_06-W-240 の下面を上下両面に採用した新規の翼型(f) New_AF_2_DN、以上の 6 つの翼型について、空力特性予測を行った. CFD 解析は STAR-CCM+を使用し、最初 に単一翼型を固定した 2 次元計算によって空力特性(揚力係数: C_b ,抗力係数: C_d ,モーメント係数: C_m)を、迎角 $a=5^\circ$ 、 $Re=3.6\times10^5$ の条件で算出した. この計算における翼弦長はc=1 m、力の作用点は 25% c を仮定した. そ の後に、直径 D=14 m、翼弦長 c=350 mm の翼 3 枚を有する実機サイズの 2 次元ロータを仮定して、風速 6 m/s の条件で出力予想を実施した. この計算においては翼の取付位置は 50% c を仮定した.

3. 主な結果と考察

表1に CFD 解析によって得られた単一翼型の空力特性を示す. 揚抗比 C₁/C_dは DU_06-W-240 が最も高く, 2 番目に NACA 0018 が高い. 対象翼かつ厚み比 24%の条件を付けるならば, New_AF_1_UP が最も高い揚抗比を示している.

図3は実機サイズの3枚翼2次元ロータの1つの翼が1回転する間のトルクの変化を示す.計算条件は先端周速比 λ =5 である.この計算では、表1で示した揚抗比が相対的に低くなった新規の翼型New_AF_2_DN は除外した.図3に示されるように、対称翼のNACA 0018、NACA 0024、New_AF_1_UPは、ロータの下流側(180°~360°)においてほぼ同様のトルク変化を示し、上流側(0°~180°)において差が生じている.非対称翼のDU_06-W-240



(a) NACA 0018 (b) NACA 0024 (c) DU_06-W-240 (d) DU_06-W-240_reverse (e) New_AF_1_UP (f) New_AF_2_DN

図1 14m級バタフライ風車

図2 計算対象とした翼型の形状

Airfoil	C_1	$C_{\rm d}$	$C_{\rm l}/C_{\rm d}$	$C_{ m m}$
NACA 0018	0.503	0.018	27.7	0.0043
NACA 0024	0.423	0.022	19.6	0.017
DU_06-W-240	0.594	0.021	28.2	-0.018
DU_06-W-240_reverse	0.493	0.026	18.8	-0.28
New_AF_1_UP	0.509	0.021	24.7	-0.015
New_AF_2_DN	0.570	0.026	21.7	-0.54

表1 各翼型の空力特性 (α =5°, Re=3.6 ×10⁵)



図3 2次元ロータ(D=14m)の1翼トルクの変化



のトルクは,他の翼型に比べて,上流側では小さく,下流側では大きい.一方,DU_06-W-240_reverse は,上流 側では大きく,下流側で小さくなっている.

図4の風速6m/sで計算したロータ出力特性を見ると、NACA 0018 がもっとも高い出力係数 C_p を示しているが、 垂直軸風車に適する対称翼であり、かつ構造的強度が高い厚み比 24%の翼型の中では、New_AF_1_UP が最も高 い出力係数($C_p = 0.399, \lambda = 5$)を示している.以上より、本研究で考案した新規翼型 New_AF_1_UP は、14 m 級バ タフライ風車の翼型の第1 候補と考えられる.

【研究組織】

原 豊	代表者	鳥取大学	教授
田川公太朗	協力者	鳥取大学	准教授
小野勇一	協力者	鳥取大学	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) 原 豊,田川公太朗,斎藤栄徳,塩谷啓介,小野 猛,牧野健治,戸羽一敏,廣林孝一,田中陽助,高島主男, 佐々木 進,野嶋賢吾,吉田茂雄,機械式過回転抑制機構を持った7m直径バタフライ風車の開発,第23回日本 流体力学会中四国・九州支部講演会,2019.6.1-2,山口大学吉田キャンパス,大学会館
- (2) 安道緋呂, 原 豊, 三浦卓也, 吉田茂雄, 直径 14m 垂直軸風車の翼型選定とロータ性能評価, 日本機械学会中 国四国学生会第 50 回学生員卒業研究発表講演会, 04b2, 2020.3.5, 広島大学

アジア域の化学輸送モデルの現状と今後の展開に関する研究集会

電力中央研究所 板橋秀一

1. 目的

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

2. 研究集会の概要

場所 九州大学応用力学研究所 ₩601 多目的研究交流室 日時 令和2年2月21日 13:30-17:15、 22日9:00-12:00

3. 研究成果

研究集会では、国内の化学輸送モデルを用いた大気環境モデリングに関わる幅広い専門家が数多く 集まり、12題の講演発表があった。関係者を含めると21名の参加があった。2日間の研究集会の 内容としては、「モデル研究と連携する野外観測」、「大気汚染質の排出量の推計とソースリセプター解 析」、「領域化学輸送モデルを用いた越境大気汚染の現状と問題点」、「2020-2050年に向けての大気観測 とモデリングの展望」などの最新の成果の報告され、本研究会が化学輸送モデルを用いた大気環境モ デリングのコミュニテイにおいて大きな貢献を果たしていくことが確認された

以下に研究集会のプログラムを掲載する。

資料1

「アジア域の化学輸送モデルの現状と今後の展開に関する研究集会」 日時 2020年2月21日(金)午後~22日(土)午前 場所 九州大学応用力学研究所 多目的研究交流室W601
- 21日(金)午後
- 13:30 趣旨説明 鵜野 伊津志 (九州大学応用力学研究所)
- 13:40 櫻井 達也 (明星大学)

AIS を用いた船舶起源排出量算定と観測に基づく不確実性評価 14:05 嶋寺 光 (大阪大学)

瀬戸内地域の気象・排出特性が大気汚染に及ぼす影響の評価 14:30 山地 一代(神戸大学)

WRF/CMAQ を用いた広域大気質濃度の評価

14:55-15:25 休憩

15:25 永島 達也 (国立環境研究所)

日本における気温と地表オゾン濃度の相関

- 15:50 板橋 秀一 (電力中央研究所)
 - CMAQ による成層圏オゾンモデリング:現状と課題
- 16:15 菅田 誠治 (国立環境研究所)
 - 大気汚染シミュレーション支援システムの開発について
- 16:40 早崎 将光 (日本自動車研究所)

ドローンを用いた気温逆転層形成時の大気汚染物質の鉛直分布観測

- 22日(土)午前
- 9:00 斎藤 正彦(愛媛大学)
 - 関東地方における冬季 PM2.5 のプロセス解析
- 9:25 茶谷 聡(国立環境研究所)

PM2.5成分自動測定結果に対するモデル再現性の相互比較と発生源影響評価

- 9:50 浦西 克維(大阪大学/奈良県くらし創造部景観・環境局) 中国東北部のバイオマス燃焼由来の PM_{2.5}越境汚染に関する大気質モデル解析-2019 年 3 月 北海道における PM_{2.5}高濃度汚染事例-
- 10:15-10:30 休憩
- 10:30 森野 悠 (国立環境研究所)

数値モデル・室内実験・大気観測に基づく有機エアロゾルの発生源解析

10:55 鵜野 伊津志 (九州大学応用力学研究所)

最近の PM2.5 の年々変化とパラダイム・シフトの可能性

11:25-12:00 議論

(研究集会)

非線形波動研究の多様性

研究代表者 津田塾大学学芸学部情報科学科 永井 敦

研究集会の目的

本研究集会のタイトルである非線形波動の研究は、流体現象の研究を源とし、幅広い分野との関連を 通して、現在の社会基盤を支える重要な研究分野に発展している.数理科学、物理学、工学などの幅広 い分野の研究者間の連携、実験的手法と理論的手法の融合による研究の多様性は本研究の大きな特色で あり、その研究対象は海洋や大気の流れなどの地球環境分野にとどまらず、生命、渋滞などの社会現象 や情報科学のアルゴリズムやオートマトンなど幅広い分野に拡がり、今なお発展し続けている.

本研究集会では非線形波動およびその周辺分野から、現象論やその背後の数理構造、そして工学や生 命科学等周辺分野への応用などに関する研究成果発表を幅広く募る.各分野における最先端研究から発 展が期待される萌芽的研究について積極的な議論を通して、非線形波動研究のより一層の発展を目指す. 2017 年度に応用力学研究所で開催された研究集会「非線形波動研究の新潮流 一理論とその応用 一」に 引き続き,研究集会が「非線形波動」をとりまく様々な分野の研究者が互いの情報を交換し,個々の研 究の最前線を理解することで問題意識を共有するとともに,更なる発展や新しい展開を生み出す場とな るようにしたい.本研究集会の趣旨である,異分野の相互作用による研究の促進のためには、共同利用 研究拠点である応用力学研究所での研究会開催がふさわしい.

なお、本研究集会は日本応用数理学会応用可積分系研究部会との共催であった。

成果の概要

本研究集会は、令和元年10月31日から11月2日までの3日間にわたり九州大学筑紫地区筑紫ホール (C-Cube1階) にて開催され、特別講演3件と一般講演27件(口頭発表13件およびポスター発表14件)が行われた。

特別講演では3名の講演者を選定して依頼を行った。まず、数理および生命に関する話題として、

- 血管新生の数理モデル
- 次に、海洋波に関する話題として、
 - 海洋における波群の形成 ~海洋波は非線形か?~

さらに、渋滞学に関する話題として、

• 可積分系から渋滞学へ ~基礎から応用、そして社会実践へ~

という講演が行われた。これら特別講演の内容は、非線形現象の数理的手法の発展が従来の分野にとど まらず,生命科学・海洋波・渋滞への啓蒙活動など幅広い分野に応用できることを示すものであり、非 線形波動研究の「多様性」を象徴する興味深い内容であった。

ポスターセッションを含む一般講演においては、非線形波動に関連する連続から離散そして超離散の 非線形可積分系を主な対象として、方程式のソリトン解やその非可換化、代数幾何解、超幾何関数解、 セルオートマトンや確率的セルオートマトン、max(min)-plus 代数とその応用、可積分系に関連する各 種数値計算アルゴリズムに関する話題まで、非線形波動研究の多様性を裏付ける内容の報告が行われた。 また、講演後においても分野の垣根を越えた活発な議論が交わされ、さらなる研究の進展が期待される。

本研究集会は、物理・数学の話題から工学・情報科学への応用に至る幅広いテーマを扱うこと、3件の 招待講演を除き、講演やポスター発表は公募によるもので自由に発表できることが大きな特色である。 全体を通して、幅広い分野での最先端の研究について、多角的な視点から議論することで、非線形波動 研究の新しい動向を見いだすという当初の目的は達成できたものと思われる。

非線形波動に関連する研究集会は 1997 年から始まり,2019 年度まで 20 回に渡り開催されてきた。

- 1. 1997年 ソリトン理論の新展開(研究代表者:薩摩順吉)
- 2. 1998 年 ソリトン理論の新展開(研究代表者:渡辺慎介)
- 3. 1999 年 非線形波動のメカニズム(研究代表者:高橋大輔)
- 4. 2001 年 非線形波動現象の理論と応用(研究代表者:高橋大輔)
- 5. 2002 年 非線形波動に関する最近の話題(研究代表者:時弘哲治)

- 6. 2003 年 非線形波動の数理と応用(研究代表者:松木平淳太)
- 7. 2004 年 非線形波動の物理と数理構造(研究代表者:梶原健司)
- 8. 2005 年 非線形波動および非線形力学形の現象と数理(研究代表者:梶原健司)
- 9. 2006 年 非線形波動現象における基礎理論、数理計算および実験のクロスオーバー(研究代表者: 西成活裕)
- 10. 2007 年 戸田格子 40 周年(研究代表者:西成活裕)
- 11. 2008 年 非線形波動の数理と物理(研究代表者:矢嶋徹)
- 12. 2009 年 非線形波動研究の現状と将来(研究代表者:矢嶋徹)
- 13. 2010年 非線形波動研究の新たな展開(研究代表者: 筧三郎)
- 14. 2011 年 非線形波動研究の進展(研究代表者: 筧三郎)
- 15. 2012 年 非線形波動研究の最前線(研究代表者:太田泰弘)
- 16. 2013 年 非線形波動研究の拡がり(研究代表者: 増田哲)
- 17. 2014 年 非線形波動研究の現状(研究代表者: 増田哲)
- 18. 2016年 非線形波動研究の深化と展開(研究代表者:辻本諭)
- 19. 2017 年 非線形波動研究の新潮流(研究代表者:辻本諭)
- 20. 2019年 非線形波動研究の多様性(研究代表者:永井敦)

「非線形波動」研究のような、様々なテーマが密接に関連しあう分野では、本研究集会のような場の存在 が極めて重要である。本共同利用研究集会を長期にわたり実現させていただいた九州大学応用力学研究 所に対して、参加者を代表して深く感謝申し上げたい。

講演概要

10月31日(木)

自己適合移動格子スキームの境界条件

丸野健一(早大基幹理工)

自己適合移動格子スキームを用いた数値計算においては境界条件の取り扱いが難しく,周期境界条件での数値計算がこれまでできていなかった.講演では周期境界条件での自己適合移動格子スキームを用いた数値計算について報告する.

確率的な周期的一次元離散粒子系の漸近的ふるまいについての分解予想 大橋 遼 (東大数理)

+分大きなサイズの確率的な1次元セルオートマトンについて、ある局所的な状態が現れる確率は、よ り局所的な状態についての確率の積として分解できるという著しい性質が発見されている(分解予想)。 本公演では、この分解予想をサポートするいくつかの周辺的な事実について紹介いたします。

max 型拡散セル・オートマトンのチューリング不安定性解析 村田 実貴生 (東農工大工)

反応拡散現象を表す基本的なセル・オートマトンとして,発表者は「max 型拡散セル・オートマトン」 を提案した.今発表では,max 型拡散セル・オートマトンにおけるチューリング不安定性の定義を与え, max 型拡散セル・オートマトンのチューリング不安定性解析を行う.また,反応拡散方程式のチューリ ング不安定性との共通点や相違点について考察する.

オペレーター形式での非可換ソリトン

浜中 真志 (名大多元数理)

非可換空間上の可積分系の定式化にはスター積を用いる記述とオペレータを用いる記述がある。非可換

空間では一般に特異点の解消が起こり非可換空間特有のソリトンが存在する。オペレーター形式は特異 点の記述に優れている。この発表ではゲージ理論における非可換可積分系を題材としてオペレータ形式 でのソリトン解を構成する。特にシフトオペレーターを用いた解生成法や特異点除去法を議論する。

KP 方程式の代数幾何解の退化について

中屋敷 厚 (津田塾大数学)

KP 方程式のテータ関数解の極限の計算は興味深い問題と考えられる。この講演では、(3,s) 曲線と呼ば れる曲線を例にとり、佐藤グラスマンを用いると、テータ関数解の種数0の解(ソリトン解、有理解) への退化だけでなく種数正の解への退化も比較的簡単に計算できることを示す。

[特別講演] 血管新生の数理モデル

時弘哲治(東大数理)

血管新生(Angiogenesis)は、既存の血管網から新しい血管が出現し新たに血管網を構成する形態形成 現象である。怪我による治癒過程だけでなく、悪性新生物の増殖や転移に深くかかわっており、この現 象の理解は医学的に重要な課題である。数年前に、東京大学医学部の栗原裕基らの研究により、血管新 生における血管内皮細胞の動態が従来考えられているものとは全く異なり、セルミキシングと呼ばれる 混合現象など、複雑な挙動を示すことが分かった。今回の講演では、最近我々のグループで提案したこ の内皮細胞運動の1次元および2次元の数理モデルについて説明する。比較的簡単な2体相互作用のみ で複雑なパターン形成を生じ、栗原らの in vitro の実験結果を定性的に再現することを示す。

11月1日(金)

交通流を記述する非線形離散モデルであるルール 184FCA の超離散解析 ○東康平 (東大数理)、薩摩順吉 (東大数理)、時弘哲治 (東大数理)

交通流を記述する FCA モデルを提案した。これは、適切な極限のもとで、Burgers 方程式とルール 184CA の発展方程式に帰着する。本講演では、このモデルの基本図が 2 次元的な領域となり、その領域内の各 点で安定であることを示す。また、任意の初期条件のもとで、超離散化されたシステムの解は、有限時 間で定常解に収束することを示す。

BKP 方程式のソリトン解の分類

○田中悠太 (早大基幹理工)、丸野健一 (早大基幹理工)、児玉裕治 (オハイオ州立大)

BKP 方程式は Gram 型 Pfaffian 表示のソリトン解を持つ.本講演では Gram 型 Pfaffian 表示のソリトン解に対して Cauchy-Binet の公式の Pfaffian 類似の公式が適用できる行列表示を与え,その表示を用いてソリトン解を分類する方法について解説する.

準結晶モデルとフラクタル幾何学

高橋悠樹 (東北大材料科学研)

二次元の準結晶モデルのスペクトルとして、カントル集合の和や積が自然に現れることが知られている。 この講演では、準結晶モデルとそれに関連するフラクタル幾何学の諸問題について話す。

q 超幾何方程式の変異版と q ホイン方程式

波多野 修也 (中央大理工)、松縄 竜弥 (中央大理工)、佐藤 智輝 (中央大理工)、〇竹村 剛一 (お茶の水女 大基幹)

ホインの微分方程式の q 差分版として q ホイン方程式を導入する。そして、 q ホイン方程式の特別な 場合として、q 超幾何方程式の変異版を導入する。変異版 q 超幾何方程式の超幾何的な解をいくつか得 たので、これの表示式を与える。

A⁽¹⁾_N 型ミューテーションの可積分性について ○野邊厚 (千葉大教育)、松木平淳太 (龍谷大理工) A⁽¹⁾ 型のクイバーミューテーションから得られる N + 1 次元双有理写像力学系の保存量を具体的に求め ることで系の可積分性を示す。

[特別講演] 海洋における波群の形成 ~海洋波は非線形か?~ 早稲田 卓爾 (東大新領域創成)

外洋に突発的に表れるフリーク波の研究により、海洋には波群が形成され、その発達が非線形シュレー ディンガー方程式(NLS)の解に類似することがわかった。一方、現実的な海洋波の方向スペクトルは 広く、NLSの適用範囲を超えていること、空間2次元のNLSには安定した孤立波群解が存在しないこ とが指摘されている。しかしながら、最近の講演者らの研究成果から、海洋波のスペクトルは気象条件 によりその形状が時々刻々変化し、フリーク波の起きやすい条件下では非対称で長時間持続的に存在す る非線形波群が形成されることがわかった。また、波浪スペクトルが非常に狭いうねりのような条件下 で、斜行する波群の存在が実験的に実証され、その波群に類似する観測例も得ることができた。最後に、 このような海洋波と光ファイバー中を伝搬する波群との比較により、海洋波の発達にはゆっくりとした 包絡線の発達近似が適用できないことを示す。

[特別講演] 可積分系から渋滞学へ ~基礎から応用、そして社会実践へ~ 西成 活裕 (東大先端研)

非線形系の優等生である可積分系には、その数学的構造の美しさはもちろん、様々な応用の可能性があ る。その一つとして、これまで車や人、物流などの社会的な流れに応用してきたものが渋滞学である。 そして近年は社会実践の段階に入り、様々な現場で車の渋滞や人の混雑、またモの滞留の解消に取り組 み、成果を挙げている。その内容を紹介するとともに、基礎と応用をどのようにバランスを持って研究 していけばよいか考察する。

11月2日(土)

行列値 Bratu 方程式の可積分性について

井上公人(九大IMI)

Bratu 方程式は応用面では内燃機関の理論,数学面では有限戸田格子の2格子点の場合,および Liouville 方程式の1次元簡約として現れる.本講演では行列への拡張である行列値 Bratu 方程式について述べる.

ファン・デル・ポール方程式の符号付き超離散化について 〇鈴木 清一朗 (法政大理工)、礒島 伸 (法政大理工)

リミットサイクルをもつことで知られる、ファン・デル・ポール方程式の符号付き超離散類似を構成す る。複数の初期値問題の解を分類して状態遷移図にまとめ、周期解やリミットサイクルの存在を議論す る。

Solution of the inverse problem for Random Domino Automaton and it's application to earthquakes

Mariusz Bialecki(Polish Academy of Sciences, Institute of Geophysics)

Random Domino Automaton (RDA) is a stochastic cellular automaton of slowly driven system type, constructed to model statistical properties of earthquakes [1]. In one time step the particle (a portion of energy) is added to the system and is scattered or retained depending on certain probabilistic parameters (rebound parameters), which governs the dynamics of the model. During evolution, it happens that various portions of energy (avalanches) are released, and a specific time series is created. In particular, RDA may be characterized by various frequency-size distributions of avalanches, depending on the choice of rebound parameters. Therefore, RDA may be regarded as a specific probabilistic generator of events, that fall into a given distribution. In this talk we present the solution to the inverse problem for RDA, i.e. we show how to find rebound parameters that result in a given distribution of avalanches. RDA can be used for a variety applications, including for modeling statistical properties of earthquakes. Having solved inverse problem, RDA can be adjusted not only to Gutenberg-Richter law, but also to distributions that deviate from it. RDA also has interesting mathematical structure.

In the case of a special choice of parameters, it exhibits two Self Organized Criticality - like states [3], and this property helps explain mega-earthquakes [5]. Equations describing stationary state of RDA in mean field approximation are solvable for a special choice of parameters and are related to Motzkin numbers [2]. Moreover, the same method like for construction RDA was used to obtain an automaton related to Catalan numbers recurrence [4].

[1] M. Bialecki, Z. Czechowski, On One-to-One Dependence of Rebound Parameters on Statistics of Clusters: Exponential and Inverse-Power Distributions Out of Random Domino Automaton, Journal of the Physical Society of Japan 82 (2013), 014003.

[2] M. Bialecki, Motzkin numbers out of Random Domino Automaton, Physics Letters A 376 (2012), 3098-3100.

[3] Z. Czechowski, A. Budek, M. Bialecki, Bi-SOC-states in one-dimensional random cellular automaton, CHAOS 82 (2017), 103123.

[4] M. Bialecki, Catalan numbers out of a stochastic cellular automaton, Journal of Mathematical Physics 60 (2019), 012701.

[5] M. H. Kim, New dynamical systems modeling helps explain mega-earthquakes, AIP Scilight 23 OCTOBER 2017, https://doi.org/10.1063/1.5009894.

量子ウォークの max-plus 類似とその性質

○渡邉 扇之介 (小山高専)、福田 亜希子 (芝浦工大システム理工)、瀬川 悦生 (横浜国大環境情報)、佐藤 巌 (小山高専)

一次元整数格子上の量子ウォークに対する max-plus 類似について考え,これを max-plus ウォークと呼 ぶことにする。本研究では,この max-plus ウォークの保存量や定常状態,極限分布について議論する。

整列的相互作用を持たない運動粒子集団における集団的円運動の発生条件

武田龍之介 (東京工大情報)、小池正史 (宇都宮大工)、〇矢嶋徹 (宇都宮大工)

運動する粒子集団が近傍粒子間相互作用の下で時間発展すると、巨視的秩序を持つ集団運動を呈するこ とがある.本講演では、相互作用として運動方向を揃える規則を陽に含まないにもかかわらず、時間と ともに集団的な運動が発生する Strömbom 模型を例として、自発的に集団運動が発生する条件を探る. この模型では、相互作用は「粒子速度」「相互作用域内の重心位置」「摂動」の3つの要素により定まり、 これらの相対的な重みによっては集団的円運動などの秩序ある運動が生じる.集団的な円運動が発生す 条件を系統的に調べた.

ポスターセッション(11月1日 15:10-16:40)

2 変数 Oregonator の超離散解析

柏舘悠平(山形大理工)

BZ 反応を記述する Oregonator に対して新たに「5 近傍の離散化」を定義し,超離散方程式を導出する. Oregonator の特徴的な現象として,振動性と興奮性がある.導出した超離散方程式やセルオートマトン モデルにおいても類似した現象を確認できた.

ー般の行列に関するラックス系(LU型, コレスキー型, QR型)の離散化について 〇中澤 朋亮 (同志社大理工)、近藤 弘一 (同志社大理工)

1980 年代に Lax 系に関する研究が盛んに行われ,種々の性質が示された.これらの性質を保持した離散化について議論する.

max-min 方程式の初期値問題を解く C プログラムの実装

○大島良太郎 (早大基幹理工)、高橋大輔 (早大基幹理工)

max-min 時間発展方程式の解の複雑さは、時間経過とともに指数関数的に増大します。これを計算する のに Mathematica のような数式処理システムは便利で強力なツールですが、計算コストは膨大になり ます。そこで、C 言語を用いて計算コスト削減と計算速度上昇を試みました。

外部変数付き max 方程式と連立の max 方程式の初期値問題について

○保坂圭祐 (早大基幹理工)、高橋大輔 (早大基幹理工)

max 方程式に外部変数を加えた場合複雑度を多項式オーダーのまま維持し続けるものがあり、我々は今回そのような外部変数付き max 方程式を探索しその初期値解を求めた。また同様に連立 max 方程式を 考えた時、複雑度が多項式オーダーを維持する方程式の探索と初期値解の探索も行った。

離散ハングリー戸田方程式を用いた逆固有値問題の解法

〇上田純也(同志社大理工)、近藤弘一(同志社大理工)

I型,II型の離散ハングリー戸田方程式を用いて要素指定を含む逆固有値問題の解法について示す。

ヘッセンベルグ行列に関連するラックス方程式の時間発展について

阪本豪太郎 (同志社大理工)、新庄雅斗 (同志社大理工)

可積分系研究において有名な戸田方程式は3重対角行列に関連するラックス方程式で記述される.適切 に離散化された離散戸田方程式は3重対角行列の固有値を保存量とする離散力学系となる.本講演では, ヘッセンベルグ行列が現れるラックス方程式の時間発展について解説する.

レイノルズ数を考慮した Burgers CA の振る舞い

○渡辺広太 (創価大工)、森田孝一 (創価大工)、石井良夫 (創価大工)

セルオートマトンは全変数が離散的な数理モデルであり、単純化したモデルから特徴的なパターンを得 て、その一つが流体力学における乱流現象を模した結果として知られている.本研究では、一次元乱流 モデルである Burgers 方程式についてレイノルズ数のパラメータを含んだ超離散 Burgers 方程式を導出 する.レイノルズ数の値による Burgers セルオートマトンの解の挙動を観察し、従来の結果と比較検討 し、レイノルズ数の効果における特徴的な振る舞いについても考察する.

超離散ハングリー戸田方程式による min-plus 代数上の固有値計算

○菅 雅文 (芝浦工大システム理工)、福田 亜希子 (芝浦工大システム理工)、渡邉 扇之介 (小山高専)

離散ハングリー戸田方程式を用いて非対称帯行列の固有値が求まるアルゴリズムが定式化されている. 本発表では,超離散ハングリー戸田方程式を用いて,min-plus代数における非対称帯行列の固有値が求 められることを示す.

超離散戸田方程式による単因子計算アルゴリズム

小林克樹 (京大情報)

超離散戸田方程式の (min, +) 演算を (gcd, ×) 演算に置き換えて得られる力学系が, 二重対角整数行列 の単因子, すなわち対応する整数行列の基本変形に対する不変量を計算するアルゴリズムであることを 示す.

ソリトン方程式の nonlocal reduction と delay reduction

○常松愛加(早大基幹理工)、田中悠太(早大基幹理工)、丸野健一(早大基幹理工)

最近、PT 対称性を持つ非線形波動の研究をきっかけに nonlocal なソリトン方程式の研究が活発になっている。また、遅延微分方程式の可積分性についての研究も最近行われつつある。講演では、連続および半離散ソリトン方程式に対して nonlocal reduction と delay reduction を適用することで nonlocal な ソリトン方程式と遅延微分方程式を導出し、それらの厳密解や性質について報告する。

dLVs 系から導かれる"加速型"箱玉系について

〇関口 真基 (東京都立荻窪高)、岡 来美 (京府大生命環境)、岩崎 雅史 (京府大生命環境)、石渡 恵 美子 (東京理科大理)

シフトパラメータを含む差分 Lotka-Volterra(dLVs) 系を超離散化し、玉の移動が加速されたような箱玉 系を定式化する.また、得られた"加速型"箱玉系の拡張について考察し、その逆超離散化で新たに得 られるタイムラグ付き dLVs 系についても紹介する.

Totally nonnegative な Laurent-Jacobi 行列の逆固有値問題の解法について

○赤岩 香苗 (京産大情報理工)、前田 一貴 (福知山公立大)

著者らは最近、Laurent-Jacobi 行列と呼ばれるジグザグ構造をもつ5重対角行列の逆固有値問題に対し て、直交多項式を用いた解法を提案している。本講演では、提案法によって作成される Laurent-Jacobi 行列が「すべての小行列式が非負」である totally nonnegative 行列となるための条件について示す。

超離散パーマネントがある超離散2次元戸田方程式を満たすことの組合せ論的証明 中田 庸一(東大アイソトープ総合センター)

昨年 RIMS 研究集会において長井が発表した、ある超離散 2 次元戸田方程式が分子解として超離散パーマネント解を持つことについて、組合せ論的な別証明を与えられることを示す。

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

参加者 77名

海洋・海岸等における波動の解析モデルの発展

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、様々な視座に立ち海洋・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、令和元年度には、応用力学研究所共同利用研究集会において、波動に関する最新の解析、実験、並びに、観測の研究成果を持ち寄り、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、その発展を目指して議論を行なうこととした.本研究集会による成果は、申請者らによる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、海岸工学、海洋物理学、流体力学及び数学といった分野において、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を開発するという目的を有している.そのために、本研究集会では、海岸・海洋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、水理実験により研究を進めている研究者、そして、応用物理学者及び数学者を迎え入れ、多様な角度から流体の波動問題に関して議論を行なった.

本研究集会は、5 年間にわたり、海岸・海洋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 として開催することができた.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研究集会であったと言えよう.

研究集会の内容

本研究集会は、2019年12月8日(日)14:30~9日(月)12:30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、物理学、応用物理学、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、大きな意味を有したと言える.これ まで開催してきた研究集会では、すべての発表に対して質疑応答が活発になされ、これは、特 筆に値する.そこで、今回の研究集会では、各講演の質疑応答時間を明確に設定しなかった. その結果、平均して1件当たり約1時間の持ち時間となった.ただし、時間調整の必要があっ たため、発表時間や質疑応答時間を仕方なく短くした講演もあった.

まず,第1日の第1セッションにおいて,港湾内の波浪を対象として1件の口頭発表及び質 疑応答が行なわれ,潜堤周辺の非線形波浪場に関する水理実験及び数値解析結果が議論された.

次に,第2セッションでは,渦層に焦点が当てられ,流体中における多層界面の不安定に関して発表された.そして,質疑応答が行なわれた.

また, 第3セッションでは, 波浪の実際を知る手立てに関して, 1件の口頭発表及び質疑応

答が行なわれた.ここでは,波浪観測手法の一つとして,リモートセンシングの利用に関して 説明され,議論が行なわれた.

第1日には,懇親会が開催され,水の波に関する様々な対象をとりあげてきた工学・理学分野の研究者間で,忌憚のない議論が行なわれた.

そして,第2日の第4セッションでは,波の生成と伝播に関して2件の口頭発表及び質疑応 答が行なわれた.すなわち,東シナ海における内部波の発生過程と,粒子法を用いた地すべり 津波の数値解析に関して発表がなされ,議論された.

更に, 第5セッションでは, 極限波に関して, 強非線形・強分散モデルに基づく孤立波の解 析解が紹介され, 議論が行なわれた.

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 (2019AO-S3)

「海洋・海岸等における波動の解析モデルの発展」

日 時 2019年12月8日(日)14:30~9日(月)12:30

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

2019年12月8日(日)

開会の挨拶(14:30~14:35)

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 -波浪のモデリングー (座長: 辻)

「潜堤による不規則波の分裂・屈折変形について」(14:35~15:40)

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静穏度を評価するために,水没した防波堤に残存する防波性能を把握す る断面・平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.不透過潜堤で不規則 波が短周期化する条件を見出すほか,背後での波の収れんは矩形潜堤や多方向波では限定的で あることを確認し,船舶動揺の抑制効果が期待された.

休憩

第2セッション 一渦と波動一(座長: 井口)

「渦層モデルによる多層界面の非線形解析」(15:45~17:00)

松岡千博(大阪市立大学大学院・工学研究科)

流体中に生じる多層界面の非線形運動を,3層2界面の場合を例にとり,渦層を用いた数理 モデルを用いて解析した.その結果,多層界面の場合は線形安定であっても,非線形領域では 一般に不安定となることがわかった.

休憩

第3セッション ー波浪の実際ー (座長:柿沼)

「リモートセンシングを利用した波浪観測」(17:10~18:00)

白水 元(山口大学大学院・創成科学研究科)

SAR 衛星画像の特徴や陸域・沿岸域の災害における活用および,波浪推算といった海洋分野 での利用についてレビューを行った.また,講演者が苅田港を含む周防灘を対象に低オフナデ ィア角の SAR 画像を利用した水面変動分布の取得と,これを用いた表面波の波長・波高の推定 を試みた実例を示した.

懇親会

2019年12月9日(月)

第4セッション 一波の生成と伝播一(座長:白水)

「東シナ海での内部波生成・伝播に関する数値モデリング」(10:00~11:05)

辻 英一(九州大学・応用力学研究所)

東シナ海における内部波の発生過程の解明を目的として、大陸棚から沖縄トラフまでの領域 を対象とした解析を数値モデル RIAMOM を用いて行なった.2016年及び2017年7月の温度場、 速度場や、2017年7月下旬に見られた急激な温度変化を伴うイベントなどについて調べた.

「地すべりや山体崩壊に起因する津波の数値解析」(11:05~11:40)

柿沼太郎(鹿児島大学学術研究院·理工学域)

地すべり、山体崩壊や、氷河崩落に伴う津波は、崩落体が水の運動と相互に干渉した結果と して形成されるため、生成過程が複雑で不明な点が多い.そこで、流体、または、剛体である 崩落体が、一様勾配斜面上を落下する場合を対象として、MPS 法を用いた断面 2 次元数値解析 を行ない、崩落体の初期状態と、生成される津波の関係に関して調べた.

休憩

第5セッション - 極限波の数学- (座長: 松岡)

「磯部ー柿沼モデルの孤立波解とその極限波」(11:45~12:25)

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.

閉会挨拶 (12:25~12:30)

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)

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:	2019年12月2日(月) 午後(13:15~17:30)
	3日(火) 午前(09:30~12:10)
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)
参加者数:	2日46名
	3日 40名

3. 発表概要

研究会では合計14件の研究発表が行われた。

1日目は、研究集会の趣旨説明の後9件の講演があった。前半は海洋レーダを用いた津波計測に 関する研究内容4件であった。国際航業の尾方らは、津波検知性能に関して仮想津波実験を用いた 検知確率から陸棚上では高確率で検知可能であるが、陸棚縁では波浪や電離層に関係するであろう ノイズの影響が大きいことを示した。中部電力の横洲らは、浜岡原子力発電所設置の海洋レーダの 視線方向流速の空間パターンを画像としてとらえ AI (深層学習)により津波検知の可能性を検証 した。津波高10m以上であれば到達時間±1分を正解とすると90%の正解率が得られた。東京電 力の金戸は柏崎原子力発電所設置の海洋レーダの受信信号を用いた仮想津波実験からデータ同化 を適用し単一レーダでの津波予測の検証を行った。検知能力が一番厳しいであろう冬季のデータを 用いても精度良く予測できることを示した。琉球大院理工の渡久地は、伊勢湾における東北地方太 平洋沖地震津波の実観測データに関して最適内挿法を用いたデータ同化を行い、沿岸水位計と比較 した。特性距離の選定に考慮する必要はあるが、精度よく津波の水位変化の再現ができることを示

1日目後半では、まず、宮崎県水試の渡慶次が宮崎県が導入した 13.5MHz レーダシステムの内

容と水産振興に向けた情報提供について報告した。JAMSTEC の田中は海洋レーダデータから短時 間予測(ナウキャスト)を行う試みを紹介し、観測範囲外へ推定手法にも触れた。気象研究所の広 瀬らは運用予定の 2km 格子海洋モデルと日向灘沖のブイ、海洋レーダとの比較検証を行った。海 洋レーダとの比較は視線方向流速で行い、黒潮や前線波動などの流速の大きい部分では良い一致を 見たが、風の影響が大きい(水吹流が強い)場合は対応が良くないことを示した。琉球大院理工の 池原は、24.5MHz レーダでの日向灘沖観測のドップラスペクトルデータ 3 年分に関してブラッグ ピークが2つある双峰型スペクトルの出現する頻度と方位を調べ、北東方向と冬季に多く出現する ことが示した。東京農工大院の小林は、海面での反射を MR-FDTD 法によるフルウェーブ電磁界 シミュレーションで解析し、ブラッグ共鳴するスペクトルを再現した。

2 日目には 5 件の講演があった。前半 3 件は JAMSTEC 設置の津軽海峡レーダに関する講演であっ た。マリンワークジャパンの橋向は、津軽海峡レーダの運用状況について、アンテナパターンを船舶の AIS 情報を用いて構成した結果、データ取得率などの改善が図られたことを報告した。北大院水産の安 井らは、1km 格子に内挿した1日平均流を船舶 ADCP と漂流ブイで計測した流速と比較した。津軽海 峡東側において、津軽暖流流路が夏季に北向き、冬季に南向きになる季節変動の存在と尻屋崎沖の水深 が浅い領域で流速強化部分があることなどを明らかにした。JAMSTECの石川は、水産業を中心とした 海況情報のニーズは1日程度先の情報が重要であることに鑑み、海洋レーダの流速データからナウキャ ストでの流速予測を行い、津軽海峡流軸部での強弱変動のトレンドが追えることを示した。日本海洋科 学振興財団の中山は 2011 年に実施された六ヶ所再処理工場沖での 42MHz SeaSonde の観測結果 wo 紹介し、長周期の風の変動との関係を示した。 琉球大院理工の川田は、浜岡原子力発電所の24.5MHzレ ーダを送信元としたバイスタティック受信実験の内容を紹介するとともに、風向との比較により受信デ ータの妥当性を検証した。

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: 2019年12月2日(月)午後~3日(火)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	2 日	(水)
--	-----	------	-----	-----

13:15-13:20	趣旨説明	
	藤井智史	(琉球大工)

- 短波海洋レーダによる津波検知性能の季節変化 13:20-13:45 尾方浩平(国際航業)、小田切祐樹(東洋建設)、藤良太郎(国際航業)、日向博文(愛媛 大工)
- 13:45-14:10 海洋レーダによる津波予測における AI 技術の適用 横洲弘武·橋詰正弘(中部電力)
- 柏崎刈羽原子力発電所に設置した単一の海洋レーダーによるデータ同化津波即時予測 14:10-14:35

金戸俊道(東京電力)、木村達人(東電設計)、寺岡駿輔(東京電力)、増子雅洋(東電設計)

- 14:35-15:00 海洋レーダ実観測データに基づく最適内挿法による津波データ同化の検証 渡久地優・藤井智史(琉球大工)
- 15:00-15:10 休憩
- 15:10-15:35 宮崎県における海洋レーダーの運用について 渡慶次力(宮崎水試)、藤井智史・池原日向(琉球大工)
- 15:35-16:00 HF レーダー観測をベースにした海況ガイダンス情報創出への取り組み 田中裕介 (JAMSTEC)、渡慶次力 (宮崎水試)、石川洋一 (JAMSTEC)
- 16:00-16:25 海洋短波レーダ等を用いた日向灘周辺における 2km 高解像度現業海況システムの検証 広瀬成章・碓氷典久・坂本圭・山中吾郎・高野洋雄(気象研究所)
- 16:25-16:50 海洋レーダ観測で得られた双峰型スペクトルの要因

池原日向・藤井智史(琉球大工)

- 16:50-17:15 海面ブラッグ反射のフルウェーブ電磁界シミュレーション
- 小林寛希・宇野亨(東京農工大)、藤井智史(琉球大工)、有馬卓司(東京農工大) 17:15-17:30 情報交換

12月3日 (火)

- 09:30-09:55
 津軽海峡 HF レーダーの運用状況について

 橋向高幸(MWJ)、佐々木建一・佐藤喜暁(JAMSTEC むつ)
- 09:55-10:20 海洋短波レーダを用いた津軽海峡東部における海面流速変動 安井智美(北大院水産)、阿部泰人(北大院水産/JAMSTEC むつ)、平譯享(北大院水産)、 佐々木建一・脇田昌英(JAMSTEC むつ)
- 10:20-10:45
 津軽海峡 HF レーダーデータを利用した海流ナウキャスト

 石川洋一・田中裕介(JAMSTEC)
- 10:45-10:55 休憩
- 10:55-11:20海洋短波レーダーによる下北半島沿岸域の観測
中山智治・渡邉修一(海洋財団)
- 11:20-11:45 バイスタティックレーダを用いた海洋観測における信号処理法の検討 川田真志・藤井智史(琉球大工)、横洲弘武(中部電力)
- 11:45-12:10 総合討論

5. 参加者名簿

氏名	所属	氏名	所属
金子貴臣	気象庁	広瀬成章	気象庁
藤井智史	琉球大工	久木幸司	琉球大理
寺岡俊輔	東京電力	恩田充	中部地整
小林寛希	東京農工大	橋詰正弘	中部電力

横洲弘武	中部電力	安井智美	北大院水産
川田真志	琉球大院理工	高橋龍平	三菱電機
渡久地優	琉球大院理工	中山智治	海洋財団
久慈智幸	海洋財団	渡邊修一	海洋財団
山田寛喜	新潟大工	碓氷典久	気象研
尾方浩平	国際航業	松澤豊	セナーアンドバーンズ
穴田琢磨	セナーアンドバーンズ	山縣純次	日本無線
小藤久毅	海洋財団	広瀬直毅	九大応力研
田中裕介	JAMSTEC	渡慶次力	宮崎水試
金戸俊道	東京電力	村上裕幸	中部地整
橋向高幸	マリンワークジャパン	木村達人	東電設計
阿部泰人	北大院水産	池原日向	琉球大院理工
江淵直人	北大低温研	宇野亨	東京農工大
坂井伸一	電中研	藤良太郎	国際航業
高山勝也	九大応力研	油布圭	九大応力研
飯田誠司	日本無線	市川香	九大応力研
脇田昌英	JAMSTEC	石川洋一	JAMSTEC
本島太郎	九大院	小平翼	東大
千手智晴	九大応力研	小池美紀	福岡県庁
福留研一	富山高専		

共同利用研究集会

「東アジア縁辺海の海水循環と生物化学過程」

"Water Circulation and Chemical-Biological Processes in the Marginal Seas in the East Asian "

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

東アジア縁辺海の生物生産には、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・日本海や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、富山大学等で進めている生物・化学的な研究との関連も深く、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、2019年 度からは東シナ海と日本海・黒潮域を含めた東アジア縁辺海での、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.今年度は、昨年度に続き黒潮に 関する研究を主に行っている新学術領域研究「海洋混合学の創設」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、東京大学1名、東京海洋大学1名、愛媛大学3名、富山大学2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、国立台湾大学7名、成功大学(台湾)1名、および九州大学8名であった.

2. 研究集会の概要

研究集会は、2020年2月1日(日)から2月2日(月)にかけて、九州大学応用力学研究所で行った.

2月1日は新学術領域研究の黒潮班の班会議と共同開催とし.まず郭が今年度終了となる新学術領域研究の今後のスケジュールについて報告した.午前中と午後の前半は,黒潮および周辺海域における乱流混合の実態として,中村がこれまでのかごしま丸航海の成果に関してまとめた.また長井は,これまで行ってきたトカラ海峡を流れる黒潮と,台湾のI-Lan Ridge における乱流混合の観測およびモデルによる研究に関してレビューした.松野は,黒潮がI-Lan Ridge を通過する際に生じる鉛直混合と水温鉛直構造に関して観測の結果を述べた.仁科は,九州南西海域亜表層に出現する小規模な低塩分水塊について,再解析データを用いてその発生時期と場所について調べた.遠藤は,長崎丸を用いて東シナ海陸棚縁辺部で観測された内部ソリトン波列の力学的な特性について述べた.さらに堤は,トカラ海峡とI-Lan Ridge 上における乱流の生成過程とエネルギー収支について計算した結果を発表した.Zhu が福島第一原発から放出された¹³⁷Cs をトレーサーとして黒潮と東シナ海での混合について述べた.

午後の後半では、黒潮および周辺海域における乱流混合の生物環境への影響の発表が行われた. 松野 は、ルソン海峡における強い潮汐混合による栄養塩の鉛直輸送によって、定常状態を仮定すると1日に 表層に存在するクロロフィルの 20-30%が消費されている可能性を指摘した. 長谷川は、平瀬周辺に おける乱流混合から硝酸塩フラックスを 0.1-10mmol/m2 であり、カリフォルニア海流と同じオーダー

295

であることを示した.またその場での湧昇による供給も大きいことを指摘した.さらに長井は,日向灘 沖のシアーおよびシルによる近慣性内部波に伴う乱流混合と栄養塩供給に関する現場観測と数値実験 について紹介し.同海域で生物生産が高まっていることを指摘した.吉江は、東シナ海陸棚斜面域にお けるサブメソスケール擾乱減少が低次生態系に及ぼす影響について発表し、70%の測点で 0.1mmol/m2/d の硝酸塩フラックスが存在することを報告した.一方,石坂は「しきさい」で観測され たトカラ海峡のクロロフィル変動を示し、季節的な混合の少ないと考えられる7月から10月ぐらいま では、海山や島周辺で頻繁に高クロロフィル渦が発生し、東に移動しながら数日にわたって維持される こと、季節的に混合が進むと考えらえる冬季には全体のクロロフィル濃度が高くなり、渦が見えなくな ることを示した.小針は、トカラ海峡上流・下流で行われた培養実験によって、黒潮流域で強化される 乱流によって、供給される栄養塩は植物プランクトンに吸収され、植物プランクトンも速やかに動物プ ランクトンに捕食されることが,浮魚資源変動を支えている可能性を示した.また,吉江は,トカラ海 峡周辺における乱流混合に伴う栄養塩供給が植物プランクトンの群集組成・光合成ポテンシャル・現存 量に及ぼす影響について述べた. Zhuは, HREE によってトカラ海峡の黒潮系水が四国東にかけて混合 する割合を示し、沿岸水の混合の重要性を指摘した.最後に郭が、数値モデルを利用した黒潮流域にお ける栄養塩輸送量の見積もりについて述べ、黒潮全体にかけての鉛直混合による栄養塩供給量の評価に ついて提案した.1日目最後の討論として,新学術研究に関するデータベースや今後の研究に関して議 論し、堤が東京大学大気海洋研究所伊藤幸彦博士の行っている黒潮・親潮域(大槌沖、常磐沖)でのサ ブメソスケール前線の研究について紹介した.

3日は、主に海洋混合学以外の話題提供が行われた. 松藤が、有明海諫早湾の外部および内部潮汐に 関して、これまでの調和解析や CEOF 解析ではなく、調和解析した渦粘性係数に基づいてエクマン流速 を求めて分離する方法について述べた.郭が,現在計画されている沿岸海洋から黒潮流域への物質輸送 の定量的評価に向けた、新たな研究計画の状況について発表した。この計画では、日本からの河川と地 下水を通した,淡水とそこに含まれる物質の外洋へのフラックスとその影響を調べる計画である.張は, 新たな研究計画のテーマに関係して,陸棚ポンプや沿岸水と外洋水の混合に化学トレーサーを利用する ことを提案した.また深海アルゴや海底ケーブルのグループと協力することも提案した.吉江は,東シ ナ海黒潮フロント域での低次生産の変動について発表した.佐藤は、有明海・橘湾・天草灘海域における 蛍光性溶存有機物について、励起蛍光スペクトルによって陸域起源腐食物質、海洋起源腐食物質、トリ プトファン様蛍光物質,チロシン様蛍光物質に分類した結果について述べた.陸域起源腐食物質は塩分 と負の相関、天草灘の海洋起源腐食物質が AOU と相関を持ち、トリプトファン・チロシン用蛍光物質 は沖合にもソースがあった. また培養実験で分解速度を求めたところ, 陸域・海域起源物質は比較的早 く、1-2日後にはかなり減少し、6日後には半分近くになることを報告した.川畑は、石川県で近年不 漁になっているズワイガニの資源量に関して、定着が9年前として九大のモデルで求めた日本海の水深 200mの水温との相関を求めた結果について述べた.その結果,隠岐周辺では正の,大和堆周辺で負の 相関が高く、それらを利用して、資源量が精度よく推定できることを報告した. 最後に千手が、富山湾 深海の長谷内での流速の測定結果について報告し,狭い谷であるにも関わらず最深部を左にした流れが 存在する可能性が示された.

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も、今回海洋混合学で 発表されたような黒潮周辺での物理化学生物過程も対象とし、石坂が申請することとなった.

九州大学応用力学研究所 共同研究集会 「東アジア縁辺海の海水循環と生物化学過程」

日時・場所:2020年2月2日(日) 応用力学研究所 本館2階 会議室
 2月3日(月) 応用力学研究所 本館3階 301 教室
 ※1日目と2日目で会場が異なりますので、ご注意ください.

2月2日(新学術A2-4 班会議と合同: 09:30-18:00)

事務連絡 郭新宇 (愛媛大) 09:30-09:40

黒潮及び周辺海域における乱流混合の実態(観測と数値モデル)

OMIX でのかごしま丸航海の概要と成果

中村啓彦(鹿児島大)9:40-10:00

- トカラ海峡を流れる黒潮による乱流混合
 - 長井健容(海洋大)10:00-10:20
- I-Lan Ridge における乱流混合

長井健容(海洋大) 10:20-10:40

- 黒潮が I-Lan Ridge を通過する際に生じる鉛直混合と水温鉛直構造の変化
 - 松野 健(九大)10:40-11:00
- 九州南西海域亜表層に出現する小規模な低塩分水塊の分布

仁科文子(鹿児島大)11:00-11:20

東シナ海陸棚縁辺部で観測された内部ソリトン波列の力学的特性

遠藤貴洋(九大)11:20-11:40

昼休み 11:40-13:00

トカラ海峡と台湾東方 I-Lan Ridge 上における乱流の生成過程とエネルギー収支 堤 英輔(東大) 13:00-13:20

Visualization and quantification of the isopycnal/diapycnal transport traced by $^{137}\mathrm{Cs}$

in the area of the Kuroshio and the marginal Seas

Siteng J. Zhu (富山大) 13:20-13:40

黒潮及び周辺海域における乱流混合の生物環境への影響

ルソン海峡における強い混合による栄養塩の鉛直輸送と基礎生産への寄与 松野 健(九大)13:40-14:00

平瀬周辺における乱流混合と硝酸塩フラックス

長谷川大介(東北水研)14:00-14:20

日向灘沖の近慣性内部波に伴う乱流混合と栄養塩供給に関する現場観測と数値実験 長井健容(海洋大)14:20-14:40 東シナ海陸棚斜面域におけるサブメソスケール擾乱現象が低次生態系に及ぼす影響 吉江直樹(愛媛大)14:40-15:00

休憩 15:00-15:20

「しきさい」で観測されたトカラ海峡のクロロフィル変動

石坂丞二(名古屋大)15:20-15:40

黒潮流域で強化される乱流が低次生態系に与える影響〜浮魚資源変動の鍵となる

トカラ海域とその下流域~

小針 統 (鹿児島大) 15:40-16:00

トカラ海峡周辺における乱流混合に伴う栄養供給が植物プランクトンの群集組成・

光合成ポテンシャル・現存量に及ぼす影響

吉江直樹(愛媛大)16:00-16:20

Quantification of the transport of the turbulence-mixed Kuroshio Tropical Water traced by HREEs: From the Tokara strait to the East of Shikoku

Siteng J. Zhu(富山大)16:20-16:40

黒潮流域における栄養塩輸送量の見積もり

郭 新宇 (愛媛大) 16:40-17:00

総合討論 17:00-18:00

2月3日 (09:30-12:40)

趣旨説明 石坂丞二(名古屋大) 09:30-09:40

渦粘性係数に基づく諫早湾の外部潮汐および内部潮汐の分離に関する研究

松藤千丈・堤 英輔・松野 健・遠藤貴洋・千手智晴(九大)09:40-10:00

沿岸海域から黒潮流域への物質輸送の定量的評価に向けて(ポスト OMIX に関連して)

郭新宇 (愛媛大) 10:00-12:20

Shelf pump およびポスト OMIX への期待について

張勁(富山大) 10:20-10:40

東シナ海陸棚縁辺部におけるサブメソスケール現象に伴う低次生態系の時空間変動 吉江直樹・加部晏諒・大城一輝・小川颯兵(愛媛大)・堤 英輔(東大)・

近藤能子・武田重信(長崎大)・石坂丞二(名古屋大)10:40-11:00

九州西部沿岸域における蛍光性溶存有機物の分布と光分解特性

佐藤光秀・緒方菜月・西村理沙・武田重信(長崎大)11:00-11:20

休憩 11:20-11:40

日本海における海況と橋立沖ズワイガニ資源量の関係性

川畑 達(石川総水セ) 11:40-12:00

富山深海長谷の流れについて

千手智晴(九大)12:00-12:20

総合討論 12:20-12:40

「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、2019 年8 月7 日から8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5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、7日は37名、8日は30名が参加し、合計 9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 30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。

日本全国で実施されているモニタリング・モデリング・水産現場からの問題 の提起等に関する発表がなされた。今回は、急潮研究を長く牽引してきた松山 優冶氏による基調講演を設定した。近年、急潮研究を開始しした若手の研究者 や、試験場の担当者等が、これまでの急潮研究の歴史に触れる機会ができ、そ れによって参加者が自身の研究の立ち位置を認識できたきっかけになったよう である。他の研究発表については、日本海沿岸域・九州西方での測流・潮位観 測結果の波動力学的な解釈の試みや、対馬暖流の分枝流の相互作用等の海洋物 理学的な発表に加え、XCTD とデータ自動送信システムを統合した新しいモニ タリング方法の提案や、海洋短波レーダーから得られる大量の情報を水産現場 に効果的に提供してきた事例の紹介、モニタリングを可能にする最新式の調査 船の紹介や、内湾域における生物生産過程理解に関する数値実験的な試み等、 内容は多岐にわたった。

また、日本周辺全域を対象に構築した高解像度モデルの運用・計算結果等の 提供に関する講演もあった。これについては、現在、粛々とモニタリングを続 けているが、結果の解釈に苦しむ全国の水産試験研究機関の担当者に対して、 明確な回答を示し得る取り組みということで、大きな反響があった。さらに、 現状で行われている、海洋モデルを用いた急潮予測に対して、次世代の予測モ デルになり得るかという議論にもなったが、計算結果の出力頻度や、情報提供 方法等に関して検討すべき問題点が多いという共通認識が出来た。

総合討論では、今後の会合の方針が議論された。急潮という切り口を軸に、 沿岸域を含めたモニタリング結果を議論する、という本会合の趣旨は、求めら れていながらも間口が狭いのではないか?という問題提起に対して、議論が行 われた。それに対し、水産現場では、急潮に関する問題は根強くあるため、継

301

続的な開催が求められるが、会の方向性については引き続き議論が必要だという結果になった。

「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」 日程:2018 年 8 月 7 日(水)13:30-8 日(木)11:55

*7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

(福 岡 県 春 日 市 春 日 公 園 6-1) (http://www.kyushu-u.ac.jp/access/map/chikushi/chikushi.html)

研究代表者: 井桁庸介(水産研究・教育機構日本海区水産研究所) 所内世話人: 千手智晴(九州大学応用力学研究所)

8月7日(水) 13:30~13:40

趣旨説明

13:40~14:20 これまでの急潮研究と今後の期待 〇松山優冶(東京海洋大学)

14:20~14:50

近慣性内部波による能登半島東岸での流速強化 〇久賀みづき(水研機構日水研)・井桁庸介(水研機構日水研)・広瀬直毅(九州大学応力研)

14:50~15:00

休憩

15:00~15:30

2019 年 3 月下旬に西日本で観測されたあびき(気象津波)について 〇田中健路 (広島工業大学環境学部地球環境学科)

15:30~16:00

宮崎県南の大型定置網における網上げできない潮流の特徴とその対策のための海洋レーダー情 報

○渡慶次 力 (宮崎県水産試験場)

16:00~16:30

2km 解像度沿岸海況システムで再現された急潮及び暖水波及

〇広瀬成章・碓氷典久・坂本圭・山中吾郎・高野洋雄(気象研究所)

8月8日(木)

9:30~10:00

富山トラフ上における対馬暖流沿岸分枝と沖合分枝との相互作用の可能性 〇井桁庸介(水研機構日水研)・Alexander Yankovsky(UofSC)・久賀みづき(水研機構日水研)・ 広瀬直毅(九州大学応力研)・福留研一(富山高専)

10:00~10:30

非構造格子を用いた高解像度沿岸海洋モデリング~伊万里湾におけるKarenia Mikimotoi赤潮動 態への応用~

山口創一・日浦健二・本島太郎 (九州大学総合理工学研究院)

10:30~10:40

休憩

10:40~11:10

福岡県漁業調査取締船「げんかい」について(シップオブザイヤー2018年受賞) 松井繁明(福岡県水産海洋技術センター)、秋本恒基(福岡県農林水産部漁業管理課)

11:10~11:40

簡易型 XBT/XCTD 投入機の開発と海洋モニタリングにおける今後の活用法

清水勇吾(水研機構中央水研)·渡慶次力(宮崎水試)·瀬藤聡(水研機構中央水研)·久野正博 (三重水研)·伊藤大樹(水研機構中央水研)

11:40~11:55

総合討論

「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

2019年12月3日から12月4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.海洋・水産に関わる大学および試験・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,41 名の参加者と 13 題の講演 があった.講演では,再解析風データを用いた波浪推算結果や,台風に注目した衛星海上 風プロダクト、海洋熱波といった海洋表層における境界条件となるデータ・現象の検証や 精度評価に関する成果の報告から,日本海北西部における低層水形成,日本海沿岸域にお ける近慣性内部波の散乱、津軽暖流における海洋酸性化といった海洋内部の現象の過程や 変動に関する報告、沿岸海況監視予測システムを用いた湾スケール・モデルの機動的開発 や ICT を利用した沿岸漁業推進などのユーザーの利用を想定したプラットフォームの開発 に関する報告、日本海周辺海域における潮汐に関しては、その経年変動の要因や新型衛星 高度計の導入による潮汐モデルの精度向上に関する報告、さらには日本海通過流のメカニ ズム、黒潮内側域冷水渦についての最新の考察にいたるまで、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等を用いた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.

九州大学応用力学研究所 共同研究集会

「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」 (代表者:福留研一、九大応力研世話人:広瀬直毅) 日程: 2019 年 12 月 3 日 (火) 午後~4 日 (水) 午前 会場:九州大学応用力学研究所西棟 W601 号室 https://www.riam.kyushu-u.ac.jp/center/access.html#access03

-----12/3(火)-----

13:30-13:35 趣旨説明

13:35-14:00

日本周辺海域の波浪推算とブイデータとの比較 〇久木幸治(琉球大理)

14:00-14:25

衛星搭載マイクロ波放射計 AMSR2 による熱帯低気圧周辺の海上風速の観測 〇江淵直人(北大低温研)

14:25-14:50

能登半島東岸の流速極大の時空間変動から推測される近慣性内部波の散乱 〇久賀みづき・井桁庸介(水研機構日水研)

14:50-15:15 日本海北西部における底層水形成とその変動 〇田中潔(東大海洋研)

15:15-15:25 休憩

15:25-15:50 日本海通過流と Island Rule について 〇木田新一郎(九大応力研)

15:50-16:15

日本沿岸海況監視予測システムを利用した湾スケール・モデルの機動的開発 〇坂本圭・ 中野英之・浦川昇吾・豊田隆寛・辻野博之・山中吾郎(気象研)

16:15-16:40

沿岸漁業に適した CTD の開発とデータ同化 〇広瀬直毅(九大応力研)・梶原伸晃(JFE アドバンテック)・滝川哲太郎(長崎 大)

16:40-17:00 情報交換

-----12/4 (*r*k) ------

9:00-9:25

九州北西岸における M2 潮の経年変化について 〇松浦浩巳(九大総理工)・上原克人・木田新一郎(九大応力研)

9:25-9:50

新型衛星高度計データを模した潮汐観測システムシミュレーション実験 〇曹江偉(九大総理工),広瀬直毅(九大応力研),磯口 治(RESTEC)

9:50-10:15

日本周辺海域の海洋熱波の解析 ~2016 年 8 月の事例を中心に~ 〇林 和彦(気象庁海洋気象情報室)

10:15-10:25 休憩

10:25-10:50

津軽暖流における海洋酸性化 ~津軽海峡モニタリングから~

○脇田昌英・佐々木建一・高田信(海洋研究開発機構)・吉野順(東北環境科学サービ
 ス)・木元克典・永野憲(海洋研究開発機構)・田中雄大・奥西武(水研機構東北水研)・阿部泰人(海洋研究開発機構・北大院水産)・渡邉修一(海洋研究開発機構)

10:50-11:15

黒潮大蛇行期における東海沖黒潮内側域冷水渦の構造と時間変化 〇清水勇吾・伊藤大樹・瀬藤聡・日下彰・安倍大介・日高清隆(水研機構中央水研)

11:15-11:40

三重県におけるブリ類漁獲量の実用的統計モデルの構築 〇万田敦昌・山田二久次・小川翔大(三重大院)・久野正博・藤田弘一(三重水 研)・武田保幸・御所豊穂(和歌山水試)・海野幸雄(静岡水技研)

11:40-12:10 総合討論

共同利用研究集会

第17回トロイダルプラズマ統合コード研究会

17th 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17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16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: 2019 年 12 月 5 日 (木) - 6 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: 26 件、参加者数: 32 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(台湾、日本滞在中) からの参加者も含めて講演26件(研究成果報告22件、サブクラスター関連4件)の申し込 みが集まった。件数は例年と同程度であり、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。初日および2日 目午前にこの一年の研究進展を紹介する講演を行った後、2日目午後に核融合フォーラム 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を行った。 研究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、流れ生成4件、MHD2件、 不純物輸送2件、データ駆動モデリング5件、波動・加熱2件、乱流1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。前回に増して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を広げる試みが様々進展している印象がある。今回のプログラムの 特徴は全体にわたってデータ駆動科学の適用研究に関する発表を配したこと、および2日 目午前に不安定性、加熱、非線形波抽出に関する英語セッションを設けたことである。ま た、MHD に関する研究発表が複数件あったことや、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ったこ とで、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6件あり、若手の活躍が見られたことも印象的である。以下に研究成果講演内容 を抜粋して説明する。

本年度の研究成果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輸送モデリン グに関する研究で構成した。本多は統合モデル GOTRESS+の進展について報告した。ニュ ーラルネットワーク利用による高速化、電流および加熱モデルとの結合、そしてプラズマ 端ペデスタルモデルとの結合による分布計算の拡張について説明をした。仲田は TRESS コ ードと GKV コードを連成させた大域的乱流シミュレーションについて報告した。複数種 のイオンを含む燃焼プラズマの分布形成を見据えて、トカマクにおける局所ジャイロ運動 論解析からイオン混合による複合的効果の評価を行った。さらに収束を加速する手法を導 入して、巨視的な輸送モデルと微視的なジャイロ運動論モデルの組み合わせによりパワー バランス条件を求めるスキームを完成させた。登田はジャイロ運動論コードを用いた LHD プラズマにおける輸送モデリングに関して、帯状流と乱流輸送に対する補足電子効果を調 べた。

2日目午前は外国からの参加者も含めて英語セッションを構成した。Cheng は燃焼プラズ マの高速イオン閉じ込めに重要な役割を果たすと考えられるトロイダルアルフヴェンモー ドの理論解析について報告した。アルフヴェン遅波モードを見出し、簡約モデル解と数値 計算の対応を示した。ヘリウム灰の除去に利用できるものである。Fukuyama は統合コード TASK における波動加熱および電流駆動解析モジュール開発の進展について報告した。光 線追跡、全波解析、運動論効果等数々のモデルと解析例を示した。Sasaki は動的モード分 解法を適用して、円筒プラズマのケルビン・ヘルムホルツ不安定性シミュレーションにお ける揺動分布の基本モードパターンを抽出した。そしてそれらモードのリミットサイクル 中での時間的ふるまいを提示した。

データ駆動科学のアプローチが広がりを見せている。沼波はジャイロ運動論計算におい て誤差を考慮して実験結果と分布を適合させるフラックスマッチング法に、簡約モデルを 組み合わせた機械学習を導入して計算の高速化を実現した。成田はニューラルネットワー クを用いた輸送解析モデルを発展させ、熱輸送および粒子輸送に適応した。そして流束決 定に半経験的な推定を用いた場合と混合長理論を導入した場合の比較を行った。森下はデ ータ同化の手法をLHDプラズマの温度時間発展計算に適用した。アンサンブル集団の時間 発展をTASK3Dコードで計算し、フィルターによるデータ同化を加え、修正しながら発展 させ、実験結果との良い一致をみた。横山はLHDプラズマ放電データベースに対して統計 的手法を適用し、輸送係数の決定に効果の大きい変数の同定を行った。そして変数を縮約 した熱輸送係数のモデルを提示した。

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。小菅は正準ヘリ シティの保存量としての性質をドリフト波および平行流駆動不安定性乱流に適用し、3次

309

元流生成機構を調べた。等分配則や対称性の破れが鍵となる。青木はエンストロフィ極小 の条件を適用することで、円筒装置における構造形成について中性粒子の存在の影響を調 べた。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、実験とドリフト運動論コード GNET を用いたシミュレーションの一致を見た。 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 GNET を用いた評価を行った。熱電子流束をモデル化しシミュレーシ ョン結果を説明することができた。相羽は edge localized mode (ELM)および QH モード放電 の概要についてレビューし、そしてその理解に重要な MHD 安定性における流れの効果を 説明した。Edge Harmonic Oscillation を伴う QH モードを得るための条件を示した。富松は 実験室トカマク装置におけるバルーニングモードおよびキンクモードのシミュレーション を行い、それぞれの不安定性が圧力分布緩和にもたらす効果を示した。矢木は密度勾配反 転分布を持つトカマクプラズマにおいて、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、粒子ピンチをもたらす条件を示した。矢本は周辺 輸送について、SONIC コードを用いて JT-60SA におけるネオン・アルゴン混合注入効果の 定量的評価を行った。そして TOPICS を用いたコア輸送計算と結合させることで、コアエ ネルギー閉じ込めの改善可能性を示した。大澤はタングステン中の2原子空孔の安定性に ついて解析した。不純物のなかでも酸素の効果が大きいことがわかった。下村は統合コー ド TASK で高電荷数不純物輸送を計算するためのモジュール開発の進展について説明した。 糟谷は統合コード TASK を実験室トカマク装置の解析に適用する様々な取り組みについて 紹介し、実験計測模擬への応用例を示した。太田は中性粒子入射によって生じる高速イオ ンの効果をフォッカープランクモデルから評価し、輸送への影響を調べた。

今回は議論の時間を多く設けて、今後の研究会の進め方について集中的に議論した。統 合コードスキームに関する幅広い話題を包含しながら、集中的なテーマ選定をすべきか、 もしくは特定項目についての作業会の要素を増やすべきか議論した。本年度の研究発表の 議論が自熱したことから幅広い話題を包含することを優先して、来年度も従来の形式を踏 襲することとし、第18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 することとした。

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)

12月5日(木)

9:15 -	9:25	はじめに	村上 (京大)	
(座長	: 村上)			
9:25 -	9:50	講演 1-1	本多 (量研)	
	Current	status of the integ	grated model GOTRESS+	
9:50 -	10:15	講演 1-2	仲田 (核融合研)	
Global turbulent transport simulation using a coupled code TRESS+GKV				

10:15-10:40 講演 1-3 登田 (核融合研)

Reduced model of turbulent transport for helical plasmas including effects of zonal flows and trapped electrons

10:40 - 10:55休憩 (座長:糟谷) 10:55 - 11:20講演 1-4 小菅 (九大) Interplay among 3d flows in turbulent plasmas 11:20 - 11:35講演 1-5 青木 (九大) Neutral effects on the structure of minimum enstrophy flows in plasmas 11:35 - 11:55講演 1-6 山本 (京大) Effects of electron cyclotron heating on the toroidal flow in HSX plasmas 11:55 - 12:20講演 1-7 村上 (京大) Modeling of supra-thermal electron flux and toroidal torque by ECH in non-axisymmetric toroidal plasmas 12:20 - 12:30議論 12:30 - 13:30昼休み (座長:林) 13:30 - 13:55 講演 2-1 相羽 (量研) Impact of plasma rotation and ion diamagnetic drift effects on MHD stability in a OH-mode plasma 13:55 - 14:10講演 2-2 富松 (九大) Nonlinear dynamics of resistive ballooning instability in PLATO tokamak plasma 講演 2-3 矢木 (量研) 14:10 - 14:35Particle transport model in plasma peripheral region 14:35 - 15:00講演 2-4 矢本 (量研) Study of multiple impurity seeding effect using SONIC integrated divertor code for JT-60SA plasma prediction 15:00 - 15:25 講演 2-5 大澤 (九大) Stability of divacancy and interaction with inevitable impurities in metals 15:25 - 15:40講演 2-6 下村 (九大) Tungsten transport analysis using integrated code TASK 15:40 - 15:55 休憩 (座長:本多) 15:55 - 16:20講演 2-7 糟谷 (九大) Analysis of laboratory torus plasma using the integrated simulation scheme 16:20 - 16:45講演 2-8 沼波 (核融合研) Development of transport prediction scheme based on first-principle simulation and machine learning 16:45 - 17:10講演 2-9 成田 (量研)

Neural-network-based multi-channel turbulent transport modeling

17:10 - 1	7:25	講演 2-10	森下 (京大)
]	Data ass	imilation system	based on integrated transport simulation of LHD plasma
17:25 - 1	7:45	議論	
17:45	散会		
18:30 - 2	21:00	懇親会 (はるら	西鉄白木原駅近)
12月6日	日(金)		
0.15	0.00	古 动)古幼	
9:15 -	9:20 小 苎)	争務理給	
()坐天:	小官)	津沙 2 1	Cline Zame Channe (古士)
9:20 -	9:45 TAE	再供 3-1	Chio Zong Cheng (東人)
0 45 1	IAEs an	id Aliven-slow eig	genmodes in tokamaks
9:45 – 1	10:10 D		Fukuyama 福山 (泉大)
10.10 1	Progress	s in wave heating	and current drive using the IASK code
10:10 - 1	10:35		Sasaki 佐々木 (九人)
10.25 1		on of plasma turb	ulence dynamics by using dynamical mode decomposition
10:35 - 1	10:30	1个兒	
(座長:7	俗波) □ 15	港湾24	
10:50 - 1	1:15	再供 3-4	
11.15 1	Modelli	ng of thermal tran	sport in fusion plasmas based on statistical approach
11:15 – 1	1:30	莆 (₫ 3-5)	
	Evaluati	on of the mome	ntum dependence of radial diffusion coefficient on density and
11.20 1	heat tran	isport in tokamak	S
11:30 - 1	1:50	議論	
11:50 – 1	3:00	昼休み	
(座長:	藤田)		
13:00 - 1	3:05	サブクラスター	·関係連絡・確認事項 林 (量研)
13:05 - 1	3:25	講演 4-1	宮戸 (量研)
]	IFERC	計算機シミュレ	ーションセンターの現状報告
13:25 - 1	3:55	講演 4-2	本多 (量研)
]	ITER に	於ける統合コー	・ド(IMEG)活動報告
13:55 - 1	4:35	講演 4-3	若月、鈴木、林 (量研)
]	ITPA 統	合運転シナリオ	グループ活動報告
14:35 - 1	4:45	休憩	
(座長:打	打田)		
14:45 - 1	5:25	講演 4-4	鈴木、林 (量研)
	JT-60SA	の研究活動報告	
15:25 - 1	6:00	サブクラスター	活動に関する総合討論と今後の予定 林(量研)
16:00	散会		

5. 参加者リスト

氏名	所属	氏名	所属
相羽信行	量研機構	福山淳	京大
鈴木隆	量研機構	村上定義	京大工
成田絵美	量研機構	山本泰弘	京大工
林伸彦	量研機構	森下侑哉	京大工
本多充	量研機構	太田佳吾	京大工
矢木雅敏	量研機構	大澤一人	九大応力研
矢本昌平	量研機構	糟谷直宏	九大応力研
宮戸直亮	量研機構	小菅佑輔	九大応力研
若月琢馬	量研機構	佐々木真	九大応力研
登田慎一郎	核融合研	山崎広太郎	九大応力研
仲田資季	核融合研	梅崎大介	九大工
沼波政倫	核融合研	青木大輔	九大総理工
横山雅之	核融合研	下村一哉	九大総理工
Cheng, Chio Zong	Univ. Tokyo	富松修平	九大総理工
藤田隆明	名古屋大	石田雅信	九大総理工
打田正樹	京大	持永祥汰	九大総理工

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: 2019.11.11-13

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

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。

研究集会のまとめ

本研究集会では乱流の理解をテーマとし、これらに深く関わるジャイロシミュレーション,分光計測,中性粒子について議論を行った。更に近年、実験解析に用いられている データ駆動科学に関する講演も行なった。今年度は佐々木助教がWarwick大学に半年ほど
滞在しており、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した。その結果についても報告した。以下に具体的な課題と議論の内容を示す。

1. Data Driven Plasma Science

佐々木助教を中心に Warwick 大学、MaxPlanck 研究所との共同研究を通じてデータ駆動 科学の手法をプラズマに適用し、データ駆動プラズマ科学の構築が開始された。

<u>ベイズ推定</u>

近年数理情報統計学的手法をデータ解析に活用することが行われている。ベイズ推定はプ ラズマ分野のデータ解析において径方向分布の推定に用いられるようになってきた。しか し二次元分布の推定は行われていないため、乱流シミュレーションのデータを利用し、ベ イズ解析により二次元分布を推定する手法の開発に着手した。

<u>動的モード分解(DMD)</u>

DMD)は近年流体分野で発展してきた手法であり、時系列データを波に分解する。しかし 同様な時系列解析手法であるフーリエ解析と異なり基底関数は直交していない。これによ り時間的に成長する波、減衰する波を取り扱うことが出来る。この DMD を 3 次元乱流シ ミュレーションデータに適用し、非線形構造の分離を行なった。得られた DMD モードの 振幅の評価法を提案した。DMD モード振幅のリサージュ図を描き、構造間の因果関係を 示す手法を提案した。

2. Progress of Gyro Simulation

ジャイロ運動論シミュレーションから乱流の長距離伝播を考察した。Warwick 大学と共同 でGENEコードを用いて、乱流の非線形伝播機構の研究に着手した。乱流の非線形飽和状 態において、帯状流と乱流が結合し、その結合関係を保持ながら両者が長距離伝播する現 象が観測されている。波動運動論方程式に基づき、同様の現象を得ることに成功した。さ らに、帯状流・乱流の空間スケールが凝縮する機構についての議論も行なった。

3. Turbulence Asymmetry

ドリフト波乱流が示す空間非対称ついて議論を行った。トカマク磁場配位では磁力線の曲 率が低磁場側及び高磁場側で異なるため乱流が高磁場側に局在化する事が指摘されてい る。核融合プラズマでは難しいが、実験室プラズマであればそのようなミクロ乱流の空間 局在性が観測できる可能性があるためその実験法について議論した。また、実際にTJ-K 装置では乱流局在性を計測している。このため期間が別となるがTJ-Kで実験を行なって いるUllmann氏の来日に合わせ、The influence of shear flows on nonlinear interaction in plasma turbulence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 乱流データ解析を行った。

International Workshop for Advanced Data Analysis of Plasma (November 11st- 13rd at RIAM Kyushu Univ.)

11/11 (Mon.)

10:00 Inagaki: Welcome and Introduction

10:15 Scientific session:

30 min. Inagaki: Recent Progress of PANTA Experiment

30 min. Nishizawa: Flow Structure in MST

30 min. Sasaki: Long Range Interaction in Turbulent Plasma

Lunch

13:30 Scientific session:

30 min. Kosuga: Effects of neutrals on drift-turbulence plasma

14:00 – Working session: Nishizawa, Inagaki, Moon, Yamazaki technical aspects of PANTA diagnostics, PANTA tour, etc.

11/12 (Tue.)

10:00 Scientific session:

30 min. Yamasaki: 2D-Tomograpy in PANTA

30 min. Dendy: Hasegawa-Wakatani theory I

30 min. Discussion

Lunch

13:30- Working session: Sasaki, Dendy, Inagaki, Nishizawa Future research collaboration with Warwick Univ. and Wisconsin Univ.

14:50- Lecture session: Nishizawa Bayesian inference of particle source and sink in a closed-divertor using Balmer line spectroscopy 11/13 (Wed.)
10:00 Scientific session:
30 min. Dendy: Hasegawa-Wakatani theory II
30 min. Sasaki: Dynamic Mode Decomposition of 3-D turbulence
30 min. Discussion

Lunch

13:30- Working session: Fujisawa, Ido, Dendy, Inagaki, Moon, Yamasaki

PLATO project, PLATO tour, budget application etc.

第12回 九大 2D 物質研究会

(主催:応用力学研究所(2019ME-S1)) 「2D物質の形成と構造・物性評価」

日時:2020年1月24日(金) 13:00~17:00 場所:コープイン京都

プログラム

1. 13:00~13:25

福井大院工 橋本 明弘 教授

「多機能2次元構造(MF2DS)上の結晶薄膜成長における最近の進展」

2. 13:25~13:50

筑波大院数理物質 神田 晶申 教授

「原子層積層化により形成した超伝導メゾスコピック系の渦糸状態」

3. 13:50~14:15

島根大院工 影島 博之 教授

「部分的に層状物質で覆われた Cu 表面でのグラフェン成長初期過程の理論検討」

4.14:15~14:40
 関西学院大 日比野 浩樹 教授
 「2D ヘテロ構造の結晶成長」

(休憩 14:40~14:55)

- 5. 14:55~15:20
 名古屋大院工 乗松 航 准教授
 「グラフェン/SiC 系における構造制御と電子状態」
- 6. 15:20~15:45
 筑波大院数理物質 友利 ひかり 氏
 「1次元周期ひずみによるグラフェンへのバンドギャップ形成」
- 7. 15:45~16:10
 九大院工 田中 悟 教授
 「ツイスト2層グラフェンの構造解析」

8.16:10~16:35
 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」

9. 16:35~17:00

総合討論

^{「2} D物質の課題と今後の取り組みについて」

1. 13:00~13:25

福井大院工 橋本 明弘 教授

「多機能2次元構造(MF2DS)上の結晶薄膜成長における最近の進展」 変形ファン・デル・ワールス成長法などのこれまでの手法とは異なる2次元/3次元界面の形成法 により作製した"多機能2次元構造(Multi-Functional 2 Dimension Structure: MF2DS)"を用 いた結晶薄膜成長の最近の進展について報告する.特に、MF2DS 形成メカニズム及び様々な条件で 形成された MF2DS 上の Si 薄膜や各種窒化物半導体結晶薄膜成長について述べる.

2. 13:25~13:50

筑波大院数理物質 神田 晶申 教授

「原子層積層化により形成した超伝導メゾスコピック系の渦糸状態」

グラフェン研究で培われた層状物質の劈開・積層技術を使って形成した原子層超伝導体では,完全 2 次元超伝導,量子金属状態など従来の超伝導体では見られなかった新規超伝導物性が観測され ている.我々は,微細加工によって形成したメゾスコピック原子層超伝導体の渦糸状態の観測を行 っている.講演では研究の進捗を報告する.

3. 13:50~14:15

島根大院工 影島 博之 教授

「部分的に層状物質で覆われた Cu 表面でのグラフェン成長初期過程の理論検討」 横方向や縦方向のグラフェン・hBN ヘテロ構造を CVD 法により形成することがどの程度自由にで きるのか知る助けとして,第一原理計算を使って理論検討した初期過程についての検討の進捗状況 を報告する.

4. 14:15~14:40

関西学院大 日比野 浩樹 教授

「2D ヘテロ構造の結晶成長」

二次元物質を縦方向に積み重ねたり、横方向に繋ぎ合わせたりすることで作製されたヘテロ構造 が、新しい物理や機能への期待から盛んに研究されている、本講演では、グラフェンと六方晶窒化 ホウ素からなる縦型および横型ヘテロ構造を、結晶成長の順序で作り分け可能であることを示す。

5. 14:55~15:20

名古屋大院工 乗松 航 准教授

「グラフェン/SiC 系における構造制御と電子状態」

SiC(000-1)面上グラフェンは、SiC 基板との相互作用や層間相互作用が弱いため、移動度の高い試料を得られる一方で、ランダムな積層回転のために構造制御が困難であることが知られている. SiC 表面のオフ角を 0~8° まで系統的に変化させた試料から得られたグラフェンの積層回転について調べた結果を報告する.また、SiC(0001)面上に転写したグラフェンにおけるフラットバンドや、SiC 表面のステップアンバンチング現象についても議論したい.

6. 15:20~15:45

筑波大院数理物質 友利 ひかり 氏

「1次元周期ひずみによるグラフェンへのバンドギャップ形成」

グラフェンには格子ひずみによって実効的なベクトルポテンシャルが生じる.この性質を利用する と本来金属伝導を示すグラフェンにバンドギャップを生成できるとの理論予測がある.本研究では 特に1次元周期ひずみを用いたバンドギャップ生成に着目し,電界効果トランジスタ構造において ひずみ誘起のバンドギャップを観測することを目的とした.

7. 15:45~16:10

九大院工 田中 悟 教授

「ツイスト2層グラフェンの構造解析」

ツイスト2層グラフェンの構造に関しての実験的報告はほとんどない.特に面内回転角度や層間距 離およびその揺らぎ、局所的な積層状態については従来の解析手法を用いての評価は困難である. ここでは SPA (Spot Profile Analysis) - LEED やX線 CTR 散乱測定により構造を評価した結果につ いて報告する.

8. 16:10~16:35

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」

ツイストニ層グラフェンの電子状態は、層間の相互作用のためにツイスト角度に依存して変化する と予想されている.特にツイスト角度が数度の場合、ディラック点付近での変化が顕著である. 我々はエピタキシャルグラフェンを真空中で張り合わせた大面積なツイストグラフェンを用いて、 角度分解光電子分光によってバンド構造を調べた.その結果、ツイスト角度 2~4°の試料では、 角度が小さくなるにつれてディラック点での速度減少が観測された. 9. 16:35~17:00

総合討論

「2 D物質の課題と今後の取り組みについて」

代表者:田中 悟(九大院工) 世話人:寒川義裕(九大応研)

全球エアロゾル気候モデルにおける降水過程の高度化

九州大学応用力学研究所 道端拓朗

要旨

大気中に浮遊するエアロゾルは、雲との相互作用により降水の微物理特性や放射収支を変調させる効果を 介して気候に重要な影響を及ぼす。数値気候モデル内では、エアロゾルの増加は降水を抑制するようにパラ メタリゼーションが仮定されているが、特に3 µm 以上の巨大な海塩粒子(Giant Cloud Condensation Nuclei; 以後 GCCN)は雲に取り込まれると降水を促進するため、他のエアロゾル種とは振る舞いが異なる。そこで 本研究では、GCCN が雲に取り込まれることでドリズル(霧雨)を形成し、降水を促進するプロセスを全球 エアロゾル・気候モデル MIROC-SPRINTARS に新たに導入した。このスキームの導入により、従来型のパ ラメタリゼーションで表現していたエアロゾルの増加による雲水量の増加を、部分的に相殺するプロセスが モデル内で表現されるようになった。GCCN が降水を促進する効果は、強風帯である南大洋で特に顕著には たらくが、雲底が低い層積雲域でも重要なプロセスであることが明らかになった。降水が促進されることで 全球平均の雲量は1.0%減少し、正味の雲放射強制力は1.0 ± 0.2 W m⁻²増加するが、GCCN の放出が多い強 風帯ではその効果はさらに大きい。このことは、現在気候におけるエアロゾル・雲相互作用の定量的な理解 に GCCN の効果が重要であるだけでなく、将来気候において大気循環場が変化した際の雲・降水システムへ のフィードバックにおいても無視できない重要なプロセスとなりうることを意味する。

1. 研究目的

エアロゾル・雲・降水相互作用は過程が非常に複雑であり、気候変動に対する影響の詳細なメカニズムは 未だ定量的に明らかになっていない。これを解明するためのツールである気候モデルは、これらの強い非線 形プロセスを半物理的・半経験的な仮定に基づくパラメタリゼーションによって表現しており、気候変動予 測の上で最大の不確実要素の一つとなっている。したがって、これらの複雑な非線形プロセスをより詳細に 表現するための、パラメタリゼーションの高度化が急務である。

現状の国内外ほとんど全てのエアロゾルモデルでは、雲凝結核(CCN)への活性化効率はエアロゾル種ごと に考慮されているものの、降水生成効率への寄与については、エアロゾル数が増加すると降水生成効率を単 調に減少させる取り扱いが、どのエアロゾル種にも適用されている。これは、従来型のモデルでは降水を陽 に予報していなかったことに起因する。しかし現実大気においては、半径 3 μm 以上に達するような巨大な 凝結核 (Giant CCN; GCCN)、特に海塩粒子の増加は降水生成を促進するプロセスを持っているため (Feingold et al., 1999)、このプロセスをモデル化しない場合、エアロゾル・雲相互作用の過大評価につながる 可能性が極めて高い。

そこで、GCCN が雲に取り込まれることでドリズル(霧雨)を形成し降水を促進するプロセスを新たに導入することで、エアロゾルに対する雲水の応答の再現性を向上させ、雲量分布および水循環効率を精度よく シミュレートできるモデルを構築することを目的とする。

2. 研究手法・新スキームの概要

SPRINTARS は、海塩粒子を粒径 0.1 µm ~ 10 µm まで 4 つの粒径ビンで取り扱っており、また研究代表者 によって降水を予報するスキームが導入済みであるため、GCCN が降水を強化する物理プロセスをモデル化 することが原理上可能である。雨水混合比 qr の予報方程式は、

$$\frac{\partial q_r}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_a} \nabla \cdot (\rho_a \mathbf{u} q_r) - \frac{1}{\rho_a} \frac{\partial (\rho_a q_r v_q)}{\partial z} + S_{q_r}$$

で表され、 ρ_a は大気密度、u は水平風ベクトル、 v_q は雨水のバルク落下速度である。したがって、右辺第一 項は水平移流、右辺第二項は雨水の鉛直落下によるフラックスの変化を意味する。 S_{qr} は雨水の生成項であ り、現状では autoconversion と accretion によって雨水は生成される ($S_{qr} = S_{auto} + S_{accr}$)。新スキームでは、上 記の生成項に加え、ある程度以上の粒径を持つ海塩粒子 (GCCN) が雲水を経由せずに直接雨水のソース (S_{gcen})となるプロセスを導入する (すなわち、 $S_{qr} = S_{auto} + S_{accr} + S_{gcen}$)。 S_{gcen} は、LES から導出された GCCN-to-Drizzle 活性化スキーム (Mechem and Kogan, 2008) をベースに、SPRINTARS で計算される GCCN の数濃度変化 (dNgccn/dt) を用いて、以下の関係式を用いて診断する。すなわち、

$$S_{gccn} = Ar_0^{\alpha} \frac{\alpha}{\alpha - 2.358} r_l^{2.358-\alpha} \frac{\partial N_{gccn}}{\partial t}$$

ここで、*A* は GCCN とドリズルの衝突・併合効率を決める係数、 α はユンゲ分布に関わるパラメータ、n は GCCN として考慮する最小サイズである。Mechem and Kogan (2008) に基づき、 $n = 3 \mu m$ として SPRINTARS の海塩の最大粒径ビン (3.16-10.0 μm) を GCCN からドリズルへの変換計算に用いたが、後述の通りスキー ムの不確実性を理解するため、 $n = 5 \mu m$, 10 μm の設定でも実験を行なった。

3. 実験結果

GCCN の効果を定量化するため、全ての降水変換項 (*Sauto+Sacer+Sgeen*) に対する GCCN による降水促進効果 (*Sgeen*) の寄与の全球分布を図1に示す。海塩粒子の放出 量は地上10 m 風速の関数としてパラメタ化されているた め、特に南大洋における降水過程で GCCN の効果が顕著 にはたらいていることがわかる。一方で、比較的成層が 安定している大陸西岸の層積雲域においても GCCN の効 果が大きい。これは、層積雲レジームでは accretion が有 意にはたらかないため、autoconversion, accretion による降 水変換項自体が小さいことと、雲底が低いため GCCN に よる影響を受けやすいためである。全球平均では 23.7% の寄与があり、そのほとんどは海上での降水システムに 起因する。

GCCN が降水を促進する効果は、大気中から雲水を枯





渇する結果として雲量を減少させる方向にはたらく。図2に衛星観測および MIROC による GCCN の効果の 有無によるシミュレーションから得られた雲量の水平分布を示す。特に GCCN の影響が顕著である南大洋に 着目するため、南極を中心として投影している。CALIPSO/GOCCP 衛星観測(Chepfer et al., 2010)による雲 量の分布(図 2a)を MIROC は定性的によく再現しているが、南大洋を中心として系統的な過小評価が見ら れる(図 2b)。これは他の気候モデルにおいても共通するバイアスとして知られており(McCoy et al., 2015)、短波放射が地表面に過剰に入射するバイアスにつながるため改善が急務である。GCCN が降水を促 進するプロセスを考慮した場合、南大洋の雲量は 2~5%程度減少し(図 2c)、南大洋バイアスを悪化させる 方向にはたらく。このことは、GCCN が降水を促進するプロセスを考慮していない他のほとんど全ての気候 モデルにおいて、南大洋の雲量バイアスは実際にはさらに深刻であることを示唆する結果である。南大洋に おけるエアロゾル光学的厚さについては衛星観測と整合的であることを考えると、海塩のエミッション自体 の問題ではなく、雲粒形成効率を過小に評価している可能性が考えられる。

もしくは、雲底下での雨の蒸発を過小評価していることも可能性としてあげられる。雨の蒸発を増加させ



図2: 南極を中心として投影した全雲量の水平分布図. (a) CALIPSO/GOCCP 衛星観測データ、(b) MIROC6 予報型 降水スキームによる GCCN の効果を考慮しない標準実験(MIROC6 CTRL)、(c) GCCN-to-Drizzle 変換過程を 考慮した実験と標準実験との差. る感度実験を行ったところ、境界層内の水蒸気フラックス が増加することで雲の形成が促進され、結果として下層雲 量が増加する方向にはたらくことがわかった。層積雲に伴 って形成される特にサイズの小さい雨滴(ドリズル)は大 きい雨滴と比較し蒸発しやすいため、蒸発に伴う水蒸気量 の変化や潜熱フラックスの鉛直プロファイルを適切に表現 することが雲量の表現に対して本質的に重要であることを 示す結果である。

GCCN による降水の促進プロセスを考慮に入れたことに 取り、全球平均で雲量が 1.0%減少したが(図 2c)、その 結果として正味の雲放射強制力に及ぼす影響は1.0 W m²に 達することがわかった(図 3)。風速が強く GCCN の放出 が多い領域や下層雲量の多い地域では GCCN によるドリズ ルの促進効果が顕著に機能し、放射場への影響は数 W m² に達する。この寄与の大部分は、下層雲量の変化による短 波放射の変化に起因する。



図3: GCCN とみなす粒径の下限値 r₁をデフォル トの3 µm から5 µm, 10 µm と変更した時の CTRL との雲放射強制力の変化(dCRF).

これらの結果は、現在気候におけるエアロゾル・雲相互作用の定量的な理解にGCCNの効果が重要である だけでなく、将来気候において大気循環場が変化した際の雲・降水システムへのフィードバックを表現する 際にも無視できない重要なプロセスとなりうることを意味する。ただし、GCCN-to-Drizzle 変換率は GCCN として考慮する粒径の閾値 nに強く依存することに注意が必要である(図 3)。Large-eddy simulation (LES) を用いた素過程レベルでのシミュレーションや、航空機観測などによる知見に基づき、不確実なパラメータ を拘束することで定量的な理解につなげていく研究が必要である。

4. 研究成果報告

● 査読論文(筆頭のみ)

- Michibata, T., K. Suzuki, T. Ogura, and X. Jing, 2019: Incorporation of inline warm rain diagnostics into the COSP2 satellite simulator for process-oriented model evaluation, *Geoscientific Model Development*, 12, 4297-4307, doi:10.5194/gmd-12-4297-2019.
- 2) Michibata, T., K. Suzuki, M. Sekiguchi, and T. Takemura, 2019: Prognostic precipitation in the MIROC6-SPRINTARS GCM: Description and evaluation against satellite observations, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, **11**, 839-860, doi:10.1029/2018MS001596.

学会発表(筆頭のみ)

- 1) <u>Michibata, T.</u>, K. Suzuki, and T. Takemura; 「Constraining responses of cloud and precipitation to aerosol perturbations: Satellite observations and global climate models」, 『100th AMS Annual Meeting 2020』, Boston (US), 12-16 January, 2020. (口頭発表, 招待講演)
- 2) <u>Michibata, T.</u>, K. Suzuki, M. Sekiguchi, and T. Takemura; 「Prognostic Precipitation in the MIROC6-SPRINTARS GCM: Improvements in Aerosol-Cloud-Precipitation Interactions」, 『AGU Fall Meeting 2019』, San Francisco (US), 9-13 December, 2019. (口頭発表, 査読なし)
- 3) <u>Michibata, T.</u>, K. Suzuki, and T. Takemura; 「Reconciling a compensating error between precipitation process constraint and energy budget requirement」, 『Earth CARE Workshop 2019』, Fukuoka (Japan), 25-27 November, 2019. (口頭発表, 査読なし)
- 4) <u>Michibata, T.</u>, K. Suzuki, and T. Takemura; 「Prognostic precipitation in the MIROC6-SPRINTARS GCM: Improvements in precipitation and radiative properties」, 『Aerosols, Clouds, Precipitation and Climate (ACPC) Workshop』, Nanjing, China, 24-26 April, 2019. (口頭発表, 査読なし)
- 5) <u>Michibata, T.</u>, K. Suzuki, and T. Takemura; 「Prognostic Precipitation in the MIROC6-SPRINTARS GCM」, 『2019 Joint US-Japan Workshop on Climate change and Variability』, Honolulu, US, 5-6 March, 2019. (口頭発表, 査読なし)
- 6) Michibata, T., T. Ogura, X. Jing, and K. Suzuki; [Implementation of an inline diagnostic tool for warm rain]

statistics to COSP2 satellite simulator」, 『CFMIP Meeting 2018』, Colorado, US, 16-19 October, 2018. (ポスター発表, 査読なし)

- 7) <u>Michibata, T.</u>, K. Suzuki, and T. Takemura; 「How does the treatment of rain in GCMs improve cloud susceptibility to aerosols?」, 『15th Conference on Cloud Physics/15th Conference on Atmospheric Radiation』, Vancouver, Canada, 09-13 July, 2018. (ポスター発表, 査読あり)
- 8) <u>Michibata, T.</u>, K. Suzuki, and T. Takemura; 「How does the treatment of rain in GCMs improve aerosolcloud-precipitation interactions?」, 『Japan Geoscience Union Meeting 2018』, Chiba, Japan, 20-24 May, 2018. (ロ頭発表, 査読なし)
- 9) <u>道端拓朗;</u>「日本気象学会 2019 年度山本賞 受賞記念講演」, 『日本気象学会 2019 年度秋季大会』, 福岡, 2019 年 10 月 28-31 日(口頭発表, 招待講演)
- 10) 道端拓朗, 鈴木健太郎, 竹村俊彦; 「降水予報型 MIROC におけるエアロゾル・雲・降水相互作用プロセスの誤差補償の緩和」, 『日本気象学会 2019 年度秋季大会』, 福岡, 2019 年 10 月 28-31 日(口頭発表, 査読なし)

●受賞

日本気象学会 2019 年度山本賞, 2019 年 10 月

5.謝辞

本研究は、九州大学応用力学研究所の共同利用研究(若手キャリアアップ支援研究)、科学研究費補助金 (若手研究; JP19K14795・基盤研究 S; JP19H05669)、文部科学省委託事業統合的気候モデル高度化研究プ ログラムの助成を受けたものです。また、MIROC-SPRINTARSの計算には、国立環境研究所 SX-ACE スーパ ーコンピュータシステムを利用させていただきました。

6. 研究組織

【研究代表者】	九州大学応用力学研究所・助教	道端	拓朗
【所内世話人】	九州大学応用力学研究所・教授	竹村	俊彦
【研究協力者】	東京大学大気海洋研究所・准教授	鈴木	健太郎
	東京大学大気海洋研究所・博士後期課程1年	堀田	陽香

References

Chepfer et al. (2010): The GCM-oriented CALIPSO cloud product (CALIPSO-GOCCP). J. Geophys. Res., 115, D00H16.

Feingold et al. (1999): The impact of giant cloud condensation nuclei on drizzle formation in stratocumulus: Implications for cloud radiative properties, *J. Atmos. Sci.*, **56**, 4100–4117.

McCoy et al. (2015): Mixed-phase cloud physics and Southern Ocean cloud feedback in climate models. J. *Geophys. Res.*, **120**, 9539-9554

Mechem and Kogan (2008): A Bulk Parameterization of Giant CCN. J. Atmos. Sci., 65, 2458-2466

窒化ガリウム結晶成長プロセスの理論データベース構築とデータ科学への応用

学習院大学 計算機センター 草場 彰

1. 研究目的

窒化ガリウム(GaN)は、その優れた物性から、現在一般的に利用されているシリコン(Si)パワーデ バイスよりも高効率な電力変換が可能とされている。その実用化には、GaN 気相成長プロセスにおい て、結晶欠陥(転位密度・不純物濃度)の精密なコントロールが求められる。しかしながら、多くの設 定パラメータに加えて成長炉形状にも依存することから、最適な成長条件の探索は極めて難しい。そこ で、機械学習の手法を活用して効率的に成長条件を探索する枠組みとして「結晶成長プロセス・インフ オマティクス」の創出を目指している。これには、計算科学やin-situ 計測により同定した成長プロセス 中の各種状態と、実際に成長した結晶の構造解析による評価結果とが対になったデータセットが必要で ある。平成 30 年度は、成長プロセス中の状態を特徴付けるパラメータとして、不純物濃度の精密なコ ントロールにおいて特に重要と考えられる、メタン(CH4)の吸着確率のデータベース構築を目的とする。

2. 研究方法

吸着確率は、結晶表面の原子構造、すなわち、表面再構成によって変化する。はじめに、成長プロ セス中の表面再構成を同定する必要がある。温度・ガス分圧に依存する最安定な表面再構成は、『気相の 自由エネルギーを考慮した第一原理計算』[1]により同定することができる。具体的には、分子の吸着エ ネルギーと温度・ガス分圧の関数である分子の自由エネルギーとの比較によって、表面再構成の安定性 が判断できる。次に、成長プロセス中に出現している表面再構成に対して、CH4吸着構造をエネルギー 論的に決定する。さいごに、その吸着構造に対する吸着確率を、独自開発の『非平衡量子熱力学に基づ く化学吸着モデル』[2]を用いて解析する。この吸着モデルでは、マクロな状態量ではなく、ミクロなエ ネルギー構造に対する確率分布を考える。したがって、表面に到達した CH4分子の大部分の吸着挙動よ りも詳細に、微量の CH4分子の吸着挙動を定量的に解析することが可能である。

参考文献 [1] Kangawa et al., Surface science 493, 178 (2001). [2] Kusaba et al., Materials 10, 948 (2017).

3. 結果と考察

有機金属気相成長(MOVPE)条件における GaN +c 面の結果を図1に示す。例えば、一般的な成長 条件である V/III 原料比 1000、温度 1000°Cでは、3Ga-H 構造が安定である。この表面再構成に対する CH4 吸着構造としては、Ga-CH3+2Ga-H 構造がエネルギー的に安定となった。さらに、この吸着構造 に対する吸着挙動を、非平衡量子熱力学に基づいて詳細に解析すると、CH4吸着確率は 7.06×10⁻³と算 出された。このように不純物源についての微量な吸着の挙動は、本解析手法によりはじめて解明できた ものである。同様にして、他の成長面方位・成長条件においても吸着確率の算出を行った。しかしなが ら、実験研究で報告されている C 不純物濃度の面方位依存性は、CH4吸着確率のみで説明づけることは できなかった。CH4吸着確率に加えて、表面第1層での N 置換 C 原子の安定性まで考慮することで、 面方位依存性は説明された。したがって、成長プロセス中の状態を特徴付ける以上 2 つのパラメータが 不純物濃度の精密なコントロールにおいて特に重要であると考えられる。



図 1. 成長プロセス中の表面再構成/CH4吸着構造/吸着挙動の定量的解析の一例(GaN+c面)。

4. おわりに

本研究では、「結晶成長プロセス・インフォマティクス」の創出を目指して、CH4吸着確率について のデータベース構築を進めた。本解析手法は、他の不純物源に対しても同様に適用可能である。例えば、 最新の研究では、C不純物混入に対してモノメチルガリウム Ga(CH₃)の寄与も大きいことが示唆されて いる。また、表面近傍での不純物原子の安定性についてもデータベース構築を進める必要があることが 本研究で明らかになった。

5. 研究成果報告

発表論文

- [1] CH₄ Adsorption Probability on GaN(0001) and (000-1) during Metalorganic Vapor Phase Epitaxy and Its Relationship to Carbon Contamination in the Films, <u>Akira Kusaba</u>, Guanchen Li, Pawel Kempisty, Michael R. von, Spakovsky, Yoshihiro Kangawa, *Materials* 12(6) 972 2019 年 3 月
- 学会発表
- [2] Non-equilibrium analysis of CH₄ adsorption on GaN(0001) and (000-1): the growth orientation dependence of the C impurity concentration, <u>Akira Kusaba</u>, Guanchen Li, Pawel Kempisty, Michael R. von, Spakovsky, Yoshihiro Kangawa, *International Workshop on Nitride Semiconductors 2018 (IWN 2018)* 2018 年 11 月 12 日
- [3] 窒化ガリウム極性面におけるメタン吸着確率と炭素不純物取り込み、<u>草場彰</u>,李冠辰,パヴェウ・ ケンピスティ、マイケル・フォン・スパコフスキー、寒川義裕、日本学術振興会第162委員会第110 回研究会・特別公開シンポジウム「紫外発光デバイスの最前線と将来展望」 2018年9月27日
- [4] Relationship between the CH₄ Adsorption Probability and the C Impurity Concentration in the Polar-GaN MOVPE System, <u>Akira Kusaba</u>, Guanchen Li, Michael R. von, Spakovsky, Pawel Kempisty, Yoshihiro Kangawa, *7th International Symposium on Growth of III-Nitrides (ISGN-7)* 2018 年 8 月 7 日
- [5] GaN-MOVPE 成長における CH4 吸着確率と C 不純物濃度の面方位依存性, <u>草場彰</u>, 李冠辰, パヴ ェウ・ケンピスティ, マイケル・フォン・スパコフスキー, 寒川義裕, 第10回ナノ構造・エピタキ シャル成長講演会 2018 年 7 月 12 日

6. 研究組織

役割	氏名	所属	職名(学年)
研究代表者	草場 彰	学習院大学	JSPS 特別研究員 PD
研究協力者	久保山 哲二	学習院大学	教授
研究協力者	Pawel Kempisty	Institute of High Pressure Physics	Assistant Professor
所内世話人	寒川 義裕	応用力学研究所	教授