# 共同利用研究成果報告 第 26 号



# 令和4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25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。2020年度からのコロナ禍で研究環境が激変 しましたが、この間にいくつかの新しい試みも開始しています。公募申請時からの研究計画を定期 的に見直し可能な体制にしました。また共同研究の実験を共同研究者である応用力学研究所の教員 の助けを借りて遠隔で実施するシステムの構築を努力しました。特に高温プラズマ理工学研究セン ターでは外部研究者が行なっていた実験計測機器運用をセンターで運用するため、技術補佐員(後 に九州大学職域限定職員)を1名採用し、その結果多くの共同研究の実験が遠隔で可能となりました 。共同研究における困難な状況を緩和し、研究を加速するという目的で、データ共有サーバーの構 築も進んでいます。これは、共同研究に参加された外部機関の研究者の方々と所内の研究者の間で 、共同研究に必要な所内の観測・実験・シミュレーション等によって得られたデータや、共同研究 の成果を共有し、公開もできるようにするものです。コロナの状況が好転している現在でもこれら は継続しています。このような努力により、共同研究として、2022年度に受け入れた共同研究者の 人数は総計600名を超え、外国人研究者の数も約70名でした。この報告書に示しますように、2022年 度は、特定研究23件を含む総計で105件の共同研究を実施するなど、貴重な研究が数多く行われまし た。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 (この20件に国際特定研究と分野融合研究のうち海外の機関に所属する研究者との3件を足した 国際共同研究の実施総数としては23件)が実施され、研究所の国際化に大いに貢献しています。こ の中で国際ワークショップが3件開催され、国内外の研究者による活発な議論が行われました。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は9件行わ れ、それぞれについてまとめられています。若手キャリアアップ支援研究の代表者として、3名の採 用(3名新規)を実施し、また博士課程学生SRAを2名、博士課程学生と博士課程に進学予定の修士課 程学生RAを15名それぞれ採用する等、若手育成にも努力しています。

これらの成果の一部は、2023 年 6 月 8 日に開催される「RIAM フォーラム 2023」でも報告されま す。またこの報告書は、応用力学研究所のホームページ(https://www.riam.kyushu-u.ac.jp) に も掲載されます。

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。また応用力学研究所は、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。2021年10月29日には、応用力学共同研究拠点の期 末評価の通知があり、無事2022年4月1日から2028年3月31日までの継続が認められることとな りました。応用力学研究所は、これからも地球環境力学分野、核融合力学分野、新エネルギー力学 分野とこれらの複数の分野にまたがる分野融合の研究領域において、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きます。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・ご鞭撻のほどよろしくお願いいたします。

> 2023年3月 九州大学応用力学研究所 所長 岡本 創

# 令和4年度 共同研究(特定研究)一覧(目次)

国際特定研究					
No.	研究課題(代表:		所内世話人 協力者数	頁	
特定研究1					
— 回転所	成層流体における波動現象の多角的理解	統括責任者 大貫 陽平			
2022S1-IC- Qu 1 wa	uasi-resonance phenomena in geophysical aves	CNRS, ENS de Lyon VENAILLE Antoine	大貫 陽平 1名	12	
2022S1-IC- 2 サ エ	全星大気波動の解析	慶應義塾大学 杉本 憲彦	大貫 陽平 4名	14	
2022S1-IC- 3 ア ト い ロ い	onlinear energy transfer within the oceanic nternal wave field	School of Marine Science and Technology, Tianjin University YANG Wei	大貫 陽平 1名	16	
2022S1-IC- 4	nergy cascade and mixing due to internal ave in stratified fluid	Laboratoire de Physique. ENS de Lyon JOUBAUD Sylvain	大貫 陽平 4名	18	

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2					
—	計測・シミュレーション・モデリングを組み合わせた 統合診断	統括責任者 糟谷 直宏			
2022S2-CD- 1	非平衡開放システムにおける時空間ダイナミクス の研究	日本大学 佐々木 真	糟谷 直宏 1 2 名	21	
2022S2-CD- 2	プラズマ分布形成の定量的理解に向けた第一原理 シミュレーションとデータ科学、数値計測による 基盤開発	核融合科学研究所 沼波 政倫	<ul><li>糟谷 直宏</li><li>4名</li></ul>	23	
2022S2-CD- 3	サ ブ グ	京都大学 本多 充	<ul><li>糟谷 直宏</li><li>3名</li></ul>	25	
2022S2-CD- 4	<ul> <li>テトロイダルプラズマにおけるMHD不安定性の非線形</li> <li>構造のシミュレーションデータ解析</li> </ul>	核融合科学研究所 佐藤 雅彦	<ul><li>糟谷 直宏</li><li>1名</li></ul>	27	
2022S2-CD- 5	マ 医療用CT・MRI技術を応用したプラズマ乱流計測	九州大学 荒川 弘之	<ul><li>糟谷 直宏</li><li>5名</li></ul>	29	
2022S2-CD- 6	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	文 贊鎬 3名	31	
2022S2-CD- 7	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	兵庫県立大学 古賀 麻由子	<ul><li>糟谷 直宏</li><li>2名</li></ul>	33	
特定研究3					
_	実験・計測科学と計算科学の融合による新しい研究分 野の開拓	<ul> <li>統括責任者</li> <li>弓本 桂也</li> <li>小菅 佑輔</li> <li>寒川 義裕</li> </ul>			
2022S3-CD- 1	結晶成長中微斜面におけるナノスケール表面荒さ とメゾスケール・マクロステップのファセット化 との関係	大阪電気通信大学 阿久津 典子	寒川 義裕 1名	36	
2022S3-CD- 2	時系列データに見られる不規則変動の分析	兵庫県立大学 中村 知道	西澤 敬之 2名	38	
2022S3-CD- 3	機械学習を活用した半導体MBE成長条件の最適条件 推定	· 久留米工業高等専門学校 奥山 哲也	寒川 義裕 4名	40	
2022S3-CD- 4	<ul> <li>フ</li> <li>テ</li> <li>実験と第一原理データの同化による物質探索に関</li> <li>l</li> <li>する研究</li> </ul>	奈良先端科学技術大学院大学 学 原嶋 庸介	寒川 義裕 1名	42	
2022S3-CD- 5	、 らせん転位配列を有するカーボンナノチューブの 変形メカニズムの解明	福井大学 雷 霄雯	寒川 義裕 3名	44	
2022S3-CD- 6	乱流プラズマの輸送特性計測のためのマイクロ波 センシング	核融合科学研究所 徳沢 季彦	西澤 敬之 5名	45	
2022S3-CD- 7	パターン形成を応用した工学分野における新しい 揺らぎの制御手法の考察	広島大学 鈴木 康浩	小菅 佑輔 5名	47	

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4					
	日に風	本型・洋上風力発電の導入に資するマルチスケール 兄研究	統括責任者 内田 孝紀		
2022S4-ME- 1		ウィンドファーム内の風特性が風車に及ぼす影響 の基礎的研究	三重大学 前田 太佳夫	内田 孝紀 4名	50
2022S4-ME- 2	サゴ	ドローンによる風況場局所計測に向けた乱流時空 間構造解析	日本大学 佐々木 真	内田 孝紀 5名	52
2022S4-ME- 3	ノテー	揺動受風を考慮した垂直軸風車の空力特性に関す る研究	弘前大学 久保田 健	内田 孝紀 6名	54
2022S4-ME- 4	7	我が国の洋上風力発電におけるリスクと対策に関 する研究	弘前大学 本田 明弘	内田 孝紀 4名	56
2022S4-ME- 5		産業用ドローンによる気象観測システムの構築	海上保安大学校 近藤 文義	内田 孝紀 1名	58

# 令和4年度 共同研究(一般研究)一覧(目次)

分野融合					
No.	研究課題 代表者名		所内世話人 協力者数	頁	
一般研究					
2022CR-CD- 1	化合物合金における空孔型欠陥と注入水素原子挙動に 関する研究	大阪公立大学 堀 史説	大澤 一人 5名	60	
2022CR-CD- 2	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	62	
2022CR-CD- 3	部分電離プラズマ中の静電イオンサイクロトロン波/ イオン音波の伝播に対する中性粒子効果	九州大学 寺坂 健一郎	小菅 佑輔 3名	64	
2022CR-CD- 4	波成二次循環の水槽実験	京都大学 吉川 裕	胡 長洪 2名	66	
2022CR-CD- 5	粉体ターゲットプラズマプロセスを用いた水素脆化防 止用傾斜機能性薄膜作製	佐世保工業高等専門学校 川崎 仁晴	花田 和明 3名	68	
2022CR-CD- 6	プラズマと流体の数理工学	立命館大学 多羅間 大輔	小菅 佑輔 1名	70	
2022CR-CD- 7	ラジカル含有リチウム酸化物薄膜の水素吸収および放 出過程	名城大学 土屋 文	徳永 和俊 3名	72	

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					
2022CR-A0-	海洋環境シミュレーション水槽とループ法を使用した	兵庫県立大学	磯辺 篤彦	74	
1	吹送距離延長法の確立	高垣 直尚	9名		
2022CR-A0- 2	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 3名	76	
2022CR-A0-	衛星・地上ライダ/レーダ解析のための氷雲・降雪粒	気象研究所	岡本 創	78	
3	子の散乱特性データベース開発	石元 裕史	2名		
2022CR-A0- 4	波浪とGNSS反射信号との対応関係の観測	京都大学 根田 昌典	市川 香 2名	80	
2022CR-A0-	海洋モデルを用いた富山湾における風および淡水流入	環日本海環境協力センター	広瀬 直毅	82	
5	量の流れ場への影響のシミュレーション	小塚 晃	2名		
2022CR-A0-	クリル海峡における順圧潮汐から地形に捕捉された内	福井県立大学	木田 新一郎	84	
6	部潮汐へのエネルギー変換率の見積もり	田中 祐希	1名		
2022CR-A0-	逆推計手法による東アジア域排出量データベースの高	電力中央研究所	弓本 桂也	86	
7	度化に向けた研究	板橋 秀一	3名		
2022CR-A0-	若狭湾における定置網漁業及び底曳網漁業の漁場環境	福井県立大学	千手 智晴	88	
8	に関する研究	渡慶次 力	6名		
2022CR-A0-	東アジアモンスーンが励起するマルチスケール黒潮変	鹿児島大学	遠藤 貴洋	90	
9	動	中村 啓彦	6名		
2022CR-A0-	気候モデルによる熱帯海盆間相互作用のメカニズム解	海洋研究開発機構	時長 宏樹	92	
10	明	RICHTER Ingo	1名		
2022CR-A0-	津波による海底堆積物の再懸濁が海洋環境に与える影	神戸大学	磯辺 篤彦	95	
11	響	林 美鶴	3名		
2022CR-A0-	等密度面モデルを用いた陸域海洋統合物質循環モデル	京都大学	木田 新一郎	97	
12	の構築	山敷 庸亮	2名		
2022CR-A0-	地上ライダー観測を用いた雲相とダスト量の関係の定	長崎大学	岡本 創	100	
13	量化	河本 和明	1名		
2022CR-A0- 14	表層海洋ドリフターを用いた沿岸表層海流の観測	東京大学 小平 翼	市川 香 2名	102	
2022CR-A0-	対馬暖流域における山陰沖合-沿岸間の海況変動を把	長崎大学	千手 智晴	104	
15	握するための観測研究	滝川 哲太郎	6名		
2022CR-A0- 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	106	
2022CR-A0-	国際共同研究体制の構築:地球温暖化に起因する東シ	富山大学	遠藤 貴洋	108	
17	ナ海の成層構造と物質循環の変化に関する研究	張 勁	3名		
2022CR-A0-	高スペクトル分解ライダー技術を用いたエアロゾル高	国立環境研究所	弓本 桂也	110	
18	度分布観測システムの構築	神 慶孝	2名		
2022CR-A0-	非線形性及び分散性を考慮した水の波の相互干渉に対	鹿児島大学	辻 英一	112	
19	する地形の影響に関する研究	柿沼 太郎	2名		
2022CR-A0-	インド亜大陸北東部からインドシナ半島における降水	東京大学	江口 菜穂	114	
20	システムの長期変動に関する研究	木口 雅司	3名		
2022CR-A0-	モンゴル・エルデネト鉱山における尾鉱沈殿池由来ホ	金沢大学	弓本 桂也	116	
21	ワイトダストの拡散動態解析	松木 篤	4名		
2022CR-A0-	夏季の宗谷暖流のジェット構造の維持機構に関する理	筑波大学	木田 新一郎	118	
22	論的研究	唐木 達郎	2名		

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					
2022CR-FP-	新しい原子力材料における重イオン照射による損傷組	京都大学	渡邉 英雄	119	
1	織の発達過程	徐 虬	1名		
2022CR-FP-	トカマクプラズマにおける高衝突領域での乱流輸送の	核融合科学研究所	糟谷 直宏	121	
2	定量化研究	登田 慎一郎	2名		
2022CR-FP- 3	反転密度勾配が駆動するドリフト波による粒子ピンチ 効果の理論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	<ul><li>糟谷 直宏</li><li>4名</li></ul>	123	
2022CR-FP-	高エネルギーイオン照射法を用いた新奇二次元層状物	量子科学技術研究開発機構	渡邉 英雄	125	
4	質の創製	圓谷 志郎	4名		
2022CR-FP-	タングステンの機械的特性評価と高熱流東材料への応	茨城大学	徳永 和俊	127	
5	用	車田 亮	2名		
2022CR-FP- 6	構造材料の破壊特性に及ぼす内在水素の影響	茨城大学 車田 亮	渡邉 英雄 2名	129	
2022CR-FP- 7	超臨界流体技術を用いたプラズマ対向機器の開発	東北大学 成基明	文	131	
2022CR-FP- 8	PLAT0トカマクにおける周辺乱流密度揺動の計測のた めのガスパフイメージング計測装置の開発	核融合科学研究所 小林 達哉	文	133	
2022CR-FP- 9	基礎実験によるプラズマカオス制御の検討	九州大学 寺坂 健一郎	小菅 佑輔 2名	135	
2022CR-FP-	中性子照射原子力材料の高分解能STEM-EDS実現のため	東北大学	渡邉 英雄	137	
10	の手法開発	嶋田 雄介	6名		
2022CR-FP-	ランジュバン系を用いたプラズマ中の非線形現象のモ	富山大学	小菅 佑輔	139	
11	デリング	成行 泰裕	7名		
2022CR-FP-	プラズマに対向した堆積層の動的水素リテンションに	京都大学	花田 和明	141	
12	関する研究	高木 郁二	3名		
2022CR-FP- 13	トモグラフィ計測を用いた磁化プラズマ乱流の3次元 波数スペクトル計測	広島大学 山崎 広太郎	文	143	
2022CR-FP-	高温下にて高エネルギーイオン照射された酸化物絶縁	核融合科学研究所	渡邉 英雄	144	
14	被覆の微細構造	菱沼 良光	2名		
2022CR-FP-	フッ化物溶融塩からの水素同位体脱離挙動に関する研	九州大学	渡邉 英雄	146	
15	究	片山 一成	3名		
2022CR-FP-	金属、合金および酸化物セラミックス中の水素同位体	九州大学	渡邉 英雄	148	
16	の溶解、拡散、放出挙動に関する研究	橋爪 健一	5名		
2022CR-FP-	直線磁化プラズマ装置における電磁乱流観測を目指し	核融合研究所	西澤 敬之	150	
17	た高ベータ実験	河内 裕一	3名		
2022CR-FP-	長時間放電におけるタングステン壁排気の物理素過程	九州大学	徳永 和俊	152	
18	の解明と制御	中村 一男	4名		
2022CR-FP-	遷移金属合金の照射による結晶構造・磁気変態の機構	岩手大学	渡邉 英雄	154	
19	解明	鎌田 康寛	3名		
2022CR-FP- 20	プラズマ乱流の非線形発展に関する研究	量子科学技術研究開発機構 西村 征也	小菅 佑輔 4名	156	
2022CR-FP-	種々の熱入射法による材料表面の高エネルギー密度入	応用ながれ研究所	徳永 和俊	158	
21	射損耗解析法の開発	糟谷 紘一	4名		

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	
一般研究					
2022CR-ME- 1	極低レイノルズ数翼の革新的空力特性向上の為の基礎 研究	同志社大学 平田 勝哉	内田 孝紀 4名	160	
2022CR-ME- 2	水中ビークルの動力学の高精度推定に関する研究	九州大学 山口 悟	胡 長洪 5名	162	
2022CR-ME- 3	OTEC深層水取水管のための自由垂下パイプの自励振動 に関する実験	九州大学 宇都宮 智昭	胡 長洪 4名	164	
2022CR-ME- 4	光センシング技術を用いた圧力センサーの開発	広島大学 岩下 英嗣	胡 長洪 4名	166	
2022CR-ME- 5	三次元有限要素法による歯科矯正用アンカースク リューの下顎歯槽部への植立角度と応力分布の関係	九州大学 髙橋 一郎	東藤 貢 3名	182	
2022CR-ME- 6	ダイヤモンド半導体および酸化ガリウム半導体の素子 に影響を与える結晶欠陥の解明	佐賀大学 嘉数 誠	東藤 貢 9名	185	
2022CR-ME- 7	化膿性脊椎炎診断のためのDeep LearningによるCT画 像解析法の検討	佐賀大学 森本 忠嗣	東藤 貢 2名	187	
2022CR-ME- 8	CT-FEMを用いた骨粗鬆症に起因する骨折メカニズムの 解明	産業医科大学 塚本 学	東藤 貢 1名	189	
2022CR-ME- 9	CT画像を利用した有限要素解析の骨折固定術への応用	千葉大学 松浦 佑介	東藤 貢 2名	191	
2022CR-ME- 10	上腕骨近位端骨折に関連する生体力学的問題に対する CT-FEMの応用	東北大学病院 仙台市立病院 佐野 博高	東藤 貢 1名	193	
2022CR-ME- 11	データサイエンスに基づく医療工学研究	九州情報大学 荒平 高章	東藤 貢 1名	195	
2022CR-ME- 12	次世代パワーエレクトロニクスシステム用劣化観測技 術	九州工業大学 長谷川 一徳	齋藤 渉 1名	197	
2022CR-ME- 13	深層学習による画像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 2名	199	
2022CR-ME- 14	新エネルギー機器のための流体構造連成シミュレー ション	東京工業大学 青木 尊之	渡辺 勢也 1名	201	
2022CR-ME- 15	空力抵抗低減に向けた物体表面の流体摩擦力の光学計 測	九州大学 安養寺 正之	内田 孝紀 1名	203	
2022CR-ME- 16	高温動作パワーモジュールの接合損傷予測	近畿大学 二 宍戸 信之	齋藤 渉 1名	205	
2022CR-ME- 17	第一原理計算による酸化ガリウム系材料の電子物性お よび構造安定性の検討	三重大学 河村 貴宏	寒川 義裕 2名	207	
2022CR-ME- 18	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 1名	209	
2022CR-ME- 19	Numerical response analysis of a floating platform hosting multiple wind turbines	Saga University (IOES) SRINIVASAMURTHY Sharath	吉田 茂雄 1名	211	
2022CR-ME- 20	回転振子式波浪発電装置の最適化に関する研究	長崎大学 経塚 雄策	胡 長洪 3名	217	

# 令和4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
2022WS- AO- 1	地球流体力学研究集会「地球流体にお ける波動と対流現象の力学」	東京大学 伊賀 啓太	山本 勝 14件・35名	応用力学研究所	2023. 3. 6- 2023. 3. 7	219
2022WS-	東アジア縁辺海における物質循環と生	長崎大学	千手 智晴	応用力学研究所	2023. 2. 20-	224
AO- 2	物・物理・化学過程	近藤 能子	16件・44名	(対面・遠隔併用)	2023. 2. 21	
2022WS-	アジア域の化学輸送モデルの現状と今	電力中央研究所	弓本 桂也	応用力学研究所	2023. 3. 2-	229
AO- 3	後の展開に関する研究集会	板橋 秀一	10件・37名	(対面・遠隔併用)	2023. 3. 3	
2022WS-	日本周辺海域の海況モニタリングと波	富山高等専門学校	広瀬 直毅	応用力学研究所	2022. 11. 30-	232
AO- 4	浪計測に関する研究集会	福留 研一	13件・33名	(対面・遠隔併用)	2022. 12. 1	
2022WS-	微細規模から惑星規模にかけての海洋	大分大学	磯辺 篤彦	九重共同研修所	2022. 11. 17-	339
AO- 5	力学過程と規模間相互作用の研究	西垣 肇	15件・23名	(対面·遠隔併用)	2022. 11. 20	
2022WS- AO- 6	日本周辺海域における環境急変現象 (急潮)のメカニズム解明および防災 に関する研究集会	高知県水産試験場 松田 裕太	千手 智晴 4件・30名	応用力学研究所 (対面・遠隔併用)	2022. 9. 14	343
2022WS-	海洋レーダを用いた海況監視システム	琉球大学	市川 香	応用力学研究所	2022. 11. 29-	347
AO- 7	の開発と応用	藤井 智史	12件・66名	(対面・遠隔併用)	2022. 11. 30	

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
2022WS- FP- 1	非線形プラズマ科学研究会	核融合科学研究所 小林 達哉	小菅 佑輔 7件・81名	応用力学研究所 他(遠隔)	2022. 7. 28– 2023. 2. 9	350
2022WS- FP- 2	第20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 32件・43名	応用力学研究所 (対面・遠隔併用)	2023. 1. 5- 2023. 1. 6	360

# 令和4年度 若手キャリアアップ支援研究一覧(目次)

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	高品質二酸化ゲルマニウム薄膜の合成と物性開拓	立命館大学 金子 健太郎	寒川 義裕 1名	368	

特定研究1【国際】

回転成層流体における波動現象の多角的理解

Multidisciplinary study of wave dynamics in rotating stratified fluids

統括責任者:大貫 陽平(地球環境力学分野)

地球海洋や惑星大気には、天体の自転に起因したコリオリカや重力成層した流体に働く浮力を復元 力した多様な波動現象が存在します。これらの波動は、流れ場との相互作用や境界における反射・ 散乱を繰り返しながらエネルギーや運動量を運ぶことで、環境システムにおいて重要な役割を果た しています。

本特定研究では、海洋・大気における波動現象への理解を飛躍的に高め、全球数値モデルの精度向 上や次世代観測衛星のデータ分析に資することを目指し、基礎流体物理的な研究を推進します。特 に大型回転水槽実験やトポロジー理論を強みとした欧州グループとの連携を強化し、実験・理論・ シミュレーションを柱とした多角的な研究アプローチを展開します。

# Quasi-resonance phenomena in geophysical waves

Antoine VENAILLE (ENS de Lyon, France)

目的:地球システムや他惑星に見られる流体現象は,物理学における他分野の知見を応用 して説明できることがある.例として我々は数年前,凝縮系物理学分野で生まれたトポロ ジカル波動論の概念を利用し,赤道波動に特徴的なスペクトル構造の説明に成功した.こ の理論は,複雑な微分方程式を詳細に解くことなく,北半球と南半球において波動成分が 局所的に異なるトポロジー的性質をもつことに基づき,赤道に捕捉された波動成分のスペ クトル構造の概形を説明することを可能にする.トポロジー解析に関連した数学手法とし て,表象として定義された関数を擬微分作用素に結びつける Wigner-Weyl 変換がある.表象 は波線追跡法に用いられる概念であるが,一方で作用素は波動のスペクトルを定めるもの である.Winger-Weyl 変換の地球流体力学への応用は,トポロジー解析とは独立して Onuki (2020)によっても提唱された.我々の共通の興味は,地球流体現象に対するこれら理論的手 法のさらなる応用可能性を探ることにある.

■ 研究 1: 連続媒質における波線追跡法とトポロジカル波動論の関係

(Venaille et al., 2023)

不均質な媒質は共通して、空間依存したパラメータの界面付近に捕捉された離散的な波動 モードを保持することがある.もしパラメータを連続的に変化させても捕捉モードが存在 し続ける場合、これらの波動は「トポロジカルな起源」をもつと呼べる.過去数十年余りの 研究によって、そのようなトポロジカルな起源をもつ波動は、2 つのバルクを跨いで Chem 数と呼ばれる単一のトポロジー不変量を計算することにより、微分方程式を直接的に解く ことなく計算できることが示されている.単純なバルク問題の計算と、より複雑な界面の 問題の対応性は、抽象的な指数定理によって正当化される.本研究では、赤道域における浅 水方程式系を例とし、波線追跡法を応用することで、この対応性に対して物理的な解釈を 与える.最初に Wigner-Weyl 変換を用いて位置と波数についての相空間における波線を計算 し、その後、量子化の条件から元の波動作用素がもつスペクトルの性質を明らかにする.そ の過程で、Chem 数が量子化の条件に関係することを示す.

■ 研究 2: 鉛直シア流の存在下における潮汐による内部波の発生

(Onuki and Venaille, Internal wave generation in shear flow: a spectral theoretic perspective, in preparation)

鉛直方向に流速勾配をもつ背景定常流の存在下において,微小な海底地形上を行き来する 潮汐振動流によって励起される内部重力波の性質を理論的に考察した.我々はこの問題を, 周期的な外力強制に対する線形システムの応答として定式化した.その一般解は,自由波 の時間発展を定める作用素のレゾルベントを用いることで、ラプラス変換の方法によって 得ることができる.このレゾルベントがエネルギーノルムについて非有界となる条件によ り、作用素のスペクトルが定義される.このスペクトルは、それぞれの水平波数に対し、鉛 直固有モードに対応する離散的な固有値と、臨界層の存在条件に対応する連続的な部分に よって構成される.強制振動に連動した定常応答解の空間構造は、フーリエ積分の漸近評 価により、地形から十分に離れた地点において、正弦波形を保ちながら伝わる離散モード 成分と、臨界層にエネルギーを吸収されながら流速シアを増していく成分によって構成さ れることが示される.順圧潮汐成分から傾圧成分へのエネルギー変換率は、スペクトルの 離散成分と連続成分それぞれからの寄与の和によって表現される.この結果は、離散モー ド成分のみを考慮した従来の結果を拡張するものである.

■ 研究 3: 東西シア流の中での Rossby 波の伝搬

順圧の準地衡方程式形において、南北方向に勾配をもつ東西シア流において励起される Rossby 波の性質を理論的、数値的に考察した.固有の南北構造をもつ離散モードと、臨界緯 度を伴う連続モードの性質を調べ、波線追跡法によって Rossby 波の伝搬特性を検証した. 外部からの周期強制によって励起される Rossby 波のエネルギーの長期的な振る舞いを調べ た結果、連続モード成分の中でも、流速の南北勾配が0となる定常流線と呼ばれる地点に臨 界緯度をもつ強制周波数に対しては、エネルギー成長の冪指数が特異的になるという興味 深い結果を得た.

- 出版論文
- Venaille, Onuki, Perez, and Leclerc, 2023, From ray tracing to waves of topological origin in continuous media, SciPost Physics, in press.
- 学会発表等
- Venaille, A., Topological waves, Boulder School 2022: Hydrodynamics Across Scales, 2022.07.
- 大貫 陽平, Antoine Venaille, シア流中に励起される内部重力波のスペクトル論的考察, 日本海洋学会 2022 年度秋季大会, 2022.09.
- Onuki, Y. and Venaille, A., Internal tide generation in shear flow, Singularities and Attractors in rotating and stratified fluids, 2022.12.
- 研究組織

代表 : Antoine VENAILLE (ENS de Lyon) 所内世話人 : 大貫陽平 協力者 : Emile DELEAGE (ENS de Lyon, Student)

# 金星大気波動の解析

## 慶應義塾大学法学部 杉本憲彦

目的

金星は、その固体部分が半径や重力加速度などの点で地球とよく似ているため、地球の 兄弟星と呼ばれる。しかし、その自転周期は非常に遅く、約243日にもなる。またその大 気部分は、二酸化炭素を主成分とし、約92気圧にも達しており、地球と大きく異なってい る。高度45-70km付近には、厚い雲層が存在するため、その大気循環の全貌は未だ解明さ れていない。雲の模様などの動きから、大気全体が自転を追い越す方向に約4日周期(~ 100m/s)で回転していることが知られており、スーパーローテーションと呼ばれているが、 その成因解明は、地球流体力学的にも興味深い研究テーマとなっている。

2015年には、我が国の金星探査機「あかつき」が金星軌道への再投入に成功し、現在も 観測が続けられている。あかつきによって、様々な時空間スケールの波動が観測され、そ の運動量輸送を通して、スーパーローテーションの生成や維持に重要な役割を果たすと考 えられている。しかしながら、これらの波動の3次元構造や働き、理論的解釈は未だ十分 になされていない。そこで本研究では、観測、モデル、データ同化、理論を駆使して、金 星の大気波動の実態を明らかにする。あかつきの観測データを金星大気大循環モデルに同 化し、より現実的な客観解析データを作成、この中に再現された大気波動を調べることで、 これらの波動の理論的解釈を試みる。そして、今後の海外金星探査計画へ、その知見の提 供を目指す。

# 研究方法

我々は、これまでに地球シミュレータ上の金星大気大循環モデル(AFES-Venus)および世 界初のデータ同化システム(ALEDAS-V)を開発してきた。本研究では、これらを用いて次の 研究を行う。

- 1. あかつき観測データを AFES-Venus に同化(杉本・藤澤・小守)することで、あか つきで観測される様々な時空間スケールの金星大気波動を再現する。
- 2. AFES-Venus 単体での高解像度計算(杉本)によって、より細かいスケールの波動現象の再現を試みる。
- これら数値モデルで得られた波動について、3次元構造や働きについての解析(藤 澤・小守)を行い、理論的な解釈(杉本・大貫・山本)を行う。
- また、国内外の金星大気大循環モデルで得られる波動についても、その発生条件や 構造の違い等を本モデルの結果と比較する(杉本・山本)。
- 同化データやモデル内での波動の再現が当初の予定通りにうまくいかない場合など、必要に応じて波動を疑似観測データとして作成、同化する実験(OSSEs)を行う(杉本・藤澤)。

# 研究結果

2022 年度は、1. あかつき風速の同化を行い、金星大気で世界初となる客観解析データの作成を行った。その結果、熱潮汐波の位相および平均東西風が改善された。また、2. AFES-Venus 単体での高解像度計算を実施し、傾圧不安定からの自発的な重力波放射を再現した。 さらに、5. あかつき中間赤外を想定した観測システムシミュレーション実験を実施し、実 観測の同化と波動の再現に向けた観測条件を探査した。1, については研究成果報告の(i) として、論文発表を行い、プレスリリースを行った。また 5. についても研究成果報告の (ii)のレター論文として出版済みである。さらに大気大循環モデルの改良として、加熱や 安定度分布を修正し、熱潮汐波や短周期波動の再現性の向上に努めている。

#### 考察

2022 年度に得られた結果は、金星大気中の波動の重要性を強く示唆するものである。こ のため、2023 年度には研究方法の3.および4.の解析を進め、理論的解釈を目指す。特 に最近の GCM 研究では、ロスビー波とケルビン波のカップリングによる結合不安定によっ て、3 次元的な短周期波動の励起が示唆されており、スーパーローテーションの時空間変 動とも強く関連する可能性が指摘されている。このロスビー波とケルビン波の結合不安定 については、これまで2 次元の浅水系を用いた基礎的な理論研究がほとんどであり、3 次 元的な励起のメカニズムの解明が期待される。また、あかつきの温度観測データの同化に も着手し、金星大気の現象の理解をさらに深めていく。

# 研究成果報告

- (i) <u>Fujisawa, Y., N. Sugimoto</u>(3 番目), 他 10 名 The first assimilation of Akatsuki single-layer winds and its validation with Venusian atmospheric waves excited by solar heating, *Scientific Reports*, Vol. 12, (2022), 14577, 11pp, 10.1038/s41598-022-18634-6. プレスリリース.
- (ii) <u>Sugimoto, N.</u>, Y. Fujisawa, N. Komori, 他3名, Akatsuki LIR observing system simulation experiments evaluated by thermal tides in the Venus atmosphere, *Geoscience Letters*, Vol. 9, (2022), 44, https://doi.org/10.1186/s40562-022-00253-8.

# 研究組織

杉本憲彦(慶應義塾大学法学部・教授):研究代表者 大貫陽平(九州大学応用力学研究所・助教):所内世話人 藤澤由貴子(慶應義塾大学自然科学研究教育センター・研究員) 小守信正(慶應義塾大学自然科学研究教育センター・研究員) 山本勝(九州大学応用力学研究所・准教授)

# Nonlinear energy transfer within the oceanic internal wave field

Wei YANG (Tianjin University, China)

概要:海洋の内部において微細な乱流運動によって引き起こされる鉛直密度混合は,運動 量,熱,淡水,炭素,あるいはその他の生物科学的な物質の輸送に多大な影響を与え,地球 規模の環境システムにおいて重要な役割を果たしている.特に深層においては,順圧潮流 が海底地形上を通過する際に発生する内部重力波(内部潮汐)が,乱流混合の主要なエネルギ ー源である.しかしながら,比較的大きな空間スケールをもち,長距離を伝搬する内部潮汐 が,どこでどのようにしてエネルギーを失い乱流散逸に至るのかは,未だ十分に理解され ていない.過去の研究では,内部波間の三波共鳴相互作用の一種である parametric subharmonic instability (PSI)が,内部潮汐から短波長の近慣性波成分へエネルギーを受け渡す ことで,エネルギー散逸を促進するメカニズムが指摘されている.しかし,PSI によって励 起された近慣性波成分のエネルギーが,その後スペクトル空間内をどのように伝わってい くのかは明らかにされていない.本研究は,高解像度三次元数値シミュレーションによっ て,内部波スペクトルにおける非線形的なエネルギー輸送機構を明らかにすることを目指 す.

■ 手法

大きな空間スケールをもつ背景内部波の一部を切り出し,周期変動する局所線形的な流速 シアと密度勾配の影響を受けて時間発展する擾乱成分を数値シミュレーションで検証した. この数値モデルは, Onuki et al. (2021)のモデルを拡張し,地球自転の効果とそれに伴う背景 内部波の偏光性の変化を組み入れたものである.計算領域を時間とともに変動させること で,領域サイズを抑えつつも背景波のもつ流速シアの効果を適切に表現し,フーリエスペ クトル法で離散化することで,小スケールの擾乱成分を精度良く解像できる点がこのモデ ルの持ち味である.

■ 結果

東シナ海を想定したパラメータ設定で、微小なガウシアンノイズを初期条件に計算を開始 した結果、擾乱エネルギーが指数関数的に増大したのち飽和に至る様子が観察された(図 1).時間当たりのエネルギーの増大率は、線形安定性解析から見積もられる PSI の不安定成 長率と整合する.エネルギー飽和の前後で、擾乱流速場の構造は層流から乱流へ遷移して おり(図 2)、内部重力波の砕波が起こったものと解釈できる.擾乱成分を周波数分解し、エ ネルギースペクトルの時系列を確認したところ、初期段階では近慣性成分に集中していた エネルギーが飽和と同時に他の周波数成分へと流れ出し、特に慣性周波数の高調波成分に ピークを作り出すことが確認できた.スペクトル空間内でのエネルギー輸送のメカニズム をより詳細に明らかにするため、バイスペクトル解析を実施し、近慣性成分のもつ流速シ アに伴うシア生成率を計算した.その結果、実地観測(Yang et al. 2022)で報告されたような 高周波数成分へのエネルギー輸送が見られた.これら高周波数成分は近慣性波と同程度の 鉛直スケールを有していた.



図 1. (a) 擾乱エネルギー密度と(b) エネルギー散逸率の時系列. 黒が全エネルギー, 赤が 運動エネルギー, 青が有効位置エネルギー, シアンが水平平均(慣性振動)成分を表す.



図 2.x 方向流速成分の鉛直断面図. 左がエネルギー飽和前で右が飽和後の様子.

## ■ 今後の展望

実験パラメータや解像度を調整しながら引き続き数値実験を実施するとともに、シミュレ ーションで得られた近慣性成分から高周波数成分へのエネルギー輸送メカニズムを詳細に 明らかにする.具体的には、いわゆる三波共鳴相互作用によるものなのか、あるいは波動平 均流相互作用に似たメカニズムによるものなのかを、慣性重力波の分散関係式や wave action の保存則の観点から議論していく予定である.

■ 共同研究者
 代表者: Wei YANG (Tianjin University)
 所内世話人: 大貫 陽平

# Energy cascade and mixing due to internal wave in stratified fluid

Sylvain JOUBAUD (ENS de Lyon, France)

Objective: Vertical mixing plays a major role in modeling the global circulation in the ocean (or climate). One of the key mechanisms for such ocean mixing is overturning internal waves. However, these mechanisms are still poorly understood and modeled on a very crude level (diffusion with an adjustable coefficient). To get more insights into this phenomenon, we will investigate the complex dynamics of rotating and stratified systems subject to high energy forcing using laboratory experiments and numerical simulations. In such cases of strongly-forced regimes, advection and mixing play essential roles by affecting the dispersion relation and the background stratification. The project aims to quantify the energy cascade due to nonlinear wave interaction and the local mixing events to relate the wave-induced mixing intensity to the intensity of the turbulent motions. In the present project, we aim to combine French and Japanese teams' efforts and benefit from the two-year visit of Y. Onuki at ENS de Lyon. S. Joubaud will take care of the experimental part while Y. Onuki will implement the numerical simulations.

 Study 1: Breaking of internal waves parametrically excited by ageostrophic anticyclonic instability (Onuki et al., 2023, under review)

A gradient-wind balanced flow with an elliptic streamline parametrically excites internal inertiagravity waves through ageostrophic anticyclonic instability (AAI). This study numerically investigates the breaking of internal waves and the following turbulence generation resulting from the AAI. In our simulation, we periodically distort the calculation domain following the streamlines of an elliptic vortex and integrate the equations of motion using a Fourier spectral method. This technique enables us to exclude the overall structure of the large-scale vortex from the computation and concentrate on resolving the small-scale waves and turbulence. From a series of experiments, we identify two different scenarios of wave breaking conditioned on the magnitude of the instability growth rate scaled by the buoyancy frequency,  $\lambda/N$ . First, when  $\lambda/N \ge 0.008$ , the primary wave amplitude excited by AAI quickly goes far beyond the overturning threshold and directly breaks. The resulting state is thus strongly nonlinear turbulence. Second, if  $\lambda/N \lesssim 0.008$ , weak wave-wave interactions begin to redistribute energy across frequency space before the primary wave reaches a breaking limit. Then, after a sufficiently long time, the system approaches a Garrett-Munk-like stationary spectrum, in which wave breaking occurs at finer vertical scales. Throughout the experimental conditions, the growth and decay time scales of the primary wave energy are well correlated. However, since the primary wave amplitude reaches a prescribed limit in one scenario but not in the other, the energy dissipation rates exhibit two types of scaling properties. This scaling classification has similarities and differences with

D'Asaro and Lien's (2000) wave-turbulence transition model. (extracted from the original paper)



A snapshot of the density field in the numerical simulation. The breaking process of internal gravity waves excited through elliptic instability is visualized.

Study 2: Three-dimensional visualization of stratified fluid flow using suspended inertial particles

This year, we have started a new series of experiments to understand the dynamics of internal gravity waves and stratified turbulence. Innumerable minute particles are suspended in density-stratified fluid in a laboratory tank. We make a wavy fluid motion by moving the tank wall while measuring the locations of the particles using particle tracking velocimetry with four cameras at any instance. Tracking the trajectory of the particles, we have created a 3D movie of streamlines, which exhibits oscillatory motion associated with the internal gravity waves and induced mixing. Using this method, we will investigate the formation of an internal wave attractor, triadic resonant instability, and turbulence statistics from Lagrangian viewpoints.

- Submitted paper
- Onuki, Y., Joubaud, S., and Dauxois, T., Breaking of internal waves parametrically excited by ageostrophic anticyclonic instability, Journal of Physical Oceanography, under review.
- Presentations
- Onuki. Y., Joubaud, S., Dauxois, T., Breaking of internal waves parametrically excited by ageostrophic anticyclonic instability, Japan Geoscience Union Meeting 2022, 2022.05.
- Onuki. Y., Joubaud, S., Dauxois, T., Breaking of internal waves parametrically excited by ageostrophic anticyclonic instability, 14th European Fluid Mechanics Conference, 2022.09.
- Project members

Representative: Sylvain JOUBAUD (ENS de Lyon)

RIAM advisor: Yohei ONUKI

Collaborators: Corentin PACARY, Dheeraj VARMA, Julie DELEUZE (ENS de Lyon)

特定研究2【分野融合】

計測・シミュレーション・モデリングを組み合わせた統合診断 Synthetic diagnostics combining measurement, simulation and modeling

統括責任者:糟谷 直宏(核融合力学分野)

研究対象を計測することが対象理解の第一歩であるのはどの分野でも共通です。実験計測を行い、その信号の物理的意味を明らかにするうえで、様々なデータ駆動科学の手法やシミュレーションが利用されています。統合診断はシミュレーションデータを用いて計測結果を再現し、定量的解釈を提供するものです。例えばプラズマ乱流の大域的シミュレーションデータを用いたイメージングがあります。AI 技法との親和性が高く、また、理論解析が巨大なデータ空間内での道標となります。

本特定研究では、様々な分野で行われている実験計測、複合シミュレーション、データ駆動モデ リングを組み合わせた統合的診断手法の共通性や応用性を探ることで、液体・気体・プラズマの ミクロ・マクロ的様相を理解するためのさらなる手法の進展を目指します。 非平衡開放システムにおける時空間ダイナミクスの研究

日本大学生産工学部 佐々木真

## 背景と研究目標

実験室プラズマをはじめ惑星大気や海洋現象など、エネルギーや粒子の流入・流出のある開放シス テムには、普遍的に揺らぎや乱流等の「時空間ダイナミクス」が存在する。そして、時空間ダイナミ クスに起因する輸送によってそれぞれの系の発展が支配されている。このようなシステムの発展を予 測・制御することは現代物理学の最先端の課題であり、それぞれの系における詳細な研究が精力的に 進められている。

本研究では、「時空間ダイナミクス」を共通の視点として、プラズマ・惑星大気・海洋現象の非線形 現象を系統的に整理することを目指す。対象は、磁化プラズマにおける乱流・惑星大気における乱流 と構造形成・海洋乱流現象に渡る。これらのマルチスケールな時空間ダイナミクスに対し、観測デー タに特異値分解や動的モード分解等のデータ駆動科学的手法を適用する事で、共通の視点から諸現象 を整理する。

今年度は(1)プラズマ乱流における乱流・構造形成相互作用を波動運動論の枠組みで解析を進め、大 域電場による帯状流の捕捉現象を発見した。また、(2)特異値分解による異種物理量間の特徴を抽出す る手法を開発した。さらに、(3)深層学習を用いて、計測困難物理量の時空間構造推定手法の構築を行 なった。以下でそれぞれについて概説する。

#### 研究成果

(1) プラズマ乱流における乱流・構造形成相互作用の理論研究

近年、JET 等の大型装置において H-mode に おける径電場 well に帯状流が存在することが 報告されている[Hillesheim, PRL '16]。流体モ デルにおける対流微分を介した相互作用を考 えると、径電場と帯状流は直接相互作用がな い。このような帯状流と径電場の空間存在位置 の関係を理論的に説明するべく 波動運動論に



の関係を理論的に説明するべく、波動運動論に基づき乱 図1:帯状流・径電場相互作用モデル 流との相互作用を介した相互作用過程を考えた。

図1に示すようなプラズマ分布・乱流・帯状流・径電場の相互作用を取り入れた波動運動論シミュレ ーションを行なった。帯状流と径電場はポロイダル流の発展方程式によりその発展を考える。帯状流は 乱流応力による駆動力を、径電場については新古典粘性をモデル化した形で、外部駆動流れを導入した。 本モデルには、波数・実空間における位相空間での乱流塊の捕捉機構が考慮されている。この乱流捕捉 は、帯状流や計電場による乱流渦のストレッチングによる波数変化を介した分散関係の変化を考慮した ものであり[Kaw, PPCF '03]、乱流の実空間構造に本質的な役割をするものである[Sasaki, Sci. Rep., '17, PoP '18, '21]。

上記モデルのシミュレーションを行なった。初期条件としては、乱流が空間一様に分布した条件から、

外部駆動の計電場を導入し、その後の発展を計算した。大域電場が形成されると、まず乱流が径電場に 捕捉される。捕捉された乱流がさらに帯状流を駆動する事がわかった。このような機構により、径電場 well 内に帯状流が"捕捉"されたような空間構造が実現する。本成果は、近日中に論文投稿予定である。

(2) 特異値分解による異種物理量間の共通構造の抽出

非平衡開放系の発展は、システム内に発生する揺動による粒子・熱・運動量輸送が支配する。揺動駆動の輸送の性質は、粒子密度や温度揺動と流れ場揺動間の相関の理解が鍵となる。このような異種物理量間の共通構造を系統的に抽出する方法として、特異値分解を応用した解析手法を開発した。本手法はmulti-field SVD と呼ぶ。

解析対象のデータには、直線磁化プラズマ装置 PANTA における乱流観 測データを用いた。本データは、イオン飽和電流から電子密度揺動を浮遊電 位分布から径方向流れ場揺動を評価することが可能である。同時計測され たこれら2種の物理量を時間方向に揃えて並べた巨大行列に対し、同時に特 異値分解を行う。すると、密度揺動と径方向流れ場揺動の共通の時間発展と それに対応するそれぞれの空間構造を得ることができる。密度・径方向流れ 場揺動は類似の空間構造を持ち、周方向に位相遅れを有している事を確認し た。本手法によって、系統的に異種物理量の位相関係や共通時間発展を抽出 することが可能である。さらに、特異値分解されたモード毎は、互いに直交 するため、同モードの組み合わせのみが輸送に寄与する(図 2)。そ

のため、従来手法に比べ圧倒的に少数自由度に落とした形で 輸送の性質を議論することが可能となる。本成果は、近日中に 論文投稿予定である。

(3) 深層学習を用いた計測困難物理量の推定

核融合プラズマにおいて静電ポテンシャル揺動の 計測は、チャレンジングである。現在では、重イオン プローブのような超大規模な装置を用いたり、ラング ミュアプローブに複数の大きな仮定を課して計測し たりと、汎用的に静電ポテンシャル揺動を計測・推定 する手法構築が喫緊の課題となっている。

そこで、本研究では図3のようなマルチスケール深層学習を 用いて[Ishikawa, '22]、密度揺動からポテンシャル揺動の推定を 行なった。対象としたデータは、3次元大域流体シミュレーシ ョンによる抵抗性ドリフト波の非線形飽和状態である。推定結 果は図4に示すように、相関係数が0.98と良好な推定が可 能であることが分かった。さらに、推定したポテンシャル 揺動から粒子輸送の定量的評価も可能である事も示した。 本成果は近日中に論文投稿予定である。



図 2: Multi-field SVD による輸送解析 上図:本提案・下図:従来手法





図 4: ポテンシャル推定結果。正解(右図) と推定結果(左図)の比較。

# 第一原理シミュレーションとデータ科学、数値計測による プラズマ分布形成の定量的理解に向けた基盤開発

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ける最重要課題として、プラズマの熱輸送や粒子輸送の物理理解とその定量予 測が挙げられる。近年の計算機の性能向上により、位相空間上の分布関数発展を第一原理的に扱えるように なり、強力な解析手段としてシミュレーション研究の重要性が増している。計算結果に対する要求レベルは さらに高まっており、数値計測手法などのシミュレーション結果に対する定量的な評価手法の開発は、その 要求に応えるものの一つとして進められている。一方で、運動論に基づく第一原理シミュレーションでは、 定量的な計算結果を得るために、巨大な計算資源を要することが課題になっている。本課題では、多くの分 野で応用が進むデータ科学的手法を利用することで、第一原理シミュレーションと数値計測手法を融合し、 プラズマの分布形成等を定量的に理解し得る解析手法の基盤開発を行う。プラズマ輸送シミュレーションを データ科学手法により効率的に実行し、得られるデータに対する数値計測を実施することで、プラズマ分布 形成と輸送現象の定量的な理解を目指す。

# 研究方法

本課題では、プラズマ輸送現象の第一原理シミュレーション結果を対象とするため、ジャイロ運動論コード GKV とドリフト運動論コード FORTEC-3D を用いた解析を進める。前者のコードは、磁力線に沿った局所 フラックスチューブ領域において、ジャイロ運動論方程式に基づいて5次元位相空間上の分布関数の時間発 展を解く。磁力線垂直方向の乱流を高精度で計算することができ、実際のプラズマ実験配位に対応させて、 輸送フラックスや乱流スペクトルを定量的に再現することに成功している。後者は、ドリフト運動論方程式 に基づいて大域的な新古典輸送現象を粒子法によって解き進めるコードである。最近では、多粒子種プラズ マにおける解析が進展し、大型へリカル装置(LHD)における不純物ホールと呼ばれる特異な密度分布構造に 対する新古典輸送からの説明に成功している。これらのコードによるシミュレーションおよび得られる計算 結果に対して、データ科学的手法および数値計測手法を適用し、下記の解析を進める。

## データ科学的手法による効率的な運動論シミュレーション

巨大な計算コストを要するジャイロ運動論シミュレーション について、簡約輸送モデルとこれまでのシミュレーションデー タベースから必要とする入力パラメータ領域を推定し、GKV コードを用いて効率的にシミュレーションを実行する。その結 果を再度、輸送モデルの最適化に用いて、対象プラズマに特化 にした輸送モデルを構築する。

# 運動論シミュレーションデータに対する数値計測

FORTEC-3D による新古典輸送の計算結果を HIBP 計測ツール に渡し、揺動分布や静電ポテンシャルの数値計測を行い、プラ ズマ分布の定量評価を行う。



Fig. 1 新しい輸送予測手法を用いて構築された最 適化輸送モデル(橙面)と従来の簡約モデル (青面)の比較。緑点は最適化輸送モデルの 構築の際に実行したジャイロ運動論シミュ レーションの結果。

データ科学的手法と第一原理計算の融合による新しいプラズマ輸送予測手法の開発

定量的な輸送予測が可能な第一原理シミュレーションの最大の弱点である膨大な要求計算コストの問題を 解決するため、入力パラメータをデータ科学的手法により予測する第一原理計算の手法を開発した。ここで は、まず簡約輸送モデル[1]を用いて対象となるプラズマの輸送フラックスに対応し得る温度勾配などの入力 パラメータを推測する。その値を用いて少数回だけジャイロ運動論シミュレーションを実行し、その結果を 用いて簡約モデルを再度、最適化する。この方法で求められた最適化簡約モデルを用いると、幅広い温度勾 配領域で実行したジャイロ運動論シミュレーションの結果を高精度で予測できることが明らかになった(Fig. 1)。本手法で構築した輸送モデルは、プラズマ温度の分布発展計算にも応用され、随時ジャイロ運動論シミ ュレーションを実行した場合と同精度で、分布形成の発展計算が実現できた[2]。

# LHD プラズマの新古典輸送シミュレーションと HIBP 計測模擬

大型ヘリカル装置(LHD)における新古典プラズマ輸送シミュ レーションを FORTEC-3D を用いて実行し、その結果に対し て、重イオンビームプローブ(HIBP)による計測を数値的に模 擬した(Fig. 2)。解析対象としたデータは、磁気面上で非一様 な静電ポテンシャルΦ<sub>1</sub>を評価したものである[3]。プローブイ オン入射条件は、1 価の金イオンを 5.5MeV のエネルギーで 入射した。実際の計測と同様に、入射角を掃引することによ り計測点の位置が空間的に変化するため、空間分布の計測が 可能になる。計測結果における電位データ局所値との比較か ら、有限幅メッシュを用いる計算誤差は入射エネルギーの 0.001%以下に抑えられていることが分かった[4, 5]。



Fig. 2 LHD 磁場配位におけるビーム軌道シミ ュレーション. 重イオンの入射角を掃引 した複数の軌道を表示している.

## まとめ

近年、データ科学に基づく解析手法の開発研究が様々な分野

で精力的に進められている。本課題では、このようなデータ科学的手法と数値シミュレーションにより、新 しい数値研究の展開を図るため、第一原理シミュレーションの効率的な実行と計算結果に対する定量的なデ ータ解析の実現を目指した。特に巨大な計算資源を要求する第一原理プラズマシミュレーションに対して、 可能な限り計算量を削減してこれまでと同精度の輸送予測が可能となる新しい解析手法を開発した。さらに、 シミュレーションデータに対して実験計測を模擬する計測手法を適用し、複雑な3次元プラズマにおける HIBP 数値計測による基盤開発を進めた。今後は、効率的な第一原理シミュレーションの実行と定量的なデ ータ解析手法を融合した手法に発展させ、より現実的なシミュレーション条件におけるプラズマ分布形成に 対する定量的な解析を進める。

- [1] M. Nunami, et al., "A reduced model for ion temperature gradient turbulent transport in helical plasmas", Physics of Plasmas **20**, 092307 (2013).
- [2] M. Nunami, et al., "Improved prediction scheme for ion heat turbulent transport", Physics of Plasmas 29, 102505 (2022).
- [3] K. Fujita, et al., "Study on impurity hole plasmas by global neoclassical simulation", Nucl. Fusion **61** 086025 (2021).
- [4] 吉原稜, "重イオンビームプローブを用いたトーラスプラズマにおける3次元揺動計測の模擬",第39回プラズマ・核融合学会年会、富山国際会議場.
- [5] N. Kasuya, "Global Structure and Its Diagnostic Simulation in Magnetized Plasma", 20th International Congress on Plasma Physics, Gyeongju, Korea.

# 計測との比較に向けた不純物輸送の統合モデリング

京都大学大学院工学研究科 本多充

目的

近年、核融合プラズマの輸送・閉じ込め研究領域において、不純物が着目されている。これまでの輸送研 究では、粒子・熱輸送のいかんに関わらず、電子やバルクイオンである重水素の輸送に注目が集まってい た。プラズマを構成する粒子の大半をそれらが占めることや、ソースの評価が比較的容易であることが理 由として挙げられる。一方、不純物は主に壁やダイバータから侵入し、周辺プラズマを経て輸送によって コアへと運ばれることから、本質的にソースの種類やその分布が異なること、粒子輸送に関しては向きが バルクイオンと異なることに加え、2価以上の価数を持っていることから、放射による熱損失を生じさせる ことなど、電子やバルクイオンと大きく異なった特性を持つ。一方で、通常、核融合プラズマ中に入射し た中性粒子ビームと完全電離不純物イオンとの荷電交換反応に続く発光のドップラー広がりからイオン温 度を、ドップラーシフトからプラズマ回転速度を計測するなど、計測分野において不純物は必要とされる 存在になっている。計測される不純物イオンの代表は炭素であり、JT-60Uをはじめ多くの装置では炭素の 発光を計測している。実験解析においては炭素とバルクイオンの温度が等しい仮定し、また炭素の回転速 度はバルクイオンのそれと等しいとして回転速度を求めることが多いが、前者はともかく後者の仮定は妥 当であるとは言いがたい。炭素は価数、質量数共にバルクイオンの代表格である重水素と隔たりがあり、 そのためイオンが感じる衝突周波数は異なっている。ゆえに両者の間で新古典輸送特性が異なるため、ポ ロイダル回転、トロイダル回転共に、常に重水素と炭素の間には差が生じる。とりわけ、イオン温度勾配 が急峻となる領域では、その差は無視できるものでは到底ないことが、理論、シミュレーション、実験解 析から分かっている。このことから、シミュレーションと実験計測との比較を行う上で、バルクイオンと は異なる不純物の挙動を十分良く模擬できるモデリングが求められている。

これまでの課題

トーラスプラズマ中の物理量の発展をシミュレーションできる流体型輸送コード TASK/TX は、プラズマ の粒子輸送、熱輸送、運動量輸送を自己無撞着に扱い、密度、温度、回転の分布を計算することができる。 これまでの拡張で電子と重水素に加えて完全電離炭素を扱えるようになっていた。炭素は壁、ダイバータ などから中性粒子の状態でたたき出される。それらがプラズマ中に混入することにより、電離、荷電交換 によってイオン化し、炭素イオンになる。炭素イオンは完全電離状態で6 価であるため、プラズマ中には 0 価から6 価までの、計7 種類の価数状態を持つ。完全電離炭素がいきなりプラズマ中に現れるわけでは ないので、完全電離炭素のみを扱うだけでは炭素の挙動をよく模擬できたとは言えず、<u>中性から完全電離</u> までの炭素を物理的に妥当な手法で扱わなくてはならない。TASK/TX では、1 つの価数状態の粒子種を増 やすごとに、方程式が8 つ増えることになるため、中性粒子を除いて6 つの価数状態を持つ炭素を全価数 状態に対して全て同等に扱ったとすれば、48本も方程式が増えてしまうことになる。行列計算上のコスト は無視できないほど増大する上、一般的な核融合プラズマの温度帯では炭素は概ねすぐに完全電離するた め、1 価から5 価までの炭素密度は極めて低く、それらを個別に扱うことは数値安定性上の懸念も残る。6 価の炭素イオンの供給源として0-5 価までの炭素不純物を扱うという目的に照らせば、0-5 価までの炭素不

#### スーパーステージモデルによる不純物輸送モデリング

複数価数のイオンを束ね(バンドルし)あたかも1つの粒子種として扱うことをスーパーステージと呼び、 各価数状態間は準静的電離平衡にあると仮定する。現在の取り組みにおいては、中性炭素によるソース効 果を適切に取り入れることが重要であったため、0-5 価までの炭素を束ね、擬中性炭素として扱うことにし た。電離や再結合の断面積データは OpenADAS から取得しており、電子温度の関数となっている。 0-5 価を束ねることの妥当性検証のために、中性炭素を 200eV の電子温度のプラズマに置いた際に、価数 ごとの炭素密度の時間発展を、0-5 価まで束ねた場合と、全価数に対して割合方程式(rate equations)を解い た場合で比較した。すると、概ね 1ms 程度で両者の割合は一致した。すなわち、1ms 程度よりも長い時間 スケールの現象を扱う上では、全価数を正確に取り扱う事と、0-5 価の擬中性炭素と6 価の炭素イオンとし て扱うことに差はほとんど無い、ということを意味する。

擬中性炭素の密度方程式には、5 価から6 価への実効電離と擬中性炭素と5 価の炭素の比を表す関数の積 がシンク項として、6 価から5 価への実効再結合がソース項として働くことになる。6 価の完全電離炭素の 密度方程式には、それらが逆符号で含まれることになる。0-5 価を束ねた擬中性炭素を扱うということは、 0-5 価までの各価数の密度比を知ることができないということを意味しない。擬中性炭素の密度から、それ に対する各価数の比率を準静的電離平衡の仮定に基づき算出できるため、各価数の密度は計算することが できる。

## 炭素源モデリング

TASK/TX は擬似的に SOL 領域を扱うことができる。2 次元モデリングとの対比として、TASK/TX の SOL 領域は径方向に 2 次元モデリングにおけるフラックスチューブに分割され、各フラックスチューブは SOL 上流領域、ダイバータプラズマ領域、ダイバータ板を含む。ダイバータ板で生成し、ダイバータプラズマ 領域を経て SOL 上流に戻る中性炭素をソースとして扱うため、ダイバータプラズマ領域で生じる物理過程 を係数としてモデル化する必要がある。ダイバータ板に流入したフラックスにスパッタリング率が掛けら れたものが、戻ってくる中性粒子フラックスとなる。一部はそのまま SOL 上流へ向い、一部はポンプによ って排気され、一部は再びダイバータ板へと戻り再堆積する。炭素の叩き出しは、重水素イオンフラック スのみならず炭素フラックスによっても生じる。物理スパッタリングのみならず、炭素フラックスであれ ば反射を、重水素フラックスであれば化学スパッタリングによる収率も考慮しなくてはならない。それら の物理過程を全て考慮して係数に落とし込み、SOL 領域における炭素源モデリングを完成させた。

#### シミュレーション

実装したモデルで TASK/TX シミュレーションを実施し、モデルの妥当性を検証した。実施する上で大事 な点は、現状のモデリングによってプラズマが系として時間と共に発散せず、炭素の収支が落ち着く定常 状態に到達するかどうかを確認することである。シミュレーションの結果、定常状態には到達したものの、 炭素イオンの生成量が実験観測されるレベルよりも遙かに大きいことがわかった。そこで、数値因子を導 入し、概ね妥当と思われる定常状態に到達するためのパラメータを探索したところ、0.05 程度で典型的な 大型トカマク実験で観測される程度の実効電荷数に落ち着いた。

準中性の度合い、両極性の破れによって生じる自発トルクなどの指標を見ても、定常に至るまでおかしな 挙動は示していない。このことは、現状では数値因子の調整が必要ではあるものの、<u>スーパーステージモ</u> デリングや炭素源モデリングそのものは本質的に成功したことを裏打ちしている。

考察

炭素生成過程における各種係数を見直し、数値因子を極力1に近づけなければならない。2次元のモデリ ングを1次元に落とし込むため、次元縮減に際しての仮定が複数導入されていることから、その点を中心 に係数を見直し、必要に応じて追加のモデリングを行い、モデルの向上に努める。

成果報告

本多充、松山顕之、本間裕貴、"スーパーステージモデルを用いた TASK/TX における炭素不純物モデリング"、プラズマ核融合学会 第 39 回年会、富山国際会議場、2022 年 11 月

トロイダルプラズマにおける MHD 不安定性の非線形構造のシミュレーションデータ解析

核融合科学研究所 ヘリカル研究部 佐藤雅彦

本研究では、トロイダルプラズマを対象として、磁気流体力学(MHD)不安定性が形成する3次元構 造形成のメカニズムを非線形シミュレーションにより解析することを目的とする。これまでに、 PLATO トカマクにおける内部キンクモード、および、バルーニングモードの非線形シミュレーショ ンを実施し、モード間相互作用の詳細な解析のため動的モード分解の導入を行なってきた[1,2]。本年 度においては、LHD プラズマに対する MHD シミュレーション結果に対して動的モード分解を適用 することを行なった。

本研究では、HINT コードにより高ベータ LHD プラズマの MHD 平衡を構築し、非線形 MHD シ ミュレーションコードである MIPS コード[3]を用いて MHD 不安定性の時間発展の解析を行った。 MIPS コードは、MHD 方程式を円柱座標系のもとで 4 次精度の有限差分法を用いて空間方向を離散 化し、4 次精度のルンゲクッタ法により時間積分を行う初期値コードである。図1に MHD 平衡の縦

長ポロイダル断面における磁力線のポアンカレ分布、及び、同断 面における Z=0 での圧力分布を示す。この平衡では、圧力分布 形状を放物型、中心ベータ値を約 10.7%と仮定している。高ベ ータ LHD プラズマでは、図 1(a)が示すように、緑で示された最 外殻磁気面の外側に磁力線がストキャスティックとなる領域が 存在する。図 1(b)において、縦の緑の破線は最外殻磁気面の位置 を示しており、ストキャスティック領域においても有限の圧力勾 配が存在していることを示している。

これまでの[3, 4]等の MIPS コードを用いた LHD プラズマに 対する MHD シミュレーション研究においては、Boozer 座標系 のもとでのフーリエモード解析が行われてきた。図1で示した MHD 平衡に対して MIPS コードによりシミュレーションを行う と、複数のトロイダルモードが線形不安定となる。その中で、最 も不安定なトロイダルモードのモード構造を図2に示す。図2 は、Boozer 座標系においてフーリエモード分解されたデータで あり、トロイダルモード数nは、n=6である。横軸のρ<sub>4</sub>は規格 化された小半径であり、規格化されたトロイダルフラックス(s) の平方根の値(ρ<sub>1</sub>=s<sup>1/2</sup>)で定義され、ρ<sub>1</sub>=1 は最外殻磁気面の位 置に対応する。ρ<sub>4</sub>=1においてもモードの振幅は有限であり、モ ードがストキャスティック領域に染み込んでいることを示して いる。しかしながら、Boozer 座標系は入子状の磁気面が存在す る領域においてのみ構築されているため、ストキャスティック領 域でのモード分解が実行できていない。そのため、Boozer 座標 系によるモード分解では、ストキャスティック領域を含めたプラ ズマ全体でのモードの分離が行えない。

この問題に対して、動的モード分解を適用して、ストキャステ ィック領域も含めてプラズマ全体をモード分解することを試み た。図3に、圧力の時系列データに対する動的モード分解より得 られたモード構造を示す。ここでは、主要な3つの線形不安定モ



図 1. 解析に用いた MHD 平 衡の(a) 縦長断面における磁 力線のポアンカレプロット。 緑の磁気面が最外殻磁気面に 相当する。(b) 同断面の Z=0 における圧力分布。縦の緑の 破線が最外殻磁気面の位置を 示している。



図3. 揺動圧力時系列データに対する動的モード分解より得られた、主要な3つの線形不安定モ ードの縦長ポロイダル断面におけるモード構造。赤の領域は揺動の値が正、青の領域は揺動の 値が負の場所を示している。また、緑の線は最外殻磁気面を表している。

ードの縦長断面での圧力揺動分布を示した。これらのモード数の異なるバルーニングモードは、緑で 表された最外殻磁気面の外側の領域、すなわち、ストキャスティック領域にも広がっている。以上の 解析から、ストキャスティック領域を含む LHD プラズマにおける MHD シミュレーションにおいて も動的モード分解の動作確認を行うことができた。今後は動的モード分解により得られたデータを用 いてモード間相互作用の解析を進めていく予定である。

[1] S. Tomimatsu, et al., Plasma Fusion Res. 15 (2020) 1403052.

[2] 黒田他、プラズマ・核融合学会九州・沖縄・山口支部第 25 回支部大会 (2021/12/18-12/19) 18pA03

[3] Y. Todo, et al., Plasma Fusion Res. 5 (2010) S2062.

[4] M. Sato et al., Nucl. Fusion 57 (2017) 126023.

# 医療用 CT・MRI 技術を応用したプラズマ乱流計測

九州大学医学研究院保健学部門 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。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 次元観測が 可能であることをシミュレーションにより確認した(荒川弘之他、2019 年度第 36 回 プ ラズマ・核融合学会 年会、 01Ap07)。加えて、PANTA において初期的な原理実証実験 による平均流計測、プラズマ装置改造に伴うレーザー伝送系の光ファイバー化を行った。 今年度は、ベクトル CT 計測実験を PANTA 装置で行い、プラズマ中心部付近における局 所的なイオン流れベクトルの 2 次元再構成を行った。

方法

下図(a)に、PANTA 装置及び実験の様子を示す。プラズマ発生装置は、九州大学直線磁化プラズマ発生装置 PANTA を利用した。円柱軸方向磁場強度 900G を印加し、アルゴンガス圧約 0.1 Pa 条件において、直径約 10cm、長さ 4.05 m の円柱状アルゴンプラズマを生成している。1回のプラズマの生成時間は 0.5 秒で、繰り返し生成を行った。プラズマ密度は約 1×10<sup>18</sup> m<sup>-3</sup>、プラズマ中心の電子温度は約 3 eV である。このプラズマ条件においては、プラズマ中の主な揺動モード(*m* = 1)が約 1 kHz で伝搬している。

ベクトル CT を用いたプラズマ流れ計測では、既存のレーザー誘起蛍光計測システ ムとラングミュアプローブ(半径位置 r = 4 cm)を用いた。レーザー誘起蛍光システ ムにおいては、レーザーを電気光学変調器(EOM)を用いて 100 kHz で強度変調させ た。レーザーは、直径約 10 cm の円柱プラズマを磁場に垂直に貫くように設置した。 レーザーはプラズマ中心から±5 cm の範囲を移動させた。レーザー波長は、アルゴン イオンの 3d<sup>4</sup>F<sub>7/2</sub>準位から 4p<sup>4</sup>D<sub>5/2</sub> 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

29

(線積分)。このため、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。

ラングミュアプローブではイオン飽和電流によりプラズマ中の密度揺動(m = 1)を 計測した。今回の実験では、プラズマ中の流れ構造が変化することなく、一定に回転 していると仮定した。このため、プラズマ中の揺動をヒルベルト変換し、回転する構 造の位相を再構成した。

以上により、プラズマ流れ構造の回転位置 φ、プラズマへのレーザー入射位置、レ ーザー波長、それぞれにおける蛍光強度を条件付き平均することで、ベクトルトモグ ラフィーの再構成条件を得た。

#### 結果

結果を以下の図(b)に示す。図では、流れの周方向平均流れを差し引いた揺動成分 を示している。今回の解析では、r > 3 cm のプラズマ密度が低い部分ではノイズの 影響により流れが発散して、意味ある結果とならなかった。一方で、r < 3 cm におい ては、密度揺動の変動に沿う形でイオン流れが観測された。これは、これまでのプラ ズマ中の揺動観測実験と矛盾しない。今後は精度検証や、圧縮センシングを用いてr> 3 cm での流れ再構成を行う予定である。



図:(a)実験の様子。青白い光がアルゴンプラズマ。図右下の暗幕内に励起光の集光光 学系を構築している。(b)ベクトルトモグラフィーによるイオン流れ計測の初期結果。 塗りつぶし等高線は密度揺動を示し、矢印はイオンの流れを示す。

成果報告:なし

# 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

# 1. 目的

プラズマ乱流の研究分野において、閉じ込めを改善する効果のあるゾーナルフローは近年広く研究さ れている。ゾーナルフローと同様にメゾスケールの一種であるストリーマーもまた閉じ込めを悪化させ る存在ではあるが、大きな注目を集めている。ストリーマーは径方向輸送に大きな影響を与えるため、 発生機構や制御・抑制を研究することは核融合プラズマの輸送を理解するうえで非常に重要となる。

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、放電条件を調整することでプラズマ 乱流中のミクロスケール構造であるドリフト波が非線形結合をし、乱流の塊であるストリーマー構造が 発生する。この時、非線形結合により乱流の塊を形成するドリフト波を搬送波と呼び、搬送波と非線形 結合をし、乱流の塊の包絡線と同じ構造を持ち位相関係がロックされている波を媒介波と呼ぶ。PANTA ではこの媒介波と搬送波が非線形結合をしてストリーマー構造を形成する様子が世界で初めて観測さ れ、その詳細が研究されてきたが、これは直線プラズマがトロイダルプラズマに比べて低温で近接性に 優れることを活かし、トロイダルプラズマでは不可能な多チャンネルプローブ計測を積極的に行ってき た結果から得られたものである。またバイスペクトル解析という非線形結合の詳細を解析できる手法を 多チャンネル計測結果に適用して、時空間的に非線形結合を調査してきたことも大きい。

ここでメゾスケール構造の発生と機構は理論・シミュレーション研究においては、ブラソフ方程式や ジャイロ運動論と同じ数理構造を持つ波動運動論を元に導き出されるが、このモデルは実空間と波数空 間からなる位相空間上において計算されている。しかし実験によって得られる情報は実空間における測 定点が足りない、あるいは測定点が十分でもスペクトル解析によって波数は空間的に積分・平均化され てしまうことが多く、位相空間上で波動運動論モデルと比較することは困難である。そこで本研究では 実験的に乱流の位相空間解析を行うことを目指して、波数の局所空間情報を求めることを試みた。その ためにまずは周方向に数値フィルターをかけてから波数スペクトルを計算するという解析を行った。

#### 2. 実験方法

九州大学の直線プラズマ実験装置 PANTA を用いてストリーマーが発生する実験を行い、多数のチャンネルを持つ周方向静電プローブアレーでイオン飽和電流の揺動(電子密度揺動に相当)を計測することで、ストリーマー構造とその発生に重要な役割を果たす媒介波、またストリーマーを形作る搬送波(ドリフト波)を観測し、両者の間に存在する非線形結合について複数のバイスペクトル解析を用いて詳細を明らかにした。PANTA は軸方向の長さが z = 4000 mm、内径 r = 450 mmの直線装置である。ソース部に付けられた内径 95 mmのガラス管に RF アンテナで 3 kW、周波数 7 MHz の RF 波を印加し、ヘリコンプラズマを発生させることで真空容器内部に直径が約 100 mmの直線プラズマが発生する。ストリーマー構造は、放電条件を調整することで発生する。具体的には、軸方向に 0.09 T の磁場を発生させ、内部に封入したアルゴンの圧力を 1.5 mTorr に調整することで、ドリフト波乱流内にストリーマー構造が形成される。このとき中心部の密度は 10<sup>19</sup> m<sup>-3</sup>程度、電子温度は 3±0.5 eV のおおよそ平坦な分布である。軸方向の磁場が 0.09 T より低い時は、プラズマ状態はコヒーレントなモードや、ある発達したモードの高調波成分が乗った周期的な孤立波(ソリタリー)モードなどとなる。

軸方向 z = 1885 mm、半径 r = 40 mm の位置に周方向 64 チャンネル静電プローブが設置されている。 このプローブは精密に周方向にプローブが配置されているため、特に精度の良い乱流の周方向モード数 を観測するが可能である。ストリーマー構造は搬送波が周方向に自己収束した構造体であり、その包絡 線は媒介波と位相関係を保持する。そのため、ストリーマーの位相構造を特定するためには、媒介波と 2 つの搬送波のバイスペクトル解析を行い、バイフェーズを計算すればよい。このバイフェーズが、搬 送波が作り出す乱流の塊の包絡線(ストリーマー構造)と媒介波の間の位相差を表す。

本研究ではさらに周方向波数の局所空間情報を計測することを目指し、周方向に並んだデータに数値 フィルターをかけてから周方向波数スペクトルの計算を行った。まずは周方向 64 チャンネルのうちお よそ半分の領域を通過させ、反対側の領域を遮断し、境界はなだらかな関数で繋ぐようなフィルターを 適用させた。フィルター適用後に周方向にフーリエ変換を行い、各周方向モードの強度の時間発展を求 めた。求めた周方向波数は概ねフィルタリングされた領域の情報となり、フィルターの幅を調整するこ とでさらに局所的な情報も取得可能となることが期待される。またフィルターの通過領域をずらすこと で周方向モードの空間依存性についても調査した。

## 3. 実験結果と考察

PANTA のストリーマー発生放電(磁 場 0.09 T、圧力 1.5 mTorr)で周方向 64 チャンネルプローブにより電子密度揺 動を測定し、ストリーマーの包絡線構造、 媒介波、搬送波を観測した。媒介波は周 方向モード数  $(m_1, f_1) = (1, -1.2 \text{ kHz})$ で、最も振幅が大きく媒介波との結合が 強かった搬送波は、 $(m_2, f_2) = (2, 7.8 \text{ kHz})$ や $(m_3, f_3) = (3, 6.6 \text{ kHz})$ の波であった。

周方向のおよそ半分の領域のみを通 すフィルターを適用してから周方向に フーリエ解析を行い、各周方向モードの 時間発展を調べた。図1は搬送波である 周方向モード数m=3の強度の時間発展 である。一番上の図に対してフィルター を適用した周方向角度をそれぞれ -π/2, -π, -3π/2 ずらした結果も並べた。図を 見ると、m=3の強度が大きい領域がス トリーマーと同じ周波数、つまり-1.2 kHz で周方向に伝播しているのが分かり、 ストリーマーの乱流の塊が各フィルタ ーを通過していく様子がうかがえる。さ らに通過中に細かい強度の増減も見ら れ、ライフタイムの短い現象が起きてい ることが示唆される。



図 1. PANTA のストリーマー発生時に周方向にフィルター をかけてから求めた周方向モード数m=3(搬送波)の強度 の時間発展。一番上の図に対して下図はフィルター適用位 置をそれぞれ  $-\pi/2, -\pi, -3\pi/2$ ずらした結果である。

今後も、波数の局所情報の詳細を求めることを目指し、乱流の位相空間解析を進めていく。

## 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現象の位相空間解析", 日本物理学会 2022 年秋季大会, 14pW621-1, 東京工業大学 (Sep 9-15, 2022).

## 5. 研究組織

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

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

兵庫県立大学大学大学院工学研究科 古賀麻由子

1. 目的

核融合プラズマの閉じ込めにおいて乱流は重要な影響を及ぼすことが知られている。乱流の物理を理解 するためにはミクロスケールの擾乱からマクロスケールの乱流成長まで高分解能で計測する必要がある。 本研究では、マイクロ波の散乱波や反射波を用いた複素振幅計測によるマイクロ波イメージング計測手 法を開発することを目的としている。マイクロ波は可視光と違い、複素振幅の測定が容易であることを 活用するもので、光学系を用いないレンズレスとし、データ処理により対象物画像を得ることで、計測ス ペースの制限なく高分解能な画像データが得られる可能性がある。

2. 画像再構成

図1にレンズレスマイクロ波ホログラフィの概念図を示す。入射マイクロ波が対象物体上の1点P<sub>t</sub>において反射率f(P<sub>t</sub>)で反射され、観測点P<sub>d</sub>に至る。入射マイクロ波の関数と反射マイクロ波の関数を掛け合わせたものを行列Hで表したとすると、受信信号g(P<sub>d</sub>)はHf(P<sub>t</sub>)=g(P<sub>d</sub>)となる。観測点で受信されるのは対象物体上の全ての点からの反射マイクロ波の総和となる。画像再構成とは、この受信信号gから反射率fを求めることである。既に、数理的にHの逆関数を求め再構成することには成功しているが、計算時間がかかることや信号にノイズが重畳すると再構成が困難になるなどの問題点がある。そのため、我々は画像再構成に機械学習を導入することを考えた。これまでの研究で、波打った対象物体や楕円の凹凸を持つ対象物体といったシンプルな対象物体に対して、機械学習による再構成が可能であることを明らかにしてきた。本研究では、より実際のプラズマに近いシミュレーションデータを用いた場合の画像再構成を試みている。



図1 レンズレスマイクロ波ホログラフィの概念図

3. 実験方法

図2に九州大学応用力学研究所糟谷直宏教授にご提供いただいた数値シミュレーションによる PANTA 装置の乱流構造データ[1]とこれを用いた電磁界計算の設定を示す。PANTA プラズマのうち40mm 四方の領域を対象物体とし、入射アンテナ・受信アンテナは対象領域から300mm 離れた位置に設定した。入射マイクロ波の周波数は30GHzとした。受信アンテナアレイは10mm 角サイズの受信器が17×17 で構成されている。対象とする領域を少しずつ変更し、対象物画像と受信信号のセットを5000 個用意し、学習データ

とした。機械学習は CNN (Convolutional Neural Network)を用いた。



図2 乱流構造データ(左)と電磁界計算の設定(右)

4. 実験結果および考察

図3に学習結果の一例を示す。受信信号の色は信号強度を示す(黄色は強度大、紺色は強度弱)。対象 物画像、予測画像の色は対象物体の奥行方向の表面位置を示す(黄色は手前、紺色は奥に対象物体が位 置している)。畳み込み処理の層数は1、活性化関数は tanh 関数、全結合層はパーセプトロン数 50 のも のを3つ使用した。受信信号は複素振幅データの実部と虚部を入力した。図から学習データ数が増える につれて対象物画像の表面位置の特徴を捉えて一致度が上がっていくことが分かる。このことから機械 学習により PANTA プラズマのマイクロ波反射計測画像を再構成できる可能性が示唆された。今後は受信 信号にノイズが重畳した場合や、プラズマがより細かい表面構造を持つ場合の再構成について調べてい きたいと考えている。



図3 学習結果の一例

[1] N. Kasuya and S. Sasaki, Plasma Fusion Res. 17, 1201053 (2022).

# 特定研究3【分野融合】

実験・計測科学と計算科学の融合による新しい研究分野の開拓 Developing new research fields by integrating experimental/measurement science and computational science

統括責任者:弓本 桂也(地球環境力学分野)

小菅 佑輔(核融合力学分野)

寒川 義裕 (新エネルギー力学分野)

これまでの科学研究では、研究対象を観測・計測し可視化する実験・計測科学と、物理・科学 理論で構築された数値モデルで現象を再現・予測する計算科学がその発展に大きく寄与してきま した。近年、機械学習や数理統計、データ同化の技術を用い両者を融合することで、おのおの単 独では得られない知見の取得や、実験設定およびモデルパラメータの最適化が行われるようにな っています。

本研究所は共同研究装置としてさまざまな実験・研究設備および大規模演算装置を有します。本 特定研究では、これらの設備を利用しつつ、実験・計測および計算科学をベースとする研究者が コミュニケーションを取りつつ、両者を融合させた新しい研究分野の開拓を目指します。 結晶成長中微斜面におけるナノスケール表面荒さと メゾスケール・マクロステップのファセット化との関係

大阪電気通信大学工学部 阿久津 典子

# 研究目的

最近、ナノスケールにおいて結晶表面のステップ間にあるテラス幅分布が計測可能になった。その 結果から SiC や GaN と言った半導体結晶についてインシリコの模型計算により原子間の量子力学 的相互作用の情報を得る方法を確立することが目的である。

#### 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おいて、最近計測が可能になった表面テラス幅分布について、引力、反発力が有る場合の表面物理模型を構築する。その結晶表面模型を用いて、テラス幅分布をモンテカルロ・シミュレーションにより計算機実験として測る。その結果から量子力学的相互作用を予測する。

# 共同研究 特別講演会の開催等

特別講演「異常を検知するテクノロジー」を主催大阪電気通信大学エレクトロニクス基礎研究所、 共催九州大学応用力学研究所、協賛日本結晶成長学会でハイブリッド開催した

 $(http://www.feri.osakac.ac.jp/lecture/lec20220720.html)_{\circ}$ 

開催日時は 2022 年 7 月 20 日(水) 17:00--18:30、開催場所は大阪電気通信大学寝屋川学舎 J 号館 J-503 教室であった。

#### 講演題目及び講演者概要

1. 講演題目「製造装置の異常を検知して装置保全に利用」、講演者:古屋 正 氏(株式会社東 京システムリサーチ)

概要:食品製造の工場において製造装置の保全を計画的に行うことは、機会損失を最小にするためにも大変重要である。従来は装置の特性から規定された時間を基準にした計画や、保全係がセンサーデータを分析し状態を予測して計画していた。講演では昨今増えているAIを利用した保全に関する課題とその解決アプローチについて紹介した。

2. 講演題目「気象などの異常を検知して防災や危機管理に利用」、講演者:矢口 裕介氏(株式 会社 Spectee)

概要:近年、頻発、激甚化する災害に対して、より効果的・効率的に対応していくためには、新たな テクノロジーを積極的に活用していくことが重要となる。講演では Spectee が取り組む AI による 防災・危機管理とはどのようなものなのか、また、これからの防災×テクノロジーはどのように発展し ていくのかについて紹介した。

## 考察
ナノスケールにおける傾斜依存ファセティング・ダイヤグラムをテンソルネットワーク 法で計算した。その結果を Si で観測されたファセット化相図と比較し, Si のステップ間引 力エネルギーは近似的に-123 meV と求めた。これにより、GaAs 等の半導体について結晶 表面のファセット化ステップの観測からステップ間引力エネルギーを近似的に求め第一原 理計算結果と比較する道が開けた。

非平衡定常状態で,原子的荒さとマクロな熱力学的荒さの中間にナノスケールでファセ ット化荒れ面が存在することを示した。平衡状態では熱力学的荒さとファセット化にファ セティング転移などで知られる確立された関係が知られている。非平衡状態では線形応答 領域の外側にファセット化しているが熱力学的に荒い面が存在することをモンテカルロ計 算法で示し、メゾスケールにおける成長速度の強い異方性発現に新たなシナリオを加え た。

#### 成果報告

#### 出版物

なし

発表論文(レフェリー有)

 <u>Noriko Akutsu</u>, Yasuhiro Akutsu, 'Slope--Temperature Faceting Diagram for Macrosteps at Equilibrium", Scientific Reports, **12** 17037 (2022). doi.org/10.1038/s41598-022-21309-x

## 紀要等(レフェリー無)

なし

### 口頭発表

- <u>Noriko Akutsu</u>, (Invited) ``Faceted-Rough Surface between Thermodynamically Rough and Atomically rough Surfaces", The 11th International Conference on Mathematical Modeling in Physical Sciences (IC-MSQUARE 2022), (On-line Conference, September 5--8, 2022).
- <u>Noriko Akutsu</u>, ``A Large Roughness Exponent and A Scaling Function for A Faceted-Rough Surface", 33rd IUPAP Conference on Computational Physics, (CCP2022), (Austin, Texas, USA, Virtual Only, The University of Texas at Austin, July 31--August 4, 2022).
- 3. 招待講演 <u>阿久津典子</u>,「ファセット化ラフ面 —原子スケール・ラフ面と熱力学的ラフ面の間—」 九州大学 応用力学研究所 RIAM フォーラム 2022, (2022 年 7 月 28 日--29 日、ハイブリッド方 式).
- 4. <u>阿久津典子</u>,「点型ステップ間引力が有る傾斜面の平衡状態近傍ステップダイナミクス:傾き依存ファセティング・ダイヤグラム」,北大低温研ワークショップ「結晶表面・界面での相転移ダイナミクスに関する理論とその場観察」(2023年1月26日--27日、北海道大学低温研究所、ハイブリッド開催)
- 5. <u>阿久津典子</u>,「熱力学的ラフ面と原子的ラフ面の間のファセット化ラフ面」,第51回日本結晶成長 国内会議(2022年10月31日--11月2日、RCC文化センター、広島県広島市)
- 6. <u>阿久津典子</u>,「マクロステップ形状維持のしくみの考察」,日本物理学会 秋季大会(2022年9月 12日--15日、東京工業大学、大岡山キャンパス)
- 7. <u>阿久津典子</u>,「多様な「荒れた表面」とファセット化ラフ面との関係」,日本物理学会 第77回年次 大会(2022年3月15日--18日、岡山大学津島キャンパス、オンライン開催)

# 時系列データに見られる不規則変動の分析

サブテーマ代表者:兵庫県立大学大学院 情報科学研究科 中村 知道

## 1 研究目的

超高温で磁場によって閉じ込められているプラズマの中では、密度と温度の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の特徴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、実データへ応用を行って いる。本研究の目的は、様々な統計的な分析手法を磁場閉じ込めプラズマ中のドリフト波乱流の大容量時系列データ に応用し、新たな知見を得ることである。

## 2 現在までの研究結果

2022 年度の研究では、統計的モデルである Redecued Auto-Regressive model[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した。この手法によって、プラズマ乱流が持つ複数の周期を正確に検出するこ とが出来る。今回は、より正確に周期の検出を行うため、また、以前に行った分析の妥当性を検証するため、これま で用いていたよりもより幅広い周期の範囲に対して分析を行った。

その結果、調査に用いたプラズマデータは、高周波、中周波、低周波の3つの周波数帯から構成されることが示され、その結果も以前に行ったものとほぼ同じものであった。このことことから、プラズマ乱流が持つ周波数の特徴を 正確に検出できたと考える。

## 3 今後の研究の方向について

プラズマ乱流は、非線形波動、大小様々な渦によって構成され、その振る舞いも複雑である。複雑な振る舞いを見 せる現象を理解するための第一歩は、その現象の基本的かつ本質的な特徴を正確に把握することである。今回は各 チャンネルから得られたデータに対して分析を行ったが、プラズマ乱流の全体像を把握するには、64 チャンネル全て のデータを用いた分析が必要であると考える。あるチャンネルのある周期が、他のチャンネルの振る舞いに影響を与 えているのかどうかを把握することが出来れば、プラズマ乱流の全体像を把握することに大きく貢献できると考える。

## 4 研究成果発表

- ・ 中村 知道, "プラズマ乱流の周期検出と周期間の関係に関する分析", 第2回プラズマインフォマティクス研究会、2022年2月24日(木)~25日(金)ZOOM オンライン会議(口頭発表)
- Toshihiro Tanizawa and Tomomichi Nakamura, "Detecting the relationships among multivariate time series using reduced auto-regressive modeling", Frontiers in Network Physiology, 2:943239, October 2022

## 5 研究組織

研究代表者 兵庫県立大学大学院 情報科学研究科 中村 知道 所内世話人 九州大学 応用力学研究所 西澤 敬之

# 参考文献

 T. Nakamura, M. Small and T. Tanizawa: "Long-range correlation properties of stationary linear models with mixed periodicities", Physical Review E, 99, 022128, 2019.

## 機械学習を活用した半導体 MBE 成長条件の最適条件推定

久留米工業高等専門学校 材料システム工学科 奥山 哲也

・目的

半導体ナノワイヤを利用した光・電子デバイスの高性能化・高機能化に関する研究が行われている。 ナノワイヤにⅢ-V族化合物半導体を用いると、混晶比の異なる材料を積層したヘテロ構造も形成可能 であり、これにより電子バンド構造の能動的な制御も可能になる。実際にデバイス応用を行う際には高 品質なヘテロ構造形成が重要になる。ナノワイヤにおいては軸方向に異種の半導体を接合した一次元へ テロ構造と、動径方向に接合したコア/シェル構造の 2 種類のヘテロ構造を利用することができる。特 にコア/シェルナノワイヤは物性の調整や表面パッシベーションを可能にするため、単体の材料では実現 困難な多様な高性能デバイスが実現可能になることが考えられ、盛んに研究されている。これら半導体 ナノワイヤは各種の手法で成長されるが、本研究では分子線エピキタシー (Molecular Beam Epitaxy: MBE) 法を取り上げる。MBE では 10<sup>-10</sup>Torr ほどの超高真空環境において、原料の入った K セル(坩堝)を加 熱し、蒸気を分子線として放出させ、対向する加熱基板表面に照射することで結晶を成長させる。MBE は超高真空環境で成長することから、基板表面への残留不純物の付着が非常に少なく高純度の結晶が得 られる。また、各Kセルにある機械的なシャッターやセル温度を制御することで、結晶の混晶組成やド ーピング不純物の濃度分布を高精度に制御した所望のヘテロ構造を成長させることができる。一方、研 究室レベルのナノワイヤ MBE では、トライアル&エラーにより実験条件(基板温度、分子線量)の探 索を行っている現状がある。本研究では、ナノワイヤの MBE 成長条件と室温フォトルミネッセンス(PL) 測定結果の関係を、データから統計的にモデル化し、新たな成長条件に対して PL 発光を予測する。ま た、モデルは逆に解かれることで、発光機能を有することが期待される新たな成長条件の自動生成にも 役立つ。

#### ・実験方法

北海道大学石川研究室より提供された III-V 族化合物半導体混晶ナノワイヤの MBE 成長条件から特 徴量設計を行い、室温 PL 測定結果と合わせて、データセットを作成する。そのデータセットの説明変 数は高次元であるため、次元削減を行い可視化する。次に、次元削減によって得られた新たな変数と元 の説明変数の相関を分析する。相関係数の大きさから、新たな変数が表している説明変数の主要な成分 を調べる。次に、複数の機械学習アルゴリズムを用いて室温 PL 発光の有無を予測する分類タスクに取 り組む。ここでは、訓練されたモデルは、次元削減により得られた2次元空間上で、室温 PL 発光を示 すデータと示さないデータを分類する境界を引く。データセットは訓練データとテストデータに分け、 決定係数を求めることで、汎化性能を調べる。

#### ・実験結果および考察

実験研究者の知見を基に特徴量設計を行い、表形式のデータセットを作成した。説明変数は、MBE 成 長によるナノワイヤ作製条件を表す変数と、作製された半導体の物性を表す変数である。目的変数は、 ナノワイヤが PL 測定において発光を示すかどうかを表す 2 値変数である。データサイズは 452×80 で

40

あり、451 個の説明変数と1 個の目的変数を記述したデータが 80 サンプル含まれる。説明変数は 451 次 元であるため、t-SNE 法により2 次元に削減することで可視化した。t-SNE 法を用いることで、PL 発光 を示すサンプルと示さないサンプルを他の次元削減手法に比べ、よく分散させることができた。

次元削減された変数をそれぞれ dev1、dev2 とし、元の説明変数との相関解析を行ったところ、dev1 は 主に3層目の体積(厚さ、長さ)、2層目、3層目における Ga と As の比率について表しており、dev2 は Step15~18 における基板温度と As ビームの強度を表していた。Step とは MBE におけるシーケンシャ ルな製造工程の区切りであり、1 つの Step で 1層つくられるというわけではない。ステップ数が多いほ ど工程は多くなり、作製する層の数も多くなる。さらに、dev1 は層の数、dev2 は総ステップ数との相関 が強いことから、新たな変数は、作製する層の数と層における GaAs の比率について説明していること がわかった。複数の機械学習アルゴリズムを用いて、次元削減後のデータセットからモデルの訓練を行 った。決定係数と散布図によって各アルゴリズムを比較した。用いたアルゴリズムは、今回の様な分 類タスクに適した SVM(サポートベクターマシーン)、KNN、勾配ブースティング、ランダムフォ レストである。その結果、SVM with RBF を利用して作成したモデルが滑らかなフィッティングが見ら れ、訓練データに対する過学習が起こっておらず、汎化性能の良い境界を引くことができた。





Fig.1 t-SNE による次元削減結果



#### ·研究成果報告

本研究では、MBE 法によって作製された半導体ナノワイヤの PL 測定結果、作製条件、物性値な どからデータセットを作成し、t-SNE による次元削減を行い、SVM アルゴリズムにより、RBF カ ーネルを用いた非線形モデルの訓練を行った。訓練されたモデルはテストデータに対して 8 割ほど の決定係数を示し、滑らかな決定境界を引けており、過学習もなく高い汎化性能を示した。この予 測モデルは PL 測定で発光を示す半導体ナノワイヤの MBE 成長条件の最適化に活用することがで きる。また、次元削減後の変数と元の説明変数との相関解析によって、層数と各層における GaAs 比率が重要であることがわかった。

#### ・研究組織

奥山 哲也<sup>1</sup>, 寒川 義裕<sup>2</sup>, 石川 史太郎<sup>3</sup>, 原 太一<sup>1</sup>, 草場 彰<sup>2</sup>)
 <sup>1)</sup>久留米工業高等専門学校,
 <sup>2)</sup>九州大学応用力学研究所,
 <sup>3)</sup>北海道大学量子集積エレクトロニクス研究センター

実験と第一原理データの同化による物質探索に関する研究

奈良先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科 原嶋 庸介

目的

新物質を探索する上で重要な課題の一つとして、探索空間の多次元化がある。物 質探索では通常、研究者の経験則に基づく候補物質の絞り込みによって探索空 間は低次元に制限される。この制限のせいで膨大な数の物質が見落とされてお り、その中には未発見の高性能物質が含まれている可能性がある。今後の物質化 学の発展には、この制限を外して、多次元探索空間への拡張が必要である。この 多次元化によって候補物質の組み合わせが指数関数的に増大するため、探索は 困難になる。実際に収集できるサンプルデータの数には限界があるため、少ない データでも物性値を高精度に予測することができる方法と、効率の良いサンプ ル収集方法が求められる。データ同化はそのような少ないデータでもシミュレ ーションデータを組み合わせることで、高精度予測を実現することができる手 法である。この物性値予測を元に最適な化学組成を選択していくことで、網羅的 な探索より少ない試行回数で目標の物性に到達すると考えられる。申請者の先 行研究では、物質科学にデータ同化を適用するためのアルゴリズムを提案し、欠 測データの取り扱いと外挿が可能になることが示されている。これを実際の物 質探索に適用するには、さらに予測モデルの逐次的データ同化アルゴリズムや 最適な合成条件の導出アルゴリズムが求められる。

データ同化の研究には、実際のデータを使用することが重要である。本研究では データ同化手法を用いて p 型半導体の探索を行う。p 型半導体はパワー半導体 デバイスの重要な構成要素である。パワーデバイスの候補物質として酸化物が よく研究されているが、酸素欠陥が生じやすく、酸素欠陥はドナーになりやすい。 p 型半導体は、この n 型化傾向を抑えた上で、十分なバンドギャップを確保する ことが重要となる。

上記を踏まえて本研究では、データ同化の手法開発に加えて p 型半導体の探索 を行う。

方法

先行研究で開発したデータ同化手法では最尤推定によりモデルを決定したため、 データが新しく追加された際に全データを使用する必要があった。本研究では

42

先行研究で開発したデータ同化アルゴリズムにベイズ推定を導入し、逐次的な データの追加を可能にする。ベイズ推定はベイズの定理に基づいた推定を意味 しており、データが与えられた場合にモデルパラメータの分布を与えることが できる。一方、申請者の開発したデータ同化アルゴリズムでは多変数ガウス分布 を利用してデータの同化を実現している。多変数ガウス分布を用いていること により、ベイズの定理を適用してモデルパラメータの分布を定式化することが 容易になると考えられ、数値積分などの計算コストのかかる手順を省略できる ことが期待できる。実装された同化アルゴリズムは擬似的に生成したテストデ ータによって性能の検証を行う。

p型半導体候補物質のバンドギャップ予測では、九州大学応用力学研究所の寒川 義裕教授と草場彰助教と共同研究を行う。探索は酸化物のカチオン元素を周期 表から選び、バンドギャップ値を網羅的に予測する。

結果および考察

データ同化手法については python で 実装およびデバッグが完了し、現在、 ベンチマークと微調整を行なってい る。尤度の最大値を与えるパラメータ から、事後分布の最大値を与えるパラ メータに変更し、先行研究で行なった テスト計算と一致する結果が得られ 図1データ同化のデモンストレーション。実 ている。本研究ではさらに事後分布を 使って獲得関数を計算し、データサン プリングの候補点の選択を行えるよ うにした。今後はテスト計算の事例を 増やし、動作の把握ができたら論文に して報告予定である。



線(紫、水色)が真のモデル、破線(赤、青) がデータ同化モデル。サンプルデータの近くで は予測できており、遠くでは予測が外れている ことがわかる。

p型半導体探索については今後の方針を定めた。まず化学量論的な化合物からバ ンドギャップが十分広いものを探す。そのための第一原理計算と実験の実施を 準備中である。

## 研究成果報告

[1] 招待講演,「実験と計算科学の融合とデータ同化」, 原嶋 庸介, 第24回理 論化学討論会, 産学連携セッション, 2022 年 5 月 19 日.

[2021 S3-4] らせん転位配列を有するカーボンナノチューブの変形メカニズムの解明 福井大学・学術研究院工学系部門 雷霄雯

#### 研究目的

転位配列を有するカーボンナノチューブ(Carbon Nanotube:CNT)は機械的特性の変化に加え,円筒形 状からの複雑な曲面の変化を及ぼす.特にらせん状の転位配列の変形メカニズムの解明を行い,CNT の曲率と転位配列との関係を明らかにすることで,欠陥を利用したエンジニアリングへの応用を目的 とする.

## 研究方法

分子動力学(Molecular Dynamics: MD)法を用いて、転位配列を有する CNT を作成し、転位配列と変形の関連性を考察する.また、複数の変形に対して微分幾何学の計算式から得られる平均曲率、ガウス曲率を用いて曲面の調査を行い、複雑な曲面を有する CNT の新規な評価方法を提案する.

#### 考察

- (1) CNT に転位配列を導入することで複雑な面外変形が発生した.
- (2) CNT の軸方向の転位配列では円筒形状から折れ曲がるような変形が発生し,転位の数が増加するに したがって折れ曲がり具合が増加した.
- (3) 折れ曲がりに対する力の関係を調査するため、ひずみエネルギーと曲率半径の関係を表したところ、 CNTを円柱と仮定した外力を加えて曲げた理論式に近い関係を示した.
- (4) 転位配列を有する CNT において、微分幾何学を用いて導出した平均曲率とポテンシャルエネルギーとの関係を示したところ、平均曲率の2乗値とポテンシャルエネルギーには線形関係が得られた.
- (5) 平均曲率の2乗値とポテンシャルエネルギーから得られる直線の傾きは,流体膜などに用いられる 式において曲げ剛性率という膜を曲げた際の弾性率に近似できる可能性が得られた.転位配列を有 する CNT において,曲げ剛性率を比較したところ,折れ曲がり具合が大きくなるにしたがって曲 げ剛性率は増加傾向を示すことが分かった.

#### 口頭発表

- 1. <u>雷霄雯</u>、永井敦士,格子欠陥を有するグラフェンシートの変形解析,「位相幾何・微分幾何及びその周辺分野への特異点論の応用」研究集会,オンライン,2022.6.16-18.
- 2. 國廣侑志、<u>LEI Xiao-Wen</u>,格子欠陥を起因する低次元ナノ炭素材料の変形メカニズムに関する研究,材 料シンポジウム「若手学生研究発表会(学生・企業研究交流会)」,京都,2022.10.11-12.
- 永井敦士、<u>LEI Xiao-Wen</u>,転位配列を有するカーボンナノチューブの変形メカニズムの解明,日本機械 学会第 35 回計算力学講演会(CMD2022),オンライン,2022.11.16-18
- 4. 雷霄雯,低次元ナノ炭素材料の変形特性解析,材料フォーラム福井 2022,福井, 2022.12.9.

#### 学術論文

1. Mengying Li, Xiao-Wen Lei, Molecular dynamics studies on mechanical properties and deformation mechanism of graphene/aluminum composites, *Computational Materials Science*, 2022, 211, 111487.

## 乱流プラズマの輸送特性計測のためのマイクロ波センシング

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。高温のプラズマ内部の非等方なプラ ズマ流の情報は、この乱流物理現象を理解する上で非常に重要である。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、高精度な時空間構造を観測し、乱流がプラズマの輸送にどのような 影響を与えているのかを調べることを目指している。

乱流の速度を観測する手法として、マイクロ波を用いたドップラーレーダーがある。本研究では、このド ップラーレーダーを高性能化するため、フェーズドアレイアンテナの適用を試みる。フェーズドアレイアン テナは、アンテナ自体は動かないまま、任意の方向にマイクロ波ビームを放射することができる。一般的な フェーズドアレイアンテナは周波数を固定して、アンテナ素子間に一定の位相差を与えることで、放射方向 を制御するが、本研究では周波数を走査することで放射方向を制御するという手法、すなわち周波数走査型 フェーズドアレイを開発した。今回、このアンテナを九州大学の直線型プラズマ実験装置 PANTA に設置し て、プラズマ計測の実証を試みた結果について、以下に報告する。

#### 2. PANTA 装置におけるプラズマ計測実証

Ku-band (12-18GHz) 仕様のフェーズドアレイアンテナを PANTA装置の水平位置にレーザー墨出し器を用いて鉛直方向 には 2mm 以下の精度で設置し、鉛直方向にビームをスキャ ンできるようにした。したがって、ドップラー反射計として 周方向速度を観測する配位となる。マイクロ波システムはへ テロダインとして、RF 光源には、マイクロ波発振器(アンリ ツ:MG3692C)の出力(+18dBm)をサーキュレータを通し てアンテナから放射し、受信も同じアンテナの同じポートを 利用し、サーキュレータからミキサーの RF ポートへ導く。 LO は、ビートがちょうど 1MH z となるように調整した信号 を+12dBm 出力で印加し、IF 信号をオシロスコープで収集し た。オシロへのトリガとして、t=0 の信号を TTL で受けプラ ズマ放電毎にデータ(サンプリングレート:25MS/s、データ 点数:10MSample)を保存した。

アルゴンガスを燃料としたプラズマ放電において、Ku-band 内でさらに3つの周波数帯(13, 15, 17GHz)に分けて、デ ータを取得した。得られた周波数スペクトルの例を図2に示 す。中心の約1MHzのピークがキャリアのビート成分であり、



図1:フェーズドアレイアンテナをPANTA 装置に設置



図2: IF 信号の周波数スペクトルの例。

これを中心に高周波数側へ少しシフトしかつ広がったスペ クトルの形状が観測された。ドップラーシフト周波数は、こ の周波数スペクトルの重心から推定する。今回は、生データ  $2^{18}$ 点ごとに FFT 処理(周波数分解能:95Hz)し、放電時間中 の平均値から、ドップラーシフトを求めた。図 3 に 15GHz 帯で観測したドップラー周波数を示す。入射周波数の増大 (入射波数の増大)に従って、ドップラーシフトが符号を反転 させながら減少している。周波数によって放射角度が異なり、 それぞれの観測位置は図 4 のようになると考えられる。プラ ズマへの入射角度 $\alpha$ が変化することにより、観測位置における 入射波の波数  $k_1 = -2 \cdot k_0 sin(\alpha)$ が変化し、結果としてドッ プラーシフト周波数  $2\pi f_D = v \cdot k \approx v_1 k_1$ が変化すると予想 され、この傾向を明瞭に示す観測結果が得られた。

## 3. 論文と学会発表

次の学会にて発表を行った。

- T. Tokuzawa, T. Tsujimura, M. Nishiura, H. Igami, S. Inagaki, T. Nasu, K. Ida, T. Kobayashi, M. Yoshinuma, K. Tanaka, Y. Takemura, I. Yamada, and LHD Experiment Group, "Edge turbulence excitation experiments in LHD", 18th International Workshop on H-mode Physics and Transport Barriers (H-mode Workshop). September 20 -23, 2022.
- T. Tokuzawa, T. Nasu, S. Inagaki, C. Moon, T. Ido, H. Idei, A. Ejiri, R. Imazawa, M. Yoshida, N. Oyama, K. Tanaka, and K. Ida, "Characteristics of 3D metal powder additive manufacturing waveguides and antenna for microwave Doppler reflectometry and trial experiments at PANTA", 15th International Reflectometry Workshop, June 7-10, 2022.



図 3:15GHz 帯のドップラーシフト周波 数 (5mTorr 実験時)



図4:プラズマ中心軸がPANTAの装置軸 と一致していて、カットオフ層はr=60mm にあると想定した場合の入射周波数に対応 する、観測位置。

3. 徳沢季彦, 後藤勇樹, 桑原大介, 矢内亮馬, 西浦正樹, 稲垣滋, LHD 実験グループ, "ECE および ECEI 計測による LHD プラズマの電子温度揺動",日本物理学会 2022 年秋季大会, 2022 年 9 月 12~15 日.

#### 論文発表

- T. Tokuzawa, T. Nasu, S. Inagaki, C. Moon, T. Ido, H. Idei, A. Ejiri, R. Imazawa, M. Yoshida, N. Oyama, K. Tanaka, and K. Ida, "3D metal powder additive manufacturing phased array antenna for multichannel Doppler reflectometer", Rev. Sci. Instrum. 93, 113535 (2022); doi: 10.1063/5.0101723.
- T. Nasu, T. Tokuzawa, T. I. Tsujimura, K. Ida, M. Yoshinuma, T. Kobayashi, K. Tanaka, M. Emoto, S. Inagaki, A. Ejiri, and J. Kohagura, "Receiver circuit improvement of dual frequency-comb ka-band Doppler backscattering system in the large helical device (LHD)", Rev. Sci. Instrum. 93, 113518 (2022); https://doi.org/10.1063/5.0101588.
- T. Tokuzawa, S. Inagaki, M. Inomoto, A. Ejiri, T. Nasu, T. Ii Tsujimura, and K. Ida, "Application of Dual Frequency Comb Method as an Approach to Improve the Performance of Multi-Frequency Simultaneous Radiation Doppler Radar for High Temperature Plasma Diagnostics", Appl. Sci. 2022, 12(9), 4744; https://doi.org/10.3390/app12094744.

## パターン形成を応用した工学分野における新しい揺らぎの制御手法の考察

広島大学大学院先進理工系科学研究科 鈴木康浩

目的

擾乱としての揺らぎは、工学・理学分野の至る所に現れる。例えば、流体中の変動成分としての乱流 や不安定性、閉じた循環系における渋滞現象などがあげられる。揺らぎは、システムの不安定化やエネ ルギー損失をもたらすために、通常はフィードバックにより制御・安定化される。一方、揺らぎを「機 能」として注目した場合、揺らぎの高次成分による流体の撹拌、熱伝導の増幅・減衰などを活用した、 革新的な制御技術への展開が期待される。しかし、これまで用いられてきたフィードバック制御は、揺 らぎを駆動する乱流や不安定性を完全に抑え込むことを目指した制御方法である。したがって、揺らぎ の高次成分を生かしつつ、揺らぎそのものも制御するためには、これまでと全く異なる制御手法を新し く検討する必要がある。

自然界には一見乱雑に見える現象でも、よく調べるとある種の規則性、つまりパターンが見つかるこ とがある。もし、パターン形成の仕組みを理解でき、かつ制御することが可能であれば、工学的に重要 な揺らぎを直接制御することが可能になるかもしれない。そこで、本共同研究では、パターン形成のメ カニズムを数値的・実験的に考察し、制御された揺らぎを定常発達できるかどうか考察する。

### 本年度の成果

まず、本年度は揺らぎの中に生まれるパターン形成について、様々な事象の中から抽出し、数理モデ ル化の検討を行った。

核融合プラズマ中には、不安定性により駆動される様々な揺らぎが存在する。しかし、何らかの理由 により、乱流状態にある揺らぎから周波数の低い、定常的な波の状態に遷移する場合がある。本年度は、 そのような揺らぎの遷移に関する事象の内、核融合プラズマの周辺部に存在する低温領域で現れる、揺 らぎの状態からの安定した状態への遷移を対象とした。図1に、前述した揺らぎの状態から安定した状 態への遷移の一例を示す。



図1 核融合プラズマ周辺部で観測された揺らぎ状態(t=3.5-3.88 s)から安定な状態(t=3.88-4.2 s) への遷移。無秩序な揺らぎから、低い周波数を持った定常的な振動へ遷移している。(b)のオレンジ線 はプラズマの輻射損失を示し、揺らぎによりプラズマのエネルギーが損失している状態を示す。 図1(b)のオレンジ線はプラズマの輻射損失を示し、揺らぎによりプラズマのエネルギーが損失している 状態を示す。しかし、t=3.88 s後には、無秩序な揺らぎの状態から、低い周波数をもつ定常的な振動に 変化していることが分かる。これは、リミットサイクル振動(LCO: Limit Cycle Oscillation)と呼ばれ る現象に酷似している。そこで、リミットサイクル振動を説明し数理モデルの一つとして、捕食-被食関 係の説明に用いられる、Lotka-Volterra 方程式を用いてこの遷移現象を考察した。

Lotka–Volterra 方程式配下のように表される非線形方程式である。

$$\frac{dx}{dt} = \alpha x - \beta x y \tag{1}$$
$$\frac{dy}{dt} = \delta x y - \gamma y \tag{2}$$

ここで、xは被食者、yは捕食者、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\delta$ 、 $\gamma$ は正の定数である。このとき、プラズマのダイナミクスに この方程式系を当てはめるとxは駆動エネルギー、yは散逸エネルギーに相当する。この方程式系で表さ れる状態を考える上で重要な事は、式(1)で駆動エネルギーが増大した場合、右辺第2項の影響で、必ず 散逸エネルギーも増大すること。同様に、式(2)で散逸エネルギーが増大すると、右辺第1項の影響で、 必ず駆動エネルギーが増大することである。図2に、Lotka-Volterra方程式に基づいて、この現象を解 析した結果を示す。図2(b)は、 $W/\delta$ が散逸エネルギー、 $j_{BS}$ が駆動エネルギーを表す。散逸と駆動の両エ ネルギーの振動が、ある位相だけずれていることが分かる。このときのリサジュー図形を図2(c)に示す。 リサジュー図形より、安定な振動が発現し、ある種のパターン形成が現れていることが分かった。



図 2 Lotka–Volterra 方程式に基づいて、乱流状態にある揺らぎから周波数の低い、定常的な波の状態 に遷移する場合を解析した結果。

### まとめと今後の展望

本年度は、揺らぎの中から自発的に現れるパターン形成に注目し、数理モデルを当てはめることで、 パターン形成に至るダイナミクスを解析した。Lotka–Volterra 方程式によると、駆動エネルギーと散逸 エネルギーの振動がある位相でずれると、リミットサイクル振動が生まれる。このダイナミクスを応用 することで、揺らぎに能動的に摂動を加えることで、パターン形成とそれに伴う揺らぎの制御が可能と なるかもしれない結果を得た。 特定研究4【新エネルギー力学分野】

日本型・洋上風力発電の導入に資するマルチスケール風況研究 A multi-scale atmospheric flow research that contributes to the installation of Japanese-style offshore wind power generation

統括責任者:内田 孝紀(新エネルギー力学分野)

2050年の脱炭素社会の実現に向け、特に切り札として期待されているのが洋上風力発電です。 日本の過酷な環境に適した洋上風力発電を成功させるためには、広域から局所域におけるマルチ スケールの非線形風況場を正確に理解し、それらを統合、将来予測する必要があります。

本特定研究では、大型流体実験設備(風洞/水槽)、数値シミュレーション、屋外計測から総合的 にマルチスケールの様々な風況問題にアプローチし、得られた結果をデータサイエンス的アプロ ーチ等を用いて統合化・普遍化することで新しい学理構築と産業界への貢献を目指します。 ウィンドファーム内の風特性が風車に及ぼす影響の基礎的研究

三重大学 大学院工学研究科 機械工学専攻 前田 太佳夫

1. 目的

平均風速が高く,乱流強度が低い海上で運転する洋上風車は,陸上風車と比べて発電量が高く,出力の 変動も小さくなる.一方,離岸距離が近い洋上風車は,風向によって風車への流入風の特性が変わる.例 えば我が国の太平洋沿岸に洋上風車を建設した場合,南東風は太平洋上を吹送してくるため乱流強度が 小さく,北西風は日本列島を通過してくるため地形の影響により乱流強度が大きくなる.

風特性は、風車の運転制御や寿命に影響を与える.とくに、洋上風車では、海象条件により、故障時の アクセスに課題があるため、風車の信頼性向上が陸上風車よりも一層求められる.したがって、風特性が 異なる場合の風車挙動を把握することは、今後の洋上風車の導入促進において重要である.

本研究では、洋上風車の導入促進に資するため、風特性が風車に及ぼす影響を明らかにした.

2. 観測データ解析方法

本研究では、ウィンドファーム内に設置されたロータ直径 80 mの風車のナセル上部に設置されている 風速計で観測された1秒データを解析した.1秒データを利用した理由としては、本研究で注目してい る風車ブレードのピッチ角制御は常時行われているため、風力発電分野における一般的な平均化時間で ある 10 分ではピッチ角制御を考察できないためである.この観測風のデータを整理することにより、平 均風速や乱れを計算し、ピッチ角制御との関係を考察した.

3. 数值解析方法

本研究では風車に流入する風の広範囲な分布などを調べるため、九州大学応用力学研究所開発の RIAM-COMPACT で解析を行った.

海風と陸風を風車に適切に流入させるため,計算領域は洋上から陸までの広い範囲を設定し,主流方向 (x),主流直交方向(y),鉛直方向(z)にそれぞれ55 km×10 km×3.984 km の空間を設定した.計算領域内の最 大標高は836.97 m,最小標高は-0.89 m である.解析方位は16方位とした.地形標高データは,国土地 理院発行の空間解像度10 m の標高データを用いた.解析メッシュ数は,主流方向,主流直交方向,鉛直 方向にそれぞれ800×200×40 であり,総メッシュ数は6,400,000 である.水平面内(x方向およびy方向) のメッシュ幅はウィンドファーム中心で密となる不等間隔であり,最小メッシュ幅を x 方向が23.42 m, y 方向が18.63 m とした.鉛直方向(z)のメッシュ幅は地面近傍が密となる不等間隔であり,最小メッシュ 幅を2.51 m とした.流入境界面にはべき法則に従う風速分布を与えた.本研究では、べき指数αは,海 風は地表面粗度区分Iに従うα=0.10,陸風は地表面粗度区分IIに従うα=0.15を用いた.流入風速は本サイ トの年間平均風速に近い8.0 m/sを与えた.地表面には粘着条件,側方境界面と上部境界面には滑り条件, 流出境界面には対流型流出条件を課した.ここで,代表長さスケールは解析領域内の最大標高と最小標 高との標高差であり、本解析領域においては837.86 m となる.また,代表風速スケールは流入境界面の 最大標高位置における風速とした.

50

#### 4. 結果と考察

本報告では、ウィンドファーム内の代表的な2基の風車 WT-A と WT-B の風特性について示す.実機デ ータから、WT-A は陸風時のピッチ角制御と海風時のピッチ角制御の違いが大きいのに対して、WT-B は陸 風時と海風時とでピッチ角制御の違いが小さい.このときの風特性をまとめると表1のようになる.本 サイトでは、陸風の乱れが大きい風車は風向によるピッチ角制御の違いが大きくなり、海風の乱れが大 きい風車は風向によるピッチ角制御の違いが小さくなると推察される.

	WT-A		WT-B	
	陸風	海風	陸風	海風
陸風と海風とのピッチ角制御の違い	大		小	
風速標準偏差	高	中	低	高
風向標準偏差	高	中	低	高

表1 2基の風車のピッチ角挙動と風特性の関係

図1は陸風に対するWT-AとWT-Bの解析結果である.WT-Aの上流風は,WT-Bの上流風と比較して,等 値線の間隔が狭く,速度勾配が急であることがわかる.また,表1の陸風の観測データからは,WT-Aの 風はWT-Bの風と比較して乱れていることがわかる.これらのことから,陸風に対する解析結果は,観測 結果と傾向が一致していることがわかる.

図2は海風に対するWT-AとWT-Bの解析結果である.WT-Bの上流風は,WT-Aの上流風と比較して,等 値線の間隔が少し狭いため,速度勾配も少し急であることがわかる.また,表1の海風の観測データから は,WT-Bの風はWT-Aと比較して,少し乱れていることがわかる.これらのことから,海風に対する解析 結果も,観測結果と傾向が一致していることがわかる.

以上より観測値と解析結果から、風特性がピッチ角制御へ及ぼす影響について示すことができた.





ドローンによる風況場局所計測に向けた乱流時空間構造解析

日本大学生産工学部 佐々木真

### 背景と研究目標

地球温暖化に対応すべく、脱炭素のクリーンなエネルギーの開発は急務の課題である。プラズ マによる核融合の長期的なエネルギー開発から、太陽電池・地熱・水力・風力発電等の開発等が 行われている。これらのエネルギー開発において、しばしば乱流の時空間構造が鍵となる。

本研究では、特に風力発電で問題となる乱流時空間構造に着目し、その計測に向けた準備を行 なった。風力発電では、風車後方に発生するウェイク構造の発生によって、発電効率が低下して しまう問題があり、ウィンドファーム等の複数の風車を設置する際の大きな問題となっている。 ウェイク構造やその形成過程の実測が求められる。

風車近傍には風力計を置く事ができないため、乱流場の直接計測は容易ではない。そこで、ド ローンによる風計測手法の構築を行なっている[松浦、荒川:島根大修士論文 2022]。これまでに ドローンの計測性能等が明らかになってきた。

本研究では、風車近傍の乱流シミュレーションデータにドローンの計測性能を考慮し、計測可 能な時空間構造を明らかにし、計測の指針を得ることを目指す。

#### 対象とするドローンの風計測性能

本研究ではドローンは DJI 社製の Mavic Mini を対象とした。本ドローンの時間変化を伴う応答 測定をした実験が島根大学にて行われ、実験では、風洞から送られる風をプロペラシャッターの回 転によって 0.2Hz から 10Hz の風速変調を与え、ドローンと超音波風速計での測定結果の比較がな された。周波数が大きくなるにつれドローンは超音波風速計よりも振幅が小さくなる、一方で位相 差は大きくなり誤差も大きくなった。約 10Hz の変調までは応答が確認できたが 10Hz より早い変 調でははっきりとした応答は得られなかった。この結果により、ドローンの測定可能領域を 10Hz とし、10Hz 以上の高周波数成分を除去することで計測信号を模擬する。

#### 風車乱流シミュレーションデータ

使用したデータは、Fig.3 のように直径 D=88m の風車に 8m/s の風が当たった場合の乱流シミ ュレーションによって得られたデータである。各座標値は半径 R=44m で規格化し、格子解像度は



図 1: シミュレーションデータのスナップショット(内田博士提供)

0.44m である。X 方面は風車中心から下流に 440m の計算領域となる。また、風向きも北、東、上 昇のそれぞれ三成分ある。図 1 にデータのスナップショットを示す。本データは内田博士(九大応 研)よりご提供頂いたものである。

#### 特異値分解による計測可能構造の抽出

シミュレーションデータに特異値分解を適用し、乱流の時間・空間構造をモード分解した。本モ ード分解は、一般行列の対角化に相当する数学的操作であり、乱流データを直交基底にて分解する 事が可能である[e.g. 佐々木, プラズマ核融合学会 2021]。基底となる直交関数はデータ駆動的に得 られるものであり、データを表現するに最適な基底が選ばれる。



図 2: シミュレーションデータの特異値分解結果 (左図:空間構造、中央図:時間発展、右図:特異値スペクトル)

本モード分解を行なった結果を図2に示す。モード毎に空間構造とそれに対応する時間発展、及 びそのモードの振幅に対応する特異値が得られる。時空間データとそのモードの特異値をかけ、そ

err rate

のデータをフーリエ変換し、遮断周波数を10Hzとして 高周波成分を除去した。フィルタリングをしたデー 10 タと元データ比較し、誤差率50%以下のもの測定対 象とする。ここで、誤差は以下の式により評価した。

$$\varepsilon_{\alpha} = \frac{\int (y_{\alpha}(t) - x_{\alpha}(t))^{2} dt}{\int y_{\alpha}^{2}(t) dt}$$

ここでαは特異値モード番号であり、y<sub>a</sub>は模擬信 号、x<sub>a</sub>はシミュレーションデータである。誤差率 0.5 以下の空間構造から、ドローンで計測可能な低周波の 空間構造を得た。ドローンで計測可能な乱流構造は 風車の近くに局在している事がわかった。



## まとめ

風車近傍における乱流シミュレーションデータをもとに、ドローンで計測可能な乱流構造の同定 を行った。特異値分解を用いて、時空間構造の分解を行い、分解された時間発展から低周波が支配 的な乱流構造を同定した。計測可能な構造は、風車の縁近くに局在しており、これらの流れは測定 が数 10%程度の誤差範囲での計測が可能である。

## 揺動受風を考慮した垂直軸風車の空力特性に関する研究

弘前大学·地域戦略研究所 久保田 健

## 目的

我々の研究グループでは、図1に示す形状特徴を有する垂直軸風車 について空力性能観点での風車仕様の検討、ならびに実装に向けた システム化とその性能検証や長期実証実験を行っている。この風車 は8枚の直線翼から構成された抗力式風車で大きなソリディティを 有しており、揚力式垂直軸風車のダリウス型や直線翼型と比べると 最大パワー係数はかなり小さい。一方、低周速比域で大きなトルク 係数を示し低風速でも始動・回転できることから、揚力型風車では 不適とされるような風況地帯でも利用できる可能性がある。

今回、青森県沿岸域の養殖生簀に環境モニタリング用のマイクロ 電源システムの給電デバイスとして、この垂直軸風車を波浪の影響 を著しく受ける小型浮体に設置したと仮定、揺動させた際の風車性 能を実験的に調査した。



風洞実験は地球大気動態シミュレーション実験棟にて行い、基本 設定風速は7m/sとした。風車は直径Φ、スパン長ともに300mmで 上下の天板はΦ310mm、板厚は1mm(材質:A5052)であって、図 2 に示すように回転軸は片持ちで支持している。トルクと回転速度 はロータリーエンコーダ付きのトルクメータ(ユニパルス社製 UTMII-1NmR)で計測し、電磁ブレーキ(小倉クラッチ社製ヒステ リシスブレーキ HB-10)で周速比を調整しながらデータロガー(グ ラフテック社製GL-900)で記録した。

揺動機構はラック&ピニオン(オリエンタルモータ社製







断面図と各部位の仕様.



図 2 上流側に 18deg 傾斜固定時の実験 システムの外観.

LM4F40AZMC-4)を用いて組上げ、揺動パタ ーンは1周期12secおよび24sec、揺動角は最 大で18degとした正弦波ならびにトロコイド 波相当の動きを与える昇降運動を、スライダ・ リンク機構を介して風車架台を動かすことで 行った。ただし、これら揺動パターンは1周期 を30区間に分割(周期12secであれば0.4sec/ 区間)し、都度変化する定速度昇降運動を連結 した近似的なパターンで構成され、図3に例示 する周期12secトロコイド波のような揺動角の 時間依存性をとる。揺動開始点は揺動角 0-0 deg であって、まず上流方向へ傾倒、最大傾斜角に到達後の復元時に 始点の 0 deg を経由して後流側最大傾斜角(図 3 の極小値)を経て再び 0 deg に還り 1 周する。実験では 3 周期の 連続運転を計測した。なお、設定波浪周期 12 sec は、青森県津軽半島北部における 30 年確率波を参考に、波高は システムの最大傾斜角が 18 deg となるように設計した形式的な波である。

#### 結果と考察

図4には傾斜角を±18deg、±8deg、0degと5条件で固定 した際の風車のパワー係数について周速比別にまとめた図 を示す。ここで、傾斜角±8degならびに±18degは、風車に 対して流入する風の水平風速成分がそれぞれ99%、95%に減 ずる設定角であって、エネルギー換算ではおよそ97%、86% に相当する。この風車は基本姿勢(0deg)であれば周速比0.35 付近にて極大値 $C_{p}$ =0.083 が得られる。図から、周速比に対 するパワー係数変化については基本姿勢とおよそ同等の傾 向が見てとれるが、後流側にわずかに傾斜した場合にパワー 係数が極大点を示す傾向が現れている。



固定された風車に流入する水平風速成分は、幾何学的には ±8deg あるいは±18deg で符号によらず同様であるものの、流れに対しての前方/後方傾斜で性能が異なる点は三

ンのは、これによっている。これにより、同様であるものの、何はいに対しての前が後の頃料で日配が異なる点は二次元的な風の流れ(スパン方向の変化)を受けたと推察するが、実証実験に先駆けて興味深い知見が得られたと認識でき、かつ、後流側に若干傾斜した状態で高い空力性能が得られる点は抗力式風車の利用において、受風時に常に後方傾斜する姿勢制御に有用な知見といえる。



図5 揺動周期 I2sec、 取入傾斜角 9.5deg 時の角速度変化と声 御ブレーキトルクの経時変化.

図 5 には、実験データの一例として揺動周期 12sec、最大傾斜角 9.5deg 時の風車回転角速度と ブレーキトルクの経時変化を示す(初期設定周速 比:0.4=18.667rad/sec)。ここからまず、電磁ブレ ーキは相対風速が変化する中でほぼ一定値とし て機能していることがわかる。角速度については、 1 周目は過度状態にあると考えられるが、慣性モ ーメントの影響を受けつつもおよそ相対風速に 追従した挙動を示し、上流に傾斜した際は増速、 下流で減速が見てとれる。2~3 周目の区間平均周 速比は0.397 であった。揺動影響でわずかに周速 比が低下する傾向は 24sec 周期のトロコイド波 ならびに正弦波でも確認されており、時間応答性 等について今後詳細に解析を進める。

## まとめ

抗力型垂直軸式のマイクロ風車を小型浮体に搭載した際の性能確認として、風車を傾斜ならびに揺動させた際の空力性能を実験的に調査、抗力で流れ後方に僅かに傾斜した姿勢で良好な空力性能が得られるとの知見を得た。

## 謝辞

本実験の遂行に際し、弘前大学技術職員の葛西 昭治氏、ならびに九州大学応用力学研究所技術職員の松島 啓 二氏には格別なるご助力を賜りました。この場を借りて感謝申し上げます。

#### 我が国の洋上風力発電におけるリスクと対策に関する研究

弘前大学 地域戦略研究所 本田明弘、理工学研究科 笹沼菜々子

目的

今後予想される風車の動向から我が国で予想されるリスク要因のうち、風車後流の発電量および安 全性の両面から検討を加える。

実験方法

複雑地形に立地する陸上風車2基を研究対象とし、観測データおよび CFD モデルを用い風下風車の ウェイク影響を定量的に検討した。

実験結果

1) 実測値における風速比

対象とした観測データは 2015 年 9 月から 2017 年 12 月の 2 年 4 か月分の 10 分平均毎の風データと した。後流の有無による対象風向での風速比の比較をすると、後流での 35%低減が判明した。

2) CFD モデルを用いた検討

九州大学応用力学研究所が開発した流体工学 CFD モデルを用いた風況 simulation のリアム・コンパ クトを用いた。Fig1 には、風車①に後流モデルのポーラスディスクモデル<sup>1)</sup>を入れて計算した対象風車 2 基とその風車間の瞬間場の風速プロファイルを示す。図の左側に 1~6 の観測地を配置し、1 の地点は 風車②、2 は風車①に対応する。また、3 と4 は風車①と風車②の間を其々1/3, 2/3 した位置に配置し た。6 は風車①の流入風を確かめるため、配置した。Fig1 の右図は、No.1,2,6 の風速の鉛直プロファイ ルを示す。



Fig. 1 Vertical wind flow of 風車① and 風車② when it is considered turbine wake (Left: Vertical wind flow vector and surroundings, right:Vertical wind flow of two wind turbines and inflow)

風車①の風速プロファイルがハブ中心に行くに従い風速が減速していることが判る。これは、右図で も確認でき、特に風車②でS字の風速分布が表れている。

考察

実測値とシミュレーション結果より、風車①の後流により風車②の風速低減が確認できた。これを 時刻歴の風速比(風車①/風車②)を地形のみ(後流モデルなし)と後流モデル有で計算した結果を下 図に示す。平均値を確認すると、後流有りは地形のみに比べ、約22%風速が減少し、実測値に比べる と風速の低減率がやや小さい。より定量的に比較するため、シミュレーション結果から時刻歴の風速 変動を確認した。Fig2に時刻歴の風速比(風車①/風車②)を地形のみ(後流モデルなし)と後流モデ ル有で計算した結果を其々プロットしたものを示す。それぞれの平均値を確認すると、地形のみで 7.2m/s、後流有りで 5.6m/s であった。後流有りは地形のみに比べ、約22%風速が減少した。実測値 の減少率に比べ、約37%過小評価している。要因として考えられることとして、対象範囲があげられ る。実測値では32分割した際の1方向を対象としているが、シミュレーションでは16分割と広範囲 での結果となり、後流の影響を過小評価している可能性がある。また、現地の環境は樹木に覆われ起 伏が激しいものであり、シミュレーション内でその地形の複雑度を正確に再現できていないと考えら れる。解決策としては、対象範囲のメッシュをより細かくし、実際の地形に近い環境に近づけること である。また、地形による風速変動を把握し、後流による風速低減を評価する必要がある。



Fig. 2 Comparison of wind speed ratio(風車② / 風車①) between when it's considered wake and without

## 研究成果報告

参考論文

1) Takanori Uchida *et.al, Doppler Lidar Investigations of Wind Turbine Near-Wakes and LES Modeling with New Porous Disc Approach,* Energies. 14(2021)

### 研究組織

- ·九州大学 応用力学研究所
- ·弘前大学 地域戦略研究所

## 産業用ドローンによる気象観測システムの構築

海上保安大学校基礎教育講座 近藤文義

#### 1. 実験目的

本研究では様々な地表面における内部境界層の発達状況を明らかにするため、地表面から高さ150m までの一般気象要素(風速・風向・気温・湿度・気圧)の鉛直分布を計測することのできるドローンに よる気象観測システムの構築を目的とした。選定した産業用ドローンは、多くのユーザーが利用できる よう国内において圧倒的なシェアを占めており高性能で安全性の確認実績が多数ある DJI 社製の Matrice 300 RTK とし、図1のように風速・風向・気温・湿度・気圧を計測する小型気象観測システム (Gill 社, MaxiMet GMX500)をドローンの上部に、CO<sub>2</sub>と H<sub>2</sub>O 濃度を計測する NDIR ガス分析計

(LI-COR 社, LI-840) とデータロガー(Campbell 社, CR800)を下部にそれぞれ固定、任意の地点 における一般気象要素を計測することができる観測システムを構築した。本研究では、GMX500 による 風速と風向の計測値が、構造物としてのドローン自体によってどのように影響を及ぼされるのか、また ドローン飛行時にプロペラの回転により生じる風の影響を明らかにするための評価実験を実施した。



図1 構築したドローン気象観測システム

#### 2. 実験方法

本実験では、任意の風速場を発生させることができる大型境界層風洞を用いて、風速・風向を定量的 に評価した。風速は1 m/s から最大 10 m/s までの範囲で1 or 2 m/s ずつ変化させ、風向はドローンの 姿勢(Yaw 角)を 45° ずつ変えることで全水平方向に対して評価した。風速の測定高度による影響を 受けないようホバリング時に GMX500の風速測定部が風洞の床から高さ 1.50m となるように維持した。



図2 境界層風洞による実験の様子

#### 3. 実験結果

図3はドローンの姿勢(Yaw)角を0~360°まで45°ずつ、また風速を2~10 m/sまで2 m/sずつ 変化させた時の風洞内の風速に対するドローンを床に置いた状態で風速計が計測した風速値の相関図 を示す。実験結果、ドローンの姿勢角によってドローンが計測する風速に有意な差は認められなかった。 またドローンの姿勢角を0°とし、風速計を取り付けたパイプの長さを0.2、0.4、0.8 m とした時には パイプが長いほど計測される風速値は大きくなったが、風速計の計測精度(±3%)の範囲内であった (ドローンの姿勢角を変えたとしても同様の傾向であった)。



図3 風洞内の風速に対するドローンを床に置いた状態で風速計が計測した風速の相関図

図4はドローンの姿勢(Yaw)角を0~360°まで45°ずつ、また風速を1~10 m/sまで1 m/sずつ 変化させた時の風洞内の風速に対するドローンを風洞内でホバリングさせた状態で風速計が計測した 風速値の相関図を示す。実験結果、ホバリング時のドローンが計測する風速は風洞内での風速より過大 評価した。この原因は、ホバリング時にプロペラが回転することによって生じる風の影響を受けたこと によるものである。ドローンの姿勢角(風向)に対して有意な差はみられなかったものの、風速が増加 するにつれてばらつきが小さくなり、特に、4 m/sまで大きくばらついている。これは5 m/s以上では ドローンの位置が水平・鉛直ともに安定していたことが原因と考えられる。また、プロペラが回転する ことによって生じる風が床面により乱れをつくり、風速毎のばらつきを生じさせた可能性があるため、 測定高度毎による影響を今後確認する必要があると考えられる。



図4 風洞内の風速に対するドローンをホバリングさせた状態で風速計が計測した風速の相関図

4. 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)

## 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

### 大阪公立大学・大学院工学研究科 堀史説

## はじめに

原子力材料分野の中でも核融合反応炉でのプラズマ壁相互作用において水素は重要な問 題の一つとして研究が進められている。プラズマからの水素原子の材料中への侵入による 脆化やボイドスエリングなど機械的強度劣化を引き起こすためである。このような材料と 水素原子の相互作用は熱伝導などの材料特性とも密接な関係を有し、さらに高エネルギー の水素は材料中に格子欠陥も同時に生成するため、これらの欠陥と水素の相互作用につい て様々な研究が行われている。一方、水素原子の材料中での振る舞いは合金種に強く依存 し普遍的でなく、粒界や転位周囲への偏析の他に単一空孔型欠陥内へ複数個にわたって水 素原子を捕獲するものがあることなどが示唆されている。このような特性は次世代エネル ギーとして期待される水素の貯蔵などへの応用も検討されている。しかし、材料中の水素 状態の評価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いる。そのため材料中の水素の問題は、第一原 理計算でも研究が進んでおり、実験と理論計算との比較などによる研究が必要である。我々 の研究においても、bcc構造を基本とする合金の中でもB2規則構造のFe-Al合金は極めて 特異な合金であることが次第にわかってきた。この合金での空孔型欠陥への水素捕獲は、 他の同じ B2 型 Fe-Rh 合金や Ni-Al 合金では観測されず、これまで電子線照射によって空 孔を導入した場合の水素放出による実験で空孔への水素捕獲の確認を進め、実証してきた。 しかし、水素を捕獲した空孔の状態についてはまだまだ不明な点が多く、今回同じ B2 型 の Fe-Al 合金に対し X 線回折による構造の歪みとの相関と陽電子消滅測定の結果から空孔 への水素捕獲の状態について検討を進めた。

## 実験方法

試料はアーク溶解にて作成した Fe-50at.%Al インゴットをおよそ 5 mm×5 mm×1 mm の板状に切出し表面を鏡面研磨したものを使用した。この試料を 3×10<sup>-4</sup> Pa の真空中で、1273K で 20 時間焼鈍後に 50K 毎に 5 時間の保持しながら 973K まで温度を下げて 72 時間保持後急冷して用いた。試料は X 線回折(XRD)により B2 単相であることを確認して使用した。試料への空孔導入は京都大学複合原子力研究所(KURRI)の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 1×10<sup>18</sup> e<sup>-</sup>/cm<sup>2</sup> で行い、水素注入はチオシアン酸アンモニウム溶液を用いた電気化学的手法によって行っている。これらの実験詳細は前年度と同じである。照射前後で陽電子消滅ドップラー拡がり(CDB)及び XRD 測定を行った。

#### 実験結果

前年度の結果から、欠陥導入試料への水素注入で試料内に水素が導入されており、さらに 水素の捕獲サイトが空孔であると確認している。これらの試料の XRD における(211)回折 ピークの詳細な変化を図1に示す。電子線照射によって高角度側にピークが移動しており、 これは照射欠陥の導入による結晶の歪みであると考えられる。照射は室温で行っているた め、照射で導入される格子間原子は低温で拡散することを考慮すると照射中に消滅してい ると考えられ残留しているのは空孔のみである。また、図2の陽電子消滅ドップラー拡が りでも照射によって低運動量領域が未照射に比べ上昇しており、空孔導入を示している。 そのため、X線による観測歪みは主に空孔型欠陥によると考えられる。一方、空孔導入後 に水素を注入すると高角度側に移動したピークが完全に戻ってはいないが、未照射に近い 値に回復する傾向を示した。これは、空孔による歪みが緩和しているためと考えられるが、 空孔内部に水素原子が捕獲されて緩和したのではないかと考えられる。陽電子消滅でも水 素注入によって低運動量領域の比率が低減しており、空孔内の電子密度が上昇したことを 示している。これはすなわち、空孔内に水素原子が捕獲されたことと良く一致している。 このように、空孔への水素捕獲の状態が歪みと電子状態で確認できることが示された。



**謝辞**:本研究は九州大学応力研の共同利用の助成を受け、同研究所の大澤一人先生及び京 大複合原子力研の徐ギュウ准教授との共同研究の一環として実施した。

研究成果発表

[1] 堀史説、大友彦卓、徐虬、大澤一人、安永和史「粒子線照射により導入した Fe-Al 合金中の 空孔への水素原子捕獲」日本金属学会秋季講演大会 2022年9月 福岡
[2] 安永和史、堀史説、徐虬、大澤一人「加速器照射を利用した規則型 Fe-Al 合金中の空孔制御に よる多量水素貯蔵に関する研究」公益財団法人若狭湾エネルギー研究センター第24回研究報告 会 2022年11月オンデマンド 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

九州大学応用力学研究所 渡辺英雄

#### 1. 緒言

原子力発電は,経済的かつ効率的に安定して電力を供給するベース電源として,日本において重要な位置を占めている. また近年の地球温暖化対策として国際的に厳しく要求される温室効果ガス排出量の低減という観点からも,原子炉運転中 に二酸化炭素を排出しないことは化石燃料を用いる火力発電と比べて有利である.

ところで、原子炉内で使用される燃料被覆管は、運転中に高温高圧水環境における腐食や核分裂に伴い発生する中性子 照射による弾き出し損傷を受けることから、材料として厳しい環境に置かれている.これまでに、燃料被覆管材料である ジルカロイ2(Zry-2)において、高燃焼度に対応する線量の中性子照射により空孔が平面状に集合した面状欠陥である c 成分転位ループの形成が観察されている.また燃焼度が40 GWd/tを超えると、Zry-2中の水素含有量が顕著に増加する 現象も確認されている.照射欠陥と水素含有量の関連性を調査するためには、低燃焼度から高燃焼度にわたる照射欠陥の 形成及び水素の蓄積挙動について調査する必要がある.そこで本研究では、沸騰水型原子炉及び加圧水型原子炉の燃料被 覆管材料である Zry-2 及び Zry-4 の試料を用いて、まず両合金の未照射試料における水素脱離挙動について、軽イオン照 射装置を用いた重水素分子イオン照射された試料を昇温脱離ガス分析(Thermal Desorption Spectrometry: TDS)する ことにより調査した.さらに、Zry-4 については低燃焼度の中性子照射を模擬した重イオン照射を行い、弾き出し損傷よ り形成される照射欠陥の与える水素脱離挙動について調査した。

#### 2. 実験方法

本研究では Zry-2(Zr-1.4Sn-0.15Fe-0.09Cr-0.05Ni)及び Zry-4(Zr-1.3Sn-0.2Fe-0.11Cr-0.01Cr)を用い,試料の表面が六 方晶の底面である c 面に平行になるように加工した.透過型電子顕微鏡(Transmission Electron Microscopy: TEM) を用いた微細組織観察用の試料は,金属圧延機により板材を厚さ 0.15 mm に圧延後,直径 3 mm の円盤型に打ち抜き加 工して作製した.また TDS 用の試料は,板材を厚さ約 0.5 mm に圧延後,5×10 mm に切断して作製した.加工後の Zry-2 及び Zry-4 の両合金試料は,フッ硝酸による化学研磨及び真空中での熱処理(630℃,2時間)を施した.

重イオン照射実験には、九州大学応用力学研究所に設置された HVEE 社製タンデム型加速器を使用した. 照射条件は、 3.2 MeV の Ni<sup>3+</sup>イオン, 照射強度  $1.0 \times 10^{-4}$  dpa/s, 照射量 3 dpa, 照射温度 400 °Cである. 重水素分子イオン照射実験 には、同所内設置の軽イオン照射装置を使用した. 照射条件は、30 keV の D<sub>2</sub>+イオン, 照射量  $3 \times 10^{21}$  ions/m<sup>2</sup>, 照射温 度は室温である. 重イオン照射後の試料は、集束イオンビーム(Focused Ion Beam : FIB)法により、重イオンにより弾き 出し損傷が誘起される深さ以上の深部領域まで薄膜化し断面試料とした. 得られた断面試料は、走査型電子線顕微鏡・エ ネルギー分散分光法 (Scanning Transmission Electron Microscopy-Energy Dispersive Spectroscopy : STEM-EDS) に より元素マッピングを行った. 重水素分子イオン照射後の Zry-2 及び Zry-4 試料の TDS 分析は、昇温速度 1°C/s、室温 ~850℃の条件で行った.

#### 3. 結果および考察

図1は、30 keVの D<sub>2</sub>+イオンを室温において 3×10<sup>21</sup> ions/m<sup>2</sup> 照射された Zry-2 及び Zry-4 試料を TDS 分析することに より得られた D<sub>2</sub>ガスの脱離速度の温度依存性である. D<sub>2</sub>+イオン照射された Zry-4 試料からの D<sub>2</sub>ガスの脱離ピークは、 矢印で示すように Zry-2 試料より 100<sup>°</sup>C以上低温に遷移している. これまでの両ジルカロイ試料の微細組織観察から、多 くの水素化物の析出サイトは金属間化合物である Zr(Fe,Cr)<sub>2</sub> 系第二相粒子の近傍であること、さらに Zry-2 と比較して Zry-4 では第二相粒子の数密度が低いことが明らかとなっている. D<sub>2</sub>ガスの脱離挙動の違いは、第二相粒子の密度に依存

して  $D_2$ <sup>+</sup>イオン照射により形成される水素化物の密度や大き さが Zry-2 と Zry-4 で異なり、水素化物が分解されて  $D_2$ ガス として放出される温度領域を変化させたことが示唆される.

図2は、3.2 MeVのNi<sup>3+</sup>イオンを室温において3dpa照射 後に 30 keV の D<sub>2</sub>+イオンを室温において 3×10<sup>21</sup> ions/m<sup>2</sup> 照射 した Zry-4 試料及び重イオン未照射の Zry-4 に同一条件で D2+ イオンを照射した試料の TDS 分析により得られた D<sub>2</sub>ガスの 脱離挙動を比較である. どちらの試料においても、300℃未満 及び 500℃以上で観察される低温及び高温の 2 つのピークが 存在している. 重イオン照射後の Zry-4 試料では, 重イオン 未照射の Zry-4 試料と比較して 2 つのピーク温度が共に低温 側に遷移している. さらに、重イオン照射後の Zry-4 試料で は、赤い破線で囲んだ低温側のピークが鋭く明瞭に観察され ている. 重イオンを 3 dpa を照射された Zry-4 試料では,弾 き出し損傷により形成された格子間原子が二次元的に集合し た a 成分転位ループが成長し、高密度の転位網を形成してい ることが微細組織観察から判明しており、100℃付近の明瞭な ピークとの関連性が高いと考えられる. すなわち, 転位ルー プまたは転位網に捕獲された重水素の離脱に起因したピーク である可能性が高いと考えられる. 高温側のピークの低温側 への遷移の理由は明確ではないが、転位網を介した重水素の 高速拡散の可能性が示唆される。

#### 4. まとめ

重水素分子イオンを照射した Zry-2 及び Zry-4 試料の  $D_2 \pi$ ス脱離挙動から、両合金中の  $Zr(Fe,Cr)_2$  系第二相粒子の数密 度の違いが水素脱離挙動の及ぼす影響が示唆された. さらに、 重イオン照射された Zry-4 試料の  $D_2 \pi$ スの脱離挙動では、転 位ループさらには転位網等の照射欠陥の形成に起因したと考 えられる低温側の明瞭なピークが観察された.

#### 研究組織

研究代表者:安永和史((公財)若狭エネ研) 研究世話人:渡辺英雄(九大応力研) 研究協力者:島袋瞬,牟田口嵩史(九大応力研)



図 1 30 keV の D<sub>2</sub>+イオンを室温にて 3×10<sup>21</sup> ions/m<sup>2</sup>照射した Zry-2 及び Zry-4 試料の D<sub>2</sub>ガスの 脱離挙動.



図2 3..2 MeVのNi<sup>3+</sup>イオンを室温において3 dpa 照射及び重イオン未照射の Zry-4 試料に 30 keV の  $D_2$ +イオンを室温にて  $3 \times 10^{21}$  ions/m<sup>2</sup> 照射後の  $D_2$ ガスの脱離挙動.

## 部分電離プラズマ中の静電イオンサイクロトロン波/イオン音波の

## 伝播に対する中性粒子効果

## 九州大学総合理工学研究院 寺坂健一郎

## 目的

宇宙空間 (星間物質),地球大気の高層部 (Ionosphere),核融合の周辺プラズマなどでは 「プラズマ」と「電気的に中性な流体」が共存する.両者は互いに相互作用し,電離や運動 量の交換などを通じて系のダイナミクスを決定する.プラズマと中性流体の相互作用を理 解することは様々なシステム (核融合や地球惑星科学)に共通する重要な課題である.

プラズマ中の中性粒子の動的振る舞いは波動伝播や不安定性の成長に重要な役割を果た す.一方,従来の研究では波動場中の中性粒子の運動の影響(以下,中性粒子効果)を実験 的に検証した例は極めて少ない.本研究では,プラズマ中の中性粒子効果に着目し,プラ ズマー中性粒子衝突の頻度を実験的に制御した能動的実験からEIC波の分散関係に周波数 の減少が生じ得ることを実験的に実証することを目的とする.柔軟な放電条件の調整が可 能で,時間的・空間的に詳細な揺動計測が可能な九州大学応用力学研究所のPANTA装置と 九州大学のHYPER-II装置を用い,プラズマと中性粒子の完全なデータセットをもって中性 粒子効果を実証することを目指し,理論・実験の両アプローチから研究を実施した.

## 結果

実験に先駆け, EIC波の中性粒子効果が現れるパラメーター領域を推定するために, 理論 的な計算を進めた. 特に, 本年度は中性粒子の有限温度効果を取り込むことで, より現実

に近い状況でEIC波の伝播特性を調べた.図1に中 性粒子の温度を考慮した場合のEIC波の分散関係 を示す.図中の(A)はEIC波,(B)は有限温度効果に よって現れる中性粒子の音波が励起する静電波モ ード(GT mode)で、2つの伝播モードが存在可能 である.この結果は、(1)中性粒子の温度が有限な 場合でもEIC波の中性粒子効果が現れる、(2)中性 粒子の動的な振る舞いによってEIC波が励起され 得ることを意味しており、自然・実験室の一般的



図 1. 中性粒子温度が有限な場合の EIC 波の分散関係(伝播可能領域のみを図示).

64

な環境において中性粒子効果が重要な意味を持つことが明らかとなった[1,2].

実験検証に関しては, PANTAに設置され ているプローブアレイを用て計測された 電位揺動データを用いた検討を行った. 中性粒子との運動量輸送が重要となる高 ガス圧力条件下で, 位相速度がイオンサイ クロトロン周波数 (*f*<sub>ci</sub>) で特徴づけられる 波動が観測された.また, このモードは乱 流状態への遷移とも関係しておりイオン スケールの乱流輸送を調べる新しい実験 手法として重要であることが示された[3].



図2. HYPER-II 装置のグリッド励起実験で観測され た静電揺動.低周波のイオンサイクロトロン周波 数近傍の群速度が EIC 波やイオン音波と異なる.

HYPER-II装置 (九大) では、外部からEIC波を励起するためのグリッド励起実験を行い、  $f_{ci}$  より高周波領域で、EIC波の伝播特性に矛盾しない揺動を観測することに成功した(図2). 今後の課題は、図2において  $f_{ci}$  に近い波動の伝播速度がEIC波よりも大きくなることの原 因解明や、PANTA、HYPER-IIの両装置において中性粒子効果を示す  $f_{ci}$  以下の周波数での 伝播を明らかにすることがあげられる.これらの原因は、現在の実験領域では減衰効果が 大きいためであると考えられる.実験領域を広げ、プラズマと中性粒子が同等の運動量密 度を持つ、より高ガス圧放電領域での実験が必要であると考えられる.

## まとめと今後の展望

プラズマ波動現象に対する中性粒子効果を実証するために、PANTA装置およびHYPER-II 装置を用いた研究を実施した.理論解析では、実際の実験室環境においてEIC波の中性粒子 効果を検証可能であることを示した.また、中性粒子音波を用いたEIC波の励起など新しい 知見を得ることもできた.

プラズマ実験では, EIC波の伝播特性を満たす揺動が観測された.また,この周波数帯の 乱流にも寄与を示唆する実験結果も得られており,将来的に乱流輸送の理解を深める展開 も可能であると期待される.本年度得られた結果は,日本物理学会での発表などで報告済 みであり,本共同研究を通して有益な結果を得ることが出来たと言える.

- [1] K. Terasaka, S. Yoshimura, Phys. Plasmas 29, 022103 (2022).
- [2] 寺坂健一郎, 吉村信次, 日本物理学会2022年秋季大会, 14aW621-11 (2022).
- [3] Y. Kawachi et al., Sci. Rep. 12, 19799 (2022).

#### 波成二次循環の水槽実験

#### 京都大学大学院理学研究科 吉川 裕

目的 水面を伝わる波(水面波)が海水をかき混ぜる(混合する)ことを示唆する水槽実験結果がいく つか報告されている(例えば, Babanin and Haus, 2009; Dai et al. 2010)。最近の数値実験(例えば, Tsai et al., 2017; Fujiwara et al. 2020)では,水の分子粘性による仮想波応力が水面付近にシアー流(渦 有り流れ)を引き起こし,そのシアー流と水面波の相互作用で波の伝播方向に軸をもつ二次循環を形成 することを示している。我々が独自に行った直接数値計算の結果では,上述の仮想波応力によるシアー 流と水面波の相互作用で二次循環が生じ,海水が混合されることを確認した(今村, 2023)。しかし,そ の混合は先行研究の水槽実験結果からの見積もりよりも数倍小さいものであった。先行研究で用いられ た水槽は幅が狭く奥行きも短いため,側壁や反射波の影響が混合を過大評価している可能性がある。

そこで我々の直接数値計算と先行研究の水槽実験の検証を目的として,応用力学研究所の深海機器力 学実験水槽を利用した水槽実験を昨年度より実施している。昨年度は,波が作る二次循環の可視化に成 功し,また成層した水温の時間変化から,鉛直混合が実際に生じていることを確認した。ただし初年度と いうことで定性的な解析にとどまっていた。そこで今年度は,可視化を工夫して二次循環の幅や深さの 評価の高精度化と,新たに作成したアレイ型水温センサーを用いた水温変化の高精度化に取り組み,よ り定量的な評価を試みた。

実験方法 周期1~2秒(波長1.56~6.24m),振幅3~4cmの波を造波機で発生させ、水運動の可視化(二次循環の評価)と、水温の鉛直分布の時間変化の計測(鉛直混合の評価)を行った。

水運動の可視化は、造波器からおよそ 30 m 離れた地点の水面下数 10 cm の位置に、マイクロバブル 発生装置(リビングエナジー社、FU11 型)の吐出口を設置し、直径 100 µ m 以下の泡(マイクロバブ ル)を発生させることで行った。造波器から約 30 m の位置にある横窓からグリーンレーザー(レーザ ークリエイト社、3010801-1W)を水中に照射することで、マイクロバブルの運動が可視化される。可視 化手法のさらなる詳細は昨年度の報告書を参照されたい。今年度は、水槽をまたぐ作業台に長い定規を 縦方向および横方向に設置して動画撮影することで、可視化される二次循環の幅と深さをより定量的に 評価した。なお今回の報告書では紙数の制約からその解析結果の詳細は割愛する。

水温変化は、応用力学研究所の野田技術職員に作成して頂いたアレイ式水温センサーで実施した。水面 から 20cm までは 1cm 間隔で、それ以深は 10cm 間隔で抵抗式水温センサーを取り付け、4Hz でサンプ リングを行った。水温計アレイはマイクロレーザを照射した面より 1m ほど上流側で行った。このアレ イが乱れを作らないと判断し、水温計測はマイクロバブルの可視化と同時に行った。振幅や周期を変え た実験も含めて、合計7回の実験で得られた水温変化を解析した。この報告書ではその一部を紹介する。

実験結果 一例として周期1秒,振幅4cmの場合の水温の時間変化を示す(図1)。成層している水温 が,造波機の作動開始時刻(図のB)で生成された主波が計測地点に到達する時刻(図のC)において大 きく減少している様子が見て取れる。水面から振幅の距離以内のセンサーは波の谷が到達する時刻には 空中に露出することになるため,混合の様子は水深4cm以深の水温データから判断する。(静止水面を

66

**z=0**としている。)なお,主波到達時刻の前に振幅の小さい波がみられるが,この波(前駆波とここでは 呼ぶ)の成因は不明である。前駆波が何らかの影響を及ぼす可能性はあるが,今回はその影響は小さいと して,反射された主波が戻ってくる時刻(図のE)までを解析対象期間とした。



図1:計測された水温変化の一例。z=0cmと付した線が造波機作動前の静止水面上にあるセンサー。

図2に周期1秒,振幅3cm(左図)および4cm(右図)の実験で得られた水温の鉛直分布の時間変化 を示す。縦の白破線はそれぞれの実験における図1のA~Eに対応する。振幅3cmの実験では,主波到 達後35~40秒後に水深10cm以浅で一時的な高温化がみられ,その後は主波到達時よりも高く比較的鉛 直に一様な水温分布がみられた。一時的な高温化は二次循環による高水温の移流,その後の一様化は混 合の結果と推察される。同様の傾向は振幅4cmの実験でも見られる。ただし一時的な高温化が発生する 時刻が早い。この結果は,振幅(波形勾配)が大きいほど二次循環の成長が速く,いち早く混合が生じる と考えると,数値実験と整合的である。また,上記の温度変化は先行研究の水槽実験とも似ている。今後, さらに精緻な解析を進め,検証を進める予定である。





謝辞 技術職員の野田氏,油布氏,前田氏には水温アレイ制作を始めとして様々な支援を頂きました。おかげさまで昨年度より詳細な計測ができました。記して感謝いたします。
 研究組織 京都大学大学院理学研究科 教授 吉川 裕,博士後期課程1回生 今村 春香
 研究成果報告 JpGU での今村春香による昨年度の成果の研究発表が学生優秀発表賞に選ばれた。

Bが造波機作動開始時刻, Cが主波到達時刻, Dが反射前駆波到達時刻, Eが反射主波到達時刻。

# プラズマプロセスを用いた薄膜作製による安価な水素脆化防止用材料作製 III

Preparation of low-cost hydrogen embrittlement resistance thin films by plasma process

佐世保高専,川崎仁晴、須本航輝,鴛淵梨花 National Institute of Technology, Sasebo College H. Kawasaki, K. Kojima, R. Oshibuchi

## 1 概要

地球温暖化防止に役立ち、かつ天候などに左右 されない安定な電力供給源となり得る「水素エネ ルギー | 関連機器は、常に高圧の水素ガスに晒さ れることが宿命付けられている。よって、これら の関連機器は耐水素脆化能力をもつ高価な金属 を利用しなければならず、水素エネルギー関連機 器の普及を妨げる要因の一つとなっている。例え ば、ステンレス鋼 SUS316L やアルミニウム合金 A6061-T6 などは耐水素侵入特性が良い等の理由 で水素脆化が起こりにくいとされ、高圧水素タン ク等の水素利用機器の金属材料候補材として挙 げられているが、安価な SUS304 に比べ 1.5~2 倍 以上の価格となる。我々は以前よりこれを解決す るため、水素脆化防止薄膜の作製を行い、ステン レス鋼 SUS316L やアルミニウム合金 A6061-T6 で安価な材料をコーティングする研究を行い、 80%以上の水素脆化防止効果があることを明ら かにした。しかしながら、例えば SUS304 等の母 材に対して上述の高水素ぜい化防止材料を利用 した場合、高圧水素に長時間さらすと水素脆化防 止効果が減少し、かつ母材から薄膜が剥離するな どの問題も発生した。これを解決するため、本研 究では、数種類の粉体ターゲットをもちいたプラ ズマプロセスで、基板と薄膜の界面ではより密着 性がよく、高圧水素に密着する薄膜側では水素脆 化防止効果が高いような傾斜機能性薄膜の作製 を試みた。

## 2 実験装置

実験装置を図1に示す。成膜には通常の高周波 マグネトロンスパッタリング薄膜作製装置を用 いた。基板として SUS304 および分析用の Si 基 板の2 種類を用い、ターゲットとして①NiO と SUS304 の混合粉体、②TiO<sub>2</sub> と SUS304 の混合粉 体を利用して成膜した。このとき、NiO/SUS304 の混合比を変えて薄膜を作製した[1-3]。成膜条件 は、雰囲気ガスとして Ar、圧力を 10Pa とし、入 カは 100W で成膜した。作製した薄膜は走査型電 子顕微鏡 (SEM:エリオニクス ERA) や XRD、 AFM 等を利用して分析した。作製した薄膜の膜 中の組成比は X 線光電子分光分析法 (XPS:日本電 子製: JPS9010) と同装置の Ar イオンによるデプ スプロファイルを用いて解析した。

水素量の測定は佐世保高専機械工学科の高圧 水素浸漬装置を用いて水素チャージ計測法で計 測した。



#### 実験結果

① NiOとSUS304の混合粉体を利用した場合 NiOとSUSを混合させた粉体ターゲットを用いてNiがドープされたSUS薄膜を作製した。その後、作製された薄膜中のNi/Feの比と、ターゲット中のNiO2/SUSの比との関係をXPSで調べた。結果から作成した薄膜中のNiドープ量は、ターゲットの粉体混合比にほぼ比例することが分かった。この結果を利用すると、複数の混合比のNiO/SUS粉体ターゲットを準備し、徐々にその組成を変えながら成膜することで、薄膜最表面と基板と薄膜の界面とで組成を変化させ、基板との結合力が強く水素脆化効果の大きい薄膜が作製できる可能性がある。そこで、NiO/SUS304の粉体ターゲット0%~100%まで変化させて混合したターゲットを11種類準備し、通常のスパッ タリング成膜装置(スパッタアップタイプ)のタ ーゲットとして混合粉体ターゲットを利用し、薄 膜作製をおこなった。はじめは SUS100%粉体を 利用し、1時間成膜、その後 NiO10%/SUS90%に 変更し、同様に 1 時間成膜。これを、 NiO20%/SUS80%と繰り返し、最後に NiO100% で成膜した。成膜結果を、XPS で、Ar イオンを用 いて深さ方向にエッチングしながら Ni と Fe の組 成比を分析した。結果を図 2 に示す。



図2 作製した Ni/SUS 薄膜の組成変化

結果から、作製した粉体ターゲットの組成に比 例して Ni の膜中含有率が変化していることがわ かった。このことは、今回利用した粉体ターゲッ トによる薄膜作製法で傾斜機能性薄膜の作製が 作成可能であることを示唆している。一方、結晶 性に関しては、NiO/SUS のターゲット混合比を 変えても大きな違いは得られなかった。

TiO<sub>2</sub> と SUS304 の混合粉体を利用した場合

TiO<sub>2</sub>/SUS の粉体を利用して同様に薄膜作製を 行い、傾斜機能性薄膜の作製が可能かどうかを検 討した。その結果、図3に示すように傾斜機能性 薄膜が作製できることがわかった。しかしながら、 TiO<sub>2</sub>/SUS の混合率の変化に伴い、結晶性が変化 することがわかった。この原因は、現在検討中で あるが、基板再表面のオンで変化によると考えて いる。

### 4. まとめ

NiO/SUS304 および TiO<sub>2</sub>/SUS304 の粉体タ ーゲットを用いて、Ni および Ti と SUS の混合比 を変化させた傾斜機能性薄膜が作製できること がわかった。今後は他の組成に対しても同様に薄 膜作製を行い同様に作製できるか調べるととも に、結晶性の変化など、より詳細な制御に関する 研究を進めたい。



図4 作製した Ti/SUS 薄膜の結晶性変化

#### 謝辞

この研究の一部は、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、科学研究費補助 金基盤(A) (No. 18H03848)および基盤(C) (No.23340181 and No. 16K04999),長岡技術科学 大学 高専連携教育研究プロジェクト、名古屋大 学低温プラズマ科学研究センターにおける共同 利用・共同研究で行われた。

#### 参考文献

[1] H. Kawasaki, etal., Jpn. J. Appl. Phys 59, SAAC01, (2019).

[2] H. Kawasaki etal, Jpn. J. Appl. Phys. 60 SAAB10 (2021)

[3] H. Kawasaki etal, Jpn. J. Appl. Phys 61 SA1019 (2021) 「プラズマと数理工学」報告書

2023年2月15日 多羅間大輔

**目的** 核融合エネルギーの実現,地球における気候変動,風力エネルギーなどの異なる問題の共通点に,流体やプラズマの数理に関する探求が必要となることはよく知られている.これらの具体的な問題に関しては,系の振る舞いが複雑なため,物理学的な基礎方程式(Navier-Stokes 方程式や Colioli 力・Lorentz 力を含む方程式系)を直接的な数値計算により解く方法に加え,簡約化されたモデルに基づく解析が威力を発揮する.こうした簡約化されたモデルの導出にあたり,物理的な直感に基づく大胆な仮定や,問題の持つ時定数や空間スケールの違いから展開パラメータを定義し漸近的に方程式を簡約化するなどの方法が実際の解析においてはとられている.

本研究の目的は,核融合,気候変動,風車エネルギー等の問題の中で用いられ るモデル方程式について,上述の両者の方法を組み合わせることで,数学的に厳密 に導出された,物理的な意味が明確な強靭なモデル方程式を得ることにある. 個別 の工学的課題や物理的課題という視点から離れ,それぞれの問題に用いられている 方程式系の持つ数理構造という点から共通点を探ることを目的とする. 応用力学研 究所で行われている物理的及び工学的観点からのアプローチに加え,新たに数理的 視点を持ち込むことに特徴があると言えるであろう.得られた方程式の解の存在や 安定性について調査を進め,最終的な非線形構造を含む乱流状態の分岐を議論する.

方法 複数の分野に共通するモデル方程式の具体例として,非線形 Schrödinger 方 程式 (Nonlinear Schrödinger equation, NLS と略す.)について考察を進める.NLS は量子系に有効であることは言うまでもなく,流体やプラズマに励起される古典物 理学的な波動の振幅変調に関する非線形解析にも用いられる.モデル方程式として のNLS は,搬送波と振幅変調の持つ時定数の違いから導出されたものである.NLS は可積分系であることが知られており,いくつかの厳密解の構成法が知られている. 本研究では,これらの厳密解が得られる条件を整理し,特定の解が選択されるため の具体的問題のもつ物理的な条件を探る.

**結果** 厳密解の一覧とその解が得られる条件の一覧を図1(小菅氏提供)に示す.よく知られているソリトン解は定常的に伝搬する解であり,一旦励起されれば安定に伝わり続ける.その一方でブリーザーと呼ばれる非線形波動は,その名前の通り時間的にエネルギーが局所的に集中し,その後散乱する.時間的には突然の波高が高くなることに相当し,いわゆる津波的な振る舞いがすることがわかる.時間的に一回だけ起こるものや,周期的に繰り返すものがあることがわかる.この小菅氏らによる結果は,[1,2]により発表されている.

**考察** NLS の厳密解とその存在条件を整理することができた. それぞれのブリー ザー解が励起される条件に着目すると, パラメータの間に ν = √−1µ という関係が あることがわかり, ある極限に相当するものと考えられる. 今後はこれらの中間状 態を現す解を探り, どちらの解へと分岐していくかという条件についてより詳しく 解析を進める予定である.

なお,関連する話題として,小菅氏が主催する「非線形プラズマ科学セミナー」 (オンライン)にて開催された辻氏の講演[3]での議論も行っている.



図1:非線形シュレディンガー方程式と幾つかの厳密解とそれらが導かれる 仮定の一覧。

# References

- [1] Y. Kosuga, S. Inagaki, Y. Kawachi, A fate of nonlinear evolution of drift waves: Excitation of nonlinear breathers, Phys. Plasmas, 29, 122301, 2022.
- [2] Y. Kosuga, Excitation of nonlinear breathers in magnetized plasmas, talk at 6th AAPPS-DPP, 2022. (2022年10月12日)
- [3] 辻英一,「孤立破裂の2次元相互作用について」,オンライン研究セミナー「非線 形プラズマ科学セミナー」,2022. (2022年9月2日)



# ラジカル含有リチウム酸化物薄膜の水素吸収および放出過程

Hydrogen absorption and release processes for radical-induced lithium oxide 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、リチウム酸化物薄膜を水素(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、リチウム酸化物一つであるLi<sub>2</sub>ZrO<sub>3</sub>は多量の水(H<sub>2</sub>O)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、プラチナ(Pt)被覆によりLi<sub>2</sub>ZrO<sub>3</sub> 表面にラジカルを形成させ、H 貯蔵量の増加およびH 解離温度の低下を目指す。特に、イオンビーム分析の一つである反跳粒子検出(ERD: elastic recoil detection)法を用いて、Li<sub>2</sub>ZrO<sub>3</sub>表面に蓄積されたH濃度を測定し、また、九州大学応用力学研究所に設置された四重極型質量分析計(Q-mass)を用いた昇温ガス脱離(TDS)法により、Hの解離温度を調べ、Li<sub>2</sub>ZrO<sub>3</sub>中のH吸収および放出過程について明らかにすることを目的とした。

**実験方法** これまでの研究成果に基づき、炭酸リチウム(Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)および酸化ジルコニウム(ZrO<sub>2</sub>)粉末を 1300℃以上の 高温および空気雰囲気において焼結することによって、直径 8 mm、厚さ 1 mm のディスク状の Li<sub>2</sub>ZrO<sub>3</sub> 試料を作製 した。Li<sub>2</sub>ZrO<sub>3</sub> 試料の結晶構造、格子定数および体積密度はそれぞれ単斜晶(monoclinic)、a=c=0.541 nm、b=0.903 nm および 3.46 g/cm<sup>3</sup> であった。次に、マグネトロンスパッタリング装置を用いて、室温および真空雰囲気において試料 両面に厚さ約 25 nm の Pt を蒸着した。蒸着後、電界放出形走査電子顕微鏡(FE-SEM)を用いて、試料表面の形態を 観測した。これらの試料内部には、作製時に吸収された H<sub>2</sub>O および CO<sub>2</sub>等による残留水素および様々なガス種が多 く含まれているため、真空雰囲気において室温から約 350℃までの各温度において熱処理された。次に、室温および 30~55 %R.H.の相対湿度の空気(水蒸気)を真空装置へ約 1×10<sup>5</sup> Pa になるまで導入した後、各空気暴露時間後に精密 電子天秤を用いた重量増加(WG: weight gain)およびイオンビーム分析を用いた ERD 測定を行った。

次に、水素吸収した試料を真空雰囲気においてセラミックスヒーターにより室温から 400~500℃までの各温度で 10 分間の等時加熱(isochronal annealing)した後、ERD 法により試料表面の水素濃度分布を測定し、試料からの水素 放出量を求めた。また、水素分子が試料から放出されていることを Q-mass を用いた TDS 法により確認するととも に、生成された水素分子量から水素放出量を求めて、ERD 法によって求めた値と比較した。得られた結果から、表 面改質された Li<sub>2</sub>ZrO<sub>3</sub>試料の水および水素吸収、蓄積および放出機構のメカニズムを明らかにした。

**実験結果および考察** 室温および 30-55 %R.H.の相対湿度の条件において、各空気暴露時間後に測定された WG スペクトルを図1に示す。図1より、Pt-Li<sub>2</sub>ZrO<sub>3</sub>試料の重量増加の割合は、空気暴露時間の増加とともに増加した。その 重量増加は約 2500 hrs(約3ヶ月)において Li<sub>2</sub>ZrO<sub>3</sub>試料の飽和値の約5倍に達することがわかった。この重量増加の 速度は、湿度に大きく影響することもわかった。従って、この重量増加は大気中の水蒸気吸収が要因の一つであると 考えられる。次に、ERD 法により、多量の H が試料作製時に吸収されることがわかった。約 350℃までの真空加熱 により、ほとんどの残留 H は放出されるが、試料中の H 濃度が空気暴露により再び増加することがわかった。この 結果より、重量増加は大気中の水蒸気吸収が要因の一つであることが明らかになった。

次に、室温および 30-55 %R.H.の相対湿度の条件で、4000 hrs(約4ヶ月)以上の長時間の空気暴露により重量変化 がほぼ一定になった Pt-Li<sub>2</sub>ZrO<sub>3</sub> 試料について、室温から 400~500<sup>°</sup>Cの温度までの各温度で 10 分間の isochronal annealing 実験を行い、ERD 法を用いて Pt-Li<sub>2</sub>ZrO<sub>3</sub> 試料中の捕捉 H 濃度の変化を評価した。ERD スペクトルより、 Pt-Li<sub>2</sub>ZrO<sub>3</sub> 試料中の捕捉 H 濃度は、約 100<sup>°</sup>C以下の低温で急激に減少することがわかった。また、Q-mass を用いた
TDS 法により、試料から放出されるガス種の判別を行った。 Li<sub>2</sub>ZrO<sub>3</sub> および Pt-Li<sub>2</sub>ZrO<sub>3</sub> 試料から得られた TDS スペク トルをそれぞれ図 2(a)および(b)に示す。Li<sub>2</sub>ZrO<sub>3</sub> 試料の場 合、図 2(a)より、H<sub>2</sub>O および CH<sub>4</sub> が約 30℃の低温から放 出し、続いて H<sub>2</sub>が約 90℃、CO<sub>2</sub> が約 210℃の温度から観 測された。他方、Pt-Li<sub>2</sub>ZrO<sub>3</sub> 試料の場合、図 2(b)より、H<sub>2</sub> および CO<sub>2</sub> がそれぞれ約 50℃および約 90℃のより低温か ら放出されており、さらに各ガス種の放出量は、Pt 効果に より約一桁増加することもわかった。従って、Pt 蒸着によ る表面改質は H<sub>2</sub>O を室温で分解して H を貯蔵する水分

解・貯蔵特性を向上させるだけでなく、CO2の吸収、蓄積 および放出特性も改善させることが明らかになった。

以上の実験結果を基にすると、水分解、水素および二酸



図 1 Li<sub>2</sub>ZrO<sub>3</sub>および Pt-Li<sub>2</sub>ZrO<sub>3</sub> 試料における重量 増加の空気暴露時間依存性。

化炭素の吸収・貯蔵・放出におけるメカニズムについて以下のことが考えられる。①Pt蒸着によってLiが表面に偏析、 また Pt が酸素と反応して酸素欠損(O 空孔)が形成される。②空気中に含有する H<sub>2</sub>O が試料表面に偏析した Li および 形成された O 空孔と反応して H および OH に分解する。③生成された H および OH は拡散して O 空孔に捕獲され る、また Li と反応して LiOH を形成する。⑤空気中に含有する CO<sub>2</sub> が LiOH と反応して、Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> が形成され、CO<sub>2</sub> が捕獲される。⑥加熱によって O 空孔から脱離した H 同士の再結合により生成された H<sub>2</sub>、H と OH との再結合によ り生成された H<sub>2</sub>O、H と Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> との反応により生成された CO<sub>2</sub> が放出される。この Pt-Li<sub>2</sub>ZrO<sub>3</sub>材料は、空気中の H<sub>2</sub>O を常温で選択的に吸収し、約 50<sup>°</sup>Cの低温で H<sub>2</sub> を放出させる優れた特性を有しており、また、大気において安定 であるため、H<sub>2</sub>O 吸収・H 蓄積・H<sub>2</sub>放出特性は劣らず、何度でも繰り返して利用することが可能である。



図2 室温で空気暴露された(a)Li<sub>2</sub>ZrO<sub>3</sub>および(b)Pt-Li<sub>2</sub>ZrO<sub>3</sub> 試料における TDS スペクトル。

<u>まとめ</u> マグネトロンスパッタリング装置を用いて約 25 nm の Pt を被覆した後、約 350℃までの真空加熱で表面改 質処理を行った Pt-Li<sub>2</sub>ZrO<sub>3</sub>試料の H<sub>2</sub>O 分解、H の吸収および蓄積特性について、WG、ERD および TDS 法を組み 合わせて調べた。Pt-Li<sub>2</sub>ZrO<sub>3</sub>試料の重量増加の割合は、室温および 30~55 %R.H.の相対湿度の空気雰囲気の条件下 において、約 2500 hrs(約 3 r 月)で Li<sub>2</sub>ZrO<sub>3</sub>試料の飽和値の約 5 倍に達することがわかった。この重量増加は、H<sub>2</sub>O の解離、LiOH および Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>の形成(即ち、CO<sub>2</sub>の捕獲)が Pt 被覆による Li の偏析および O 空孔の形成によって促 進されたことを表す。さらに、H<sub>2</sub>が Pt 被覆効果により約 50℃の低温で放出されることがわかり、低エネルギーによ る H<sub>2</sub>O 分解、H 吸収および H<sub>2</sub>放出の可能性を示唆した。 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、応用力学研究所の共同利用水槽にて水位・差圧の同時 測定を行い、運動量収支法を用いて、砕波した水面にかかる摩擦速度の推定を昨年度よりも高精度に行 った.また、伝熱実験の準備を行った.

・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、風波気液界面を通しての運動量輸送量の高精度測定を行った.また、熱輸送量の測定実験の準 備を行った.

・実験方法および実験結果

実験・解析は、吹送距離は20mの地点において、ファン回転数100回転から最大の1700回転において、 実施された.表1に、2018-2021年度の最高風速等の値を示す.特に、2018年度に台風シミュレーション水 槽へと改造を行って以来、摩擦速度は2018-2021年度には精度よく測定できなかったものの、運動量収支 法を使用することにより、今年度初めて精度よく評価された.図1に、吹送距離20mにおける一様風速と 摩擦速度の関係を示す.図より、低風速から高風速までのすべての風速帯において、過去の他の水槽にお ける測定値(*Takagaki et al.*, 2012)と非常によく一致することがわかる.今後は、波高と摩擦速度との関 係を検討し、運動量輸送機構の海洋物理モデルを確立する.また、台風シミュレーション水槽にて伝熱実 験を行い熱輸送機構の解明にも挑戦する.

・成果報告(論文、学会発表リスト等)

- N Takagaki, S Sasaki, N Suzuki, S Goda, Y Troitskaya, S Komori, Development of Wind Wave Suppression Method for Air-Water Momentum Transport at Extremely High Wind Speeds, Journal of Advanced Marine Science and Technology Society, (2022).
- 2. 高垣直尚, 西海和希, 林凌大, 栗原直希, 台風シミュレーション水槽内部における高風速時の風速・

波高測定,第1回「ムーンショット目標8高垣プロジェクト」ワークショップ,九州大学,2023年3月6日.

- 3. 鈴木直弥,高垣直尚,西谷幸祐,濱口拓海,西海和希,林凌大,栗原直希,高風速時の海面を通しての 運動量輸送量の測定,第1回「ムーンショット目標8高垣プロジェクト」ワークショップ,九州大 学,2023年3月6日.
- 岩野耕治,高垣直尚,林凌大,西海和希,栗原直希,高風速時の海面を通しての熱輸送量測定に関する検証,第1回「ムーンショット目標8高垣プロジェクト」ワークショップ,九州大学,2023年3月 6日.

Table 1: Maximum wind velocity in RIAM wind-wave tank. Values of  $U_{\infty}$  in 2020 and 2021 were extrapolated values. Values of  $U_{10}$  in 2017 and 2019 were estimated from  $U_{\infty}$  using model (*Takagaki et al.*, 2012). Values of  $U_{10}$ 

	N	F	$U_\infty$	$U_{10}$	<i>u</i> *
	[rpm]	[m]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
Takagaki et al. (2017)	1300	6.5	14.0	22.8	-
RIAM Report (2019)	1700	6.5	22.2	36.8	-
RIAM Report (2020)	1600	33	24	37.6	1.9
RIAM Report (2021)	1700	33	25	43.5	2.2
Present	1700	20	24.0	40.3	2.0

in 2020 and 2021 were estimated from u\* using model (Takagaki et al., 2012).



Fig. 1: Relationship between freestream wind speed  $U_{\infty}$  and friction velocity  $u^*$  at x = 20 m.

#### 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

潮汐混合と浮力加入間のバランスの空間的な違いから形成される潮汐フロントは、世界中の内湾や陸棚上に存在し、物質の循環を通じて生物生産に寄与すると考えられている. 我が国では豊後水道で初めて潮汐フロントの形成が報告された(柳・大庭 1985). 豊後水道の潮汐フロントについては、海峡部の強い潮流による移流によって位置とフロント強度が著しく変動することを近年申請者らが明らかにし(Dong and Guo, 2021), この発見に基づいて 2021 年 7 月に豊後水道の潮汐フロントの詳細な船舶観測を実施した結果、下げ潮から低潮時にかけて水平距離 100m 程度で海面水温が 5 度も変化するようなシャープなフロントが捉えられた. このようなフロントは上げ潮時には減衰しており、その原因として水平移流による発散や拡散が考えられたが、悪天候のため十分な観測ができずその全貌は不明であった. 本研究では前年度に引き続き豊後水道の潮汐フロントの船舶観測を実施し、フロントの形成と変動に関わるプロセスを明らかにすることを目的とする.

## 研究内容

2022年5月8-10日(小潮期)と5月15-17日(大潮期)に、速吸瀬戸南部に形成される潮汐フロントを対象 として、フロント構造と乱流強度分布の調査を愛媛大学沿岸環境科学研究センター練習船「いさな」により実施 した.フロントを横断する観測断面(測点 A03-A12)を設定し、JFE Advantech 社の多項目水質計 RINKO プロ ファイラー及び乱流微細構造プロファイラ TurboMAP-5により潮汐フロント周辺の成層構造と乱流強度を計測す るとともに、いさな搭載の音響ドップラー流速計(ADCP, TRDI 社 Workhorse Sentinel 300 kHz)と水温計によって 流速と海面水温を計測した.また、乱流観測時には舷側から TRDI 社 Workhorse Sentinel 600 kHz ADCP を吊 り下げ、船底ADCPでは捉えきれない表層の流れを鉛直流も含めて高精度に計測した.

大潮期 5 月 16 日午前(上げ潮から下げ潮への転流時)及び午後(下げ潮から上げ潮への転流時)に得られ た水温の分布を図 1 に示す.午前には南側の温暖な水(> 17.0 ℃)が A07 測点以東に位置し,A06 点付近に おいて速吸瀬戸周辺の混合した冷涼な水(~15.5 ℃)との間に緩やかなフロントを形成していた(~0.3 ℃ km<sup>-1</sup>).午後になるとフロントは下げ潮によって南東の A11 測点付近にシフトし,著しく勾配が強化された (~5.0 ℃ km<sup>-1</sup>).上げ潮時には暖水がプリュームとして表層を A05 測点付近まで広がった(図 1c, f).同様の フロントの移動と強度の変動は小潮期の調査結果にも見られた(図は省略).図2に5月17日の上げ潮から下 げ潮時にかけて実施した流れと乱流の断面観測結果を示す.フロントが位置する測点 A07 から A11 までの地 点においては、測点 A09 付近の海底に高さ約 20 m の砂堆が存在し、その付近で-0.02 m s<sup>-1</sup>の強い下降流と *O*(10<sup>-5</sup>) W kg<sup>-1</sup>の著しい乱流運動エネルギー散逸率が得られた.(図 2c, d).また混合域であり海峡部斜面上に 位置する A05 測点では 0.02 m s<sup>-1</sup>の強い上昇流が得られた.他の調査時にも海峡部及び砂堆上において強 い上昇流・下降流が度々計測されたことから、これらの海域では海底地形と強い潮流に起因して顕著な鉛直循 環が生じている可能性がある.この鉛直循環過程は、海峡部及び潮汐フロント域の鉛直混合と物質輸送、及び 潮汐フロントの消長に影響し得るため、今後も詳細な調査を行い明らかにする予定である.

76



図1 2022年5月16日大潮期の(a-c)上げ潮から下げ潮、および(d-f)下げ潮から上げ潮にかけての調査で得られた水温分布.(a,d) 航跡上の海面水温マップ.(b,e) 船舶搭載の水温計とCTDによる水温、(c,f) CTDによる水温の断面図. 横軸と縦軸は航跡に沿った距離及び深度であり,等値線は海水密度(の)を示す.



図 2 5月17日の下げ潮から上げ潮にかけて実施した乱流計 TurboMAP と流速計 ADCP による断面観 測結果. (a) 水温, (b) 船底に設置された 300-kHz ADCP で計測された観測断面に沿う方向の流速 V(北西向きを正とする), (c) 舷側から吊り下げた 600-kHz ADCP で計測された鉛直流速 <math>W(上向きを正とする), (d)TurboMAP-5 で計測された乱流運動エネルギー散逸率  $\varepsilon$ . 各図中の黒実線は海水密度 ( $\sigma$ ), 黒いシェードは 海底地形を示す.

#### 研究組織

郭 新宇(愛媛大学沿岸環境科学研究センター、研究代表者)、遠藤 貴洋(九州大学応用力学研究所、所内 世話人)、郭 新宇(愛媛大学沿岸環境科学研究センター、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)、堤 英輔(東京大学大気海洋研究所/鹿児島大学水産学部)

### 衛星・地上ライダ/レーダ解析のための氷雲・降雪粒子の散乱特性データベース開発

気象研究所 気象観測研究部 石元裕史

#### ・要旨および目的

気象研究所で開発した氷晶・降雪粒子モデルおよび散乱特性計算手法によって得られた計算結果を大 気物理研究室で開発している氷雲解析アルゴリズムに組み込み、高度なレーダ・ライダ複合解析技術を 開発する。この目的のため、1)積雪や霰のX線マイクロCT画像をもとにした3次元の雪片・霰粒子 モデルを開発し、霰粒子についてはマイクロ波での後方偏波散乱特性データセットを作成した。また2) 可視・近赤外波長では、不純物を含む氷晶の散乱計算ができるよう幾何光学近似法を改良した。

·研究方法

氷晶・降雪粒子散乱特性については、粒子形状の精緻化(あるいは高度化)や散乱計算手法などについて検討し、散乱特性計算はその一部を気象研側が実施する。計算結果はデータベースとし大気物理研究室側に提供する。レーダ波長での粒子散乱特性は DDA または FDTD 法を用い、ライダ波長では気象研の幾何光学近似法(GOA)および改良幾何光学近似法(GOIE)を高度化して計算する。その計算結果をもとに大気物理研究室の物理モデルや放射伝達計算手法の改良などを支援する。

·研究結果

雪片・霰粒子の3次元形状モデルについては、防災科研雪氷防災研究センターから入手したX線マイ クロ CT で計測した霰粒子と積雪の3次元構造データを利用した。雪片については Ishimoto et al. (2018)の手法を用いて積雪構造から分離・抽出した構成粒子を使って雪片形状を再構築し、代表的な 雪片のサイズー質量関係を満足する複数の粒子形状モデルを作成した。また霰については単一粒子のマ イクロ CT 画像から画像処理的手法により異なる密度の粒子を作成し、またサイズの違いや氷の複素屈 折率に水の混合を考えることで、複数の変数からなる霰粒子のデータセットを作成した。また DDA 法を 用いて計算した粒子散乱特性をデータベース化し、サイズ・密度・湿り度を入力としレーダー偏波特性 を出力するパッケージを開発した。

六角柱、六角板、ドロクスタル形状、砲弾型、ボロノイ型などの氷晶粒子モデルの後方散乱特性を計算しデータベースの作成を行った。それらの一部はライダー(0.355µm)とレーダー(94GHz)の複合利用による氷晶粒子のサイズ推定アルゴリズムの開発に活用された(Shishiko et al., 2022)。

氷晶粒子モデルの精緻化・高度化について、氷晶内部にススやダストなどの吸収物質が含まれるよう な非均質粒子に対応できるように幾何光学近似による散乱計算手法を改良した。計算例として吸収物質 の氷晶内部での配置によって粒子全体の吸収率がどのように変化するかを調べた。球形粒子では、吸収 物質が球の中心付近に存在する場合の方が、周辺付近に存在する場合に比べて吸収率が大きくなること が知られているが、六角柱や六角板のように平面で構成される氷粒子では、吸収率は吸収物質の氷内部 での配置にはほとんど影響を受けないことが分かった。



左:積雪マイクロ CT データから作成した雪片モデル.右:霰モデルによる C バンドレーダー偏波特性  $(K_{dp})$ 

参考文献

[1] Ishimoto H., S. Adachi, S. Yamaguchi, T. Tanikawa, T. Aoki, and K. Masuda, 2018: Snow particles extracted from x-ray computed microtomography imagery and their single-scattering properties. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 209, 113-128.

[2] Shishko.V.A, D.N.Timofeev, A.V.Konoshonkin, N.V.Kustova, N.Kan, I.V.Tkachev, K.Masuda, H.Ishimoto, H.Okamoto, A.G.Borovoi. 2022: Backscattering characteristics of optical and electromagnetic waves in joint sensing of cirrus clouds by a polarizing lidar (0.355µm) and a 94GHz radar. Atmospheric and Oceanic Optics, Vol.35-6, 775-781.

• 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

#### 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

本研究は、海表面の水位変動(水位と波浪)によって GNSS 反射波が受ける影響の評価する研究の一 環として実施する研究である.波浪と GNSS 反射波強度の関係に影響を与えうる海上風とうねりとの 非等方的な関係について評価する.今年度も実地観測が困難であったため、過去に得られた波浪の2次 元スペクトルに代表される詳細な波浪情報を用いて解析を行い、うねりの存在が風波の状態に与える影 響を評価する.平成 30 年度の共同利用研究の結果得られたうねりの波形勾配と風波のエネルギーの関 係をさらに詳細に検討し、風波エネルギーに加えてうねりの非等方的な影響に着目する.

#### <u>手法の概要</u>

本研究で用いたデータは 2014 年白鳳丸航海 KH14・1 で行った波浪観測において取得されたものであ る.波浪観測は応用力学研究所所有の GPS 波浪ブイ (ゼニライトブイ製) と同型のものを利用した. これまで実施した研究結果から,従来行われている海上風から海面の風応力を推定する手法には,介在 するバルクパラメタリゼーションが波浪の影響を受けるという本質的な問題が含まれていることが分 かっている.そのため,Toba(1972, J. Oceanogr. Soc. Japan, 28, 109-120)で提唱された風波に対する 関係式を用いて,風波が平衡状態にある場合の摩擦速度 (風波摩擦速度) を定義して利用する (式(1)).

$$u_{w*} = \frac{H_S^2}{gB^2 T_S^3}$$
(1)

通常,摩擦即素はベクトルとしては扱わないが,風波摩擦速度は風波の励起と直接的に対応するため, 風波摩擦速度は海上風の方向ではなく風波の方向に沿った成分であるとして扱う.

#### <u>結果の概要</u>

風波の状態についてはいくつかの無次元関係が成立することが知られている.その中でも特に波齢と 波浪エネルギーはよく成立することが知られている(式(2)).一方,エネルギーとフェッチの関係(式 (3))については KH-14-1 ではフェッチを確定することが難しいことから Kahma and Calkoen (1992, J. Phys. Oceanogr., 22, 1389-1405)が得た関係式を用いて有次元のフェッチを推定して用いる.

$$\widetilde{E^{w}}_{*} = b_{w*} \widetilde{W}_{*}^{a_{w*}} \tag{2}$$

$$\tilde{E}^{\tilde{w}}{}_{10} = b_{x10} \tilde{X}_{10}^{\ a_{x10}} \tag{3}$$

ここで、 $\widehat{E}_w$ は風波の無次元エネルギー、 $\widehat{W}$ と $\widehat{X}$ はそれぞれ無次元の波齢とフェッチであり、添え字の\*と 10 はそれぞれ風波摩擦速度と 10m 風速で無次元化されていることを示す. *a*と*b*はそれぞれ経験的に決 定される係数を表す. KH-14-1 の観測データを用いてそれぞれの係数を求めた. 図1はこの関係式から の個々の観測データの乖離をうねりの波形勾配に対して調べたものである. 波齢とエネルギーの関係か らの乖離については系統的な傾向はみられないが、フェッチとの関係については、波形勾配が大きい場 合に無次元エネルギーが減少する傾向がみられる. 式(2)と式(3)はそれぞれ風波のエネルギーに関する 経験則であるが、波齢との関係については波の状態に関するものであるのに対して、フェッチとの関係

については風波の励起に関する関係である ことに注意すると、このような差異は風か ら風波へのエネルギー輸送の組み込み方が 影響していると考えられる.これには輸送 係数とともに風波が風向となす角度にも関 係していると予想される.

うねりがエネルギー輸送の関係に影響す る可能性として、うねりによる大気海洋境



図1:(左)風浪エネルギーと波齢との関係式(赤線)からの乖離(縦軸)に対するうねりの波形勾配(横軸)との関係。(右)は同様に風浪 エネルギーとフェッチの関係式からの乖離を示す。

界層への上向きの運動量輸送が考えられる (Donelan, 1990, The Sea—Ideas and Observations on Progress in the Study of the Seas, Vol. 9, John Wiley and Sons, 239–292, 他). そこで, うねりの強度と角度を考慮した指標 (swell-windsea strength index: *swsi*)を導入し, この指数に対するエネルギーや風波の方向を調査する.

$$swsi = \left(\frac{h_s}{h_w}\frac{f_s}{f_{w*}}\right)^2 \cos\theta_s,\tag{4}$$

ここで、 $h \ge f$ はそれぞれ波高と周波数を表し、添え字はうねり(s)と風波(w)を示す.  $\theta_s$ はうねりと海上風の角度を表す.

図2は*swsi*に対する無次元波浪エネルギーと海上風と風波のなす角度の依存性を示 す.強不安定の状態(Ri<-0.01)では*swsi*に 対するこれらの依存性はほとんどないため描 画から除いている.図中には線形回帰直線も 示したが,風波エネルギーとの関係における 回帰直線は統計的に有意ではなかった.一方, 海上風と風波のなす角度に関しては有意な相 関(0.5)を得た.この関係からは,うねりと 海上風の方向に大きな差がある場合には,風 波の方向は海上風に対してうねりの進行方向



図2: swsiに対する(左)無次元風浪エネルギーと(右)風と風波 のなす角度の依存性。点の色はリチャードソン数(Ri)を示し、強不 安定(Ri<-0.01)を除いて示している。点線は線形回帰直線を示す。

に向かって屈折する傾向がみられる.これがうねりによる抵抗係数への影響に起因するのであれば,う ねりによる非等方的な影響によって風応力の方向が変化する一方で,風波のエネルギーに対応する応力 の大きさに与える影響は相対的に弱い可能性が高い.*swsi*を構成する各要素の相対的な重要性を検討す るために(4)式から波高比,周波数比,うねりと海上風の角度をそれぞれ単独で除いた指数で同様の評 価をしたところ,どの要素を除いても図2のような相関関係は悪化したため,海上風の方向に対する風 波の方向の屈折に対してはこれらの各要素がそれぞれ影響していることも分かった(図は非表示).

これらの結果から、風応力のうねりの方向に沿った成分だけがうねりの影響を受けるという仮定に基づいて、(5)式のような swell-induced friction velocity(修正摩擦速度)を考える(図3上).

$$\overrightarrow{u_{s*}} = \mathcal{R}(\theta_s) \begin{pmatrix} \overline{u_{b*}} \cos\theta_s - A_p \cdot swsi \cdot c_{ps} \\ \overline{u_{b*}} \sin\theta_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \overline{u_{b*}} - A_p \cdot swsi \cdot \cos\theta_s \cdot c_{ps} \\ A_p \cdot swsi \cdot \sin\theta_s \cdot c_{ps} \end{pmatrix}$$
(5)

 $\Re(\theta_s)$ は回転変換を示し、 $A_p$ は経験的に得られる係数である. $u_{b*}$ は風速に基づいたバルク式によって得られる摩擦速度である.これが風波の方向と一致すると仮定すると、修正摩擦速度はベクトルとして考えられる.修正摩擦速度の海上風に直交する成分とを比較した(図3下).修正摩擦速度は方向だけを考慮して得られたものであるが、それぞれの大きさについてもほぼ一致することから、うねりの方向に沿った応力成分だけがうねりの影響を受けるという非等方的な作用が働いているという予想は妥当なものであると考えている.

これらの結果は, GNSS 反射信号強度が単なる波高の高次モード(Mean Square Slope)だけではなく,非等方な要素からの影響を受ける可能性を示している.

## 研究成果報告

口頭発表:4件(別紙論文リスト参照)

#### <u>研究の体制</u>

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



図3:(上)修正摩擦速度の概念図と(下) その海上風直交成分(縦軸)と風波摩擦 速度の海上風直交成分の対応

# 海洋モデルを用いた富山湾における風および淡水流入量の 流れ場への影響のシミュレーション

公益財団法人 環日本海環境協力センター 小塚 晃

#### 1. 目的

富山湾は定置網漁業が盛んで、その漁具性能は流れの向きによって大きく影響されるため、漁業者は 流れの向きに合わせて定置網を設計し、漁業を営んでいる。富山湾奥部の沿岸の流れは夏に反時計回り、 冬に時計回りに季節変動することが経験的に知られており、冬の時計回りの流れに合わせて定置網を設 計している。このような流れ場の逆転メカニズムについて明らかになっていない。

これまでの共同利用研究で、富山湾高解像度モデル(DREAMS\_K)を用いた数値実験等から、冬季に湾 奥で暖水域が毎年発生し、河川水由来の低密度水が湾奥上層部に形成されることが分かった。この低密 度水の輸送にも富山湾内の流れ場が影響するが、流れ場に影響を及ぼす要因が不明であるので、 DREAMS\_K上で、河川流量や海上風を変化させて、流れ場自体の応答を調べることを目的とした。

## 2. 方法

本研究では、図 1 の範囲における高解像度海洋同化モデル DREAMS\_K(以下、DR\_K)を作成し、富山湾内を水平解像度 500m、鉛直方向を水深 1~1092m(61層)とし、流向・流速、水 温、塩分を計算した。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 の一級河川における実際の日別河川流量データを同化した(図 1)。 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。

まず、モデルの再現性を確認するため、富山県急潮ブイシステ ムによって取得した新湊のブイ(36.79°N,137.16°E)の水深10m の東西流速データとモデルの流れ場を比較した。モデル実験では 2017年9月1日~12月31日の計算期間に対して、9月中は観測 された5河川の河川流量データを用いて計算後、10月1日以降は 河川流量を実測値、海上風を気象モデル値とした現実に近いシナ リオ1、計算領域上の海上風をなしとしたシナリオ2、河川流量 をなしとしたシナリオ3の3パターンを想定し、計算を行った。



図1. 計算領域と観測点の位置図



図 2. 新湊ブイにおける実測流速と 15 日平均流速

#### 3. 結果および考察

新湊ブイの実測した東西流速の15日平均流速は、10月中旬に

反時計回り(東向き)に5 cm程度で流れているが、10月下旬に時計回り(西向き)に変化し、12月上 旬に最大で3 cm程度の大きさをもっていることが分かった。10月23日に最大の38 cmを記録し、この とき台風21号が日本に接近していた。 DR\_Kのシナリオ1において、新湊ブイと同場所、同期間の 東西流速を調べると、10月上旬に反時計回り(西向き)に流れ、 その後時計回り(東向き)に約2 cmで流れたのち、10月下旬に 反時計回り(西向き)に変化し、その流れは12月にかけて弱 まっていた。実測値と比較すると、東向き流速が2 cm程度小さ かったが、流向の反転する時期は概ね一致していた。モデルに おいても、台風21号接近に伴う強い流れが確認できた。

シナリオ1において、新湊ブイを含む南北断面の15日平均 流速を調べたところ、水深 50m 付近に流速が最大となる時計 回りの流れが確認されたため、ブイのやや沖の新湊沖(36.79° N, 137.16°E)、水深 50m に絞ってシナリオごとの流れを比 較した(図4)。

基本となるシナリオ1(黒線)は、常に時計回りに流れ、流 速ブイのような流向の反転を示さなかったが、時計周りが冬に 強まる傾向は同じであった。

海上風をなしにしたシナリオ2(緑線)では、シナリオ1に 比べ11月中旬以降、時計回りの流れ場が弱くなったため、海 上風は時計回りの循環を強化する方向に作用していると考え られる。また、河川流量をなしにしたシナリオ3(黄線)にお いても11月中旬以降時計回りの流れ場が弱まったため、河川 流入も時計回りの循環を強化する方向に作用していると考え られる。これは、海面冷却期に内湾で発達するエスチュアリー 循環流が時計回りの流れを強めていることを示していると考 えられる。



#### 4. 研究成果報告

小塚晃・広瀬直毅、「イカ類の漁獲量変動が示唆する日本海、東シナ海と富山湾の関係性」 日本海洋 学会,講演要旨集, pp167, 2022.9.6(名古屋)

#### 5. 研究組織

研究代表者	公益財団法人	環日本海環地	竟協力セン	/ター	小塚	晃	主任研究員
所内世話人	九州大学応用ナ	力学研究所	広瀬	直毅	教授		
研究協力者	九州大学応用ナ	力学研究所	千手	智晴	准教授		



DR K の実測流速と 15 日平均流速



図 4. 新湊沖 50m 深におけるシナリオ
ごとの 15 日平均流速 黒:シナリオ1、
緑:シナリオ2、黄:シナリオ3

# クリル海峡における順圧潮汐から地形に捕捉された内部潮汐へのエネルギー変換率の 見積もり

福井県立大学 海洋生物資源学部 田中祐希

#### 1. はじめに

海洋中の鉛直乱流混合は、沿岸域から外洋域まで広い海域における熱や物質の輸送をコントロールする重要な物理過程の一つである。この乱流混合の主要なエネルギー供給源が、潮汐流と海底地形との相互作用によって励起される内部潮汐波である。北極海などごく一部の高緯度域を除く半日周潮汐と、およそ緯度 30°より低緯度における日周潮汐は慣性周波数以上の周波数を持ち (superinertial)、自由伝播可能で、傾圧的な鉛直構造を持つ内部潮汐波を発生させる。一方、緯度 30°より高緯度における日周潮汐は慣性周波数以下の周波数を持ち (subinertial)、海底地形に捕捉されて伝播する内部潮汐波を発生させる。Subinertial な内部潮汐波は内部ケルビン波と地形性ロスビー波の混合した性質を示し、その空間構造は一般に浅い海域では順圧的で、水深が大きくなるにつれて傾圧性を増すという特徴を持つ。

外部潮汐(海面変位に表れるモード)から内部潮汐(海面変位に表れないモード)へのエネルギー変換率(す なわち内部潮汐波の励起率)は、これまで、全球のほとんどの海域で卓越する superinertial な潮汐を主な対象 に、順圧モード(鉛直一様なモード)から傾圧モード(鉛直平均がゼロのモード)へのエネルギー変換率と同一視 して見積もられてきた。しかしながら、この方法は、外部モードだけでなく内部モードも順圧的になり得る subinertial な潮汐については有効ではなく、内部潮汐へのエネルギー変換率を過小評価してしまうことが容易 に推察される。実際、強い日周潮汐が存在するクリル海峡(北太平洋とオホーツク海を結ぶ海峡)では、この方 法で見積もられる内部潮汐へのエネルギー変換率はエネルギー散逸率よりもはるかに小さくなってしまう (Tanaka et al. 2010)。そこで本研究では、subinertial な内部潮汐へのエネルギー変換率を、順圧的な構造を持 つ内部モードへのエネルギー変換率も含めて定式化する。さらに、得られた定式化をクリル海峡へと適用するこ とで、その有効性を確認する。

## 2. 定式化

海洋における順圧的(地形性ロスビー波的)な構造を持つ内部モードへのエネルギー変換率を定式化する。 簡単のため、まず密度一定の場合を考える。海底地形を含むf面上の線形順圧系において、流量をヘルムホル ツ分解して  $H\mathbf{u} = \mathbf{k} \times \nabla \psi + \nabla \phi$  (H: 水深,  $\mathbf{u}$ : 水平流速)と表したときに、発散成分  $\phi$ ,および回転成分  $\psi$  のうち 渦度  $\zeta = 0$ を満たす成分  $\psi_s$ を外部モード、残りを地形モード $\psi_T$ と定義する。このようにして分離された外部モ ード ( $\phi$ , $\psi_s$ ) と内部モード $\psi_T$  はどちらも妥当な空間分布を示すことは、海底地形や成層を様々に変化させた数 値実験で検証されている。内部モード $\psi_T$ に対する渦度方程式は

 $\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{1}{H} \nabla^2 \psi_{\mathrm{T}} + \nabla \frac{1}{H} \cdot \nabla \psi_{\mathrm{T}} \right) + f \left[ \frac{1}{H} \nabla^2 \phi + \nabla \frac{1}{H} \cdot \nabla \phi - J \left( \frac{1}{H}, \psi_{\mathrm{T}} + \psi_{\mathrm{S}} \right) \right] = 0, \tag{1}$ 

となる。式(1)は相対渦度の時間変化と地形性ベータ効果とのバランスを表しており、順圧的な内部モードとして 短波の地形性ロスビー波を仮定したことに相当する。式(1)からエネルギー方程式を作ると、順圧的な内部モー ドへのエネルギー変換率として

 $C_{S \to T} = \rho_0 \psi_T \left[ \frac{f}{H} \nabla^2 \phi + \nabla_H \frac{f}{H} \cdot \nabla \phi - J \left( \frac{1}{H}, \psi_S \right) \right] = -\rho_0 \psi_T \frac{f}{H} [w_S(0) - w_S(-H)], \quad (2)$ ( $\rho_0$ は基準密度)が得られる。式(2)は、外部モードと海底地形との相互作用で生じる鉛直流  $w_S$  による渦柱の伸縮に伴って、外部モードから内部モードへのエネルギー変換が生じることを表しているものと理解できる。

次に、密度変化があり、傾圧的(内部ケルビン波的)な構造を持つ内部モードも存在する場合のエネルギー変 換率を定式化した。詳細な導出過程は省略し、結果を図1 にまとめる。密度一定の場合と同様、従来の順圧モ ード(青点線)を外部モードと地形モードに分離し、地形モードと従来の傾圧モードを合わせて内部モード(赤点 線)と定義する。外部モードから傾圧的な内部モードへのエネルギー変換率は従来と同様の式

$$C_{\mathrm{S}\to\mathrm{bc}} = \int_{-H}^{0} \rho' g w_{\mathrm{S}} \,\mathrm{d}z,\qquad(3)$$

 $(\rho' は密度偏差)によって表されるが、鉛直流に全順圧モードではなく外部モードのみによる<math>w_s$ を用いる点が異なる。外部モードから内部モードへの全エネルギー変換率は、従来の定式化では $C_{s \to bc} - C_{bc \to T}$ として見積もられていたのに対し、本研究の定式化では $C_{s \to T} + C_{s \to bc}$ で与えられる。

## 3. クリル海峡への適用

北太平洋とオホーツク海とを結ぶクリル海峡は、世界で最も強い日周潮起源の鉛直乱流混合が存在する海域 として知られている。クリル海峡における鉛直乱流混合は、北太平洋中層水の形成や北太平洋中・深層の子午 面循環、さらには北太平洋を中心とした広い領域における十年規模の気候変動に重要な役割を果たすことが 指摘されている。Tanaka et al. (2010)は、高解像度の3次元数値シミュレーションによって、クリル海峡における 日周 K<sub>1</sub>潮汐のエネルギー散逸率を23 GWと見積もった。しかしながら、これまで subinertial な内部潮汐へのエ ネルギー変換率を表す有効な定式化が存在しなかったため、この散逸のうちどの程度が内部潮汐を経由して生 じているのかは明らかにされていなかった。

本研究の定式化を Tanaka et al. (2010)の数値シミュレーション結果に適用した結果を図 2 に示す。外部モードから傾圧モードおよび地形モードへのエネルギー変換率 [それぞれ式(3), (2)] はともに約 11 GW と、同程度の寄与を果たしている。両者の空間分布は、どちらも顕著な海底地形上で大きいという点では共通しているものの、前者はブッソル海峡内の海山周辺[(x, y) = (330–380 km, 230–260 km)]で特に大きいのに対し、後者は東部の海堆上[(x, y) = (550–740 km, 130–240 km)]で特に大きいという違いがあることも明瞭に認められる。両者の合計は約 22 GW に達し、クリル海峡におけるエネルギー散逸率 23 GW に非常に近くなる。このことは、クリル海峡におけるエネルギー散逸率であ。

本研究の結果は、クリル海峡のように subinertial な潮汐が卓越する海域では、内部潮汐波へのエネルギー変換率が半分程度に過小評価されてしまっている危険性を強く示唆するものであり、今後、本研究の定式化を用いた全球分布の再評価が必要と考えられる。



図1:本研究で得られたエネルギーダイアグラム。

図 2: クリル海峡における外部モードから(a)傾圧モード、 (b)地形モードへのエネルギー変換率。

## 2022CR-AO-7

# 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 サステナブルシステム研究本部 板橋 秀一

1. 目的

中国における窒素酸化物 (NO<sub>x</sub>) 排出量は 2011 年から減少傾向に転じている (Zheng et al., 2018). 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 数年を要する問題点がある.この問題に対し,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,激変する東アジア域の排出量推移 を継続的に把握するため,逆推計手法を構築して NO<sub>x</sub>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5年目となる今年度は,新型コロナウイルス感染症が広まった 2020 年1月以降,感染症対策のために経済活動状況などが目紛しく変化している近況までを捉えるため, 長期衛星計測データをもとに 2022年までデータ解析を延伸した.ここではその内容を速報的に報告 する.

## 2. 手法

Aura 衛星に搭載された OMI センサーによる対流圏 NO<sub>2</sub>カラム量(大気柱総量)を用いた. 解析に は Level 3 の 0.25°×0.25°の日別の格子点データを利用し,日別値から月平均値,年平均値を算出し た. 解析対象は 2005 年から 2022 年までとした.

## 結果と考察

日中韓 3 カ国について,2005 年から 2022 年までの国毎に平均した NO<sub>2</sub>カラム量の経年変化を示す (図 1). 中国については,2011 年をピークに NO<sub>2</sub>カラム量は減少傾向であり,ボトムアップ推計



図1. (a) 中国, (b) 韓国. (c) 日本における 2005 年から 2022 年までの NO<sub>2</sub> カラム量の経年変化. 実線は 年平均値を,月平均最大および最小値の範囲を示す.

による NO<sub>x</sub> 排出量推計結果(Zheng et al., 2021)とも整合していた. 韓国はほぼ横ばいであったが, 2016 年以降, 緩やかな減少傾向を見せた. また, 日本は単調な減少傾向を示した.

特筆すべきは,新型コロナウイルス感染拡大初期の2020年と比較して,2021年・2022年と日中韓 3 カ国で減少傾向が続いていた点である.この点を明瞭にするため,2005年平均値で規格化した NO<sub>2</sub> カラム量を解析した(図2).中国,韓国,日本のいずれについても,2022年平均の NO<sub>2</sub>カラム量 は解析対象の過去18年間で最小となることが明らかとなった.中国については,2022年平均値は 2005年平均値を初めて下回ることとなり,NO<sub>x</sub>排出総量としての変化量を推計する必要がある.韓 国と日本も2022年平均値は過去最小であり,経済活動状況等とも照合させ,NO<sub>x</sub>排出量としての実 態の解明を進める必要がある.新型コロナウイルスの感染拡大以降,社会状況が急変しているが, 準リアルタイムの衛星計測データの長期解析から近況までの情報を得ることができた.



図2.2005年平均値で規格化した NO2 カラム量の経年変化.

## 4. まとめ

衛星計測データ解析に基づき複雑化している排出量変化の近況を東アジアスケールで推計した.こ のような情報をもとに、逆推計手法による排出量データベースの構築や、それを入力データとした シミュレーションを実施し、東アジアスケールの大気環境変化を継続して注視していく.

## ・参考文献

Zheng, B. et al.: Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of clean air actions, Atmos. Chem. Phys., 18, 14095–14111 (2018).

Zheng, B. et al.: Changes in China's anthropogenic emissions and air quality during the COVID-19 pandemic in 2020, Earth Syst. Sci. Data, 13, 2895–2907 (2021).

若狭湾におけるズワイガニ資源の季節・経年変動の特徴

福井県立大学 渡慶次 力

## 1. 目的

本研究の代表者は「福井県ズワイガニ資源の有効活用に向けた意思決定ツール」の開発に着手した。 この研究は、漁業者が資源を取り控える事によって、将来の漁獲金額にどの程度繋がるかを判断できる アプリ構築を目指している。そのためには、資源量推定を行う必要があり、その基礎情報となる資源の 分布や変動特性を整理しておく必要がある。福井県水産試験場(以下「福井水試」と呼ぶ)は、ズワイガ ニを漁獲する底曳網船の数日単位の漁獲情報を記録した操業日誌を、18年間の長期間にわたりデータを 蓄積している。

本研究では、福井水試が取りまとめてきた操業日誌を分析して、若狭湾におけるズワイガニ資源の季節・経年変動の特徴を整理した。

#### 2. データと方法

使用したデータは、底曳網船の操業日誌のうち、2002~2019年までの18年間におけるズワイガニを 漁獲した年月日、位置、銘柄別(大ガニ、中ガニ、山ガニ、黒仔)の漁獲尾数と操業回数を使用した。 雄の銘柄は、大ガニが重量1kg以上、中ガニが1kg未満で、両者とも最終脱皮後のハサミが大きく甲羅 の硬い個体である。山ガニは最終脱皮が終わっておらず、ハサミが小さく甲羅の硬い個体を示している。 雌は、最終脱皮後の黒紫色の卵を持つ黒仔として記録されている。漁期は、雄が11月6日から翌年3 月20日まで、雌が11月6日から12月31日までである。本研究では、銘柄別の漁獲尾数を操業回数 で除した CPUE (Catch per unit effort)を資源量の指標として用いた。それを月単位・年単位で平均 値を求め、経時的な変動に着目した。加えて、漁獲位置を緯度・経度ともに0.1°毎に集計し、CPUE の時空間変動に着目した。

#### 3. 結果

#### 3.1 季節変化

月平均 CPUE (図 1) は、大ガニが 11 月に 9、2~3 月に 8~9、中ガニが 11 月に 5、2~3 月に 4~5 と、両銘柄ともダブルピークがみられた。一方、山ガニは 11 月の 10 から 3 月の 5 へと減少傾向を示し た。黒仔は、雄に比べて 1 オーダー高い値を示し、11 月の 159 から 12 月の 33 へと急減した。

次に月平均 CPUE の空間分布に注目 すると、大ガニは 11-12 月に南西域 の天然礁付近(浦島礁)で 14 と最も高 く、2-3 月には南西域に加えて、北東 域の天然礁付近(玄達瀬・松出シ瀬) や南部中央域でも 9~11 と高かった。 中ガニは、大ガニと比べて、全ての 月で空間分布と類似しているが、全



図1 ズワイガニ漁期中の月平均 CPUE の季節変化(図中のポイントは平均値、バーは標準偏差値)

域で低かった。山ガニは、11-12月に中央域を中心に最高値が22と高く、翌月以降は類似した空間分布のまま低下傾向を示した。黒仔は、11月に南部中央域で383と最も高くなるが、12月以降に143と急減した。

#### 3.2 経年変動

年平均 CPUE(図2)は、大ガニが 2002 年の4から 2019 年の10 へと上昇傾向で、中ガニが2~6の 範囲で特に傾向が見られず、山ガニが4~14の間で変動が大きかった。一方、黒仔は、雄に比べて、値 が10 倍程度高く、53~145 と経年変動が大きかった。次に銘柄毎に年平均 CPUE の多い年と少ない年 の漁場の値を比較した。大ガニの漁場は、両期とも天然礁付近を中心にほぼ同位置に分布しており、そ の差は10 程度であった。中ガニも大ガニと同様の傾向があった。山ガニの漁場は、両期とも天然礁の 間を中心にほぼ同位置に分布しており、両期の差は約30 であった。黒仔の漁場は、両期とも南部中央 域と東部中央域の同位置に分布しており、両期の差は、11 月はほぼ0 であったが、12 月に約300 と大

きくなった。すなわ ち、雌雄の漁場は、 経年的に位置が変 わらず、その資源密 度が異なることが 分かった。



#### 4. 今後の展開

本研究では、若狭湾におけるズワイガニ資源の季節・経年変動の特徴を整理した。今後は、大ガニと 中ガニで見られた CPUE 季節変化のダブルピークなど、各銘柄でみられた特徴的な季節変化や経年変 動の要因を特定したい。また、資源量推定をベースに取り控える事による漁獲金額の増加が判断できる アプリ構築を目指す。

5. 論文等 なし

#### 6. 研究組織

代表者	福井県立大学	准教授	渡慶次 力
世話人	九州大学応用力学研究所	准教授	千手 智晴
協力者	京都府農林水産技術センター海洋センター	副主查	野口 俊輔
協力者	京都府農林水産技術センター海洋センター	技師	木下 直樹
協力者	福井県水産試験場	部長	河野 展久
協力者	福井県水産試験場	研究員	岩﨑 俊祐
協力者	福井県水産試験場	主事	前川 龍之介
協力者	福井県立大学	教授	兼田 淳史
協力者	九州大学応用力学研究所	教授	広瀬 直毅

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位相が180度異なるが、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。黒潮の季節変動は、黒潮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にカスケードダウンし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を統合的に調べる必要がある(中村 2017)。黒潮エネルギーの散逸過程については、近年海峡域における地形間相互作用に起因した内部波の砕波(Nagai et al. 2021)に加え、陸棚斜面域における対象/慣性不安定から生じる内部慣性重力波の砕波(Nakamura et al. 2021)が考えられるが、その全容を明らかにするためには、流れと乱流の現場観測に加え、数値実験によるプロセスの解明と検証が必要である。前年度までの研究から、トカラ海峡において平瀬と呼ばれる海山(鉛直スケール 500 m、水平スケール 10 km)上を黒潮が流れることでその背後に渦と内部重力波が生じ、黒潮エネルギーの散逸に寄与する可能性が示唆された。このような背景を踏まえ今年度の研究では、渦と内部波生成に代表される流れと海底地形間の相互作用を経由した黒潮の運動エネルギーの散逸過程を明らかにすることを目的とする。

**研究内容** 鹿児島大学水産学部練習船「かごしま丸」KG1915 航海(2019 年 11 月 16-25 日)において、 トカラ海峡の平瀬で生じる流れと地形の相互作用に関するデータを得るため、3 台の超音波ドップラー 流速計(ADCP, Teledyne RDI 社)と19 台の水温塩分計(MicroCAT, SeaBird Scientic 社)を用いた係留系 による時系列観測を実施した。係留系は平瀬下流側の水深約 350 m の地点に設置し、深度約 180 m の位 置に立ち上げたボールブイの上下に ADCP を取り付けることで深度約 50 m から 300 m までの流れを計 測した。また、海底からボールブイまでのチェーンに水温塩分計を 6 m 間隔で組み込み、6 秒間隔でサ ンプリングすることで乱れを含む水温塩分変動を計測した。このデータを基に乱流長さスケール Ellison scale を計算し、Ivey et al. (2018)の方法によって鉛直渦拡散係数  $K_{\rho}$ を推定した。観測結果の解釈のため に、MITgcm(Marshall et al. 1997)を用いた理想化した黒潮を開境界から入力し黒潮と平瀬地形間の 相互作用を再現した。潮汐の効果を考慮するため、開境界から半日周期潮汐および日周期潮汐を入力す る実験も実施した。計算領域は 240 km×180 km×600 m とし、平瀬背後の擾乱を解像するよう格子幅を 水平 200 m 鉛直 5 m とした。粘性・拡散については、背景の鉛直粘性・拡散係数を 1×10<sup>-5</sup> m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup> とし、 内部波の砕波による密度逆転からThorpe scale 法に従って鉛直粘性・拡散係数は 1 m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>で一定とした。

**結果** 図1にKG1915航海で得られた観測結果を示す。海域で卓越する半日周期の潮汐は、黒潮の流れに対して干潮時に加速し、満潮時に減速する関係にあった。黒潮の流れは表層 200m をジェット状に南東へ流れる一方で、その下部では半日周期の潮汐変動が支配的であり、平均的には黒潮に対して反流となっていた。この表層の黒潮ジェット下部における半日周期変動は水温にも見られた。鉛直拡散係数の推定値からは、10<sup>2</sup>~10<sup>-1</sup> m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup> の著しい乱流拡散が得られたが、概ね2タイプに分類ができ、それぞれの発生には潮汐との対応が認められた。一方は満潮から下げ潮にかけて 250m 以深の比較的深い層で生じる対流不安定乱流であった。理想化数値実験はこのような海域の流れと鉛直拡散の変動を良く再現しており、この実験結果の解析から、平瀬下流で観測された流れと拡散に支配的な半日周期変動については、地形背後の渦流が主な要因であることが分かった(図2)。すなわち、平瀬を乗り越えられない黒潮は、平瀬側方を回り込む流れとなるが、潮汐の効果によって振動境界層を形成し平瀬背後に渦を放出する。このような渦は背景の流れ場により下流に移流されるとともに水平的に傾けられ、鉛直シア層と鉛直不安定層を形成することが明らかとなった。これらのシア層と不安定層が、観測されたシア不安定乱流や対流不安定乱流の発生に寄与していると考えられた。

研究組織 中村 啓彦 (鹿大水産,研究代表者), 遠藤 貴洋 (九大応力研,所内世話人), 堤 英輔 (東大大海研/鹿大水産,研究協力者), 小針 統 (鹿大水産,研究協力者), 仁科 文子 (鹿大水産 研究協力者), 井 上 龍一郎 (海洋研究開発機構,研究協力者), 長井 健容 (東京海洋大,研究協力者)



図1 2019年11月17 日から 21 日にかけて トカラ海峡の平瀬上 で実施した係留観測 結果。(a) 係留点近傍 の中之島験潮所にお ける観測潮位η。(b) 超音波流速計で得ら えた流速の鉛直平均 値。(c) 水温塩分計で 得られたポテンシャ ル水温 θ。(d) 主軸方 向の流れ成分 u。(e) 短軸方向の流れ成分  $v_{\circ}$  (f) Ellison スケール 法によって推定した 鉛直渦拡散係数  $K_{\rho}$  (=  $0.09 L_E^2$  Sh,  $L_E$  : Ellison スケール, Sh:流れの 鉛直シアの絶対値)。



図 2 黒潮と潮汐、海山間の相互作用の理想化実験の結果。(a) 計算開始後 10 日時点におけるコリオリ 周波数で無次元化した相対渦度の鉛直成分 $\zeta/f$ の 3 次元分布。(b) t = 16.375 日における無次元渦度 $\zeta/f$ の 200m 深水平断面図(左図)、主軸方向流速の鉛直シア  $\partial u/\partial z$ (右上図)と無次元渦度 $\zeta/f$ の y = 0 km に おける鉛直断面図。(c) (b) と同様。ただし t = 16.625 日のもの。

## Clarifying mechanisms for the tropical basin interaction using climate model simulations

Ingo Richter, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)

## 1. Aims of the current research project

The impact of the tropical Atlantic and Indian Ocean on El Niño-Southern Oscillation (ENSO) in the tropical Pacific has been highlighted in recent years but much remains to be learned about the importance of these influences and their pathways. Using a novel experiment design based on global climate model (GCM) experiments, the current project reexamines the influence of the tropical Atlantic on ENSO.

1) A previous study by Richter et al. (2021) mostly relied on global climate model (GCM) experiments, in which SSTs were prescribed (so-called atmosphere-only experiments). While such experiments are useful, they cannot represent the coupled ocean-atmosphere interactions, thought to be important in amplifying ENSO events. For the current research project, we therefore use a fully coupled ocean-atmosphere GCM, to conduct additional experiments for investigating the influence of the tropical Atlantic on ENSO.

2) In addition to investigating the Atlantic influence on ENSO, we also aim at developing a general framework for investigating interaction among the tropical basins using a relatively simple datadriven modeling technique.

## 2. Methods

1) To quantify the tropical Atlantic influence on ENSO we developed, together with Yu Kosaka (University of Tokyo), a novel GCM approach that combined so-called perfect model hindcasts and pacemaker experiments. In these experiments, 12-month predictions are initialized from a free-running 1000-year control simulation with the GFDL CM 2.1 model. We selected events for which a warming in the northern tropical Atlantic in spring was followed by an El Niño event in winter. For these years, we ran hindcast experiments initialized from January 1 and integrated until the end of the year. In the control hindcast experiment, we ran a regular hindcast by letting the model evolve freely. In our SST intervention (pacemaker) experiments, on the other hand, we restored the SSTs in the tropical Atlantic. These experiments were used to quantify the importance of the northern tropical Atlantic in triggering ENSO events. Analogous experiments were performed for warm events in the equatorial Atlantic. In addition to restoring tropical Atlantic SSTs, we also performed a set of experiments in which we restored the Pacific SSTs to climatology. This was to test, whether the warm events in the tropical Atlantic were themselves a result of previous forcing from the tropical Pacific.

2) To develop a general framework for investigating interaction among the tropical basins, we collaborated with Shoichiro Kido (JAMSTEC), Tomoki Tozuka (University of Tokyo) and Ping Chang (Texas A&M University) to modify the well-known linear inverse model (LIM) approach. LIMs use statistical analysis to derive a linear operator from observations, such as SSTs, in order to approximate and predict observed variability. Kido et al. (2022) modified this technique to allow separating the interaction among basin pairs (e.g., Atlantic and Pacific). The linearity of the operator then allows to eliminate the interaction among certain basins and to test how this affects the variability.

## 3. Results

1) Perfect model hindcast experiments with and without restoring tropical Atlantic SST to climatology indicate that both the northern tropical and equatorial Atlantic have a very small influence on ENSO development (Figs. 1a and 1c). During decaying ENSO events, on the other hand, northern tropical Atlantic SST anomalies strongly accelerate the decay (Figs. 1b and 1d). Key to the Atlantic influence on ENSO decay are Atlantic SST anomalies just north of the equator



Figure 1. Results from perfect model hindcast experiments with selective SST restoring. In the CTRL simulation, the model evolves freely over the 12-month forecast. In noTATL, the SSTs in the tropical Atlantic are restored to climatology, while in noTPAC, SSTs in the tropical Pacific are restored to climatology. The left (right) column shows the average over years with a developing (decaying) El Niño. The individual lines show anomalies of SST in the Niño 3.4 region (green line; 170-120°W, 5°S-5°N), SST in the ATL3 region (blue line; 20°W-0, 3°S-3°N), SST in the NTA region (40-10°W, 8-20°N), 10m wind in the Niño 4 region (brown line; 160°E-150°W, 5°S-5°N), and 10m wind in the ATL4 region (red line; 45-20°W, 3°S-3°N). Filled circles indicate differences from CTRL that are significant at the 95%-level.

2022). We are planning to further develop this technique in order to utilize output from existing multi-model data bases (such as CMIP6) for the study of interbasin interaction.

(~  $5^{\circ}N$ ). These lead to local convection anomalies that change the Walker circulation so as to accelerate ENSO decay. Importantly, anomalous events in either the northern tropical or equatorial Atlantic fail to develop the in hindcast ensemble mean (Figs. 1e and 1f), when tropical Pacific SSTs are restored to climatology. This indicates that anomalous tropical Atlantic events in boreal spring and summer are dependent strongly on preceding ENSO events in boreal winter. Thus, the role of the tropical Atlantic is to mediate a negative feedback of ENSO on itself (Richter et al. 2022).

2) An interbasin LIM was observed constructed from SSTs and sea-surface heights. Experiments with modifications of the linear operator successfully reproduced many results that previous studies obtained from GCM experiments, indicating that the technique may provide an alternative to GCMs at low computational costs (Kido et al.

## Achievements

Articles in peer reviewed journals

1. <u>Richter, I.</u>, Y. Kosaka, S. Kido, and <u>H. Tokinaga</u> (2022): The tropical Atlantic as a negative feedback on ENSO, Climate Dynamics, <u>https://doi.org/10.1007/s00382-022-06582-w</u>.

2. Kido, S., <u>Richter, I.</u>, Tozuka, T., and P. Chang (2022): Understanding the interplay between ENSO and related tropical SST variability using linear inverse models. Climate Dynamics, <u>https://doi.org/10.1007/s00382-022-06484-x</u>

## **Conference Presentations**

1. <u>Hiroki Tokinaga</u>, Shoshiro Minobe, Youichi Tanimoto, Malcolm Roberts (2022): Evaluation of the Pacific Decadal Oscillation in the HighResMIP-PRIMAVERA model simulations. JpGU Meeting 2022.

2. Shiozaki Masahiro, <u>Hiroki Tokinaga</u>, Masato Mori (2022): The influence of the tropical Indian Ocean warming on the Western Pacific teleconnection pattern. JpGU Meeting 2022.

3. <u>Ingo Richter</u>, Yu Kosaka, <u>Hiroki Tokinaga</u>, Shoichiro Kido (2022): Reexamining the tropical Atlantic influence on ENSO in perfect model prediction experiments. JpGU Meeting 2022.

#### 津波による海底堆積物の再懸濁が海洋環境に与える影響

神戸大学 内海域環境教育研究センター 林 美鶴

1. 目的

海底堆積物には多様な生物や物質が含まれ、2011 年に発生した東北地方太平洋沖地震では堆積 物のまきあげにより様々な海洋環境変化をもたらした。南海トラフ地震による津波により、大阪湾 でも堆積物が激しく巻き上げられ、それらは潮流により沿岸や沖ノ瀬、湾奥の一部に再堆積する事 が予測されている。瀬戸内海では1970年代の富栄養化に対し陸域からの物質負荷を削減することで 水質が改善したが、現在は大阪湾を除いて貧栄養ぎみで、ノリの色落ちや漁獲量の減少が続いてい る。他の海域に比べ大阪湾は、海底からの栄養塩溶出フラックスが大きく、これが基礎生産を支え ている。津波は底泥の被覆による溶出抑制と同様の効果をもたらす可能性があるが、津波による再 堆積が溶出現象に与える効果について研究された事例はない。

本研究の目的は、津波が溶出現象に与える影響を明らかにすることであり、大阪湾で採取した堆 積物を用いて津波後の再堆積を模した溶出実験を行い、アンモニア態窒素(NH4-N)とリン酸態リ ン(PO4-P)の溶出速度を定量化した。また、津波前後の溶出の変化が基礎生産に影響する可能性 について考察した。

2. 方法

大阪港の岸和田航路で採取された浚渫土を実験試料とした。底質は粘土質シルトで硫化水素臭が あり、大阪湾奥の底質を代表している。図1に示す「コントロール」と「再堆積」の2種類のコア を各3本作成した。コントロール・コアは、採取した堆積物を高さ30cmまで入れて、現状の海底を 表現している。再堆積コアには採取した堆積物を28cm入れ、採取した堆積物の一部を曝気、静置し て再堆積物させ、これを2cm被せることで津波後の再堆積を表現した。コアを水槽にいれて水を張 り、夏季の平均的な泥温23℃に保った。いずれのコアの上部も人工海水で満たし、シリコン製の蓋 で密封した。蓋には溶存酸素センサー、プロペラ、及び2本の採水チューブを取り付けた。プロペ ラで直上水をかき混ぜ均一にした。直上水中の酸素飽和度から、DO飽和度が0%に達して還元状態 になった後、初日、2日目、5日目の3回、直上水を採水した。片側の採水チューブから人工海水

(50ml)を注射器で注入し、もう一方のチューブから押し出さ れた直上水を注射器に採水し、濾過した。溶出実験後に直上水 を抜き取り、コア内の堆積物を表面から 1cm ずつ3 層を切り取 って、遠心分離機にかけて間隙水を分離、濾過した。

採取した直上水及び間隙水を、NH4-N と PO4-P のパックテス トの試薬で反応させ、分光光度計で吸光度を計測した。人工海 水を用いて作成した標準溶液で検量線を作成し定量化した。 NH4-N と PO4-P の溶出フラックスは、コアインキュベート法と 数学モデル法によって推定した。



図1 コントロール・コア(左)と 再堆積コア(右)

3. 結果

全てのコアで直上水中 NH4-N・PO4-P 濃度が上昇した。コアインキュベート法により推定した溶 出速度を図 2 に示す。NH4-N、PO4-P とも溶出速度は、いずれの評価期間においても、コントロー ル・コアに比べ再堆積コアの方が小さく、全期間で求めた場合、NH4-N は 71%、PO4-P は 62%に低 減した。NH4-N は還元状態で硝酸塩に変化するが、海中に巻き上げられることで還元反応が進まなか った可能性や、堆積物底層からの NH4-N の拡散に時間を要した可能性が考えられる PO4-P は、堆積 物表面が酸化的な場合に酸化膜が形成され、これに PO4-P が吸着された可能性が考えられる。酸素消 費が進むと消滅するため、吸着していた PO4-P が遊離して、後半に PO4-P の溶出速度が大きくなった と考えられる。



図2 NH4-N(左)とPO4-P(右)の溶出速度 Wholeは初日~5日目の3回の分析値により評価し、初日と2日目、及び2日目と5日目の分析 値でも評価した。値は、3本のコアの平均値で、最大値と最小値をエラーバーで示している。 数値はコントロールに対する再堆積の減少率である。

4. 考察

本研究で得られた溶出速度を既往の溶出速度と比較すると、NH4-N は季節変動の範疇に収まっていたが、PO4-P は富栄養化に対する 40 年に渡る陸域からの負荷削減に相当する程度の溶出速度低減だった。大阪湾奥の基礎生産を律速する栄養塩はリンであるため、PO4-P 溶出量の低下は植物プランクトンの増殖を低下させる可能性が示唆された。

- 5. 成果報告
- ・林美鶴、松本太一、井上徹教、津波による堆積物擾乱を模した栄養塩溶出実験、2022 年度地球惑星 合同大会.
- ・林美鶴、松本太一、井上徹教、津波後に再堆積した海底堆積物からの溶出に関する模擬実験、2022 年度日仏海洋学会学術研究発表会.
- 6. 研究組織

林 美鶴	神戸大学	准教授
廣川綜一	神戸大学	技術職員
井上徹教	港湾空港技術研究所	グループ長
磯辺篤彦	九州大学	教授

## 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

観測データの乏しい島嶼域の汽水域から沿岸域までの河川水の拡散過程を検証することが可能な数 値モデルの構築を目指す。琉球列島のような島嶼域では、汽水域が独自の生態系を育む貴重な領域であ る。陸域面積が小さい島嶼域の汽水域の特徴は、平時に海洋の影響を強く受け、そして台風・豪雨時に 突発的に発生する河川流出の影響を受けることである。海洋と河川によって短時間のうちに劇的に塩分 が変化してしまう場なのである。また、石西礁湖を含む珊瑚礁域においても河川水の供給は栄養塩と塩 分濃度の違いと同時に沿岸域の水温に大きな影響をもたらす。近年台風は強くなる傾向があることから、 河川水の拡散範囲は汽水域および沿岸域の環境場にも大きな変化をもたらすことが予想される。汽水域 における環境変化を忠実に再現できるようなモデルを構築する必要であるが、河川海洋接合部では既存 の河川モデルを用いて潮汐を伴う変動や成層構造の再現することが難しく、またパラメータチューニン グを必要とするため、観測データが限られている島嶼域への適応が困難である。本課題では、山岳地域 から海洋に至る間に劇的に変化する流れのレジームを再現し、様々な島嶼域に適応することが可能な河 川海洋一体型モデル(Kida & Yamashiki, 2015)を用いて、豪雨時における島嶼域の河川水流出イベント が再現できるユニバーサルなモデルを構築する。

#### 2. 解析手法

(1) これまで主に九州地方に利用してきた高解像度の河川海洋一体型モデルを孤島における流出過程 の再現に応用するため、高解像度地形データを用いた数値モデルを構築する。

(2) 九州地方に焦点を当てた河川海洋一体型物質循環モデルの検証を引き続き進め、特に陸面の再現 性の向上を改善する。これまで進めてきた観測データと河川モデルの出力結果との比較、そして高解像 度標高データプロダクト毎の河川勾配の特徴を基にモデルの改良を進め、特に、土地利用モデルのパラ メタリゼーションを通じて白川上流の流況を改良する。また一体型モデルによる河口付近の物質循環の 再現にむけ、まずは既存の海洋モデルを用いて河川水流出に対する生態系の応答を高解像度で再現する。

#### 3. 解析結果

(1) 昨年度と同様陸面過程は一律 60%の雨水が土壌へと到達すると仮定し、さらに一定量でより土壌 深くまで吸収される効果と大気へ蒸発する効果が導入してある。計算結果は、ピーク時間が遅れる傾向 を示しており、遅れの要因として考えられる底面摩擦を改善する上で、サブグリッドスケールのモデル にどのような摩擦係数を導入するかは引き続き課題である。孤島における流出過程の再現に応用するた め、まずは ASTER-GDEM の高解像度地形データ(水平解像度 30m)をもとに屋久島、石垣および西表島 の流出モデルを構築した。昨年度構築したモデル(90m)では解像することが難しかった小規模河川を忠 実に再現することが可能になった。ただ地形には数値ノイズがあり、特に浸透水の影響や細かい起伏を 再現できていないので、今後地表面モデルの導入が必要である。

(2) 地表面モジュールを再構築し、白川を対象とした流域解析を行なった。比較のため、すでに最適 計算による計算結果が出ている CDRMV3 モデルを用いた。Isopycnal モデルとの比較を行う。CDRMV3

97

の特徴は、モデルが単純でかつ SCE-UA 法による最適化の効率が非常に良いことにある。対して Isopycnal モデルは個々のセルに対して浅水流計算を行うため計算時間が長く、最適化は困難である。 しかし、特に急斜面での水の流れの物理的特性が高いことが示唆されているため、本計算手法を用いる。 結果はまだまだ改善の余地のある状況となったが、表面の水文プロセスを精緻に表現した Isopycnal モ デルができたことにより、今後さらに改良が進むと考えられる。

#### 4. 考察

昨年度の課題であったより精緻な陸面モデルを導入し、従来の分布型流出モデルとの比較を行なった。 計算結果はまだ改善の余地があるが、まずは基本となるモデルの方程式系の構築が行えたことにより本 モデルの陸域への適用可能性は広げることができた。また高度な陸面モデルと最適化過程が導入された 分布型流出モデルを構築したことで、白川を中心にモデル間の再現性の検証を今後効率的に進めること ができるようになった。上流から下流を含む流量のピーク流量の改善、そして懸濁物質が上流から下流 へと到達する時間スケールの再現性を高めることで、高解像度海洋モデルで再現した河口における物質 循環を河川海洋一体型モデルで再現することを目指す計画である。



# ISOPYCNAL)

## 5. 研究成果

学会発表

泉 智貴・木田 新一郎, 潮汐が河川水に対する海洋生態系の応答メカニズムに与える影響 JPGU 2022 (幕張メッセ) 2022/5/22-5/27

Shinichiro Kida, Development of a regional river-ocean seamless model for the island of Kyushu, JPGU 2022 (幕張メッセ) 2022/5/22-5/27

佐藤 啓明・山敷 庸亮, Application of Isopycnal Layered Model to the Calculation of Hydrological and Oceanic Flows on Islands, JPGU 2022 (幕張メッセ) 2022/5/22-5/27

## 論文発表

泉 智貴 潮流が河川水に対する海洋生態系の応答メカニズムに与える影響 修士論文(九州大学)

Sato Hiroaki Evaluation of the Terrestrial Aquatic Environment Using Remote Sensing and Numerical Simulation 修士論文(京都大学)

## 研究組織

代表者	京都大学	教授	山敷庸亮
協力者	京都大学	修士2年	佐藤啓明
世話人	九州大学	准教授	木田新一郎

# 地上ライダー観測を用いた雲相とダスト量の関係の定量化

長崎大学大学院水産·環境科学総合研究科 河本和明

[要旨]

気候変動に大きな影響を及ぼす雲物理量の1つである雲粒子の熱力学的相(水滴または氷晶のいずれか。以後は雲相と呼ぶ)について、氷晶核としてはたらくダスト量との関係に興味が高まっている。本研究では、まず地上設置型のライダーデータを用いて雲相を判別する手法を検討した。衛星データ解析で使われる雲相判別手法を地上ライダーデータに適用したところ、水滴と氷晶を分離できる場合と分離が困難な場合があることがわかった。分離が困難な場合は、新たな情報を用いる必要がある。

[目的]

気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第6次報告書でも示されている通り、気候の将来予測において 最も不確かな要素の一つが雲の扱いである。これまで行った一般研究によって、能動型衛星データから推 定したエアロゾル種ごとの絶対量(消散係数)と雲相との比較から、同じ温度でもダスト消散係数が高い方 が氷晶の割合が高いことがわかった(Kawamoto et al. 2020)。つまり同じ温度でもダスト量が多い方が凍結 効率が上がる。衛星からは雲頂付近の状況が詳しく測られるが、本研究では逆に、地上設置型のライダー から得られる雲底付近の状況を調査するために、まずは地上ライダーデータを用いた雲相判別の手法を 検討する。

#### [方法]

使用するライダーデータは、国立環境研究所が運営する東アジアの約 20 点での地上ライダーネットワークの 10 年分のデータであり、東京、仙台、富山、長崎、千葉、福岡、辺戸岬(沖縄)、福江、大阪、札幌、松江、新潟、つくばの値を使った。気象データは、気象庁のメソスケールモデル(東西方向 0.125 度、南北方向 0.1 度の空間分解能、6時間の時間分解能)の気温と高度の出力値を用いた。雲相の判別には、ライダー光の減衰量と偏光解消度を組み合わせることが有効であるとモンテカルロ法を使った数値計算と衛星からのライダー観測の結果からわかっている。Yoshida et al. (2010)は衛星データを用いて、鉛直方向に連続する後方散乱係数の比を X として横軸に、偏光解消度を δ として縦軸に取ったダイアグラムから雲相判別を行う方法(図 1)を提案しており、本研究ではこの原理を地上ライダーデータに適用した。

[結果と考察]

本研究においても Yoshida et al. (2010)と同様な変数を用いてダイアグラムを描いた(δは 100%を1として表現している)。雲層温度が 230K 以下で雲粒子が全て凍結していると考えられる場合の散布図を図2に、雲層温度が 280K 以上で雲粒子が全て水滴であると考えられる場合の散布図を図3 に示した。図2から水晶では X が0付近、δは幅広い値を取ることがわかる。一方、図3から水滴では X は幅広く、右上がりに分布するがδの値は概ね0.4以下であることがわかる。図2と図3を重ね合わせた図4より、X が0付近、δが0.2以下の場合は青点と赤点が重なっていて雲相の厳密な同定は難しいが、青点と赤点が重ならない領域では雲相判別は可能であることがわかった。しかし雲相判別が困難な場合があるということは、トータルとしての雲相割合を定量化することは難しいことを意味する。衛星データを用いた結果との差異の原因の1つは、視野角の違いと考えている。今後は、今回使用した X とδを使う方法のブラッシュアップに加え、他の根拠や原理の適用を検討していく必要がある。

## [参考文献]

Kawamoto, K., Yamauchi, A., Suzuki, K., Okamoto, H., & Li, J. (2020). Effect of dust load on the cloud top ice-water partitioning over northern middle to high latitudes with CALIPSO products. *Geophys. Res. Lett.*, 46, e2020GL088030. https://doi.org/ 10.1029/2020GL088030.

Yoshida, R., H. Okamoto, Y. Hagihara, and H. Ishimoto (2010), Global analysis of cloud phase and ice crystal orientation from Cloud Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation (CALIPSO) data using attenuated backscattering and depolarization ratio, *J. Geophys. Res.*, 115, D00H32, doi:10.1029/2009JD012334.

#### [研究組織]

河本和明(長崎大学大学院水産・環境科学総合研究科、衛星データの解析・全体のまとめ) 岡本創(九州大学 応用力学研究所、雲相推定手法についてのアドバイス)の2名である。



表層海洋ドリフターを用いた沿岸表層海流の観測

東京大学 大学院新領域創成科学研究科 小平翼

1 目的

海難事故による原油流出や震災時における瓦礫流出、放射性物質等の海洋汚染を検討する上で海洋の 流動場、そして漂流プロセスの把握は非常に重要である。本共同研究では漂流予測手法の高度化を目的 として、室内実験や海洋観測塔付近における実験により、漂流に対する海流・潮流、波浪、風、それぞれの 影響の定量化を試みる。今年度は特に波浪を計測するのに適した浮体形状の検討に焦点を当て、平塚海 洋観測等付近にて波浪計測試験を実施した。

#### 2 実験方法

平塚総合海洋実験場付近の海域において、3 種類の異なる浮体形状を用いて、波浪計測試験を行った。Fig.1 に試験に利用した計測機器ならびに試験実施の様子を掲載する。浮体形状は、昨年度の共同研究においても漂流性能試験を実施した波浪計測が可能なドリフターFZ (Buoy#1)、FZ のセンサボックスのみを主に漁業用に利用される発泡体浮子に取り付けたもの(Buoy#2)、そして同じくセンサボックスを扁平な浮き輪形状に取り付けたもの(Buoy#3)の3 種類について試験を行った。

波浪の計測は、浮体に取り付けた慣性計測装置(IMU)により加速度、角速度、地磁気をそれぞれセンサ 座標系3軸に対して16Hzで計測を行うことによって実施した。波浪計測は30分ごとに1024sの間行い、 データはSDカードに記録される。得られたデータに基づいて鉛直加速度を計算し、周波数空間で2階積 分を行うことにより変異のパワースペクトル密度を推定した。



Fig.1 波浪計測試験に利用した各種機器(左)と展開の様子(右)

## 3 実験結果

波浪計測試験により得られた鉛直変異のパワースペクトルを Fig.2 に示す。加速度計による波浪計測に おいては、低周波数において比較的ノイズが大きくなることが知られており、カットオフ周波数を定めてアイ ディアルフィルタを適用し、通常ハイパスフィルタとして用いられる。カットオフ周波数を定めるにあたって は、ノイズレベルを低く抑えることが重要となるが、3 種類の異なる浮体形状を用いて実施した計測結果か らは、鉛直方向に比較的長い形状となった発泡体浮子を用いたブイ(Buoy#2)による計測結果が、その他 2 つに比べて低周波数において大きなパワースペクトル値を示す結果となった。また、違いはわずかではあ るが、扁平な形状をした浮体である浮き輪を用いた浮体(Buoy#3)が昨年度の共同研究においても漂流性 能試験を実施した波浪計測が可能なドリフターFZ (Buoy#1)よりも低いパワースペクトル値を示す結果とな った。



Fig. 2 異なる浮体形状を用いた IMU による波浪計測結果

4 考察

慣性計測装置が計測しているのはセンサの加速度、角速度といった情報であり、波浪を直接計測してい るわけではない。取り付けられた浮体の運動を計測するため、波浪を計測するには波浪による浮体の応答 関数を明らかにしておく必要がある。試験時の浮体の動揺状況を観測した限り、浮体の形状によってピッ チ、ロール運動が異なり、特に鉛直方向に比較的長い形状となった発泡体浮子を用いたブイ(Buoy#2)は 大きな運動となっていた。推定された浮体の姿勢情報に基づいて鉛直加速度を計算してはいるが、今回得 られた結果は、その補正が十分に機能しない可能性、あるいはピッチ、ロール運動によって加速度計測の ノイズを大きくする可能性があることを示唆していると考えられる。今後は波浪方向スペクトルの計測を視野 に入れ、室内実験を交えながら漂流に対する波浪影響の明確化に取り組むことを検討する。

5 成果報告

下記の通り、関連する口頭発表を実施した。

Kodaira, T., Katsuno, T., Fujiwara, Y., Nose, T., Rabault, J., Voermans, J., Kimitsuka, M., Inoue J., Toyota T., & Waseda, T, Development of MEMS IMU based and solar powered wave buoy FZ, OCEANS 2022, Hampton Roads. IEEE, pp. 1–6, Virginia Beach Convention Center

Katsuno, T., Kodaira, T., Nose, T., Uchiyama R., & Waseda, T., Ocean wave observation by multiple drifting buoys in Beaufort Sea of the Arctic Ocean, The 13th Symposium on Polar Science, Tachikawa

対馬暖流域における山陰沖合ー沿岸間の海況変動を把握するための観測研究

長崎大学 滝川哲太郎

## 1. 目的

対馬暖流は東シナ海から対馬海峡を通過し、その沿岸分枝流は日本海南西海域の大陸棚上を流れる。 一方、日本海の沖合には冷水が分布し、この冷水が大陸棚に近づくことにより、対馬暖流の流路やその 強弱、そして水塊特性に影響を与えていると考えられる。この対馬暖流沿岸分枝の海況変動とカタクチ イワシなどの浮魚類の魚群は、同様の数日の時間スケールで変動しており、海洋物理学的な興味だけな く水産学にも繋がる研究トピックである。

これまで、研究メンバーは、山口県・福岡県・長崎県の沿岸・沖合定点における海況モニタリングを 行ってきており、2021年7月には山陰沖合の大陸棚縁の海底に2台の流速プロファイラー(ADCP)を 設置した(図1)。本報告では、2022年5月に行った ADCP 回収の状況と、観測結果の一次処理を示す。

## 2. 海底設置 ADCP の回収

長崎大学水産学部附属練習船「長崎丸」を用い、 ADCPの設置・回収を行った(表1)。設置・回収日は、 それぞれ2021年7月26日と2022年5月10日である。 設置については、前年度の報告を参考にされたい。

TR1では、ADCP を回収するための切離し装置から の反応はあったものの、架台 TRM のフロート部が浮 上せず、回収できなかった。TR2では、ADCP とその 架台 TRBM を回収した。この TRBM には泥が多量に 付着しており、回収できなかった TRM は泥に埋もれ て浮上できなかった可能性がある。

TR2 では、鉛直流を計測できる5 ビームのセンチネ ル V-ADCP を設置していた。既存のワークホース(4 ビーム)用の TRBM に背の高いセンチネル V を取り 付けたため、トランスデューサー上部のカバーを外し て使用していた。回収時にはトランスデューサーのウ レタン部分が剥がれた状態であり、この方法は長期設 置には向かないと考えられる。



図 1. 継続的に行われている観測網(直線: フェリー航路、○:定点モニタリング) と、2021~2022 年の ADCP 設置点△。

## 3. ADCP データ

流速データが得られるアンサンブル間隔を30分とし、1アンサンブルあたり90回のpingを打つ設定 で流速を計測した。しかし、観測期間を通じて、pingの発信が途中で止まる、またはpingが発信されな い不具合が生じていた(10月の例、図2)。そこで、一次処理として、単pingのデータからの流速計算 を試みた。一般的な処理では、水平流を計算する際、4つのビームのデータを用いるが、できるだけ計 測精度を落とさないように5つのビームで水平流を計算した。今回の設定では、単pingの精度は3.32 cm s<sup>-1</sup>であるため、アンサンブルによってping数は異なるが数 cm s<sup>-1</sup>程度の標準誤差になると考えられる。 例として10月の流速の時間深度断面を図3に示す(アンサンブル間隔:30分)。日本海の特徴である日 周潮流が顕著に現れている。今回、ping数が少ないことから、鉛直流については十分な精度が得られないと考えられる。



図2. 2021年10月の生データの例(上図:東向流速、下図、北向流速)。流速データが存在する部分は カラーで表示されている。



## 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), 遠藤貴洋 (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)
福岡県 水産海洋技術センター	池浦 繁(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)

## 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/鹿児島大学水産学部 堤 英輔

**背景と目的**大陸棚や内湾,沿岸域における乱流混合は,熱や淡水,物質の輸送を通じて海洋環境に深く 関わる.特に密度躍層における乱流混合は,下層の栄養塩を有光層へ供給することで海域の基礎生産を 支え,また底層へ酸素を供給し貧酸素水塊の消長を促すため生態系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周辺で生じる乱流混合の定量化を目的として,乱 流微細構造計測データの解析を行う.昨年度までに日本周辺の複数の海域で得られた乱流観測結果につい て,海域間比較を行ったところ,豊後水道で計測された乱流は,流れのシアや成層強度に関して同等の条件 下で比較して,東シナ海陸棚上や三陸陸棚上において得られた値よりも高い乱流エネルギー散逸率と鉛直拡 散係数が得られた.この原因として,豊後水道では急峻な地形と強い潮汐により生じた渦や内部波などの擾乱 が直接的に乱流を生じている可能性が考えられたが,詳細は不明であった.本年度はこの点について研究を 進めるべく,地形が流れ場と乱流に影響を与えている豊後水道と三陸沿岸において乱流の観測を実施した.

研究内容 2022 年 7 月 17 日から 23 日にかけて実施された愛媛大学沿岸環境科学研究センター調査実習船 「いさな」による豊後水道・御五神島周辺航海,及び 2022 年 8 月 4 日から 10 日にかけて実施された学術研究 船「新青丸」による KS-22-11 次三陸沖航海において乱流の調査を行った. 豊後水道では愛媛県宇和島市沖の 御五神島の周囲に 5 つの定点 (水深 70~100 m)を設け,上げ潮時と下げ潮時に各点で観測を行った. 三陸 では岩手県の大槌湾沖に 2 点の定点 (水深 100 m 及び 125 m)を設け,1 時間間隔で交互に観測を行った. 豊後水道では計 110 キャスト,三陸では計 60 回の計測が行われた. 乱流データは乱流微細構造プロファイラ を用いて取得し,豊後水道では応用力学研究所所有の TurboMAP-5 (JFE アドバンテック社),三陸沖では東京 大学大気海洋研究所所有の VMP-250 (Rockland Scientific 社)を使用した. 乱流の計測に合わせて流れの計 測も実施し,豊後水道では船舶搭載の音響ドップラー流速計 (Teledyne RDI 社 300-kHz WH ADCP),三陸沖 では同音響ドップラー流速計をコンパクトリカバリブル装置 C-ROM を用いて海底設置して計測した. 微細構造 プロファイラで計測された乱流シアから乱流運動エネルギー散逸率 $\varepsilon$ を計算し,Osborn (1980) に基づき鉛直渦 拡散係数  $K_{\rho}$ を見積った ( $K_{\rho}$ =0.2 $\varepsilon$ N<sup>2</sup>, N は浮力振動数). 乱流量 ( $\varepsilon$ ,  $K_{\rho}$ ) は鉛直 4 m 毎に計算し,同一の計 測層での浮力振動数 N と流速の鉛直シア Sh と比較することで乱流量のファインスケール量 ( $N^2$ , Sh<sup>2</sup>) への依 存性を調べた.

**結果と考察** 豊後水道の調査海域周辺では、御五神島やリアス海岸に潮流が作用し、流下方向に島影渦とウェークが形成されていた。また、御五神島一帯は冷水域となっていたことがひまわり衛星データから確認された. 全観測点における流れの鉛直シアと浮力振動数の平均値は、それぞれ  $Sh^2 = 7.3 \times 10^5 \text{ s}^2$ ,  $N^2 = 9.0 \times 10^5 \text{ s}^2$  であり、乱流運動エネルギー散逸率と鉛直渦拡散係数の平均値はそれぞれ  $\varepsilon = 1.0 \times 10^7 \text{ W kg}^1$ ,  $K_\rho = 2.6 \times 10^4 \text{ m}^2 \text{ s}^1$  であった (図 1a, b). 三陸の調査海域である大槌湾沖は、重茂半島のリアス海岸沿いを南下する津軽暖流の風下ウェークに位置し、三陸沿岸に沿って形成された冷水帯中に位置していた. 係留した流速計のデータからは、内部潮汐によるバロクリニックの潮汐流が流れ場に卓越していた. 流れの鉛直シアと浮力振動数の平均値はそれぞれ  $\varepsilon = 1.1 \times 10^5 \text{ s}^2$ ,  $N^2 = 8.8 \times 10^{-5} \text{ s}^2$  であり、乱流運動エネルギー散逸率と鉛直渦拡散係数の平均値はそれぞれ $\varepsilon = 1.1 \times 10^8 \text{ W kg}^1$ ,  $K_\rho = 3.7 \times 10^5 \text{ m}^2 \text{ s}^1$ であった (図 2a, b). これらの 2 海域は、鉛直シアや成層の強度は平均的に同等であるが、乱流量( $\varepsilon$ ,  $K_\rho$ ) については豊後水道の方が 1 オーダー程度大きかった. 乱流量は 2 海域ともに鉛直シアに正の依存性、成層強度(浮力振動数)に負の相関を持つ Gregg (1989) パラメタリゼーション型の(Sh, N) 依存性を持つことが分かった. この理由として 2 海域は共に流れ・地形間の相互作用に起因する高次モードの流れのシアが卓越する点が考えられた.

研究組織 堤 英輔(東京大学大気海洋研究所\*研究開始時/鹿児島大学水産学部\*現所属,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),遠藤貴洋(九州大学応用力学研究所,研究協力者)



図1 豊後水道における乱流観測結果. (a) 乱流運動エネルギー散逸率  $\varepsilon$  と (b) 鉛直渦拡散係数  $K_{\rho}$  のヒストグラム. (c) 乱流運動エネルギー散逸率  $\varepsilon$  と (d) 鉛直渦拡散係数  $K_{\rho}$  の二乗浮力振動数 ( $N^{2}$ )と二乗鉛直シア ( $Sh^{2}$ ) に対する依存性. 実線は勾配リチャードソン数 ( $Ri_{g} = N^{2}/Sh^{2}$ ) が 1/4 となる境界を表す.



図2 図1に同じ.ただし三陸沖における結果.

## 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 related to global warming

We conducted a quantitative study of the water mixing in the East China Sea via chemical tracers, and promoted scientific communication by organizing the International Brainstorming Workshop on Healthy & Sustainable Terrestrial and Coastal Waters in University of Toyama.

# 1. Water origins of low-oxygen water on the outer shelf and material transport from the East China Sea to the Kuroshio area (NS22-095)

In recent years, it has been reported that the occurrence frequency of hypoxic water masses has increased and its area has expanded in the East China Sea (ECS). The continental shelf margin in the ECS plays an important role in supplying biological resources to the sea around Japan via the Kuroshio. Considering about the deterioration of the marine environment and accompanying changes in ecosystems, it is urgent to clarify the dynamics and formation mechanism of hypoxic water. In this study, seawater, sediment, pore water and isotopes samples were collected on outer shelf of the ECS, to study low-oxygen water on the outer shelf and to analyze the transport of the nutrients and the impact on the Kuroshio from the shelf pump both in temporal scale and spatial scale.

The Nagasaki Maru NS22-095 cruise was conducted from 11 to 19 July 2022 along M line, K line and KM line in the East China Sea (Fig.1). Seawater samples were collected by Niskin bottles attached with CTD sensor for REEs (160 samples), Nd-isotopes (32 samples), Nutrient samples (30 samples), Dissolved Oxygen (33 samples), Hydrogen and oxygen isotopes (200 samples), Nitrogen isotope (87 samples), Ra-isotopes (16 samples) and Rn (6 samples). Sediment samples were collected by multiple corer, and then were sliced in 1 cm and 3 cm onboard. Pore water was squeezed in syringe under low temperature condition (~ 4°C). DO samples were analyzed by Titrator instrument onboard. The REEs and Nd-isotopes, nutrient samples etc. will be measured in the laboratory on land.

The preliminary results obtained are as follows: Low-oxygen water has been identified for the summer months of the ECS outer shelf. Based on mixing model
combined with rare earth elements (REEs), as they allow a good distinction between different water masses, the origins of low-oxygen water were quantified. We determined that the low-oxygen water on the outer shelf mainly originated from Kuroshio Subsurface Water and confirmed the contribution of coastal water. Moreover, the influence of factors on the formation of this low-oxygen water may include water stratification, water mixing, organic matter remineralization, spring tide and so on.

# 2. International Brainstorming Workshop on Healthy & Sustainable Terrestrial and Coastal Waters

Within the framework of the 10-year WESTPAC program for "Healthy, Productive and Sustainable Asian Marginal Seas" that started in 2021, the International Brainstorming Workshop was held on November 30th, 2022 in University of Toyama, combining with recent research and specific scientific questions. The overall objective of the workshop was to gather up-to-date information on existing knowledge, research gaps and challenges related to the flux of nutrients and heavy metals in WESTPAC etc. To attain the objectives, the workshop commenced with 16 participants, represented Japan, Cameroon and Indonesia in person and 5 participants, represented Thailand, Korea, China, Bangladesh and WESTPAC through zoom. The introductory remarks by the chairperson (Jing Zhang) reiterated the raison d'être of the workshop to the participants, who in turn presented specific case studies for each topic in the workshop. Moreover, a multidisciplinary evidence-based research activities involving natural and social sciences, will not only identify the variables, local vulnerability, impact and challenges in coastal ecosystems, but will also enable adequate understanding of the program's subject matter in the AMS and Coast of Cameroon (CC), for sustainable biodiversity production and ecosystem services.



Picture: Photo of Participants (In person and Online) during the workshop noted sampling stations.

# 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

国立環境研究所地球システム領域 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】

本研究では、波長 532 nm と 355 nm の 2 波長で動作する HSRL システムを導入する。ミー散乱と大 気分子からのレイリー散乱を分離して測定するため、波長 532 nm ではヨウ素吸収フィルターを、355 nm では干渉計を高分解能分光素子として用いる。昨年度までに波長 532 nm の HSRL システムを応力 研ライダーに導入し、連続観測を開始している。今年度は波長 355 nm の HSRL システムの導入を進 めた。波長 355 nm の HSRL システムでは、走査型干渉計を用いた国環研独自の革新的手法を取り入 れる。従来手法では、干渉計の透過スペクトルのピーク周波数をレーザー波長に一致させるため、高 度なフィードバック制御を行う。本研究では、複雑な制御を排除するため、干渉計を 1 フリンジ分だ け常時スキャンし、干渉縞の位相毎の信号を測定する。測定信号をフィッティング解析して干渉鮮明 度を推定し、干渉鮮明度の大きさから大気エアロゾルの後方散乱係数と消散係数を抽出する。このコ ンセプトに基づく HSRL システムを国立環境研究所にて構築し、連続観測試験を実施した。また、干 渉計システムの多波長化を見据えて、波長 355 nm に加えて 532 nm も同時に測定した。

# 【結果】

図1に2020年8月にHSRLで測定された大気エアロゾルの消散係数と後方散乱係数の時間高度断面図を示す。また、各波長(波長355 nm、532 nm)の消散係数と後方散乱係数の比(ライダー比) も示している。ライダー比は大気エアロゾルの粒径分布や化学組成、形状に依存するため、大気エアロゾル特性を詳らかに調べるための重要なパタメータである。ライダー比の1ヶ月間平均値は波長355 nm で $63.6\pm11$  sr、波長532 nm で $58.2\pm13$  sr であった。また、オングストローム指数の1ヶ月平均値は $1.52\pm0.7$ であった。これらの結果から、観測期間中では硫酸塩や硝酸塩などの粒径が小さいエアロゾルが支配的であったと考えられる。また、大気エアロゾルの光学的厚さは波長355 nm で $0.40\pm0.2$ 、波長532 nm で $0.23\pm0.12$ であった。これはスカイラジオメーターで測定された光学的厚さ( $0.41\pm0.2$ 、 $0.23\pm0.12$ )とよく一致している。

本研究では、干渉計を常時スキャンする手法によって大気エアロゾルを連続的・安定的に測定でき ることを確認した。また、走査型干渉計を用いることで、シンプルな多波長化が可能であることがわ かった。従来の多波長 HSRL 手法では、波長毎に一つの分光計を使用し、各波長についてレーザーな いしは分光計を波長制御する複雑な機構が必要であった。本研究の手法では、1つの干渉計で多波長 化が可能であるためコストが低減し、且つ波長制御が不要であるためシンプルなシステムとすること

110

ができる。応力研ライダーでは波長 355 nm に対してのみ干渉計を用いる予定であるが、ヨウ素フィル ターを用いた波長 532 nm の HSRL システムによる安定的な波長制御が難しい場合、干渉計を用いた 2 波長 HSRL システムに切り替えることを想定している。

【今後の展望】

今後、干渉計を用いた波長 355 nm HSRL を応力研ライダーに導入し、連続観測を実施する。また、 532 nm HSRL の連続観測によって得られたデータを解析し、エアロゾル光学特性の季節変動やイベン ト解析を進める。



図1:2波長高スペクトル分解ライダーで測定された大気エアロゾルの消散係数、後方散乱係数、 ライダー比の時間高度断面図

# 【研究成果】

Y. Jin, T. Nishizawa, N. Sugimoto, S. Takakura, M. Aoki, S. Ishii, A. Yamazaki, R. Kudo, K. Yumimoto, K. Sato, and H. Okamoto: "Demonstration of aerosol profile measurement with a dual-wavelength high-spectral-resolution lidar using a scanning interferometer", Applied Optics, 61(13), pp. 3523-3532, 2022. (その他学会発表3件)

# 非線形性及び分散性を考慮した水の波の相互干渉に対する地形の影響に関する研究

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

辻・及川は、2 層流体における弱非線形・弱分散モデルを用いて、孤立波の2 次元相互作用 の数値解析を行ない、ソリトン共鳴に伴いステムが生成し得ることを示した.これに端を発し たこれまでの共同研究において、非線形性及び分散性の強い内部波が相互作用する場合を対象 として、変分法に基づく波動方程式系を適用した数値解析により、孤立波の2次元相互作用に 起因するステムの生成や、生成されたステムの挙動に関して調べてきた.そして、2 層流体に おいて、ステムの振幅増幅率が、critical level によって抑制されること等が示された.

ところで、長周期の表面波及び内部波が生成・伝播する東シナ海といった実海域は、様々な 地形によって構成されている.しかしながら、こうした水深の変化が、非線形波の生成・伝播 過程やソリトン共鳴にどのような影響を与えるのかに関しては、不明な点が多い.

そこで、今年度は、海底地形が、表面波・内部波の生成・伝播過程及び非線形相互作用に与 える影響を数値解析に基づき調べることを研究目的とした。本研究で明らかにしようとする非 線形波の挙動特性は、東シナ海や九州西岸域を対象とした波・流れ場の研究、例えば、現在、 辻が行なっているモデル計算に基づく研究等に対して、基礎的知見を与えることが期待される。

#### 研究の具体的方法

具体的には、表面波、または、内部波を対象とし、次の各事項に関して研究を進めた.すな わち、様々な地形を有する水域を伝播する表面波、または、内部波を対象とし、波の非線形性 や分散性を考慮した数値解析を実施し、波の分裂現象や増幅機構等に関してメカニズムを考察 した.

研究では、数値解析や理論に関する仕事を分担し、計画の遂行にあたった.なお、メール等 での議論のみならず、2023 年 3 月に、全メンバが遠隔で議論を行なう.更に、同月に、九州大 学応用力学研究所において、波動モデルに関する研究集会を開催し、本研究の成果を報告して フィードバックを得る予定である.

#### 主要な成果

地形が水の波に与える影響を調べる研究として、まず、河川地形を様々に変えて、河川を遡 上する津波の3次元数値解析を行なった<sup>1)</sup>. そして、河川に進入した回折波が、河川津波の津波 高さや、ソリトン分裂に関与し得ることがわかった.

次に,複数の気圧波によって生成される水の波の1次元伝播の数値解析を行なった<sup>2)</sup>.その結 果,階段地形上及び斜面上の,それぞれに特有の水の波の生成・増幅過程が得られた.すなわ ち,階段地形の水深変化部上で,気圧波が,自由波として伝播している既存の津波に追い着く と,Proudman 共鳴によって生成された,気圧波に追随する拘束波が,既存の津波に重合して津 波高さが増加し,その後,増幅された津波が浅い水域を伝播した.これに対し,水平床上で, 気圧波が,自由波として伝播する既存の津波に追い着く場合には,拘束波が,既存の津波に重 合している間は,津波高さが増加したが,気圧波が既存の津波を追い越した後に,津波高さは, 重合前の元の値に戻った.また,斜面上を自由波として伝播している既存の津波も,気圧波に 追い越されることによって増幅される可能性のあることがわかった.更に、下り勾配の斜面上 を正の気圧偏差の気圧波列が通過する際、水の波の増幅過程において、うなりが発生した.そ して、自由波として伝播する津波の峰の増幅が抑制された.逆に、自由波として伝播する津波 の谷の振幅は、増加した.

そして、地球科学への応用として、東シナ海の大陸斜面におけるエネルギー収支を調べる目 的で、高分解能数値実験を行なった<sup>3)</sup>. 2016年と2017年の夏の期間を対象に、大陸斜面でのエ ネルギー変換率の分布を比較し、初期条件や境界条件に対する影響を調べた. 感度実験の結果、 黒潮流が傾圧へのエネルギー変換の分布に重要な影響を与えることがわかった. また、エネル ギー変換の周波数解析から、高い周波数の潮汐運動からの寄与は、低周波数のそれと同程度で あることが示された.

更に、上記の変分法に基づく波動方程式系を適用した数値解析により、遠地津波の伝播を調べた<sup>4)</sup>. ここで、陰的スキーム<sup>5)</sup>を用いた差分法により基礎方程式系を解いた. 波の強非線形性 及び強分散性を考慮した数値解析では、津波の初期波形が相対的に長い峰であると仮定し、水 平床上を伝播する遠地津波の津波高さ及び波長の時間変化の推定式を提案した. また、地球の プレートの弾性及び上部マントルの流動性を考慮した数値解析では、上部マントルの深さが大 きく密度が適度に大きい場合に、プレート及び上部マントルが特定の条件を満たすとき、有為 な津波高さを有する内部波モードの津波が、対応する1層問題の津波よりも遅い速度で伝播す ることがわかった.

#### 研究成果報告

- (1) 柿沼太郎・楠原 嘉: 河川津波の3次元数値解析, 第69回海岸工学講演会, 2022. (招待講演)
- (2) Kakinuma, T.: Tsunamis generated and amplified by atmospheric pressure waves due to an eruption over seabed topography, Geosciences, 12(6), 232, 17 pages, 2022. doi: 10.3390/geosciences 12060232.
- (3) 辻 英一: 東シナ海の大陸斜面における順圧-傾圧エネルギー転換の数値解析, 九州大学 応用力学研究所共同利用研究「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」研究集会, 2022.
- (4) Kakinuma, T.: A numerical study on distant tsunami propagation considering the strong nonlinearity and strong dispersion of waves, or the plate elasticity and mantle fluidity of Earth, Fluids, 7(5), 150, 17 pages, 2022. doi: 10.3390/fluids7050150.

#### 参考文献

(5) Nakayama, K. and Kakinuma, T.: Internal waves in a two-layer system using fully nonlinear internal-wave equations, Int. J. Numer. Meth. Fluids, 62(5), 574–590, 2010. doi: 10.1002/fld.2037.

## 組 織

研究代表者 柿沼太郎 (鹿児島大学学術研究院 理工学域) 所内世話人 辻 英一 (九州大学応用力学研究所 地球環境力学部門) 研究協力者 中山恵介 (神戸大学大学院 工学研究科)

# インド亜大陸北東部からインドシナ半島における 降水システムの長期変動に関する研究

代表者:東京大学 未来ビジョン研究センター 木口 雅司 所内世話人:九州大学 応用力学研究所 江口 菜穂

#### 1. 研究の目的

インド亜大陸における約 100 年間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 Fukushima et al. (2019) によって報告されている。一方で、ここ 30 年間で、北半球夏季 (7-9 月)のアフリカ大陸からアジアモンスーン域の対流活発域が北進していることが明らかとなってい る(Kodera, Eguchi et al., ACP, 2019; Kodera, Eguchi et al., JMSJ, 2021)。

本研究対象とするインド亜大陸東北部とインドシナ半島は、インドモンスーンの下流にあたり、かつ 準2週間周期変動(QBO)や BSISO などの季節内変動の始点にあたる。またこの地域は特異な地形によ る地形性の降水システムが顕著にみられる地域で、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明らかにしたい。一方で、熱帯域の長期変動であるインドダイポールや ENSO の 影響も強く受けているので、熱帯域の経年変化との関連の調査も目指す。

本研究では、研究対象地域における地上降雨量データを収集し、アジアモンスーン降雨データベース を作成し、各現業機関の了承を得て、他の研究にも使用できるようデータベースをレポジトリサイトに て公開することを目指し、さらに季節サイクルなどの長期トレンド解析を試行する。本研究で開発する データベースは、APHRODITE(Yatagai et al., 2012)より長い期間(APHRO\_V1101 は 57 年間)のデー タとなり、より長期の解析が可能となる。さらに、衛星観測データ(TRMM 等)や既存の雨量プロダクト (APHRODITE 等)を用いて、作成したアジアモンスーン降雨データベースの検証を実施しつつ、季節進 行が先行研究の結果と類似しているかどうかの確認を行う。また、本研究の研究目的の達成に十分な精 度を持っているか、検討することを目的とした。昨年度に引き続き COVID-19 の影響を受けて研究対象 地域におけるデータ収集や特に重要である各現業機関のデータ公開に向けた了承を得るための交渉が 大幅に遅れている。そのため、本報告では、既に入手した雨量データと衛星観測データ TRMM との検 証結果と、研究領域は異なるが解析手法開発を先に進めるために実施した日本での高解像度雨量データ セット開発や長期トレンドに関する解析結果が最終的に論文として採択されたので、その中でメガラヤ 高地における降水データの検証と日本の公開どうぞ雨量データセット開発について報告する。

### 2. メガラヤ高地における降水データの検証

世界有数の多雨地域であるインドと バングラデシュの国境に位置するメガ ラヤ高地において得られた雨量データ を検証するため、観測された豪雨発生時 における TRMM PR(熱帯降雨観測衛星 搭載の降雨レーダー)とのマッチング比 較を実施した。その中で、インド北東部 の豪雨地点チェラプンジにおいて 2022 年 6 月 17 日 03UTC までの 24 時間に 過去 122 年の中で 3 番目に多い雨量 972mm を観測したとインド気象局が発 表した。この図1はインド気象局チェラ プンジ観測所から西に約 1km 程度離れ た場所に設置したVaisala社製の自動気 象観測装置 WXT520 を用いて観測した 2022 年 6 月の日雨量の時系列である。 この地域は準2週間周期の季節内変動 による降水変動が卓越しており、11-20 日にかけて日雨量 100mm 以上の降水

が継続しているが、その中でも14-16日





の3日間の降水量が突出して多く、3日間で2500mm程度降っている。下流のバングラデシュ Sylhet では広域にわたって鉄砲水による被害が生じた。今後はこの大雨をもたらした降水システムや気象場の

#### 解析を行う予定である。

#### 3. 日本での高解像度雨量データセット開発

本研究の降水量データセット作成のため、COVID-19の感染拡大によってデータの収集並びに公開に 関する交渉が遅れているものの、先行してこれまで提案されている作成手法(例えば Dirks et al., 1998) を検討し、長期データが別プロジェクトで揃っていた日本において 1926 年から 2020 年までの 0.01 度 の空間解像度での降水量データセットを作成した。用いたデータは、区内観測所、AMeDAS、水文水質 データベースで、パラメータ推定の検証のため東京大学演習林が整備した全国演習林データベースの降 水量データ(1990~2009)を準備した。Dirks et al.(1998)で提案された逆距離加重法においてパラメータ 推定を行い、その結果に基づいて日本域における 0.01 度高解像度長期降水量データセットが完成した (Hatono, Kiguchi, et al., 2022)。開発したデータセットを時空間分解能の異なる APHRO\_JP と比較す るため、北海道を除く日本の流域面積の大きい 6 河川(利根川、信濃川、北上川、阿賀野川、淀川、最上 川)における平均月雨量と年雨量を計算した結果、2 つのデータセット間の相関係数は高かった。一方で、 極端イベント(1947 年カスリーン台風、1999 年千葉県香取市での豪市)で比較してみると、使用する地 点数の多い本研究のデータセットのほうがより詳細な情報を得ることができ、河川モデルへの入力値と してもより再現性の高い結果が期待できる。



図2:本研究におけるデータ作成手法のフローチャート。

4. まとめ

本研究では、地上観測データと衛星観測データとの関係性を検証した。また、先行して長期降水量デ ータセットのグリッド化を目指した作成手法を日本において検討し、データセットを作成、公開した。

5. 研究組織

研究代表者	木口 雅司	東京大学 未来ビジョン研究センター 特任教授
所内世話人	江口 菜穂	九州大学 応用力学研究所 准教授
研究協力者	村田 文絵	高知大学 理工学部 准教授
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

#### 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の他に、JSPS 科研費 JP26220202、 JP21K14252、JP21H05002、文部科学省統合的気候モデル高度化研究プログラムJPMX D0717935457、 2017 年度住友財団環境研究助成「茶園観測データレスキューと将来予測による 19-21 世紀アジアモン スーンの降雨変化」、(独)環境再生保全機構の環境研究総合推進費(S-14)、中国建設弘済会技術開発支援 事業によって実施された。

# モンゴル・エルデネト鉱山における尾鉱沈殿池由来ホワイトダストの拡散動態解析

金沢大学 環日本海域環境研究センター 松木篤

【はじめに】

東アジア最大規模の銅・モリブデン鉱山があるモンゴル・エルデネト市(N49°1'38", E104°2'40)周 辺では、鉱山活動に伴う環境汚染が深刻化している。特に、郊外に設けられた尾鉱沈殿池には坑排水処理 に伴う中和殿物が大量に堆積しており、乾燥時に干上がり露出した池底から、強風によって大量に巻き 上げられた中和殿物が白い大気粉塵(ホワイトダスト)となって同市の大気質を著しく低下させる。ホワ イトダストは人体への直接的な曝露のみならず、拡散・輸送・沈着後に広域にわたって水質、土壌を汚染 し、二次的かつ継続的な健康被害を引き起こす可能性がある。

現地では地上大気環境監視インフラの整備が進んでおらず、大気中の浮遊粒子状物質 (SPM) や PM2.5 などの連続的なデータが不足しており、ホワイトダスト発生の頻度や規模も十分に明らかになっていな い。そこで本研究では静止気象衛星ひまわり 8 号の高解像度画像から局所的なダストイベントを抽出す る解析方法を確立し、ホワイトダストの時空間的な挙動を系統的に明らかにすることを目的とする。

### 【方法】

ひまわり 8 号の画像解析に基づくダストの発生地 域、時間の識別、抽出には衛星コンポジット画像(Dust RGB)を用いた(Yumimoto et al., Scientific Reports, 2019)。また、現地に監視カメラとローコスト小型 PM2.5 および粉塵センサ(PS2花粉センサ,神栄テク ノロジーを応用)を追加設置し(図1)、衛星画像の解 析結果と実際の大気粉塵イベント発生の様子とを比 較するための地上直接観測を行った。

# 【結果と考察】

ひまわり8号のDust RGB 画像解析に基づいて、尾 鉱沈殿池から発生する人為ダストの時空間的な分 布を検出することに成功し、従来の予測よりも影響 が広範囲に及んでいる実態が明らかになった。図2



**図1.** 尾鉱沈殿池(赤)とセンサの設置地点(緑). Train station には PM2.5 に加え粉塵センサを設置.

に、典型的なホワイトダスト発生時の Dust RGB 画像を示す。ちょうど尾鉱沈殿池に対応する地点から 南東方向に帯状に広がるダスト・プリューム(マジェンタ)の発生が確認できる。従来の研究では、黄砂 のようなメソー総観スケール規模の自然現象を対象とした研究が中心であったが、この結果は、高度 36,000km にある静止気象衛星が、鉱山のようなポイント汚染源からの人為ダストのホットスポット検出、 ならびにその拡散輸送実態の追跡にも有効であることを示している。

#### 2022CR-AO-21



図2. ダスト発生時の Dust RGB 画像(時間は UTC). マーカーは尾鉱沈殿池( $\Delta$ ), および地上 センサが設置された地点 Train station ( $\Diamond$ ) と Meteorological station ( $\Box$ )の位置を示す.



図 3. エルデネト市内に設置した小型センサによる粗大粒子個数濃度(青),および PM2.5 質量濃度(赤,黄緑)測定値の時間変化.

図 3 には、風下の Train station、並びに Meteorological station に設置されたセンサ(粉塵センサは Train station のみ)による測定値の時系列を示す。Train station における粉塵センサの計数(青:粗大粒 子個数濃度に相当)、および PM2.5 質量濃度(赤)の時間変化と、DustRGB 画像で視覚的にホワイトダ ストの発生が検出され、継続したタイミング(グレーの網掛け)との間には極めて良い対応が見られた。 興味深いことに、発生源から距離にして 10 km ほどしか離れていないエルデネト市の市街中心部に位置 する Meteorological station では(図 3, 黄緑)ほとんど粒子の濃度上昇がみられない。DustRGB 画像上 のプリュームも Meteorological station に対応する位置にはかかっておらず(図 2)、衛星観測結果が地上 でのダスト濃度の空間的な分布ともよく対応していることがわかる。

以上のことから、ホワイトダストはポイント汚染源(尾鉱山沈殿池)から発生した後、きわめて指向 性の高いプリュームを形成することがわかる。しかし、(衛星からでも検出が可能な一定の濃度を保った まま)プリュームが到達する距離は優に100kmを超え、風下には集落なども位置することから、今後も 継続的なモニタリングにより重金属を多く含むホワイトダストによって汚染されている地域の抽出が重 要となる。ローコストセンサによるグランドトゥルースと静止気象衛星の画像解析を組み合わせた本研 究のアプローチは、広大な国土に対して人口が少ないモンゴルのような地域と極めて親和性が高く、発 展的に同地域における環境動態解析において益重要な役割を果たすものと期待される。

【研究成果報告】Batbold, C., Yumimoto, K., Sonomdagva, C., Batdelger, B., Avirmed, B., Ganbat, S., Kaneyasu, N., Matsumi, Y., Yasunari, T.J., Taniguchi, K., Hasebe, N., Fukushi, K., Matsuki, A., 2022, Spatiotemporal dispersion of local-scale dust from the Erdenet mine in Mongolia detected by Himawari-8 geostationary satellite, *Scientific Online Letters of the Atmosphere*, **18**, 225-230.

#### 【研究組織】

研究代表者:松木 篤、所内世話人:弓本 桂也 研究協力者:鵜野 伊津志、Chultem Batbold (D3)、Sonomdagva Ch. (NMU)

#### 夏季の宗谷暖流のジェット構造の維持機構に関する理論的研究

#### 筑波大学生命環境系 唐木達郎

目的:冷たく低塩分なオホーツク海に面した北海道北東沿岸海域では、宗谷暖流と呼ばれる沿岸境界流が温かく高塩分な 黒潮起源の海水を運んでいます。宗谷暖流は夏季に最盛期を迎え、宗谷岬から知床半島まで約250 kmの距離の間、秒速 lmを越す非常に速い表層ジェット流構造を維持します。宗谷暖流によって性質の異なるオホーツク海の海水と黒潮系海 水が隣り合い、北海道北東沿岸海域に顕著な海洋前線帯が生まれると、これまでは考えられてきました。一般的に沿岸境 界流は外洋水との境界に前線帯とジェット流帯を併せ持つものです。ジェット流は前線のもたらす傾圧性により海底に 近いほど遅くなります。そのため沿岸境界流は海底摩擦の影響をあまり受けずに長い距離を流れることができます。しか し宗谷暖流の前線ジェット流帯は流域幅の中間に位置し、オホーツク海の外洋水と黒潮系海水の境界には生まれません。 両海水は水温と塩分によって決まる海水密度において差がないため、水塊境界に傾圧性が生じないのです。また、一般的 な沿岸境界流の前線は海底斜面から海面まで鉛直的に分布しますが、宗谷暖流の前線の上端は亜表層に位置し、夏季の季 節躍層に接続します。なぜ宗谷暖流は、一般的な沿岸境界流とは異なる特徴を持った前線ジェット流帯を持つのでしょう か。この謎を明らかにすることが我々の目的です。

我々はこれまでに数値モデルを使い、宗谷暖流域の季節躍層が海底斜面上の鉛直混合によって斜面下方に傾き、そ して前線帯の形成に至ることを明らかにしました。宗谷暖流はその上流域に該当する宗谷岬沖において、季節躍層に特徴 づけられる順圧性の高い沿岸流でした。上流域の宗谷暖流はその順圧性ゆえ、表層と同様に海底でも流れが速く、海底摩 擦の影響を強く受けます。それに伴って海底で鉛直混合が活発になり、季節躍層が上下に良くかき混ざることで海水密度 も鉛直に一様となります。この混合過程によって宗谷暖流下流域の前線帯は生まれたのです。興味深いことに宗谷暖流 は、上流域で海底摩擦を受けて順圧流から傾圧流へと流れ構造を変え、下流域ではむしろ海底摩擦の影響を受けづらい構 造になるのです。そのため宗谷暖流はその表層ジェット流構造を宗谷岬から知床岬まで維持できることが分かってきま した。本研究課題において我々は、宗谷暖流の流下方向の順圧-傾圧変遷過程を説明する理論を構築し、この不思議な現 象の一般化を試みました。

理論:海底境界層の発達理論は宗谷暖流の順圧-傾圧変遷過程とよく似た状況を想定しています。この境界層理論の主要な要素は、表層から海底までの連続的な密度成層、緩やかな海底斜面、そして岸を右手に流れる順圧流の流入の3つです。この順圧流に海底摩擦と地球の自転が働くことで、海底近傍に海底エクマン輸送が生じます。海底エクマン輸送によって斜面上方の低密度の海水が斜面下方へ運ばれ、より高密度の海水の真下に潜り込みます。浮力対流がこの密度層の逆転を解消すると、海底付近に密度の鉛直一様な層が発達します。この層は海底境界層と呼ばれています。この海底境界層の特徴は斜面を横切る方向に密度勾配を持つことです。その傾圧性ゆえ、海底境界層内の斜面に沿った方向の流れは斜面に近いほど遅くなります。海底境界層が十分に厚くなると海底近傍の流れはほぼゼロになり、海底摩擦の影響をほとんど受けない定常な傾圧流が生まれます。宗谷暖流の順圧-傾圧変遷過程は海底エクマン輸送と鉛直混合の盛衰に整合しますので、宗谷暖流の海底から亜表層まで分布する前線は海底境界層だと考えられます。

しかし我々は、海底境界層を発達させる鉛直混合が本当に浮力対流なのか疑問を抱きました。浮力対流は密度の非 断熱変化を伴うものです。そのため本来であれば、海底エクマン輸送によって斜面下方に運ばれた軽い海水は、その真上 の重たい海水と混ざり合い、密度が高くなるはずです。その結果、海底境界層の上端には密度分布の不連続点が生じるは ずですが、宗谷暖流の前線の上端に不連続点はなく、連続的な密度分布を示します。これと整合的に、近年の乱流解像モ デル実験は、海底境界層の発達時に卓越するのは浮力対流ではなく機械混合であると示しています。そこで我々は機械混 合に整合的な海底境界層理論を構築しました。一般的に乱流が斜面を下降すると、その真上にある流体は機械混合によっ て乱流に取り込まれます。これを海底境界層の発達理論に応用すると、海底エクマン輸送によって境界層内のある密度を 持った海水が斜面を下降するとき、その真上にある同じ密度の海水が機械混合によって境界層に取り込まれると説明で きます。つまり、海底境界層内の流れに沿って密度はラグランジュ的に保存する、ということです。そのとき海底エクマ ン輸送が等密度線を斜面下方に運び、同時にその鉛直方向の移動距離だけ機械混合が生じることで等密度線は傾くので す。この海底斜面直上の等密度線の沖向き移動が、宗谷暖流域で季節躍層が傾いて前線に至る軌跡を説明します。さらに 我々は理想化された数値モデル実験を行い、機械混合に整合的な海底境界層の発達を確認しました。

**考察**:密度の断熱変化という観点は、宗谷暖流が前線ジェット流帯を持つことのひとつの意味を示唆します。前線は不安 定になって水平に戻るためのポテンシャルエネルギーを秘めています。順圧-傾圧変遷過程によって、宗谷暖流域の季節 躍層に蓄えられた太陽放射エネルギーは、効率よく前線のポテンシャルエネルギーに変換されて海底境界層に蓄えられ るのです。この発見はエネルギーの散逸場として知られる沿岸域に新たな視点を与えるものでしょう。宗谷暖流域で生ま れた前線のポテンシャルエネルギーは、その後どの海域でどのような形で消費されるのでしょうか。今後も研究を続けた いと考えています。

#### 研究成果報告:なし

研究組織: 唐木達郎(筑波大学)、三寺史夫(北海道大学)、木田新一郎

#### 新しい原子力材料における重イオン照射による損傷組織の発達過程

#### 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 渡邊 英雄

#### 1. 目的

CoCrFeMnNi ハイエントロピー合金(HEA)は、高強度、優れた延性と靭性、耐熱性及び耐食性を示す ことから、新しい金属材料として注目がされている。また、このHEAにおける原子空孔集合体の形成と 照射による偏析が起きにくいことからこの合金の耐照射性も優れている。一方、CoCrFeMnNi と同じ系の CoCrNi と CoCrFeNi ミディアムエントロピー合金(MEA)においても、CoCrFeMnNi に劣らない力学特性 を持つ。本研究では、CoCrFeMnNi 系の HEA と MEA における高温でのイオン照射による組織の安定性に及 ぼす影響を調べた。

#### 2. 実験方法

等原子分率 CoCrFeMnNi HEA と CoCrNi、CoCrFeNi MEA は、高純度(>99.9%)の Co、Cr、Fe、Mn 及び Ni により真空誘導炉の MgO るつぼで溶融された。その後に、1473K で真空中 10 時間均一化処理を行った。インゴットから厚み 1mm の正方形試験片(10mmx10mm)を切り出し、0.1mm まで圧延した。 $3mm \Phi \vec{\tau}$ ィスク試料を打ち抜き、真空中に 1273K で 1 時間焼鈍を行った。95%の酢酸と 5%の過塩素酸の溶液に 60V の電解研磨により薄膜試料を作製した。これらの薄膜試料に対して 2.4MeV の銅イオンにより 673K 及び 873K で 1.6×10<sup>19</sup> ions/m<sup>2</sup>まで照射を行った。損傷ピークは表面から約 800nm で、ピークの損傷量は約 1dpa であった。照射の後に、透過型電子顕微鏡とエネルギー分散型 x 線分析装置(EDS)を用いて、組織 観察及び組成変化の分析を行った。

#### 3. 実験結果と考察

673K で照射した MEA の CoCrNi、CoCrFeNi と HEA の CoCrFeMnNi においては、転位ループの形成が観察 された。また、MEA の薄い所(60nm)で三角形を持つ積層欠陥四面体(原子空孔集合体)の形成も観察さ れた。これに対して、HEA においては、積層欠陥四面体の形成が全く観察されなかった。同様な条件で 照射した Ni においては、観察された欠陥が殆ど積層欠陥四面体であった。従って、Ni に比べ、MEA と HEA の耐照射性は優れていることが分かった。

図1に873Kで照射したMEAとHEAの組織を示す。観察された場所の厚みは130nmであった。HEAにおいては、格子間原子型転位ループの形成が観察された。これに対して、MEA特にCoCrNiにおいては、方向性がある格子間原子型欠陥の形成が観察された。いずれの試料においても照射によってボイドの形成が観察されなかった。この条件で照射したNiにおいては、主に直径200nmのボイドであった。図2に、照射した CoCrFeNiの元素分布を示す。照射によって形成された欠陥にCrが偏析したことが分かった。CoCrNiも同様な結果が得られた。一方、HEAにおいては、照射によるCrの偏析が観察されなかった。また、照射したMEAの浅い所(60nm)に、673Kでの照射より顕著な積層欠陥四面体の形成が観察された。しかし、照射したHEAの浅い所に、積層欠陥四面体の形成が観察されなかった。

以上の結果から MEA と HEA が Ni より耐照射性が良いことが分かった。また、MEA に比べ、HEA の方が 照射による偏析は起こらないので、耐照射性がもっと優れている。

#### 4. まとめ

合金組成の安定性は合金の耐照射性に影響を与えるため、本研究では、MEA の CoCrNi、CoCrFeNi と HEA の CoCrFeMni に対して、高エネルギーイオン照射による組成変化の影響を調べた。薄膜した MEA と HEA に、673K と 873K で 2.4MeV の銅イオンを  $1.6 \times 10^{19}$  ions/m<sup>2</sup>まで照射を行った。673K では、MEA と HEA において、格子間原子型転位ループが形成された。Ni に比べ、MEA の積層欠陥四面体の形成が大幅 に抑制された。873K では、ボイドの形成が主体になる Ni に比べ、MEA と HEA においては、ボイドの形成が観察されなかった。一方、HEA と比較すると、MEA の方が照射による Cr 偏析が観察された。MEA、特に HEA の優れた耐照射性が確認された。



図1 873K でイオン照射した薄膜 MEA の CoCrNi、CoCrFeNi と HEA の CoCrFeMnNi 試料の損傷組織



図2 873K でイオン照射した薄膜 MEA の CoCrFeNi 試料の元素分布

### トカマクプラズマにおける高衝突領域での乱流輸送の定量化研究

核融合科学研究所 登田慎一郎

### 1 研究目的

本研究の目的は、トロイダルプラズマにおける乱流輸送を定量的に評価することである。電磁 ジャイロ運動論的シミュレーションを用いて、微視的なプラズマの不安定性を研究している。線 形計算により、不安定性の種類を調べ、不安定性励起の条件を評価する。不安定性の飽和レベル を非線形計算から求め、乱流輸送値を求める。九州大学応用力学研究所にある PLATO 装置で プラズマ実験が開始されました。PLATOのプラズマ分布は、統合コードである TASK コード で予測される。TASK で予測されたプラズマ分布と磁場配位に対して、PLATOの例としてジャ イロ運動論的解析を行った。PLATOの予測パラメータ領域において、特徴周波数がイオンと電 子のバウンス周波数の間にあり、密度勾配が増加するため、不安定性は捕捉電子モード (TEM) とイオン温度勾配モード (ITG) によって励起されていることが示された。これまで、ITG-TEM 解析のための解析モデル、流体モデル、ジャイロ流体モデルが報告されている。ジャイロ流体 モデルによる ITG-TEM 解析が報告されている。ITG-TEM プラズマに対して、局所ジャイロ 運動論的シミュレーションが行われている。グローバルジャイロ運動論的コードは開発され実 施されているが、本研究ではモデル衝突演算子を用いた局所ジャイロ運動論的シミュレーショ ンを実施した。まず、線形ジャイロ運動論的シミュレーションにより、不安定性の種類と不安定 性が発生する条件を検討した。次に、非線形シミュレーションにより、静電ポテンシャルの揺ら ぎの時間発展を示す。Sugama 衝突演算子を用いたシミュレーションの結果と Lenard-Bernstein 衝突演算子によるものを比較した。これまでの研究では、ヘリカルプラズマのイオン温度勾配 (ITG) 乱流に対して、断熱電子条件と運動論電子条件での簡約化モデルを構築した。線形シミュ レーション結果によって構築されたこれらの簡約化モデルは、乱流輸送の非線形シミュレーショ ン結果を速やかに再現するため、動的輸送シミュレーションにおいて簡約化モデルで乱流輸送 を評価する場合、統合(動的)輸送シミュレーションが可能となる。TEM 及び ITG モードプ ラズマのシミュレーション研究は、トカマクプラズマの TEM 及び ITG モード乱流の簡約化モ デルを構築する際の基礎となるものである。

# 2 パラメーター設定

PLATO で予測されるプラズマについて、微視的不安定性によって駆動される乱流を研究した。 PLATO 装置でのプラズマ実験が開始された。TASK コードによって予測された PLATO におけ るプラズマプロファイルが使用されている。同心円状の磁束面を持つトロイダル・プラズマを 研究した。簡単のため、安全係数  $q(\rho) = 1 + 2\rho^2$ の分布を設定する。PLATO の安全係数に関す る詳細な解析が行われている。本研究では、局所フラックスチューブジャイロ運動論シミュレー ションに GKV コードを使用した。規格化衝突周波数である  $\nu_{\rm e}^*$  と  $\nu_{\rm i}^*$  は  $\rho = 0.65$  で、それぞれ 0.22 と 8.8 であることが示された。そのため、電子はバナナ軌道を形成し、イオンはバナナ軌道 を形成しない。規格化電子半径とイオン半径は、 $\rho = 0.65$  において、それぞれ  $\rho_{\rm e}^* = 3.9 \times 10^{-4}$ ,  $\rho_{\rm i}^* = 6.5 \times 10^{-2}$  ほどである。したがって、GKV コードは  $R/L_{T_{\rm e}}$ ,  $R/v_{\rm te}$ ,  $k_y \rho_{\rm e}$  の単位で実行さ れる。

# 3 シミュレーション結果

トカマクプラズマにおいて線形ジャイロ運動論的シミュレーションを行った。Sugama (S) 衝 突演算子と Lenard-Bernstein (LB) 衝突演算子を用いた線形シミュレーションの結果を比較し た。線型成長率  $\gamma$  の規格化ポロイダル波数  $k_{u}\rho_{e}$  依存性を  $\rho = 0.47, 0.65, 0.81$  において調べた。 また、 $k_y \rho_e$ の関数としての実周波数、 $\omega$ についても調べた。本研究で予測された  $\rho = 0.47$  と  $\rho = 0.65$ における不安定性は、捕捉電子モード (TEM) とイオン温度勾配モード (ITG) によっ て駆動されるものである。 $\rho = 0.47$ と $\rho = 0.65$ でポロイダル波数が増加すると、実周波数が 電子反磁性ドリフト運動方向からイオン反磁性ドリフト運動方向へ変化することがわかった。 TEM は規格化された電子プラズマ周波数が1以下となる不安定な状態である。TEM モードか ら ITG モードへの遷移のような現象が、S 衝突演算子を用いたポロイダル波数に対する実周波 数の依存性において、特に $\rho = 0.65$ で得られていることがわかった。TEM モードは、 $\rho = 0.81$ で不安定になると予測される。S 衝突演算子を用いると、ITG モードは 0.026 < k<sub>u</sub>ρ<sub>e</sub> < 0.100、 ρ = 0.65 では、0.030 < k<sub>u</sub>ρ<sub>e</sub> < 0.100 で不安定になることが示された。一方、LB 衝突演算子を 用いた場合、ITGモードはこれらのポロイダル波数領域で安定であることがわかった。 *LB* 衝突演算子を用いた非線形ジャイロ運動論解析結果として、 $\rho = 0.47$ ,  $\rho = 0.65$  と $\rho = 0.81$ での乱流ポテンシャル揺動  $\mathcal{T}\left(=\Sigma_{\tilde{k}_x,\tilde{k}_y\neq 0}\left<|\tilde{\phi}_{\tilde{k}_x,\tilde{k}_y}|^2\right>/2\right)$ と、帯状流ポテンシャル揺動  $\mathcal{Z}\left(=\sum_{\tilde{k}_x, \tilde{k}_y=0}\left\langle |\tilde{\phi}_{\tilde{k}_x, \tilde{k}_y}|^2 \right\rangle / 2 \right)$ の時間発展を調べた。ここで、 $\tilde{\phi}$ は静電ポテンシャル揺動である。 ho=0.65での、電子、イオン熱拡散係数はそれぞれ  $29\mathrm{m}^2/\mathrm{s}$  and  $32\mathrm{m}^2/\mathrm{s}$  である。粒子拡散係数 は19m<sup>2</sup>/sである。S衝突演算子を用いた非線形ジャイロ運動論解析を今後行う予定である。

### 反転密度勾配が駆動するドリフト波による粒子ピンチ効果の理論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

トカマク型核融合炉においては燃料供給のためプラズマ周辺部にペレット入射を予定しており,プ ラズマ周辺部に密度のハンプが形成され反転密度勾配が実現される.このような状況では粒子ピン チ(内向きの粒子フラックス)が起こることが理論的に示されている.粒子ピンチ効果を外部から 制御できれば核燃焼プラズマ制御が可能となるのでこの研究は重要な研究課題と考えられる.本研 究においては反転密度勾配駆動ドリフト波が不安定性として存在しうるか、この不安定性がどの程 度の大きさの内向きのフラックスを作り出せるのか、シミュレーション解析により検討し、実験検 証の可能性を探ることを研究目的とする.

### 研究成果

本年度は、周辺部にソースをおいて密度分布の時間発展を追跡し、乱流の時間発展を解析したので その結果を報告する[1]. 今回の用いたモデルは6場簡約化 MHD モデル[2]であり1次元領域分割版 (R6F コード)を用いてシミュレーションを行った.2次元領域分割版(R6F2 コード)に関しても平行 して開発を進めているが[3]、ソース項の実装が間に合わなかったため、今回は見送った.R6F コー ドに実装した密度源モデルとして球形を仮定した. $S_n = S_0 \exp(-\xi^2/2\Delta^2) \exp(-\zeta^2/2\Delta^2\epsilon^2)$ 、 $\xi = \sqrt{r^2 + r_s^2 - 2rr_s \cos\theta}$  ここで ζはトロイダル角、 $\theta$ はポロイダル角を示す.シミュレーションでは  $S_0 = 0.2, r_s = 0.8, \Delta = 0.1, \epsilon = 1/3$ を用いた.また、電子温度に対するシンク源として簡単のため  $S_{T_e} = -S_n \epsilon$ 仮定した.今回のシミュレーションでは熱源は導入せず、初期分布を緩和させた状態で 粒子源を印可する.初期分布はITGモードに対し不安定な分布のため、イオン温度の緩和が起こる.



図1:各モードの揺動密度エネルギーの時 間発展.横軸はポロイダルアルヴェン時間 で規格化された時間を示す.

がイオン分布の緩和が進行しており、t=6400の 時点でITG モードに対し中立安定なイオン分布 にほぼ緩和する.t=6400 で粒子源を印可すると (0,0) モードが増加する(図1).図2 に t=6400,8000,10000の全密度分布をζ=0ポロイ ダル断面の等高線により示した.密度源はミッ ドプレイン上 r=0.8 に印可している.印可され た密度は均質に内側へ拡散しておらず、巻き込 むように内部へ浸透しているのが明らかとなっ た。この振る舞いを理解するために t=10000 に おけるヘリカルフラックスの等高線を図3 に示 す.r=0.5 に(2,1)磁気島が発生していることが 分かる.磁気島の存在により密度は磁気島のセ パラトリクスを回り込ように内部へ浸透する. DENQ+DEN min/max=-0.411E-05 0.237E-01 T=6400















図 3:t=10000 におけるヘリカ ルフラックス関数の等高線図

図4に磁気面平均された密度分布の時間発展を示 す.t=8000においてr=0.5付近に弱い密度ハンプ が形成されているのは磁気島によって内部と外部 が遮断されていることに起因する.図2から明ら



# 図4:磁気面平均された全密度分布の時間発 展.t=6400(破線),t=8000(青),t=10000(赤)

かなようにミッドプレイン上では密度ハンプが形成されているが、磁気面平均すると見えなくなっている。r=0.8 に密度ハンプが形成されるまでには長時間シミュレーションが必要と考えられる. また、この時刻において有意な乱流の発展は観測されなかった.一方で、初期分布として密度ハン プを与えたシミュレーションを行うと乱流が強く発展し、分布が急速に緩和する.密度ハンプの形 成とそれに伴うドリフト波乱流の発展は次年度の課題として取り組む予定である.

# 参考文献

[1] M. Yagi, "Particle Transport in Fusion Plasmas", 第 20 回核燃焼プラズマ統合コード研究会(九州大 学応用力学研究所), 2023-1-5.

[2] M. Yagi, "Development of reduced 6-field MHD code for particle transport", Modeling and Simulation of Magnetic Fusion Plasma に関する日韓ワークショップ (online), 2022-11-18.

[3] 矢木雅敏,九州大学応用力学研究所共同利用研究成果報告書第25号(2021), 21FP-16.

# 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(日本大)、稲垣滋(九大応力研)、糟谷和賀子 (応用流れ研究所)

# 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)などの軽元素からなる二次元層状物質は,高い放射線透過性を有す ることから,耐放射線材料としての応用が期待されているが,種々の放射線および粒子線照射による構造への 影響等,詳細な研究は行われていない。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[1,2]。同方法では,電子励起相 互作用が支配的なエネルギー領域(数 MeV)のイオンビームをヘテロ原子と二次元層状物質の界面等の接合 領域に照射することで,電子励起後の緩和過程で空間的に近接し同様に励起状態にあるヘテロ原子との間で 結合の組み換え(置換)を生じさせ化合物を作製する。本研究では,グラフェンの表面への気体分子の吸着や, グラフェンの表面を異種原子の薄膜で被覆することでグラフェンと異種原子との界面を作製し,同界面に高エネ ルギーイオンを照射することでグラフェンに種々の異種原子をドーピングした。本報告書ではグラフェンへのヨウ 素のドーピングの研究成果について報告する。

#### 2. 実験方法

多結晶 Cu 箔にメタン,水素ガスを前駆体とする化学気相蒸着法によりグラフェンを成長した[3]。同グラフェン を SiO<sub>2</sub> 基板上に転写[4]した後に,超高真空中で KI 薄膜を室温で 100 nm 蒸着した。その後 KI/グラフェン /SiO<sub>2</sub> 試料をイオン照射槽に導入し,高エネルギーイオン(2.4 MeV Cu<sup>2+</sup>, 3.0 MeV Ni<sup>+</sup>)を照射することでグラフ ェンへのヨウ素のドーピングを行った。イオン照射は九州大学応用力学研究所および高崎量子応用研究所のタ ンデム加速器を用いた。グラフェンの電子状態や原子構造はX線光電子分光(XPS),X線吸収分光(XAFS), 顕微ラマン分光や第一原理計算により評価した。

#### 3. 結果および考察

図1に10<sup>15</sup> ions/cm<sup>2</sup>イオン照射によるグラフェンの XPS スペクトルの変化を示す。ピーク強度の解析から、0.5 – 0.8%のヨウ素がグラフェンにドーピングされたことが分かった。同値はグラフェンへの塩素(21%)やホウ素(4%)のドーピング量に比べて小さいが、ドープされるヨウ素原子の立体障害に起因すると考えられる。ハロゲン化グラフェンの安定性はハロゲン原子のサイズが大きくなるに伴って顕著に低下し、ヨウ化グラフェンは極めて不安定になり自然分解することが報告されている[5]。C 1s スペクトルでは、イオン照射に伴いピークが 284.5 eV から 285.2 eV へと高エネルギー側にシフトすることが分かった。高エネルギーイオンの照射によりグラフェンの化学結合が再構成され、*sp*<sup>3</sup> 結合が形成されたことが示唆される。287.8 eV にみられるブロードな構造は酸化(C=O)ま

たはハロゲン化炭素に由来すると考えられる。同様に I 3d5/2 のピークは 620.9 eV に観察 されており、 I5-, I2 や C-I と一致する。

XPS によってグラフェンへのヨウ素のドーピ ングは実証することができたが、ドープされた ヨウ素の化学状態は明らかにされていない。 そこで以下ではXAFSを用いて同化学状態を 議論する(図 2)。C K 端 XAFS スペクトルで は、イオン照射に伴ってπ\*由来の構造(C1) の強度が減少し、σ\*由来の構造(C2)の強度 が増大することが分かった。さらにイオン照射 後のスペクトルはアモルファスダイヤモンドや ダイヤモンドイドの XAFS スペクトルとよく類似 していることが分かった。このことから XPS で 得られた結果を支持し、イオン照射によってグ



ラフェンの C-C 結合が sp<sup>2</sup>から sp<sup>3</sup> へと再構成することが示された。IL<sub>3</sub>端 XAFS スペクトルでは、4562 eV(I1)、 4567 eV(I2)および 4582-4590 eV(I3)に構造が観察された。同スペクトルの形状は KI や I<sub>2</sub>、有機ヨウ素化合物

等の既知のヨウ素化合物のスペクトルとは一致しない。 一方で、図 3(c)に示す C-I 結合を含む構造について有 限差分(FDM)を用いたシミュレーションによって得られ た XAFS スペクトルでは、図 3(b)のスペクトルを再現でき ることが分かった。同計算から I1 および I2 は 2p から空 の s-および p-軌道(炭素とヨウ素の電子状態が混成して 形成されたπ\*およびσ\*に相当)への遷移であること、I3 は 2p から 5d への遷移であることが分かった。これらの 結果から、高エネルギーイオン照射により従来の化学的 な方法では実現されていないヨウ化グラフェンを実験的 に形成できることが分かった。

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 では得られないハロゲン化グラフェンであるヨウ化グラフ ェン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] S. Entani, et al., RSC. Adv. 6, 68525 (2016).
- [2] S. Entani, et al., Nanotech. 31, 125705 (2020).
- [3] S. Entani, et al., Appl. Surf. Sci. 475, 6 (2019).
- [4] S. Entani, et al., Surf. Sci. 704, 121749 (2021).
- [5] F. Karlicky, et al., J. Chem. Phys. 137, 034709 (2012).

#### 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:名古屋大学未来材料・システム研究所 所内世話人: 渡邉 英雄 所属:九州大学応用力学研究所

#### 成果報告

- 1) 圓谷志郎, アブラモフパヴェル, 鈴木智子, 滝沢優, 山本春也, 好田誠, 「イオンビームのエネルギー付与 を利用した材料創製」, QST 高崎サイエンスフェスタ 2022/QST 量子機能創製拠点シンポジウム 2022 年 12 月.
- S. Entani, S.-I. Sato, M. Honda, T. Ohshima, "Local structure of high-energy implanted Ni into Si(100)", QST Takasaki Annual Report 2021, accepted.
- S. Entani, M. Takizawa, K. Harii, Y. Yamazaki, T. Ohshima, "Ion-beam assisted synthesis of new graphene compounds", QST Takasaki Annual Report 2020, Part II, 1, 20, 2022.



図 2 (a) 10<sup>15</sup> ions/cm<sup>2</sup> イオン照射した KI/グラフェ ン/SiO<sub>2</sub>(赤)および未照射グラフェン/SiO<sub>2</sub>(黒)の C K 端 NEXAFS スペクトル。(b) 10<sup>15</sup> ions/cm<sup>2</sup> イオン 照射した KI/グラフェン/SiO<sub>2</sub>(赤)および未照射グラフェ ン/SiO<sub>2</sub>(黒)の I  $L_3$  端 NEXAFS スペクトル。異なる 炭素-ヨウ素原子の結合距離  $d_{C-I}$  (1.70Å(ピンク), 1.80Å(水色), 1.90Å(青), 2.00Å(緑), 2.10Å(濃緑))を用いた FDM 計算によって得られた I  $L_3$ 端スペクトル。 $d_{C-I} = 1.90$ Å においてスペクトル をよく再現する。(c) FDM 計算に用いた原子モデル。I 原子(紫)および第 1, 第 2 近接 C 原子(明灰 色)を計算に用いた。

タングステンの機械的特性評価と高熱流束材料への応用

茨城大学工学部 車田 亮

【目的】原型炉のダイバータ板の表面材料には、スパッタリングや熱特性が良好なタングステン(W)が 使用される計画である。しかし、Wは低温脆化、再結晶脆化、照射脆化等の問題がある。特に、脆性の 性質を持つため、定常熱負荷やディスラプション時のパルス高熱負荷、さらに、プラズマ閉じ込め性能 が良いELMs時の周期的な高熱負荷を受けた際の熱応力によりき裂などの形成による破壊が生じること が懸念されている。本研究では、研究代表者が専門の機械工学分野の固体力学的な解析を進めることに より破壊靭性評価の精度を向上させ、さらに、破壊靭性などの機械的性質が高熱流束材料としての特性 とどのような関連があるかを解明することを目的とする。昨年度は、破壊靭性試験における静的曲げ試 験後の破面とパルス熱負荷実験による表面損傷の関係を明らかにした。このような破面や表面損傷は W の組織に依存する。そこで、本年度は、電子線後方散乱回折(EBSD)を用いて方位の異なる3面の組織観 察を行った。さらに、方位によるき裂進展の挙動やパルス熱負荷実験結果との関連を調べた。

【実験方法】純Wの圧延材(応力除去処理材、形状:50 mm×50 mm×12.3 mm)から、図1に示すTD-RD(ND 面)、ND-RD(TD 面)および ND-TD(RD 面)の3 面を加工し、FE-SEM に付属した電子線後方散乱 回折(EBSD)を用いて組織観察を行った。また、片側切欠き付き微小3 点曲げ試験片(幅5 mm、厚さ3 mm、長さ25 mm、切欠き(Uノッチ)の幅0.15 mm、深さ2 mm)を、図1に示した4 方位に加工した。 さらに、パルス熱負荷実験結果と比較検討することにより、破壊靭性などの機械的特性とパルス熱負荷 による損傷の関連性を調べた。

【結果】図2には、電子線後方散乱回折(EBSD)による IPF マップを示す。RD 面(ND-TD)は、圧延面に 垂直で、圧延方向に垂直な面である。この面では、左右方向(TD 方向)に結晶粒が広がっており、結晶粒 の大きは、数µmと小さいものがあるが横方向に広がった10µmを超える結晶粒も見られ、混粒の状態 であることがわかる。TD 面(ND-RD)も RD 面と同様に左右方向(RD 方向)に結晶粒が分布していること がわかる。一方、ND 面(TD-RD)では、比較的等方的な形状の結晶粒が多くみられ、サイズは、5µm程 度である。圧延方向である RD 方向への偏りは比較的少ないことがわかる。図3には、破壊靭性試験の ための予き裂導入時の側面に導入された各方位での予き裂を観察した結果を示す。TL 方位の試験片で は、予き裂は RD 方向であり、予き裂の写真にも見られるようにノッチ底から垂直に比較的直線的な予 き裂が導入される。また、圧縮疲労で導入された予き裂は 3PB 疲労により容易に伸延することができ、 ao/dc(ao:予き裂長、dc:繰り返し塑性域サイズ)の値では、5.5 程度まで伸延することができた。また、LT 方 位の試験片でも、写真にみられるようにノッチ底から垂直に比較的直線的な予き裂が導入されているが、 3PB 疲労による圧縮疲労で導入された予き裂の伸延では、容易に伸延することができず ao/dcの値では、 3 程度までに留まる。これらに反して、TS 方位および LS 方位の試験片では、ノッチ底から垂直に比較 的直線的な予き裂の導入は難しい。図3に示した TS 方位の試験片では、A 面および B 面共に、予き裂 が湾曲しており、特に B 面では、途中下方に比較的小さい予き裂が分岐していることがわかる。さらに、 LS 方位の試験片では、A 面では左下部からき裂が発生し、水平方向に伸延し途中で上方に進み湾曲して いる。また、B 面では最初は水平方向にき裂が発生するが、途中で上下に分岐していることがわかる。 TS および LS 方位の試験片では、圧延面に垂直にき裂が進展するため、直線状のき裂が形成しにくく、 き裂の湾曲や分岐が発生するものと考えられる。図4には、RD 面を表面とした試料にパルス熱負荷を

127

与えた後の表面の光学顕微鏡写真(リング照射と同軸照射のミックス照射)を示した。上下左右にき裂が 発生しており、き裂に囲まれた領域では表面の凹凸が形成されていることがわかる。左右方向のき裂は、 長く繋がっており、圧延面に平行であるため、組織を反映したき裂が形成されることがわかる。

【まとめ】電子線後方散乱回折(EBSD)を用いて方位の異なる3面の組織観察を行い、方位によるき裂進 展の挙動やパルス熱負荷実験結果と組織との関連を調べた。





図4 パルス熱負荷後の表面(RD 面)



図2 各面の IPF マップ



図3 各方位におけるき裂

### 構造材料の破壊特性に及ぼす内在水素の影響

# Influence of Inherent Hydrogen on Fractural Properties of 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、プラズマからの重水素やトリチウム等が材料内部に拡散するとともに、 材料製造時の大気環境やタングステン材料の還元熱処理により、内在水素が材料中に保持されている。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(タングステン材 料、低放射化フェライト鋼、ステンレス鋼等)の破壊特性(き裂発生やき裂進展等)が、材料中の内在水素 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、茨大の昇温脱離ガス分析装置(TDS) と、九大応力研のSEM・TEMの微細組織観察装置を共同研究に利用し、材料に関する豊富な知識と経験を共有 しながら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。本年度は、TDSによる内在水素の放出 特性と3,000回繰り返し溶接試験によるき裂特性の総合的評価を行った。

#### 2. 実験方法

#### 2.1 タングステン材料

本研究では、繊維状組織を有する未再結晶材の純タングステン(F)、ほぼ等軸状組織を有する再結晶材の 純タングステン(EA)、銅を約10%含有する銅タングステン(C10B2)、酸化セリウムを約1%添加したセリ ウム入りタングステン(CeW)の4種類のタングステン材料を試料として用いた。各材料は、粉末状のタン グステンをプレス成型、仮焼結、焼結した後、スウェージ加工によって製造されている。再結晶材の純タン グステン材料は、スウェージ加工後に、2,000℃の水素雰囲気中で熱処理されている。上記の4種類のタング ステン材料を用いて、昇温脱離ガス分析試験及び繰り返し溶接試験を実施した。

#### 2.2 昇温脱離ガス分析試験(TDS 試験)

TDS 試験では、超高真空中にて試料表面の水分を飛ばすために、予備加熱として 10℃/min の昇温速度で加熱して 100℃で 30 分保持した後、100℃/h の昇温速度で 450℃まで加熱し、試料から放出される水素ガスを測定した。TDS 試験後、室温まで冷却して再度同じ昇温速度で加熱し、放出される水素ガスを測定してバック グラウンドとし、放出総量から差引いた。

# 2.3 3,000 回繰り返し溶接試験

3,000 回繰り返し溶接試験では、0.5mm 厚のタフピッチ銅を2枚重ねた銅シート板を被接合材として、3,000 回までの繰り返し溶接試験を実施し、生じたき裂のき裂総長及び最大き裂幅の測定を行った。溶接条件は、 通電時間を 0.35s、加圧力を 180N とした。また、電流値は溶接時の電極と被溶接材の界面の温度が 813℃と なる値を予備実験で求め、その値を用いた。

#### 3. 実験結果

#### 3.1 昇温脱離ガス分析試験結果

各試料の総水素放出量を図1に示す。水素の全放出量を比較すると、F-topの放出量は EA-topの放出量の 約3倍である. EA は水素ガス中で熱処理されているが、その熱処理中の水素は材料中に侵入せず、再結晶に より加工時の転位や欠陥が消滅し、水素のトラップサイトが少なくなったものと考えられる。一方でFは製 造時のスウェージ加工により材料中に多数の転位や欠陥が存在し、それがトラップサイトとなり多量の残留 水素が存在したと考えられる。また、C10B2-topの水素放出量は EA-topと同様に小さい。これはタングステ ンの粒界に存在した残留水素が銅層を通り自然放出され残留水素が少なくなったものと考えられる。CeW-top の水素放出量は F-top と同様に大きい。これは粒界析出物や空孔に多量の水素がトラップされていたためと 考えられる。さらに、4 種類の材料のいずれに関しても、電極先端部(top)と比較して電極後端部(bottom) の水素の放出が極僅かである。電極の後端部は銅製の支持部に接合されており、銅と密着しているため、そ の銅材を通して内在水素が自然放出されたものと考えられる。

#### 3.2 3,000 回繰り返し溶接試験結果

3,000 回繰り返し溶接試験で電極に生じたき裂総長及び最大き裂幅を表1示す。同表には前述の総水素放 出量も示した。き裂総長は、EA 材が特に大きく、F と C10B2 と CeW 材がほぼ同程度に小さな値を示した。 また、最大き裂幅は、EA が特に大きく、他の3種類の材料はほぼ同程度に小さくなった。ここで、3,000 回 繰り返し溶接試験は、電極と被溶接材の界面の温度が一定となる条件で実施しており、電極の熱応力の分布 はほぼ同じであると考えられる。

#### 3.3破壊特性(き裂総長や最大き裂幅)と内在水素の関係

上述の結果を基にして、タングステン材料の破壊特性(き裂総長や最大き裂幅)と内在水素の関係を図2 に示す。EA 材はき裂総長や最大き裂幅が大きく水素放出量が少ない。C10B2 材はき裂総長や最大き裂幅が 小さく水素放出量が少ない。また、F 材と CeW 材はき裂総長や最大き裂幅が小さく水素放出量が比較的多 い。したがって、破壊しにくい特性を有し、内在水素量の少ない C10B2 材が、核融合炉用プラズマ対向材 料として有効であると考えられる。

#### 4. まとめ

4 種類の W 材料に対して、TDS による内在水素の測定及び 3,000 回繰り返し溶接試験を実施し、破壊特性 に及ぼす内在水素の影響を調査した。得られた結果を以下に示す。

(1) TDS による内在水素の測定の結果、EA 材と C10B2 材は水素放出量が少なく、F 材と CeW 材は水素放 出量が多かった。

(2) 3,000 回繰り返し溶接試験の結果、F 材と C10B2 材と CeW 材はき裂総長や最大き裂幅等が小さく、破壊しにくいことが明らかとなった。一方、EA 材は破壊しやすいことが分かった

したがって、銅含有タングステン材料(C10B2)は、内在水素量が少なく、破壊しにくいため、核融合炉用 プラズマ対向材料として有効であることが明らかとなった。

#### 参考文献

- (1) 車田亮,小野稜宙,伊藤吾朗,向江信悟,"スポット溶接用タングステン電極のき裂発生・進展挙動 に及ぼす加圧力および微細組織の影響",日本機械学会論文集,Vol.84,No.867,(2018),pp.1-7.
- (2) 近松宏洋,車田亮,伊藤吾朗,藤田貴弘, "スポット溶接用タングステン電極の耐久性の評価",日本機械学会関東支部 2019 年度茨城講演会講演論文集,No. 190-2, (2019. 8. 22), 0S4-(2), No. 409.
- (3) 近松宏洋,車田亮,伊藤吾朗,藤田貴弘,"タングステン電極の耐久性に及ぼす残留水素の影響", 日本機械学会関東支部 2020 年度茨城講演会講演論文集,No. 200-2, (2020. 8. 21), 0S4-(1), No. 404.



 
 Table 1 Total crack length, maximum crack width and total quantity of hydrogen desorption.

電極材料	EA	F	C10B2	CeW
き裂総長[mm]	9.9	3.1	2.9	1.4
最大き裂幅[µm]	22.0	7.0	6.0	6.3
水素放出量[massppm]	0.35	1.08	0.40	1.08



Fig. 2 Relationship between crack property and inherent hydrogen.

# Development of plasma-facing component using Supercritical fluid technology

New Industry Creation Hatchery Center, Tohoku University, SEONG Gimyeong

#### 1. Background and Purpose

Supercritical fluids are innovative reaction fields where unusual chemical reactions occur, so much interest and research have been conducted recently. In the case of using plasma-assisted supercritical fluids, a non-equilibrium reaction field, the active species produced by the plasma are supplied to the supercritical fluids having high density and high diffusivity. Thus, non-equilibrium materials can be obtained. These advantages enable the creation of high-performance nanomaterials. Their development is of great significance. In particular, composite materials that can withstand thousands of degrees of heat, such as tungsten alloys, are attracting attention in nuclear fusion and various fields, such as aerospace. However, many things could still be improved in plasma generation in a supercritical fluid environment, especially physical property diagnosis. More accurate analysis and control of the reaction field are deeply connected to creating new nanomaterials.

Therefore, this joint research aims at developing non-equilibrium materials and finding new possibilities for supercritical fluid plasma processes with the support of Research Institute for Applied Mechanics' advanced plasma physics research capabilities. In this study, the potential energy of the nanoparticles was calculated using molecular dynamics simulation, and stability was examined by analyzing the excess energy.

#### 2. Methods

Changes in properties such as the melting point of material are macroscopically seen as the mixing or synthesis of materials, but microscopically due to changes in particle arrangement or crystal structure. In this study, we paid attention to the placement of nanoparticles and the oxygen vacancies. In general, highly active nanoparticles are unstable [1]. However, it has been reported that the stability of nanoparticles of a few nanometers rapidly increases when they are gathered in a periodic arrangement [2]. In this study, nanoparticles with a size of several nanometers were first synthesized, and monodisperse particles and particles having a periodic sequence structure were compared and analyzed. In order to synthesize monodisperse particles, a flow-type reactor was used. Cr(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> and Ce(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> were used as precursors, and surface modification was applied to stabilize the surface of the nanoparticles (decanoic acid). The obtained particles were precipitated using ethanol, separated by centrifugation, and freezing dried [3]. A model for molecular dynamics (MD) was used to analyze the physical properties of metal-substituted CeO<sub>2</sub>. This study preferentially performed mixed tetravalent and trivalent CeO<sub>2</sub> models. The simulation engine is Fujitsu's SCIGRESS (v3.3) MD-ME. The force field potential for short range was used as the Buckingham potential [4].

#### 3. Results and Discussion

In previous research, it was confirmed that high-concentration Cr was stably substituted into the CeO<sub>2</sub> structure. In addition, the oxygen storage capacity increased as the chromium concentration increased. The actual Cr concentration was saturated at about 23 mol%. Here, the theoretical basis for the stable concentration of Cr-CeO<sub>2</sub> was investigated. Figure 1 shows the crystallization process of CeO<sub>2</sub>. An amorphous CeO<sub>2</sub> model was created using MD, and CeO<sub>2</sub> nanoparticles were made during crystallization while cooling. The oxidation degree (number of Ce<sup>3+</sup>) of CeO<sub>2</sub> was controlled and compared. The picture is a particle model in a room temperature state obtained through this process. The region where the potential energy changes rapidly are where the phase transition occurs, and this temperature becomes the melting point. Since the temperature change occurs in less than ns in MD, the same effect as the quenching process, the calculated m.p. is 30–40 % higher than the reference melting point. Therefore, trend interpretation is more important than absolute values.

In the particle models,  $Ce^{3+}$  exposed to the surface increased as the oxidation degree of Ce increased from tetravalent to trivalent. This is because higher energy is distributed in the edge of the particles, and the oxygen can be actively adsorbed or desorbed according to the redox conditions. As the oxygen vacancies increase, the particles expand and show a maximum value of around 75%. At Ce<sup>3+</sup> 100%, it shows an entirely different particle state (Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Next, comparing the melting points, an overall shift to lower temperatures is confirmed as the Ce<sup>3+</sup> increases. In addition, potential energy drops near m.p. gradually



Figure 1 The crystallization of  $CeO_2$  with different degrees of oxidation, the pictures on the right show the particles at 298K. Yellow is  $Ce^{4+}$ , gray is  $Ce^{3+}$ , and red is  $O^{2-}$ . All samples are calculated with net charge zero condition.

decrease, showing a relatively easy phase transition. This phenomenon is directly related to the oxidation state and stability of nanoparticles, which is essential information to understand.

#### 4. Summary and Conclusion

As part of basic research on non-equilibrium materials, the structural properties of nanoparticles were studied using MD. The stability of the particles was evaluated according to oxygen vacancies, that is, the degree of oxidation of cerium. The crystallization and calculated properties showed good agreement with the references, and other relevant information are sufficiently provided. This theoretical approach can be a potent tool in this study and we plan to investigate other type of materials by adding other metal species.

#### **Research Organization**

Tohoku University New Industry Creation Hatchery Center: SEONG Gimyeong (representative); Kyushu University: MOON Chanho (caretaker)

#### Acknowledgement

This work was supported in part by the Collaborative Research Program of Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University (2022CR-FP-7) and was supported by JSPS KAKENHI Grant Number JP21K04763.

#### References

- [1] R. A. Andrievski, J Mater Sci., 2014, 49, 1449-1460.
- [2] T. Takashi and M. Tetsuro, NPG Asia Materials, 2014, 6, e100.
- [3] Y. Zhu.et al., ACS Appl. Energy Mater. 2020, 3, 4305–4319.
- [4] JPA de Mendonça et al, Mater. Adv. 2021, 2, 7759–7772.

# PLAT0 トカマクにおける周辺乱流密度揺動の計測のためのガス パフイメージング計測装置の開発

# 核融合科学研究所 小林達哉

# 1. 研究目的

周辺のプラズマ乱流分布は、閉じ込め領域だけでなくその外側のスクレイプ オフ層(SOL)を含む広い領域で決定されることが知られている。異なる磁場トポ ロジーをまたぐ領域における乱流のモデル化は開放系における複雑な物理現象 を理解する上で有意義な課題である。これを検証するためには、周辺およびスク レイプオフ層での乱流揺動を、同時多点計測する必要がある。本研究では、詳細 なプラズマ乱流物理研究が可能な小型トカマク装置 PLATO に於いて、新規にガ スパフイメージング計測装置を導入し、乱流計測を行うことを目的とする。

# 2. 研究結果

ガスパフイメージングに使用するためのガス入射ノズル並びにバッファタン ク系統の設計をおこなった。図1にガスパフイメージング計測用ガス入射装置 の設計図を示す。再現性の良いガス入射を可能にするため、高圧バッファータ ンクおよびソレノイドバルブを用いる。ノズルはシートガスビームを入射でき るよう、シャワー状ノズル[1]とする。噴射口は孔径と孔深さの比が30倍にな るよう設計することで、立体角の小さなガス噴射となるようにする。バッファ タンクはコイルやサポートと干渉しないようL字アングルでポートと水平に設 置する。バッファタンク及びノズルのサポートは四角ポートからのみ取るよう にし、真空容器の大幅な改造を避ける。



図1. ガスパフイメージング計測用ガス入射装置の設計図。

# 3. まとめ

小型トカマク装置 PLATO に導入するための、ガスパフイメージング計測装置の概略設計を行った。来年度は、実機の作成と計測器への導入を行う。

# 研究組織

文 贊鎬 (九大応力研)、西澤敬之 (九大応力研)、藤澤彰英 (九大応力研)

# 参考文献

[1] I. Shesterikov et al., Rev. Sci. Instrum. 84 053501 (2013)

# 基礎実験によるプラズマカオス制御の検討

# 九州大学総合理工学研究院 寺坂健一郎

### 目的

時系列データはしばしばカオス的振る舞いを示す.このカオス的振る舞いを制御するカ オス制御に関する研究が進められている.例えば,系に固有な周期を持つ外部摂動により 時系列データをフィードバック制御する方法が試みられている.本研究では,このカオス 制御の観点からプラズマの非線形的振る舞いを制御することを目的としている.

プラズマ乱流では乱流成分とコヒーレントな波や非線形構造が共存する状態がしばしば 観測される. 直線装置 PANTA (九州大学応用力学研究所) においてもドリフト波を代表す る様々な揺動や帯状流などの非線形構造が励起されている. 特に非線形構造の制御は核融 合炉心プラズマの性能向上に不可欠であり, その制御方の確立が求められている. 本共同 研究では, このようなプラズマ乱流や非線形構造の制御にカオス制御の観点から挑戦する ためにカオス状態を再現する新プラズマ装置の開発と, 実際の乱れたプラズマへの制御法 の適用を目指した時系列解析を行った.

# 結果

図1に本共同研究で使用する実験装置を示す.図1(左)は新しく構築した直流プラズマ装置で、カオス状態を放電電流で高精度に制御することが出来る.本装置にはプラズマからの発光を計測するためのフォトダイオードが設置されており、これを参照信号とするフィードバック制御が可能となっている (フィードバック信号は放電電流および磁場印加のためのコイルに送られる仕組みとなっている).本実験では、実データを用いたカオス制御に対して有効な手法であるピラガス法[1]を採用している.図2は九州大学応用力学研究所のPANTA装置であり、装置中では様々な非線形現象や乱流状態が観測されている.本研究で



図 1. カオス制御の原理実 証を行う直流プラズマ装置 (左)と、プラズマの乱流状 態や非線形構造形成現象が 観測されている九州大学の PANTA 装置 (右). は直流プラズマ装置で開発したフィードバック システムをPANTA装置に将来的に適用するこ とを目指し、フィードバックに対する最適化条 件や制御パラメーターに対する自由度に関する 基礎実験を実施した.

図2に直流プラズマ装置におけるプラズマか らの発光の時系列データとその自己相関係数を 示す.放電電流に対するフィードバック制御を 行い,フィードバック信号の位相(時間遅れ) および振幅を適切に選ぶことで,長時間にわた りプラズマを安定化できることが確認できた. また,印加磁場を用いた初期実験も行い,交流 磁場に対してプラズマが応答を示し,カオス状 態の周波数スペクトルが質的に変化する様子も 観測された.



図 2. フィードバック制御時の(左)時系列 信号と(右)自己相関係数:

上段:フィードバックなし (自発的揺動) 中段:フィードバックあり,良い制御状態 下段:フィードバックあり,悪い制御状態

本年度は、新装置の開発と並行してPANTA装置の時系列解析を行った.静電プローブの 浮遊電位信号データを用いた時系列解析から、ある放電条件では正のリアプノフ指数を持 つカオス的な振る舞いを持つことが明らかとなった.本研究で実装しているフィードバッ ク方法は物理の素過程に依存しないロバストな手法である.したがって、直流プラズマで 開発したフィードバック法を上手く応用することで、将来的にはPANTAでのプラズマ制御 実験が可能であると考えられる.

# まとめと今後の展望

カオス制御に関する原理を確認するための直流プラズマ装置を新しく構築し、本装置中 で様々なカオス状態 (弱いカオスや強いカオス状態)を放電パラメーターで制御すること が可能であることを確認した. 今後は、PANTAで観測されたカオス状のプラズマに対して フィードバック制御を行い、輸送特性に対する影響を調べる予定である. 今年度得られた 結果は2022年度のプラズマ・核融合学会年会で報告済みである[2].

また,共同研究者である長崎大学教育学部の福山博士との議論において,カオスプラズ マを用いた演示実験教材の開発に関しても指針を得た.本共同研究は,プラズマ科学分野 の発展のみならず教育分野との分野融合的展開においても有益なものであった.

[1] K. Pyragas, Phys. Lett. A 170, 421 (1992).

[2] 寺坂健一郎, 小菅佑輔, 福山隆雄, 第39回 プラズマ・核融合学会 年会, 22P11 (2022).

# 中性子照射原子力材料の高分解能 STEM-EDS 実現のための手法開発

東北大学 嶋田雄介

#### 1. 目的

原子力材料は中性子照射下の過酷環境に曝されることで、材料内部に特異な微細組織を形成することが知られている。本課題では、特に結晶粒界や転位と照射欠陥の相互作用を理解するため、エネルギー分散型 X線分光法(EDS)計測時の球面収差補正走査透過電子顕微鏡法(STEM)のレンズ条件および撮影手順を最適化し、より高い分解能(例えば元素カラム分解能)と高い再現性で微細組織のひずみと化学組成を同時評価する顕微手法を開発することを目的としている。さらには、本解析手法開発の実現後には、実材料として中性子照射された圧力容器鋼中の照射欠陥ならびに転位周辺の元素分析を行うことで、ひずみ周りの特定元素偏析などの解析を試みる。そのなかで、2021年度は低合金鋼を用いて不可逆的な実験である TEM 内その場加熱観察の条件探索を行った。2022年度は大洗センターから持参予定の特殊ホルダーについての輸送による性能変化チェックを行ったほか、実験では我々のターゲットとする材料である次世代炉用鋼材(F82H鋼)を用いて、高分解能での解析を実施するために必要な照射影響組織、特に転位ならびに照射欠陥集合体の焼鈍中における挙動解析を行った。

#### 2. 実験方法

本研究課題は大洗センターと応力研問の拠点を越えた連続的な組織解析により目的の達成を試みている。 今年度は試料として F82H 鋼(中性子照射量:9.2×10<sup>23</sup> n/m<sup>2</sup>)を用いて、その場加熱 WB-STEM 観察を実施し、 転位ならびに照射欠陥集合体についてその挙動の解析を行った。実験は大洗センターにて、応力研の収差補 正 STEM 装置と同型機(ARM-200F:日本電子製)において実際に持ち込み予定の特殊ホルダー(日本電子製) を用いて、代表者および協力者の吉田准教授ならびに九大世話人の渡邉准教授と適宜打ち合わせながら遂行 した。本特殊ホルダーは我々のグループが独自開発したカートリッジ式のもので、試料傾斜機構を含む先端部 をそのまま取り外し、応力研をはじめ、試料をセットした状態で外部にL型輸送が可能であることが特徴である。

まず観察試料の準備として、試料の電子線に対する磁性影響を抑制するため、試料を FIB マイクロサンプリングにより 20µm までの微小サイズに加工した。この効果は、FIB 試料を用いた高分解能 TEM 観察などから確認している。次に、本課題に適した転位組織観察手法として WB-STEM 観察を採用し、EDS 計測のために最適となる試料傾斜範囲(X 軸傾斜で約 10 度)において電子線入射条件を調整し、その近傍に分布する照射欠陥のその場加熱観察を行った。

#### 3. 実験結果および考察

室温、300℃、400℃、450℃、475℃、500℃、525℃で 30 分の等温焼鈍を実施した瞬間の暗視野 WB-STEM 像観察を行った結果、照射欠陥集合体の数密度を評価すると焼鈍温度の上昇に伴い、照射欠陥密度が減少 することが確認された。注目すべきは、減少が始まる温度が 475℃と比較的高温であることである。これは、F82H 鋼では、Cr や W、Ta などの添加元素の効果によって、直径 6-7nm 程度の小さな照射欠陥集合体が安定となり、 従来の低合金鋼に比べて 75℃以上も熱緩和温度が高まったことを実空間で証明しているといえる。

図1に、500℃での等温その場焼鈍試験中に撮影された明視野 WB-STEM 動画からのキャプチャー像を示

す。矢印で示される粒状の照射欠陥集合体の消失が確認された。その特徴は、1次元運動というよりは"溶解"と 考えられる変形であった。つまり、転位ループ自体のすべり運動よりもより小さな原子スケールの拡散と格子緩 和によって、照射欠陥集合体の変形が起きていることを示している。この現象は、転位や粒界・表面近傍の照射 欠陥集合体が選択的に消失していることを説明するものである。

以上の結果から、今後本課題においてはこれら"溶解"を起こす転位や粒界近傍の照射欠陥集合体に注目し、 加熱前後にて高分解能 EDS 分析を試みる必要があることが示唆された。



図 1 F82H 鋼の 500℃その場加熱 WB-STEM 明視野観察動画キャプチャー像。 図右上にキャプチャーした時間を示す。 図中丸は同一の転位、四角は照射欠陥集合体を示す。 矢印は、これら照射欠陥集合体の消失直前であることを示している。

# ランジュバン系を用いたプラズマ中の非線形現象のモデリング

Langevin modeling of nonlinear phenomena in plasmas

### 富山大学・学術研究部・教育学系 成行 泰裕

# 研究目的:

プラズマ中の非線形現象はスケール間結合を伴っているものが多いが、磁気流体スケ ールの現象の理解においては、イオン・電子スケールのミクロな現象に対して何らかの近似 や平均操作を用いた記述が必要になる。このことは、大規模な運動論シミュレーションが可 能になった今でも本質的には変わっておらず、実験室プラズマと宇宙・天体プラズマ双方に 共通した課題である。本研究課題は、ランジュバン系を用いた解析を通じてプラズマ中の非 線形現象を新しい視点から記述すること、およびそれを踏まえて実験室プラズマと宇宙・天 体プラズマの新しい接点を探索するための新しい実験の提案や新規の実験データの解析 法などを提案することを目的としている。

# 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解析・数値計算・実験/ データ解析について発展させた結果について、定期的に議論を行うことを基本としている。

# 研究成果:

昨年度は電子スケールの運動について議論したが、本年度はイオンスケールの運動 について、ランジュバン系を用いた議論を行った。Milovanov et al(2021)において staircase が存在する場合の微視的輸送のモデルとして非整数階フォッカー・プランク方程式(Levy ノ イズ)が適用されていたが、一般的に非整数階フォッカー・プランク方程式の物理的解釈は 難しい。そこで本研究では、定常解としてカッパ分布を持つ整数階フォッカー・プランク方程 式を代替モデルとして考えた。

非整数階フォッカー・プランク方程式の定常解とカッパ分布はよく似た分布であり、比較 等もすでに行われている[e.g., Tawfik and Elkamash, 2022]。一方で、定常分布としてカッパ 分布を与えるフォッカー・プランク方程式には拡散係数が変数の二乗に依存するモデルが 古くから知られている[e.g., Hasegawa et al, 1985]が、一意的に決まるモデルではない。そこ で本研究では少し異なる別のモデル[e.g. Sakaguchi,2001]を用いて、従来のモデルとの比 較を行った。フォッカー・プランク方程式に対応する Langevin 系を Stratonovich 型で表記し た場合、前者では確率項由来のドリフト項が存在するのに対し、後者は係数ノイズ(乗法ノイ ズ)由来のドリフト項を含まない。このことは、ミクロな非線形性に起因して非ガウス分布をもた らすランダム力がブラウン運動粒子に付加されていると考える場合は、モデル化としては後 者の方が適切であることを示唆している。また、これらのモデルではカッパ分布の指数 κ をド リフト項および拡散項の係数を用いて表すことができるが、後者のモデルの方がより広いパ ラメータ範囲において有限の2次モーメントを与えることが分かった。

Milovanov et al(2021)では実空間中の輸送が議論されているが、カッパ分布は宇宙プ ラズマでも粒子速度分布・エネルギー分布のモデル化に広く用いられている[e.g., Verscharen et al, 2019]。また、このような所望の粒子分布に対する確率モデルの不定性はレ ーザープラズマなどでも既に指摘されており[e.g., Liu, 2017]、本研究ではこれに関係するモ デルの一般化も行った。今後は、実験室・宇宙それぞれのプラズマにおける各スケール (MHD・イオン・電子)の確率モデルの比較を進める予定である。

# 公表状況:

Y. Nariyuki, M. Sasaki, T. Hada, On validity of quasi-linear theory for non-resonant pitch-angle diffusion by finite amplitude parallel propagating Alfven waves, Physics of Plasmas, 29, 3, 034501 (2022).

# 研究組織:

成行泰裕(富大)、佐々木真(日大)、加藤雄人(東北大)、川面洋平(東北大)、諌山翔伍 (九大)、羽田亨(九大)、稲垣滋(京大)、小菅佑輔(九大)

# プラズマに対向した堆積層の動的水素リテンションに関する研究

京都大学大学院工学研究科 高木郁二

#### 1. 目的

プラズマ対向壁表面に吸着した水素原子が放出される過程は、大別すると4種類ある。それぞれの過 程における速度定数を温度依存性を含めて把握することは、表面からの水素放出量や放電洗浄によるト リチウムの除染効率などを評価するうえで必要である。本研究では、発熱的に水素を吸収する金属の代 表であるバナジウムについて、表面からの水素放出を支配する過程を実験的に調べた。

#### 2. 実験方法

試料は Johnson Matthey 社のバナジウム板で厚さは 0.254 mm、純度は99.5%である。耐水研磨紙と粒径0.05 μm アルミナ粉で研磨し、エタノールで超音波洗浄した 後に図1に示す分析チャンバーに装着した。試料の片面 を重水素プラズマ、水素プラズマまたは真空に曝し続け た状態で1.3MeV に加速した<sup>3</sup>He+イオンビームを照射 し、試料中の重水素の深さ方向分布を核反応法によって 測定した。試料の温度は室温、500 K 及び 600 K であ る。

#### 3. 実験結果

水素や重水素は表面とバルクに分布してお り、測定した深さ方向分布から、それぞれ、重 水素の面密度と平均濃度を求めた。

代表的な例として、試料温度を 500 K に保 ち、最初に水素プラズマに暴露した場合の重水 素面密度の変化を図2に示す。最初の水素プラ ズマ暴露中は重水素は存在していないので、次 の重水素プラズマに暴露したときから測定を 開始した(図中 D-H)。重水素面密度は急激に増 加して一定の値を示し、再び水素プラズマに暴 露すると(図中 H-D)、急激に減少したがゼロに はならず、最後に真空で放置した場合は緩やか に減少した。他の温度においても同様の傾向が



図1 実験チャンバーの概要



図 2 500K で H を先行して暴露した場合の重水素 面密度

みられ、温度が低い方が D-H 時の定常状態における面密度は大きくなることが分かった。H-D におい て重水素面密度がゼロにならなかったのは重水素が強くトラップされて水素と置換され難いためと考 えられる。

次に、試料温度 500 K で最初の重水素プラズマを暴露した場合の重水素面密度を図3に示す。面密度の増減傾向は最初に水素プラズマに曝した図2と同じである。2回目の重水素プラズマ暴露時(図中 D-H)に、面密度の値が最初の Dup での値に到達しなかったことは、前述したトラップに水素が重水素よりも深く捕捉されていることを示唆している。

#### 4. 考察

固体表面からの水素の放出過程は、大別すると次の4つに分類できる。

- (1) 表面に吸着している水素原子同士が再結合し放出される表面再結合
- (2) バルク中の水素が表面に吸着している水素と結合し放出されるバルク再結合
- (3) 表面に吸着している水素が入射してくる水素と入れ替わって放出される置換反射
- (4) 表面に吸着している水素が入射してくる水素と結合して放出される結合反射

(2)以下は本報告における仮の呼称である。 一般に知られている Pick [1]のモデルに(3) と(4)の過程を追加したモデルを作成したと ころ、変数は18であり、温度依存性を考慮す ると更に2倍近くにもなった。これに対し、面 密度以外にバルクの重水素平均濃度も測定し ていること、非定常状態で測定できたこと、速 度定数はアレニウス型の式で表されると仮定 するなどの条件を設けることによって、測定 値をできるだけ少ない変数でフィッティング した。フィッティング曲線をデータに重ねて 図2と図3に示す。

上記解析の結果、(2)と(3)の過程は無 視しても実験データを再現できることから、



図3 500KでDを先行して暴露した場合の重水素面 密度

(1)の表面再結合と(4)の結合反射が主な過程であることがわかった。(2)はバルクから表面にジャンプした水素原子が、表面に吸着している水素原子と同期して再結合する現象であるので、他の現象に較べて起こる数が十分少ないことは妥当である。また、(3)はいわゆる衝撃脱離過程の一つであり、通常は数 100 eV 以上のエネルギーを持つ粒子が起こす現象であるので、本研究のような数 eV 程度の プラズマから入射する水素では起こりにくいと思われる。

(4)の過程は温度依存性がほとんどないことから、熱活性化過程ではなく非熱的過程であると考えられる。物理的な衝突によって結合反射が起こると仮定して推定すると、その反応断面積は100 pm<sup>2</sup>のオーダーであった。この値は水素原子のボーア半径から求めた幾何学的な断面積の1%程度であるので、 衝突が起こっても大半の水素は反応しないことが示唆された。

(1)と(4)を比較すると、試料温度が室温の場合は(1)はほとんどおこらず、650Kという高 温においても比較的少なかった。バナジウムは水素を発熱的に吸収する金属であり、放出に対する活性 化エネルギーが高い、つまり熱活性化過程による水素放出が起こりにくいことが理由と考えられる。

#### 参考文献

[1] M. A. Pick et al., J. Nucl. Mater., 131 (1985) 208-220.

#### 研究成果

なし

#### 研究組織

高木郁二	京都大学大学院工学研究科	教授
花田和明	九州大学応用力学研究所	教授
市川祐大	京都大学大学院工学研究科	修士2年
齋藤 巧	京都大学大学院工学研究科	修士2年
	高木郁二 花田和明 市川祐大 齋藤 巧	高木郁二     京都大学大学院工学研究科       花田和明     九州大学応用力学研究所       市川祐大     京都大学大学院工学研究科       齋藤     巧     京都大学大学院工学研究科

トモグラフィ計測を用いた磁化プラズマ乱流の 3 次元波数スペクトル計測

広島大学 先進理工系科学研究科 山崎 広太郎

本研究では直線磁化プラズマ装置 PANTA においてトモグラフィを用いて磁化プラズマ乱流の 3 次 元波数スペクトル計測を行う.近年,密度勾配と速度シア両方からエネルギーを受け取る揺動の存在が 示唆されており,この揺動とドリフト波が径方向位置の異なる場所で同時に生じることがシミュレーシ ョン結果から明らかになった(M. Sasaki, et al., PoP (2017)).この研究結果は,プラズマ断面全体にわた る乱流輸送の理解を深める上で径方向各位置において揺動を分類することが必要であることを示唆し ている.トモグラフィ計測を用いれば磁化プラズマ乱流の波数をプラズマ断面内全体で取得する事がで き,揺動の種類を特徴づけることができる.本研究を遂行し3次元波数スペクトルの径方向分布を取得 できれば,種類の異なる揺動同士の競合や共存を実験的に明らかにできる.

本研究ではトモグラフィを用いて乱流の波数を径方向各位置で計測可能にするために(1)トモグラフィの投影行列の計測 および (2)トモグラフィの空間分解能を推定する手法の開発 を行った.

(1) トモグラフィの投影行列の計測

トモグラフィに用いる投影行列は、観測領域内の空間点における物理量と計測データの写像関係 を与える表現行列である.本研究で扱うプラズマ乱流計測トモグラフィでは、観測領域で発せられ たアルゴンイオンの発光分布を入力として受け取り、その際に得られる視線積分発光量データを出 力する写像を表す表現行列と考えることができる.本研究で扱うトモグラフィシステムの投影行列 を実験的に取得するために、トモグラフィ計測領域に垂直に挿入した直径4mmの冷陰極管から生 じる発光の視線積分発光量データを取得した.冷陰極管はアクチュエータを用いて5 µm 程度の位 置精度で挿入位置を制御した.トモグラフィの計測領域全体に冷陰極管を移動させその都度視線積 分発光量を取得することで投影行列の各要素のデータを得ることができる.得られた投影行列を用 いてアルゴンプラズマの発光量分布を再構成したところ、これまで数値計算を用いて作成した投影 行列を使用した場合に比べてなめらかな発光量分布が得られた.

(2) トモグラフィの空間分解能を推定する手法の開発

トモグラフィ再構成で得られる空間分解能を評価するために,投影行列の写像の性質に着目した. 投影行列は観測領域の発光分布を視線積分発光量に変換する行列であることから,トモグラフィで 得られる再構成画像を表現する基底の数は投影行列が表す写像の像空間の次元と一致すると考えた. 投影行列のランク(Nr)を数値的に取得するために Bi-Cross Validation(BiCV)と呼ばれる手法を用い, 投影行列の次元が 54 程度であることが明らかになった.

トモグラフィの空間分解能を評価するために観測領域の各ピクセルに点光源を与えたときに得ら れる視線積分発光量データの線形独立性を評価した.得られた視線積分発光量データをベクトルと 考え,異なる位置においた点光源から得られた視線積分発光量ベクトルの内積の値を用いて各ピク セルの線形独立性を評価した.あるピクセルを基準に選んだときに線形独立であると評価できる 54 個のピクセルを選択することで空間分解能を評価する.この手法を用いることで,観測領域全体にお いて平均的に 1cm 程度の空間分解能があることが判明した.また,視線積分発光量を計測するコリ メータ近傍では空間分解能が高く,コリメータから離れると空間分解能が低下することが判明した.

# 高温下にて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

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 における圧損や透過によるトリチウム漏洩の抑制は大きな課題となっている。その対策としてブランケ ット部材への酸化物被覆が広く検討されており、酸化物被覆層における中性子照射効果は先進ブランケ ット設計において大変重要な検討項目である。しかしながら、現状の日本では中性子照射実験は困難な 状況である一方で、重イオン照射は損傷領域が限定されるものの短時間で大きな照射量が期待できるた めに中性子照射の加速試験に相当する。故に、イオン照射は中性子照射を外挿的に検討することが可能

であり、九州大学応用力学研究所に設置されている重イオン 照射システムに使用した照射実験は中性子照射効果を外挿 するには非常に有益な装置になる。これまで、先進ブランケ ット部材として期待される高機能酸化物被覆について共同 研究にて、Fig.1 に示すように室温下での重イオン照射によっ て金属基板と酸化物被覆の界面に非晶質相(アモルファス) が生成することを見出し、そして非晶質相の生成によって被 覆層の剥離強度は照射量に応じて低下することを見出した<sup>1)</sup>。

そこで、本研究では、これまでと比較してより核融合実環 境を意識した照射効果を検討するするために、高温下でのイ オン照射を実施し、イオン照射後の微細組織における試料温 度の影響について明らかにする。



Fig. 1 室温下での 1.5 dpa の Cu<sup>2+</sup>イオン照 射損傷を受けた Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SUS 二重被覆断 面における STEM 像

### 2. 実験方法

Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SUS316 二重被覆材は核融合研の MOCVD 装置にて成膜された。 一般的に、MOCVD での被覆層の生成はエピタキシャル成長によって促され ることが知られており、被覆層の成長方位は基板の格子定数や結晶方位の 影響を受ける。Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 結晶の格子定数は Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 結晶の格子定数とほぼ同等であ るために、Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 被覆を中間層として成膜することで Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 被覆相の結晶配向 性が向上し緻密な微細組織が得られる。本研究では、直径 10 mm、厚さ 1 mm の SUS316 基板上に中間層を Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> とした Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 二重被覆を成膜し、その 成膜条件は 500 ℃の 3 時間とした。なお、Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 及び Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 被覆層の厚さは それぞれ約 300 nm 及び約 500nm 程度であると確認した。Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SUS316 被覆材を九州大学応用力学研究所のタンデム型イオン加速器にて成膜表面



Fig. 2 高温下での照射ホル ダー
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 Cu<sup>2+</sup>イオンとした。イオンビーム 照射前に TRIM コードにて Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SUS316 二重被覆における照射損傷速度を計算した。本研究におけ る高温下での Cu<sup>2+</sup>イオン照射量は、TRIM コードにて算出された Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 酸化物層における照射レート (0.12 ×10<sup>-4</sup> dpa/sec)を参考に、Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 被覆層で 1.5dpa 相当とした。また、試料温度を 500°Cに設定した。試 料温度は Fig.2 に示すような試料ホルダーにセットアップし、試料ホルダーの Cu ブロック部材内のヒー ターにて Cu ブロック部材を加熱し、熱伝導にて Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SUS316 二重被覆試料の基板側から熱伝導に て加熱した。

Cu<sup>2+</sup>イオン照射前後の Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SUS316 二重被覆試料における微細構造の観察は、集束イオンビーム 加工(FIB)による薄片化試料の酸化物層/SUS316 基板界面を中心に走査型透過電子顕微鏡(STEM)を用 いて実施した。

#### 3. 結果と考察

Fig. 3に Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SUS316二重被覆試料断面における室温 での Cu²+イオン照射後の元素分布を示す ¹)。 Fig.1 で示したよ うに、イオン照射後の Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 中間層/SUS 基板界面において非 晶質化が促進されていることが明らかになっている。EDX に よる元素分布解析においても Fig.1 の解析を支持する元素分 布が示された。特に、非晶質化が促進された領域では、Fe と酸素の元素分布とがほぼ一致していることから、界面には 非晶質の Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 中間層から Y が微量拡散した Fe 酸化物が生成 しているものと考えられる。Fe 酸化物の Fe 源は、SUS316 基 板からの Fe 成分であり、イオン照射による弾き出し現象に て析出したものと考えている。今回、Er2O3 被覆層にて 1.5dpa の照射量であるが、これは SUS316 基板では約4倍の 6.0dpa に相当し、界面では弾き出しによる元素拡散が促進されたた めと考えられる Fig.4 に Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SUS316 二重被覆試料断面 における試料温度 500℃での Cu<sup>2+</sup>イオン照射後の元素分布を 示す。Fig.3 と比較して、界面付近にて Fe 成分の濃化と一部 Cr の分布が観察された。これにより、500℃いう温度にて、 イオン照射による Fe 及び Cr 原子の弾き出し現象が促進され ていることが示唆された。また一方で、界面での酸素の分布 が大きく異なり、酸素の分布が確認されなかった。酸素成分 の変化は注目できるもので、300℃と中温度での照射試料と の比較をする必要がある。



Fig. 3 室温での 1.5 dpa の Cu<sup>2+</sup>イオン照射後 の Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SUS316 二重被覆試料断面にお ける元素分布<sup>1)</sup>



Fig. 4 試料温度 500℃での 1.5 dpa の Cu<sup>2+</sup>イ オン照射後の Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SUS316 二重被覆試 料断面における元素分布

1) Y. Hishinuma et al, Nuclear materials and energy, 16, 2018, 123-127.

フッ化物溶融塩からの水素同位体脱離挙動に関する研究

九州大学大学院総合理工学研究院 片山一成

## 【緒言】

太陽熱発電プラント、溶融塩原子炉、高温水素製造システムなどエネルギー利用分野において、高温熱媒体であ る溶融塩の幅広い適用が期待されている。一般に、溶融塩は種々の金属に対する溶解性能が高く、分離抽出操作や、 金属被覆技術へも利用されている。大量の溶融塩を用いたシステムの実用化には、高温溶融塩循環技術の確立が必 要であり、システムを構成する各機器の開発が望まれている。リチウムを含むフッ化物溶融塩を冷却材として用い る溶融塩炉では、リチウムと中性子との核変換反応によりトリチウムが生成される。トリチウムの一部はフッ素と 結合し、腐食性の強いフッ化水素として脱離するため、その挙動を把握して制御する必要がある。また、溶融塩へ の水素溶解度が低いことから、生成されたトリチウムの一部が金属配管を透過して外部に漏洩することが懸念さ れる。さらに、溶融塩は製造過程で水蒸気を取り込む可能性があり、不純物として残留する水蒸気との同位体交換 反応を通じて、トリチウムが水蒸気状で滞留する可能性も考えられる。移動性の高い放射性物質であるトリチウム の安全管理には、溶融塩から放出されるトリチウムの化学形を把握しておく必要がある。実効的な水素溶解度を高 めて、トリチウムの透過漏洩量を低減するために、溶融塩にチタン等の水素吸蔵材料を添加する方法が提案されて いる[1]。先行研究では、チタン(Ti)添加溶融塩に対して、水素含有ガスの吹込みにより、その有効性が示されてい る[2]。しかしながら、核変換反応により溶融塩中に生成されたトリチウムに対するチタン添加の効果や、トリチウ ム放出化学形への影響についての理解は十分ではない。昨年度の共同研究では、フッ化物溶融塩 FLiNaK を試料と し、京都大学研究用原子炉にて中性子照射を行い、溶融塩中にトリチウムを生成させた。その後、九州大学におい て、照射試料を加熱し放出されるトリチウムの挙動を観測した。試料封入管の破損により空気接触した FLiNaK か らは、トリチウムのほとんどが水蒸気状(HTO)で放出され、フッ化水素状(TF)、水素状(HT)の放出量はごく わずかであった。一方、空気接触していないFLiNaKからのトリチウム放出では、水素状が 70%、水蒸気状が 25%、 フッ化水素状が 5%であった[3]。吸湿性である溶融塩からのトリチウム脱離挙動の理解を深めるためには、 溶融塩からの水蒸気の放出挙動を把握することが重要である。そこで本研究では、FLiNaBe 及び FLiNaK か らの水蒸気放出挙動を観測した。

## 【実験方法】

アルゴン(Ar) 雰囲気に制御されたグローボックス中において、FLiNaBeの原材料であるLiF、NaF、BeF 粉末を 混合調整し、Ni 製るつぼに入れ十分混合した。Ni 製るつぼを SUS304 製ポットに設置し、ガス給排気ポート及び

熱電対挿入ポートが備えられたフランジで密封した。 グローブボックスから取り出し、ポットを覆うように フレキシブルヒーターを巻き付けて、Ar ガスでバブ リングしながら、600℃まで昇温し、一定時間温度を 保持した。その後自然放熱し、常温に戻した。自然放 熱開始後の溶融塩温度の経時変化を観測し、温度降下 の過程でFLiNaBeの融点である約305℃においてプラ トー領域があらわれることを確認した。プラトー領域 は、液相から固相への相変態が生じていることを示 す。水素吸蔵金属の添加による水蒸気放出挙動への影 響を調べるため、一部の試料には、5.0wt%で Ti 粉末 を添加した。同様にして、Ar 雰囲気グローブボックス 中において、LiF、NaF、KF 粉末を Ni 製るつぼ内で混 合調整し、Ar バブリングしながら 600℃まで加熱し、 FLiNaK を作製した。

作製した FLiNaBe および FLiNaK 試料をそれぞれ Ni 製るつぼから取り出し、小片状にして約 1g ずつモリブ デン(Mo)るつぼに再充填し、これを片封じ石英管 (内径 30 mm, 外径 34mm, 長さ 200 mm) に設置した。実験装 置概略図を図 1 に示す。試料が設置された石英管内を



図1 トリチウム放出実験装置概略図

図2 実験条件

試料	FLiNaBe, FLiNaBe with 5wt%Ti
	FLiNaK
質量 [g]	1.0
ガス流量 [cc/min]	475
パージガス	Ar
加熱温度 [℃]	600

Ar ガスでパージしながら、電気炉を用いて 600℃まで加熱した。熱電対は、Mo るつぼに接触するように設置した。出ロガス中の水蒸気濃度は、水分計(島津製作所製 MAH-50)を用いて連続測定した。試料から腐食性の HF が放出される可能性があるため、反応管出口には、2 連の水バブラーを設置しこれを回収した。

## 【結果及び考察】

図2にFLiNaBeからの水蒸気放出挙動を示す。昇温開始後、 300℃付近で放出ピークが観測され、その後緩やかに放出量が 減少した。FLiNaBeの融点が305℃程度であることから、溶融 塩の溶融とともに多くの水蒸気が放出されたと考えられる。図 3 に 5.0wt%Ti 混合 FLiNaBe からの水蒸気放出挙動を示す。Ti 添加無し FLiNaBe と比較すると、放出ピーク位置はほぼ同じで あるが、放出量に違いが見られた。Ti 添加 FLiNaBe からの方が 約1.15 倍水蒸気放出量が多かった。保管中に Ti 粉末が微量の 水蒸気を分解・捕捉し、これが加熱によって放出されたため、 Ti 添加 FLiNaBe からの方が水蒸気放出量が多かったのではな いかと考えている。図4にFLiNaKからの水蒸気放出挙動を示 す。水蒸気放出量は、FLiNaBeに比べて圧倒的に多く、放出ピ ークは2つ観測された。FLiNaK からの水蒸気放出量は、 FLiNaBe の約 8.4 倍であった。1 つ目の放出ピークは、小片の 表面に付着していた水蒸気だと推測される。2 つ目の放出ピー クは、FLiNaK バルク内に残留していた水蒸気だと考えられる。 放出速度も遅く、長時間に渡って放出が続くことがわかった。

図5には、未照射FLiNaKからの水蒸気放出曲線と、中性子 照射されたFLiNaKからの水素状トリチウムの放出曲線を比較 する。照射試料からは、加熱開始後20分程度までほとんど放 出が生じていない一方、水蒸気は急峻に放出されている。おそ らく、表面に到達したトリチウムの一部は、一旦表面吸着水に 捕捉され、吸着水の脱離とともに放出されたものと推測され る。FLiNaKの原料であるKFは水に溶けやすく、潮解性を有 するため、FLiNaK作製時にKFが保持していた水分が混入し たものと推測される。溶融塩中の水分量は、トリチウム放出化 学形に大きな影響を及ぼすことから、FLiNaBeからに比べて FLiNaKからのトリチウム放出は、水蒸気状トリチウム比率が 高くなると想定される。

#### 【結言】

- ・ FLiNaBe からの水分放出量は、Ti 添加により増加する。
- ・ FLiNaK からの水分放出ピークは2つあり、表面吸着水とバルク溶解水だと考えられる。
- FLiNaK からの水分放出量は、FLiNaBe に比べて 8.4 倍多い。
  参考文献
- A. Sagara et al., Fusion Engineering and Design, 89 (2014) 2114-2120.
- [2] J. Yagi et al., Fusion Engineering and Design, 98-99 (2015) 1907-1910.
- [3] K. Katayama et al., SOFT2022, Online, September (2022).



図5Ti混合FLiNaKからのT及び水蒸気放出

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

ジルコニウム金属は代表的な水素吸蔵材料であり、核融合炉で使用されるトリチウムガスの吸収、 回収にも使用可能な材料である。ジルコニウム中に含まれる不純物は水素の吸蔵放出に影響を及ぼすが、 酸素や炭素などの軽元素不純物の影響は必ずしも明確になっていない。本研究では、酸素添加あるいは 炭素添加ジルコニウム中の水素溶解に対する影響を調べることを目的とした。具体的には、粉末冶金法 にて作製した酸素添加あるいは炭素添加ジルコニウムについて、重水素溶解を行い、昇温脱離ガス分析 装置(Thermal Desorption Spectrometry, TDS)法により水素の脱離挙動に対する、酸素、炭素の影響を調 べた。さらに、拡散解析ソフトである TMAP-4 を用いて、SUS304 試料からの水素の放出挙動をシミュ レートし、不純物による水素のトラップエネルギーを評価した。 2.実験

純 Zr 粉末、ジルコニア(ZrO<sub>2</sub>)粉末、炭化ジルコニウム(ZrC)粉末(株式会社ニラコ、高純度化学研究所) を使用し、Zr に対して不純物元素(O、C)の割合が 5%および 10%となるように調製した。その粉末を遊 星ボールミルで1分間、100 rpm で混合することで4種類(ZrO<sub>0.05</sub>、ZrO<sub>0.10</sub>、ZrC<sub>0.05</sub>、ZrC<sub>0.10</sub>)の粉末試 料を得た。純 Zr 粉末と混合粉末試料を 10 mm ダイスに約 0.5 g 入れ、20 MPa で一軸圧縮して円板形状 とし、さらに 200 MPa で冷間静水圧プレスして圧粉体試料を得た。圧粉体試料を 500K/h の昇温速度で 真空加熱し、1273 K で 1時間焼結させ、酸素添加 Zr、炭素添加 Zr および純 Zr の焼結体試料を作製した。

図1に各焼結体試料のX線回折法(XRD)による 回折ピークを示す。酸素添加試料については、酸化 物のピークは検出されず、酸素はZrに固溶しており、 一方、炭素添加試料では炭化物ZrCのピークが検出 され、ZrCとして存在することが分かる。 純Zr、ZrO<sub>0.10</sub>、ZrC<sub>0.10</sub>焼結体試料を重量約0.04g、

純 Zr、ZrO<sub>0.10</sub>、ZrC<sub>0.10</sub> 焼結体試料を重量約 0.04 g、 厚さ 1.4 mm となるように切断加工したもの(図 2) を TDS 試料として用いた。この試料を 1123 K で 30 分間焼鈍したのち、重水素(D<sub>2</sub>)を試料の重量に対し て濃度が約 0.5 at%となるように吸収させた。その試 料を図 3 に示す TDS 装置にセット、試料を加熱し、 放出される D<sub>2</sub> を四重極質量分析計 (QMS, Inficon H200M) で測定した。昇温速度を 0.5 K/s とし、1273 K まで加熱した。



図2 純 Zr, ZrC0.10, ZrO0.10 の TDS 試料



#### <u>3. TMAP-4 による TDS の水素放出シミュレーション</u>

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 1.4mm、 水素 0.5at%が均一に溶解し、試料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。 純 Zr 中の水素の拡散係数 [1,2] を使い、加熱条件を、初期温度 298 K、昇温速度 0.5K/s として、拡散 の活性化エネルギー ( $E_d$ )の値を変えながら水素放出スペクトルを算出した。

4. 結果と考察

図4に各Zr 試料からのD<sub>2</sub>昇温脱離スペクトルを示す。D<sub>2</sub>放出は900K以上の温度で顕著となり、ピーク温度は純Zrが1160K程度であった。一方、ZrC<sub>0.10</sub>とZrO<sub>0.10</sub>試料はそれぞれ1220K、1240K程度と、あまり大きな違いはなく、純Zr試料の結果よりも60~80K程度高いピーク温度となることが分かった。 ピーク温度の違いは、炭素と酸素が水素に対しトラップ効果を及ぼした結果と考えられる。水素に対するトラップ効果の機構は炭素と酸素で異なる。ZrCはZrに固溶せず析出物として存在している。ZrとZrCの界面には格子の不整合を緩和する歪んだ領域が存在することになるため、このような領域に水素は優先的に集積すると考えられる。一方、酸素についてはZrに添加することで水素の溶解熱が変化することが知られており[3]、これは酸素と水素との結合が強くなったとみなすことができる。いずれにしてもTDSでの水素放出温度の変化は、水素に対する酸素のトラップ効果として現れたものと考えることができる。このトラップエネルギーをTDSの放出スペクトルをTMAP4でモデル化して評価した。図5に放出スペクトルの計算結果を示す。Zr 中の水素の拡散の活性化エネルギー( $E_d$ )を40~70kJ/molの範囲で変化させ、放出スペクトルを求めたものである。 $E_d$ の変化は太結果として不純物によるトラップエネルギーとみなすことができる。ピーク温度と $E_d$ の関係はほぼ比例関係にあり、その比例係数は、60 J/K であった。実験で得られたピーク温度差の結果から、炭素と酸素のトラップエネルギーは、4~5kJ/mol程度と見積もることができた。



#### <u>4. まとめ</u>

粉末冶金法にて作製した酸素添加および炭素添加ジルコニ ウム中に重水素を溶解し、TDS 法にて重水素の高温脱離挙動を 調べた。酸素添加、炭素添加で放出ピーク温度は高温側へシフ トし、不純物による水素の捕獲(トラップ)が示唆された。単 純なモデルでトラップエネルギーを評価したところ、炭素と酸 素で大きな違いはなく 4~5 kJ/mol 程度であった。

## 5. 研究組織

- 九大総理工:橋爪健一 大学院生:藏本創、徳富弘大、 西原昂汰、河股大翔、 九大応力研:渡辺英雄
- <u>参考文献</u> [1] K. Hashizume *et al.*, J. Nucl Sci. Technol., 31 (1994) 1294. [2] 染野、日本金属学会誌 24(1960)249.
  - [3] M. Miyake et al., J. Nucl. Mater., 270(1990)233.





# 直線磁化プラズマ装置における電磁乱流観測を目指した高ベータ実験

自然科学研究機構核融合科学研究所 河内裕一

## 要旨

本課題では、直線磁化プラズマ装置 PANTA において磁場を低く制御して実験を行うことで比較 的高ベータ条件におけるプラズマ乱流の観測をおこなった。この実験により、従来観測が不可能 であった電子スケールの乱流を、多チャンネルプローブによって高い時間・空間分解能で観測す ることに成功した。本成果は、Scientific Reports に掲載され、共同プレスリリースもおこなった 。今後は、観測された電子スケール乱流の更なる調査を行なっていく。

#### 研究目的

これまでのプラズマ乱流研究は、イオンスケールの静電的な乱流を対象に実験が行われてきた。 近年、イオンスケールの乱流よりも小さいスケールの乱流や、電磁的な乱流による異常電子熱輸送 や異常加速の可能性が注目されている。しかし、小さいスケールないし電磁的な乱流に関する研究 は、大型・中型のトーラス装置での研究が主であり、基礎装置での研究が少ない。また、この種の 乱流の時空間構造を精度よく計測した例はない。本研究では、小さいスケールないし電磁的な乱流 の間構造を、低温で S/N が高く空間分解能の高い計測器を利用できる直線プラズマ装置において 詳細に観測することを目的とする。そのために、従来直線プラズマ装置で行われてきたイオンスケ ール・静電的な乱流の実験スキームを電子スケールあるいは電磁的な乱流の実験スキームへ拡張す ることを目的とする。

### 実験方法

九州大学応用力学研究所の乱流プラズマ実験装置(PANTA)を利用して実験を行った。通常 PANTA では 1000G 程度の磁場をプラズマに印加して乱流の観測を行っている。磁場は、乱流のス ケールや性質を決定する上で重要である。すなわち、磁場を低くすると乱流が電磁的になりやすく なりかつ励起する乱流のスケールを大きくなるため、これまでに観測できなかった電子スケールの 乱流の計測が可能になる。

本研究では特に、電子スケール乱流の観測を目指して、磁場を通常の 1/4 である 225G に設定し て実験を行った。この条件では、イオン慣性長がプラズマ半径と同程度になるため、イオン慣性長 よりも大きいイオンスケール乱流は周期境界条件を満たさず抑制される。すなわち、イオンスケー ルよりも小さいスケールの乱流のみ励起可能である。この他の実験パラメータは、中性粒子ガス圧 0.5 Pa、RF パワー3kW に設定した。プラズマ乱流の計測には、周方向 64ch プローブを利用し、時 空間構造の詳細観測を行った。

## 実験結果

本研究の低磁場実験で得られた、典型的な乱流の二次元スペクトルを図1に示す。2つの典型的 なスペクトルのピークが観測された。1つはイオンサイクロトロン周波数程度の周波数を持ち周方 向モード数が m=10 程度のシャープなピークであり、もう一つはイオンサイクトロン周波数よりは るかに周波数の高いブロードなスペクトルであり、周方向モード数は m=10-40 である。先行研究 で観測されるドリフト波はイオンサイ クロトロン波と比べて周波数が十分小 さく、モード数も m=1-4 程度であり、 本研究でイオンスケール乱流(例えば ドリフト波)よりもはるかに小さなス ケールの乱流であることがわかった。 図2には規格化周波数のスペクトルを 示しており、規格化したスケールで見 ても、イオンスケール乱流よりも小さ いスケールの乱流が本実験により観測 されたことが確認できる。規格化波数 スペクトルで見ても同様の傾向を示し ている。



図 1: 典型的な乱流の二次元パワースペクトル。青点線はイオン サイクトロン周波数 (*f*<sub>ci</sub>)を示している。

m=10 程度の揺動と m=10-40 の揺

動の詳細を調べるために揺動の相関長を解析した結果、m=10の揺動は周方向に相関長が長くコヒ ーレントな構造を有していることが明らかとなった。一方で、m=10-40のブロードなスペクトルを 持つ揺動の相関長は 1cm 程度であり、揺動自身のスケールと同程度であることが明らかとなった。

## • 考察

本実験条件では、イオンスケールの乱流が周期境界条件を満たさないためイオンスケール乱流が 抑制され、イオンスケール乱流が得るはずのエネルギー電子スケール乱流が得たために電子スケー ル乱流が励起したと考えることができる。観測された電子スケール乱流にはコヒーレントな成分と 乱流的な成分が存在し、互いに異なる特徴を有していた。コヒーレントな揺動はプラズマの外側で 最も振幅が強いため不安定性の駆動源は中性粒子の圧力などが考えられる。乱流的な揺動は圧力勾 配の強い位置で最も振幅が強いため圧力勾配によって駆動されたと考えられる。乱流的な揺動の位

相速度は、音速ないしドリフト速度程度であ り、これは静電イオンサイクロトロン波やイオ ンサイクロトロンドリフト波の特徴と類似し ている。今後の研究では、これらの電子スケー ル乱流の基礎特性や駆動する輸送の解明に向 けて実験・計測を行い、核融合炉における異常 熱輸送の理解への貢献を目指す。

## 成果報告

本研究の成果は、査読有科学雑誌 Scientific Reports に掲載され(DOI: 10.1038/s41598-022-23559-1)、核融合研究所、日本大学、九州大学、 京都大学で共同プレスリリースを行った。ま た、日本物理学会秋季大会で、本研究について の口頭発表を行った。



図 2: 規格化周波数のパワースペクトル。規格化 周波数が1以下でイオンスケール、1以上で電子 スケールの乱流を意味する。青線が従来の実験 の結果で、オレンジ線が本実験の結果である。

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。

はじめに: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 [3,4]。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[5,6]。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ハードウェアおよび ソフトウェアを更新した。同時に「ガス分析におけるピーク高さの同定方法」「ガス分析データの保存方 法」に関して改良を行ったので、その内容についても報告する。

更新・改良内容: TDS 装置のハードウェアでは、DOSV パソコンを Windows10 パソコンに更新し、PC カードバスおよび入出力カードを USB および入出力ユニットに更新した。また、入出力ユニット〜中 継器間の接続ケーブル、中継器も更新した。リレーボックスは更新していない。加熱制御電源に関して は、デジタルプログラム温度調節計のみを更新し、温度変換器、サイリスタレギュレータ、などは更新 していない。

TDS 装置のソフトウェアでは、Visual Basic 6.0 から Visual Basic.NET に更新した。統合開発環境 IDE としては Visual Studio Community 2019 をインストールした。Visual Basic という意味で、フォ ーム上のボタンコントロール、ラベルコントロール、テキストボックスコントロールに関して変更はな い(図1)。しかし、実行環境が.NET Framework に変わるため、フォーム上のコントロールは新しく 配置した。オブジェクト指向という意味では、グラフ描画およびデータ保存に関するクラス、オブジェ クト、メソッド等の記述に注意した。当面は Debug モードにて利用する。エラーが発生せず、プログラ ムの変更も無くなれば、Release モードに移行する。

(1)初期化:初期化の前に全画面表示とし、ファイル名、テスト条件を入力し、時間変化表示マス組合せ、初期電流感度、サンプリング時間などを選択する。

(2) 測定開始:3時間、540周期に亘って QMA 電流、真空度、試料温度を測定して表示する。

・QMA 電流はマス M を M-0.5~M+0.5 と 0.1 ステップで変化させて最大値を採用している。

- ・電流最大値を探索する際には隣のマス M の裾野の影響を受けないように配慮した。
- ・マス M の前後の複数点の多項式近似曲線から電流最大値を評価するように改良した。

・QMA 電流の仮数部が 9.6 以上または 0.96 以下のとき、次周期における電流感度の桁が切替る。

・前周期のマススペクトルは白色ペンで上書き描画することによりクリアして毎周期描画している。

・真空度、試料温度の時間変化をグラフ表示するするように改良した。

- (3) 測定中断:540周期に至る前に測定およびグラフ表示を中断する。
- (4) データ保存:540周期または測定中断までの測定データをテキストファイルに保存する。
- ・Print 関数では行の末尾に改行が含まれないので、PrintLine 関数を採用している。
- ・測定中も1周期毎に詳細データをテキストファイルに追加保存するように改良した。
- (5)終了処理:入出力ユニットの終了処理をする。
- ・終了後にも測定データの時間変化、任意時刻のマススペクトルを表示できるように改良した。
- ・代表的なマスに関しては、拡大プロファイルと採用したピーク高さを確認できるように改良した。



図1. TDS コントローラのテストフォーム.

- 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] K. Tokunaga, S. Matsuo, H. Kurishita, T. Toyama, M. Hasegawa, K. Nakamura, Close-up tracing of fatigue precrack evolution and reliable fracture toughness evaluation by the precracked specimens in an ITER specification W plate, Journal of Nuclear Materials, 553 (2021) 153045.
- [4] 徳永和俊、進藤京平、藤本 陽、松尾 悟、松尾 悟、外山 健、長谷川 真、中村一男, タングステン再 結晶材の破壊靭性評価, 日本金属学会 2022 年秋季講演大会, 2022 年 9 月 21 日~23 日, 福岡工業大学.
- [5] K. Tokunaga, S. Matsuo, H. Kurishita, S. Nagata, B. Tsuchiya, Q. Xu, M. Tokitani, D. Nagata, M. Hasegawa, K. Nakamura, Combined effects of low energy helium irradiation and tensile strain on surface modification in ITER, International Conference on Fusion Reactor materials, 25th-28th October 2021, Granada, Spain.
- [6] 徳永和俊, 松尾悟, 栗下裕明, 永田普二, 土屋文, 徐虬, 時谷政行, 永田大介, 長谷川真, 中村一男, タン グステンにおける注入 He 深さプロファイル分析と引張応力負荷の影響, 第 22 回「イオンビームによる 表面・界面の解析と改質」応用物理学会薄膜・表面物理分科会 特別研究会, 2021 年 12 月 3 日-4 日 名古 屋市.

# 遷移金属合金の照射による結晶構造・磁気変態の機構解明

## 岩手大学理工学部 物理・材料理工学科 鎌田康寛

## 目的

原子炉や大型加速器では機器構造材の一部にステンレス鋼のFe-Cr-Ni合金が使われている。それらの結晶構造と磁性に与える照射効果の解明は、原子炉での磁気計測による劣化評価や、加速器の衝突性能の確保に役立つと考えられる。照射効果を調べる研究手法として、我々はイオン照射と薄膜試料を組み合わせた実験を提案している。イオン照射では中性子照射と同様にカスケード損傷が生じ、中性子照射と異なり放射化しない利点がある。一方で損傷領域が表面に限られる問題があるが、薄膜試料を用いることで全体を損傷させることができ、評価・解析が容易になる。ここで薄膜試料を作製する際、下地物質・成長温度の違いで結晶構造・磁性が変わる可能性が考えられるため、それらの選択に注意が必要である。これまで、MgO(001)基板上に作製したfcc-Fe-Ni合金薄膜の磁化がイオン照射で増加したと報告してきたが[1]、Fe-Cr-Ni合金薄膜の研究報告はほとんど無い。本研究では、fcc-bcc相境界付近の組成のFe-Cr-Ni合金 の結晶構造と磁性に対する照射影響として、特に高照射量(数十 dpa)とキャビティ形成(ここでは He 集合体)の影響とそれらの機構を明らかにすることを目的として実験を行った。

## 実験方法

Fe-Cr-Niの3元系状態図(600℃)と作製した合金薄膜の組成を赤点で図1に示す。超高真空中で電子 ビーム蒸着により組成の異なる5種類のFe-Cr-Ni合金薄膜(Sp.1~5)を作製した。基板温度と下地物 質として、高温(500℃)でMgO(001)上に200nm成長させした。成膜中にRHEED 観察を行い、結晶成長 を観察した。成膜後に小片を切り出し、各種測定を実施した。各試料に対して加速電圧30keVでHe<sup>+</sup>を室 温で照射した(九大応力研)。SRIM 計算より、損傷量は最大で20dpaと見積もられた。照射したHeイオン の大部分が薄膜内に残留するイオン加速電圧を設定した。照射前後の構造をXRD、EBSD、TEMで、 磁化曲線をVSM で調べた。

#### 結果及び考察

EBSD 観察の結果、低 Ni 合金では bcc 単相、高 Ni 合金では bcc 相と fcc 相が共存していることがわ かった。照射による2相の比率の顕著な違いは見られなかった。高 Ni 合金薄膜(Sp.3-5)の X線回折測定 の結果を図 2 に示す。いずれも(002)<sub>bcc</sub>と(220)<sub>fcc</sub>回折ピークが確認された。照射量の増加とともにピーク強 度は低下し、ピーク位置は低角側にシフトした。ピーク位置のシフトは、bcc 相および fcc 相の両相で膜面垂 直方向の格子間隔が増加していることを示している。高 Ni 合金薄膜(Sp.4, 66Fe-14Cr-20Ni (mass%))の断 面 TEM 観察の結果を図 3 に示す。照射後の TEM 像で白い粒状のコントラストが多数見られ、He 照射に より高密度のキャビティが形成したことを示している。高 Ni 合金薄膜(Sp.3, 4)の磁化測定の結果を図 4 に 示す。照射により飽和磁化が僅かに増加した。これは Fe-Cr-Ni 合金の fcc 相の一部が磁化の大きい bcc 相に変態した可能性、あるいは fcc 相の磁性が照射に敏感である可能性を示唆する現象と考えられる。

今回用いた MgO(001)基板は bcc-Fe の作製に適した基板と言われており、その上の Fe 系合金薄膜は 基板拘束により bcc 相が安定化しやすい可能性がある。このことが、照射による fcc 相から bcc 相への変態

154

[2]が明確には確認できなかった原因の一つに考えらえる。Fe-Ni 合金で良く知られているが、Fe 系合金の fcc 相は低スピンと高スピンの磁気状態[3]を持つ場合がある。体積が大きい場合は高スピン状態が安定に なる。本研究の高 Ni 合金薄膜における照射による磁化増加の原因として、(1)fcc 相から bcc 相への僅かな 量の照射誘起構造変態、(2)格子間間隔の増加膨張に伴う低スピンから高スピン状態への fcc 相の磁気変 態、の2 つの可能性が考えられ、さらに詳しい検討が必要である。

## まとめ

5 種類の Fe-Cr-Ni 合金薄膜を作製し、He イオン照射を実施したところ、格子間隔の増加と組密 度のキャビティ形成を確認した。高 Ni 合金薄膜では照射による飽和磁化の増加が見られ、結晶構 造と磁気変態の観点から変化機構を提示した。

文献 1. 小宅ら, 第 165 回金属学会講演大会概要集(2019)、2. 鶴田ら, 日本金属学会誌, 85 (2021 239-246 3. R J Weiss, *Proc. Phys. Soc.*, 82 (1963) 281-288

#### 成果報告:

畠山将人,中川一沙,村上武,清水一行,鎌田康寛,渡辺英雄, "fcc-bcc 相境界の Fe-Cr-Ni 合金の構造と磁性 に及ぼす照射効果",材料照射研究会 2022, 2022.12.9, 仙台国際センター

K.Shimizu, H.Tsuruta, Y.Kamada, T.Murakami, H.Watanabe, "Crystallographic analysis of Ga<sup>+</sup> irradiation-induced phase transformation in austenitic stainless steels", *Mater. Charact.*, 194, 112375, 2022.

研究組織 : 鎌田康寛, 清水一行, 村上武, 畠山将人, 梅山大輝 : 岩手大・理工、渡辺英雄 : 九大・応力研



図1 Fe-Cr-Ni状態図と作製した試料(赤点)





図3 Fe-Cr-Ni 薄膜 (Sp.4)の断面 TEM 像

図 2 Fe-Cr-Ni 薄膜の X 線回折プロファイル



図 4 Fe-Cr-Ni 薄膜の磁化曲線

## プラズマ乱流の非線形発展に関する研究

量子科学技術研究開発機構 那珂研究所 西村征也

【研究目的】

天体近傍の宇宙空間や磁場閉じ込め装置においては、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、磁気流体力学的(MHD)不安定性が発生する。磁 場閉じ込め装置の一つであるトカマクにおいては、MHD 不安定性であるテアリングモードやバル ーニングモードの発達によってプラズマの性能が大きく変化する。特に、バルーニングモードの線 形安定性や非線形発達を理解することは、トカマクプラズマにおける周辺輸送を制御する上で重要 な研究課題である。

MHD 不安定性の線形安定性解析や非線形シミュレーションするために伝統的に用いられてきた 手法が簡約化 MHD モデルである。簡約化 MHD モデルは、逆アスペクト比を用いたオーダリング を用いることで数学的に扱いやすく、数値的に安定にシミュレーションすることを可能とするもの である。しかし、簡約化 MHD モデルには様々な種類があり、もしエネルギーや角運動量が保存さ れないようなモデルやシミュレーションの設定を用いると、線形安定性の評価や非線形発展過程が 正しく評価されないといった問題が生じる。

本研究においては、簡約化 MHD モデルを用いたバルーニングモードの非線形シミュレーション において、エネルギーや角運動量が正しく保存されるかを検証することを目的とした。

【研究方法】

シミュレーションモデルとして、磁化プラズマを記述する簡約化 MHD モデルを用いる。簡約化 MHD 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。 本研究においては、Hazeltine(1985)の簡約化 MHD モデルを参考に、オーダリング上は落とされる べきであるが、エネルギー保存を保証する上で残す必要がある高次の項を圧力の発展方程式に導入 した。このことによって、系のエネルギー保存則を定式化した場合に、曲率に関わる準線形項や揺 動の二次積として表現される非線形項からの寄与の総和はゼロとすることができ、これらの項から 非物理的にエネルギーが発生することを防止することができる。

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、時間微分項にルンゲクッタ法を適用 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。

#### 【研究結果】

#### 1. 数値不安定性の回避

エネルギー保存則を保証するような簡約化 MHD モデルを導入した結果、プラズマの中心領域に おいて数値不安定性が生じやすくなることが明らかになった。この数値不安定性を回避するために は、非常に多くの径方向のメッシュが必要となる。そこで、本研究においては、プラズマの中心か ら 10%程度の領域を避けるように計算領域を設定することで、この問題に対処した。



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1にポロイダル断面における圧力揺動の分布を示す。線形発達段階においては、良い曲率の領 域に摂動のピークが集まるバルーニングモードの特徴的な構造が現れている。非線形飽和段階にお いては、中心領域に向かって揺動が伝搬していることが分かる。

2. エネルギー保存と角運動量保存の検証

図1に示したバルーニングモードの発達において、エネルギー保存と角運動量保存が成立してい るかを検証するために、モデル方程式からこれらの保存則を解析的に導出した。



図2 エネルギーと角運動量の時間変化率の発展

図2にエネルギーと角運動量の時間変化率の発展を示す。エネルギーに関しては、先に述べたように準線形項と非線形項からの寄与(それぞれ、 $S_{QL} \geq S_N$ )がゼロであり、線傾項からの寄与( $S_L$ )のみによって系全体のエネルギー(E)の変化率が再現されている。また、角運動量に関しては、レイノルズ応力のトルク( $T_R$ )、マックスウェル応力のトルク( $T_M + T_B$ )、粘性トルク( $T_V$ )の和によって角運動量(L)の変化率がおおむね再現されている。図2の右図においては、やや誤差が生じているが、径方向のメッシュ数を大きくすることでより角運動量の保存の精度を高くすることが確認された。

【まとめ】

簡約化 MHD モデルを用いたバルーニングモードの非線形シミュレーションにおいて、エネルギーや角運動量が正しく保存されることを検証した。このコードを使用して、より現実的な条件におけるバルーニングモードの非線形シミュレーションを行うことが今後の課題である。

# 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

応用ながれ研究所とレーザー技術総合研究所 糟谷紘一

<u>1. はじめに</u> 過酷な条件下で使用する材料の諸特性を明らかにし、それらを生かした諸応 用を提案し、これらの課題に関連する、最近の共同研究結果について、その概要を述べる。

<u>2.</u>研究目的 九州大学応用力学研究所の材料加熱装置を用いて諸材料を加熱し、各種計測 装置により、高温下での表面損耗量(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とが、本共同研究の最終目標である。本研究 では、近く再開する高熱流照射のために、関連計測装置の準備と新規な方法の調査・提案をした。

#### 3. 研究成果

3-1 変位計測システムの整備 マルチカラー同軸変位計1式のうち、昨年度までの共同研究費 で調達未了であったコントローラを購入した。但し、九大予算で不足分を、応用ながれ研究所 から九大へ寄付金として納入後にやっと発注できた。これらの手続きのために、当初予定の年 度初めの納品が11月初旬まで遅延した。同時に、USB接続で変位計信号をパソコンに取り込む ための増設ユニットやシステム電源等経費も応用ながれ研究所などが負担した。変位データを 迅速に可視化するための被測定材料位置駆動のための電動 X-Y ステージやパソコン2台は、現 有の物を一部改造して利用できるようにした。これらの整備により、昨年度のメーカー借用デ モ機なしで、とりあえず変位測定が、曲がりなりにもできるようになった。これらシステム全 体写真と稼働状況写真を、前年度共同研究報告書の図1と図2に示した。

<u>3-2</u>整備後システムを用いたレーザー超音波厚さ測定法の有効性の再確認 年度替わり期間中 にメーカーデモ機(マルチカラー同軸変位計)で予備テストしていた厚さ測定サンプルの表面 損耗状態を、上記の変位計測システムを用いて再確認測定した。その結果、レーザー超音波厚 さ測定のために、サンプル表面を叩いても、サンプル表面の損耗は十分浅く(小さく)、測定法 に固有のダメージがサンプルに与える悪影響はほとんど無視できるほど小さいことが判った。

<u>3-3</u>透明薄板の厚さ測定 当研究に使用可能な耐熱材料薄板市販品の調査を行った。元々は音響レコードプレイヤーの針支持ヘッド部に挟み使用する音質向上用カートリッジスパーサー (単結晶サファイア透明基板)を見つけて、メーカーに、これらの製品デモを依頼した。寸法 は縦16 mm、横16 mm、厚さ 0.4 mm、質量 0.4g、耐荷重 5 kgであった(図1)。基板表面上には ORSONIC の英文字がレーザー刻印してあり、メーカー工場のレーザー顕微鏡でその平均深さを測定した 結果は約 3  $\mu$  m、深い場所では 10  $\mu$  m 程度であった。顕微鏡測定の結果写真等を図2に示す。 レーザー刻印の部分は粗く、数  $\mu$  m の凸凹があった。一方、薄板自体の厚さを今年度取り揃えた 変位計システムで測定すると 495  $\mu$  m であった。これは、カートリッジを音響部品に固定するた めの U 字形切り込みエッジ部分を横断する表面深さ測定により得られた結果である(図3)。

<u>3-4 アップコンバージョン用新材料開発研究の最近の進展調査</u>以前から本研究に関連する長 波長から短波長への光のアップコンバージョンについて、本年度も最寄り研究機関が公表して いる文献調査を行った。下記は、かなり高温でも使えそうな新材料であるが、最終的に使い物 になるかどうかは、今後の研究の進展による。

1)R. Enomoto and Y. Murakai, Solvent-free temperature gradient melt formation of efficient visible-to-UV photon upconversion organic films with subsolar threshold and over 100h photostability in air, Journal of Materials Chemistry C(IF-8.067), DOI 10.1039/D2TC04578H. 2) 榎本, 村上,太陽光の可視光を紫外光に変換する固体膜,東工大ニュース,公開日 2023.01.27.

<u>4. 研究成果報告</u>最近の当共同研究結果を、本年度には、下記の論文などで公表した。

1) K.Kasuya, T.Taira, O.Kotyaev, Y.Izawa, K.Tokunaga, H.Kawaji, T.Taira, New Proposals of Fusion Chamber Wall Safeguards with Various Laser Techniques Including Laser Induced Ultra-sonic Waves and Laser Thickness Profilers, On Site Meeting, Prague Conference Center, Czech Republic, Thursday June 16, 10:15-10:30, 2022.

2) ibid., Diagnostics of Fusion Chamber Material Erosions, Alexander von Humboldt Virtual Colloquium, Science Gallery, Poster, Main Site-Germany, Nov. 16-17, 2022.

3) 糟谷紘一, コチャエフ・オルグ, 井澤靖和, 徳永和俊, 川路 均、 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、 九州大学応用力学研究所共同利用研究 成果報告、 25, 1, 144-145、2022.

4) 糟谷紘一グループ、 種々の先進材料の高密度エネルギー計測分野への応用、 東京工業大学・技術創成研究院・フロンティア材料研究所共同利用研究報告書、 26, 1, 111-113, 2022.



図1 厚さ標準サファイア薄板

 【計測データ】
【3Dグラフ】 開始点一終了点: (400,200)-(4400,2400) 距離: 4565.08µm 高さ: 1.17µm 角度: 0.0147° 最大値一最小値: (412.8481.77)
測定日時: 2023/01/20 22:04:56 設定ファイル名: C:¥Program Files¥MAP-3D¥Config X執測定範囲: 5000 μm X執測定ビッチ: 200 μm Y執測定範囲: 5000 μm Y執測定ビッチ: 200 μm コメント:
【2Dグラフ】 距離: 1,625.17µm 高さ: 494.61µm 角度: 16.9273° 面積: 142,431.4µm <sup>2</sup>

図3 新設変位計による標準基板の厚さ 測定結果(上と右)

#### 5. 研究組織

<u>6. 謝辞</u>本研究は、九州大学応用力学研究所と東京工業大学・フロンティア材料研究所の共同 研究経費の援助を受けた。また、前者の糟谷直宏教授を含む共同研究支援職員と後者の共同研究 支援職員、並びに、応用ながれ研究所スタッフの支援を受けた。さらに、サファイア薄板製品特 性の計測について、0rbray 社にお世話になった。併せて感謝の意を表します。(2023/02/08 記)



図2 基板表面上の刻印測定結果(左上部)



## 極低レイノルズ数翼の革新的空力特性向上の為の基礎研究

同志社大学 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 浜口 慶一郎 同志社大学 理工学部 若林 叡広 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 九州大学 応用力学研究所 高田 青

1. 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 や超小型航空機 MAV の開発,昆虫・鳥・種子の飛行システムの解明,小型風力や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 効果のため、未だ充分ではない.本研究では、翼まわりの流 れの3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 計測を施し、 そのデータを解析することで、3次元渦構造を可視化し、Re により分類する.

#### 2. 実験方法

実験の概略図を図1に示す.実験装置は、水槽とモデル、曳航式台車、照明装置、撮影装置で構成されている.モデルまわりの流れの可視化には、流体に混ぜたトレーサー粒子を用いた.トレーサー粒子には、流体として用いた水に比重が近いナイロンパウダーを用いた.実験時は、光源・モデル・カメラは全て台車に設置しており、共に一定速度で移動させた.光源からの光をスリットによりシート状にして、シート面における粒子の動きを撮影した.撮影面は、主流方向に直角な面とした.



Fig. 1 Experimental apparatus.

#### 3. 結果と考察

図2に,水槽実験において, Re=150-350 で,迎角α=90deg.の平板翼後流に生成された3次 元渦構造を示す.撮影面は,翼背面から2翼弦長下流であり,(a)は主流方向渦度を主流直角かつ スパン直角方向に平均したもので,(b)は主流方向渦度の等値面である.縦軸はスパン方向座標, 横軸は時間であり、\*は無次元化されていることを表す.

図 2 を見ると, Re = 150 - 250 で, Reの増加に伴って渦間隔が小さくなるように見える.また, あるスパン方向座標を見ると, Re = 150 では, 渦の正負が規則的に入れ替わる箇所,  $Re \ge 250$  で は,入れ替わらない時間が長い箇所を確認できる.この特徴は, C. H. K. Williamson, 1996<sup>1)</sup>が示 した円柱後流の 3 次元構造である Mode A と Mode B の特徴に似ている.よって, Re = 150 - 250での変化は, Mode A に似た構造から Mode B に似た構造への変化であると考える.



Fig. 2 Visualization of three-dimensional vortices structure.

## 4. まとめ

水槽実験を行い,迎角 α = 90deg.の平板翼後流を解析した結果, *Re* = 150 – 250 において, Mode A に似た構造から Mode B に似た構造への変化を確認した. 今後,特に *Re* = 100 – 300 で, 水槽実験と数値解析の両者を用いて,整合性を検証する予定である.

#### 参考文献

(1) C. H. K. Williamson, "Vortex Dynamics in the Cylinder Wake", Annu. Rev Fluid. Mech. Vol.28 (1996), pp.477-529

## 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.

#### 令和4年度共同研究成果報告書

水中ビークルの動力学の高精度推定に関する研究(課題番号: 2022CR-ME-2)

九州大学大学院工学研究院 山口 悟

#### 1. 緒言

近年、海底下の海底遺跡、沈船を対象として音波探査や各種ソナーによる調査が実施されている。こ れに使用する海中ビークルを開発するためには、有効な機体形状を計画し、その運動を制御するために 機体の運動について詳細に検討する必要がある。一方で、海中ビークルは形式、使用目的ごとに機体形 状が大きく異なるため、開発の初期段階で機体の正確な運動モデルを構築することは困難である。

本研究では、海底遺跡探査用の曳航システムを提案し、その運動性能を CFD 計算、水槽試験、数値シ ミュレーションにより調査する。海底下に埋没した海底遺跡、沈船を音波探査により調査するためには 海底地形に沿って、機体と海底間の距離を一定に保つ必要がある。このため、追加のカナード翼を装備 した多翼型曳航体を計画し、構築された運動モデルに基づく数値シミュレーションにより本機体の有効 性を調査する。機体に作用する流体力の特性は CFD 計算により検討し、流体力係数の有効性を確認す るために深海機器力学実験水槽において模型試験を実施した。さらに、海底地形に対応して航行するた めの運動制御系を設計し、機体の運動制御性能を数値シミュレーションにより調査した。

#### 2. 数値計算による流体力の解析

多翼型曳航体のプロトタイプとして Fig. 1 の機体を計画した。翼間の相互干渉を検討するための数値 流体計算には OpenFOAM を使用し、機体に作用する流体力の特性について調査した。機体まわりの流 体の基礎方程式は非圧縮性粘性流体を対象とした RANS 方程式と連続の式である。ここで、ソルバーに PimpleFoam を用い、計算に使用したメッシュ数は約 130 万セルである。乱流モデルには  $k - \omega$  SST を 使用した。計算に用いた格子と計算結果の一例を Fig. 2 に示す。







#### Fig. 1 Principal configuration of the towed vehicle Fig.2 Calculation mesh and velocity distribution

#### 3. 水槽試験と運動制御系の開発

応用力学研究所の深海機器力学実験水槽において機体模型の曳航試験を行い、機体に関する流体力係 数を求めた。試験用模型と計測結果の一例を Fig.3 に示す。得られた機体の運動モデルに基づき LQI 制 御による運動制御系を設計した。



Fig. 3 Vehicle model and experimental results

#### 曳航システムの運動シミュレーション 4.

運動制御系を搭載した機体の数値シミュレーションを実行し、多翼型曳航体の有効性について検討す る。目標ピッチ角を順次変化させた場合の機体深度の変動を,通常型の曳航体と比較して Fig.4 に示す。 左図がピッチ角変動量、右図が機体深度変動量の時刻歴を示し、それぞれの図中の破線は通常型機体の 結果を示す。通常型機体ではピッチ角変動が機体の深度に大きく影響するのに対し、多翼型曳航体では 機体の深度を一定に保ったままピッチ角を変更することが可能であることが分かる。



**Result of the simulation (Pure pitching)** 

## 5. 結言

計画した多翼型曳航体の有効性を調査するため水槽試験により各種流体力を求め、機体の運動モデル に基づき LQI 制御系を設計した。主翼とカナード翼間の相互干渉影響については CFD 計算により、そ の影響が小さいことを確認した。数値シミュレーションでは、縦運動において機体のピッチ角と深度を 独立に制御することが可能であるが、制御性能は翼の可動域の制限によって大きな影響を受けるため、 制御目的に応じた適切な翼面積の設計が重要であることを確認した。

今後は制御機構を実装した曳航体を製作し、実験により運動制御系の有効性を確認する予定である。

## OTEC 深層水取水管のための自由垂下パイプの自励振動に関する実験

九州大学・大学院工学研究院 宇都宮 智昭

## 研究目的

海洋温度差発電(OTEC)の商用化に向け、大流量取水のための深層水取水管(CWP)がボトルネックとなっている.正味出力 100MW の CWP では取水量は約 200m<sup>3</sup>/s 必要であり、直径 12m、長さ 800m で 2m/s での取水が想定される.このような流量で CWP に内部流による不安定振動が発生する可能性があり、このような流体関連振動現象を理論的に明らかにする必要がある.

2021 年度の実験では、内径 20mm、外径 22mm、長さ 4m のポリカーボネートパイプを深海機器力学 水槽に垂下し、サージタンクを介して上端より水を水中ポンプでくみ上げることで上向きの内部流を発 生させた.この状態で、パイプ下端に与えた強制変位の解放により自由振動を生じさせ、自由振動波形 の流速による変化を観察した.その結果、自由振動状態が内部流速により明確に異なった傾向を示すこ とが確認でき、自由端影響を考慮する新たな理論との定性的一致を確認した.

2022 年度の本実験では、実験装置の構成を見直すことでさらに取水流速を上げるとともに、パイプ上端において強制加振をおこなうことで、強制加振状態でのパイプの振動における内部流の影響を検討することを目的として実験を行った.

## 実験方法

深海機器力学水槽に図1および図2の通り実験装置を構築した.図1の単純取水実験では,長さ4m, 内径20mm,板厚1mmのポリカーボネート製パイプの上端から,昨年度実験では設置したサージタンク



図1 単純取水実験



を設けることなく,直接,吸引型のポンプで取水することで,本実験装置によっても人工的な振動をパ イプに発生させることなく大流量を発生させることが可能かどうかを検証した.次に,図2に示すとお り,図1で構成した実験装置を強制加振装置の下端にとりつけることで,強制加振状態におけるパイプ の振動における内部流の影響を検討することとした.

計測は試験体上端にひずみゲージ,下端に反射テープを貼付け,それぞれ動ひずみと3次元変位を計測する.水槽の底に2台のネットワークカメラ IPC608UW (LINOVISION, https://www.linovision.com/)を設置し,反射テープの中心を対象とした画像処理・モーションキャプチャーを行えるよう,システムを構築した.

#### 研究結果・考察

図3は、単純取水実験におけるパイプ下端変位(X方向変位およびY方向変位)を取水流速の関数と して示したものである.まず、取水流速や上端ひずみおよび下端変位の時刻歴波形より、サージタンク を設けない本実験装置の構成でも、十分に安定した一定流速を発生できていることを確認した.その上 で、図3に示すとおり、下端変位は管直径の概ね2.5%(0.5mm/20mm)以内となっており、基本的に自 励振動は4.1m/sの比較的速い流速下においても発現しないことが確認できた.

図4は、取水あり/なしでの強制加振状態での取水実験におけるパイプ下端変位を示したものである. ここで、Y方向が加振方向、X方向が加振直交方向となっている.取水ありの場合は、取水なしの場合 に比べて、加振方向変位が増大していることが分かる.また、取水なしの場合、加振直交方向にはほと んど変位が生じていないのに比べ、取水ありの場合、加振直交方向にも大きな変位が発生している.な お、加振直交方向には VIV による変位が現れる場合があるが(今回の実験でも、他の加振周波数におい て顕著な VIV を観測している)、図4で観測される加振直交方向変位は VIV によるものではない.この ような現象は、既存の理論では説明できず、新たな理論モデルの構築が必要である.



## 研究成果報告

Hisamatsu, R. and Utsunomiya, T. 2023. DYNAMICS OF A COLD WATER INTAKING PIPE SUBJECT TO INTERNAL FLOW AND MOTION EXCITATION. *Proceedings of the ASME 2023 42nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, OMAE2023-103375, June 11-16, 2023, Melbourne, Australia (講演予定).

# 光センシング技術を用いた圧力センサーの開発

広島大学大学院先進理工系科学研究科 教授 岩下 英嗣

## 1. 研究目的

近年、地球温暖化対策として CO2 排出量の削減が求められている。貨物輸送の9割以上を担っている 船舶においては EEDI 規制が施行されるなど輸送機器に対する環境規制は今後さらに厳しくなっていく ことが予想され、波浪中の推進性能に優れた船型開発は非常に重要である。こうした状況の中で近年は 特に CFD を用いたシミュレーションが発展してきており、それらの数値計算結果を検証するためには 水槽試験から得られる船体表面圧力をはじめとした実験データが必要である。しかし、これまでは物理 的にセンサーの取り付けが不可能である場所があることなどから十分な圧力計測は不可能であった。

こうした背景を受け、研究代表者は6年にわたり、光センシング技術を用いた貼付式の圧力センサー (FBG 圧力センサー)の開発を行ってきた<sup>1)2)3)4)</sup>。FBG 圧力センサーは、船体模型に直接貼り付けて圧 力計測が可能となっており、船体片弦表面に 400 点近い数のセンサーを添付して圧力計測することで、 圧力の面分布を取得することに成功している。また、計測された圧力分布を船体表面上で面積分するこ とにより船体に作用する流体力や抵抗増加が算出でき、それらを検力計から得られた結果と比較するこ とにより両者の良好な合致が示されている。この積分領域は船体表面の自由表面下部であり、境界面と なる自由表面位置は船側波形の計測値を使用することになり積分精度に大きく影響する。

そこで本研究では、これまで使用してきた 2018 年に計測された船側波形の計測精度を確認するととも に、6 台の高速度カメラを用いた画像解析により船側波形を計測する手法を開発する。本手法は従来の 容量線を用いた船体長手方向 30 断面ほどにおける船側波形計測と比較し、数 mm ピッチと非常に細か く船側波形を計測することができ、模型を傷つけることがないという利点を要する。

氏 名	所属	職名	役割・担当
岩下 英嗣	広島大学先進理工系科学研究科 輸送・環境システム専攻	教授	代表者・実験解析
福光竜晟	広島大学先進理工系科学研究科 輸送・環境システム専攻	修士 2 年	実験補助
安藤悠輔	広島大学先進理工系科学研究科 輸送・環境システム専攻	修士 2 年	実験補助
山崎大樹	広島大学先進理工系科学研究科 輸送・環境システム専攻	修士1年	実験補助
青木海人	広島大学工学部第一類輸送・環境工学プログラム専攻	学部4年	実験補助
河野邑磨	広島大学工学部第一類輸送・環境工学プログラム専攻	学部4年	実験補助
中谷俊介	広島大学工学部第一類輸送・環境工学プログラム専攻	学部4年	実験補助

## 2. 研究組織

## 3. 実験の概要

九州大学応用力学研究所の深海機器実験水槽 ( $L \times B \times d = 65 \times 5 \times 7$ m)にて、ウレタン製 RIOS bulk carrier 模型を用いて正面向い波 (規則波) 中を曳航し、模型右舷側に取り付けられた容量線および 模型左舷側に設置された高速度カメラによってその際の船側波形を同時に計測する。高速度カメラで撮 影された画像からは水面と模型のデッキに沿って張り付けられたテープまでのピクセル数が計測され、 そのピクセル数を実際の長さに変換するために、本研究では模型を一定量沈下および上昇させた状態で 曳航し、そのときの各断面におけるピクセル数の計測を繰り返すことでキャリブレーションを行ってい る。容量線によって計測された船側波形は 2018 年に同様に計測された船側波形と比較することで計測 精度の確認を行う。また、容量線と高速度カメラによってそれぞれ計測された船側波形を比較すること で、高速度カメラを用いた船側波形計測の妥当性を評価する。

## 3.1. 供試模型

実験で使用した供試模型を Fig.1 に、その主要目を Table1 に示す。



Fig.1 供試模型 (ウレタン製製 RIOS Bulker)

$L_{pp}$	(m)	2.4000	$A_W$	$(m^2)$	0.8354
В	(m)	0.4000	$x_B(=x_G)$	(m)	0.0510
d	(m)	0.1280	$z_G$	(m)	-0.200
$C_b$		0.8000	$z_B$	(m)	-0.0618
$\bigtriangledown$	(kg)	98.30	$\kappa_{yy}/L$		0.2500

Table1 供試模型主要目

## 3.2. 高速度カメラによる船側波形計測

今回の実験では6台の高速度カメラおよびレーザー墨出し器をFig.2に示すような治具を用いて水槽 壁に設置した。使用した高速度カメラはFig.3に示す株式会社ディテクトのHAS-U2であり、水平面に 対して垂直なレーザー光を照射する小型のレーザー墨出し器とセットでFig.4に示すように設置した。6 台の高速度カメラを同期することで、フレームレート200fps、解像度1280×1080で同時に撮影を行っ た。模型左舷側のデッキに沿って黒色のテープを張り、赤色のレーザー光を模型左舷側から照射すること で撮影される画像の概略図をFig.5に示す。レーザー光は水中を透過しないため、反射率の高い色で塗装 された模型表面のみにレーザーが照射される。そのレーザーの長さを喫水線とデッキまでの長さから引 くことにより船側波形の振幅が算出されるというのが高速度カメラによる船側波形計測の仕組みである。



#### 3.3. 容量線

過去計測された船側波形の精度を確認することおよび高速度カメラによる船側波形計測の妥当性を評価するために、模型左舷側 29 断面に容量線を設置した。容量線の設置断面を Fig. 6 に示す。容量線は Fig. 7 に示すようにアース線とセットになっており、模型に刺した 3D プリンター製の針に通すことで設置した。針の穴の、容量線およびアース線の直径はそれぞれ φ=0.8mm、0.5mm、0.5mm と非常に細いことに加え、容量線の絶縁被膜を傷つけないよう取り付けを行う必要があるため、容量線の取り付けは非常に長い時間を要するものとなっている。また、Fig. 7 右側の図に示すように今回は模型から 3mm 離して容量線を設置した。2018 年はこの距離が 5mm であったため、その際の計測と比較してより模型に近い位置での船側波形計測が可能となっている。



Fig.7 模型への容量線取り付け

## 3.4. 水槽試験

容量線が取り付けられた模型を Fig. 8 に示すように検力計を介して強制動揺装置に取り付けた。また 計測システムの概略図を Fig. 9 に示す。トリガーはカメラ操作用ソフトウェアがインストールされた PC および電気系のデータ収録器に配線されており、流体力の計測、高速度カメラおよび容量線による船側 波形計測が同時に行えるようになっている。今回は  $F_n = U/\sqrt{gL} = 0.18$ で模型を曳航し、 $\lambda/L = 0.5$ 、 0.8、1.0、1.25、1.5、2.0の条件における波強制力試験、強制同様試験 (heave, pitch モード) および運動 計測試験を行った。



#### 3.5. 高速度カメラのキャリブレーション

高速度カメラを用いた船側波形計測を行うにはカメラで撮影された画像におけるピクセル数を実際の 長さに変換する必要があるため、本計測に先立ち高速度カメラのキャリブレーションを行った。キャリ ブレーション方法は波が立たない低速で模型を曳航し、その際のレーザー光の長さを6台の高速度カメ ラで撮影するというものである。喫水線が水面と一致したときを基準に昇降装置を用いて5mm ピッチ、 ± 90mm レンジで模型を沈下および上昇させその都度撮影を繰り返し行った。6台のカメラにおける任 意の長さのレーザー光の撮影された画像におけるピクセル数の平均をとることで Fig. 10 に示すような キャリブレーション結果が得られる。本計測ではこのキャリブレーション結果を線形補間することによ り船側波高の算出を行っている。



Fig. 10 キャリブレーション結果

## 4. 結果と考察

## 4.1. 過去実験の計測精度

Fig. 11、Fig. 12 は強制 pitch 試験と強制 heave 試験にて容量線により計測された船側波形の非定常成 分の一次成分の無次元値をそれぞれ示している。 $F_n = 0.18$ 、  $K_eL = 9.9$  ( $K_e = \omega_e^2/g$ )の計測条件にお ける結果であり、これは $\lambda/L = 1.25$ の正面向かい波中を前進することに相当する。横軸は無次元化した 船長、縦軸は波振幅を入射波振幅で割った無次元値であり、中白の黒丸および中白の赤丸は 2022 年の計 測値の sin 成分と cos 成分の pitch 試験では 6 回、heave 試験では 7 回の計測の平均値と標準偏差を示し ている。中黒の黒丸および中赤の赤丸は 2018 年の 1 回の計測値の sin 成分と cos 成分を示している。ど ちらも 2018 年と 2022 年に計測された船側波形は概ね一致していることがわかる。



Fig. 11 強制 pitch 試験における船側波高の非定常一次成分,  $F_n = 0.18$ ,  $K_e L = 9.9$  ( $\lambda/L = 1.25$ )



Fig. 12 強制 heave 試験における船側波高の非定常一次成分,  $F_n = 0.18$ ,  $K_e L = 9.9 (\lambda/L = 1.25)$ 

Fi. 13には前述の結果と同様に  $F_n = 0.18$ 、 $\lambda/L = 1.25$ の条件における運動計測試時に計測された船 側波形を示す。2022年は3回計測を行っており、その平均値と標準偏差を示している。強制動揺試験と は異なり、2018年と2022年の船側波形の計測値に大きなずれが確認できる。2022年度の計測は標準偏 差が小さく、過去の計測値と比較して良好な結果を取得することができた。2度の容量線による船側波 形計測において、変更したのは容量線を設置する位置の模型からの距離のみである。アンプ等の計測機 器や配線は共通していたため、容量線の設置位置を変更したことが結果にずれが生じた原因であると考 えられる。



Fig.13 運動計測試験における船側波高の非定常一次成分,  $F_n = 0.18$ ,  $\lambda/L = 1.25$ ,  $\beta = 180^{\circ}$ 

#### 4.2. 高速度カメラにより計測された船側波形

Fig. 14 に 6 台のカメラと容量線による船側波形計測の例として  $F_n = 0.18$ 、  $K_eL = 9.9$  の条件 の強制 pitch 試験における比較をそれぞれ示す。横軸は無次元化した船長、縦軸が波振幅を入射波振幅で割った無次元値であり、赤丸が容量線、黒線がカメラによって計測された船側波形を示している。



Fig. 14 強制 pitch 試験における船側波形計測値,  $F_n = 0.18$ ,  $K_e L = 9.9$  ( $\lambda/L = 1.25$ )

今回はカメラの台数を*n*として、カメラの間隔が $\Delta x = UT_e/n(n = 6, T_e = 2\pi/\omega_e)$ となるよう計測 条件ごとにカメラの位置調整を行いながら計測を行った。したがって模型 F.P. が各レーザー光に到達し た時刻を*t* = 0 として*j* 番目のカメラによって計測された船側波高  $\zeta_j$  は以下の式で表される。

$$\zeta_{j}(-Ut) \cong \zeta_{0}(-Ut) + \zeta_{c}^{(1)}(-Ut) \cos \omega_{e}(t+x_{j}/U) + \zeta_{s}^{(1)}(-Ut) \sin \omega_{e}(t+x_{j}/U) + \zeta_{c}^{(2)}(-Ut) \cos 2\omega_{e}(t+x_{j}/U) + \zeta_{s}^{(2)}(-Ut) \sin 2\omega_{e}(t+x_{j}/U)$$
(1)

ここで、 $\zeta_0$  は定常波、 $\zeta_c^{(k)}$  および $\zeta_s^{(k)}$  はそれぞれ k 次の cos 成分および sin 成分、 $x_j$  は1台目のカメラ の位置を  $x_1 = 0.0$  としたときの各レーザーとカメラの位置を示している。Fig. 14 で示す結果は異なる 時刻における 6 つの船側波形  $\zeta_j$  ( $j = 1 \sim 6$ ) である。得られた計測値を (1) 式の左辺に代入し最小二乗 法により連立方程式を解くことで、右辺の5 つの未知数  $\zeta_0$ 、 $\zeta_c^{(1)}$ 、 $\zeta_s^{(1)}$ 、 $\zeta_c^{(2)}$  および  $\zeta_s^{(2)}$  を求めることが できる。 Fig. 15から Fig. 20までは波強制力試験におけるカメラによる計測値から (1)式を解いた結果を示している。横軸は無次元化した船長、縦軸が波振幅を入射波振幅で割った無次元値であり、黒丸および黒線がそれぞれ容量線とカメラによって計測された cos 成分、赤丸および赤線がそれぞれ容量線とカメラ によって計測された sin 成分を示している。上段が $\zeta_c^{(1)}$ および $\zeta_s^{(1)}$ 、中段が $\zeta_c^{(2)}$ および $\zeta_s^{(2)}$ 、下段が $\zeta_0$ を示したグラフとなっている。概ね高速度カメラと容量線によって計測された船側波形は一致しているが、特に $\zeta_c^{(1)}$ および $\zeta_s^{(1)}$ では計測条件によってずれが生じているケースも確認される。画像解析の際には数ピクセルのずれが数ミリのずれに相当するため、その精度により解析結果のずれが生じているものと考えられる。

Fig. 21 から Fig. 26 までは強制 heave 試験におけるカメラによる計測値から (1) 式を解いた結果を示している。強制 heave 試験においても容量線と高速度カメラによる計測値は良好な一致が確認できる。

Fig. 27 から Fig. 32 までは強制 pitch 試験におけるカメラによる計測値から (1) 式を解いた結果を示している。これらの結果からも高速度カメラによる船側波形計測の妥当性が確認できる。



Fig. 15 波強制力試験における船側波高,  $F_n = 0.18$ ,  $\lambda/L = 0.5$ ,  $\beta = 180^{\circ}$ 







Fig. 19 波強制力試験における船側波高,  $F_n = 0.18$ ,  $\lambda/L = 1.5$ ,  $\beta = 180^{\circ}$ 

- 8 -

















Fig. 27 強制 pitch 試験における船側波高,  $F_n = 0.18, K_eL = 33.7 (\lambda/L = 0.5)$ 











Fig. 32 強制 pitch 試験における船側波高,  $F_n = 0.18, K_eL = 5.5 (\lambda/L = 2.0)$
# 5. おわりに

これまで使用してきた2018年に計測された船側波形の計測精度を確認するとともに、6台の高速度カ メラを用いた画像解析により船側波形を計測する手法を開発することを目的として行った本研究で得ら れた成果を以下に示す。

- (1) 船側波形の再計測により 2018 年度の結果と比較して良好な計測値を取得することができた。これ は容量線を船体模型から従来の 5mm よりも近い 3mm 程度の位置に浮かせて取り付けたことによ る結果と考えられる。
- (2) 高速度カメラを使用した船側波形計測に際し、計測方法および時間効率のよいキャリブレーション 方法を開発した。この手法は、船体長手方向に数 mm ピッチの密度で船側波形を計測することが でき、また模型を傷つけることがないという利点を有している。
- (3) 高速度カメラにより計測された船側波形は容量線による計測結果と比較することで良好な一致が 確認され、本手法の計測の妥当性が確認された。一方で、計測条件によってはフーリエ係数にず れが生じていたことから、画像解析の精度を向上させることが今後の課題である。

今回の計測では縦運動拘束なしでの船側波形の計測も実施しており、今後はその解析を行うことが課題 となる。また、キャリブレーションを更に高精度化することも可能であることから、以降の計測におい て試みてみる予定である。

# 参考文献

- 1) Iwashita, H., Kashiwagi, M.: An Innovative EFD for Studying Ship Seakeeping, Proceedings of the 33rd IWWWFB, 2018
- Kashiwagi, M., Iwashita, H., Waskito, K.T., Hinatsu, M.: Prediction of Wave Loads with Measured Unsteady Pressure Distribution on Ship-Hull Surface, The 35th Workshop on Water Waves and Floating Bodies, Seoul, Korea, 26-29 April 2020, 査読有
- Kurniawan T. Waskito, Masashi Kashiwagi, Hidetsugu, Iwashita, Munehiko Hinatsu: Prediction of Nonlinear Wave Loads Using Measured Pressure Distribution on Ship Hull, Applied Ocean Research, 101, pp1-20, 102261, 2020, 査読有
- 4) Hidetsugu Iwashita: Innovative Measurement of Unsteady Pressure Distribution on Ship-Hull Surface and Its Use for Hydrodynamic Study on Seakeeping, Invited-Speaker Lecture No.4, The 33rd Symposium on Naval Hydrodynamics, 19-23 October, 2020, 招待講演

# 歯科矯正用アンカースクリューにおける患者別3次元不均質性骨モデルを用いた 有限要素解析の臨床診断への応用

九州大学大学院歯学研究院歯学部門口腔保健推進学講座

歯科矯正学分野 高橋一郎

【研究の背景】

矯正歯科治療は、マルチブラケット装置という口腔内に装着する矯正装置により発生す る矯正力を歯に伝達し、歯を動かすことによって不正咬合を改善するための治療である。こ の治療では、それぞれの歯に加わる力を適切に制御することが治療の成果に直結し、動かす べきではない歯を適切に動かさないように制御することが重要である。この動かしたくな い歯を動かさないという概念を「固定」という。「固定」を適切にコントロールするのは大

変困難であり、この能力を身につけることが矯正歯 科医として最も重要なことでもあるが、それを劇的 に改善したのが歯科矯正用アンカースクリュー(以 下、スクリュー(図 1))である。近年、スクリューの 出現により、治療期間の短縮や抜歯および外科矯正 の機会の減少など、矯正歯科治療は重要な進歩を遂



げつつある。スクリューは患者の協力を必要とせず絶対的な固定を実現できるなど多くの 利点があり、現代矯正歯科治療の主役の一つであるといっても過言ではない。一方で、治 療期間中のスクリューの脱落は骨の治癒期間を待つことになり治療期間の延長、あるいは 治療アウトカム達成率の低下の要因となる。スクリューの脱落率は13.4%-20.1%との報告が あり、脱落因子として患者性質・植立方法・スクリュー形状など様々な因子が挙げられて はいるが、スクリューの脱落を予測することは未だ困難であるというのが現状である。

骨や歯などの生体硬組織は、場所により材料や密度が異なる不均質性材料であり、生体内 部に存在するため、その形状や力学的特性を直接的に求めることは不可能である。その一方 で、CT や MRI などの医療画像情報に基づいて生体の力学モデルを構築し力学解析を行うイ メージ連成バイオメカニクスの技術が発達し、有限要素法(FEM)を用いて患者の骨強度を 解析する方法の必要性は高まってきている。この個体別最適モデルを使ったシミュレーシ ョンシステムの構築は急務である。三次元有限要素法を用いたスクリュー成否要因に関す る過去の研究の多くは骨の不均質性を考慮しておらず、個々の状況を詳細に反映していな い。当講座では先行研究として、上顎骨に植立されたスクリューに対して骨の不均質性を反 映した FEM 解析を行い脱落予測因子としての機械的パラメータを検討した。しかし、皮質骨 が上顎骨より厚いとされる下顎骨の脱落予測因子は未だ特定されていない。皮質骨の厚み や骨密度など性質の異なる上下顎骨において、共通して臨床診断に応用できるスクリュー の脱落因子を検索する為、われわれは患者毎の骨の不均質性やスクリューの植立位置、およ び隣在歯の位置を反映した現実に近いモデルを作成し有限要素解析を行い、スクリューの 脱落に関連する機械的パラメータおよび臨床的リスク因子の解析を行った。

【目的】

本研究では下顎骨に植立したスクリューに対する矯正力負荷が歯槽骨に与える力学的影響を、骨の不均質性を反映したモデルを用いて三次元有限要素法により解析し、植立の成 否に関連する機械的パラメータおよび臨床的リスク因子を特定することを目的とした。

#### 【資料および方法】

マルチブラケット装置を用いた矯正治療の対象となった症例のうち、抜歯が必要と診断 された症例において犬歯遠心移動時の固定原として下顎第二小臼歯、第一大臼歯間に植 立された計 32 本(成功 26 本、脱落 6 本)のスクリューを解析の対象とした。植立前 CT データより骨、第二小臼歯、第一大臼歯、歯根膜のモデルを作成した。マイクロ CT データより作成した直径 1.4mm、長さ 6mm のスクリューのモデルを、植立後 CT データよ り作成したモデル上で重ね合わせ、骨モデルに植立した。三次元有限要素解析ソフトウェ ア(Mechanical Finder)を用いて 2Nの荷重を近心方向に加えた。スクリュー表面からの距 離によって骨を 4 つの領域:領域 1 (0.0~0.5 mm)、領域 2 (0.5~1.0 mm)、領域 3 ( 1.0~1.5 mm)、領域 4 (その他の骨)に分割し、応力とひずみに関連する 20 の機械的パラ メータのピーク値を求め、ロジスティック回帰分析によってスクリュー成否に関与する機 械的パラメータの検索を行った。さらに、CT 画像データおよび有限要素モデルより骨密 度・皮質骨の厚み・スクリューと隣接歯根との距離・スクリュー植立角度などのデータを 取得し、回帰分析を行うことで下顎骨に植立されたスクリューの成否に最も関連する機械 的パラメータに関与する臨床的リスク要因の検索を行った。

【結果および考察】

下顎骨に植立されたスクリュー成否の評価基準として、機械的パラメータは最小主ひずみ、歯槽骨の領域では領域2(0.5~1.0 mm)が適切であると推察された(R2 = 0.8033)。 上下顎骨共に領域2(0.5~1.0 mm)の主ひずみにおいて成功群と脱落群の間に差があると 考えられた。予測式によると、領域2の最小主ひずみが -474 µstrainの場合、スクリュー が脱落する可能性は 5%であった。一方、スクリューが脱落する可能性は領域2の最小主 ひずみが -663 µstrainで 50%、-852 µstrainで 95%と予測された。スクリュー表面から0.5 ~1.0 mmの範囲の骨の主ひずみの増大が、上下顎骨ともにスクリューの脱落に最も関連し ており、下顎骨では上顎骨よりも小さな主ひずみでスクリューの脱落が起こることが明ら かとなった。このことから、スクリューの脱落には主応力や相当応力よりも主ひずみが重 要な役割を果たしていることが示された。次に、臨床的因子がスクリューの周囲の骨の主 ひずみに与える影響を検討した。患者の骨密度、スクリューと隣接歯根との距離、スクリ ューの垂直的植立角度が上下顎骨ともに主ひずみに有意に関連していた。スクリュー植立 前に CT 撮影を行い骨密度が低い部位への植立を避け、スクリュー植立の際には粘膜の炎症 および隣接歯根との近接を避けるために付着歯肉から歯根側へスクリューを傾斜させて植 立することでスクリューの成功率向上に寄与できる可能性が示唆された。

【今後の展望】

スクリューは近年顎整形力への応用も期待されているが、矯正力と比較し負荷の大きな 顎整形力に対するスクリューおよび骨の耐性についてのエビデンスの不足が歯科矯正用ア ンカースクリューのガイドラインにおいても指摘されている。このような問題に対して、ブ タの下顎骨にスクリューを植立し荷重を増大させていく動物実験と有限要素解析を用いた ブタおよびヒトにおけるスクリューへの荷重増大シミュレート解析を行っていく。まず、 ブタの下顎骨を CT スキャンして作成したモデルの有限要素解析を行うことで骨の状態と 脱落との関連を検討し、次に、ブタの下顎骨に実際にスクリューを植立し、スクリューが 脱落するまで荷重を増加させていく実験とを実施し、患者固有の耐荷重量を推察すること ができるモデルを策定することをめざして研究を展開することとした。また、荷重をかけ た時の歪みの分布などについても調査を行っていく。加えて、上顎骨の口蓋に植立したス クリューに対する矯正力負荷が歯槽骨に与える力学的影響を骨の不均質性を反映したモデ ルを用いた3次元有限要素法により解析し、植立の成否に関連する機械的パラメータおよ び臨床的リスク因子を特定することを目的として、継続的に研究を実施する。こうした研 究成果をとりまとめ、スクリューの脱落を予防するための診断基準を策定し、矯正歯科臨 床の安全性の向上に寄与することを目的として研究を進めていく。本研究を進めていくこ とで、最終的には、患者毎にスクリュー植立前に最適な植立部位や荷重量、スクリューサイ ズなどを特定できるシミュレーションシステムの確立を目指したいと考えている。

# ダイヤモンド半導体および酸化ガリウム半導体の素子に影響を与える 結晶欠陥の解明

#### 佐賀大学大学院理工学研究科 嘉数 誠

#### 1. はじめに

β 型酸化ガリウム (β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)はワイドバンドギャップ(4.8 eV)と高い絶縁破壊電界(8 MV/cm)をもつ半導体で,次世代高効率パワーデバイスに期待されている.最近,我々は探針接触で誘起された結果[1]と線状欠陥[2]がデバイスの特性を劣化させるキラー欠陥であることを見出したが.その結晶中の転位が作製した縦型ショットキーバリアダイオード(SBD)特性に与える影響については明らかでなかった.本研究では,走査型電子顕微鏡やエミッション顕微鏡,シンクロトロンX線トポグラフィーでキラー欠陥となる転位を見出した.

#### 2. 実験方法

測定試料は、2インチ径 EFG 成長(001)単結晶基板上に HVPE 法で成長した n 型  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> エピタキシャル層である. 正味のドナー濃度(N<sub>D</sub>-N<sub>A</sub>,)は 1.6 × 10<sup>16</sup> cm<sup>-3</sup>である. エピ膜厚は約 10  $\mu$ m である 縦型 SBD を作製した. オーミック電極は Ti/Au を用い、ショットキー (SB) 電極には、表面に Ni/Au を蒸着した.

#### 3. 実験結果と考察

Figure 1 に SBD #F0316b で逆方向電圧-100 V 印加, リーク電流-0.98 μA の条件下でのエミッション顕 微鏡像を示す. リーク電流により矢印で示す 1 つのエミッション(発光) パターンが観察された.

つぎに Fig. 2 に、ウェハのシンクロトロン X 線トポグラフィー (g ベクトル 605, 225,  $\overline{2}$ 24,  $\overline{10}$ 05) 像 のエミッション箇所を示す. 点状のコントラストとして観察される転位がg ベクトル 605 と 225 では, コントラストが観察され, g ベクトル  $\overline{2}$ 24 と  $\overline{10}$ 05 ではコントラスト消失している. 以上の結果をg・b 消滅則から判断すると, 転位のバーガーズ (b) ベクトルを決定した.

#### 4. 結論

本研究では, HVPE 成長(001) 面方位 β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>SBD のリーク電流をもたらすキラー欠陥の転位は, **b**=000 と決定された.1本の転位は, -0.98 μA のリーク電流に相当することがわかった.

#### 5. 発表, 論文リスト

[1] Sayleap Sdoeung, Kohei Sasaki, Katsumi Kawasaki, Jun Hirabayashi, Akito Kuramata, and Makoto Kasu,

"Probe-induced surface defects: Origin of leakage current in halide vapor-phase epitaxial (001)  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Schottky barrier diodes", Applied Physics Letters **120**, 092101 (2022).

[2] Sayleap Sdoeung, Kohei Sasaki, Katsumi Kawasaki, Jun Hirabayashi, Akito Kuramata, Toshiyuki Oishi, and Makoto Kasu, "Line-shaped defects: Origin of leakage current in halide vapor-phase epitaxial (001)  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Schottky barrier diodes", Appl. Phys. Lett. **120**, 122107 (2022).

[3] Sayleap Sdoeung, Kohei Sasaki, Akito Kuramata, and Makoto Kasu,

"Identification of dislocation responsible for leakage current in halide vapor phase epitaxial (001) β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Schottky

barrier diodes investigated via ultrahigh-sensitive emission microscopy and synchrotron X-ray topography",

Appl. Phys. Express 15, 111001 (2022).



Figure 1. Emission microscopy image of β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Schottky barrier diode. The reverse bias voltage of -100 V.



Figure 2. Synchrotron X-ray topography images at the position of the emission spot.

# 化膿性脊椎炎診断のための Deep Learning による CT 画像解析法の検討

佐賀大学大学院医学研究科 森本忠嗣

# 1. 緒 言

化膿性脊椎炎は、細菌が脊椎に侵入することにより化膿する病気であり、症状が進み破壊されると手術が必要となってしまうため、医療画像による早期診断が重要である。可能性脊椎炎の診断は、MRI 画像がスタンダードであるが、一般的には CT 画像の方がより 簡便に短時間で検査することができる.そこで本研究では、CT 画像を用いた化膿性脊椎炎 診断に対して、深層学習を利用した画像解析法を利用することを検討した.

# 2. 実験方法

佐賀大学附属病院において化膿性脊椎炎と診断された 47 名分の CT 画像から 22 名分 1008 枚(男性 14 名,女性 8 名,41 歳~87 歳)を選択し,腰椎の L1~L4 の横断面に限定 して解析に使用した.画像データは陽性と陰性に分割し,訓練データ,検証データ,テス トデータが枚数比 6:2:2 となるように用意した.プログラミング言語は Python,深層学 習ライブラリは PyTorch,開発環境に JupyterLab を使用して解析を行った.深層学習モデ ルは,ImageNet データセットで事前学習した VGG16, ResNet50, EfficientNet B3 の三つ のモデルを用いてファインチューニングを行った.以下に解析方法を示す.

① 3つのモデルによる class weight を用いた手法の比較

② Data Augmentation (データ拡張)の二パターン (online と offline) の比較

③ ①と②で最も精度が良かった VGG16 の学習に scheduler を施す

評価指標は、Accuracy、Recall、Specificity、F1 score、ROC AUC を用いた.また、GradCAM を用いることで深層学習モデルが画像のどこを注目したのか判断根拠の可視化を行った.

# 3. 結果及び考察

三つのモデルで行った class weight の結果と VGG16 での Data Augmentation の二パタ ーンの比較, VGG16 に scheduler を施した結果を以下に示す. Table1 の上段に示すよう に, VGG16 の精度が最も高かった. 最も精度の悪い EfficientNet B3 に関しては, 陽性に 対する分類(Recall)はできているが, 陰性に対する分類(Specificity)が全くできていなかっ た. Table1 の中段は Data Augmentation の二パターンでの比較を行った結果である. Table1 には 3 つのモデルで一番精度の高い VGG16 の結果のみを示している. 中段の結果から offline 拡張よりも online 拡張の方が有用であるといえる. 下段では VGG16 の online 拡張 したものにさらに scheduler を加えた結果を示している. scheduler で学習率を適度に下げ ることにより精度を高めることができた.

次に GradCAM による判断根拠の可視化を Fig.1 に示す. Fig.1 は VGG16 を使って, GradCAM による判断根拠の可視化を行ったものである. 左が陰性画像, 右が陽性画像で あるが両方とも椎骨部により判断ができている.

# 4. 結 言

三つのモデルを用いて化膿性脊椎炎の有無の画像解析を行った. 三モデルを比較して VGG16 により高い精度で有無を分類することができた. さらに online 拡張, scheduler を 施すことによりさらに精度を向上させることができた.

	Accuracy	Recall	Specificity	F1 score	ROC AUC
VGG16	0.927	0.951	0.886	0.943	0.902
ResNet50	0.833	0.992	0.557	0.883	0.852
EfficientNet B3	0.672	0.967	0.157	0.789	0.704
VGG16 offline	0.868	1.000	0.639	0.906	0.821
VGG16 online	0.927	0.992	0.814	0.945	0.898
VGG16 online	0.022	1 000	0.914	0.050	0.062
+ scheduler	0.932	1.000	0.014	0.930	0.903

Table1. Analysis Results



Fig.2 Visualization with GradCAM

# CT-FEM を用いた骨粗鬆症に起因する骨折メカニズムの解明

産業医科大学 塚本 学

## 1. はじめに

骨粗鬆症は、骨量の低下と骨組織の微細構造の異常を特徴として、骨強度が低下し、骨 折のリスクが高い状態を指す。骨粗鬆症に関しては、破骨細胞の働きを抑えることで骨密 度低下の抑制する薬や骨芽細胞を活性化させて骨密度の向上させる薬などによって治療が 行われる。臨床により骨粗鬆症患者に効果が示されている薬であったとしても、その効果 には個人差がある。また、骨密度に変化がなくとも骨の内部構造の変化による骨質の変化 によって骨強度の向上が起こることもある。医療現場では、患者ごとに骨密度だけでなく、 骨強度を知ることができれば治療計画を立てやすくなるため、骨密度と骨強度の両方を評 価できる手法が求められている。そこで本研究の目的は、CT-FEMを用いて骨粗鬆症患者 への投薬によって起こる骨構造や骨強度の変化を評価できるか検討することとした。

#### 2. 解析条件

大腿骨を骨折し人工関節置換を行った高齢患者のCT 画像を用いてモデル作成を行った。 同一患者の術前、術直後、術後1年、術後2年の健側のデータを用いて大腿骨有限要素モ デルを作成した。CT 値から骨密度を推定し、骨密度から Keller の式を用いてヤング率と降 伏強度の推定を行った。荷重拘束条件としては、片足立ち荷重、転倒荷重、ねじり荷重1、 ねじり荷重2の4種類の荷重条件にて解析を行った。1ステップ10N で解析を行い、引張 または圧縮破壊の要素数が500 に達すると骨折したと定義し、このときの荷重の大きさを 強度として評価した。

# 3. 結果と考察

本稿では、転倒荷重条件での結果のみを示す。図1に平均骨密度の比較を示している。 骨全体の平均骨密度は時間経過とともに減少していた。転倒荷重における破壊形態を図2、 引張破壊要素数の経時変化を図3(a)、圧縮破壊要素数の経時変化を図3(b)に示す。転倒解 析における強度は術前が1002N、術直後が1037N、術後1年が1199N、術後2年が921N という結果になった。図3の破壊形態を見ると、術前と術直後のモデルは頭部と頸部の境 界と転子部にある程度破壊が分布している状態であるが、術後1年以降は転子部の破壊が 多く見られ、術後1年においては破壊のすべてが転子部周辺で起こっているという結果が 得られ、破壊形態が変わっていることが確認できた。また、破壊要素数の経時変化を見る と、術後1年の破壊要素数の伸びが最も緩やかであることから、術前と比較して皮質骨の 骨密度が低いにも関わらず、表面の状態などの骨質の変化によって強度に影響が起こった 結果が得られたと考えている。

# 4. 結 言

骨粗鬆症患者への投薬による影響については、骨全体の平均骨密度は時間経過ととも低下しており、その原因として術直後は皮質骨の量の低下、術後1年および2年は皮質骨の 骨密度自体の低下が起こっていた。しかし、骨密度の高い術前や術直後ではなく術後1年 がすべての条件で最も強度が高いことから、骨密度が低下しても投薬による骨質への影響 によって強度低下が抑制されたことを示せた。







Fig.2 Fracture diagram in overturning load



Fig.3 Change in number of compression fracture elements in overturning load

# CT 画像を利用した有限要素解析の骨折固定術への応用

千葉大学大学院医学研究院 松浦 佑介

#### 1. 緒 言

大腿骨骨幹部骨折に対する髄内釘挿入術の良好な成績が報告される一方で、固定性不足による偽関節 症例もしばしば経験する。骨折部の仮骨形成に関しては仮骨のひずみの大きさで議論されることがある が、術後の固定性や適切な髄内釘サイズの評価方法は確立されていない。そこで我々は、有限要素解析 で骨折部仮骨の破壊リスクを評価することで、荷重に対して偽関節に陥るリスクや固定性を定量的に評 価できると考えた。本研究の目的は、CT ベース有限要素解析を用いて、髄内釘挿入術後、また偽関節 手術にて異なるサイズの髄内釘と入れ替えた場合の固定性を定量評価することである。

#### 2. 方法

対象は 51 歳男性であり、仮骨形成を認める術後6ヶ月の CT 画像を用いて有限要素解析を行い、仮 骨部の破壊リスクを評価した。解析モデルは大腿骨近位、遠位骨片、仮骨、髄内釘、スクリューで構成 され、アーティファクトの影響を軽減する際、海綿骨と皮質骨で異なる上限値を設定するため、該当部 分を別途モデル化した (図 1)。また、偽関節手術のシミュレーションとして φ 12mm L360mm、φ 12mm L400mm、φ 13mm L360mm、φ 13mm L400mm の髄内釘を想定したモデルも作成した (図 2)。境界条 件は骨頭に体重の 3 倍 (1911N)の荷重を与え、荷重方向は常に骨頭中心から膝関節中心へ向くように 設定した。拘束は遠位端を完全拘束とした。評価は骨折部分の仮骨の破壊リスクに注目した。

#### 3. 結果と考察

術後6ケ月における引張破壊リスク 50%以上の仮骨領域を図3に、その時の引張破壊体積率の荷重 変化を図4に示す。体重3倍の荷重では15%程度の領域が引張破壊を起こし、歩行によって偽関節に陥 る可能性が示唆された。髄内釘挿入術後と偽関節手術としてサイズが異なる4種類の髄内釘を入れ替え たモデルの比較を図5に示す。骨折部仮骨の破壊リスクのある体積は髄内釘の径を11mmから12mm、 12mmから13mmと太くすると、それぞれ11.1%、35.1%軽減した。臨床上、偽関節手術としての髄内 釘入れ替えはリーミングすることによって骨癒合を促す作用と力学的安定によって骨癒合を期待する 作用が考えられるが、髄内釘の径を太くすることのみによっても、骨癒合に良い影響を与えることが示 唆された。一方12mm、13mm径、長さ360mmの髄内釘を400mmと長くすると、それぞれ8.8%、 15.6%の軽減となり、径を上げる方が効果を得られた。これは、髄内釘を長くしても骨折部分の剛性が 変わらないためと考えられる。さらに、髄内釘が長くなるとスクリュー固定部も骨折位置から離れるた め、骨折部分の固定力は下がる可能性もある。また、11mmから12mm径へは13mmと比べて効果が 小さいが、T2 Femoral nailの11mm径では近位部が11.5mmと差が小さいことが影響していると考え られる。いずれにせよ、より太くより長い髄内釘を挿入することでより安定した骨折の固定ができると いう臨床的に矛盾しないが結果が示された。

1

191





図1 有限要素モデル

図 2 各解析モデル。左から Ø 11mm L360mm、 Ø 12mm L360mm、 Ø 12mm L400mm、 Ø 13mm L360mm、 Ø 13mm L400mm



Force [%BW]

図3 引張破壊リスク 50%以上を示す要素





図 5 体重 3 倍荷重時の各モデルの引張破壊リスク 50%以上の要素。左から A. ¢ 11mm L360mm、 B. ¢ 12mm L360mm、C. ¢ 12mm L400mm、D. ¢ 13mm L360mm、E. ¢ 13mm L400mm

# 上腕骨近位端骨折に関連する生体力学的問題に対する CT-FEM の応用

#### 東北大学病院 佐野博高

# 1. 緒言

上腕骨近位端骨折は肩関節周囲の骨折で最も多く、特に骨粗鬆症を持つ高齢の女性に多く発生している。この骨折は、高齢患者の転倒および骨粗鬆症に起因しており、股関節骨折、橈骨骨折に次いで、高齢患者で3番目に多い骨折である。上腕骨近位部骨折患者の70%以上が60歳以上であり、 挙上困難や疼痛などの肩関節の機能障害が残ることが問題となっている。しかし、異なる骨折形態が発生するメカニズムは、まだ明らかになっていない。また、骨折後の固定方法に対しても力学的検討はされておらず、整形外科医の経験によって固定方法を決定している。そこで、本研究では、 CTデータより上腕骨モデルを作成後、FEMを用いて骨折の再現を試みた。さらに荷重方向の変化に伴う骨折形態の調査、年齢と性別の変化に伴う骨折形態の調査、固定方法の力学的最適化を行った。

#### 2. 解析方法

CT 画像から骨解析ソフトウェア Mechanical Finder を用いて 3 次元上腕骨モデルを作成した。上腕骨の骨密度は HU 値から推定し、ヤング率と降伏応力は Keyak (1998)の予測式を用いて算出した。 骨内部の要素は 4 面体要素を用い、最外層にはシェル要素を用いた。拘束条件は腱板の付着部で完 全固定したものを拘束条件 1、関節包の付着部で完全固定したものを拘束条件 2、関節包の付着部 を外科頚の内側の拘束を変化させたものを拘束条件 3 (Fig.1)とし、荷重条件は内転負荷で行った。 年齢と性別の変化に伴う骨折形態の調査と固定方法の力学的最適化は実際の肩関節に近い拘束条 件 3 で内側の拘束は XY 方向を固定した。ステップ数を 100、荷重増分は 5N/ステップとした。終 了条件は、シェル要素数で設定した。固定方法の最適化では、髄内釘固定とプレート固定の打ち上 げスクリューの有無での破壊要素数の変化を調査した。Fig.2 の左図の髄内釘の 2 つある打ち上げ スクリューの上を打ち上げスクリューa 下を打ち上げスクリューb とした。

#### 3. 結果と考察

拘束条件1では引張破壊が分散していて連続した骨折線は見られなかった。拘束条件2では外科 頚の内側に骨折線が見られた。拘束条件3では外科頚骨折に類似した損傷が見られた(Fig.3)。外 科頚の内側を部分拘束するとその部分の拘束が弱くなり外科頚の内側でも骨折線が生じた。したが って、拘束条件3が実際の骨折に近いのではないかと考える。年齢と性別の変化に伴う骨折形態の 変化の調査では年齢が若い人ほど骨折は発生しにくく、男性と女性では、男性の方が骨折は発生し にくいことが分かった。固定方法の力学的最適化では髄内釘固定、プレート固定ともに打ち上げス クリューがある方がより大きな荷重に耐えられる。シェル要素の破壊が開始した最初の荷重値に大 きな差は見られなかったが、荷重を大きくするとその差が顕著に表れた。髄内釘固定において打ち 上げスクリューaと打ち上げスクリューbでは打ち上げスクリューbの方がより大きい荷重に耐え ることができることが分かった(Fig.4, Fig.5)。

#### 4. 結言

本研究では、上腕骨近位端骨折のメカニズム解析を行い、外科頚の内側を部分拘束、外側を完全 拘束すると実際の外科頚骨折に類似した損傷が発生すること分かった。また、年齢が低く、また男 性の方がより大きい荷重に耐えられることが分かった。さらに、髄内釘固定、プレート固定ともに 打ち上げスクリューは有効であることが分かった。



Fig.1 Boundary condition



Fig.3 Distribution of fracture elements



Fig.2 Femoral model with implant



Fig.4 Comparison of fracture load



Fig.5 Accumulation of fracture element under compression

# ME-11 データサイエンスに基づく医療工学研究

九州情報大学 荒平 高章

# 1. 緒言

近年,人工知能(AI)に関する研究開発が国内外を通して活発に展開されている. AI 技術を駆使し,コンピュータに人のような振る舞いを再現させようとする研究は,医学・ 歯学・薬学・看護・介護分野では労働者の仕事効率のスマート化などが期待されている [1].また,人工知能アルゴリズムの中のひとつに GAN (Generative Adversarial Networks)があり,その派生技術は,有名な映画作品の画風を模倣した絵を描き[2], ある文章からその特徴を表した画像を生成することができる[3].

一方、歯科医療分野では CT 画像に映った歯科インプラントの種類を識別する必要の ある場面が存在する.しかし、インプラントは 100 種類以上あるといわれており、識別 するには知識と経験が重要になってくる.さらに、インプラントの画像データをもとに 学習用データを作成することは患者本人や医療機関への同意などが必要となり、データ ベース化することが困難であることも問題となっている.そこで、GAN の派生技術の 一種である DCGAN (Deep Convolutional GAN) と LSGAN (Least Square GAN) を使って歯科インプラントの CT 画像生成を行い、学習用データとしての可能性につい て検討を行った.

#### 2. 方法

本研究では、1737 枚の画像を学習データとして DCGAN, LSGAN によって学習を 1200 回行 った.その際,画像は学習回数 20 ごとに 16 枚生成するものとした.それぞれの画像の精度 を,形状,鮮明さを比較し、より本物画像に近い画像を生成しているかについて検討を行 った.

#### 3. 結果と考察

DCGAN の場合, 学習データを再現し始めたのは学習回数 20 であった. インプラントの形状をはっきりと表すようになったのは学習回数 720 であった(図 1). 最終的に色, 形状, 鮮明さを持った画像は5 枚であった. 実行に要した時間はおよそ1 時間であった.

LSGAN の場合, 学習データを再現し始めたのは DCGAN と同様の学習回数 20 であった. さらに,インプラントの形状を学習回数 20 の段階から表しはじめ, その後も DCGAN と比較すると,インプラントに近い形状の画像を生成していた(図 2). 最終的に色, 形状, 鮮明さを持った画像は7枚であった. 実行に要した時間はおよそ1時間 50 分であった.

195

以上より,全体的に安定した画像を生成していたのは,LSGAN であることが明らかとなった.また,GAN を用いることで,学習データを生成させることが可能となり,より少ないインプラントデータであっても,疑似的にインプラント画像を作成できることが明らかとなった.



図 1 DCGAN による生成画像 (学習回数 720)



図 2 LSGAN による生成画像 (学習回数 900)

# 4. 結言

本研究では、GAN によるインプラント画像の生成を試みた. その結果、GAN を用い ることで、学習データを生成させることが可能となり、より少ないインプラントデータであ っても、疑似的にインプラント画像を作成できることが明らかとなった. また、学習に用い た画像データは 1737 枚を要したが、今後はより少ない画像データで実際のインプラントデ ータに近い画像を生成できるかどうかについて検討を行う.

参考文献

(1) 勝又 明敏, 歯科画像情報の現状と将来展望, 日本歯科保存学雑誌, 2019 年 62 巻
5 号, 238-242. DOI <u>https://doi.org/10.11471/shikahozon.62.238</u>

(2) Yang Chen, Yu-Kun Lai, Yong-Jin Liu. CartoonGAN: Generative Adversarial Networks for Photo Cartoonization, (2018).

(3) Han Zhang, Tao Xu, Hongsheng Li, Shaoting Zhang, Xiaogang Wang, Xiaolei Huang, Dimitris Metaxas. StackGAN: Text to Photo-realistic Image Synthesis with Stacked Generative Adversarial Networks, (2017).

# 次世代パワーエレクトロニクスシステム用劣化観測技術

九州工業大学 大学院工学研究院 電気電子工学研究系 長谷川 一徳

#### 1. 研究目的

自然エネルギー有効活用にはパワーエレクトロニクス(パワエレ)システムの普及拡大が必要不 可欠であるがパワエレシステムの導入数増加とともにその信頼性向上も急務となっている。パワエ レシステムを構成するパワー半導体デバイスの故障は、パワエレシステムの中で主な故障原因の一 っとなっている。近年、パワー半導体デバイスが複数搭載されたパワーモジュールの信頼性研究が 盛んに行われており、パワーデバイスが発生する損失による自己発熱に起因した金属接合劣化が故 障要因として明らかになっている。本研究の目的は、パワエレシステムにおけるパワーモジュール の劣化状況を観測する技術の構築である。

#### 2. 研究の具体的方法

パワエレシステムの動作状態におけるパワーモジュールの劣化観測技術として,チョッパ回路連 続動作時におけるモニタリングする手法を開発する。パワーモジュールの温度と電流を計測し,モ ジュール内で発生する損失を演算し,そこからパワーモジュールの熱抵抗の変動量を求めることで, モジュールの劣化を観測する。従来,パワーモジュールの劣化評価試験では,実際のパワエレ回路 動作ではなく,モジュール内に一定損失を繰り返し発生させた条件で試験が行われてきた。提案手 法はインバータ動作を模擬し任意の電流・周波数における実温度・電流波形を用いてパワーモジュ ールの劣化を抽出できる点に特長がある。

提案手法を用いてパワーモジュールの劣化観測を行い,回路の動作条件(電流・電圧波形)と計 測間隔,演算モデルの関係を明らかにすることで劣化検出技術を構築する。

本研究のパワーモジュールの高精度な劣化検出技術はパワエレシステムの設計最適化につなが り,高寿命化と信頼性向上に大きく貢献する。

3. VCE 測定環境の構築

チョッパ回路動作時のパワーモジュール内の IGBT チップのオン電圧 V<sub>CE</sub>を測定することでその 動作温度を算出できるが、オフ時の高電圧に伴うノイズを除去し測定する必要がある。そこで、図 1 に示す小型 IoT プラットフォーム Leafony Basickit2 を採用した。Leafony は A/D 変換回路を内蔵 し、USB アイソレータまたは Bluetooth を使用しノイズ伝送が可能であるため、ノイズ耐性に優れ ている。

4. チョッパ回路を用いた温度特性プロファイルの測定

図2に示すチョッパ回路を用いてパワーモジュールの温度特性プロファイルの測定を行った。この回路は測定対象の素子 Q<sub>2</sub>を最初の1秒スイッチングさせ,温度上昇を確認する。次の3秒では主に Q<sub>3</sub>をスイッチングさせ,100回に1回 Q<sub>2</sub>をスイッチングさせて,温度の低下を確認する。

#### 5. 測定結果

図 3~6 にチョッパ回路の動作条件を 4 つのパターンで変更したときの V<sub>CE(sat)</sub>から算出した温度のデ ータを示す。電流に注視して比較した場合,20 kHz 時,図 3 において,70 A の時は定常時の温度 と比べると 81℃上昇している。図 4 において,50 A の時は 64℃上昇している。電流が 29%減少し たことで温度上昇が 21%減少した。30 kHz 時,図 5 において,70 A の時は 165℃上昇している。 図 6 において,50 A の時は 126℃上昇している。電流を 29%減少したことで温度上昇が 24%減少 した。20 kHz,30 kHz 共に電流の変化率に対する温度上昇の変化率がほぼ一致した。算出した温度 プロファイルは導通損失による熱応答特性を定量的に示している。スイッチング周波数で比較した 場合も同様に,周波数増加に伴い温度上昇幅の増加が確認できる。

6. まとめ

本研究では、パワーモジュールの劣化状況を観測するため、Leafonyを用いた V<sub>CE</sub> 測定環境の構築とチョッパ回路を用いた温度プロファイルの測定を行った。取得した温度プロファイルはモジュールの熱抵抗算出のキャリブレーションデータとして使用できる。以上の成果は今後インバータ実動作条件における劣化試験の基礎データとして活用する。



図 1: Leafony Basickit 2



図 3:20 kHz 70 A 時の温度変化



図 5:30 kHz 70 A 時の温度変化







図 4:20 kHz 50 A 時の温度変化



# 深層学習による画像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

#### 1. はじめに

顔面痛の代表的な疾患である三叉神経痛は、三叉神経が支配する領域に生じる片側(まれ に両側)の発作性顔面痛である.痛みは三叉神経枝が支配する領域に限られ、非侵害刺激に より誘発され、短時間で繰り返す[1].典型的な三叉神経痛の年齢分布は、若年者から高齢 者までと幅広い.典型的な三叉神経痛は、三叉神経起始部で三叉神経が周囲の血管により圧 迫されることにより起こると考えられている.典型的な三叉神経痛は画像診断が有効である が、遠隔地では診断が困難であり、医師の経験が必要とされる.また、現在では医療分野で のAIの画像認識技術の活用が注目されており、画像認識を得意とする畳み込みニューラルネ ットワーク[2]が多くの症例で有効であるこが示されている[3][4].AIを用いた自動診断手 法の確立を目指し、本研究では、基礎的研究として深層学習を用いた診断手法を検討する.

#### 2. 画像解析法

2.1 データセットの作成

献体43名の三叉神経のMRI画像から,三叉神経痛と非三叉神経痛の画像,計240枚のデー タセット(A set)を作成した.さらに,A setを4倍にデータ拡張をした,計960枚のデータセ ット(B set)と10倍にデータ拡張した,計2400枚のデータセット(C set)を準備した. 2.2 分類と評価方法

CNNを用いて、3種類のデータセットから三叉神経画像を陰性か陽性かの2クラス分類する.本研究では、VGG16、VGG19、ResNet 50の汎用性の高い3種類のCNNで転移学習を行い、結果を比較した.価方法は、陽性の識別が重要であると考え、Accuracy、Precision、Recall、F1-score、aucからテストデータを用いて評価した.また、その時、Grad-CAM[5]を用いてCNNの判断根拠を可視化することで、評価の透明性をした.

#### 3. 結果と考察

VGGモデルにおいて、安定したパフォーマンスを示すことができた. Resnet 50の結果から、畳み込み層を増加すると、学習が収束しない(精度が上昇しない)状況が生まれたため、 Resnet 50よりも多層モデルでの性能が上昇しないことが予測された. そこで、より精度の 高いモデルを提案するためにVGGモデルの構造に着目し、構造の改良を行った. そのため、 VGGモデルの構造の改良において、二つの手法を提案した.

1つ目の手法では、VGGモデルの識別器をサポートベクターマシン(SVM)[6]に変更にした.SVMは2クラス分類を得意とするため、本研究と互換性が良いと考え、採用した.また、学習時において、学習のばらつきがみられたため、2つ目の手法として、VGGモデルの層にBatch Normalization(BN)[7]を追加することでネットワークの学習プロセスを全体的に安定化させて学習速度を高めることを図った.

199

サポートベクターマシンの結果においては、VGG16、VGG19ともに、全ての評価指標に おいて0.7~0.8に留まり、性能向上がみられなかった.しかし、Batch Normalizationの追加 では性能向上がみられた.BN追加後のVGG16の結果を表1に示す.C setにおける結果では、 オリジナルモデルと比べ、Acuuracy:1.2%、Recall:4.1%、F1- score:1.3%、auc:1.3%の向上が みられた.次に、BN追加後のVGG19の結果を表2に示す.同様に、C setにおける結果では、 オリジナルモデルと比べ、Accuracy:7.9%、Presicion:8.5%、Recall:6.2%、F1- score:7.3%、 auc:2.7%と大幅な性能向上がみられ、本研究において最も性能であり、Grad-CAMの結果 (図1)からも性能の信頼性を示すことできた.

各データセットでの3種類のCNNモデルを比較した結果,VGGモデルは安定した結果を示 しており,C setにおけるVGGモデルがAccuracy: 0.942, Precision: 0.958, Recall: 0.926, F1score: 0.942, auc: 0.982を達成した.この結果から,CNNによる基礎的な診断手法が構築で きていることがいえ、より実用化に向けて更なる性能向上が期待できる

#### 4. 結 言

本研究では、三叉神経痛の画像診断のAI診断法について深層学習を用いた画像解析法を検 討・提案した.その際、CNNを中心としたVGG16、VGG19、ResNet50の3種類の分類モデ ルで一連の実験を行い、各モデルの性能を比較した.その結果、最も性能の良いモデルは、 C setのVGG16であった.さらに、VGGモデルの性能の向上を目指し、VGGモデルの構造 の改良を行い、2つの手法を提案した.サポートベクタマシンでは、性能向上はみられなか ったが、Batch Normalizationの追加では、性能向上の可能性がみられた.以上より、この研 究は、三叉神経痛における画像診断のAI診断法のシステムの構築に向けた一翼を担うもので あり、近い将来、医療格差がある地域で有用となる可能性があると確信している.

		Accuracy	Precision	Recall	F1-score	auc
VGG16 +	A set	0.792	0.800	0.727	0.762	0.944
BN	B set	0.917	0.880	0.957	0.917	0.963
		0.954	0.944	0.967	0.955	0.995

表1.	Test result	with	VGG1	6+	BN
-----	-------------	------	------	----	----

表 2. Test result with VGG19+BN

		Accuracy	Precision	Recall	F1-score	auc
VGG19	Aset	0.792	0.714	0.909	0.800	0.888
BN	Bset	0.896	0.875	0.913	0.894	0.951
	Cset	0.979	0.983	0.975	0.979	0.991



 $\boxtimes$  1. Grad-CAM of VGG19 + BN on C set

新エネルギー機器のための流体構造連成シミュレーション

東京工業大学 学術国際情報センター 青木 尊之

#### ・目的

風力発電などの新エネルギー機器では、軽量化のために構造物が薄板で構成されることが多い。構造 物の疲労や破壊につながる空力ー弾性変形の数値シミュレーションによる連成解析を行う。基本的な形 状として長方形薄板を扱い、一方の短辺が支持されているとき、薄板の変形が長辺の長さによってどの ように変わるか、また薄板を2枚並べることにより流れがどのように抑制されるかを明らかにする。

#### 解析方法

流体については AMR 法を導入したキュムラント型格子ボルツマン法を用い、構造解析は 6 面体 2 次 要素と要素の剛体回転を考慮した Green-Lagrange ひずみの有限要素法を用いた。連成計算には Direct Forcing 埋め込み境界法を用い、流体計算を高効率に行うために薄板近傍と強い渦の近傍に高解像度格 子を動的に配置し、重力も考慮している。解析に用いたコードは、傾いたアクリルの薄板に風を当てる 実験(Jin, et al.:, J. Fluid Mech., Vol. 864, pp. 273–285, 2019) でコーシー数(風速)に応じて Fluttering モー ド、Twisting モード、Orbital モードが現れることを精度よく再現している。また、薄板が流れに対して Twisting することにより、流れに対する投影面積が自動的に低減され、効力が低下する点も実験とよく 一致することが確認されている。

#### ・解析結果と考察

# (1) 薄板の長さの流体構造連成に対す る影響

矩形領域の 2.46 m×0.82 m×0.82 m に対して計算を行い、格子幅は物体近 傍で 0.2 mm、遠方で 51.2 mm とした。 境界条件は,前方および四方の壁に流 入境界条件、後方の壁に流出境界条件 を適用した。流体は常温の空気を想定 し、初期状態での密度  $\rho_{\rm f} \ge 1.205$  kg/m<sup>3</sup>, 動粘度  $\nu \ge 1.512 \times 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s 流入する風 速を 10 m/sec に設定した。

アクリルの薄板の厚みを 0.5 mm とし、 短辺の幅を 20 mm とした。ヤング率を 0.15 × 10<sup>9</sup> Pa、ポアソン比を 0.37、密度を 930.0 kg/m<sup>3</sup>とした。

有限要素計算の要素数は短辺の幅の 方向に 30 要素割り当てた。長辺の長さ は 100 mm, 150 mm, 200 mm の 3 通り





を計算し、それぞれの長辺の方向に 120, 180, 240 要素を割り当てて計算を行った。レイノルズ数 Re は代表長さを短辺の幅の 20 mm とすると 13,228 である。8 台の GPU (NVIDIA A100) を使用し、薄板

201

の長さが 100 mm の場合に物理時間を 0.768 sec 進めるのに 14.7 時間、長さが 150mm の場合には 0.768 sec 進めるのに 20.8 時間、長さが 200 mm の場合,物理時間を 0.690 sec 進めるのに 1 日程度の計算時間 を要した。

薄板の変位に対するスペクトル解析を行った結果は、長さ100 mm の薄板は11.72 Hz でスペクトルが 最大となり、37.76 Hz にもピークが見られた。長さ150 mm の方は7.81 Hz でスペクトルが最大となり、 15.63 Hz, 20.83 Hz, 36.46 Hz にもピークが見られた。一方、長さ200 mm の方は11.60 Hz でスペクトル が最大となり、5.80 Hz, 17.40 Hz, 34.79 Hz, 46.39 Hz にもピークが見られた。薄板の長さが長くなる と、流体構造連成においても高次モードが強くなっていくことが明らかになった。

#### (2) 2 枚の薄板と流体の連成解析

2 枚の同じ薄板(大きさを 150 mm × 0.5 mm × 20 mm、要素数を 180 × 1 × 30)を薄板間の距離を 0.164 mm で短辺を固定し、流入流速は 10 m/s で計算を行った。物理時間を 0.921 sec 進めるのに、4 日間程度 の計算時間を要した。



 図2 2枚の薄板の流体構
 図3 1枚と2枚の薄板の後端から放出される渦(速度勾配テンソルの 造連成による変形
 第二不変量の等値面)

薄板が1枚だけの場合と比較すると、2枚の場合は薄板後端から放出直後の渦の強さが弱い。上の薄板 がたわんだ際に生じた渦により下の薄板に上下方向の圧力差が生じ、揚力が大きくなっている。薄板2 枚の場合は縦方向の変位が半分になっている。このことから、複数枚の並んだ薄板と流れの連成により 流れが安定化され、薄板の振動を抑制できることが示唆される。

#### ・研究組織

東京工業大学 学術国際情報センター 青木尊之 東京工業大学 工学院・機械系 TAN Hong Guan 九州大学 応用力学研究所 渡辺勢也(所内世話人)

# 空力抵抗低減に向けた物体表面の流体摩擦力の光学計測

九州大学大学院総合理工学研究院 環境理工学部門 安養寺 正之

1. 目的

航空機や自動車などを始めとする高速輸送機の燃費性能向上のためには、空力抵抗の低 減が必須の設計課題である.本研究では自動車を対象として、物体表面の流体摩擦応力ベク トルを光学的に計測する Global Luminescent Oil-Film(GLOF)法<sup>[1]</sup>を適用することで、摩擦応 カベクトルをベースとしたミクロな流体構造解析により、各種模型形状と幅広い気流条件 における空力特性と流体メカニズムの関連を明らかにすることを目指している. 我々の研 究グループではここ数年でこの GLOF 法を風洞試験で幅広い速度域に適用できる基礎技術 開発を進めてきた.本年度は大型境界層風洞を用いて、(1)簡易車体模型に空力抵抗低減用 のデフレクターを取り付けた際の車体後方の渦特性と(2)タイヤ模型表面の流れ場、の2 つ を調べることを目的とし、GLOF 法を適用した流れの可視化試験を実施した.

#### 2. 実験方法

本研究では、準標準簡易車体模型として用いられているアハメド模型<sup>[2]</sup>(図 1)を対象とした.車体の空力抵抗の主要因は車体後方に形成される後曳き渦であり、模型後方のスラント 面を発生起因とする.本研究ではスラント面に図1に示すようなデフレクターを設置し、ヨ ー角変化、デフレクターの設置位置やデフレクター角度の固定/可変によるスラント面にお ける渦構造の変化を計測対象とした.一方、タイヤ模型はショルダー形状や溝の有無の効果 を調べるため、図2に示す4つの模型を3Dプリンターで製作した.



図1 デフレクター付きアハメド模型



一連の GOLF 法の光学計測は応用力学研究所の大型境界層風洞にて実施した.本 GLOF 法では、シリコンオイルに蛍光色素を含有させた蛍光油を使用する.この蛍光油は通風前に 模型表面にスプレーで薄膜塗装(約 10~20 µ m)される.この蛍光油に励起光を照射させるこ とで油を発光させる.本画像解析に関するアルゴリズムの詳細は文献[1]を参照されたい.

#### 3. 実験結果と考察

GLOF 法によって得られた風速 10 m/s 時のスラント面の摩擦応力線分布について、ヨー

角 12 deg におけるスラント部のデフレクター有無で比較した結果を図3に示す.スラント 面に形成される剥離泡構造がデフレクターの設置によって大きく消失している様子が観測 される.一方,ショルダー部に R を設置しないエッジタイヤ模型の側面における発光強度 画像と解析後の摩擦応力ベクトル線図を図4 に示す.側面でも明瞭な剥離泡構造及びその 内部の二次剥離現象を観測することに成功した.



(a)デフレクターなし (b) デフレクターあり

図3デフレクターの有無によるスラント面の摩擦応力ベクトル線の比較





(a) 蛍光油膜の発光強度画像 (b) 側面の摩擦応力ベクトル線図 図 4 タイヤ側面における蛍光油膜発光強度画像と摩擦応力ベクトル線

#### 4. まとめ

昨年度までの技術検証実績を踏まえて、本年度は姿勢角だけでなく、デフレクターの有無 やタイヤ模型など、パラメトリックな実計測にトライし、本 GLOF 法ならではの摩擦応力 ベクトル場に基づくユニークな流体構造が抽出できた.現在、得られた一連の結果の画像解 析を急ピッチで進めるとともに、これらの結果を纏め、国際ジャーナルへの投稿準備を進め ている.

参考文献

[1] Liu, T., "Global Luminescent Oil-Film Skin Friction Meter", AIAA J., Vol. 46, No. 2, pp. 1–11 (2008).

[2] Ahmed, S.R., Ramm, G. and Faltin, G., "Some salient features of the times-averaged ground vehicle wake", SAE technical paper, 1(840300) 1–31, (1984).

# 高温動作パワーモジュールの接合損傷予測

近畿大学理工学部 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、それに伴う熱抵抗の劣化が深刻な問題となる。高温下での材料の変形は弾塑性のみならずクリープまでもが複雑に絡み合うが、現状ではこのような過酷な環境下での材料物性データの蓄積が乏しいために、そこでの寿命も定性的な予測ないしは実機試験による事後評価が主体となっている。例えばパワーサイクル試験と呼ばれる電力印加による耐久試験では、従来その寿命 Nfを素子の温度変化 *AT* を用いて整理した式 *AT* (*N*<sub>f</sub>)<sup>*a*</sup> = *C*<sub>1</sub>を求めて、その式を製品寿命予測に用いるのが一般的であったが、モジュールの構造寸法や材料が異なる系での定量評価に適用できる保証はない。このような背景から、従来手法では次世代パワーエレクトロニクスで想定される高温環境下での熱抵抗劣化の定量予測には未だ至っていない。

そこで本研究では、パワーモジュール内部におけるパワーデバイス直下の接合部が損傷し、熱抵抗が 劣化する挙動を数値シミュレーションによって再現できるか検討した。特に、実機データに基づくモデ ルの検証を想定して、実際の温度計測点における感度についても調査した。このような研究成果の蓄積 によって任意の接合構造での損傷予測が可能となれば、次世代パワーエレクトロニクスの開発を加速す ることが期待できる。

#### 解析モデル

パワーモジュール実機における IGBT チップの温度を数値シミュレーションによって予測するために,図1に示す3次元構造モデルを作成し熱伝導解析を実施した。モデルの積層構造は図2に示す。このとき、チップーケース間の熱抵抗に対してワイヤ、カバー、シリコーンゲルの寄与は小さいとしてモデルから省いた。熱伝導解析に用いた材料特性を表1に示す。このとき、ヒートシンクとの接触部に熱伝達 h=1.3×10<sup>4</sup>W/m2K を設定することで、実際の測定環境で用いたヒートシンクによる冷却を再現した。

動作時の温度分布の一例を図 3 に示す。チップの表面温度は中央が最も高く、周囲に近づくにつれて低下 する。チップーケース間の熱抵抗 *R*<sub>th jc</sub> はチップ温度の変化量と入力した損失を用いて算出される。実用上、定 常状態におけるチップ表面の温度上昇量の平均値を前者に代入することで求められ、本モデルでは *R*<sub>th jc</sub>=0.31K/W であった。

まず得られた温度履歴を解析によって再現できるか検証するとともに、異なる動作条件でも予測できるよう DUT のスイッチング損失の温度特性を決定した。得られた DUT の温度履歴より本構造モデルによって加熱冷 却時の温度履歴がよく再現できていることが確認できた。さらに、得られたスイッチング損失は対象モジュールの



Fig.1 3-dimensional structure model for estimating Fig.2 Cross-section of the layered structure thermal resistance on the power module

データシートの代表値から予想される値から大きく 外れることなく妥当な結果であった。次に、この損失 特性を反映したシミュレーションモデルを用いて、異 なる電流条件における温度分布を再現したところ、 スイッチング周波数および電流の増加に伴う DUT 温度の上昇が再現できていることが確認できた。

#### 劣化に対する予測結果

前述した解析モデルを初期状態として、そこから 劣化により熱インピーダンスが一律 10%上昇したと 仮定して温度履歴を予測した一例を図 4 に示す。 劣化後のサンプルを実測した結果と比べて、I=50A では予測の温度上昇が速く、I=70A では予測の温 度上昇が遅い結果であった。これは発熱の小さな 条件では熱抵抗の劣化による熱インピーダンスへの 影響は小さいが、発熱が大きくなると熱抵抗の劣化 による熱インピーダンスへの影響が顕著になり、温 度予測シミュレーションによる予測からは大きく外れ ることが確認できた。

また、パワーモジュールの温度モニタリング用の 熱電対、備え付けのサーミスタにおける温度履歴の 予測結果を図 5 に示す。サーミスタは予測値と実測 値とがよく一致しており、数値シミュレーションモデ ルが妥当であることを示している。一方で、熱電対 の結果は予測と大きく異なる結果であった。これは、

	Thickness t[mm]	Density <i>p</i> [kg/m³]	Specific heat c[J/kg K]	Thermal conductivity <i>k</i> [W/m K]
Silicon	0.13	2340	729	139
Solder	0.08	7300	226	73
Cu	0.3	8960	386	397
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.35	3900	850	35
Cu	0.35	8960	386	397
Solder	0.3	7300	226	73
Baseplate	3.00	8960	386	397

Table 1 Material properties



Fig.3 Distribution of temperature during DUT operation

数値シミュレーションにおける熱電対の参照位置が DUT 直下の Baseplate 裏面であるのに対して、実測は DUT 直下のヒートシンクの溝に設置した熱電対温度であるため、後者の温度応答が緩やかになったと考えられる。サ ーミスタ、熱電対の実測値はいずれも温度上昇量が小さく、これまでの考察も踏まえると熱抵抗劣化を検出する には不適であり、V<sub>CE(sat)</sub>によるチップ温度評価が劣化検出には重要であるといえる。





Fig.4 Temperature profile during heating process Fig.5 Case temperature at different points of interest. before and after deterioration.

# 第一原理計算による酸化ガリウム系材料の電子物性および構造安定性の検討

三重大学大学院工学研究科 河村貴宏

#### 研究背景・目的

Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>は約5 eVの大きなバンドギャップを持つことから次世代の高周波・高出力デバイス用材料と して期待されている。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>や In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>との混晶やヘテロ構造、超格子構造を形成することでバンドギャ ップなどの物性制御が可能となるため、バンドエンジニアリングの観点からも注目されている。一方で Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>デバイスの実用化には基礎物性の理解、組成制御(混晶、超格子)、異相界面構造の理解など未だ 取り組むべき課題が多く残っている。本研究ではそれらの問題解決に向けた研究の一環として、(1)β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>のバンド構造に対する格子歪みの影響と、(2)Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の構造安定性に対する酸素空孔の影響を明ら かにすることを目的として、第一原理計算による解析を行った。

#### 計算方法

(1) <u>β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>のバンド構造に対する格子歪みの影響</u>

図1に示すように $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の *a、b*軸方向の格子定数を固定し、*c* 軸の *ab*面垂直方向成分のみを格子緩和させることで *ab*面内に 2 軸 歪みが加わった状況を再現した。このモデルを用いて格子定数を決 定した後、primitive cell (10 原子)を用いてバンド構造解析を行っ た。同様の解析を *ac*面内と *bc*面内に 2 軸歪みが加わった場合につ いても行い、それらの結果から格子歪みとバンドギャップ変化の関 係について検討を行った。

(2) Ga2O3の構造安定性に対する酸素空孔の影響

図 2 に示す $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\kappa$ 相の Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>のスーパーセルに中性または+2 価の酸素空孔( $V_0$ 、 $V_0^{+2}$ )を導入し、それらの空孔形成エネルギーを求めた。酸素空孔濃度に対する空孔形成エネルギーの変化を調べ、その結果を用いて構造安定性の酸素空孔密度依存性について検討を行った。

#### 結果および考察

(1) β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>のバンド構造に対する格子歪みの影響

図 3(a)-3(c)はそれぞれ ab 面内 2 軸歪み、ac 面内 2 軸歪み、bc 面内 2 軸歪みが加わった場合のГ点に おける直接ギャップと間接ギャップの変化を表している。ここで、横軸のマイナスは圧縮、プラスは引 張歪みを示している。ab 面内 2 軸歪みの結果を見ると、4%の圧縮歪みが加わった時にバンドギャップ は最大となり、その点を境に圧縮・引張どちらの歪みを加えてもバンドギャップは減少した。ac 面内 2 軸歪みと bc 面内 2 軸歪みの場合も同様の傾向を示したが、その変化の大きさは異なっており、歪みの 大きさだけでなく歪みの方位もバンドギャップ変化の程度に影響することが分かった。

(2) Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の構造安定性に対する酸素空孔の影響

図4はβ相を基準としたα相とκ相における空孔形成エネルギー( $\Delta E_{\alpha}$ 、 $\Delta E_{\kappa}$ )の空孔濃度依存性を示している。中性の酸素空孔の場合は、空孔濃度の増加に伴って空孔形成エネルギーが増加したことに対して、+2価の場合は空孔濃度の増加に対してエネルギーは減少した。その結果、空孔濃度が2.7%以上で



図1 ab 面内2軸歪み



図 2  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\kappa$ 相 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

β相よりもα相が安定、また 4.2%以上でβ相よりもκ相が安定になった。以上の結果から、酸素空孔濃度 が  $Ga_2O_3$ の構造安定性に重要な影響を及ぼすことが示唆された。



#### 研究成果報告

- S. Fujita, T. Akiyama, T. Kawamura, and T. Ito, "Effect of lattice constraint on structural stability and miscibility of (Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films: a first-principles study", Japanese Journal of Applied Physics, 62, SC1031 (2023).
- T. Akiyama, T. Kawamura, and T. Ito, "Role of charged oxygen vacancies and substrate lattice constraint on structural stability of Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> polymorphs", Applied Physics Express, 16, 015508 (2023).
- 3) 藤田柊理, "III 族セスキ酸化物混晶の構造安定性および混和性に関する理論的研究", 三重大学大学 院工学研究科修士論文
- 4) 河村貴宏,秋山亨,"2軸歪みによるβ-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>のバンドギャップ変化",第83回応用物理学会秋季学術 講演会,20p-B203-11.
- 5) 秋山亨,河村貴宏,伊藤智徳, "Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の構造安定性に対する酸素空孔の影響に関する理論的検討", 第 83 回応用物理学会秋季学術講演会, 20p-B203-13.
- 6) T. Kawamura, K. Basaki, A. Korei, T. Akiyama, and Y. Kangawa, "Bandgap change in InN/AlN superlattices induced by lattice strain", International Workshop on Nitride Semiconductors 2022, PP177.
- 7) R. Ito, T. Yasuda, T. Kawamura, and T. Akiyama, "Effect of Lattice Strain on Bandgaps of β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>", 第 41 回電子材料シンポジウム, Fr2-4.
- 8) T. Akiyama, T. Kawmaura, and T. Ito, "Structural change of Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> induced by charged oxygen vacancies: a first-principles study", The 4th International Workshop on Gallium Oxide and Related Materials, Pos 2-33.
- T. Kawamura and T. Akiyama, "Influence of Biaxial Strain on Bandgaps of β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>", The 4th International Workshop on Gallium Oxide and Related Materials, Pos 2-35.

#### 研究組織

```
研究代表者 河村貴宏(三重大学 大学院工学研究科・助教)
所内世話人 寒川義裕(九州大学 応用力学研究所・教授)
研究協力者 秋山亭(三重大学 大学院工学研究科・准教授)
```

# 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

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、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矩形翼と比較し、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、これらに対して図 2 で示す計算格子に対する数値流体力学 (CFD) を実施した.計算条件は、マッハ数( $M_{\infty}$ )0.2 及び 0.7 に対してレイノルズ数 (翼弦長さ基準): 6.0 × 10<sup>6</sup>、迎角(AoA): 0° ~ 6°とした.



#### 3. 結果と考察

図3に揚力係数( $C_L$ )の分布,及び抗力係数( $C_D$ )の分布の結果を示す.図3(a)において, $M_{\infty}$ =0.74のときのwing\_gridの $C_L$ は、すべてのAoAにおいて矩形翼のそれよりも小さく、AoAの増加とともにこれらの翼の $C_L$ 差は広がっている。逆に、 $M_{\infty}$ =0.20のときのwing\_gridの $C_L$ は、矩形翼と比べてすべてのAoAで大きく、 $M_{\infty}$ =0.74のときは大きくなった。図3(b)では、 $M_{\infty}$ =0.20と $M_{\infty}$ =0.74のときいずれもwing\_gridの $C_D$ が矩形翼の $C_D$ を上回り、 $M_{\infty}$ =0.20のときの両者の $C_D$ 差はどのAoA値でもほぼ一定であるが、 $M_{\infty}$ =0.74のときの $C_D$ はAoAの増加とともに小さくなり矩形翼の $C_D$ がwing gridの $C_D$ に近くなっている。

次に、低 *AoA* と高 *AoA* の wing\_grid の流れ場について議論する. 図 4 と図 5 に  $M_{\infty}$ =0.74, *AoA*=0°及 び  $M_{\infty}$ =0.20, *AoA*=6°の場合の翼上面の圧力係数 (*C<sub>p</sub>*) 値を示す. 図 4 では、 $M_{\infty}$ =0.74, *AoA*=0°の場合、 第 1 翼端の後縁付近の wing\_grid では低い *C<sub>p</sub>* が観測されるが、矩形翼では前縁付近でのみ観測されるこ とが分かる. さらに図 4(c)より *AoA*=0°での規格化した垂直長さ方向 (*z/t*)に対する *y/b*=2.38 のときの *C<sub>p</sub>* の分布より、wing grid ではサクションループが欠落し、抗力ループのみが存在している. つまり、wing

grid の結果は矩形翼の結果と異なり,図3で示すように $M_{\infty} = 0.74$ でのwing\_grid の $C_D$ は矩形翼の $C_D$ より大きくなる. 一方, $M_{\infty} = 0.20$ ,  $AoA = 6^{\circ}$ の場合, wing grid の第1翼端の全域と第2翼端の後縁領域付近で低い $C_p$ が見られるが、矩形翼は翼端の前縁領域付近でのみ観察される。さらに図5(c)より $AoA = 0^{\circ}$ での規格化コード長さ方向 (x/c) に対する y/b = 2.38 のときの $C_p$ の分布より翼格の第1 翼端および第2



# 5. 研究成果報告

S. Morizawa and S. Obayashi, "Evaluation of a Planar Wing with Wing Grid using CRM.65.airfoil", 沖縄工 業高等専門学校紀要, Vol. 16, pp.61-72, 2022.

# 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)九州大学応 用力学研究所 吉田 茂雄(所内世話人)

# Numerical simulation of a floating-type point absorber wave energy converter

#### Sharath Srinivasamurthy\*

\* Institute of Ocean Energy, Saga University, 1 Honjo-machi, Saga 840-8502, Japan.

#### \*Corresponding author

**Abstract**. Wave energy converters (WEC) have been researched extensively to harvest large amounts of untapped ocean renewable energy. Floating-type point absorbers are a type of WEC that converts the ocean wave energy to electrical energy, by utilizing the relative motion of multibody system mainly consisting of a floating section and a reaction section. The design of floating-type point absorbers is not straightforward and needs special attention to understand the dynamics of the multi-body system, and power take-off (PTO) mechanism placed in the reaction section. The purpose of this study is to develop a numerical simulation tool which can help understand various dynamics of a floating-type WEC and aid in the practical design of PTO systems. The PTO mechanism is represented using a spring-damper system and theoretical modelling of mean absorbed power is presented. The numerical simulation is developed in Orcaflex and is carried out on a demonstration model to show the usefulness of the developed tool. The heave displacement shows the effect of damping (PTO) on the motion response of the floating-type WEC. It is found that the maximization of absorbed power is possible using the developed simulation tool for a specific sea state. Furthermore, the results show the potential use of the developed tool for other floating-type WEC concepts.

Keywords: Renewable energy, Floating-type wave energy converter (WEC), Mean absorbed power, Representative power take-off (PTO) mechanism.

#### 1. Introduction

Renewable energy has been attracting attention all over the world to reduce carbon emissions and to provide clean energy. Major sources of renewable energy include solar, wind, hydro, geothermal, and ocean renewable energy. Oceans cover about 70% of the earth's surface and has a huge potential to contribute to the energy mix. Ocean renewable energy can be broadly classified into OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion), ocean wave energy, ocean current energy, and ocean wind energy. Even though ocean waves around the world are known to hold large amounts of energy, wave energy harvesters are still not as mature as other forms of renewable energy harvesting devices. This limitation is due to the complexities involved in converting wave energy to electricity. In this paper, a type of ocean wave energy converter (WEC) called as point absorbers will be focused since it is an upcoming research field and has good potential for commercialization [1,2].

A point absorber converts the wave energy by utilizing the heave motion (up and down motion) (see Figure 1). Typically, it is either a single-body that generates energy by reacting against a fixed seabed frame, or it is a multiple-body device that generates energy from the relative motion between the two floating bodies. In the case of floating-type WEC system, it generally uses a two-body heaving system, which converts energy from the relative motion between the two oscillating bodies, a float section, and

a reaction section [3]. The float is only allowed to move freely in one degree of freedom, with respect to the reaction section (generally heave motion). To understand point absorber behaviour, precise modelling tools are needed to simulate the dynamics of the device, along with a well-defined combination of modelling methods. Technology developers, engineers, and researchers need a tool which employs the relative motion of the multi-body dynamics. The purpose of this study is to develop a numerical simulation tool which aids in the study of floating-type point absorbers. Specifically, a simulation method to maximize mechanical power under a particular sea state is demonstrated by use of a damper system to represent the power take-off (PTO) system.



Figure 1. Illustration of a point absorber wave energy converter (Adapted from [3]).

# *1.1. Modelling of floating-type wave energy converter*

Orcaflex is used for modelling the floating-type wave energy converter. Orcaflex is a dynamics analysis software for offshore marine system operations [4]. It consists of various objects to model different components of the device. In this study, both the spar and float of the WEC device are modelled as 6D buoy objects (see Figure 2).

The spar is the reaction section, which is stabilized with the use of 3 catenary-type mooring lines. A link object (similar to a spring-damper system) is used to represent a power take-off (PTO) system. As explained earlier, since there is relative motion between the spar and float in a floating-type point absorber WEC, it is not a straightforward process to set up the conditions of simulation with simple objects. Therefore, in this study, we adopted the use of constraint object in Orcaflex. Constraint is one of the versatile connection objects which can be defined in Orcaflex. Two constraints are defined, one each for the float and the spar sections. The float section is constrained to motion only in heave direction, and connected to the link object. Therefore, when the float section heaves due to the incoming wave, we can control the motion response by varying the stiffness and damping conditions of the link object. In other words, the representative PTO can be modelled which is highly useful for wave energy harvesting devices.



Figure 2. Simulation modelling in Orcaflex.

# 1.2. Model specifications

This section describes the demonstration model of the floating-type point absorber device. Table 1 shows the principal particulars of the demonstration model. It is noted that the model defined here is hypothetical and used only to demonstrate the development of the simulation tool.

Specifications	Value	Unit
Diameter of spar section	9.4	m
Diameter of float section	30.0	m
Length of spar section	130.0	m
Length of float section	20.0	m
Number of mooring lines	3	nos

Table 1. Principal particulars of the demonstration mo	del.
--	------

#### 1.3. Theoretical modelling of mean absorbed power

The mean absorbed power [5] per wave cycle of the moving float can be obtained as shown in the following Equation (1).

$$P_m = 0.5D\omega^2(\tilde{x})^2 \tag{1}$$

Here, *D*: Damping of the PTO system,  $\omega$ : Wave angular frequency,  $\tilde{x}$ : Heave displacement. Effectively, it describes the mean force acting on the float multiplied by the velocity of the float. This simple theoretical modelling will help understand how heave motion can be converted into power. It can be observed that mean absorbed power per each wave cycle is proportional to the PTO damping. Also, it is proportional to square of the heave displacement.

#### 1.4. Simulation conditions

In the demonstration simulation, the mechanical stiffness is kept constant and damping is varied to represent the effect of PTO mechanism. Wave period is set to 8 seconds, and wave height is set to 2

Table 2. Simulation conditions.				
Simulation cases	Stiffness (kN/m)	Damping (kNs/m)		
Case1	500	2,500		
Case2	500	5,000		
Case3	500	7,500		
Case4	500	15,000		
Case5	500	20,000		
Case6	500	25,000		

meters in the simulation. Table 2 shows the simulation conditions. Overall, 6 cases of damping are considered and compared with the base case (Case0) without damping.

#### 2. Results and discussion

Figure 3 shows the simulation result comparing the effect of damping on the heave motion of float. In the Orcaflex simulation, statics is firstly solved followed by the dynamics. The simulation is divided into 2 stages; Stage 1 is from -8 to 0 seconds, and the wave conditions are set using a ramp function in this duration. Stage 2 represents the float response to incoming wave (0 to 80 seconds). The wave period of the simulation is 8 seconds, and therefore we can observe 10 peaks between 0 and 80 seconds. The blue solid line shows the response of float when damping value is set to zero and a heave displacement of 0.8 meters can be observed. However, when the damping value of 25,000 kNs/m (Case6) is simulated, the heave displacement (dotted purple line) reduces to about 0.2 meters. This shows the effect of damping, and represent the PTO mechanism. In other words, the PTO in reality dampens the WEC device and reduces the motion response while generating available power. So, to generate maximum power, evaluation based on varying damping is essential.



Figure 3. Effect of damping on the heave motion response of float section – Case0 vs Case6.

Figure 4 shows the simulation result of the heave displacement for different damping conditions (from Case1 to Case6). It can be observed that the response of heave displacement decreases as the damping

value becomes larger. It can be said that selection of optimum PTO damping needs attention and it can help to maximum power.



Figure 4. Heave motion response for different damping conditions.



Theoretical power maximization curve

Figure 5. Theoretical power maximization curve.

As discussed in Section 1.3, the mean absorbed power is proportional to square of heave displacement and also proportional to damping value. To understand this, mean absorbed power is plotted for all the

6 cases of damping as shown in Figure 5. The larger damping value need not always produce maximum energy since it also decreases the heave motion and Figure 5 confirms the same. From the theoretical power maximization curve, it is found that maximum power of 410kW can be obtained if the damping value is 7,500 kNs/m (Case3). The absorbed power decreases for damping larger than this value. Therefore, in the real device it is a good idea to select a PTO system which produces a damping of 7,500 kNs/m by using appropriate control strategies.

Using this simulation tool, the power maximization can be studied for different wave conditions depending on the installation site of the floating-type WEC device. Furthermore, PTO system can be developed for the specific installation site. This study demonstrated the advantages of the tool for understanding the float response by including the damping value of the system. In the future it is desired to carefully consider the device specifications and improve the performance of the float.

# 3. Conclusions

This study focused on developing a simulation tool for evaluating the performance of a floating-type point absorber wave energy converter. The tool demonstrated how to maximize the mean absorbed power by including a representative PTO and heave motion of the float section. It also demonstrated the use of spring-damper system to model the characteristics of a PTO system for a wave condition. The potential use of the simulation method is demonstrated for other concepts of floating-type point absorber WEC.

# References

- [1] Shami AL, Zhang R, Wang X. Point Absorber Wave Energy Harvesters: A Review of Recent Developments. Energies 2019; 12(1), 47. https://doi.org/10.3390/en12010047.
- [2] Beatty SJ, Hall M, Buckham BJ, Wild P, Bocking B. Experimental and numerical comparisons of self-reacting point absorber wave energy converters in regular waves. Ocean Engineering 2015; 104(2015) 370–386. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.05.027.
- [3] Li Y, Yu YH. A synthesis of numerical methods for modeling wave energy converter-point absorbers. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2012; 16 (2012) 4352–4364. https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.11.008.
- [4] https://www.orcina.com/.
- [5] Chandrasekaran S, Harender. Power Generation Using Mechanical Wave Energy Converter. Journal of Ocean and Climate Systems 2012; 3-1. https://doi.org/10.1260/1759-3131.3.1.57.
### 回転振子式波浪発電装置の最適化に関する研究

#### 長崎大学海洋未来イノベーション機構 経塚雄策

目的

地球環境における海洋の重要性については古くから指摘されているところではあるが、海洋におけ る人間活動は最近になってようやく沿岸域において拡大しつつある。徐々にしか拡大しない理由は 今でも海洋には未知の部分が多く、人間活動を阻害するリスクが多いことがあげられる。「海を知 る」ためには、衛星を利用した広域データとともに直近の海域データも不可欠である。

長崎大学では、この目的で潮流・海流を利用した発電機付き海面ブイ(スマートブイ)の開発を行 ってきたが、一般に流れよりも波の方が大きなエネルギーポテンシャルを持つ海域の方が面積は大 きいと予想されるので、波浪発電機付海面ブイの必要性も高いと考えられる。そこで、波浪中にお ける浮体運動を利用して発電するために鉛直軸の回転振子による波浪発電装置について基礎的な研 究を行った。

• 実験方法

図1、図2のように、箱船の片側に没水平板あるいは浮力体を付けることによって、非対称形状の 浮体とする。この箱船の中央に鉛直軸を持つ回転振子を搭載し、主として縦揺と横揺を利用して振 子を回転させる、フラフープ運動によって回転軸に取り付けられた発電機を回転させて発電する。 この時、フラフープ運動が実現する条件としては、縦揺と横揺の位相差が±90°付近であると思わ れるので、そのような条件を満たすように没水平板あるいは付加浮力体の位置と大きさを数値計算 によって求めた。今回は一方向からの規則波を対象とした。



図1 没水平板付き箱船



図2 片側浮力体付箱船

長崎大学が所有する所有する箱船(L x B x D = 1.2m x 0.8m x 0.4m)の中央部に回転振子装置を据え 付け、回転軸の片側にギア比 1:5のギアードモーターを取り付けて発電機とした。なお、回転振 子の半径は 0.2m、不平衡重錘は 2.86kg であった。これに上記で求められた没水平板および浮力体 を付加し、重量調整を行って排水量と喫水を一定と して実験を行った。

実験結果

実験は、令和4年10月17日~21日に深海機器実 験水槽で行われた。図3のようにロープで緩係留 し、波高約8cmの規則波中で実験した。フラフープ 運動が発生するためには初期回転が不可欠なので、 実験途中で手動で初期回転を与えた。今回の実験で は、周期が約1.3秒から1.37秒の時に、振子の回転



図3 箱船と回転振子式発電装置

が持続したが、それ以外の周期では回転は途中で止まってしまった。なお、今回実験においては、 浮体運動については、浮体の内部に6自由度のジャイロ/加速度センサーによって計測した。

考察

当初の予想通り、没水平板あるいは付加浮力体を箱船に付けることによって非対称浮体とし、規則 波中でフラフープ運動が発生持続することを実験的に確認したが、最後に付加物を除いて単なる箱 船として、動揺に実験したところ、同様にフラフープ運動が持続した。この場合には不平衡振子が 回転することによって横揺れが自励振動として発生するためである。今後、左右対称/非対称浮体 のフラフープ運動が実現する波周期と波高の関係について調査する必要があると思われる。

研究成果報告

海洋観測装置などへの給電を目的に、波浪エネルギーを利用する浮体式波浪発電装置について考察 した。エネルギー変換装置としては、浮体の横揺と縦揺によって浮体内に設置した鉛直軸不平衡回 転振子を回転させるもので、構造的に単純であり、海水とは直接に接しない点が他の装置と比較し て優れているように思われる。箱船に付加的に没水平板あるいは浮力体を付加することによってフ ラフープ運動が持続することを実験的に確認できた。今後の課題としては、初期回転の与え方、多 方向不規則波中での性能、低回転での発電機性能の高効率化などが課題である。

氏名	所 属	職名・級号俸等 (院生は学年)	役割・ 担当分野
経塚雄策	長崎大学	教授	研究代表者
横井裕一	長崎大学	准教授	研究協力者、発電装置
北嶋佑亮	長崎大学	M2	研究協力者、実験担当者
胡 長洪	九州大学	教授	所内世話人
合計 4名			

● 研究組織

課題番号:2022WS-A0-1

研究集会「地球流体における波動と対流現象の力学 」の報告

研究代表者:伊賀 啓太(東京大学 大気海洋研究所) 開催日時:2023 年 3 月 6 日(月) 13 時 30 分 ~ 17 時 30 分 2023 年 3 月 7 日(火) 10 時 30 分 ~ 15 時 30 分 実施方法:対面会議

研究集会の目的:近年の計算および観測技術の著しい進歩により、大気や海洋の 小規模渦から大規模循環まで計算機上で再現できるようになり、リモートセン シングやその場観測の蓄積に伴い、さまざまな時空間スケールの観測データが 入手可能になった。今日では、地球科学は、再現と検証の手段を得て、先端科学 のひとつに変貌している。このような状況において、地球流体力学は、数値モデ ルや観測の膨大なデータを整理し統一的な理解を得るのに、重要な役割を担う 学問である。本研究集会の目的は、複数の分野の地球流体力学に関連した研究者 が一堂に集まり、相互に最新の情報を交換し、異なる分野研究の相互理解を深め、 新しい学問の展開を模索するものである。

研究集会の概要:本集会は九州大学応用力学研究所と東京大学大気海洋研究所 の間で交互に開催される地球流体力学研究集会であり、今回 は24回目にあた る(21回は新型コロナ肺炎感染拡大のため中止)。開催方式に関しては、新型 コロナ肺炎感染が落ち着いたため、対面集会を行った。しかしながら、講演申し 込みの段階で、収容人数50%の制約があったため、14名の講演を2日間で行う ことにした。

一日目は「金星大気」と「地球中層大気」、二日目は「対流圏」と「実験」を 中心としたプログラム構成で、14件の発表があり、所外講演者と参加者は18名 (世話人・所内聴講者は除く)であった。分野が異なる研究協力者の間の日程調 整が難しく、直前まで収容人数 50%の制約があり、密をさける形で対面にした ため参加人数は多くなかったが、十分な質疑応答や講演後の議論ができた。

研究集会の内容は以下のように要約される。1日目は、金星山岳波の鉛直伝播 や運動量輸送に関する議論、金星 GCM でみられる波動やその成因に関する議論、 ラプラスの潮汐方程式に基づく金星および地球の熱潮汐波の理論考察、金星や 地球大気データ同化でみられる力学過程に関する議論、中層大気波動の物質輸 送の診断方法に関する議論が行われた。2日目は、メソ降水系の事例解析、雲の 大規模な組織化に関する議論、高低気圧の渦や前線の力学、力学コアの開発と検 証、円筒水槽の流れの安定性や波の考察、地学イベントでみられるラム波の包括 的な理解に関する議論が行われた。

大学院学生から名誉教授の発表まであり、情報交換や教育の場として貴重な 機会であった。また、理論だけでなく、データ同化や観測の話題まで広く議論が できた。自分の専門以外の研究をじっくり聞く良い機会を提供できたのではな いかと思う。

以下にプログラムを添付します。

九州大学応用力学研究所共同利用研究集会 地球流体における波動と対流現象の力学

日時: 2023 年 3 月 6 日 (月) 13:30-17:30

3月7日(火)10:30-15:30

場所: 九州大学応用力学研究所(福岡県春日市春日公園6-1)3階講義室 コンビーナー:伊賀 啓太(東京大学大気海洋研究所) 所内世話人:山本 勝(九州大学応用力学研究所)

#### プログラム

3月6日(月)

13:30-13:40 \*伊賀 啓太(東京大学) 趣旨説明

 13:40-14:10 \*鈴木 杏那(京都産業大学), 安藤 紘基(京都産業大学), 高木 征弘(京都 産業大学), 前島 康光(理化学研究所), 杉本 憲彦(慶應義塾大学), 松田 佳久(東京学芸大学)
 金星山岳波の鉛直伝播と運動量輸送

14:10-14:40 \*高木 征弘(京都産業大学), 安藤 紘基(京都産業大学), 今井 正尭(京都 産業大学), 杉本 憲彦(慶應義塾大学), 松田 佳久(東京学芸大学) 金星 GCM にみられた赤道反対称な構造をもつ惑星規模波動について

14:40-15:10 \*山本 勝(九州大学),池田 恒平(国立環境研究所),高橋 正明(国立環境 研究所), 佐藤 正樹(東京大学) 金星大気大循環モデルを用いた熱潮汐波の解析:回転および発散成分の構 造とエネルギー変換について

休憩

15:30-16:00 \*松田 佳久(東京学芸大学) 金星と地球の熱潮汐波

- 16:00-16:30 \*杉本 憲彦(慶應義塾大学), 藤澤 由貴子(慶應義塾大学), 小守 信正(慶 應義塾大学), 安藤 紘基(京都産業大学), 神山 徹(産業技術総合研究所), 高木 征弘(京都産業大学) 金星大気におけるあかつき中間赤外カメラの観測システムシミュレーシ ョン実験
- 16:30-17:00 \*山崎 哲(海洋研究開発機構), 野口 峻佑(九州大学) EnKF 大気再解析での成層圏突然昇温時の先駆的スプレッド増幅
- 17:00-17:30 \*木下 武也(海洋研究開発機構) 様々な大気波動に伴う物質輸送の診断方法の考察
- 3月7日(火)
- 10:30-11:00 \*万田 敦昌(三重大学),変わりゆく気候系における中緯度大気海洋相互作用 hotspot 観測チーム
   自由対流圏の水蒸気輸送が梅雨前線帯におけるメソ降水系強化に及ぼす影響:2022 年 6 月の事例解析
- 11:00-11:30 \*柳瀬 友朗(理化学研究所), 西澤 誠也(理化学研究所), 三浦 裕亮(東京 大学), 富田浩文(理化学研究所) 非静力学大気モデルを用いた放射対流平衡実験における雲と水蒸気の大 規模な組織化
- 11:30-12:00 \*栃本 英伍(気象研究所), 新野 宏(東京大学) スプリット前線を伴う温帯低気圧の構造と環境場

#### 休憩

- 13:15-13:45 \*山本 晃立(東京大学), 伊賀 啓太(東京大学) PV cutoff の3次元的な併合
- 13:45-14:15 \*小笠原 宏司(京都大学), 榎本 剛(京都大学) 動径基底関数に基づくカ学コアによる傾圧不安定実験

14:15-14:45 \*伊賀 啓太(東京大学)

円筒容器内で回転する円盤上の軸対称流の安定性と波の実効的水深

14:45-15:15 \*中島 健介(九州大学)

種々の地学イベントによって励起されるラム波の比較

15:15-15:30 情報交換/総合討論

九州大学応用力学研究所 研究集会報告書

課題番号:2022WS-AO-2

課題名:東アジア縁辺海の物質循環と生物・物理・化学過程

Material Cycle and Biological / Physical / Chemical Processes in the Marginal Seas in the East Asia

研究代表者:近藤能子(長崎大学総合生産科学域/大学院水産・環境科学総合研究科) 所内世話人:千手智晴

### 1. 目的と開催経過

東シナ海や日本海など東アジア縁辺海の海水循環は太平洋含めた隣接海域の生物生産並びにそれを支 える栄養塩動態に大きな影響を与えるため、同海域における生物・物理・化学過程を包括した研究は重 要である。九州大学応用力学研究所では、東アジア縁辺海や太平洋側の黒潮域など周辺海域含めた海水 の循環に関する研究を継続的に展開しており、これまで名古屋大学、長崎大学、富山大学、鹿児島大学、 愛媛大学、水産教育研究機構・水産試験場等の研究機関との共同研究も多く実施されてきた。今後の共 同研究の更なる進展のため、本研究集会では東アジア縁辺海を中心とした海域における生物・物理・化 学過程を包括した研究の今後の展開を考える場として、これまで得られた成果の発表ならびに今後の観 測計画に関する議論を行うことを目的とした。特に、東シナ海や日本海における調査では、長崎大学練 習船長崎丸が重要な役割を担うことから、本研究集会では研究者のみならず船舶運航側のオフィサーを 含めて長崎丸観測計画について議論を行い、観測体制の強化を目指した。

本研究集会は対面・オンラインのハイブリッドで開催した。出席者は対面では長崎大学3名、愛媛大学4名、名古屋大学1名、富山大学1名、福井県立大学1名、九州大学10名の計20名、オンラインでは長崎大学8名、愛媛大学1名、富山大学3名、東京大学3名、水産機構資源研4名、日本海洋生物研究所1名、港湾空港技術研究所1名、JAMSTEC1名、東京海洋大学1名、国立環境研1名の計24名の参加があった。

#### 2. 研究集会の概要

研究集会は 2023 年 2 月 20 日 (月) ~21 日 (火) にかけて九州大学応用力学研究所で開催された。 初日は主に長崎大学練習船長崎丸を用いた観測結果をベースにした研究成果発表と、来年度 7 月に実施 予定の長崎丸研究航海計画についての紹介とディスカッションを行った。千手 (九大応力研) は富山深 海長谷内部の流向・流速とセンサーから得られる海洋環境について講演し、深海長谷内では東西で流向 が異なり、谷を横切るような流れの存在の可能性について示した。大塚(富山大学)は富山深海長谷の 堆積物の元素組成と炭素安定同位体比について講演し、東側の斜面には重金属元素と陸由来の有機物が 蓄積しやすいことなどを示した。滝川(長崎大学)は東シナ海陸棚と五島列島を隔てる五島海底谷の流 動構造の調査結果について講演し、鯨類が頻出する 2022 年 4 月の海底谷の流向は表層・中層・下層で 異なることなどを紹介した。Deng(富山大学)は東シナ海底層付近に発生する低酸素水における希土類 元素や栄養塩について講演し、底層に見られた低酸素水は黒潮亜表層水に属し、比較的高い N/P 比を もっていること、一方でこの低酸素水の栄養塩輸送は日本海のそれに比べ低めであることなどを紹介し た。張(富山大学)はWESTPAC—AMS program の近況報告を行い、アジア諸国との連携による観測 体制の強化について述べるとともに、日本沿岸で近年問題視されている貧栄養化が中国や韓国でも同等 以上に進行していることなどについて紹介した。その後、事前のプログラムでは組み込まれていなかっ たが、石坂(名古屋大学)から国際的な活動関連として AP-CREAMS (in PICES)と NOWPAP の紹介 がされた。筒井(長崎大学)は2題続けて講演を行い、1題目では東シナ海・西日本沿岸各地で採取さ れた表層海水中のカルシウムイオン濃度について、2題目では長崎丸航海で採取された魚種ごとの血中 カルシウムイオン濃度の違いについて報告を行った。郭(愛媛大学)は今年度から始まった学術変革領 域研究(A)「マクロ沿岸海洋学」における「黒潮・亜熱帯外洋域の栄養物質輸送」班の研究計画について 紹介し、その中では陸起源物質の海洋への供給と拡散の研究推進に長崎丸航海が貢献していることにつ いても言及した。吉江(愛媛大学)はこれまで黒潮流域・東シナ海周辺を中心に展開してきた低次生態 系の時空間変動に関する研究を紹介し、同海域では黒潮・陸棚水の影響の強さにより応答する植物ブラ ンクトン相が異なったことなどについて述べた。初日最後は遠藤(九州大学)より来年度夏季に実施予 定の長崎丸航海計画についての紹介とその航海計画に関する船長や一等航海士ら長崎丸オフィサーと のディスカッションが行われた。

2日目の講演では、木田(九州大学)は河川水供給が駆動する沿岸循環と生態系応答に関して有明海 や厚岸湖を汽水湖として見立てた際の数値モデルについて紹介し、海峡部で河川水が広がるタイミング は上潮の初期にあること、また汽水域の深さで循環が変わることなどを述べた。田中(福井県立大学) はSubinertial な外部潮汐から内部潮汐へのエネルギー変換率について講演を行い、定式化した変換率 の有効性を調べる数値実験結果を示し、その大きさや分布は海底地形に依存することなどを言及した。 武田(長崎大学)は夏季の日本海対馬暖流沿岸分枝に沿った蛍光性溶存有機物(FDOM)の分布と組成 について紹介し、低塩分水の認められた島根県沖では陸起源および海洋性腐植様物質が比較的多く認め られたことなどを示した。北島(水産機構資源研)は2000年代以降の東シナ海北部の海洋環境と動物 プランクトン組成について講演し、同海域表層では低塩分化と高水温化が進み、Paracalanus spp.の個体 数が減少する一方、Calanus sinicus 個体数が増加し、海洋環境を反映した可能性について言及した。Zilin (愛媛大学)はWorld Ocean Database から得られる1951年~2006年までの東シナ海陸棚上の底層部 に広がる低酸素水の分布の変遷についてまとめる報告を行った。Cao(愛媛大学)は2011年に東シナ海 で発生した台風が海洋環境へ与える影響について係留観測とHYCOM データから解析した結果につい て紹介した。

全ての発表ののちに、総合討論を行った。来年度の長崎丸航海に関して、特に現在は新型コロナ感染 対策のため乗船基準が厳格化されているが、政府方針の変更に伴いこの基準も緩和される可能性がある ことから、研究者側と船側が引き続き連携をとることなどが話し合われた。また、既に近藤(長崎大学) が申請済みの来年度の九州大学応用力学研究所の共同利用研究集会についても、採択された暁には今回 と同様の時期で、東アジア縁辺海の物質循環と生物・物理・化学過程をテーマとして開催することを報 告した。

#### 九州大学応用力学研究所研究集会

### 「東アジア縁辺海の物質循環と生物・物理・化学過程」

場所:九州大学応用力学研究所3階301号室 & オンライン(ハイブリッド開催)

日時: 2022 年 2 月 20 日(月) 13:00 ~ 18:00

21日(火) 9:00 ~ 12:15

### 趣旨

東シナ海や日本海など東アジア縁辺海の海水循環は太平洋含めた隣接海域の生物生産並び にそれを支える栄養塩動態に大きな影響を与えるため、同海域における生物・物理・化学過程を 包括した研究は重要である。九州大学応用力学研究所では、東アジア縁辺海や太平洋側の黒 潮域など周辺海域含めた海水の循環に関する研究を継続的に展開しており、これまで名古屋大 学、長崎大学、富山大学、鹿児島大学、愛媛大学、水産教育研究機構・水産試験場等の研究機 関との共同研究も多く実施されている。そこで、今後の共同研究の更なる進展のため、これまで 得られた成果の発表ならびに今後の観測計画に関する議論を行うための研究集会を開催する。 東シナ海や日本海における調査では、長崎大学練習船長崎丸が重要な役割を担うことから、研 究集会の場で話し合われる長崎丸観測計画については、研究者のみならず船舶運航側のオフィ サーを含めて議論を行うことで、観測体制の強化が期待される。東アジア縁辺海を中心とした海 域における生物・物理・化学過程を包括した研究の今後の展開を考える場として本研究集会を 位置付ける。

### 2月20日(1日目)

13:00 - 13:05 **開会・挨拶及び開催趣旨説明** 近藤能子(長崎大学)

- 13:05 13:15 WESTPAC-AMS program の近況報告 張勁(富山大学)
- 13:15 13:40 係留系とLADCP による富山深海長谷内部の流れの観測 千手智晴(九大応力研)
- 13:40 14:05 元素組成と炭素安定同位体比を用いた富山深海長谷の堆積物起源と運搬過 程の推定(オンライン発表) 大塚進平\*・張勁(富山大学)・千手智晴(九大応力研)

14:05 - 14:30 **五島海底谷通過流の流動構造-2022 年 4 月観測結果-**滝川哲太郎\*・森井康宏・山脇信博・木下 宰・合澤 格・保科草太・丸山裕豊(長

崎大学) 14:30 – 14:55 Low-oxygen bottom waters on the outer shelf of the East China Sea: Water mass analysis, nutrient transport, and tidal influence using multi-chemical tracers(オンライン発表) Wenjie Deng<sup>\*</sup>, Jing Zhang, Siteng Zhu, Saki Katazakai, Keiji Horikawa (Toyama University), Takahiro Endoh, Takeshi Matsuno (RIAM), Yoshiko Kondo (Nagasaki University)

- 14:55 15:15 休憩
- 15:15 15:40 東シナ海・西日本沿岸各地表層海水中のカルシウムイオン濃度 筒井英人\*・桑野和可・鈴木利一・山脇信博・森井康宏・合澤格・保科草太・丸山 裕豊・木下宰(長崎大学)
- 15:40 16:05 **東シナ海各地で採捕した魚類の血中カルシウムイオン濃度について** 山脇信博・森井康宏・筒井英人\*・松下吉樹・高谷智裕・合澤格・保科草太・松山 晃・三浦翔平・岩崎淩・中尾直幸・丸山裕豊・木下宰(長崎大学)
- 16:05 16:30 マクロ沿岸海洋学における黒潮班の研究計画 郭 新宇(愛媛大学)
- 16:30 16:55 **黒潮流域における低次生態系の時空間変動に関する研究** 吉江直樹(愛媛大学)
- 16:55 17:10 休憩
- 17:10 18:00 長崎丸航海計画についての紹介とディスカッション 遠藤貴洋(九大応力研)

### <u>2月21日(2日目)</u>

- 9:00 9:25 **河川水が駆動する沿岸循環と生態系応答について** 木田新一郎(九大応力研)
- 9:25 9:50 Subinertial な外部潮汐から内部潮汐へのエネルギー変換率:日本周辺の縁辺 海への適用

田中祐希(福井県立大学)

9:50 - 10:15 夏季日本海における対馬暖流沿岸分枝に沿った蛍光性溶存有機物の分布と 組成(オンライン発表) 武田重信\*・保科草太・合澤格・木下宰・山脇信博・森井康宏(長崎大学)

10:15 - 10:40 2000 年代以降の 6 月の東シナ海北部の海洋環境と動物プランクトンにみられる変化(オンライン発表)
 北島聡\*・西内耕・長谷川徹・清本容子・廣江豊・種子田雄・瀬藤聡(水産機構資源研)

- 10:40 10:55 休憩
- 10:55 11:20 Analysis of oxygen deficit on the mid-outer shelf of East China Sea based on the World Ocean Database

Li Zilin\*, Xinyu Guo (Ehime University)

11:20 – 11:45 Ocean dynamical response to Typhoon Meari (2011) in the East China Sea Anzhou Cao\*, Shuya Wang, Xinyu Guo, Akihiko Morimoto (Ehime University)

11:45 - 12:15 総合討論

### 閉会

著者が複数の場合、発表者に\*を記載。

### 2022WS-AO-3

### 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

一般財団法人 電力中央研究所 サステナブルシステム研究本部 板橋 秀一

### 研究集会の目的

応用力学研究所の大気環境モデリング研究グループは、世界的に見てアクテイブに研究を進 めるグループの一つであり、モデル研究だけでなく、多波長のレーザーレーダーの導入による 黄砂・大気汚染粒子の同時計測などの先進的な研究を推進している. 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、数値モデルとさまざまな大気環境計測データを 統合した解析や、データ同化による先端的な研究は、いまだ十分に明らかにされていないエア ロゾルの物理化学特性に係る重要な科学的知見をもたらすとして、国内外から大きく期待され ている. 本研究集会では、そのような最前線の知見を、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ともに、各分野がリンクすることによる新たなブレークスルーを生む機 会を設けることを目的としており、これは、アジア域の化学輸送モデル研究の推進やモデル精 緻化にとって非常に重要である.

#### 研究集会の概要および成果

本年度は2023年3月2日(木)午後~3日(金)午前にハイブリッド形式(現地:応用力 学研究所,オンライン:Zoom)で開催とした.研究集会には国内の化学輸送モデルを用いた 研究者にとどまらず,博士課程学生や地方自治体関係者など大気環境研究に関わる幅広い専門 家が集まり、計10題の発表が行われ,現地12名,オンライン最大25名が参加した.

研究集会では、「モデル間相互比較実験」「環境省環境研究総合推進費による研究成果」「モ デル開発の現状や動向」「排出量インベントリの動向」「将来の気候変動下の黄砂・大気質変化」 などのトピックについて最新の成果が報告され、十分な質疑の時間を確保することで活発な議 論が行われた.ハイブリッド開催ということもあり、地方環境研究所からは昨年に引き続き多 くの参加があった.本研究集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.このような大気環境研究に係る研究者 間の貴重な交流の場を設けるために、来年度も引き続き本研究集会を開催したい.

以下に研究集会のプログラムを掲載する.

### プログラム

日時:2023年3月2日(木)午後~3日(金)午前

場所:ハイブリッド形式

(現地:九州大学応用力学研究所2階会議室,オンライン:Zoom) 主催:九州大学応用力学研究所全国共同利用研究集会(2022WS-AO-3)

共催:大気環境学会 九州支部会

大気環境学会 大気環境モデリング分科会

環境省·環境再生保全機構環境研究総合推進費(5MF-2201)

### 2日(木)午後

座長:板橋 秀一 (電力中央研究所)

- 13:30 趣旨説明: 弓本 桂也 (九州大学応用力学研究所)・写真撮影
- 13:40 山地 一代(神戸大学)[ロング] 東アジア域を対象とした大気質モデルの物質濃度再現性について
- 14:10 櫻井 達也 (明星大学)[ショート]

気象の再現性から見る Ox 高濃度事象のモデル予測精度

- 14:30 嶋寺 光 (大阪大学) [ロング] 長期大気質シミュレーションに基づく関西・関東地方におけるオゾン濃度経年変化の解 析
- 15:00 板橋 秀一(電力中央研究所)[ロング] 衛星計測によるオゾン感度レジームの長期変化とモデルを活用した地表面濃度推定の 試み
- 15:30 弓本 桂也 (九州大学応用力学研究所)[ロング]

衛星リトリーバルと一体化したエアロゾル予測システムの開発

16:00-16:20 議論等

#### 3日(金)午前

座長:弓本 桂也(九州大学)

- 9:00梶野 瑞王(気象庁気象研究所) [ロング] 【オンライン】<br/>NHM-Chem の現状と今後
- 9:30 森野 悠 (国立環境研究所) [ショート] 【オンライン】 数値モデルによるオゾン生成レジームの再現性検証
- 9:50 森川 多津子(日本自動車研究所)[ロング]【オンライン】 自動車からの非排気粒子推計の状況と CMAQ による大気中濃度の試算
- 10:20 弓本 桂也 (九州大学) [ロング]温度上昇が黄砂に与える影響
- 10:50 茶谷 聡(国立環境研究所)[ロング] アジアの将来気候・環境シナリオに基づく大気質予測
- 11:20-11:40 議論等・総括・次回開催について

\*発表形式:[ショート]:発表 12 分+質疑 8 分・[ロング]:発表 20 分+質疑 10 分

「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

2022 年 11 月 30 日から 12 月 1 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。開催にあたっては感染症対策を講じた上で対面形式にて実施したが. 急遽自宅にて隔離が必要となった講演者に対してはリモートでの講演も受け入れ,コロナ 禍においても全体では 33 名の参加者と 13 題の講演があった.初日の 11 月 30 日は,大気 海洋間のフラックスや相互作用に対する海洋の応答、日本周辺海域を対象としたモニタリ ング結果やモニタリング手法の開発・検証についての講演となった.講演の前半では練習 船や調査船による ADCP、XCTD、表層水質モニター等を用いた現場観測による、降雨に よる低塩化の3次元的な空間構造や潮目の検出、津軽暖流の流量の再評価についての講演 があった.続いて,黒潮流路近辺の水位データを用いた黒潮の勢力や流路をモニタリング する手法,より簡便に高解像度で多要素の観測が可能なセンサプローブの開発・検証,魚 探を搭載した水中グライダーによる低次生産構造のモニタリングの取り組みについての講 演があった。2 日目の 12 月 8 日においては,特徴的な地形や特定海域における力学やそれ らが海洋資源や環境に与える影響、日本沿岸の数値モデルおよびそれを用いた海洋現象の 事例解析などの講演が中心となった。前半では海峡における季節性の潮汐流がスルメイカ を南下させるプロセスや日本海における近慣性内部重力波、島影渦列の中立派の共鳴によ る解釈についての講演があり、続いて日本海周辺海域におけるマイクロプラスチックの砕 波モデル、日本沿岸の海況監視予測システムの出力を用いた越前海岸で発生した急潮の事 例解析、日本海沿岸モデルの非構造データ同化に関する講演があった。

2日間を通して、日本周辺海域における海況モニタリングと波浪計測を基礎とした、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.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のご参加頂いたことによって、海洋モニ タリングに関してその手段の多様化が顕著であること、それらを用いた新たな取り組みと 成果が生まれていることを広く共有する機会とすることが出来た.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.

232

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プログラム(11/30-12/1)

 ==== プログラム=======
 九州大学応用力学研究所研究集会
 「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: 2022年11月30日(水)~12月1日(木)
 開催場所: 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) (https://www.riam.kyushu-u.ac.jp/center/access.html)

\*先だって行われるレーダー集会後に時間をおいて開催します. \*各講演,質疑応答込み20~25分でお願いいたします.

-----11/30 (水) ------

13:30-趣旨説明

13:35-14:00

大気強制と日本海通過流が作るSSTトレンドの強弱 〇松浦浩巳(九大総理工)・木田新一郎(九大応力研)

14:00-14:25 黒潮フロント域で観測された降水起源の低塩分プール 〇滝川哲太郎(長大院水産・環境)・立花義裕(三重大)・中村啓彦・仁科文子(鹿大水)・広瀬直毅(九大応力研)

14:25-14:50 表層水質モニターによる連続観測データを用いた潮目の検出 〇林美鶴・西岡亮太・廣川綜一(神戸大)

14:50-15:05 休憩

15:05-15:30 ADCP4往復調査法による津軽暖流流量の再評価 〇西田芳則(道総研中央水試)

15:30-15:55 三宅島周辺の黒潮のモニタリング 〇寄高博行(高知大)

15:55-16:20 小型曳航式観測システム用センサプローブの開発 〇長谷川大介・田中雄大(水産機構・資源研)

16:20-16:45 東北太平洋沖における魚探グライダーによる海洋モニタリング 〇田中雄大・長谷川大介・奥西武(水産機構・資源研)

16:45-17:00 情報交換

-----12/1(木)-----09:05-09:30 対馬海峡に発生する季節性潮汐流とスルメイカ南下との関係 〇山口忠則(九大院総理工)・広瀬直毅(九大応力研)

9:30-9:55

富山湾深層における近慣性内部重力波

〇越後友利果・磯田豊(北大院水産)・千手智晴(九大応力研)・藤居流(北大院水産)

9:55-10:20

中立波の共鳴による島影渦列の解釈 〇藤居流・磯田豊・越後友利果(北大院水産)

10:20-10:35 休憩

10:35-11:00

日本周辺海域に浮遊するマイクロプラスチックの破砕モデル 〇徳地雄真(九大院総理工)・磯辺篤彦(九大応力研)

11:00-11:25 越前海岸で発生した2022年8月の急潮について 〇広瀬成章(気象研)・岩崎俊祐(福井水試)・碓氷典久・坂本圭・石川一郎・中野英之(気 象研)

11:25-11:50 日本海沿岸モデルの非構造データ同化 〇広瀬直毅(九大応力研)

11:50-12:15 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 2022年11月30日~12月1日

	氏 名(所属)		
1	福留研一(富山高専)		
2	滝川哲太郎 (長崎大学)		
3	長谷川大介(水研・塩釜)		
4	佐々木建一(JAMSTEC)		
5	印貞治(日本海洋科学振興財団)		
6	久木幸治(琉球大学理学部)		
7	広瀬成章(気象研)		
8	中山智治(日本海洋科学振興財団)		
9	坪野考樹(電力中央研究所)		
10	江渕直人(北大低温研)		
11	難井章嗣(NICT)		
12	寄髙博行(髙知大学)		
13	田中雄大(水研・塩釜)		
14	林美鶴(神戸大学)		
15	<b>藤井智史(琉球大学)</b>		
16	磯田豊(北海道大学水産科学研究院)		
17	藤居流(北海道大学水産科学研究院)		
18	越後友利果(北海道大学水産科学研究院)		
19	髙山勝巳(株式会社いであ)		
20	倉垣拓二(JFEアドバンテック)		
21	松野健(九大・応力研)		
22	市川香(九大・応力研)		
23	千手智晴(九大・応力研)		
24	遠藤貴洋(九大・応力研)		
25	木田新一郎(九大・応力研)		
26	辻英一(九大・応力研)		
27	広瀬直毅(九大・応力研)		
28	谷口勝平(九大・総理工)		
29	山口忠則(九大・総理工)		
30	松浦浩巳(九大・総理工)		
31	徳地雄真(九大・総理工)		
32	酒井秋絵(九大・総理工)		
33	中島広貴(九大・総理工)		
	参加者 合計 33名		
九大 13名(応力研7名 総理工 6名) その他 20名			

## 黒潮フロント域で観測された 降水起源の低塩分プール

滝川哲太郎(長崎大学)
 立花義裕(三重大学)
 中村啓彦・仁科文子(鹿児島大学)
 広瀬直毅(九州大学)
 共同観測チームALL JAPAN(感謝)

新学術研究 気候系のHotspot2

A02-3東アジア縁辺海と大気の連鎖的双方向作用とモンスーン変調 立花藩

# 降雨による低塩化の先行観測研究

Kameyama et al. (2022), Frontiers in Climate

• 黒潮続流**定点KEO**ブイ→台風通過に伴う低塩化

Cao et al. (2022), Remote Sens.

- 南シナ海の高気圧性渦上のLow-salinity poolを衛星観測と航跡
   に沿った船舶観測で詳述
- Barrier layerによって**鉛直拡散を抑制→表層にpoolを維持**

岩松ほか (2003), 海の研究

• 黒潮フロント域(八丈島南方)の<u>低塩分水塊</u>

↑上流の降雨域からの移流

3次元的な空間構造を捉えた研究はない? 亜表層への影響は?(サブダクション、混合過程)

## 目的

海洋に供給された淡水の分布や挙動

→海水や物質の移流・拡散過程を考える上で重要



・黒潮フロント域における

降水起源の低塩分水の3次元空間構造

・**低塩分水の亜表層への影響**(鉛直流、鉛直拡散)





観測海域南部で黒潮フロント



# 観測海域南部の降水



IT - 00

海洋同化モデル Dreams\_Ep (九州大) (本観測データは未同化)

1日後



Salinity at Model Level [psu]+Sea 0701 00:30 UTC-20220701 23:30 odel Level [m/s 24, incr=1); De



1285 128.55 1295 129.55 1305 130.55 131 59 32.76 32.92 33.08 33.24 33.41 33.57



Bckgr: Salinity at Model Level [psu]+Sea Current at Model Level [m/s] E for 20220623 00:30 UTC-20220623 23:30 UTC (n\_ave=24, incr=1); Dep 23 32.5 31.5N 31 N 30.5N 301 29.5

5E 128E 128.5E 129E 129.5E 130E 130.5E 131E 131.5E 132E 32.59 32.76 32.92 33.08 33.24 33.41 33.57 33.73 33.89



Bckgr: Salinity at Model Level [psu]+Sea Current at Model Level [m/s] E for 20220626 00:30 UTC-20220626 23:30 UTC (n\_ave=24, incr=1); Dep



27E 127 5E 128E 128 5E 129E 129 5E 130E 130 5E 131E 131 5 32.43 32.59 32.76 32.92 33.08 33.24 33.41 33.57 33.73 33.89

まとめ

- 黒潮フロント域での航走ADCP&格子XCTD観測
- 降雨量で低塩化(33.4→32.7)を説明
- 黒潮フロントに沿った降雨起源の低塩分プール

水平・鉛直スケール:L130 km×W40 km×D30 m

- 低塩分水が流下方向に舌状に、20m以深まで分布
   沈み込みの位置~収束域
  - 下降流0.03 cm s<sup>-1</sup>だけでは説明できない。
- 同化モデルで低塩分プールを再現していた。

降水と低塩化のタイミングが一致 亜表層への影響は観測より小さい?

2022年12月モニタリング研究集会@九大応研

## 表層水質モニターによる連続観測データを用いた 潮目の検出

林 美鶴(神戸大・内海域セ/院海事) 西岡亮太(神戸大・海事) 廣川綜一(神戸大・院海事)

### 目的

現場観測データを用いて潮目の立体構造を捉え ↓ その時空間変動特定を明らかにする T、S: <u>船舶インテイク水</u>、人工衛星 流動: 船舶&定点ADCP、HFレーダ



神戸大学大学院海事科学研究科 付属練習船深江丸(2021年度退役)の インテイク水(深度約3m)を使用



## 2008年の表層水温0.5'グリッド平均



## フロント検出基準









## データ数(毎分)に対する検出割合



246



25.500

26.000

26.500

(cm/s)

2021/08/21 19:00



フロント位置・強度の解析(林ら、2013)





## 基礎生産環境

## 参考:Chl-aパッチ・ストリークの形成



R4.11.30

### 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

## ADCP4往復調査法による津軽暖流流量の再評価

道総研中央水試 西田芳則

### 背景

### <u>最近の研究成果</u>



b Annual average (dashed) and 5-year running average (solid) transports through the Tsushima Strait (red), Tsugaru Strait (blue), and Soya Strait (green) simulated in RIAMOM. Estimates based on acoustic Doppler current profiler observations along the Tsushima Strait are shown in black (Utsumi 2018) (color figure online) (kida et al. 2021)

- ・ 左記と同期間における北海道西岸を北上する 対馬暖流流量のトレンドは0.04Sv/10年
- ・対馬海峡の流量変動の寄与は半分程度



北海道西岸を北上する対馬暖流流量の時系列

### 背景



### 背景

- ・深浦と函館の水位差(△η)から津軽暖流の流量(Q)を算出する経験式を提案
- ・2003年1月に函館の験潮場が移設。それに伴いT.P.は13cm低下。水位差のジャンプ。



### 目的・方法

津軽海峡西口においてADCPを用いた4往復観測\*を実施し、最近の津軽暖流流量の変動傾向

を評価する。 \*観測線上を24時間50分間に一定の速度で4往復することにより、観測線上の任意の点において、潮流成分が 除去された日平均流を求めることができる。(加藤、1988)

ADCP4往復調査:2022年7月4~5日に実施




#### ADCPの仕様・流速の外挿方法



#### 結果:流速の鉛直断面

過去の知見

- ・北海道側の表層には強流域が形成。
- ・観測線中央部の深度90mでは表層の強流域に匹敵するほどの流速



各横断における流速分布の鉛直断面(図中左:横断回数、右:流量) 観測:2022年7月4~5日 日平均流量:2.0Sv

#### 結果:断面流量と水位差の時間変化



#### 結果:断面流量と水位差との相関関係



水位差は横断ライン中央部を通過した時間よりも2時間前を採用

#### 結果:津軽暖流流量の推定

- ・2003年を挟んで流量のジャンプはみられない
- ・1997~2012年の津軽暖流流量に増加傾向はみられない
- ・2010年以降津軽暖流の流量は増加傾向



経験式: (2003年以前) Q=0.0271Δη+0.933、(2003年以降) Q=0.0388Δη+0.0353

#### 結果:津軽暖流流量の推定





#### 結果:津軽暖流流量の推定

・最近の津軽暖流流量の増加は函館の水位低下が要因



#### 結果:津軽暖流流量の季節変化

(過去の知見)津軽暖流流量の季節・経年変動幅はともに0.3Sv それほど変わってはいない



#### まとめ

・津軽暖流流量の季節変動幅は0.4Svで過去の知見と 大きな違いは無い。

津軽暖流流量は、2010年以降は増加傾向。
 0.3Sv/10年(2010~2020年)
 太平洋の水位低下が大きいため。

## 三宅島周辺の黒潮のモニタリング

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
 2022.11.30
 寄高博行
 (高知大学黒潮圏科学部門)





$$\zeta_{Ako} - \zeta_{Tsubota} = \frac{1}{2g} \gamma(\theta) C_p U^2$$























Ako-Tsubota+160cm [cm]







関東東海海況速報
/伊豆諸島海域









#### まとめ

- •三宅島の西の阿古と南東の坪田の水位差と、三宅島の西の流れの30°~50°方向成分の相関が良い。
- 40<sup>°</sup> 方向成分は、非大蛇行北偏流路(NLMN)で1m/sを越えることがあるが、大蛇行西偏流路(LMW)で1m/sを越えることはない。

# 小型曳航式観測システム用 センサプローブの開発

○長谷川大介・田中雄大

水研機構・資源研 塩釜庁舎 (旧東北水研) 寒流第2グループ

#### 海洋のサブメソスケール構造(数百 m ~10 km)



1)通常のCTD観測



- ・頻繁な減速/加速
  - ADCPデータの処理が煩雑に
  - 船が嫌がる場合もある
- ・採水ができる



2) 航走しながらの連続CTD観測



- ・定速で高解像度の観測が可能
- ・機材によっては大掛かりとなる

MVP-300



Underway CTD



### 観測解像度などの特徴(250 km x 500 m 観測する場合)

プラット フォーム	航行速度 [kts]	水平解像度 [ km ]	所要時間 [days]	機材の 規模	多項目
通常のCTD観測	10	5(任意)	1.6	大掛かり	$\bigcirc$
水中グライダー	0.5	1.4	10.7	小型 独立	Ô
SeaSoar MVP- 300	8	4.9	0.7	大掛かり	$\bigcirc$
Underway- CTD	8	3.7	0.7	小型	CTD のみ



#### 海洋のSub-Mesoscale (数百 m ~10 km) 構造



#### UCTDシステムで多項目観測を実現したい



Presentation Venue / Date & Time



一方で,プローブに関する技術論文は出版されていない 本日のトピック:

- ・各種センサの応答速度と高速落下の影響
- ・塩分スパイクの処理
- ・糸巻きが面倒 → 重量増加により糸巻きを不要に
- ・曳航時の姿勢について

塩分スパイクはT-C両センサの応答特性が分かれば補正できる! (Lueck & Picklo 1990)

S(t) = Salinity(P(t), T(t - lag), h(t) \* C(t))C-Tのセンサの 位置の違いにより じる計測時間差 Cの応答速度をTの応答速度に 合わせるためのフィルタ

発表内容から論文公表前の内容を削除しております。

ご興味がある方は,長谷川 (daisukeh (at) affrc.go.jp) まで, ご連絡ください。 九州大学応用力学研究所 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」 2022年11月30日16:20~16:45

### 東北太平洋沖における魚探グライダ-による海洋モニタリング

#### 田中雄大・長谷川大介・奥西武 (水産研究・教育機構 水産資源研究所 塩釜庁舎)



#### 水産試験研究機関による船舶海洋モニタリング







#### 2022年度 東北近海の8月~10月のマサバ漁場予測



このサイトは、東北近海(三陸海峡)の約1→10月のマサバ漁場を予測情報を提供しています。 次の1)に本年の予測、2)に予測に用いる指標水温、3)に本年5月上旬の水温(現況)及び平年値との比較水 温、4)に予測時域の説明を示しています。

#### 1) 漁場予測(8月~10月): 2022年6月24日発表



#### 2)指標水温の時系列変化



Year 黒破線(c.・)は、指標となる金華山沖(38-38.73k) 142-142.75b)の5月上旬の水温(0-50m深度)の年変動を示しま す。•は本年の値です。青線(三陸北部海域)、線線(三陸南部海域)は過去の東北近海におけるマサパ漁獲量の海域別 の比率を示します。赤線は基準水温(9.77c)を示し、高水温年は三陸北部海域、低水温年は三陸南部海域の漁獲が多く なる傾向を利用して、漁場予測をしています(詳細は<u>奥西6,2020</u>を参照)。 水温データは<u>海辺ブ測システムFRA-ROMS</u>を利用しています。

#### 水中グライダーによる海洋モニタリング実施状況





#### 水中グライダーによる資源海洋モニタリングに向けた取り組み



図 水中グライダーによる観測の概念図

三陸沖フロント域など漁場周辺での浮魚の餌生物分布や、それを支える低次生産構造・ 栄養塩動態を把握するための、グライダーモニタリング体制の構築が課題



## **Acoustic Glider Configuration**



### **Acoustic Glider Mission**



2020: 5/10 ~ 5/15 2021: 4/28 ~ 5/18 2022: 4/20 ~ 5/2



【目的】

・春季東北沖海域における音響散乱特性を明らかにする。

・音響散乱特性と海洋環境との関係を明らかにする。

### **Acoustic Data Process**

<u>平均体積後方散乱強度, Sv:</u> SONAR Equation (Urick, 1983; Guihen et al. 2014):

 $S_V = RBV + 20 \log_{10} R + 2aR - (SL + RR)$ 

- 10  $\log_{10} \frac{c\tau}{2}$  - 10  $\log_{10} EBA$  - C - g

R: range (m), a: absorption coefficient (dB/m), SL: transducer source level (=210.7 dB re 1µPa at 1m), RR: transducer receiving response (=-184.6 dB re 1V/µPa), c: sound velocity (m/s), T: pulse length (s), EBA: equivalent beam angle (=0.0172 steradians), g: gain (=41.5 dB), C: calibration constant (=1.26 dB)

以降のスライドでは、Svを「音響強度」と表記





### 音響散乱強度(2021年)



### 音響散乱強度(2021年)



### 音響散乱強度と照度プロファイル



#### 日周鉛直移動の軌跡の抽出



⑩日周鉛直移動の特性として、昼は深いところ、夜は浅いところにいるはず。
→ Sv\_maxを求める際、夜(20~28時)の90m以深、昼(10~16時)の50m以浅は、考慮しない。
①各キャストでSvの最大点(Sv\_max)を抽出(●と○)
②Sv\_maxが50mより浅くなるキャストを、日周鉛直移動開始・終了とし、
その直前・直後の1キャストを含めて、日周鉛直移動の軌跡とする(▽)。
③得られた軌跡に対して、最小2乗法により、2次関数をフィッティング(黒曲線)
④得られた曲線の上下50m内でのSv\_max点を抽出し、最終的な軌跡とする(●)
⑤2次曲線の頂点を境に、下り・上りに分け、各々線形フィッティング(白直線)
⑥得られた直線から、降下・上昇速度を計算





・求めた $K_d \ge I_0$ から、音響散乱の日周鉛直移動を最もよく再現する等照度線を算出  $\rightarrow$ 532nmの場合、log(I)=-13.0 [ $\mu$ W/cm<sup>2</sup>/nm]が最適 (r=0.49, p<0.01)

#### 水塊分布との関係(2021年)







・2020年初日、観測海域は曇天

・2022年4/27は曇天、4/30は晴天だが、ともに日中表層の反応あり
 ・2022年4/24は曇天だが、日中表層の反応なし



・黒潮系暖水域では、日中でも表層に音響反応が残る傾向

#### まとめと今後の課題

- ・春季東北太平洋沖において、魚探を搭載した水中グライダーによるモニタリング調査を、2020年に開始した。
- ・音響散乱強度の鉛直ピークが日周鉛直移動する様子が見られ、通常、昼間は、(照 度センサーの下限値以下となる)光が届かない下層へ移動していた。
- この音響反応が、動物プランクトンを反映しているとすると、潜行速度から小型カイアシ類の可能性が考えられた。また、照度と潜行水深の関係は、陸棚上や高塩分の黒潮系水塊が覆う海域と、それ以外の海域で異なる特徴を示した。
- ・一方、(特に2020年や2022年は)昼間でも表層に強い音響反応が見られる場合が あった。日中の照度(=曇りor晴れ)だけでなく、高塩分の黒潮系水塊の出現とも 関連している可能性が考えられた。

# 対馬海峡に発生する季節性潮汐流 とスルメイカ南下との関係

〇山口忠則(九大院総理工)、広瀬直毅(九大応力研)

# スルメイカ (Todarodes pacificus)



- ・軟体動物 貝類など
- ・ 頭足類 イカやタコ、オウムガイ
- 寿命 1年未満



# スルメイカの分布



(10~12月)

水産庁HP

# 推定回遊経路



水産庁HP

# 人工衛星夜間画像と粒子追跡実験

2015年12月





2016年3月





# Dreams\_Mの daily と hourly (30m深)



2022年9月27日

同日21時(UTC)



2015年10月のUNラインにおける南西流

# 南西流の季節変化 (2010~2019年、各15日平均)



### スルメイカの南下仮説

- ・対馬海峡には潮汐の影響により、季節性の 南西流が発生する
- ・スルメイカは昼間、海底に定位する
- もし、南西流発生と鉛直日周運動が同期すれば、スルメイカは自然に南下する

## 底引網漁業によるスルメイカの漁獲



水産大学校 松本氏調査



# 粒子追跡実験の条件

- Dreams\_M hourly, Kako et al. (2014)
- Smagorinsky係数: 0.1
- •水深30m
- ・リリース場所: 対馬海峡北部UNラインの5点
- •実験期間: 2015年10月~2016年2月
- ・リリース日: 各月の大潮(新月)、中潮、小潮
- ・計算時間: 18、21、24(0)時(JST)から各6時間のみ
- 実験数: 5×5×3×3=225
- ・計数: 30、60、90日後の南下した粒子








# ケンサキイカの推定移動経路



# 天草海に滞留する平均粒子数 (2013-2017年)



Yamaguchi et al. 2020

19

20

# スルメイカの南下プロセス(秋から冬)



まとめ

- ・対馬海峡には、夏至と冬至の大潮時に、それぞれ日没と日出の前後約6時間、南西流が発生する海域がある
- ・春分と秋分の大潮時には、日没と日出の両方の時間帯に発生する(季節性)
- 南西流は大潮時に最も強く、中潮から小潮にかけて弱くなり、発生する時間帯も遅くなる(潮汐流)
- 秋から冬にかけて、南西流の発生周期(真夜中から日出)と鉛直日周運動が同期したスルメイカは、対馬海峡を自然に南下する

# 富山湾深層における近慣性内部重力波

越後友利果·磯田豊(北大院水産)·千手智晴(九大応力研)·藤居流(北大院水産)







fcを考慮すれば、入射波の流速楕円は大きく扁平し、 反時計回りの流速楕円の近慣性波(内部波及びGsW)も存在する!?

流速観測の一例

日本海盆内のSt.8 (St.7は省略) 海底上100mと50m(N=0のBW内) の係留流速計資料(保安庁)



#### St.8の海底上50mの意味





調和定数(振幅と位相)の時系列

越後ほか(2022)より引用



① 近慣性周期変動なのに、流速楕円(特に8b+100)は円形ではなく、扁平が大

② 海底近傍の8b+50ほど振幅が大きく、位相が遅れる (反射波の影響が大)議論略

楕円の長軸方向のバラツキ具合から、色々な方位θから入射した波が観測されたと推測。 → fcを考慮すべき更なる証拠を示すために、北側からの入射波を選択的に観測したい!! その最適な場所が「富山湾」

富山湾深層における近慣性内部重力波







# 中立波の共鳴による<mark>島影渦</mark>列の解釈

藤居流・磯田豊・越後友利果(北大院水産)



**障害物背後の水平シアー流により生じる不安定波** Taneda(1963),Hannemann and Oretel(1989)など



カルマン渦列 2列の配位 a/b = 0.2806 b 円柱の場合・・ Re数= 40~200 St数 = 0.2前後

有名なのは・

(a) Karman vortices

**V₀** ♂ ↔ ↔ ↔ ↔

d

# 夏季の対馬暖流域の島を想定した数値実験(1.5層モデル)





シアー不安定の**基礎方程式**の導出

(位相と振幅)



「へ」の字型の偏差擾乱
島背後の水平シアー流による不安定波





シアー不安定波の式

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + V \frac{\partial}{\partial y}\right) \nabla^2 \psi - \frac{d^2 V}{dx^2} \frac{\partial \psi}{\partial y} = 0 \qquad (1)'$$

さらに、y方向に伝播する擾乱解  $\Psi = F(x)e^{i(ky-\sigma t)}$  を代入して整理すると(kは波数、 $\sigma$ は周波数)

基礎方程式 
$$(Vk - \sigma)\left(\frac{d^2F}{dx^2} - k^2F\right) - kF\frac{d^2V}{dx^2} = 0$$
 ② 振動源を  
(Rayleigh方程式)





# 中立波を特定する方法

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial t} + V \frac{\partial}{\partial y} \end{pmatrix} \nabla^2 \psi - \frac{d^2 V}{dx^2} \frac{\partial \psi}{\partial y} = 0 \quad ①' \qquad シ ア - π 安定波の式$$
  
**基本場のシア**-部分  $-\frac{d^2 V}{dx^2} = \beta_t$  とおいて...  $\mathbf{COB}_t$ は、地形性 $\beta$ (または惑星 $\beta$ )と考えると・・   
 $\begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial t} + V \frac{\partial}{\partial y} \end{pmatrix} \nabla^2 \psi + \beta_t \frac{\partial \psi}{\partial y} = 0 \qquad \mathbf{8}$ 流場 $V$ [こおける非発散の (地形性)ロスビー波の式   
 $\underbrace{ \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial t} + V \frac{\partial}{\partial y} \end{pmatrix}}_{\mathbf{7}^2 \psi + \beta_t \frac{\partial \psi}{\partial y} = 0} \qquad \mathbf{8}$ 流のみを零  $V \rightarrow \mathbf{0}, but \beta_t \neq \mathbf{0}$   
 $\frac{\partial}{\partial t} \nabla^2 \psi + \beta_t \frac{\partial \psi}{\partial y} = 0 \qquad \mathbf{8}$ 流過(浅瀬側または北極側)を   
 $\frac{\partial}{\partial t} \nabla^2 \psi + \beta_t \frac{\partial \psi}{\partial y} = 0 \qquad \mathbf{8}$ 流過(洗瀬側または北極側)を   
 $\mathbf{7}$ 発散ロスビー波として、

(移流 Vを考慮しないときの)中立波が特定できると考えた!









レイノルズ数Re=450から、カルマン渦列が励起されるRe=100へ変更 (ただし、非回転系) → 1列配位の島影渦列から2列配位のカルマン渦列への遷移



レイノルズ数Re=450から、カルマン渦列が励起されるRe=100へ変更 (回転系に戻す) → 1列配位の島影渦列はみられるが、カルマン渦列は形成されない!!



**O**<sup>O</sup> (360°)

### 60°

### 120°

# 180°



N3 の中立波(下流方向へ自由伝播)が最初に発生し、

**α1**のころ

#### その後、**遅れて**発生する

N2 の中立波(上流方向へ自由伝播するが、下流へ移流) **Q3**のころ が同じ伝播速度となって (重なり合って) 共鳴する。 このとき、偏差擾乱の形状は「へ」の字となる。

二つの中立波N3とN2の位相遅れが1/4波長(90°)くらいのとき、その渦流擾乱の成長率 が最も大きくなり、我々が観察できる島影渦になると解釈される。

# 日本周辺海域に浮遊するマイクロプラスチックの破砕モデル

#### \*徳地雄真1、磯辺 篤彦2

(1. 九州大学総合理工学府、2.九州大学応用力学研究所)

研究背景

2014年以降の日本周辺海域でマイクロプラスチック(MP)のサイズ分布調査が行われている。 (環境省ー沖合海域における漂流・海底ごみ実態把握調査業務報告書)





採取はネットを使用して行われる 網口:75cm\*75cm 網目:350µm

2

3

#### マイクロプラスチックのサイズ分布は、プラスチックの海洋 環境下での劣化・破砕過程を反映しているはず。



海表面での曳網調査で採取したマイクロプラスチック現存量 (piece/m3)と、Tokai et al. (2021, MPB)による網目から漏れた存在量 の補正。2014年以降の日本周辺における全ての採取プラスチックを 使って作成したもの。これ以降は、この補正分布で議論を進める



既存のマイクロプラスチック破砕モデル1 ~Cozar et al. (2014)の平衡破壊モデル



#### Plastic debris in the open ocean

.

Andrés Cózar<sup>a,1</sup>, Fidel Echevarría<sup>a</sup>, J. Ignacio González-Gordillo<sup>a</sup>, Xabier Irigoien<sup>b,c</sup>, Bárbara Úbeda<sup>a</sup>, Santiago Hernández-León<sup>d</sup>, Álvaro T. Palma<sup>e</sup>, Sandra Navarro<sup>f</sup>, Juan García-de-Lomas<sup>a</sup>, Andrea Ruiz<sup>g</sup>, María L. Fernández-de-Puelles<sup>h</sup>, and Carlos M. Duarte<sup>i,j,k,l</sup>

$$\mathbf{A}_{i}^{f} = \frac{\mathbf{A}_{ref} \cdot \alpha \cdot \mathbf{I}_{ref}^{3}}{\alpha \cdot \mathbf{I}_{i}^{3}} = \frac{\mathbf{A}_{ref} \cdot \mathbf{I}_{ref}^{3}}{\mathbf{I}_{i}^{3}}$$

平衡状態では質量(体積)保存を満たすよう三次の増加曲線に 従う(Cozar et al., 2014)

#### 疑問

- ✓ MPの生成と破砕はサイズごとに平衡状態か?
- ✓ サイズの三乗は体積(重量)の良い指標か?
- ✓ むしろ二次曲線がよく合致するのはなぜか?

$$A_i^f = \frac{A_{ref} l_{ref}^2}{l_i^2}$$

既存のマイクロプラスチック破砕モデル2 ~ Aoki & Furue (2021)のボルツマン分布モデル PLOS ONE



MPの破砕が細かく進むほど、破砕に要するエネルギーが大きくな り、そのエネルギーを供給する自然現象の発生確率は小さくなる (ボルツマン分布に従う)



疑問  $\checkmark$ 

調整値は合理的か?

5

プレートの破壊理論

## 既存のマイクロプラスチック破砕モデル3 ~ Kaandorp et al (2021)のフラクタル破壊モデル

10-

ENVIRONMENTAL RESEARCH

a)

k=1

particle size [mm]

I.

k = 0**Figure 2.** (a) Illustration of a parent cube (size class k = 0), consisting of successively Only three iterations until size class k = 3 are shown here, the size class can increase fragmentation model with p = 0.5 and after one fragmentation event  $i_f$ , based on Tu

LETTER

abundance [n] 1011

10<sup>8</sup>

10

10

Modelling size distributions of marine plastics under the influence of continuous cascading fragmentation

b)

10 (b)

10

10-

10-

10-

particle size [mm]

mass [g] 10

- 10<sup>10</sup> u - 10<sup>7</sup> and a support 1010

alized 10-5

Mikael L A Kaandorp\*, Henk A Dijkstra and Erik van Sebille



m:MP重量の確率密度分布 k:サイズの段階 f: 調整するパラメータ p:一回の破砕で割れる割合0<p<1. PPC0.45. PEC0.39 この割合がサイズに関わらず一定で破壊が続くというフラクタル破壊モデル 「:ガンマ関数 m:MP個数の確率密度分布  $D_{N}$ : 3(fragment), 2(sheet), 1(fiber) smaller cubes, based on Turcotte (1) ndefinitely. (b) Illustration of the ca 固体地球分野の土壌や岩盤破壊のモデルの応用 (Turcotte et al., 1986, JGR-Solid Earth) 0

> 疑問 ✓ 調整値は合理的か?

> > 6



● 日本海:1.6mmあたりまで、曲線に沿うがそれ以下のサイズで欠損が発生 ● 親潮域:3.0~0.5mmの範囲において、質量保存から予想される浮遊密度を超える 黒潮域:1mm以下の小さなサイズで大きく欠損



# 初期破砕サイズによる個数分布の違い

破砕スタート時の初期MPサイズにより、各サイズへ破砕する一定の確率Pを決定する 初期MPサイズには、観測されるサイズ分布を最もよく再現できるものを採用



### RMSEによる初期MPサイズ別破砕モデルの比較



▶ 観測値と最も誤差の小さい、6.5mmをモデルの初期MPサイズに設定

10

手法 — 破砕モデル概要



#### 手法ー破砕モデル設定

✓ 直径0.3mm以下のMPは実海域で採集不可のため、モデル内では消滅するものと設定

✓ 全てのサイズで破砕が同確率で起きると仮定

✓ どの直径サイズから破砕がスタートしても、破砕先のサイズを決める確率は一定



破砕の様子の例(モデル1)



13

12

# 海洋表層乱流に伴う鉛直混合を補正



MPの鉛直分布より、表層曳網調査では観測できない水深1m以深(図のグレー部分)のMPをモデルから 除外する。

### 鉛直混合効果の計算

鉛直混合の効果を決定する、平均風速(J−OFURO; Tomita et al., 2019)と有義波高 (J−OFUROを駆動力とした波浪モデルで計算)を、観測日時と場所で抽出



$\frac{\bar{n}(z)}{\bar{n}_0} = e^{\frac{W_b}{A_0}z}  \text{T. Kukulka et al.(2012)}$
$ar{n}(z)$ : 位置zにおける粒子数 $w_h=0.002\sigma$ m/s (上昇速度)( $\sigma$ : size)
$A_0 = 1.5 u^* \kappa_{H_s}$ (鉛直拡散係数)
$u^* = 0.0012 w_{10}$ (水摩擦速度)
$\kappa = 0.4$ (カルマン定数)
$H_s = (有義波高)$
w <sub>10</sub> = (風速)

15

モデル結果

#### ・20000回の試行を行った個数分布結果 (直径5mmのMP個数で規格化済み)



モデル1は三次曲線(破線)に近くなり、二次曲線に近くなるモデル2に比べMPの数が飛躍的に増える(左右の図で<u>縦軸の数値が異なる</u>ことに注意).。モデル2の方が観測に近い

### 海域別個数分布の比較



モデルと観測で、サイズ別MP個数の比をとる。

- ✓ モデルは閉鎖系の物理的破壊モデルなので、次のような過程は表現できない
- ① MPの上流から下流へ移流
- MPの生物過程による表層海洋からの沈降(Long et al., 2015; Hinata et al., 2022など)
- ✓ 上流の対馬暖流域や黒潮域に比べ、下流の親潮域では①もしくは②で以下のような比が顕著となるはず



# 海域別個数分布の比較



### 結論

✓ ランダムに破砕を繰り返すMP破壊モデルを構築した

- ✓ 元のMP体積(質量)を保存するモデル1と、一定の厚みで破砕を繰り返すモデル2の比較を 行った。
- ✓モデルでは閉鎖系での破砕と海洋乱流による鉛直混合のみを考慮しており、海流の下流に 行くに従って新たに生成されるMPの加入や、生物過程に伴う海洋表層からの沈降除去過 程は考慮されていない。
- ✓ 下流に位置する親潮域と、上流の対馬暖流域や黒潮域との観測/モデル比を見る限り、モデル2の方がモデル1よりも矛盾がない。

✓ Kaandorp et al (2021)のフラクタル破砕モデルに切り替えて、同じ解析を行なってみたい。

# 越前海岸で発生した 2022年8月の急潮について

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 2022年12月1日@九州大学応用力学研究所

<u>広瀬成章1</u>・岩崎俊祐<sup>2</sup>・碓氷典久<sup>1</sup>・坂本圭<sup>1</sup>・石川一郎<sup>1</sup>・中野英之<sup>1</sup> (1. 気象研究所, 2. 福井県水産試験場)

## 2022年8月の越前海岸急潮

「越前町の定置網 被害深刻 急潮影響 復旧に数億円」9月14日中日新聞 □7月中旬に米ノ、8月中旬に小樟で網やロープの破損、切断による被害 □地元漁業関係者「今回は今までにない被害」 □被害総額は約2.57億円

✓ 定置網近くの係留流速計で、1~2knotの持続する強い南東流を観測。
 ✓ 8月16日~19日頃に小樟定置網に大きな被害発生(福井県水産試験場)
 ✓ 若狭湾内に高気圧性渦を観測(8月22日~23日)





135° 00' E

<sup>136° 03&#</sup>x27; E

# 2022年小樟流速観測



(福井県水産試験場 岩崎氏提供)

# 若狭湾の急潮

#### 大気擾乱起源

- 近慣性波及び沿岸捕捉波
   一 台風、低気圧通過前後
- @丹後半島
  - 熊木ら, (2005), Igeta et al., (2007, 2009)







- 沖合の亜表層冷水域の存在
  - Kaneda et al., (2017, 2019)



# 対馬暖流の流路

- 対馬暖流分枝
  - □第一分枝:沿岸分枝
  - □第二分枝:沖合分枝
  - □第三分枝:東韓暖流
  - Kawabe (1982), Hase et al., (1999), Ito et al., (2014)
  - Yabe et al., (2021):高度計データから流路分類
    - →大和海盆周辺の流路の季節変動
- 風による寄与

  - 流量の季節変化。
    - Moon et al., (2009)







### 本研究の目的

- 2022年8月に越前海岸で発生した急潮の要因を調べる。
   ✓観測の特徴:若狭湾内の高気圧性循環、強い流れの継続性(7月下旬~8月中旬)
   ✓対馬暖流との関係性(沿岸分枝)
- 使用データ
  - ▶気象庁の現業海況システムの数値モデルデータ ▶福井県水産試験場による現場観測との比較
  - ▶(衛星高度計による海面高度・地衡流速)



# 気象庁の現業海況システム

#### 日本沿岸海況監視予測システム(JPNシステム)

仕様:気象庁現業運用

- 海洋モデル: MRI.COMv4.6
- 水平解像度: 2km
- 領域: 117-160E, 20-52N (日本近海)
- 鉛直層:60層
- 大気外力: GSM(水平解像度~20km)
- 河川:日別気候値
- ・ データ同化:NPR-4DVAR → IAUダウンスケーリング(IAU-DS)
- ・ 観測データ(NPR-4DVAR):水温・塩分プロファイル、海面水温、海面高度
- 同化期間: NPR-4DVAR(10日)、IAU-DS(3日IAU)
- 本発表では、日別解析値のデータを用いる。



### 小樟における流速観測との比較

## 若狭湾内の循環場の比較

JPN 水温、流速, 8月23日 若狭湾の海況(CTD, ADCP) 2022/8/22~23 20822-23 表層 (\*C) 20220822-23\_表層 36.25N 36.25 36N 36N 35.75N 35.75N T1m 35.5N 50 35.5N 136E 135.5E 135.75E 185° 00' E 135° 00' E 36.25N 36.25N 0220822-23\_50m (°C) 20220822-23\_50 36N 36N 35.75N 35.75 T50 50 35.5N 35.5N 135.25E 135.5E 136E 135.25E 135.5E 135.75E 135.75E 136E 135E 135E https://www.fklab.fukui.fukui.jp/ss/joho/wakasawan/w20220822-23.pdf

若狭湾の8月中旬の流速場

#### JPN 流速@10m水深

8/11-8/21

- 沿岸分枝の接岸
- 小樟周辺は南向きの流れ 8/16~8/19
- 高気圧性渦の発達と東進







# 分位値による強流域の検出(日本海南部)



421

40

38N

36N

34N

32N

## 対馬暖流流量

- 流量偏差:12年(2008-2019)の日別気候値+31日移動平均からの偏差
- 東水道流量:正偏差→6月中旬~7月上旬、7月下旬~8月
- 西水道流量:正偏差→6月下旬~7月上旬、8月中旬



## 対馬海峡断面@34.6N,8月

#### 東水道

- 日本側(>131E)に高温偏差~高水位偏差
- 対馬側(<131E)で底層は低温偏差
- 海面勾配大→北向き成分が強化(正の流量偏差)

#### 西水道

- 海面はやや水温正偏差、底層は冷水温
- 韓国側の水位低下→対馬西岸で北向き強化
- 流量偏差としてはやや正











# 風速場による沿岸水位への影響

- 7月下旬~8月中旬に南西風の継続
   エクマン輸送による沿岸水位の上昇
- 東水道流量(~沿岸分枝)の強化と持続への寄与を示唆
  - > 風速の偏差成分の寄与は今後の確認事項



# 沿岸分枝と周辺場との関係



# 冷水渦の追跡(5~8月)

- 冷水渦は若狭湾の沖合に停留→沿岸分枝の接岸を維持
- 6月以降、北側の暖水渦が発達
- 暖水渦と冷水渦が相互に強化されていることを示唆。

上段: SSH, UV月平均値 下段: 日別気候値からの偏差



# 冷水渦の追跡(5~8月)

- 冷水渦は若狭湾の沖合に停留→沿岸分枝の接岸を維持
- 6月以降、北側の暖水渦が発達
- 暖水渦と冷水渦が相互に強化されていることを示唆。

上段: SSH, UV月平均値 下段: 日別気候値からの偏差


## まとめ

・2022年8月に越前海岸で発生した急潮の要因を調べた。

✓現業のJPNシステムは若狭湾内の循環場、急潮を良く表していた。

- ✓ 過去(2008-2019)に比べてもかなり強い流れ(95%分位値以上)
  - 若狭湾内の高気圧性渦、対馬暖流沿岸分枝
- ✓8月の対馬暖流東水道の流量は正偏差傾向
  - ・ 沿岸水位の上昇←南西風の継続によるエクマン輸送の寄与を示唆。
- ✓若狭湾沖合の冷水渦の停留
  - ✓若狭湾口において沿岸分枝が長期に接岸。
  - 大和海盆との高気圧性渦が6月以降発達。渦同士の相互作用を示唆。
- 今後の課題
  - ▶風の寄与(水位、対馬暖流流量)
  - ▶対馬暖流流量と大和海盆の渦の発達の関係(季節性・経年性)
  - ▶ 若狭湾内の高気圧性渦の発生と発達の要因

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」 2022.11/30-12/01

# 日本海沿岸モデルの非構造データ同化

広瀬 直毅

九州大学応用力学研究所



# DREAMS 1.5km models ( $\Delta x \sim 1.5$ km)







# DREAMS 1.5km models ( $\Delta x \sim 1.5$ km)





Continental Shelf Research 143 (2017) 194-205

Contents lists available at ScienceDirect

Continental Shelf Research

journal homepage: www.elsevier.com/locate/csr

329

Research papers

SEVIEI

### Numerical simulation of the abrupt occurrence of strong current in the southeastern Japan Sea



CONTINENTAL Shelf Research

Naoki Hirose<sup>a,\*</sup>, Yutaka Kumaki<sup>b</sup>, Atsushi Kaneda<sup>c</sup>, Kouta Ayukawa<sup>d</sup>, Noriyuki Okei<sup>e</sup>, Satoshi Ikeda<sup>f</sup>, Yosuke Igeta<sup>g</sup>, Tatsuro Watanabe<sup>g</sup>

<sup>a</sup> Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, 6-1 Kasuga-kouen, Kasuga 816-8580, Japan
 <sup>b</sup> Kyoto Prefectural Agriculture, Forestry and Fisheries Technology Center, 1029-3 Odashukuno, Miyazu 626-0052, Japan
 <sup>c</sup> Faculty of Marine Bioscience, Fukui Prefectural University, 1-1 Gakuen, Obama 917-0003, Japan

- <sup>4</sup> Factual of marine bioscence, runn respective or notes sig, 1-1 orasing of 14.0843, Japan
   <sup>6</sup> Factual Hisheries Experimental Station, 23-1 Urasoko, Tsuruga 914.0843, Japan
   <sup>6</sup> Ishikana Prefecture Fisheries Research Center, 3-7 Ushitsu-shinko, Noto 927-0435, Japan
   <sup>7</sup> Nigata Prefectural Fisheries and Marine Research Institute, 3-13098-8 Ikarashi, Nishi, Niigata 950-2171, Japan
- <sup>8</sup> Japan Sea National Fisheries Research Institute, Fisheries Research and Education Agency, 1-5939-22 Suido-cho, Chuo, Niigata 951-8121, Japan

#### ARTICLE INFO

Keywords: Stormy current Kyucho Set-net fishery Ocean general circulation model Coastal current **JAPAN** Sea

**A**AA

#### ABSTRACT

Coastal set-net fisheries have been frequently damaged by the occurrence of sudden current (known as kyucho) in the Japan Sea. In this study, a high-resolution coastal ocean model is developed to provide a means to predict this stormy current. The 1.5 km-mesh model nested in a regional ocean data assimilation system is driven by mesoscale atmospheric conditions at 1-hour intervals. The modeled results show rapid changes of the coastal current along the San-in Coast, on the eastern side of the Tango Peninsula, and around the Noto Peninsula and Sado Island, mostly associated with strong wind events. These modeled coastal water responses are consistent with in-situ velocity measurements. The simulation also shows that the vortex separated from the Tango Peninsula frequently grows to a bay-scale anticyclonic eddy in Wakasa Bay. Evidently, the coastal branch of the Tsushima Warm Current becomes unstable due to a strong meteorological disturbance resulting in the generation of this harmful eddy.

# $\mathsf{DR}\_\mathsf{C}\to\mathsf{DR}\_\mathsf{Cp}$

□領域は同じ、水平分解能も変わらず。

□鉛直方向の解像度は約3倍(鉛直層数 36 → 102)

✓ (old) 2m, 3m×2, 4m, 6m, 8m×2, 10m, 12m, 16m, 18m, 20m, …

✓ (new) 2m×10, 2.5m×2, 3m×5, 4m×4, 5m×2, 6m×16, …
 □ 開境界条件も(若干)調整

□壁境界(粘性)条件:CFDに倣う

ロ水平渦動粘性と拡散係数の比:1で良さそう

✓ 鉛直方向は100とした(要検討)

□能登半島を境に、西CWと東CEに出力データを分割

水温断面図(鳥取-兵庫)

134.5°E, 2021-10-01 0-1UTC

DR\_C

DR\_Cp



# 水温断面図(富山湾-能登半島)

137.25°E, 2021-10-01 0-1UTC

DR\_C

DR\_Cp





# 最大の違い:データ同化

331

# ロそもそも、DR\_Cでは全くデータ同化「なし」

# □<u>衛星高度計</u>

# 

- ✓水試
- ✓ ARGO

✓ 漁船向け"smart-ACT"



# DREAMS coastal models ( $\Delta x \sim 1.5 \text{km}$ )

- □ DoF ~ O(10<sup>7</sup>) 400 x 400 x 100 x 4(TSUV) x 0.5(water area)
- □ Error covariance ~ O(10<sup>14</sup>) ~ petabyte



# Full state vector of my ocean model

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} T_{i,j,k}(t) \\ \vdots \\ S_{i,j,k}(t) \\ \vdots \\ U_{i,j,k}(t) \\ \vdots \\ \eta_{i,j,k}(t) \\ \vdots \\ \eta_{i,j,k}(t) \\ \vdots \end{bmatrix} \qquad \begin{bmatrix} \text{length} \\ \sim 10^7 \\ \text{length} \\ \sim 10^7 \end{bmatrix}$$

# **Reduced-order** approximation

$$\mathbf{x}_t = \bar{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\mathbf{x}'_t$$
~10<sup>7</sup> ~10<sup>3-4</sup>

$$\mathbf{P}_t \approx \mathbf{B} \mathbf{P}'_t \mathbf{B}^T$$

$$\mathbf{P}_{t}^{\prime f} = \mathbf{M}^{\prime} \mathbf{P}_{t-1}^{\prime a} \mathbf{M}^{\prime T} + \mathbf{\Gamma}^{\prime} \mathbf{Q}_{t-1} \mathbf{\Gamma}^{\prime T}$$
~100MB

# Sparse modeling!



# Number of Altimeter Data (2020)



measurement frequency: 10day ~ 20km



# Sparse KF



# Sparse KF (unstructured)



## <u>}}}}</u>

# Measurement Update (Increment)



🧲 [ 21 ]

# Measurement Update (Increment)





# 残差分散 (cm<sup>2</sup>)

Experiment	Rvar (mup)	Rvar (dup)	lvar
NA	$\rightarrow$	40.229	0
S	31.652	36.718	1.145
U	32.374	37.461	1.145

(2019.04-2022.03)

336

# 残差分散の減少



# 沿岸流速データと比較

実験	<b>御崎</b> (鳥取県大山町) <b>26m</b>	<b>宇久</b> (福井県小浜市) <b>10m</b>	門前 (石川県輪島市) <b>10m</b>
NA	0.782	0.310	0.224
S	0.793	0.337	0.341
U	0.795	0.413	0.471
SU	0.789	0.340	0.419
US	0.787	0.362	0.460

相関係数(並岸成分·日平均·mup)

深謝:藤岡さま(鳥取県)・兼田さま(福井県大)・奥野さま(石川県)





□DREAMS 1.5kmシリーズは日本最北(宗谷海峡) まで到達

 $\Box DR_C \rightarrow DR_C p \land \mathcal{P} \neg \mathcal{P} \lor \mathcal{$ 

✓水平格子は同じ、鉛直層数 36 → 102

√データ同化の有無

□非構造な誤差共分散は

✓ 流速成分(U, V)、特に沿岸付近に有利

□密度成分(T, S)の誤差共分散は構造格子!

✓中規模渦の等方性、ただしロスビー変形スケール程度

## 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

海水の運動や物理的性質,物質循環などの海洋現象についての知見は,近年飛躍的に増えている。こ れは主に観測技術,計算機技術,数値計算技術の発展によるものである。特に,海洋プラスチックや植 物プランクトンなどの物質循環については,力学モデルの活用により,その把握が急速に進みつつある。 ところが,海洋現象の力学理論の発展は,観測・数値モデルが提供する知見の増加に遅れている。これ ら諸々の海洋現象を力学的に理解するためには,微細規模から惑星規模にかけての幅広いスケールをつ なぐ,多角的・包括的な海洋力学理論の再構築が必要である。

この大きな目標に近づくため、力学理論に加え、観測、データ解析、数値モデル、データ同化、物質 輸送・物質循環など、さまざまな課題に携わっている研究者が集まり、集中的に海洋力学過程および関 連する諸課題について議論を深めた。

#### 研究集会の概要

2022 年 11 月 17 日~20 日に研究集会を開いた。日程を長めにとり,講演時間と質疑時間を十分に取った。九重共同研究所・九大山の家において,寝食を共にする合宿形式で行った。また,対面参加を推奨しながらオンライン参加を受け入れる形で,ハイブリッド方式を採用した。

プログラム(図 1)に示すよう,15件の講演があった。議論の進展に合わせて時間を調節するなど, 適宜進行の調整を行った。参加者一覧(表 1)に示すよう,現地18人,オンライン5人,計23人が参加した。

### 各講演の概要

各講演の概要を発表順に述べる。

松田は、南極周極流の流量が風応力に対して鈍感であること(渦飽和)について、その物理機構を調べた。MITgcmを用いて、数値実験を行い、地形の南北幅が十分な場合にのみ、渦飽和を起こすことを示した。

吉川は、海面加熱時の Langmuir 乱流が混合層を深める効果を、波強制の強さに加え、海面加熱の強さや水面波の波長、風向と波向のずれも考慮して LES 実験で評価した。Langmuir 乱流と風成シア乱流の どちらが卓越するかを示すレジームダイアグラムを作成し、再解析データと合わせて全球評価を行った。

寺田は、太平洋赤道中層深さ 500-2000 m における、南北・鉛直方向に向きを変える複数の東西ジェットについて、観測データの解析と数値実験を実施した。風の変動が Yanai 波を励起し、それが伝搬して中層に季節内変動をもたらすことが示唆された。

久住は、北半球夏季における西部アラビア海に現れる高気圧性渦 Great Whirl の形成過程を調べた。領 域海洋モデルを用いて、風応力強制が慣性流ジェットの離岸緯度より北側に及ぶ設定の実験を行った。 その結果、慣性流ジェットの離岸位置から北向きに渦が周期的に放出された。

辻は、東シナ海の大陸斜面におけるエネルギー収支を調べる目的で、高分解能数値実験を行った。2016

### 九州大学応用力学研究所共同利用研究

「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」研究集会
日程:2022年11	月17日(木)~20日(日)
場所:九重共同研	修所・山の家
₹879-4912	大分県玖珠郡九重町湯坪字八丁原 600-1 電話: 0973-79-2617
プログラム	
11月17日	
17:00 まで	入所
17:30-	夕食
18:30-18:45	開会・参加者あいさつ
18:45-19:55	松田 拓朗(まつた)(北大低温研)
11月18日	A new hypothesis for the eddy saturation in the Antarctic Circumpolar Current
7:30-	朝食
8:30-9:10*	吉川 浩一朗(きっかわ)(京大院理)
	海面加熱時の Langmuir 乱流が混合層深度に及ぼす影響についての数値実験:
	パラメータ依存性について
9:40-10:40	寺田 雄亮(東大院理)
	赤道中層海流とその駆動源
10:50-11:50	久住 空広(くすみ)(東大院理)
	赤道を横切る西岸境界流の離岸に伴う高気圧性渦の役割
12:00-	昼食
13:00-14:10	迁 英一(九大応力研)
	東シナ海の大陸斜面における順圧-傾圧エネルギー転換の数値解析
14:20-15:30	Young-min Park (GeoSystem Research Corporation)
	水産分野における災害対応予測システムの開発
15:40-16:50	矢部 いつか(東大大気海洋研)
	磯口ジェット周辺における栄養塩供給を伴う水塊混合に関する研究
17:30-	
18:30-19:10*	大員 陽平 (九大応刀研; ENS de Lyon, Laboratoire de Physique) (オンフイン)
10.20 20.00*	虹直シア派の存在下におりる内部朝夜の励起 水田 二十 (北土地球理培)
19:20-20:00	小田 儿太(北八地场境境) Come Dambay 加喜密度水の傾耳不安定
11月19日	Cape Danney 评同否反示VD慎止个女定
7:30-	朝食
8:30-	エクスカーション・昼食
13:30-14:40	今村 春香(京大院理)
	波解像モデルにおける砕波のパラメタリゼーションに向けて
14:50-16:00	美山 透(JAMSTEC)
	2017 年から始まった黒潮大蛇行の特徴

図1 研究集会のプログラム

16:10-17:20	蓮沼 啓一 (海洋総合研究所)
	津軽海峡内での潮汐特性の変化
17:30	夕食
18:30-19:40	西野 圭佑(電中研)
	潮汐の振動流が底層懸濁粒子の物理過程に及ぼす影響に関する考察
11月20日	
7:30-	朝食
9:00-10:10	藤原 泰(神戸大海事科学研究科)
	大気海洋結合境界層数値モデルの開発
10:20-11:30	磯辺 篤彦(九大応力研)

海洋マイクロプラスチックの海洋学的な話題-破砕モデルや年齢組成など

図1 研究集会のプログラム(つづき)

氏名	所属	職名	氏名		所属	職名
松田 拓朗	北大低温研	研究員	西野	圭佑	電中研	研究員
吉川 浩一朗	京大院理	学生 (M1)	藤原	泰	神戸大海事科学	助教
寺田 雄亮	東大院理	学生 (D1)	磯辺	篤彦	九大応力研	教授
久住 空広	東大院理	学生 (D2)	広瀬	直毅	九大応力研	教授
辻 英一	九大応力研	助教	吉武	珠穂	九大総理工	学生 (D1)
Young-min Park	九大総理工	学生 (D3)	西垣	肇	大分大理工	准教授
矢部 いつか	東大大気海洋研	研究員	中島	広貴	九大総理工	学生 (M1)
大貫 陽平*	ENS de Lyon	訪問研究員	尾形	友道*	JAMSTEC	研究員
水田 元太	北大地球環境	助教	牛島	悠介*	気象業務支援セ	研究員
今村 春香	京大院理	学生 (D1)	豊田	隆寛*	気象研	主任研究官
美山 透	JAMSTEC	主任研究員	梶野	瑞王*	気象研	主任研究官
蓮沼 啓一	海洋総合研究所	代表取締役				

表1 参加者。\*はオンラインでの参加者。

年と 2017 年の夏の期間を対象に、大陸斜面での順圧-傾圧エネルギー変換率の分布を比較した。感度 実験の結果、黒潮流が傾圧へのエネルギー変換の分布に重要な影響を与えることがわかった。

Park は、韓国における水産災害対応システムの構築状況について説明した。NEMO を親モデルとし、 ROMS を入れ子モデルとした海洋循環モデルに揚子江流量観測データや気象予測データを与え、また粒 子追跡モデルを加えている。赤潮移動拡散予測や海況予測を目的としている。

矢部は、北西太平洋の混合水域で温暖な水塊を亜寒帯域に運ぶ磯ロジェットにおける水塊混合について、観測的に調べた。2017年には、強いフロント構造が中規模渦の影響を受けて大きく蛇行していた。 そこでの二次循環が磯ロジェット周辺に湧昇流を形成していることが示唆された。

大貫は,鉛直方向に勾配をもつ背景流の存在下において,微小な海底地形上を行き来する順圧振動流 によって励起される内部重力波を,理論的に考察した。準共鳴機構によって生成される内部重力波のエ ネルギーは,鉛直方向の離散モード成分と連続モード成分の重ね合わせで表現されることを示した。 水田は,南極底層水形成域の一つであるケープダンレー沖における高密度水の流速と水温,塩分にみ られる数日周期の顕著な変動について調べた。変動の位相は水温と流速で鉛直方向に逆向きにずれてお り,3層準地衡流モデルとも整合することから高密度水の傾圧不安定が起きていると考えられる。

今村は,海岸に打ち寄せる波が作り出す流れである離岸流の力学的な発生機構の解明を目的として, 数値モデルを開発している。波と流れの相互作用を近似なしに再現することを目指す。そのための準備 として,離岸流の再現に必要な砕波の効果を数値モデルでどの程度再現できるかを検証した。

美山は,2017年に始まった黒潮大蛇行の特徴を観測,理論,再解析データで考察した。今回の大蛇行 イベントは長期化するとともに冷水渦が西寄りになるという特徴を持ち,1970-1980年のイベントと共 通点を持つ。両イベントの共通点は黒潮が弱いことによると考えられる。

蓮沼は、津軽海峡における潮汐を調べた。潮汐の調和定数の変化機構を、主として位相-振幅図を用いて検討した。海峡内では日本海から太平洋へと 2.5 Sv 程度の海水が流れているのに対し、潮汐波(主要4分潮)は振幅を減少させながら太平洋側から日本海側へと進んでいる。

西野は,河川から流入する粒子が沿岸域で堆積する過程を調べた。粒子の再懸濁・移流・沈降過程に おいて乱流が粒子分布に及ぼす影響に注目し,流体-粒子結合モデルを用いて検討した。その結果,乱 流による凝集は,粒径によらず水平物質輸送を減少させる効果を持つことが分かった。

藤原は、大気乱流と波浪の相互作用の機構を解明するため、気液2相の波解像数値モデルを開発している。過去の自由表面数値モデルの計算スキームをもとに気液2相モデルのスキームを構築し、プロトタイプモデルを開発した。海面重力波・Kelvin-Helmholtz不安定などが精度よく表現された。

磯辺は,西部太平洋域で採取された浮遊マイクロプラスチックの年齢分布を求めた。カルボニルイン デックスと紫外線吸収量,さらには環境温度を定式化し,採取されたマイクロプラスチックのカルボニ ルインデックスと,気象・海洋観測データから年齢を求めた。

### 成果

寄せられた演題は、対象スケールの小さいものから順に、表層混合層過程(吉川,今村,藤原),沿岸・ 内部重力波・潮汐・サブメソスケール(辻, Park,大貫,蓮沼,西野),中規模運動(松田,寺田,久住, 矢部,水田,美山),大洋スケールの現象(磯辺)と広範にわたった。扱う現象は、海水循環、波動,混 合過程に加えて近年活発に研究されている物質循環、物質輸送も含まれた。手法は、数値実験を軸とす るものが多かったが、観測データ解析、解析的理論を主とするものもあった。

本研究集会は、対面・合宿方式で行い、参加者が存分に議論・情報交換ができる場を提供した。ここ では、学会大会のような多人数・短時間の研究発表ではなく、適正な人数で十分に時間を取った。さま ざまな研究課題、研究手法、多くの若手を含む幅広い年代の研究者が、講演・参加した。参加者には、 気心の知れた常連参加者と新規参加者・若手参加者がバランスよく含まれた。共通項として、海洋力学 が好きであることがあげられる。これら好条件を満たす参加者に恵まれ、ブレーンストーミング的に多 角的・包括的な議論を忌憚なく進めることができた。

講演者にとって,所属機関外の人と濃厚な議論をする貴重な機会になった。特に若い参加者に,十分 な時間を取った質疑が好評だった。また,参加者が,研究会・共同生活ともに活き活きと過ごしている 様子で,満足度の高さがうかがわれた。本研究集会が,各課題の進展に寄与すること,規模間相互作用 の力学理論構築に寄与することが期待できる。 日本周辺海域における環境急変現象(急潮)のメカニズム解明および防災に関する研究集会

高知県水産試験場 松田裕太

1. 目的

急潮等の海洋環境急変現象による漁業被害は、日本沿岸の地域経済に大きな打撃を与える。急潮 発生等の比較的時空間スケールの小さな海洋環境場の予測に対する社会的なニーズは高い。海洋環 境場の予測には、大気・海洋のモニタリングデータの解析およびモデリング等が不可欠である。地 先での大気・海洋データのモニタリングおよび急潮予報の発出・漁業現場対応は、各府県の水産試 験研究機関が独自に実施しているが、それらのデータや情報を共有する場がなく、海洋環境場の予 測の精度向上や急潮の防災につながりにくい。本研究集会では、地先での観測データや漁業現場で 発生した環境急変現象について、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 担当者同士や海洋物理学的な研究を継続してきた研究者、海洋観測機器メーカーおよび漁網会社や 漁具等の専門家を交えて議論することで、漁業現場に求められる情報の創出や未解明の物理現象に 対する研究の萌芽に努める。

2. 研究集会の概要

日時:令和4年9月14日(水)

- 場所:①WEB 会議(ZOOM 開催 参加希望者に直接 URL を送付) ②九州大学筑紫キャンパス応用力学研究所 301 号室
- 概要:研究集会は、WEB会場と現地会場を併設し、1日間のみの開催とした。前半の部では、各府 県担当者の悩み相談会として、急潮防災に関する話題提供を2題行い、関連する情報交換と議 論を実施した。後半の部では研究発表として、発表 20分質疑 10分の1題あたり 30分で、4 題の発表を実施した。
- 3. 研究成果

研究集会には、府県担当者、研究者の合計 30 名が参加した(詳細は別添名簿を参照)。

前半の部では、各府県が行う急潮の予測・対策に伴い生じている課題を共有し、京都府及び神奈 川県が行う急潮対策について情報提供が行われた。意見交換では、急潮警報を出す基準や情報発出 の手段、急潮による被害があった際の情報収集の手段などについて議論が行われた。また、海況デ ータの解析方法や海況予測モデルの活用方法について、各府県に対し研究者からアドバイスがなさ れた。

後半の部では、各府県地先での観測結果や発生現象についての事例紹介、海洋レーダを活用した 潮流観測の紹介、急潮と海況との関連や流れに対する漁具の耐性など複数の観点から研究を行い、 急潮対策を行った事例の紹介があり、それぞれの発表に対して活発な質疑応答がなされた。

総合討論やその後の議題では、本研究集会が非常に有意義であった旨の意見が複数の参加者から 聞かれ、来年度からも継続して本研究集会を開催できるよう、協力していくことを参加者全員と確 認し終了した。 研究集会を通して、府県担当者の知識の底上げや担当地域における急潮対策の着想を得ることが できた。また、研究者においては、地域のニーズを認識し急潮対策に関する研究の発展につなげる ことができると考えられた。以上から、府県水産試験場担当者と研究者が協力して急潮対策を進め ていくための貴重な情報交換の場とすることができたと考えられた。

この場を借りて、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、所内世話人である千手智晴准教授をはじめとして開催に尽力いただいた関係者に深く感謝申し上げる。

九州大学共同利用研究集会

日本周辺海域における環境急変現象(急潮)のメカニズム解明および防災に関する研究集会

次 第

【日時】 2022 年 9 月 14 日 (水) 10:00 ~ 16:00

【場所】九州大学筑紫キャンパス応用力学研究所 3F(301 号室)

- 1. 開会・挨拶および開催趣旨説明
- 2. お悩み相談会
  - (1) 趣旨説明
  - (2) 自己紹介
  - (3) お悩み相談会
- 3. 研究発表および話題提供

- 13:00~15:10
- (1) 室戸岬東岸における紀南分枝流を起源とする急潮の予測 松田 裕太(高知県水産試験場 漁業資源課)
- (2) 京都府における急潮対応事例
  - 上野 陽一郎 (京都府農林水産技術センター海洋センター)
- (3) 室戸岬東岸の海洋レーダ観測について

藤井智史、櫻本大翔、渡嘉敷悠大(琉球大学工学部)

亀田洋志 (三菱電機株式会社)

(4) 急潮から定置網を守る方法

石戸谷 博範(東京大学生産技術研究所 平塚総合海洋実験場)

- 4. 総合討論
- 5. その他
- 6. 閉会

 $15:20 \sim 15:40$ 

 $10:00 \sim 10:05$ 

10:05~12:00

 $15:40 \sim 16:00$ 

### 九州大学共同利用研究集会

日本周辺海域における環境急変現象(急潮)のメカニズム解明および防災に関する研究集会 参加者名簿 30 名参加(うち14 名現地参加)

所属	氏名	参加方式
島根県水産技術センター 漁業生産部海洋資源科	寺戸 稔貴	web
島根県水産技術センター 漁業生産部海洋資源科	寺谷 俊紀	web
石川県水産総合センター	奥野 充一	web
新潟県水産海洋研究所 海洋課	五十嵐 修吾	web
福井県水産試験場	岩崎俊祐	現地
鳥取県水産試験場	藤岡 秀文	web
佐賀県玄海水産振興センター	江口 勝久	現地
佐賀県玄海水産振興センター	牟田 圭司	現地
日東製網株式会社 技術部総合網研究課	細川 貴志	web
兵庫県立農林水産技術総合センター		wab
但馬水産技術センター	亚小花工	web
福岡県水産海洋技術センター漁業環境課	池浦繁	web
福岡県水産海洋技術センター漁業環境課	松井 繁明	web
九州大学応用力学研究所	千手 智晴	現地
九州大学応用力学研究所	広瀬 直毅	現地
九州大学応用力学研究所	山口創一	現地
福井県立大学 海洋生物資源学部	兼田 淳史	web
福井県立大学 海洋生物資源学部	渡慶次 力	web
富山県農林水産総合技術センター水産研究所	阿部 隼也	web
高知県水産試験場	松田 裕太	現地
神奈川県水産技術センター相模湾試験場	田村 怜子	現地
京都府農林水産技術センター海洋センター研究部	木下 直樹	現地
京都府農林水産技術センター海洋センター研究部	野口俊輔	現地
京都府農林水産技術センター海洋センター研究部	上野 陽一郎	現地
気象研究所全球大気海洋研究部 第四研究室	中野 英之	web
気象研究所全球大気海洋研究部 第四研究室	坂本 圭	web
気象研究所全球大気海洋研究部 第五研究室	石川 一郎	web
気象研究所全球大気海洋研究部 第五研究室	広瀬 成章	現地
琉球大学 工学部電子情報通信コース	藤井 智史	現地
東京大学生産技術研究所 平塚総合海洋実験場	石戸谷博範	現地
高知大学 黒潮圏科学部門	寄高 博行	web
蘭越町貝の館	山崎友資	web

### 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、短波帯や超短波帯の電波を使い、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、洋上の係留系や船舶 の観測に比べて運用や保守が容易である。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深化と、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本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、国内の海洋レーダの開発や応用分野の研究者、利用者が一堂 に会する研究集会として 20 年にわたり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:	2022年11月29	9日(火) 午	-後(13:3	$30 \sim 17:00)$	
	3	0日(水)	F前(09:	$30 \sim 12:15)$	
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:	29日32名、	30日34名	両日参加	加:29名	

### 3. 発表概要

本年度は、新型コロナウィルス感染症禍での行動制限が前年より緩和されはじめた中での実施 となり、合計 12 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7件の講演があった。愛媛大学工学部の片岡は、インドネシ ア・ジャワ島南岸に設置したレーダを用いた波浪観測の初期解析結果を報告した。熱帯特有のノ イズ等に関する報告もされた。琉球大学理学部の久木は、和歌山県美原町ならびに白浜町に設置 したレーダを用いた波浪計測において、ドップラスペクトルの選択法を提案し高精度化を図った。 琉球大学大学院理工の渡嘉敷は、宮崎県設置の13.5MHzレーダのドップラスペクトルの一時散乱 のピークが分裂する形状になる現象(双峰型スペクトル)に対し、その時間的空間的分布とその 成因に関する検討を進めた。東京電力の中島らは、東京電力柏崎刈羽原子力発電所内に設置され たレーダのスペクトル形状によって流速算出で異常な値が出る例について検証した。宮崎県水産 試験場の山田は日向灘短波レーダ海況表示システムの利用状況をアクセスログ等から解析すると ともに、浮き漁礁に設置した流速計との比較検証結果を示した。グリーン&ライフイノベーショ ンの高橋は、沖合養殖場の設置時の適地探索に対する海洋レーダ情報の活用に向けての期待を述 べた。三菱電機の亀田らは、愛媛大学や琉球大学との共同研究を通して実施している、高知県室 戸岬での観測計画と初期データを紹介した。

2日目は5件の講演があった。九州大学大学院総合理工の松尾は、応用力学研究所が2002年から2020年まで運用した対馬海峡レーダの長期データを解析するにあたり、その予備解析の結果として流況の季節変化や経年変動を紹介した。JAMSTEC むつ研究所の金子は、津軽海峡東部での観測に対して、係留系との比較を行い流速精度検証に寄与できることを示した。北海道大学低温科学研究所の江淵らは、宗谷海峡における19年間の連続長期観測を総括し宗谷暖流の季節変動・経年変動の様子を明らかにした。新潟大大学院自然科学の松田は、24.5MHz レーダで得られた航空機のエコーに対し、レンジ方向とドップラ変化方向の補償をすることで、検出精度向上の可能性を示した。情報通信研究機構沖縄センターの灘井は、パッシブレーダ技術の海洋レーダへの応用に関して数値解析によりその性能評価を行った。

### 4. 研究集会プログラム

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

(代表者:藤井智史、九大応力研世話人:市川香)

開催日: 2022年11月29日(火)午後~ 30日(水)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)

11月29日 (火)

$13:30 \sim 13:35$	趣旨説明
	藤井智史(琉球大工)
$13:35 \sim 14:00$	短波海洋レーダを用いたインドネシア・ジャワ島南岸の波浪特性の把握(速報)
	片岡智哉・藤良太郎・日向博文(愛媛大院理工)
$14:00 \sim 14:25$	海洋レーダによる和歌山県沖の波浪の長期観測の初期解析
	久木幸治(琉球大理)、片岡智哉(愛媛大院理工)
$14:25 \sim 14:50$	13.5MHz 海洋レーダによる双峰型スペクトル発生要因の考察
	渡嘉敷悠大(琉球大院理工)、藤井智史(琉球大工)、山田和也(宮崎県水試)
$14:50 \sim 15:15$	柏崎刈羽原子力発電所に設置した海洋レーダの流速異常値について
	中島健・金戸俊道(東京電力 HD)、木村達人(東電設計)
$15:15 \sim 15:30$	休憩
$15:30 \sim 15:55$	宮崎県における海洋レーダの利活用

山田和也(宮崎県水試)

- 15:55~16:20 沖合養殖適地の選定と沿岸漁業に活用可能な波浪・流況観測網充実への期待 高橋文宏(G&LI,北大北極域研究セ)、阿部泰人(北大院水)、細川貴志(日東製網)、齊藤 誠一(G&LI,北大北極域研究セ)
- 16:20~16:45 海洋レーダによる海象観測・海洋監視の検討と評価用実験について
   亀田洋志・高橋龍平・山田哲太郎・伊藤聡宏・今津智成(三菱電機)、片岡智哉(愛媛大院理工)、藤井智史(琉球大工)
- 16:45~17:00 情報交換

### 11月30日 (水)

- 09:30-09:55 海洋レーダを用いた対馬海況変動の解析 松尾俊弥(九大院総合理工)、上原克人(九大応力研)
- 09:55-10:20 津軽海峡東部における海洋短波レーダー表面流速と係留観測の比較 金子仁・佐々木建一・佐藤喜曉(JAMSTEC むつ研)、橋向高幸(MWJ)
- 10:20-10:45 短波海洋レーダによる宗谷暖流の 19 年長期連続観測 江淵直人(北大低温研)、深町康(北大北極域研究セ)、大島慶一郎・三寺史夫・西岡純・ 高塚徹・小野数也・石川正雄・大坊孝春・白澤邦男・若土正曉(北大低温研)
- 10:45-11:10 休憩
- 11:00-11:25 海洋レーダにおけるレンジ及びドップラウォーク補償を用いた 松田暁・山田寛喜(新潟大院自然科学)、藤井智史・長名保範(琉球大工)、宇野亨(東京 農工大工)
- 11:25-11:50 パッシブレーダ技術を用いた海洋表層流速場計測に関する検討 灘井章嗣(NICT 沖縄)
- 11:50-12:15 総合討論

## 非線形プラズマ科学研究会

核融合科学研究所 小林達哉

1. 目的

プラズマは様々なシステムに存在し幅広い応用が試みられている。多様な 天体現象を生み出す起源となる一方で、核融合や宇宙推進といった幅広い応 用が試みられている。それぞれの課題の中で研究が進められているが、共通 の物理課題を有する場合が少なくない。例えば核融合プラズマの閉じ込め特 性を決める乱流輸送は、核融合のみならず、宇宙の降着円盤の質量降着や、 宇宙推進器の推力向上の鍵を握る重要問題である。別個に進められているこ れらの問題に対して、本研究集会では共通の物理課題を探ることを目的とす る。異なる問題に対して試みられているアプローチに対して、別の課題への 応用可能性などについて探ることを目的とする。本年度は非線形性をテーマ に、プラズマが現れる様々な分野の研究者の間でそれぞれの未解決問題を共 有するための場を設ける。

また、プラズマは様々な非線形的な振る舞いを示し、その性質は海洋や大 気において観測される乱流と類似の振る舞いを示す。本研究集会では、プラ ズマ物理に固有の課題のみならず、幅広く大気や海洋における非線形現象と の共通の物理を炙り出すことをもう一つの目的とする。例えば、プラズマや 海洋では様々な非線形波動が励起されうる。今年度の研究集会では、非線形 波動の励起という側面から、プラズマおよび地球流体の非線形現象に共通す る物理課題の抽出に重点を置く予定である。

2. 概要

上記の目的のもと、今年度は複数回のオンラインセミナーを設けた。以下に リストを示す。

- 1. 7.28(木) 磁化プラズマにおけるブリーザーの励起 小菅佑輔(九大応 研)
- 2. 8.25(木) 3次元磁気流体数値計算によるブラックホール降着流の解析 町田真美(国立天文台)
- 3. 9.22(木) 孤立波列の二次元相互作用について 辻英一(九大応研)
- 4. 10.27(木) 磁場閉じ込めプラズマにおける雪崩輸送と構造形成 金史良 (京都大学)
- 5. 12.1(木) 強磁場中における相対論的波動粒子相互作用に関する数値シミ ュレーション 佐野孝好 (大阪大学)
- 6. 1.12(木) 逆磁場ピンチ磁場配位における乱流、帯状流、大域的磁場揺動 の相互作用 西澤敬之 (九大応研)

7. 2.9(木) ダイバータプラズマの捕食者-被食者関係 小林達哉 (核融合研)

各講演の詳しい内容については概要集を末尾に添付している。内容を概観す ると、プラズマや海洋における非線形波動(小菅、辻)、磁場閉じ込め実験 (金、西澤、小林)、レーザープラズマ(佐野)、天体プラズマ(町田)か らなり、幅広い話題をカバーすることができ、目的としていたプラズマが関 連する複数の分野をカバーする研究集会を開催することができた。

専門の違う聴衆が集まるため、講演の途中でも疑問があれば質問ができる というスタイルで進めたため、問題を把握するための質問が多数なされた。 当初予定していた一時間程度という枠を超えて議論が続けられていたことも 印象的である。

今年度カバーした内容を踏まえ、来年度以降の在り方について議論する場 を設けた。プラズマが関連する幅広い研究者が集える場所を提供すべく、来 年も応用力学研究所の共同研究集会として応募することとした。来年度はこ れまでのトピックスに加え、データ解析に関連する話題を取り入れていく予 定である。

### 3. 参加者リスト

参加者名	所属	学生
小林達哉	核融合科学研究所	
町田真美	国立天文台	
彌冨豪	総合研究院大学	$\bigcirc$
斎藤晴彦	東京大学	
安立史弥	東京大学	$\bigcirc$
稻垣滋	京都大学	
金史良	京都大学	
多羅間大輔	立命館大学	
小菅佑輔	九州大学応用力学研究所	
辻英一	九州大学応用力学研究所	
寺坂健一郎	九州大学総合理工学府	
Moon Chonho	九州大学応用力学研究所	
永島芳彦	九州大学応用力学研究所	
西澤敬之	九州大学応用力学研究所	
恩地拓己	九州大学応用力学研究所	
池添竜也	九州大学応用力学研究所	
松清修一	九州大学総合理工学府	
小山一輝	九州大学総合理工学府	$\bigcirc$
山口貴大	九州大学総合理工学府	$\bigcirc$
吉田光太郎	九州大学総合理工学府	$\bigcirc$

Fan Yumeng	九州大学総合理工学府	$\bigcirc$
西村大輝	九州大学総合理工学府	$\bigcirc$
小林大輝	九州大学総合理工学府	$\bigcirc$

第1回セミナー 7.28(木曜) スピーカー:小菅佑輔(九大、応研) タイトル:磁化プラズマにおけるブリーザーの励起

アブストラクト:

波と流れの相互作用は核融合閉じ込めの観点から重要な問題であるだけでなく、広 く海洋や大気、天体プラズマでも重要な問題である。本講演では、磁化プラズマに おけるドリフト波とそれが非線形的に駆動する径方向の流れ「ストリーマー」の相 互作用について議論する。変調不安定性による流れの励起について紹介した後、変 調不安定性が非線形発展する結果、プラズマにおいても海洋と同様の一発大波(ブ リーザー)が励起されることを示す。磁化プラズマにおける一発大波と海洋におけ る一発大波を記述する共通のモデルについて紹介し、非線形波動の一種である時間 的に局在化しているブリーザーが励起されることを示し、予測された理論波形を元 に実際の実験データからブリーザーを同定した結果について紹介する。

参加者:11名(うち学生(\*)3名) 九大:小菅佑輔、辻英一、寺坂健一郎、Moon Chonho、永島芳彦、小山一輝\*、西 村大輝\*、小林大輝\* 核融合科学研究所:小林達哉 量子科学技術研究開発機構:金史良 国立天文台:町田真美 第2回セミナー

8.25(木曜日)

スピーカー:町田真美(国立天文台)

タイトル:3次元磁気流体数値計算によるブラックホール降着流の解析

アブストラクト:

X線連星や、活動銀河中心核(AGN)で観測されるジェットやX線フレアなどの高エ ネルギー現象は、降着流(コンパクト星の周りを回転しながら落下するプラズマ)を介 して解放されるコンパクト星の重力エネルギーを駆動源としている。降着流から中 心にガスを落下させるためには、角運動量を外向きに輸送する必要がある。角運動 量引き抜きの機構として我々は、磁気回転不安定性が重要であると考えている。特 に、降着流中で成長する磁気回転不安定性が大局構造形成へ与える影響を調べる目 的で3次元磁気流体数値実験を行っている。その結果、エントロピーが高い渦状構 造が形成されると質量降着率が上昇することがわかった。また、この渦状構造は、 動径方向速度にはっきりとした不連続を作るが、衝撃波ではない事、渦状構造内の 高温でガス密度が低い状態は渦状構造内で生じた磁気リコネクションによることな どを明らかにした。

参加者:12名(うち学生(\*)4名)

九大:小菅佑輔、Moon Chonho、西澤敬之、恩地拓己、池添竜也、小山一輝\*、西 村大輝\*、小林大輝\* 東大:高竜太\*

立命館大学:多羅間大輔 核融合科学研究所:小林達哉

国立天文台:町田真美

第3回セミナー 9.22(木曜日) スピーカー:辻英一(九州大学応用力学研究所) タイトル:孤立波列の二次元相互作用について

アブストラクト:

様々な自然現象で観測される孤立波は、数値計算や実験だけでなく、理論的にも よく調べられている。単一の孤立波の二次元相互作用については、角度によっては 新しい孤立波の生成が起こるという、個性を保って伝播する一次元相互作用とは異 なる性質をもつ。この性質は弱非線形近似によって系統的に導かれるソリトン方程 式の解の性質によって理解できる。

一方、河川・運河や海洋ではしばしば、一群となって進む孤立「波列」が観測されることがあるが、そのような複数の孤立波列の相互作用は、これまで調べられていない。本研究では弱非線形近似の元での理論計算と、強非線形計算スキームを用いた数値計算を行い、両者の結果の比較をおこなう。これまで調べたパラメーター 領域では、理論と数値計算には良い一致が見られる。

参加者:13名(うち学生4名)

九大:辻英一、寺坂健一郎、永島芳彦、小菅佑輔、Moon Chonho、西澤敬之、小山 一輝\*、西村大輝\*、小林大輝\* 東大:安立史弥\*

立命館大学:多羅間大輔

量子科学技術研究開発機構:金史良

国立天文台:町田真美

第4回セミナー 10.27 (木曜日) スピーカー:金史良 (京都大学) タイトル:磁場閉じ込めプラズマにおける雪崩輸送と構造形成

アブストラクト:

磁場閉じ込め高温プラズマは、外部から注入されたエネルギーが多様なダイナミク スにより輸送・散逸され準定常状態が保たれる非平衡開放系である。プラズマは磁 場に束縛されているため、エネルギーは局所拡散的に輸送されると考えられてきた が、1990年代から局所輸送だけでは説明できない現象が数多く発見され、高温プラ ズマの非局所的輸送として議論されてきた。雪崩輸送は、その様な非局所的輸送を 説明しうる自己組織化的な機構であり、圧力分布や流れ場などの大域的な構造形成 に決定的な影響を及ぼすことが数値計算などで予想されていた。近年の計測器やデ ータ解析技術の進歩により、実験的にも雪崩輸送が計測できる様になりその検証が 進んでいる。本発表では、JT-60Uトカマク装置の実験結果を示し、雪崩輸送が高温 プラズマ中で普遍的に観測される構造「硬直性分布」と「内部輸送障壁」にどの様 に寄与しているのか、紹介する。

参加者:12名(うち学生(\*)4名) 九大:辻英一、永島芳彦、小菅佑輔、Moon Chonho、西澤敬之、小山一輝\*、西村 大輝\*、小林大輝\* 大阪大:佐野孝好 総合研究院大:彌冨豪\* 京都大学:稲垣滋、金史良 第5回セミナー

12.1 (木曜日)

スピーカー:佐野孝好 (大阪大学)

タイトル: 強磁場中における相対論的波動粒子相互作用に関する数値シミュレーション

アブストラクト:

レーザープラズマ物理の究極の目標は、レーザー駆動による慣性核融合の実現であ る。この目標を達成するためには、レーザー光による効率的なプラズマ加熱過程を 解明しなければならない。近年、磁場を用いてレーザープラズマを制御する手法が 盛んに考えられるようになり、強磁場中のレーザープラズマ相互作用の理解が急務 となっている。そこで、我々はプラズマ粒子シミュレーション(Particle-in-Cell法) を用いて、相対論的強度のレーザーによるプラズマ加熱及び加速過程が、強磁場の 存在でどのような影響を受けるかを調べている。特に、磁力線に沿って対向に伝播 する電磁波同士が衝突した際に生じる定在波とプラズマとの相互作用に着目してい る。本セミナーでは、磁場中を伝播するホイッスラー波の特性によって、電子やイ オンが選択的に加熱される物理機構について紹介する。

参加者:12名(うち学生(\*)5名)

九大:小菅佑輔、西澤敬之、池添竜也、恩地拓己、松清修一、小山一輝\*、山口貴大 \*、吉田光太郎\*、Fan Yumeng\* 大阪大:佐野孝好 総合研究院大:彌冨豪\* 国立天文台:町田真美 第6回セミナー

1.13 (木曜日)

スピーカー:西澤敬之(九州大学)

タイトル: 逆磁場ピンチ磁場配位における乱流、帯状流、大域的磁場揺動の相互作 用

アブストラクト:通常の逆磁場ピンチ(RFP)においてはティアリングモードにより 磁場が統計的となり大きな熱、粒子輸送が生じる。しかし外部から誘導的に電流分 布を制御することで RFP プラズマ中のティアリングモードを安定化させ磁場の統計 性を抑えることができる。電流分布制御を行なった RFP においてはトカマクや最適 化の進んだステラレータと同様に乱流による輸送が支配的であると考えられてい る。本発表では RFP の基本的な特徴を述べた後、特異な磁場配位を持つ RFP プラ ズマ中での乱流、帯状流、大域的磁場揺動の相互作用に関する研究について紹介す る。非線形ジャイロ運動論コードを用いたシミュレーション結果では RFP 中の強い 磁場のシアにより乱流が抑制され、帯状流が層状に連なった流れの構造が形成され ることが予測されたが、実験的にはイオンスケールの乱流が観測された。実際の RFP プラズマでは電流制御を行なってもティアリングモードによる有限の大域的磁 場揺動が残留する。この効果を取り入れて再度非線形シミュレーションを行なった 場合、実験結果と一致する乱流状態が得られた。また実験的に最外殻磁気面に近い 閉じ込め領域において帯状流が観測された。この位置における帯状流の有無、また その役割はトカマクにおける LH 遷移においても重要であり議論の対象となってい る。なぜ RFP において最外殻磁気面付近に帯状流が生じるかを解明できれば LH 遷 移の理解にも貢献することが示唆される。

参加者:12名(うち学生(\*)5名) 九大:小菅佑輔、西澤敬之、池添竜也、恩地拓己、辻英一、永島芳彦、Moon Chonho、西村大輝\*、小林大輝\*、小山一輝\*、 東京大学:斎藤晴彦、安立史弥\* 京都大学:稲垣滋、金史良 総合研究院大:彌冨豪\* 国立天文台:町田真美 第7回セミナー 2.9(木曜日) スピーカー:小林達哉(核融合科学研究所)

タイトル:ダイバータプラズマの捕食者-被食者関係

概要:核融合プラズマ装置では、プラズマ排熱をダイバータと呼ばれる耐熱性の高 い装置で処理する。炉心プラズマの高温化が進み、排熱が大きくなると、通常のダ イバータでは処理しきれない運転領域となる。非接触ダイバータとは、ダイバータ 部のプラズマをプラズマ再結合により中性粒子に戻し、熱負荷を下げる運転方法で ある。大型ヘリカル装置(LHD)では、外部から印加した摂動磁場により、非接触ダ イバータ状態を実現する。非接触ダイバータ生成は、プラズマ-摂動磁場相互作用や 原子分子プロセスなどの非線形物理を内在するため、その発生に強い遷移性が見ら れる。非接触プラズマ運転の安定性向上のため、背景物理の理解が望まれている。 近年 LHD では、プラズマが一定周期で接触-非接触状態を行き来する、ダイバータ 自励振動が発見された。この振動は、プラズマ放射損失のポロイダル不均一性の遷 移によって引き起こされる、孤立した磁場構造(磁気島)の自励振動であることがわ かった。磁気島の幅と自己生成局所プラズマ電流(ブートストラップ電流)の間の非 線形関係をモデル化するため、捕食者-被食者モデルを導入した。モデルの数理・数 値解析により、モデルが実験結果をよく説明することを示した。

参加者:9名(うち学生(\*)4名) 九大:小菅佑輔、Moon Chonho、西澤敬之、辻英一、西村大輝\*、小林大輝\*、小山 一輝\*、 東京大学:安立史弥\* 核融合科学研究所:小林達哉

### 共同利用研究集会

## 第20回トロイダルプラズマ統合コード研究会

### 20th 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 20 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 19 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: 2023年1月5日(木) – 6日(金) 開催場所: 九州大学応用力学研究所会議室およびオンラインハイブリッド形式 講演数:32件、参加者数:43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。外国人参加者も含めて 講演 32件(研究成果報告 27件、サブクラスター関連5件)の申し込みが集まった。件数は 例年と同程度である。今回は九州大学の現地会場を主会場としたハイブリッド開催とした。 このことでコロナ禍の影響で移動が困難な研究者のオンラインでの参加も可能とした。今 回の特徴として、特定研究「計測・シミュレーション・モデリングを組み合わせた統合診 断」研究集会との合同セッションを設定したこと、昨年度の企画セッションで生まれた共 同研究を発展させるためのワークショップ「不純物輸送」を設定したことがある。また、 口頭発表とポスター発表それぞれのセッションを設定し、全体の議論を重視するか、個別 の議論を深めるか各自の発表内容に合わせて選択してもらった。このように一方通行的な 研究発表となることを避け、議論の活性化を図るための工夫を加えた研究会を企画した。 合同セッション(口頭)5件、口頭発表 15件、ポスター発表 7件とバランスの良い構成とな
った。口頭発表は Zoom、ポスター発表は Remo を利用した。1 日目午前に核融合フォーラ 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。

研究成果報告はどれも質の高いものであった。今回は昨年に引き続き不純物輸送やデー タ駆動手法とともに乱流輸送に関する話題が豊富であった。学生による講演も10件あり、 若手の活躍に今後の期待が持てる。以下に研究成果講演内容を抜粋して列挙する。

合同セッション「計測・シミュレーション・モデリングを組み合わせた統合診断」を実 施した。まず糟谷が九大応力研の特定研究「計測・シミュレーション・モデリングを組み 合わせた統合診断」として実施される共同研究の枠組みについて紹介した。続いて糟谷は 磁化プラズマにおける巨視的構造診断のためのシミュレーションの取り組みを紹介した。 計算機シミュレーション研究の進展から揺動の 3 次元構造を提示できるようになってきて いるので、開発中の統合数値診断プラットフォーム iTDS を用いたシミュレーションデー タの特徴的な診断について説明した。プラットフォーム上で実験計測の模擬を行い、トカ マクプラズマ空間3次元時系列シミュレーションデータに対して物理量を抽出する。多様 な比較対象を提示することで、実験とシミュレーションの比較手法の進展を図るものであ る。本多はスーパーステージモデルを用いた TASK/TX における炭素不純物モデリングの進 展について説明した。トーラスプラズマ中の物理量の自己無撞着な取り扱いに特徴がある 流体型1次元輸送コード TASK/TX を開発している。近年、不純物を含む複数粒子種系への 拡張を行っている。不純物はプラズマ中で多数の価数段階を取ることができ、価数ごとに 流体方程式を増やすのは計算コストや安定性の問題から現実的ではない。TASK/TX では複 数の電離段階をグループ化するスーパーステージモデルを採用し、既存のトカマクで重要 となる炭素の不純物モデリングを進めている。佐々木はデータ駆動科学による乱流時空間 ダイナミクスの進展について紹介した。データ駆動科学的な乱流の縮約化と物理機構の理 解については特異値分解を用いたモード間相互作用や輸送解析への応用、直交性を利用し たエネルギー相互作用の定量化、複数場特異値分解による粒子輸送解析、さらには海洋ソ リトンや風車近傍乱流という他分野への波及研究について説明した。また、機械学習を用 いた乱流現象の推定については拡張版動的モード展開を用いた乱流時空間発展の長期予測、 マルチスケール畳み込みニューラルネットワークを用いた電位揺動の推定について説明し た。山田は直線磁化プラズマにおける乱流構造の解析の進展について紹介した。PANTA プ ラズマにおけるストリーマ構造の周方向構造を解析しており、空間フィルターを用いた抽 出の試みを説明した。これら計測とシミュレーションをめぐる様々な話題に対する議論を 通じて研究の相互理解を進めることができた。

ワークショップ「不純物輸送」を実施した。トカマク統合コードを開発・利用している 九州大、量研機構、名古屋大間の研究協力を促進するために、それぞれのコードを用いて 不純物輸送に関するコード間ベンチマークを計画している。実施内容についての打ち合わ せを行った。

成田はニューラルネットワークモデルに基づいた半経験乱流輸送モデル DeKANIS を用いて粒子・熱流束予測を行った。汎用性を改善するため乱流飽和則の改良及び訓練データがカバーするプラズマパラメータ領域の拡張を加え、ITER を想定した統合シミュレーションを行った。

福山は平衡解析、輸送解析、幾何光学的解析、波動光学的解析、速度分布解析等のモジ

361

ュールが更新中である統合コード TASK の更新の目的と現状を述べるとともに、IMAS とのインターフェースの仕様と課題を説明した。

横山はIAEA Coordinated Research Programの枠組みでスタートした AI for Fusion について その取り組みと今後の進め方について議論を行う会合が開催されたので内容を紹介した。 LHD からのデータ提供も視野に入れた取り組みである。

森下は統合コード TASK3D をシステムモデルとするデータ同化システム ASTI の開発を 進めている。ASTI による核融合プラズマの制御を実現するため、統合コードの持つ不確実 性を観測情報により抑え込みながら、目標状態を作る制御入力を推定することができる新 たなデータ同化フレームワーク DACS を開発した。そして DACS に基づいて構築した ASTI により実際に LHD プラズマの温度と密度を制御する実験を行なった。

藤田は原型炉における高い閉じ込め性能・ベータ値と流出パワーのトレードオフの観点 から、不純物種の選定を含む運転シナリオについて検討した。ダイバータ熱負荷を許容値 以下に抑えるためには境界層・ダイバータ領域に加えて主プラズマからの放射パワーを増 大させることが有効である一方、流出パワーの低減は閉じ込め性能の向上を、不純物入射 による燃料希釈はベータ値の上昇を、それぞれ必要とする。

持永はトカマク装置のコアプラズマにおける不純物制御手法の確立を目的として、統合 輸送シミュレーションコード TASK の開発を進めている。改善閉じ込めモードとして負磁 気シアモードと高βp モードを対象としたダイナミクスを含むタングステンイオンの輸送 について評価を行った。

Park は KSTAR トカマクにおける高速イオンによって誘起された高温核融合プラズマ放 電モード FIRE モードの統合モデリングおよびジャイロ運動論シミュレーション結果につ いて説明した。FIRE モードは H モード同等の高イオン温度を持つ。

竹本は JT-60U の H モードプラズマにおいてプラズマ電流と逆向きのトロイダル回転の 増大とともに W 蓄積増加が観測されているので、この現象理解のため、トロイダル回転・ 径電場に伴うピンチモデルが導入された統合輸送コード TOTAL で解析を行っている。現 行の不純物輸送コードのピンチ・拡散モデルの妥当性検討のため、軟 X 線計測模擬コード を開発し、蓄積タングステンの空間分布を実験値と比較した。

Hahm は磁気島中の E×B 渦ダイナミクスについて解説した。トーラスプラズマ中の磁気 島の特性についての紹介ののち、2 点相関除去理論を用いた磁気島中の E×B シア率の導出 について説明した。シア率が磁気島位置によって異なるという空間構造と、乱流拡散が X 点を通じて起きるという実験結果が関連することを示した。

矢木は核融合プラズマの核燃焼制御手法のうち、プラズマ周辺部から供給される燃料の 粒子輸送を理解することが重要であるので、簡約化 MHD モデルを用いて大局的な粒子輸 送シミュレーションを行い、ソース粒子の輸送ダイナミクスを評価した。

Choi は KSTAR プラズマにおけるアルフベン固有モード AE と微視的不安定性の特性評価のためにジャイロ運動論シミュレーションを行った。L モードプラズマで TAE/RSAE や BAE といったモードが AE として代表的であった。線形不安定な微視的モードは電子温度勾配モードであった。

登田は PLATO トカマクにおいて、統合コード TASK を用いて予測されたプラズマ分布と 磁場配置を対象として電磁的ジャイロ運動論解析を行った。線形解析により予測された不 安定性は、主に捕捉電子モードと ITG モードであった。モデル衝突演算子を用いて得られ た解析結果を Lenard-Bernstein 衝突演算子によるものと比較した。

麝嶋は深層学習を用いた計測困難物理量の推定手法を提案した。乱流シミュレーション により得た密度揺動の2次元時空間データをマルチスケール畳み込みニューラルネットワ ークに学習させ、静電揺動を出力させるネットワークを構成した。空間的に集中した構造 と高度に拡散した構造を同時に検出でき、両方の特徴量を抽出する事が出来る。支配モー ドに対する静電電位揺動の推定やその揺動が駆動する粒子輸送の評価が可能である。

滝塚は PIC 粒子モデルによる大域的プラズマシミュレーションのための低コスト手法を 新たに開発した。Ingenious モデル、Double Leap-Frog 法、Numerical Heating Correction 法、 Increasing/Decreasing Particle Number 法について説明した。

沼波はプラズマ乱流シミュレーションに現れる多様体構造と輸送モデリングについて議 論した。これまで乱流と帯状流強度を用いた現象論的な輸送モデル関数を構築してきたが、 ここでは、シミュレーション結果が、モデル関数のパラメータが張る空間上で、多様体と して表現できることに注目し、その構造と更なるモデリングの可能性について議論した。

村上はプラズマ乱流による静電および磁場揺動が存在する場合の ECH による高速電子 の径方向拡散への影響を GNET シミュレーションにより評価した。また電子電流によるト ロイダル駆動トルクへの影響について研究を行った。

轟はプラズマ中心近傍にまで粒子供給する上で有効な粒子ピンチ効果のひとつとして 密度勾配の反転により内向きの乱流粒子輸送を生む機構が知られているので、5場簡約化 磁気流体モデルを用いてトーラスプラズマ端近傍に反転勾配を持つ密度分布を導入した乱 流シミュレーションを行った。グローバルシミュレーションにおける密度勾配が正・負で ある領域の乱流粒子流束の解析を行い、その向きと大きさの評価結果を報告した。

梅崎はダイバータ板前面において再結合により生成される中性粒子が特定の方向に流速 を持つ場合の大角度散乱を介した粒子輸送を評価した。熱負荷がどのように変化するか微 分断面積とピッチ角を適切に考慮して検討した。

矢本は統合ダイバータコード SONIC における最近の運動論的熱力・熱流東モデルの導入 や、非定常計算モデルの開発といった SONIC の不純物輸送モデルのさらなる高度化のため の開発状況、及び開発したモデルを JT-60SA の運転予測計算に適用した結果について報告 した。

吉原は複数種のシミュレーションデータに対して数値診断を行うことは様々なプラズマ 様相の解明に効果的であるので、統合的な数値診断プラットフォームの開発を行い、LHD やPLATOといった実験装置を対象に行った3次元乱流場シミュレーションデータに対して 重イオンビームプローブ計測ルーチンを適用した結果を報告した。

古田原は乱流輸送解析方法として異なる物理量を同時に解析する multi-field 特異値分解 を提案した。本手法を直線磁場プラズマ実験で得られたイオン飽和電流と浮遊電位揺動に 適用した。モード分解された両揺動の共通時間発展をもつ空間構造を抽出し、空間構造に おける位相差を得た。各特異値モードが駆動する輸送を全ての結合の組み合わせについて 評価し、内向き・外向き輸送を引き起こす揺動が共存している事を確認した。

田原は軌道追跡型の5次元位相空間ドリフト運動論方程式解析コード GNET において、 Maxwell 分布を仮定しない任意の分布関数を持つ粒子との衝突を考慮できる非線形衝突演 算子を導入し、LHD プラズマにおいて NBI 加熱によって生じた高エネルギー粒子の分布に 対するビーム間衝突の影響を評価した。ビーム粒子との衝突を考慮した結果、高エネルギ 一領域での拡散が増大し、Maxwell 分布を仮定した線形 Coulomb 演算子を用いた場合に比 べ、実・速度空間の両方において分布が広がりを持つようになることが分かった。

以上のように多様な研究内容に関して、ハイブリッド開催という実施方法を最大限に利 用して議論を活性化するという目的を達成した研究会を実現した。来年度はより多くの参 加者が現地で直接顔をあわせることができるようになることを祈りつつ、第21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

1月5日(木)

(核融合エネルギーフォーラムサブクラスターとの合同会合)

9:30-9:40 林 (QST)

連絡事項

- 9:40 10:10 宮戸(QST) IFERC 計算機シミュレーションセンターの現状報告
- 10:10 10:40 横山(核融合研)、林(QST) ITER に於ける統合モデリング活動の報告
- 10:40-11:10 若月 (QST) ITPA 統合運転シナリオグループ活動報告
- 11:10-11:30 星野(慶應大) 炉心プラズマ+炉工学炉材料モデリングサブクラスター合同会合の報告
- 11:30-12:00 林 (QST) 今後の予定の議論
- 12:00-13:30 昼休み

ワークショップ「不純物輸送」 Lunch time workshop "Impurity transport" 13:00 – 13:30 林 (QST)、藤田 (名大)、糟谷 (九大) online 昨年の企画セッションを受けた共同研究作業会を昼休みに開催

13:30-13:40 事務連絡 Business announcement

(座長:村上)

- 13:40-14:05 講演 1-1 成田 (QST) Improvement in a semi-empirical turbulent transport model for its versatility and its application to integrated simulations
- 14:05-14:30 講演 1-2 福山 (京大)

Progress of the development of TASK code and interface to IMAS

14:30-14:55 講演 1-3 横山 (核融合研)

Introduction to IAEA coordinated research program: AI for Fusion

14:55-15:15 講演 1-4 森下 (京大)

Control of LHD plasma using the data assimilation system ASTI

15:15-15:25 休憩

(座長:横山)

15:25 – 15:50 講演 1-5 藤田 (名大) online

Study on operation scenario with enhanced radiation power from main plasma by impurity injection in DEMO

- 15:50 16:10 講演 1-6 持永 (九大) Impurity transport simulation in tokamak plasmas using the integrated code TASK
- 16:10 16:30 講演 1-7 Park (SNU)
  Integrated modelling of high-temperature fusion plasma regime facilitated by fast ions in the KSTAR tokamak
- 16:30-16:45 講演 1-8 竹本 (名大) online

Validation of tungsten transport model by simulating soft x-ray measurement in JT-60U

- 16:45 16:55 休憩
- (座長:糟谷)
- 16:55 17:20 講演 1-9 Hahm (SNU)

ExB vortex dynamics inside a magnetic island

17:20-17:45 講演 1-10 矢木 (QST)

Particle transport in fusion plasmas

- 17:45 18:10 講演 1-11 Choi (SNU) online Gyrokinetic simulation of KSTAR AE-ETG system
- 18:10-18:35 講演 1-12 登田 (核融合研) Study of turbulent transport in trapped electron and ion temperature gradient modes in high collision regime for tokamak plasmas
- 18:50 散会

## 1月6日(金)

- 9:00-10:30 ポスター講演 Poster (online, 開室 start 8:45、閉室 end 13:00)
- 10:30-10:40 休憩

(座長:村上)

- 10:40 10:55 講演 1-13 麝嶋 (日大) Estimation of 2D distribution evolution of electrostatic potential fluctuations using deep learning
- 10:55 11:20 講演 2-1 滝塚 (阪大) online Several low-cost techniques for global plasma simulation with particle-in-cell model
- 11:20 11:45 講演 2-2 沼波 (核融合研) Manifold structure appearing in plasma turbulence simulations and transport modeling
- (Session Leader: 村上)
- 11:45-12:05 議論 Discussion
- 12:05 12:10 事務連絡 Business announcement
- 12:10-13:20 昼休み

(特定研究「計測・シミュレーション・モデリングを組み合わせた統合診断」研究集会との 合同会合)

- (座長:糟谷)
- 13:20 13:30 講演 3-1 糟谷(九大)
  特定研究「計測・シミュレーション・モデリングを組み合わせた統合診断」の紹介
- 13:30 14:00 講演 3-2 糟谷(九大)

Global structure and its diagnostic simulation in magnetized plasmas 磁化プラズマにおける巨視的構造診断のためのシミュレーション

14:00 - 14:30 講演 3-3 本多 (京大)

Carbon impurity modeling with the superstage model in TASK/TX スーパーステージモデルを用いた TASK/TX における炭素不純物モデリング

14:30-15:00 講演 3-4 佐々木(日大)

Study on spatio-temporal dynamics in turbulence applying data-driven science データ駆動科学による乱流時空間ダイナミクスの研究

15:00-15:30 講演 3-5 山田(九大)

Analysis of turbulent structures in magnetized cylindrical plasmas 直線磁化プラズマにおける乱流構造の解析

15:30-16:00 糟谷(九大) discussion 議論

# **Poster number**

# PA-1 村上定義 (京大) S. Murakami

Effects of magnetic and electrostatic fluctuations on ECH supra-thermal electron behavior and toroidal torque in tokamak plasma

<sup>16:00</sup> 散会

## PA-2 轟晴彦 (九大) H. Todoroki

Analysis of turbulent particle fluxes by using 5-field RMHD code in torus plasmas

## PA-3 梅崎大介 (九大工) D. Umezaki

Effect of large-angle scattering transport in divertor plasmas

# PA-4 矢本昌平 (量研) S. Yamoto

Improvements of impurity transport modelling by integrated divertor code SONIC and its application to predictive simulation of future devices

# PA-5 吉原稜 (九大) R. Yoshihara

Simulation of 3D perturbation measurement in torus plasmas using a heavy ion beam probe PA-6 古田原拓実 (日大) T. Kodahara

Analysis of particle transport in PANTA by using multi-field SVD

# PA-7 田原康祐 (京大) K. Tahara

Influence of the beam-beam collisions on the energetic particle distribution in Large Helical Device

5. 参加者リスト

2					
氏名	所属	氏名	所属		
林伸彦	量研機構	東郷訓	筑波大		
矢木雅敏	量研機構	古賀麻由子	兵庫県立大		
西村征也	量研機構	佐々木真	日大		
成田絵美	量研機構	麝嶋祐樹	日大		
矢本昌平	量研機構	古田原拓実	日大		
宮戸直亮	量研機構	筒井 広明	東工大		
若月琢馬	量研機構	星野一生	慶大		
杉山翔太	量研機構	御手洗 修	九州東海大		
横山 雅之	核融合研	村上定義	京大工		
登田慎一郎	核融合研	本多充	京大工		
沼波政倫	核融合研	福山 淳	京都大		
佐藤雅彦	核融合研	森下侑哉	京大工		
奴賀秀男	核融合研	田原康祐	京大工		
藤田隆明	名大	打田正樹	京大エネ		
伊藤佑	名大	山田琢磨	九大基幹教育		
竹本壮汰	名大	梅崎 大介	九大工		
Choi, Gyungjin	SNU	糟谷直宏	九大応力研		
Hahm, Taik Soo	SNU	小菅佑輔	九大応力研		
Park, Sangjin	SNU	持永祥汰	九大総理工		
滝塚知典	阪大	吉原稜	九大総理工		
辻井直人	東大	轟晴彦	九大総理工		
宮前健人	東大				

## 高品質二酸化ゲルマニウム薄膜の合成と物性開拓

立命館大学 総合科学技術研究機構 金子健太郎

・研究の目的

新しいパワーデバイス材料として、3.4 eV 以上の禁制帯幅をもつ超ワイドバンドギャップ(UWBG) 半 導体が注目を浴びている。ダイヤモンド(C)や窒化アルミニウムガリウム(AlGaN)、酸化ガリウム(Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) などがその例である。しかしながら、先行して市場投入されている炭化ケイ素(SiC)や窒化ガリウム(GaN) に置き換わるためには、性能だけでなく、実用的な半導体応用が可能であるかという検討が重要である。 その必須要素として、「基板およびエピ膜が安価・大量に生産できる(低コスト)」「SiCや GaN を大きく上 回るデバイス性能が期待できる(既存設備との置換)」「p型とn型の両キャリア伝導が可能である(多種類 のデバイス展開)」という3つがある。しかしながら、現在研究されているUWBG材料の中で、この3つ の要素を満たす材料はほとんど見つかっていない。しかしながら、報告者が開拓を進めているルチル構 造二酸化ゲルマニウム(r-GeO2)は、この要素をバランス良く満たす材料として大きな注目を集めている(表 1)。しかしながら、r-GeO2の薄膜成長は極めて困難であった。その大きな理由として、①深いエネルギー 位置に石英型相とアモルファス相が存在し、ルチル型相に相転移させる事が困難である事[1] ②r-GeO2は 蒸気圧が高く、酸素欠損が導入される事で Ge と GeO2 が反応して GeO となり、気体として脱離してしま

					i	1			i
	E <sub>g</sub> (eV)	ε <sub>0</sub>	$\mu_{\rm e} / \mu_{\rm h}$ (cm <sup>2</sup> V <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> )	E <sub>C</sub> (MVcm <sup>-1</sup> )	n-BFOM	p-BFOM	К (Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	Bulk	Price
Si	1.1	11.9	1240 / 450	0.3	1	1	130	0	〇(ホモ)
4H-SiC	3.3	9.7	980 / 120	2.5	375	126	370	0	〇(ホモ)
GaN	3.4	10.4	1000 / 31	3.3	943	80	253	0	△(ホモ) /〇(ヘテロ)
$\beta$ -Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.6	10	258 / 🗙	6.4	1480	×	11~27	0	△(ホモ)
$\alpha$ -Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.6	10	300 (est.) / 🗙	1100	7759-590	×	16~20	×	O(ヘテロ)
Diamond	5.5	5.7	1060 / 2000	13	33409	173125	3000	Δ	× (ホモ)
r-GeO <sub>2</sub>	4.68	13	300 / 30 (est.)	7.0	3400	880	51	0	〇(ホモ)
[1] S. Chae et al., APL <b>118</b> , 260501 (2021).							量産化に有利		

各種半導体材料の物性値凹と特徴

表1 従来材料である SiC、GaN、酸化ガリウム(Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)やダイヤモンドと二酸化ゲルマニウム(GeO<sub>2</sub>) の比較。GeO2はβ-Ga2O3の3倍以上のバリガ性能指数(低周波)を示し、かつp型とn型のキ ャリアタイプ制御が可能である。しかも、安価な合成手法によってバルク基板およびエピ膜 の合成が可能である事から、究極のパワーエレクトロニクス材料である。

う事が挙げられる[2]。これまでの研究でも、2020年に報告された、MBE を用いた結晶成長による 10nm/h(4時間で40nm成長)という成長速度が最高値であり[1]、1µm以上の膜厚が要求されるパワーデバ イスへの応用は困難であった。そこで報告者は大量に酸素源が供給可能なミスト CVD 装置を改良し、そ の高速成長と混晶作製に成功し、これまで報告を行ってきた[3][4]。

しかしながら、r-GeO2の薄膜成長技術は確立されたわけではなく、様々な問題を含んでいる。それは薄膜中にアモルファス相が混在してしまう事である。そこで本研究では、r-GeO2の結晶成長における結晶 化要因を特定し、アモルファス相の低減により薄膜の高品質化を目指した。

#### ・実験方法

製膜手法は改造したミスト CVD 装置を用いた。溶質である Ge の前駆体にはビス[2-カルボキシエチ ルゲルマニウム(IV)]セスキオキシド (C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>Ge<sub>2</sub>O<sub>7</sub>)を用い、溶媒には超純水と塩酸を体積比 9:1 で混 合した溶液を用いた。この溶質を溶媒に超音波撹拌装置を用いて溶解させ、0.01 mol/L の水溶液を作製 した。電気炉の構成として、上流側を 750℃で固定し、下流側の成長温度を 675~775 ℃で 25 ℃ずつ変 化させた。成長時間は 25 分である。キャリアガス及び希釈ガスには酸素(O<sub>2</sub>)ガスを用い、ガス流量は 供給側が 3.0 L/min、希釈側を 0.5 L/min とした。基板には TiO<sub>2</sub>(001)基板を用いた。

### ・実験結果・考察

構造評価として、X線回折装置による2θ/ω測定を行った。成長温度750℃とのサンプルのみr-GeO2(002)に由来するピークを確認したが、他のサンプルではr-GeO2由来のピークは確認されなかった。一方で、全てのサンプルにおいて薄膜由来の干渉膜が確認されたことから、成長温度750℃以外のサンプルは全てアモルファス膜であった。

次に電子顕微鏡(SEM)による表面形状の観察を行った。これまでの知見より、アモルファス相は水溶 性であるが、結晶性の r-GeO2 は水に不溶である事が判別している。そこで、結晶相との相違を確認す るため、750℃で成長した結晶サンプルを超純水によって洗浄し、アモルファス相の除去を行った。図 1は、各サンプルの表面 SEM 画像である。成長温度 750℃以外のサンプルはアモルファス相になってい るため、その表面には構造物等は観察できなかった。一方で成長温度が 750 ℃、775 ℃のサンプルにお いては円形の構造体が確認された。750℃のサンプルはアモルファス相を除去した後の結晶化部と思わ れる部分がアイランド状に存在している。一方で、775℃のものは粒が小さく判別が難しいため、両サ ンプルの高分解画像を図2に示す。すると両サンプルともに中心点付近から放射状にのびた結晶化部が 確認された。微結晶同士が集合する事により結晶薄膜を形成している、一方で、超純水洗浄を行った 750℃サンプルと洗浄を行っていない 775℃のサンプルの表面画像を比較すると、微結晶の集合体意外 の部分で残渣に大きな違いがある。750℃の方は結晶化部以外は無くなっているが、775℃のサンプルで は残っているため、この部分はアモルファス相である可能性が高い。つまり、r-GeO2の結晶成長様式 として、核形成によって成長した微結晶が集合体となり、その核形成以外の部分ではアモルファス相が 支配的に成長する事が判明した。このことは、現在の結晶成長様式では大きな単結晶薄膜の作製が困難 である事を示唆しており、装置や成長条件の改良・改善が必要である事を示唆している。具体的には、 r-GeO2の結晶膜作製のためにはアモルファス相を形成しないために基板内温度など結晶雰囲気の面内 均一性が重要である事が示唆された。



(a) 750°C (b) 775°C 図2 成長温度 750℃、775℃の r-GeO2 薄膜表面(高分解)



20µm (f) 800 °C 図1 各成長温度における r-GeO2 薄膜表面の SEM 画像 0



(e) 775 °C

(c) 725 °C



(a) 675 °C



20µm (b) 700 °C





- [1] S. Chae et al., Appl. Phys. Lett. 114, 102104 (2019).
- [2]] S. K. Wang et al., J. Appl. Phys. 108,054104 (2010).
- [3] H. Takane, and K. Kaneko, Appl. Phys. Lett. 119, 062104 (2021).
- [4] H. Takane , Y. Ota , T. Wakamatsu, T. Araki, K. Tanaka, and K. Kaneko, Phys. Rev. Mat. 6, 084604(1-12) (2022).