共同利用研究成果報告 第 27 号



令和5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26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推進するため、例えば高温プラズマ理工学研究センターでは 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。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。分野融合室を2023年12月に立ち上げ、分野融合研究をよ りいっそう推進する体制になりました。

共同研究として、2023年度に受け入れた共同研究者の人数は総計800名を超え、外国人研究者の数も 88名でした。この報告書に示しますように、2023年度は、特定研究23件を含む総計で103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、27件(この27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4件を足した国際共同研究の実施総数としては31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2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、5名の採用(2名新規)を実施し、また博士課程学生SRAを1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16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、2024 年 7 月 4 日に開催される「RIAM フォーラム 2024」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加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。

> 2024年3月 九州大学応用力学研究所 所長 岡本 創

令和5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	代表者名	所内世話人 協力者数	頁		
特定研究1							
	回	転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				
2023S1-IC- 1		金星大気波動の解析	慶應義塾大学 杉本 憲彦	大貫 陽平 4名	12		
2023S1-IC- 2	サブ	Nonlinear energy transfer within the oceanic internal wave field	School of Marine Science and Technology, Tianjin University YANG Wei	大貫 陽平 1名	13		
2023S1-IC- 3	/テーマ	Quasi-resonance phenomena in geophysical waves	CNRS, ENS de Lyon VENAILLE Antoine	大貫 陽平 2名	18		
2023S1-IC- 4		Small-scale instabilities in rotating and stratified fluid	Indian Institute of Technology Madras MATHUR Manikandan	大貫 陽平 2名	19		
2023S1-IC- 5		Triadic resonant instability of internal gravity waves in a stratified shear flow	Indian Institute of Technology Madras ROY Anubhab	大貫 陽平 1名	22		

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			·			
	計統	測・シミュレーション・モデリングを組み合わせた 合診断	統括責任者 糟谷 直宏			
2023S2-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6名	24	
2023S2-CD- 2		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 本多 充	槽谷 直宏 3名	26	
2023S2-CD- 3	サブ	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	糟谷 直宏1名	28	
2023S2-CD- 4	テー	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 佐藤 雅彦	糟谷 直宏 1名	29	
2023S2-CD- 5		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	
2023S2-CD- 6		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 沼波 政倫	糟谷 直宏 2名	33	
特定研究3						
_	実! 野	験・計測科学と計算科学の融合による新しい研究分 の開拓	統括責任者 弓本 桂也 小菅 佑輔 寒川 義裕			
2023S3-CD- 1		結晶斜面テラス幅分布からナノスケール動的荒さ および表面成長/後退速度の情報を得る方法の探索	大阪電気通信大学 阿久津 典子	寒川 義裕 1名	35	
2023S3-CD- 2	サ	機械学習を活用した新材料の結晶構造探索	久留米工業高等専門学校 奥山 哲也	寒川 義裕 3名	36	
2023S3-CD- 3	ブテー	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	38	
2023S3-CD- 4	7	パワーデバイス半導体中における欠陥移動反応機 構の解析	和歌山大学 小田 将人	寒川 義裕 1名	40	
2023S3-CD- 5		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	41	

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 況研究	統括責任者 内田 孝紀				
2023S4-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	43		
2023S4-ME- 2		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	45		
2023S4-ME- 3		洋上風力発電が沿岸空港の低層風況に及ぼす副次 的効用についての検討	宇宙航空研究開発機構 牧 緑	内田 孝紀 6名	47		
2023S4-ME- 4	サブテ	我が国の洋上風力におけるリスクに関する研究	弘前大学 本田 明弘	内田 孝紀 4名	48		
2023S4-ME- 5	 	RIAM-COMPACTの後流モデルの検証	九州大学 小野 謙二	内田 孝紀 1名	52		
2023S4-ME- 6		養殖用浮体に設置された多連垂直軸風車の空力応 答	弘前大学 久保田 健	内田 孝紀 2名	53		
2023S4-ME- 7		風況シミュレーションの高度化のための気象モデ ルとCFDモデルの結合手法の開発	筑波大学 日下 博幸	内田 孝紀 3名	54		
2023S4-ME- 8		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 4名	55		

令和5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							
2023CR-CD- 1	粉体ターゲットプラズマプロセスを用いた2次元傾斜 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	57			
2023CR-CD- 2	ラジカル含有リチウム酸化物薄膜の水素および二酸化 炭素吸収・放出過程	名城大学 土屋 文	徳永 和俊 3名	59			
2023CR-CD- 3	波成乱流の水槽実験	京都大学 吉川 裕	胡 長洪 2名	61			
2023CR-CD- 4	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 4名	63			

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						
2023CR-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	65		
1	吹送距離延長法の確立	高垣 直尚	22名			
2023CR-A0-	長崎県雲仙での現場観測によるエアロゾル特性と雲の	長崎大学	岡本 創	67		
2	熱力学相の関係	河本 和明	1名			
2023CR-A0- 3	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	68		
2023CR-A0- 4	若狭湾における定置網漁業及び底曳網漁業の漁場環境 に関する研究 ~若狭湾における雄ズワイガニの銘柄と成長関係~	福井県立大学 渡慶次 力	千手 智晴 11名	69		
2023CR-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	71		
5	動	中村 啓彦	6名			
2023CR-A0-	うねりと風波が同時に存在する状況でのGNSS反射強度	京都大学	市川 香	75		
6	への影響の観測研究	根田 昌典	1名			
2023CR-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	77		
7	の構築	山敷 庸亮	2名			
2023CR-A0- 8	沿岸海洋の密度躍層における乱流混合の定量化	鹿児島大学 堤 英輔	遠藤 貴洋 2名	80		
2023CR-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	81		
9	明	RICHTER Ingo	1名			
2023CR-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	85		
10	度化に向けた研究	板橋 秀一	3名			
2023CR-A0-	陸域から外洋への水・栄養輸送に気候変動がもたらす	富山大学	遠藤 貴洋	87		
11	影響	張 勁	3名			
2023CR-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	89		
12	システムの長期変動に関する研究	木口 雅司	3名			
2023CR-A0-	九州北部地方における火山性エアロゾルの光学的特性	富山大学	竹村 俊彦	91		
13	の影響	青木 一真	2名			
2023CR-A0-	大気汚染物質の予測精度の向上を目指した化学輸送モ	長野県環境保全研究所	原 由香里	92		
14	デルと植生モデルの統合に関する研究	栗林 正俊	1名			
2023CR-A0-	海洋マルチドリフターを用いた海洋漂流現象に関する	東京大学	市川 香	93		
15	研究	小平 翼	2名			
2023CR-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	96		
16	響	林 美鶴	3名			
2023CR-A0-	非線形性及び分散性を考慮した表面波・内部波に対す	鹿児島大学	辻 英一	98		
17	る地形の影響に関する数値解析的研究	柿沼 太郎	2名			
2023CR-A0-	東シナ海から日本海の海況変動を把握するための観測	長崎大学	千手 智晴	100		
18	研究	滝川 哲太郎	6名			
2023CR-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	101		
19	度分布観測システムの構築	神 慶孝	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							
2023CR-FP-1	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 徐 虬	渡邉 英雄 1名	102			
2023CR-FP-2	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	核融合科学研究所 河内 裕一	西澤 敬之 3名	104			
2023CR-FP-3	プラズマに対向した堆積層の動的水素リテンションに 関する研究	京都大学 高木 郁二	花田 和明 3名	106			
2023CR-FP-4	トカマクプラズマにおける高衝突領域での乱流輸送モ デル研究	核融合科学研究所 登田 慎一郎	糟谷 直宏 2名	107			
2023CR-FP-5	構造材料の耐水素脆化特性に及ぼす熱処理の影響	茨城大学 車田 亮	渡邉 英雄 3名	108			
2023CR-FP-6	高熱負荷によるタングステン材の損傷と強度特性の相 関に関する研究	茨城大学 車田 亮	徳永 和俊3名	110			
2023CR-FP-7	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	112			
2023CR-FP-8	金属、合金および酸化物セラミックス中の水素同位体 の溶解、拡散、放出挙動に関する研究	九州大学 橋爪 健一	渡邉 英雄 3名	115			
2023CR-FP-9	定常プラズマ対向機器への適用を目指した粉末固相接 合によるタングステン-銅接合材の研究	核融合科学研究所 森崎 友宏	花田 和明 4名	116			
2023CR-FP- 10	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	渡邉 英雄 6名	117			
2023CR-FP- 11	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	富山大学 成行 泰裕	小菅 佑輔 7名	119			
2023CR-FP- 12	分散強化銅合金における重イオン照射効果	核融合科学研究所 菱沼 良光	渡邉 英雄 3名	121			
2023CR-FP- 13	長時間放電におけるタングステン壁排気の物理素過程 の解明と制御	九州大学 中村 一男	徳永 和俊4名	122			
2023CR-FP- 14	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 2名	123			
2023CR-FP- 15	高エネルギーイオン照射法を用いた新奇二次元層状物 質の創製	量子科学技術研究開発機構 圓谷 志郎	渡邉 英雄 4名	125			
2023CR-FP- 17	宇宙線ミュオンを用いた磁場のイメージング(Magic- µ)/QUEST磁場を通過した宇宙線ミュオンフラックス マップの計測	九州大学 金 政浩	花田 和明 2名	126			
2023CR-FP- 18	トモグラフィ計測を用いた磁化プラズマ乱流の同定お よび競合状態の観測	広島大学 山崎 広太郎	文	128			
2023CR-FP- 19	超臨界CO2-金属界面での物質移動現象に関する研究	九州大学 片山 一成	渡邉 英雄 3名	129			
2023CR-FP- 20	軸対称トカマクにおける重イオンビームプローブ計測 器の揺動計測のための最適化研究	核融合科学研究所 清水 昭博	藤澤 彰英 2名	130			
2023CR-FP- 21	基礎実験によるプラズマカオス制御の検討	崇城大学 寺坂 健一郎	小菅 佑輔 2名	131			
2023CR-FP- 22	磁化プラズマ中における磁力線並行・垂直方向イオン 温度計測技術の開発	東北大学 高橋 宏幸	文 贊鎬 1名	133			
2023CR-FP- 23	ヘリウムイオン照射した鉄系合金のキャビティ形成と 磁気特性	岩手大学 鎌田 康寛	渡邉 英雄 5名	134			
2023CR-FP- 24	種々の熱入射法による材料表面の高エネルギー密度入 射損耗解析法の開発	応用ながれ研究所 糟谷 紘一	徳永 和俊 5名	135			
2023CR-FP- 25	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	槽谷 直宏 3名	137			

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						
2023CR-ME- 1	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 3名	138		
2023CR-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 6名	139		
2023CR-ME- 3	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 5名	140		
2023CR-ME- 4	第一原理計算による α-Ga203/A1203超格子のバンド構 造解析	三重大学 河村 貴宏	寒川 義裕 2名	160		
2023CR-ME- 5	腫瘍を有する脛骨の力学的解析法の検討	兵庫県立がんセンター 藤本 卓也	東藤 貢 1名	162		
2023CR-ME- 6	ウルトラワイドギャップ半導体ダイヤモンドおよび酸 化ガリウムデバイスに影響を与える結晶欠陥の特性解 明	佐賀大学 嘉数 誠	東藤 貢 6名	164		
2023CR-ME- 7	大腿骨頭壊死症を有する大腿骨の骨折挙動に関する研究	福岡大学 山本 卓明	東藤 貢 3名	166		
2023CR-ME- 8	骨密度分布と微視構造を考慮した骨の力学特性予測理 論の構築	千葉大学 松浦 佑介	東藤 貢 2名	169		
2023CR-ME- 9	人工股関節ステムが大腿骨に及ぼす力学的影響に関す る研究	産業医科大学 塚本 学	東藤 貢 2名	171		
2023CR-ME- 10	脊椎の力学的諸問題に対するCT-FEMの応用に関する研究	佐賀大学 森本 忠嗣	東藤 貢 2名	173		
2023CR-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	175		
2023CR-ME- 12	ムーンプールを有する浮体式洋上風力発電用ポンツー ンの波浪中応答に関する研究	日本大学 譚 雷	劉 盈溢 1名	176		
2023CR-ME- 13	離島間輸送を実現に向けた空陸両用車の実現性の検討	沖縄工業高等専門学校 森澤 征一郎	内田 孝紀 4名	177		
2023CR-ME- 14	水平接触面を利用した一方向凝固による熱電変換材料 の配向制御と高性能化	名古屋大学 松川 祐子	草場 彰 2名	178		
2023CR-ME- 15	極低レイノルズ数翼の革新的空力特性向上の為の基礎 研究	同志社大学 平田 勝哉	内田 孝紀 3名	179		
2023CR-ME- 16	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	181		
2023CR-ME- 17	X線CTで取得した砂粒子特性に基づく相互作用モデル を用いた解像型DEM-CFDシミュレーション	東京工業大学 松下 真太郎	渡辺 勢也 4名	183		
2023CR-ME- 18	力学解析法の脳神経外科への応用	京都府立医科大学 梅林 大督	東藤 貢 1名	184		
2023CR-ME- 19	高温動作パワーモジュールの接合損傷予測	近畿大学 宍戸 信之	齋藤 渉 1名	186		
2023CR-ME- 20	歯科矯正用アンカースクリュー埋入時の上下顎歯槽骨 ならびに口蓋骨への荷重量と応力分布の三次元有限要 素解析 ~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 高橋 一郎	東藤 貢 3名	187		
2023CR-ME- 21	非対称浮体による回転振子式波浪発電装置に関する研 究	長崎大学 経塚 雄策	胡 長洪 3名	191		

令和5年度 研究集会一覧(目次)

分野融合							
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	
2023WS- CD- 1	核融合と水素エネルギー利用社会のあ るべき姿	核融合科学研究所/ 京都フュージョニア リング 芦川 直子 核融合科学研究所 平野 直樹	花田 和明 12件・29名	応用力学研究所 (対面・遠隔併用)	2023. 10. 3- 2023. 10. 4	193	

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	
2023WS- AO- 1	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 3件・33名	応用力学研究所 (対面・遠隔併用)	2023. 9. 14- 2023. 9. 15	199	
2023WS- AO- 2	日本周辺海域の海況モニタリングと波 浪計測に関する研究集会	富山高等専門学校 福留 研一	広瀬 直毅 20件・45名	応用力学研究所	2023. 12. 20- 2023. 12. 21	203	
2023WS-	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	九重共同研究	2023. 10. 26-	277	
AO- 3	力学過程と規模間相互作用の研究	西垣 肇	14件・18名	所・山の家	2023. 10. 29		
2023WS-	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	2023. 12. 19-	283	
AO- 4	の開発と応用	藤井 智史	11件・48名	(対面・遠隔併用)	2023. 12. 20		
2023WS-	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	2024. 2. 9–	287	
AO- 5	物・物理・化学過程	近藤 能子	13件・31名	(対面・遠隔併用)	2024. 2. 10		
2023WS-	アジア域の化学輸送モデルの現状と今	国立環境研究所	弓本 桂也	応用力学研究所	2024. 3. 14-	289	
AO- 6	後の展開に関する研究集会	菅田 誠治	14件・40名	(対面·遠隔併用)	2024. 3. 15		

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		
2023WS- 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 6件・31名	応用力学研究所 (遠隔)	2023. 6. 1– 2023. 12. 26	292		
2023WS- FP- 2	第21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 30件・41名	応用力学研究所 (対面・遠隔併用)	2023. 12. 21- 2023. 12. 22	301		

新エネルギー力学分野								
No.	研究課題	代表者名	所内世話人 講演数・参加者数	開催場所	開催日	頁		
2023WS- ME- 1	整形外科と応用力学の融合~予防医学 としての骨折力学の確立~	横浜市立大学 稲葉 裕	東藤 貢 12件・43名	JR博多シティ会 議室	2023. 7. 29	309		

令和5年度 若手キャリアアップ支援研究一覧(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				
2022EC-CD- 1	機械学習とトモグラフィーを用いたトカマク配位形成 の物理メカニズムの解明とその制御	東京工業大学 宗近 洸洋	藤澤 彰英 6名	313				

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
2022EC-A0- 1	対馬暖流流路の中・長期変動とその要因解明	東京大学 矢部 いつか	木田 新一郎 2名	318

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。

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、地球と大きく異なる。高度45-70km付近には、厚い雲層が存在し、大気循環の全貌は解明されていない。特に大気 全体が自転を追い越す方向に約4日周期(~100m/s)で回転するスーパーローテーションの成因解明は、地球流体力学的 にも興味深い研究テーマである。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、様々な 時空間スケールの波動が観測されたが、これらの波動の3次元構造や働き、理論的解釈は十分に研究されていない。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ことを目的にする。 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、①あかつき観測データをAFES-Venusに同化することで、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、②AFES-Venus 単体での高解像度計算によって、より細かいスケールの 波動現象の再現を試み、③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を行い、理論的 な解釈を行う。④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。⑤さらに、波動を疑似観測データとして同化する実験(OSSEs)を行い、波動の同化で再現でき る新規観測の立案を行う。

結果: 2023 年度は、あかつき中間赤外画像から得られる温度の同化を試行した結果、熱潮汐波の位相が改善された。また、AFES-Venus 単体で再現されるスーパーローテーションについて、解像度を変えて水平粘性依存性を調べた結果、水平粘性に依存しないパラメータ領域を見出した(成果報告②)。さらに、あかつき紫外画像を想定した観測システムシミュレーション実験(OSSEs)を実施し、ロスビー波の再現に向けた観測条件を探査した。衛星間電波掩蔽を用いたコールドカラーの再現可能性に関する OSSEs の結果を論文化した(成果報告③)。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が向上し、これらの解析も進行中である。

考察: 2023 年度に得られた結果から、あかつきの温度同化は風速と異なり、基本場を大きく変更する可能性があること がわかった。これは観測とモデル間の平均温度に大きなバイアスが存在することに起因している。このため、2024 年度 には、温度場のバイアス補正を行うことや、中間赤外画像の射出角に応じて同化する高度を変えるなどの方法を検討して いる。また、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の理論的解釈が必要である。特に Venus Express やあかつきによる長期観測により、雲層のアルベドやスーパーローテーションの長期的な変動が報告されており、3 次元 的な波動の時空間変動が深く関わる可能性が示唆されている。このため、これまでに得られている 3 次元的な波動の励起 メカニズムの解明が望まれる。またモデル間比較により、金星大気波動の普遍性について、今後は理解を深めていかなけ ればならないと考える。

研究成果報告:①Fujisawa, Y., N. Sugimoto他6名, Evaluation of new radio occultation observations among small satellites at Venus by data assimilation, Icarus, Vol. 402, (2023), 115728, 10pp.
 ②Sugimoto, N., Y. Fujisawa, N. Komori 他3名, Super-rotation independent of horizontal diffusion reproduced in a Venus GCM, Earth, Planets and Space, Vol. 75, (2023), 44.
 研究組織:杉本憲彦(研究代表者)、藤澤由貴子、小守信正:慶應義塾大学

大貫陽平(所内世話人)、山本勝:九州大学応用力学研究所

12

Nonlinear energy transfer within the oceanic internal wave field (2023S1-IC-2)

Applicant: Wei Yang (Tianjin University)

Abstract

To investigate the nonlinear energy transfer within internal wave fields, we continued to analyze the observations and carry out numerical simulations during the last year. We have performed bispectral analysis to determine the direction of energy transfer in vertical wavenumber space. The results showed similarities with the in-situ oceanic observations of the previous study during this project. A new interesting result we obtained during the project is that we found the interaction mechanism may resemble the classical wave-mean flow interaction mechanism. However, here the mean flow oscillates with near-inertial frequency. This is an interesting mechanism and awaits further investigation in depth. We suspect that this mechanism may be important in understanding the oceanic internal waves interactions and play an essential role in the real ocean.

1. Purpose

Tropical cyclones (TCs) represent the most extreme atmospheric disturbances passing over the ocean which can excite intense oceanic responses from both thermal and dynamic views. These responses are in multiple forms, such as significant surface cooling, surface waves, geostrophically balanced motions, intense turbulence and mixing, and internal waves at various frequencies. A more comprehensive understanding of the oceanic wave responses is required which is crucial for the understanding of energy pathways from TC forcing to ocean interior mixing.

The possible energy exchange and interactions between internal waves at different frequencies further added to the difficulty in understanding the oceanic responses to passing TC. Based on moored velocity measurements in the northern Gulf of Mexico, Jing et al. (2015) observed the energy transfer from near-inertial to superinertial internal waves after the passing of a TC which was further demonstrated to play an important role in elevating the superinertial shear variance. The understanding of the energy exchange is crucial for understanding how the TC distributes their energy and feeds mixing in the ocean interior. However, observations so far remain limited in picturing the problem, and we are still unclear how the internal waves at super-inertial frequencies after TC can be fueled.

The East China Sea (ECS) is a midlatitude marginal ocean with a long continental shelf slope in the northeast-southwest direction. It is located adjacent to the western North Pacific Ocean which is the most active tropical cyclone basin in the global oceans. Furthermore, this region is also characterized by the strong west boundary current, Kuroshio, and rich internal wave fields such as semidiurnal internal tides and internal solitary waves which together form quite complicated dynamic fields (Min et al., 2023). Based on the measurements from a mooring station at the shelf slope northeast of the Taiwan island, we aim to understand oceanic wave responses to a passing TC at near-, and super-inertial frequency ranges and investigated the associated dynamic mechanisms.

2. Methods

The main observation data used here was acquired at a mooring station at the ECS from Aug. 27 to Oct. 28, 2013. Horizontal velocities were measured by two acoustic Doppler current profilers

(ADCPs 75-kHz Long Ranger, Teledyne-RD Instruments), which were deployed at 445 and 455 m with one looking upward and the other looking downward, having a temporal resolution of 5 minutes and vertical resolution of 8 m. Valid velocity measurements covered a depth range of 50 – 710 m. Due to the separation between the upward-looking and downward-looking ADCP sensors, velocity measurements had a gap in the mid-water column which was supplemented by linearized interpolation. Measurements of temperature across the water column were sampled by 24 temperature-depth sensors (TD, SBE37) and 7 conductivity-temperature-depth sensors (CTD, SBE37).

Following Sun and Pinkel (2012), we calculated the energy transfer rate from near-inertial to high-frequency internal waves following

$$g = -\sum \langle u'_i w' \frac{\partial U_i}{\partial z} \rangle, i = 1, 2$$
 (1)

where the angle bracket $\langle \rangle$ represents time averaging, u'_i , w' are the horizontal and vertical velocities associated with HFIWs, respectively, $\frac{\partial U_i}{\partial z}$ is the velocity shear of low-frequency internal waves, subscript i = 1, 2 stands for the zonal and meridional components, and Σ represents the summation over the subscript i = 1, 2. u'_i , and w' were highpass filtered above 6 cpd. The vertical shears $(\frac{\partial U_i}{\partial z})$ here were bandpass filtered at a frequency range of $(0.8-1.3)\omega_f$. w' was derived from the vertical motion of isotherms which originally had 1-min temporal resolution and was discrete in vertical space. To calculate φ , we averaged the w' into 5-min segments and interpolated them to the ADCP bins. Furthermore, the semi-Lagrangian reference frame which was obtained by referencing measurements to isotherms was used in the calculation (Yang et al., 2022).

3. Results and discussion

3.1 Occurrence of high-frequency internal waves after TC Fitow

The wavelet spectra of the depth-averaged vertical velocity showed that in addition to the typical near-inertial response after TC, the other pronounced response was located at the high-frequency range appearing immediately after TC Fitow at 18:00, Oct. 7. This high-frequency response had a period of 0.2 - 0.8 h lasting ~ 8 hours.

A close examination of the calculated rms vertical velocity at high-frequency bands (σ_w) showed that the HFIW appeared in a regular semidiurnal (M₂) period before the approaching of TC Fitow (vertical gray dashed lines in Fig. 1d). Previous studies showed that the HFIWs at the study area were ubiquitous, having multiple generation sites and traveling in different directions (Duda et al., 2013). These HFIWs can be generated by various mechanisms such as the local tide-topography interactions, and disintegration of internal tides remotely generated over I-Lan Ridge (Min et al., 2023). The regular semidiurnal occurrence before TC Fitow also indicated the tidal origin of the HFIWs. The intense HFIW packet emerging at 18:00, Oct. 7, 30 hours after the pass of the TC center, was different from the typical HFIWs in the study area. The calculated σ_w showed that the intense HFIW event did not follow the regular semidiurnal occurrence before TC Fitow (Fig. 1d).



Fig. 1. (a) Time series of the wind speed (black line), wind direction (gray arrows), and air pressure (red line) at the mooring station. (b) and (c) are the depth-time maps of highpass-filtered ($\omega > 24$ cpd) meridional and vertical velocities, respectively. The contoured lines are isotherms of 7 and 11 °C. (d) The rms vertical velocity (σ_w) at high-frequency bands ($\omega > 24$ cpd). The gray and black lines represent the calculated values in 1- and 24-hr intervals, respectively. The vertical dashed lines in (c) and (d) denote a regular M₂-period separation.

3.2 Energy transfer properties

With this limited dataset, it was not possible to establish the exact nature of the intense HFIW after TC Fitow. We next seek to understand the plausible energy transfer between the HFIWs and background internal waves. How the HFIWs were energized by NIWs after their generation is of interest here.

The calculated φ showed that energy was efficiently transferred from near-inertial to highfrequency bands of the internal waves (overall positive values in Fig. 2). Along with the appearance of intense HFIWs after TC, φ was elevated by one order of magnitude with the depth-averaged approaching 2 × 10⁻⁶ W kg⁻¹. Besides the temporal variation, the calculated φ also showed an interesting structure of horizontal layers with vertical scales of ~ 100 m (Fig. 2b). This was largely related to the vertical structure of NIWs. Those horizontal layers in φ disappeared if we applied a much broader bandpass-filtering frequency range to the vertical velocity shear (0.6 < ω < 3 cpd instead of 0.8-1.3 ω_f). However, the averaged φ did not vary a lot demonstrating the dominant role of NIWs in the energy transfer.

Based on measurements taken in the nearfield of the tidal conversion site near Kaena Ridge, Hawaii, and near the ECS shelf break, previous studies have also documented the energy transfer from NIWs to HFIW which had similar average values at the order of 1×10^{-7} W kg⁻¹ (Sun and Pinkel, 2012; Yang et al., 2022). Observations in the open ocean revealed much less averaged energy transfer which is almost two orders smaller (3.7×10^{-9} W kg⁻¹) (Chen et al., 2023). The calculated φ after passage of TC Fitow along with the appearance of intense HFIWs was much larger than those previous estimations. This demonstrated efficient energy transfer from NIWs to HFIW. The efficient energy transfer can aid the growth of HFIW and play a key role in redistributing the TCinjected energy in the ocean interior.



Fig. 2. (a) Time series of the rms vertical velocity (σ_w) at high-frequency bands in 1- (gray line) and 24- (black line) hour intervals. The red line represents the depth-integrated HKE of NIWs. (b) and (c) are the energy transfer rate from NIWs to HFIWs and the corresponding depth-averaged values, respectively.

4. Future work

Although we have identified nonlinear energy transfer from NIWs to HFIWs from the observation data in the East China Sea, the detailed mechanism of this interesting process remains to be explored. From a mathematical viewpoint, the temporal scale separation between slowly varying NIWs and rapidly oscillating HFIWs enables the use of wave-mean flow interaction theory. In this framework, the propagating and amplification of HFIWs in the NIWs field are represented by the set of ray-tracing equations, and the feedback to NIWs can be evaluated by the radiation stress computable from the pseudo-momentum flux. At the end of this year, we have derived a suitable model equation system describing this mutual-interaction process. Preliminary numerical simulations were carried out to exhibit the decay of NIWs through the radiation of HFIWs over a corrugating sea floor (Fig. 3). A thorough analysis of the simulation results and the investigation of parameter dependence are planned for the next year.

References

- Duda, T. F., A. E. Newhall, G. Gawarkiewicz, M. J. Caruso, H. C. Graber, Y. J. Yang, and S. Jan, 2013: Significant internal waves and internal tides measured northeast of Taiwan. J. Mar. Res., 71, 47–82.
- Jing, Z., P. Chang, S. F. Dimarco, and L. Wu, 2015: Role of near-inertial internal waves in subthermocline diapycnal mixing in the northern Gulf of Mexico. J. Phys. Oceanogr., 45, 3137– 3154.
- Min, W., Q. Li, Z. Xu et al., 2023: High-resolution, non-hydrostatic simulation of internal tides and solitary waves in the southern East China Sea. *Ocean Model.* **181**, 102141.
- Sun, O. M., and R. Pinkel, 2012: Energy transfer from high-shear, low-frequency internal waves to high-frequency waves near Kaena Ridge, Hawaii. *J. Phys. Oceanogr.*, **42**, 1524–1547.

Yang, W., H. Wei, and L. Zhao, 2022: Energy transfer from PSI-generated M1 subharmonic waves to high-frequency internal waves. *Geophys. Res. Lett.*, **49**, e2021GL095618.



Fig. 3. Snapshots of the zonal velocity of near-inertial waves in numerical simulations. A near-inertial wave packet is reflected over (a) flat and (b) corrugating sea floors.

RIAM host: Yohei Onuki

Quasi-resonance phenomena in geophysical waves

APPLICANT: Antoine VENAILLE, (ENS de Lyon, France)

Reminder: the scientific context of the proposal

This project is motivated by geophysical phenomena. We advocate the fruitful exchange of ideas between geophysical fluid dynamics and other fields of physics. We identified several geophysical wave problems that can be tackled by using the Wigner-Weyl transform and related techniques.-

Scientific questions addressed in 2022

The first question we asked was « can be used ray tracing and semi-classical analysis to understand the topological origin of equatorial waves ». This project emerged building on previous work by A. Venaille on one side, and of Y. Onuki on the other side. Thanks to the RIAM collaborative project, combining our different knowledge on this topic allowed us to obtain a new result which may have an impact beyond geophysical fluid dynamics, see abstract below.

Scientific questions addressed in 2023

In recent years, there has been a strong interest in Lyon for the application of tools from topology to the physics of waves. The theoretical framework involves Wigner-Weyl calculus and is very relevant to this collaborative research project. Together with Pierre Delplace, we started a new line of research aiming at proving bulk-edge correspondence for fluids, a cornerstone of topological wave physics. We also generalized the flow spectral approach to shear stratified flow on the equatorial beta plane with application to the planetary atmosphere.

This part was led by Yohei Onuki, and used the expertise in Lyon on topological wave physics.

The concrete outcome of the project

[1] 2023 Venaille Onuki Perez Leclerc, *From ray tracing to waves of topological origin in continuous media*, <u>https://arxiv.org/abs/2207.01479</u>. *This paper is published in SciPost, which features an open review process; one of the reviewers qualifying the work as « an illuminating tour-de-force ».*

Abstract: Here, by applying ray tracing machinery to the paradigmatic example of equatorial shallow water waves, we propose a physical interpretation of the bulk-edge correspondence, a cornerstone of topological wave physics.

[2] 2023 Onuki Venaille Delplace, Bulk-edge correspondence recovered in incompressible continuous media, <u>https://arxiv.org/abs/2311.18249</u>. This paper will be submitted to Physical Review Research.

Abstract: In continuous media, the bulk-edge correspondence can be violated, resulting in weak topological protection of chiral edge states. Here, we propose a strategy to reestablish strong bulk-edge correspondence in incompressible continuous media.

Conference presentations

[1] Venaille, Wave topology in fluids, Seminar at LOMA Marseille, Dec. 19, 2023.

[2] Venaille, Wave topology in fluids, Seminar at Grenoble, Nov. 27, 2023.

[3] Venaille, Wave topology in fluids, Seminar at Cambridge, Oct. 5, 2023.

[4] Venaille, Wave topology in fluids, Winter School NORDITA Stockholm, Jan. 20-26, 2023.

[5] Venaille, Wave topology in fluids, Summer School GRENOBLE, Jun. 6-13, 2023.

Small-scale instabilities in rotating and stratified fluids

Professor Manikandan Mathur Department of Aerospace Engineering Indian Institute of Technology Madras, Chennai, India.

Internal waves play a significant role in promoting vertical mixing in the ocean, and hence contributing to the global circulation and energy budget. In this joint research, we study the evolution of small-amplitude and short-wavelength instabilities in internal waves using a local stability method and Direct Numerical Simulations. The investigation is motivated by the dynamics of inertial-gravity waves in the ocean, which are well-described within a Cartesian geometry for processes that do not extend over vast latitudinal or longitudinal ranges. The plots of growth rates were made in the perturbation space for the base flow inertia-gravity wave parameters $(\omega/N, \omega/f \text{ and } A)$, where ω is the frequency of the base wave, N is the buoyancy frequency, f is the Coriolis parameter and A is the non-dimensional amplitude. Figure 1 shows the growth rates for $\omega/N = 0.25, A = 1$ and $\omega/f = 1.5, 2.1, 5$. Clear instability bands are observed on the perturbation parameter space. For a given base inertial-gravity wave, the dominant instability has also been identified for the perturbations for which the growth rate is maximum. These results are being prepared for a research article in the Journal of Fluid Mechanics. Direct numerical Simulations of turbulence and mixing induced by short-wavelength instabilities in inertia-gravity waves have been discussed and planned to be performed in 2024.



FIG. 1: Growth rate (σ) non dimensionalized by ω , as a function of perturbation wave vector orientations ϕ_0 (deg.) and θ_0 (deg.) for $\omega/f = 1.5, 2.1, 5$ (column-wise) and A = 1, with $\omega/N = 0.025$.

Local stability analysis was also conducted in the limit of internal waves with rotation and no stratification, namely inertial waves. At sufficiently small amplitude, three-dimensional parametric subharmonic instability (PSI) is the only instability mechanism. As the amplitude is increased, theoretical PSI estimates become less relevant in describing the instability characteristics, and the dominant instability transitions to two-dimensional shear-aligned instability, which is shown to be driven by third-order resonance. The dominant instability characteristics are shown in figure 2. The results of this work have been accepted for publication in the Journal of Fluid Mechanics. The discussions with Dr. Yohei Onuki through the RIAM joint research program have been acknowledged in the paper.



FIG. 2: Dominant instability diagram for an inertial wave. (a) Maximum growth rate σ^* as a function of Φ and A, and the corresponding (b) θ_0^* and (c) ϕ_0^* at which the maximum growth rate occurs. (d) Angle between the inertial wave vector and the most unstable perturbation wave vector, $|\Phi - \phi_0^*|$, as a function of Φ and A.

Professor Manikandan Mathur had a successful visit to RIAM, Kyushu University from 23rd September to 5th October, 2023, and held several collaborative research discussions with Dr. Yohei Onuki and colleagues. The visit started with participation in The Oceanographic Society of Japan, Fall Meeting (9/24-28, 2023) 2023 Fall Meeting of the Oceanographic Society of Japan was held at Kyoto University. Research discussions were focused on short-wavelength instabilities in inertia-gravity waves, and a clear roadmap for theoretical calculations has been developed. Professor Manikandan Mathur gave a talk on "Instabilities in internal gravity waves" and also held discussions with several researchers at RIAM. Dr. Shinichiro Kida, RIAM, Kyushu University was hosted for an online seminar on "River-Ocean Interaction of the Ganges-Brahmaputra-Meghna Delta" at the Geophysical Flows Lab, IIT Madras. Some photos from Manikandan Mathur's visit to RIAM are included below.

3



FIG. 3: (a) Professor Manikandan Mathuir with Prof Yohei Onuki at an experimental waves facility in RIAM, Kyushu University. (b) Brainstorming sessions on the interaction between internal waves and Kuroshio current.



FIG. 4: (a) Discussions at RIAM, Kyushu University (b) Professor Manikandan Mathur presenting a seminar at RIAM, Kyushu University.

Triadic resonant instability of internal gravity waves in a stratified shear flow

APPLICANT: Anubhab Roy, (IIT Madras, India)

Summary:

In this work, we study the stability of an internal gravity wave (IGW) mode in a 2D, inviscid, uniformly stratified, linear shear flow confined between two walls. Assuming the reference frame to be moving with the phase speed of the IGW mode, and a small amplitude, we evaluate the vertical structure of the IGW mode. The stability of this mode, then, is studied using Floquet theory. The growth rates and the corresponding vertical structures of the perturbation variables can be obtained by solving a generalized eigenvalue problem for the two discrete interacting perturbation modes. At resonance, the frequencies of both modes should be equal. An asymptotic calculation is done with a small detuning between the two frequencies to obtain the growth rates near the resonant interactions. The growth rates, thus obtained, are compared with the solution by solving the generalized eigenvalue problem numerically.

Theoretical model:

We consider a base field as a stably stratified fluid flow superimposed with a stationary internal gravity wave with rigid top and bottom boundary conditions. The following set of equations governs the linear stability of this system to infinitesimal perturbation:

$$\frac{\partial \nabla^2 \psi'}{\partial t} + J(\tilde{\psi}_B, \nabla^2 \psi') + J(\psi', \nabla^2 \tilde{\psi}_B) = -\frac{g}{\rho^\star} \frac{\partial \rho'}{\partial x}$$
$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} + J(\tilde{\psi}_B, \rho') + J(\psi', \rho_B) = 0$$

Here, ψ and ρ represent the stream function and density, respectively. A symbol with a subscript B denotes the base field component, and that with a prime denotes a perturbation.

Assuming the spatial periodicity of the base wave field, we apply the Floquet theory to expand the disturbance as the sum of a Fourier series and derive a generalized eigenvalue equation determining the instability growth rate. We also apply the asymptotic analysis to obtain the analytical expression of the growth rate and compare it with numerical solutions (Figure).



Figure. Instability growth rate λ , as a function of the disturbance wavelength γ . The amplitude and width of the unstable region agree well between the analytical and numerical solutions.

Publications:

- Kadam, Y., Patibandla, R., & Roy, A. (2023). Wind-generated waves on a water layer of finite depth. *Journal of Fluid Mechanics*, 967, A12.
- Patibandla, R., Basak, S., Dasgupta, R., & Roy, A. (2023). Surface and internal gravity waves on a viscous liquid layer: Initial-value problems. *International Journal of Multiphase Flow, 169*, 104592.

Conference presentations:

- Patibandla, R., Mathur, M., & Roy, A. Triadic resonances in internal wave modes with background shear. *European Geosciences Union (EGU) 2023*, Vienna, Austria, April 2023.

RIAM host: Yohei ONUKI

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)従来の特異値分解の手法を輸送解析に適用可能な形に拡張し、突発輸送の素過程分解を 行なった。また、(2)深層学習を用いて、計測困難な物理量の空間パターンの推定手法を開発し、多種 の乱流場への適用可能性も議論した。以下でそれぞれについて概説する。

研究成果

(1) 多重場特異値分解による突発輸送の素過程分解

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。 本手法は多重場特異値分解(multi-field SVD) と呼ぶ。図1に示すように、多種物理量の観測 行列をまとめて一つの行列に表現し、その特異 値分解をする、というものである。この手法で、 空間方向の直交性を担保することが可能である [1,2]。ただし、観測行列は全ての物理量で全て 同じサイズであることが必要である。





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。分解したモードの積より粒子フラックスを次のように評価する。

$$\Gamma_r = \sum_{\alpha,\beta} N_\alpha V_{r,\beta}$$

ここで N_{α} 、 $V_{r,\beta}$ はそれぞれ密度・径方向流れの特異値モードである。これらの積を輸送行列として表し、 さらに図2の様に対角成分と非対角成分に分解する。輸送行列は空間的な直交性により、空間積分を行 うと対角成分のみが残る。対角成分は定常的輸送成分、非対角項は非定常成分に対応する。非定常成分 の振幅は対角成分の平均値の数十倍にも上り、局所的な輸送は突発性を伴うことが分かった。条件付き 平均によって、重要となるモード結合を明らかにしたところ、径方向流れは一発大波の特徴を持つ波形 が発生するとき、密度揺動にはストリーマ状構造の駆動が関わる可能性が示唆された。両者が同時に起 きた時に突発的輸送が起こっている可能性がある。本成果は近日中に論文にまとめる予定である。



(2) 深層学習を用いた計測困難物理量の推定の多種の乱流場への適用可能性

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[3]。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(DW)と平行流シア不安定性(PVG)の混合状態である。平行流ソースをスキャンするこ

とで、DW から PVG への遷移状態を実現した。DW に おける学習で PVG の、PVG の学習で DW におけるポ テンシャル揺動推定を行い、その外挿性を調べ、おお よそ 6~7 割の推定精度を持つことを明らかにした。本 成果は近日中に論文投稿予定である。



図 3: 深層学習によるポテンシャル推定

- [1] T. Kodahara, M. Sasaki, et. al., Plasma Fusion Res. Rapid Communication, 18, 1202036 (2023).
- [2] G. Yatomi, M. Nakata, M. Sasaki, Plasma Phys. Control. Fusion, 65, 095014 (2023).
- [3] Y. Jajima, M. Sasaki, et. al., Plasma Phys. Control. Fusion, 65, 125003 (2023).

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と仮定し、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、前者はともかくとして後者の 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

トカマクプラズマにおいて重要な性質の一つは、粒子輸送の両極性であり、両極性は新古典輸送と乱流輸 送で独立に成立することが知られている。プラズマ流や電流、電場形成などと密接に関わる新古典粒子輸 送の両極性成立は、モデリングをする上で満たすべき最も大事な性質の一つである。さらに、<u>軸対称系に</u> おいては径電場は両極性やポロイダル回転と独立である事が求められる。これらの性質を満たす為に必要 な条件は、線形化衝突演算子の運動量保存性と自己随伴性であることが確認されていた。しかし、新古典 輸送モデリングにおいて標準的に用いられるモーメント法の枠組みにおいては、数値的にはその事実が確 認されていたが、解析的には近似的にしか証明されていなかった。数値計算での成立性をいくら積み重ね ても恒等的に成立することを示したことにならず、モーメント法の厳密な体系において解析的に証明する ことが重要である。

衝突演算子は線形化することで解析的に扱いやすくなるため、通常の数値計算では線形化された衝突演算 子を用いる。しかし、線形化することで本来の演算子の有する性質のいくらかが近似的にしか成立しなく なり、何を重要視するかの違いから多くの線形衝突演算子のモデルが提案されてきた。各種コードにおい てどのモデルを用いるかは、そのコードが用いている物理的な境界条件に適しているかどうかで判断すべ きであり、解析的な手法によって衝突演算子がもたらす性質をつまびらかにすることにより、モデルの選 択に対する指針を与えることが可能になる。

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。純プラズマでは電子と バルクイオンの粒子束は完全に釣り合うが、不純物が含まれると質量差から不純物とバルクイオンの粒子 束が概ね釣り合い、電子粒子束は無視できるほど小さくなるとの予測があり、それゆえ不純物新古典粒子 束はバルクイオンの新古典粒子束から算出できるとするモデルが使われていた[C. Angioni et al., Nucl. Fusion 54, 083028 (2014)]。しかし、平行電場によって駆動されるウェア粒子束はとりわけ電子で大きくな るはずであり、トカマクにおいては完全非誘導電流駆動でない限り平行電場は常に存在するため、前述の モデルの妥当性に疑問を持っていた。シミュレーションによって、電子ウェア粒子束の影響を明らかにす る。

両極性に必要な条件

モーメント法において解析的に扱いが困難なのは、粘性係数から摩擦係数を差し引いた行列の逆行列を求 めなくてはいけないところにある。N種の粒子種に対する行列は 2Nx2N の正則行列となり、この逆行列を 代数的に求めることは不可能である。そこで、逆行列を直接求める代わりに行列の余因子を計算し、行列 式はラプラス展開によって行列成分と余因子の積の和で表現される性質を用いて、所与の目的に必要な部 分のみを抽出し代数的に証明することにした。代数計算の結果、バナナ・プラトー粒子束が両極性を満た すために必要な衝突演算子の性質は運動量保存のみである事が分かった。自己随伴性の成立は両極性とは 無関係であった。また、フィルシュ・シュリューター粒子束や古典粒子束に関しては、粘性が関与してこ ないため、解析的に簡単に同様の事実を示すことができる。

粒子束とポロイダル回転の径電場に対する独立性に必要な条件

同様にして、<u>径電場に対する独立性に対しても代数的に調べた結果、こちらは運動量保存だけではなく自</u> <u>己随伴性も必要である</u>ことが分かった。両方が同時に満たされた場合においてのみ、軸対称系において満 たさなくてはいけない、粒子束とポロイダル回転の径電場に対する独立性を保持することから、衝突演算 子の自己随伴性は必要な性質である事が分かった。

シミュレーション

常に自己随伴性を満たす衝突演算子と、粒子間に温度差がある場合に自己随伴性が破れる衝突演算子をと もに実装した新古典輸送モデル Matrix Inversion を、プラズマ回転や新古典粒子・熱流束を計算できるコ ード CHARROT で呼び出すことで、実際のシミュレーション条件において両極性がどのようになるかを 検証した。なお、どちらの衝突演算子モデルも運動量保存は満たしている。CHARROT は解析コードであ るため、CHARROT に与えるプラズマの諸分布は TASK/TX シミュレーションによって事前に構築した。 電子とイオンで温度差が生じるような設定としているため、自己随伴性を常に満たすことを保証している モデルでなければ、自己随伴性が破れる条件となっている。シミュレーションの結果、どちらの衝突演算 子を用いた場合でも、丸め誤差レベルで両極性が満たされていることが分かった。さらに、周辺にペデス タルが形成され、急峻な温度勾配が付いているケースにおいても同様に満たされていることが分かった。 数値計算によっても、両極性の成立において自己随伴性を必要としていないことを示した。なお、バナナ・ プラトー粒子束に含まれるウェア粒子束は有限の平行電場の存在下において存在しているが、これが両極 性を満たす為には準中性条件も別途必要となることを付言しておく。加えて、ウェア粒子束は電子にも大 きな粒子束を生じさせ、通常のトカマク放電程度の平行電場(周回電圧)があれば<u>ウェア粒子束の寄与に</u> よって電子粒子束が他の粒子束よりも大きくなりうることをシミュレーションで示した。

今後の計画

2019 年に洲鎌ら[H. Sugama et al., Phys. Plasmas **26**, 102108 (2019)]によって高衝突領域における再現性が 向上した線形化衝突演算子が複数提案された。これらを Matrix Inversion に実装して、モデルの選択肢を さらに複線化し、加えてモデルの向上によるより精緻なシミュレーションを目指す。

成果報告

M. Honda, "Algebraic and numerical studies on the roles of momentum conservation and self-adjointness in moment-based neoclassical particle fluxes", Phys. Plasmas **6**, 092305 (2023).

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、レンズレス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、光学系を用いずデータ処理に 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. 実験方法

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 流構造データを用い、学習データを構築した。PANTA プラズマのうち 40mm 四方の領域を対象物体とし、 300mm 離れた位置から 30GHz のマイクロ波を入射、反射したマイクロ波を受信器アレイ(10mm 角サイズ、 17個×17個) で受信する設定とした。機械学習は CNN(Convolutional Neural Network)を用いた。

3. 実験結果および考察

図1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。ただし昨年度行っ たアルゴンプラズマと比較すると、細かい構造を持つヘリウムプラズマの予測一致度の方が低く、予測 が難しいことがわかった。また両方のプラズマモデルを学習することで、どちらのプラズマでも予測可 能であることが確認できた。



図1 学習結果の一例(He プラズマ)

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 研究部 佐藤雅彦

高ベータトカマクプラズマにおいては、圧力勾配に比例したブートストラップ電流が多く流れるようになる。ブートストラップ電流は、磁気軸から離れた位置において、その大きさが最大となるため、コア領域での磁気シアーが弱くなる。このような磁気シアーの弱いコア領域において、大きな圧力勾配が存在すると、低次のインファーナルモードが不安定となりうることが指摘されている[1]。インファーナルモードはトカマクプラズマのポロイダルベータ値を制限するため、その抑制は重要な課題の一つである。本研究においては、トカマクプラズマにおけるインファーナルモードの安定性解析を、MHD シミュレーション、および、運動論的 MHD シミュレーションを用いて実施した。

本解析では、簡単のために円形断面トカマクプラズマに 対して行った。図1に平衡での圧力分布と安全係数分布を 示す。中心ベータ値(β_0)が $\beta_0=5.7\%$ のときは n=3 の理 想インファーナルモードが不安定であり、β₀=4.1%の平衡 では n=3 の理想インファーナルモードは安定だが、n=3 の 抵抗性インファーナルモードは不安定な平衡となってい る。ここで、n はトロイダルモード数である。これらの平 衡に対して、MHD モデルに基づく MIPS コードと、熱イ オンの運動論的効果を考慮した運動論的 MHD モデルに基 づく MEGA コードを用いて解析を行った。運動論的 MHD モデルにおいては、イオンに対してはドリフト運動論モデ ルにより取り扱い、電子圧力は断熱則の流体モデルにより 取り扱う。密度、磁力線方向の流体速度、磁力線に平行方 向の圧力、磁力線に垂直方向の圧力は、イオンの分布関数 の速度モーメントから評価される。また、初期平衡におい ては、電子圧力とイオン圧力は等しいと仮定した。



図1. 解析に用いた MHD 平衡の圧 力分布 (実線)と安全係数分布 (点 線)。横軸は規格化された小半径。

図2に、n=3モードの線形成長率の磁気レイノルズ数(S)依存性を示す。磁気レイノルズ数が低い領域においては、MHDモデルと運動論的 MHDモデルの線形成長率はほぼ同じであり、熱イオンの運動論的効果の影響は小さい。一方、磁気レイノルズ数が大きくなり、線形成長率が低下してくると、運動論的 MHD モデルより得られた線形成長率は、MHD モデルより得られた線形成長率よりも小さく、熱イオンの運動論的効果による安定化効果が見られることがわかった。図3は、(β, S)=(4.1%,



図 2. (a) β_0 =5.7%、および、 (b) β_0 =4.1%の平衡に対す る n=3 モードの線形成長率 の磁気レイノルズ数依存 性。緑色のデータは MHD モ デル、赤色のデータは運動 論的 MHD モデルより得ら れた結果を示している。

10⁵)の場合に対する n=3 モードの揺動圧力のモード構造を示 している。この図では、圧力揺動の(m,n)=(5,3)の sin 成分に対 する cos 成分の比が最も大きくなるように、位相をシフトさせ て表示している。ここで、mはポロイダルモード数である。運 動論的 MHD モデルから得られた電子圧力揺動とイオン圧力 揺動の固有関数に大きな差は見られない。また、両固有関数は、 MHD モデルから得られた圧力揺動とほぼ一致しており、熱イ オンの運動論的効果による影響が小さいことを示している。図 4 では、熱イオンの運動論的効果が見られる(β, S)=(4.1%, 10⁷)の場合の運動論的MHD モデルから得られた電子圧力揺動 とイオン圧力揺動の固有関数を示している。ここでは、最も振 「幅の大きい m=5 と、そのサイドバンドである m=4、および、 m=6 の3つのモードのみを示した。電子圧力揺動とイオン圧 力揺動の振幅はほぼ等しい。このことは、熱イオンの運動論的 効果によりイオン圧力揺動が著しく低下する LHD プラズマの 圧力モードに対する結果[2]と大きく異なる点である。図 4(b) が示すように、圧力揺動には sin 成分が存在するが、電子の圧 力揺動とイオンの圧力揺動では、その符号が異なる。これは、 図 4(c)が示すように、電子圧力揺動と、イオン圧力揺動の位相 がずれていることを示している。この位相のずれは、不安定性の 駆動源としての寄与が異なることを意味する。ここで、圧力によ



図 3. (β_0 , S)=(4.1%, 10⁵)に対する n=3 モード圧力揺動のモード構造。 緑線は MHD モデルから得られた 圧力揺動、青線、赤線は運動論的 MHD モデルから得られた電子圧 力揺動、磁場に垂直方向のイオン圧 力揺動を示している。また、実線は cos 成分、破線は sin 成分を示して いる。(MHD モデルに対しては、sin 成分は省略している。)

る仕事を評価すると、イオン圧力は運動エネルギーを増加させる働きを持つが、電子圧力は運動エネ ルギーを減少させる働きを持つことが分かった。この解析から、トカマクプラズマにおけるインファ ーナルモードでは、電子圧力が不安定性の駆動源への寄与が低下することにより線形成長率が低下す ることが分かった。



J. Manickam, et al, Nucl. Fusion 27 1461 (1987).
 M. Sato and Y. Todo, Nucl. Fusion 61 116012 (2021).

図4. 運動論的 MHD モデルから得られた(β₀, S)=(4.1%, 10⁷)に対する n=3 モード圧力揺動のモー ド構造。(a)は電子圧力揺動と磁場に垂直方向のイオン圧力の cos 成分、(b)は sin 成分を示している。 (c)はトーラス外側の領域におけるポロイダル断面(θは磁気座標系におけるポロイダル角)での電子 圧力揺動(点線)および磁場に垂直方向のイオン圧力揺動(実線)示しており、赤線は正、青線は負 の領域に対応する。

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、ミクロな構造であるドリフト波が非線形結合をすることで、輸送 に大きな影響を与えるゾーナルフローやストリーマーなどのメゾスケール構造が発生している。ゾーナ ルフローが輸送を抑制するのに対してストリーマーは輸送を増大させるため、これらの構造の発生機構 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も非常に重要である。

九州大学応用力学研究所の直線プラズマ実験装置 PANTA では、放電条件を調整することでプラズマ 乱流中のドリフト波が非線形結合をして生じた乱流の塊であるストリーマー構造が発生する。この時、 乱流の塊を形成するドリフト波(搬送波)が媒介波と呼ばれる波と非線形結合をし、乱流の塊の包絡線 と媒介波は同じ構造を持ちながら位相関係がロックされている。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。

ところがプラズマの断面上の詳細な構造を観測するための周方向 64 チャンネルプローブアレー(測 定半径 40 mm)は存在したが、径方向を細かくかつ広い範囲で計測できるプローブアレーは存在しな かった。そこで新たに径方向 10 チャンネルプローブアレー(測定半径 20 mm~65 mm、間隔 5 mm) を製作して PANTA に設置し、計測を行った。径方向の測定が細かくなることでストリーマーのより詳 細な構造計測が期待できる。またストリーマーとは別の放電条件では孤立波が発生し、近年ゾーナルフ ローに起因する孤立波構造内の孤立渦とそれに付随する微細構造が計測されているので、その詳細がさ らに明らかになることも期待できる。

2. 実験装置

九州大学の直線プラズマ実験装置 PANTA に周方向 64 チャンネルプローブアレーと径方向 10 チャン ネルプローブアレーを設置し、孤立波が発生する実験を行った。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。その他の条件としては、軸方向の磁場は 0.09 T、内部に封入したアルゴン の圧力は 3 mTorr に調整した。このとき中心部の密度は 10¹⁹ m⁻³程度、電子温度は 3±0.5 eV のおおよそ 平坦な分布である。

実験結果と考察

64 チャンネルプローブのうちの 32 チャンネルと 10 チャンネルプローブではイオン飽和電流の揺動 (電子密度揺動に相当)を計測し、フーリエ解析をした後にある周波数での各々の相互相関を取ること でプラズマ断面内の相関と位相情報を求めた。ただし、プラズマの相関長が軸方向には十分長いことと、 プラズマの軸対称性を仮定している。図1がその結果である。ペアとなる図の左が相互相関の実部(相 関の強さと位相情報を合わせた図)、右が相互相関の絶対値である。左上→左下→右上→右下の順に、 周方向モード数 *m*=1に相当する周波数(1.2 kHz)、*m*=2に相当する周波数(2.5 kHz)、…、*m*=8 に相当する周波数の相互相関である。孤立波が発生しているため、主となる波は(*m*=1, 1.2 kHz) と その高調波成分となり、モード数と周波数は比例の関係にある。



図 1. 周方向 64 チャンネルプローブ(うち 32 チャンネル)と径方向 10 チャンネルプローブから求めた密度揺動のプラズマ断面上の相互相関(左:実部、右:絶対値)。左上→左下→右上→右下の順に、m=1に相当する周波数(1.2 kHz)、m=2(2.5 kHz)、…、m=8に相当する周波数である。

図1から分かるように孤立波は渦を巻いた構造であり、時間的には図で時計回り(電子反磁性方向) に回転している。主となる m=1 は滑らかな構造をしているが、m=2以降は所々に径方向に位相の飛 びがある。また飛びの位置では相関の値も急激に変わるか、低くなっている。孤立波は主モードとその 高調波成分で形成されているため、周方向モード数 m が高くなれば径方向波数も大きくなっているはず である。径方向波数の測定は周方向に比べると難しいが、本研究で5 mm 間隔の径方向10 チャンネル プローブアレーを導入したことでかなり細かい構造まで見えていて、期待を超えた成果が得られた。今 後もバイスペクトル解析やコンディショナルアベレージなどを用いることでさらに孤立波やストリー マー構造の詳細が明らかになることが期待できる。

4. 研究成果報告

[1] 山田琢磨他, "多チャンネル計測による直線プラズマの乱流解析", 日本物理学会 2024 年春季大会, 18aB1-3, オンライン (Mar 18-21, 2024).

5. 研究組織

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

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 研究部 沼波 政倫

研究目的

磁場閉じ込め核融合プラズマ研究において、プラズマの熱・粒子の輸送現象の理解と予測は、現在に至る重要 課題の一つである。計算機シミュレーションが位相空間分布関数を第一原理的に取り扱えるようになり、輸送 評価に対する強力な解析手法として確立してきた一方で、現実的な輸送予測に対する要求レベルは依然として 高い。こうした中、例えば、応用力学研究所共同研究における数値計測手法の開発は、その要求への一つの回 答であった。本研究課題では、多くの分野で応用が進むデータ科学や第一原理シミュレーション、数値計測手 法を用いて、プラズマ輸送現象から結論づけられる密度・温度分布の形成に対して、その評価基盤手法の開発 を行い、プラズマ分布形成と輸送現象の更なる理解を進める。

研究方法

プラズマ輸送の評価は、運動論に基づく第一原理シミュレーションが有用であるが、計算コストの増大が課題 であり、精度の高い輸送予測を如何に実効的に実現するモデルを構築するかが重要になる。そこでここでは、 シミュレーション結果から普遍的なパラメータ空間構造を探索し、その構造の数理モデル化を行う。並行して、 シミュレーションから得られた静電ポテンシャル分布をHIBP計測ツールで数値計測し、定量的な解析を行う。 輸送モデル構築と数値計測手法の開発を進め、上記の目的の達成を目指す。

研究成果

乱流の解空間構造による輸送モデリング 運動論に基づく第一原理計算から得られる乱流輸送レベルを簡約し て表現した従来の輸送モデルは外挿性に課題が残っている。ここでは、シミュレーションで得られる乱流輸送 現象の解軌道が束縛される解空間に注目し、解空間の構造の数理的な表現を試みた。従来の簡約モデルで用い ていた数理モデルを基に解空間をモデリングし、その実効性も評価した。最も実効性が高い数理式を用いると、 輸送レベルに対する帯状流の効果を表す指数の値域を大きく制限することができた[1]。

計測模擬と数値診断 プラズマ乱流の3次元的な様相を示す大域的シミュレーションデータを用いた計測模擬 において、モジュール構成の統合乱流計測シミュレータ(iTDS)による複数シミュレーションデータの統合解析 の環境を構築した。重イオンビームプローブ計測模擬(sHIBP)を、最外殻磁気面内外の磁場情報を加味してLHD 磁場配位に適用し、新古典3次元電位分布を揺らぎの経路積分効果の評価入射条件を変えることで計測した[2]。

まとめ

本課題では、巨大な計算資源を要求する第一原理計算の実効的な予測手法と実験計測を模擬する手法の開発を 通じて、数値シミュレーションや数値診断による新たな展開を図っている。今後は、開発した基盤手法を用い て、より現実的な条件におけるプラズマ分布形成に対する解析を進める。

- [1] 沼波政倫, "プラズマ乱流の部分空間表現と輸送モデリングへの応用", プラズマ・核融合学会第40回年会、盛岡市 (2023).
- [2] 糟谷直宏, "トーラス3次元計測とシミュレーションデータを用いた数値診断",日本物理学会第78回年次大会、東 北大学 (2023).

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。 結晶斜面テラス幅分布からナノスケール動的荒さおよび表面成長/後退速度の情報を得る方法の探索

大阪電気通信大学工学部 阿久津典子

研究目的

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 およびナノスケール動的荒さの情報を得る方法を探索する。さらに、テラス幅分布と表面成長/後退速 度との関連付けができれば、テラス幅分布から表面成長/後退速度を知ることが出来るので、テラス幅 分布と表面成長/後退速度との関連も調べる。

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、マクロステップ高さ分布について、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、マクロステップ高さ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、ナノスケール表面荒さ、表面成長・後退速度を予測する。

共同研究特別講演会の開催等

特別講演「生成型 AI の発展に対する付き合い方」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/lec20230719.html)。開催日時は 2023 年 7 月 19 日 (水) 16:30-17:30、開催場所は大阪電気通信大学寝屋川学舎 J 号館 J-414 教室であった。

講演題目及び講演者概要

講演題目「生成型 AI の発展に対する付き合い方」、講演者:古屋 正 氏(株式会社東京システムリ サーチ)

概要: 昨年人工知能の可能性を大きく発展させる可能性を秘めた生成 AI を利用した Chat-GPT シ ステムが発表されると、またたくまに世界的なブームを呼び、今では | 億人を超えるユーザが利用し て、色々な使われ方が考案されつつある。利用するにあたっては、色々な意見がある生成 AI ではある が、ここ数年の間に色々な利用方法が見つかるだろうし、かつ、課題であるセキュリティや権利につ いての懸念も解決の方向へ向け、新たな技術革新やルールが整備されていくものと思われる。本講演 では、この生成 AI に関する説明と、その利用に関わる注意事項、どのようなプレーヤーの盤上で利用 していくことになるかなどについて、調査した内容と今後の方向性に関する予想を発表して頂いた。

考察

ラフニング転移温度の 1/4 程度の低温の(001)特異面とそこから(111)面に傾いた面について,ナノ スケール定常成長する表面の表面荒さ(高さ高さ相関関数と等価)をモンテカルロ法で計算した。

(001)特異面について、これまで2次元核形成成長モードから核形成頻度が大きくなることにより付 着成長モードへ移行するカイネティック・ラフニング点が知られていた。このカイネティック・ラフニ ング点よりも平衡状態に近いところに熱力学的カイネティック・ラフニング点が有ること、Kardar-Parisi-Zhang (KPZ) 普遍クラスのラフネス指数を持つことを初めて明らかにした。KPZ ラフニング 転移点は、単数核形成成長モードから多数核形成成長モードへ移行するクロスオーバー点と一致するこ とも明らかにした。さらに多段差の島が多数形成されると付着成長モードへ移行する。

傾いた面では、(001)特異面と様相が異なることも明らかにした。平衡状態で傾いた面は原子的にス ムースであるが、熱力学的には表面張力波により Berezinskii-Kosterlitz-Thouless (BKT)ラフである ことが知られている。結晶成長駆動力 $\Delta \mu$ が $\Delta \mu_{co}$ =0.3 ε より小さい場合、全ての傾き角の面で BKT ラフであった。しかし、 $\Delta \mu_{co} < \Delta \mu$ では KPZ ラフ面と BKT ラフ面が面の傾きと $\Delta \mu$ によって複雑に 入り組む。これは 2 次元核形成によりテラスに島ができる速度とステップ平行列の成長速度の競合で起 こることを示した。

機械学習を活用した新材料の結晶構造探索

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

結晶中では一種または多種の原子が規則正しく配列しており、安定した結晶構造はX線回析などの実 験によって得られた結晶の逆格子マップや電子分布を基に調べることが可能である。このような実験計 測による結晶構造解析は、既存材料に対しては有効であるが、未知の機能材料の探索には適用困難であ る。また、機能材料において準安定相が安定相より優れた機能物性を有する場合があることが知られて おり、探索範囲を未知の準安定相にまで拡張することを考慮すると計算科学による結晶構造予測が必要 となる。未知の物質について構造物性や機能物性の計算予測手法として、量子論に基づく第一原理計算 が広く知られている。一般的な第一原理計算ソフトでは、任意の初期構造に対して共役勾配法による構 造緩和を行い、系の全エネルギーやバンド構造を解析する。しかし、原子の初期配置が安定構造のそれ から大きく離れていると極小点に陥り易く、また一方で未知の機能材料の探索を行うことを考えると、 原子の初期配置に依らない安定構造、準安定構造の予測手法が必要となる。本研究では、昨今の機械学 習の進歩を取り入れ、第一原理計算をベースとする結晶構造の予測手法の適応について検討を行う。具 体的には、第一原理計算により得られる原子配置と系の全エネルギーの相関(計算データ)を活用し、 遺伝的アルゴリズムによる結晶構造の計算予測を試み、任意の化学量論組成から物質の安定相、準安定 相を計算予測する手法の確立を目指す。

·解析方法

本研究では、複数の安定構造を持つことが知られている窒化ホウ素の結晶構造が未知であると仮定し、 第一原理計算および遺伝的アルゴリズムを用いた構造予測を行った。第一原理計算による構造緩和では 一般的に用いられる共役勾配法を使用し、遺伝的アルゴリズムによる構造探索では初期集団に含まれる 初期構造の数を 20 個または 50 個として最大で 50 世代まで実行した。得られた構造やその全エネルギ ー、計算時間について評価を行うことで、それぞれのメリット、デメリットについて検討した。

結晶中の原子配置と全エネルギーの相関を知るための第一原理計算の計算ソフトとしては Quantum Espresso、遺伝的アルゴリズムによる機械学習のための計算ソフトとしては Python の Atomic Simulation Environment というパッケージを使用した。

・解析結果および考察

初期構造として 2 次元 *h*-BN 構造がもつ格子定数 (a=b=2.504Å、c=6.660Å、 $\alpha = \beta = 90^{\circ}$ 、 $\gamma = 120^{\circ}$) 中に窒素とホウ素を 2 個ずつランダムで配置したもの(初期構造①)を使用し、第一原理計算の共役勾 配法による構造緩和、遺伝的アルゴリズムによる構造探索を行った。また、初期構造の格子定数のうち c 軸の長さを変化させた場合(a=b=2.504Å、c=4.220、4.830、5.440、6.050Å、 $\alpha = \beta = 90^{\circ}$ 、 $\gamma = 120^{\circ}$)

(初期構造②)について同様に結晶構造の予測を行った。ここで、*c*=4.220Åとした場合の格子定数は*w*-BN が持つものである。それぞれについて複数回実行し、得られた構造がもつエネルギーについて精度 や正確性について調査を行った。初期構造①について、構造緩和・構造探索を開始した場合、初期構造
と手法に応じてエネルギーを収束させて構造を得ることができた。一般的な第一原理計算(FPC)で 用いられている共役勾配法による構造緩和を 20 回実行したところ、最安定構造として図1に示すよう な積層構造が得られた。結果は多くが積層構造であったが、一部そうでない構造も得られた。全エネル ギー値については、しばしば再安定構造と比べて最大 10 eV 程度の差がある準安定、もしくは安定でな い構造が得られた。また、遺伝的アルゴリズム(GA)による構造探索を初期集団に含まれる初期構造 を 20 個、50 個とした場合についてそれぞれ 20 回実行したところ、再安定構造として図2 および図3 に 示すような積層構造となる結果となった。



↑ Total energy : -1,084.7228 eV 図 1 FPC による再安定構造 (初期構造①)



図 2 GA による再安定構造 (初期構造①、20 個)



↑ Total energy: -1,084.4791 eV 図 3 GA による再安定構造 (初期構造①、50 個)

·研究成果報告

初期構造①について、FPC より得られた再安定構造は、GA 結果と比較して最も安定ではあった が、得られたエネルギー値にばらつきが生じていた。これに対し、GA による結果では、ばらつき が少なく平均的により安定したエネルギーが得られていた。これは、FPC は原子の初期配置によっ ては計算途中で不安定な極小点に陥りやすいのに対し、GA は多くの初期構造に対して適応度を評 価するため、より安定な原子配置を見つけやすくなり、結果の最適化を行わないことから原子位置 のずれは極小となる。初期構造の数量に応じて計算時間は長くなるが、結果精度は向上することに なる。初期構造②について初期構造 50 個とした GA による構造最適化を実施したところ、*c*= 4.830,5.440,6.050Åにおいて初期構造①と同様に積層構造が得られる結果となった。*c*=4.220Åでは *w*-BN の特徴と一致した原子配置を得る結果を導き出せた。本研究の遂行により、結晶構造探索に 向けた機械学習の適応手法の妥当性を示すことができた。

・研究組織

奥山 哲也¹⁾,寒川 義裕²⁾,諏訪 陸矢¹⁾,草場 彰²⁾
¹⁾久留米工業高等専門学校,
²⁾九州大学応用力学研究所

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

令和5年度は、磁場閉じ込め核融合プラントの立ち上げ時に発生が予想される、熱的不安定性の制御 について検討を行った。

磁場閉じ込め核融合プラントは、超高温・超高密度のプラズマを一定時間閉じ込めることで原子核融 合反応を起こし、その反応エネルギーを利用して発電・その他を行う。しかし、原子核融合反応を起こ すには、超高温のプラズマを生成する膨大な加熱エネルギーが必要であり、最終的に原子核融合反応に より得られるエネルギーが過熱に必要なエネルギーを上回る必要がある。このとき、エネルギー利得*Q* を次の方程式で定義できる。

$$Q = \frac{P_{fus}}{P_{aux}}$$

ここで、*P_{fus}*は核融合反応出力、*P_{aux}*は加熱入力である。このエネルギー利得*Q*が1の時を核融合臨界条件と呼び、出力と入力が等しい場合である。*Q*>1の場合に初めてエネルギーを取り出すことが出来る。 プラントとして十分なエネルギーを取り出すためには*Q*を十分に大きくする必要がある。

核融合プラントの設計の際、POPCON プロットがよく用いられる。POPCON とは Plasma OPeration CONtour の略である。図1に POPCON プロットの例を示す。日本の核融合原型炉設計の値を用いて、中心温度(横軸)と中心密度(縦軸)に対し、到達Q値の等高線を示した。POPCON プロットから、核融合プラントの立ち上げは温度・密度が共にゼロの状態を起点とし、時間をかけて温度と密度を上げていく物であると解る。さらに、Qの計算には定常状態を仮定しているので、Q=-定の等高線は熱平衡状態を表していると考えることが出来る。中心温度 T_{e0} と中心密度 n_{e0} が反比例の関係にあるために、

POPCON プロットで密度を上げるには温度が下がる領域が出てくる。従って、熱的不安定な領域が現れる。POPCON プロットでは、熱的不安定な領域を青紫色でハッチした。



図 1 POPCON プロットの例。エネルギー利得を等高線として表示した。カラーマップは、熱的不安 定性の線形成長率を示す。線形成長率が正の場合は、熱的不安定な領域。

2. 熱的不安定性の非線形制御

熱的不安定性が発生した場合、中心温度が下がらないように強力に加熱する必要がある。しかし、そのような不安定性回避のための強力な加熱は、Qを高くするためには不利となる。そこで、熱的不安定 性を回避するのに、単純に強力な加熱を加えるのではなく、2次以上の高次高調波の熱揺動を加えるこ とで熱的不安定性を制御できるか検討した。まずは、0次元エネルギーバランスの式から熱平衡方程式 を導出した。次に、この熱平衡方程式に温度揺動を加え、線形安定性解析を行った。解析の結果得られ た線形成長率を、図1のカラーマップに示している。広い領域で、熱的不安定性が線形不安定になって いることが解る。

そこで、熱的不安定性を制御するために、線形信号、非線形信号を用いてフィードバック制御を行い、 熱的不安定性が制御出来るか考察した、非線形信号として、指数関数およびべき乗関数を採用した。そ の結果、非線形信号を用いた方が、単純な線形フィードバックよりも高速に熱的不安定性を制御出来る ことが解った。

まとめと今後の展望

今後、非線形制御とパターン形成の関係について考察を進める。

パワーデバイス半導体中における欠陥移動反応機構の解析

和歌山大学システム工学部 小田将人

【目的】

次世代パワーデバイス材料として注目されている窒化ガリウム(GaN)は、欠陥密度が大きく、アニール することで各種欠陥が移動・集合し大型欠陥の成長につながるという問題がある。本研究では、実験的に 注目されている VGa-VN 複合欠陥が集合する現象を扱う。欠陥が移動するという化学反応について第一 原理電子状態計算を用いてその反応の断熱ポテンシャルを解析し、ミクロな反応機構を明らかにするこ とを目的としている。

【手法】

GaN 中の V_{Ga}-V_N 欠陥を表現するために、190 原子を含む GaN スーパーセルモデルを採用した。c 軸に対 して並行な配置、非並行な配置に V_{Ga}-V_N 欠陥をそれぞれ配置し、安定構造を求めた。それらの安定構造 間を原子が移動する欠陥反応に対する断熱ポテンシャルを評価した。具体的には、第一原理電子状態計 算及び、その計算結果に対して NEB(Nudged Elastic Band)法を用いて化学反応に対する断熱ポテンシャル を用いた。

【結果・考察】

注目する欠陥反応は、Ga 原子が移動する場合と、N 原子 が移動する場合が考えられる。それぞれの反応に対する断 熱ポテンシャルを図に示す。N(Ga)原子が移動する場合の 反応障壁は 3.3 (2.2)eV であった。これらの値は、先行研究 の VGa 単空孔周りの欠陥反応に対する障壁、及び Si 中の 置換型不純物移動に対する反応障壁と同程度である。よっ て、GaN 中において本研究で注目する欠陥反応は十分起こ りうる。またその結果、V_{Ga}-V_N欠陥は GaN 中を移動して いると考えられる。



【研究成果】

[1] Jota Nakamura, Masato Oda, and Yoshihiro Kangawa,

'Adiabatic potential for conformational change of VGa-VN complex defects in GaN', 14th International Conference on Nitride Semiconductors, TuP-CH-29(Poster), Fukuoka.

[2] 中村 城太、小田 将人、寒川 義裕、'窒化ガリウム中における V_{Ga}-V_N周りの欠陥反応解析'、第71回 応用物理学会春季学術講演会、25a-P03-9、東京都市大学.

【研究組織】

小田将人(和歌山大学・准教授):計算の実行、解析 中村城太(和歌山大学・M2):計算の実行、解析 寒川 義裕(九州大学・教授):計算の実行、解析

40

図:V_{Ga}-V_N移動に対する断熱ポテンシャル

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

磁場閉じ込め核融合プラズマ内部における乱流現象を理解するため、 プラズマと非接触なマイクロ波を用いた計測手法の開発を行っている。 特に非等方な流れを観測することを目的とし、ドップラーレーダーと フェーズドアレイアンテナを組合わせた計測手法の適用を試みた。本 研究では通常のフェーズドアレイアンテナとは異なり、周波数を走査 することで放射方向を制御する周波数走査型という手法を 3D 金属プ リンタで実現した(図1)。前回、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行ったので、今回はこれ



図1:フェーズドアレイアンテナの放射特性

2. QUEST 装置への適用

まず、Ku-band (12-18GHz) のフェーズドアレイアンテナを QUEST 装置の水平位置に設置し(図 2)、鉛直方向にビームをスキャンできるよ うにしプラズマ実験に適用した。しかしながら、ドップラーレーダーと しての優位な信号を得ることができなかった。主たる要因は想定よりも 電子密度が低い事であると考え、X-band (8-12GHz) のホーンアンテナ を用いて計測を行ったところ、プラズマ放電波形に従ったレーダー信号 を得ることができた (図 3)。そこで、新たに X-band に対応したフェー ズドアレイアンテナを製作することにした。アンテナが大型化するため、 アンテナデザインおよび材料を変更し試作を行った後、造形した(図 4)。 来年度、QUEST 装置へ再敷設し、プラズマ実験での測定を目指す。

3. 論文と学会発表

論文発表

 T. Tokuzawa, Y. Goto, *et al.*, "New Q and V-band ECE radiometer for low magnetic field operation on LHD", EPJ Web of Conferences 277, 03008 (2023).



図 4:新たに開発した X-band フェーズドアレイアンテナ

次の学会にて発表を行った。

- 1. 徳沢季彦、他, "LHD における乱流の非等方性を検出するためのミリ波散 乱計測", 40th プラズマ・核融合学会年会, 2023 年 11 月 27~31 日.
- 2. T. Tokuzawa, *et al.*, "GAM eigenmode observation by ECE Imaging diagnostics on LHD", 49th European Physical Society Conference on Plasma Physics 2023, July 3-7, 2023.
- 3. T. Nasu, T. Tokuzawa *et al.*, "Electron-scale turbulence characteristics in LHD plasma", IAEA-FEC2023, Oct. 16-21, 2023.



図 2 : Ku バンドのフェーズドアレイアン テナを QUEST 装置に設置



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

洋上を吹く風は平均風速が高く乱流強度が低いため,洋上風車は陸上風車と比べて発電量が高く,出力 変動が小さいことが利点である.一方,海岸から比較的近い距離に建てられた洋上風車は,海から吹く風 を受けることもあれば,陸から吹く風に晒されることもある.そのため,風向によって風車への流入風の 特性が変化する.風特性が変化すると,風車の運転制御に影響を及ぼす上に,風車荷重にも影響を与え寿 命が短くなる可能性がある.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、実機の陸上風車から得られた風車運転挙動と風特性 を整理することにより、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 速計で観測された風の1秒データを解析した.また、風車の SCADA に記録されている風車回転数とピッ チ角度の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 ードのピッチ角度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 ではピッチ角度制御を考察できないためである.この観測風のデータと風車運転データを整理すること により、ウィンドファーム内の風特性がピッチ角度制御に及ぼす影響を考察した.

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.

図1に解析領域の鳥観図を示す.風を風車に適切に流入させるため,計算領域は風車から十分上流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24km×15km×3.492kmの空間を設定した.計算領域内の最大標高は840.35m、最小標高は28.3mである.解析方位は16方位としたが、本報告では卓越風向である西風の解析結果を示す.地形標高データは、国土地理院発行の空間解像度10m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480×400×80であり、総メッシュ数は15,360,000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17.5m、y方向が13.5m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2.4m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、当該サイトが複雑地形であることを考慮してα=0.25を用いた.流入風速は本サイトの年間平均風速に近い8.0m/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 812.05 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.

4. 結果と考察

本報告では、ウィンドファーム内の2基の風車 WT-A と WT-B に注目し、風特性による風車挙動の違い について示す.図2に風速に対する風車発電機回転数を示す.図から、WT-B は WT-A と比べ、風速域 8~ 10 m/sのピッチ制御範囲において、風速に対する発電機回転数が大きい.このことから風速が同じでも 風車ごとに風車に流入する風エネルギー量が異なる可能性がある.

図3に発電機回転数に対するピッチ角度を示す.図から,WT-AとWT-Bは、定格発電機回転数2100 rpm 付近において、発電機回転数に対するピッチ角度に差があることがわかる.一般に風車のピッチ角度は 発電機回転数を基準に制御されている.しかし、図3からは風車の違いによって、つまり風車に流入する 風の違いによって、発電機回転数とピッチ角度が1対1に対応していないことがわかる.このことから、 風速変動にともなう風車への流入エネルギー量の変動等の要因により、ピッチ角度制御の応答性が風車 ごとに異なる可能性がある.したがって、風車ごとの風エネルギー量を比較するため、RIAM-COMPACT を 用いて鉛直方向の速度分布を調査する.

図4はWT-AとWT-Bの位置での風速の鉛直分布を示す.図より,WT-BはWT-Aと比べ,ロータ面内で速度勾配が小さいことがわかる.一方,図2よりWT-BはWT-Aと比べ,同じ風速に対する発電機回転数が大きい.そのため,WT-BはWT-Aと比べ,同じ風速に対してロータ面を通過するエネルギー量が大きいと考えられる.図4からは,WT-AはWT-Bと比べ,ロータ面内の速度勾配が大きいため,ロータ上部と下部で異なる風速でブレードが風を受けていると考えられる.また図3で同じ発電機回転数でありながら,WT-AとWT-Bのピッチ角度に違いが生じたのは,図4で示されるように,WT-AはWT-Bと比べ風車1回転中に受ける相対速度の変化が大きいため、ピッチ制御の応答が遅れている可能性がある.





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り、それを基にシミュレーションから計測模擬を行ってき た。

本年度は、風車近傍の乱流シミュレーションデータ得られた計測模擬信号からドローンの飛行 経路を設計し、中部電力御前崎発電所における風車実機にて計測を行った。

風車乱流シミュレーションデータ

内田博士(九大応研)より乱流シミュレーションデータをご提供頂いた。直径 D=88m の風車に 8m/s の風が当たった場合のシミュレーションである。各座標値は半径 R=44m で規格化し、格子 解像度は 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。Fig.1 にデータの スナップショットを示す。Fig.2 は風車の中心から上下左右に速度の時間平均分布をとったもので ある。左図が上下、右図が左右を円周方向にそれぞれ表示したものである。図より、中心に近い場 所では 0.6、風車ブレードの半径を越えると 1 になりその後、下のみ急激に風速が小さくなり地表 付近では 0 になっている。上下方向には数割程度非対称性があると考えられる。



Fig. 1: 風車後方におけるスナップショット(左図). 時間平均風強度の左右・上下非対称性の構造(右図).

実機における観測

実験は中部電力御前崎風力発電所で行った。風車の直径 D = 80m の間隔を空け、風車の前方と 後方にそれぞれドローンを静止させる。後方ドローンはシミュレーション解析より得られた上下の 非対称を実測すべく上空 135m~10m までの間を移動させ、それぞれの高さでの前方ドローンに対 する相対風速を計測した。

Fig.3 は、高さごとの速度の時間平均分布をとり、風車前方の風で規格化したものをシミュレー ションと比較したものである。上がシミュレーション、下が実測値である。図より、実測結果は全 体的に風速が小さいがシミュレーション結果と定性的に一致していることがわかる。また、シミュ レーション値が風車領域内で 30%ほど減衰しているのに対し実測値では 50%ほど減衰しているこ とがわかる。



Fig.3 風速の時間平均(左図)と標準偏差(右図)の鉛直方向分布 (上図:シミュレーション 下図:実測値)

Fig.3 の右図は、高さごとの風速の標準偏差を求めたものである。こちらも上がシミュレーショ ン、下が実測値である。風速が一定であることは乱流などがない一様な風域を表すため、この標準 偏差は乱流成分の強度を反映している。図より、こちらも時間平均と同様に、シミュレーション結 果と定性的に一致している。実測結果はシミュレーションに比べ乱流成分を数倍程度含んでおり、 このことよりシミュレーションは乱流成分を過小評価している可能性がある。シミュレーションで は風車に一様な風速の風が当たる場合を考えているが、実際の風は周辺環境や気象条件などにより すでに乱流となっている。実機で、より強い乱流が生じる原因は今後考えるべき重大な問題である。

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、ドローンの飛行経路設計を行い、中部 電力御前崎発電所における風車実機で観測を行なった。風車領域で風の減速領域が見られ、定性的 にはシミュレーションと同様の構造が見られた。定量的には、実機の方が風の減速率が大きいが、 これはシミュレーションで乱流成分を過小評価している可能性がある。 洋上風力発電が沿岸空港の低層風況に及ぼす副次的効用についての検討

宇宙航空研究開発機構 牧緑

1. 研究の背景と目的

日本列島には沿岸空港や離島空港が多い。沿岸部の強風、周辺の岸壁、山地、丘陵から成る複雑起 伏地形により発生する地形性乱気流等、風は航空輸送の安全性を脅かす気象リスクと認識されてい る.この空港低層の風環境を、近年導入が加速している洋上風車の配置設計により整えることがで きれば、風力発電の意義価値を一層向上することができる。本研究では、洋上風車の副次的効用を 調査する活動の準備として、実在空港周辺の風観測やフライトデータを用いて、RIAM-COMPACT によ る乱気流やシア風の再現可能性を検証する。

研究の方法

運航安全上の不具合事象が多発し、エアラインより調査依頼のあった、奄美群島南西部沖永良部空港 滑走路上の横風シア、および山口県岩国錦帯橋空港進入着陸経路における山岳波について、その正体を 解明するため、RIAM-COMPACT による風況 LES 計算と精度検証のための現地風観測を実施する。

成果の一例

沖永良部空港における南東風系で多発する着陸接地直後の機種方位制御の不具合事象について、計算 より得られた滑走路上の強風域・弱風域の位置が、パイロットコメントおよび現地風観測(空港風速計2 基と超音波風速計4基)と概ね一致していることを確認できた。



5. まとめと今後の課題

岸壁の複雑地形により発生する乱気流や横風シア、飛行機が遭遇した実現象を、RIAM-COMPACT により再現できることを確認した。洋上風車敷設の2次効果についての検討までは至らなかったが、来年度も空港風環境を改善する可能性について検討を継続したい。

九州大学 応用力学研究所 共同施設利用 2023 年度 報告書

弘前大学 地域戦略研究所 本田 明弘

1. 揚力線理論による NREL 5 MW RWT での後流計算^[1]



図1. 風車と後流に放出された揚力線モデル



出力制御方式:ピッチ制御 可変速 定格出力:5MW カットイン風速:3 m/s カットアウト風速:25 m/s



図2.風車の運転条件と計算条件

上記の風車モデルに対して、接近流における風速の高度分布(シア)を変化させて、後 流における流速分布を比較したものが図3である。 なお、シアの大きさはべき指数αで 表す。

図3からは、べき指数αの増大とともに後流は流下するにしたがって上昇する傾向にあ り、風車設計の国際規格で用いられているα=0.2 では後流の及ぶ範囲は縮小していること が明確である。

このことは、陸上に設置された風車で観測される後流に比べて、今後設置が計画される 洋上風車で予測される後流の及ぶ範囲は増大する可能性があることを示している。



図3.シアの変化による後流の流速分布の変化

2. 小型風車の後流の可視化と流速分布^[2]

実機の風車の後流を可視化するために対象とした小型風車の全景及び寸法を下図に示す。



図4. 対象とした小型風車

風車の実機の大きさは小型風車でも数10m、大型風車になると数100mあり、通常の カメラで撮影した画像は距離に応じて歪むこととなる。一方で撮影速度は比較的ゆっくり した流れの変化であり高速度撮影は必要ない。

図6(上段)には、地上に設置したカメラに広角レンズを取り付けて撮影された画像であ り、各種の渦が捉えられているものの左端に見える風車のタワーが傾斜しているのが判る。 これに対して図6(下段)にはレンズ補正と遠近法による画像ひずみの補正を施した画像 に PIV にて流速を算出したコンタを重ねた図を示す。左端の風車タワーが垂直にとらえら れている。また流速のコンタからはナセル風下での流速低下と、流れ方向の流速の減速傾向 が見て取れる。更に1章で予測された後流が流下方向に上昇する傾向も認められる。



図6. 風車後流の可視化結果(上段:画像補正なし、下段:画像補正あり)

3. まとめ及び今後の課題

今回の研究でのまとめ及び今後の課題を以下に記す。

- 運転中の風車の風下に生じる後流は特に洋上風力のリスク要因の一つであり、その特性を把握するために、詳細な運転状況を考慮することが可能である揚力線理論を用いたシミュレーションを行い、陸上に比べて洋上での後流範囲が広がることが明らかとなった。
- 2) 実風車における後流を可視化した結果、翼先端から生じる渦の挙動を見ても現実の現象は非定常性が強く、さらに風下に流下するにつれて上昇してゆく傾向が認められた。
- 3) 実風車に作用する降雪に投光器を照射して得られる画像は、レンズおよび遠近法 による補正が必要であるが、高速度カメラでの撮影は必要なく、通常のカメラでの計測 が可能である。
- 4) 種々の歪みを補正した動画を PIV にて流速を評価することができたが、投光器に よる光が降雪に照射されて生じる輝度が一様ではなく、これが計算される流速に影響す ることが判明した。(輝度が弱い部分は、流速も低いと計算される。)

また今後検討が必要と考えられる項目を以下に示す。

- 5) 画像のバックグラウンドの輝度が均一でない場合の PIV 処理方法。
- 6) 種々のウェイクモデルの適用性確認。
- 7) 後流特性が荷重、発電に及ぼす影響に関する検討。

参考文献

[1] 本田 明弘、久保田 健、笹沼 菜々子、大槻 映玲永、「風車後流に及ぼす諸因子に関す る検討」、第 45 回風力エネルギー利用シンポジウム 、2023

[2] 大槻 映玲永、 本田 明弘、 久保田 健、 笹沼 菜々子、岡崎 衆介、「降雪を 用いた実機風車の後流の可視化手法に関する研究」、第 45 回風力エネルギー利用シンポジ ウム、2023

RIAM-COMPACT の後流モデルの検証

九州大学情報基盤研究開発センター 小野謙二

目的

ウインドファームの発電性能を予測するため風況解析が実施されるが、風車ブレードまでを精密に再現 したシミュレーションは計算コストが高いため現実的ではない。そのため、後流モデルによる計算時間 の削減とともに GPU および OpenMP による高速並列計算について取り組んだ。

計算方法

RIAM-COMPACT の 3 次元版(アクチュエータラインモデル(ALM))と 2 次元版(ポーラスディスク モデル(PDM))の 2 つのコードについて高速化を行った。3 次元コードの基本的な解法は C++でスク ラッチでコーディングし、差分法、三次精度風上スキーム、Euler 陽解法、Fractional Step 法、ALM に よる構成である。2 次元コードは f90 をベースにスタガード格子差分法、三次精度風上スキーム、Euler 陽解法、Fractional Step 法、PDM によるコードである。

計算結果

3 次元コードは九大スパコン ITO サブシステム B(NVIDIA Pascal x 4GPU)向けに、MPI-GPU の並 列化を行った。4 ノードを用いた並列計算では最大 12 倍の高速化を達成できた。一方、2 次元コードは 圧力 Poisson 反復を SIMD 化可能な RB-SOR の実装に変更、データコピーをポインタ交換に変更、時 間平均操作の変更などで、オリジナルの逐次実行 11,264 秒から 7,074 秒へ短縮した。また、36 コア利 用時には 350 秒へと時間短縮できた。スケーラビリティの点からは、36 コア時に 21.4 倍の性能が得ら れた。また、風車後流 5D の位置での速度プロファイルを比較し、最大誤差 0.02%の一致度で計算結果 の同一性を確認している。







⁵D 位置での速度プロファイルの比較

今後の展望

開発したコードを更に複数風車への計算に拡張し、様々な配置での干渉状況を調査していく予定である。

養殖用浮体に設置された多連垂直軸風車の空力応答

弘前大学·地域戦略研究所 久保田 健

目的

海上養殖における環境モニタリングや遠隔通信用の電源として垂直軸風車の適用を想定した場合、超小型であ れば養殖用浮体に直接設置が可能であるものの、必要電力量の確保については状況に依存するも難しい可能性が 高い。システムの重心を過度に高めることなく電源増強を図るには風車の多連装化が真っ先に思いつかれるもの の、風車間距離や主風向に対する互いの配置によっては干渉影響が生じる。本研究では、垂直軸風車を近接配置 した際の各風車の空力性能の変化について調査することを目標とし、図1左の拡大図に示す形状特徴を有する垂 直軸風車を0.5D離して2基配置した場合(図1右)の2次元 CFD 計算を行った。

方法

計算には ANSYS-Fluent を用い、2 次元 RANS モ デルは SSTk-ooを使用した。計算領域は風車間の中 心を基準点に上流 7.5D、左右(図 2 では上下)そ れぞれ 7.5D、下流 15.5D とし、流入風速は 7m/s に 固定した。翼表面近傍はレイヤー16 層で、予備計 算から y+値が 1 未満となるように第 1 層厚みは 2.2x10⁻⁵m とした。全体の Cell 数はおよそ 3.8x10⁵ で ある。風車の計算周速比 (TSR) については、単機



図1 垂直軸風車(8 枚翼)の形状断面図と2D計算3 仕様.

の風洞実験でパワー係数極大値を示す TSR が 0.3~0.4 であることから 0.2~0.6 の範囲で 0.1 刻みとし、これを上下 風車で組み合わせることに加え、単基での順回転方向の組合せとして Case-A~C の 3 パターンを計算した(図 1)。

結果と考察

図2には Case-A~C における風車回りの流れ場を示す。風車単基では上流側の7~9時角で反回転方向のトルクが発生し、翼に到達した流れは風車内外に分岐するが、外の流れは増速する。この流れ場の活用を図ったものが2基とも順回転の Case-A、派生が上流から見て外向きと内向き回転の Case-BとCである。2風車の平均値で性能を比較すると風車間距離0.5Dの今回のケースに限れば、パワー係数は Case-A で漸増するにとどまった。一方でCase-Bでは1.5倍を超える傾向が見られ、Case-C は低下した。

現段階では、パワー係数の変化は風車仕様の違いによる風車内に流入する流れに要因があると認識されるが、 今後は3D計算や実験と組み合わせ、本事象をさらに精査してゆく。



図2 各周速比で回転させた際の2連風車回りの圧力場コンターと速度ベクトル(下方の数値は周速

風況シミュレーションの高度化のための気象モデルと CFD モデルの結合手法の開発

筑波大学計算科学研究センター 日下 博幸

1 目的

一般に風力資源評価において、風速の鉛直プロフ ァイルの鉛直外挿に使われているのは、べき乗則と 対数則である.べき乗則・対数則に従わない風速の 鉛直プロファイルの代表的なものとして、強安定時 の風速の鉛直プロファイルと、夜間に発生する、 Nocturnal Low Level Jets (下層ジェット)があげられ る.

本研究では、より精緻な風力資源量評価を目的に、 複雑地形かつ沿岸地域の北海道北東部に位置する、 北見市常呂町周辺のべき乗則・対数則に従わない風 速の鉛直プロファイルについて調査を実施した.

2 実験方法

本研究を行うにあたって、北海道北東部に位置 する北見市常呂町に LiDAR (ZephIR 300) を北緯 44°4′38.28″、東経 144°3′36.36″ (森林地帯) に設置 した. 観測値は 10 分平均値の風速・風向である.

以上のデータから森林域のべき乗則・対数則に 従わない鉛直プロファイルを安達(1981)を参考 に抽出した。そのうち山を越える事例である1事 例(南風事例)について、WRFを用いた気象シミ ュレーションを実施し、解析を行った。

- 3 結果と考察
- 3.1 べき乗則から外れる時間帯

べき乗則のプロファイルから外れる時間帯では 安定成層が形成されていた.また WRF のシミュレ ーション結果である図 1 から,観測地点の風上に 位置する北見と阿寒湖周辺の風が観測地点で収束 している,もしくは北見からの風が観測地点付近 で増速している可能性があった.

3.2 べき乗則に合うプロファイルに戻る時間帯

べき乗則に合うプロファイルに戻る時間帯である 12 時 10 分時点では、WRF の地上風速・風向の 時系列である図 2 より、寒冷前線が観測地点を通 過していた.また、WRF では、観測地点において 中立成層が形成される結果が得られた(図 3).そ のため、寒冷前線の通過で中立成層が生成された ことが本事例において、べき乗則に外れるプロフ ァイルからべき乗則に合うプロファイルに戻った 一因であると考えられる.

2019-07-27 10:00 (200 mASL)



Time (JST) 図 2 WRFの10m高における風速の時系列 (青実線:風速,灰色点:風向)



図 3 WRF における 2019/7/29 12:10 の温位[K]の南北 断面(赤三角は観測地点を表す)

4 研究成果報告

山越え気流事例でべき乗則から外れる事例について、結果と考察で述べた知見を得た.本研究と 平行して、WRFを入力値にできる RIAM COMPACT の開発も実施した。来年度は統計解析 とWRF と RIAM COMPACT を結合したシミュレー ションでべき乗則から外れる要因を調査する予定 である。 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、CO₂と H₂O 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、主にドローンの バッテリから排出される熱によって GMX500 の温度の計測値にどのような影響を及ぼすのかを明らか 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、任意の風速・風向に 対してバッテリからの排熱によりドローンに設置する温度計がどのように影響を受けるのか定量的に 評価した。風速は1m/sから最大10m/sまでの範囲で2m/sずつ、風向はドローンの姿勢(Yaw)角を 45°ずつ変えることで全方位の各風速に対して評価した。またドローンの熱的な影響を受けない位置を 把握するために、自己記録型の小型温湿度計(InterMet Systems 社, iMetXQ2)をGMX500の頭部と ドローンの前面下部にも設置した。



図2 境界層風洞による実験(左)と小型の温度計(iMetXQ2)の設置位置(右)の様子

3. 実験結果

図3はドローンの姿勢角を0度とし、風速を1~9 m/s まで2 m/s ずつ2分毎に風速を変化させた時のドローンの頭部(Upper)と前面下部(Down)、および参照地点(Reference)における iMetXQ2で計測した各温度の時系列を示す。実験結果、9時43分30秒にホバリングを開始した直後、ドローンで計測した温度の変動が大きくなる様子がみられ、動揺の影響の大きいUpperの方が影響の小さいDown よりも温度変動が大きいことから、この原因はドローンの動揺によるものであると考えられる。また参照温度に対して、UpperとDownともに有意な差はみられず、これらの位置におけるドローンの排熱の影響は限定的であることが示唆される実験結果を得ることができた。



図3 ドローンの姿勢(Yaw)角が0度における各風速に対するドローンの頭部(Upper)と前面下部 (Down)、参照地点(Reference)での計測温度の時系列

図4はドローンの姿勢(Yaw)角を0~180°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の頭部と参照地点で計測した温度の差を示す。実験結果、 どの風向風速に対しても温度差は±0.5℃以内の範囲内にあり、上昇するドローンの排熱は風速が弱い時 にドローンの頭部の温度計測に与える影響が大きいと予想していたものの、各風速・風向に対して有意 な傾向はみられなかった。風速が増加するにつれて温度差のばらつきは小さくなり、4 m/sの風速まで 大きくばらついている。これは5 m/s 以上でドローンの動揺が小さくなったことが原因と考えられる。



図4 各風速・風向に対するドローンをホバリングさせた状態でドローンの頭部と参照地点で計測した 温度の差

4. 研究組織

研究代表者・近藤文義(海保大)/協力者・杣谷啓,足立尚哉(大同大)/世話人・内田孝紀(九州大)

粉体ターゲットプラズマプロセスを用いた2次元傾斜機能性薄膜の作製 Preparation of low-cost hydrogen embrittlement resistance thin films by plasma process 佐世保高専,川崎仁晴、竹市悟志,小島圭太郎 National Institute of Technology, Sasebo College H. Kawasaki, S. Takeichi, K. Kojima

1 概要

「水素エネルギー」は地球温暖化防止に効果的 であるだけでなく、自然環境に左右されない高い 安定性を持っているため、我が国で最も友好的な 次世代エネルギー源として期待されている。しか しながら、水素関連機器は、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ため、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。 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、 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、 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。同時に 基板に対して水平方向に変化する薄膜の作製も 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 TiO₂ と SUS304 の混合粉体を利用して成膜した。このと き、TiO₂/SUS304 の混合比を変えて薄膜を作製 した。成膜条件は、雰囲気ガスとして Ar、圧力を 10Pa とし、入力は 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。薄膜の水平方向の分布は、ターゲットに穴を 開け、各穴に濃度の異なる混合粉体ターゲットを 設置して成膜を行った。



図1 実験装置

3 実験結果

(1) 膜厚方向の傾斜機能性薄膜

TiO₂/SUS を混合させた粉体ターゲットを用い て Ti 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 Ti/Fe の比と、ターゲ ット中の TiO₂/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 TiO₂/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、TiO₂/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 TiO₂10%/SUS90% に変更し、同様に1時間成膜した。この方法で、 混合比を変えながら TiO₂20%/SUS80%と繰り返 し、最後に TiO₂100%で成膜した。成膜結果を、 XPS 図 3A利用セズを用びて深き分布にエッチン 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。

(2)水平方向に傾斜機能性を持たせた薄膜作製

図3に示すような、混合比の異なる TiO₂/SUS の粉体を同じターゲットホルダー上に設置し、1 度の成膜で基板に水平方向に傾斜機能性を持つ 薄膜が作製可能かどうかを検討した。膜厚方向の 成膜と同じ条件で、成膜を行った結果を図4に示 す。写真から横方向にグラデーションを持つ薄膜 の作成が可能となった。中央部分と端部分の組成 を調べた結果を図5に示す。場所によって組成比 が異なることが示唆されたが、制御性に関しては 十分とはいえない結果となった。これは、スパッ タされた粒子の広がりの影響だと考えられる。

4. まとめ

TiO₂/SUS304 の粉体ターゲットを用いて、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 3 横方向に傾斜した薄膜作製用ターゲット



図4 作製した薄膜の様子



図 5 XPS による分析結果

謝辞

ホルダー

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. 60 SAAB10 (2021).
- [2] H. Kawasaki etal, Jpn. J. Appl. Phys 61 SA1019 (2021).
- [3] T. Satake, etal, e-Journal of Surface Science and Nanotechnology, Vol. 21(3), p. 218 (2023)
- [4] T. Satake, etal, Archives of electrical engineering, Vol.72(2), pp.555-563 (2023).

ラジカル含有リチウム酸化物薄膜の水素および二酸化炭素吸収・放出過程

Absorption and desorption processes of hydrogen and carbon dioxide 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Li₂ZrO₃は多量の水(H₂O)およびHを吸収し、その吸収されたHの解離温度は約100[°]C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Li₂ZrO₃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、Li₂ZrO₃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)法およびガスクロマトグラフィー(GC)法により、Hの解離温度を調べ、Li₂ZrO₃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(Li₂CO₃)および酸化ジルコニウム(ZrO₂)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 Li₂ZrO₃ 試料を作製 した。Li₂ZrO₃ 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/cm³ 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 H₂O および CO₂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 1×10⁵ 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)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 法および GC 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 Li₂ZrO3 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 スペクトルより、Pt-Li₂ZrO₃ 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 Li₂ZrO₃ 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。この事実を明らかにするために、試料中の H 濃度を ERD 法により測定した。その結果、多量の H が試料作製時に吸収されることがわかった。この H 濃度は350℃までの真空加熱によりほとんど減少するが、空気暴露時間の増加とともに徐々に増加することがわかった。従って、試料の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判明された。

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-Li₂ZrO₃ 試料について、室温から 400~500[°]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-Li₂ZrO₃ 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、



図1 室温で空気暴露された((a), (b))Li₂ZrO₃および((c), (d))Pt-Li₂ZrO₃試料におけるGCスペクトル。

Pt-Li2ZrO3 試料中の捕捉H濃度は、約100℃以下の低温で急激に減少することがわかった。

次に、GC 法を用いた放出ガス分析が実施された。TDS 測定と同様に、約 5000 時間(約 200 日間)まで空気暴露された Li₂ZrO₃ を試験管に導入し、ロータリーポンプおよびターボ分子ポンプの排気システムにより約 1×10⁵ Torr まで真空排気した後、8 ml/min の流量でAr ガスを流しながらマントルヒーターを用いて 4[°]C/min の昇温速度で 350[°]C まで加熱した。Li₂ZrO₃ から放出されたガス種の判別は、カラム内へ一緒に導入されたキャリアガス(Ar あるいは He ガス)の熱伝導度と放出ガスの熱伝導度の差によって決定された。キャリアガスがAr および He の場合、それぞれ H₂、N₂、O₂、CH₄および CO₂、C₂H₆、H₂O、C₃H₈が主に計測された。キャリアガスにAr および He を用いて、約 200 日間の空気暴露された Li₂ZrO₃ を Ar 雰囲気中で加熱したときに同時に測定された GC(Ar)および GC(He)スペクトル をそれぞれ回 1 (a)および(b)に示す。横軸は計測時間(s)、縦軸は信号強度を(mV)を表す。図 1(a)中の 28 および 38 sec のピークおよび図 1(b)中の 18 sec のピークは、Li₂ZrO₃からの放出ガスによるものではなく、ガスライン、カラムおよびキャリアガス中に初めから含まれている空気(O₂および N₂)を表す。CO₂および H₂O だけでなく、H₂、CH₄、C₂H₆および C₃H₈が空気暴露された Li₂ZrO₃ から放出していることがわかる。次に、試料表面に Pt をコーティングした Li₂ZrO₃を Ar 雰囲気下で加熱したときの GC スペクトルを図 1 (c)および(d)に示す。図 1 (c)および(d)より、Pt コーティングされた Li₂ZrO₃を加熱すると、H₂、CO₂および H₂O が放出されることがわかった。一方、Pt コーティングされた Li₂ZrO₃ を加熱すると、H₂、CO₂および H₂O が放出されることがわかった。での結果より、炭化水素系ガスの生成には Li₂ZrO₃ 素料表面での反応が重要であることがわかった。

<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-Li₂ZrO₃試料の H₂O 分解、H の吸収および蓄積特性について、WG、ERD、TDS および GC 法を 組み合わせて調べた。Pt-Li₂ZrO₃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 ヶ月)で Li₂ZrO₃試料の飽和値の約 5 倍に達することがわかった。さらに、H₂が約 100℃以下の低温で放出されることがわかり、低エネルギーによる H₂O 分解、H 吸収および H₂放出が判明された。</u>

60

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)が水を混合することが、水槽実験により報告されている(例えば, Babanin and Haus, 2009; Dai et al. 2010)。我々が独自に行った直接数値計算の結果では,波の粘性減 衰に伴う波から平均流への運動量輸送(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,水が混合されることを確認した(今村, 2023)。しかし,数値実験で再現された混合強度は、先行 研究の水槽実験から見積もられるもの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に引き続き実施した。今年度は,昨年度までのマイクロバブル を用いた可視化と水温計アレイによる成層構造変化の計測に加えて,流速の短周期時間変動を超音波流 速計で計測することで乱流を直接的に評価することを試みた。以下では超音波流速計の計測について報 告する。

実験方法 周期1秒(波長1.56 m),振幅 3cm または4 cm の波を造波機で発生させ,造波器からおよそ29m の 位置に設置した超音波流速計(Nortek 社製 Vector)で計 測を行った。深海水槽では散乱体が少なく,そのままでは 計測ができないことが前年度の試験的な計測で分かって いたため、水槽の水を汚さないマイクロバブルを発生させ る装置を技術職員の野田氏に新規に作成して頂き、マイク ロバブルを散乱体として計測を行った(図1)。計測を続け るとマイクロバブルが音波の送受信部に付着し,感度が悪 くなることが判明したため,計測前にセンサー部のマイク ロバブルを綿棒などで取り除いて実験を行った。流速計の 計測部の水深は(静水時の水面から測って)28cm である。

実験結果 図2にマイクロバブルを散乱体として計測した流速変動の一例を示す。周期1秒の波による軌道運動流



速(流速 u,w)が良く捉えられていることが分かる。周期1秒の変動におけるコヒーレンスおよびフェイズも軌道運動流速と整合的であった。流速変動のエネルギーを振動数別に表示したエネルギースペクトル(図3)においては、周期1秒(振動数1)の軌道運動流速に加えて、高周波領域に乱流による高波数域へのエネルギー輸送を表す慣性小領域に対応する-2/3のべき乗領域が流速 u と流速 w に見られた。これより、軌道運動に加えて乱流運動も計測できたと判断した。ただし、エネルギーは u の方が w よりも2桁程度大きい結果となった。この原因として、計測深度(28cm)における温度成層の影響が考えられるが、より詳細な検討が必要であり今後の課題である。



図2 vector で計測した流速変動の一例。左側が上から波の進行方向成分(u)、それと直交する水平成分(v)、延長成分(w)の時 系列。右側がuとwのコヒーレンスとフェイズ。横軸が時間、縦軸が周波数。



謝辞 技術職員の野田氏,油布氏,前田氏にはマイクロバブル発生装置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に続き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2回生 今村 春香

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・大学院工学研究科 堀史説

はじめに

金属材料中の水素原子の挙動は様々な分野で興味深い研究対象である。特に原子力材料 分野では核融合反応炉でのプラズマ壁相互作用において照射損傷である欠陥と水素の相互 作用が重要な問題の一つである。すなわち材料中の水素の挙動は熱伝導や強度などの材料 特性と密接な関係を有している。また水素原子の材料中での振る舞いとしては、合金種に 強く依存しているが一部の金属で空孔型欠陥内に複数個の水素を捕獲することなどが第一 原理計算などから示唆されている。このような水素一欠陥相互作用を基にした材料特性は 次世代エネルギーとして期待される水素貯蔵や水素透過膜などへの応用も検討されている。 しかし、これらの原子レベルでの欠陥に関係した水素原子の状態評価は非常に難しく、不 明な点が多い。そのため材料中の水素の問題に対して、第一原理計算による理論計算と水 素を評価できる実験的な手法との比較などによる研究が必要である。我々の研究では、空 孔への複数の水素原子捕獲の可能性の高い B2 規則構造の Fe-A1 合金について研究を進め ており、この合金系は同じ BCC 型の他の合金とは異なる極めて特異な性質がわかってきて いる。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 水素捕獲を実証してきた。今年度は、電子線照射した試料に対し電気化学的に水素を注入 し空孔に捕獲されていると確認された試料について低速陽電子を用いて異なる注入水素量 での空孔中の電子状態変化から水素捕獲状態について評価を行なった。

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 3×10⁻⁴ Pa の真空中で 1273K、20 時間の焼鈍後に 50K 毎に 5 時間の保持しながら 973K まで温度を下げて 72 時間保持後急冷することで残留空 孔を出来るだけ除去したものを用いた。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 1×10¹⁸ e/cm² で行いた。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 8, 16, 80, 160 時間注入した。これらの実験詳細はこれまでの本共同研究報告 と同じである。照射及び水素注入後の試料に対して、京都大学複合原子力研究所の原子炉 ビームラインで 1~30 keV の低速陽電子を用いて深さごとのドップラー拡がり及び陽電子 寿命測定を行った。

実験結果

前年度までの結果から、電子線照射により空孔を導入した試料への電気化学的水素注入すると 300℃付近に空孔から脱離した水素の放出が確認されているが、どのような捕獲状態かわかっていなかった。そこで、低速陽電子を用いて表面からの注入陽電子のエネルギーを変化させて測定した陽電子消滅ドップラーSパラメータの深さ分布を図1に示す。陽電子注入エネルギーは深さに対応し、各深さでのSパラメータの値を示す。黒点は電子線照

射により空孔を導入した試料の分布で、 深さ方向に対しほぼ均一である。表面付 近でやや高い値を示すのは、注入された 陽電子の熱拡散による表面での消滅割 合がわずかに含まれるためである。これ に対し、16時間の水素により表面から 顕著にS値が減少している。陽電子の消 滅サイトは空孔であると考えられるた め、S値の減少は空孔内の電子密度が単 空孔より増加したことが考えらえる。さ らに水素の注入量を80時間まで増やす と、表面付近のS値は変化しないものの S値の減少が16時間に比べ深い領域ま で進んでいることがわかる。これは水素 が注入時間の増加とともにより深部に





まで侵入したことが考えらえる。続けて 160 時間まで注入すると、表面付近の S 値がさら に低下した。これは、それまでの空孔状態から相対的に電子密度が増加したことを示して おり、これまでの第一原理計算結果を考慮すると水素を捕獲していた空孔にさらに水素が 捕獲し水素の多重捕獲が起こったのではないかと考えられる。このことは陽電子寿命測定 の結果とも相関があり、現在も低速陽電子でそれぞれの深さでの陽電子寿命測定と解析を 進めおり、表面付近では水素の注入時間増加に伴い未注入では単空孔の値を示していた寿 命値が水素注入時間 160 時間では未注入の 195ps から 160ps 程度まで低下し空孔サイズの 大きな減少が見られ、複数の水素原子が空孔に捕獲された可能性を示唆している。以上よ り、これまでの研究で示されてきた空孔への水素捕獲だけでなく水素原子が同一空孔内に 複数個捕獲される可能性を示すデータが得られた。今後、理論計算による水素多重捕獲の 正確な電子状態を詳細に再現した陽電子消滅理論計算をさらに進め本結果の確認を進める。

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、若狭 湾エネルギー研究センターの安永和史博士及び京大複合原子力研の徐虬准教授との共同研 究の一環として実施しました。低速陽電子測定については京大複合原子力研の木野村教授 と薮内助教にご協力頂きました。

成果発表

[1] 平山翔太、徐虬、大澤一人、安永和史、堀史説「電子線照射により Fe-Al 合金中に導入された 空孔内での水素状」日本金属学会秋季講演大会 2023 年 9 月 富山大

[2] 平山翔太、田嘉信、徐虬、大澤一人、安永和史、堀史説「水素イオン照射による B2 型 Fe-Al 合金中の照射導入空孔への捕獲水素状態の研究」第 33 回日本 MRS 年次大会 2023 年 11 月横浜 [3] 堀史説、徐虬、大澤一人、安永和史「加速器を利用した Fe-Al 合金中のナノ空間への水素捕獲 挙動」公益財団法人若狭湾エネルギー研究センター第 25 回研究報告会 2023 年 11 月 福井大 [4] 平山翔太、田嘉信、宮住賢太、徐虬、大澤一人、安永和史、堀史説「B2 型 Fe-Al 金属間化合 物中の空孔内水素状態評価に関する研究」材料物性工学談話会 2024 年 1 月 阪大 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

大気海洋間の運動量・熱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風速・波高・水位・差圧・温度・湿度測定を実施した。さらに、運動量収支法および熱収支法を用いて水面を通して通過する運動量フラックスおよび熱フラックスを測定した。また、界面活性剤を使用してこれらの輸送量を変化させることができるかの検証を行った。

・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・熱輸送量の測定を行った.また、界面活性剤を使用してこれ らの輸送量を変化させることができるかの検証を行った.

・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、2018-2023年度の最高風速等の値を示す.特に、今年度初めて界面活性剤を使用した 場合の実験を実施し一部の風速測定を行った.図1に、海上10mでの風速と抗力係数の関係を示す.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、台風シミュレーション水槽にて伝熱実験を行い熱輸 送機構の解明や輸送量の制御にも挑戦する.

・成果報告(論文、学会発表リスト等)

- Naohisa Takagaki, Naoya Suzuki, Koji Iwano, Kazuki Nishiumi, Ryota Hayashi, Naoki Kurihara, Kosuke Nishitani, Takumi Hamaguchi, Fetch effects on air-sea momentum transport at very high wind speeds, Coastal Engineering Journal, pp. 1-14, (2023).
- Ryota Hayashi, Naohisa Takagaki, Naoya Suzuki, Kazuki Nishiumi, Naoki Kurihara, Kosuke Nishitani, Takumi Hamaguchi, Laboratory measurements of the wind stress at high wind speed and long fetch condition, Japan Geoscience Union Meeting 2023, Makuhari, Japan, May 21-26, 2023.

- Kazuki Nishiumi, Naohisa Takagaki, Naoya Suzuki, Ryota Hayashi, Naoki Kurihara, Kosuke Nishitani, Takumi Hamaguchi, Development of mesurement method for momentum transport through air-water surface, The 3rd Joint Symposium on Advanced Mechanical Science and Technology, National Taiwan Ocean University, Keelung, TAIWAN, Nov. 26-29, 2023.
- 4. 池田空翔,高垣直尚,鈴木直弥,林凌大,西海和希,栗原直希,界面活性剤を用いた台風シミュレーション水槽での風波抑制効果の検証,日本機械学会関西学生会2023年度学生員卒業研究発表講演会,大阪工業大学,2024年3月14日.

Table 1: Maximum wind velocity in RIAM wind-wave tank. Values of U_{∞} in 2020 and 2021 were extrapolated values. Values of U_{10} in 2017 and 2019 were estimated from U_{∞} using model (*Takagaki et al.*, 2012). Values of U_{10} in 2020 and 2021 were estimated from u^* using model (*Takagaki et al.*, 2012). Tap water were used in 2017- 2022, and SDS solution was used in 2023.

	solution	N	F	U_∞	U_{10}	<i>u</i> *
		[rpm]	[m]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
Takagaki et al. (2017)	TW	1300	6.5	14.0	22.8	-
RIAM Report (2019)	TW	1700	6.5	22.2	36.8	-
RIAM Report (2020)	TW	1600	33	24	37.6	1.9
RIAM Report (2021)	TW	1700	33	25	43.5	2.2
RIAM Report (2022) and	TW	1700	20	24.0	40.3	2.0
Takagaki et al. (2023)	1 W					
<i>Ikeda et al.</i> (2024)	TW	1700	20	22.9	-	-
<i>Ikeda et al.</i> (2024)	SDS	1700	20	24.0	-	-



Fig. 1: Relationship between 10-m height wind speed U_{10} and drag coefficient C_D . This figure is reproduced based on Fig. 12 of *Takagaki et al.* (2023).

長崎県雲仙での現場観測によるエアロゾル特性と雲の熱力学相の関係

長崎大学大学院水産・環境科学総合研究科 河本和明

[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)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高い凍結効率を示す。衛星データからは広域にわた って雲頂付近のバルクな状況が示されるが、現場観測を用いたエアロゾルと雲の詳細な直接比較も求められ る。本研究では、地上に接した雲である霧を対象に、長崎県の雲仙岳で行われている霧粒の現場観測から、 まずは霧粒子特性の特徴を明らかにする。

[方法]

観測は、妙見岳にある雲仙ロープウェイの山頂駅(標高 1300 m)と、仁田峠にある山麗駅(標高 1080 m)に おいて実施した。Cloud Particle Sensor (CPS)は雲粒子にレーザー光を照射して、粒子からの散乱光を検 出することで雲粒子の特性を測定する装置である。単位時間に検出された粒子数をサンプリング流量で除 することで雲粒子の数密度に対応する情報が得られる(検出効率を考慮していないため本研究では相対値 として扱う)。また、散乱光の強度に対応する信号から粒子サイズに関する情報が得られる。さらに非球形 粒子が光の偏光方向を変化させる特性を持つことを利用して、レーザー光の偏光面に対して垂直方向の偏 光面を持つ散乱光成分の割合に対応する信号を得ることで粒子の非球形性に関する情報が得られる。

妙見岳における8月および12月に観測された雲粒子の数密度および粒径指標の10分平均値の頻度分布を 図に示す。両地点において、雲粒子特性に明瞭な季節変動が見られた。8月は、12月に比べて雲粒子の発 生頻度が高く、雲粒子サイズが大きい傾向がみられた。一方、12月には、8月に比べて低頻度ながら、よ り小粒径で高数密度の雲粒子が発生することがわかった。同一地点の2台のCPSで得られた雲粒子特性は 同様の傾向を示した一方、妙見岳と仁田峠では、雲粒子の特性に違いがみられ、期間を通して妙見岳の方 が個数濃度および粒子サイズが大きい傾向があった。理由として上昇気流や水蒸気量の特性が考えられ る。今後はエアロゾル観測と同期して両者の関係を定量的に調べ、衛星観測との比較を行う必要がある。



[参考文献]

Kawamoto, K., Yamauchi, A., Suzuki, K., Okamoto, H., & Li, J. (2020). *Geophys. Res. Lett*.. [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) 本研究では中山智喜長崎大学准教授のご協力を得た。

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.前年度までの共同利用研究では、豊後水道には 0.05 ℃ m⁻¹ に及ぶ著しい水温フロントが存在し、その周辺で強い鉛直流と乱流混合が生じていることが明らかにされた.本研究ではこのような潮汐フロント域における強乱流による栄養塩輸送の定量評価を目的し観測を実施した.

研究内容

2023 年 5 月 9–11 日 (小潮期)と16–18 日 (大潮期)に,豊後水道の速吸瀬戸南部に形成される潮汐フロント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」航海で実施した.フロント域の定点において,乱流微細構造プロファイラ TurboMAP-5 と水中紫外線硝酸塩アナライザ Deep SUNA-V2 による乱流と硝酸塩濃度の計測を行った. 観測時には舷側から超音波ドップラー流速計を吊り下げ,亜表層までの水平・鉛直流速を高精度に計測した. TurboMAP で計測した乱流シアから鉛直渦拡散係数 Kz を Osborn (1980)の式によって見積もり、SUNA による硝酸塩濃度値 C_{NO3}と合わせ硝酸塩フラックス F_{NO3} = - Kz∂C_{NO3}/∂z を求めた.

研究内容

5月16日の下げ潮中に実施した観測結果を図1に示す.船舶計測の表層水温には13時頃に約2°Cの急減が認められ,観測点をフロントが通過したと考えられる.観測開始時には水深20m付近に亜表層クロロフィル極大層が形成され、その下部で硝酸塩濃度が急増する典型的な成層域の鉛直構造であった一方で、その後の下げ潮とともに混合域の水塊が移流されてきた(図1c-f).生物生産に重要な亜表層の鉛直拡散について、観測開始時には比較的弱かったが下げ潮とともに強化され、12時過ぎには著しく強化された(10^3-10^2 m² s⁻¹, 図1g).この潮汐フロント域での乱流強化に伴って、上向き乱流硝酸塩フラックスが11時以降には $O(0.01 \text{ mgm}^2 \text{ day}^1)$ にまでに増加した.この亜表層の強乱流帯は、少なくとも2時間程度持続しており、この間の平均的な流速が0.4 m s⁻¹であったことから、3 km程度の幅を持っていたと推察される.本研究の結果から、潮汐フロントの成層域側で顕著な乱流混合が生じ、上向きの硝酸塩フラックスが生じている実態が明らかとなった。



図 1 2024 年 5 月 16 日に豊後水道の A10 測点で実施し た乱流と流速、硝酸 塩濃度の観測結果. (a) 東西流速, (b) 南北流速,(c) 水温, (d) 塩分, (e) 蛍光 光度, (f) センサー 計測硝酸塩濃度 (未較正), (g) 鉛直 拡散係数, (h) 上向 き乱流硝酸塩フラッ クス. 図中の白線は 海水密度 (σθ), 黒 線は海底の位置を 示す。

若狭湾における定置網漁業及び底曳網漁業の漁場環境に関する研究 ~若狭湾における雄ズワイガニの銘柄と成長関係~

福井県立大学 渡慶次 力

1. 目的

若狭湾で漁獲される「越前がに」(ズワイガニ Chionoecetes opilio)は、福井県の県魚として指 定されており、福井県の水産経済的に非常に重要な魚種である。このため、福井県では 1980年代 から保護区の設定、漁期の短縮など資源回復対策を行ってきた。効果的な資源管理を行うために、 ズワイガニの生活史を踏まえた対策を行う事が重要である。特に漁獲加入後も脱皮をし、成長に伴 い単価が上昇する雄は、例えば漁業者による取り控えによる資源管理を行う事で、資源を守りなが ら漁獲金額を増やすこともできる。福井県水産試験場は、ズワイガニを漁獲する底曳網船の漁獲情 報を記録した操業日誌、市場の販売記録、精密測定の記録など、漁獲加入後の資源的な繋がりを明 らかにするための豊富なデータを蓄積している。

そこで、本研究では、若狭湾における漁獲加入後の雄ズワイガニの資源的な繋がりの解明を目的 に、銘柄間の成長関係を調べた。

2. データと方法

2000年~2018年に福井県越前町漁業協同組合(以下、越前町漁協)所属の底曳網漁船が記帳した操業日誌と越前町漁協が開設する市場の販売記録を使用し、脱皮後1年以上経過したカタガニ、脱皮後1年未満のミズガニを本研究の対象とした。また、カタガニのうち、鋏が大きく最終脱皮し、 重量1kg以上の個体を大ガニ、重量1kg未満の個体を中ガニとし、鋏が小さく最終脱皮が終わっていない個体を山ガニとして取り扱った。

カタガニの漁獲尾数は、操業日誌で銘柄別(大ガニ、中ガニ、山ガニ)の漁獲尾数を年集計して 解析に使用した。一方、ミズガニの漁獲尾数は、市場の販売記録から入り数別(5入、8入、10入、 12入の4つで、入り数の少ない方が大きいサイズを示す)の漁獲尾数、精密測定から得られた入 り数別の鋏の大小比率を使用して、鋏の大小別・入り数別の漁獲尾数を推定した。解析では、雄ズ ワイガニの銘柄間の成長関係について年変動のラグ相関をとり、有意差がある位相差に着目して考 察した。

3. 結果

雄ズワイガニの銘柄間のラグ相関の有意差に注目し、雄ガニの脱皮と成長の関係(東海林ら、 2021)から、成長段階を説明できる関係は、山ガニが大ガニと中ガニより1年先行していることと、 鋏の小さい8入りのミズガニが鋏の大きい5入りのミズガニより1年先行していることの3点であ った。それ以外は、成長段階を説明出来ない関係であった。

成長段階を説明できた関係は、成長最終段階の銘柄同士であり、各銘柄からの加入が少ないこと から、有意な相関関係が見られたと考えられた。一方、成長段階を説明できなかった関係は、成長 途中の銘柄同士であり、多数の銘柄から加入し、非常に複雑な成長段階の関係が混在したため、有 意な相関関係が見られなくなったと考えられた。

69

4. 今後の展開

本研究では、雄ズワイガニの銘柄間のラグ相関に注目して、若狭湾における漁獲加入後の雄ズワ イガニの資源的な繋がりを考察した。ズワイガニ資源は、若狭湾内にとどまる傾向があり(三浦, 2020)、今後も脱皮する山ガニが、最終脱皮の大ガニと中ガニよりも、1 年位相が早い。このこと から、両者には資源的な繋がりが示唆され、山ガニを取り控えることで、1 年後の大ガニと中ガニ の資源増加に繋がる可能性がある。

今後は、昨年度に実施したズワイガニ資源量の時空間変動の特徴と本研究の研究結果を踏まえて、 若狭湾におけるズワイガニ資源量推定の研究へ展開したいと考えている。さらに、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。このアプリを漁業者 に使ってもらうことで、若狭湾のズワイガニ資源を守りながら、大ガニと中ガニより安価な山ガニ を取り控えて成長を待ち、高価な大ガニ・中ガニになった段階で漁獲することで、漁業者の収益ア ップも図れるアプリ構築を目指す。

5. 成果報告等

森亮輔・前川龍之介・元林裕仁・渡慶次力,若狭湾における雄ズワイガニの銘柄と成長の関係, 2023 年度水産海洋学会研究発表大会講演要旨集, pp58, 2023.11(札幌市)

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	主任研究員	熊木 豊
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	丸山 香野子
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 海洋資源研究センター	主任研究員	松宮 由太佳
協力者	福井県水産試験場 海洋資源研究センター	研究員	岩﨑 俊祐
協力者	福井県水産試験場 海洋資源研究センター	研究員	元林 裕仁
協力者	福井県水産試験場 海洋資源研究センター	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	気象研究所	研究官	広瀬 成章
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 東シナ海における黒潮の運動エネルギーは,夏季に大きく秋・冬季に小さい顕著な季節変動をも つ。この季節変動は,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)。黒潮の 運動エネルギーを乱流へ供給するプロセスとしては,海峡域における黒潮と海山間の相互作用に起因し た内部波の砕波(Tsutsumi et al. 2017, Hasegawa et al. 2021, Nagai et al. 2017; 2021, Takahashi et al. 2024)に 加え,陸棚斜面域における対象/慣性不安定を通じ放出される近慣性内部重力波の砕波(Nakamura et al. 2021)及び地形性渦の放出に伴うシアー・対流不安定混合(Inoue et al. 2024)が考えられるが,その全 容を明らかにするためには,黒潮流域におけるエネルギー散逸過程の解明が必要である。本研究は,現 場観測と数値実験によって,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 上記の一連の過程を観測することを1つの目的として、日韓共同で、2020年6月より北部沖 縄トラフの黒潮流域に4台のADCP(RDI 社製/WH-LR75KHz)を設置している(図1:現在,継続中)。 さらに、2022年6月~2023年6月の1年間、Thermistor String(RBR 社製: Centro TX deep)と流速計(FSI 社製:3D-ACM)で構成された係留系を、KCM5の500~600m深に設置した(図2)。Thermistor String は、1本のケーブルに水温センサーが3m間隔で24個取り付けられており、係留期間中、同期したデー タが10秒毎に1つのデータロガーに保存された。ADCP 観測網により、冬季に黒潮が不安定化すると き黒潮の擾乱から近慣性内部波が励起されるかどうかを確かめ、Thermistor String により、近慣性内部波 エネルギーの増減が乱流強度の増減に繋がっているかどうかを確かめた。さらに、3次元数値海洋モデ ル(MITgem: Marshall et al. 1997)を用いて観測結果を再現し、その力学過程を調べている。

ここでは、2022 年 6 月~2023 年 6 月の観測データを用いて、黒潮変動からのエネルギー・カスケードの仮説を検証した結果を報告する。

結果 KCM5 の 3D-ACM データより,黒潮擾乱に由来する流速,および近慣性内部波に由来する流速の 鉛直シアー強度の1年間の時系列が得られる。また,Thermistor String データより,水温逆転に基づいて Thorpe スケールを計算し,エネルギー散逸率の時系列が得られる。これらの時系列を比較することによ り,黒潮擾乱から近慣性内部波が励起され,その鉛直シアー不安定による砕波を通して乱流混合が強化 されるメカニズムの存在を確認する。なお,ここで想定している黒潮擾乱は,黒潮フロントの不安定化 に起因する約 10~30 日の周期性擾乱で,冬季に活発化する傾向がある (Nakamura et al., 2012)。KCM5 の中層で観測された状況と,黒潮表層の変動との関係は,ADCP 観測網のデータとの比較から理解する。

まず, KCM5 における1) 近慣性周期帯の流速の鉛直シアー強度,2) 疑似 Thorpe スケール (水温逆転の距離の総和),3) KCM3 と KCM3a の ADCP 流速の1年間の時系列を示す(図3)。これらの結果より,黒潮下層で南下流傾向のときに近慣性内部波エネルギーが高くなる傾向があり,近慣性内部波エネルギーが高いときに疑似 Thorpe スケールが大きい傾向があることがわかる。この現象は,台風による夏季の間欠的な発生を除けば,黒潮擾乱の季節変動に関連して12~3月頃顕著に起こる傾向がある。

次に、上記の関係が明瞭な 2021 年 12 月 2 日~2022 年 1 月 2 日の 1 か月間における 1) 3D-ACM 流 速と鉛直シアー強度、2) 疑似 Thorpe スケールの時系列を示す(図 4)。これらの結果より、約 20~30 日 周期の黒潮擾乱により、黒潮流軸が陸棚から離れ黒潮直下に南下流が形成されるとき、黒潮下層で鉛直 混合が強化されていることがわかる(黄色網掛け期間)。さらに、日周期と半日周期の流速変動に連動し て、疑似 Thorpe スケールが大きくなる特徴が認められる。この特徴を 3 日間(12 月 21~23 日)の時系 列で示す(図 5)。本観測から、黒潮下層の鉛直混合は、黒潮擾乱に関係して生成された近慣性内部波が、 日周潮と半日周潮に拘束されながら砕波する可能性が示唆された。今後は数値実験により、観測結果を 再現しメカニズムの解明を目指す。

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.マルチスケール黒潮変動の係留観測網.






図 3. KCM5 における(a) Thermistor String データより計算された疑似 Thorpes スケール(10 秒 毎の値の日平均値),(b) 3D-ACM データより計算された近慣性周期帯(22~30 時間)の鉛直シア 一強度(上側と下側の流速差の2乗),(c) KCM3のADCP 流速(黒潮方向成分),(d) KCM3aの ADCP 流速(黒潮方向成分)。黒縦線は黒潮の沖向きシフトを示す。黄色丸印(a 上端)は,黒潮の 沖向きシフト,近慣性内部波エネルギーが大きいイベント,疑似 Thorpe スケールが大きいイベント がおおよそ一致している事例を示す。赤枠は,図4の期間を示す。



図 4. 2021 年 12 月 2 日~2022 年 1 月 2 日の 1 か月間における, KCM5 の(a)上側(520 m 深) と(b)下側(597m 深)の 3D-ACM 流速(青線:東西成分,赤線:南北成分),(c)鉛直シアー(上 側一下側),(d)疑似 Thorpe スケール(10 秒毎の値の 1 時間平均値)。黄色網掛は,黒潮下層に南 下流が出現した期間と疑似 Thorpes スケールが大きい期間を示す。赤枠は,図 5 の期間を示す。



図 5. 2021 年 12 月 21~23 日の 3 日間の Thermistor String の(a) 水温変動(565 m~595m の 30m を抽出)(時間解像度 1 分, C.I.=0.05℃),(b)疑似 Thorpe スケール(1 時間平均値)。疑似 Thorpe スケールが大きくなると,成層が弱くなり高温化する特徴が認められる。

うねりと風波が同時に存在する状況での GNSS 反射強度への影響の観測研究

京都大学大学院理学研究科 根田昌典

<u>目的</u>

本研究は、海表面の変動(水位と波浪)によって GNSS 反射波が受ける影響を評価する研究の一環と して実施する研究である.これまでの研究で、うねりと風浪が共存する状況において風向と風波の方向 に系統的な差が生じることがわかってきた.風波が海上風に駆動されるならば、うねりの存在下では風 応力と一般的な 10m 高度風との間に成立する対数分布則自体が変化する可能性がある.今年度は、和 歌山県田辺湾にある観測塔に設置した複数高度の風ベクトル観測のデータをもとにして、うねりの存在 下での海上風ベクトルプロファイルが対数則からどのように乖離するかについて検証する.

<u>手法の概要</u>

昨年の研究ではうねりの存在下で 風波の方向が 10m 高度風の平均風向 から系統的に偏向することを確認し た.その事象と大気境界層(ABL)の 構造との関係を把握するために和歌 山県田辺湾にある田辺中島高潮観測 表1:観測装置設置状況

観測開始	観測終了	概要	備考
2021/10/22	2021/11/19	北東向き(2 高度)	
2022/6/17	2022/7/21	北東向き(4 高度)	
2023/3/20	2023/6/19	西向き(4 高度)	髙波による破損(6/2)
2023/11/22	継続中	西向き(4 高度)	

塔において複数高度(13m, 11m, 6m, 4m)で海上風ベクトルを計測した. 観測塔では通常観測として平均 海面から 23m の高度に設置された 3 次元超音波風速計によって 3 次元風速成分を取得しており、この データから渦相関法による風応力の直接観測値を得ることができる. このほか, 12.5m 高度での気温や 水蒸気量,海面温度や波高観測が行われており、これらのデータを本研究に利用する.

複数高度海上風ベクトル観測装置の設置は断続的に複数回行った(表1). これらの観測は本研究で 得られた研究結果を発露として獲得につながった外部資金によって実施された. 温暖期の観測に加え, 2022 年冬季の強い北西風の状態を観測することを予定していたが, 天候により設置できないまま 2023 年 3 月になってから設置した. しかし, 2023 年の観測時には非常に強いうねりによって設置した風速 計の下側フレームが損傷を受けたために観測を中断することとなった. 予定外の修理が必要となり,本

研究の経費を利用して再設置を行った.これにより 2023 年 冬季の観測を実施することができた.この観測は現在も継続 しているため次年度に詳しく解析する予定である.

結果の概要

これまでに取得した風速観測データと観測塔で取得され た気象海洋観測データの品質管理や補正を完了したのちに, 観測結果を解析した.うねりがあって,且つ観測塔が風ベク トル観測値に影響を与えない状況を抽出し,うねりと ABL の風ベクトル鉛直構造の関係について解析を行った.図1は 2022年7月3日23時から翌1時までの2時間の各高度の 海上風観測値と波浪スペクトルの変化を示したものである. 風速自体は3ms¹程度で推移し,高高度の風速が大きいこと は対数則に従った海上風鉛直構造と整合的であるように見 える.また,この時間帯はうねりが観測されており,弱風速 下であるために風波よりもうねりのエネルギーが高くなっ ている.田辺湾の地形的な特徴からうねりは常に南西方向か ら入射するため,風波の方向と海上風の方向が大きく乖離し ていない場合にはうねりと風波の方向をおおよそ決定する



図1:2022年7月3日23時-4日1時ま での(上)複数高度風速(黒:23m,赤:13m, 緑:11m,青:6m,黄:4m)と(下)波高スペ クトル密度. 点線は遮断周波数,黒点は風 波とうねりのピークを示す ことができる.図1に示した期間においては,海上風 はほぼ東風であった.このため,うねりと風波の方向 は135度程度であったと推定できる.

この時の海上風の鉛直構造を対数分布則に従った 傾度法を利用して検討した.モニンオブコフ長(L)を 観測塔の観測値から決定すれば,2高度の風速を用い た対数分布則は

$$\begin{cases} \frac{\kappa u_1}{u_*} = ln\left(\frac{z_1}{z_0}\right) + \beta \frac{z_1}{L} \\ \frac{\kappa u_2}{u_*} = ln\left(\frac{z_2}{z_0}\right) + \beta \frac{z_2}{L} \end{cases}$$

であり,ここから摩擦速度(u*)は以下の式で与えられる.

$$u_* = \frac{\kappa(u_2 - u_1)}{ln(\frac{z_1}{z_2}) + \frac{\beta}{L}(z_2 - z_1)}$$



図 2:(左) うねりのない状態(2021 年 11 月 8 日 18:30)の海上風鉛直構造と(右)うねりがあ る状態(2022 年 7 月 3 日 23:30)での海上風鉛 直構造. 〇は風速観測値,赤:(13m-11m),青 (11m-6m),緑(6m-4m)の各線は2高度風速から 推定した風速プロファイルを示す.

図2は、うねりのない状態(2021年11月8日18:30)とうねりのある状態(2022年7月3日23:30) それぞれについて、2高度の組み合わせから推定した海上風鉛直プロファイルを示す.うねりのない状況では異なる高度の風速から推定した海上風プロファイルはほぼ一致するのに対して、うねりがある場合には最下部(6mと4m)の組み合わせによる風速プロファイルは明らかにほかの高度の海上風の組み合わせから得た風速プロファイルと異なっている.6m以高の海上風観測値は鉛直方向にほぼ一様であるのに対して4m風のみが減速されているようである。既述のようにこの時間はうねりと海上風の方向が逆向き(135度付近)に近く、うねりによる接線応力(tangential stress)によって上向きの運動量輸送が発生することによる下層風の減衰が生じることと矛盾しない。

また、昨年の解析結果である 10m 高度風に対して風波の方向が屈折する可能性を考慮すれば、下層 風がうねりの方向(この場合は時計回り方向)に屈折していることが予想される.図3は4m高度風に 対する6m高度風の差分ベクトルの時間変化を示す.両風向が同一方向であれば差分ベクトルが上向き になるように図示している.6m高度風が4m高度風に対して反時計回りに回転していることがわかる. この関係を模式的に書くと、図4のようにうねりの方向に沿った海面からの上向きの運動量輸送がある 状況を示唆する関係にあることがわかる.これらの結果を考慮すれば、うねりの存在下で、うねりの影響による海面から上向きの運動量輸送が発生すれば、下層風の風速とともに風向も影響を受ける事例を 実証的に得ることができたと考えている.

長期間の観測であるにもかかわらず,風速計が観測塔の風 下側にある期間が多かった.そのため,うねりや海上風の強 さなどに関して広いレンジでの解析はできておらず,これら への依存性については検証できていない.2023年3月から の観測では,つよいうねりの存在時に下層の風速の方が上層 の風速よりも大きい事例も得られている.また,2023年11 月に再び観測装置を稼働させることができたので,強い北西 風とうねりが共存する事例を解析できることを期待してい る.これらの解析は次年度に引き続き進める予定である.

<u>研究成果報告</u>

口頭発表:1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



うねりの方向は茶色の点線矢印で示す.

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でも活用できるような陸域 - 汽水域 - 沿岸域と流れる河川水の動態を再 現する数値モデルの構築を目指す。多くの島嶼域では汽水域が独自の生態系を育む貴重な領域となって いる。そして特に陸域面積が小さい島嶼域の沿岸域では、平時は海洋の影響を強く受けつつも、台風・ 豪雨時には突発的な河川流出の影響を受ける。対象とする水域は海洋と河川のどちらが支配的な作用を もたらすかで、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。河川水の供給は、栄養塩と 塩分、そして水温に大きな影響を沿岸域にもたらすだけでなく、近年台風は強くなる傾向があることか ら、河川水の拡散範囲の拡大によって汽水域および沿岸域の環境場、ひいては沿岸生態系にも大きな変 化がもたらされることが予想される。

陸域 - 汽水域 - 沿岸域と流れる河川水の動態を再現する数値モデルとして、既存の河川モデルと海洋 モデルを結合する手法では潮汐に伴う変動や成層構造の再現することが難しい。しかもパラメータチュ 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では適応が困難である。そこで本課題で 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の再現に欠かせない Shallow Water Equation を上流域から下流域まで連続的に適用する河川海洋一体型モデル(JORRO, Kida & Yamashiki, 2015)を用いる。そし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

高解像度の河川海洋一体型モデルを用いて、流路上で常流と射流が交互に発生する熊本県白川に焦点 をあてた数値モデルを構築する。流路上にある妙見橋(カルデラ内)・立野(斜面)の観測値と数値モデ ルの出力結果を比べることで、モデルの再現性を検証する。力学的なパラメータは一定にしつつ、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し、一体型モデルによる白川の流量 変化を捉える数値モデルを高解像度で再現する。また既存の水文モデル CDRMV3.1.1を構築し、両モデ ルの計算結果と比較することで JORRO の再現性を検証する。

3. 解析結果

(1)流路幅の調整&背景流の生成

熊本周辺を通過した台風時における流出過程を再現するため、2015 年9月6日から 2015 年9月1 2日までの降雨データを用いて計算を行った(図1)。流路幅をこれまで 180m 一定で構築していたた め、川幅の狭い上流域の流れが遅くなり、ピーク流量が生じるタイミングが遅れていることがわかった。 そこで流路幅を 90m に変更したところ流れが早くなったが、グリッド間で流路が接続できていない区 間が生まれてしまい、洪水が発生してしまっていた。そこで地形勾配と高度情報をもとに流路をよりス ムーズに接続、かつ高低差が逆にならないように調整した。また高解像度地形を利用するうえで、局所 的に窪地が生じていたため、ARCGIS を用いたスムージングを行った(図2)。これの前処理によりカル デラ域から斜面域への流れが現実的に再現できるようになった。 また平水時の流れを再現するため 1mm/hour または 0.5mm/hour の弱い雨を一定で降らせるように した。これはスピンアップに相当し、トライアンドエラーから 0.5mm/hour が現実的な平水時流量を再 現することがわかった。

(2) CDRMV3.1.1 との比較

CDRMV3.3.1 は土壌を三層に分けてモデル化しており、中間流を考慮することのできる水文モデルで ある。土壌の等価祖度や空隙率といったパラメータは観測流量とのキャリブレーションによって同定し、 最適化することで現実の流量を高い精度で再現することができる。ただし個別の流路における流速が評 価できない。JORRO モデルでは、各流路に合わせて適切なフルード数が変化・評価されており、より現 実に近い流れ環境が再現されていると言える。すなわち、適切な流路加工を施せば、キャリブレーショ ン未適用の河川への応用が可能であることが確認できた。まだ JORRO での計算結果は、時間変化等、 最 CDRMV3.1.1 の適化後のものと比べると再現性は低いが、最適化前のものと比べると降雨からの応 答の面では JORRO の方が現実的であった。

4. 考察

本年度は、本格的な高解像度モデルの実現にむけ、白川の流出過程を上流から下流までの再現性の検証 を進めた。これに昨年度導入した土地利用モデルを活用することで、領域ごとの土地利用の違いが流量 変化に与える影響を検証することが可能になった。また JORRO の再現性を検証するため、本年度は水 文モデルを構築した。今後は、両モデルの違いを詳細に検証し、流れの物理特性が変化する上流から下 流までを Shallow Water Equation をフルかつユニバーサルなパラメータで解く JORRO の力学的優位 性を示すとともに、水文モデルがもつ土壌過程の役割を明らかにする計画である。



5. 研究成果

学会発表

佐藤 啓明・山敷 庸亮・木田 新一郎,等密度面モデルの陸域への拡張による白川流域における水文過程 の検証,九州沖縄合同シンポジウム 2023/12/8

佐藤 啓明・山敷 庸亮, Application of Isopycnal Layered Model to the Calculation of Hydrological and Oceanic Flows on Islands, JPGU 2023 (幕張メッセ) 2023/5/23

研究組織

代表者	京都大学	教授	山敷庸亮
協力者	京都大学	博士1年	佐藤啓明
世話人	九州大学	准教授	木田新一郎

沿岸海洋の密度躍層における乱流混合の定量化

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に関わるため海洋生態系に果たす役割が大きい.し かし,その定量化は未だ十分でなく,現実的な乱流混合の定式化が必要である.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.

研究内容 本研究では 2022 年 5 月, 2022 年 7 月, 2023 年 5 月, 2023 年 7 月に豊後水道で実施した乱流観 測データの解析を行った。観測は愛媛大学沿岸環境科学研究センター調査実習船「いさな」による航海 において,応用力学研究所所有の微細構造プロファイラ TurboMAP-5 (JFE アドバンテック社, 512 Hz)と 音響ドップラー流速計 (Teledyne RDI 社 600-kHz WH ADCP)を用いて得られた. 5 月の観測は豊予海峡 南方の潮汐フロント域, 7 月の観測は宇和島市沖の御五神島周辺域において実施し,それぞれ 86 と 198 個の乱流運動エネルギー散逸率 *ϵ* と水温・塩分の鉛直プロファイルが得られた. 流速計は船舶の舷側か ら下向きに吊り下げ,海面下 4 m から 40 m まで 0.5 m 間隔での流速を高精度に計測した.

結果 潮汐フロント域では亜表層で対流不安定に伴い乱流エネルギー散逸が強化されていた. 御五神島 周辺では地形性ウェーク中のシア不安定による著しい乱流エネルギー散逸が特徴的であった. ϵ の背景 の成層強度 (2 乗浮力振動数 N^2) と鉛直シア強度 (2 乗鉛直シア Sh^2) を調べると, 2 海域で傾向が異 なり,潮汐フロント域では勾配リチャードソン数 ($Ri_g = N^2/Sh^2$) に依存しない MacKinnon-Gregg (2003) 型,地形性ウェーク域では勾配リチャードソン数に依存する Gregg (1989) 型もしくは Mellor-Yamada スキームの安定度関数型 (Galperin et al. 1988) を示した (図 1). この不安定過程の違いによる乱 流強度 ϵ oN^2 (Ri_a) 依存性の違いを,乱流パラメタリゼーションで考慮する必要があると考えられる.



図1 豊後水道において観測された乱流運動エネルギー散逸率 ϵ の,2 乗浮力振動数 N^2 と2 乗鉛直シア Sh^2 との関係. (a) 豊予海峡南部の潮汐フロント域における結果, (b) 宇和島市沖の御五神島回りの地形性ウェーク域における結果. 実線と破線はそれぞれ勾配リチャードソン数が1と1/4 となる境界を表す.

Elucidating tropical interbasin interaction mechanisms using climate models (気候モデルによる熱帯海盆間相互作用のメカニズム解明)

海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門 Ingo Richter

Background

Interaction among the tropical ocean basins has received increased attention in recent years. While it has long been recognized that El Niño-Southern Oscillation (ENSO) has strong impacts on the tropical Atlantic and Indian Oceans, it is becoming increasingly apparent that both these remote basins have their own variability modes and that these modes can influence the tropical Pacific and ENSO (Cai et al. 2019). It remains an open question, however, how important these influences are, to what extent the Atlantic and Indian oceans can act independently of ENSO, and what the dominant pathways of interaction are.

The tropical Atlantic is home to two major modes of interannual sea-surface temperature (SST) variability, namely the Atlantic meridional mode (AMM) in the northern tropical Atlantic (NTA), and the Atlantic Niño, or Atlantic Zonal Mode (AZM) in the equatorial Atlantic. It has been well established that ENSO events force same signed SST anomalies in the NTA region during the decaying phase (Enfield and Mayer 1997). An El Niño event peaking in winter (DJF), e.g., is typically followed by a positive AMM event in the following spring (MAM). Despite this robust influence on the AMM, ENSO's influence on the equatorial Atlantic is inconsistent (Chang et al. 2006; Lübbecke and McPhaden 2012), with El Niño events followed by AZM events of either sign. The perhaps striking example of this inconsistency is the fact that the strong El Niños of 1982/83 and 1997/98 were followed by AZM events of the opposite sign (negative and positive, respectively).

Several explanations have been offered for the inconsistent influence of ENSO on the AZM. These include the competition of thermodynamic and dynamic remote ENSO impacts (Chang et al. 2006), the influence of off-equatorial Rossby waves in the tropical Atlantic (Lübbecke and McPhaden), the timing of ENSO decay (Tokinaga et al. 2019), and the influence of intrinsic tropical Atlantic variability (Kido et al. 2023). The relative importance of these mechanisms, however, remains to be evaluated.

Aims of the current research project

The current research project reexamines the impact of ENSO on the equatorial Atlantic, with the aim of clarifying the importance of individual mechanisms. Based on the insights gained from this analysis we will build a simple statistical model to predict the AZM 6 months into the future.

Methods

1) Data

While the eventual goal is a better understanding of the observed relation between ENSO and the AZM, here we focus on 44 coupled global climate models (GCM) from the Coupled Model Intercomparison Phase 6 (CMIP6) that were integrated under pre-industrial control (piControl) scenario. The advantage of piControl simulations is that they offer long time series (typically 500-1000 years) under steady radiative forcing, thus eliminating the confounding

influence of changes in radiative forcing due to increasing greenhouse gas concentrations. In addition, we use two observation-based data sets, the ERA-5 and NCEP reanalyses.

2) Composites

We use two kinds of composites: El Niño events followed by a negative AZM event (AZM-), and El Niño events followed by a positive AZM event (AZM+). For the former composite, we average over those years for which both the Niño 3.4 index (an indicator of ENSO activity) in DJF is above +0.5 standard deviations, and the ATL3 index (an indicator of AZM activity) in the following JJA is below -0.5 standard deviations.

Results

A simple correlation analysis indicates that despite the inconsistent ENSO-AZM relationship, there is a robust relationship between the Niño 3.4 index in spring (MAM) and the surface winds over the equatorial Atlantic during the same season (Fig. 1), with El Niño events associated with easterly wind anomalies over the equatorial Atlantic. Such easterly surface winds over the equator are known to contribute to AZM- events through enhanced equatorial upwelling. The consistent relationship in MAM had received little attention in the literature so far.



Figure 1. Correlation between MAM Niño3.4 SST and MAM ATL4 (45W-20W, 3S-3N) surface zonal wind anomalies in the ERA-5 and NCEP reanalyses (leftmost two bars), the GFDL CM 2.1 model (a previous generation climate model) and 44 CMIP6 models.

Based on composite analysis of the CMIP6 models, we find that the timing of ENSO decay is indeed an important factor for whether El Niño is followed by AZM- or AZM+. Specifically, we find that early El Niño decay tends to be followed by an AZM+ event in the equatorial Atlantic.

Further composite analysis suggests that the competition between dynamic and thermodynamic influences is indeed an important factor in the ENSO-AZM relationship, as is internal tropical Atlantic variability. The Rossby wave mechanism, however, does not appear to play a major role, though it does become important in certain years.

Using simple multilinear regression, we build a statistical model to predict the JJA ATL3 index based on conditions two seasons earlier, in DJF. In many CMIP6 models, this simple statistical model can predict the target data quite

skillfully with correlation coefficients above 0.5. For observations, however, the skill is somewhat lower, possibly due to the relatively short data record.

The results have been presented at several international workshops and conferences, and a manuscript is currently in preparation.

Additional activities

In addition to the ENSO influence on the AZM described above, Ingo Richter has also contributed to a study on the influence of the AZM on ENSO. The study, published in Nature Communications, identified atmospheric Kelvin waves as the major pathway for the equatorial Atlantic influence on ENSO. It also found that the topography over the Maritime Continent interacts with the atmospheric Kelvin waves, and that this interaction is important to mediate the Atlantic influence on the tropical Pacific.

Achievements

Articles in peer-reviewed journals

1. Liu, S., P. Chang, X. Wan, S. G. Yeager, and I. Richter, 2023: Role of the maritime continent in the remote influence of Atlantic Nino on the Pacific. *Nature Communications*, **14**, 3327. <u>https://doi.org/10.1038/s41467-023-39036-w</u>

Conference presentations

<u>Ingo Richter</u>, Shoichiro Kido, Tomoki Tozuka, <u>Hiroki Tokinaga</u>, Yu Kosaka, Ping Chang: Revisiting the inconsistent influence of ENSO on the equatorial Atlantic. Ocean Sciences Meeting, New Orleans, USA; 2024/02/20
<u>Ingo Richter</u>, Yu Kosaka, <u>Hiroki Tokinaga</u>, Shoichiro Kido: Toward quantifying the tropical Atlantic influence on ENSO. APL-ICAR-CMCC Workshop, Yokohama, Japan; 2023/08/07

3. Ingo Richter, Shoichiro Kido, Tomoki Tozuka, Hiroki Tokinaga, Yu Kosaka, Ping Chang: Evaluating interbasin linkages with GCMs and LIMs. CLIVAR/TBI Science Meeting, Guangzhou, China; 2023/11/21

Meetings organized

Workshop on interbasin interactions and predictability in the tropics. JAMSTEC, Yokohama, Japan; 2023/12/20

References

Cai, W., and Coauthors, 2019: Pantropical climate interactions. *Science*, **363**, eaav4236, https://doi.org/10.1126/science.aav4236.

- Chang, P., Y. Fang, R. Saravanan, L. Ji, and H. Seidel, 2006: The cause of the fragile relationship between the Pacific El Niño and the Atlantic Niño. *Nature*, **443**, 324–328, <u>https://doi.org/10.1038/nature05053</u>.
- Enfield, D. B., and D. A. Mayer, 1997: Tropical Atlantic sea surface temperature variability and its relation to El Niño–Southern Oscillation. J. Geophys. Res., 102, 929–945, <u>https://doi.org/10.1029/96JC03296</u>.

- Kido, S., I. Richter, T. Tozuka, and P. Chang, 2022: Understanding the interplay between ENSO and related tropical SST variability using linear inverse models. *Climate Dyn.*, **61**, 1029–1048, <u>https://doi.org/10.1007/s00382-022-06484-x</u>.
- Lübbecke, J. F., and M. J. McPhaden, 2012: On the inconsistent relationship between Pacific and Atlantic Niños. *J. Climate*, **25**, 4294–4303, <u>https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00553.1</u>.
- Tokinaga, H., I. Richter, and Y. Kosaka, 2019: ENSO influence on the Atlantic Niño, revisited: Multi-year versus single-year ENSO events. *J. Climate*, **32**, 4585–4600, <u>https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0683.1</u>.

2023CR-AO-10

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

2000年代に増加の一途であった中国の窒素酸化物(NO_x)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)ため,その推計には数年を要する問題点がある.この問題に対して,準リアルタイムの衛星観測データを拘束条件とした逆推計(トップダウン法)が有用となる.本共同利用研究では,激変する東アジアの排出量を継続的に把握するため,逆推計手法を構築してNO_x排出量データを近年まで更新することを目指している.継続6年目となる今年度は,先行研究であるItahashi et al. (2019)で報告していた中国・インドのNO_x排出量のトレンドを更新するため,長期衛星計測データの解析を2023年にまで延伸し,さらに中国の将来排出量推計値と比較した.ここではその内容を報告する.

2. 手法

Aura 衛星に搭載された OMI センサーによる対流圏 NO₂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用い,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 2023 年までとした.また,中国清華大学が中心となって開発している共有 社会経済パス (Shared Socioeconomic Pathways; SSP) での複数シナリオに基づく将来排出量推計値 (Tong et al., 2020) を利用した.

3. 結果と考察

中国およびインドについて, 2005 年から 2023 年までの NO₂ 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 NO₂ カラム量が減少傾向に転じ, 一方でインドは 2018 年まで は緩やかな増加傾向であっ た.新型コロナウイルス感



図1. 中国・インドの2005年から2023年までのNO2カラム量の経年変化.

染拡大の影響を受けたと考えられる 2020 年を含み,インドは近年ではほぼ横ばいの傾向にあること がわかった.結果として,2021 年以降の中国とインドの国平均の NO₂ カラム量は,年平均値として 近い値となっていることが示された.

脱炭素化に向けた CO₂ 排出削減と同時に,大気汚染物質排出量も変化していくことが考えられる. 中国の NO_x 排出量は,SSP3 (地域対立)のシナリオを除いて減少するものと予測されている (図 2a). このような複数シナリオ下の排出量予測と,現在までの NO_x 排出量の指標と見なせる NO₂ カラム量 について,2015 年値で規格化して比較を行った(図 2b).その結果,現在までの中国の NO_x 排出量 は SSP5 (従来型発展)をやや上回る推移をたどっていることが明らかとなった.



図2. (a) 4 つの SSP シナリオ下での 2050 年までの中国の人為起源 NO_x 排出量の将来予測値.
(b) 2015 年値で規格化した NO₂ カラム量(黒色,図1)および人為起源 NO_x 排出量(a)の変化率.

4. まとめ

衛星計測による中国とインドの NO₂カラム量の解析を延伸し,中国の人為起源排出量の将来予測値 と比較した.今後は,逆推計手法により近況までの NO_x排出量を推計し,中国とインドという世界 的に見て重要な発生源の排出実態をいっそう把握していく必要がある.

・参考文献

Itahashi, S. et al.: Inverse estimation of NO_x emissions over China and India 2005-2016: contrasting recent trends and future perspectives, Environ. Res. Lett., 14, 124020 (2019).

Tong, D. et al.: Dynamic projection of anthropogenic emissions in China: methodology and 2015-2050 emission pathways under a range of socio-economic, climate policy, and pollution control scenarios, Atmos. Chem. Phys., 20, 5729–5757 (2020).

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).

陸域から外洋への水・栄養輸送に気候変動がもたらす影響

富山大学 大学院理工学研究部 張勁

Impact of Climate Changes on Water and Nutrient Transport: from Land to Open Ocean

Throughout 2023, two joint cruises (Nagasaki Maru and Kagoshima Maru) have been successfully conducted to study water movement in the East China Sea (ECS) by the University of Toyama, Kyushu University, Ehime University, and Kagoshima University. Both qualitative observation and quantitative calculation have been partially carried out to understand the dynamics of low-oxygen bottom and subsurface water layers. Additionally, a time series station, coupled with physical observation, was observed to conceive water dynamics temporally. Furthermore, in response to global climate change in the marine environment, a meeting (in the JpGU 2023 session) in collaboration with the IOC-WESTPAC program concerning healthy, productive, and sustainable Asian Marginal Seas (AMS) was conducted in May 2023. **1. Dynamics of bottom waters in the time series station and low-oxygen water in the subsurface layer observed during the 2023 NS23-117 cruise**

The East China Sea is one of the largest marginal seas, lying over a broad continental shelf (~500km) from the Chinese coast to Okinawa through. The ECS plays a vital role in supplying biological resources to the sea around Japan via the Kuroshio. Considering the deterioration of the marine environment and accompanying changes in ecosystems, it is thus urgent to clarify the dynamics of low-oxygen water. Low-oxygen bottom water during summer months has been widely identified in the outer shelf of the ECS from 2018-2020 and currently in 2023. In the 2023 cruise, the positive correlation between low oxygen bottom (and subsurface) waters and turbidity is much more prominent than in 2018, 2019, and 2020 (Figure 1). Many seawater, sediment, and porewater samples were collected to be analyzed chemically and biologically. Seawater samples were collected by Niskin bottles attached with CTD sensors for REEs, Nd-isotopes, radon, radium, nutrients, dissolved oxygen, and water isotope analysis. Sediment samples were collected by multiple corers and then sliced in 1 cm and 3 cm onboard. Pore water was squeezed in a syringe under low-temperature conditions.

Some preliminary results obtained are as follows: (1) based on the simple mixing model by using temperature and salinity combined with Heavy Rare Earth Elements (HREEs), it is found that temporal factors and physical forces might significantly influence the variability of the KIW and KSSW intrusion into the shelf area, thus influencing biological activity in the area, (2) Part of the low-oxygen water on the outer shelf is originated from KSSW and MSW. Nutrient (DIN, DIP) contribution in low-salinity, low-oxygen waters in the subsurface layer of the ECS is further required to quantify the material budget in the area.



Figure 1. Sectional view of fluorescence contoured with DO<3.75 and transmission<88% (left); Sectional-contour view of %transmission, contoured with DO<3.75 (right).

2. JpGU meeting: healthy, productive, and sustainable Asian marginal seas in response to global climate change

As the AMS is a very important region for human society due to its high productivity, the changing climate and human economic activities have significantly changed the hydrological and biogeochemical cycles, affecting the marine ecosystem. Understanding the nutrient and material cycle is urgent to evaluate the biological productivity changes due to global warming. This meeting discussed various approaches regarding the behavior of nutrients by applying various studies, such as remote sensing, numerical experiments, and physical, chemical, and biological sensing. Oral and poster presentations were given to around 20 scientists, students, and practitioners from various countries (Japan, China, Bangladesh, Thailand, Malaysia, and Cameroon) to deliver their thoughts. We emphasized two main international projects, focusing on nutrient footprints of primary productivity and long-term variations in the water structure and circulation of the Pacific AMS. We hope that the continuation of this collaborative work will help us understand the impact of climate change on the marine environment globally.

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:東京大学大学院工学系研究科 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、インド西ベンガル州周辺におけるトレンド解析結果が最終的に論文として採 択されたのでその成果について報告する。

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、TRMM PR (熱帯降雨観測衛星搭載の降雨レーダー)の気雨量気候分布と実際の雨量計地点との比較を行った。TRMM PR から得られる気候雨量分布(図1)は谷の中で相対的に雨が多い一方で、世界的豪雨地点として知られる Cherrapunji や Mawsynram が位置する台地上では相対的に雨が少ない分布を示す。一方、図2は Cherrapunji にあるインド気象局内に設置した雨量計データを横軸に、より台地内部にある Cherrapunji の雨量データ、及び隣接する谷の中に位置する地点 Sohkhme の雨量データを縦軸にとった散布図を日雨量について作成した。図2の結果は、より内陸の台地上及び谷の中、共にインド気象局内に比べて雨量が系統的に少ないことを示す。この結果について、谷の中で雨量が多い結果は事実かもしれない。ただ、TRMM PR の雨量は地形クラッターの影響を受けない地上から 1km 程度以上上空の結果であり、谷の中の気流場の影響を受けて、谷の中で生成された雨が地上では谷に近い台地上で降っているのではないかと考察した。

3. インド西ベンガル州周辺におけるトレンド解析

変化する気候条件の下で、インド夏季モンスーンの開始、終了及び期間について、過去(1976~2006 年)と将来(2071~2100年)のトレンドを評価した。まず、インド亜大陸で観測された過去の降水量 データ(APHRODITE)を解析し、モンスーンの開始、終了、期間のトレンドを明らかにした。いくつ かの地域では、過去データからモンスーンの開始が早まり、期間が長くなり、また、モンスーンの終了 が遅れていることが確認された。インド亜大陸北東部では、このようなモンスーンの開始と期間のトレ ンドが顕著であった。第5期結合モデル相互比較計画(CMIP5)のいくつかの気候モデルは、観測デー タから検出された過去の傾向を捉えることができ、5つのモデルを選んで将来の期間を解析した。 RCP8.5シナリオの下での CMIP5 モデルの将来予測は、統計的有意性は弱いものの、モンスーンの開 始、終了、期間について同様の傾向を示した。この結果は、過去に観測された、モンスーンの開始が早 まり、終了が遅れる傾向は将来も続き、期間は長くなることを示唆している。



図1: Hirose and Okada (2018) が作成した TRMM 降雨レーダーによるインド北東部のメガラヤ高 原南部の雨量気候分布。黒実線は 500 m 毎の標高を表す。図2 で使用した Cherrapunji と Sohkhme を含む雨量計地点が \blacktriangle や Δ 、☆印で示される。Cherrapunji の町に設置された雨量計地点は2 地点あ り、☆がインド気象局 Cherrapunji 観測所内に設置された雨量計である。



図2: 横軸にインド気象局 Cherrapunji 観測所内に設置した雨量計のデータをとり、縦軸に同じ日の (a)気象局より西の台地内に設置した雨量計データと(b)気象局の南東 6km の谷の中の村 Sohkhme に 設置した雨量計データをそれぞれ示す。黒実線は y=x、青実線は回帰直線を表す。

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、インドにおけるトレン ド解析を実施し、過去に観測されている、モンスーンの開始がより早まり、終了がより遅れる傾向が、 将来も続き、またモンスーンの雨季の期間が長くなる結果が得られた。

5. 研究組織

研究代表者	木口 雅司	東京大学 大学院工学系研究科 上席研究員
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、地球 規模課題対応国際科学技術協力プログラム(SATREPS)、国立研究開発法人科学技術振興機構(JST) / 独立行政法人国際協力機構(JICA)、JICA の人材育成奨学計画(The Project for Human Resource Development Scholarship)によって実施された。 九州北部地方における火山性エアロゾルの光学的特性の影響

富山大学学術研究部理学系 青木一真

要旨

九州北部地方は、日本で越境大気汚染の影響を受けやすい地域として、季節変化や人為起源 (PM2.5等)と自然起源(黄砂等)エアロゾルの変動特性を研究してきた。近年、桜島等だけでな く、西之島のような海洋上から輸送された火山性エアロゾルが観測され、長距離輸送による変質に より、大気汚染とあまり変わらない結果が得られた。

1. はじめに

大気中に浮遊するエアロゾル粒子の時空間変動は、中国などの排出量の変化も影響し、わずかな がら減少傾向にある。九州北部地方は、大陸から越境する汚染物質、黄砂粒子、森林火災などの複 合的に影響を受けやすい場所である。本研究は、長期的な変動の中で、短期的に桜島や西之島など の噴火の影響が観測されており、それらの光学的特性について研究を進めている。

2. 観測·解析概要

エアロゾルの光学的特性は、九州大学応用力学研究所(気候変動科学分野所有)に設置している 太陽直達光と周辺光の放射輝度を観測・解析し、エアロゾルの光学的厚さ・オングストローム指数 (エアロゾル粒径の指標)・一次散乱アルベド(放射吸収のパラメータ)・体積粒径分布等を示す。

3. 結果・考察

Fig.1は、2017年12月から2023年7月までの九州 大学応用力学研究所(福岡県春日市)における 0.5µmのエアロゾルの光学的厚さ(AOT(0.5))とオ ングストローム指数 (Alpha) の月平均値を示した ものである。概ね、エアロゾルの光学的厚さとオ ングストローム指数の季節変化は、同じような季 節傾向が見られたが、西之島のように長距離輸送 で変質された粒子は、大気汚染とあまり変わらな い結果が得られ、モデルや衛星観測との解析が必 要不可欠であった。残念ながら、2023年8月以降の 観測は、豪雨・落雷により観測機器の故障により、 観測を中断している。2023年12下旬より再開した。



Fig.1 RIAM屋上のAOD(0.5)とAlphaの月平均値

4. 研究成果

Aoki, K., M. Momoi and T. Takemura., AOGS2023, Singapore, (2023.08.03)

【招待講演】

研究組織 5.

代表者	青木 一真	(富山大学学術研究部理学系)
協力者	竹村 俊彦	(九州大学応用力学研究所、所内世話人)
	河本 和明	(長崎大学環境科学部)

大気汚染物質の予測精度の向上を目指した化学輸送モデルと植生モデルの統合に関する研究

長野県環境保全研究所自然環境部 栗林正俊

【目的】

PM_{2.5} や地上オゾン(O₃)等の大気汚染物質の動態を予測する上で、化学輸送モデルは有効であるが、O₃ 濃 度の予測精度には問題がある。これは、O₃が大気中での光化学反応により二次生成される汚染物質であり、 O3の前駆物質の1つである揮発性有機化合物(VOC)の排出量が正確に評価できていないことが一因である。 VOC は人為起源と植物起源(BVOC)に大別され、温暖化すると BVOC の排出量が増加すると考えられてい る。BVOC 排出量を推定する際は、BVOC 放出量算出モデル MEGAN を用いることが多く、MEGAN は植 生割合や葉面積指数(LAI)を入力値として、植生タイプ毎の排出係数に日射量や気温、葉齢などの変動因子を 加味して BVOC 排出量を計算する。しかし、落葉樹の葉群フェノロジーは有効積算気温に明敏な応答を示す ことが知られており、温暖化を念頭に置いて BVOC 排出量を予測する場合、LAI を予報的に計算できること が重要である。陸域生態系モデル VISIT は、植物生理プロセスに基づいて LAI 等の生物学的因子と併せて、 CO₂, CH₄, BVOC 等の大気-陸域間のガス交換を予報的に計算できる。本研究では、将来的に化学輸送モデル と VISIT を結合させることを念頭に置いて、VISIT により異なる 2 つの植生の BVOC 排出量を過去気候と 将来気候の条件下で推定し、温暖化応答性の植生による違いについて考察することを目的とする。

【方法】

国立環境研究所の富士北麓フラックス観測サイト(標高 1100 m)の林齢約 70 年のカラマツ林(落葉針葉樹) と森林総合研究所の富士吉田フラックス観測サイト(標高 1030 m)の林齢約 100 年のアカマツ林(常緑針葉樹) を対象に、VISIT で過去と将来の BVOC 排出量を計算する。この 2 つの観測サイト間の距離は約 1.2 km で、 どちらも年平均気温は 9℃前後、年降水量は 1900 mm 前後である。VISIT に入力する気象データは、過去に ついては JRA55 再解析値を非静力学地域気候モデル(NHRCM)の境界値に用いた再現計算結果、将来につい ては地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベースの産業革命前+2℃(21 世紀半ば頃)の予測 値を NHRCM の境界値に用いた計算結果、をそれぞれ利用する。JRA55/NHRCM による過去計算の水平解 像度は 5 km で、富士北麓カラマツ林と富士吉田アカマツ林は同じ格子となる。将来の大気中 CO2 濃度は RCP8.5 シナリオを利用し、解析対象年は過去を 2011~2015 年、将来を 2046~2050 年とする。

【結果】

富士北麓における気象観測値と NHRCM の計算値を比較した結果、NHRCM は降水量をやや過大評価し たが、気温を高精度に再現した。同サイトの生態系純生産量(NEP)について観測値と VISIT の計算値を比較 した結果、VISIT は NEP の極大値をやや過小評価するものの季節変化は観測値とよく整合した。

カラマツとアカマツの過去気候下における年間BVOC排出量は、カラマツが33.0 (kg C ha 1 yr 1)であるのに 対し、アカマツが7.0 (kg C ha⁻¹ yr⁻¹)で、カラマツの方がアカマツに比べて4.7倍多かった。組成としては、カ ラマツでは6割近くをイソプレンが占め、残りをモノテルペン類が占めたのに対し、アカマツでは8割近くを イソプレンが占め、残りをモノテルペン類が占めた。将来気候下における年間BVOC排出量は、カラマツが 54.8 (kg C ha⁻¹ yr⁻¹)であるのに対し、アカマツが12.1 (kg C ha⁻¹ yr⁻¹)で、カラマツの方がアカマツに比べて4.5 倍が多かった。どちらの植生も将来はイソプレンが1.7~1.8倍、モノテルペン類が1.6倍、それぞれ増加した。

日別BVOC排出量の季節変化について、カラマツは展葉直後から急激にBVOC排出量が増加して、着葉期 間の前半を中心にBVOCを多く排出し、落葉後はBVOC排出量がほぼ0になる季節変化をしていた(図1)。一 方、アカマツのBVOC排出量は、冬季に低く夏季に高くなる緩やかな季節変化をしていて、量は少ないもの の冬季はアカマツの方がカラマツよりも多い。過去と将来で比較すると、カラマツは気温上昇に伴い展葉が 早期化することを反映して、将来はカラマツのBVOC排出量が増加し始める時期やピークに達する時期が約 3週間早まる。また、将来は気温上昇に伴い落葉が晩期化することを反映して、カラマツのBVOCの排出が終 わる時期は約1週間遅まる。一方、将来のアカマツの日

別BVOC排出量は、過去に比べてどの時期も増加する ものの季節変化の特徴に大きな変化はない。

【考察】

カラマツは温暖化に伴う葉群フェノロジーの変化が BVOC 排出量の季節変化にも反映されるので、紫外線 の強い春から初夏にかけて BVOC 排出量が大幅に増え ることで O₃の光化学生成を助長する可能性がある。ア カマツの場合はカラマツに比べるとこの影響は小さい と考えられるが、温暖化に伴い BVOC 排出量が増加す ることに変わりはなく、また街に近い低標高域にも多 く生えているので、こちらも O3の光化学生成を助長す る可能性がある。

【研究成果報告と研究組織】

別紙の発表論文・学会発表リストに記載のとおり。



図1 VISIT で計算された富士北麓カラマツ林と富士 吉田アカマツ林における過去(2011~2015年)と将来 (2046~2050年)の日別 BVOC 排出量の季節変化。

海洋マルチドリフターを用いた海洋漂流現象に関する研究

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。今年度は波浪と海洋表層流を測定するドリフター の開発および展開に加えて、海上風を計測するのに適した浮体形状の検討に焦点を当て、予備実 験ならびに平塚海洋観測等付近にて計測試験を実施した。

2 手法

これまで申請者が開発してきた波浪ブイに抵抗体を付与することにより波浪と海洋表層流を同時に計測する波浪漂流ドリフターの開発に取り組んだ。具体的にはFig.1で示されるような小型ドリフターの上部に波浪計測センサボックスを搭載させ、GPSと IMU データから漂流に関する情報 ならびに波浪に関する情報を計測するものとした。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。

また、超音波風速計(CALYPSO instruments 社)とマイコンとを Bluetooth Low Energy によって 無線接続し、データを取得するシステムを構築した。同超音波風速計は直径 70mm、高さ 57mm、 145g と非常に小型かつ軽量である。測定レンジは 1-25 m/s であり、精度については ±0.1 m/s at 10 m/s と記載されている。太陽光電池が搭載されており、測定間隔 1Hz で計測した風向・風速 データを出力可能である。ただし、センサの方位を得ることができず、別途地磁気センサとの組 み合わせ等により風向を算出する必要がある。本研究では超音波風速計(CALYPSO instruments 社) と研究遂行者がこれまで開発してきた GPS, IMU 計測システムと融合することで風を計測する試み を行った。より具体的にはキャンパス環境棟屋上での予備実験ならびに平塚海洋観測棟付近での 展開試験を実施した(Fig.2)。

3 実験結果

2023 年 9 月の北極航海において開発した波浪漂流ドリフターを展開した。展開後の軌跡に基づく 海洋表層流と ERA5 再解析データ海上風に基づき、Windage を計測したところ Fig. 3 のような結果 となった。風速の 2%弱で応答しており、また偏角も海上風の向きから 45 度程度右となる点で頻度 が高くデータが得られていることから吹走流に沿って動いていることが示唆される。

また、風速については計測し Bluetooth Low Energy での接続によりマイコンにて受信すること ができたが、地磁気による方角の修正、検証が未着手である。また、測定した風速についてもレ ファレンスとなる風速計との比較が必要である。



Fig. 1 開発した波浪漂流ドリフター



Fig. 2 柏キャンパス環境棟屋上での予備実験の様子(左)と平塚海洋観測棟付近での展開の様子(右)



Fig. 3 開発した波浪漂流ドリフターのWindage(複素数形式)

4 成果報告

下記の通り、論文発表を実施した。

Tsubasa Kodaira, Tomotaka Katsuno, Takehiko Nose, Motoyo Itoh, Jean Rabault, Mario Hoppmann, Masafumi Kimizuka & Takuji Waseda (2023) An affordable and customizable wave buoy for the study of wave-ice interactions: design concept and results from field deployments, Coastal Engineering Journal, DOI: 10.1080/21664250.2023.2249243 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、海底堆積物が津波により巻き上げられる事による栄養塩溶出の変化を明らかにする ことである。大阪湾3箇所で海底堆積物を採取し、洗掘と津波後の再堆積を模擬したコアを作成し、栄 養塩溶出速度や間隙水中栄養塩濃度鉛直分布の現状(コントロール)との比較を行った。



2. 方法

図1に示す A,B,C の3 地点でコアサンプリングと、海底直上水の採水を行った。先行研究の堆積物巻 上げ・輸送シミュレーション結果から、A 地点では堆積物の洗掘が、B・C 地点では再堆積が起こると 予想され、B・C 地点は底質が異なる。A・C 地点で各3本、B 地点で6本の堆積物コアを採取した。採 取したコアで、現状を表す「コントロール」コア、津波により表層堆積物が2cm 洗掘された状態を想定 した「洗掘」コア、洗掘された堆積物が再堆積した状態(表層堆積物を曝気し被せた)を想定した「再 堆積」の3種類のコアを作成した。いずれのコアも、採水・濾過した現場海水で堆積物上を満たし、溶 存酸素・水温センサー、プロペラ、採水チューブを入れ、シール・オイルで密封した。プロペラ回転数

20 rpm(堆積物が巻き上がらない速度)で、直上水をかき混 ぜて均一にした。図2の通りにコアを並べ、実験室内温度を 夏季の平均的な泥温23℃に保った。直上水中の溶存酸素飽和 度が0%になった後、毎日2回直上水の採水を行うと共に採 水量の海水を曝気した現場海水で補充し、溶出実験を行っ た。コアサンプリング直後、及び溶出実験1週間後に、コア を表面から1cmずつ3層に切り分け、遠心分離機にかけて間 隙水を採取した。B地点のコアは40日後まで溶出実験を行 った後、間隙水を採取した。採水した現場海水、直上水、間 隙水は直ちに濾過して冷凍保存し、後にアンモニア態窒素

 (NH₄-N)、硝酸態窒素(NO₃-N)、亜硝酸態窒素(NO₂-N)、 リン酸態リン(PO₄-P)、ケイ酸塩(SiO₂)、溶存態炭素(NH₄-N)、及び溶存有機体窒素(DOC)の各濃度を測定した。これ ら無機塩の溶出速度を、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。

3. 結果

全てのコアで、時間と共に直上水中の NO₃-N、NO₂-N、DOC 濃度が低下した。NO₃-N と NO₂-N は NH4-N に還元され、 DOC は無機に分解されたと考えられる。NH4-N、PO4-P、及 び SiO₂ 濃度は図 3 の通り上昇し、堆積物からの溶出が見られ た。NH4-N と PO4-P の直上水中濃度は、概ね一定値に収束し た。この最終濃度は、栄養塩供給ポテンシャルを表している と考えられる。時間経過と共に、直上水と間隙水との濃度差 が小さくなった。これは堆積物内の微生物活性が下がったた めだと考えられる。コアの種類による栄養塩濃度の違いは、 堆積物表層の生物活性の高さの差が現れだと考えられる。



図3 直上水中濃度の時間変動

4. 成果報告

- M. Hayashi, T. Inoue and S. Hirokawa, C. Estimation of Changes in the Nutrient Release Rate from Sediments after a Tsunami by an Incubation Experiment, Water, 15, 11, 2041, 2023.
- ・神戸大学大学院海事科学研究科津波マリンハザード研究講座、神戸大学でのマリンハザード研究、防災推進国民大会 2023, イグナイトステージ IG-5.
- ・神戸大学大学院海事科学研究科津波マリンハザード研究講座、津波による堆積物擾乱後の海底からの 栄養塩溶出フラックスの変化、防災推進国民大会 2023, ポスターPS-23.

5. 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

非線形性及び分散性を考慮した表面波・内部波に対する 地形の影響に関する数値解析的研究

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、ソリトン共鳴に伴って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が強い内部波が相互作用する場合を対象 として、変分原理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 により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 成されているが、こうした水深の変化が、非線形波動の2次元伝播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、様々な形状の海底地形 が、表面波や内部波の伝播過程に与える影響を数値解析によって調べる.本研究で明らかにし ようとする非線形波の挙動特性は、東シナ海の大陸棚近傍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、表面波や内部波を対象とし、次の各事項を目的として研究を進めた.

- (1) 様々な水深や,平面形を有するモデル領域を伝播する表面波,または,内部波の非線形性や 分散性を考慮して,波の挙動の数値解析を実施し,特に,内部波の生成に関するメカニズム を考察する.
- (2) 東シナ海といった実水域の特徴を考慮した地形を対象として、表面波及び内部波の挙動を 調べ、そのメカニズムを考察する.

これらの各段階において,数値モデルの開発や,数値解析に関する仕事を分担し,計画の遂 行にあたった.1回は,全メンバが直接会って議論する機会を持つ.更に,昨年度に引き続き, 波動問題に関わる他の研究者と研究集会を開催する.

主要な成果

まず,前述した変分原理に基づく多層問題の非線形波動方程式系を1層問題の非線形浅水方 程式系とし,薄板状浮体の曲げ剛性率を考慮して,航空機の滑走によって浮体空港に生成され る浮体波の1次元及び平面2次元数値解析を行なった(Kakinuma and Hisada, 2023).そして, 航空機の走行速度と線形浅水波の位相速度が近いときに,大きな浮体波が生成される様子をシ ミュレートした.

次に、上記の多層問題の非線形波動方程式系を2層問題の非線形浅水方程式系とし、気圧波 によって励起される表面波及び内部波の1次元数値解析を行なった(Kakinuma, 2023).気圧波 の移動速度が表面波モード、または、内部波モードに近い場合に、表面波や内部波が生成・増 幅された.また、静水深が徐々に浅くなる斜面上では、気圧波から外れた波が、浅水変形によ って増幅された.

そして、表面波に対する地形の影響を利用した研究を行なった.すなわち、上記の多層問題 の波動方程式系を1層問題の強非線形・強分散波動方程式系とし、薄板状浮体の曲げ剛性率を 考慮して、弾性浮体と潜堤を併用した津波高さの低減手法に関して数値解析により調べた (柿沼,2023).数値解析では、陰的スキームを採用した差分法(Nakayama and Kakinuma, 2010) を適用して、基礎方程式系を解いた.入射波の波形勾配が大きい程、弾性浮体の津波高さ低減 効果が大きくなるため、浮体の沖側に潜堤を設置し、潜堤上で増幅した津波を浮体に入射させ る.対象とした条件において、潜堤を併用することによって、潜堤を設置しない場合よりも、 弾性浮体が有する津波高さ低減効果を大きくすることができることを確認した.

更に,東シナ海の内部潮汐の力学の解明を目的として,東シナ海の大陸棚から沖縄舟状海盆 を含む領域を対象とした数値モデルによる研究を行なった(辻,2023).黒潮の平均流に違いが ある 2016 年と 2017 年の 7 月を計算期間に選んだ.初期・境界条件を変えた計算ケースで,順 圧-傾圧エネルギー転換率を調べ,その周波数解析から,大陸斜面でのエネルギー転換の変動 と黒潮平均流との関連を強く示唆する結果を得た.

研究成果報告

柿沼太郎:弾性浮体と潜堤を併用した津波高さの低減,津波工学研究報告,40,153-158,2023.

- 辻 英一:東シナ海における順圧-傾圧エネルギー変換の解析,京都大学数理解析研究所 RIMS 共同研究(公開型)「非線形波動現象の数理とその応用」,2023.
- Kakinuma, T. Numerical simulation of surface and internal wave excitation due to an air pressure wave. Geol. Earth. Mar. Sci. 5(3), 1–5, 2023.
- Kakinuma, T. and Hisada, M. A numerical study on the response of a very large floating airport to airplane movement. Eng 4(2), 1236–1264, 2023.

参考文献

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.

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)

東シナ海から日本海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. はじめに これまで、研究メンバーは、山口・福岡・長崎県沿岸での水温・塩分等のモニタリングや、 沖合での係留観測を行っており、これらを継続・拡張する。ここでは、東シナ海から対馬海峡へと通じ る五島海底谷縁辺で行われた係留 acoustic Doppler current profiler(ADCP)観測について報告する。 2. 係留 ADCP 観測 長崎大学水産学部附属練習船「鶴洋丸」を用い、ADCP(Sentinel V 300 kHz, Teledyne Marine)の設置・回収を行った。図1の五島海底谷縁辺の水深 199 m に設置した。設置期間は 2023 年 6 月 12 日~6 月 14 日の約 41 時間である。係留系の概略を図2 に示す。設置の際に、応用力学研究所の切 離し装置(海洋電子)を使用した。観測には鉛直流を計測できる5 ビームの ADCP を用いた。できるだ け 5th beam が鉛直上向きとなるように、抵抗の少ないと考えられる楕円型のブイ(EB-33, Mooring Systems, Inc.) に ADCP を取り付けた。ADCP の設定は、broadband(bandwidth 25%)、層厚 4 m で測定 レンジを 148 m とし、1 秒間隔で ping を発信した。実際は、60 m 程度のレンジまで観測できた。



図1. 観測点。 △が ADCP 設置点である。



図 2. 係留系の概略図。ADCP より上部は設置後 に切り離される。

3. 結果 ここでは示さないが、5th beam で観測された ADCP 鉛直流は正に偏っていた。水平流が弱いときに、鉛直流が小さくなる傾向を示した。pitch (p) と roll (r) からもとめた ADCP の傾き θ を図 3 に示す。水平流と ADCP の傾き (pitch と roll) から、鉛直流を再計算する必要があると考えられる。



図 3. pitch (p) と roll (r) の時系列。ADCP の傾き θ は、cos θ = cos p cos r とした。
研究組織 長崎大学 流州大学 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)
地口県 水産研究センター 渡辺俊輝,和西昭仁(研究協力者)

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。2021 年度に波長 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 めるとともに、波長 532 nm の HSRL 観測データの解析を行った。レイリー散乱信号の高度減衰量か らエアロゾル消散係数を抽出し、全散乱(ミー散乱+レイリー散乱)信号とレイリー散乱信号の比を とることで後方散乱係数を抽出した。さらに、体積偏光解消度と後方散乱係数から粒子偏光解消度を 導出した。また、消散係数と後方散乱係数の比(ライダー比)を計算した。

【結果】

図1に2023年4月に九大HSRLで観測されたライ ダー比と粒子偏光解消度の散布図を示す。各プロット の色はエアロゾルの高度を示す。過去に応力研ライダ ーで観測された大気汚染粒子、海塩粒子、鉱物ダスト のケースについてもプロットしている(高度400– 700mの観測値)。散布図の結果から、高度2km以下 では偏光解消度が低く、ライダー比の変動が大きい。 これは大気汚染粒子と海塩粒子が存在するためだと考 えられる。また、高度2km以上では偏光解消度が高 く、鉱物ダストが観測された。この時のライダー比は 39.3±13 sr であり、東アジアで観測される鉱物ダス トと比べて 5-10 sr 小さい。また、偏光解消度は 0.25±0.09 であり、発生源付近の値(約0.35)よりも





小さい。これは鉱物ダストの輸送中に球形粒子と内部・外部混合したことを示唆している。

【今後の展望】

今後、波長 355 nm HSRL を応力研ライダーに導入し、多波長 HSRL の連続観測を実施する。

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

ハイエントロピー合金(HEA)は、等原子組成比の5つ以上の元素で構成されており、ギブズ自由エネルギー配置エントロピーの寄与が大きい。従って、金属間化合物を形成することなく、面心立方(FCC)、体心立方(BCC)、六方最密(HCP)構造などの単純な結晶構造を持つ単相固溶体に形成することができる。HEAの最初の例として、FCC単相固溶体CoCrFeMnNi等原子比の合金が報告された。このHEAは優れた機械的特性を備えた安定した合金であるため、広く研究されている。また、このHEAは優れた耐照射性を有することも報告された。最近、CoCrFeMnNiの降伏強度と引張強度を向上するため、析出させた(CoCrFeNi)95Ti₁Nb₁Al₃の引張特性と照射による空孔集合体の形成について調べた。

2. 実験方法

高純度(>99.9%)のCo、Cr、Fe、Ni、Ti、Nb 及びA1により真空誘導炉のMg0 るつぼで溶融された。 その後に、1473K で真空中 12 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、0.2mm まで圧延した。微小引張試験片と 10mm の正方形試料を打ち抜き、真 空中に 1273K で 1 時間焼鈍を行った。一部の試料をさらに 1023K で真空中に 8 時間の時効で析出をさせ た。75%の酢酸と 25%の過塩素酸の溶液に 15V の電解研磨により試料表面の酸化膜を取り除いた。引張試 験の歪速度は 2.0×10⁻³/s であった。10mm の正方形試料に対して 2.5MeV の鉄イオンにより 300K、573K 及び 773K で最大 1.5×10¹⁹ ions/m²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 傷量の最大は約 1.65dpa であった。照射の後に、低速陽電子ビームにより試料中の鉄イオン照射による 空孔集合体の形成を調べた。

3. 実験結果と考察

図1に析出させた(CoCrFeNi)₉₅Ti₁Nb₁Al₃HEA の引張試験の結果を示す。比較のため、析出をさせていな かった試料、CoCrFeMnNi 及び CoCrFeNi の結果も示す。析出をさせていなかった試料の降伏と引張強度 が CoCrFeNi より高かったが、CoCrFeMnNi より低かった。また、伸びも小さかった。一方、析出させた 試料の伸びは殆ど変わらなかったが、降伏と引張強度は 200MPa 以上増加した。析出物の形成により HEA の力学特性が改善されたことが分かった。

図2に(CoCrFeNi)₉₅Ti₁Nb₁Al₃における照射された低速陽電子のエネルギーと照射深さの関係を示す。 この図から2.5MeV鉄イオンの照射により形成された欠陥の測定は16keVの陽電子ビームが適切である ことが分かった。以下の結果は16keVの陽電子ビームを用いた測定である。図3に各温度で照射した析 出させた(CoCrFeNi)₉₅Ti₁Nb₁Al₃の陽電子消滅同時計測ドップラーブロードニング(CDB)を示す。横軸は電 子の運動量で、縦軸は未照射試料との比である。低運動量領域(<5×10⁻⁸m₀c)の値は空孔の形成を表す。 空孔がないと思われるよく焼鈍された試料に比べ、もしその値は1より高かったら、空孔が存在する。 従って、300Kと573Kで照射した試料においては、空孔が形成された。これに対して、773Kで照射した 試料に空孔がなかった。また、高運動量領域の値は合金の構成元素の偏析・析出のことを表す。未照射 試料に比べ、いずれの照射試料においても高運動量領域に顕著なピークが現れなかったので、照射によ る析出や偏析などがなかった。図4に300Kで照射量が多かった試料における焼鈍による欠陥の回復の CDBを示す。低運動量領域の値は焼鈍温度の上昇と共に減少した。これは照射によって形成された空孔 集合体の密度が減少したと示唆している。また、773Kまで焼鈍しても低運動量領域の値が773Kで照射 した試料より高かった。773Kで照射によって安定な空孔集合体の形成ができないことが分かった。さら に、773Kまで焼鈍中に高運動量領域に析出や偏析を示す顕著なピークが現れなかったことからこの合金 は773Kにおいても安定のことを示している。

4. まとめ

本研究では、析出分散強化(CoCrFeNi)95Ti₁Nb₁Al₃HEAの開発は成功した。この合金の降伏と引張強度は CoCrFeMnNi より 200MPa 以上増加した。また、この合金においては、照射による空孔集合体の形成とそ の熱安定性を調べた。室温 300K での照射では空孔集合体が形成され、一部は 773K での焼鈍後も安定に 残った。一方、773K での照射では空孔集合体が形成されなかった。この結果は(CoCrFeNi)95Ti₁Nb₁Al₃の 耐照射性が優れていることを示している。



図1 CoCrFeNi、CoCrFeMnNiと焼鈍、時効した (CoCrFeNi)95Ti1Nb1Al3の引張試験結果



図2 (CoCrFeNi)₉₅Ti₁Nb₁Al₃における各エネル ギー陽電子の深さ分布



図3 各温度で照射した(CoCrFeNi)₉₅Ti₁Nb₁Al₃ と未照射試料の CDB 比の曲線



図 4 300K 照射した試料の高温焼鈍による 回復の CDB 結果

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

京都工芸繊維大学 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 的高ベータ条件を作ることを目的として実験を行った。この実験により、ベータ値自体はそれほ ど変わらなかったものの、従来観測が不可能であった高波数乱流を、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、中性粒子ガス圧依存性について明らかにし た。本成果は、Plasma Physics and Controlled Fusion に掲載され,カバーイメージにも採択された。 今後は、観測された高波数乱流の質量依存性やマルチスケール相互作用の調査などを行なってい く。

研究目的

磁化プラズマ乱流の空間スケールはイオン実効ラーマー半径 ρ_s を基準に、 $k_\perp \rho_s \ll 1$ のイオンスケール乱流やそれよりもさらに細かいスケール、すなわち $k_\perp \rho_s \geq 1$ の高波数乱流に特徴づけられる。 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、高波数乱流が異常熱輸送や異常加熱に寄与するとされており、研究対象として注目が集まってきた。高波数乱流の観測は主に一部の大型トーラス装置にてマイクロ波散乱計測で行われてきたが、 昨年度の九州大学での共同研究にて、高波数乱流を直線装置で励起させることに成功した[]。本年度は、本実験を発展させるためにパラメータ探索に着手する。

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)を利用して高波数乱流実験を行った。 先行研究により磁場を 225G 程度にすることで高波数乱流が励起することが確認されている[1](図 1参照)。本実験では、磁場以外のパラメータスキャンとして中性粒子ガス圧スキャン実験を行っ

た。中性粒子ガス圧スキャンに より中性粒子とイオンや電子 との衝突周波数が変わるため、 波動の減衰や不安定性の成長 率等が変わりうる。

計測には半径方向駆動プロ ーブと周方向プローブを利用 し、揺動の半径方向分布や、高 波数乱流による密度揺動の時 空間発展計測を行った。



図 1: 高波数乱流励起実験の概要[2]



図 2: 乱流の二次元スペクトルの中性ガス圧依存性。(a)-(c)は中性粒子ガス圧 0.38Pa、 (d)-(e)は中性粒子 ガス圧 0.76Pa の場合を示す。(b),(e)は周方向モード数・周波数空間で分解された二次元スペクトルであり、 これをモード数方向に積分したものが(a),(d)、一方で周方向に積分したものが(c),(f)である。

実験結果

高波数乱流励起実験における中性粒子ガス圧スキャンを行った際に得られた二次元スペクトルを 図2に示す。ガス圧が0.38Paでは先行研究[1]で得られたような波数空間・周波数空間においてブ ロードな連続スペクトルが観測された。観測された揺動の時空間構造はイオンの実効ラーマー半径 よりも十分小さく、イオンサイクロトロン周波数よりも十分速い現象である。中性ガス圧を0.76Pa として中性粒子との衝突周波数を増やしたところ、ブロード連続スペクトルのパワーが減少し、離 散的なピークが新たに現れた。(図2の(d)や(e)を参照)。さらにガス圧をスキャンした結果、この 離散ピークはガス圧を増やすほどパワーが増加し、連続スペクトルのパワーは減少することが明ら かとなった。さらに、離散ピークについてそのピーク間周波数を調べたところ、イオンサイクロト ロン周波数程度であることが明らかとなった。

考察

中性粒子ガス圧を変化させると、主に中性粒子との衝突周波数が変化する。連続スペクトルのガ ス圧増加に伴うパワーの減少は衝突による減衰が効いている可能性がある。一方で、衝突周波数が 大きいにも関わらず離散ピークのパワーが増加することについては、寺坂・吉沼の理論解析の静電 イオンサイクロトロン波の特徴と類似している。また離散ピークのピーク間周波数がイオンサイク ロトロン周波数程度であることから、離散ピークはイオンサイクロトロン運動に起因する不安定性 の可能性が高いと考えられる。

成果報告

本研究の成果は、査読有科学雑誌 Plasma Physics and Controlled Fusion に掲載された[2](DOI: 10.1088/1361-6587/acfbf7)。また、日本物理学会秋季大会、プラズマ核融合学会年会、および AAPPS-DPP にて、本研究についての口頭発表を行った。

参考文献

- [1] Y. Kawachi et al., Sci. Rep. 12, 19799 (2022)
- [2] Y. Kawachi et al., PPCF 65, 28, 115001 (2023)

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おける水素原子の反射は、水素原子の再結合と並んで水素リテンションを決定 する重要な現象である。本研究では、分子動力学法を用いた計算によって、金属表面に水素原子が付着 している場合の反射挙動を評価した。

2. 計算方法

分子動力学のコードはオープンソフトウェアである LAMMPS、ポテンシャル関数は多原子系に対応 し、原子どうしの結合と解離を記述できる ReaxFF を用いた。固体は8×8×8 格子の鉄結晶で入射粒子 は1 eV の重水素原子である。初期状態の鉄結晶に重水素原子を入射し続けて表面の重水素を飽和させ、 その状態で更に重水素原子を入射させたときの反射率は角度分布を調べた。

3. 計算結果と考察

温度 373Kの鉄における重水素の反射角(表面法線に対す る角度)の分布を図1に示す。入射角(法線に対する侵入角) が0°である(a)の場合は、30°付近にピークがあるように 見える。表面は原子レベルの凹凸があり、大半の原子は凹 部のポテンシャルで反射する。反射角が大きいと周囲の鉄 原子に遮られてしまうので、ランダムな反射であるコサイ ン分布(実線)の大角度側がカットされたような形になっ たと考えられる。入射角が15°、30°、45°でも同様の傾 向が見られた。粒子反射係数は0.10~0.16であった。

60°入射の(b)では、ランダムな成分はほとんど無く、 55°付近に鋭いピークが見られ、大半の重水素原子が鏡面 反射した。粒子反射係数は 0.38 であった。入射角 60°で は 0°に較べて法線方向のエネルギーは 0.25 倍となること から、表面付近における等ポテンシャル面は、1eV では凹 凸があり、0.25 eV では平坦であると考えられる。



45°の入射(法線方向のエネルギー0.5eV)では鏡面反射 が見られなかったことから、サブ eV 程度の僅かなエネル 図1 373Kに(a)0°方向および(b)60° から入射した重水素の反射角度分布

ギー差によってランダム反射と鏡面反射の違いが生じ、反射率も大きく異なることが分かった。

研究成果

なし

研究組織

代表者	高木郁二	京都大学大学院工学研究科	教授
研究協力者	花田和明	九州大学応用力学研究所	教授
研究協力者	森山瑠大	京都大学大学院工学研究科	修士2年
研究協力者	杉野目翼	京都大学大学院工学研究科	修士1年

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。PLATOの予測パラメータ領域において、衝 突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 散逸性捕捉電子モード (d-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 を示す。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行う。 Sugama(*S*) 衝突演算子を用いたシミュレーションの結果と Lenard-Bernstein(*LB*) 衝突演算子 によるものを比較する。

2 パラメーター設定

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を使用している。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。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。

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。*S* 衝突演算子と *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。*S* 衝突演算子を用いた場合、 $\rho = 0.47 \ge \rho = 0.65$ における不安定性は、d-TEM と ITG モードによって駆動されるものであ る。 $\rho = 0.47 \ge \rho = 0.65$ 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。d-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。d-TEM モードは、 $\rho = 0.81$ で不安定に なると予測される。一方、*LB* 衝突演算子を用いた場合、ITG モードは安定であり、d-TEM は 不安定であることが分かった。

非線形ジャイロ運動論解析の結果、帯状流の乱流に対する影響は*S*衝突演算子を用いた場合の 方が、*LB*衝突演算子を用いた場合と比べて大きい。その結果、*S*衝突演算子を用いた場合は、 *LB*衝突演算子を用いた場合と比べて、乱流輸送が小さくなることを示した。さらに乱流輸送 の定量化を行った。

107

構造材料の耐水素脆化特性に及ぼす熱処理の影響

Effect of Heat Treatment on Hydrogen Embrittlement of Structural Materials

茨城大学 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こと により、水素脆化を引き起こす懸念がある。また、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考えら れてている。一方、同組成の材料でも、その熱処理条件を変えることにより、機械的特性の向上に加 えて、水素脆化を抑制できることが最近の研究で分かってきた。そこで、本研究は、構造材料の耐水 素脆化特性に及ぼす熱処理条件の影響を究明し、耐水素脆化特性に優れた高性能構造材料の開発に役 立つ知見を得ることを目的とする。

2. 実験方法

2.1 7000 系アルミニウム合金

試料は、熱処理条件の異なる 7000 系アルミニウム合金 7H146 の T6 熱処理において、冷却速度の異 なる 3 種類の材料を使用した。表 1 に各材料の特性を示す。冷却条件の違いに伴い、空冷 100 ℃/min で冷却したものを 7H146A、空冷 30 ℃/min で冷却したものを 7H146A2、空冷 20 ℃/min で冷却したも のを 7H146A3 とした。それらの機械的特性は冷却速度の低下に伴って低下し、逆に破断伸びは増大し た。1 例として、7H146A3 の引張強さは 7H146A の 12.4 %低下し、7H146A3 の 0.2 %耐力は 7H146A の 14.7 % 低下し、7H146A3 の破断伸びは 7H146A の 0.17 %増大している。また、先行研究により、T6 熱処理の条 件範囲内で冷却速度が遅い方 (7H146A3) が耐水素脆化特性に優れていることが明らかとなっている^(1,2)

材料名	冷却条件(空冷)	引張強さ[MPa]	0.2%耐力[MPa]	破断伸び
	[°C/min]	(LT 方向)	(LT 方向)	[%]
7H146A	100	501	459	19.0
7H146A2	30	466	418	18.6
7H146A3	20	439	384	22.2

表1 7000 系アルミニウム合金材料の特性

2.2 Gaによる液体金属脆性を利用した粒界破面作成

図1にGaによる液体金属脆性の模式図を示す。アルミニウム材料に、Gaなどの低融点金属が付着すると、アルミニウム多結晶体の結晶粒界に侵入し、延性を急激に低下させて液体金属脆性(LME)を引き起こす。これにより粒界上析出組織を詳細に観察でき、粒界析出組織を定量評価ができる。



図1 アルミニウム多結晶体に及ぼす Ga による液体金属脆化現象の模式図
2.3 実験方法及び実験装置

短冊状試験片(10Wx30Lx1Tmm、圧延方向に垂直方向)を機械加工により切り出し、両面を耐水研磨 紙及びアルミナ粒で鏡面研磨した。試験片中央部の溝に液体 Ga を塗布し、導電性テープを貼り付け、 温度 50℃で 24h 保管した。その後、試験片を剛体で圧縮しながら長手方向に引張り破断させた。これ により、最も Ga の浸透が少ない粒界破面が出現し、結晶粒界の詳細な SEM 観察が実施できた。

3. 実験結果

3.1 Ga による液体金属脆性を利用した粒界破面の観察

7H146A や 7H146A2 に関しては図 2 のような比較的大きい平滑な結晶粒界が観察され、7H146A3 では 比較的小さな結晶粒界が観察された。また、平滑で切れ目のない大きな粒界破面が観察できた。

7H146A2 と 7H146A3 では図 3 のような粒界内凹凸が多数観察され、粒界析出物の存在が明らかとなった。また、切断法によって結晶粒径の測定を行ったところ、冷却速度が遅くなる、扁平した結晶粒径が小さくなることが分かった。このことから、7000 系アルミニウム合金は、冷却速度の低下に伴って、結晶粒径の微細化及び多数の粒界析出物の出現により、耐水素脆化特性が向上したことが明らかとなった。





⊠ 2 Fracture surface of 7H146A or 7H146A2.

🗵 3 Fracture surface of 7H146A3.

4. まとめ

本研究は、耐水素脆化特性に優れた高性能構造材料の開発に役立つ知見を得るために、T6 熱処理の 冷却条件の異なる3種類の7000系アルミニウム合金に対して、Gaの液体金属脆性を利用した粒界破面 を詳細に観察した。その結果、7000系アルミニウム合金は、T6熱処理の冷却速度の低下に伴って、結 晶粒径の微細化及び多数の粒界析出物の出現により、耐水素脆化特性が向上したことが明らかとなっ た。

今後、STEM を用いた粒界析出粒子の定量的な評価を実施する予定である。

参考文献

- 大野源也、車田亮、渡邉英雄、"7000系アルミニウム合金の破面観察による耐水素脆化特性の火江 名に関する研究"、日本機械学会関東支部第30回茨城講演会講演論文集, No. 220-2, (2022. 8. 19), 0S4-(1), No. 403.
- (2) 大野源也、車田亮、田代一真、渡邉英雄、"7000系アルミニウム合金の破面観察による耐水素脆化 特性の火江名に関する研究"、日本機械学会関東支部第 31 回茨城講演会講演論文集, No. 230-2, (2023. 8. 18), 0S4-(1), No. 402.

高熱負荷によるタングステン材の損傷と強度特性の相関に関する研究

茨城大学工学部 車田 亮

【目的】国際熱核融合実験炉(ITER)のタングステン(W)ダイバータは、定常熱負荷やディスラプション および ELMs 時の非定常熱負荷を受け、室温から融点直下までの静的・動的温度変化を受ける。したがっ て、室温から高温までの広い温度範囲にわたり材料特性のデータを取得する必要がある。本研究では、 各種の W 材に対して、ELM 様熱負荷および高熱負荷による損傷と W の降伏応力、引張強さおよび伸び などの強度特性の相関を明らかにし、W 材の開発のための基礎データを取得することを目的とする。

【実験方法】本年度の共同研究では ITER 仕様の純 W の高温での変形挙動を調べた。ITER 仕様の純 W 圧延材(アライドマテリアル製の応力除去処理材(SR 材))から引張試験片を切り出した。一部の試験 片を 1800℃で 1 時間、真空焼鈍することにより再結晶処理材(RC 材)とした。試験片の寸法は、平行 部の長さ 5.0 mm、幅 1.2 mm、厚さ 0.5 mm である。引張試験時の初期歪速度は 1800℃では 2 x 10⁻⁴ s⁻¹、 5 x 10⁻⁴ s⁻¹ および 2 x 10⁻³ s⁻¹ で、1600℃では 5 x 10⁻⁴ s⁻¹ とした。得られたデータなどから、引張強度、降伏 強度、全伸びおよび均一伸びの温度・歪速度依存性をこれまでのデータと共に整理し、高温変形の律速 機構について検討した。また、破断した試験片の破面や表面は SEM を用いて観察した。

【結果】図1には、応力歪曲線を示す。破断伸びは温度の上昇とともに低下し、また、歪速度の増加と ともに増大することがわかる。粒界すべりによる変形の場合、破断伸びは温度の上昇とともに増大し、 また、 歪速度の増加とともに低下するため、 この純 ₩ 圧延材の変形は、 転位すべりによる変形であると 考えられる。図2には、試験温度1800℃で初期歪速度を2x104s1、5x104s1および2x103s1と変化さ せた場合の破断後の試験片の側面および断面の SEM 像を示す。歪速度が大きくなるにつれて、破断面 が絞られていることがわかる。また、破断後の表面観察ではすべり線が観察され、歪速度が速い程、す べり線が多くなっている。すべり面とすべり方向は、結晶学的にほぼ決まっているが、各結晶粒の方位 が異なるため、結晶粒間ですべり線の数や段の深さがかなり異なる。その結果、結晶粒間での表面凹凸 が顕著となり、歪速度が速い程すべり線が多くなり、観察結果と一致している。図3には、初期歪速度 が2x10⁴s⁻¹における変形強度(塑性変形開始後、加工硬化率がほぼゼロになる応力。ヤング率(E)で規 格化)のアレニウスプロットを示す。図からわかるように、SR 材と RC 材の変形強度は領域 I (400℃~ 1300℃)およびII(1300℃~1800℃)の二つの領域に分けることができる。領域 I では、RC 材は SR 材と比 較して変形強度は半分程度に低下しており、再結晶による結晶粒の粗大化と転位密度低下により軟化し たものと考えられる。また、SR(L-T)材の領域Ⅱでは直線関係が得られ、直線の勾配 Q/nR(Q:変形の活 性化エネルギー、n: 歪速度の応力指数、R: 気体定数)は 9800 K となった。また、1800 ℃の変形強度 と塑性歪速度の両対数プロットにより n≃7.5 が得られ、これらを用いて Q≃610 kJ/mol と評価された。

材料の塑性変形において、変形応力(flow stress, σ_j)は試験温度(T)および歪速度(ϵ)に依存し、それらの間には次の関係が成立する。

$\dot{\varepsilon} = A(\sigma_f / E)^n \exp(-Q / RT)$ (1)

ここで、A は定数、E はヤング率、n は歪速度の応力指数、Q は変形の活性化エネルギー、R は気体定数、T は絶対温度である。式(1)の両辺の自然対数を取ると、以下の式となる。

110

$$\ln \varepsilon = \ln A + n \ln(\sigma_f / E) - Q / RT \qquad (2)$$

右辺第一項は定数となり、したがって、変形応力の試験温度に対するアレニウスプロット($\ln(\sigma_{f'}/E)$ vs 1/T(K)のプロット)の直線の傾きが Q/nR を与える。この傾きの値に n と R を代入すると変形の活性化エネルギーQ が得られる。上述の値を代入すると Q = 9800 x nR = 9800 x7.5 x 8.3 = 610 kJ/mol となる。この値は、W の自己拡散の活性化エネルギー 526 kJ/mol および 666 kJ/mol(1700~3409K)[1]に近い。このことは、ITER-grade W の高温(領域II)における変形の律速機構は、内部応力の回復であることを示している。



図 2 破断試料(試験温度:1800 ℃)の SEM 像、(a)および (b):2 x 10⁻⁴ s⁻¹、(c)および(d):5 x 10⁻⁴ s⁻¹、(e)および(f):2 x 10⁻³ s⁻¹、(a)、(c)および(e):側面、(b)、(d)および(f):破面

参考文献 [1] J. N. Mundy et al., Phys Rev. B 18(1978)6566-6575)

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装置の詳細設計及び動作試験をする予定であったが、 PLATOのプラズマ立ち上げが予定通り進まなかったため、機器導入をすること ができなかった。代替策として、応用予定のデータ解析アルゴリズムの整備を 進めた。これまで乱流の計測は、計測原理の制限から、密度揺動をターゲット としたものが多かった。一方、乱流スプレディングや乱流輸送など、物理的に 重要なトピックを実験的に扱うためには、乱流速度場の計測が重要となる。直 接計測が困難な速度場を推定する手法として、揺動パターンを追跡する Velocimetry法が開発され、応用されている[1]。一方で、推定結果の妥当性や 推定誤差の評価のため、複数アルゴリズムの比較が望まれていた。本研究で は、太陽光球面観測でしばしば利用される「Local Correlation Tracking (LCT)」[2]と[1]で利用されている「Orthogonal Dynamic Programing – Particle Image Velocimetry (ODP-PIV)」手法を擬似乱流データに適用し、 結果を比較した。

擬似乱流データは、白色ガウスノイズにローパスフィルタをかけたものを利 用した。60x60ピクセルの2次元データを対象とし、ローパスフィルタのカット オフ波数をスキャンすることで、典型的な乱流セルのサイズを変え、 Velocimetryの結果に与える影響を議論した。乱流データに対し、テスト速度 場を与え、連続の式を数値的に解くことでテストデータを作成した。ここで は、乱流場を時計回りに作動回転させるように速度場を与えた。周辺で速度を 0にすることで、境界の効果を無視できるようにした。与えた乱流場及び速度 場(v_x, v_y)を図1に示す。



図1. テスト乱流場[スケールファクター(a)*m*=4及び(b)16]、及びテスト速度 場[(c)v_x, (d) v_y]。

Velocimetry の結果を図 2 に示す。2 種類の LCT コード(Flowmaker, FLCT) 及 び ODP-PIV を比較した。*m*=4 の場合、乱流セルが速度場と同程度の空間スケー ルとなる。この場合、乱流セルの形状変化が避けられないため、推定精度が悪化 した。このような状況下でも、LCT コードは ODP-PIV コードと比較し妥当な結果 を得た。*m*=16 の場合は乱流セルが速度場の空間スケールより小さく、トレーサ ーとして扱うことが妥当となると考えられる。Velocimetry 精度も向上し、ノイ ズは小さくなった [3]。

ODP-PIV 手法は 1 次元的なトレーサートラッキングをイタレーティブに行う ため、トレーサーの形状変化が起こるとトレーサーを見失ってしまうことが考 えられる。LCT 手法は 2 次元空間上で直接トラッキングを行うため、トレーサー 形状の変化に強く、妥当な結果をもたらしたものと考察される。



図2. Velocimetry結果。上段は*m*=4の場合、下段は*m*=16の場合。左列はLCT (Flowmaker)、中列はLCT (FLCT)、右列は0DP-PIVの結果を表す。

3. まとめ

小型トカマク装置 PLATO に適用予定の Velocimetry コードの比較研究を行った。空間分解能が限られる小型プラズマ装置におけるイメージング計測では、計 測対象の速度場が乱流セルと同程度のスケールになることが考えられる。この ような状況下でも、LCT 手法は比較的精度の良い速度場推定を与えることが明ら かになった。より定量的な性能評価は、[3]に詳述した。

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] S. Banerjee, et al., Rev. Sci. Instrum. 86, 033505 (2015).

[2] L.J. November and G.W. Simon, Astrophys. J. 333, 427 (1998)

[3] Tatsuya KOBAYASHI, Ryohtaroh T. ISHIKAWA, Motoki NAKATA, Takayoshi OBA and Yukio KATSUKAWA, Plasma and Fusion Research 18, 1402058 (2023)

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

従来、水素グロー放電を利用した金属試料への水素注入法を金属材料中の拡散挙動研究に採用して きた。この方法は、注入法としては簡便で、水素注入量の再現性などもよい。しかしながら、装置の構 造上、室温のみの注入であり、加熱した環境下での注入ができていなかった。そこで今年度は、試料を 加熱しながら水素同位体注入することを目的として放電装置を改良した。さらにその装置を用いて、金 属タンタル(Ta)試料を用いて、加熱を行いながらの重水素放電注入実験を実施し、そのTa試料の昇温 脱離ガス分析(Thermal Desorption Spectrometry, TDS)によって重水素が注入されていることを確認した。 2.実験

図1に、試料を加熱できるように改良した 放電注入装置を示す。石英ガラス管内に、Ta円 発調 (直径 5mm、0.7 mm^t)を固定した SUS 電極(図2)をセットする構造で、試料を外部 ヒータで加熱しながら重水素の放電が可能で ある。Ta 試料の温度を室温、100℃、200℃で 重水素放電注入を行った。放電条件は、放電電 圧を1.8kV、重水素圧力を0.5 Torr、放電時間 1時間とした。放電実験後、Ta 試料を取り出 し、TDS 装置にセットした。真空引き後、試 料を昇温速度 0.5 ℃/sec で加熱しながら質量 分析計(Anelva M-070QA-TDF)で重水素の放 出挙動を測定した。



3. 結果

図1 加熱放電注入装置

図2 SUS 電極と Ta 試料

図3にTa試料からのD₂昇温脱離スペクトル(緑線)を示す。各注入温度でD₂放出が確認された。注入 温度が高くなるほど放出量が減少し、放出温度ピークが高温側にシフトする傾向があることが分かる。



<u>4. まとめ</u>

グロー放電水素注入装置を、金属試料を加熱しながら注入できるように改良した。Ta 試料を 200℃まで加熱しながら重水素注入を行い、TDS 法にて試料への重水素注入を確認した。

5. 研究組織

九大総理工:橋爪健一 大学院生:河股大翔 九大工:赤田大和、大西駿祐 九大応力研:渡邉英雄

図3 TDS 結果(左:室温注入、中:100℃注入、右:200℃注入)

定常プラズマ対向機器への適用を目指した 粉末固相接合によるタングステン-銅接合材の研究

核融合科学研究所 森崎友宏

1. 研究の目的

球状トカマク装置 QUEST は、運転開始時より全金属壁環境下で実験を遂行し。2015 年には壁温 473K で6 時間放電を成功させる等、粒子循環プロセスの理解とその制御法の開発という定常プラズマ維持研究の進展に 貢献してきた。QUEST の金属壁は、タングステン部とステンレス部から成る。QUEST のタングステン部は、一部 を除き大部分がステンレス板にタングステン粒子を溶射したコーティング材であるため、表面には多くの細孔が 存在し、粒子循環に大きな影響を与えると考えられており、バルク材の導入が検討(一部進行)しつつある。

本研究は、バルク材の導入に当たり、核融合研で新たに開発された「放電プラズマ焼結(SPS)」でタングステン とステンレスを接合した壁材を製作し、QUESTへの導入を目指す。

2. 接合材製作の方法

初年度となる令和5年度は、核融合研で開発した SPS による接合材が QUEST の設置基準を満足するか否か を調べるために、真空容器壁(非ダイバータ領域)への適用を念頭に入れた、タングステンとステンレス鋼の接合 材を製作する。良好な接合が得られた場合は熱負荷試験を行うとともに粒子吸蔵特性等を調べる。SPS 接合時 には、熱応力を緩和するために、中間層(インサート)として、1mmのニッケル層(粉末として挿入)を設ける。

3. 結果

先行研究で製作した、ロウ付け接合による接合材との 比較を行うために、当初、同じ仕様の材料(タングステ ン: 0.1mm×50mm×50mm、ステンレス: 5mm×50mm ×50mm)で SPS 接合を試みたが、高い圧力をかける SPSの工程で、0.1mmのタングステン箔が、パンチに固 着するトラブルが発生した。このため、タングステンの厚 さを 1mmに変更し、再度接合を試みた。接合後はタン グステン側が凸となる反りが発生したが、接合面に剥離 等は見られなかった。しかし、最終形状に成型するため にワイヤーカットを行ったところ、応力開放が起こり、タ



図1 ワイヤーカット後に生じた剥離

ングステンとニッケルインサートとの接合面に剥離が生じた。これは、ニッケルインサートがタングステンとステンレ ス鋼の間に生じる熱応力を緩和できなかったためで、現在、多層化したインサートを設計し、本年度内に再度接 合を実施する。また、タングステンを小片化()し、熱応力を緩和する方法を検討する。

4. 研究成果報告

森崎友宏、村瀬尊則、時谷政行、花田和明、島袋 瞬、諌山明彦、林 孝夫、坂田浩章、北垣慎二、 曽我部敏明、塩崎智広(プラズマ・核融合学会 第40回年会、27P47、2023年11月27日)

5. 研究組織

核融合研:森崎友宏(研究代表者)、村瀬尊則、時谷政行、 九大:花田和明(世話人)、島袋 瞬

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(現 九州大学) 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、九大での実験条件を想定した軽水炉圧力容器鋼の WB-STEM/STEM-EDS 分析を実施した。また東北大内においてコールド材試料(鋼合金)とホルダーの通常輸送を行ったうえで加熱高分解能(HR)STEM を実施し、各種運搬についても問題なく可能であることを確認した。2023年度は、コロナ禍のため未実施の次世代炉容器材(低放射化フェライト:例えばF82H 鋼)および核融合炉用鋼合金に2022年度に確立したWB-STEM/HRSTEM-EDS 分析を適用した。それにより、原子炉容器鋼中の転位周辺の溶質元素偏析および鋼合金中の加熱に伴う母相/析出物界面の組成変化について確認を行った。

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:9.2×10²³ n/m²)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

F82H鋼(Fe-8Cr-2W-0.04Ta-0.1C)では、中性子照射材に硬さ試験、3D-AP計測、WB-STEM観察を実施し、 溶質原子クラスターの化学組成や転位ループのサイズ分布・数密度を評価した。それにより、従来の照射欠陥 分析では分からなかった照射欠陥集合体ー転位複合体の形成など照射脆化機構における新しい素過程が見 つかった。 図1に、未照射および中性子照射された F82H 鋼について、3D-AP 計測によって得られた Si および Cr のア トムマップを示す。未照射では、Si・Cr はほぼ均一に分布していた。照射量 1.9×10^{22} n/m² および 5.5×10^{22} n/m² でも Si・Cr の分布はほぼ均一だったが、照射量 3.0×10^{22} n/m² では Si 分布はやや不均一になった。Cr 分布は ほぼ均一だった。照射量 9.2×10^{23} n/m² では、Si は線状に濃化していた。これは、転位への Si 濃化と考えられ る。この時の濃化係数(線状濃化領域における Si 濃度とマトリックスにおける Si 濃度の比)は約 9 であった。Si 濃化領域では、わずかに Crも濃化している傾向も認められた。また、拡大図(赤枠)に示すように Si が円環状に 濃化した領域も観察された。

次に、本研究では WB-STEM を用いて、初期的な硬化が確認された照射量 1.9×10²² n/m² および Si 偏析が 見られた照射量 9.2×10²³ n/m²の F82H 鋼の照射欠陥集合体の定量解析を行った。

図 2 には、回折条件 B=[111], g=1-10, (g,4g)で撮影した明視野 WB-STEM 像(g₀)および暗視野 WB-STEM 像(2g)を示す。簡単のために照射量 1.9×10²² n/m²の試料を H1、照射量 9.2×10²³ n/m²の試料を H4 と呼称す る。転位ループを含む照射欠陥集合体の平均サイズは H1 で 6.4±0.2 nm、H4 で 7.7±0.2 nm であった。膜厚判 定プログラムによって観察領域の試料厚さが実測され、数密度は、H1 で 4.9×10²¹m⁻³、H4 で 6.6×10²¹m⁻³ であっ た。F82H 鋼中の照射欠陥集合体は、低照射線量の試料から確認でき、線量増加に伴い、平均サイズと数密度 が緩やかに上昇する傾向が見出された。転位のバーガーズベクトル解析の結果、F82H 鋼中の照射欠陥集合 体には、低合金鋼中性子照射材などでも報告されているバーガーズベクトル b=1/2<111>の転位ループが含ま れることが確認された。さらに、転位ループよりも周期性の低いひずみ場(等方的なひずみ場)を有する照射欠 陥集合体が多く存在していることも分かった。



図 1 未照射 F82H 鋼および中性子照射 された F82H 鋼の Si および Cr のアトム マップ。紙面奥行き方向の厚さは 20 nm。 照射量 9.15×10²³ n/m² については、Si の 円環状濃化領域を拡大図 (赤枠) に示す。



図2 中性子照射された F82H 鋼の照射欠陥 集合体 WB-STEM 像と定量解析結果。

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・一昨年度はそれぞれイオン・電子スケールに関係した現象を議論していたた め、本年度は流体スケールに関するランジュバンモデルについての検討を行った。近年「そ の場」観測が進められている太陽近傍の太陽風プラズマにおいては、Taylorの凍結流仮説 [Taylor, 1938]が成立しない可能性が認識されており、大スケール擾乱による sweeping 効果 を含んだモデルも近年提唱されている[Bourouaine+Perez, 2020; and references therein]。こ のモデルは大スケール擾乱と乱流との非局所相互作用をランダム振動子の形でモデル化し たものであるが、ゾーナル流とドリフト波乱流の相互作用に関しても同様の観点からモデル 化が行われている[e.g., Krommes, 2009;2015]。特に、内部太陽圏で良く見られるアルヴェン 的な状態(高クロスへリシティー流)では、乱流を構成する擾乱が一方向伝搬に近い状況に なるため、ポロイダル方向に伝搬するドリフト波乱流と良いアナロジーがある。

各波数モードの時間発展をランダム振動子でモデル化した場合、最も簡単な形では平均値が時間とともに減少する振幅一定のモデルになる[e.g., Gardiner, 2009]。これは、フーリエ位相を確率変数と見なしたモデルに相当しており、強度一定の白色ガウスノイズを考える場合のフーリエ位相はブラウン運動(Wiener 過程)になる。一方で、乱流中のフーリエ位相には有限の位相相関があることは、宇宙プラズマ[e.g., Hada et al, 2003]や実験室プラズマ[e.g., Yamada et al, 2010]でも指摘されており、その場合は各波数モードの位相の時間発展も独立にはならない。

位相相関を含む系への拡張には幾つかの選択肢があるが、ここでは最も簡単な以下のようなモデル(Ornstein-Uhlenbeck 過程)を考える(Wは標準 Wiener 過程):

$$d\theta = -\beta(\theta - \theta_0)dt + \sqrt{2\gamma}dW$$

これは、各フーリエモードの位相が同じ値の周りで揺らいでいるモデルであり、ノイズが 無い場合は位相相関指数[Hada et al, 2003]を評価する際の位相を揃えたサロゲートデータ に相当している。この θ を位相とした複素振幅 $\psi = |\psi|e^{i\theta}$ のアンサンブル平均(< ψ >)の大 きさの時間変化を描いたものが Fig.1 である。Fig.1 より、ドリフト項の係数(β)が大きいほど(θ の定常分布の幅が小さいほど) | < ψ > |の減衰が小さいことが分かる。今後は、より一般的 に位相相関を記述する確率モデルの検討などを通じ、宇宙・天体プラズマと実験室プラズ マとの新しい接点の探索を続ける。



Figure 1 | < ψ > |の時間変化(γ = 0.32、 β = 0.32(黒実線)、0.08(灰実線)、0.01(薄 灰実線))。実線は ψ (t = 0)=1 の場合で、 破線は初期位相を幅2 π の一様分布で与 えた場合である。

公表状況(学会発表):

Yasuhiro Nariyuki, Yusuke Kosuga, Shogo Isayama, Tohru Hada, On stochastic processes generating non-Gaussian particle distributions in the heliospheric plasm, 日本地球惑星科学 連合 2023 年大会, PEM16-P06, オンラインポスター(5/23)

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)

分散強化銅合金における重イオン照射効果

核融合科学研究所 研究部 菱沼良光

1. 研究目的

核融合炉の実現に向けた要素技術開発において、高い中性子照射耐性や機械的な高強度を満たす W/Cu 合金接 合構造のダイバータが注目されている。特に、ダイバータのヒートシンク材として作用する Cu 合金においては、 高い熱伝導率と中性子照射及び高温下での高強度が要求されており、そのために析出強化あるいは分散強化され た銅合金が注目されている。核融合研においても、機械的合金化(Mechanical Alloying: MA)と熱間等方静水圧焼結

(Hot Isostatic pressing: HIP) を組み合わせた MA-HIP 法を開発し、MA-HIP 法による Cu-Y₂O₃ 分散強化銅合金の合成に成 功し、純銅と比較して導電率を損ねることなく機械的強度が向上していることが明らかとなった。更なる進展に は MA-HIP 法による Cu-Y₂O₃ 分散強化銅合金の微細組織及び機械強度における中性子照射効果を明らかにする必要 があり、重イオン照射試験を中性子照射の加速試験と位置付けて、純銅や市販の分散強化銅合金(Gridcop)との 比較することで今後の中性子照射実験体系や最適構造設計に繋げたいと考えている。一方で、核融合炉における 高磁場超伝導マグネットにおいて高磁場による電磁力印加に耐え得る高強度化が要求されている。つまり、ダイ バータ向けに開発した分散強化銅合金を超伝導マグネット用の超伝導素線の高強度化に資する電気的・熱的安定 化部材として波及することも期待できる。

2. 実験方法

Cu-Y₂O₃分散強化銅合金の微細組織及び機械特性における照射効果を応用力学研究所に設置されている高エネル ギーイオン発生装置(タンデム加速器)を用いた Cu²⁺イオン照射実験を計画しており、最初に照射実験条件を TRIM 計算コードにて検討した。並行して、照射実験に供する MA-HIP 法 Cu-Y₂O₃合金及び W/Cu-Y₂O₃合金接合構造体 を核融合研にて作製した。

3. 結果と考察

照射実験に供する MA-HP 法 Cu-Y₂O₃ 合金及び W/Cu-Y₂O₃ 合金接合構造は問題なく作製することが出来、、照射実 験に供する試験片加工を進めている。照射実験を実施す るにあたり、照射条件が重要である。図 1 に TRIM 計算 コードによって見積もられた Cu 試料片表面から深さと 損傷速度の相関性を示す。Cu²⁺イオンのエネルギー及び 個数をそれぞれ 2.4 MeV、20,000 個とした。また、照射面 積は直径 2 mm の円とし、照射電流は 1 nA とした。TRIM 計算の結果、Cu 試料における最大の損傷速度は試料表面 から 645 nm の深さで 5.737 × 10⁴ dpa/sec と見積もられた。 実際の Cu²⁺イオン照射実験では、最大の損傷速度を基に して、照射電流と照射時間を調整することで、目的の照 射損傷組織を得ることとする。



図 1 TRIM 計算コードで見積もられた Cu 試料における Cu²⁺イオン照射損傷速度と試料深さの相関性

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。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。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が共同利用研究でなされている[1]。熱負荷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装置が活用されている[2,3]。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Windows10 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。加熱制御電源における昇温加熱制御ではデジタル指示調節計(PID 制御部)とサイリスタレギュレータ(アクチュエータ部)を用いており、後者を更新する前の特性試験を行った。

更新・試験内容:デジタル指示調節計においては、パソコンからの温度指令値(目標値)を受取り、試料温度(制御対象)を熱電対、温度変換器にて計測して、両者が一致するように、試料加熱ヒータの電流指令値をサイリスタレギュレータに送出している。サイリスタレギュレータにおいては、指示調節計からの電流指令値(目標値)を受取り、試料加熱ヒータの電流(制御対象)を電流変成器 CT にて計測して、両者が一致するように、サイリスタの点弧位相角をフィードバック制御している(図1)。試料加熱ヒータにおける温度のヒータ電流に関する時定数は、サイリスタレギュレータにおけるヒータ電流の点弧位相に関する時定数に比較して十分長いので、両者は独立してフィードバック制御可能である。サ

イリスタレギュレータ JM において電流指令値を段階的に 上げた場合の出力電圧波形(10:1 電圧プローブ)および出 力電流波形(電流変成器 CT + 移動平均)(図2)は良好な 制御特性を示している。

- K. Tokunaga, et al.: Thermomechanical Behavior of Plasma Spray Tungsten Coated Reduced-Activation Ferritic/ Martensitic Steel, Journal of IAPS, Vol.24, No.2 (2016) 73-78.
- K. Tokunaga, et al.: 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.
- [3] 土屋 文, 寺沢亮輔, 片岡啓介, 徳永和俊: 空気中の水および二酸 化炭素を吸収したリチウム複合酸化物の炭化水素系ガス放出特 性, 日本金属学会第 173 回秋期講演大会, Sept. 19-22, 2023.



図1. サイリスタレギュレータ結線図.



図2. サイリスタレギュレータにおける出力電圧波形および出力電流波形.

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。近年のシミュレーション研究において、トカマクプラズマの周辺領域における ポロイダルシアフローがバルーニングモードの乱流の発展と大域的な熱輸送に影響を与えている ことが指摘されている。

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。昨年までの共同研究において、抵抗性バルーニングモードの非線形発展を調べることができる シミュレーションコードの開発を行った。今年度はこのコードを用いて、ポロイダルシアフローがどのよう な物理課程を通してバルーニングモードの乱流の発展と大域的な熱輸送に影響を与えているかを 調べ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。 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が圧力の発展方程式に残されている。本研究に おいては、ポロイダルシアフローを実装するために平衡の静電ポテンシャルを導入した。

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】

図1に、圧力と安全係数および平衡のポロイダルシアフローの小半径方向分布、それらの分布を用いた 場合のバルーニングモード乱流の発達に伴う蓄積エネルギーの損失率の時間発展を示す。シアフローの 絶対値が大きくなるにつれて、蓄積エネルギーの損失が低減されることが分かる。蓄積エネルギーの損失 の低減は、バルーニングモード乱流の第一の飽和領域(時刻 200 付近)および、その後の非線形発展(時 刻 300 以降)の両方において生じる。



図1(a) 圧力と安全係数の小半径方向分布、(b) 平衡のポロイダルシアフローの 小半径方向分布、(c) 蓄積エネルギー損失率の時間発展

図 2 にポロイダル断面における圧力揺動の時間発展のカラーコンターを示す。シアフローが存在しない 場合は、コア領域まで圧力揺動が広がっていることが分かる(図 2(a))。このとき、コア領域に広がるストリー マ状の構造は、バルーニング乱流におけるモード間の非線形結合によって生じるものである。一方で、強 いシアフローが存在する場合には、このような構造は卓越せず、圧力揺動の径方向内側への広がりが抑制 されていることが分かる(図 2(b))。



以上の結果から、周辺のポロイダルシアフローは、バルーニングモード乱流の第一非線形飽和領域に おいては局所的な閉じ込め改善に寄与し、さらに引き続く非線形発展においてはコア領域に向かう乱流広 がりを抑制することで大域的な閉じ込め改善にも寄与することが明らかになった。

【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を行い、ポロイダル シアフローがコア領域に向かう乱流広がりを抑制することを明らかにした。より現実的なポロイダル形状 やパラメータを扱うことができるようにコードを拡張することが今後の課題である。

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塩 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

KCl/グラフェン/SiO₂ ヘテロ構造に高エネルギーイオン(2.4 MeV Cu²⁺, 3.0 MeV Ni⁺)を照射することでグラフ エンへの塩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にイオン照射後のKCl/グラフェン(照射後に KCl層は除去)のClsおよびCllsXPSスペクトル を示す。イオン照射に伴い、グラフェンの炭素の結 合がsp²C=Cからsp³C-Cへと変化し、塩素がドー プされたことが分かった。ClK端XAFSの結果もあ わせて考えると、高エネルギーイオン照射によって C-Cl結合が形成され、連続膜の塩化グラフェンを 作製することができたといえる。

本研究では、高エネルギーイオン照射下の非平 衡励起反応場を利用することで、大面積で層数が 厳密に制御された塩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).

成果報告

- 1) 圓谷志郎, 滝沢優, 本田充紀, 水口将輝, 渡邉英雄, 大島武, 好田誠, 「重イオンビームからのエネルギー 付与を利用した新規二次元物質の創製」, 第33回日本 MRS 年次大会, 2023 年 11 月.
- 2) 圓谷志郎, 滝沢優, 本田充紀, 茂木俊憲, 水口将輝, 渡邉英雄, 大島武, 好田誠, 「イオンビームのエネル ギー付与を利用した二次元新材料の創出」, QST 高崎サイエンスフェスタ 2023, 2023 年 12 月.
- 3) 圓谷志郎,本田充紀,水口将輝,渡邉英雄,大島武,好田誠,「高エネルギーイオン照射法によるグラフェン薄膜への塩素ドーピング」,2023年度量子ビームサイエンスフェスタ,2023年3月.

宇宙線ミュオンを用いた磁場のイメージング(Magic-µ) QUEST 磁場を通過した宇宙線ミュオンフラックスマップの計測

九州大学総合理工学研究院 金 政浩

背景

宇宙から飛来する高エネルギー素粒子である「宇宙線ミュオン」は、近年その高い透過能力と直進性を 活用した巨大構造物の透視「ミュオグラフィ」に利用されている。本研究ではミュオンが荷電粒子であ ることにも着目し、磁場による偏向を検出して空間中の巨大磁場のイメージング技術の開発に取り組ん でいる。この技術は、将来的に核融合炉の超伝導磁場の健全性の長期的なモニタリングに活用できる可 能性がある。当研究グループはこの技術の実用性について、シミュレーションを軸にエビデンスを重ね てきた。その結果テスラオーダーの磁束密度をもつ対象は、短期間で磁場領域を描き出すことができる ことがわかったため、次のステップとして大型施設特有のノイズや振動のある現実的な場面で計測下限 を見出すことが重要となってきた。そこで本研究では現実的な場の例として、QUEST の作り出す磁場を 通過した宇宙線ミュオンの測定を可能とし、当技術の計測下限を推定する技術開発を行うことを目的と した。

計測原理

ミュオンは荷電粒子であるため、Fig. 1 に示すように磁 場中を飛行するとラーモア半径を持った円運動をはじめ る。2 軸負の方向にミュオン検出器を設置している場合、 主にラーモア半径よりも十分厚い磁場領域の影響で、宇宙 線ミュオンが遮蔽され、計数が減少する。環境中の宇宙線 ミュオンのエネルギー分布は極めて安定しているため、磁 東密度が高いほどラーモア半径は大きくなり、より高いエ ネルギーのミュオンまで磁場に遮蔽される。つまり磁東密



度に応じた計数マップが得られる。これにより空間中の磁場分布が推定できる。

プロトタイプ宇宙線ミュオグラフィ検出器

当研究室で製作したプロトタイプミュオグラフィ検出器の心臓部は2つのミュオン位置検出器で構成さ れている。この2つの検出器をミュオンが位置からその飛来方向を推定できるようになっいる。長時間 計測の結果より、方向毎に単位時間あたりのミュオン飛来数ており、データ収集系として NIM 規格で作 られた easiroc module (販売 GND 社)を用いている。NIM 規格では、ビン電源を AC 電源に接続し、6,-6, 12,-12,24,-24 V の DC 電源を供給している。また検出器には温度依存性があるため、ペルチェ型の温調 器で内部温度を一定に保つようにしてある。今回の報告では、これらふたつの電源装置が建屋電源から 供給される形となっている部分に注目のこと。

ノイズ耐性のある計測システムへの改良

検出器の設置医位置・環境について検討した。候補として挙がったのはいずれもコア近くでの観測がで きる場所的には良い地点だったが、同時にコア付近ということ QUEST やその付帯設備からの強力なノ イズが懸念されたので、本年度はそれに対処したシステムに改良した。ノイズ対策としてはノイズ源を

抑える方法では無く、検出器自体を完全に電気的に絶縁して、 コモンモードノイズが乗らない系を考えた。

先述の建屋電源からの電源取得を遮断するため、データ収集 系は東大島添研が開発している PET スキャン装置のデータ収集 ボードを適用した。東大の PET スキャンは、計測の対象は異な るものの、シンチレータの光を微弱光検出器で測定するという、 同様のセンサーシステムを用いているため適用可能となってい る。また、AD 変換には time-over-threshold 法を用いており、極 めてダイナミックレンジの広い計測が可能となっている。東大で

はこのデータ収集ボードの電源として安定化電源を3台用いているが、今回は建屋電源からも遮断する ため、Fig.2に示すモバイルバッテリーで駆動可能な三端子レギュレータによる自作システムを整備した。 さらにフロントエンド PC としてラップトップを用意していたが、これも建屋電源を使用せずモバイ ルバッテリーで駆動可能な Raspberry Pi 400 (Fig. 3)を整備し、スタンドアロンで計測可能なシステムと

また検出器の温度依存性の対策としてペルチェ型の温度調節機構 を廃止するため、新たに温度によるゲイン変動をモニタリング可能 な手法を検討した。一般的によく用いられるのが温度補償機能と呼 ばれるもので、事前に温度とゲインの関係を調べておき、計測中は 気温に応じて検出器の印加電圧をリアルタイムに変化させてゲイン 変動を抑える機構である。この機構は印加電圧の変更に伴う暗電流 の変化が起こるため、ノイズレベルに近い波高のミュオンイベントを

した。

観測するときはネックとなる。そこで、現在、光センサ部に定期的に LED で一定の光量を与えて、計測 スペクトル上でその LED によるピークがどこにあるかで現在のゲインを推定し、解析時にゲインが一 定になるように時系列のリストデータを補正することで、ゲイン変動を抑える。この点は、この概念決 定までを今年度実施し、来年度以降はまずはモックアップを用いた試験を通してゲイン変動を実際に抑 えられるか確かめていく。なお、LED ドライバーも自作のものを用意して、モバイルバッテリーから電 源供給できるようにする。





Fig.2 データ収集系のボードに電源を 供給可能な自作電源

トモグラフィ計測を用いた磁化プラズマ乱流の同定および競合状態の観測

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性質の異なる磁化プラズ マ乱流の競合状態の観測を行った.近年のシミュレーション研究から種類の異なる乱流が径方向位置の 異なる場所で同時に生じ得ることが明らかになった(M. Sasaki, PoP (2017)). これらの結果は,磁化プ ラズマ中心から周辺部までに生じる輸送を明らかにするためには各径方向位置で生じている揺動の種 類を明らかにする必要があることを示唆している.実際に,申請者が行ってきたトモグラフィ計測にお いてもプラズマ中心部と周辺部で性質の異なる揺動が存在することが確認できている(K. Yamasaki, Global Plasma Forum 2023).本研究ではトモグラフィを用いて得られた揺動データから周波数および 周方向モード数で分類した揺動の空間構造の時間発展を詳細に解析することで,挙動の異なる揺動同士 の相互作用が示す時空間構造を明らかにした.

直線磁化プラズマ装置 PANTA において磁場 1300 G, 放電パワー6 kW の条件下で周方向モード数 m=1 と m=4 の構造を持つ揺動が非線形結合している現象が観測された. この非線形結合により m=4 揺動のサイドバンドモード(m=3,5)が形成されている. 上記の放電条件において行ったトモグラフィ再構成データを解析したところ, m=3,4,5 の揺動は時間的に一定の空間構造を示しているが m=1 揺動は時間的に振幅が増減したりねじれたりする変化を示していることが明らかになった. また m=1 揺動の振幅はプラズマ中心部から周辺部に伝搬している様子や, それに伴い m=4 揺動の振幅が減少する様子 も確認できた.

トモグラフィで観測された m=1,3,4,5 揺動の空間構造の安定性および非線形結合の時空間構造を定 量的に評価することを目的として、structure function および modal coupling function と呼ぶ解析手法 を開発した. Structure function は径方向および時間的に離れた位置において特定の周波数と周方向モー ド数を持つ揺動のコヒーレンスを評価する手法である.一方 modal coupling function は周波数および周 方向モード数のマッチング条件を満たした揺動間で生じる非線形結合の時空間分布を評価する手法で ある. Structure function を用いて各揺動の空間構造安定性を解析したところ、m=3,4,5 の揺動はプラズ マ中心部から周辺部にかけて構造が安定していることが明らかになった.一方で m=1 揺動は r=2 cm 付 近を境にコヒーレンスが急激に低下する傾向があることが明らかになった.この結果は、m=1 揺動と m=3,4,5 揺動が示す空間構造の時間発展が大きく異なることを定量的に示している.また modal coupling function も r=2 cm 付近で低下していることが判明した.これらの結果は、プラズマ中心部と 周辺部で揺動同士が示す非線形結合現象が m=1 揺動の時空間発展に支配されていることを示唆してい る.

M=1 揺動の時空間発展と非線形結合の変化の関係性を明らかにするために, m=1 揺動の振幅変化 が r=2 cm に到達する時間を基準として structure function および modal coupling function の時空間発 展を計算した. 解析の結果, m=1 揺動の振幅が強い領域が径方向に伝搬する時間帯に合わせて m=1 揺 動の空間構造の安定性が増加し, さらに非線形結合が強い領域が径方向に伝播していることが明らかに なった. 上記の結果は磁化プラズマ中で生じる輸送の突発的な変化に関して重要な知見を与えるもので あると考え,現在論文投稿の準備を進めている.

128

超臨界 CO₂-金属界面での物質移動現象に関する研究

九州大学大学院総合理工学研究院 片山一成

【緒言】

エネルギー資源の効率的利用の観点から、高効率な発電システムの開発が求められている。CO2は温度31℃、 圧力 7.4 MPa という常温に近い温度領域に臨界点を有し、超臨界状態では、気体と液体の中間的な性質をも つ超臨界流体として振舞う。超臨界 CO,の圧縮率係数は比較的小さいことから、ガスタービンシステムを構 成する圧縮機を臨界点付近で運転することにより、圧縮に必要な動力を大幅に低減できる。そのため、超臨 界 CO2ガスタービン発電は、従来のガスタービン発電に比べて、高い発電効率を得ることが可能である。高 温下で稼働させる発電システムを長期間安全に運転するためには、作動流体と構造材料との相互作用を理解 しておくことが重要となる。しかしながら、超臨界 CO2 と金属界面における化学反応・物質移動に関する知 見は十分ではない。CO2 と金属界面での化学反応・物質移動は、構造材料の酸化腐食や不純物ガスの発生を 生じさせる可能性があることから、長期運転時の構造材料の健全性評価や、作動流体精製プロセスの設計を 行う上で、その理解を深める必要がある。本研究では、超臨界 CO2 と金属との反応により生じる気体状生成 物の発生機構の解明を目的とした基礎実験を行った。ここでは、超臨界 CO2 循環ループを構成する配管材料 から放出されうる不純物水素が混入する状況を想定した実験を行った。

【実験方法】

実験装置の概略図を Fig.1 に示す。H2/CO2 混合ガス(H2:1017ppm, CO₂:balance)と CO₂ガスを混合し、任意の水素濃度を有する CO₂ガス を試料管 (SUS316, 長さ:300mm, 外径 19.05mm, 厚さ 1.24mm) に封 入した。管外部に巻き付けたリボンヒーターで 400 ℃ まで加熱する ことによって 11.0 MPa 程度に圧力を上昇させ、超臨界状態とした。 温度制御は、管中央に挿入した Inconel 被覆熱電対で行った。試料管 下部に2つのバルブを設置し、30分おきに上部バルブを開閉して気 体の一部をバルブ間の空間にサンプリングした。下部バルブを開放 し、サンプリングしたガスを低流量でガスクロマトグラフ (GC:島津 製作所製 Tracera) に供給し、気体状生成物濃度を測定した。

【結果及び考察】

400℃に加熱した超臨界 CO2 中には、事前に CO2 とともに封入した H2に加え、気体状生成物として CO と CH4 が検出された。どちらの成 分も加熱保持時間ととも緩やかに増加した。COは、金属表面でのCO2 の還元反応に伴い生じていると考えられる。また CH4は、金属表面の 酸化反応によって析出した C と封入した H2 との反応によって生成さ れたと考えられる。CO2-SUS316界面で生じると考えられる化学反応 を以下に示す。1





 $2Fe + 3CO_2 \rightarrow Fe_2O_3 + 3CO$ $C + CO_2 \rightarrow 2CO$

(1), $2Fe + 3CO \rightarrow Fe_2O_3 + 3C$ (3), $C + 2H_2 \leftrightarrow CH_4$

(2)(4)

COとCH4の生成機構は次のように考えられる。まず、SUS316表面酸化膜を拡散したFeが気相との界面に 到達すると、CO2と反応して Fe2O3 が形成されるとともに CO が発生する。Fe は発生した CO とも反応して、 Fe₂O₃が形成され、SUS316表面にCが析出される。CはCO₂と反応してCOを生じる。気相中にH₂が存在 する場合は、析出した C と反応して CH4 が生じる。 超臨界 CO2 を用いた冷却系では、 配管材料から放出され る不純物水素と、CO2による酸化反応に伴って析出するCとの反応によりCH4が生成し得る。CO2純化系に は、CO 除去系に加えて、CH4 除去系を備える必要があると考える。超臨界 CO2 冷却系を核分裂炉や核融合 炉[1]に適用する場合は、炉心から移行してくるトリチウムと析出炭素との反応によってトリチウム化炭化水 素が形成される可能性があり、安全上の配慮を必要とする。

参考文献

[1] S. Ishiyama et al., Fusion Science and Technology, 75 (2019) 862-872.

軸対称トカマクにおける重イオンビームプローブ計測器の揺動計測

のための最適化研究

核融合科学研究所 清水昭博 九州大学応用力学研究所 藤澤彰英、井戸毅

重イオンビームプローブ(HIBP)は、高温プラズマ中の平衡電位と、電位揺動、密度揺動を局所的に、 プラズマに摂動を与えずに、高空間・時間分解能で測定することができる。この特性から、異常輸送の原 因とされるドリフト不安定性に起因するミクロスケールの乱流揺動を精度良く計測できる。更に、最近で は様々なトーラス磁場装置において層状流やストリーマ等、メゾスケールの構造形成に伴って発生する 電位を計測しており、HIBP は閉じ込め物理の研究において非常に有用な計測ツールとなっている。HIBP の計測能力を効果的に活かすためには、プローブビーム電流を増大し、S/N 比を改善することが望まれ る。本研究の目的は、HIBP のイオン源を含めたビームガンの設計改良により、ビーム電流を増大して S/N 比を改善する。その後 PLATO 装置における HIBP を用いてプラズマ中の局所乱流揺動を計測し、 更にトモグラフィーによる全域計測と協働することで閉じ込め改善の研究に役立てることを目標とする。

PLATO 装置における HIBP は、各種の高圧電源、加速、ビーム引き出し、ビーム集束、イオン源フィ ラメント用の電源の準備が整い、PLATO 装置への入射テストを実施している。プローブビームを真空容 器上側のポートから入射し、入射角をスキャンして、真空容器下側に設置した一次ビーム検出器で、一次 ビームを測定した。入射角スキャンに同期した信号が得られ、設計通りのビーム軌道が実現されて、一次 ビームが観測されている。二次ビームについて、更に校正実験を進めると共に、イオン源開発を継続し S/N 比改善を目指す。

多チャンネル放射光計測によるトモグラフィについては、計測機器の準備を進めると共に、解析手法に ついて検討を進めている。多数の視線計測によるデータから、プラズマ中の空間的な発光分布を得るため には、何らかの変換を行う必要がある。PLATO 装置においては、あるポロイダル断面で多視線放射光計 測を実施し、この2次元平面における発光分布を変換によって得る。この変換手法には、様々な方法があ り、例えば、2次元平面でメッシュを区切って各メッシュの発光値を代数的に求める方法や、フーリエベ ッセル関数等、適切な基底関数を選んでその級数の係数を求める方法がある。これらの手法には、それぞ れ利点、欠点があり、ノイズを含む実験データの解析において、どの方法が最適であるかは一概には言え ない。実験データの解析では、負の値が許されないことや、スムージングの有無等、実用的な側面/条件 も考慮する必要がある。本研究では、テストデータを用いてトモグラフィの解析手法の検討、特に基底関 数を替えた時に、解析結果にどのような影響が見られるかについて研究を進めている。直線装置 PANTA への実験データ解析への適用も考慮しつつ、解析手法の検討を継続する。

基礎実験によるプラズマカオス制御の検討

崇城大学 情報学部 情報学科 寺坂健一郎

目的

空間的に有限なプラズマは常に不均一性を有し、この不均一性はプラズマの乱れた 挙動を誘起する.このようなプラズマ中では、カオス的振る舞いや乱流といった乱れた挙 動が観測される.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、その制御法の確立が求められている. とりわけ、乱れたプラズマを完全に静かな状態に抑え込むことは困難である、プラズマの 乱れた状態は時々刻々と変化するという性質から、制御法には強度的に輸送の程度を調整 したり、時間変化に対応して敏感に対応できるといった柔軟性が求められる.本研究では、 制御性の観点からカオス状態のプラズマに着目し、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.本年度は、昨年度開発したプラズマカオス発生装置を用いたフ ィードバック制御実験を行い、カオス状態を定量化するための解析手法の開発を行った.

結果

本年度は,直流放電装置 を用いてカオス状態のプラ ズマへの磁場印加実験を行 った.図1に印加磁場の周波 数を変化させたときの周波 数スペクトルを示す.印加 磁場にプラズマが応答して いる様子が見て取れる.ま た,電離波動の基本周波数 と印加磁場の周波数が近い 場合に基本周波数のずれが 生じる傾向が見られる.初 期的な実験ではあるが,カ オス状態をコントロールす る制御の部として磁場が有



図 1. 本共同研究で製作したデス クトップサイズのプラズマカオ ス制御実験用直流プラズマ発生 装置(左上). 直流プラズマに交流 磁場を印加したときのプラズマ 自発光の周波数スペクトル(右).



効な候補であることを示唆している.昨年度までは,放電電流を計測し,放電電流そのものにフィードバックをかけることで,カオス状態の制御を行っていた.本年度の結果は,カオス制御に用いる参照信号に柔軟性があることを意味し,プラズマの制御の部として様々なパラメーターを選択できる可能性を実験的に確認できたと考えている.

上記の実験と並行し、従来の放電電流に対するフィードバックシステムを用いた装置で も制御実験を実施した.フィードバック信号の条件を詳細に調べることで、図2に示す間欠 的なカオス状態の発生など新しい知見を得ることができた.この結果については Plasma Fusion Res. 誌や学会において報告済みである.



図 2. 直流プラズマ(Ne)の自発光の時系列データ(T. Fukuyama et al., PFR 2023[1], Fig. 3 より抜粋). 左(a)は非フィードバック時 (非カオス状態). (b)-(d)は Pyragas 方式のフィードバック信号の振幅が特定のウィンドウ内にある場合に発生する間欠カオス (e), (f)はフィードバック信号の振幅を大きくした場合に生じる強いカオス状態. 文献[3]ではリカレンスプロットを用いた解析など, カオスの特徴について詳細を議論している.

まとめと今後の展望

本年度は、実際のカオス発生装置を用いて制御に向けた具体的な実験を実施することが できた.カオス制御研究について実験データが蓄積されつつある状況にあったが、研究代 表者の異動に伴う実験装置移転の関係で充分なマシンタイムを確保できなかった点が心残 りである.今後は磁場を用いたフィードバック制御システムの構築や情報エントロピーを 用いた時系列解析(CH解析)を用いたカオス状態の定量化について研究を進め、プラズマ 制御の高度化を図る予定である.

[1] T. Fukuyama et al., Plasma Fusion Res. 18, 1401088 (2023).

磁化プラズマ中における磁力線並行・垂直方向イオン温度計測技術の開発

東北大学大学院工学研究科 高橋宏幸

1. 目的

磁化プラズマ中では磁力線に対して平行方向のイオン温度(T_l)と垂直方向のイオン温度(T_l)が定 義できる.磁場閉じ込め核融合炉のSOL・ダイバータ領域では2つのイオン温度が異なる値を持つ と予想されており,T_lとT_lを計測する必要がある.しかしそれぞれ独立した計測システムを要する ためポート数に限りのある環状閉じ込め装置で2方向のイオン温度を計測する事は容易ではない. 本研究ではT_lの計測を目的として開発された Retarding field analyzer (RFA)の速度選択性に着目し, 単一の計測器・単一の放電から2方向のイオン温度を導き出す手法を開発する事を目指す.

2. 成果

我々の提案する手法では RFA により実験的に取得した電流-電圧特性(*I-V* 特性)と速度選択性を 考慮した計算により得られた *I-V* 特性とを比較する事によって T_{\parallel} と T_{\perp} を導き出す.計算ではその目 処が得られていたものの,実験的な検証はこれまで行われていなかった.そこで本年度はその検証 を目的とした実験を実施した.実験は東北大学の DT-ALPHA 装置にて行なった.

DT-ALPHA で電子密度が 5 x 10¹⁵ m³程度の希薄なヘリウムプラズマを生成し RFA と ISP^{*1}の計 測を行なった. RFA で実験的に取得した *I–V*特性と計算とを比較すると, T_{\parallel} =1.2 eV および T_{\perp} =2.1 eV が得られた. この T_{\perp} の妥当性を検証するため,同じ放電条件下で ISP による計測を実施した. ISP で得られた *I–V*特性を解析すると 2.0 eV となり,RFA で得られた T_{\perp} と良い一致を示した.初期 結果ではあるものの,我々の提案する手法に対して一定の妥当性を与えるものである.現在この成 果を纏めた論文を投稿中である.高密度なプラズマへの適用可能性を調べるために異なる放電条件 で同様の実験を試みた.しかしプラズマ密度が増加するにつれ RFA の *I–V*特性が空間電荷効果に 支配される傾向が確認された.空間電荷効果は RFA 内に多量のイオンが蓄積する事により発生す る.そこで RFA の運転領域を拡大すべく小型 RFA の設計を行なった.現在は小型 RFA の組み立て を進めている.これまで運用してきた RFA と比べて口径が 1/2 となるため,より高密度条件での計 測が期待できる. ※1 Ion sensitive probe.垂直方向イオン温度を計測するための機器である.

3. 成果報告

加賀谷重考 他,「Retarding Field Analyzer におけるイオン選択性を用いた磁力線垂直方向イオン温度計測手法の検証,プラズマ・核融合学会第40回年会,ポスター番号30P60
加賀谷重考 他,「Retarding Field Analyzer における速度選択性を利用した2方向イオン温度の

同時計測手法の構築」,日本物理学会2024年春季大会,講演番号18aB1-11

4. 研究組織

東北大学大学院工学研究科 高橋宏幸,加賀谷重考

ヘリウムイオン照射した鉄系合金のキャビティ形成と磁気特性

岩手大学理工学部 鎌田康寛

目的:核融合炉や先進原子炉用の機器構造材料の一つにFe-Cr及びFe-Cr-Ni合金があり、機械特性に 与える照射影響の研究が進んでいる。他方、プラズマ消失時に発生する電磁力の計算で磁気特性が 必要であり、構造体の磁性に与える過酷照射の影響の理解が必要であるが、ほとんど分かっていな い。我々の研究グループでは先行研究として、bcc構造のFe-18Cr-8Ni薄膜をHeイオンで過酷照射 することで、キャビティが形成し磁化曲線の形状が変わることを見出しているが[1]、Niの役割は 不明であった。本研究では、相境界組成を含むFe-Ni薄膜に対してHeイオン照射を行い、その結 晶構造と磁性に与える過酷照射の影響を調べた。

実験方法:超高真空電子ビーム蒸着法を用い、MgO(001)基板上に膜厚 200 nm の Fe-Ni 合金薄膜(Ni 組成:15,24,36%)を作製し、30keV で He⁺を室温照射した。損傷量と残留 He 分布を SRIM 計算か ら推定した結果、最大弾き出し損傷量は 19 dpa で、He は薄膜内に残留することを確認した。照射 前後の結晶構造・磁性を EBSD、XRD、TEM、VSM で評価した。

結果及び考察:EBSD 観察の結果、MgO(001)基板上に15Niでは主にbcc 構造が、24Niではbccと fcc 構造が、36Niでは主にfcc 構造が成長していることを確認した。結晶構造と方位の照射による 変化は見られなかった。XRD 測定の結果、全ての試料で照射量増加に伴いピーク位置が低角側に シフトし、膜面垂直方向に膨張した。また、照射後の断面 TEM 観察から、照射により高密度のキ ャビティが形成していることを確認した。VSM による磁化測定の結果、bcc 構造の 15Ni 薄膜では 照射による磁化曲線の形状に変化は見られなかった。この結果は bcc 構造の Fe-20Cr や Fe-18Cr-8Ni 薄膜の結果[1]とは異なる。これらの結果は、照射による bcc 構造の Fe-Cr-Ni 合金の照射による磁気 特性変化において、Ni の寄与は小さく、Cr が重要な役割を持つことを示している。それに対して、 24Ni、36Niでは 15Ni と異なり、照射により飽和磁化が減少した。24Ni、36Ni の照射前試料は少量 の bcc 構造に変態した可能性が考えられる。薄膜表面の EBSD 観察と XRD 測定からは直接確認で きなかったが、断面試料の透過 EBSD による高分解能観察で、照射前とは方位の異なる fcc 構造の 形成を確認しており、照射による結晶構造の変化を示唆している。本研究より、bcc 相と fcc 相と で Fe-Ni 合金の磁性に与える照射影響が異なることがわかり、実用 Fe-Cr-Ni 合金の磁性の照射影響 を考える上で有用な情報を得ることができた。

文献:1 畠山将人ら, 第173回金属学会講演大会概要集(2023)

成果報告:

Y. Kamada *et al.*, "Irradiation Effects on Structure and Magnetism of Fe-Cr-Ni Alloys at the fcc-bcc Phase Boundary", "Effects of Helium-Ion Irradiation on Magnetism of Pure Iron and Iron-Chromium Alloy", ICFRM-21, Granada, Spain, Oct. 2023 (2 件)

Y. Kamada *et al.*, "Microstructure and Magnetism of Heavily Helium-Ion Irradiated Epitaxial Iron Films", *Metals*, 13. (2023) 1905.

組織:鎌田康寬,清水一行,村上武,畠山将人,梅山大輝,久慈聖太:岩手大、渡辺英雄:九大

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.</u> はじめに 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 基本設備の更新 研究計画全体の遂行のために必要なパソコン関連一式設備を見直し、基本情報処理用 PC 等を追加購入設置した。すなわち、近く(2025 年夏頃)、MS 系の公式 0S サポートが Windows10 から Windows11 に切り替わるので、サポート以後の安全確保のために、対応可能な新しい PC 等に更新した。但し、各個システム稼働のためのソフトウェアが Win10 対応以前のものについては、同ソフトウェア稼働時には、外部ネットワーク接続なしで稼働するように、注意している。

<u>3-2</u>変位計測システムの追加整備可能性の検討 マルチカラー同軸変位計1式のうち、昨年度 までに完了していなかった、より遠距離配置の真空或いは指定雰囲気中の対象物測定のために、 より遠距離測定可能な変位計システムの検討をした。損耗量のその場測定の応用範囲を広げる ために必要であったが、変位計ヘッドを入れ替えるだけでなく、ヘッドをバックアップする部 品系1式(コントローラ、増設ユニット等)も追加調達する必要があることが判明したので、 本年度は、準備のための小実験をするにとどめた。たとえば、これまでに用意した古い真空蒸 着装置のベルジャー部と同一種類のガラス板の背後に被検材を置いて、被検材厚さ測定ができ るかどうかを調べた。

<u>3-3</u> レーザー励起超音波厚さ測定装置の最近の製品調査 これまでに使用の当該厚さ測定装置 の装置価格は必ずしも安価ではなく、その応用範囲をさらに広げるためには、より小型化、低 価格化を実現する必要がある。そこで、さらなる調査を実施した。その結果、非接触レーザー 超音波可視化検査装置なる製品名で、つくばテクノロジー(株)からカタログ販売されている ものがあり、現在、同社に連絡し、本研究目的をカバーでき、かつ、さらなる広範囲への応用 が可能な、かなり安価で小型の新製品開発の可能性検討を開始した。

<u>3-4</u> アップコンバージョン(UC)光を利用する複合分光法の準備 構造材料本体背面或いは、 これの背後に置いた高温用透明材料との組み合わせ材料に、UC材料の薄層を加えたサンプルを 作成し、これらの高速温度上昇時の分光測定を計画した。

<u>4. 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。併せて感謝の意を表します。

5. 研究組織

糟谷紘一^{4,8}, 井澤靖和^B, 徳永和俊^c, 川路 均^D, 平等拓範^{E,F}, ⁴応用ながれ研究所, ^Bレーザー技術総合研究所, ^c九州大学応用力学研究所, ^D東京工業大学フロンティア材料 研究所, ^B分子科学研究所, ^F理化学研究所. (2024/02/15 記) <u>6.研究成果報告一覧</u>最近の当該共同研究結果を、下記の論文などで公表或いは公表 1) 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, 26,1,158-159,2023.

2) 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, 27, 1, 93-95, 2023.

3) 糟谷紘一,徳永和俊,川路 均,平等拓範,核融合材料の損耗過程の・その場測定法に関す る最近の試み,2023 年度 NIFS 共同研究夏の合同研究会,筑波大学総合研究棟 B112 講義室+オ ンライン,2023 年 9 月 5 日-9 月 6 日.

4) 糟谷紘一グループ,レーザー照射に付随する検体の放射損傷の極小化とその医療診断への応用に向けて,第1回医療フォトニクスシンポジウム〜フォトニクスの医療応用を加速させるには〜,2024年3月13日14:00〜20:00、大阪大学銀杏会館3階,ポスター講演.

7. スピンオフ研究課題の提案

当該研究課題は、元々、核融合関連高温材料の研究のために進めてきたものである。特にごく最 近は、産官学全体の異常なまでの核融合炉開発付随研究の高まりがあって、根っからの核融合関 連研究者にとっても、増々ありがたい環境になっている。但し、核融合発電実現が近づいたこと の宣伝が嘘であったことが判明する場合、ごく近い将来か、もう少し先になるかは別として、世 界の失望・反動は、計りしれなく深いものになるであろう。それでも、さらに引き続き核融合研 究を続けるべきかと問われるなら、やはり地球上の生体のさらなる存続を望む限り、続けざるを 得ないと答えるしか道はないであろう。

さらに続けて、本研究の代表者は以下のことを付記したい。元々核融合材料の損耗研究であった 研究課題は、何もこれのみに限定されるべきものではなく、より生々しい生体防衛の観点からの、 スピンオフ的研究課題へと敷衍する。すなわち、例えばレーザー光照射による生体診断・治療分 野において、対象物に与える乱れ(よくない状態変化)を、可能な限り小さく抑えて診断・治療 する方法の選択を可能とする進化した方法の提案を、能動的に展開したいと言うモチベーション の盛り上がりをもたらす。 という訳で、ごく最近、研究代表者らはスピンオフの1つの方 向を模索するため、上記(6-4)項)のシンポジウムに参加することにした。余命期間がより 短い者に取っては、こちらの課題の方が、短期間で寄与できることがより多くありそうである。

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

昨年度は、R6Fコード(1次元領域分割版)を用いて周辺部にハンプをもつ密度分布を初期値とし て与えた場合や放物線型の密度分布に対し、ある時刻において球状の粒子ソースを印可した場合 等に関して報告したが[1-2],本年度は、R6F2コード(2次元領域分割版)にガウス型の加熱ソー スと粒子ソースを実装し、コア部に加熱ソース、周辺部に粒子ソースを印可して分布の時間発展 を解析した.ポロイダルアルフベン時間で規格化した時間に

おいてt = 4000で加熱ソースを $r_0 = 0.2$ に印可しており(イオ ンと電子両方),その後しばらく分布の発展をさせた後,t =10000で粒子ソースを $r_0 = 0.8$ に印可し,密度分布の時間発展 を追跡した.図に密度分布の時間発展を示す.加熱ソース印 可後,密度分布はコア部が減少に転じていることがわかる. r = 0.6にq = 2面が存在し磁気島が形成されている.これが障 壁となりr = 0.6に境界が置かれているのと等価な振る舞いを している.密度ソースの添加後,コア部の減少はとまり外側 からの密度供給により徐々に回復している.この場合,r =0.6を横切って密度が上昇していることから障壁としての効果 は弱いようである.詳細な乱流揺動解析は次年度引き続き行 う.さらに R6F コードの GPGPU への移植も進展した[3].



図:密度分布の時間発展

[1] 宮本琉耶, 糟谷直宏, 矢木雅敏, "Evaluation of nonlinear mechanism to induce inward turbulent particle fluxes in tokamaks", 第21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), 2023-12-22.

[2] 矢木雅敏, 令和4年度共同利用研究成果報告第26号, 2022CR-FP-3.

[3] 矢木雅敏, 轟晴彦, 糟谷直宏, "GPU acceleration of RMHD model and application to particle transport in plasma peripheral", 第 21 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), 2023-12-21.

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)、糟谷和賀子(応用流れ研究所)

137

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)の深層水取水管(CWP)の設計の根幹に関わる懸念として大流量の内部流によ る不安定振動があり、この流体関連振動現象を理論的に明らかにする必要がある.これまでの実験では 内部流による不安定振動は確認されなかったものの、振動特性が大きく変化することが確認された.一 方、取水管特有の点として取水口近傍の流れが振動特性に大きく影響を及ぼすことが理論的に得られて いるものの、非定常な流れ場の影響などの多くの曖昧さがあり実験的にも確認されていない.本研究は 取水管下端の取水口近傍の流れの振動への影響を実験的に明らかとすることを目的とする.

実験方法

深海機器力学水槽に図1の通り実験装置を構築した.長さ4m,内径20mm, 板厚1mmのポリカーボネート製パイプを試験体として,強制動揺装置に鉛 直に取り付けて静水中の強制変位励振下での振動を下端の変位,上端の軸ひ ずみにより計測した.この際に吸引ポンプにより最大5.7m/sの取水流れを試 験体に発生させる.取水口近傍の流れの影響を調査するため,ここでは取水 口の下端に通常の切断面に加えてベルマウス形状,T字形状,L字形状の3 種類のアタッチメントに変更することでそれぞれの振動特性を調査した.

実験結果・考察

図2に示すように、本実験では取水口形状の違いによる加振方向の周波数 応答特性の違いは殆ど確認されなかった.これは従来の定常流れ場を仮定し た理論を裏付けるものであり、非定常な流れの振動特性への影響は小さいと 考えられる.一方、T字型取水口では高周波数での振動、全体的に 6-8 秒で の加振時の振幅の増加という既存理論では説明できない振動現象を新たに 観察した.これらの現象を理論的に解明することが今後の焦点となる.



図1 実験装置



研究成果報告

Hisamatsu, R., Yamaguchi, Y., Riveros-Jerez, C., Utsunomiya, T. 2024. EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF THE INLET EFFECT ON THE DYNAMICS OF A WATER INTAKE PIPE. OMAE2024-124537, June 9-14, 2024, Singapore EXPO, Singapore (講演予定).

水中ビークルの動力学の高精度推定に関する研究

九州大学大学院工学研究院 山口 悟

1. 緒言

海底の状態を詳細に観察しようとするとき,水中ビークルに搭載した光 学カメラを用いて静止画や動画を撮影することが有用である。海底を広範 囲に撮影するためには海底の起伏や勾配に追従し障害物を回避しながら 海底との距離を近く保ったまま水中ビークルを高速で移動させるための 高い運動性能が求められる。本研究では,Fig.1に示す光学カメラによっ て海底を撮影する水中曳航体の運動制御手法について調査した。



Fig. 1 Model of towed vehicle

2. モデル予測制御

システムモデルを使って逐次的に有限時間まで先の最適化問題を解く制御アルゴリズムであるモデ ル予測制御(MPC: Model Predictive Control)は現代制御アルゴリズムの一つであり、システムモデルを 非線形のまま線形化することなく制御を行うNMPC(Non-linear MPC)は複雑な非線形性を持つ制御対 象に対して高い制御性能を発揮する。水中曳航体は流体力や曳航ケーブルの動力学特性の影響でシステ ムの非線形性が非常に強いため、低高度・高速型の水中曳航体を高機動に運用するためにはシステムモ デルを非線形のまま取り扱える NMPC が有効であると考えられる。

正弦波状の深度目標に対するLQI制御系とNMPC制御系のシミュレーション結果をFig.2,3に示す。LQI 制御は目標の深度に追従することができなかったが,NMPC制御系は目標値に対して制御量がよく追従 した。ここでは,現在時刻から0.5 秒先まで5ステップ分の制御入力を印加したときの2秒先までの20ス テップ分の出力を制約のもとで最適化して制御を行っている。有限時間先までの予測を逐次繰り返す NMPCの制御則が,周期が短い正弦波状の深度目標に追従する高機動な運動制御に対して有効であるこ とが確認された。



3. 結言

水中曳航体に光学カメラを搭載し、低高度・高速で起伏の多い海底面からの高度を一定範囲に保つた め深度を大きく変更しながら航行する場合を対象として、近年様々な分野で注目されているモデル予測 制御を運動制御手法として導入することを試みた。機体運動の数値シミュレーションによりNMPC制御 系の有効性を確認した。今後は試験機を設計、製作し、実機でのデータ収集と制御系開発を行い、高機 動運用可能な水中曳航体の実用化を目指す。

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、依然深刻化が進む地球温暖化の対策として CO2 排出量の削減が各国や企業に対して強く求めら れている。船舶分野においても CO2 削減が喫緊の課題となっており CO2 削減を実行する上でも、波浪 中の推進性能に優れた船型開発は非常に重要となっている。こうした状況下で近年は特に CFD を用い たシミュレーション技術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、本研究室では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¹⁾²⁾³⁾⁴⁾。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の濡れ面部分で面積分すること 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 で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ることから、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。本研究室で は、これまで容量式波高計を用いての船側波形の計測を実施してきたが、それに代わる新たな計測手法 として昨年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した。本手法は 従来の容量線を用いた手法と比較し、模型を傷つけることがないという利点を有したが、カメラのレン ズの歪みによって船体が画像の中央にある場合と端にある場合で画像の pixel 数と実際の長さの関係が 変化するため校正試験に時間がかかってしまうという問題点があった。

そこで本研究では新たにカメラ2台ずつで解析が可能なステレオ撮影を用いて船側波形を計測する手 法を開発した。本手法ではカメラの設置が以前より簡単になることに加え、校正試験の方法が簡単にな ることで大幅な時間の削減が可能であるという利点を有する。

2. 研究組織

			-
氏 名	所属	職名	役割・担当
岩下 英嗣	広島大学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
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2年	実験補助
中谷 俊介	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
河野 邑磨	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
土本 貴大	広島大学工学部 第一類 輸送システムプログラム	学部4年	実験補助
岡崎 圭冴	広島大学工学部 第一類 輸送システムプログラム	学部4年	実験補助

実験の概要

2023 年度の9月に九州大学応用力学研究所の深海機器実験水槽 $(L \times B \times d = 65 \times 5 \times 7 \text{ m})$ にて、水槽試験を実施した。実験概要としては、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。高速度カメラは F.P. から Ord.9.0 までを映したカメラ 2台 と、Ord.8.5 から Ord.7.5 までを映したカメラ 2台の計 4 台を使用した。また、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Fig.1に示すようなキャリブレーターを用いてカメラの校正試験を行った。方法としてはまず、キャリブレーターに白色に着色した8個のガラス玉を取り付ける。ガラス玉の配置は100×100×100mmの立方体の頂点の位置になるようにしており、これを水面に浮かべ2台のカメラで同時に撮影することで画像のある点と、その実際の位置の点の関係を座標として決定する。そして、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、新たに開発した高速度カメラを用いた船側波形の計測方法の妥当性を評価する。



Fig.1 キャリブレーターと校正試験の様子

3.1. 供試模型

実験で使用した供試模型を Fig.2 に、その主要目を Table1 に示す。



Fig.2 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	κ_{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4台の高速度カメラをFig.3に示すようなマグネット取付け式カメラマウントを用い て曳航電車に設置した。使用した高速度カメラはFig.4に示す株式会社ディテクトのHAS-U2を使用し た。また計測に用いた4台の高速度カメラを同期し、フレームレート 200fps、解像度1280×1024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、船体のOrdinate毎に罫書かれた 線上において黒色のテープの下部から水面までの長さを撮影された画像から算出する。そして、その長 さを喫水線と黒色のテープの下部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 が本実験における船側波形計測の仕組みである。



<image>

Fig. 4 使用した高速度カメラ DETECT HAS-U2

Fig.5 カメラを設置した様子

3.3. 容量線

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、模型右舷側と stem 部分を含む 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、模型船に 3D プリンター製の針を刺しその穴に通すことで設置した。針の穴に通す容 量線およびアース線の直径はそれぞれ φ=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 の右側に示すように容量線は模型船から約 3mm 離して設置した。



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 に示すようにして運動計測装置に取り付けた。運動計測装置 においては surge、heave、pitch 方向の運動を計測し、前側と後ろ側のヒービングロッドに取付けた歪 み式ゲージで surge 方向の力を計測する。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の条件における運動計測試 験を行った。



Fig.8 運動計測装置概略図

Fig.9 計測システム図(電気配線図)

3.5. 高速度カメラのキャリブレーション方法

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前述した通りであり、Fig.1に示したガラス玉付きのキャリブレーターを水面に浮 かべ、Fig.10に示すように2台のカメラでそれぞれ撮影する。撮影した画像内からこの8個のガラス玉 をマーカーとして解析することで三次元補正が可能になる。このキャリブレーション方法により大幅な 時間の削減が可能になった。



Fig. 10 キャリブレーションに用いた画像

4. 結果と考察

続いて、本実験で得られた解析結果を示す。また、今回実験を行うにあたって取得した波条件毎のデー タ数を Table 2 に示しておく。また、以下に示す解析結果はこれらのデータの平均を取ったものを示し ており図中にそれぞれのデータから得られた標準偏差も示している。

波条件	データ数
$\lambda/L = 0.5$	3
$\lambda/L = 0.8$	4
$\lambda/L = 1.0$	4
$\lambda/L = 1.25$	4
$\lambda/L = 1.5$	4
$\lambda/L = 2.0$	4

Table 2 実験データ数

4.1. 高速度カメラにより計測された船側波計

Fig. 11 から Fig. 16 は運動計測試験の各波条件における高速度カメラにより求めた船側波形の計測結 果と容量線により得られた船側波形の計測結果を示している。上段と中段のグラフについては横軸はx軸を船体の半分の長さで除した値を取っており船体中央を0とし船首が1、船尾が-1を示している。縦 軸は波振幅を入射波振幅で割った無次元値であり、上段が cos の一次成分、中段が sin の一次成分を示し ている。また下段のグラフは横軸は無次元化した船長、縦軸が波振幅の有次元値を示したグラフとなっ ている。また、赤丸がカメラによって計測された結果を示しており、青丸が容量線によって計測された 結果を示している。これらの計測結果を比較すると、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。画像解析の際には測定する2点間の位置を手動で決定するため数ピクセルのずれが生じてしまったと考えられる。


Fig. 12 運動計測試験における船側波高, $F_n = 0.18$, $\lambda/L = 0.8$, $\beta = 180^{\circ}$



Fig. 14 運動計測試験における船側波高, $F_n=0.18,\,\lambda/L=1.25,\,\beta=180^\circ$





5. 追加実験

9月に実施した実験では Ord.7.5 までの船首付近のみの船側波形計測を行ってきたが、同年 12 月に船 体全域を撮影可能な広角レンズを取り付けて地上からステレオ撮影を行い、運動計測試験における船速 波形を計測する実験を実施した。また、12 月の実験では 6 台のレーザー墨出し器を Fig. 17 に示すよう な治具を用いて、水槽壁に対して垂直にレーザーを照射するように調整し設置した。そしてそれらを挟 むようにして 2 台の高速度カメラを設置し計測を行った。使用した高速度カメラは 9 月の実験で使用し たものと同じ株式会社ディテクトの HAS-U2 を用いた。また、設置した 2 台の高速度カメラはそれぞれ 同期されており、フレームレート 100fps、解像度 1920 × 1080 で同時に撮影を行った。



Fig. 17 レーザー墨出し器の治具と設置の様子

5.1. 追加実験の概要

使用した広角レンズは Fig. 18、19 に示している株式会社ヴイ・エス・テクノロジーの VS-1614H1N を 使用した。カメラの設置位置においては船体全域が撮影できるように注意しながら Fig. 20 に示している ように設置した。今回の実験では、6 台のレーザー墨出し器から照射される赤色のレーザー光が船体左舷 側の表面に反射することで、左舷側に貼り付けた黒色のテープから水面までのレーザーの長さを画像か ら読み取り、それを黒色のテープから喫水線までの長さから引くことにより船側波形の振幅を算出する。



Fig. 18 使用したカメラと広角 レンズ VS-1614H1N



Fig. 19 VS-1614H1N の各寸法



Fig. 20 カメラを設置した様子

5.2. 追加実験における高速度カメラのキャリブレーション

高速度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ため、高速度カメラのキャ リブレーションを行う必要があるが9月の実験と比較して、より広範囲を映すことになるためキャリブ レーターも Fig. 21 に示すようにガラス玉の位置が250×250×500 mm である大型のキャリブレーター を用意して校正試験を実施した。



Fig. 21 追加実験に使用したキャリブレーター



Fig. 22 実際に撮影した画像

5.3. 追加実験で実施した水槽試験

船体模型は同様のものを使用し、Fig.8 に示しているように運動計測装置に取り付け surge、pitch、 heave 方向の運動と前後のヒービングロッドに取り付けた歪み式ゲージから surge 方向の力を計測した。 また、追加実験における計測システムの概略図を Fig.23 に示す。トリガーも9月の実験と同じように高 速度カメラによる撮影と船側波形の計測が同時に行えるようになっている。また、実験条件も9月と同 様であり $F_n = 0.18$ 、 $\lambda/L = 0.5$ 、0.8、1.0、1.25、1.5、2.0 における運動計測試験を行った。



Fig. 23 追加実験における計測システム図(電気配線図)

6. 追加実験の結果と考察

続いて、追加実験で得られた解析結果を示す。また、今回の追加実験で取得した波条件毎のデータ数 を Table 3 に示しておく。また、以下に示す解析結果はこれらのデータの平均を取ったものを示してお り図中にそれぞれのデータから得られた標準偏差も示している。

Table3 追加実験における実験データ数

波条件	データ数
$\lambda/L = 0.5$	3
$\lambda/L = 0.8$	3
$\lambda/L = 1.0$	3
$\lambda/L = 1.25$	3
$\lambda/L = 1.5$	3
$\lambda/L = 2.0$	3

6.1. 追加実験により得られた船側波計の計測結果

Fig. 24 から Fig. 29 は運動計測試験の各波条件における高速度カメラにより求めた船側波形の計測結 果と容量線により得られた船側波形の計測結果を示している。上段と中段のグラフについては横軸は *x* 軸を船体の半分の長さで除した値を取っており船体中央を0とし船首が1、船尾が-1を示している。縦 軸は波振幅を入射波振幅で割った無次元値であり、上段が cos の一次成分、中段が sin の一次成分を示し ている。下段のグラフは横軸は無次元化した船長、縦軸が波振幅の有次元値を示したグラフとなってい る。また、赤の実線がカメラによって計測された船側波形の解析結果で青丸が容量線によって得られた 船側波形の解析結果を示している。

これらの結果を比較すると、 $\lambda/L = 0.8$ 、2.0 などでは概ね一致していることが確認できる。その他の 波条件では多少相違が確認できるが、カメラでの撮影における標準偏差の結果を確認するとばらつきが 小さいことから再現性が確認できる。また、ところどころ船首付近でのばらつきが大きい箇所が確認で きるがこれは解析に用いる画像内では船首部分の曲率が大きいため黒色のテープと水面の2点間を追尾 することが難しく正確に追尾できていないことが原因であると考えられる。







Fig. 24 追加実験の運動計測試験における船側波高, $F_n = 0.18$, $\lambda/L = 0.5$, $\beta = 180^{\circ}$

Steady and unsteady wave profile of RIOS bulker model at Fn = 0.18, λ /L=0.8, χ =180degs., measured along ship-side

Fig. 25 追加実験の運動計測試験における船側波高, $F_n = 0.18$, $\lambda/L = 0.8$, $\beta = 180^{\circ}$







Fig. 26 追加実験の運動計測試験における船側波高, $F_n = 0.18$, $\lambda/L = 1.0$, $\beta = 180^{\circ}$

Fig. 27 追加実験の運動計測試験における船側波高, $F_n = 0.18$, $\lambda/L = 1.25$, $\beta = 180^{\circ}$







Fig. 28 追加実験の運動計測試験における船側波高, $F_n = 0.18$, $\lambda/L = 1.5$, $\beta = 180^{\circ}$

Fig. 29 追加実験の運動計測試験における船側波高, $F_n = 0.18$, $\lambda/L = 2.0$, $\beta = 180^{\circ}$

7. おわりに

カメラを用いた船側波形の計測手法の新たな開発を目的として、2023年9月と12月に実施した本研 究にて、得られた成果を以下に示す。

- (1) 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。9月に実施したステレオ撮影方法では、従来のカメラ6台を用いて計測する方法 よりも、より多くの周期の船側波形を計測することができるといった利点を有している。一方12 月に実施した従来の方法も取り入れたハイブリッド手法では集録できる船側波形の周期は少なく なるものの船側波形の多断面計測が可能であり、レーザーを使用することでデッキと水面の2点 間の追尾が簡単になるという利点を有する。
- (2) 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と良好な一致が見られる所もあった。一方で、計測する波条件によってはフーリエ係数にずれが生じていたり、標準偏差においても大きなばらつきが見られた所もあったことから、引き続き画像解析の精度を向上させることが今後の課題である。

今回の研究では9月に実施した曳航電車にカメラを取り付け船体模型と同じように移動しながら撮影す る手法と、地上にレーザーと共に設置し船側波形を計測する2種類の手法を開発した。両手法とも画像 解析であるという点から撮影した画像において、より正確に水面とデッキを追尾する必要がある。本実 験においても船体側面を照らす明かりを増やすなど様々な調整を行ったが依然として船首部分や船体運 動が大きい場合などは追尾が困難であった。今後は、これらの課題を解決すると共に更なる高精度化を 試みる予定である。

参考文献

- Iwashita, H., Kashiwagi, M.: An Innovative EFD for Studying Ship Seakeeping, Proceedings of the 33rd IWWWFB, 2018
- 2) 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

付録A

ここでは本研究で得られた実験結果の比較として、今年の9月にカメラ6台を地上に設置して実施し た運動計測試験における船側波形の実験概要と解析結果を示す。

A.1 実験概要

この実験では6台のカメラとレーザー墨出し器を使用して実験を行った。この実験の計測システムを Fig. A.1 に示す。使用したカメラはFig.4に示しているカメラを使用し、レーザー墨出し器も同様のものを 使用した。高速度カメラの解像度は1280×1024、フレームレート数は船速波形計測時には200 fps、カメラ の検定試験時には100 fps にして撮影を行った。6台のカメラとレーザー墨出し器はそれぞれ3Dプリンター によって作成された治具に取り付け、Fig. 17 の左図に示している通りにアルミフレーム上に設置し水槽壁 面に取り付けた。実際の取り付けた様子をFig. A.2 に示す。そして、6台のレーザー墨出し器から照射され る赤色のレーザー光が船体左舷側の表面に反射することで、左舷側に貼り付けた黒色のテープから水面ま でのレーザーの長さを各カメラで撮影した画像から読み取る。それを黒色のテープから喫水線までの長さ から引くことにより船側波形の振幅を各カメラごとに算出する。その後各カメラで計測された船側波形を フーリエ級数展開することでフーリエ係数を求め、容量線によって計測された船側波形との比較を行った。



Fig. A.1 計測システム図(電気配線図)



Fig. A.2 カメラ設置時の様子

A.2 高速度カメラのキャリブレーション

カメラの校正試験方法は、まず強制動揺装置にて喫水位置に固定された模型船を波が立たない程の低 速(U=0.30[m/s])で曳航させその時の2点間のピクセル数と実際の2点間線分長さを記録する。次に模 型船を5mm沈下させ同様に曳航し2点間距離を記録する。これを沈下方向に5mmピッチで115mm、 上昇方向に5mmピッチで60mmまで行う。これにより任意の各断面における5mm間隔の2点間ピク セル数と線分長さの関係が求められる。最後に6台の結果を平均することで最終的な校正係数を得る。

Fig. A.3 には校正試験によって得られた結果を面分布にして示しており、横軸は船体の Ordinate、縦軸は計測した 2 点間距離のピクセル数、奥行きの軸は 2 点間のレーザー距離を示している。



Fig. A.3 キャリブレーション結果

A.3 結果

続いて、この実験で得られた解析結果を示す。また、実験にて取得した波条件毎のデータ数を Table A.1 に示しておく。また、次に示す解析結果はこれらのデータの平均を取ったものを示しており図中にそれ ぞれのデータから得られた標準偏差も示している。

Table A.1 実験データ数

波条件	データ数
$\lambda/L = 0.5$	6
$\lambda/L = 0.8$	3
$\lambda/L = 1.0$	5
$\lambda/L = 1.25$	4
$\lambda/L = 1.5$	5
$\lambda/L = 2.0$	4







Fig. A.4 運動計測試験における船側波高, $F_n=0.18,\,\lambda/L=0.5,\,\beta=180^\circ$

Steady and unsteady wave profile of RIOS bulker model at Fn = 0.18, λ /L=0.8, χ =180degs., measured along ship-side

Fig. A.5 運動計測試験における船側波高, $F_n=0.18,\,\lambda/L=0.8,\,\beta=180^\circ$



Steady and unsteady wave profile of RIOS bulker model at Fn = 0.18, λ/L =1.0, χ =180degs., measured along ship-side



Fig. A.6 運動計測試験における船側波高, $F_n=0.18,\,\lambda/L=1.0,\,\beta=180^\circ$

Steady and unsteady wave profile of RIOS bulker model at Fn = 0.18, λ /L=1.25, χ =180degs., measured along ship-side

Fig. A.7 運動計測試験における船側波高, $F_n = 0.18$, $\lambda/L = 1.25$, $\beta = 180^{\circ}$



Steady and unsteady wave profile of RIOS bulker model at Fn = 0.18, λ/L =1.5, χ =180degs., measured along ship-side



Fig. A.8 運動計測試験における船側波高, $F_n=0.18,\,\lambda/L=1.5,\,\beta=180^\circ$

Steady and unsteady wave profile of RIOS bulker model at Fn = 0.18, λ /L=2.0, χ =180degs., measured along ship-side

Fig. A.9 運動計測試験における船側波高, $F_n = 0.18$, $\lambda/L = 2.0$, $\beta = 180^{\circ}$

第一原理計算によるα-Ga2O3/Al2O3 超格子のバンド構造解析

三重大学大学院工学研究科 河村貴宏

研究背景・目的

Ga₂O₃の準安定相の1つであるα-Ga₂O₃は同じ結晶構造を持つα-Al₂O₃との混晶やヘテロ構造、超格子 構造の形成が可能であり、そのデバイス応用が期待されている。ヘテロ構造や超格子構造においては各 層の格子定数差や熱膨張係数差に起因して格子歪みが発生するため、コヒーレント成長可能な膜厚の制 限や成長条件の最適化が課題となっているが、今後のデバイス応用を見据えて、結晶成長技術の向上と 共にその基本的特性の理解が求められている。そこで本研究ではα-Ga₂O₃/Al₂O₃超格子構造について、超 格子構造の層厚と格子歪みが電子構造に与える影響を明らかにすることを目的として第一原理計算を 用いた解析を行った。

計算方法

図1に示すように α -Ga₂O₃ と α -Al₂O₃ を c 軸方向に重ねた計算モデルを 作成した。全方向に周期境界条件を適用することで c 軸方向に α -Ga₂O₃ と α -Al₂O₃が周期的に積層した超格子構造となる。

超格子の層厚の影響を調べるために、 α -Ga₂O₃と α -Al₂O₃の単位格子の サイズを基準にして、0.5Ga₂O₃/0.5Al₂O₃、1Ga₂O₃/1Al₂O₃、2Ga₂O₃/2Al₂O₃ の3つのモデルを用いて解析を行った。格子緩和計算を行う際に、a、b 軸方向の格子定数を α -Ga₂O₃または α -Al₂O₃と同じ値に拘束することで、 α -Ga₂O₃ 基板または α -Al₂O₃ 基板上に成膜した超格子が基板拘束による 格子歪みを受けている状況を再現した。最適化された格子定数と原子座

標のデータを用いて、バンド構造計算と状態密度計算を行った。これら

の結果からバンドギャップとバンドオフセットについて評価した。また

本研究で行った解析は全て第一原理計算プログラム Quantum ESPRESSO

0.5Ga,O/0.5Al,O, 0.5Ga,O,O,IAl,O, 1Ga,O,IAl,O, 1GA,O,IAL,O,IAL,O, 1GA,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IAL,O,IA

図1Ga₂O₃/Al₂O₃超格子の 計算モデル

結果および考察

を用いて行った。

図2はGa₂O₃/Al₂O₃超格子のバンドギャップと格子歪みおよび 超格子の層厚の関係を示している。まずバンドギャップと格子 歪みの関係について見ると、圧縮歪み(ϵ <0)が加わるとバンド ギャップは増加し、逆に引張歪み(ϵ >0)が加わると減少するこ とが分かった。これはバルク α -Ga₂O₃のバンドギャップと格子歪 みの関係(T. Kawamura et al., Jpn. J. Appl. Phys. 61, 021005 (2022)) と同様の傾向である。次に、バンドギャップと超格子の層厚の関 係を見ると、格子歪みの大きさに関わらず 0.5Ga₂O₃/0.5Al₂O₃の 値が最も大きく、2Ga₂O₃/2Al₂O₃の値が最も小さくなっており、 層厚が増加するにつれてバンドギャップが減少することが分か



図 2 Ga₂O₃/Al₂O₃ 超格子のバン ドギャップと超格子の層厚およ び格子歪みとの関係

った。同様の傾向が GaN/AIN 超格子や InN/AIN 超格子(T. Kawamura et al., Phys. Status Solidi B 257,1900530 (2020)) などの III-V 族窒化物半導体でも現れていることから、超格子構造において現れる共通の特徴だ と考えられる。

次に、無歪みの条件で行ったバンドオフセットの結果を図3に示す。各図の横軸はc軸方向の原子座 標、縦軸はエネルギーを示している。図の下側が価電子帯、上側が伝導帯を示しており、白色の領域が バンドギャップに相当する。0.5Ga2O3/0.5Al2O3 超格子についてはGa2O3 層とAl2O3 層の厚さが薄いため か、はっきりとしたオフセットが見られなかった。一方、1Ga2O3/1Al2O3 超格子と2Ga2O3/2Al2O3 超格子 においてはオフセットが見られた。1Ga2O3/1Al2O3 超格子と2Ga2O3/2Al2O3 超格子 においてはオフセットが見られた。1Ga2O3/1Al2O3 超格子と2Ga2O3/2Al2O3 超格子の伝導帯のオフセット はそれぞれ 2.7 eV、3.3 eV であり、また価電子帯のオフセットは0.2 eV、0.5 eV であった。超格子の層 厚が増加するにつれて伝導帯、価電子帯どちらもオフセットが増加する傾向が見られた。また、ここに は示していないが、格子歪みもバンドオフセットに影響することが分かった。

以上の結果から、Ga₂O₃/Al₂O₃ 超格子の電子構造は超格子の層厚と格子歪みの影響を受けて変化する 事が明らかとなった。



図 3 Ga₂O₃/Al₂O₃界面のバンドオフセット: (a) 0.5Ga₂O₃/0.5Al₂O₃、(b) 1Ga₂O₃/1Al₂O₃、 (c) 2Ga₂O₃/2Al₂O₃. 価電子帯上端をエネルギーゼロにしている。

研究成果報告

- T. Kawamura, T. Akiyama, and Y. Kangawa, "First-principles calculations of band structures of α-Ga₂O₃/Al₂O₃ superlattices", Journal of Crystal Growth, 626, 127477 (2024).
- T. Kawamura, T. Akiyama, and Y. Kangawa, "First-principles calculations of band structures of α-Ga₂O₃/Al₂O₃ superlattices", 20th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy, Poster Presentation 27, Naples, Italy
- 3) 河村貴宏,秋山亨, "α-Ga₂O₃/Al₂O₃超格子のバンド構造解析",第70回応用物理学会春季学術講演会, 16p-E102-7

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 秋山亨(三重大学 大学院工学研究科・准教授)

1

腫瘍を有する脛骨の力学的解析法の検討

兵庫県立がんセンター 藤本卓也

1. はじめに

線維性骨異形成症は、骨に繊維性組織が異常増殖して置換されることで腫瘍となる疾患 で、痛みや骨折の原因となるため骨切除術が施されるが、その際に骨の強度低下が懸念さ れる。そこで本研究では、CT 画像から3次元骨モデルを作成し力学的な解析を行い、2箇 所に腫瘍が存在する脛骨の術前の腫瘍切除の想定モデルを複数作成して比較検討を行い、 さらに骨切除術後1年経過のCT 画像からも同様にモデルを作成し骨形成の状態を確認す ることを試みた。

2. 解析方法

20 代女性の右脛骨の手術前の CT 画像から骨解析ソフトウェアである Mechanical Finder ver. 11.0 を用いて 3 次元脛骨モデルを作成した。このモデルを術前モデルとする。術前モ デルをもとに 2 か所の腫瘍切除を想定した形状の異なるモデルを 3 種類(術前想定モデル A, B, C)作成した。境界条件は Fig.1 に示すように、近位部と遠位部に樹脂のブロックを 設置し、近位部のブロック上面から荷重をかける垂直荷重と、近位部のブロック側面から 面と並行に荷重をかけるねじり荷重の 2 種類で行った。骨の降伏応力とヤング率は Keller の計算式⁽¹⁾を用いた。本研究では、引張か圧縮破壊の要素数が 1000 に達すると骨折したと 定義し、その荷重を強度として評価した。手術から 1 年経過後の両足の CT 画像からも同 様にモデル化を行い、術後1年モデルとして図1の2 種類の条件で解析を行った。

3. 結果と考察

術前および術後1年の骨モデルの解析結果の比較をFig.2に示す。術前の想定において は垂直荷重条件では1~8%程度の強度低下であったのに対して、ねじり荷重条件では77~ 88%と著しい強度低下が見られた。また、Fig.3のねじり荷重350N時の相当応力分布を見 るとモデルBの直方体の角で非常に高い値を示している。そして、Fig.2からモデルBが 最も強度が低いという結果が得られたことから、手術の際の形状は楕円体が望ましく、ね じる動作に注意が必要であると担当医に報告し、実際に手術が行われた。

術後1年の患側と健側のモデルの結果については、Fig.2のように垂直荷重条件では術前 に想定したどのモデルよりも強度が低い値となっていた。その理由として骨密度の低下が 考えられる。脛骨全体の平均骨密度は、術前が0.620 g/cm³、術後1年の健側が0.493 g/cm³、 患側が0.534 g/cm³となっていた。骨密度は骨に荷重がかからないことで低下することが知 られているため、手術後の長期間にわたる荷重制限によって骨密度が低下したことで術前 の想定より強度が低い結果となったと考える。また、ねじり荷重条件では、骨密度が低下 しているにも関わらず患側と術前想定モデルA、B、Cと比較をして強度が高い値となって いること、健側と比較した強度低下の割合が2条件ともに20%程度とほぼ変わらなかった ことから、ねじり方向の強度は術前の想定と比較して改善されていると考えている。これ らのことから、ねじりによる破壊を気にすることなく荷重制限を少しずつ緩和して骨密度 を元の状態に近づけていくことが必要であると判断した。得られた知見を参考に実際の臨 床が実施された。











ウルトラワイドギャップ半導体ダイヤモンドおよび酸化ガリウムデバイスに 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-Ga₂O₃)は,4.8 eV のワイドバンドギャップ半導体で,次世代パワー半導体として期 待されている.しかし,デバイス特性で逆方向耐圧の低下や逆方向リーク電流をもたらす結晶欠陥(キ ラー欠陥)の存在が課題である.我々はこれまで(001)面と(010)面で SBD のキラー欠陥を同定してきた が,低転位と報告[1]のある(011)面方位にショットキーバリアダイオード(SBD)を作製し,キラー欠陥を 調べた.

2. 実験方法

(011) 面方位β-Ga₂O₃ 基板上に HVPE 成長させ, 縦型 SBD を作製し評価を行った.表面には Ni/Au を蒸着 させショットキーを形成させ,裏面は Ti/Au でオーミック接合を形成した.高感度 CCD カメラを搭載し たエミッション顕微鏡で逆方向バイアス時の SBD を裏面からエミッションスポット観察した.次にウエ ハをシンクロトロンX線トポグラフィでエミッションスポットとなった箇所の観察し,さらに AFM でも 観察した.

3. 実験結果と考察

図1は逆方向バイアス-50 V印加時のSBD(一辺1600 µm)のエミッション顕微鏡像である. エミッショ ンスポットが観測され, -36 µA の大きなリーク電流が測定された. シンクロトロンX線トポグラフィ ではエミッションスポットは欠陥となる歪み場が観察された. 図2は, エミッションスポットのAFM 像 であり, 高さに約30 nm の差がある, 異なる結晶方位を持つ粒界で構成された欠陥が観察された. この 欠陥は(001)面でも観察されたキラー欠陥の多結晶欠陥[2]と思われる.

4. 結論

低欠陥密度との報告のある(011) 面方位で作製したβ-Ga₂O₃ ショットキーバリアダイオード(SBD) を作製 し、シンクロトロンX線トポグラフィーやAFMで観察したところ、異なる結晶方位を持つ粒界で構成さ れた欠陥が観察された.この欠陥は(001) 面でも観察されたキラー欠陥の多結晶欠陥[2]と思われる.

5. 発表、論文リスト

- [1] K. Goto, Y. Kumagai, et al., Appl. Phys. Lett. 120, 102102 (2022).
- [2] S. Sdoeung, M. Kasu, et al., Appl. Phys. Express 14, 036502 (2021).



図 1. (011)β-Ga203 SBD の逆方向バイアス-50 V印加時のエミッション顕微鏡像



図 2. (011) 面 β-Ga203 で、SBD のキラー欠陥として見出された多結晶欠陥の AFM 像と断面プロファ イル

大腿骨頭壊死症を有する大腿骨の骨折挙動に関する研究

福岡大学整形外科 山本卓明

INTRODUCTION

Total Hip Arthroplasty (THA) is a common surgical procedure for the management of end-stage hip disease such as femoral head necrosis, offering better quality of life and sustained pain relief. Despite the excellent clinical outcomes of THA in reducing hip pain, the burden of revision surgery after THA has remained unchanged for many years. Known risk factors of the biomechanical problems following THA such as implant loosening due to stress shielding and periprosthetic femoral fractures, are associated with implant design, bone variables, and implant position. Several biomechanical studies have been conducted in recent years, particularly using computational techniques such as finite element analysis (FEA), to investigate the relationship between these risk factors and complications, specifically in the design of the implant. Due to the heterogeneous nature of bone, biomechanical studies even with the use of computational methods have been limited, thus, study on risk factor related to bone variables to the outcomes after THA are rarely conducted. To address this limitation, this study aims to investigate the effects of bone variables such as bone density, geometry, angle of femoral torsion and thickness of femoral bone as well as the effect of implant position to the THA femurs, through the prediction of bone damage mechanisms by using computed tomography (CT) based FEA.

METHODS

28 patients diagnosed with femoral head necrosis were included in this study, with their ages ranging from 19 to 87 years old. Quantitative CT images were obtained from the Fukuoka University Hospital and imported into the CT-FEM software, Mechanical Finder version 11.0 (RCCM, Japan) for the purpose of modelling. A linear formula was utilized to convert the Hounsfield unit (HU) into bone mineral density (BMD), thereby introducing inhomogeneous BMD values into each element that form the three-dimensional geometry of the femur.

The femoral head and neck of the femur was removed and Zweymuller stem was chosen to be inserted into the femur. The placement of the implant was carefully inserted into the femoral canal through templating from the CT-images while considering the medial offset, vertical height, and angle of torsion to replicate the femoral torsion of the original femoral head. The materials of the stem and femoral ball were assumed to be titanium alloy (E=114 GPa, v=0.34) and alumina ceramic (E=370 GPa, v=0.22), respectively. Three different loading and boundary conditions were introduced into the nonlinear FE analysis in order to predict the damage formations of the THA femoral bones. These conditions were implemented on the basis of the validated and well-established testing protocol for periprosthetic femoral shaft fixation. Those three loading and boundary conditions were denoted as stance condition (SC), lateral bending condition (LBC), and torsional condition (TC). The boundary conditions, SC, LBC, and TC are shown in Figure 1. For all conditions, the magnitude of applied load was set to be increased stepwise with 10 N increment per step until the failure of 1000 shell elements. The analysis was terminated after the failure of shell elements, and the value of the final load was recorded as the fracture load of the THA models.

The deformation characteristics of the bone components were presumed to exhibit bi-linear elastoplastic behaviour when subjected to compressive stress, while displaying linear elasticity under tensile stress conditions. The initiation of plastic deformation was determined using the Drucker-Prager yield criterion, employing the compressive yield strength obtained through the Keyak et al., and Keller equations for each individual element. Subsequently, the occurrence of compressive fracture in plastically deformed elements was assumed to transpire once the minimum principal strain reached a critical value. Conversely, tensile fracture in the elements was assumed to initiate when the

maximum principal stress reached a critical value. Additionally, the fracture load of the bone was defined as the critical load at which 1000 elements failed.

RESULTS AND DISCUSSION

Figure 2 shows the correlation between bone density and fracture load in all the THA models under SC, LBC, and TC, respectively. Based on the results, the mean (\pm standard error) predicted fracture load of those THA models was found to be 1093 N in SC, 667 N in LBC, and 950 N in TC. A strong positive correlation was observed between BMD and fracture load, which found to be consistent in all three boundary conditions (SC, r = 0.74), (LBC, r = 0.79), (TC, r = 0.88). The presence of a strong correlation coefficient implies that there is a significant statistical relationship between these two variables, with higher BMD being associated with higher fracture load. These findings suggested that bone with higher density will have a greater bone strength and resistance to fracture from the outer cortical region, despite being implanted with the metallic stem and assigned with different boundary conditions.

Distribution patterns of element failures as bone micro-damages for H1 and H2 models under SC are shown in Figure 3, respectively. In those images, distributions of solid element failures at the damage initiation and internal damage at fracture are presented, along with the distributions of shell element failures indicate external formation of bone fracture.



Figure 2: Correlation coefficient between BMD and fracture load: (a) SC, (b) LBC and (c) TC



Figure 1: Correlation coefficient between BMD and fracture load of THA models under (a) SC, (b) LBC and (c) TC

3



Figure 2: Distribution of element failures under SC

骨密度分布と微視構造を考慮した骨の力学特性予測理論の構築

千葉大学整形外科 松浦佑介

1 Introduction

In CT-based finite element analysis, Young's modulus of bone has been evaluated as a function of bone mineral density using empirical formulae such as Keyak's forumale. Those formulae were determined based on experiments and there was no theoretical background. Therefore, the principal objectives of this study were to develop the relationship between bone mineral density (porosity) and Young's modulus of bone theoretically and compare with Keyak's results.

2. Theory

In this study, bone is first considered as an ideal poroelastic medium. Through Cowin's research, the Young's modulus of cortical bone(E_c) and cancellous bone (trabecular bone) (E_t) can be expressed by E_s (the elastic moduli of trabecula bone tissue) such that

$$E_{c} = E_{s} (1 - \frac{3(1 - v_{s})}{2(1 - 2v_{s})}) \phi_{c}$$
(1)

$$E_{t} = E_{s} \beta^{2} \quad \text{while} \quad \phi_{t} = 2\beta^{3} - 3\beta^{2} + 1 \quad (2)$$

where ϕ_c, ϕ_t : the porosity of cortical bones and trabecular bones (BMD=1- ϕ).

Afterwards, a micromechanical model for the Young's modulus of bone proposed by Wanger was introduced. The model incorporates the platelet-like geometry of the basic reinforcing unit, the presence of alternating thin and thick lamellae, and the orientations of the crystal platelets in the lamellae. The thin and thick lamellae are modeled as orthotropic composite layers made up of thin rectangular apatite platelets within a collagen matrix, and classical orthotropic elasticity theory is used to calculate the Young's modulus of the lamellae. Bone is viewed as an assembly of such orthotropic lamellae bent into cylindrical structures, and having a constant, alternating angle between successive lamellae. The micromechanical model employs a modified rule-of-mixtures to account for the two types of lamellae. According to this model, Es can be expressed as a function of θ_{thin} and θ_{thick} (the angles between the longitudinal direction of the thin and thick lamellae and the long axis of bone). For the E₁ and E₂ (the longitudinal and transverse Young's moduli of bone), two important parameters required when calculating E_s, Halpin and Tsai(HT) derived their formulae:

$$E_1 = E_m(\frac{1+2\alpha_1\eta_1\phi_p}{1-\eta_1\phi_p})$$
 with $\eta_1 = \frac{E_p/E_m - 1}{E_p/E_m + 2\alpha_1}$ (3)

While, Padawer and Beecher(PB) also derived:

$$E_1 = \zeta E_p \phi_p + E_m (1 - \phi_p) \quad \text{and} \quad \zeta = 1 - \frac{\tanh \gamma}{\gamma} \quad \text{with} \quad \gamma = \alpha_1 \left(\frac{\phi_p}{1 - \phi_p}\right)^{1/2} \left[\frac{G_m}{E_p}\right]^{1/2} \quad (5)$$

 E_p , E_m : the elastic moduli of the apatite platelets and the collagen matrix; G_p , G_m : the shear moduli of the apatite platelets and the collagen matrix; ϕ_p : the volume fraction of the platelets; E_1 , E_2 : the longitudinal and transverse Young's moduli of bone; E_2 , is given by the same expression as E_1 , but with α_2 (the ratio of the platelet length to thickness) instead of α_1 (the ratio of the platelet width to thickness)

By using different models, the final calculated E_s value will change. Then, we use the revised model to calculate the E value of normal bones, bones with osteopenia and osteoporosis, and compare

with the experimental data of Keyak to get the final conclusion of this stage of the experiment.

2

$$E_{thin}(\theta) = \left[\frac{\cos^4(\theta + \theta_{thin})}{E_1} + \frac{\sin^4(\theta + \theta_{thin})}{E_2} + \left(\frac{1}{G_{12}} - 2\frac{v_{12}}{E_1}\right)\sin^2(\theta + \theta_{thin})\cos^2(\theta + \theta_{thin})\right]^{-1} \quad (6)$$

$$E_{thick}(\theta) = \left[\frac{\cos^4(\theta + \theta_{thick})}{E_1} + \frac{\sin^4(\theta + \theta_{thick})}{E_2} + \left(\frac{1}{G_{12}} - 2\frac{v_{12}}{E_1}\right)\sin^2(\theta + \theta_{thick})\cos^2(\theta + \theta_{thick})\right]^{-1} \quad (7)$$

$$E_s = \frac{2}{\pi} \int_{0}^{\pi/2} \left[V_{thin}E_{thin}(\theta) + V_{thick}E_{thick}(\theta)\right]d\theta \quad (8)$$

 θ thin, θ thick :the angles between the longitudinal direction of the thin and thick lamellae and the long axis of bone; V_{thin}, V_{thick}:the volume fractions of thin and thick lamellae; G₁₂: The shear modulus of a single lamella; v₁₂: the Poisson's ratio of a single lamella

3 Results and discussion



Fig.1 Variation of Young's modulus of bone as calculated from the (a)HT model, (b)PB model

Comparing the results of this calculation with the previous studies reviewed, the variation trend of the PB model is the same as the previous research results, while the HT model is numerically similar to it. Therefore, using these two models for the next calculation.



Fig.2 Variation of Young's modulus (E) with BMD from (a)HT model;(b)PB model

For normal bones, bones with osteopenia and bones with osteoporosis, the variation trend of E with BMD is similar to Keyak's model, and the results calculated by using the HT model are closer to Keyak's experimental results than those using the PB model.

1

人工股関節ステムが大腿骨に及ぼす力学的影響に関する研究

産業医科大学 塚本学

1. はじめに

人工股関節全置換手術(THA)は、変形性股関節症や大腿骨頭壊死症などの末期状態に対する最終 的な治療法として広く行われている.THA を施した場合、激しい痛みや過度の変形により歩行も困 難な状態が大幅に改善され、軽度の運動も可能となる.一方、術後に転倒などにより過度の負荷が 股関節に作用した場合、大腿骨に挿入したステムの周囲で発生する骨折が問題となっている.また、 様々な形態の骨折が存在するが、その詳細なメカニズムは明らかになっていない.本研究では、CT-FEM を用いて単一荷重の場合や単調増加荷重の場合と比較することで、複合荷重が骨折に及ぼす 影響について検討した.

2. モデル作成と解析法

84 歳女性患者の CT 画像データより, Mechanical Finder Ver 12.0(計算力学研究センター)を用い て大腿骨モデルを構築した.次に大腿骨骨頭部に対して Mechanical Finder 上で骨切りを行い,人工 股関節ステムと骨頭ボールの CAD データを挿入し,THA モデルを構築した.作成した THA モデ ルを Fig.1 示す.人工股関節ステムと骨頭ボールの材料特性はそれぞれチタン合金,アルミナの値 を設定した.大腿骨の骨密度は,CT 画像の HU 値から線形関係を仮定して推定し,ヤング率と圧 縮降伏応力は Keyak の予測式を用いて推定した.要素は四面体要素を用い,メッシュサイズは最小 1mm,最大 2mm とした.また,モデル表面には皮質骨の最外殻を表すシェル要素を設定し,厚さ は 0.3mm とした.骨の引張変形は線形弾性とし,最大主応力を基準として圧縮降伏応力の 0.8 倍を 破壊条件とした.一方,圧縮変形は弾塑性とし,Drucker-prager 相当応力を基準として塑性変形開始 後,最小主ひずみ 10000μ ε を破壊条件とした.

繰り返し荷重での現象と単調増加荷重での現象と違いがあるのかを知るために比較を行った.境 界条件を Fig.2 に示す.大腿骨の遠位部 1/5 を完全拘束し,荷重は骨頭ボール中心から膝関節中心 に向かって与えた.単調増加荷重では 1200N を 100 ステップに分けて,荷重を与えた.一方,繰り 返し荷重では負荷から除荷までを 1 サイクルとして 4 サイクル行った.また,負荷時には 900N を 10 ステップに分けて与え,除荷時には 1 ステップで除荷するように設定した.Fig.3 にそれぞれの 荷重条件の模式図を示す.骨折の条件は設定せず,単調増加荷重では 1200N に達したときに解析終 了,繰り返し荷重では 5 サイクル終了したときに解析終了とした.この解析においては損傷の蓄積 によって現象の違いを評価した.

3. 結果と考察

Fig.4 に単調増加荷重(左)と繰り返し荷重(右)での損傷ソリッド要素と損傷シェル要素の蓄積 を示す.Fig.4 からわかるように単調増加と繰り返し荷重では異なる現象が得られた.単調増加荷重 ではステップ数が増える、つまり、荷重が大きくなるにつれて蓄積される損傷要素数も増えていく が、繰り返し荷重ではサイクル中には増えず、サイクルが完了するごとに蓄積される損傷要素数が 増えていくことがわかる.また、サイクルが増えるにつれ、蓄積される損傷要素数が減少している こともわかる.このことから繰り返し荷重では蓄積される損傷要素数がある値に収束していくと考 えられる.



Fig.4 Accumulation of damaged elements

脊椎の力学的諸問題に対するCT-FEMの応用に関する研究

佐賀大学整形外科 森本忠嗣

1. INTRODUCTION

Vertebral compression fractures are the most common fractures in the world, and their incidence worldwide have been increasing in number since 1990. The majority are seen in elderly people, with falls being the major cause. By site, lumbar and thoracic spine are reported to be the most common. The number of vertebral compression fractures occurring in osteoporotic patients is expected to increase in the future, causing serious health and social problems. Balloon kyphoplasty (BKP) is a treatment approach for vertebral compression fractures that continue to cause pain even after adequate conservative treatment and is widely practiced worldwide. However, despite the minimally invasive nature and expectation of early pain relief, the incidence of adjacent vertebral fractures (AVFs) is reported to be approximately 13.0%-30.1%. Recently, Hijikata et al. developed an after vertebral augmentation (AVA) score to predict AVFs. The AVA score consists of 5 items, and the performance of discrimination was relatively high, with an optimism-corrected c-statistic of 0.77. Although the AVA score is a simple and potentially useful tool, its validity has not yet been investigated, which is an urgent issue in the clinical field. Therefore, we wondered whether or not the mechanical stress on adjacent vertebrae is high in cases with high AVA scores. The purpose of the present study was therefore to mechanically verify the AVA scores using the CT-FEM with the accurate material constants of BKP cement.

2. METHODS

Representative cases of after vertebral augmentation (AVA) score 1 (case 1), 3 (case 2), and 5 (case 3) among patients with vertebral body fracture who underwent balloon kyphoplasty (BKP) at our institution from October 2012 to November 2021 were selected for this analysis. As the analysis software program, MECHANICAL FINDER version 11.0 Extended Edition (Center for Computational Mechanics, Tokyo, Japan) in Lenovo ThinkStation Windows 11 pro was used. To accurately investigate adjacent vertebral body fractures, an FEM model consisting of two upper and lower vertebral bodies and an intervertebral disc centered on the injured vertebral body in each case was created (Fig. 1).

The material constants were defined according to the reports by Keyak et al., and the Young's moduli of the intervertebral disc and facet joints were set to 8.4 and 11 MPa, respectively. The Young's modulus of the vertebral bodies was calculated by converting the CT Hounsfield Unit values into bone density values using Keyak's conversion formula. The Young's modulus of the BKP cement was directly measured using a conventional testing machine (EZ-Test EZ-S; Shimadzu Corporation, Kyoto, Japan).

As the boundary conditions in this analysis, a fall on a firm floor was assumed; a total vertical compressive force of 4000 N (100 N/step × 40 steps) was applied to the upper surface of the model (85% vertebral body and 15% vertebral arch). Complete fixation was applied to the lower surface of the vertebral body. It was assumed that bone behaves as a linear elastic material under tensile stress conditions but as an elastic–plastic material under compressive stress conditions. The bone fracture occurred when the maximum principal stress reached the critical value under the tensile stress condition. In contrast, the compressive fracture of bone occurred when the minimum principal stress reached the critical value under the tensile stress condition was determined using the Drager-Prager yield stress. The amount of displacement for each load was compared between the upper and lower vertebral bodies of each model. A fracture is defined as the point where the slope of the load–displacement curves begins to steepen

3. RESULTS

Regarding the upper vertebral body, fracture was detected by vertical compressive forces of 3300 N, 3000 N, and 1200 N in cases 1, 2, and 3, respectively (Fig. 2a). Regarding the lower vertebral body, fracture was detected by vertical compressive forces of 3300 N, 3100 N, and 1200 N in cases 1, 2, and 3, respectively (Fig. 2b). In case 1, a 3300 N load resulted in a 13.8 mm displacement in the superior vertebral body (Supplementary material 1) and a 2.4 mm displacement in the inferior vertebral body

(Supplementary material 2). In case 2, a 3100 N load resulted in a 10.8 mm displacement in the superior vertebral body (Supplementary material 1) and a 2.5 mm displacement in the inferior vertebral body (Supplementary material 2). In case 3, a 1200 N load resulted in a 10.6 mm displacement in the superior vertebral body (Supplementary material 1) and a 3.3 mm displacement in the inferior vertebral body (Supplementary material 2).



Fig.1 Spine models with boundary condition



Fig.2 Displacement-Force corves with fracture points

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

[緒言] 脱細胞化生体組織及び脱細胞化臓器(脱細胞化組織)は、ヒトまたは異種動物の生体組織、臓器から 細胞成分を除去し、得られるマトリックスである[1].主に移植用及び再生医療用の足場材料等として注目 されている.脱細胞化組織を使用する利点としては通常の臓器移植で生じる拒絶反応を抑えることができ ることや、ドナー不足の解消が見込めるということが挙げられる.また、最近では野菜の骨格を足場とし た細胞実験も行われている.先行研究では足場に対する細胞親和性に関する基礎的検討はなされているが、 脱細胞化された植物を使用した足場材で機能最適化等は行われていないのが現状である[2].

そこで本研究では食品ロスの解消を視野に入れた上で日本の一般家庭で多く使われている野菜を選び, 脱細胞化処理を行うことで野菜の骨格のみを使用し,その試料で細胞培養実験を行い,選定した植物の足 場材としての可能性についての検討を細胞実験,力学特性,構造によって比較,検討を行った.

[方法] ゴボウ,ダイコン,アスパラガスを試料とした.ポンチでゴボウ,ダイコンをそれぞれ直径 10mm にカットした.カットした試料を 0.5wt%のドデシル硫酸ナトリウムに 18 時間浸漬させた.18 時間経過後, 試料を取り出し,PBS とペニシリン 1%を混合させた溶液に 37℃で 6 時間浸漬させた[2]. 得られた試料に 対して,力学試験,構造観察,細胞培養実験(細胞数・ALP 活性)を実施した.

[結果と考察] 力学試験結果より、ゴボウが最も高い弾性率を示し、次いでアスパラガス、ダイコンの順 となった.構造観察結果より3種類すべての試料において多孔質構造が確認された.また、この結果より 平均気孔径を算出し、湿式時と乾式時の試料の収縮率から、湿式時の各試料の気孔径を計算すると、それ ぞれゴボウが約310µm、ダイコンが約80.7µm、アスパラガスが約117µmとなった.細胞培養実験より、 培養7日における細胞数、ALP活性量についての結果であるが、細胞数に関してはダイコンが有意に高い 値を示し、ALP活性量に関してはアスパラガスが高い値を示した.

[結言] 本研究で使用した3種類の植物組織は,組織再生用足場材として使用可能であることが明らかとなった.弾性率の違いや細胞増殖・分化能の違いが確認されたため,それらの特徴を踏まえた上で,様々な組織へ適用できる可能性が示唆された.

[参考文献](1) 岸田晶夫. 脱細胞化生体組織の現状と将来展望. Organ Biology, 27-34, 2018. (2) Jennifer Lee, Hyerin Jung, Narea Park ,Sung-Hwan Park & Ji Hyeon Ju, "Induced Osteogenesis in Plants Decellularized Scaffolds", SCIENTIFIC REPORTS ,1-10,2019.

[論文発表] 三枝明日葉, 荒平高章, (2023), 植物組織による 3 次元足場材の有用性の検討, 臨床バイオメ カニクス, 44, pp. 269-273. ムーンプールを有する浮体式洋上風力発電用ポンツーンの波浪中応答に関する研究 課題番号:2023CR-ME-12 区分:一般 所内世話人:劉 盈溢 日本大学理工学部 譚 雷

Purpose and Methodology

The main purpose is to understand the viscous and nonlinear effects on the hydrodynamic responses of a barge-type floating foundation with multiple moonpools. We used a modified potential flow model and quantified the viscous damping by the experimental data of 1:100 scaled model tests of a floating wind turbine with four moonpools. Furthermore, we carried out a numerical study on the second order wave effects on drift forces and motion responses.

Results and discussions

Fig. 1 shows the computational panels of the barge platform where damping lids were used for simulating the viscous effects of the resonances in moonpools. Fig. 2 presents the calculated water free-surface shape in a moonpool. Fig. 3 presents the measured and calculated mean drift forces on the platform. Fig. 4 demonstrates the second order effect due to difference-frequency QTF on the surge responses of the platform with moonpools.



Publications

[1] L. Tan, Y. Liu, T. Ikoma, "Effect of Second-order Wace Drift Loads on a Barge-type Floating Wind Turbine Platform with Multiple Moonpools", 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 37 号, 2023A-GS5-3, 出島メッセ長崎, 2023 年 11 月 27 日-28 日.

[2] T. Ikoma, L. Tan, Y. Aida, H. Eto, N. Sekiya, K. Takahashi, K. Nao," Design and fundamental study of floating three-blade verticalaxis wind turbines supported by a barge platform with multiple moonpools", 2024, 日本大学理工学部理工学研究所研究ジャー. (Decision in progress)

[3] L. Tan, Y. Liu, T. Ikoma, "Effect of Second-order Hydrodynamic Loads on a Barge-type Floating Wind Turbine Platform with Moonpools", Proceedings of the ASME 2024 43nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Singapore, June 9-14, 2024. (Submitted)

離島間輸送を実現に向けた空陸両用車の実現性の検討

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

日本国内の離島に住む人々にとって、空路は重要な交通手段となっている.しかし、人口減少に伴う利 用者の減少が進むことで地方空港の利用率が低下し赤字路線となり、路線の縮小や廃止が進みつつある. そのため、新たな代替できる移動が必要な状態となっている.

本研究の目的は,離島間の新たな移動手段の実現を目指し,既存の地方空港を用いた空陸両用車による 離島間移動の実現性を検討することである.その第一歩として,簡易的な流体計算による空気力の評価 方法に対する妥当性の評価,及び風洞実験に向けた検討を行った.

2. 検討対象と評価方法

なパネル法による流体計算,及び風洞実験によって評価を行う.

3. 実施状況と今後

図1にモデリングした空陸両用車の流れ場,及び過去の実験結果とパネ ル法による流体計算の結果を示す.その結果,高迎角時の失速特性などの 予測は難しいが,低迎角時の巡航特性などの予測は可能であることを示し た.その結果,過去の結果と比較することでモデリング,及び流体計算の 結果に関する妥当性を確認した.現在は,ナビエ・ストーク方程式を用い た高忠度な計算方法によって失速特性の予測を目指す.一方,風洞実験に 関しては,図2で示す支持部の検討を行っている.特に,指示部に生じる 荷重変位を調べ,実験に支障がないことを示した.

今後は、着陸時を想定し、風洞実験による横風を受けた際の空気力、及

び流れ場の計測を行う.そして,流体計算との 比較を行い,双方から結果の検討を行い,妥当 性を示す.さらに,この空陸両用車の形状変更 などを行うとともに,航続距離を計算すること で,本研究の目的である離島間移動の実現性の 検討を行う.



5. 研究成果報告

図2 風洞実験をする際の支持部についての検討

0 37500

0.250

-0.87500

1 50000

(a) 空陸両用車の形状と流れ場

(b) 空陸両用車の空力特性 図1 事前検討した空陸両用車

<u>S. Morizawa</u>, R. Sakai, R. Kikuchi, and S. Obayashi, "Initial Study for the Construction of Phenomenology based Control Law for a Roadable Aircraft during Landing phase around Okinawa's Islands," Twentieth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2023), CFR-54, Sendai, Japan,November 6-8, 2023.

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 内田孝紀(所内世話人)



水平接触面を利用した一方向凝固による

熱電変換材料の配向制御と高性能化

名古屋大学 大学院工学研究科 松川祐子 (申請時所属:九州大学 大学院工学研究院)

1. 目的: 酸化バナジウムの中で安定相である、β-V2O5 は、結晶構造に異方性を持ち、方位によって比 抵抗が異なる。これをモデル物質として、本研究では、水平接触面存在下での一方向凝固により配向し た結晶を作製することで、比抵抗を低減させ熱電性能を向上させる手法を開発することを目指した。

2. 実験方法: β-V₂O₅ 粉末 5.0gを角型るつぼに測り入れ、温度勾配が存在する管状炉内で加熱・徐冷す ることで融解・凝固を経て試料を作製した。得られた結晶を研磨し、5 mm×5 mm×1 mm に切り出した ものを測定試料とした。評価として XRD、比抵抗測定、ゼーベック係数測定を行った。XRD では凝固 開始地点から見て、手前と奥の二箇所に対して、試料の表面およびるつぼに接していた裏面と、凝固方 向に対し垂直な切断面について測定を行った。比抵抗測定、ゼーベック係数測定に関しては、結晶の成 長方向に対して平行な方向 (parallel, para と呼称) と、垂直な方向 (perpendicular, perp と呼称) それぞれ について測定を行った。

3. 実験結果: 作製した試料の外観 (Fig. 1 (a)) からは、温度勾配と平行に成長した粒が見られた。切断面の XRD 結果により、結晶が[010]方向に優先的に成長したことが確認できた。また、裏面では測定箇所に関わらず(100) 面が現れていた。比抵抗測定では Fig. 1 (b)に示すように、para において perp より一桁程度低い値を示した。ゼーベック係数はいずれの方向においても-600 μ V/K 程度の高い値を示した。 測定した比抵抗とゼーベック係数を用いて、パワーファクターの関係式、*PF*=*S*²/ ρ より、*PF* を算出した所、para では 0.021 × 10⁻⁴ V² / K² Ω を示した。

4. 考察: るつぼとの接触面において特定の面が現れたことから、るつぼが結晶の成長方位に影響を及 ぼしたことが示唆された。また para が perp よりも低い比抵抗を示したのは、para では電気伝導に有利 な[010]方向が優位に成長したことと、電気伝導を妨げる向きの粒界が少ないことによる考えられる。

5. 研究成果報告:

前村 大樹, 松川 祐子, 高木 健太 郎, 有田 誠, 宗藤 伸治, "一方向 凝固による V2O5 熱電材料の配向 制御と電気抵抗率の低減", *令和* 5 年度合同学術講演会 日本金属 学会・日本鉄鋼協会・軽金属学会 九州支部共催, 2023, B05.

松川 祐子, "結晶育成とエネルギ ー・生体関連分野への活用", *超セラ* ミックス 超セラ若手の会, 2024.



Fig.1 管状炉で作製し切断・研磨を行った試料の(a)外観 (表面) と(b)para, perp の比抵抗の温度依存性.

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 若林 叡広 同志社大学 理工学部 池尻 翔太 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 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=130-250で、迎角 $\alpha=90$ deg.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から、あるスパン方向座標を見る と、Re=130では、渦の正負が規則的に入れ替わる箇所、Re=140-180では入れ替わる箇所と 入れ替わらない時間が長い箇所の両方, $Re \ge 190$ では,入れ替わらない時間が長い箇所を確認で きる. Re = 130 と $Re \ge 190$ の特徴は Williamson, 1996¹⁾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 = 130 - 190 にかけて, Mode A に似た構造から, Mode B に似た構造へ変化したものであると考える.



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*=130-190 にかけて, 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, *Re*=140-180 での流れの三 次元構造を,水槽実験と数値計算の両面から詳細に調べる予定である.

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.
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。具体的には,劣化モジ ュールの熱抵抗増加を観測する。

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_{CE}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劣化モジュール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劣化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。劣化パワーモジュールはパワーテスター(Siemens POWERTESTER MicRed PwT 1500A)を用いて

作製した。チョッパ回路は測定対象の素子 Q_2 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_3 をスイッチングさせ、100 回に 1 回 Q_2 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_{CE(sat)}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144℃上昇している。図4において,50 A の時は79℃上昇している。30 kHz 時,図 5 において,70 A の時は194℃上昇している。図6において,50 A の時は123℃上昇している。以 上の結果は2022 年度に報告した非劣化モジュールに比べ温度上昇幅が増大しており,劣化により 熱抵抗が増加したことが観測される,

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_{CE} 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劣化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 2: チョッパ回路を用いた測定環境



図 4:20 kHz 50 A 時の温度変化



1欧6:30 kHz 50 A 時の温度変化

X線CTで取得した砂粒子特性に基づく相互作用モデルを用いた

解像型 DEM-CFD シミュレーション

東京工業大学 工学院機械系 松下 真太郎

【目的】

CO2 が水より重くなりハイドレートも生成しない条件下で砂層へ貯留する「逆浮力法」実現のためには 海底面の隆起や注入井周りの砂の流失を招かない圧入計画を策定するために流動と砂の力学的な相互作 用を含めたモデルを構築する必要がある.本研究では,X線CT装置を用いて実験による粒子の特徴量を 抽出しシミュレーションに導入することで,実粒子の特徴を反映した個別要素法(DEM)と大規模計算に 適した流体計算手法の連成シミュレーションを実施し,逆浮力法によるCCS 圧入計画立案にあたっての 知見を得ることを目的とする.

【実験・解析手法】

実験: ヘレショウセルによる2次元砂流動実験,X線CT装置を用いて2種類の粒子径を持つ多数粒子中 を流れるシリコンオイルと水によって逆浮力法を模擬した混相流の可視化実験を実施する.

解析:弱圧縮性混相流計算手法と個別要素法を連成したコードを開発し、ベンチマーク問題で精度を検証した後に3次元実験を模擬した計算を行う.

【結果】

ヘレショウセルによる 2 次元実験によって粘性力・表面張力の支配度合いによって 3 つの界面パターン に区分できることが明らかになった.摩擦フィンガリングは,界面張力により界面に粒子が蓄積し,粒子 の摩擦力によってフィンガーが生じる.高い粒子体積分率では,フラクチャリングと浸透が起こった.こ れは粘性力,摩擦力,界面張力の競合によってパターンが分かれる.摩擦支配時には,粒子は運動をしな いため流体は粒子間を浸透する.一方,粘性力と界面張力が支配的な場合,粒子を押しのけるように運動 させ,フラクチャリングを発生させる.X線 CT 装置による逆浮力法を模擬した 3 次元実験では,注入流 体が WP(Weting Phase)か, NWP(Non-Wetting Phase)によって粒子の運動箇所が異なることが明らかになっ た.WP の注入では,粒子が注入口近傍で堆積しやすい一方で,NWP の注入では注入流体と被置換流体 の界面で粒子の運動が起こる様子を可視化することができた.DEM と弱圧縮性解法を組み合わせたコー ドの開発に成功し,単一球の沈降計算を解くことで連成計算が十分な精度で行えることを確認した.逆 浮力法を模擬した実験条件でシミュレーションを実施し,実験を定性的に再現する結果を得た.

【考察】

2 次元での粒子運動パターンでは、粒子とガラス間の摩擦によって運動パターンが変化し、粘性・界面張 力によって粒子間の流動バランスが変化することによって、特徴的な界面パターンを区分することがで きたと考えられる. X線 CT装置による非混和性二相流れでの粒子を含む多孔質内流動実験において注入 流体が WP か NWP かによる粒子挙動の差は、DEM と連成させたシミュレーションによって定性的に再 現することに成功し、解析の結果、界面張力によって粒子が WP 側に集約されることによって局所的空 隙率が高まり、流動が阻害されたことで生じたものと考えられる.

【成果報告】

・中村悠希(2024),地下砂層流動計算に向けた解像型 CFD-DEM シミュレーション手法の開発,東京工業 大学工学院機械系修士論文.

・堀川茂雄(2024),多孔質体内流動における粒子・流体・界面の相互作用,東京工業大学工学院機械系修 士論文.

力学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

INTRODUCTION

Osteoporosis is a skeletal disorder characterized by compromised bone strength (BS) predisposing to an increased risk of fracture. Finite element analysis (FEA) based on quantitative computed tomography (QCT) scans, or called CT-FEA, is a technologically advanced method currently available for the noninvasive clinical assessment of BS. However, the main restriction on the clinical practice of CT-FEA is its time-consuming modeling process and computation. Hence, the objective of this study was to explore novel-defined parameters across aspects of BMD features, geometrical features and osteoporotic features, that obtain a robust predictive power on FEA-evaluated vertebral BS, to improve the efficiency of osteoporotic vertebral fracture risk assessment method.

METHODS

This study collected quantitative computed tomography (QCT) images of 72 patients (26 males, 46 females) aged 42- 96 years. A CT-image based FEA (CT-FEA) software, Mechanical Finder Clinic (MFC) software (Research Center of Computational Mechanics, Inc., Japan, RCCM) was used to construct three-dimensional finite element models, and then to evaluate bone strength (BS) for vertebral bodies of 155 vertebrae. In this study, applied load at the final stage was defined as the vertebral BS value. Then, Mechanical Finder 10 (MF10, RCCM) was used to study the BS-related BMD, geometrical, osteoporotic and geometrical-osteoporotic features of vertebral bodies to elucidate the BS prediction determinants. Except for geometrical features, linear regression and Pearson's correlation analysis were conducted for BMD, osteoporotic, and geometrical-osteoporotic features. The workflow of CT-FEA is schematically shown in Fig.1.

RESULTS AND DISCUSSION

Correlations of BS values were analyzed with 6 parameters such as L2 aBMD, YAM lumbar, avg Tr.vBMD, |LnVR_{low-vBMD}|, CSA_{min} • |LnVR_{low-vBMD}| and K_{vertebrae}, respectively, and the results are shown in Fig.2. The low-vBMD range of |LnVR_{low-vBMD}| was specified to 0-0.5 g/cm³, which is the best osteoporotic defects indicator of low-vBMD ranges. For overall 155 vertebrae, the top three best correlating indicators were CSA_{min} • |LnVR_{low-vBMD}| (r = 0.885, p < 0.0001), K_{vertebrae} (r = 0.850, p < 0.0001) and |LnVR_{low-vBMD}| (r = 0.830, p < 0.0001).

The CSA_{min} • $|LnVR_{low-vBMD}|$ has a potential to be an effective predictor of CT-FEA evaluated vertebral BS. The mechanical relationship between BS and CSA_{min} • $|LnVR_{low-vBMD}|$ and its effectiveness of being a FE-evaluated BS predictor has been confirmed to improve the osteoporotic vertebral fracture risk assessment from three aspects. In view of mechanism of osteoporotic fracture, mechanical behaviors of Drucker-Prager equivalent stress and SED suggested the stress concentration that occurs on relatively high-vBMD elements surrounded by large volume of low-vBMD elements leads to low apparent BS primarily. Then, the engineering beam theory revealed that CSA_{min}· $|LnVR_{low-vBMD}|$ is proportional to apparent compressive yielding stress of vertebrae, σ_Y . Last, the variable of $|LnVR_{low-vBMD}|$ quantifies the trabecular structure change from the BMD and osteoporotic defects variations together. It accounts for a good predictive power and relatively small error for predicting FE-evaluated BS.

CONCLUSION

A novel-defined structural-osteoporotic feature, $CSA_{min} \cdot |LnVR_{low-vBMD}|$, obtains a robust predictive power on FE-evaluated vertebral BS and has the potential to improve the effectiveness of osteoporotic



vertebral fracture risk assessment by saving the FE evaluation time.

Figure 2 Correlation between BS (kN) and (a) L2 aBMD (g/cm²), (b) YAM lumbar, (c) avg Tr.vBMD (g/cm³), (d) |LnVR_{low-vBMD}|, (e) CSA_{min}·|LnVR_{low-vBMD}|, and (f) K_{vertebrae}.

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

目的

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。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。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。

解析方法

図1に示す3次元構造モデルを作成し熱伝導-構造連成解析を実施した。接合部損傷モデルの一例を図2 に示す。半導体チップにおけるジュール発熱を仮定し、実際のパワーデバイスの状態パラメータである半導体 チップの平均温度をいずれのボイド状態も同じとなるよう発熱量を設定した。図2は左から順に接合部の損傷が ない状態、中央部にボイドが発生した状態、端部にボイドが発生した状態を再現した。

解析結果および考察

動作時の温度分布の一例を図 2 でコンターとして示す。完全に接合した状態では半導体チップ上の温度は ほぼ一様であるが、ボイドが存在する場合、熱伝導パスが失われたためにボイド直上で非常に高温となることが わかる。一方で、そのような温度分布状態であっても図3に示すように、損傷が進行すると考えられるチップ端部 ではそれほど温度差は見られず、逆に損傷がない状態が最も温度上昇量が大きいことがわかる。図4にはその 際のクリープひずみの履歴を示しているが、損傷の駆動力として考えられるひずみ振幅の大きさは、中央にボイ ドがある場合が最も小さく、これは他に比べて損傷の進行速度が緩やかになることを示している。





Fig.2 1/4 model of DUT with different void shapes



Fig.3 Temperature profiles during heating process.



Fig.4 Strain histories during power cycles.

歯科矯正用アンカースクリュー埋入時の上下顎歯槽骨ならびに口蓋骨への荷重量 と応力分布の三次元有限要素解

九州大学大学院歯学研究院歯学部門口腔保健推進学 髙橋一郎

【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。

【研究成果】

我々は、これまで患者別3次元有限要素解析を行い、歯科矯正用アンカースクリュー(以下スクリュー)の脱落は主ひずみの増加に関連することを示してきた。下顎骨におけるスクリューの脱落予測因子として最適な機械的パラメータは、スクリュー表面から0.5~1.0 mmの範囲内の最小主ひずみであった(R2=0.8033)。下顎骨では最小主ひずみがそれぞれ-474 μ strain、-663 μ strain、-852 μ strain の時、スクリューの成功率はそれぞれ95%、50%、5%という予測結果であった。次に、ブタの下顎骨を用い実際に脱落が起こるまで荷重を増加させる実験とブタ骨のCTデータより作成した有限要素モデルで同じく荷重を増加させるシミュレーションを行った。脱落が起きた時の主ひずみは10万 μ strain以上となり非常に大きな値となった。現在ヒトの骨モデルにおいて荷重を増加させる実験を行なっている。これまで15人(脱落群5人成功群10人)の解析を終え、脱落群のうち4人が2Nの荷重で脱落率が95%となる主ひずみ-852 μ strainを超えていた。そのうち2名は1Nの時点で-852 μ strainを超える歪みが発生していた。残る1名は3Nの荷重で-816 μ strainと

なった。一方、成功群では-474 µ strain を超える歪みが発生したのは荷重量がそれぞれ 8N, 6N, 6N, 5N, 5N, 4N, 4N, 3N, 3N, 2N の時であり、-663 µ strain を超える歪みが発生したのは 荷重量がそれぞれ 11N, 9N, 8N, 7N, 7N, 6N, 5N, 4N, 4N, 3N の時であった。

近年、スクリューはより大きな力がかかる顎整形力に応用されているが、スクリューの患 者毎の耐荷重量は未だ不明であるというのが現状である。今回の研究結果からスクリュー は 2N 以上の大きな荷重でも耐えられる可能性があり、顎整形力へのスクリューの安全な応 用可能性が示唆された。

非対称浮体による回転振子式波浪発電装置に関する研究

長崎大学海洋未来イノベーション機構 経塚雄策

目的

日本政府は、2050年にカーボンニュートラルを実現することを宣言し、将来のエネルギー政策の改訂を 行った。それによれば、再生可能エネルギーの比率は従来の25%程度から約60%へと大幅な拡大が求め られている。海洋エネルギーについては、洋上風力発電が最も大きな割合を占めるが、次にエネルギー ポテンシャルが高いのは波浪発電である。そこで、本研究では波浪中の浮体の動揺を回転振子の回転に 変換して発電する新型式の波浪発電装置を提案し、発電効率を最大化するための条件を理論的、実験的 に求めることを目的としている。本研究においては、模型実験によって実際に発電可能なことを示すこ とを目的として、応用力学研究所の深海機器実験水槽(長さ65m、幅5m)において実験を行った。

• 実験方法

図1のように、箱船の片側に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、縦揺と横揺の動揺がほぼ同一でかつ両者の位相差が±90°付近であること が良好と思われるので、それを満たすように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 非対称浮体(箱船+浮力体)



図2 非対称模型と回転振子式発電装置

図2は、長崎大学が所有する所有する箱船(LxBxD = 1.2mx0.8mx0.4m)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1:10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5年11月6日~10日に 深海機器実験水槽で行われた。図3は 波周期1.32秒、波高約8cmの規則波 中の実験のRoll, Pitch, Swayの時刻歴 で、約50秒のところでモータリング により強制回転を与えた。モータリン グ前には発電機は微小振動するだけで あるが、モータリング後は一定方向に 回転する。この変化は右図のように横



図3 実験時刻歴および Roll-Pitch 平面軌跡

軸に Roll、縦軸に Pitch をとってその軌跡を比較すると両者の位相差の変化が明瞭となる。今回の 実験では、周期が約 1.3 秒から 1.37 秒の時に、振子の回転が持続した。

考察

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、規則波中で回転振子式発電機が回転する 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。非対称浮体とモータリングによって初期回転を与えることによって 回転振子が持続的に回転することを実験的に確認できた。今後の課題としては、自律的な初期回転 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	特定教授	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
三明 迅	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

核融合と水素エネルギー利用社会のあるべき姿

核融合科学研究所研究部/京都フュージョニアリング(2024年1月~) 芦川直子 核融合科学研究所研究部 平野直樹*1

1. 目的

カーボンニュートラルと持続可能な社会実現、および内閣府からの強い後押しによりに、核融合発電 の早期実現に向けた注目度が向上している。他方、核分裂炉の代替え法として核融合エネルギーは発電 としてのみ使用するといった考えが長く続いている。電気代金の増加、持続的な資源輸入への懸念、な ど日本が有する社会情勢を背景に、未実装の新たな発電手法への開発競争が続いている。これは、再生 可能エネルギーのみならず、革新的核分裂炉など多岐にわたる。これら発電手法に対し、核融合エネル ギー利用の技術成熟度レベルは相対的に低い状況にある。この状況で核融合エネルギーを社会実装する には、社会から求められるエネルギー形態を有するプラント像を把握し、核融合プラント設計を改善し ていく必要がある。核融合反応から得られる熱は発電のみならず水素製造にも利用可能で、その水素は カテゴリー上ではグリーン水素で、カーボンニュートラル社会への貢献が得られる。

重水素-トリチウムを燃料とする核融合プラントでは、運用開始後はプラント内でトリチウム自己増 殖を目指す。重水素は海水に含まれ抽出に関する基礎技術は開発されているとともにソースは無尽蔵で ある。つまり海に囲まれている日本としても、これら資源を自国でまかなうことが出来る。そこで、本 研究会では、核融合反応から発電と水素製造が可能な Fusion Power Complex[1-2]の社会実装に必要な 要素とは何かを、エネルギーや水素製造の専門家らと共に議論し、課題精査する場として研究会を開催 した。

[1]H. Chikaraishi, N. Ashikawa, N. Hirano, et al, "Conceptual Design of Fusion Power Complex with Hydrogen

Storage Function in Superconducting Magnet System", Plasma Fusion and Research, 18 (2023) 1205001. [2]N. Ashikawa, "Safety Science and Engineering for Fusion Power Complex", ITC31 (2022) Invited talk.

2. 開催日時、場所、参加人数

日程: 2023 年 10 月 3 日 (火) 13:10~10 月 4 日 (水) 12:00 場所:九州大学筑紫キャンパス応用力学研究所 2 階大会議室 および オンライン 参加人数: 2 9 名 *企業 4 社からの発表を含む。うち 3 社はオンサイト会場で発表があった。10 月 3 日夜には懇親会を開

催し、カーボンニュートラル社会に向けた情勢等について情報交換を行った。

*1 申請時の代表者(芦川)転職に伴い、2024年1月に代表者を平野へ変更

3. 参加者リスト

001	芦川 直子	核融合科学研究所・研究部・超伝導・低温工学ユニット	准教授
002	花田 和明	九州大学 応用力学研究所	教授
003	市川 貴之	広島大学 大学院先進理工系科学研究科	教授
004	輿野 文人	京都大学 エネルギー理工学研究所	研究員
005	竹永 秀信	量子科学技術研究開発機構 六ケ所研究所	所長
006	立川 達也	九州大学•工学研究院 機械工学部門	准教授
007	寺尾 悠	東京大学 大学院新領域創成科学研究科	助教
008	平野 直樹	核融合科学研究所 研究部・超伝導・低温工学ユニット	教授
009	中田 博之	関西電力 水素事業戦略室 技術開発グループ	チーフ MGR
010	井野 孝	京都フュージョニアリング Technical Development Dept. Plant Technology	Div.MGR
011	碓井 志典	三菱重工業 原子力セグメント先進炉部	部長
012	片山 一成	九州大学 総合理工学府	准教授
013	樋口 誠一	関西電力	
014	吉田 茂	核融合科学研究所 核融合科学学際連携センター	特命専門員
015	長谷川 真	九州大学 応用力学研究所	准教授
016	井戸 毅	九州大学 応用力学研究所	教授
017	村岡 克紀	九州大学	名誉教授
018	長谷川 卓	川崎重工業 水素戦略本部 プロジェクト開発部	課長
019	浅井 英明	三菱重工業	
020	都築 和泰	エネルギー総合工学研究所	
021	鈴木 康浩	広島大学 大学院先進理工系科学研究科	教授
022	藤原 英弘	三菱重工業	
023	清水 克祐	三菱重工業	
024	馬場 貴志	三菱重工業	
025	土屋 隼人	川崎重工	
026	岡村 俊哉	川崎重工	
027	中村 一男	九州大学名誉教授	
028	武田秀太郎	九州大学	准教授
029	岳 其霖	九州大学	大学院生

4. 研究会プログラム

10月3日(火)

- 13:10 趣旨説明(芦川、花田)
- 13:15 芦川直子(核融合研)

「Fusion Power Complex の提案~核融合熱からの電力/水素製造プラント~」 13:50 竹永秀信(量研機構六ヶ所)、 「原型炉を中核としたフュージョンインダストリーの創出と未来社会」

14:25 平野直樹(核融合研)

「超伝導応用研究における液体水素冷熱利用への期待」

- 休憩(10分)
- 15:10 中田博之(関西電力)

「関西電力の水素社会実現に向けた取組み」

15:45 碓井志典/浅井英明(三菱重工業)

「高温ガス炉の取り組み/水素ステーション向け水素昇圧ポンプの紹介」

(水素昇圧ポンプ、水素製造関係)、 *一部リモート

16:20 市川貴之(広大)

「700℃域での熱化学水素製造プロセスの可能性」

16:55 立川達也(九大)

「九大伊都キャンパス水素ステーションにおける水素社会実装に向けた取組み」

17:30 興野文人 (京大)

「グリーン水素製造への核融合の適用」

18:05 終了

懇親会

10 月4日

9:00 寺尾悠 (東大)

「液体水素ポンプに用いるモータ及びその関連技術」

9:35 長谷川卓(川崎重工業)

「国際水素サプライチェーンと液化水素技術」*リモート

10:10 井野孝(京都フュージョニアリング)

「マイクロ波加熱装置を用いたバイオマス熱分解技術に関わる検討」

休憩 (5 分)

10:50 村岡克紀(九大(名誉教授))「Necessity of a nationally coherent energy strategy for meeting the Paris Agreement - a case study for Japan」

11:05 総合討論

コメント (吉田茂 (核融合研))

会合のまとめと、今後の展開

12:00 終 了

5. 発表概要

芦川直子(核融合研)

「Fusion Power Complex の提案~核融合熱からの電力/水素製造プラント~」

社会が核融合エネルギーを利用する時、他のエネルギー源と比較し顕著な利点とは何か、今からそれを 社会に提示し電力グリット接続を想定したプラント概念が必要になる。水素冷却による超伝導コイルを 有するプラントを想定すると、核融合による熱から電気と水素が製造可能で、かつ液化水素としての長 期備蓄が可能となる。このようなプラントを Fusion Power Complex と定義する。講演ではそのプラントの特徴について述べる。

竹永秀信(量研機構六ヶ所)

「原型炉を中核としたフュージョンインダストリーの創出と未来社会」

量子科学技術研究開発機構では、ITER 計画/BA 活動を中心としたフュージョンエネルギーの実用化に 向けた研究開発とともに、フュージョンテクノロジーを活用したイノベーションの創出を推進している。 将来的には、核融合原型炉を中核に、水素製造・利用や資源確保・循環、中性子利用等のフュージョン インダストリーを興し、未来社会の発展に貢献していく。講演では、研究開発及びイノベーション創出 の現状と未来社会像について報告する。

平野直樹(核融合研)

「超伝導応用研究における液体水素冷熱利用への期待」

エネルギー持続可能社会実現に向け、核融合技術への関心が高まっている。中でも高温超伝導を利用し たコンパクトな核融合炉の研究開発が、欧米のスタートアップ企業を中心に加速している。高温超伝導 を用いた応用では、従来のヘリウム資源を用いた冷却に代わり、液体水素の冷熱を利用することが考え られる。講演では、最近の高温超伝導応用研究の動向と、その冷却としての液体水素への期待について 紹介する。

中田博之(関西電力)

「関西電力の水素社会実現に向けた取組み」

関西電力は、2021 年 2 月に「ゼロカーボンビジョン 2050」を策定し、水素社会への挑戦を取組みの柱 に掲げた。また、2022 年 3 月には「ゼロカーボンロードマップ」を公表し、「ゼロカーボンビジョン 2050」 を実現するための道筋を定めた。本講演では、これに関連した、水素の製造・輸送・供給・発電用燃料 としての利用の実現に向けた取組みについて紹介する。

碓井志典/浅井英明(三菱重工業)

「高温ガス炉の取り組み/水素ステーション向け水素昇圧ポンプの紹介」

三菱重工の取り組み2件を紹介する。1件目は、高温ガス炉開発。三菱重工は、高温ガス炉実証炉開発 の中核企業に選定され 2030 年代の実証炉建設に向け開発、設計を推進している。高温ガス炉は、水素 製造設備に接続しており水素製造の仕組みについて紹介する。

2 件目は、水素ステーション向けの超高圧型液体水素昇圧ポンプに関して紹介する。従来のポンプに比 べより多くの水素燃料を充填することができるポンプを開発。その特徴を説明する。

市川貴之(広大)

「700°C域での熱化学水素製造プロセスの可能性」

我々のグループでは、様々な排熱や太陽光の集光熱を蓄熱し、これを有効に利用することを目的として、 500℃以下の温度における熱化学水素製造プロセスの開発に注力してきた。熱のみを用いて水から水素 を製造するプロセスとしてナトリウムレドックス反応に期待が持たれるが、逆に 500℃以上の温度では 反応性が高すぎて反応を格納する容器の材質を見出すことができない。本研究ではナトリウムとのアナ ロジーからリチウムに着目し、リチウムレドックス反応による熱化学水素製造反応の可能性を見出した。 リチウムの系はナトリウムに比べて反応性は低く、より高温での反応制御が可能となると期待している。

立川達也(九大)

「九大伊都キャンパス水素ステーションにおける水素社会実装に向けた取組み」 九州大学では水素社会の実現に向けた取組みをこれまで多く進めてきており、

その中でも伊都キャンパスにある水素ステーションはその中心的な実証施設の1つとしてこれまで運 用されている。水素の製造や利用に関する研究の取り組みや、再生可能エネルギーの活用に向けてこれ まで実施してきた取組みについて講演する。

興野文人(京大)

「グリーン水素製造への核融合の適用」

CO2 を出さないグリーンで高効率な水素製造、即ち水の分解による水素製造、は 1980 年代から多数の 案が提唱されているがいまだ実用レベルで確立されていない。その原因は水分解のエンタルピーの高さ とエントロピーの低さにある。唯一実証実験がなされている SI 法に於いても 950℃の温度が必要であ り各種技術的な困難が伴う。そこで電気分解とのハイブリッドにより 500℃領域で可能な CCC 法と核 融合による熱出力を組み合わせた完全グリーンな水分解による水素製造方式について提案をする。

寺尾悠(東大)

「液体水素ポンプに用いるモータ及びその関連技術」

近年、カーボンニュートラル社会を迎えるに当たり、液体水素の活用が盛んに議論されている。この中 で、貯蔵タンクから外部へ液体水素を送り出すためのポンプ技術は一つの重要トピックであり、ロケッ ト、車、プラントと様々な分野において技術開発が盛んになってきている。本講演では、液体水素を送 り出すためのポンプ用モータ及びその周辺部品等に関して、常電導/超電導技術を用いた研究開発動向 を紹介する。

長谷川卓(川崎重工業)

「国際水素サプライチェーンと液化水素技術」

脱炭素政策で注目が集まる水素だが、再生可能エネルギー由来の水素または化石燃料改質の CO2 を地下貯留 する等の低炭素水素の生産に適した地域は、水素の需要地域とは異なる。そのため、低炭素の利用にあたっ て LNG のような国際的なサプライチェーンの構築が必要になる。川崎重工業が 2015 年度から取り組んでい る NEDO 技術実証、2030 年までの商用化実証事業、中でも液化水素の取り組みを紹介する。

井野孝(京都フュージョニアリング)

「マイクロ波加熱装置を用いたバイオマス熱分解技術に関わる検討」

昨年度、京都府補助金事業を活用して実施した、マイクロ波加熱装置によるバイオマス炭化および水素 生成実証、および、京都府や京都府向日市と連携した事業開発に関わる検討について、ご報告する。

村岡克紀(九大(名誉教授)

[Necessity of a nationally coherent energy strategy for meeting the Paris Agreement - a case study for Japan]

吉田茂(核融合研)

総合討論への話題提供として、核融合プラントで利用可能な温度領域や条件に関する議論を水素製造の 専門家と共に実施することの重要性について言及があった。

6. 本研究集会による成果

本研究集会の実施により得られた一番の成果は、「核融合と水素エネルギー利用社会のあるべき姿」 という課題に対し、新たな研究グループ構築が出来たことである。本研究集会では、これまで核融合 研究分野の共同研究者として共に議論をしてきた研究者のみならず、他分野で活躍する水素製造の専 門家らを招聘し、共に議論をする場を構築することを目指した。本共同研究採択時には、審査委員か ら研究協力者の不足が指摘されたが、その後地道に本課題に必要な専門家の調査と共に研究会への参 加依頼を行った。その結果、大学を含む公的機関と企業の双方から講演者が集い、かつ水素に関する 専門家が多数という形での研究会プログラムとなった。併せて、九州大学伊都キャンパス水素ステー ションに関する講演を含めることが出来た。近年内閣府主導による核融合エネルギー推進に関する動 きもあり、水素製造の専門家からも本研究会を通じて核融合研究の最新情報が得られたとの感想を得 た。このように、核融合エネルギーおよび水素製造といった双方の専門家にとって新たな情報が得ら れる有意義な研究会となると共に、更なる議論展開に向けた基盤構築となった。

以上

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

京都府農林水産技術センター海洋センター 木下直樹

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5年9月14日(木)、9月15日(金)

- 場所:①WEB 会議(Z00M 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、2日間にわたって開催した。1日目は、各府県 担当者の悩み相談会として、事前に府県担当者に向けて実施したアンケート結果を基に急潮 に関連する情報交換と議論を実施した。2日目は研究発表として、九州大学応用力学研究所に おける特別講義との共同開催により1題、本研究集会からは2題の発表(発表 20分質疑 10 分の1題あたり30分)を実施した。

3. 研究成果

研究集会には、企業、研究者、府県担当者ら合計 33 名が参加した(詳細は別添名簿を参照)。 1日目は、「昨年度の海況」、「使用している観測機器、管理体制、維持費等」、「取得した観測デー タの活用状況」の3つのテーマについて、京都府、神奈川県、高知県、佐賀県、福井県、兵庫県、 鳥取県、島根県から情報共有が行われた。意見交換では、各府県における急潮事業の位置づけや体 制、観測に適した機器の選定、昨年度発生した急潮の発生要因などについて議論が行われた。また、 急潮対策用海洋レーダーの展開について、各府県に対し福井県立大学渡慶次准教授から協力依頼が あった。

2 日目は、北海道大学大学院水産科学研究院磯田准教授から日本海の海洋環境に関する特別 講演、気象庁気象研究所広瀬研究官により気象庁現業海況システムで再現した 2022 年 8 月の 越前海岸急潮の事例紹介、九州大学応用力学研究所千手准教授から水産試験場の海洋観測デー タの活用に関する発表が行われ、それぞれの議題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課題の共有、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】 2023 年 9 月 14 日 (木) 14:00 ~ 17:00, 9 月 15 日 (金) 9:00 ~ 12:00

【場所】14日:九州大学筑紫キャンパス応用力学研究所3F(301号室) 15日:九州大学筑紫キャンパス応用力学研究所6F(W601号室)

【9月14日(木)14:00-17:00】

・開会挨拶および開催趣旨説明 14:00~14:05

14:05~16:30

 $16:30 \sim 17:00$

- ・お悩み相談会
 - (1) 趣旨説明
 - (2) 自己紹介
 - (3) お悩み相談会
 - · 全体質疑

【9月15日(金)9:00-12:00】

- ・研究発表および話題提供
 - (1)日本海の話 9:00~10:30
 磯田 豊(北海道大学大学院 水産科学研究院)
 (2)気象庁現業海況システムで再現した 2022 年 8 月の越前海岸急潮 10:30~11:00
 - 広瀬 成章 (気象庁気象研究所)
 - (3) 水試観測データを活用した海洋研究のすすめ 11:00~11:30

千手 智晴(九州大学 応用力学研究所)

・総合討論	$11:30 \sim 11:50$
・その他	11:50~12:00
 ・閉会 	

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 33 名参加(うち17 名現地参加)

所属	氏名	参加方式
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	木田 新一朗	現地
九州大学応用力学研究所	遠藤 貴洋	現地
九州大学工学部 エネルギー科学科	水岡 岳人	web
北海道大学大学院 水産科学研究院	磯田 豊	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	現地
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
国立研究開発法人水産研究・教育機構	井桁 庸介	web
国立研究開発法人 海洋研究開発機構	宮澤 泰正	現地
日東製網株式会社(顧問)	石戸谷博範	現地
JFE アドバンテック株式会社	松岡 正敏	web
JFE アドバンテック株式会社	倉垣 拓二	web
株式会社オーシャンアイズ	笠原 秀一	web
神奈川県水産技術センター相模湾試験場	田村 怜子	現地
神奈川県水産技術センター	石井洋	web
新潟県水産海洋研究所	佐藤修	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
石川県水産総合センター	仙北屋 圭	web
福井県水産試験場	岩崎俊祐	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
京都府農林水産技術センター海洋センター研究部	鈴木 千恵	web
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
兵庫県立農林水産技術総合センター但馬水産技術センター	鈴木 雅巳	web
鳥取県水産試験場	藤岡 秀文	現地
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
高知県水産試験場	有光 慎吾	web
福岡県水産海洋技術センター	小池 美紀	web
佐賀県玄海水産振興センター	牟田 圭司	現地
佐賀県玄海水産振興センター	豊福、太樹	現地
長崎県総合水産試験場	北原茂	web
長崎県総合水産試験場	高木信夫	現地

「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

2023年12月20日から12月21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.開催にあたっては対面形式にて実施し,全体では 45 名の参加者と 20 題の講演があった.初日には、波浪・潮流、日本海・対馬暖流、宗谷・津軽暖流等に関 わる,計12題の研究発表が行われた.前半では東シナ海の有義波高におけるうねりと風 浪の各々の寄与,三陸沖合域の極端波浪の特性と発生要因,双方向の音波送受信データの 同化による瀬戸内海狭水道の潮流場の再現実験に続いて、日本海北部海域における表層水 平循環を構成する流動の変動特性、東部日本海における対馬暖流の分布と経年変動の沿岸 水の沖合輸送との関わり、日本海南部の栄養塩供給に寄与する水塊の混合過程についての 講演があった.後半では ADCP 観測による流速・後方散乱強度を用いた,宗谷暖流域での 海底堆積物の巻き上がり、東樺太海流域での巻き上がりや動物プランクトンのモニタリン グについての講演に続き、陸奥湾のモニタリング結果を用いた津軽海峡の海洋酸性化、そ の酸性化に寄与する津軽暖流の流量の経年変動の要因、津軽海峡東方海域において津軽暖 流を伝播する潮汐変動,津軽海峡中央部における水塊構造についての講演があった.2日 目には、日本海および、日本周辺海域を対象とした数値実験、環境モニタリング等に関し て、計8題の研究発表が行われた。前半では最新の気象庁現業システムによる日本近海の 海洋再解析データセットの紹介、高精度かつ高解像度な海上風予測手法、富山トラフにお ける乱泥流や日本海における東岸境界流の数値実験についての講演があった.後半では日 本海中層水の経年変化とその起源、黄海で漁獲されるスルメイカの粒子逆追跡実験、七尾 湾と伊勢湾におけるロガーを用いた CDOM 現場観測、瀬戸内海における pCO2 の空間分 布推定モデルの構築についての講演があった.

2日間を通して、日本周辺の海域において確認された諸現象を様々な直接モニタリング 結果や間接的に推定する手法、数値実験等を用いて説明する、再現する取り組みによる研 究成果の発表が多くあった.加えて、観測データの再活用、新たなモニタリング手法の開 発・検討等、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現場観測、 力学研究、数値実験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にご参加頂 き、海洋モニタリングによる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 会となった.今後とも、日本周辺海域の海況・波浪の研究に携わる研究者・関係者が一堂 に会する集会となり、活発な議論と情報交換の場となることを期待する.最後に、本研究 集会の開催を承諾して頂いた九州大学応用力学研究所、集会を開催するにあたりお世話し て頂いた広瀬直毅教授をはじめとする諸氏に感謝する.

九州大学応用力学研究所 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: 2023年12月20日(水)~12月21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)

-----12/20 (水) ------

11:25- 趣旨説明

★座長 江淵直人(北大低温研)

11:30-11:50

東シナ海の波高変動

○久木幸治(琉球大理学部)

11:50-12:10

北太平洋沿岸域に伝播して来るうねり性波浪の特性について

○龔含遠(東大院)・小松幸生(東大大海研)

12:10-12:30

音波送受信で得られる流速計測データを用いた沿岸潮流場変動の再現

○谷口直和・陸田秀実・荒井正純・作野裕司・濱田邦裕(広島大)・高橋俊之・吉木健吾・山本裕規(復 建調査設計)

12:30-13:30 昼食

★座長 福留研一(富山高専)

13:30-13:50

日本海北部海域における表層水平循環の流動特性

○西田芳則(道総研中央水試)・伊藤 雅(航空自衛隊府中基地)・森本昭彦(愛媛大沿岸セ)・広瀬直毅

(九大応力研)

13:50-14:10

春季の東部日本海における対馬暖流の勢力と分布の変動

○和川 拓・井桁庸介 (水研機構)・坂本 圭 (気象庁)・広瀬成章 (気象研)

14:10-14:30

日本海南部の栄養塩循環における極前線・対馬暖流を介した水塊混合に関する研究

○矢部 いつか (東大大海研)・木田 新一郎 (九大応力研)・和川 拓 (水研機構)

14:30-14:45 休憩

★座長 遠藤貴洋(九大応力研)

14:45-15:05

ADCP で観測された宗谷暖流域での海底堆積物巻き上がりとその発生条件

○久賀みづき・大島慶一郎(北大低温研)・深町康(北大北極研究セ)・伊藤優人(極地研)・西岡純(北大低温 研)

15:05-15:25

ADCP による、フラジルアイス・巻き上がり・動物プランクトンのモニタリング:東樺太海流域を中心 として

○大島慶一郎(北大低温研)・大嶋護(北大院環境科学)・久賀みづき(北大低温研)・伊藤優人(極地研)・ 中田和輝(JAXA)・深町康(北大北極域研究セ)

15:25-15:45

青森県陸奥湾における海洋酸性化モニタリング

○脇田昌英 (JAMSTEC)・高坂祐樹・扇田いずみ・長野晃輔・遊佐貴志 (青森水総研)・木元克典・畳指 祥子・金子仁・佐々木建一・永野憲 (JAMSTEC)・磯田豊 (北大水産)

15:45-16:00 休憩

★座長 広瀬成章(気象研)

16:00-16:20

津軽暖流の流量と北太平洋亜熱帯域の風によって駆動される日本周辺潮位の経年変動

○永野 憲・金子 仁・脇田 昌英(JAMSTEC)

16:20-16:40

津軽海峡東方海域における津軽暖流の潮汐変動

○印貞治・久慈智幸・小藤久毅・中山智治(日本海洋科学振興財団)

16:40-17:00

津軽海峡中央部の 2000 年以降の水温・塩分変動

○渡邉修一・中山智治・久慈智幸・小藤久毅・印貞治(日本海洋科学振興財団)・小林直人・亀井佳彦・ 佐藤太一・坂岡桂一郎・飯田高大・阿部泰人(北大水産)・脇田昌英・金子仁・佐々木建一(JAMSTEC)

17:00-17:20 情報交換

-----12/21 (木) -----

★座長 広瀬直毅(九大応力研)

09:15-09:35

日本近海長期海洋再解析(FORA-JPN60)の紹介

○碓氷 典久・広瀬 成章 (気象研), 西川 史朗・五十嵐 弘道 (JAMSTEC), 坂本 圭・浅井 博明 (気象 庁)・中野 英之 (気象研), 石川 洋一 (JAMSTEC)

09:35-09:55

Downscaling costal surface wind by statistical methods comparing GSM and MSM datasets

○Tiancheng JIA(九大院)・広瀬直毅(九大応力研)

09:55-10:15

- 富山トラフにおける乱泥流の数値実験
- ○高橋陽奈·磯田豊(北大水産)
- 10:15-10:35
- 日本海の東岸境界流の現場観測と数値実験
- ○高槻丈嘉・磯田豊・大野舞子・高橋陽奈・小林直人(北大水産)
- 10:35-10:50 休憩

★座長 林美鶴(神戸大内海セ)

- 10:50-11:10
- 日本海中層水の経年変化(1997~2022年)
- ○大野舞子・高槻丈嘉・磯田豊(北大水産)
- 11:10-11:30
- 黄海で漁獲されたスルメイカの平衡石分析と追跡実験
- ○山口忠則(九大院)・Hong-Ryeol SHIN(公州大)・広瀬直毅(九大応力研)
- 11:30-11:50
- ロガーを用いた有色溶存有機物(CDOM)現場観測の日本沿岸海域への展開

○中田聡史(国環研)・杉本亮(福井県大)・伊藤幸彦(東大大海研)・小林志保(京大農)・梅澤有(東京農工 大)・小倉亜紗美(呉高専)・二瓶泰範(大阪公大)・増田憲和(日本海工)・神尾光一郎(東京久栄)・奥野充一 (石川県水産)

- 11:50-12:10
- ランダムフォレストによる pCO2 モデルの構築

○藤田眞大(神戸大院海事)・林美鶴(神戸大内海セ)・山下栄次(岡山理大)・廣川綜一(神戸大院海事)

12:10-12:30 総合討論

日本周辺海域の海沢モニタリングと波浪計測に関する研究集会

	氏 名(所属)	
1	渡慶次力(福井県立大学)	
2	石井昴 (福井県立大学)	
3	江洲直人 (北海道大学低温科学研究所)	
4	広瀬成章 (気象研究所)	
2	碓氷典久 (気象研究所)	
9	藤井智史(琉球大学)	
L	印貞治(日本海洋科学振興財団)	
8	渡邉修一(日本海洋科学振興財団)	
6	國分 祐作 (Nortekジャパン)	
10	脇田昌英(JAMSTEC)	
11	山口忠則(九大総理工)	
12	冀含遠(東京大学大学院)	
13	渡部由佳(東京都島しょ農林水産総合センター八丈)	
14	谷口直和 (広島大学大学院先進理工系科学研究科)	
15	和川 拓 (水産研究・教育機構)	
16	矢部いつか (東大大海研)	
17	戸口智貴 (Nortekジャパン)	
18	西田芳則(北海道立総合研究機構)	
19	中島広貴(九大総理工)	
20	酒井秋絵(九大総理工)	

日本周辺海域の海沢モニタリングと波浪計測に関する研究集会

	氏 名(所属)	
21	永野憲 (JAMSTEC)	
22	久木幸治(琉球大理学部)	
23	灘井章嗣 (NICT)	
24	市川香(九大応力研)	
25	中田聡史(国立環境研究所)	
26	藤田眞大(神戸大院海事)	
27	遠藤貴洋 (九大応力研)	
28	JIA TIANCHENG(九大総理工)	
29	中山智治(日本海洋科学振興財団)	
30	坪野考樹 (電力中央研究所)	
31	山下学 (九大総理工)	
32	木田新一郎 (九大応力研)	
33	林美鶴(神戸大)	
34	久賀みづき (北海道大学低温科学研究所)	
35	大島慶一郎 (北海道大学低温科学研究所)	
36	広瀬直毅(九大応力研)	
37	高山勝巳(いであ)	
38	千手智晴(九大応力研)	
39	磯辺篤彦(九大応力研)	
40	福留研一(富山高専)	

日本周辺海域の海沢モニタリングと波浪計測に関する研究集会

	氏 名(所属)	
41	磯田豊(北海道大学 大学院水産科学研究院)	
42	髙橋陽奈(北海道大学 大学院水産科学研究院)	
43	大野舞子(北海道大学 大学院水産科学研究院)	
44	高槻丈嘉(北海道大学 大学院水産科学研究院)	
45	大貫陽平 (九大応力研)	
46		
47		参加者 合計 45名
48		九大 12名(応力研7名 総理工 5名)
49		その他 33名
50		
51		
52		
53		
54		
55		
56		
57		
58		
59		
60		









































































33

index	mode	months	cor.	index	mode	months	cor.
AOI	2	JFM	-0.421^{*}	AOI	2	Total	0.395^{*}
AOI	2	OND	-0.364	AOI	2	OND	0.461*
PDO	2	JFM	0.390	PDO	2	JFM	-0.474°
ENSO	1	JAS	0.624*	ENSO	1	Total	0.412*
ENSO	2	JFM	0.412*	ENSO	1	JAS	-0.401^{*}
ENSO	2	JAS	-0.348*	ENSO	1	OND	0.384*

34

まとめと今後の課題

- ・東シナ海のうねり波高と風浪波高についての季節・経年変化を調べた。
- うねり波高の波高の経年変化への寄与が大きい。
- ・波高偏差のEOFの第1モードと第2モードの固有ベクトル分布図に対応するSOM配列のパターンが同定。
- ・最も主要な波高偏差の分布は、特に夏季に頻度が高い。
- ・うねり波高偏差の最も主要な SOM パターンの頻度と EOF の第1モード ともに、うねり波高の増加傾向を示している。
- ・東シナ海では、特定の期間にうねり高度の増加傾向が顕著である。
- ・東シナ海のうねり波高偏差パターンと風速偏差パターンの関係は季節に よって異なる。
- ・いくつかの気候指標と波高偏差の EOF時間係数は相関。

まとめと今後の課題

- ・経年変化はERA5とNowphasデータでは傾向が一致しない。
- うねり波高については太平洋側と東シナ海で違いがある。
- ・台風の位置・強さの経年変化







1. Variation of windspeed due to differences between GSM and MSM land-sea distribution.

2. Changes in wind direction due to differences between GSM and MSM land-sea distribution.

3. Comparison of several numerical statistical methods for spatial interpolation and do the machine learning process.

4


















Dataset for Part 3

12:00, and 18:00 UTC.

 Selection of data: Selected in groups of <u>3×3=9</u> points GSM and corresponding MSM data in coastal

areas. A total of 2532 groups are mainly distributed in Japan, South Korea and China.

Data source: GSM and MSM surface wind and land-sea distribution data in GPV from JMA.
Selection of dates: Year 2019, 2020, 2021, the first day of each month, and each day at 0:00, 6:00,



Fig. 9: An example of one of selected groups in the Kyushu area.

13

Part 3 Spatial Interpolation

 Use 9 surrounding costal GSM data to interpolate the MSM wind speed in the red circle, and evaluation them with the MSM data.



14

Research results (U component) Method 4: Bicubic Interpolation RMSE: 1.8395 m/s R-squared : 0.7978 • Method 1: Use closest GSM point RMSE: 1.8885 m/s R-squared: 0.7849 Method 5: Splines Method 2: Single Linear RMSE: 1.8641 m/s RMSE: 1.8617 m/s R-squared: 0.7925 R-squared : 0.7906 Library: scipy.interpolate Method 3: Bilinear Method 6: Ordinary Kriging RMSE: 1.8268 m/s RMSE: 1.8412 m/s R-squared : 0.7958 R-squared: 0.7992 Library: pykrige.ok











Summary

- Wind speed in coastal areas, the ratio of ocean winds to land winds is about 2:1.
- Different between wind angles of ocean winds and land winds is about 7°.
- Kriging interpolation has advantages over other 5 methods in interpolating costal wind speed. Ridge Regression of multiple interpolation results can improve the accuracy furthermore.





.



HIROSHIMA UNIVERSITY 双方向音波送受信による流速計測 双方向音波送受信で計測した伝搬時間から経路平均流速を算出する. 音響局B 音響局A $\tau_{\rm BtoA} || \tau_{\rm AtoB}$ 受信波形の例 平均音速 C 平均流速 u Н 距離L **←**(((E 伝搬時間 1 伝搬時間 L 受信信号のタイムスタンプ $\tau_{\rm BtoA} = \frac{1}{C+u}$ $\tau_{\text{AtoB}} = \frac{1}{C-u}$ 音波送受信実験で 計測した伝搬時間 1 = $\frac{C+u}{1}$ τ_{BtoA} C-uL $\tau_{\rm AtoB}$

4































日次	HIROSHIMA UNIVERSITY
 背景・目的 双方向音波送受信による流速計測について 三原瀬戸の潮流場再現実験 音波送受信実験について 数値海洋モデル データ同化法 4. 結果 	18
18	























































沿岸水の沖合輸送:高気圧性渦、初期場、対馬暖流 0.2 (~ • *) <u>;</u> ◆沿岸水輸送が大きい
 → 沖合域低塩の"好"初期場 - 沖合分枝強化 - 沿岸分枝強化 焦点: ◦沿岸水の沖合流出に関わる、春季に おける沖合域の塩分場・流れ場と、 その経年変動 138.0 138.5 139.0 139.5 Jacobiate (Y) 春季に """"""""""""""""""""""""""""" 塩輸送大・小期間の海面流速・塩分(青濃淡)合 塩敏医大・小期间の海面流速・塩分(青 成図(それぞれ約25日間) 色等深線:200, 400, 1000, 2000 m 塩分33.9以上は無視、33.0以下は同青色 -- 生物生産にも影響 東部日本海の対馬暖流 20 Dec 2023 Т

10



















- ◆沖合域の塩分初期場が低塩だと、高気圧性渦の形成・沿岸水の沖合流出に有利
 今後:惑星ロスビー波による渦度供給も沖合流出を加速させる可能性
 > 沿岸捕捉波から?
 生物生産の加速にまで繋がるインパクトを持つ
- ◆古典的な研究テーマなようだが、時空間的に広範囲な資料に基づき、多角的な視点で、多様な現象を扱う必要ある
 先端の数値実験、観測により可能になってきた
 素部日本海の対集観測
 20 Dec 2023













ADCPで観測された 宗谷暖流域での海底堆積物巻き上がり とその発生条件

久賀みづき (北大低温研)
大鳥慶一郎 (北大低温研)
深町康 (北大北極研究セ)
伊藤優人 (極地研)
西岡純 (北大低温研)



















まとめ





- 宗谷暖流域での積物巻き上がりを ADCP観測データを用いて初めて捉えた
- 平均流+潮流+**強流イベント**で巻き上がり発生
 - □上流(宗谷海峡に近い) 強い南風による海峡間水位差増加 南風イベントの多い9~12月に発生頻度高い
 - □下流 オホーツク海の北風連吹による沿岸浦捉波 濁度の直接観測でも巻き上がりを確認























































津軽暖流の流量と北太平洋亜熱帯域の風によって駆動される 日本周辺潮位の経年変動

永野 憲1・金子 仁2・脇田 昌英2

1 大気海洋相互作用研究センター/JAMSTEC 2 むつ研究所 /JAMSTEC

Nagano A., H. Kaneko, and M. Wakita (2023): Interannual sea-level variation around mainland Japan forced by subtropical North Pacific vind and its possible impact on the Tsugaru warm current, doi: 10.1007/s10236-023-01580-w Ocean Dynamics, Special Session of Global WBC

2023年12月20日



 グローバルな温暖化に関わらず、亜表層水の鉛直混合によって津軽海峡の水温は有意に減少、 大気の強制ではない。

 ・速い酸性化は、人為起源 CO₂の吸収による溶存無機炭酸(DIC)の増加だけでなく、他の物理過程 および生物過程が原因になっている。特に、亜表層からのDICの表層への拡散が重要





島周りの流線関数 (Pedlosky et al., JMR,1997)



理論的には、トカラ海峡 (30°N) から津軽海峡 (42°N) のSverdrup流線関数を平均すれば、津軽暖 流の流量の変動が求まるはずだが...

風応力から津軽暖流の流量を計算した結果



 $\Psi_{\rm I}=r\psi_{\rm I}$

r は、海底地形によるブロッキングに関係するスケールファクター (Minato and Kimura, 1980). 本研究では、試みに ratio of the water depth 対馬海峡の深さ(-200 m) と東シナ海の最大深さ(-2000 m) の比, r = 0.1, とした. Averaging Lat. Band: 30-36°N



相関係数 $\Psi_{\rm I}$ = $r\psi_{\rm I}$ vs EOF1: 0.65 > 95%信頼限界(0.58) 相関係数 $\Psi_{\rm I}$ = $r\psi_{\rm I}$ vs NPI: 0.54 > 90% 信頼限界 (0.50)

まとめ

- 潮位データと風応力データを用いて、北太平洋上の風の変化との関係に着目して、 (津軽海峡の酸性化を強化させている)津軽暖流の流量の経年変動の要因を調べた。
- •津経海峡を除く日本周辺で一様に変動する潮位変動(第1EOFモード)は、深浦と函館の潮位差(津軽暖流の流量変動の指標)と有意な関係があった。
- ・津軽暖流の流量変動は、トカラ海峡(30℃)から黒潮離岸緯度(36℃)の緯度帯の風
 の経年変化の影響を受けている。特に、アリューシャン低気圧の強度の経年変化に起因
 している。





































・ 1-c「日本域海洋変動予測システム開発」

- FORA-WNP30、MOVE/MRI.COM-JPN Datasetの後継データセット
 FORA-WNP30 (北西太平洋10km, 1982-2016年)
- MOVE/MRI.COM-JPN Dataset (日本周辺2km, 2008-2019年)



再解析実験の仕様		
	FORA-JPN60	FORA-WNP30
海洋モデル	<u>MRI COM v5.0</u> ・ JPN:2km, NP:10km, GLB:100km ・ Online two-way nesting ・ 潮汐、気圧応答	MRI.COM v2.4 • WNP:10km, NP:50km • One-way nesting ・ 潮汐、気圧応答なし
フォーシング	大気:JRA-3Q(3時間値) 河川:JRA-55 + JMA-RI(流域雨量指数)	大気:JRA-55(日平均) 河川:なし
データ同化	<u>MOVE V4</u> ・ 海洋:4D-Var + IAUダウンスケーリング ・ 海氷:ナッジング	<u>MOVE V3</u> • 海洋:4D-Var • 海氷:ナッジング
観測データ	海面水温 (CORE-SST2, MGDSST) 衛星海面高度編差 ・ 載定沿いSIA (14衛星) ・ 載ええりいク成分の補正 現場水温・違分 ・ BK4をペースとし、複数のデータセットを追加 満水密設度 ・ SSM, SSMS ・ オホーツク2海水解析	海面水県(MGDSST) 衛星海面高度偏差 ・軌道(A) (SIA (11衛星)) 現場水晶、塩分 ・ WOD13 - GTSPP - SSM(SSMIS
再解析期間	1960年代~2020年(予定)	1982~2016年
































富山トラフを単純な水路モデルで表現 使用モデル:回転系(f=0.89×10⁻⁴s⁻¹)静水圧近似のMITgcm(海面はリジッド・リッド近似) 水平渦粘性係数:10 m²s⁻¹ 鉛直渦粘性係数:10⁻⁴ m²s⁻¹ Δx = Δy = 500m, Δz = 100m 水温の鉛直拡散係数:10⁻⁴ m²s⁻¹ ∆t = 3s 水温の水平拡散係数:100 m²s⁻¹ 塩分の鉛直拡散係数:10⁻⁵ m²s⁻¹ 塩分の水平拡散係数:10 m²s⁻¹ (a) (b) 39.5 Closed slip boundary Radiation 2 38.5 (deg. ÷ Latitude 37.5 100km No bottom friction 36.5 138 136 Longitude (deg.E)

V字型のトラフ地形(Top-2)と沖向きに深度を増す深み地形(Top-3)で構成 主に、Top-1の結果を紹介し、最後に、Top-2とTop-3のモデル結果の相違を示す x (km) Top-1 (H 180 120 20 1200m Top-2 180 120 160 20 Тор 100 120 140 160 180 20 Тор -4 H=1000m (km) 4

富山トラフ(Top-1)は、





5

3

















東岸境界流 or サブダクションに関する既往の研究 ③ 南北加熱冷却強制によるオーバーターニング循環(風成循環なし・陸棚地形なし) 表層 中深層 Yoshikawa et al. (2021) λ ①~③のまとめ 水平流速 温度場 ビれも観測結果ではなく
 3.3 ままβ面のモデル実験の知見
 の知見
 1.3 ままり
 1.3 ままり</p 南北密度勾配による 強い熱強制が必須 沈降流 \downarrow 東岸境界域の沈降流 (サブダクション)が再現 水平流速 300 「東岸境界流」の形成は &ずしも必須ではなさそう 1000 2000 3000 4000 500 X [km] 1000 2000 3000 4000 5000 X [km] 本研究の目的 海洋観測により日本海の「東岸境界流」の特徴を記述 → それのモデル再現を試みる? 3











































PO4 LSIWとHSIWのPO4はともに、 AOUと似た分布及び経年変化を示す **LSIW** (Symbol $\times : S_{max}$) 97 9 98 (µM kg-1) 0 20 40 60 80 100 0.6 -3 1.0 PO 00 1.4 120 140 160 Π IV I IV 2.2 π Π π T HSIW 11 13 <mark>15</mark> 17 19 10 12 14 16 <mark>18</mark> 21 20 (yr.) 97 9 98 11 13 <mark>15</mark> 10 12 14 16 21 (y 97 9 98 (µM kg-1) 0 20 40 00 80 100 1' (µM kg^{.1}) 0.2_{]3} I Π ш IV ш īV I Π Po 120 140 20 1.8 ****** ÷., 2.2 そこで、AOUとPO4を用いて、Preformed PO4とPreformed DOを計算







12





HSIWOAOUx PGA(N) ILE II: NUMOSIUL <, mmotion vig → Maniake Adding to come for a xig Normal of the second second

 ■~Ⅳ期におけるHSIWの酸素減少量から酸素消費速度を概算すると 2.27 µmol kg⁻¹/4 千年 (2008): 0.96~0.55ml·1⁻¹/4 中山 (2007): 1.2~1.4µmol kg⁻¹/年
 C = 1~2 µmol kg⁻¹/年
 ■ (Татириски странование)
 ■ (Татириски странование)

16



17







3

KFAS 한국수산과학회지

0(2), 183-194, 2017

Sea of Todarodes Pacificus Winter Cohort

Ocean Climate and Ecology Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea Fisheries Resources Management Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46063, Korea ³Department of Marine Bioscience, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea



4







 ○ 輪紋計数 ⇒ ふ化日と日齢推定
 ○ 家/Ca比測定 ⇒ 経験水温と負の相関
 □ keda et al. (2003)
 ■ keda et al. (2003)
 ■ Leda et al. (2003)</li <figure><figure><figure><figure><figure><figure>

10





9



































沿岸域におけるCDOM(有色溶存有機物)の諸プロセス COOMは水柱の光透過(に影響 (Kirk, 1994) → 基礎生産を調節(Markager et al., 2004: Thrane et al., 2014; Seekell et al., 2015) → 有容式客外線(U)から次生生物を保護(Hader et al., 2011) DOM内の溶存有機波素(DOC)は従属栄養細菌の代謝基質の主供給源(Findlay and Sinsabaugh, 2003) 紫外線 徴生物ループ 分解 CDOM 植ブラの 生産 pro 陸域負荷 溶出 深層から 供給



















河口域	~沿岸海域のCDOM観測(七尾湾西湾)	
 ・沖合域は低濃度(5[ppb]以下) ・河口域は高濃度(5-15[ppb]) 	→ 熊木川からの河川ブリューム → 少しずつ薄まっていく(塩分の時間変動と対応)	
熊木川CDOM濃度分布	CDOM濃度[ppb] ◆	
<u>соон (гра)</u> ни - ни -		
1.05 - 10.45 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55 10.55		Q

河口域~沿岸海域の表層塩分(SSS)観測(七尾湾西湾) 海水交換により外洋水(対馬暖流水)と混合して塩分増加(約2週間) 熊木川からの河川ブリューム CDOM濃度分布は河川プリュームを示唆する証左 沖合域は高塩(32.9-33.7) 河口域は低塩(31.1-32.5) $\rightarrow \rightarrow \rightarrow \rightarrow$ Salnity(塩分) 能太川表層塩分分布 1 Ū 1 1 Ū T





16





17













研究背景 pН 大気試料 pCO, ◆海水試料 DIC 標準ガス 1 1 PPPI TA 表面海水中および大気中の二酸化炭素観測の概略図 出典:気象庁 CO₂calc 出典:USGS 測定機器はおおがかりなものが多く. pCO₂(海水中二酸化炭素分圧)の直接測定は少ない 間接的に推定する手法もあるが、DIC、TAも容易に測定できない 3



研究目的 瀬戸内海におけるCO₂fluxを見積もる ・過去~現在までのpCO₂空間分布, CO₂fluxの変化を調べる ・ ランダムフォレストを用いて, 比較的測定が容易な パラメータよりpCO₂を推定する

ータと手法 デー <u>実測データ</u>「深江丸」 •1994~2010年,23回実施 E PR 神戸商船大学/神戸大学大学院 海事科学研究科附属練習船「深江丸」 300 348 300 420 Carrier DO2 pp=+ ाजका (सका (प्रदा) – प्रिया バブリング方式 <u>パラメータ</u> 測定 季節 15分毎 pCO₂(海水中CO₂分圧), 春季:3月 ·海面下約3m(海水) PCO₂(大気中CO₂分圧), 夏季:7~9月 ·海面上約10m(大気) T, S, pH, DO, 緯度, 経度





















 T・S・pH・DOより pCO2を推定
 RMSE
 MAE
 R2

 ランダムフォレスト
 [µatm]

 雇季
 12.0

 夏季
 36.6





















結果と考察

- 1. pCO₂の空間分布
- 2. pCO₂推定モデルの構築

3. 総合水質調査データでpCO₂を推定

26

 3. 総合水質調査データでpCO₂を推定

 深江丸全てのデータ → モデル構築

 瀬戸内海総合水質調査のデータ → pCO₂を推定

 ・深江丸での測定と時間・場所が近い測点で、

 海域ごとの推定精度を評価

 ・深江丸での測定と時間・場所が近い測点で、 海域ごとの推定精度を評価

27





28



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。最 新の観測技術,計算機技術,数値計算技術により,様々なスケールの諸々の現象について,その把握が 進められている。しかし,これらの現象の理解は,観測や数値モデルによる知見の増加に追い付いてい ない。多くの現象は複雑な過程を伴い,その把握や再現を力学的理解につなげることは必ずしも容易で ない。諸々の海洋現象を力学的に理解するためには,各スケールの力学理論の発展に加えて,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、多彩な課題に取り組む研究者たちがブレーンストーミング的な議論を 忌憚なく行う場を設けるべく、本研究集会を開いた。力学理論に加え、観測、データ解析、数値モデル、 データ同化、物質循環など、様々な手法で多様な課題に携わる研究者が集まり、諸々の海洋力学過程に ついて、議論と相互理解を深めた。

研究集会の概要

2023 年 10 月 26 日~29 日の 3 泊 4 日で研究集会を開いた。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。顔が見え る環境で忌憚のない議論を進めることを重視し,前年に行っていたオンライン参加の受け入れを取り止 めた。

研究集会には、大学院生から大ベテランまでの幅広い年代の18人が参加し(表1),14件の講演が行われた。事前準備したプログラムは図1のとおりである。各講演には、質疑を含めて60分の時間を取った。ただし、当日の進行に合わせて時間を適宜調整した。

氏名		所属	職名	氏名		所属	職名
今村	春香	京大院理	学生 (D2)	水田	元太	北大地球環境	助教
粟野	翔太	京大院理	学生 (M2)	藤原	泰	神戸大海事科学	助教
吉川	浩一朗	京大院理	学生 (M2)	酒井	秋絵	九大総理工	学生 (D3)
西野	圭佑	電中研・京大院理	研究員・学生	吉武	珠穂	九大総理工	学生 (D3)
			(D1)	中島	広貴	九大総理工	学生 (M2)
寺田	雄亮	東大院理	学生 (D2)	大貫	陽平	九大応力研	助教
唐木	達郎	東大院理	特任助教	広瀬	直毅	九大応力研	教授
中野	英之	気象研	室長	磯辺	篤彦	九大応力研	教授
石崎	廣	気象研	客員研究員	西垣	肇	大分大理工	准教授
蓮沼	啓一	海洋総合研究所	代表取締役				

表1 本研究集会の参加者。

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:2023年10月26日(木)~29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

10月26日

- 17:00 まで入所17:30-夕食
- 18:30-18:40 開会
- 18:40-19:40
 今村 春香(京大院理)

 波解像モデルでの沿岸域の理想化実験に向けて

10月27日

- 7:30- 朝食
- 8:30-9:30 酒井 秋絵(九州大学総理工)
- 日本海南東部で観測される近慣性内部波
- 9:40-10:40 唐木 達郎(筑波大)機械混合に矛盾のない海底境界層の発達理論
- 10:50-11:50 中野 英之(気象研究所全球大気海洋研究部) 海洋モデルの渦度バランスについて
- 12:00- 昼食
- 13:00-14:00 粟野 翔太(京大院理)遷移層特性の空間分布と季節変化
- 14:10-15:10 吉川 浩一朗(きっかわ,京大院理)
 海面加熱時の Langmuir 乱流に関する数値実験:
 混合層深度や TKE 収支のパラメータ依存性
- 15:20-16:20 石崎 廣(気象研究所全球大気海洋研究部)
 西部熱帯北太平洋での測流による上方位相伝播を伴う東西流の経年変動
 16:30-17:30 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 その3

17:30- 夕食

図1 研究集会のプログラム

10月27日 (つづき)

18:30-19:30 大貫 陽平(九大応力研) 回転成層流体のトポロジカル指数とバルク-エッジ対応

10月28日

- 7:30- 朝食
- 8:30- エクスカーション・昼食
- 14:00-15:00寺田 雄亮(東大院理)東太平洋における赤道中層海流の駆動メカニズム
- 15:10-16:10 吉武 珠穂(九大総理工)
 生物過程を考慮した浮遊マイクロプラスチックの鉛直輸送に関する数値的研究
- 16:20-17:20水田 元太(北大地球環境)大陸斜面上でのケープダンレー底層水の水塊形成と流動
- 17:30- 夕食
- 18:30-19:30 藤原 泰(神戸大海事科学研究科)地球自転影響下でのストークス輸送と反流応答の数値計算

10月29日

- 7:30- 朝食・退所準備
- 9:00-9:40* 広瀬 直毅(九大応力研)

漁船観測データの同化実験
 9:50-10:30* 磯辺 篤彦(九大応力研)
 微細マイクロプラスチックを測ると言うこと —beyond the 300 micrometers—

退所

発表時間は質疑を含めて 60 分です。ただし、*印のものは短めの時間です。 天気予報等によってエクスカーションを 10 月 27 日に変更する場合があります。 その他、時間通りに進まない場合があります。

代表者:西垣肇(大分大) 所内世話人:磯辺篤彦(九大応力研)

> 図1 研究集会のプログラム(つづき)。進行の都合上,発表1件を 日程変更し,1件を取り止めた。

各講演の概要

・今村春香(京大院理)、波解像モデルでの沿岸域の理想化実験に向けて

離岸流の力学的な発生機構について波解像モデルを用いた数値実験で解明することが本研究の目的で ある。この目的のため、これまで発表者が使用してきた外洋を想定した波解像数値モデルに対して、海 底地形・波の強制減衰・砕波のパラメタライズの導入や岸沖境界の再検討を行い、沿岸域への拡張を行 った。先行研究との比較から拡張した数値モデルの性能評価を実施し、モデルの振る舞いは概ね良好で あることを確認した。

・酒井秋絵(九州大学総理工)、日本海南東部で観測される近慣性内部波

日本海南東部の大和海盆では,深海で近慣性内部波(NIW)が観測される。流速計を用いた係留観測の 結果,観測層上層と下層で NIW が観測される時期と上層でのみ観測される時期があった。NIW の周波 数と伝播経路から,各層で観測された NIW の励起緯度を推定したところ,上層の NIW の方が下層の NIW よりも南で励起されていることがわかった。また,NIW を励起させた気象擾乱を調べたところ,下 層まで到達する NIW,上層にのみ到達する NIW はそれぞれ低気圧,前線であることがわかった。

・唐木達郎(筑波大),機械混合に矛盾のない海底境界層の発達理論

成層順圧流体が海底斜面上を岸を右手に流れると, 傾圧流構造を持った海底境界層が発達する。理論研 究はこれまで浮力混合が海底境界層の発達をもたらすと考えてきたが, 近年の数値実験は機械混合がよ り支配的な駆動源であると示唆する。本講演では海底境界層の発達理論が機械混合のみで矛盾なく組め ることを示す。海底エクマン輸送が境界層上端に機械混合を伴うならば, 海底境界層内の密度はラグラ ンジュ的に保存する。

・中野英之(気象研究所全球大気海洋研究部),海洋モデルの渦度バランスについて

海洋モデルの水平差分には Arakawa-B-grid 及び C-grid が使われる。B-grid は地衡流の表現に優れ, Cgrid は連続の式の表現に優れている。C-grid には地形の昇降に伴い偽の渦度を生じさせることを示した 論文 (Styles et al. 2022) および, この結果を踏まえつつも NEMO で渦度バランスを計算し, 渦度バラ ンスのレビューを行った Waldman and Giordani 2023 の論文を紹介しつつ, 海洋モデルでの渦度の解析 や, MRI.COM の渦度バランスを紹介する。

・粟野翔太(京大院理),遷移層特性の空間分布と季節変化

遷移層は乱流の強い混合層と、その下の密度躍層の境界にある薄い層であり、遷移層内の弱い混合が、 混合層と内部領域の間のフラックスを発生させている。鉛直解像度が2mのArgoデータを用いて、主 に太平洋における遷移層の特性値の空間分布と季節変動を調べた。遷移層の厚さの中央値は9mで、比 較的一定の値であった。空間的な特徴として、北太平洋亜寒帯循環域で1mの季節変動が見られ、ペル ー沖で同緯度と比較して薄くなるという構造が確認された。

・吉川浩一朗(きっかわ,京大院理),海面加熱時のLangmuir 乱流に関する数値実験:混合層深度やTKE 収支のパラメータ依存性

海面加熱時に Langmuir 乱流がどれだけ混合層を深めるのかを,先行研究で考慮されていたパラメータ (風摩擦速度,ストークスドリフト速度)だけでなく,その他のパラメータ(海面浮力加速度フラック ス,コリオリ係数,波長)を含め,LES 数値実験によって評価した。数値実験の結果から,海面加熱の 強さ,波長の長さも混合層深度への影響を変化させることが明らかになった。さらに再解析データも用 いて全球評価を行った結果,先行研究が考慮したパラメータだけでは推定できないような影響を持つ海 域(インド洋など)が存在することが明らかになった。

・石崎廣(気象研究所全球大気海洋研究部),西部熱帯北太平洋での測流による上方位相伝播を伴う東西流の経年変動

西部熱帯北太平洋での7年余の測流で,2500m深にまで及ぶ,東西流の約4年の経年変動が見られ,し かも,その変動の位相の上方伝播が示めされた。高解像度モデルによると,測流点を含む緯度帯では圧 力場とそれに伴う zonal jet が西進し,それによって東西流経年変動がもたらされる。また,この緯度帯 では,ロスビー波による西向下方へのエネルギー伝達と西向上方への位相伝播がみられ,測流での上方 位相伝播に対応する。

・ 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 その3

津軽海峡はそこを通って日本海から太平洋へ出る流量に関して古くから関心をあつめてきた。本研究で 注目する点は津軽海峡内で潮汐の特性(位相・振幅)が大きく変化することである。太平洋側では顕著 な潮汐現象が認められるのに対し,日本海側ではそれがほとんど見られない。津軽海峡周辺の約 30 地 点の 15 年分の潮位の観測データを集め,調和定数を求め,その空間的変化及び経年変化を調査した。 海峡内で見られる多くの潮汐特性の中で,特に注目されたのは Mf 潮周期(13.7 日)の流動が卓越して いることである。Mf 潮は,O1 と K1 の唸りの周期と同じ周期であり,O1 と K1 の影響を受けることが 明らかとなった。北海道側と本州側とのO1 と K1 の位相差は海峡内で日本海側に行くほど大きくなり, この位相差の違いが Mf 潮を強化することが明らかとなった。

・大貫陽平(九大応力研),回転成層流体のトポロジカル指数とバルク-エッジ対応

回転成層流体の線形モデルを対象とし、非発散拘束条件を形式的に消去する補助場の方法を用いて、シ ュレディンガー型の方程式を導いた。水平波数ベクトルが構成するリーマン球面上で慣性重力波モード と定常流モードの固有ベクトルが構成するファイバー束の Chern 数を計算した結果、赤道に捕捉されて 存在する Kelvin 波や Yanai 波、あるいは側壁を伝わる各種捕捉モードの分散関係の性質がトポロジカル に説明されることを示した。

・寺田雄亮 (東大院理), 東太平洋における赤道中層海流の駆動メカニズム

東部赤道太平洋深さ 1000 m で観測された約 30 日周期の季節内変動について,その起源と中層の東西流 ジェットとの関連を観測データと数値実験を用いて調査した。海面水温,500 m 以浅の水温・流速デー タからは約 30 日周期,東西波長約 1000 km で西向きに伝搬する赤道反対称の変動が確認され,その季 節性と経年的な変調は深さ 1000 m で観測されたものと矛盾しないものだった。さらに数値実験からは このような東部赤道太平洋における季節内波動の沈み込みが赤道中層循環の東西幅を変えることが明 らかになった。 ・吉武珠穂(九大総理工),生物過程を考慮した浮遊マイクロプラスチックの鉛直輸送に関する数値的研究

夏季に韓国沿岸で行われたマイクロプラスチック(MP)鉛直分布の観測によると、粒径 300 µm 以下の MP は海面だけでなく水柱全体に分布しており、水温躍層直上で最大濃度を示しているという。本研究 では、この MP が示す中層極大が、植物プランクトンの中層極大(subsurface chlorophyll maximum; SCM) と関連していると仮定し、数値モデルで検証を試みた。MP と植物プランクトンとの関連は、植物プラ ンクトンの形成する凝集体への取り込みを考えている。

・水田元太(北大地球環境),大陸斜面上でのケープダンレー底層水の水塊形成と流動
 南極底層水の一つであるケープダンレー沖底層水(CDBW)の係留観測を行った。CDBWは海氷生産によって作られる Shelf Water が陸棚上で Winter Water,周極深層水(CDW)と混合して作られる modified
 Shelf Water (mSW)と CDW の間の移行層に相当する。2008年に比べ2019,2020年の CDBW は低温低塩分化しており,Winter Water の影響が示唆される。(進行の都合上10月29日に変更した。)

・藤原泰(神戸大海事科学研究科),地球自転影響下でのストークス輸送と反流応答の数値計算 藤原は,沿岸域に打ち寄せる波浪に伴うストークス輸送とそれに対するオイラー流の応答過程を,波の 直接数値計算・波平均数値モデルによる理想化実験を通して調べた。地球自転効果がない時にはストー クス輸送の収束発散による水面凹凸を解消するように重力波として反流が生じ,一方地球自転効果のも との定常状態はエクマン層内でオイラー反流が生じ,その周りを慣性重力波として振動するような応答 となることを報告した。

・磯辺篤彦(九大応力研), 微細マイクロプラスチックを測ると言うこと — beyond the 300 micrometers— サイズが数百マイクロメール以上の海域浮遊マイクロプラスチックについて, 観測の調和化・標準化を 経て,全球海洋における浮遊量(浮遊密度)のデータベースの構築,それらを利用した数値モデリング 研究による現存量やフローの把握,そして将来予測へと進んでいる研究の現状を報告した。これに対し て,数百 µm 以下の微細マイクロプラスチックの現存量や将来予測については,現状で精度良い観測を 保証するプロトコルが存在せず,未知の研究テーマである。

成果

発表演題は、対象水平スケールの小さいものから、水面波・表層混合層(今村,粟野,吉川,吉武,藤原),内部重力波・潮汐・沿岸(酒井,唐木,蓮沼,水田),中規模運動(中野,石崎,大貫,寺田), 対象スケールを特定できないもの(磯辺)と広範にわたった。扱う現象は,前述の海洋運動に加え,熱 収支や物質循環もあった。手法は,数値実験・モデル,観測,解析的理論と,多彩だった。

本研究集会には、大学院生の若手から退職後年代のベテランにわたる幅広い参加者があった。参加者 は、力学に理解と興味があり、集中的な議論するのに適した人数で、常連参加者と新規参加者がバラン スよく含まれた。長めの発表時間を取り、綿密な議論が進められた。また、発表以外の時間にも多岐に わたる議論や情報交換がなされた。以上のよう、参加者に恵まれたこともあり、海洋力学の発展にとっ て、海洋学コミュニティにとって、有意義な研究集会になった。

最後に,4日間にわたって講演・質疑・合宿生活に真摯かつ協力的に取り組み,会を楽しんでいただ いた参加者に,代表者として感謝する。

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:	2023年12月1	19日(火)	午後(1	$3:30 \sim 17:00)$	
		20日(水)	午前((09:30~11:00)	
開催場所:	九州大学応用	力学研究所西桥	東6階	多目的研究交流室	(W601 号室)
参加者数:	19日48名、	20日41名	両日	参加:41名	

3. 発表概要

今年度は12件の講演応募があったが1件キャンセルが生じ、11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。九州大学応用力学研究所の上原は、海 洋レーダから得られる視線方向流速と合成ベクトル流速のデータを地球物理学分野で多用される netCDF形式での表記することを提案し、海洋レーダに適した既述フォーマットの確立の必要性を 説いた。情報通信研究機構沖縄センターの灘井は、メソスケールの渦などの海洋現象に対する海 洋レーダのドップラスペクトルをシミュレートしその観測可能性について述べた。新潟大学大学 院理工学研究科の松田は、新潟大学工学部屋上に設置した水平垂直の両偏波を観測可能なレーダ を用いて、移動対象物(船舶と航空機)からの散乱信号の解析方法を提案し、その検出能力を検 証した。三菱電機情報技術総合研究所の亀田は、高知県室戸市に設置のFMCW方式の海洋レーダ での観測を通して、海象の観測と洋上船舶の検出追尾を同時に行うための受信信号の鮮明化と目 標識別方法に関する実験の概要と初期段階の結果を報告した。海洋研究開発機構の王は、2022 年 トンガ火山噴火によって発生した津波に対して、同機構むつ研究所が展開している津軽海峡東部 海洋レーダ観測の流速値でデータ同化することにより津波波高値の再現性を評価した。国際航業 の林は、静岡県御前崎港に設置の13.5MHz レーダを用いた波浪観測実験について、ハードウェア とソフトウェアでのノイズ対策を施し GPS 波浪計との比較から波高ならびに周期ともに相関係数 が向上したことを報告した。愛媛大学工学部の三宅は、深層学習を用いて海洋レーダのドップラ スペクトルから海上風と波浪の同時観測を行う手法を提案しその検証を行い、ドップラスペクト ル上での1次散乱と2次散乱の分離なしに風向・風速と波高の推定ができる可能性を示した。

2日目は4件の講演があった。福井県立大学海洋生物資源学部の宮崎は、ヒアリング調査の報告 文書における単語抽出から、海洋レーダで得られる潮目、急潮、波高等の情報の水産業への活用 可能性について検討し、定置網漁での急潮対策、波高情報による出漁判断、漁具投入・運用に対 する黒潮情報などが求められていることを明らかにした。電力中央研究所の坪野は、伊勢湾・三 河湾で運用されている国土交通省設置のレーダの流速データに対して、一昨年の発表に引き続き、 モデルを用いて湾内での潮流パラメータに関する精度比較を行った。福井県立大学海洋生物資源 学部の石井は、日向灘で採取した環境 DNA の時空間変動を海洋レーダの流向・流速データ、衛星 観測による海面水温、CTD の水温鉛直観測を用いて評価し、魚種相の季節変化について言及した。 九州大学大学院総合理工の松尾は、海洋レーダ観測データと海洋モデル DREAMS_D を用いて、 2004~2017年の対馬西水道での渦の発生メカニズム解明を試みた。冬季に短周期反時計回りの水 平スケール約 30km の渦が発生することを確認され、移動速度約 17cm/s で北上するということを 明らかにした。

4. 研究集会プログラム

- 九州大学応用力学研究所 共同研究集会 「海洋レーダを用いた海況監視システムの開発と応用」 (代表者:藤井智史、九大応力研世話人:市川香) 開催日: 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

趣旨説明

応用力学研究所西棟6階多目的研究交流室(W601号室)

12 月	19	日	(火)
------	----	---	-----

 $13:30 \sim 13:35$

	藤井智史(琉球大工)
13:35-13:55	HF レーダー流速データの netCDF 形式への変換について
	上原克人(九大応力研)、松尾俊弥(九大院総理工)
13:55-14:15	短波海洋レーダによるサブメソスケール現象の観測にむけて
	灘井章嗣(NICT 沖縄)
14:15-14:35	海洋レーダにおける移動目標検出に関する実験報告
	松田暁(新潟大院理工)、山田寛喜(新潟大工)、藤井智史(琉球大工)、長名保範(熊本大半
	導体・デジタル機構)、有馬卓司・宇野亨(農工大工)

- 14:35-14:55 海洋レーダによる海象観測と海洋監視の実験報告 亀田洋志・高橋龍平・今津智成(三菱電機)、片岡智哉(愛媛大工)、藤井智史(琉球大工)
- 14:55-15:10 休憩
- 15:10-15:30 海洋レーダーを用いた津波データ同化への不均一誤差分布の適用 [キャンセル] ムハンマド イルハム サハナ(愛媛大院理工)、日向博文(愛媛大工)、藤良太郎(国際航

業)

- 15:30-15:50 津波早期警報のための HF レーダーを用いたデータ同化: 2022 年トンガ火山津波の ケーススタディ 王宇晨・今井健太郎・MULIA Iyan・有吉慶介・高橋成実・佐々木健一・金子仁・阿 部泰人・佐藤喜曉(JAMSTEC)
- 15:50-16:10 13.5MHz 海洋レーダによる波浪観測精度の向上策の検討 林正太(国際航業)、国交省名古屋技調、藤井智史(琉球大工)、長名保範(熊本大半導 体・デジタル機構)、春日井康夫・齊藤創太(沿岸技術研究センター)、金津伸好・永松 宏(国際航業)
- 16:10-16:30 深層学習モデルを用いた海洋レーダによる風・波浪同時観測の試み 三宅智大(愛媛大工)、片岡智哉(愛媛大工)、田村仁(港空研)
- 16:30-17:00 情報交換

11月30日 (水)

- 09:30-09:50海洋レーダー情報に対する日本漁業のニーズ解析
宮崎新・渡慶次力(福井県大海洋生資)
- 09:50-10:10 2016 年から 2023 年 2 月までの伊勢湾・三河湾レーダ結果と計算結果の比較 坪野考樹(電中研)
- 10:10-10:30 日向灘における環境 DNA の時空間変動の特徴〜海洋生物分野における海洋レーダー利活用の事例紹介〜
 石井昴(福井県大海洋生資)、堀井日向・山田和也(宮崎水試)、渡慶次力(福井県立大海洋生資)
 10:30-10:50 対馬海峡西水道の短周期変動解析

松尾俊弥(九大院総理工)、上原克人・広瀬直毅(九大応力研)

10:50-11:00 総合討論

5. 参加者名簿

氏名	所属	氏名	所属
江淵 直人	北大学低温研	長名 保範	熊本大
阿部 泰人	北大水産	中條 飛翔	北大水産
渡慶次 力	福井県立大	宮崎 新	福井県立大
石井 昴	福井県立大	片岡 智哉	愛媛大
三宅 智大	愛媛大	藤平 卓	セナーアンドバーンズ
永井 勇	セナーアンドバーンズ	亀田 洋志	三菱電機
高橋 龍平	三菱電機	藤井 智史	琉球大学
林美鶴	神戸大	渡邊 康志	中部電力
荒木 貴光	熊本大	岩渕 透	日本無線
土屋 聖	日本無線	油布 圭	九大応力研

山本 浩	航空イノベーション推 進協議会	渡邊 翔太郎	ジャパン・リニューア ブル・エナジー
松田 暁	新潟大	木下 倫太朗	読売新聞
堀川 博紀	JAMSTEC	碓氷 典久	気象研
広瀬 成章	気象庁	渡部 由佳	東京都島しょセンター
水藤 寛	東北大 AIMR	渡辺 楓	東北大 AIMR
印貞治	日本海洋科学振興財団	藤 良太郎	国際航業
林正太	国際航業	李 広聚	九大応力研
久木 幸治	琉球大理	上原 克人	九大応力研
渡邊 修一	日本海洋科学振興財団	木村 達人	東電設計
中山 智治	日本海洋科学振興財団	大畑 聡	千葉県水産総合研究セ ンター
松尾 俊弥	九大院総理工	市川 香	九大応力研
広瀬 直毅	九大応力研	坪野 考樹	電中研
灘井 章嗣	NICT	今井 健太郎	JAMSTEC
王宇晨	JAMSTEC	中島 広貴	九大院総理工

九州大学応用力学研究所 研究集会報告書

課題番号:2023WS-AO-5

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3名、富山大学1名、鹿児島大学4名、水産機構水産資源研究所2名、九州大学4名の計17名、オ ンラインでは長崎大学2名、愛媛大学1名、富山大学3名、東京大学2名、水産機構水産資源研究所2 名、北海道大学1名、日本水産資源保護協会1名、福井県立大学1名、九州大学1名の計14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9日(金)~10日(土)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動場の長期係留観測による調査結果について講演し、海谷内の平均流は東西斜面上で非対称な流動場があり、全点で海谷に沿う深海長谷内に沿う流れには20~30日周期の流速変動が認められること、上空の風との関連が示唆されることについて示した。遠藤(九大応力研)は2023年夏の長崎丸航海による東シナ海陸棚縁辺域における海底エクマン層の観測結果について講演し、流速に関して潮汐流は観測全期間で平均するとほぼゼロであり、また海底混合層内の流向はより陸棚側を向くことを示し、粒子逆追跡の結果からは粒子の流入方向もエクマン螺旋に影響されることなどを示した。郭(愛媛大学)は黒潮内側域における観測結果について講演し、流速は潮汐・約10日の周期で、水温(DIN)は約30日の周期で卓越することなどを示した。Wang(愛媛大)は黒潮域の海底地形によって形成されるサブメソスケールプロセスについて講演し、モデル解析

結果から黒潮域においては順圧・斜傾不安定性がサブメソスケールプロセスのエネルギー供給で重要で あり、トカラ海峡で起こる乱流混合に大きく寄与することについて示した。吉江(愛媛大学)は夏季・ 秋季の東シナ海陸棚斜面域や鹿児島湾口部における低次生態系の時空間分布について講演し、栄養塩や 植物プランクトン群集組成が時空間的に大きく異なることについて示した。筒井(長崎大学)は東シナ 海大陸棚に分布する *Euplectella* sp.表面に見られる付着物について講演し、表面には珪藻など海洋起源 生物粒子だけでなく花粉や大気ダストなどに由来する陸起源粒子も付着していることを示した。 Haryanto(富山大、オンライン参加)は昨年下記に実施された長崎丸による東シナ海観測における低酸 素・高濁度水の動態についての結果を紹介し、東シナ海の海底直上に分布する低酸素・高濁度水では KIW や K SSW の寄与が大きかったことを示した。Deng(富山大、オンライン参加)はこれまでの東シナ海 陸棚底層付近の低酸素・高濁度水について希土類元素分析や δ 34S や 226Ra の分析結果を加えた解析に ついて講演し、低酸素水の一部は沿岸エリアに起源を持つが、大部分は KSSW に由来すること、その一 方で、大潮は間隙水の直上水へのフラックスを上昇させることに寄与する可能性などについて示した。 初日最後は来年度の航海計画、特に長崎丸航海計画についての紹介とその計画に関する船長とのディス カッションが行われた。

2日目の講演では、堤(鹿児島大学)はDREAMS Epsilonを用いた 2009-2022 年の九州沿岸から沖 合域にかけた表層流れ場解析について講演し、実測値との対応から、本モデルは甑海峡流の季節変動を 再現していることが示され、同海域では五島から甑島、大隈海峡にかけての沿岸流が存在する一方、冬 季から春季にかけては渦変動が優勢することが示された。近藤(長崎大学)は夏季に貧酸素水塊が発達 する有明海における微量金属元素の水平分布並びに湾奥部での 1 時間ごとの時系列変化について講演 し、成層化している夏季の有明海では鉄・マンガン・亜鉛の濃度は潮時によって大きく変化することを 示した。北島(水産機構資源研)は春季東シナ海陸棚縁辺部における流れ藻の分布と起源について講演 し、観測並びに粒子追跡実験の結果から、中国浙江省の沿岸部やその南部から遊離してきた可能性を示 した。山下(鹿児島大学)は西部太平洋におけるカツオ仔稚魚の成長と餌生物の海域間比較について講 演し、餌生物としてはカイアシ類よりも原生動物やゼラチン質分解物が多いこと、また海域間で差のあ るカツオ仔稚魚の成長は仔魚期における経験水温の差によるものである可能性について講演し、動物プ ランクトンに含まれる不飽和脂肪酸含有量は黒潮域と内側域では同程度であったことから、仔稚魚の索 餌海域としての可能性を持つことを示した。

全ての発表ののちに、総合討論を行った。本研究集会の参加者は東シナ海など日本縁辺海を中心とし た研究でこれまでも共同研究を行ってきたが、今後も新たな研究・航海の申請で連携することが重要で あることについて話し合った。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(2月)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。
地球環境力学分野 研究集会

2023WS-AO-6

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

代表:国立環境研究所 菅田誠治

所内世話人:弓本桂也

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 ロゾル等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 ユ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2024 年3 月14 日(木)午後から 15 日(金)午前にかけ,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,修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14 題の発表が行われ,現地20名,オンライン約20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、AIを用いた大気質予測やその補正などのトピッ 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今回も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ィ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.

第7回アジア域の化学輸送モデルの現状と今後の展開に関する研究集会

日時: 2024年3月14日(木)13: 30頃~15日(金)12:00頃

開催方法:ハイブリッド形式(対面+Zoom)

対面開催場所:九州大学応用力学研究所2階会議室

Zoom 接続情報:

https://riam-kyushu-u-ac-jp.zoom.us/j/83938927835

ミーティング ID: 839 3892 7835

パスコード: chemchem7

主催:九州大学応用力学研究所全国共同利用研究集会(2023WS-AO-6)

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)

国立環境研と地方環境研とのⅡ型共同研究「光化学オキシダント等の変動要因解析

を通した地域大気汚染対策提言の試

問合せ先:菅田誠治/弓本桂也

プログラム

・[ショート]:発表12分+質疑8分、[ロング]:発表20分+質疑10分

・原則として会場側で準備した PC を使って発表いただきますので、発表当日に USB 媒体 等でプレゼン資料をコピーお願いいたします。

3月14日(木)午後

座長:菅田 誠治(国立環境研究所)

- 13:30-13:40 趣旨説明: 弓本 桂也(九州大学応用力学研究所) 写真撮影
- 13:40-14:00 梶野 瑞王 (気象研究所) [ショート]

エアロゾル粒径分布観測によるモデルプロセス評価法の提案

14:00-14:20 板橋 秀一(電力中央研究所) [ショート]

気象・化学輸送モデルの高時間分解出力の検討

14:20-14:40 浦西 克維(北九州市立大学)[ショート]

大気質モデルを用いた西之島噴火による PM2.5 汚染事例解析

-2020年8月九州地方-

14:40-15:00 森野 悠 (国立環境研究所) [ショート]

エアロゾルの HO2 取込によるオゾンの生成抑制

15:00-15:10 休憩

15:10-15:40 細越 英彰 (明星大学) [ロング] ディーブラーニングを用いた光化学オキシダント濃度の短期予想についての

有効性の検討

- 15:40-16:10 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
- 16:10-16:40 山地 一代(神戸大学)[ロング]

デリー首都圏および周辺地域における PM2.5 濃度上昇を対象とした数値解析(仮)

- 16:40-17:00 弓本 桂也(九州大学応用力学研究所)[ショート] 機械学習を応用した大気汚染予測版ガイダンスの構築
- 終了後、懇親会を予定

3月15日(金)午前

- 座長:弓本 桂也(九州大学応用力学研究所)
- 09:00-09:10 接続確認等
- 09:10-09:30 太田 聡(石川県保健環境センター)[ショート]【オンライン】 微小粒子状物質(PM2.5)の成分組成による発生源解析
- 09:30-09:50 大原 利真(埼玉県環境科学国際センター)[ショート]

首都圏における長期モニタリングによる CO2 排出量削減の検出

09:50-10:10 森川 多津子(日本自動車研究所)[ショート]

日本の BC 排出量推計の精度向上について(仮題)

10:10-10:40 茶谷 聡(国立環境研究所)[ロング]

```
推進費 5-2105 成果としての排出インベントリ・関連データの公開について
```

- 10:40-11:00 永島 達也(国立環境研究所)[ショート]
 - MICS Asia 第 4 期の現状について
- 11:00-11:30 富澤 慧(福岡研保健環境研究所)[ロング]

SCALE-RM を用いた超高解像度エアロゾル気候モデルの開発

11:30-11:50 議論・総括等、次回開催について

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。別個にすすめらているこ 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。

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。共通のモデル方程式 を有することがあり、その背後にある数理構造に迫る研究テーマも扱う予定 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. 6.1(木) 計測データに根ざした物理現象のモデリング:低温磁化プラズ マにおけるイオン速度分布関数などを例に 徳田悟(九州大学)
- 2. 6.30(金) 多重場特異値分解を用いたプラズマ乱流ダイナミクス解析 佐々木真(日本大学)
- 3. 9.29(金) ダイポールによる荷電粒子閉じ込めの進展と電子・陽電子プ ラズマ計画 斎藤晴彦(東京大学)
- 11.9(木) 回転成層流体のトポロジカル指数とバルクーエッジ対応 大 貫陽平(九州大学)
- 5. 12.13(水) 細胞運動のアクティブマター物理学 多羅間充輔 (九州大学)
- 6. 12.26(火) 回転磁気流体のねじれ振動と木星表層変動 堀久美子(核融 合科学研究所)

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、データ解析関連のトピックス(徳田、佐々木)、実験室プラズマ(斎 藤)、惑星流体(大貫、堀)、非平衡統計物理(多羅間)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 れまでのオンラインでのセミナーに加え、対面でのワークショップを開きた いと考えている。

参加者名	所属	学
		生
小林達哉	核融合科学研究所	
堀久美子	核融合科学研究所	
町田真美	国立天文台	
胡文卿	総合研究院大学	0
斎藤晴彦	東京大学	
安立史弥	東京大学	\bigcirc
佐々木真	日本大学	
古田原拓実	日本大学	0
小澤一隆	日本大学	0
高橋芳文	日本大学	0
竹内悠人	日本大学	0
牛腸匠	日本大学	0
稻垣滋	京都大学	
河内裕一	京都工芸繊維大学	
中島雄太郎	京都工芸繊維大学	0
多羅間大輔	立命館大学	
島裕輔	広島大学	0
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	
森田太智	九州大学総合理工学府	
Moon Chonho	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	
大貫陽平	九州大学応用力学研究所	
多羅間充輔	九州大学理学府	

3. 参加者リスト

小山一輝	九州大学総合理工学府	\bigcirc
肥田愛蘭	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
福山隆雄	長崎大学	
岩山隆寛	福岡大学	
政田洋平	福岡大学	

第1回セミナー

6.1(木曜)

スピーカー:徳田悟(九大)

タイトル:計測データに根ざした物理現象のモデリング:低温磁化プラズマにおけ るイオン速度分布関数などを例に

アブストラクト:

着目する現象を簡素な関数や方程式を用いて記述する数理モデリングはしばしばそ の現象の理解につながる。構築したモデルは計測データとの照合を通じ、その妥当 性が検証される。本セミナーでは統計学の視点から、こうした検証に関わる3つの 問題を提起する。それらへの一つの対処法として、ベイズ推定を用いたアプローチ を紹介する。また、低温磁化プラズマにおけるイオン速度分布関数の決定に関する 事例を含め、講演者がこれまで取り組んできた広く凝縮系物理学にまつわる題材を (時間の許す限り)解説する。

参加者:11名(うち学生(*)5名) 九大:小菅佑輔、西澤敬之、辻英一、小林大輝*、肥田愛蘭* 核融合科学研究所:小林達哉 国立天文台:町田真美 京都工芸繊維大学:河内裕一、中島雄太郎* 日本大学:古田原拓実*、小澤一隆* 第2回セミナー

6.30(金曜)

スピーカー:佐々木真(日大)

タイトル:多重場特異値分解を用いたプラズマ乱流ダイナミクス解析

アブストラクト:

磁場閉じ込めプラズマは、エネルギーや粒子の供給を伴い、内部のダイナミクスに よりそれらが散逸する非平衡開放系である。プラズマの輸送・散逸過程は空間不均 一性に駆動される乱流が支配している。乱流は非線形的に帯状流と呼ばれる空間均 一性を伴う流れや、孤立渦やストリーマと呼ばれる空間局在性を伴う長寿命構造を 駆動し、輸送特性を決めている。これらの空間局在性を伴う構造に関する非線形過 程の定量的議論は従来のフーリエ基底に基づく解析では困難であった。本研究で は、特異値分解と呼ばれる手法により、空間局在性を伴う構造を包含する全ての非 線形過程を系統的に定量化する手法を紹介する。さらに、輸送ダイナミクス解析へ の応用方法についても議論する。

参加者:11名(うち学生(*)5名) 九大:小菅佑輔、辻英一、Moon Chanho、小山一輝*、小林大輝*、西村大輝* 立命館大学:多羅間大輔 京都工芸繊維大学:中島雄太郎* 日本大学:古田原拓実*、高橋芳文*、竹内悠人*、牛腸匠* 第3回セミナー

9.29 (金)

スピーカー:斎藤晴彦(東大)

タイトル:ダイポールによる荷電粒子閉じ込めの進展と電子・陽電子プラズマ計画

アブストラクト:

高 β 状態の安定維持が可能な先進的核融合配位として研究が進められてきたダイポ ールは、リング電流により容易に生成される単純な磁場配位であるが、捕獲された 荷電粒子は諸々の特徴的な挙動を示す。急峻な磁場勾配を持つダイポール磁場中で は、強磁場側への粒子の内向き「拡散」によるプラズマの構造形成が、宇宙と実験 室で共通して観測される。磁力線を横切る径方向輸送を駆動するのは粒子の第三断 熱不変量の非保存化であり、安定構造が形成される過程では低周波揺動が自発的に 発生する。またプラズマ内部に揺動などの外的要因が存在しない場合にも、荷電粒 子の異なる種類の周期運動の結合により、ダイポール磁場中では軸対称な系であり ながら粒子軌道がカオス化する。カオスの効果は、放射線源から供給される反粒子 のダイポール磁場中への入射や閉じ込めにも応用可能である。こうした粒子軌道の 特性や良好な閉じ込め性能、また外部コイル電流のみで軸対称な閉じ込め磁場を生 成可能という特徴から、ダイポールは各種の低エネルギー荷電粒子や新奇なプラズ マの閉じ込めに利用することができる。特に、電子とその反粒子である陽電子から 構成されるペアプラズマは、質量対称性に起因する波動モードの縮退により、通常 のイオン電子系とは異なる集団現象を示すことが予測されている。低エネルギー陽 電子の磁場閉じ込めによるペアプラズマは実現されておらず、その性質の実験的解 明が待たれている。東大 RT-1 やドイツ IPP で実施されてきたダイポール磁場にお ける電子や陽電子の入射閉じ込め研究の進展と、産総研と広島大、核融合研と進め る反物質ペアプラズマ生成計画の現状について報告する。

参加者:11名(うち学生(*)5名) 九大:小菅佑輔、辻英一、Moon Chanho、小山一輝*、小林大輝* 核融合科学研究所:小林達哉、胡文卿* 立命館大学:多羅間大輔 京都工芸繊維大学:河内裕一、中島雄太郎* 東京大学:安立史弥* 第4回セミナー

11.9 (木)

スピーカー:大貫陽平(九大)

タイトル:回転成層流体のトポロジカル指数とバルクーエッジ対応

アブストラクト:

近年の研究で、古典的な流体系に見られる波動現象を、トポロジーの概念を用いて 理解する動きが活発化している。例として Delplace et al. (2017, Science, 358:6366, 1075-1077)は、回転浅水系方程式を調べ、赤道域において大気や海洋に共通して存 在する Kelvin 波と Yanai 波の分散関係の性質が、量子ホール効果との類推によって トポロジカル指数の一種である Chern 数で説明されることを示した。しかし、こう した先行研究はいずれも、二種の流体相の界面に捕捉されて存在する波動モードに は有効であるが、海洋の沿岸 Kelvin 波のような境界に捕捉された波動を議論するに は不十分であった。本研究では、回転成層流体の方程式を対象とし、水平波数ベク トルが構成するリーマン球面上で Chern 数を計算することで、任意の境界条件にお ける捕捉モードの分散関係の性質がトポロジカルに説明されることを示す。

参加者:11名(うち学生(*)4名)

九大:小菅佑輔、長谷川真、徳田悟、Moon Chanho、小山一輝*、徳満優* 核融合科学研究所:小林達哉、堀久美子 立命館大学:多羅間大輔 福岡大学:岩山隆寛 広島大学:島裕輔* 日本大学:佐々木真 東京大学:斎藤晴彦 京都工芸繊維大学:中島雄太郎* 第5回セミナー 12.13(水) スピーカー:多羅間充輔(九大) タイトル:細胞運動のアクティブマター物理学

アブストラクト:

外力がなくとも自ら運動エネルギーを生成して運動するものを総称してアクティブ マターと呼ぶ。その例は多くの生命現象に見られる。実際、細胞の自発運動は発生 などの生命現象で重要な役割を担うことが知られている。本講演では、特に細胞運 動に焦点を当てたアクティブマターのダイナミクスの理論研究に関して紹介した い。

参加者:11名(うち学生(*)2名) 九大:小菅佑輔、辻英一、大貫陽平、Moon Chanho、小山一輝*、小林大輝* 核融合科学研究所:小林達哉、堀久美子 京都大学:稲垣滋 長崎大学:福山隆雄 東京大学:斎藤晴彦 第6回セミナー 12.26(火) スピーカー:堀久美子(核融合研)

タイトル:回転磁気流体のねじれ振動と木星表層変動

アブストラクト:

高速自転する系における磁気流体波・振動の一つに,ねじれ振動(または軸対称ねじ れアルヴェン波)がある(Braginsky 1970).このモードは,地球磁場や自転速度におけ る数年変動の成因として,また,地球深部ダイナモ(または液体鉄コア)内のポロイダ ル磁場強度・構造などを知るための手段として注目され,研究されてきた.一方,同種 の波・振動は,他惑星・天体で励起されていてもよい.我々は,ガス惑星の典型として 木星に注目し,その深部ダイナモ(または金属水素層)における励起や検出の可能性 を検討してきた.その結果,木星深部でもねじれ振動が励起されうること,木星表層大 気で観測された数年周期性がねじれ振動に起因するかもしれないこと,などがわかっ た.その算出方法や仮定を示し,残った課題などを議論する.

参加者:10名(うち学生(*)1名)

九大:小菅佑輔、辻英一、西澤敬之、大貫陽平、Chanho Moon, 森田太智、西村大輝*

核融合科学研究所:小林達哉、堀久美子 福岡大学:政田洋平

共同利用研究集会

第21回トロイダルプラズマ統合コード研究会

21st 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「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21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20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 12 月 21 日 (木) - 22 日 (金) 開催場所:九州大学筑紫キャンパス 応用力学研究所 2 階大会議室 および オンライン 講演数:30 件、参加者数:41 名

3. 研究集会の内容

トロイダルプラズマにおける複合現象の統合モデリングおよびそのシミュレーションの 進展について議論するため研究集会を2日間にわたって開催した。講演30件(研究成果報 告26件、サブクラスター関連4件)の申し込みが集まった。件数は例年と同程度である。 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。このことで遠方の研 究者のオンラインでの参加も可能とした。今回は昨年度に引き続き、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と本 研究会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。また、ロ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(ロ頭)4件、ロ頭発表12件、ポスター発表10件と バランスの良い構成となった。ロ頭発表はZoom、ポスター発表はRemoを利用した。2日 目午後に核融合フォーラムサブクラスターとの合同会合で内外の研究情勢の報告と今後の 研究方針の議論を行った。

研究成果報告はどれも質の高いものであった。今回は核燃焼を見据えた制御や高エネル

301

ギー粒子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進捗状況の概要について紹介した。続いて 古賀はマイクロ波イメージング計測に関する機械学習を用いた取り組みを紹介した。レン ズレスマイクロ波イメージングでは受信信号から実空間上パターンを再構成する必要があ るので、畳み込みニューラルネットワークを用いた機械学習を適用した。手法の有効性を 評価するために、直線プラズマ装置密度揺動シミュレーションの時間発展データを用いた 学習を行い、再構成の信頼度を示した。佐藤はトカマクプラズマのベータ限界を規定する インファーナルモード不安定性について、MHD コードと運動論的 MHD コードの計算結果 比較を行った。磁気レイノルズ数が大きいと線形成長率が小さくなり、運動論的熱イオン の効果がモードの安定化に効く。非線形計算で分布緩和の傾向を見ると、抵抗性インファ ーナルモードにおいて差が顕著で、運動論的モデルではモードの位相のずれが輸送の低減 をもたらすので、圧力緩和が抑制されることがわかった。沼波は磁場閉じ込めプラズマに おける乱流輸送の外挿モデリングに向けた取り組みを紹介した。散逸系における慣性多様 体や場の理論における繰り込み軌道の考えを応用して、プラズマ乱流輸送における解の部 分空間を考察した。時間発展を利用し、さらに時間遅れという新たな変数を導入すること で輸送モデルを改善した。そして多様体構造を利用してモデルの最適化を行った。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。

本多はGOTRESS+コードによる原型炉のコアプラズマ性能評価と実現可能性調査を行った。安定的な収束アルゴリズムを実装した定常輸送ソルバーGOTRESS は燃焼プラズマの 定常状態をより包括的に探索することができる。統合輸送モデル GOTRESS+を JA-DEMO の運転シナリオ開発に適用可能となったので、JA-DEMO の典型的な運転シナリオに規定さ れた目標性能値を満たすことができるかを調べた。

福山は統合コード TASK の進展について、光線追跡法の整備と積分形誘電率による波動 光学的解析の開発、輸送コードと平衡コードの連携等について報告するとともに、ITER 標 準解析コードインターフェース IMAS への対応の現状について報告した。

持永は統合コード TASK を用いて、改善閉じ込めプラズマにおける高 Z 不純物のトロイ ダル回転による遠心力効果について解析した。新古典輸送コード NCLASS の輸送係数に幾 何学係数を導入することで、トロイダル回転が駆動するポロイダル非対称性を考慮したタ ングステン分布の計算を行った。H モードプラズマでは実験結果と良く一致する結果が得 られた。改善閉じ込めシミュレーションでトロイダル回転速度と ITB 位置の依存性につい て解析を行った。

田原は LHD プラズマにおける高エネルギー粒子の分布関数に対するビーム間衝突の影響を、軌道追跡型 5 次元ドリフト運動論方程式ソルバーGNET を用いて解析した。任意の 分布関数による衝突効果を考慮できる拡張版 GNET-NLC を用い、軽水素および重水素 NB 入射下におけるビーム-熱粒子間の D-D 核融合反応による中性子発生率の減衰時間に対す るビーム間衝突の影響を評価した。 佐々木は平均シア流存在下における乱流、帯状流相互作用を理論的に調査した。乱流、 帯状流相互作用はプラズマ特性を支配する重要な機構であり、新古典効果を考えると背景 分布スケールのポロイダルシア流が普遍的に存在する。波動運動論に基づき位相空間シミ ュレーションを行った。

矢木は OpenACC を利用して簡約 MHD コード R5F を GPU へ適用させた。CPU と GPU 間の通信を削減し、1 ノードで 4 GPU を使用する拡張を加えた。計算実行時間は半分以下 となった。このコードを用いて熱・粒子ソースを加えたイオン温度勾配乱流シミュレーションを行った

奴賀は LHD における中性粒子入射パワーに依存する高速イオン閉じ込め悪化について 調査した。重水素を用いた LHD 実験において観測された中性粒子入射パワーに依存する高 速イオンの閉じ込め悪化現象は、不安定性以外の要因で閉じ込めが悪化していると考えら れる。計測結果と TASK3D-a を用いた統合シミュレーションによって、どの程度の閉じ込 め悪化が生じているか評価した。

森下は核融合プラズマの高度な解析・制御を実現するため、統合シミュレーションコー ド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。リアルタイム での観測値に基づいてシステムモデルを最適化しながら、最適な制御入力を推定すること ができる制御システムを開発し、実際に LHD において実装した。

佐藤は将来の核融合炉の実現に向けて課題となるトカマクプラズマの分布制御に対して の先進的な制御手法を検討した。プラズマ分布の制御は電流分布と圧力分布の強い非線形 性などにより、従来の PID 制御のような標準的な制御では対応できないので、制御理論と いう学問的体系からのアプローチについて議論した。

鈴木は LHD 装置において放射崩壊は強い発光を伴ってプラズマからエネルギーを放射 させてしまうので、この発光を捉えたカメラ画像から機械学習を使うことでその特徴を学 習させ予測を行う手法を提案した。高い精度で画像から放電状態を分別し、それを動画に 適用することで予測器として利用することができた。

相羽は ELM 抑制運転である QH-mode の発生条件について、DII-D 装置の実験データを 用いた MHD 安定性の数値解析結果の比較により議論した。プラズマ圧力分布としてはほ ぼ同一のプラズマであっても、イオン温度の違いによるイオン反磁性ドリフト効果の影響 で安定性特性が大きく変わることを明らかにした。

竹本は統合コード TOTAL を用いて、タングステン輸送モデルの妥当性検討のため、輸送計算で得られるタングステン蓄積の空間分布および時間発展の計算値と JT-60U における軟 X 線計測データの比較を行った。

村上は静電および磁場揺動が存在する場合の ECH 高速電子輸送について研究を行って いる。捕捉電子の輸送についてモデル化し、シミュレーション結果と比較した結果につい て述べた。

成田はジャイロ運動論コードによる数値計算から示される水素同位体効果を準線形乱流 輸送モデル DeKANIS に反映させるようモデル化した。改良した DeKANIS を用いて、水素 同位体効果を考慮した統合シミュレーションを実施した。

登田は PLATO トカマク装置において数値解析によって予測されたプラズマ分布を用いたジャイロ運動論的解析を行った。散逸性捕捉電子モードとイオン温度勾配モードが、

Sugama 衝突モデル演算子を用いた際に、不安定化することを予測した。帯状流の乱流に対 する影響について、線形解析と非線形解析結果を検討した。

糟谷はトーラスプラズマの複数種類のシミュレーションデータに対して実験計測模擬を 行う統合的なシミュレーションプラットフォームの開発を行っている。LHD ヘリカルプラ ズマを対象に行った、ドリフト運動論シミュレーションデータを利用した重イオンビーム プローブ計測やジャイロ運動論シミュレーションデータを利用した位相コントラストイメ ージング計測について紹介した。

福永は回転の発生機構として NBI 加熱時の j × B トルクに着目し、NB 入射後に発生 する径方向電流についてプラズマ中の各粒子種が占める割合を流体輸送コード TASK/TX を用いて解析した。荷電分離による径方向電流発生モデルを使用した結果と比較した。

古田原は磁場閉じ込めプラズマにおける突発粒子輸送の解析を行った。磁化直線プラズ マ装置 PANTA で観測された、イオン飽和電流と浮遊電位の時空間発展データを解析対象 とし、多重場特異値分解を行った。各特異値モードからの粒子輸送への寄与を輸送行列と して表現し、対角・非対角成分に分解することで定常輸送と間欠的輸送の時空間構造を抽 出した。

可児は統合コード TOTAL を用いて中性粒子ビーム入射電流駆動に関する計算の高速化 を行った。核融合プラズマ制御における実時間シミュレータは統合コードの延長にあるが、 現状よりも高速な解析が要求されている。モンテカルロ計算に用いられているテスト粒子 数の検討と入射した中性粒子の電離判定を行う計算過程を合理化することによって中性粒 子ビーム入射電流駆動の計算コストの削減を行った。

桑宮は乱流シミュレーションデータを用いて、位相コントラストイメージング PCI による密度揺動計測のシミュレーションを行うコードを開発している。JT-60SA トカマクにおける磁場平衡計算と簡約 MHD コードによる揺動場を組み合わせた解析結果について報告した。

宮本は核融合プラズマにおいて中心密度上昇に有効な内向き粒子流束の生成機構を理解 することが粒子供給の点で必要であるので、トーラスプラズマ端近傍にピークを持つ密度 分布を導入した簡約 MHD コードを用いた乱流シミュレーションを行った。非線形的に維 持された乱流内向き粒子流束が見られており、その流束を維持する非線形機構の評価を行 った.

小山はイオンの圧力勾配が誘起するトロイダル流(平行流)が乱流による輸送を阻害す ることで内部輸送障壁が形成されると考えられているので、平行流と密度勾配が共存する 系にイオンの温度勾配を加えたモードの線形解析の結果を報告した。

ランチタイムを利用して、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実施している。実 施内容についての打ち合わせを行った。

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。今後核融合研究環境の 変化が見込まれるなかでの新しい流れも取り込みつつ、来年度も第22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

12月21日(木)

(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)

- 9:45 10:00 講演 D-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」の実施 状況
- 10:00-10:30 講演 D-2 古賀(兵庫県立大)

Research on a reconstruction method of micro-wave imaging using machine learning 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

10:30-11:00 講演 D-3 佐藤(雅)(核融合研)

Simulation data analysis of nonlinear structures of MHD instabilities in toroidal plasmas 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

11:00-11:30 講演 D-4 沼波(核融合研)

Development of a platform for quantitative understanding of plasma profile formation mechanisms using first-principal simulation, data science, and numerical measurement
 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

- 11:30-12:00 糟谷(九大) discussion 議論(一部関係者のみ)
- 12:00-13:00 昼休み
- 13:00-13:20 会議登録 Registration
- 13:20-13:30 事務連絡 Business announcement

(座長:村上)

13:30-13:55 講演 1-1 本多 (京大)

Assessment and feasibility study of core plasma performance for JA-DEMO using GOTRESS+

13:55-14:20 講演 1-2 福山 (京大)

Progress of integrated code TASK and the development of interface with IMAS

- 14:20 14:40講演 1-3持永 (九大)Effect of toroidal rotation on impurity transport in tokamak improved confinement
- 14:40 14:55 講演 1-4 田原 (京大) The effect of beam-beam coulomb collisions on the energetic particle distribution in LHD

14:55-15:15 集合写真 group photo、休憩 break

(座長:福山)

- 15:15 15:40 講演 1-5 矢木 (量研)
 GPU acceleration of RMHD model and application to particle transport in plasma peripheral
- 15:40 16:05 講演 1-6 奴賀 (核融合研) online Degradation of fast-ion confinement depending on the neutral beam power without EP-driven instability in LHD
- 16:05-16:30 講演 1-7 森下 (京大)

Development of an adaptive predictive control system using data assimilation at LHD

16:30-16:45 講演 1-8 佐藤(真)(総研大)

Study of model based control for tokamak plasma profile

16:45 – 17:00 講演 1-9 鈴木 (総研大) Prediction of radiative collapse by analyzing videos of plasma discharge with CNN in LHD

- 17:00 散会
- 12月22日(金)
- 9:00-10:30 ポスター講演 Poster (online, 開室 start 8:50、閉室 end 12:50)
- 10:30-10:40 休憩

(座長:糟谷)

- 10:40 11:05 講演 2-1 相羽 (量研) online Identification of plasma conditions affecting MHD stability in QH-mode and ELMy H-mode plasmas in DIII-D
- 11:05 11:30 講演 2-2 佐々木 (日大) online

Interaction between turbulence and zonal flows in the presence of mean shear flow

11:30-11:45 講演 2-3 竹本 (名古屋大) online

Comparison of W spatial distribution and time evolution by impurity transport calculation with soft X-ray measurement data

(Session Leader: 村上)

- 11:45-12:05 議論 Discussion
- 12:05-12:10 事務連絡 Business announcement
- 12:10-13:30 昼休み Lunch break

(ワークショップ「不純物輸送」 Lunch time workshop "Impurity transport"
12:15-13:00 林 (QST)、藤田 (名大)、糟谷 (九大) online
昨年に続く共同研究作業会を昼休みに開催します、関係者のみによる集まりです)

(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)

13:30-13:40 林 (QST)

連絡事項

- 13:40 14:10 宮戸(QST) IFERC 計算機シミュレーションセンターの現状報告
- 14:10 14:40 横山(核融合研)ITER に於ける統合モデリング活動の報告
- 14:40 15:10 若月 (QST)ITPA 統合運転シナリオグループ活動報告
- 15:10-15:30 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
- 15:30 16:00 林 (QST) 今後の予定の議論

16:00 散会

Poster number

PA-1 村上定義 (京大) S. Murakami

Modeling of ECH supra-thermal electron transport in the presence of magnetic and electrostatic fluctuations

PA-2 成田絵美 (京大) E. Narita

Introduction of hydrogen isotope effects to a turbulent transport model DeKANIS and its application to integrated simulations

PA-3 登田慎一郎 (核融合研) S. Toda Research of turbulent transport due to dissipative trapped electron mode in tokamak plasmas PA-4 糟谷直宏 (九大) N. Kasuya

Development of integrated turbulence diagnostic simulator and its application to torus device measurement

PA-5 福永龍平 (京大) R. Fukunaga

Verification of charge separation model in generation of radial current with multi-fluid transport code TASK/TX

PA-6 古田原拓実 (日大) T. Kodahara

Extraction of abrupt turbulence driven particle transport using multi-field SVD

PA-7 可児和寿 (名大) K. Kani

Optimizations of NB deposition calculations in the integrated code

PA-8 桑宮幸佑 (九大) K. Kuwamiya

Simulation of PCI experimental diagnostic for density fluctuations in tokamak plasmas

PA-9 宮本琉耶 (九大) R. Miyamoto

Evaluation of nonlinear mechanism to induce inward turbulent particle fluxes in tokamaks PA-10 小山一輝 (九大) K. Oyama

Analysis of parallel flow shear driven mode including effect of finite ion temperature gradient

氏名	所属	氏名	所属
林 伸彦	量研機構	滝塚 知典	阪大
矢木雅敏	量研機構	星野一生	慶大
相羽信行	量研機構	古賀麻由子	兵庫県立大
矢本昌平	量研機構	村上定義	京大
宮戸直亮	量研機構	本多 充	京大
若月琢馬	量研機構	福山 淳	京大
杉山翔太	量研機構	成田絵美	京大
横山雅之	核融合研	森下侑哉	京大
沼波政倫	核融合研	田原康祐	京大
登田慎一郎	核融合研	福永龍平	京大
佐藤雅彦	核融合研	打田正樹	京大エネ
奴賀秀男	核融合研	山田琢磨	九大
佐藤真紀	総研大	糟谷直宏	九大
鈴木優也	総研大	小菅佑輔	九大
藤田隆明	名大	西澤敬之	九大
竹本壮汰	名大	持永祥汰	九大
可児和寿	名大	小山一輝	九大
御手洗 修	東海大	桑宮幸佑	九大
宮前健人	東大	宮本琉耶	九大
佐々木真	日大	山口貴大	九大
古田原拓実	日大		

5. 参加者リスト

1

研究集会「整形外科と応用力学の融合~予防医学としての骨折力学の確立~」

横浜市立大学整形外科 稲葉 裕

1. 研究集会の目的

超高齢社会を迎えた我が国において、骨粗鬆症に罹患した高齢者の骨折は社会的問題となってい る。骨折した高齢者はそのまま寝たきりの状態になることも多く、正常な日常生活が送れない状態 が続いてしまうと、介護や経済的負担等様々な問題が生じてくる。一方、骨折の危険性は臨床的に は骨密度で評価されることが多いが、平均的に評価される骨密度では正確に骨折危険性を評価する ことはできない。骨折の危険性は、対象とする部位の骨密度分布や構造と形状、さらには負荷に対 する変形と破壊という力学的検討を加えて初めて高精度での評価が可能となると考えられるが、そ のような観点からの骨折危険性評価は皆無であるのが現状である。そこで本研究集会では、骨折を 研究する整形外科学と生体力学の研究者が一堂に会し、「骨折力学の確立」をテーマとして、基礎か ら応用まで最新の研究成果を発表し議論することを目的としている。

2. 研究集会の概要

本研究集会は、「骨折力学」とその臨床応用をテーマとした第1回目の研究集会であり、2023年 7月29日(土)にJR博多シティ会議室10階大会議室を会場として実施された。協賛として、九州 大学医用工学研究センターと日本臨床バイオメカニクス学会に、協力として株式会社計算力学研究 センターにご協力頂いた。実行委員と講演者を含む参加者の合計は43名であり、そのうち27名が 整形外科医であり、8名が医療機器メーカーからの参加であった。

午前中のセッションでは、最初に「骨折力学」の提唱者である九大応力研の東藤准教授から「骨 折力学の提言」として、骨折力学の基礎と応用について紹介があった。次いで産業医科大学整形外 科と横浜市立大学整形外科より、股関節や脊椎の骨折および骨粗鬆症との関連に関する話題提供が あった。午後のセッションの最初の講演は、骨折力学の臨床応用を実現する上で必要不可欠な骨解 析ソフトウェアの開発を行っている RCCM より、骨折のシミュレーション法について説明がなさ れた。それ以降は応用例として、上腕骨、前腕骨、脊椎、脛骨、足根骨、大腿骨等の骨折問題へ骨 折シミュレーション法を応用して得られた研究成果について発表があり、活発な質疑応答が行われ た。

「骨折力学」に基づくシミュレーション法の基礎は、いくつかの工学理論に基づく高度な工学的 内容であるが、その適用対象となる問題は、高度に医学的(整形外科学的)な内容であるために、 整形外科医と工学者が連携して共同研究を進めることで、初めて有用な成果が得られるであろう。 次年度はより臨床に則した内容で第2回目を実施する予定であり、医工連携を代表するテーマとし て益々の発展が期待される。

<u>3. プログラム</u>

9:40 開会挨拶 横浜市大整形外科・稲葉 裕
9:50-10:00 九州大学応用力学研究所・東藤 貢 「骨折力学の提言」
セッション1 骨折の基礎と臨床
1) 10:00-10:30 産業医大整形外科・塚本 学 「骨粗鬆症による骨微細構造変化」
2) 10:30-11:00 横浜市立大学整形外科・池裕之 「人工股関節周囲骨折について」
3) 11:00-11:30 横浜市大整形外科・伊藤陽平 「骨粗鬆症性椎体骨折の手術治療」
昼食休憩(80分)
セッション2 FEAによる骨折解析1
4) 12:50-13:20 RCCM・三又秀行 「有限要素解析における骨折とは?」

- 5) 13:20-13:50 仙台市立病院整形外科・佐野博高

「上腕骨近位端骨折の発生機序と手術法の検討」

- 6) 13:50-14:20 千葉大学整形外科・松浦佑介
 - 「前腕骨骨折の Plate 固定」
- 7) 14:20-14:50 佐賀大学整形外科・小林孝巨

「脊椎外科領域の有限要素解析ー佐賀大学整形外科のこれまでの取り組み」

8) 14:50-15:20 龍谷大学機械工学·田原大輔

「骨粗鬆症脊椎・多椎体固定術の FEA」

休憩(10分)

- セッション2 FEA による骨折解析 2
- 9) 15:30-16:00 京都大学整形外科·森田悠吾

「内側開大式高位脛骨骨切り術中ヒンジ部骨折の三次元的予測分析」

10) 16:00-16:30 健和会大手町病院・坪根 徹

「有限要素法による足根骨骨折発生機序の理解と予防医学への応用」

11) 16:30-17:00 福岡大学整形外科・藤田 潤

「FEA を用いた大腿骨頭軟骨下脆弱性骨折を発生させる因子の検討」

12) 17:00-17:30 九州大学応用力学研究所·東藤 貢

「繰り返し荷重下での大腿骨の骨折解析のこころみ」

17:30 閉会挨拶 九州大学応用力学研究所・東藤 貢

<u>4. 参加者リスト</u>

■ 実行委員&講演者

番号	氏名	所属	役割
1	稲葉 裕	横浜市立大学整形外科	代表者
2	池 裕之	横浜市立大学整形外科	実行委員、講演者
3	原 直樹	計算力学研究センター	実行委員
4	塚本 学	産業医科大学整形外科	講演者
5	伊藤陽平	横浜市立大学整形外科	講演者
6	三又秀行	計算力学研究センター	講演者
7	佐野博高	仙台市立病院整形外科	講演者
8	松浦佑介	千葉大学整形外科	講演者
9	小林孝巨	佐賀大学整形外科	講演者
10	田原大輔	龍谷大学工学部	講演者
11	森田悠吾	京都大学整形外科	講演者
12	坪根 徹	関門医療センター整形外科	講演者
13	藤田 潤	福岡大学整形外科	講演者
14	東藤 貢	九州大学応用力学研究所	世話人、講演者

一般参加

登録番号	氏名	所属	
1	安達和彦	中部大学工学部機械工学科	一般参加
2	遠藤大輔	長崎大学大学院医歯薬学総合研究科肉眼解剖 学分野	一般参加
3	赤瀬広弥	大分大学医学部付属病院整形外科	一般参加
4	仲宗根 哲	琉球大学整形外科	一般参加
5	伊藝尚弘	琉球大学整形外科	一般参加
6	國吉さくら	琉球大学整形外科	一般参加
7	猿賀達郎	弘前大学医学部附属病院整形外科	一般参加
8	井上貴之	帝人ナカシマメディカル株式会社開発部	一般参加
9	田野敦寛	横浜市立みなと赤十字病院整形外科	一般参加
10	田中健誠	大分大学医学部医学科人工関節学講座	一般参加
11	坂本幸成	九州大学整形外科	一般参加
12	細山嗣晃	大分大学整形外科	一般参加
13	守屋真我	岡山医療センター	一般参加
14	松田昌悟	大分大学医学部付属病院	一般参加

15	佐藤太一	東京電機大学工学部先端機械工学科	一般参加
16	野田光昭	西病院整形外科	一般参加
17	後藤昭一	LandTrading LLC	一般参加
18	堀口智弘	帝人ナカシマメディカル株式会社	一般参加
19	徳永 由太	株式会社テラバイト筋骨格技術課	一般参加
20	今田貴章	浜松医科大学整形外科教室	一般参加
21	佐原 輝	横浜市立大学整形外科	一般参加
22	渋田祐太朗	大分大学医学部附属病院	一般参加
23	三浦鴻太郎	弘前大学大学院理工学研究科	一般参加
24	坪内 優太	令和健康科学大学リハビリテーション学部 理学療法学科	一般参加
25	棚橋 一希	メイラ株式会社メディカル事業部 技術グループ	一般参加
26	中牟田侑昌	崇城大学工学部機械工学科	一般参加
27	金﨑 彰三	大分大学医学部附属病院整形外科	一般参加
28	川岸 正周	大分大学医学部附属病院整形外科	一般参加
29	高橋広幸	帝人ナカシマメディカル株式会社	一般参加

機械学習とトモグラフィーを用いたトカマク配位形成の 物理メカニズムの解明とその制御

東京工業大学 宗近 洸洋

1 背景・目的

核融合の分野では、トカマク型の国際熱核融合実験炉 ITERやJT-60SA(日本)が建設中であり、発 電実証を行うための原型炉としてトカマク装置の概念設計が世界的に盛んに行われている。トカマク配位 を形成するには、装置中央に置かれたソレノイドコイルによって発生させる周回電圧によりプラズマ電流 を駆動する必要がある。一方、建設直後の装置では電流が立ち上りにくく、トカマク配位を形成するため に長い時間を費やすことが多い。現在、前述のITERやJT60SAでは、ともに周回電場の値が低いため、 効率的な電流立ち上げの方法が検討されている。この問題の解決には、プラズマ電流立ち上げに関する物 理、特に低周回電場での電流立ち上げの物理的理解が不可欠である。しかし、トカマク配位形成の研究は 数も少なく、十分な理解が得られていないため、その理解は喫緊の重要課題である。本研究では、九州大 学応用力学研究所のPLATOトカマクにおいて、高速可視光カメラとインテンシファイアを用いてトカマ ク配位形成時のプラズマを観測し、最先端のトモグラフィー解析を通してトカマク配位形成の物理機構を 探求する。PLATOでは周回電場がITERのそれに近い。そのため、PLATOは低周回電場での電流立ち 上げに関しての希少な画像観測データなどを得ることができる。また、比較的高い周回電場を用いる東京 工業大学の小型トカマク装置PHiXと比較することでトカマク配位形成の物理機構の理解を深めることが できる。

2 実験方法

本研究における実験では、可視光高速カメラとイメージインテンシファイアを用いて、PLATOのト カマクプラズマ放電を高速撮像し、マクロ的なプラズマの成長過程を観測する。実験に用いた高速カメ ラはナックイメージテクノロジー社製のMEMRECAM ACS-1 M60、イメージインテンシファイアは Invisible社製のUVi(Model 1850-10-S25)、レンズはSIGMA社製 8-16mm 広角レンズであり、それら を組み合わせてトーラス接線方向に視野を持つように設置した(図1)。撮像速度(サンプリングレート)は 100 kHzである。

トカマク放電立ち上げの方式として、①Trapped Particle Confinement (TPC)と、②Field Null Confinement (FNC)の2つの方式を用いて、トカマク配位形成の過程を観測した。また、TPCに関しては、途中でコンデンサー電源の追加磁束を加えることのによるトカマクプラズマの成長過程についての実験③も行った。FNC実験に関しては、高強度の発光が予想されたため、インテンシファイアを取り外しての撮影を行った。

1

313



図1: 可視光撮像実験において、高速カメラ・インテンシファイア・レンズを組み合わせた計測器の写真(a)、カメラ 視野のシミュレーション画像(b)、そのときのカメラ視野範囲を青い領域で示し、それをトカマク装置上部から見た 図(c)、そして、実際の撮影画像(d)を表す。

3 実験結果・考察

3.1 TPC放電とFNC放電の比較

まずはshot#7195のTPC放電①とshot#7216のFNC放電②の結果を比較する。図2に各時刻における 撮像画像の積分値の時間変化を示す。②では、インテンシファイアを用いていないため、①に比べ全体 の光量がかなり低くなっている。光量の時間変化としては、TPC放電の方が光量の立ち上がりが早いが、 一方でFNC放電では光量がゆるやかに増加していることがわかる。図3にて、各放電における撮像画像を 比較すると、TPC放電では放電開始から200 µs程度で、真空容器上側で発光分布が大きく成長している。 一方、FNC放電では放電開始後、真空容器下側付近から発光が増大していることがわかる。FNC放電の 場合、磁場強度が低いNull点領域から放電が開始されるため、この領域が真空容器下側に位置しているの だと予想される。より、正確には、コイル電流値から真空磁場の分布を推定し、それに基づいて放電の開 始位置を特定することが必要である。

3.2 TPC放電の追加磁束実験

次に、shot#7195のTPC放電①とそれに追加磁束を加えたshot#7192のTPC放電③の結果を比較す る。図4に各時刻における撮像画像の積分値の時間変化を示す。③では、追加磁束を加えたことにより、 放電の後半部分から大幅に光量が増加していることがわかる。図5の高速カメラによる撮像結果によると、



図2: 各時刻における撮像画像の積分値の時間変化。点線は図3の撮像画像の時刻に対応る。



図3: shot#7195とshot#7216の高速カメラ撮像結果。各フレーム時刻は図2の点線位置に対応する。

追加磁束を加えた放電③では、1.7 ms付近から大半径内側にピークした発光が観測されており、時間が経 過するにつれて発光分布が真空容器上側にて大きく成長していることがわかる。その後、大半径外側に発 光分布が移動し、消滅していることがわかる。初期にTPC放電によって既に閉磁気面は形成されている と考えられるが、追加磁束を加えることで内側にてピークした発光が観測されていることから、閉磁気面 の分布は大きく変化していると考えられる。より詳細な磁気面の形状解析を行うためには、発光分布だけ でなく磁気計測による磁気面再構成手法が必要となる。



図4:各時刻における撮像画像の積分値の時間変化。点線は図5の撮像画像の時刻に対応る。



図5: shot#7195とshot#7192の高速カメラ撮像結果。各フレーム時刻は図4の点線位置に対応する。

4 今後の課題

本研究において、PLATOトカマクのプラズマ放電の高速撮像結果を示した。撮像結果はカメラ視野方 向における積分値であるため、より正確なプラズマの位置・形状解析を行うにはポロイダル断面図での評 価が必要である。これは今後、トモグラフィー手法を課すことによるプラズマ発光断面の再構成を行うこ とで解決しうる事柄である。この時、可視光発光であるため、壁からの反射光を考慮した再構成が必要で ある。この点は、PHiXにおける先行研究にて既に行われているため、PLATOにおいても同様の手法を 適用することで、より詳細なプラズマ形状の解析が可能となる。また、磁場分布についても今後、磁気計 測等を用いて解析を行うことで、プラズマ発光と両者の関係を明らかにすることができる。このような解 析を行うことで、トカマク配位形成の物理機構の理解をより深めることができると考えられる。

対馬暖流の中・長期変動とその要因

東京大学大気海洋研究所 矢部いつか

1. 背景

亜熱帯循環由来の温暖な黒潮を起源とする対馬暖流は、マイワシなどの水産有用種の成長・生残な好 適な環境を日本海南部にもたらす。また、対馬海峡から流入する黒潮水は日本海における最大の栄養塩 供給源であり、日本海内部の基礎生産を支える(Onitsuka and Yanagi, 2005; Kodama et al., 2015)。一 方で、栄養塩濃度は水深とともに増加するため、日本海内部の中深層にも大量の栄養塩が存在する。近 年の物理モデルと生態系モデルを組み合わせた数値実験によると、沖合ほど、日本海内部の鉛直的な栄 養塩供給の割合が高いことが示唆された(Shibano et al., 2019)。冬季には、海面冷却と強い季節風によ る深い鉛直対流が中層の栄養塩を有光層に供給するものの、とくに栄養塩が乏しい夏季~秋季の混合プ ロセスは明らかとなっていない。

沖合域で中深層の栄養塩を有光層にもたらす水塊混合プロセスとして、①フロント域に発生する湧昇 流、②渦やフロントの影響を受けた近慣性内部波の砕波、③海流と海底地形の相互作用による鉛直混合・ 湧昇が考えられる。いずれのプロセスにも対馬暖流および対馬暖流が日本海内部に作り出すフロント構 造が重要となる。本研究の最終的なゴールは、日本海南部における極前線・対馬暖流や関連する渦構造 を介した水塊混合を明らかにすることである。日本海内部の物質循環や生態系変化の理解には対馬暖流 と関連する日本海内部での混合に関する理解が欠かせない。半閉鎖的な日本海では、すでに温暖化の影 響による水温上昇や深層水形成量の減少などが観測データから示されている(Gamo et al., 2014; Senjyu, 2022)。また、対馬海峡からの流入量は増加トレンドにある(Kida et al., 2020)。そこで本研究では、長 期的な海洋観測データに基づき日本海内部の栄養塩分布の海域間の違いと栄養塩の供給源を明らかに すること、対馬暖流のフロント域に着目した海洋観測データに基づき乱流強度を調べることを目的とす る。

2. データ

気象庁が公開している海洋気象観測船による海洋・海上気象観測資料を使用した(https:// www.data.jma.go.jp/kaiyou/db/vessel_obs/data-report/html/ship/ship.php?year=2020&season=fall# kisetsu)。日本海では毎年 9~11 月に海洋観測が実施されており、若狭湾口の越前岬から大和堆を結ぶ PM ラインと呼ばれる定線も存在する。解析には9年間(2012 年から 2020 年)の CTD データ(水温、 塩分、水深)および採水サンプルを用いた栄養塩分析の結果を使用した。さらに、対馬暖流周辺の乱流 強度を調べるため、2019 年から 2021 年に実施した対馬暖流のフロントを横断する複数回の CTD・乱 流観測のデータを使用した。

3. 結果

(1) 日本海内部の栄養塩プロファイル

日本海を南西部(40°N以南、136°E以西)、南東部(40°N以南、136°E以西)、北部(40°N以北)の 3 海域に分けて平均した硝酸塩の鉛直プロファイルを図1に示す。23.6-27.2 σ_θの全密度帯で南部の硝 酸塩濃度は北部よりも高い(図1a)。極前線周辺では、等密度面混合により北部の低塩分・高 DO の表 層水が南部の中層に潜り込むことが知られているが、等密度面混合では、北部から南部に栄養塩を供給 しない。なお、水深を基準とした栄養塩分布はいずれの海域においても水深とともに増加し、南部より も北部で濃度が高い(図1b)。つまり、日本海南部の有光層に栄養塩を供給するには、密度面を横切る 水平・鉛直混合が必要となる。

日本海内部の基礎生産を支える栄養塩の供給源が黒潮である根拠の一つが硝酸塩極大を持つ水深(密度)が対馬海峡の水深と概ね一致するという点である(Kodama et al., 2015)。対馬暖流の入口に近い日本海南西部では 25.0 σ_t付近に硝酸塩濃度の極大値を持つのに対し、日本海北部および南東部では、密度の増加に伴い硝酸塩濃度は上昇する(図 1a)。黒潮由来の栄養塩の大半が南西部で消費され、南東部

ではその影響が小さくなっていることが示唆された。



図 1: 硝酸塩と亜硝酸塩の海域別の平均プロファイル。縦軸はそれぞれ(a)密度と(b)圧力であり、平均 値を太線、1標準偏差の範囲をハッチで示す。

(2)気象擾乱通過後の栄養塩分布と水塊混合

2008 年 10 月の PM ラインに沿った水温、塩分、硝酸塩の鉛直断面図を図2に示す。水深 50-150 m 付近には黒潮由来の高温・高塩分の水塊が、水深 50 m 以浅には高塩・低塩分の長江希釈水が分布する (図 2a,b)。硝酸塩濃度は 38.5°N の水深 50 m 付近で局所的に高い(~10 µmol kg⁻¹、図 2c)。観測直前 には低気圧が日本海を縦断しており、人工衛星で観測した海洋観測後の海面クロロフィル分布でも、パ ッチ状にクロロフィル濃度が高くなっていた。対馬暖流が形成するフロント域や高気圧性渦の縁辺では、 相対的に強い乱流混合が観測されており、近慣性内部波の混合に寄与することが示されている (Kawaguchi et al., 2021)。2008 年以外にも同様の事例を複数捉えられた。これらの結果は、近慣性内 部波が水塊混合のみならず基礎生産に影響を与え得る下層からの栄養塩供給にも寄与することを示唆 する。



図 2: 2008 年 10 月の PM ラインに沿った(a)水温、(b)塩分、(c)硝酸塩の鉛直断面図。いずれの図も等 値線は密度を示す。

(3) 対馬暖流のフロント域の乱流強度と拡散係数

次に、能登半島の西側から大和堆を結ぶ観測ラインで 2020 年 8 月に実施した乱流観測の結果を図 3 に示す。観測時には 36.7°N 付近に対馬暖流の沿岸分枝が、37.6°N 付近に沖合分枝が流れていた。パッチ状ではあるものの、乱流逸散率が周囲よりも 2-3 桁大きい領域~O(10⁻⁷ W kg⁻¹)が 37.5°N 付近の水深 200-300 m に存在した。対馬暖流由来の高塩分水の底部に位置する。乱流逸散率から算出した鉛直拡散 係数は O(10⁻³ m² s⁻¹)程度であり、沖合域としては比較的大きな値を示した。2019 年、2021 年に実施し

た観測でも同様に対馬暖流水もしくはその下部の密度帯で乱流逸散率が周囲よりも高くなっており、局所的ではあるものの、継続的な強い鉛直混合と下層からの栄養塩供給が示唆される。今後は算出した拡 散係数と同航海で実施した栄養塩サンプルの分析結果を組み合わせることで栄養塩フラックスを見積 もる予定である。



図 3: 2020 年 8 月の YR ラインの塩分と乱流逸散率。いずれの図も等値線は密度を示す。

4. まとめと今後の課題

日本海内部での水塊混合・物質循環を理解するための第一歩として、日本海南部の栄養塩循環を調べ た。対馬海峡に近い日本海南西部では黒潮由来と言われる栄養塩極大が明瞭であるものの、日本海南東 部および北部ではその影響が小さくなることが密度平均した栄養塩分布から明らかとなった。また、密 度平均した栄養塩濃度は日本海北部よりも南部で高いため、等密度面混合では北部から南部への栄養塩 供給は起こり得ない。そのため、密度面を横切る水平・鉛直混合が栄養塩の有光層への供給に必要とな る。対馬暖流水およびその底部では局所的に強い乱流が観測されており、下層からの栄養塩供給の重要 性が示唆される。今後は、硝酸塩センサーを用いた鉛直解像度の細かい観測と乱流観測を組み合わせる ことで硝酸塩フラックスを見積もり、対馬海峡からの栄養塩流入量との比較することで、下層からの栄 養塩供給の重要性を評価する。

5. 研究組織

東京大学大気海洋研究所 矢部いつか(研究代表者) 国立研究開発法人 水産研究・教育機構 和川拓(研究協力者) 九州大学応用力学研究所 木田新一郎(所内世話人)

参考文献

- Onitsuka, G., and T., Yanagi (2005), Differences in Ecosystem Dynamics between the Northern and Southern Parts of the Japan Sea: Analyses with Two Ecosystem Models. J. Oceanogr, Vol. 61, pp. 415 to 433.
- [2] Kodama, T., H. Morimoto, Y. Igeta, and T. Ichikawa (2015), Macroscale-wide nutrient inversions in the subsurface layer of the Japan Sea during summer, J. Geophys. Res. Oceans, 120, 7476–7492, doi:10.1002/2015JC010845.
- [3] Shibanoa, R., A., Morimoto, K., Takayama, T., Takikawa, M. Ito (2019), Response of lower trophic ecosystem in the Japan Sea to horizontal nutrient flux change through the Tsushima Strait. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 229, 106386, https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.106386.
- [4] Kawaguchi, Y., T. Wagawa, I., Yabe, D., Ito, T. Senjyu, S. Itoh, and Y. Igeta (2021), Mesoscaledependent near-inertial internal waves and microscale turbulence in the Tsushima Warm Current. J. Oceanogr. 77, 155–171.
- [5] Gamo, T., et al. Monogr. Environ. Earth Planets 2, 1 (2014)
- [6] Senjyu, T. (2022), Changes in Mid-Depth Water Mass Ventilation in the Japan Sea Deduced From Long-Term Spatiotemporal Variations of Warming Trends. Front. Mar. Sci. 8:766042. doi: 10.3389 /fmars.2021.766042.
- [7] Kida, S., K., Takayama, Y. N., Sasaki, H. Matsuura, N. Hirose (2020), Increasing trend in Japan Sea Throughflow transport. J. Oceanogr., doi:10.1007/s10872-020-00563-5.