

共同利用研究成果報告

第 28 号



令和6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27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も構築しています。これにより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、データの種類ごとに範囲を設定して公開いたします。分野融合室を2023年12月に立ち上げ、異分野融合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、2024年度に受け入れた共同研究者の人数は総計900名を超え、外国人研究者の数も91名でした。この報告書に示しますように、2024年度は、特定研究20件を含む総計で112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、29件（この29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33件）が実施され、研究所の国際化に大いに貢献しています。この中で国際ワークショップが5件開催され、国内外の研究者による活発な議論が行われました。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11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、6名の採用（3名新規）を実施し、また博士課程学生SRAを2名、博士課程学生と博士課程に進学予定の修士課程学生RAを11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、2025年6月20日に開催される「RIAM フォーラム 2025」でも報告されます。またこの報告書は、応用力学研究所のホームページ（<https://www.riam.kyushu-u.ac.jp>）にも掲載されます。

九州大学は2004年に国立大学法人として文部科学省から独立しました。応用力学研究所は、法人化後も引き続き、「力学に関する学理及びその応用の研究」を目的とする研究所として位置づけられ、重要な役割を与えられています。また応用力学研究所は、2010年4月、文部科学省により応用力学共同利用・共同研究拠点の認定を受けました。2021年10月29日には、応用力学共同研究拠点の期末評価の通知があり、無事2022年4月1日から2028年3月31日までの継続が認められることとなりました。応用力学研究所は、これからも地球環境力学分野、核融合力学分野、新エネルギー力学分野とこれらの複数の分野にまたがる分野融合の研究領域において、国際的に高い水準の研究成果を挙げるとともに、21世紀の人類にとって極めて重要な課題となっている地球環境問題とエネルギー問題の解決に向けた研究に、理学と工学の両面から取り組んでいきます。同時に、全国共同利用研究を基にして、全国および世界の研究者と連携し、力学とその応用の分野における世界的研究拠点となることを目指します。これからも応用力学研究所が一層発展し、日本のみならず世界の学術研究の重要な拠点であり続けることができますように、全国の研究者の方々からのより一層のご支援・ご指導・ご鞭撻のほどよろしくお願いいたします。

2025 年 3 月

九州大学応用力学研究所

所 長 寒川 義裕

令和6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		
2024S1-IC-1	サブ テ ー マ	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	13
2024S1-IC-2		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	14
2024S1-IC-3		Quasiresonances in geophysical flows	CNRS ENS de Lyon VENAILLE Antoine	大貫 陽平 1名	16
2024S1-IC-4		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	20
2024S1-IC-5		Small-scale instabilities in rotating and stratified flows	Indian Institute of Technology Madras MATHUR Manikandan	大貫 陽平 2名	21

分野融合					
No.	研究課題		代表者名	所内世話人 協力者数	頁
特定研究 2					
—	計測・シミュレーション・モデリングを組み合わせた 統合診断		統括責任者 糟谷 直宏		
2024S2-CD-1	サブ テ ー マ	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	糟谷 直宏 2 名	26
2024S2-CD-2		データ駆動科学的手法を用いた非平衡開放系の時 空間ダイナミクス研究	日本大学 佐々木 真	糟谷 直宏 6 名	28
2024S2-CD-3		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	29
2024S2-CD-4		プラズマ分布形成の定量的理解に向けた第一原理 シミュレーションとデータ科学、数値計測による 基盤開発	核融合科学研究所 沼波 政倫	糟谷 直宏 2 名	30
2024S2-CD-5		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	31
2024S2-CD-6		直線磁化プラズマにおける乱流構造の解析	九州大学 山田 琢磨	文 賛鎬 3 名	32
特定研究 3					
—	実験・計測科学と計算科学の融合による新しい研究分 野の開拓		統括責任者 弓本 桂也 小菅 佑輔 寒川 義裕		
2024S3-CD-1	サブ テ ー マ	データ科学的アプローチによる設計可能な材料創 製への計算手法の検討	久留米工業高等専門学校 小袋 由貴	寒川 義裕 4 名	35
2024S3-CD-2		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 6 名	37
2024S3-CD-3		窒化物半導体超格子界面における原子拡散機構の 解析	和歌山大学 小田 将人	寒川 義裕 1 名	38
2024S3-CD-4		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 4 名	39
特定研究 4					
—	IoTとビッグデータを活用した情報処理プロセスの自 動化と最適化		統括責任者 長谷川 真 朱 洪忠		
2024S4-CD-1	サブ テ ー マ	ピストンモード流体共振を予測する機械学習モデ ルの開発	日本大学 譚 雷	朱 洪忠 2 名	42
2024S4-CD-2		ハイブリッドサイクルを用いた海洋温度差発電プ ラントの性能評価機能を有する遠隔監視システム の開発	佐賀大学 松田 吉隆	朱 洪忠 7 名	43
2024S4-CD-3		トムソン散乱計測のためのアライメント自動化	東京大学 江尻 晶	長谷川 真 2 名	44
2024S4-CD-4		クラウドを利用したQUEST装置実験のデータ解析環 境構築	核融合科学研究所 江本 雅彦	長谷川 真 1 名	45
2024S4-CD-5		QUEST装置におけるCHIプラズマ現象解明のための 解析システムの開発	海上保安大学校 黒田 賢剛	長谷川 真 1 名	47

令和6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				
2024CR-CD-1	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	48
2024CR-CD-2	粉体ターゲットプラズマプロセスにおけるターゲットと薄膜の関連	佐世保工業高等専門学校 川崎 仁晴	花田 和明 3名	50
2024CR-CD-3	金属間化合物中の空孔型欠陥への水素原子の捕獲挙動に関する研究	大阪公立大学 堀 史説	大澤 一人 4名	52
2024CR-CD-4	波成乱流の水槽実験	京都大学 吉川 裕	胡 長洪 2名	54

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				
2024CR-A0-1	高低差観測におけるエアロゾルの光学的特性の変動	富山大学 青木 一真	竹村 俊彦 2名	56
2024CR-A0-2	力学的・統計的モデルによる熱帯海盆間相互作用の統合的理解	海洋研究開発機構 Ingo Richter	時長 宏樹 4名	57
2024CR-A0-3	表面波・内部波の非線形性及び分散性に対する地形の影響に関する数値解析的研究	鹿児島大学 柿沼 太郎	辻 英一 2名	59
2024CR-A0-4	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	61
2024CR-A0-5	山岳での直接・遠隔測定を用いた霧粒の特性把握	長崎大学 河本 和明	岡本 創 2名	62
2024CR-A0-6	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	東京大学 木口 雅司	江口 菜穂 3名	63
2024CR-A0-7	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 栗林 正俊	原 由香里 1名	65
2024CR-A0-8	北極海表層流の海洋表層ドリフターと海面高度計による推定	東京大学 小平 翼	市川 香 1名	66
2024CR-A0-9	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 根田 昌典	市川 香 1名	69
2024CR-A0-10	高スペクトル分解ライダー技術を用いたエアロゾル高度分布観測システムの構築	国立環境研究所 神 慶孝	弓本 桂也 3名	71
2024CR-A0-11	海洋環境シミュレーション水槽とループ法を使用した吹送距離延長法の確立	兵庫県立大学 高垣 直尚	磯辺 篤彦 17名	72
2024CR-A0-12	東シナ海から日本海の時況変動を把握するための観測研究	長崎大学 滝川 哲太郎	千手 智晴 7名	75
2024CR-A0-13	LESモデルを用いた複雑地表面上での鉛直運動と雲形成過程の解析	京都大学 竹見 哲也	岡本 創 1名	76
2024CR-A0-14	陸域から外洋への水・栄養輸送に対する気候変動の影響	富山大学 張 勁	遠藤 貴洋 4名	77
2024CR-A0-15	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	79
2024CR-A0-16	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	福井県立大学 渡慶次 力	千手 智晴 12名	80
2024CR-A0-17	東アジアモンスーンが励起するマルチスケール黒潮変動	鹿児島大学 中村 啓彦	遠藤 貴洋 6名	82
2024CR-A0-18	地球衛星観測ミッションEarthCAREにおけるエアロゾル・雲プロダクト推定アルゴリズムの高度化と地上検証に資する観測研究	国立環境研究所 西澤 智明	岡本 創 3名	86
2024CR-A0-19	HFレーダと人工衛星による沿岸海域諸現象の検知と構造の解明	神戸大学 林 美鶴	磯辺 篤彦 2名	87
2024CR-A0-20	等密度面モデルを用いた陸域海洋統合物質循環モデルの構築	京都大学 山敷 庸亮	木田 新一郎 2名	90
2024CR-A0-21	Tidal impacts on winter mixed layer formation over the Bering Sea by numerical simulation	Japan Agency for Marine- Earth Science and Technology SHU Hung-Wei	木田 新一郎 1名	94
2024CR-A0-22	日本周辺海域を対象とした潮流シミュレーションモデルの作成	東京大学 松村 義正	広瀬 直毅 4名	96

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				
2024CR-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	渡邊 英雄 1 名	101
2024CR-FP-2	簡約化ドリフトMHDモデルによる捕捉粒子モード駆動輸送シミュレーション研究	量子科学技術研究開発機構 矢木 雅敏	糟谷 直宏 3 名	103
2024CR-FP-3	誘電体バリア放電式大気圧プラズマを応用した芸術作品の開発	九州大学 栗山 斉	小菅 佑輔 5 名	104
2024CR-FP-4	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	渡邊 英雄 2 名	106
2024CR-FP-5	ベイズ推定を用いた位相空間トモグラフィ手法の開発	核融合科学研究所 小林 達哉	文 贊鎬 2 名	108
2024CR-FP-6	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	111
2024CR-FP-7	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	112
2024CR-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	渡邊 英雄 5 名	113
2024CR-FP-9	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	渡邊 英雄 3 名	114
2024CR-FP-10	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	116
2024CR-FP-11	PLATOトカマクへのモデル内包型平衡再構成手法の適用	京都工芸繊維大学 三瓶 明希夫	西澤 敬之 3 名	117
2024CR-FP-12	宇宙・実験室プラズマにおける乱流描像の普遍性・特殊性	富山大学 成行 泰裕	小菅 佑輔 7 名	119
2024CR-FP-13	基礎プラズマ装置PANTAにおける高波数乱流励起実験	名古屋大学 河内 裕一	西澤 敬之 3 名	121
2024CR-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
2024CR-FP-15	高エネルギー重イオン照射を利用した量子ナノ構造作製のための基盤的研究	量子科学技術研究開発機構 圓谷 志郎	渡邊 英雄 2 名	125
2024CR-FP-16	高温高圧水と金属界面における物質移動現象の把握	九州大学 片山 一成	渡邊 英雄 4 名	126
2024CR-FP-17	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 5 名	127
2024CR-FP-18	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 吉田 健太	渡邊 英雄 5 名	128
2024CR-FP-19	MAX相セラミックスの照射損傷に及ぼす結晶方位の影響	北海道大学 池田 賢一	渡邊 英雄 2 名	130
2024CR-FP-20	磁化プラズマ中における磁力線平行・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 2 名	131
2024CR-FP-21	QUESTプラズマに曝露した金属材料における水素の昇温脱離特性	九州大学 大宅 諒	花田 和明 3 名	132
2024CR-FP-22	高度形状制御を目的としたトカマクの垂直位置制御用フィードバックシステムの開発	日本大学 加藤 修平	西澤 敬之 3 名	133
2024CR-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	渡邊 英雄 3 名	135
2024CR-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	応用ながれ研究所とレーザー技術総合研究所 糟谷 紘一	徳永 和俊 4 名	136

2024CR-FP-25	3次元波数スペクトル計測と温度・密度・流速分布計測を用いた磁化プラズマ乱流の競合状態の解明	広島大学 山崎 広太郎	文 贊鎬 1名	137
2024CR-FP-26	トロイダルプラズマにおける乱流揺動計測データの解析手法の最適化研究	核融合科学研究所 清水 昭博	藤澤 彰英 2名	138
2024CR-FP-27	低放射化バナジウム合金の照射誘起析出の探索及び制御	核融合科学研究所 長坂 琢也	渡邊 英雄 1名	139

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				
2024CR-ME-1	画像解析による船側波形の計測技術の開発	広島大学 岩下 英嗣	胡 長洪 4名	140
2024CR-ME-2	電気ウナギを模擬した積層ハイドロゲル電池を用いた機械的エネルギー変換システムの構築	崇城大学 中牟田 侑昌	東藤 貢 2名	155
2024CR-ME-3	κ -Ga203系混晶および超格子構造に関する第一原理計算	三重大学 河村 貴宏	寒川 義裕 4名	156
2024CR-ME-4	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 2名	158
2024CR-ME-5	水中ビークルの動力学の高精度推定に関する研究	九州大学 山口 悟	胡 長洪 5名	159
2024CR-ME-6	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	160
2024CR-ME-7	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	162
2024CR-ME-8	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 1名	163
2024CR-ME-9	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	164
2024CR-ME-10	CT-FEMを用いた変形性膝関節症に対する脛骨骨切り術の応力解析	大分大学 松田 昌悟	東藤 貢 2名	165
2024CR-ME-11	CT-FEMを用いた骨盤骨折の発生機序に関する研究	大分大学 川岸 正周	東藤 貢 1名	166
2024CR-ME-12	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	167
2024CR-ME-13	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	168
2024CR-ME-14	風洞実験による沿岸近傍の洋上ウィンドファームと大気境界層間の相互作用の評価	近畿大学 Goit Jay Prakash	内田 孝紀 3名	169
2024CR-ME-15	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 3名	170
2024CR-ME-16	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	九州大学 高橋 一郎	東藤 貢 5名	171
2024CR-ME-17	極低レイノルズ数翼の革新的空力特性向上のための基礎研究	同志社大学 平田 勝哉	内田 孝紀 4名	174
2024CR-ME-18	セミサブ型浮体式洋上風車のCFDを用いた動揺解析の検証	九州大学 久松 稜弥	胡 長洪 3名	176
2024CR-ME-19	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 2名	177
2024CR-ME-20	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	178
2024CR-ME-21	高ソリディティを有する抗力型垂直軸風車の性能予測に関する研究	弘前大学 久保田 健	内田 孝紀 5名	179
2024CR-ME-22	光ファイバー圧力センサーを用いた流速・波浪計の開発研究	長崎大学 経塚 雄策	胡 長洪 2名	180

令和6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
2024WS- 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 平野 直樹	花田 和明 7件・28名	応用力学研究所 (対面・遠隔併用)	2024. 10. 2- 2024. 10. 3	183
2024WS- CD-2	非線形プラズマ科学研究会2024	核融合科学研究所 小林 達哉	小菅 佑輔 10件・17名	応用力学研究所 (対面・遠隔併用)	2024. 12. 5- 2024. 12. 6	187

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
2024WS- A0-1	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	富山県農林水産総合 技術センター水産研 究所 阿部 隼也	千手 智晴 6件・33名	応用力学研究所 (対面・遠隔併用)	2024. 9. 10- 2024. 9. 11	192
2024WS- A0-2	地球流体力学研究集会「地球流体における波動と対流現象の力学」	東京大学 伊賀 啓太	山本 勝 18件・30名	応用力学研究所 (対面)	2025. 3. 3- 2025. 3. 4	196
2024WS- A0-3	微細規模から惑星規模にかけての海洋力学過程と規模間相互作用の研究	大分大学 西垣 肇	磯辺 篤彦 7件・9名	九重共同研修 所・九大山の家	2024. 10. 24- 2024. 10. 27	205
2024WS- A0-4	東アジア縁辺海における物質循環と生物・物理・化学過程	長崎大学 近藤 能子	千手 智晴 12件・43名	応用力学研究所 (対面・遠隔併用)	2025. 1. 9- 2025. 1. 10	210
2024WS- A0-5	海洋レーダを用いた海況監視システムの開発と応用	琉球大学 藤井 智史	市川 香 13件・40名	応用力学研究所 (対面)	2024. 12. 2- 2024. 12. 3	215
2024WS- A0-6	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	富山高等工業高等専 門学校 福留 研一	広瀬 直毅 12件・49名	応用力学研究所 (対面)	2024. 12. 3- 2024. 12. 4	219
2024WS- A0-7	アジア域の化学輸送モデルの現状と今後の展開に関する研究集会	国立環境研究所 菅田 誠治	弓本 桂也 11件・30名	応用力学研究所 (対面・遠隔併用)	2025. 2. 27- 2025. 2. 28	269

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
2024WS- FP-1	第22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 27件・42名	応用力学研究所 (対面・遠隔併用)	2024. 12. 19- 2024. 12. 20	272

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
2024WS- ME-1	整形外科と応用力学の融合～骨折力学の臨床応用～	横浜市立大学 稲葉 裕	東藤 貢 11件・45名	JR博多シティ 9階中会議室 (対面)	2024. 8. 10	279

令和6年度 若手キャリアアップ支援研究一覧（目次）

核融合力学分野				
No.	研究課題	代表者名	所内世話人 協力者数	頁
2023EC-FP-1	Joint research of power balance and heat load distribution on QUEST and EAST tokamak	九州大学 WANG Yunfei	花田 和明 2名	283
2023EC-FP-2	プラズマの自己組織化を支配する真の保存法則の探求	京都工芸繊維大学 井上 孟流	西澤 敬之 11名	287

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
2023EC-ME-1	第一原理分子動力学法、自由エネルギーサンプリングと機械学習を組み合わせたGaNエピタキシャル成長に関する研究	Université de Strasbourg-CNRS 石曾根 香菜	寒川 義裕 3名	290

特定研究 1【国際特定研究】

研究テーマ：回転成層流体における波動現象の多角的理解（3 年目）

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）

Integrator : Yohei Onuki (Earth Environment Dynamics)

概要：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力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、地球の姉妹星と呼ばれる。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: 2024 年度は、あかつき中間赤外面像から得られる温度の同化を、実観測および疑似観測を用いて試行した。そして、熱潮汐波の位相や風速が改善される結果について、追加の解析を実施し、論文を執筆中である。また、AFES-Venus の高解像度実験により、傾圧波からの自発的な重力波放射についての解析を行った。さらに、Bred Vector を用いて、金星大気擾乱の成長率についての実験と解析を行い、その成果が論文として出版された。

考察: 2024 年度に得られた結果から、あかつきの温度を同化すると、昼面と夜面の場合に異なる結果が得られ、基本場であるスーパーローテーション構造を大きく変化させ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のバイアスに起因している。このため、これらの一連の同化による影響をまとめた論文を報告するとともに、局所化を大きくして影響を緩和するなどの試行をしている。今後は、温度場のバイアス補正や、中間赤外面像の射出角に応じて同化する高度を変えるなどの方法も検討している。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。さらに、Bred Vector を用いた解析では、ローレンツエネルギーサイクルに対応して、エネルギー変換の定量的評価も可能になる。我々はポテンシャルエネルギー方程式の導出に成功しており、これを用いた傾圧エネルギー変換についても調査を行う予定である。

研究成果報告: Liang, J., N. Sugimoto, and T. Miyoshi, **Analyzing the Instabilities in the Venus Atmosphere Using Bred Vectors**, *Journal of Geophysical Research: Planets*, Vol.129, (2024), e2023JE008067, doi.org/10.1029/2023JE008067.

他に招待講演 8 件など

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

Nonlinear energy transfer within the oceanic internal wave field (2024S1-IC-2)

Applicant: Wei Yang (Tianjin University)

To investigate the nonlinear energy transfer within internal wave fields, we carried out a set of numerical simulations during the last year. We show, using two-dimensional numerical simulations, that the internal tide (IT) energy can be efficiently transferred to both near-inertial and high-frequency internal waves. High-frequency waves entering the near-inertial shear can further extract energy from the near-inertial internal waves. The interaction between near-inertial and high-frequency internal waves can play an important role in redistributing the wave energy and modulating diapycnal mixing in the ocean.

Earlier work pointed out two major mechanisms responsible for the energy loss of ITs: the nonlinear steepening (NS) and the parametric subharmonic instability (PSI). Although these two phenomena have been addressed separately in existing studies, we demonstrate that their interplay effectively assists in the dissipation of ITs on a continental shelf. We simulate the interactions and energy transfer associated with ITs using the Massachusetts Institute of Technology general circulation model. All simulations in this study are constructed in the 2-D setting (cross-shelf and vertical), assuming uniformity in the along-shelf direction. In our two-dimensional numerical model, an idealized IT wave train generated offshore approaches a shelf slope and experiences successive linear and nonlinear transformations. On a steep slope, the IT wavelength is shortened via near-critical reflection to create a beam-like structure and induce high-frequency internal waves due to the NS. Far above the slope, near-inertial waves arise to extract energy from the IT through the PSI.

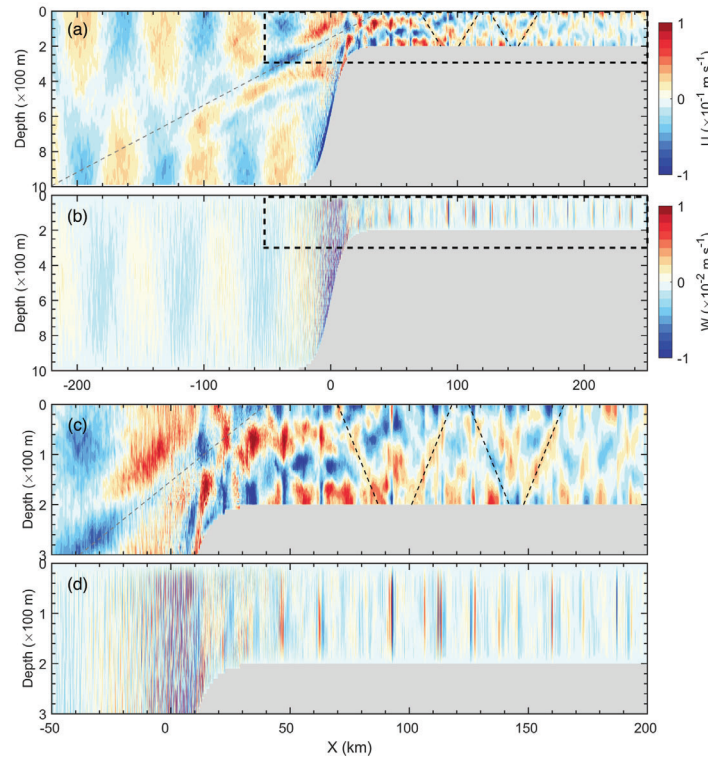


Fig. 1 Cross-shelf distribution of the (a, c) zonal and (b, d) vertical velocity at day 50. (c) and (d) are the corresponding magnified views focusing on the upper 300 m with their positions shown in (a)

and (b), respectively. The gray and black dashed lines in (a) and (c) indicate the wave characteristics of $1.03f$ and $M_2 - f$ based on the linear wave theory, respectively.

Then, high-frequency waves entering the near-inertial shear further extract energy from near-inertial waves and become strengthened. The interplay between the PSI-generated NIWs and NS-generated HFIWs well above the slope assists in transferring energy from NIWs to HFIWs with a broad frequency range. The resulting internal wave field has a continuous energy distribution across all wave frequencies and scales, commonly known as the internal wave continuum. The interaction mechanism is next of interest. The bispectrum results show that the pair of HFIWs share almost the identical small horizontal wavelengths while interacting with far greater-scale NIWs. Although the vertical scale-separation assumption is not adapted in the present case, the slowly varying approximation underlying the ray theory is valid. The phase-locked structure of NIWs and HFIWs as revealed by bispectral analysis in the present and several previous studies is now reinterpreted in terms of the ray theory, in a manner akin to the time-dependent refraction. Such energy transfer widely exists for various latitudes and slope angles. The resulting intense high-frequency wave carries the transferred energy and will be dissipated elsewhere. The revealed mechanism explains the unsettled energy transfer from low- to high-frequency internal waves recently identified in current meters and regional ocean models. However, the exact nature of the interactions is complicated and awaits further elucidation. We expect that the application of ray tracing simulations will help interpret the interactions more clearly in future studies.

RIAM host: Yohei Onuki

Report on RIAM collaborative project

APPLICANT: Antoine VENAILLE, (ENS de Lyon, France)
RIAM host: Yohei ONUKI**Reminder: 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. Few years ago, a new line of research emerged, showing that the concept of topological wave that was born in condensed matter is highly relevant to geophysical waves. In this context, one can infer global properties of geophysical wave spectra in complicated situations by inspection of a simpler, local problem. The relevant theoretical framework to justify the topological approach involves tools originally developed in semi-classical analysis, relying on Wigner-Weyl transforms that relate a symbol (used for instance in ray tracing) to an operator (with spectral properties that can be related to symbol properties). It turns out that one of the very first use of Wigner-Weyl framework in geophysical fluid dynamics has been proposed by Y. Onuki (RIAM), albeit independently from topological considerations. Our common interest in those theoretical tools with potential applications to geophysical fluid dynamics was the main reason for my application to this joint research program at RIAM. We identified several geophysical wave problems that can be tackled by using Wigner-Weyl transform and related technics. One of them deals with the longstanding problem of critical layers, that are associated with the emergence of singularities at large time in the presence of an external forcing. Those singularities are related to wave focusing and feedback on mean flow properties. As such, they need to be understood for an efficient parameterization in coarse numerical climate models.

First scientific questions addressed in 2022

The first question we asked was « can we develop a new theoretical framework for the phenomenon of wave focusing in the presence of monochromatic external forcing, with application to several geophysical phenomena? » We started to tackle this question in the case of internal gravity waves propagating in a stratified medium, with application to the dissipation of energy by oceanic internal tide.

This part was led by Yohei Onuki. The results have already been presented in workshop and conferences. A paper is almost submitted in 2024 (see abstract below).

The second 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 theoretical result which may have an impact even beyond geophysical fluid dynamics, see abstract below.

The third question we asked was « can we understand, in a common microlocal framework, the propagation of Rossby waves and internal gravity waves in sheared flow? »

We obtained preliminary results with an ENS Lyon student (Emile Deleage). This is an ongoing promising line of research.

Second 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 research collaborative 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 planetary atmosphere.

This part was led by Yohei Onuki and used the expertise in Lyon on topological wave physics. One paper is published (see abstract below), and one another paper is in preparation.

A visit at RIAM in 2024

Thanks to our third year of RIAM funding, A. Venaille visited RIAM from October 15 to October 18, 2024. This has been the opportunity to (almost) finish writing the paper on internal tides, to advance discussions on related topics to the 2023 scientific question, and to discuss new interesting venues of research related to the collaborative project (such as wave mean flow interaction problems).

Concrete outcome of the project

[1] **2023 Venaille, Onuki, Perez, Leclerc**, From ray tracing to waves of topological origin in continuous media. <https://scipost.org/SciPostPhys.14.4.062> and <https://arxiv.org/abs/2207.01479>

This paper is published in SciPost Physics, which features open review process, all the reviewer are extremely positive, one of them qualifying the work as «an illuminating tour-de-force».

Abstract : Inhomogeneous media commonly support a discrete number of wave modes that are trapped along interfaces defined by spatially varying parameters. When they are robust against continuous deformations of parameters, such waves are said to be of topological origin. It has been realized over the last decades that such waves of topological origin can be predicted by computing a single topological invariant, the first Chern number, in a dual bulk wave problem that is much simpler to solve than the original wave equation involving spatially varying coefficients. The correspondence between the simple bulk problem and the more

complicated interface problem is usually justified by invoking an abstract index theorem. Here, by applying ray tracing machinery to the paradigmatic example of equatorial shallow water waves, we propose a physical interpretation of this correspondence. We first compute ray trajectories in a phase space given by position and wavenumber of the wave packet, using Wigner-Weyl transforms. We then apply a quantization condition to describe the spectral properties of the original wave operator. We show that the Chern number emerges naturally from this quantization relation.

[2] 2024 Onuki, V enaille, Delplace, Bulk-edge correspondence recovered in incompressible geophysical flows. <https://journals.aps.org/prresearch/abstract/10.1103/PhysRevResearch.6.033161> and <https://arxiv.org/abs/2311.18249>

This paper is published in Physical Review Research

Abstract : Bulk-edge correspondence is a cornerstone in topological physics, establishing a connection between the number of unidirectional edge modes and the topological invariants that describe bulk wave singularities. In continuous media, this 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. The key ideas involve handling the divergence-free constraint through an auxiliary field and considering a physical mechanism that imposes a high-frequency cutoff of bulk waves. When applied to rotating stratified fluids, this approach highlights the resilience of coastal Kelvin waves near vertical walls under varying boundary conditions.

[3] 2025 Onuki, V enaille to be submitted to Journal of Physical Oceanography, <http://arxiv.org/abs/2501.19121>.

Abstract : Generation of internal waves driven by barotropic tides over seafloor topography is a central issue in developing mixing and wave drag parameterizations. Traditional analytical methods for calculating the energy conversion rate from barotropic tides to internal waves rely on expanding a wave field into discrete eigenmodes. However, this modal expansion becomes inadequate when a sheared background current is present, as singular solutions accompanied by critical levels emerge. To uncover the distinct roles of regular eigenmodes and singular solutions in tidal energy conversion, this study analytically investigates wave generation over a localized bottom obstacle in the presence of shear flow under a basic irrotational condition. Using horizontal Fourier and temporal Laplace transforms, we identify regions in the topographic wave number and forcing frequency space where unbounded energy growth occurs. These regions coincide with the spectrum of an operator governing free wave propagation and comprise the discrete and continuous parts, which correspond to regular eigenmodes and singular solutions, respectively. Asymptotic evaluation of the Fourier integral reveals that the flow field far from the obstacle consists of standing wave trains associated with the discrete spectrum and evolving wave packets associated with the continuous spectrum. Away from the obstacle, the velocity amplitudes of wave packets decay, but their

vertical gradients grow in the horizontal direction—in contrast to a single-wave number solution attracted towards a particular critical level. Finally, we derive a formula for the net barotropic-to-baroclinic energy conversion rate, extending the classical one by incorporating the contributions from both the discrete and continuous spectra.

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. In a reference frame moving with the wave, we obtain the Dubiel-Jacotin-Long (DJL) equation [1] for the wave elevation (η)

$$\nabla^2 \eta = -\frac{U_z}{(c-U)}(\eta_x^2 - 2\eta_z + \eta_z^2) - \frac{N^2}{(c-U)^2} \eta$$

Here, U is the background velocity and c is the phase speed of the wave. Assuming a periodic solution of countably infinite discrete modes, the DJL equation can be simplified to a Taylor-Goldstein equation [1] for each discrete mode. The TG equation is solved analytically and discrete IGW mode eigenfunctions are obtained, to the leading order, in terms of Bessel functions for the linear base-flow considered here. The dispersion relation however is solved numerically using a root-finding algorithm. Assuming Floquet ansatz [2], a generalized eigenvalue problem is obtained, to solve for the growth rate (λ) due to resonant nonlinear interactions (of the leading order modes) and the eigenfunction ($\mathbf{v}$) at the next order in amplitude

$$\lambda \hat{\mathbf{A}} \mathbf{v} + \hat{\mathbf{B}} \mathbf{v} + \epsilon \hat{\mathbf{C}} \mathbf{v} = 0$$

Where $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$ and $\mathbf{C}$ are differential operators and ϵ is the small parameter. Asymptotic expressions for the growth rates have been derived and the resulting growth rates match well with that from solving the generalized eigenvalue problem, numerically. The growth rates near resonance have also been obtained and analyzed as a function of the detuning parameter. To study the triadic resonance interactions including modes from the continuous spectrum, the weak shear limit has been chosen as it allows the use of the WKB approximation [1]. A Lagrangian coordinate system is used, which simplifies the analysis [3]. In this coordinate system, the new horizontal coordinate is related to the time of motion of a Lagrangian particle following the base-flow and the new vertical coordinate to the streamfunction. Expressing other quantities in the new coordinates, asymptotic expressions for the growth rates and eigenfunctions for modes undergoing resonant interactions, have been derived. The analysis shows that for short-wavelengths, the triadic-resonance instability is spatially localized at a particular vertical level [4]. The governing equations are then written in the vicinity of this level, by stretching the coordinates. Growth rates are obtained by numerically solving the resulting equations. We speculate that the shear-flow tends to weaken the resonant instability at short wavelengths and this requires further analysis. The continuous spectrum contribution and the possibility of explosive resonant interactions is also being studied

References:

- [1] Sutherland, B (2010) *Internal Gravity Waves*, Cambridge University Press.
- [2] Fan, B & Akylas, TR (2021) *Instabilities of finite-width internal wave beams: from Floquet analysis to PSI*. Journal of Fluid Mechanics 913, A15.
- [3] Buhler, O (2014) *Waves and Mean Flows*, Cambridge University Press.
- [4] Grimshaw, R (1988) *Resonant wave interactions in a stratified shear flow*, Journal of Fluid Mechanics 190, 357-374.

Publications:

- Patibandla, R., Roy, A., & Subramanian, G. (2025). *The flow field due to a sphere moving in a viscous, density-stratified fluid*. Journal of Fluid Mechanics, 1022, A44.

Conference presentations:

- Roy, A.*, Patibandla, R., & Mathur, M. *Resonant triad interactions among internal waves in stratified shear flow*. Japan Geosciences Union (JpGU), Chiba, Japan, May 2024.
- Harishankar, M.*, Patibandla, R., & Roy, A. *Generation of waves on a free surface by quadratic shear currents*, APS-DFD 2024, Salt-Lake city, USA, Nov 2024.
- Patibandla, R.*, Kadam, Y.*, & Roy, A. *Wind-generated waves on a water layer of finite depth: A linear stability study*, APS-DFD 2024, Salt-Lake city, USA, Nov 2024.

RIAM host: Yohei ONUKI

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 $(\omega/N, \omega/f$ 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 $\omega/N = 0.025$ with $A = 0.1, 1, 10$ and $\omega/f = 1.5, 2.1, 5$. Clear instability bands are observed on the perturbation parameter space. For $A = 0.1$, most of the $\phi_0 - \theta_0$ plane (the angles that parameterize the perturbation wave vector) is stable, except a small region around $(\phi_0, \theta_0) = (90^\circ, 0^\circ)$. The inner instability region has larger growth rates than the outer one. For $\omega/f = 2.1$, a third instability region emerges around $(90^\circ, 0^\circ)$, that too with noticeably larger growth rates than what is observed in the other two instability regions. At $A = 1$ (middle row of figure 1), non-zero growth rates are observed over much wider regions on the $\phi_0 - \theta_0$ plane compared to the case of $A = 0.1$. The maximum growth rate for $\omega/f = 5$ is larger than that for $\omega/f = 1.5$ and 2.1 at $A = 1$. Finally, upon increasing A to 10, finite growth rates are observed almost entirely over the $\phi_0 - \theta_0$ plane, with significant fractions of the plane showing growth rates comparable to the maximum growth rate. For a given n , we identify the largest growth rate among all perturbations in a small neighbourhood of the TRI curve. We then identify the frequencies present in the corresponding perturbation amplitude evolution as given by the local stability equations. Specifically, the frequency spectrum for a given perturbation amplitude evolution is calculated as

$$\hat{a}_x(j\omega) = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} a_x(t) \exp(-\omega(\sigma + i\sigma_i)t) \exp(-ij\omega t) dt \quad (1)$$

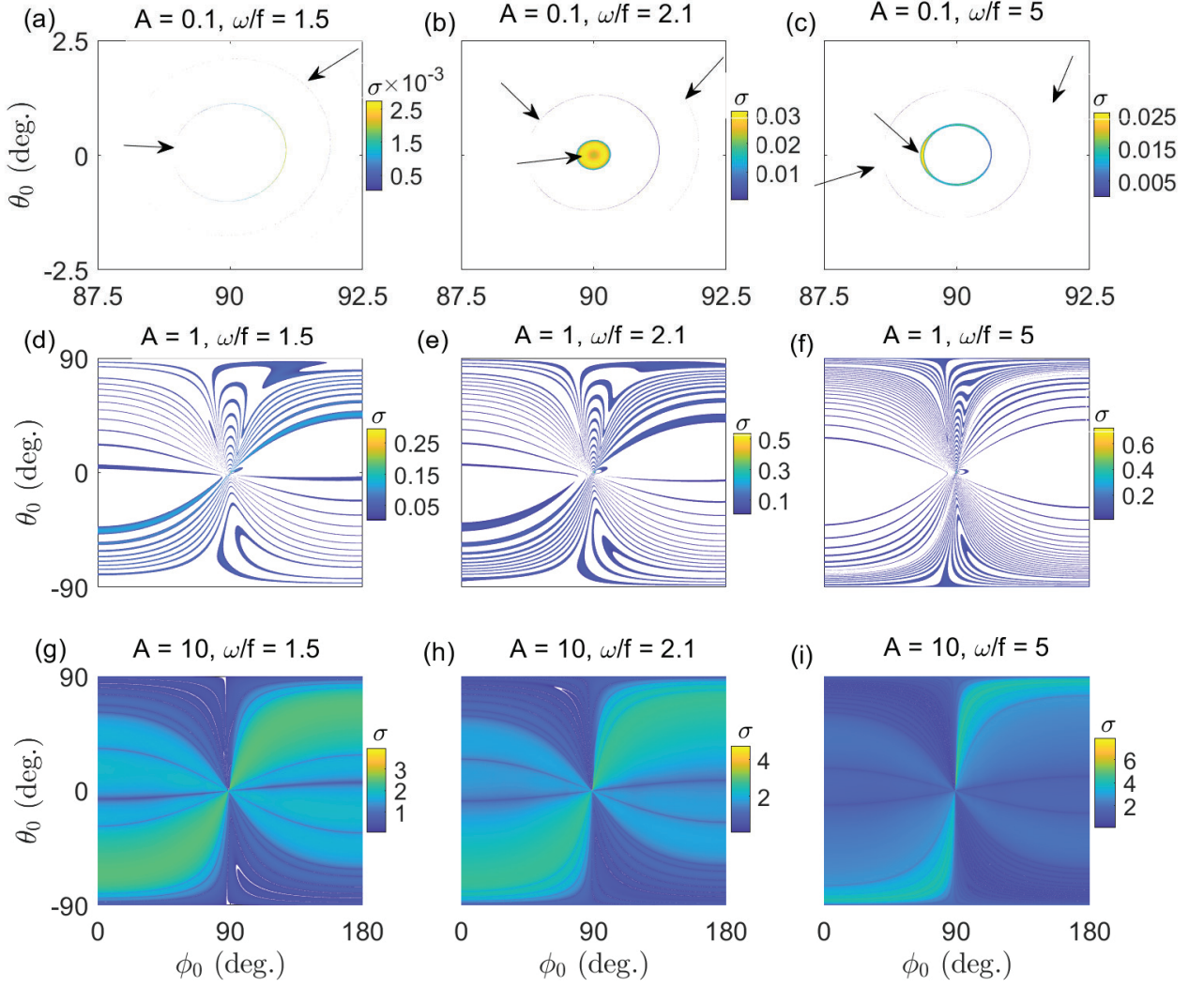


FIG. 1: Non-dimensional growth rate (σ) (equation (??)) as a function of ϕ_0 (deg.) and θ_0 (deg.) for $\omega/f = 1.5, 2.1, 5$ (column-wise) and $A = 0.1, 1, 10$ (row-wise). All the plots correspond to $\omega = 0.025$. In the first row, all growth rates are zero everywhere outside the range shown.

where j is any integer, $i = \sqrt{-1}$ and $a_x(t)$ is the evolution of the horizontal velocity perturbation amplitude obtained from the local stability equations. Figure 2(a)-(c) show the variation of $|\hat{a}_x|$ (normalized by its maximum value) with the perturbation frequency (normalized by the inertia-gravity wave frequency ω) for the same three cases as in figures 2(a)-(c). Across all the cases in figure 2, the peak of $\hat{a}_x$ occurs at $\omega_p = n\omega/2$, strongly suggesting that it is indeed the $(n+1)th$ order TRI that drives the corresponding instabilities. Interestingly, non-negligible strength is often observed at $\omega_p = n\omega/2 \pm \omega$ as well, which indicates the occurrence of secondary interactions between the primary inertia-gravity wave at frequency ω

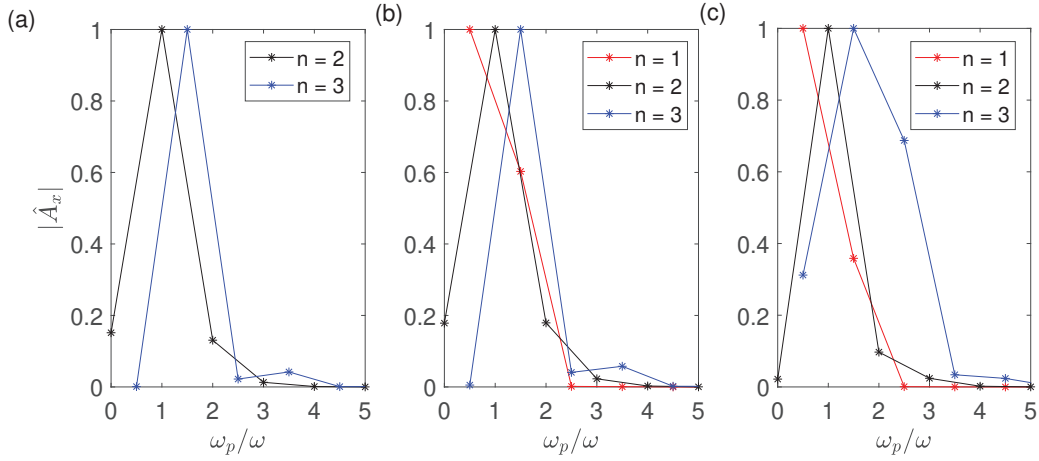


FIG. 2: Frequency spectra, normalized by its maximum value) for $A = 0.1$ and (a) $\omega/f = 1.5$, (b) $\omega/f = 2.1$, and (c) $\omega/f = 5$. The curves in all the panels correspond to the most unstable perturbations in a small neighbourhood of the corresponding TRI curves.

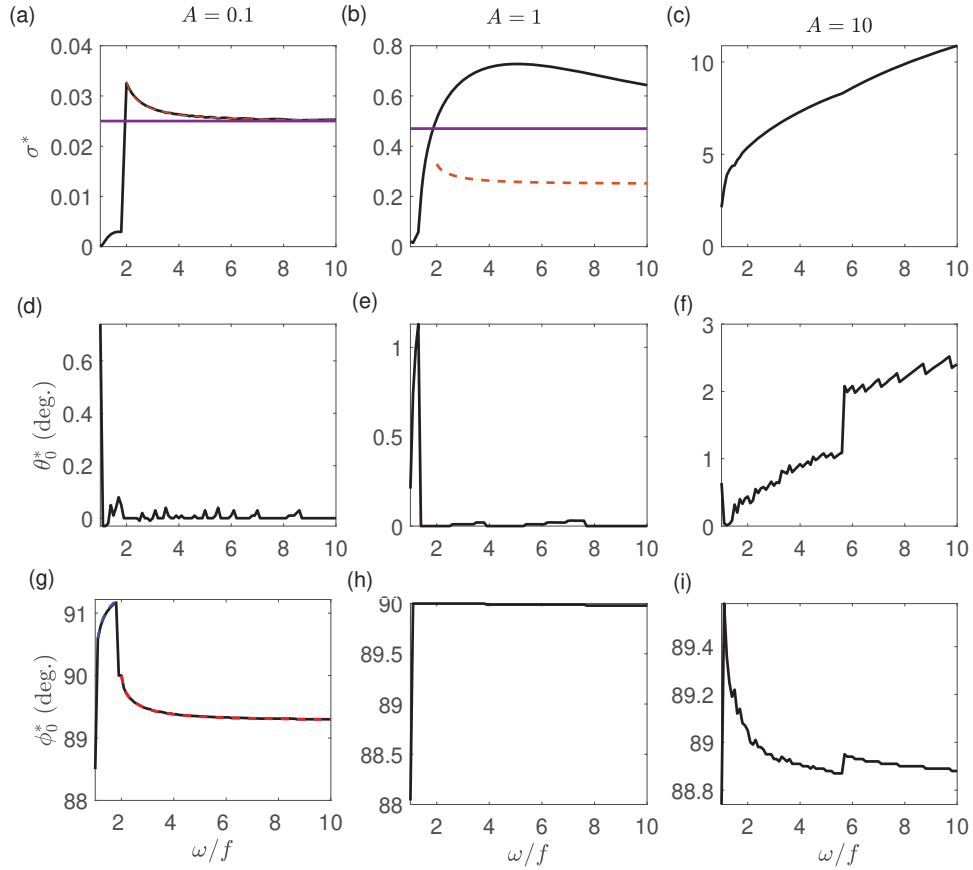


FIG. 3: Maximum growth rate σ^* (black solid line) as a function of ω/f (first row) and the corresponding wave vector orientations θ_0^* (2nd row) and ϕ_0^* (3rd row, black solid line) at which the σ^* occurs. The left, middle and right columns correspond to $A = 0.1, 1$ and 10 respectively. The red dashed curve in (a) corresponds to the growth rate of PSI obtained from $n = 1$ TRI equations at which the nearly two-dimensional perturbations at $\theta_0 = \theta_0^*$ represent inertia-gravity waves at $\omega/2$ and ω , respectively.

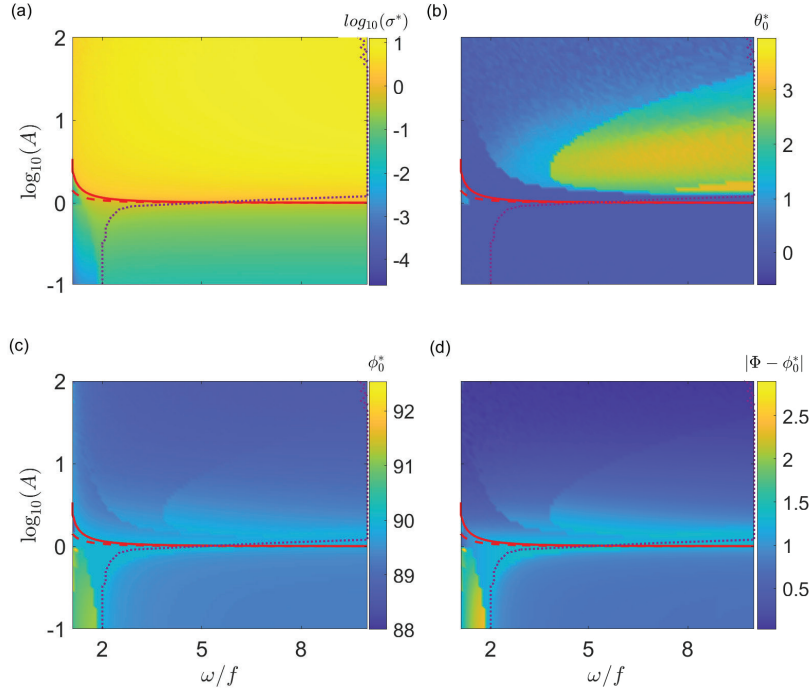


FIG. 4: (a) Maximum Growth rate σ^* nondimensionalized by ω as a function of A and ω/f and the corresponding wave vector orientations (b) θ_0^* and (c) ϕ_0^* at which the maximum growth rate occurs when $\omega = 0.025$. (d) The angle between the inertia-gravity wave vector and the most unstable perturbation wave vector, $|\Phi - \phi_0^*|$ as a function of ω/f and A .

and the secondary waves at $n\omega/2$ generated by TRI.

For a given base inertial-gravity wave, the dominant instability has also been identified for the perturbations for which the growth rate is maximum. For a given $(A, \omega/f)$, the most unstable perturbations occur at $(\phi_0, \theta_0) = (\phi_0^*, \theta_0^*)$ where σ attains a maximum on the entire (ϕ_0, θ_0) plane. The corresponding maximum growth rate is denoted as σ^* . To summarize figure 3, σ^* attains a maximum at $\omega/f = 2, 4$ and ∞ for $A = 0.1, 1$ and 10 , respectively. Figure 4 plots the distribution of (a) σ^* , (b) θ_0^* , (c) ϕ_0^* and (d) $|\Phi - \phi_0^*|$ as a function of ω/f and A . The minimum Richardson number criteria and the static gravitational instability criteria are given by the red dashed and red solid curves respectively. 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 2025.

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 results of this work have been published in the Journal of Fluid Mechanics. The discussions with Dr. Yohei Onuki through the RIAM joint research program have been acknowledged in the paper.

特定研究 2【分野融合】

研究テーマ：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（3 年目）

Synthetic diagnostics combining measurement, simulation and modeling

統括責任者：糟谷 直宏（核融合力学分野）

Integrator : Naohiro Kasuya (Nuclear Fusion Dynamics)

概要：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。

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

水素同位体との違いに着目した、不純物種の輸送をシミュレーションコードで取り扱う上での課題は複数ある。本共同研究では以下の 2 つの課題に取り組んだ。

1. 複数価数状態を持つ不純物種の取扱い

不純物は壁から叩き出されてくる、意図的に目的を持って注入するなどの理由からプラズマに混入してくるが、プラズマ中に入ってきた瞬間は中性粒子であり、そこから背景プラズマとの衝突による電離や荷電交換といったプロセスを経て電子が剥ぎ取られイオン化する。1 価しかない水素同位体とは異なり不純物種は多くの価数状態を取り得る。輸送コードでは粒子種を流体として取り扱うため、価数ごとに輸送方程式を立てると方程式数が膨大な数に上るほか、プラズマ中での存在時間が短い価数の粒子種は極端に密度が低いことが予想されるため、直接扱うことは数値不安定性を引き起こす恐れがある。

2. 不純物存在下における新古典粒子束の両極性の成立について

軸対称系であるトカマクプラズマでは新古典粒子束、乱流粒子束ともに独立に両極性が成立することが知られている。意図せざる両極性の破れは偽のトルクや電場を生じさせるため、両極性は輸送モデリングにおいて満たすべき最も大事な性質の一つである。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、両極性の成立について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なく、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求められていた。

得られた結果

1. 複数価数のイオンを束ね（バンドルし）あたかも 1 つの粒子種として扱うことをスーパーステージと呼び、各価数状態間は準静的電離平衡にあると仮定する。現在の取り組みにおいては、中性炭素によ

るソース効果を適切に取り入れることが重要であったため、0-5 価までの炭素を束ね、擬中性炭素として扱うことにした。電離や再結合の断面積データは OpenADAS から取得しており、電子温度の関数となっている。0-5 価を束ねることの妥当性検証のために、中性炭素を 200eV の電子温度のプラズマに置いた際に、価数ごとの炭素密度の時間発展を、0-5 価まで束ねた場合と、全価数に対して割合方程式(rate equations)を解いた場合で比較した。すると、概ね 1ms 程度で両者の割合は一致した。すなわち、1ms 程度よりも長い時間スケールの現象を扱う上では、全価数を正確に取り扱う事と、0-5 価の擬中性炭素と 6 価の炭素イオンとして扱うことに差はほとんど無い、ということを意味する。擬中性炭素の密度方程式には、5 価から 6 価への実効電離と擬中性炭素と 5 価の炭素の比を表す関数の積がシンク項として、6 価から 5 価への実効再結合がソース項として働くことになる。6 価の完全電離炭素の密度方程式には、それらが逆符号で含まれることになる。0-5 価を束ねた擬中性炭素から各価数の比率を準静的電離平衡の仮定に基づき算出できるため、各価数の密度は計算できる。実装したモデルを流体型輸送シミュレーションコード TASK/TX に実装し妥当性を検証した。シミュレーションの結果、粒子種ごとの密度変化が落ち着く定常状態に到達することを確認した。現状では実験乾燥に合わせるための数値因子が必要ではあるものの、スーパーステージモデリングに成功したと言える。

2. 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を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。

モーメント法において解析的に扱いが困難な逆行行列計算を、直接求めるのではなく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。

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用い、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でシミュレーションした結果、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。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ないことを確認した。

今後の計画

研究代表者が中心となって開発している定常統合モデル GOTRESS+では粒子輸送を取り扱っていない。密度分布は計測によって比較が可能なものである上、原型炉の性能を左右する重要な要素となる。九州大学は不純物の密度分布を決定する割合方程式に関するコードと知見を有しているため、本共同研究で得られた知見を加え、粒子輸送のモデリング、粒子源のモデリング、熱輸送とのカップリング、そして粒子輸送を加えた上で安定かつ高速に数値計算が可能なスキームの確立、を順次進めていく予定である。

成果報告

本多充、糟谷直宏、藤田隆明、「計測との比較に向けた不純物輸送の統合モデリング」 応用力学研究所共同研究集会 九州大学応用力学研究所 2024 年 12 月 19 日

データ駆動科学的手法を用いた非平衡開放系の時空間ダイナミクス研究

日本大学生産工学部 佐々木真

背景・研究概略

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、マルチスケール乱流と構造形成・輸送の素過程のデータ駆動科学的手法の開発や理論的研究を推進し、データ駆動的モード分解、及びそのクラスタリング手法の開発、深層学習を用いた計測困難量の推定手法の開発などの成果を得る事ができた。本報告書では今年度の成果の中から、磁場閉じ込めプラズマや惑星・海洋乱流に普遍的に見られる帯状流・乱流相互作用の特徴的素過程の発見について報告する。

研究成果

惑星大気や磁場閉じ込めプラズマにおける準2次元乱流は Charney-Hasegawa 方程式と呼ばれる非線形偏微分方程式で記述される。本研究では、ドリフト波乱流の空間偏在を引き起こす物理機構の理解に焦点を当てた。これまで運動論シミュレーションをはじめ、流体シミュレーションでも多く、乱流の空間偏在性は観測され、乱流強度分布は帯状流の曲率符号に非対称である事が報告されてきた e.g. [1]。従来の帯状流による乱流抑制理論[2]では、説明の困難であった。従来理論では、「流れシアの2乗で乱流が抑制される」というモデル化が行われてきたが、このモデルで予測され分布は帯状流の曲率に対称となってしまう。一方で、波動運動論による帯状流・乱流相互作用解析において、「乱流捕捉機構」と呼ばれる素過程が発見され、乱流捕捉によって、流れの曲率に非対称な分布を説明できる可能性が指摘されてきた[3]。波動運動論は多くの仮定に立脚した簡約モデルである為、実際の乱流現象で乱流捕捉が起こり得るのかを検討する必要があった。

そこで、本研究では2次元の Hasegawa-Wakatani モデルを基に、非線形シミュレーションを実施した。密度勾配を固定値として与え、断熱係数をショット毎にパラメタとして変化させた。断熱係数が小さな領域では、強い乱流状態が実現し、帯状流も励起されるものの、明確な乱流捕捉は実現しなかった。一方で、断熱係数を大きくしていくと、明確な乱流捕捉が得られた。乱流が捕捉される空間位置についても波動運動論が予言と一致することを確認した。捕捉された乱流が偏在する領域では、粒子輸送が空間的に変調され、密度分布に長寿命の凸凹構造が励起されることを観測した。この密度分布の corrugation についても[4]の予測と一致することを確認した。

- [1] G. Dif-Pradalier, + PRL, 114, 085004 (2015). [2] P.W.Terry, Rev. Mod. Phys. 72, 109 (2000).
[3] M. Sasaki, +, Phys. Plasmas, 25, 012316 (2018). [4] M. Sasaki, +, Phys. Plasmas, 28, 112304 (2021).

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重要な影響を及ぼすとされる乱流の物理を理解するためにはマイ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を行う必要がある。本研究では、高分解能を達成できる計測法としてレンズレスマイクロ波イメージングを開発している。

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

Ar プラズマを学習したモデルと He プラズマを学習したモデルの予測結果を比較した。その結果、同じ学習量では He プラズマを学習したモデルの予測精度が低いことがわかった。これは、He プラズマの方がより細かい構造を持っており、特徴を掴みにくいためと考えられる。学習量を増やすと予測精度は向上するものの、15000 データ程度でその効果は頭打ちになることから、更なる精度向上のためには学習モデルの改良が必要と考えられる。

次に Ar プラズマ学習モデルに He プラズマのデータを、He プラズマ学習モデルに Ar プラズマのデータを解析させた。図 1(a) (b)に結果の例を示す。どちらの学習モデルも学習に使用したプラズマの特徴を反映した予測となっており、学習していないタイプのデータの予測精度は低いことがわかる。しかしながら、図 1(c)に示すように、両方のプラズマデータを学習させたモデルは、どちらのプラズマデータに対してもある程度の精度で予測が出来ていることがわかる。つまり、様々なプラズマ状態が起こり得る状況に対応させる場合には、学習データも様々なものを用意する必要があると言える。

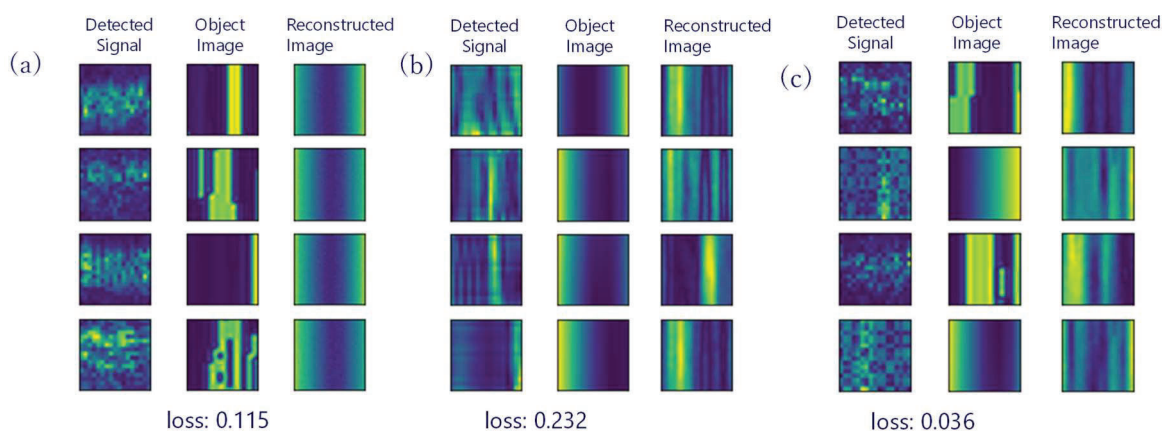


図 1 学習結果の一例 (a)Ar プラズマ学習モデルで He プラズマデータを解析
(b)He プラズマ学習モデルで Ar プラズマデータを解析
(c)両方のプラズマデータを学習させたモデルで両方のプラズマデータを解析

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において、炉の成否は高温プラズマの閉じ込めにかかっている。そして閉じ込め性能を左右するプラズマの熱や粒子の輸送制御は現在に至る重要課題である。輸送現象を正確に理解し予測するには第一原理に基づく運動論シミュレーションが有効で信頼できる手法となっているが、一方で、解像度や物理モデルの制約など現実的な予測に要求されるレベルには依然として隔たりがある。このような背景の下、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、上述のシミュレーション結果に対する妥当性や信頼性を確立する上での一つの回答であった。本研究課題は令和4年度から6年度までの計画で、最近さまざまな分野で応用が進むデータ科学の手法を用いながら、上記の第一原理シミュレーションと数値計測手法を通じて、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ものである。

研究方法

プラズマ輸送評価は上述の通り運動論シミュレーションが有用であるが、計算コストが課題であり高精度の輸送予測モデルを構築することが重要になる。ここでは、シミュレーション結果（解軌道）を理論空間上で表現し、その解空間構造の数理モデル化する。また、運動論シミュレーションによる静電ポテンシャル分布などを計測ツールで数値計測・定量解析を行う。輸送モデル構築と数値計測手法の開発を並行して進める。

研究成果

本研究課題の実施期間（令和4年度-6年度）で得られた成果は下記である。

輸送モデルの予測精度向上と乱流の解空間構造による新しいモデリング 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。既存モデルを修正して精度向上する方法や、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た数理的な輸送モデルの表現を試みた。これまでの簡約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。さらに解空間上で描く解軌道を食者捕食者の関係の方程式系でもモデリングを行い、軌道の特徴を抽出することができた。

計測模擬と数値診断 モジュールで構成された統合乱流計測シミュレータ(iTDS)による複数のシミュレーションデータの統合解析の環境を構築した。LHD における大域的新古典輸送コード FORTEC-3D による電位分布の揺らぎに対して、重イオンビームプローブ模擬 (sHIBP) を適用し、揺らぎの経路積分効果の評価や異なる入射条件による分布計測を実施した。これらから、観測領域の評価や複数種の物理量の解析、大域的構造のダイナミクスへの局所計測からの指針を示すことができた。

まとめ

本課題で得た成果を通じて、①計測シミュレータによる第一原理計算への数値計測の適用から、実験側への観測指針提供へ、②乱流輸送モデリング研究から、モデル高精度化や分布予測、基礎物理からのモデル拡張の指針へ、③本研究の波及研究から、第一原理乱流計算の高次元解析や計算結果の低次元モデル化へ、などの各アウトプットに繋がっている。今後は逆問題解析の手法などを用いた研究に発展させることを計画している。

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

核融合プラズマでは、MHD（磁気流体力学）不安定性を抑制し、安定した高ベータプラズマを維持することが重要である。プラズマ中では複数の MHD 不安定性が発生し、これらが相互作用することで複雑な非線形発展を引き起こす可能性がある。本研究では、MHD 不安定性間の相互作用を理解するための解析ツールを開発し、シミュレーションを通じてその物理を明らかにすることを目的とする。

本研究では、九州大学応用力学研究所のトカマク実験装置 PLATO を対象とし、シミュレーション解析を実施した[1]。まず、統合輸送コード TASK/EQU モジュール[2]を用いて、内部キンクモードとバルーニングモードがともに線形不安定な MHD 平衡を構築し、その MHD 平衡に対して MIPS コード[3]を用いて MHD 不安定性の解析を行った。ここで MIPS コードは、MHD 方程式を空間方向に 4 次精度の有限差分法で離散化し、時間積分には 4 次精度のルンゲクッタ法を適用するシミュレーションコードである。図 1 に、MIPS コードによるシミュレーションから得られた、ポロイダル断面での圧力分布の時間発展を示す。時刻 $t = 250$ 付近では、プラズマ周辺部でバルーニングモードによる圧力分布の変形が生じている。さらに、 $t = 425$ 以降では内部キンクモードの影響が顕著になり、中心圧力が大きく減少する現象が生じていることがわかる。次に、動的モード分解の結果を図 2 に示す。ここでは、固有値の大きい順にモードを並べた。最も固有値が大きいモード ($k = 1$) が主要モードであり、 $k = 11$ のモードは背景分布に対応する。 $k < 11$ のモードは時間とともに成長するモードであり、 $k > 11$ のモードは減衰するモードである。モードの特徴を解析した結果、 $1 \leq k \leq 4$ のモードはバルーニングモードに起因する圧力分布の変形を示し、 $5 \leq k \leq 8$ のモードは内部キンクモードの影響を反映していると考えられる。

本研究では、内部キンクモードとバルーニングモードがともに不安定な MHD 平衡に対して動的モード分解を適用し、それぞれのモードによる揺動圧力分布を抽出することに成功した。今後は、従来のフーリエ級数によるモード分解に加え、本研究の手法を併用することで、複数の MHD 不安定性の相互作用に対する詳細な解析を行なっていく。

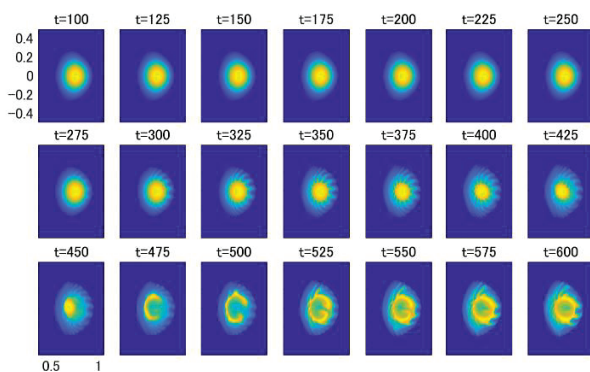


図 1. ポロイダル断面上での圧力分布の時間発展。

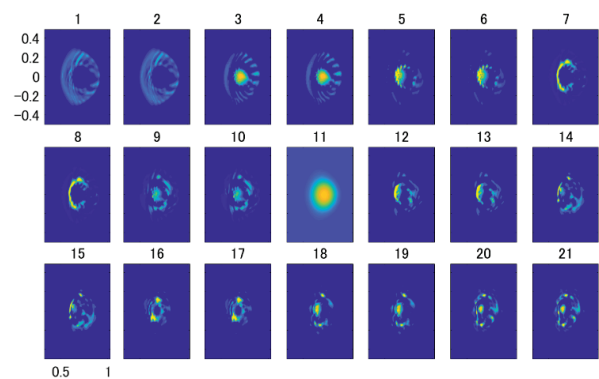


図 2. 動的モード分解により得られたモード構造。各図の上の数字はモード数(k)を表す。

[1] 川村, 糟谷, 佐藤, 佐々木, プラズマ・核融合学会九州・沖縄・山口支部第 28 回支部大会(2024/12/21-12/22).

[2] <http://bpsl.nucleng.kyoto-u.ac.jp/task/>

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

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

プラズマ乱流内では、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。ゾーナルフローは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、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 PANTA 実験では、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、乱流の塊であるストリーマーの包絡線と媒介波が同じ構造を持ちながら位相関係がロックされている様子を世界で初めて観測した。この成果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。

PANTA の別の放電条件では、ドリフト波が非線形で長寿命な孤立波構造を生み出す。また同時に非線形結合により生じたゾーナルフローと同期して、孤立渦と呼ばれる構造も生み出す。さらに孤立渦に捕捉されてスプラッシュと呼ばれる細かくて高周波な微細構造も発生する。このように PANTA はメゾスケール構造の解析と現象解明に非常に有用な装置であり、様々な結果を生み出している。

今までの研究では周方向プローブアレーと径方向プローブアレーでの計測結果の相互相関を取り、ある周波数に着目してプラズマ断面内の相関の強さと位相構造を解析していたが、本研究では周方向プローブアレーにより揺動が周方向モード数ごとに分離できることに着目し、周波数と周方向モード数を同時に指定してプラズマ断面内の構造解析を行うという新解析法を開発した。これによりストリーマーや孤立波、スプラッシュなどのより詳細な構造計測が期待できる。

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（測定半径 40 mm）と径方向 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）を設置し、孤立波およびスプラッシュ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。その他の実験条件としては、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 10^{19} m^{-3} 程度、電子温度は $3 \pm 0.5 \text{ eV}$ のおおよそ平坦な分布である。

3. 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 f での各々の相互相関を取り、実部をプロットすることでプラズマ断面内の相関と位相情報を求めた。このとき周方向 32 チャンネルプローブの計測結果に対しては 2 次元フーリエ展開を行い、ある周方向モード数 m のみの成分を取り出した。10 チャンネルプローブの計測結果が 2 次元フーリエ展開を行っていない場合でも、両者の相関を取れば、指定した周方向モード数 m の成分のみの相関が残ることになる。

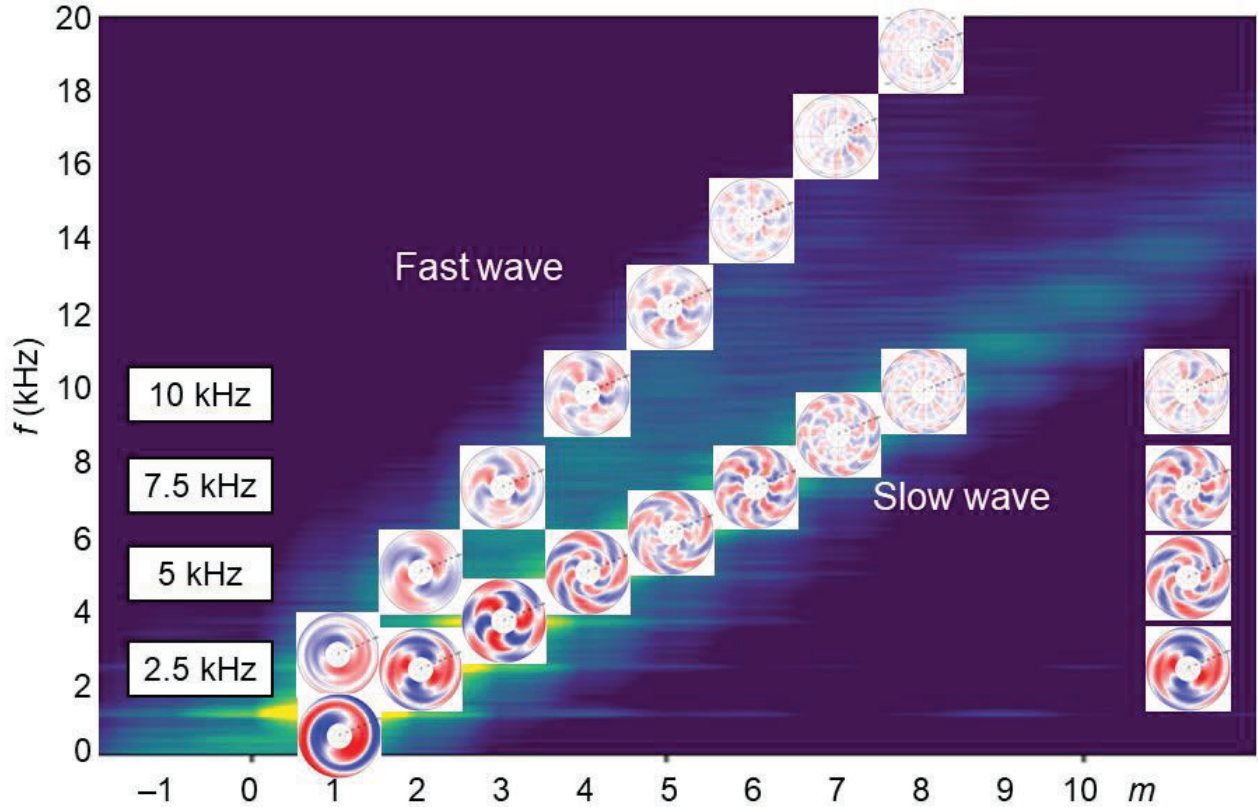


図 1. 周方向 64 チャンネルプローブ（うち 32 チャンネル）と径方向 10 チャンネルプローブから求めたモード(m, f)の密度揺動のプラズマ断面上の相互相関の実部を、2 次元スペクトル上に重ねたもの。右の余白には従来の f のみを指定した解析法での結果を示している。

このとき、周方向モード数ごとに展開するために毎度周方向 32 チャンネル全てのデータを用いているため、周方向の局所情報が失われていることになる。そのため周方向 θ に、まずはなるべくノイズが発生しないように単純な $(1+\cos\theta)/2$ の周方向フィルターをかけ、ある程度局所情報を復活させた。

図 1 の密度揺動スペクトルが示すように、回転速度 1.25 kHz の孤立波に相当する Slow wave とその高調波、回転速度が 2 倍程度速く振幅の小さいスプラッシュに相当する Fast wave とその高調波が現れた。Slow 系列は断面上で相関が強く長寿命で安定なのに対し、Fast 系列は相関が弱く、高調波成分で断面の左右で相関の強さにも差があるため、空間的にも時間的にも寿命が短い。また右の余白に周波数のみを指定した従来の構造解析の結果を示すが、2.5, 5, 7.5 kHz では Slow 系列に埋もれていた Fast 系列が明らかになったことと、10 kHz では周波数のみの解析結果が Slow, Fast 両系列の特徴を合わせ持つことをよく表している。このように新しい周方向モード数分解した解析方法の妥当性が示され、今後この解析法により孤立波、スプラッシュ、ストリーマーなどの研究が進展すると大いに期待できる。

4. 研究成果報告

- [1] T. Yamada *et al.*, “Investigation and wave number analysis of meso-scale structures formed in plasma turbulence”, 8th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics, CD-7-TP7, Malacca, Malaysia (Nov 3-8, 2024).
- [2] 山田琢磨他, “直線プラズマにおけるメゾスケール構造の研究と波数解析”, 第 41 回 プラズマ・核融合学会 年会, 18P20, 東京 (Nov 17-20, 2024).

5. 研究組織

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

特定研究 3【分野融合】

研究テーマ：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（3年目）

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）

Integrator : Keiya Yumimoto (Earth Environment Dynamics)

Yusuke Kosuga (Nuclear Fusion Dynamics)

Yoshihiro Kangawa (Renewable Energy Dynamics)

概要：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、おのこ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きます。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。

データ科学的アプローチによる設計可能な材料創製への計算手法の検討

久留米工業高等専門学校 材料システム工学科 小袋 由貴

1. 目的

最近、コンピュータ性能が格段に向上し、情報通信関連技術の進化が著しい。物質・材料の研究開発においても、実験だけではなく第一原理計算に代表される革新的な理論計算法を駆使して、構造や物性を電子レベルから本質的に理解しようとする研究事例が非常に増えてきた。さらには、マテリアルズ・インフォマティクス技術に代表されるように、実験や理論計算から得られた構造や物性データを集積してビッグデータ化し、それを AI に学習させて未知の物質や材料の構造や物性を予測することも可能になってきた。しかしながら、個々の蓄積されたデータがどのような精度で得られたのか正しく見極めることが何よりも重要である。本研究では、可視光線を吸収することによって黄色発色や光触媒機能を発現する BiVO_4 に注目し、第一原理バンド計算によって実験データがどの程度まで再現できるのか検証したのでここに報告する。

2. 計算方法

検討対象には、単斜晶構造を持つ BiVO_4 を選んだ[1]。第一原理バンド計算は、最も高精度のバンド計算法として知られている FLAPW 法を実装した WIEN2k コードを使用した[2]。交換相関相互作用は、一般化密度勾配法 (generalized gradient approximation, GGA) [3]の枠内とし、また交換ポテンシャルに改良型 Becke-Johnson 法 (modified Becke-Johnson, MBJ) の適用も試みた。FLAPW 法では、一電子の感じる結晶ポテンシャルを Muffin Tin (MT) 球と呼ばれる原子核を中心とした球形領域と格子間領域に分割して計算を進める。基底関数には、MT 球内において原子状波動関数、格子間領域では平面波を用いた。MT 半径 (R_{MT}) は Bi, V, O に関してそれぞれ 2.50, 1.71, 1.55 a.u. とし、平面波のカットオフは $R_{\text{MT}} \times K_{\text{max}} = 7.0$ とした。状態密度 (density of states, DOS) 計算では、第一ブリルアンゾーン内において 30 の k 点を選択し、原子ごとの部分状態密度 (partial density of states, PDOS) も見積もった。また、 BiVO_4 の光学特性を調べるために、複素誘電関数 $\epsilon_1(\omega) + i\epsilon_2(\omega)$ を計算した。複素誘電関数の実数部 $\epsilon_1(\omega)$ は、虚数部 $\epsilon_2(\omega)$ から Kramers-Kronig 関係を用いて算出した。

3. 結果と考察

Fig. 1 には、GGA 法の枠内で得られた単斜晶 BiVO_4 の DOS を示す。エネルギー軸の原点は価電子帯の頂上とした。伝導帯は 3 つのエネルギー領域：I (2.18~3.21 eV)、II (3.27~4.90 eV)、III (4.93 eV 以上) に大別できる。領域 I と II は、主に V 3d 状態と O 2p 状態間の相互作用に帰属される。V に関する PDOS 解析から、領域 I では e 軌道 (dz^2 と dx^2-y^2)、領域 II では t_2 軌道 (dxy, dxz, dyz) が主成分であり、 VO_4 四面体による結晶場分裂が認められる。領域 III は、Bi 6p 状態と O 2p 状態が混成していた。一方、価電子帯は、2 つのエネルギー領域：IV (-9.70~-8.86 eV) と V (-5.18~0 eV) 領域に分けることができ、それぞれ Bi 6s 状態と O 2p 状態が大きく寄与していることがわかった。一般に、GGA 計算では半導体や絶縁体のバンドギャップが小さく見積もられる。単斜晶 BiVO_4 のバンドギャップは 2.18 eV であり、実験値 (2.45 eV) よりも小さくなった。これに対して、MBJ 法ではバンドギャップが 2.51 eV と見積もられ、実験値に近い値が得られた。なお、高い精度を持つとされる混成汎関数 HSE06 でバンド計算を行

うと、BiVO₄ のバンドギャップが過大評価されるとの報告がある[4]。これらの結果から、BiVO₄ の固体電子構造解析では、MBJ 法が最も適していると考えられる。

Fig. 2 に、MBJ 法を適用して得られた単斜晶 BiVO₄ の複素誘電関数と光学吸収係数を示す。単斜晶 BiVO₄ は異方性を持つため、複素誘電関数のテンソル成分 xx , yy , zz はお互いに異なる挙動を示した。光学吸収と関連付けられる $\epsilon_2(\omega)$ に注目すると、3.0 eV 以下のエネルギー領域では xx および yy 成分にピークが観察された。このことは、価電子帯－伝導帯間の電子遷移が x および y 方向の異方性をもつことを意味している。V の PDOS 解析から、この吸収は、価電子帯頂上付近の d_z^2 状態から、伝導帯底付近の $d_{x^2-y^2}$ 状態への電子遷移が関与しているものと考えられる。

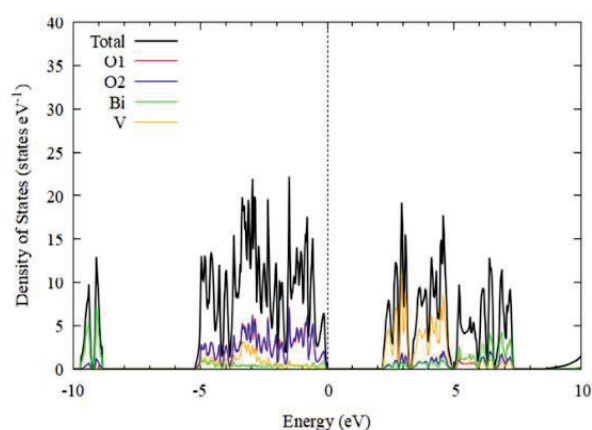


Fig. 1 DOS obtained with GGA for monoclinic BiVO₄.

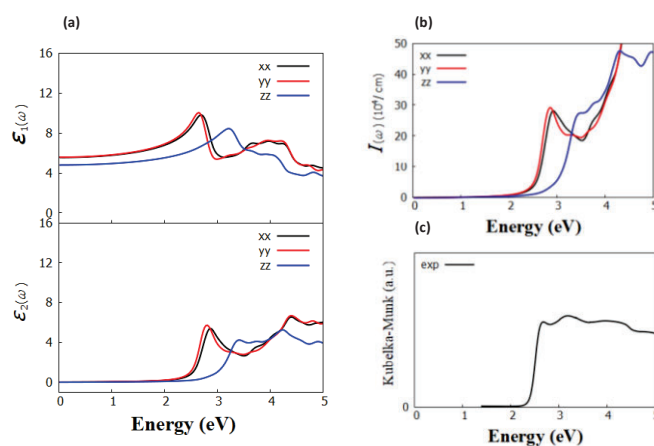


Fig. 2 (a) Real and imaginary parts of dielectric function and (b) absorption coefficient obtained by MBJ calculation, and (c) experimental UV-vis spectrum for monoclinic BiVO₄.

4. まとめ

本研究では、単斜晶 BiVO₄ について第一原理バンド計算を実施し、MBJ 法を用いることで実験的バンドギャップを再現できることを明らかにした。

参考文献

- [1] A.W. Sleight *et al.*, *Materials Research Bulletin*, 14, 1571-1581 (1979).
- [2] P. Blaha *et al.*, *J. Chem. Phys.* 152, 074101 (2020).
- [3] J.P. Perdew *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 77, 3865-3868 (1996).
- [4] S. Lardhi *et al.*, *J. Phys. Chem. C*, 122, 18204-18211 (2018).

研究組織

小袋 由貴¹⁾, 寒川 義裕²⁾, 草場 彰²⁾, 奥山 哲也³⁾, 古賀 紀后¹⁾

¹⁾久留米工業高等専門学校、²⁾九州大学応用力学研究所、³⁾九州大学大学院総合理工学研究院

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・研究部・位相空間乱流ユニット 徳沢季彦

1. 目的

核融合プラズマ内部における乱流現象理解のため、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実証を試みている。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 金属プリンタを利用することで実現し、前回、九州大学の QUEST 装置に適用することを試みたが、マイクロ波の周波数帯を低くする必要があることが判明した。そこで今年度、新たに X-band (8-12GHz) のアンテナを造形しその特性を調べた。

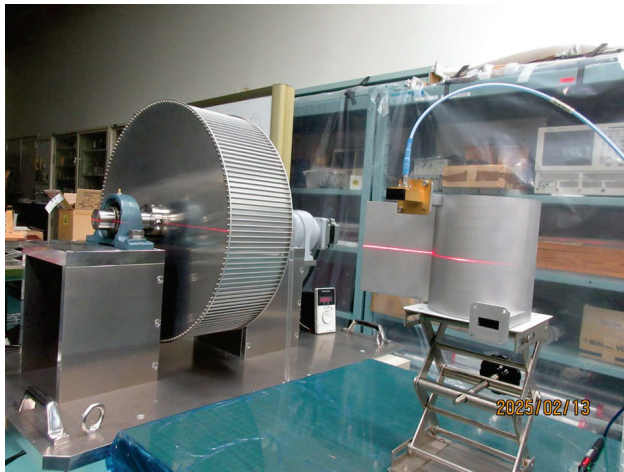


図 1：新たに造形した X-band フェーズドアレイアンテナ(手前)を用いたドップラーレーダー装置のプラズマ模擬試験の状況。奥のドラムを回転させてドップラーシフトを生じさせる。

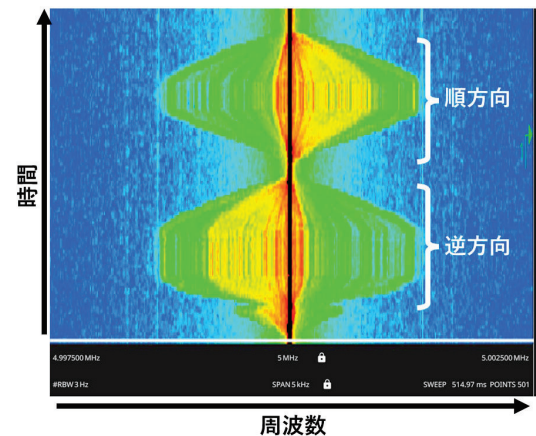


図 2：X バンドのフェーズドアレイアンテナを周波数を固定し、ドラムの回転速度を上下させた時に生じるドップラーシフトの様子。

2. ドップラーレーダーテスト

X-band フェーズドアレイアンテナの放射特性が周波数で制御可能であることを確認した後、ドップラーレーダーとして活用できるかを試験した。図 1 に試験の状況を示す。周波数を固定し、プラズマを模擬した回転ドラムの速度を変化させると図 2 に示すように明確な周波数シフトが観測された。次に、回転速度は一定にして、入射周波数を変化させると、図 3 に示すようにドップラーシフトが反転することが確認でき、プラズマ実験での実証試験が期待できる結果を得た。

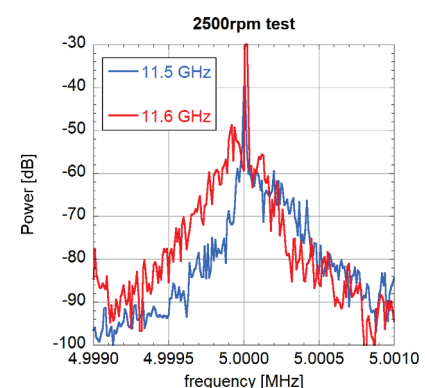


図 3：周波数を変え放射方向を反転させると、ドップラーシフトが反転することを確認した

3. 論文発表

1. T. Tokuzawa, M. Yoshida, *et al.*, “Preparatory study of feasibility for a vertical viewing electron cyclotron emission diagnostic for the JT-60SA tokamak”, *Rev. Sci. Instrum.* 95, 083531 (2024).
2. T. Nasu, T. Tokuzawa *et al.*, “Electron-scale turbulence characteristics with varying electron temperature gradient in LHD”, *Nucl. Fusion* 64 096008 (2024).

窒化物半導体超格子界面における原子拡散機構の解析

和歌山大学システム工学部 小田将人

【目的】

近年、次世代パワーデバイス材料として優れた物性を持つ窒化ガリウム (GaN) および窒化アルミニウム (AlN) が注目されている。これらを用いたヘテロ接合により、高電子移動度トランジスタ (HEMT) の開発が可能となり、通信基地局やレーダーなどへの応用が期待されている。しかし、GaN と AlN の格子定数の違いにより界面に欠陥や歪みが生じ、さらに欠陥を介した原子拡散による混晶化が問題となっている。デバイス性能を左右する界面の品質は、欠陥の存在や原子拡散に強く依存することから、本研究では AlN/GaN 界面における混晶化機構の解明を目的とし、複合欠陥の安定性を評価する。

【手法】

c 軸方向を成長方向とした AlN/GaN モデルを作成し、格子定数を GaN に固定した AlN on GaN モデルと、格子定数を AlN に固定した GaN on AlN モデルの 2 種類を対象とした。さらに、それぞれ III 族極性と V 族極性の成長を考慮し、計 4 種類のモデルにおいて、図 1 に示す界面近傍の複合空孔欠陥 (V_{Ga} or V_{Al} -VN) の形成エネルギーを算出した。エネルギー計算に際しては構造最適化を行い、最安定となる原子配置を求めた。全ての計算は PHASE/0 を用いた。k 点メッシュは $3 \times 3 \times 1$ 、カットオフエネルギーは 30 Ry、構造最適化における力の最大値の閾値は 0.9×10^{-3} Hartree/Bohr とした。

【結果】

格子定数や成長面の極性によって、界面に形成される複合空孔欠陥のエネルギーに顕著な違いが見られた。特に、AlN 側に複合空孔欠陥が位置する場合にエネルギーが大きくなる傾向が確認された。今後は、複合空孔欠陥の拡散反応障壁を評価し、界面混晶化の詳細なメカニズムを解明する予定である。

【研究成果】

- [1] Jota Nakamura, Masato Oda, and Yoshihiro Kangawa, Phys. Stat. Solidi B, **2024**, 2024, 2400026.
[2] 藤田 大輝、小田 将人、寒川 義裕、'AlN/GaN における混晶化機構の解明'、第 72 回応用物理学会春季学術講演会、14p-P05-1、東京理科大学。

【研究組織】

小田将人(和歌山大学・准教授): 計算の実行、解析
藤田大輝(和歌山大学・M1): 計算の実行、解析
寒川義裕(九州大学・教授): 計算の実行、解析

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攪拌、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值的・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6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。

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 =一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。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。

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。

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。図 2 (a)に線形に加熱を加えた場合の熱平衡点へ帰還するまでの時間変化を密度毎に調べた図を示す。線形制御の場合、帰還までの時間が密度に依存することが分かる。一方、図 2 (b)にべき乗関数を用いて加熱を入力した場合を示す。帰還までの時間が線形制御と比べて 1/10 に減少していることが分かる。

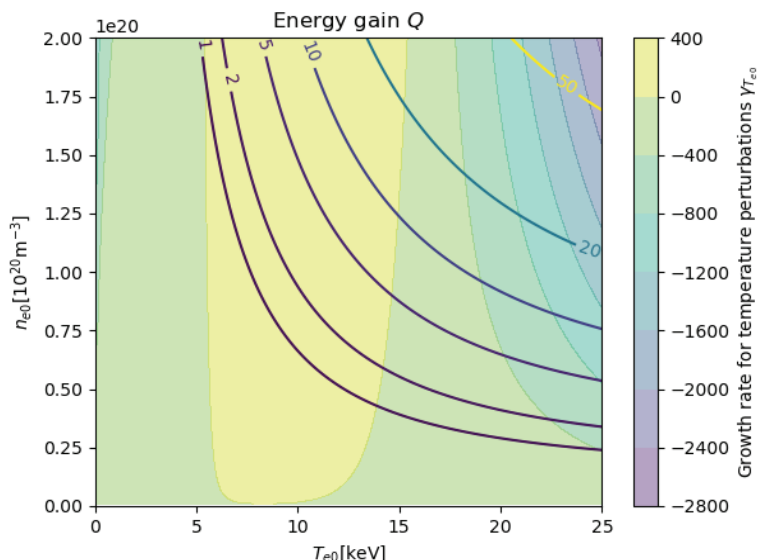


図 1 POPCON プロットの例。エネルギー利得を等高線として表示した。カラーマップは、熱的不安定性の線形成長率を示す。線形成長率が正の場合は、熱的不安定な領域。

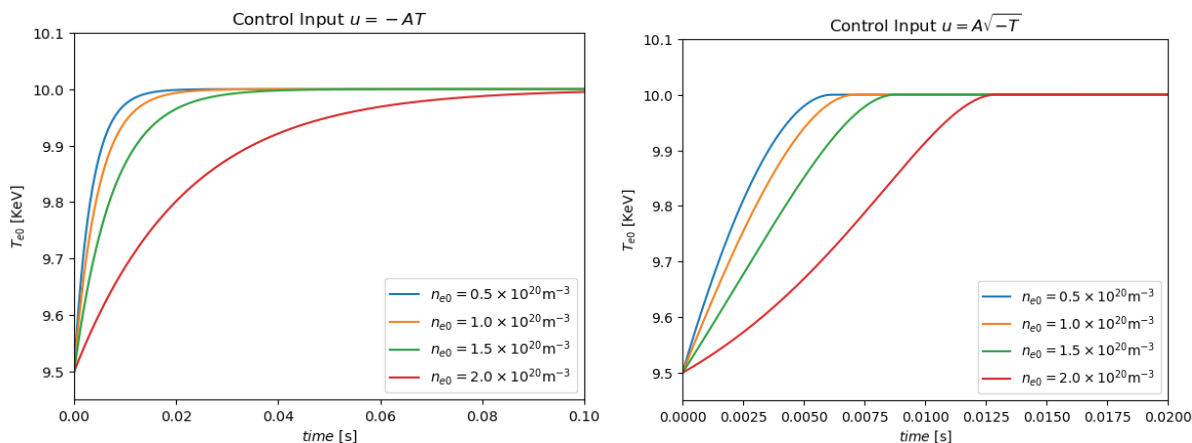


図 2 熱的制御のフィードバック制御の例。(a)は線形制御、(b)はべき関数を用いた非線形制御。A は加熱入力[kW]。

まとめと今後の展望

今後、今回の結果を数理モデル化し、パターン形成との関係について考察を進める。

特定研究 4【分野融合】

研究テーマ：IoT とビッグデータを活用した情報処理プロセスの自動化と最適化（新規）

Data Processing Automation and Optimization using IoT and Big-Data
Technologies

統括責任者：長谷川 真（核融合力学分野）

朱 洪忠（新エネルギー力学分野）

Integrator：Makoto Hasegawa (Nuclear Fusion Dynamics)

Zhu Hongzhong (Renewable Energy Dynamics)

概要：IoT（Internet of Things）技術の急速な普及と共に、世界中のデバイスやセンサーから大量のデータが生成されるようになりました。同時に、ビッグデータ技術も急成長し、これらのデータを収集、保存、解析するための効果的な手法も開発されています。これに伴い、情報処理プロセスの自動化と最適化は多くの分野で重要な課題となっています。

本特定研究では実験的な研究で培った様々な分野の制御手法と自動化技術を背景に、リアルタイムな情報処理など新技術の開発・蓄積と普及を推進する中核的な役割を果たします。本研究はデータ駆動型制御や洋上風力の開発など広範な領域でその応用が可能であり、革新的なアプローチや技術の普及を、分野をまたがり行うことで課題解決力と競争力の強化を促し、新しい知識と価値の創造を目指します。

Development of a novel prediction model based on machine learning method for piston mode fluid resonance

日本大学理工学部 譚 雷
九州大学応用力学研究所 朱 洪忠

• Research Objectives:

Piston mode fluid resonance is a common phenomenon in ocean engineering which may occur in a moonpool, narrow gap between two side-by-side vessels, or oscillating water column devices. The large-amplitude resonance may hinder the normal operations of marine craft, but may also increase wave energy conversion efficiency. The prediction of resonant amplitude by traditional potential flow models is usually challenging due to the nonlinear damping effects. To address the issues, machine learning methods, which is famous for the predictive capabilities and computational simplicity, are utilized to develop a model for estimating viscous damping and fluid resonance.

• Research approach and results:

Firstly, experiments were conducted for preparing relevant data for training neural network algorithms. Two types of round buckets (with different diameters) and two types of square quadrangular buckets (with different side lengths) under various drafts were considered in the experiments. Free decay tests with various initial water column heights were performed and the water surface level during the oscillating was recorded. An experimental scene using a round bucket with a diameter of 250 mm is shown in Fig. 1(a), and two groups of free-decay results are shown in Fig. 1(b, c).

Based on the free-decay tests, a damping estimation method is developed to estimate the linear and nonlinear damping coefficients for each scenario. The damping estimation method is shown in Fig. 2. A comparison between experimental and numerical results is shown in Fig. 3.

• Conclusion and future work

Experiments with two types of buckets under various drafts and initial amplitude were conducted, and a damping estimation approach was proposed to estimate the linear and nonlinear damping coefficients. The comparison between experimental and numerical results demonstrate the effectiveness of the proposed approach.

In future work, neural networks approaches are to be applied to establish the model of the damping coefficients as a function of geometry, draft, and oscillating amplitude. Since more datasets would lead to more accurate damping estimation and expand the scope of application, published data will also be collected to enhance this study.

• Publications

- 1) H. Zhu, C. Hu, L. Tan, A digital twin approach for damping estimation of a ship towing system with suction caissons, The 13th International Workshop on Ship and Marine Hydrodynamics (IWSH2025). (to be presented)

• Research regime

譚 雷、日本大学理工学部助手 研究代表

朱 洪忠、九州大学応用力学研究所准教授 研究提案とマネジメント

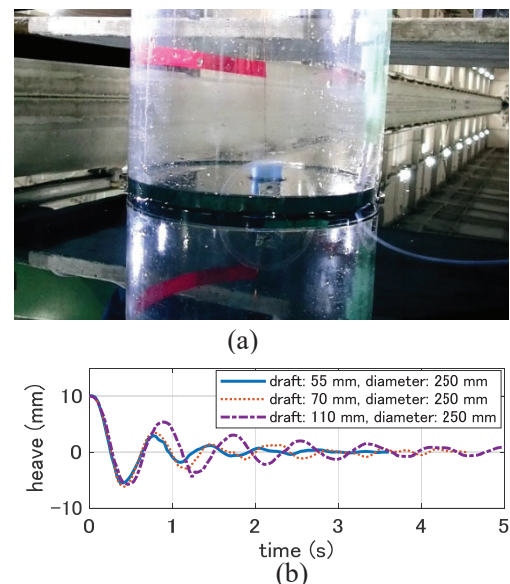


Figure 1. (a) Experimental setup for OWC free-decay tests; (b) Results with different draft.

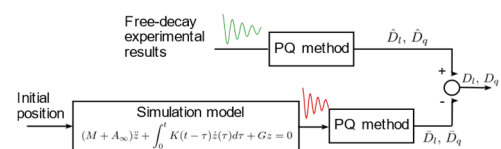


Figure 2. Damping estimation method.

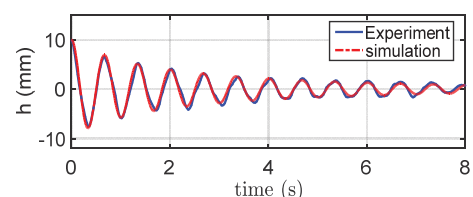


Figure 3. A comparison of experimental and numerical results.

ハイブリッドサイクルを用いた海洋温度差発電プラントの性能評価機能を有する 遠隔監視システムの開発

佐賀大学海洋エネルギー研究所 松田吉隆

目的 海洋温度差発電は、海洋表層の温海水と海洋深層の冷海水の温度差を用いて発電を行う。化石燃料等を用いずに海水のみを熱源としているため環境に優しい次世代の再生可能エネルギーとして重要である。海洋温度差発電プラントはその発電原理から僻地や海洋上などの遠隔地に設置されることが多いと想定されるため、遠隔地からプラントの監視・操作を行うことが必要となる。一方、水不足は世界的に喫緊の課題であるが、その解決方法のひとつとして海水淡水化がある。海洋温度差発電との複合利用を目的とした淡水化手法として、スプレーフラッシュ蒸発式海水淡水化プラントが検討されているが、この発電と淡水化を組み合わせる構成される、ハイブリッドサイクルを用いた海洋温度差発電プラントの研究が近年進められている。本研究では、ハイブリッドサイクルを用いた海洋温度差発電プラントの遠隔監視システムの開発に関する研究を実施した。

方法 本研究では、性能評価機能を有する遠隔監視システムを、先行研究のシステムに改良を加えることによって開発した。先行研究の遠隔監視システムは、佐賀県佐賀市にある佐賀大学研究室内 PC（クライアント）と沖縄県久米島にある佐賀大学海洋エネルギー研究所久米島サテライト PC（サーバ）で構成される。サーバ内には発電量制御シミュレーションのための発電量制御モデル、データのやり取りのためのテキストファイル、Web アプリケーションが保存されている。本研究において改良を施した遠隔監視システムの Web ブラウザ表示画面を Fig. 1 に示す。構成図の改良、画面サイズに対応したデータ表示機能の追加、グラフ表示機能の追加、性能評価パラメータの計算・表示機能の追加などを施した。

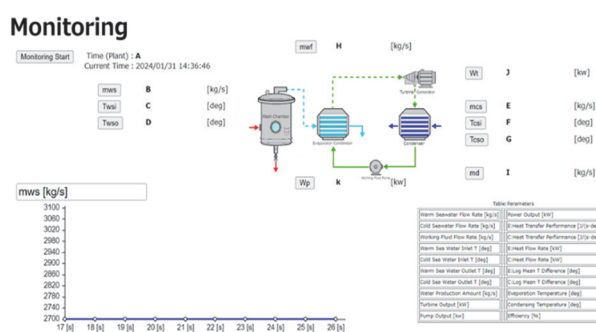


Fig. 1 遠隔監視システム Web ブラウザ開発画面

結果 本研究で開発した遠隔監視システムの動作を確認するために、遠隔監視実験を実施した。実験を通して、データ取得の正確性については十分であることが確認されたが、データ表示に関しては上手く表示されない場合があることが確認された。

研究成果報告 2024 年電気学会電子・情報・システム部門大会, 2024 年度(第 77 回)電気・情報関係学会九州支部連合大会にて発表

研究組織 研究代表者：松田吉隆（佐賀大学）、所内世話人：朱洪忠（九州大学）、研究協力者：後藤聡（佐賀大学）、杉剛直（佐賀大学）、江頭成人（久留米工業高等専門学校）、森崎敬史（佐賀大学）、安永健（大阪電気通信大学）、池上康之（佐賀大学）

トムソン散乱計測のためのアライメント自動化

東京大学大学院新領域創成科学研究科 江尻 晶

1) 目的

九州大学の QUEST 装置では、本課題代表者らがトムソン散乱計測装置を構築、運用、解析し多くの研究者に電子温度と電子密度の空間分布データを提供してきた。QUEST の特徴である長時間放電実験では、6 時間程度の放電に対し YAG レーザー (近赤外: 波長 1064nm) の正確なアライメントが求められる。現在は可視緑色レーザー (ガイド用) を基準として市販の小型白黒可視カメラを用いた自動アライメントシステムを構築、運用しているが、本課題では YAG レーザーを赤外線カメラで直接計測し、YAG レーザーを基準とした自動アライメントシステム構築のための試験を行う。

2) 方法

YAG レーザーのパワーは 1.6J, パルス幅 10ns, 繰り返し周波数は 10Hz である。緑色レーザーは 10mW/CW であり、カメラで撮影すると YAG レーザーが入射したフレームでは白飛び画像となり、画像解析では互いのレーザースポット中心の判別が不能となる (図 1: A ミラーフレーム, B YAG レーザー, C 緑色レーザー)。市販の小型赤外線カメラは高価であり、プログラミングで独自の制御システムを構築しても採用できるかどうか不明である。そこで Raspberry Pi に小型赤外線カメラモジュールを接続、比較的安価で制御しやすいカメラシステム (以下, Rasp. Camera) を自作し、YAG レーザーと緑色レーザーの撮影試験を行う。また、YAG レーザーは JIS C 6802「レーザ製品の安全基準」において Class 4 に該当しレーザ管理区域が設定され容易に使用することができない。よって YAG レーザーの模擬試験光として赤外 LED 光 (中心波長 870nm) を 10Hz で点灯させる装置 (以下, 模擬光装置) を別途製作する。

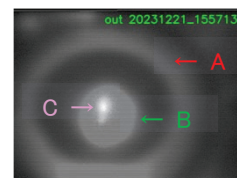


図 1 白飛び画像

3) 結果

図 2 に Rasp. Camera で撮影した画像を示す。紫色が YAG レーザー (一部はミラーのフレームで反射) で緑色レーザーのスポット中心 (図 2 黒点線) の判別が可能となり、この画像ではほぼ一致していることがわかる。スポット中心付近のみを切り出して画像解析することで、それぞれのレーザースポット中心位置を正確に求めることができる。静止画撮影のタイミングによっては YAG レーザーのみ、緑色レーザーのみが撮影される場合もあった。また、模擬光装置を製作し Rasp. Camera で撮影したところ、図 2 と同様に明瞭な紫色で示され、YAG レーザーの模擬光として活用できることがわかった。

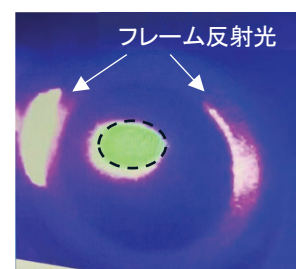


図 2 Rasp. Camera 画像

4) 考察及び今後の展望

Rasp. Camera により明瞭に 2 種類のレーザースポット中心の判別が可能となった。緑色レーザーを入切することで、YAG レーザースポットだけの画像も取得可能である。今後、露出調整を行い、プログラムを改良して現在稼働中の自動アライメントシステムへの採用を試みる。また、複数の Rasp. Camera の同時制御システムの検討・開発を開始する。製作した模擬光装置を活用し、最適なシステムの構築を目指す。

5) 成果報告 (2024 年度学会発表)

河野香, 井戸毅, 木下稔基, Peng Yi, Jiang Zhengnan, 江尻晶, QUEST におけるスイッチドキャパシタ ADC を用いたトムソン散乱計測, 第 41 回プラズマ・核融合学会年会, タワーホール船堀, 18P53.

クラウドを利用した QUEST 装置実験のデータ解析環境構

自然科学研究機構 核融合科学研究所 江本雅彦

目的

現在、核融合科学研究所では、プラズマ・核融合クラウド構想が進行中である。これは、LHD や QUEST 装置を含む、国内外に存在する核融合実験装置で得られた実験データや理論モデル計算のデータと、計算資源をシームレスに利活用できるプラットフォームの構築を行うものであり、研究成果の再利用化による核融合研究の促進を行うものである。本研究会の目的は、この構想実現のための環境の構築について議論を行う場を設けるものである。

成果報告

上記プラズマ・核融合クラウド構想実現のため、各研究所における実験データ環境の現状の把握、および問題点を洗い出すため、下記日程にて、研究会を開催した。尚、本会議は核融合科学研究所一般共同研究課題名『研究データエコシステム「プラズマ・核融合クラウド」構築と関連技術の高度化』との同時開催という形で行われた。

研究会概要

研究会名：研究データエコシステム「プラズマ・核融合クラウド」構築と関連技術の高度化 同時開催 九州大学応用力学研究所 研究会「クラウドを利用した QUEST 装置実験のデータ解析環境構築」

開催場所：自然科学研究機構 核融合科学研究所 401 会議室

開催日時：2025 年 2 月 25 日 10:00 ～ 16:30

参加者：会場参加 9 人、オンライン参加 17 人

発表内容

発表者は計 8 名で、下記のような発表が行われた。

氏名（所属）	タイトル・要旨
中西秀哉（核融合研）	「プラズマ・核融合クラウド」の概要と取組課題、並びに進捗状況
	プラズマ・核融合クラウド構想の趣旨・概要の説明、関連する研究データエコシステム構築事業ユースケー

	ス創出課題 ならびに令和6年度のオープンアクセス加速化事業における取り組みについて説明を行った。
佐竹真介（核融合研）	新プラズマシミュレータシステムの概要
	NIFS と QST が共同調達を行い、2025 年 7 月より運用開始するスーパーコンピュータシステムについて、その構成等の詳細説明が行われた。
山中顕次郎（情報研）	AWS NIFS-LHD オープンデータを活用したデータ転送の評価
	現在、AWS のオープンデータスポンサーシッププログラムにより公開されている LHD の計測データについて、各種ツールによる転送速度等の性能調査結果の発表
吉川正志（筑波大）	GAMMA 10/PDX における実験データ取得と NIFS へのデータ転送
	筑波大学の GAMMA10/PDX 装置及び同実験についての紹介と、SNET による核融合科学研究所との連携についての説明があった。また、超伝導ミラー装置 Pilot GAMMA PDX-SC についても紹介が行われた。
星健夫（核融合研）	計算と計測データの連携
	計測データからの逆問題解析フレームワーク2DMAT と、計算と計測データの連携を通じて、NIFS の次期実験装置計画であるマイクロ集団現象観測プロジェクト（MCPoP）との関係および MS10 関連について、説明が行われた。
長谷川真（九州大）	QUEST 装置実験データ解析システムの新たな構築とその活用
	QUEST 実験の中でデータ解析システムにおけるリレーショナルデータベースの活用事例と、Pythonを用いたGUIツールの説明、GitLabによるコード共有等の説明が行われた
江本雅彦（核融合研）	Fusion Cloud 構想に向けた、ポータブルな解析環境の開発
	プラズマ・核融合クラウド構想の一部としてのオープンデータサービスの紹介と、これらの解析を行うための環境として、Dockerによるコンテナ技術や、推奨プログラム言語の提案等が行われた。
稲垣滋（京都大）	Heliotron J の実験データへのアクセスと解析ツール
	Heliotron Jの実験ネットワーク環境の説明と、データアクセス手法の説明および問題点が紹介され、今後のデータ公開に対する提案が行われた。

また、研究者発表後、総合討論が行われ、下記課題について話し合った。

- I. プラズマ・核融合クラウドおよび本研究会の今後の運用・活動形態について
- II. 教育と人材育成、交流の場の形成について
- III. 核融合（実験）データの共通・共用化、オープン化に向けた取り組みの統一と連携について
- IV. Data Free Flow with Trust の適用例としての核融合データ

QUEST 装置における CHI プラズマ現象解明のための解析システムの開発

海上保安大学校 准教授 黒田 賢剛

トカマク装置ではトロイダル方向の電流を駆動させてプラズマを維持させる必要があり、装置のコンパクト化を目指した球状トカマク装置ではセンターソレノイドコイルを用いない非誘導の電流駆動手法を確立させなくてはならない。CHI は米国の球状トカマク装置 HIT-II 及び NSTX で開発された電流駆動手法である。両装置では、真空容器の中心壁と外周壁がセラミックにより絶縁されており、この絶縁された容器壁を電極として使用し、電極間に高電圧を印加させて電極からプラズマ中に kA オーダーの電流を入射させる。電極から、トロイダル磁場とポロイダル磁場によって形成される螺旋状の入射磁束に沿って電流が入射され、この入射電流により磁束は球状に発展して閉じ込め配位を形成する。CHI は直接的に電流を入射させる強力な電流駆動手法であり、パルスの大電流入射により劇的に変化するプラズマ現象は不明瞭な点が多く、学術的にも興味深い。装置導入にあたり複雑な電極構成が難点であったが、九州大学の球状トカマク装置 QUEST では真空容器内に簡易型の円環バイアス電極を設置し、真空容器に対してこのバイアス電極の高電圧を印加することで従来と同等の電流駆動を達成した。本件ではこの QUEST において生成された CHI プラズマ現象解明のための解析システムの開発に取り組んだ。

2024 年度は QUEST の容器壁に設置した磁気センサーアレイで計測されるトロイダル磁場の変動値 B'_{tor} から入射電流分布を求めて CHI の磁束発展の解析を行なった。電流が発展配位の磁力線に沿って流れる force-free 近似モデルを用い、 B'_{tor} 値から算出した入射電流分布とトロイダル電流の計測波形より図 1 に示す CHI 磁束の発展過程が見積られた。磁束の磁力線(曲線)に沿って電流(赤矢印)が流れる見積もり配位はプラズマ画像とも一致し、その妥当性が示された。この手法を用いれば、様々な磁束条件や電極構成においてどのように入射電流が流れて磁束が発展するのか解析することが出来る。実験値との比較により、見積もり精度を向上させるためのいくつかの改善点が挙げられた。まず、この算出手法では容器壁間を連結する磁力線上に流れる電流が考慮されていないため、電流の流れない領域が算出されており、この領域の電流についての計測データを取得する必要がある。この領域に電流が流れている場合、センタースタックに入射電流と逆向きの負の流入電流が流れるはずであり、その詳細分布を調べるためセンタースタックの磁気センサーを増設した。またセンタースタック近傍では B'_{tor} 値の数十倍高い垂直磁場の変動が生じることが示され、精度よくトロイダル磁場成分のみを検出しなければならない。電極近傍においては急峻な電流駆動により容器壁に数十 kA オーダーの渦電流が流れていることが示唆され、そのため実験値との磁束分布のズレが確認された。渦電流についてはフラックスループのループ電圧値から見積もり、算出コードに組み込む予定である。図 1 の $t=0.2$ ms より前の初期段階の発展配位は見積もることは出来なかった。これ以前の、初期入射磁束が入射領域から急峻に噴出する立ち上がり過程は平衡や軸対称性などの仮定が成り立たない過渡状態にある可能性がある。今後の展望として、より正確な入射電流分布の揺動データが得られれば、それによる発展配位の変動の振る舞いを見積もることで磁束発展過程の機構を解き明かす手掛かりが得られると考える。

2025 年度は上記の点について改善を試みる。

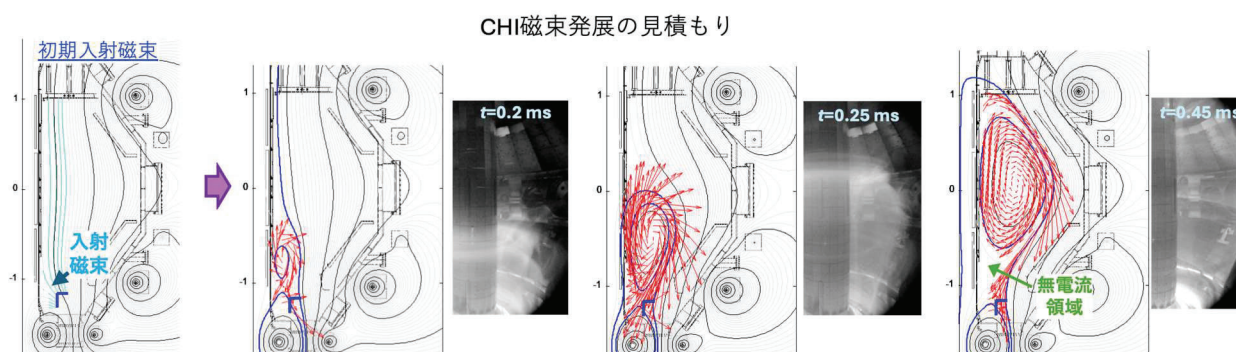


図 1 磁気センサーアレイの計測データから算出した入射電流分布より force-free 近似モデルを用いて見積もった各時刻の CHI 発展配位とプラズマ画像との比較。

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 Li_2ZrO_3 は多量の水(H_2O)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 Li_2ZrO_3 表面にラジカルを形成させ、H 貯蔵量の増加および H 解離温度の低下を目指す。特に、イオンビーム分析の一つである反跳粒子検出(ERD: elastic recoil detection)法を用いて、 Li_2ZrO_3 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、 Li_2ZrO_3 中の H 吸収および放出過程について明らかにすることを目的とした。

実験方法 これまでの研究成果に基づき、炭酸リチウム(Li_2CO_3)および酸化ジルコニウム(ZrO_2)粉末を 1300°C 以上の高温および空気雰囲気において焼結することによって、直径 8 mm、厚さ 1 mm のディスク状の Li_2ZrO_3 試料を作製した。 Li_2ZrO_3 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)、 $a=c=0.541\text{ nm}$ 、 $b=0.903\text{ nm}$ および 3.46 g/cm^3 であった。次に、マグネトロンスパッタリング装置を用いて、室温および真空雰囲気において試料両面に厚さ約 25 nm の Pt を蒸着した。蒸着後、電界放出形走査電子顕微鏡(FE-SEM)を用いて、試料表面の形態を観測した。これらの試料内部には、作製時に吸収された H_2O および CO_2 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°C 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 $1\times 10^5\text{ Pa}$ 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ヒーターにより室温から $400\sim 500^\circ\text{C}$ までの各温度で 10 分間の等時加熱(isochronal annealing)した後、ERD 法により試料表面の水素濃度分布を測定し、試料からの水素放出量を求めた。また、水素分子が試料から放出されていることを Q-mass を用いた TDS 法および 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 Li_2ZrO_3 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- Li_2ZrO_3 試料の重量増加の割合は、空気暴露時間の増加とともに増加した。その重量増加は約 2500 hrs(約 3 ヶ月)において Li_2ZrO_3 試料の飽和値の約 5 倍に達することがわかった。この重量増加の速度は、湿度に大きく影響することもわかった。従って、この重量増加は大気中の水蒸気吸収が要因の一つであると考えられる。次に、ERD 法により、多量の H が試料作製時に吸収されることがわかった。約 350°C までの真空加熱により、ほとんどの残留 H は放出されるが、試料中の H 濃度が空気暴露により再び増加することがわかった。この結果より、重量増加は大気中の水蒸気吸収が要因の一つであることが明らかになった。

次に、室温および 30-55 %R.H.の相対湿度の条件で、4000 時間(約 5 ヶ月)以上の長時間の空気暴露により重量変化がほぼ一定になった Pt- Li_2ZrO_3 試料について、室温から $400\sim 500^\circ\text{C}$ の温度までの各温度で 10 分間の isochronal annealing 実験を行い、ERD 法を用いて Pt- Li_2ZrO_3 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、

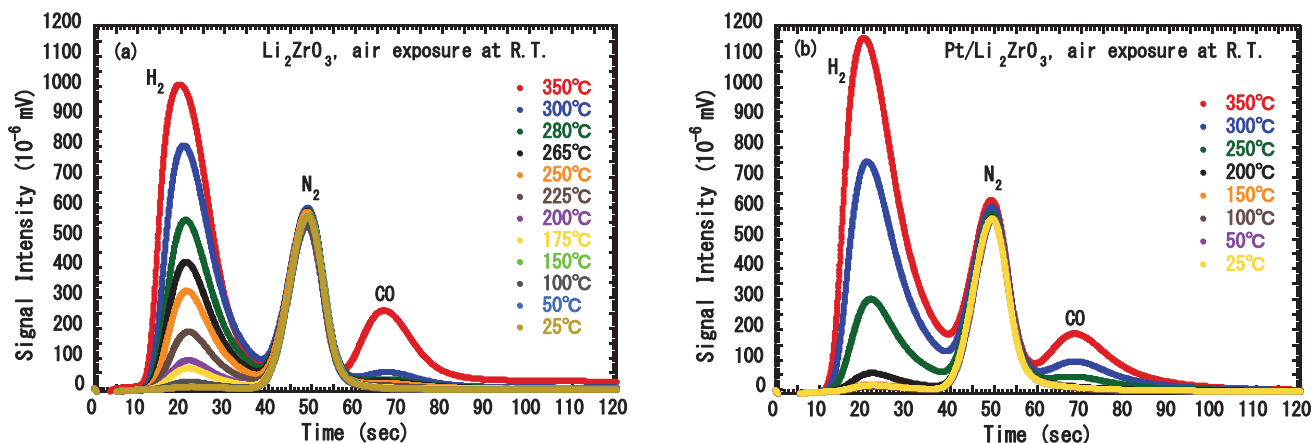


図1 至温で空気暴露された(a) Li_2ZrO_3 および (b) $\text{Pt-Li}_2\text{ZrO}_3$ 試料における GC スペクトル。

$\text{Pt-Li}_2\text{ZrO}_3$ 試料中の捕捉 H 濃度は、約 100°C 以下の低温で急激に減少することがわかった。

次に、約 5000 hrs (約 6 ヶ月) まで空気暴露された Li_2ZrO_3 および $\text{Pt-Li}_2\text{ZrO}_3$ 試料から得られた TDS スペクトルから、 Li_2ZrO_3 試料の場合、 H_2O および CH_4 が約 30°C の低温から放出し、続いて H_2 が約 90°C 、 CO_2 が約 210°C の温度から観測された。他方、 $\text{Pt-Li}_2\text{ZrO}_3$ 試料の場合、 H_2 および CO_2 がそれぞれ約 50°C および約 90°C のより低温から放出されており、さらに各ガス種の放出量は、Pt 効果により約一桁増加することでもわかった。従って、Pt 蒸着による表面改質は H_2O を室温で分解して H を貯蔵する水分解・貯蔵特性を向上させるだけでなく、 CO_2 の吸収、蓄積および放出特性も改善させることが明らかになった。

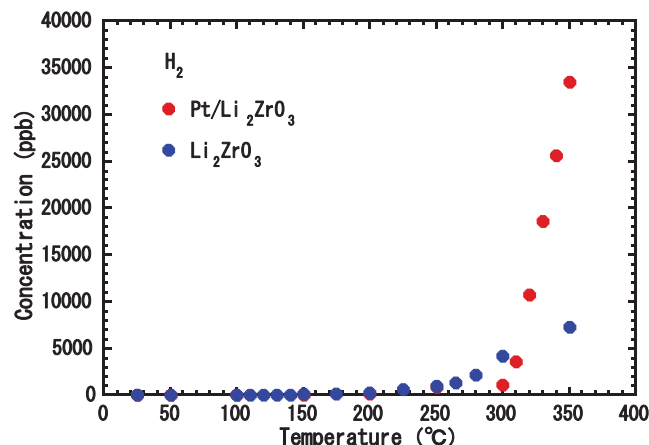


図2 空気暴露された Li_2ZrO_3 および $\text{Pt-Li}_2\text{ZrO}_3$ 試料からの H_2 放出量における温度依存性。

次に、NISSHA エフアイエス株式会社製のガスクロマトグラフィーを用いた水素ガス分析が実施された。TDS 測定と同様に、約 5000 hrs (約 6 ヶ月) まで空気暴露された Li_2ZrO_3 および $\text{Pt-Li}_2\text{ZrO}_3$ 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 1×10^{-5} 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 $4^\circ\text{C}/\text{min}$ の昇温速度で 350°C まで加熱した。 Li_2ZrO_3 および $\text{Pt-Li}_2\text{ZrO}_3$ から放出されたガスは、導入される Ar ガスによってオートサンプラーへ送り込まれ、1 ml のガスが 3 min 間隔でカラムへ送り出される。さらにそれらのガスは、流量制御気を用いて、ポンプにより取り込まれ、空気浄化フィルターを透過して水素および水が除去された空気(キャリアガス)によりカラム内へ導入され、終端の半導体ガスセンサーによって感知され、 H_2 、 N_2 および CO が主に計測された。空気暴露された Li_2ZrO_3 および $\text{Pt-Li}_2\text{ZrO}_3$ を Ar 雰囲気中で加熱したときに測定された GC スペクトルをそれぞれ図 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) および (b) 中の 10~35、40~60 および 60~80 sec のピークは、それぞれ H_2 、ガスラインおよび Ar ガスおよび空気のキャリアガス中に初めから含まれている N_2 および CO を表す。従って、 H_2 および CO が空気暴露された Li_2ZrO_3 および $\text{Pt-Li}_2\text{ZrO}_3$ から約 200°C 以下の低温で放出していることがわかる。さらに、図 2 に示すように、 $\text{Pt-Li}_2\text{ZrO}_3$ からの H_2 放出量は Li_2ZrO_3 からの H_2 放出量の約 5 倍であることがわかった。

まとめ 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°C までの真空加熱で表面改質処理を行った $\text{Pt-Li}_2\text{ZrO}_3$ 試料の H_2O 分解、 CO_2 吸収、 H_2 および CO 放出特性について、WG、ERD、TDS および GC 法を組み合わせで調べた。 $\text{Pt-Li}_2\text{ZrO}_3$ 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下の条件下において、約 2500 hrs (約 3 ヶ月) で Li_2ZrO_3 試料の飽和値の約 5 倍に達することがわかった。この重量増加は、 H_2O の解離、 LiOH および Li_2CO_3 の形成(即ち、 CO_2 の捕獲)が Pt 被覆による Li の偏析および O 空孔の形成によって促進されたことを表す。さらに、 H_2 が Pt 被覆効果により約 50°C の低温で放出されることがわかり、低エネルギーによる H_2O 分解、H 吸収および H_2 放出の可能性を示唆した。

粉体ターゲットプラズマプロセスにおけるターゲットと薄膜の関連 Relation between target properties and thin film qualities in powder target plasma process

佐世保高専, 川崎仁晴、竹市悟志、鴛淵梨花

National Institute of Technology, Sasebo College

H. Kawasaki, S. Takeichi, R. Oshibuchi

1 概要

社会的課題を解決し、国連の持続可能な開発目標や「Society 5.0」を達成するための日本の国家戦略として、高機能な新素材を創出する研究開発が提唱されている。また、ほとんどの分野で従来材料の探索が限界に近づきつつあり、新機能材料への探索範囲の拡大が必要となっている。しかし、多系統材料の探索は、材料に含まれる元素の数が増えるほど複雑になる。スパッタリング成膜は、安価かつシンプルなシステムで、高い成膜速度で均一性の高い膜が得られることから、薄膜の成膜に広く用いられている。しかしながら、従来のスパッタ蒸着では、高密度のバルクターゲットを用いるため、複数の元素からなる薄膜を作製することは困難であった。これを解決するために、我々は多元素粉末ターゲットを用いた薄膜作製法を開発した。これまでに、数種類の粉末を混合したターゲットを用いて、1 サイクルで数種類の元素組成を持つ薄膜の作製に成功した。この薄膜作製中で、成膜時にターゲットを入れ替えることにより、薄膜の膜質、特に成膜速度や結晶性が変化することが分かった[1~3]。

一方、通常のスputタリング法で薄膜作製を行う場合、成膜速度と膜質が成膜直後と、ある程度成膜が進んだ後では異なる事が考えられる。特にマグネトロンスputタ法では成膜部分のエロージョンが発生するため、長時間成膜後は膜質・成膜速度ともに大きく低下する事が知られている。本研究では、ターゲット表面の状態を変えて成膜を行い、そのことが膜質にどのように影響を及ぼすかを調べた。本年度は、成膜前後の粉体ターゲットの性質と薄膜の膜質の関係性をさらに詳しく調べ、粉体ターゲットの表面状態や結晶性、元素組成比と作製した薄膜の膜質（表面状態、結晶性、組成比）との関係を調べた。ターゲットとしては、アルミニウムドーパド酸化亜鉛(AZO)とZnOやの粉体を利用した。

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put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、ステンレス製のターゲットホルダーに酸化アルミと酸化亜鉛の2種類の混合粉末を用いた粉末ターゲットをセットした。真空容器内はターボ分子ポンプとロータリーポンプで 5×10^{-3} Pa 以下まで排気し、その後、アルゴンガス(Ar:99.99%)を 10 sccm の流量で真空容器内に封入した。成膜全圧は 10~20 Pa とした。周波数 13.56MHz、パワー100W の RF 電源でスパッタリング成膜を行った。Si 基板ターゲットから 2.0cm の位置に設置した。成膜時間は 2~8 時間、基板温度は室温とした。薄膜の結晶構造は XRD で、組成は XPS で測定した。膜厚は段差膜厚計(ET4000A)を用いて測定した。

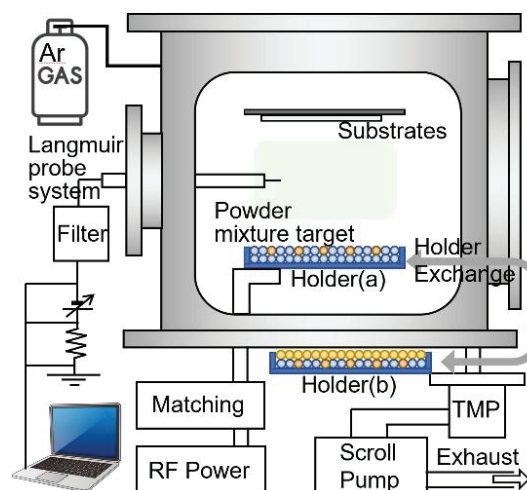


図1 実験装置

3 実験結果

ZnO:Al₂O₃=90:10wt%の混合粉末ターゲットを用いて、室温でAZO薄膜を作製した。蒸着時間は変化させ、基板は加熱しなかった(すなわち室温で使用した)。今回は(1)粉末ターゲットを60分ごとに新しいものに交換した場合(以下、「交換

粉体ターゲット」と、(2)ターゲットを交換しない場合（以下、「非交換粉体ターゲット」）の2つの条件で成膜した。図1は、交換粉体ターゲットと非交換粉体ターゲットを用いて作製したAZO薄膜の成膜速度を示している。交換粉体ターゲットを用いた場合の成膜速度は、時間とともに徐々に低下し120分間で90%となった。一方、非交換粉体のターゲットを用いた場合の成膜速度は時間とともに急激に低下し90分後に60%となった後、飽和した。図2は、非交換粉体のターゲットを用いて作製した薄膜の結晶性を示している。非交換粉体のターゲットでは、蒸着60分後にZnO(101)に起因すると思われるピークが低角側にシフトし、ピーク強度の低下とピーク幅の広がりも観察された。このことから、ターゲット自体の結晶性の低下に加え、アルミニウムや酸素の混入により格子定数が変化したか、使用粉末に圧縮応力による結晶歪みが生じたと考えられる。

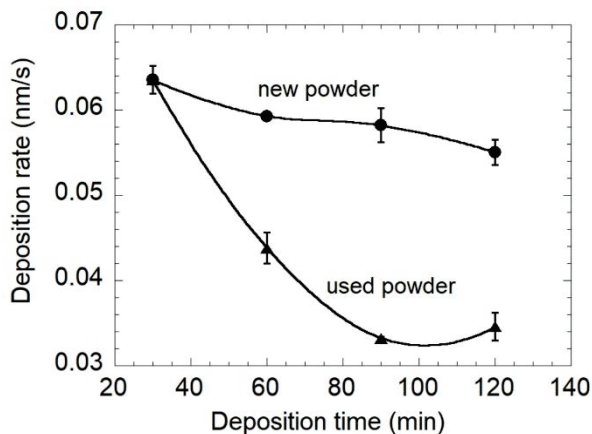


図1 成膜速度のターゲット依存性

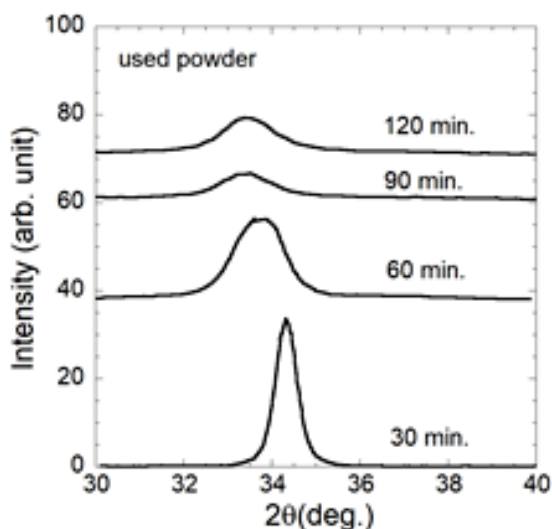


図2 非交換粉体のターゲットを用いて作製した薄膜の結晶性

図3には、交換粉体のターゲットを用いて作製した薄膜の結晶性を示している。交換粉体のターゲットでは、30分後に34度付近にZnO(101)のピークが得られた。さらに、120分後は32~34度付近にZnO(100)、(002)、(101)のピークが現れている。このことは薄膜表面までAZOの結晶構造が形成されているを示唆している。

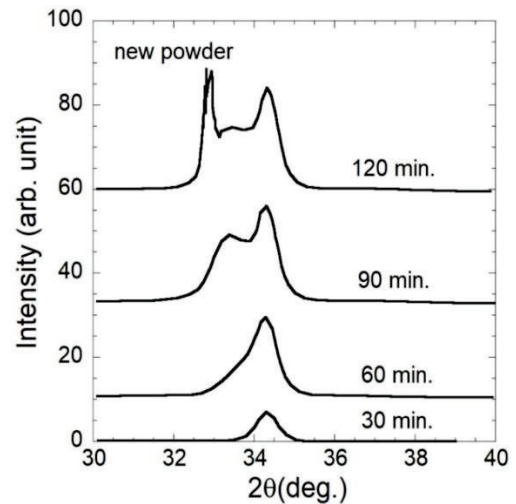


図3 交換粉体のターゲットを用いて作製した薄膜の結晶性

4. まとめ

AZOの組成に近い混合比を持つ混合粉体ターゲットを用いて、いくつかの方法でAZO薄膜の作製を行った。その結果、粉体を入れ替えながら作製することで、比較的結晶性のよい薄膜が作製できることがわかった。

謝辞

この研究の一部は、本研究は、九州大学応用力学研究所の共同利用研究の助成、科学研究費補助金基盤(A) (No. 18H03848)および基盤(C) (No.23340181 and No. 16K04999), などにおける共同利用・共同研究で行われた。

参考文献

- [1] H. Kawasaki et al, Jpn. J. Appl. Phys. 60 SAAB10 (2021).
- [2] H. Kawasaki et al, Jpn. J. Appl. Phys 61 SA1019 (2021).
- [3] T. Satake, et al, e-Journal of Surface Science and Nanotechnology, Vol. 21(3), p. 218 (2023).

金属間化合物中の空孔型欠陥への水素原子の捕獲挙動に関する研究

大阪公立大学・大学院工学研究科 堀史説

はじめに

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。材料中の水素は熱伝導や強度などの材料特性と密接な関係を有しており、特に原子力材料では中性子反応に際し発生した水素の材料への侵入によるスウェリングや核融合プラズマによるイオン侵入がいずれも材料劣化に繋がる。水素原子の材料中での振る舞いは合金種に強く依存するが、タンゲステンなど一部の金属では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。一方で、水素-空孔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、軽元素である水素は元素分析や電子状態評価が極めて難しく、実験による空孔の水素多重捕獲の実証は前例がない。本研究では B2 型規則構造の Fe-Al 合金に対し制御した電子線照射によって単空孔のみを導入した後に電気化学的に水素を注入し、注入量を増やしていくと材料内に蓄積される水素量が増加することから水素が何らかの浅い捕獲状態で蓄積されている結果を示すことから、空孔内に水素が捕獲されていると結論つけていた。さらに、前年度は注入水素量の異なる試料の低速陽電子消滅測定において、陽電子パラメータの特異な変化を観測し、これが空孔内の多重捕獲を示唆していると結論つけた。今年度はこの結果を裏つけるため、第一原理計算により空孔内に捕獲された 2 つの水素原子の安定位置を計算し、その結果を用いて陽電子消滅計算を行い実験結果との比較検証を行った。

方法

計算は以下の手順で行った。原子配置の計算には第一原理電子状態計算プログラムの VASP(Vienna Ab initio Simulation Package)を用い、扱う原子は Al:64、Fe:63、H:1、U(空孔と仮定):1 の計 129 個に設定して原子位置の緩和計算を行った。求めた水素原子位置を基に構成した Fe-Al 合金中での super imposed atom method による陽電子波動関数を計算した求めた波動関数から電子との消滅率を求め陽電子寿命を算出した。

結果

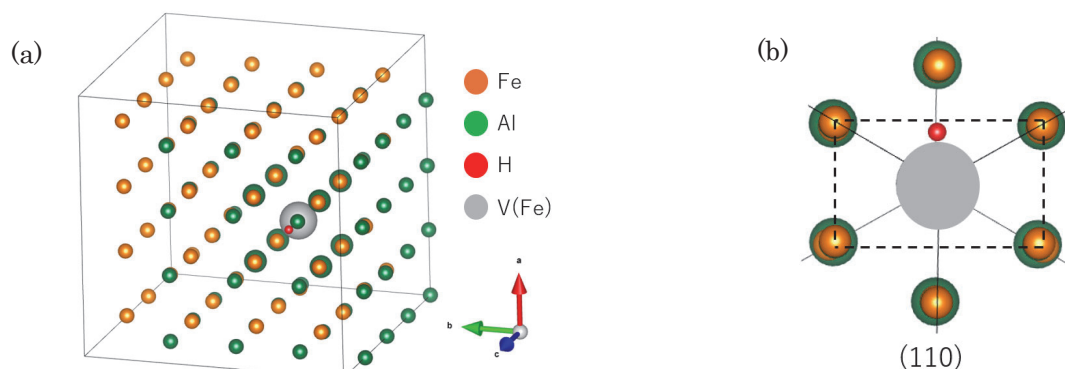


図1 Fe-Al合金中の鉄空孔内に水素を配置した場合の安定配置の第一原理計算結果(a)3次元、(b)(110)断面

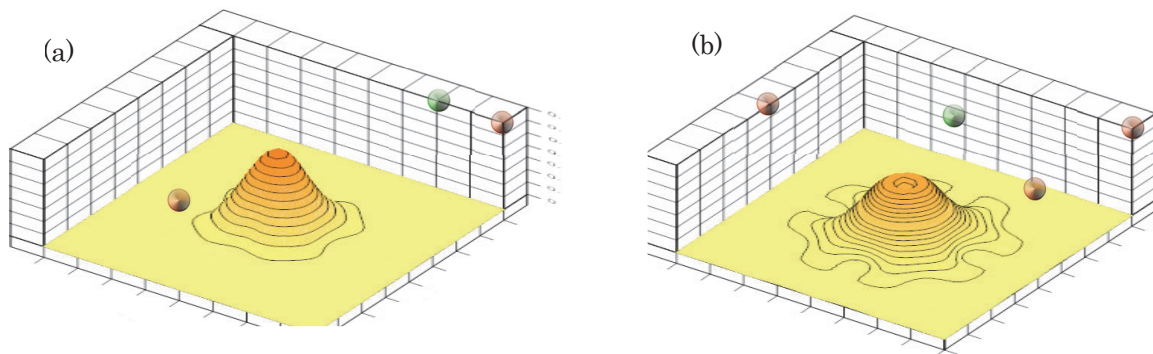
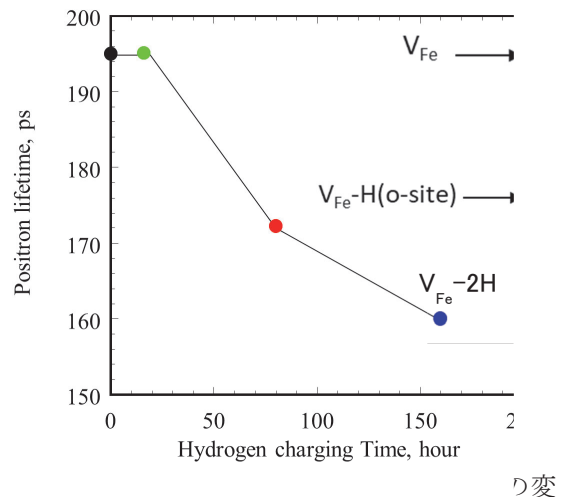


図2 (a) 鉄空孔のo-siteおよび、(b) 鉄空孔の中心に水素を配置した場合の(110)面での陽電子波動関数

前年度の結果では、16 時間の水素注入で空孔を導入した合金の陽電子 S パラメータが減少し、80 時間注入では S の値は変化しないものの深さ方向に対してその変化が広がりを見せ、さらに 160 時間注入では S パラメータがさらに大きく減少していた。このような S パラメータの減少は、陽電子は注入前に導入していた空孔を検出しておりそこでの電子密度の増加を示唆している。第一原理計算により緩和した鉄空孔内の水素原子安定配置を図 1 に示す。水素原子は空孔の中心でなく八面体位置 (o-site) 付近に配置した。空孔の中心に水素を配置した場合と、o-site に水素を配置した場合の陽電子波動関数の比較を図 2 に示す。水素の位置により波動関数は分布が変化



しており消滅寿命値も単空孔より低い値を示した (図 3 の $V_{Fe-H(o-site)}$)。この陽電子寿命計算値は 80 時間注入試料の陽電子測定値とほぼ一致した。さらに図 3 からわかるように、S パラメータが大きく変化した 160 時間でも、2 個の水素を導入した計算値と測定値が良く対応しており、過剰な水素の注入により空孔内に複数の水素が入ったことを示すことができた。

謝辞：本研究は九州大学応力研の共同利用の助成を受け、同研究所の大澤一人先生、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として実施しました。

成果発表

- [1] 平山翔太、田嘉信、宮住賢太、徐虬、大澤一人、安永和史、山本春也、堀史説「B2 型 Fe-Al 合金中の空孔への水素原子多重捕獲」日本金属学会春季講演大会 2024 年 3 月 東京
- [2] J. Tian, S. Miyazumi, Q. Xu, K. Ohsawa, K. Yasunaga, Y. Saito, F. Hori 「Interaction between hydrogen and defects introduced by H⁺ irradiation in B2 type Fe-Al alloy」 34th Annual Meeting of MRSJ 2024, Yokohama
- [3] 徐虬、堀史説、大澤一人、安永和史「加速器照射を利用した規則型 Fe-Al 合金中の空孔制御による多量水素貯蔵に関する研究」若狭湾エネルギー研究センター第 26 回研究報告会 2024 年 11 月 福井大
- [4] J. Tian, S. Miyazumi, F. Hori, Q. Xu, K. Ohsawa, K. Yasunaga, Y. Saito 「Hydrogen-defect interactions simultaneously introduced by H ion irradiation in B2 type Fe-Al alloys」材料物性工学談話会 2024 年 1 月 阪大

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、いくつかの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（Imamura et al. 2025）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）によるシア一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。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。この水槽は幅が広く深いため、側壁の影響が小さいという利点がある。今年度は、昨年度に引き続き、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、流速の短周期時間変動を超音波流速計で計測することによる乱流の直接評価を行ったが、今年度はとくに送風機で風を水面上に吹かせることで、風による混合と、風と波が共存する場合の混合を評価した。

実験方法 周期 1 秒（波長 1.56 m）、振幅 4 cm の波を造波機で発生させ、造波器からおよそ 29m の位置に超音波流速計（Nortek 社製 Vector）、50Hz 水温計、29 連水温計、そして風速計を設置して計測を行った（図 1）。技術職員の野田氏・前田氏に作成して頂いた装置を用いて発生させたマイクロバブルを散乱体として計測を行う。

水槽実験 全体図

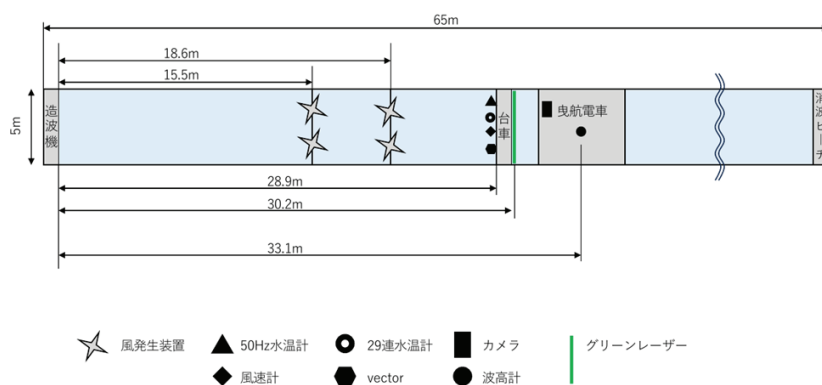


図 1 水槽実験全体図。左の造波器で図中右向きの波を発生させる。中央の星印にある送風器は右向きの風を生成する。造波器から約 29m の位置に、流速計などを設置して水中の流速、水温、風速を計測する。曳航台車で波高を計測しつつ、グリーンレーザーで視覚化されたマイクロバブルをカメラで撮影する。

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鉛直流速の時間変化（上図）とエネルギースペクトルの時間変化（下図）の一例を示す。青矢印の時刻（約 110 秒）で送風機が稼働し、風が吹くことで比較的強い乱れが 120 秒から 210 秒くらいまで生じていることが分かる。風はその後もしばらく吹いているが、乱れの高周波成分は 210 秒以降収まる。オレンジ色の矢印の時刻（約 410 秒）で造波器を稼働さ

せた。計測地点に波が到達するのは約 500 秒であることが、軌道運動流速に対応する鉛直流速の激しい変化で見て取れる。反射波が到達する前の緑色の矢印の時刻（520 秒）に造波器を停止させた結果、計測地点での波は約 610 秒で収まった。エネルギースペクトルをよく見ると、530 秒および 550～580 秒、620～630 秒で乱れの高周波成分が増大している。また水温分布の時間変化（図 3）を見ると、風が高温層を水深 20 cm 程度まで押し下げているが、約 530 秒の波による乱れが発生すると、水深 30 cm 程度にまで一気に高温層が達している様子が見て取れる。これらの結果から、風よりも風と波が共存することで生じる 2 次循環がより効果的な海水混合を引き起こしていることを示している。

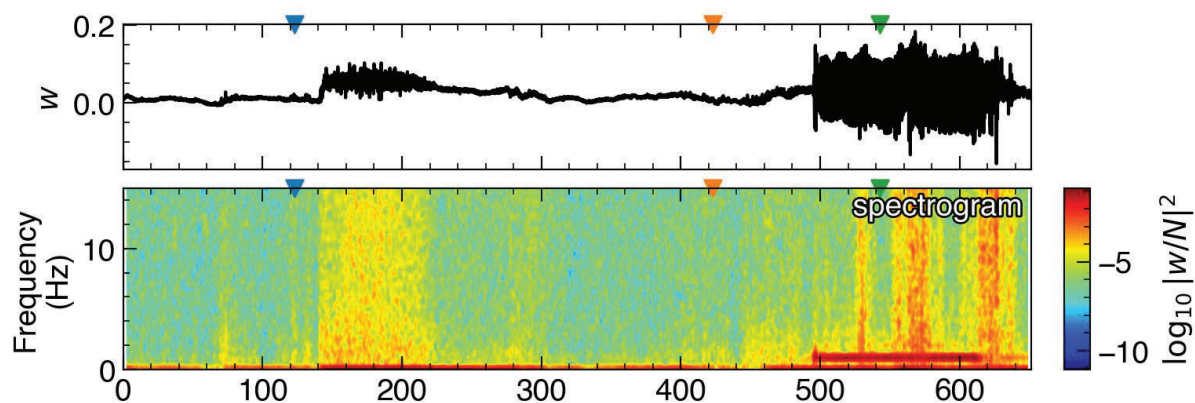


図2 vector で計測した流速変動の一例。上図が鉛直流速 (w) の時系列。下図が w^2 ののスペクトルの時系列。横軸が時間、縦軸が流速（上図）と周波数（下図）。

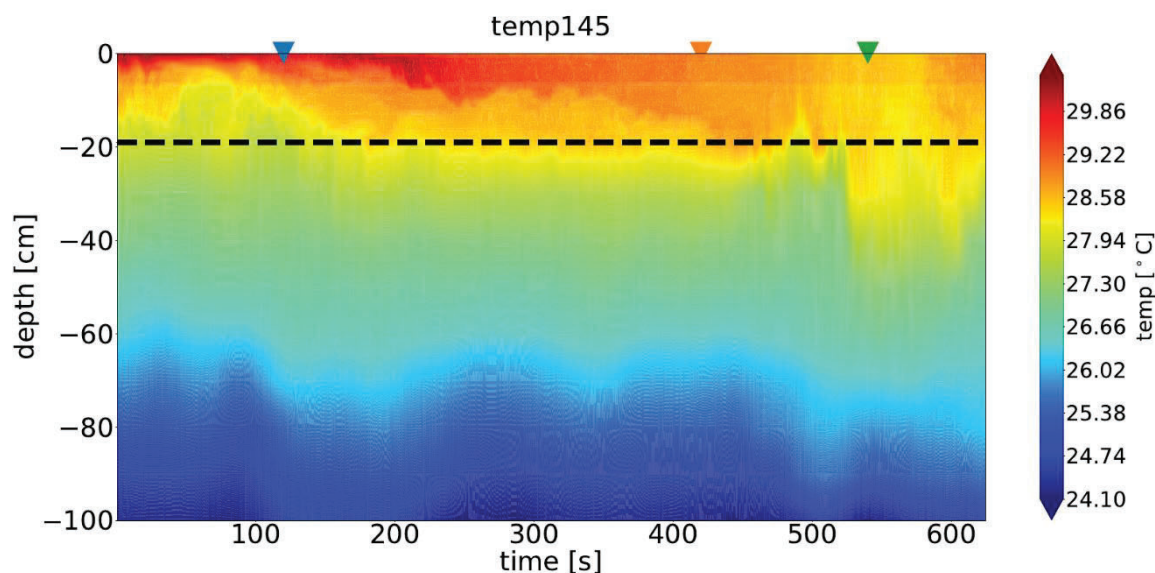


図3 水温の時間鉛直断面図。縦軸が水深、横軸が深さ。

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 3 回生 今村 春香

高低差観測におけるエアロゾルの光学的特性の変動

富山大学学術研究部理学系 青木一真

要旨

近年、日本国内のエアロゾルは、わずかながら減少傾向に見られるが、越境汚染や黄砂や火山噴火の影響でしばしば大気を混濁させる。本研究では、その様々な影響を平地（福岡・春日、長崎）と山岳地（雲仙岳）の高低差の観測から、九州北部上空におけるエアロゾルの光学的特性の影響について調査することを目的とした。高低差の結果より、光学的厚さは差が見られたが、粒径分布の傾向は月によって同様な傾向が見られた。

1. はじめに

近年、大気中に浮遊する微粒子（エアロゾル）は、日本国内ではわずかながら減少傾向にある。本研究は、1996年から長崎大学、2003 年からは九州大学応用力学研究所、2022年からは雲仙岳において、太陽直達光と周辺光の放射輝度を観測するスカイラジオメーターを使い、エアロゾル光学的特性の解析を行っている。本研究では、そのさまざまな影響を平地（福岡・春日、長崎）と山岳地（雲仙岳）の高低差を利用した観測から、九州北部上空におけるエアロゾルの光学的特性の影響について調査することを目的とする。

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、2024年1月から5月までの長崎（NGS）、雲仙岳（UZN）、春日（KSG）における $0.5\mu\text{m}$ のエアロゾルの光学的厚さ（AOD(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。高度差約1000mのAOD(0.5)の差は量的な違いは見られたものの、Alphaの月変化は、同じような傾向が見られた月とそうでない月が見られた。これらは、越境汚染や黄砂など広域に影響を受けたときとそうでない場合や輸送経路の相違を示している。4月のNGSやUZNは黄砂の影響に対して、KSGは黄砂+越境汚染の影響が示され、高度差と輸送経路の違いも示された。

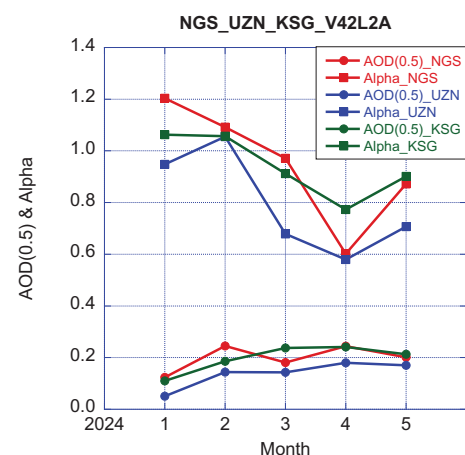


Fig. 1 長崎（NGS）、雲仙岳（UZN）、春日（KSG）の
AOD(0.5)とAlphaの月平均値

4. 研究成果

Aoki et al: Long-term and current status in ground-based and maritime solar aureole measurements of aerosol optical properties from AERONET and SKYNET (AGU2024, Washington DC, 2024.12.09)

5. 研究組織

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

A hybrid dynamical-statistical modeling approach for understanding tropical basin interaction

(力学的・統計的モデルによる熱帯海盆間相互作用の統合的理解)

海洋研究開発機構 Ingo Richter

1. 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 remote basins have their own variability modes and that these modes can influence the tropical Pacific and ENSO (Cai et al. 2019, *Science*). 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. Furthermore, there are many outstanding questions regarding how tropical basin interaction (TBI) shapes the response of the climate system to greenhouse gas forcing.

2. Activities associated with the research project*2.1 Building a data-driven model to replicate the behavior of global climate models*

The well-known linear inverse model (LIM) approach has been extended in two ways: 1) We have developed a technique to split the linear operator in such a way that the interaction between specific basins can be suppressed by zeroing out off-diagonal elements of the operator matrix (Kido et al. 2023, *Climate Dynamics*). This allows assessing the contributions of individual basins to TBI. 2) While, traditionally, LIMs have been trained on observational data, we have trained the LIM on output from a global climate model.

A free-running control simulation with a global climate model has been performed, and the model output has been used to train a LIM. We have used this LIM to evaluate the influence of the equatorial Atlantic on ENSO and compared the results to an equivalent experiment with our global climate model. The comparison suggests that the LIM can reproduce the behavior of the climate model rather well, while only requiring a fraction of the computational resources. A manuscript describing these results is currently in preparation.

2.2 ENSO's influence on the equatorial Atlantic

A study examining the influence of ENSO on the equatorial Atlantic was started in FY2023 and included support from a RIAM Joint Research Grant (2023CR-AO-9). This study has been successfully concluded, and the results have been published in the *Journal of Climate* (Richter et al. 2024b). The results of the study were obtained through the analysis of climate models and led to the development of a simple statistical model to predict the impact of ENSO on the equatorial Atlantic 6 months into the future.

2.3 Clarifying the mutual interaction between ENSO and the equatorial Atlantic

A study by Jiang et al. (2023, *Geophys. Res. Lett.*) has argued that the equatorial Atlantic cannot influence ENSO, and that previous studies reporting such an influence (e.g. Rodriguez-Fonseca et al. 2009, *Geophys. Res. Lett.*) have misinterpreted their results. We have critically examined the arguments by Jiang et al. (2023) and found that their methodology contains several shortcomings. Our study relied on observational results but also on synthetic time series of equatorial Atlantic sea-surface temperatures to test various hypotheses regarding the Pacific-Atlantic interaction. The results indicate that an influence of the equatorial Atlantic on ENSO cannot be ruled out. These

findings have been published as a Comment in the journal *Geophysical Research Letters* (Richter et al. 2024a).

2.4 Role of the extratropics in the observed acceleration of the equatorial atmospheric circulation

Experiments with a global climate model were performed to examine the influence of the extratropics on long-term changes in the equatorial atmospheric circulation. The results suggest that sea-surface temperature changes in the southeastern Pacific may have contributed substantially to the acceleration of the equatorial circulation during the period 1980–2020. The study has been published in the journal *Nature Geoscience* (Toda et al. 2024).

2.5 International workshop held at RIAM

A workshop on TBI was held at RIAM on December 16–17, 2024 with approximately 30 participants, including researchers from China, South Korea, and the United States. The RIAM research grant was used to partially fund the travel costs of the project members, and the travel costs of two researchers, one from Tohoku University and one from the University of Tokyo.

3. Refereed publications resulting from the project

Richter, I., N. Keenlyside, T. Tozuka, Y. Okumura, C. Wang, P. Chang, S. Kido, and H. Tokinaga, 2024a:

Comment on “Resolving the tropical Pacific/Atlantic interaction conundrum” by Feng Jiang et al. (2023).
Geophys. Res. Lett., 51, e2024GL111563, <https://doi.org/10.1029/2024GL111563>.

Richter, I., S. Kido, T. Tozuka, Y. Kosaka, H. Tokinaga, and P. Chang, 2024b: Revisiting the Inconsistent Influence of El Niño–Southern Oscillation on the Equatorial Atlantic. *J. Climate*, 38, 481–496, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-24-0182.1>.

Toda, M., Y. Kosaka, A. Miyamoto, A., and M. Watanabe, 2024:. Walker circulation strengthening driven by sea surface temperature changes outside the tropics. *Nat. Geosci.*, 17(9), 858–865. <https://doi.org/10.1038/s41561-024-01510-5>

4. Project members

P-I: 海洋研究開発機構 Ingo Richter

Co-I: 海洋研究開発機構 木戸 昌一郎

Co-I: 東京大学 東塚 知己

Co-I: 東京大学 小坂 優

世話人: 九州大学 時長 宏樹

表面波・内部波の非線形性及び分散性に対する 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に基づく数値モデル (Nakayama and Kakinuma, 2010) を適用し、孤立波の2次元相互作用に起因するステムの生成に関して調べてきた。ところで、長周期の表面波や内部波が生成・伝播する過程において、地形が様々な影響を与えると考えられるが、静水深の空間的、または、時間的な変化が、非線形波動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、表面波や内部波の生成・伝播過程に与える影響を数値解析によって調べた。本研究で明らかにしようとする非線形波の挙動特性は、東シナ海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) 様々な地形を有するモデル領域において、表面波や内部波の生成・伝播過程に関する1次元数値解析を実施し、表面波や内部波に対する地形の影響を調べる。ここで、波を生成させる原因としては、浮体上を滑走する航空機、水平移動する海底斜面及び気圧波とする。
- (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、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、九州大学応用力学研究所において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次元数値解析を行なった (Kakinuma and Fukuura, 2024)。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、これらの浮体波が空港端で反射を繰り返して、浮体の振動が継続した。そこで、この浮体の振動を低減するために、二つの方法を検討した。第1の方法として、空港端部の曲げ剛性を空間的に線形に低下させた。その結果、航空機による浮体波の反射率が低減し、浮体の振動の継続が抑制された。また、第2の方法として、浮体波の増幅が顕著な区間において、空港滑走路下の静水深を浅くした。すると、

浮体波の増幅が抑制され、浮体波の波高を低下することができた。

次に、同一の方程式系を適用し、一様な勾配の海底斜面が、冲向きや岸向きに水平移動する場合に生成される津波をシミュレートした（柿沼・帖佐，2024）。2024 年能登半島地震においても、横ずれ断層地震が発生している。数値解析の結果、沿岸に位置する斜面の水平移動により、津波が冲向きのみならず岸向きにも伝播し、海岸に数多くの津波が到達し得ることがわかった。特に、斜面の冲向きの移動速度が、斜面沖側の線形浅水波の位相速度に近いと、冲向きに伝播する津波が共鳴によって増幅された。他方、海底斜面が岸向きに移動する場合、斜面の水平移動速度が斜面岸側の線形浅水波の位相速度に近く、斜面の水平移動距離が大きいと、特に、岸向きに進行する津波の谷が増幅された。

そして、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、または、内部波の 1 次元数値解析を行なった（Kakinuma and Kosugi, 2024）。気圧波の移動速度が表面波モード、または、内部波モードの位相速度に近い場合に、それぞれ、表面波や内部波が生成・増幅された。1 層流体において、数値解析で得られた津波高さを線形理論解と比較したところ、静水深が浅く、気圧波波長が大きいほど、最大可能津波高さに対する非線形効果がより顕著になった。気圧波の移動速度を v 、線形浅水波の位相速度を c とし、Froude 数を $F_r = v/c$ で定義すると、最大気圧が 2 hPa の場合、 $|1 - F_r| > 0.1$ を満たし、静水深が 10 m より大きいと、非線形性が無視できる。また、一つの気圧波でも、伝播中に静水深が変化すると、 F_r 数に応じて複数の津波を生成し、新たに生成された津波が、海底斜面上の既存の津波と重なり、津波高さが変化する可能性のあることがわかった。一方、2 層流体においては、線形浅水内部波の位相速度を c_i として、最深部で内部 Froude 数 $F_{r,i} = v/c_i$ が 1 の場合、内部波モードの内部波が励起されたが、顕著な内部波モードの表面波は、現れなかった。

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。本研究は、継続中である。

研究成果報告

柿沼太郎・帖佐育彦：底面の水平移動に伴う津波の数値解析，津波工学研究報告，41，97–102，2024. https://www.tsunami.irides.tohoku.ac.jp/media/files/_u/topic/file/23p50hj06g.pdf.

Kakinuma, T. and Fukuura, Y.: Control of floating body waves due to an airplane takeoff from a very large floating airport, Eng, 5(3), 1513–1533, 2024. <https://doi.org/10.3390/eng5030081>.

Kakinuma, T. and Kosugi, J.: Numerical study on the excitation and propagation of surface/internal waves due to air pressure waves over topography, Water Waves, 2024. <https://doi.org/10.1007/s42286-024-00099-x>.

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. <https://doi.org/10.1002/fld.2037>.

組 織

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

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豊予海峡における鉛直混合に起因して、豊後水道北部に水平距離 60 m で 3 °C 変化する著しい水温フロントの存在が明らかにされた。豊後水道では他にも愛媛県宇和島市沖の日振島周辺や御五神島南西域強い鉛直混合が生じることが知られている (Nagai & Hibiya 2013)。本年度はこの宇和島沖における強乱流の定量評価を目的とした観測を実施した。

研究内容

2024 年 8 月 1 日から 8 日までに愛媛大学沿岸環境科学研究センター練習船「いさな」を用い、愛媛県宇和島市沖海域において乱流混合の観測を行った。乱流微細構造プロファイラ TurboMAP-5 を用い乱流シアの計測を行うとともに、舷側から超音波ドップラー流速計 (ADCP) を吊り下げ垂表層 (水深 40 m 程度) までの水平・鉛直流速を高精度に計測した。調査では御五神島周りの測線と日振島・戸島間の水道部に設定した測線について日毎に測線を交互に替え、また各日における観測を午前・午後の異なる潮時に 2 回行った。乱流シアから乱流運動エネルギー散逸率 ε を求め、Osborn (1980) の式によって鉛直渦拡散係数を $K_z = 0.2\varepsilon N^{-2}$ と見積もり、鉛直混合強度の評価に用いた。

研究内容

観測結果のうち、8 月 6 日と 7 日 (大潮期) に実施した図 1 に示す。8 月 6 日の午前は上げ潮後の転流時であり、鉛直拡散係数は鉛直平均値で 10^{-5} から $10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ のオーダーであったのに対し、午後の下げ潮時には $10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ のオーダーに強化されていた (図 1 a, b)。特に横島南西の測点 OI1 では $10^{-2} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ のオーダーに達するほどの鉛直混合の強化が見られたが、流速には強化が見られなかった。8 月 7 日の日振島・戸島間水道部の調査では、午前の上げ潮時には 10^{-4} から $10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ のオーダーであったのに対し、午後の下げ潮時には 10^{-3} から $10^{-2} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ のオーダーに強化されていた (図 1 c, d)。8 月 6 日と同様に、OI1 測点では弱い流れにも関わらず、下げ潮時に鉛直混合が強化されていた。この理由として、下げ潮時の OI1 観測点では両日も 0.1 m s^{-1}

を超えるような強い上向き鉛直流が生じており、厚い鉛直一様層の形成が認められたため、鉛直対流によって混合が起こっているためだと考えられた。この上向き鉛直流は、下げ潮時に横島の島影に作られる後流渦に伴って生じていると推察される。また御五神島南西の測点では、乱流強度は Nagai & Hibiya (2013) の数値実験で予測されたものよりも 1 オーダー小さかった ($\varepsilon = 1.2 \times 10^{-6} \text{ W kg}^{-1}$)。この理由として、水平渦粘性散逸の評価方法 (パラメタリゼーション) の問題が考えられた。

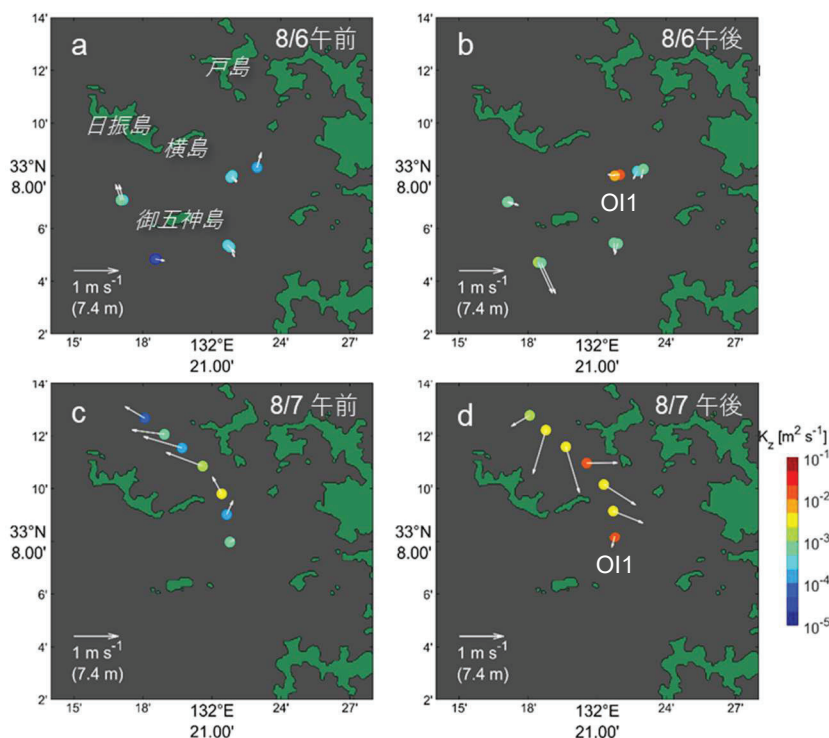


図 1 2024 年 8 月に宇和島沖で実施した乱流と流速の観測結果。色丸が鉛直平均した鉛直渦拡散係数を表し、白矢印は表層の流速を示す。(a) 8/6 午前, (b) 8/6 午後, (c) 8/7 午前, (d) 8/7 午後。

山岳での直接・遠隔測定を用いた霧粒の特性把握

長崎大学大学院 総合生産科学研究科 河本和明

[目的]

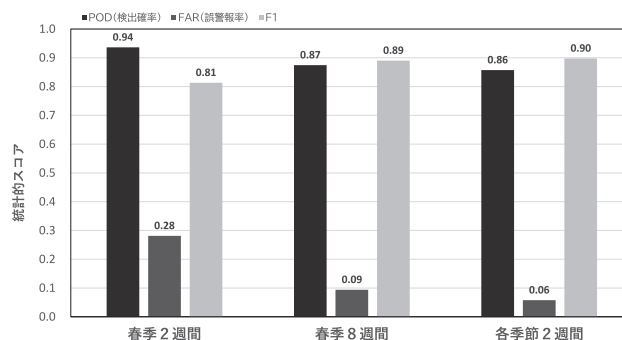
地球大気放射収支の重要な決定要因の一つは雲や霧である。そのため地球の気候の維持や変動を調べるには、その発生頻度などの特徴の理解が重要である。山岳域での直接観測は、人工衛星やラジオゾンデによる観測によりも、同一地点での時間分解能が高いデータを連続的に取得できる利点がある。しかし、コストが高いため、高精度な測器による霧の特性を観測している地点は極めて少ない状況で、定点カメラの画像取得は、低いコストで実施できる。本研究では、長崎県の雲仙岳にて定点カメラによる遠隔測定と言える画像撮影と、雲粒数密度の直接観測を同時に行った。そしてカメラ画像の機械学習を用いた解析結果を、直接観測データと比較した。

[方法]

長崎県の雲仙岳(標高 1300 m)にて定点カメラを用いた遠隔測定を、2020 年 1 月～2024 年 3 月の画像を 10 分毎に取得し、解析に使用した。また、同地点に雲粒子測定器(Cloud Particle Sensor)を設置し、雲粒数密度を直接観測した。2022 年 3 月～2024 年 3 月の CPS データを解析に使用した。機械学習手法のランダムフォレストを使用し、取得した画像を「霧」「霧なし」の 2 種類に分類した。

[結果と考察]

機械学習を用いた画像解析手法の霧判別の妥当性を評価するため、「霧」と分類された画像の割合から霧が存在した時間の割合を求め、閾値以上の雲粒数密度が観測された時間の割合と比較した。月毎で見ると、機械学習の分類による「霧」の発生率は、CPS による雲粒数密度から推定された霧の発生率と同様の季節変動を示すことがわかった。また閾値の情報を使うことで、雲の発生率に加え、霧の濃さに関する情報を取得することができることがわかった。下図に春季 2 週間、春季 8 週間、各季節 2 週間の画像を教師データとした場合について統計値スコアを示す。本研究により、適切な教師データを用いることで、分類モデルを作成し、カメラ画像からの霧の発生状況に関する有効な情報が得られることが示された。



[研究組織]

河本和明(長崎大学大学院 総合生産科学研究科、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。

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あり、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、昨年度に引き続き、東南アジア域における降水量データの収集および検証作業を実施し、データ公開のための作業を実施した。それと並行して、検証を終了した科学的に有効なデータを用いて季節サイクルの長期トレンド解析を推進した。その中で、本報告では北東インド亜大陸において高時間高解像度を持つ Web サイトの紹介と、タイにおける季節内変動の長期トレンドについて報告する。

2. 北東インド亜大陸の高時間分解能降水量観測データセットの公開

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とその周辺地域において得られた雨量データは、昨年度の本研究において Murata et al. (2024) として発表された TRMM PR（熱帯降雨観測衛星搭載の降雨レーダー）の雨量気候分布との検証結果に基づき、その特性が評価された。その雨量データが、Web サイト（<https://www.sohmon.net/>）において公開された（図 1）。本報告を執筆時は公開の最終調整中であるが、本年度内に完了予定である。

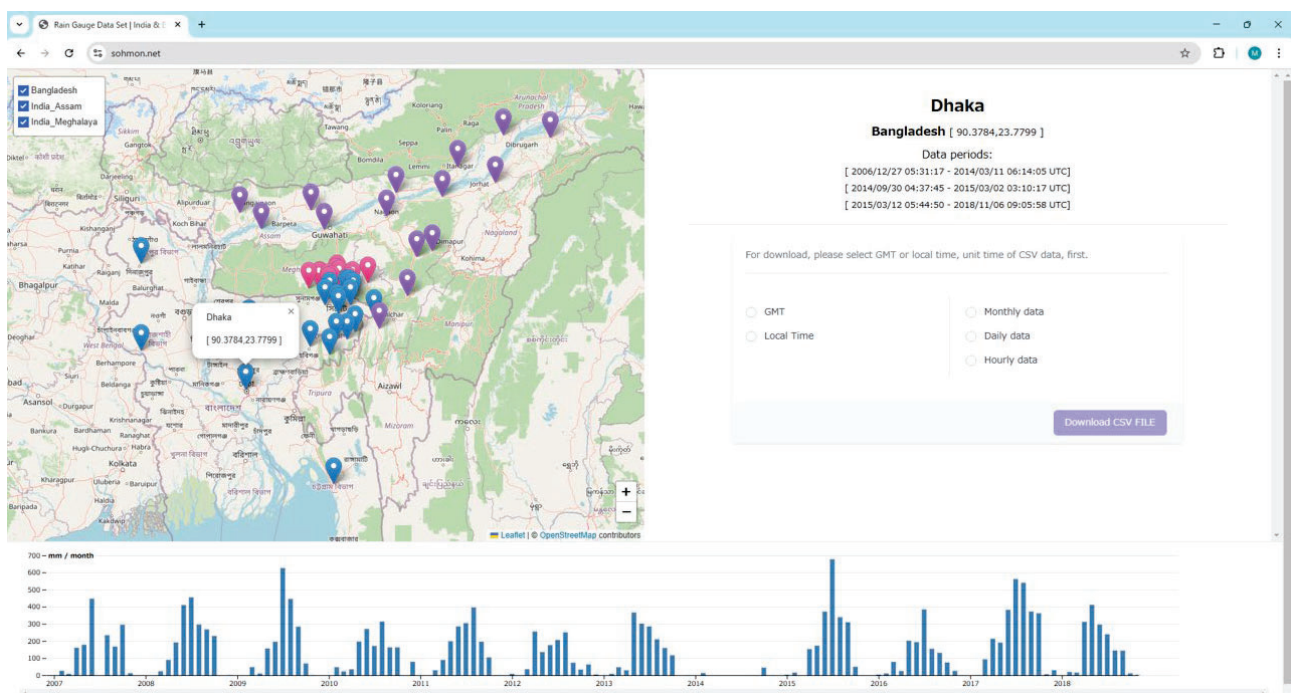


図 1：“Rain Gauge Data Set | India & Bangladesh”のサンプル画像。ダッカ地点におけるデータが示されており、観測期間やデータをダウンロードするラジオボタン、月雨量の簡単な時系列の図が表示されるようになっている。

3. タイにおける季節内変動の長期トレンド解析

タイは、乾季と雨季がはっきり分かれているインド亜大陸西部とは異なり、アジアモンスーン域においてプレモンスーン降水が存在する地域の一つである。この地域では、雨季には 10～20 日周期と 30～60 日周期が卓越すると言われている（例えば Yokoi and Satomura, 2005）。そのような季節内変動の長期トレンドについての解析は、バングラデシュの約 20 年程度の年々変動の事例 (Fujinami et al., 2011) が報告されている程度である。またプレモンスーン期とモンスーン期の季節を分けた解析は行われていない。そこで、本研究では、過去 50 年のバンコクにおける 1951～2000 年の日降水量データを、プレモンスーン期（3 月 12 日～5 月 14 日）とモンスーン期（5 月 15 日～9 月 15 日）に分けて、降水特性の異なる期間を分けた長期トレンド解析を可能とした。季節内変動の周期を導出する手法は高速フーリエ変換によるパワースペクトルである。図 2（左）は、プレモンスーン期の季節内変動の長期トレンドであるが、年々による変動が大きい、一方でパワースペクトルの強度が 1980 年代以降、短周期側で大きくなっている。一方、図 2（右）のモンスーン期は、主に 30～60 日周期が卓越しており、10～20 日周期も見られる。過去に見られていた 5～7 日周期は弱くなっている。これらはまだ初期結果に過ぎないが、再解析データを用いた総観気象場からの考察によって、長期の気候トレンドを明らかにすることが可能である。

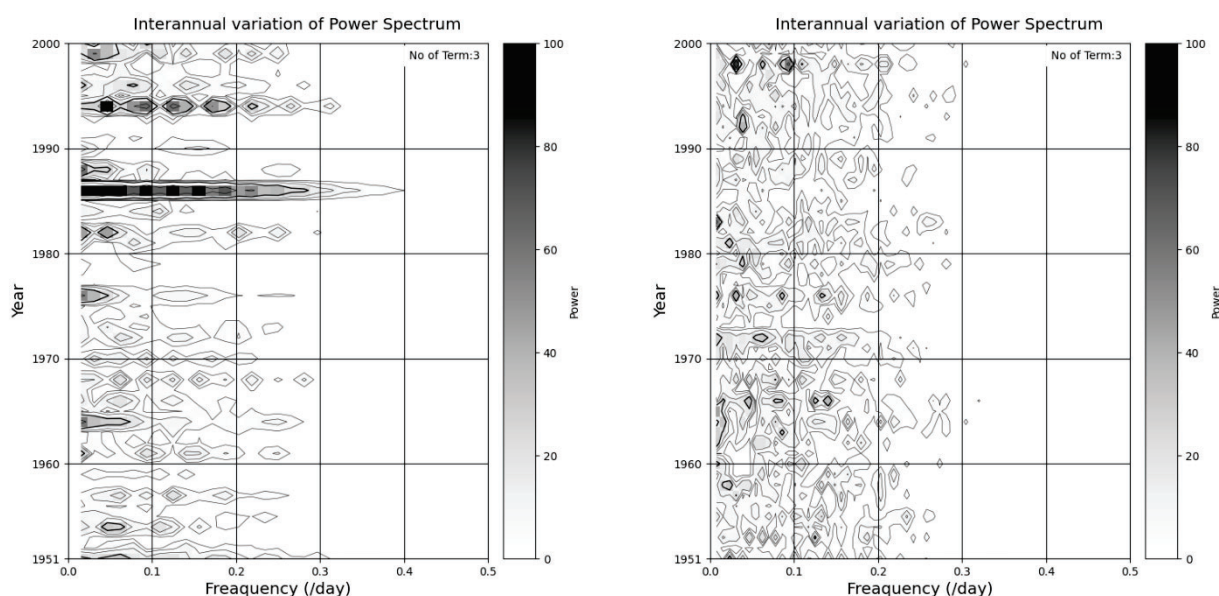


図 2：1951～2000 年の日降水量データを用いたパワースペクトルの長期トレンド。(左) プレモンスーン期と、(右) モンスーン期。濃淡は、パワースペクトルの強度を示す。

4. まとめ

本研究で実施された季節内変動の長期トレンド解析は、長期降水データを用いることで気候場の変化を明らかにする可能性を示し、他地域でのこのような解析が推進されることが期待される。

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)、JAXA 地球観測研究公募によって実施された。

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 の放出量が増加すると考えられている。BVOC 放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 放出量を計算する。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 放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 により日本全国の LAI や BVOC 放出量を計算し、空間分布の特徴を評価することを目的とする。

【方法】

VISIT の計算対象領域は、北緯 20~46°、東経 122~154° とし、空間解像度は約 1 km に相当する緯度経度 30 秒とした。ベースとなる土地被覆分布は、衛星観測に基づく SYNMAP データをモデルに合わせて 16 タイプに集約したものを使用した。BVOC の主要な放出源である森林は、常緑針葉樹林、常緑広葉樹林、落葉針葉樹林、落葉広葉樹林、混交林の 5 タイプに主に分けられている。地形は SRTM30、土壌特性は Harmonized World Soil Database、気象は ERA5、をそれぞれモデルに合わせて 30 秒メッシュに変換したデータを使用した。ERA5 は空間解像度 0.25° であり、線形内挿による変換を行った。使用した気象要素は、地上 2 m 気温、降水量、露点温度、下向き短波放射である。VISIT の計算は、2018 年 1 月 1 日から 2020 年 12 月 31 日の 3 年間で 1 時間ステップで実施し、LAI や BVOC 放出量に加えて生態系純生産量(NEP)も出力した。VISIT で扱う BVOC の成分は、イソプレン、モノテルペン、メタノール、アセトン、酢酸、アセトアルデヒド、ギ酸、ホルムアルデヒドで、これらの合計値を BVOC 放出量としている。

【結果と考察】

VISIT による LAI 計算値を人工衛星(MODIS)による LAI 観測値と月毎に比較した結果、MODIS に比べて VISIT の方が LAI を高く評価する傾向があり、特に展葉季は高かった。一方、空間分布や季節変化の特徴は VISIT と MODIS で整合していた。次に、VISIT と MEGAN による BVOC 放出量の計算値を月毎に比較した結果、夏季を中心として MEGAN に比べて VISIT の方が BVOC 放出量を高く評価する傾向があった。VISIT は LAI を高く評価する傾向があるため、BVOC 放出量も高く評価された可能性がある。

図1に各年のBVOC放出量の空間分布を示す。これによると、2018年や2019年は東北地方や新潟県の沿岸域、中国地方の山間地で比較的BVOC放出量が多いが、1.8 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹を超える地域はほとんどなかった。一方、2020年は新潟県や東北地方の日本海側、および、中国・四国・九州地方の山間地で1.8 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹を超えるBVOC放出量となった。BVOC放出量の多い地域はNEPも高い傾向があった。また、どの年も農地や都市が広がる関東地方や近畿地方などの平野部、気候が寒冷な北海道や長野県は比較的BVOC放出量が少なかった。BVOC放出量の空間分布は基本的に土地被覆に依存し、年によるBVOC放出量の違いは、植物の活性が最も高い夏季の天候の年々変動を反映していると考えられる。今後は、各成分別にBVOC放出量の空間分布を評価して、化学輸送モデルの入力に利用できるようにしていくことが課題である。

【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。

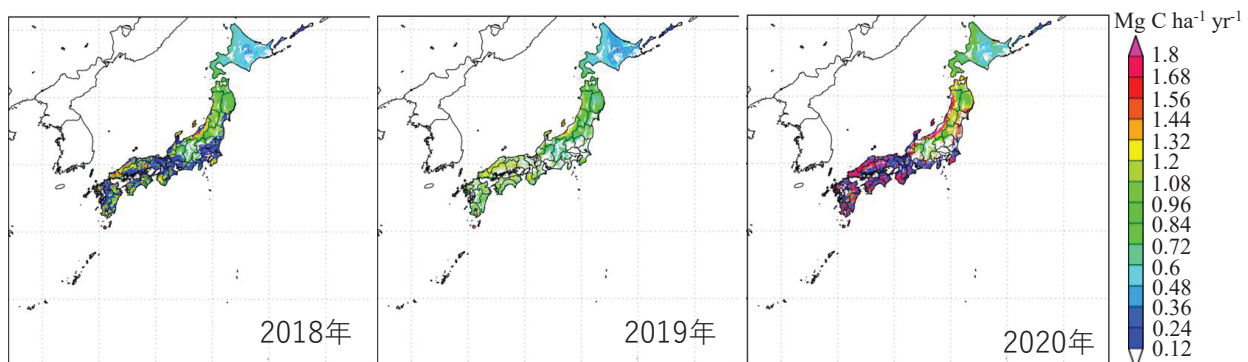


図1 VISIT で計算された我が国における 2018~2020 年の各年の合計 BVOC 放出量の空間分布。

北極海表層流の海洋表層ドリフターと海面高度計による推定

東京大学 大学院新領域創成科学研究科 小平翼

1 目的

海洋表層の流れは熱や淡水、物資循環に大きな影響をもたらし、その正確な把握と予測は重要である。気候変動に対して重要な役割を持つ極域の海水の分布も表層流に大きく影響される。衛星海面高度計は表層流に関連する情報を提供する有用な観測手法であるが、極域に関する研究例は少ない。特に、海面高度の面的計測が可能な SWOT データが利活用できれば表層流に関する知見が多く得られると期待されるが、まず検証が必要である。そこで本研究では 2023 年 9 月に北極海カナダ海盆上に 7 基展開した小型ドローグ付き漂流ブイの軌跡をもとに、衛星海面高度計に基づく海洋表層流の推定について検討を行った

2 手法

2023 年 9 月、JAMSTEC 海洋地球調査船「みらい」より小型ドローグ付き漂流ブイを北極海カナダ海盆上に 7 基、集中展開した (Fig. 1)。展開は 5 海里ごと 3 地点から直線的に行い、2 地点目では中央の地点とそこから東西南北にそれぞれ 200m 離れた地点の 5 地点に 1 基ずつ展開した。

展開した漂流ブイの軌跡より推定した海洋表層の流れと、海面高度計による海洋表層の地衡流を比較した。具体的には 30 分ごとに計測される離散的なドリフターの漂流軌跡から中央差分により求めたドリフターの漂流速度 $\mathbf{u}_d$ が地衡流 $\mathbf{u}_G$ 、エクマン吹走流 $\mathbf{u}_E$ 、近慣性周波数成分 $\mathbf{u}_{NI}$ 、サブメゾスケール流れ $\mathbf{u}_{SMS}$ 、推定誤差 ε として、次の通りモデル化を行った。

$$\mathbf{u}_d = \mathbf{u}_G + \mathbf{u}_E + \mathbf{u}_{NI} + \mathbf{u}_{SMS} + \varepsilon$$

海面高度計データを比較すべきは $\mathbf{u}_G$ 成分であるため、 $\mathbf{u}_E$ については ERA5 再解析データの高度 10m 風速 $\mathbf{U}_{10}$ より、 $\mathbf{u}_E = \mathbf{U}_{10} * \alpha e^{-i\beta}$ として推定した。 α には 0.01 β には $1/4 \pi$ を用いた。また、 $\mathbf{u}_{NI}$ は $\mathbf{u}_d$ にローパスフィルタを用いることで除去できるものとした。以上の手法で求めた、小型ドローグ付き漂流ブイ由来の $\mathbf{u}_G + \mathbf{u}_{SMS} + \varepsilon$ と、海面高度計測に基づく海洋表層地衡流の計測結果を比較する。海面高度計は、従来の複数衛星観測結果の統合プロダクト CMEMS-L4 データと面的な海面高度の観測が可能となった SWOT L3 データを平滑化処理を施した上で用いた。

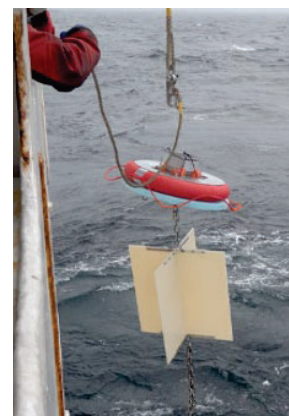
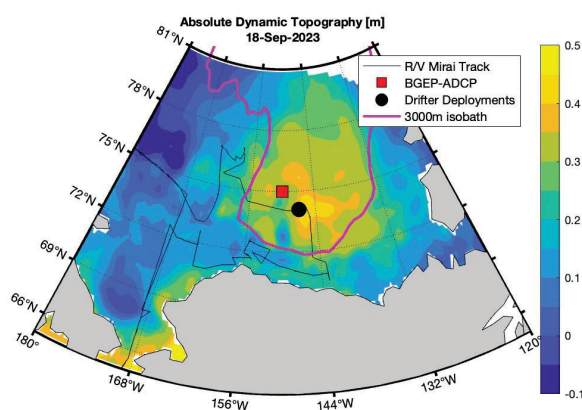


Fig. 1 北極海カナダ海盆におけるドローグ付き漂流ブイ展開地点(左)と展開時の機器の様子(右)

3 結果

小型ドローグ付き漂流ブイの展開後 10 日間の軌跡と海面高度計計測結果を示す (Fig. 2)。大気再解析 ERA5 データによると高度 10m の海上風は期間初期に 6m/s の北風が数日続いた後に 10m/s 程度の北東風であった。異なる 3 地点から漂流させたブイの軌跡からは、中央から流した 5 つのブイが滞留する一方で、北東側と南西側の展開地点からは滞留点を迂回して漂流する軌跡が示された。風の変化が大きく変わることは考え難く、この結果は直径数 10km 程度の時計回りの渦の存在が示唆されると考えられる。

複数衛星観測結果の統合プロダクト CMEMS-L4 データと面的な海面高度の観測が可能となった SWOT L3 データの観測結果に基づく力学的海面高度を Fig. 2 に示す。CMEMS-L4 データに比べて SWOT L3 データではより細かな構造が示されていることが示される。また、小型ドローグ付き漂流ブイの漂流から示唆される直径数 10km 程度の時計回りの渦を検知されていることが示された。

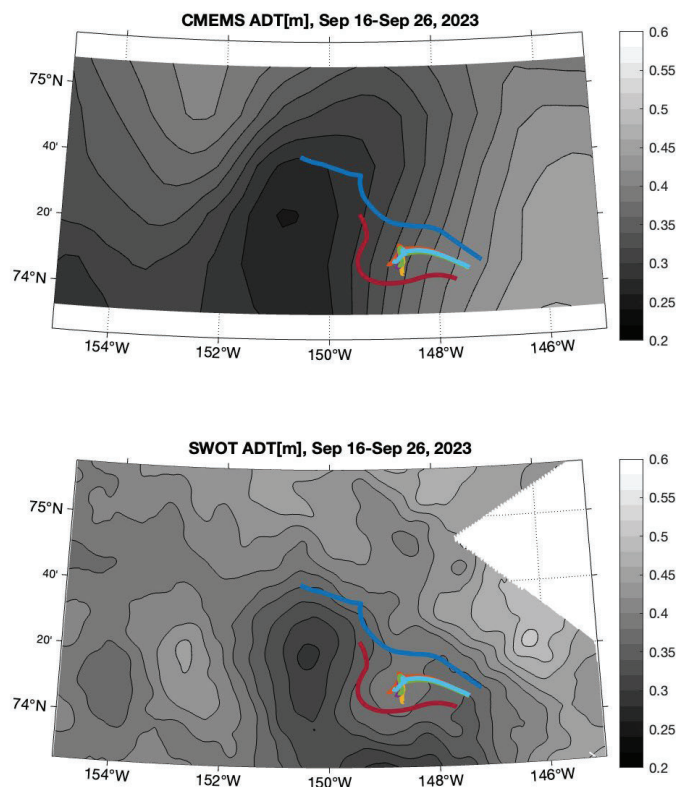


Fig. 2 ドローグ付き漂流ブイの軌跡と海面高度計の計測結果。上図は複数衛星観測結果の統合プロダクト CMEMS-L4、下図は面的な海面高度の観測が可能となった SWOT L3 データ

4 考察

面的な海面高度の観測が可能となった SWOT L3 データを参照すると、小型ドローグ付き漂流ブイの軌跡と衛星海面高度計計測結果に基づく海面高度の等値線は似た分布を示していた。ブイの軌跡は海面高度から推測される海洋表層の地衡流成分以外にも影響されているため、一致することはないが、今回の計測では地衡流成分が主要であったため、類似性が見られたものと考えられる。今後は複数展開したブイの情報から海水縁付近の海洋渦の性質等について検討を行う。

5 成果報告

下記の通り、関連する口頭発表を実施した。

小平翼，早稲田卓爾，藤原 泰，勝野 智嵩，君塚政文，川口悠介，野瀬毅彦， 藤原周，多点漂流型ブイを用いた北極海カナダ海盆氷縁域海洋表層流のラグランジュ観測， 日本船舶海洋工学会令和6年 春季講演会，5月28日，2024，仙台．

Kodaira, T., Waseda, T., Fujiwara, X., Xingkun, Y., Nose, Submesoscale and Mesoscale Eddies near the Sea Ice Edge in the Canada Basin, Arctic Ocean, IWMO 2024, June. 18th, 2024, Low-temperature science institution, Hokkaido University.

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

目的

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。波浪と海上風鉛直構造観測の結果を用いて GNSS 反射波観測によって得られる波浪情報の物理的意味を検討する。これまでの研究で実施した観測で、うねりの存在下で下層風が加速される事象を捉えることに成功した。これらの観測事実は、うねりによる海面形状の非等方的な変化が標準的な指標である 10m 高度の海上風速と海面風応力の関係を変化させる可能性を示唆する。今年度は観測塔における海上風鉛直構造観測を継続し、海上風とうねりの非等方的な関係が海上風鉛直構造に与える影響のより明瞭な観測事例を抽出した。

手法の概要

うねりと大気境界層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塔（以下「観測塔」）において複数高度(13m, 11m, 6m, 4m)で海上風ベクトルを計測する観測を継続実施した。本年は台風の接近によるダメージのリスクを冒し、夏季の台風シーズンにおいても観測を継続した。その結果、2024 年 8 月末に西日本において複雑な経路をたどった台風 10 号の影響によるうねりが発生する期間の観測データを取得することに成功した。しかしながら、12 月 1 日に一般船舶による観測機器への接触事故があり、少なくとも最下層風速計（4m 高度）は破損し、観測を中止する事態となった。データの確認は完了しているが、観測機器の状況の詳細は現在でも不明である。6m 高度風速計も設置位置の変化などの影響を受けている可能性が高い。

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。2024 年 8 月下旬に西日本に接近した台風 10 号は、風向の急激な変化（南東風から北西風に変化）から 8 月 31 日 6 時 30 分頃に田辺湾を横切ったと推測される（図は示さない）。気象庁が作成した 8 月後半の沿岸波浪図と地上気圧分布図（天気図）（図 1）から、台風が田辺湾付近を通過する以前から強いうねりがあることがわかる。図 2 は台風の影響がほとんどない静穏な状況（8 月 23 日）の各高度風速の 9 時からの 1 時間観測値と 13m 高度と 6m 高度の風ベクトルを示す。また、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。

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

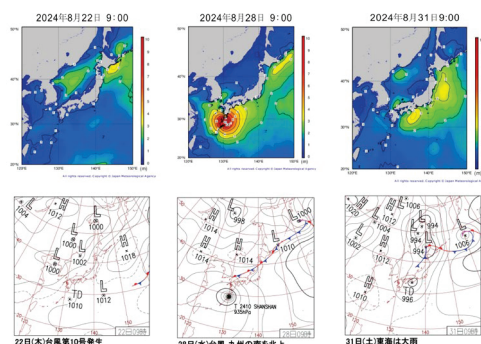


図 1：気象庁によって作成された（上）沿岸波浪図と（下）天気図。左からそれぞれ 2024 年 8 月 23 日、28 日、31 日の 9 時の図である。気象庁ホームページからの抜粋による転載。

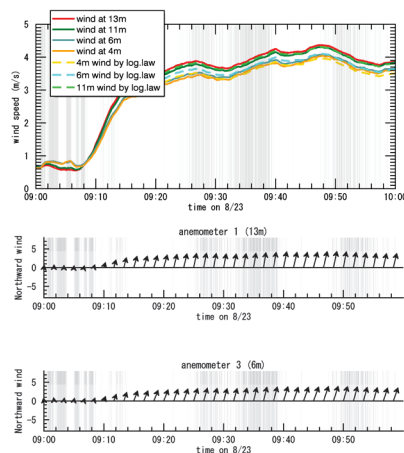


図 2：8 月 23 日 9 時から 1 時間の（上）各高度風速と（中）13m 高度と（下）6m 高度の風ベクトル。上図は（赤）13m（濃緑）11m（薄緑）6m（橙）4m 高度の風速を示す。点線は 2 高度風速から対数測によって推定した各高度風速を示す。

ここで得られた摩擦速度を用いれば、ある高度の風速(u_1)を与えれば任意の高度の海上風(u_2)を推定できる。図2の各高度風時系列には13m風を基準として求めた4m, 6m, 11mの高度の推定値を点線で示した。点線はほとんど各高度の実線と重なっている。風ベクトルの時系列からは、13m風と6m風での風向の差が非常に小さいことがわかる。これらは静穏な状況下では従来の対数分布側が成立していることを示す。

図3は、台風が通過した直後の8月31日9時から1時間の観測値を示す。風向はほぼ北北西であり、風速は 10ms^{-1} 程度から 7ms^{-1} 程度まで下降しているが、うねりとともに風浪も強いことが予想される。静穏時とは異なり、傾度法で推定した各高度風速は実測値よりも低風速となっている。これは、比較的高高度の風速を基準として推定した風速鉛直プロファイルが下層の風速を過小評価していることを示し、うねりによる下層風加速の発生と矛盾しない。また、13m高度の風向が概ね北北西方向であるのに対し、6m風速はほぼ北西風である。田辺湾におけるうねりの方向は地形的な制限からほぼ南西方向に限られており、静穏時の状況との違いを考えると、この風向の差はうねりの存在に起因する海面からの北東向きの運動量輸送によって生じた可能性は高い。

図4は静穏時(8月23日)と台風通過後(8月31日)の風速の鉛直構造を示す。静穏時には各高度風速観測値はほぼ対数測に沿っていることがわかる一方、台風通過時には13m高度風速が明らかにそれよりも下層の風速よりも低い。高風速(8ms^{-1} 以上)であっても、うねりがある状態では下層風が有意にうねりの影響を受けることがわかる。ただし、単純に海面からの運動量輸送があると考えると最下層の風速加速が大きいはずであるのに対し、11m高度までは高さに対して風速が大きくなっている。これには風向とうねりの向きの差異が影響している可能性がある。今回は観測塔に設置されている23m高度の風速は解析に用いていないが、今後高高度の海上風から対数測によって推定した鉛直プロファイルと下層風から推定した鉛直プロファイルの差を求めれば、海面から受ける運動量輸送の影響を定量的に評価できる可能性が高い。これらについては、次年度に詳細な解析を実施する。13m高度風速が11m高度風速よりも低いことは、うねりの影響が及ぶ高度についての示唆が得られる。比較のために、 4ms^{-1} 以下の弱風速下でありながらうねりが観測された2023年5月30日の風速鉛直構造を図5に示した。ここでも13m高度風速が最も低いが、11m高度風も6m高度風に比べて低くなっている。これらの比較から、うねりによる運動量輸送の影響が強く及ぶ範囲は、10m高度付近であることが示唆されるが、うねりと風浪の相対的な強さや角度の違いがどのように影響しているかは今後の課題として残る。

謝辞：本研究の観測は京都大学防災研究所附属白浜海象観測所のご協力のもと実施されたものです。

研究成果報告

口頭発表：0件

研究の体制

研究代表者：根田昌典：京都大学大学院理学研究科 特定教授
所内世話人：市川香：応用力学研究所 准教授

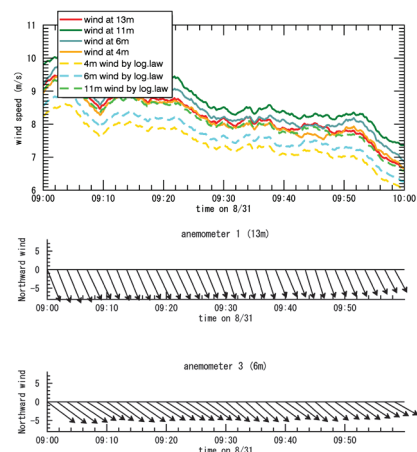


図3：図2と同じ。ただし、8月31日9時から10時の時間変化を示す。

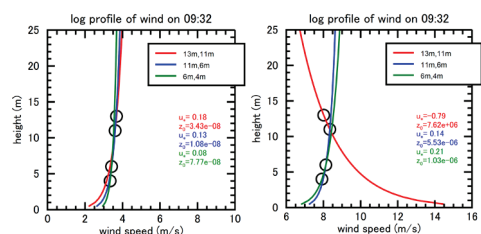


図4：(右) 8月23日9時30分と(左) 8月31日9時30分の海上風鉛直構造。○は風速計による観測値を表す。実線は(赤)13mと11m、(青)11mと6m(緑)6mと4mの風速から対数測に従って推定した風速鉛直構造を示す。

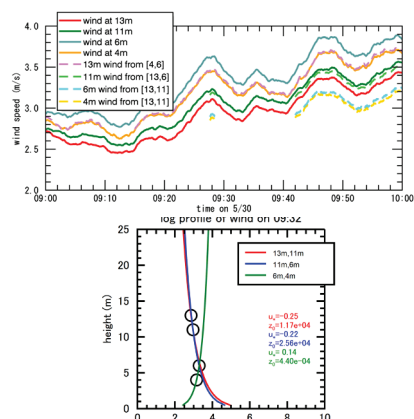


図5 2023年5月30日9時-10時の風観測データ。時系列と鉛直プロファイルはそれぞれ図2、4と同様の図。

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 システムの導入を行った。分光フィルターとして走査型マイケルソン干渉計を使用し（図 1 (a)）、周期的に 1 フリンジ分スキャンして、スキャン信号をフィッティングすることで、干渉縞のコントラストを測定した。干渉縞のコントラストの大きさを解析することで、ライダー信号からレイリー散乱成分を抽出した。

【結果】

図 1 (b)-(d)に 2024 年 9 月 3 日に応力研ライダーで観測された波長 355nm（青）と 532nm（緑）のエアロゾル消散係数、後方散乱係数、偏光解消度の鉛直プロファイルを示す。偏光解消度が 0.05 以下であり、球形粒子が卓越していたものと考えられる。消散係数は測定ノイズの影響を強く受けるため、大気境界層内のエアロゾルのみ抽出可能であるが、後方散乱係数は自由対流圏での薄いエアロゾルについても抽出できている。観測パラメーターの時間分解能は 5 分であり、従来のラマン散乱ライダーと比べて高時間分解能でエアロゾルの光学特性を抽出することが可能となった。今後は連続観測データを解析することで、多波長でのエアロゾル光学特性の時間的・空間的な変動を明らかにする。

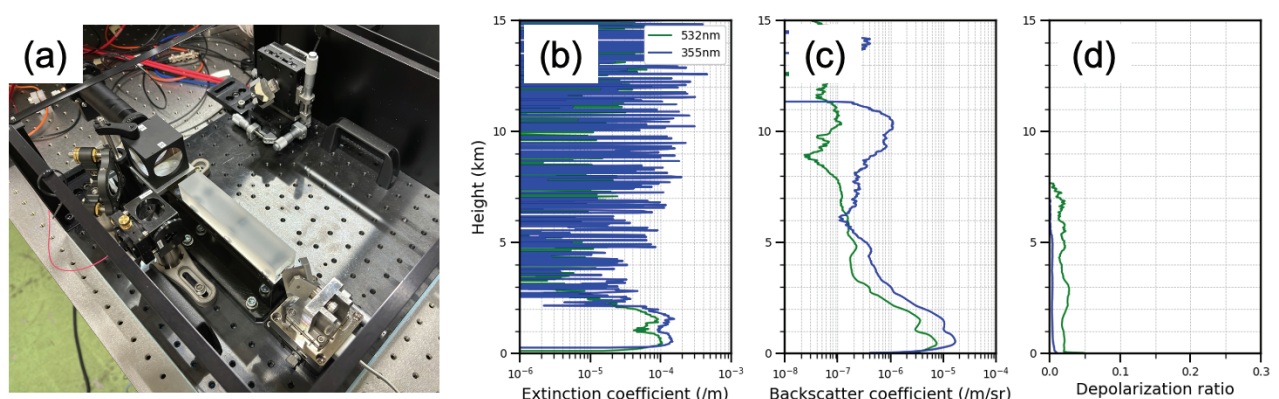


図 1 (a)波長 355nmHSRL 用走査型干渉計の写真、(b)-(d)2024 年 9 月 3 日における波長 355、532nm のエアロゾル消散係数、後方散乱係数、偏光解消度

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の追試を実施した。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追試を行った。

・ 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、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追試を行った。

・ 実験方法および実験結果

実験・解析は、吹送距離は5.5mから33m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、2018-2024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。なお、本年度はSDS溶液の場合に波高の実測を行い、波高よりモデルを使用して推測された抗力係数の値をプロットしている。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、真水の場合に比べてSDS溶液での値は低いことがわかる。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）

1. Gaku Terazono, Naohisa Takagaki, Naoki Kurihara, Motoko Hatanaka, Evaluation of Momentum Transport through the Water Surface with the Typhoon Simulation Tank, 4th Joint Symposium on Advanced Mechanical Science and Technology (4th JSAMST), Best Poster Award, University of Hyogo, September 25 to 28, 2024.
2. Naohisa Takagaki, Surfactant contamination effects on wave wind height in typhoon simulation tank, The 4rd Joint Symposium on Advanced Mechanical Science and Technology, University of Hyogo, September 25 to 28,

2024.

3. Naohisa Takagaki, Surfactant contamination effects on wave wind height in typhoon simulation tank, The 4rd Joint Symposium on Advanced Mechanical Science and Technology, University of Hyogo, September 25 to 28, 2024.
4. Naoki Kurihara, Naohisa Takagaki, Gaku Terazono, Motoko Hatanaka, The effect of surfactant on the wave under typhoon condition, The 4rd Joint Symposium on Advanced Mechanical Science and Technology, University of Hyogo, September 25 to 28, 2024.
5. Naohisa Takagaki, Estimation and Control of Air-Sea Momentum and Heat Fluxes of Typhoons, International Symposium on Weather Controllability 2024, Hitotsubashi Hall, Tokyo, Japan & Online, Oct 6 to 7, 2024.

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, 2021 and 2024 were estimated from u^* using model (Takagaki *et al.*, 2012). Tap water were used in 2017-2022,2024, and SDS solution was used in 2023,2024.

	solution	N [rpm]	F [m]	U_∞ [m/s]	U_{10} [m/s]	u^* [m/s]
<i>Takagaki et al. (2017)</i>	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 <i>Takagaki et al. (2023)</i>	TW	1700	20	24.0	40.3	2.0
<i>Ikeda et al. (2024)</i>	TW	1700	20	22.9	-	-
<i>Ikeda et al. (2024)</i>	SDS	1700	20	24.0	-	-
<i>Kurihara et al. (2024)</i>	TW	1700	5.5	21.52	-	-
<i>Kurihara et al. (2024)</i>	TW	1700	6.5	21.46	-	-
<i>Kurihara et al. (2024)</i>	TW	1700	19	24.01	-	-
<i>Kurihara et al. (2024)</i>	TW	1700	20	24.09	-	-
<i>Kurihara et al. (2024)</i>	TW	1700	33	24.04	-	-
<i>Kurihara et al. (2024)</i>	SDS	1700	5.5	21.94	-	-
<i>Kurihara et al. (2024)</i>	SDS	1700	6.5	21.83	-	-
<i>Kurihara et al. (2024)</i>	SDS	1700	19	23.49	-	-
<i>Kurihara et al. (2024)</i>	SDS	1700	20	23.40	-	-
<i>Kurihara et al. (2024)</i>	SDS	1700	33	23.49	-	-

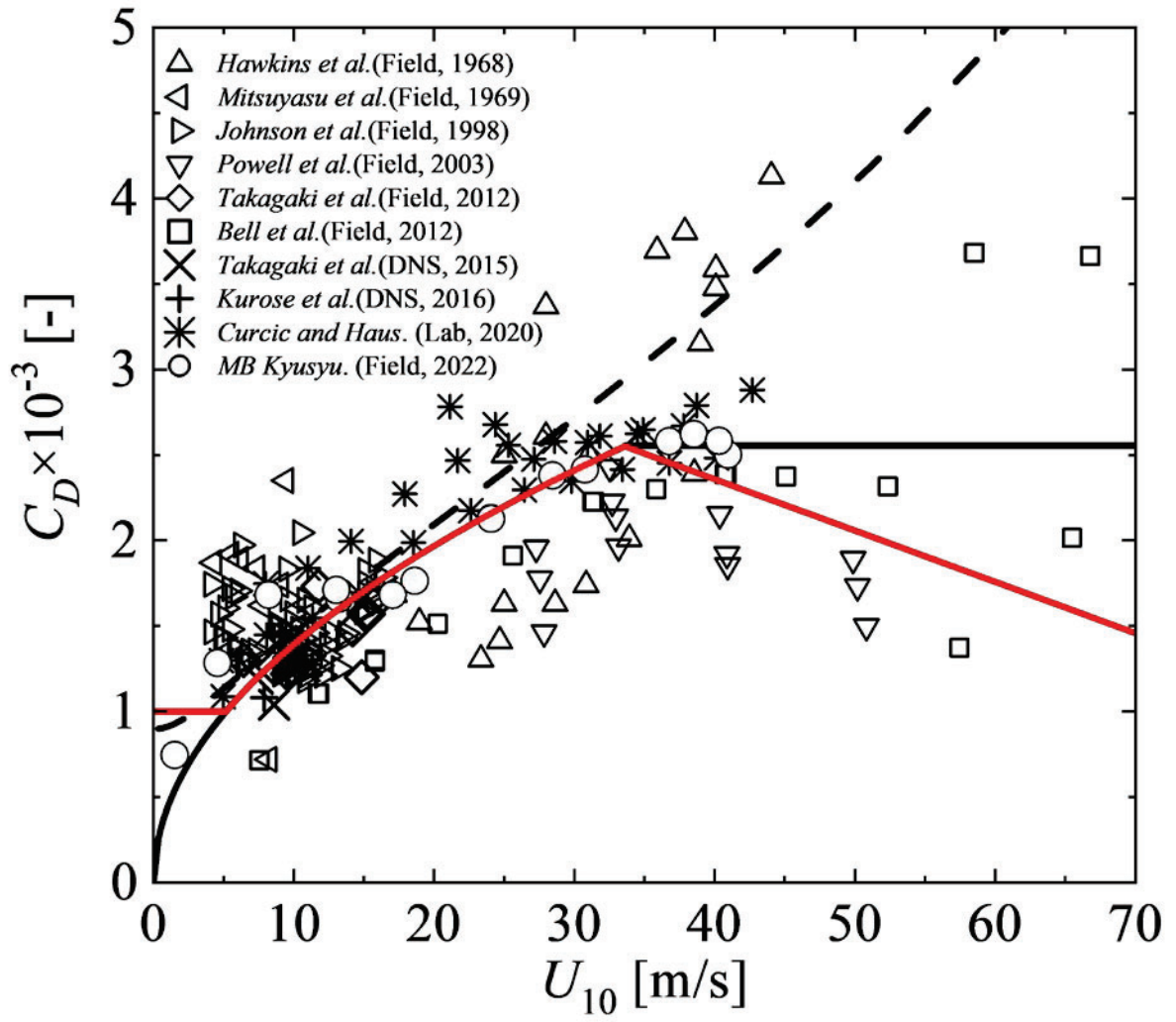


Fig. 1: Relationship between 10-m height wind speed U_{10} and drag coefficient C_D . This figure is reproduced based on Fig. 12 of Takagaki *et al.* (2023).

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いる。このなかで、2024 年の春から夏にかけての 3 か月間、五島海底谷に係留系を設置したので、その概要を報告する。
2. 係留観測 長崎大学水産学部附属練習船「長崎丸」を用い、係留系の設置・回収を行った。その位置と日付を表 1 に示す。五島海底谷の最大水深は約 700 m であり (Oiwane et al., 2011, Marine Geology)、斜面上の水深 347.5 m の位置に係留した (図 1)。係留系には、5-beam ADCP (Sentinel V 300 kHz, Teledyne Marine) と 2 台の電磁流速計 (INFINITY-EM, JFE アドバンテック) を取り付けた。電磁流速計、切離し装置等の係留機材は、応用力学研究所の海洋観測・解析システムから利用した。ADCP は上向きに設置した。計測機器の配置は係留図を参考にされたい (図 2)。ADCP の圧力センサから、その設置深度は平均 176.4 m となった。電磁流速計には圧力センサが付いていない。係留図をもとに、ADCP 設置深度と水深から見積もった電磁流速計の深度は 235 m と 304 m であった。ADCP の設定は、broadband (bandwidth 25%)、層厚 6 m で測定レンジを 144 m とした。ここで、アンサンブル間隔 30 分ごとに 1 秒間隔で 120 ping を発信した。電磁流速計の設定は、バースト時間 10 分ごとに 1 秒間隔で 10 測定とした。

表 1. 2024 年の五島海底谷における係留系設置・回収情報。

緯度	経度	水深	設置日	回収日
32°17.5143'N	128°42.2198'E	347.5 m	4 月 24 日	7 月 23 日

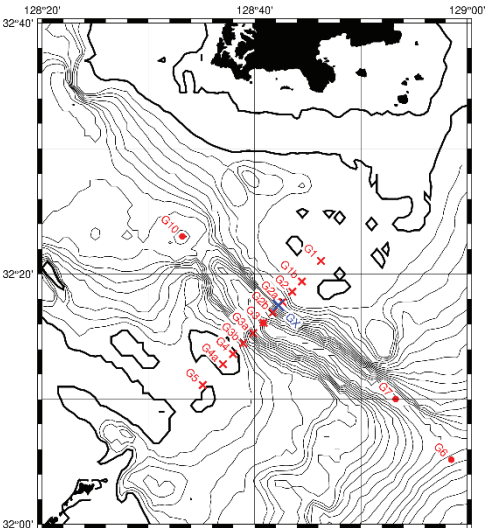


図 1. 係留位置 (青×)。赤×は 4 月の CTD 観測点である。

研究組織 長崎大学
九州大学 応用力学研究所
愛媛大学 沿岸環境科学研究センター
福岡県 水産海洋技術センター
山口県 水産研究センター

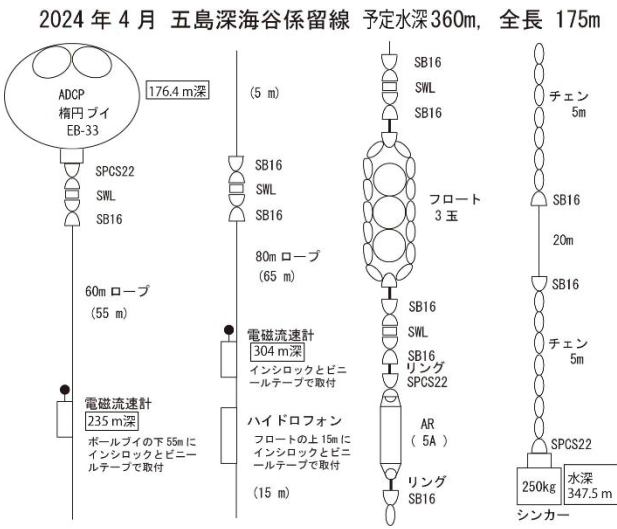


図 2. 係留系の概略図。四角枠に回収後の確定値を示す。

滝川哲太郎 (研究代表者)
千手智晴 (所内世話人), 遠藤貴洋 (研究協力者)
森本昭彦 (研究協力者)
池浦 繁 (研究協力者)
渡辺俊輝, 和西昭仁, 安部 謙 (研究協力者)

LES モデルを用いた複雑地表面上での鉛直運動と雲形成過程の解析

京都大学防災研究所 竹見哲也

【目的】

都市の気象防災・大気環境に係る諸問題は日常生活で極めて重要である。特に、都市の風は、台風など強風現象の発生時に瞬間的な風速の強化による災害、夏季晴天時には風速の抑制による熱環境の悪化、様々な気象状況下での大気質の問題など、災害や環境の観点から、定量的に把握することが大事である。都市の風は激しく変動することから、細密な観測網の構築によるリアルタイムでのモニタリングとともに、個々の建物や構造物を陽に表現可能とする数値モデルも必要である。

市街地や複雑地形など複雑地表面上での大気下層の運動は、地表面の複雑性に起因して、激しく変動する。こういった非定常な気流の変動を定量的に評価するためには、高分解能で乱流を陽に表現可能な Large-Eddy Simulation (LES) モデルを用いることが必要である。そこで本研究では、建物や構造物、地形を精緻に表現可能な LES モデルを用いて、複雑地表面上での大気下層における乱流変動や大気境界層の組織構造を精緻に表現し、大気の鉛直運動とそれに伴う雲の形成過程の物理過程を明らかにすることを目的とする。特に、市街地における雲の形成に至るまでの物理過程に着目し、大気境界層での乱流運動や鉛直方向の運動量・熱輸送が都市の建物配置にどのように影響を受けるかについて調べる。また、メソ気象モデルと組み合わせることにより、都市からの熱輸送が雲形成に及ぼす影響について調べる。

【解析手法】

気象場の数値シミュレーションには、Weather Research and Forecasting (WRF) モデルを用い、ネスティングにより最も内側の計算領域の格子幅は 1 km とした。建物解像 LES モデルとして、PALM モデルを用いた。大阪市街地を対象地域として、国際航業による 2 m 分解能の DSM/DEM データを用いて、実在の市街地・建物形状を建物解像 LES モデルの下部境界に取り込んだ。都市の人工構造物が気流に及ぼす影響を調べるため、地面標高は除外し、建物や人工構造物の高さのみを考慮した。WRF モデルを用いたシミュレーションでは、3 段階ネスティングにより計算領域を設定し、4.5 km/1.5 km/0.5 km と解像度を徐々に上げるようにした。大阪平野で発生した夏季の局地的な降水を対象とし、2023 年夏の事例を探索し、8 月 27 日の大阪市周辺での局地的な降水事例を選定した。この事例を対象として、計算開始時刻を様々に変化した初期時刻アンサンブルシミュレーションを実施し、再現性を調べた。次に、都市からの排熱効果の変化による気象影響の評価を念頭に置き、地表面からの顕熱輸送量を改変した数値実験を実施した。

【結果】

建物解像 LES モデルにおいて、建物からの現実的な排熱を想定し、建物表面からの顕熱輸送の有無の違いによる境界層での運動量輸送・熱輸送を比較した。その結果、排熱あり実験において、運動量輸送量が大きくなり、排熱の有無の差は高層ビルと中低層ビルが密集する街区において顕著であることが分かった。この運動量輸送の街区毎の違いは、熱輸送量にも影響を及ぼす。特に、高層ビルの存在が、運動量も熱も効果的に輸送していることが分かった。

このような都市の排熱効果の違いが、局地的な降水にどのような影響を及ぼすのかについて、WRF モデルによる感度実験を行った。陸面からの顕熱輸送量を 50% に改変した実験により降水量の変化を調べたところ、大阪平野で領域平均した降水量が 2 割強程度にまで減少していた。

陸域から外洋への水・栄養輸送に対する気候変動の影響

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

本報告書では、主に 1. 2024 年 7 月に実施された「長崎丸」の研究航海 (NS24-137) の速報、および 2. 2024 年 12 月 6 日～8 日に富山大学で開催された IOC WESTPAC-FEC 国際ワークショップの概要について報告する。

1. Dynamics of bottom waters observed during the 2024 NS24-137 cruise

The East China Sea (ECS) provides essential biological resources for its local fishery and contributes to biodiversity on its surrounding seas, mainly through the Kuroshio Current, which regulates cross-shelf material transport on various scales. It is thus urgent to clarify the dynamics of bottom water (onshore and offshore dynamic) that potentially influence local marine productivity and further downstream areas like the Japan Sea. In the NS24-137 Nagasaki Maru cruise, three sections in the outer shelf of ECS were studied during the Summer of 2024. CTD observation and water sampling were conducted on a spatial and temporal basis (time-series station). Some biochemical parameters analyzed are rare earth elements (REEs), neodymium isotopes, radon, radium (Ra), nutrients, dissolved oxygen, and water isotope analysis. Using a multicore sampler, sediment cores with overlying water were collected at several stations. Additionally, shipboard and moored data from the Acoustic Doppler Current Profiler and microstructure profilers were utilized to help interpret physical forcings further.

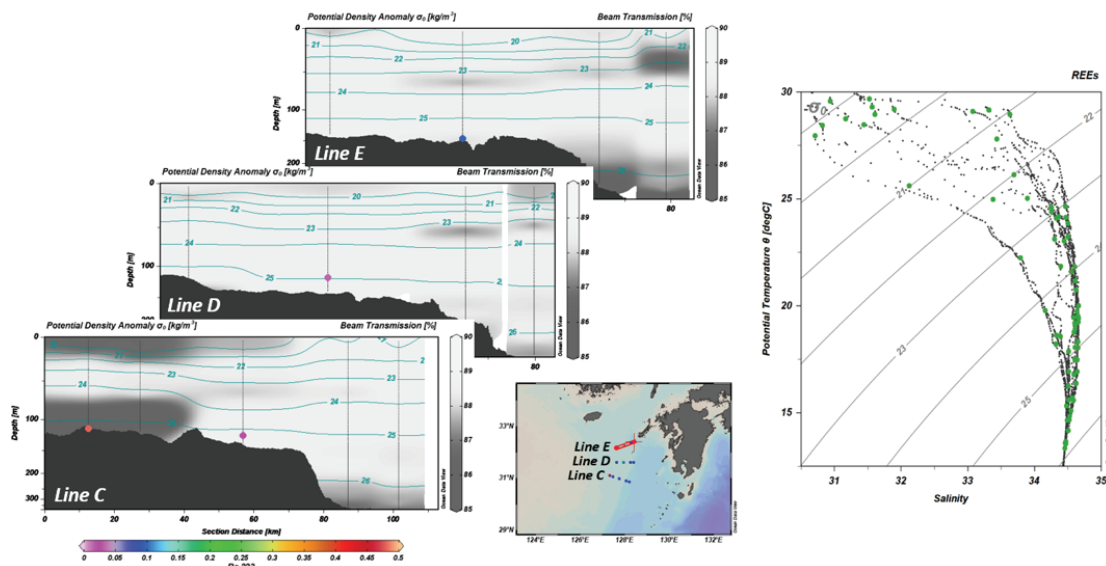


Figure 1. The sectional view of beam transmission contoured with potential density anomaly (Tosca line) and overlapped with the ²²³Ra (colored dots) data from the NS24-137 Nagasaki Maru cruise. Locations of stations are also given. The temperature-salinity diagram of all stations with the REE samples (green dots) is also presented.

By incorporating REEs and Ra isotopes, it is now possible to clarify the mechanism and changing rate of water masses in the outer shelf of ECS on a temporal basis. Some preliminary results are as follows: (1) based on the simple mixing model

by using temperature and salinity combined with heavy REEs, it is found that temporal factors and physical forces might significantly influence the variability of Kuroshio Intermediate Water and Kuroshio Subsurface Water intrusion into the shelf area. (2) A change in vertical structure could further generate a geostrophic flow, usually indicated by the turbidity tongue around the shelf break (Line C in **Figure 1**). (3) The Ra value decreases from the inner to the outer shelf, indicating that the water from the inner shelf mainly regulates Ra (**Figure 1**). On a zonal basis, it is seen that Ra value does not change significantly, indicating that Kuroshio intrusion may not be the driving factor of Ra distribution along the shelf of ECS (**Figure 1**). Further, this study will combine these results with water mixing analysis to understand the spatio-temporal variation of Kuroshio Intrusion onto the shelf area.

2. IOC WESTPAC-FEC Workshop: Role of human activities on the marine environment through the exchange of materials between land and the ocean



Figure 2. Group photo during the IOC WESTPAC-FEC Workshop, December 6-8, 2024, in the University of Toyama, Japan.

The workshop focuses on sustainable and healthy oceans, with a particular emphasis on the stage of economic development and the transport of nutrients from land. The forum, part of the workshop, is a joint event organized by the Intergovernmental Oceanographic Commission for the Western Pacific (IOC-WESTPAC) and Future Earth Coasts (FEC). The workshop aims to advance scientific understanding of the biogeochemical process in the Asian Marginal Seas. The first day was designed for a business meeting among scientists under the IOC-WESTPAC framework. The second day was intended for a scientific forum, open to the public, to report current research and progress in understanding water and nutrient transport between land and ocean. In addition, perspectives from social and economic are given to enhance our understanding of nutrient management in coastal oceans under global climate change. A poster presentation session was also conducted for early career researchers to deliver their research updates and thoughts about the workshop topic. Researchers from 11 countries, totaling more than 50 participants, attended this workshop. Ultimately, enhanced collaboration, communication, information exchange, and cooperative activities with FEC are projected.

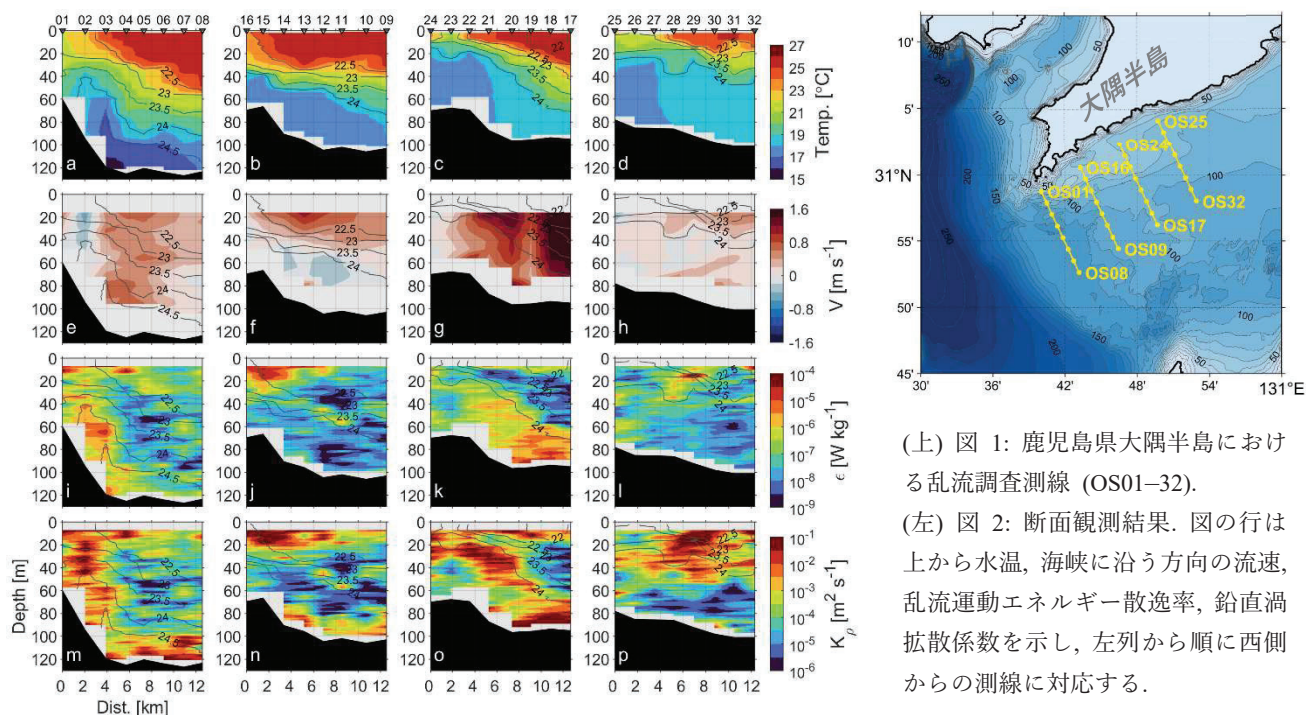
沿岸海洋の密度躍層における乱流混合の定量化

鹿児島大学水産学部 堤 英輔

背景と目的 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海域の基礎生産を支え、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、乱流混合の定式化が必要とされている。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。本年度は、水産重要魚種の産卵生育場として重要な大隅海峡（Kume et al. 2021）における乱流調査を実施した。

研究内容 2024年6月8日から9日にかけて図1に示す大隅半島南岸沖に4測線（測点 OS01–32; 図1）を設定し断面観測を実施した。観測は鹿児島大学水産学部附属練習船「かごしま丸」KG2409 航海にて行い、応力研所有の微細構造プロファイラ TurboMAP-L (JFE Advantech 社) を用いて乱流と成層を計測した。TurboMAP は自由落下式で使い海面下から海底直上までのデータを得た。計測された乱流シアから乱流運動エネルギー散逸率 ϵ を計算し、Osborn (1980)の方法で鉛直渦拡散 K_ρ を見積もった。

結果 大隅海峡には黒潮からの分枝流と潮汐流によって顕著な流れが生じる（山城ら 2008）。観測が実施された時にも、各測線の沖（南）側では黒潮に由来する暖水（表層で約 26°C）と海峡に沿う北東向きの強流（最大で 1.6 m s⁻¹）が存在していた（図2 a-h）。一方で各測線の岸側 4–5 km の範囲には冷水（表層で約 20°C）が存在し、その表層 30–40m で顕著な乱流混合（ $\epsilon \sim 10^{-6}$ – 10^{-5} W kg⁻¹, $K_\rho \sim 10^{-2}$ – 10^{-1} W kg⁻¹）が生じる傾向が認められた（図2 i-p）。この岸側は反流もしくは淀み域となっており、そこでの冷水と強い乱流は大隅半島先端の佐多岬での大隅分枝流の接岸・剥離に起因して生じたと推察される。岸側のみならず、大隅海峡では概して著しい乱流混合が生じており、地形性後流渦や海底エクマン層等の流れと地形間の相互作用を明らかにすることが、この海域の乱流混合の定量的評価に必要なと考えられる。



(上) 図 1: 鹿児島県大隅半島における乱流調査測線 (OS01–32)。

(左) 図 2: 断面観測結果。図の行は上から水温、海峡に沿う方向の流速、乱流運動エネルギー散逸率、鉛直渦拡散係数を示し、左列から順に西側からの測線に対応する。

Delury 法による若狭湾のズワイガニ資源量の推定

福井県立大学 渡慶次 力

1. 目的

福井県の若狭湾で漁獲されるズワイガニ *Chionoecetes opilio* は「越前がに」と呼ばれ、福井県の海面漁業産出額の約 30% を占めるほど重要な魚種である。このため、福井県では、保護礁設置、漁業者の自主的規制、1997 年以降の TAC 規制など各種努力により、近年の年間漁獲量は 400 t から 600 t と安定的に推移している。漁期トータルの資源量で設定される TAC を漁期内で有効に活用するには、若狭湾かつ漁期内の時空間スケールで資源評価をすることが必要となる。特に、雄ズワイガニは成長に伴い単価上昇することから、漁期内での資源評価を漁業者が操業で利用できれば、資源を守りながら漁獲金額を増やすことが可能となる。漁業者の資源管理のモチベーションを持ってもらう条件である分かりやすく、かつ若狭湾のズワイガニ資源を漁獲情報で簡便に評価する方法として、Delury 法は有効だと考えられる。なぜなら、Delury 法の 3 つの前提条件①加入や移出入のない閉じた個体群、②短期間に強度の漁獲圧によって資源が顕著に減少し、③漁獲努力量と資源量が比例する資源は、若狭湾のズワイガニに十分適応できると考えられるからである。さらに、福井県は Delury 法のデータとして必要となる漁獲量と努力量のデータを十数年に至る長期間蓄積している。しかしながら、若狭湾のズワイガニ資源量の推定を Delury 法で検討した事例がない。そこで、本研究では Delury 法による若狭湾ズワイガニの資源量推定の妥当性を検討した。

2. データと方法

2002 年～2019 年に越前町漁協所属の一部（7～21 隻）の底曳網漁船が記帳した操業日誌と越前町漁協の販売記録を使用した。使用したデータは、ズワイガニを漁獲した年月日、緯度・経度、銘柄別（大ガニ・中ガニ・山ガニ・黒仔）の漁獲尾数である。大ガニと中ガニを分けずに記載されていたことから、両者を併せて大中ガニとして扱った。解析海域は、緯度経度 0.03 度でグリッドを作成し、操業された全ての海域（以下、海域条件 1）と、ある程度の頻度以上で操業された海域（以下、海域条件 2）でそれぞれ分析した。海域条件 2 は、18 年間の累計 CPUE のヒートマップを作成し、全解析期間の平均値・標準偏差より CPUE が大きい海域とした。資源量指標として CPUE を 1 網ごとのズワイガニの漁獲尾数により算出した。資源量推定には、CPUE を目的変数、累計漁獲尾数を説明変数とし、単回帰分析を行い、 x 切片により初期資源尾数を推定する方法を用いた。各漁期について操業日誌から日別、週別、月別の各集計単位で銘柄別の漁獲尾数と CPUE をまとめて初期資源尾数を推定し、真値を「越前町漁協の小型底曳網漁船のみの漁獲量」（以下、「小底漁獲量」）として、両者の相関関係を確認し、Delury 法の妥当性を検討した。

3. 結果

全漁期年を通して推定初期資源尾数が正数で得られたのは、大中ガニの海域条件 2 の日別、週別集計、山ガニの海域条件 1 の日別集計、黒仔の海域条件 1 の日別、週別、月別集計であった。全漁期年を通して推定初期資源尾数が正数になった銘柄・集計単位の場合のみにおいて相関関係を確認

した．有意な相関関係（ $p<0.05$ ）があったのは，真値「小底漁獲量」と黒仔の海域条件 1 の日別集計（ $r=0.56$ ），週別集計（ $r=0.61$ ），月別集計（ $r=0.59$ ）であった．しかし，大中ガニ・山ガニは有意な相関関係はみられなかった．本研究による Delury 法による大中ガニ・山ガニの精度は低く，漁期開始時の CPUE が不均質な分布範囲，漁期後半の CPUE が一時的に上昇しダブルピークになることが要因であった（図 1，左側）．一方で，黒仔の精度は高く，限られた分布範囲かつ漁期終了にかけて急減することがその要因と考えられた（図 1，右側）．

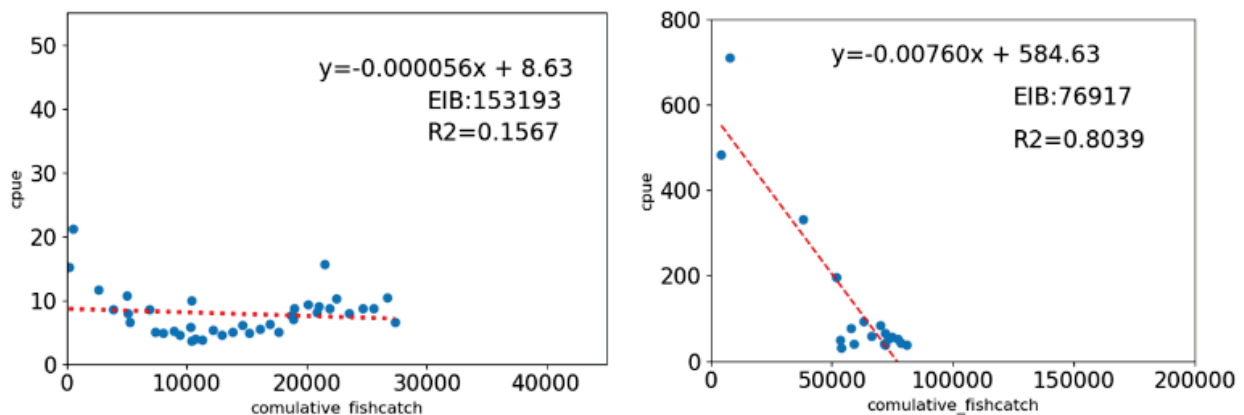


図 1 2016 年の累計漁獲尾数と CPUE の関係（左：大中ガニ，右：黒仔）

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 Delury 法による資源量推定，2024 年度水産海洋学会研究発表大会講演要旨集，pp79, 2024.11（静岡市）

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	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	京都府農林水産技術センター海洋センター	技師	山渕 航助
協力者	福井県水産試験場 海洋資源研究センター	所長	河野 展久
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	福井県水産試験場 海洋資源研究センター	主事	梶原 大郁
協力者	福井県水産試験場 海洋資源研究センター	主事	荒井 遼
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
協力者	九州大学応用力学研究所	准教授	木田 新一郎

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が乱流スケールにカスケードダウンし散逸する仕組みを研究している。これまでの研究で、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、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碎波 (Tsutsumi et al. 2017, Hasegawa et al. 2021, Nagai et al. 2017; 2021, Takahashi et al. 2024), 海山で励起された後流渦のシア・対流不安定混合 (Inoue et al. 2024) の重要性を示してきた。一方、大陸棚斜面域で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するプロセスとして、黒潮の対象/慣性不安定を通じ放出される近慣性内部重力波の碎波が重要であるという仮説を提案し (Nakamura et al. 2021), 現場観測と数値計算による研究を続けてきた。このように、本研究課題は、東シナ海の海峡域と陸棚斜面域での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している。

研究内容 2019 年より 6 年間、継続課題として研究を行ってきたが、本年度で上記目的の研究を終了する。終了する理由は、トカラ海峡の「平瀬」における黒潮-海山の相互作用観測プロジェクト (ワシントン大学との国際共同観測) が 2023 年 6 月に終了し、その成果がほぼ出揃ったこと (Tsutsumi et al. 2017, Hasegawa et al. 2021, Nagai et al. 2017; 2021, Takahashi et al. 2024, Inoue et al. 2024) による。さらに、東シナ海陸棚斜面域で日韓共同の黒潮観測を実施しているが、黒潮運動エネルギーの散逸過程解明を目的とした観測は一区切り付き、次の重点観測課題 (2025 年度/九大応力研/一般共同利用申請中) として、黒潮の鉛直混合過程から湧昇過程の研究に移行する方針を固めたことによる。これまでの観測を振り返ると、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-LR 75KHz) を設置してきた (図 1: 配置を変えて今後も継続予定)。2022 年 6 月~2023 年 6 月の 1 年間は、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 500~600 m 深に設置した。これらの観測により、現時点で黒潮運動エネルギーの散逸メカニズムの推測に資する観測事実を把握する作業は終了した。今後は、数値実験を通して観測事実と整合的な散逸メカニズムの仮説形成を行う必要があるが、その研究は次の重点研究課題の中で継続することにした。

今年度は、以下の観測・解析を行った: 1) 日韓共同観測を次の観測フェーズに向けて継続したことに加え、2) 2022/6~2023/6 の係留観測データより得られた観測事実を再検討 (2023 年度研究課題の成果の再検討)、3) 超高解像度の海洋再解析データ (DR_Ep) を用いて黒潮運動エネルギーの散逸メカニズムを推定した。以下、2) と 3) について、結果の概略を示す。

結果 2022/6~2023/6 の係留観測戦略は、ADCP 観測網により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ることだった。この戦略で観測データを解析した結果、昨年度、以下の結果を得た。KCM3 の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 (水温逆転の距離の総和) が大きい傾向があった。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 (約 10~30 日周期) の季節変動に関連して 12~3 月頃顕著に起こる傾向があった。さらに、上述の変動が卓越した 3 日間 (12 月 21~23 日) について詳細な解析を行った結果、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傾向が認められた。

今年度、上述した要素 (黒潮下層の南下流、半日・日周期の外部潮汐、近慣性内部波エネルギー、疑似 Thorpe スケール) の関係を、12 月~3 月の冬季について系統的に調べた (図 2)。結論として、観測事実を以下のように整理した。近慣性内部波エネルギーと疑似 Thorpe スケールの増大は、20~30 日周期の黒潮擾乱に由来する黒潮流軸の沖へのシフト (黒潮下層の南下流イベントと整合的) に同期している。日周潮の大潮 (約 13 日変動) は、黒潮流軸の沖へのシフトの 3 回に 2 回の割合で起こる。しかし、両者には因果関係はなく、最小公倍数の関係による偶然の結果と解釈される。また、12 月~3 月期、日周期と半日周期の大潮は同期する傾向がある。したがって、近慣性内部波エネルギーと疑似 Thorpe スケールの強化は、黒潮流軸の沖へのシフトと日周潮・半日周潮の大潮の両方に起因しているように見える。つまり、黒潮が大陸棚斜面から離れたタイミングで大潮が起ると、大振幅の近慣性内部波が励起され、それが碎波することで鉛直混合が促進されると考えられる。

この観測事実を検証するために、超高解像度の海洋再解析データ (DR_Ep) を解析した。その結果、以下の事実がわかった。再解析データには、観測で見られるような、水平流速の鉛直高波数シアーブンド構造が再現されている。このシアーブンド構造は、以下の現象に伴われている (図 3) : 1) 日周期の内部潮汐 (近慣性内部重力波と周期がほぼ同じで両者を厳密に分離するのは困難) が、陸棚縁辺で形成されて沖縄トラフの黒潮内部へ向かってビーム状に下方エネルギー伝搬する現象, 2) 半日周期の内部潮汐が陸棚斜面上の黒潮底部からビーム状に上方エネルギー伝搬する現象。これらの現象は黒潮の沖へのシフトにより強化されている傾向が示唆される (現時点では年間を通した特性の解析は行っていない)。なお、再解析データからは、水平流速の鉛直高波数シアーブンド構造は、内部潮汐波のビーム状の伝搬 (線形力学) として理解できそうであるが、ADCP 流速時系列 (図 4) からは、このシアーブンドはビーム状伝搬構造ではなく、高波数の鉛直モード構造とみなせるときがあり、黒潮の非線形性が波動伝搬に強く影響してエネルギーが局在化している可能性が指摘できる。現時点ではこの点の解析は不十分であり、今後、さらに観測データ解析と数値実験を実施する必要がある。上述した理解は、黒潮ではなく潮汐の運動エネルギー散逸のプロセスに留まる。このプロセスの中に、黒潮の運動エネルギー散逸が関連するかどうかを調べることも重要な研究課題として残されている。

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)

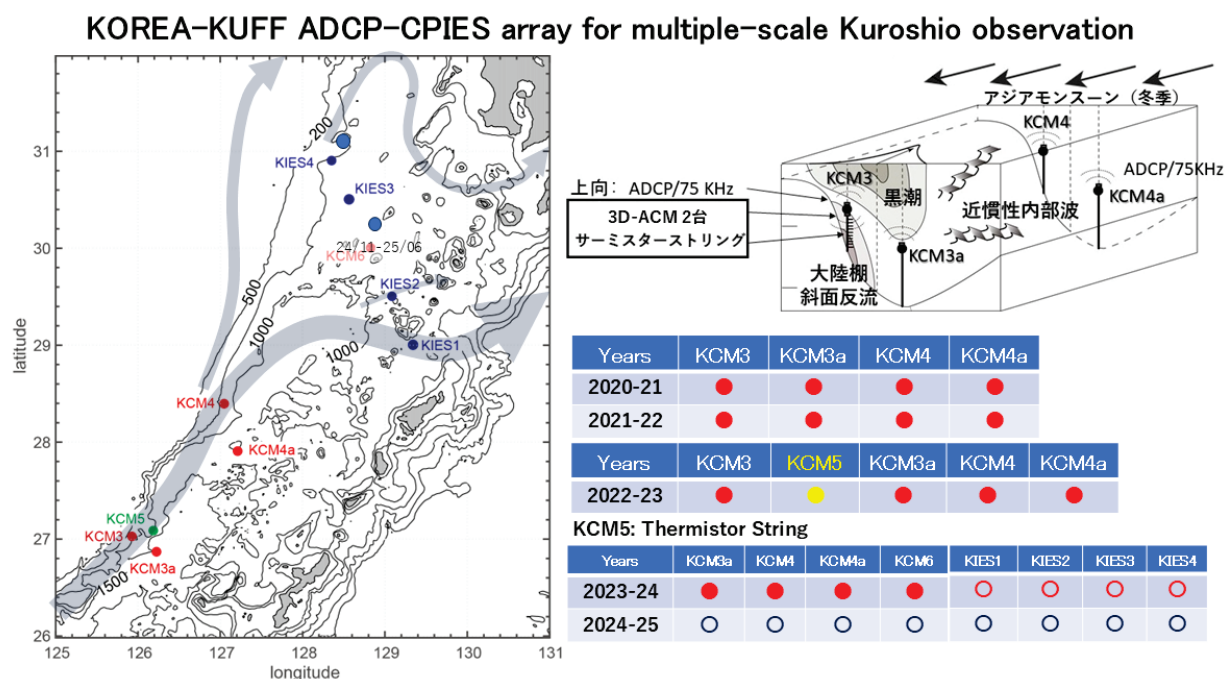


図 1. マルチスケール黒潮変動の係留観測網。KCM3~KCM6 (赤字)は ADCP (WH-LR 75KHz), KCM5 (緑字)は Thermistor String, KES1~4 (青字)は CPIES (A current- and pressure-recording inverted echo sounder)の係留点。

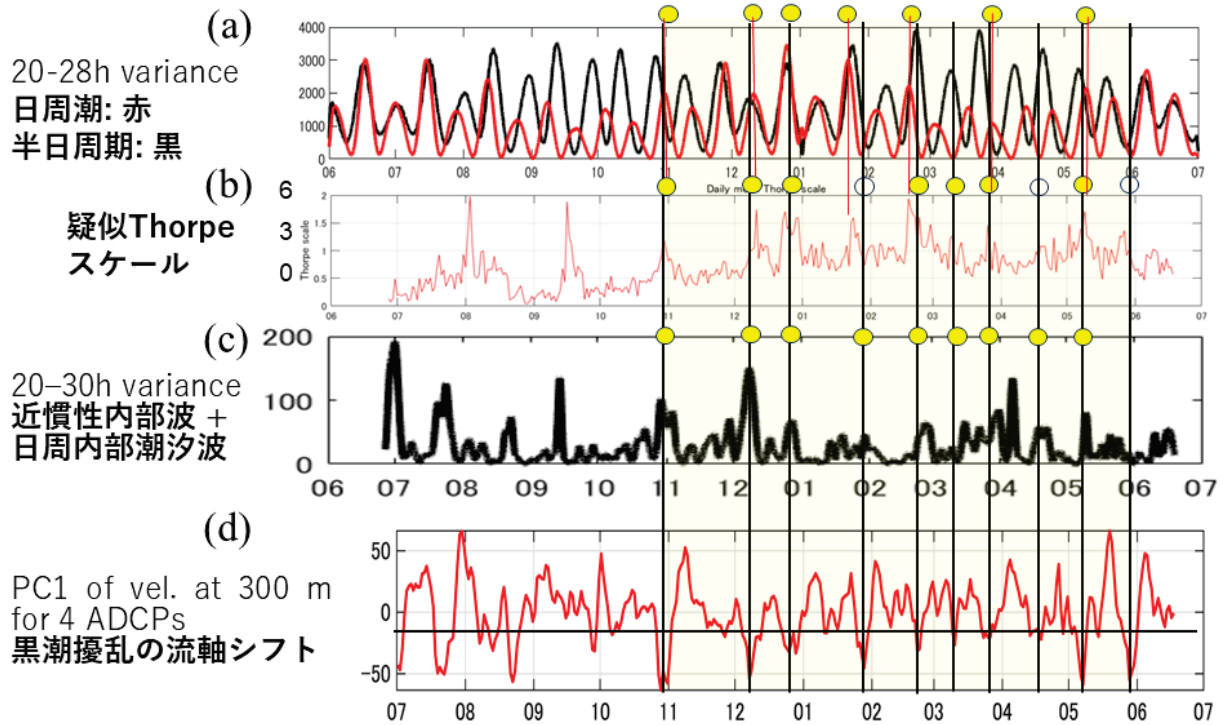


図 2.. (a) 那覇の潮位データによる潮汐エネルギー：1 日周期成分の分散（赤），半日周期成分の分散（黒）。(b) KCM5 の Thermistor String データより計算された疑似 Thorpes スケール（10 秒毎の値の日平均値），(c) KCM5 の 3D-ACM データより計算された近慣性周期帯（20～30 時間）の水平流鉛直シア強度（上側と下側の流速差の 2 乗），(d) KCM3-3a における黒潮の流軸位置指標時系列（負：冲向きシフト）（KCM3～4a における 200m 深の ADCP 流速ベクトル時系列の結合 EOF 解析結果：第 1 主成分）。縦線は，11～6 月の期間での黒潮の冲向きシフト（縦線）を示す。黄色丸印は，黒潮の冲向きシフトと同期している，近慣性内部波エネルギーが大きいイベント（図 c），疑似 Thorpe スケールが大きいイベント（図 b），日周潮汐の大潮（図 a）を示す。

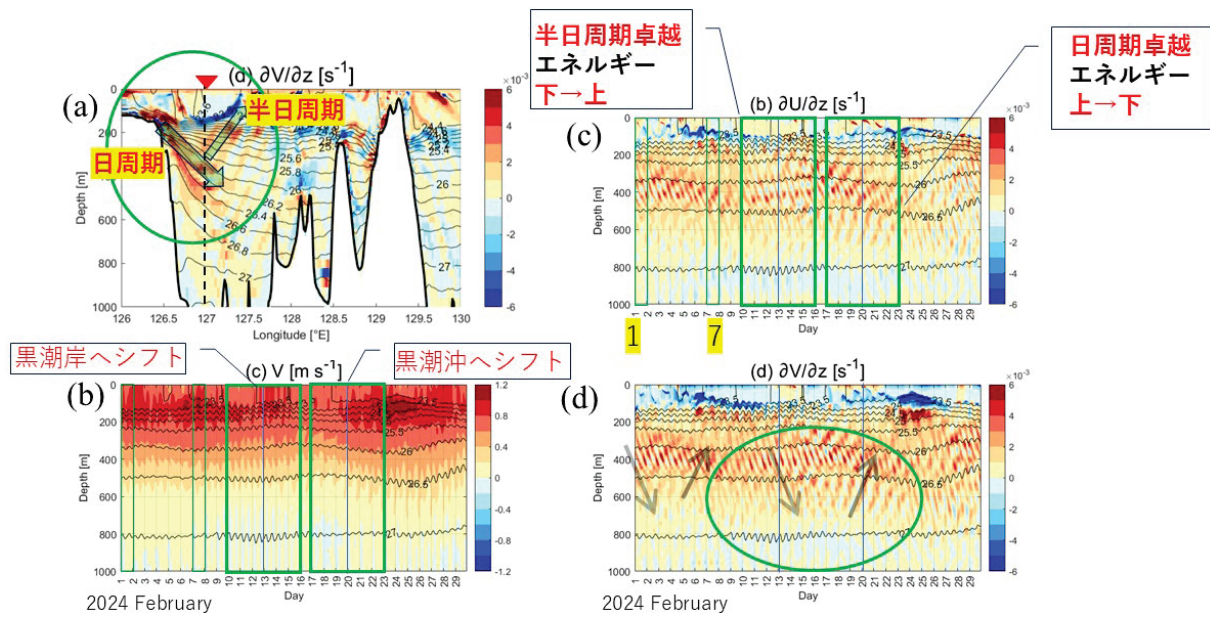


図 3. 2024 年 2 月の 1 か月間の KCM4 近傍における描像。(a) 黒潮を横切る東西断面での断面直交流速の鉛直シア分布。図(a)の縦破線の地点における各種時系列：(b) 断面直交流速，(c) 東西流の鉛直シア，(d) 南北流の鉛直シア（矢印は等位相線を示すので、エネルギー伝搬は等位相線に直交する方向とみなせる）。

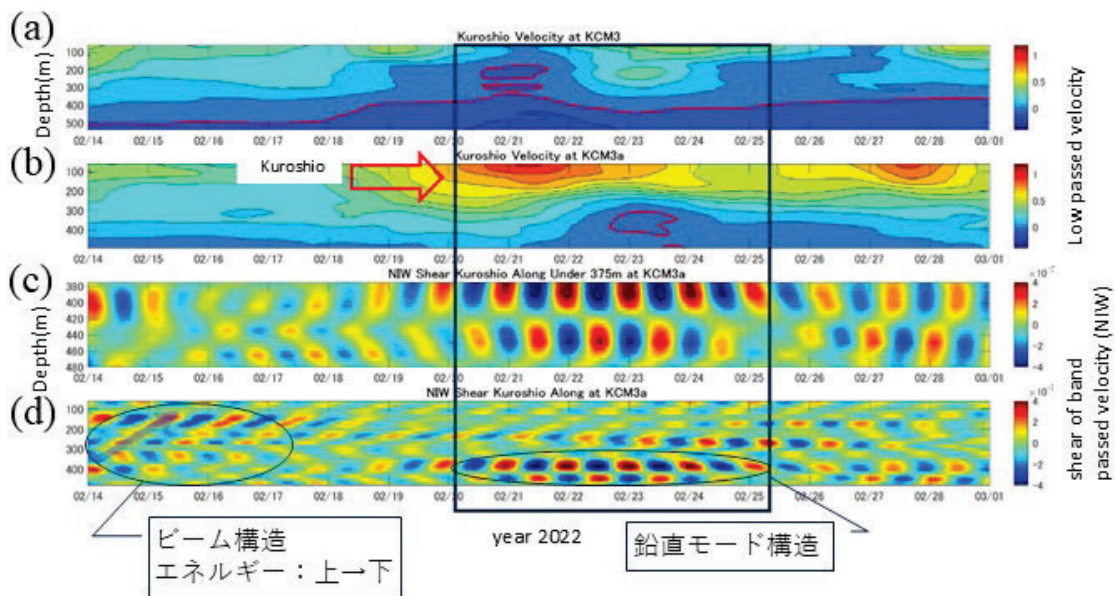


図 4. 2022 年 2 月 14 日～3 月 1 日の ADCP 流速（黒潮方向成分）の時系列。(a, b) 長周期成分（50h low-pass filtered velocity）：(a) KCM3, (b) KCM3a. (c, d) 調和解析により主要 8 分潮の潮汐変動を除去したあと、近慣性周期帯のエネルギー（0.90f~1.25f）を抽出した水平流の鉛直シア一時系列：(c) 300 m～400 m 深，(d) 全層。四角で囲った期間では、黒潮が沖にシフトしたタイミングで、黒潮下部に高波数の鉛直モード構造が出現していることがわかる。

地球衛星観測ミッション EarthCARE におけるエアロゾル・雲プロダクト推定アルゴリズムの高度化と
地上検証に資する観測研究

国立環境研究所 西澤智明

背景・目的

地球気候への大気粒子（エアロゾルや雲）の影響評価を目的として、日欧共同地球衛星観測プロジェクト EarthCARE が進行しており、2024 年 5 月に本衛星が打ち上げられた。本衛星には紫外レーザーを用いた高スペクトル分解ライダー ATLID と共に雲レーダー、多波長イメージャー、広帯域放射計が搭載され、複数センサーの観測データを利用した大気粒子プロダクト等が生成される。一方で、そのプロダクトには準リアルタイム公開性やデータリソースの制約等があり、計算速度向上のための仮定・簡略化や出力プロダクト数の制限などの制約がある。そこで本研究では、これらの制約を超えた、新たな解析手法の開発や新規プロダクトの生成を目的とする。また、本研究で考案したアルゴリズムの開発や EarthCARE プロダクトの検証を目的とした地上観測及び装置開発も本研究の範疇とする。

研究方法と結果

光学的に厚い粒子層からのライダー信号には（特に ATLID を含む衛星ライダー）、粒子からの一次散乱成分と共に多重散乱成分が多く含まれる。よって、ライダー信号を用いた大気粒子の濃度等の物理量推定における多重散乱成分の取扱い（補正や利用）は重要な課題となる。先行研究にて、衛星搭載ライダーの測定信号を地上観測から再現するために、多重散乱成分を独立測定するライダー（多重散乱ライダー）を国環研・九大応力研で共同開発し、アルゴリズム開発・改良に利用してきた。その中で、上記アルゴリズムの高度化に向けて本ライダーの改良点が幾つか挙げられた。そこで本研究では、これまでの直線偏光レーザーを用いた直線偏光測定モードと共に、円偏光レーザーを用いた円偏光測定モードでの測定も可能とする多重散乱ライダーシステムへの拡張を図った。システム全体の設計を見直し、最小限の改良で実現するための光学設計案を策定し、情報通信研究機構（東京都小金井市）にて観測運用している多重散乱ライダーへ本機能を導入した。試験観測を実施し実測可能であることを確認した。一方で、光学アライメントの調整および信号校正が従来よりもシビアなことも判明した。安定運用と高精度測定に向けた調整手法の確立を進めつつ、観測データの蓄積を今後行う。

また、環境研・九大応力研の共同で地上常時観測を行なっている高スペクトル分解ライダーデータを用いて、ATLID 用大気粒子推定アルゴリズムの改良も行った。数年にわたる長期観測データを統計解析し、大気粒子層の検出や大気粒子のタイプを識別する解析手法の改良（閾値等の改良）に用いた。これらの研究成果は論文や学会等を通じて公表された。

研究成果

発表論文 2 件、学会・研究会発表 5 件

研究組織

研究代表者 西澤智明（国立環境研究所）

研究協力者 神慶孝（国立環境研究所）、岡本創、佐藤可織（九州大学応用力学研究所）

HF レーダと人工衛星による沿岸海域諸現象の検知と構造の解明

神戸大学 内海域環境教育研究センター 林 美鶴

1. 目的

短波海洋レーダ（HFレーダ）は海面流を測定する機器で、波浪も測定できる。さらに、津波、海上風、海面塩分、物体なども検知できる可能性がある。紀伊水道と大阪湾西部には国交省近畿地方整備局がゴミ回収を目的にHFレーダを設置しているが、研究に利用された実績は少ない。人工衛星搭載のセンサーは高解像度化が進み、沿岸の小規模の現象を捉えられるようになってきた。himawari は日本が継続的に運用し、水温だけでなくクロロフィル濃度も提供されている。本研究では、これらリモートセンシングにより面的同時性を持って連続的に得られるデータを用いて、諸現象を把握し、それらの構造を明らかにする。

2024年度は海面収束場の検出を試みた。申請者は2017～2018年度に「大阪湾に出現するフロント構造の解析」として共同研究を実施した。この研究では、船舶で得られた水温・塩分データを用いてフロント検出を試み、その検証に人工衛星やHFレーダのデータを使用した。これによりフロント位置の空間分布や季節特性が明らかになったが、船舶データは線であり、フロントは離散した点でしか検出できない。そこで今回は、人工衛星の海面水温データによる潮汐フロントの検出と、HFレーダの海面流データによる収束場の検出を実施した。

また、海面過程に重要な役割を果たす海上風について、船舶での観測値に対する船体影響について検討した。研究では、多くの場合に数値モデルやリモートセンシングによる海上風データを使用しているが、ほぼ全ての船舶に風速計が搭載されており、一部のデータは気象庁に報告されている。しかし船上観測データは船体影響を受けているため、研究に利用するにはその特性の把握が必要である。

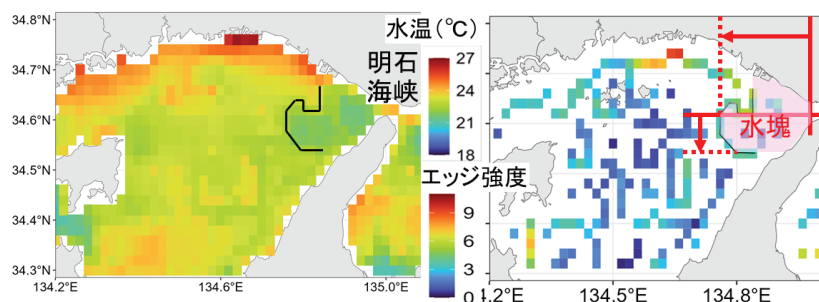


図1 海面水温（左）とエッジ検出結果（右）

2. 人工衛星の海面水温データによる潮汐フロントの検出

明石海峡での潮流に起因する潮汐フロントを、大阪湾に比べ他の環境要素の影響が少なく、検出しやすい播磨灘を対象に、JAXA が公開しているひまわりモニタ（静止気象衛星ひまわり標準データ、空間分解能 $0.02^\circ = 1.2\text{mile} \div 2.2\text{km}$ 、10 分毎）の海面水温 1 時間平均値を用いて検出を試みた。データ取得率が概ね 100% で、連続してデータが得られた 2021 年 6 月 9 日 17 時～10 日 8 時（6 時間、明石海峡で転流→上げ潮流→下げ潮流→上げ潮流→転流、鳴門海峡との位相差約 2 時間、大潮初期、日朝不等大）でのデータを用いた。フロントの検出には、キャニーエッジ検出手法を用いた。これは、ソーベルフィルタにより x y それぞれの方向で差分を求めて、エッジの強さ G と角度とを算出し、角度に応じた細線化処理（法線 3 ピクセルの中央でエッジ強さ最大となる場合のみ抽出）を行った上で、2 つの閾値を用

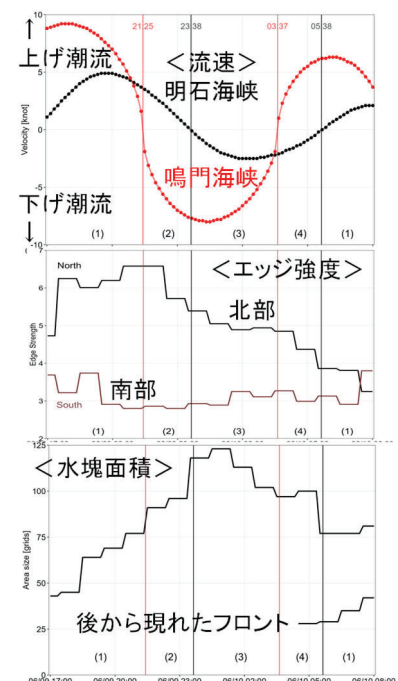


図2 潮流流速、エッジ強度、水塊面積の時間変化

いてヒステリシス閾値処理を行う手法である。ヒステリシス閾値処理では、高強度のエッジの閾値を HT 、低強度の閾値を LT とし、 $HT \leq G$ の場合は検出し、 $G < LT$ の場合は検出せず、 $LT \leq G < HT$ の場合は、 $HT \leq G$ のエッジに接続している場合に検出する。図 1 に示す通り、最初の画像で検出されたエッジから潮汐フロントを決定して、これを毎時追跡し、明石海峡(34.62N,134.98E)からのフロントの距離(西(経度)方向、南(緯度)方向)、水塊(明石海峡での混合水)面積、平均エッジ強度(明石海峡から西に延びる北部フロント、南北に延びる南部フロント)を定量化した。

図 1 に、明石海峡と鳴門海峡の潮流流速、算出したエッジ強度、及びフロントに囲まれた水塊面積の時間変化を示す。明石海峡で上げ潮流の間にフロントは西方向へ、下げ潮流の間に東方向へ移動した。南北方向には、鳴門海峡の潮流に応じて、下げ潮流時に南へ、上げ潮流時に北へ移動した。これに応じて水塊面積が増減した。明石海峡の下げ潮流で北部フロントの強度が最大となり、下げ潮流になり減衰した。南フロントの強度は変化しなかった。明石海峡で 2 回目の上げ潮流時に、新たなフロントが出現した。播磨灘に出現する明石海峡の潮汐フロントに対し、鳴門海峡の潮流も影響を与えている。

3. HF レーダの海面流データによる収束場の検出

2010 年 3 月 1 日～2018 年 5 月 26 日、及び 2021 年 1 月 1 日～2024 年 7 月 31 日の大阪湾の毎時の HF データから収束度(s^{-1})を算出した。平均風速 $1.0m/s$ 以下のケースについて、風速別に地点毎の収束度を累積した。風速毎に収束度累積が高い海域を抽出し、これらを重ね合わせることで、図 3 に示す通り上げ潮流の収束エリア A と B、下げ潮流の収束エリア X と Y が特定できた。

明石海峡での流速、各エリアの平均流速、及び平均収束度の三者の相関関係を解析した。エリア A では、明石海峡での流速とエリア平均流速・収束度との相関は低い、流速と収束度には正の相関が見られ、上げ潮流の強弱に寄らず収束が生じている可能性が示唆された。エリア B では明石海峡での流速とエリア平均流速・収束度とに相関が見られ、収束は上げ潮流により生じている可能性が示唆された。

図 3 に示す通り、紀淡海峡を通過した上げ潮流は明石海峡に向かう流れと、湾奥や淡路島沿いの流れに分散する。湾奥からは明石海峡に向かう流れが生じ、これが水深の浅い沖ノ瀬に進行を阻まれることで流速が低下して、エリア A で海面収束が生じると推測される。湾奥からの流れに対し、上げ潮流の影響は小さいと予想される。紀淡海峡からの上げ潮流は、沖ノ瀬の西側で淡路島沿いの流れと合流する。このため、潮流に影響を受ける海面収束がエリア B に生じると推測される。

エリア X と Y では明石海峡での流速とエリア平均流速・収束度とに相関が見られ、収束は下げ潮流により生じている可能性が示唆された。図 3 に示す通り、明石海峡を通過した下げ潮流は沖ノ瀬を迂回するように二手に分かれる。湾奥からは紀淡海峡に向かう流れが生じ、これと沖ノ瀬の東側の下げ潮流との境界となるエリア X で海面収束が生じると推測される。二手に分かれた下げ潮流は紀淡海峡付近で合流し、合流海域となるエリア Y で海面収束が生じると推測される。いずれの収束も下げ潮流に起因するため、潮流の強弱で収束度が変化すると考えられる。

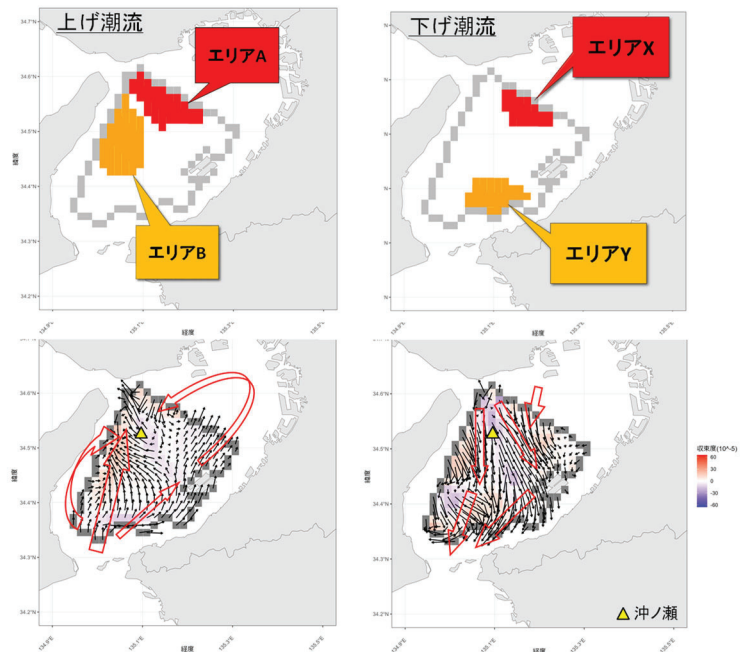
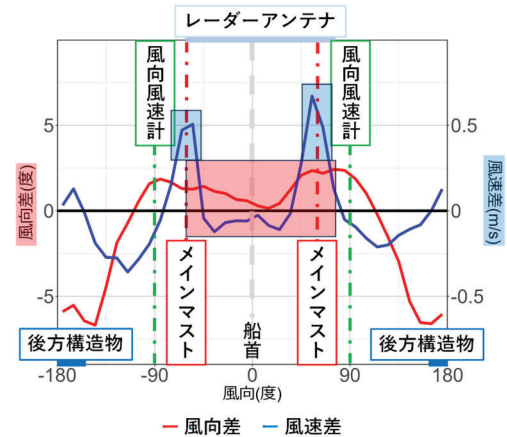


図 3 収束場(上)と海面流ベクトルと収束度の分布例(下)

4. 船舶観測風に対する船体影響の検討

神戸大学大学院海事科学研究科附属練習船「海神丸」のメインマスト左右に 3m 間隔で設置されている風速計で、2022 年 5 月～2023 年 8 月の 16 ヶ月間に計測された相対風向・風速の 1 分平均値により、両者の差分から船体影響を検討した。両舷機の風向差は、 $(\text{風向差}) = (\text{左舷機風向}) - (\text{右舷機風向})$ で求め、風向差+は風下側では風上側よりも船尾側から風を受けていることを意味する。風速差は、 $(\text{風速差}) = (\text{風上側風速}) - (\text{風下側風速})$ で求め、風速差+は風下側で風上側よりも風速が小さいことを意味する。

両舷機の風向・風速差は平均的には両機はほぼ一致するが、偏差が大きくなる風向が見られた。風向差・風速差を、風向 10 度毎に平均した分布図と、風上に存在する船体構造物の位置関係を図 4 に示す。いずれの風向においても、風上側に比べ風下側ではやや横風を示す傾向がある。風速は、船首方向と正横から後方にかけての風は風下側で大きくなり、斜め前方と船尾方向の風は風下側で小さくなる。後方からの風では、後部マストの影響で風向差がより大きい。船尾寄りの風は風上側でもこれらの影響を受けているが、横方向の風では風上側への影響は小さい。構造物が風下側のみ影響する風向で風向差が極大となり、船首側から回り込むように風向が変化する。風下側への構造物の影響が小さくなる横からの風では、風が吹き抜けて風向差は小さくなるが、風速は風下側で大きくなる。正横から船首寄りではメインマストの影響を受け、風は船尾側に回り込み、また減速して風上側よりも弱い風速になる。船首方向は開けているため、メインマスト方向よりも船首側の風上風に対する影響は小さい。その中で両舷機とも影響が小さい方位は、右舷側のレーダーアンテナにより、やや右舷寄りになる。



5. 成果報告

< 発表論文 >

- ・ M. Hayashi et al., Characterization of Onboard Wind by Comparing Two Anemometers, Proceedings of OCEANS 2024 - Halifax, 1-5, 2024.

< 学会・研究会等発表 >

- ・ 林ら、両舷に搭載された風向・風速計による船上風計測特性の把握、日本航海学会第 150 回講演会
- ・ 谷田、林、廣川、FVCOM を用いた大阪湾の流況再現および HF レーダ観測値による精度評価、愛媛大学瀬戸内海水産環境研究集会
- ・ 林ら、船上計測風に見られる船体構造物の影響、日本海洋学会 2024 年度秋季大会
- ・ 増田、林、廣川、船上計測風が持つ船体影響に関する研究、第 54 回南海・瀬戸内海洋調査技術連絡会
- ・ 谷田、林、廣川、HF レーダ及び FVCOM を用いた大阪湾の流況解析、九州大学応用力学研究所研究集会「海洋レーダを用いた海況監視システムの開発と応用」
- ・ 増田、林、廣川、船上の風向風速計が計測する風を海上の風に補正する手法の確立、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」
- ・ 増田、林、廣川、船上の風向風速計が計測する風を海上の風に補正する手法の確立、香川大学瀬戸内圏研究センター沿岸海洋研究集会

6. 研究組織

林 美鶴	神戸大学	准教授
廣川 綜一	神戸大学	技術職員
磯辺 篤彦	九州大学	教授

等密度面モデルを用いた陸域海洋統合物質循環モデルの構築

京都大学・総合生存学館 山敷 庸亮

1. 研究目的

観測データの乏しい島嶼域の汽水域から沿岸域までの河川水の拡散過程を検証することが可能な数値モデルの構築を目指す。琉球列島のような島嶼域では、汽水域が独自の生態系を育む貴重な領域である。陸域面積が小さい島嶼域の汽水域では、平時には海洋が支配的である一方、台風・豪雨時は突発的に発生する河川流出の影響が支配的になる。近年、台風は強くなる傾向があることから、島嶼域における汽水域の環境場では、将来、大きな環境変化が起こることが予想される。しかしながら、島嶼域の環境変化のリスクを理解するうえで、既存の河川モデルを活用するには、パラメータチューニングのための観測データが欠かせず、多くの島嶼域にはそのようなデータは存在しない。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を再現し、様々な島嶼域に活用することが可能な河川海洋一体型モデル JORRO(Kida & Yamashiki, 2015)の高度化を目指す。一つのモデルで多様な環境・地形に対応できるユニバーサルな物理過程を扱える数値モデルを実現し、汽水域は既存の河川モデルでは対応できない海流・潮流をも考慮に入れた数値モデルを実現する。流出過程を再現し、山間部から汽水域への栄養塩の輸送過程・塩分と水温の変化の再現を目指す。

2. 解析手法

熊本県阿蘇白川流域に焦点を当てた高解像度の河川海洋一体型モデルを構築し、台風時における流出過程の検証を進める。阿蘇白川流域は、平坦な山間部・急斜面・蛇行と多くの物理過程を考慮する必要があるため、各プロセスの重要性を検証するには最適な流域である。

数値計算は応用力学研究所のスーパーコンピュータおよび九大の大型計算機センターにて実施する。海底地形には日本水路協会の海底地形デジタルデータ、陸面には ASTER-GDEM2、潮汐強制には Matsumoto et al. (2000)、降雨データには解析雨量を用いる。2015 年 9 月の豪雨時における河川流出を再現し、その出力結果を国交省の水位・流量観測データと比較する。本年度は、2023 年度に引き続き山間部から急な地形勾配による常流と射流が混在する流域の流出の時間変化の忠実な再現を目指す。物理的な要素の重要性に加え、既存の水文モデル・CDRMV3 との比較を行うことで、土地利用による遮断、浸透、流出率などを変数の役割を検証する。

3. 解析結果・考察

(1)標高データの調整

JORRO モデルの解析に用いている数値標高データは 30m 解像度であり、河川網データを使用し計算用の地形を作成した際に、不自然な貯水地が発生する、意図しない箇所での別の河川へ流れ込むなどの課題が見られた。昨年度までの解析では、数値標高データの調整を行うことで、白川上流のカルデラから中流までの区間で、降水に対し現実的な流量の応答を捉えることができていた。本年度の解析では数値標高データの調整を対象区間全域で行い、上流から下流まで全ての領域で不自然な水の動きが発生しないよう地形データを整備した。



図1 調整が必要な標高データ（赤丸部）

河川が二股に分かれており、本流（上側）以外にも水が流れ込んでしまう。

(2) JORRO モデルの計算結果

標高データの調整後、2015 年 9 月の雨量を入力として与え、観測結果との比較を行った。上流から立野、陣内、代継橋の 3 地点で解析を行った。立野、陣内では流量の立ち上がりやピークの観測結果とのずれが数時間程度であったが、代継橋では 1 日近くピーク時のずれが見られた。下流に行くほど現実の流れと差異が生じていることがわかる。目視で確認したところ、不自然な貯水地が発生する、河川水が支流を遡るといった現象は発生しておらず、モデルの特性や地下水の影響など現実の河川の性質によるものだと考えられる。また、流量の絶対値についても観測結果とのずれが確認できた。立野では一つ目のピーク時に流量が過小評価されており、陣内では二つ目のピークが過大評価されている。観測結果では下流である陣内の方が流量が少ないが、JORRO ではその逆である。モデル上では地下水の影響が考慮されておらず、地形に調整を加えているため一度本流に流れ込んだ水はそれ以外の箇所に流れることはないため、このような結果となっていることが考えられる。再現性向上のためには地下水などの要素をモデルに組み込む必要がある。

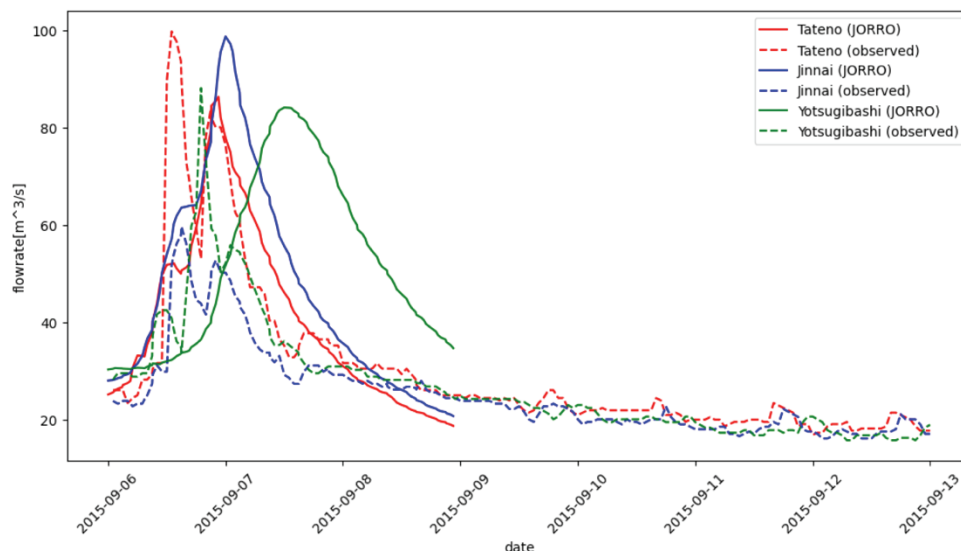


図2 JORRO モデルでの計算結果。

実線が JORRO での解析結果、破線が観測流量。

(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。土壌の等価粗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。以下に CDRMV3 での解析結果を示す。ピークごとの流量の絶対値に $20\text{m}^3/\text{s}$ 程度の違いが見られる場合があるものの、立野よりも陣内の流量が少ないといった性質や、代継橋の立ち上がりなどが JORRO よりも精度良く再現されている。

このように JORRO と比べ再現性という点では利点が見られるが、各観測点においてキャリブレーションをすることで再現性を高めているため、結果の物理的理解が難しい。JORRO モデルでは、各流路に合わせて適切なフルード数に変化・評価されており、地下水や現実の河川の性質を反映したモデルに改良していくことで、最適化を行わずともより現実に近い流れ環境が再現できる可能性がある。

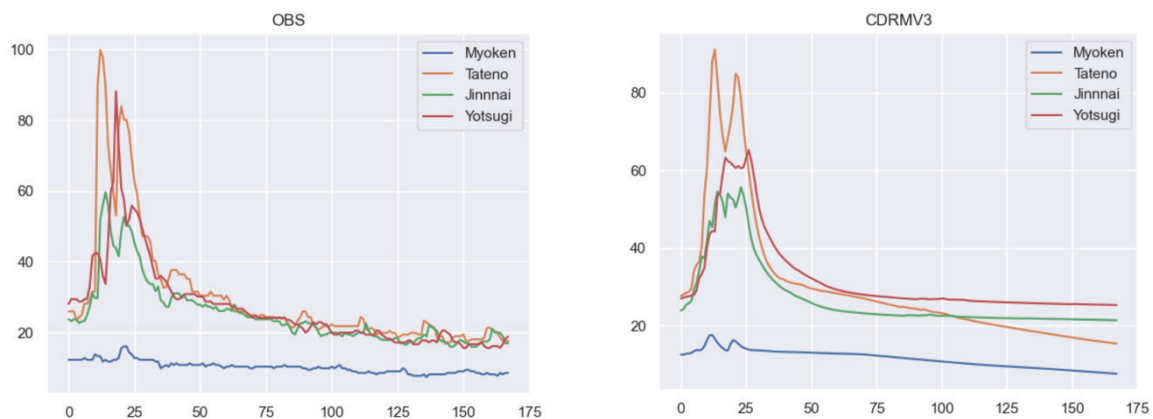


図 3 CDRMV3 での計算結果。

左が観測流量、右が CDRMV3 での解析結果。

4. まとめ

本年度は、JORRO モデルの流量再現性向上を目的に、数値標高データの調整を行い、2015 年 9 月の降水データを用いた解析を実施した。従来の調整範囲を流域全体に拡大することで、不自然な貯水地の発生や流路変更の問題を解消し、より自然な水の流れを再現できた。解析結果では、立野・陣内では観測流量とのずれが数時間程度で収まったが、代継橋ではピークが 1 日近く遅れる傾向が見られた。また、流量の絶対値にもずれがあり、地下水の影響を考慮しないことが原因の一つと考えられる。CDRMV3.3.1 との比較では、流量の再現性に優れる一方で、個別流路の流速評価が困難という課題があった。JORRO モデルは流路ごとの流速変化を評価できるため、地下水の影響を組み込むことで、より現実に近い流れの再現が期待できる。今後は、結果をより詳細に分析し、現実と差異が生じる原因の特定や、それぞれのモデルの特徴を精査していく。また、JORRO モデルの再現性向上に従って必要な要素を明らかにする。

5. 研究成果

学会発表

佐藤 啓明・山敷 庸亮・木田 新一郎, 海洋・河川・流出統合レイヤーモデル JORRO を用いた陸域の解

析結果の、既存の水文モデルと観測流量との比較, JPGU 2024 (幕張メッセ) , 2024/5/28

木田 新一郎, 陸海一体型モデルについて, 九州沖縄合同シンポジウム, 2024/12/6

木田 新一郎, 陸海一体型モデルにむけて, 沿岸海洋シンポジウム 2024, 2024/09/16

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 2 年	佐藤啓明
世話人	九州大学	准教授	木田新一郎

Tidal impacts on wintertime mixed layer formation over the Bering Sea by numerical simulation

海洋研究開発機構

Shu, Hung-Wei

目的 高緯度・極域における冬季海洋混合層の発達、は、全球の海洋-大気間の熱収支や海洋生態系、さらに海洋成層構造の決定において重要な役割を果たす。しかし、潮汐との相互作用のメカニズムに関する理解は不十分である。本研究では、数値シミュレーションを用いてベーリング海の冬季混合層に対する潮汐のインパクトを実験し、潮汐強制および非潮汐強制のケースを比較することで、水塊分布や熱交換への影響を明らかにする。

方法 渦解像の海洋大循環モデル COCO を使用し、潮汐振動を圧力勾配項に導入した。モデルの計算領域は北太平洋全体を対象とし、水平解像度は 8-15 km、鉛直は 84 層である（図 1）。気候学的外力を用いた 60 年間のシミュレーションの後、潮汐強制および非潮汐強制の実験を 20 年間実施し、最後の 10 年間の結果を解析対象とした。モデルの検証には 1980 年-2000 年の客観解析データを使用した。

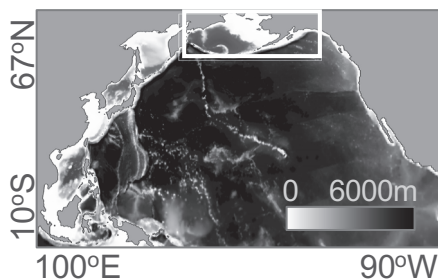


図 1. モデルの計算領域およびベーリング海

が見られた。季節変動の解析では、潮汐ケースがより広範かつ深い混合層を形成し、塩分主導の混合が進むことで成層が弱まることが確認された。その結果、潮汐振動を考慮したモデルは現実的な冬季混合層とそれに伴う海洋貯熱量を再現することが明らかとなった（図 2）。これは、潮汐インパクトにより垂直混合が強化され、塩分の均一化によって成層が緩み、塩分躍層が深くなるためである。今年度の研究では、風だけでなく潮汐も塩分躍層の深度を制御し、水塊特性を変化させることが示された。

来年度に見込まれる成果 ベーリング海における海洋

成層構造の気候学的平均場の形成に対する潮汐起因の海水混合過程の影響を各種数値実験により調べる予定である。現状、すでに潮汐流を導入した海洋モデル実験や潮汐を考慮しない比較実験は完了し

結果 潮汐ケースでは、非潮汐ケースと比較して冬季混合層がより深く広がり、気候学的観測結果と整合的な傾向を示した。両ケース間の垂表層の温度差は 1.5°C を超え、潮汐による鉛直的な熱輸送が促進されることが示唆された。特にアリューシャン列島上の鉛直混合が強化されることで、貯熱の放出が促され、中層水温の低下が観測された。一方、非潮汐ケースでは、混合層が浅く維持されることで中層水が保持され、表層水温の上昇

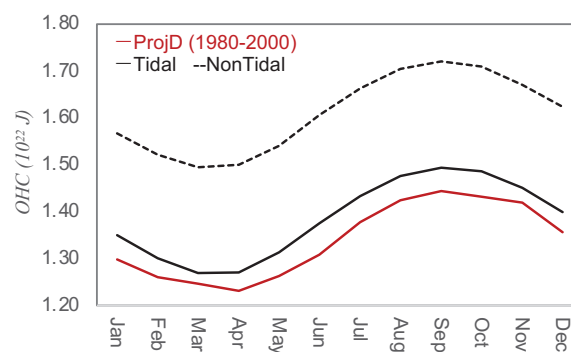


図 2. ベーリング海の海洋貯熱量(Ocean heat content, OHC)。赤線、黒実線、および黒破線は、それぞれ客観解析データ、潮汐強制ケース、非潮汐強制ケースを示す。

ている。ここまでの解析結果からは、潮汐混合が存在することによって特に塩分の鉛直的な均一化によって混合層が深まり、これに伴って、亜表層水温が寒冷化することが示されている。今後は、鉛直混合により変質した海水の輸送過程など詳細を調べることにより、アリューシャン海峡やベーリング海北東部陸棚域、どちらの海域における潮汐流が上記の寒冷化へより重要なのか特定する。研究自体は順調に進んでおり、今年度の実施内容と合わせて、論文による成果公表を見込んでいる。

日本周辺海域を対象とした潮流シミュレーションモデルの作成

松村 義正¹, 広瀬直毅², 辻英一², 蓮沼啓一³, 北村尚士³

1 東京大学 大気海洋研究所, 2 九州大学応用力学研究所, 3 株式会社海洋総合研究所

目的：

日本周辺海域では顕著な潮流が見られるが、現状での潮流予報は内湾域等の狭い領域に限定されていることが多い。これを周辺海域にまで広げ、漁業や船舶運航、漂流物の追跡等の手助けとなる基本データを得ることを目的とする。

手法：

日本周辺の海域には海流と言われるようなゆっくりとした変動と、時間的变化の大きい潮流とが存在している。両者は流れを作り出す力学が大きく異なっている。海の流れを予報するには、本来であれば両者を同時に計算するシステムを構築すべきであるが、本研究では簡便な統計法と精確な力学法を比較・検討する。すなわち、短周期変動（潮流成分）と長周期変動成分を別々に求め、次いで両者を合成する方法を探る。長周期変動成分に関しては既存の計算結果（今回は気象庁の MOVE と欧州 Copernicus の CMEMS）を用いることとする。

結果：

対象領域として、潮流が複雑で予測の難しい対馬周辺の海域を選ぶことにする。まず図 1 に MOVE と CMEMS の二つの海洋モデルの 2025 年 1 月 15 日の日平均表面水温（Sea Surface Temperature, SST）を示す。第一印象として、両者はよく似ているが細部では異なる点も認められる。例えば、韓国沿岸や瀬戸内海の低温分布では違いが大きい。

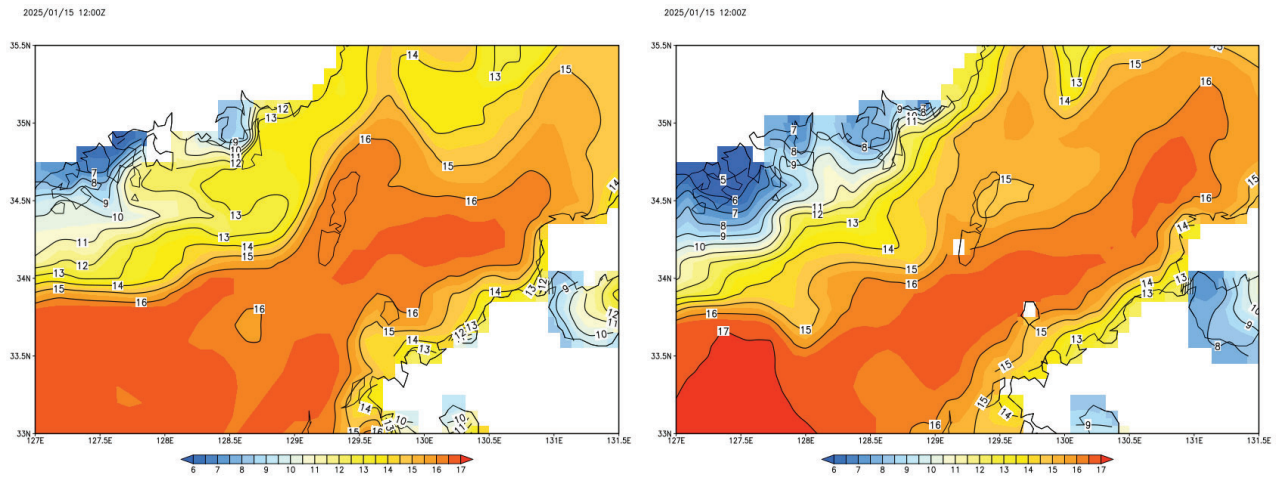


図1：2025年1月15日の日平均表面水温分布。左：MOVE 右：CMEMS

両者の平均を求めると誤差が低減されるはずであることから、上記を平均した結果を、九州大学のモデル DREAMS_M (Hirose et al. 2013) と合わせて図2に示す。両者の解像度の違いによる細部の違いがある。

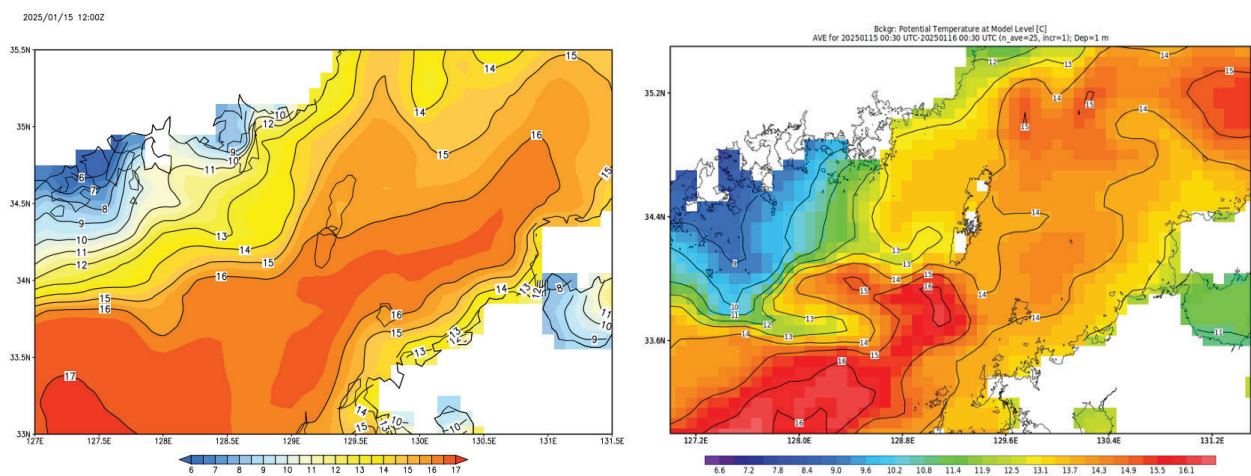


図2：2025年1月15日の日平均表面水温分布。左：MOVE+CMEMS 右：DREAMS_M

次に、同様に平均処理した流速を図3に示す。特に対馬南西部での速度分布など、ある程度の違いが認められる。

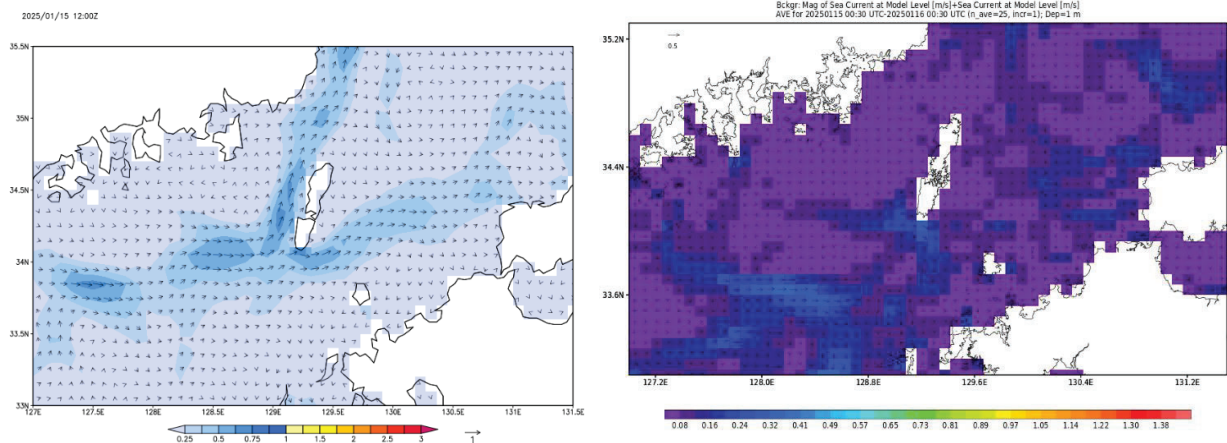


図3：2025年1月15日の日平均表面流速分布。左：MOVE+CMEMS 右：DREAMS_M

次に潮汐データ（松本モデル）を合成したデータを作成した。潮汐の差が最も大きい15時（厳原での干潮時）と23時（満潮時）のデータを図4、図5にそれぞれ示す。こちらについてはよく似た分布を示しており、潮汐の影響はよく反映できていると考えられる。

まとめ：

日本周辺海域は様々な海流が流れる領域であり、しかもその複雑な海岸、海底地形のため、その流れは非常に複雑である。その流れを海洋モデルによって再現する場合に重要な要素として潮汐の取り扱いがある。本研究は特に日本周辺の潮流シミュレーションについて、その潮汐の影響を調べた。二つのモデル結果を比べ、特に日平均流の違いが大きいことがわかった一方で、潮汐自体の合成は問題なく行えているという結果を得た。

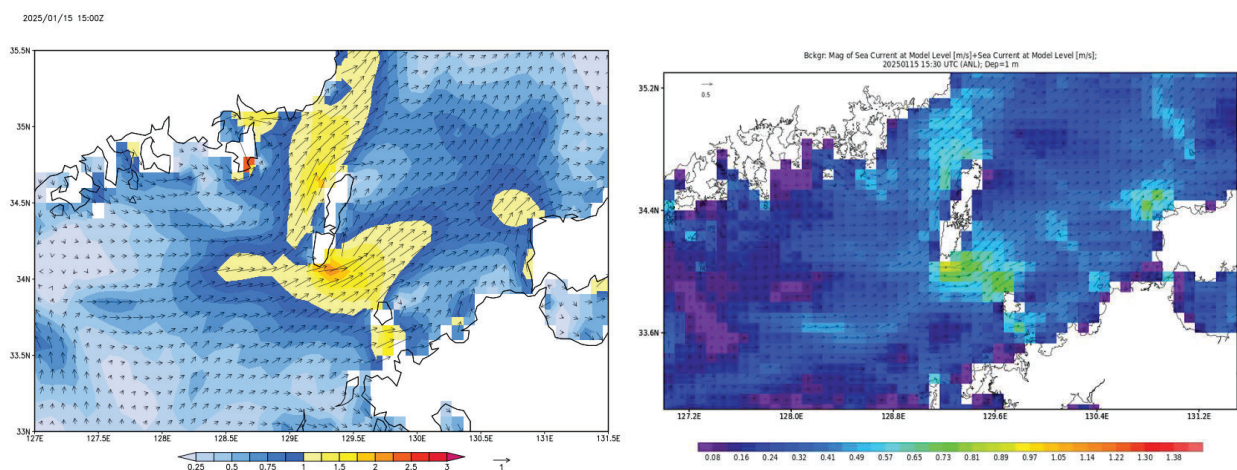


図4：2025年1月15日15時の表面流速分布。左：MOVE+CMEMS 右：DREAMS_M

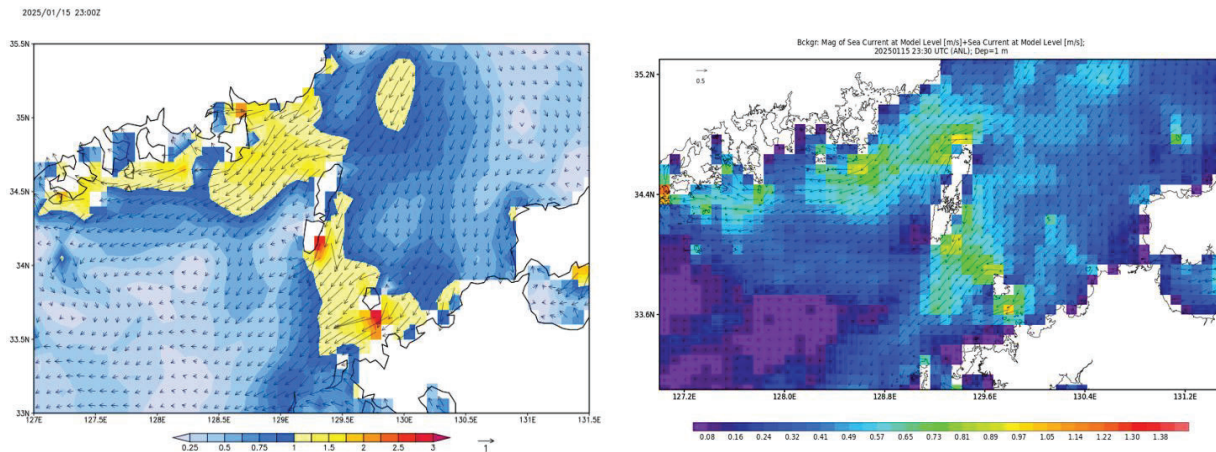


図 5：2025 年 1 月 15 日 23 時の表面流速分布。左：MOVE+CMEMS 右：DREAMS_M

参考文献：

松本 晃治 (2004): 海洋潮汐モデル NAO.99b の構築と普及. 測地学会誌, 50 (3), 187-200,
doi:10.11366/sokuchi1954.50.187.

気象庁 日本沿岸海況監視予測システム (MOVE-JPN)

https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/data/db/kaikyo/knowledge/move_jpn/tech_note.html

CMEMS – Global Ocean Physics Reanalysis

https://data.marine.copernicus.eu/product/GLOBAL_MULTIYEAR_PHY_001_030/description

Naoki HIROSE, Katsumi TAKAYAMA, MOON JAEHONG, Tatsuro WATANABE, Yoshinori NISHIDA

“Regional data assimilation system extended to the East Asian marginal seas”,海と空 89 43-51

2013 年 12 月

研究組織：

松村義正（研究代表者、東大 大気海洋研）	モデル作成・実行・解析
広瀬直毅（所内世話人、九大 応力研）	潮流プログラム提供
蓮沼啓一（株式会社海洋総合研究所）	解析・とりまとめ
辻英一（九大 応力研）	モデル作成・実行・解析
北村尚士（株式会社海洋総合研究所）	モデル作成・実行・解析

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
九州大学応用力学研究所徐 虬
渡邊 英雄

1. 目的

CoCrFeMnNi ハイエントロピー合金 (HEA) は、高強度、優れた延性と靱性、耐熱性及び耐食性を示すことから、新しい金属材料として注目がされている。また、この HEA における原子空孔集合体の形成と照射による偏析が起きにくいことからこの合金の耐照射性も優れている。一方、CoCrFeMnNi と同じ系の CoCrNi と CoCrFeNi ミディアムエントロピー合金 (MEA) においても、CoCrFeMnNi に劣らない力学特性を持つ。しかし、これらの MEA における高温照射による組織の不安定性が報告された。本研究では、CoCrFeNi 合金に析出させた (CoCrFeNi)₉₅Ti₁Nb₁Al₃HEA に対して、高温でのイオン照射による組織の安定性に及ぼす影響を調べた。

2. 実験方法

高純度 (>99.9%) の Co、Cr、Fe、Ni、Ti、Nb 及び Al により真空誘導炉の MgO るつぽで熔融された。その後、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 (10mm×10mm) を切り出し、0.1mm まで圧延した。3mmΦディスク試料を打ち抜き、真空中に 1273K で 1 時間焼鈍を行った。また、一部の試料に析出させるため、1023K で 8 時間時効を行った。図 1 に時効前後の組織を示す。95%の酢酸と 5%の過塩素酸の溶液に 60V の電解研磨により薄膜試料を作製した。これらの薄膜試料に対して 2.4MeV の銅イオンにより 673K 及び 873K で 1.6×10^{19} ions/m² まで照射を行った。損傷ピークは表面から約 800nm で、ピークの損傷量は約 1dpa であった。照射の後に、透過型電子顕微鏡とエネルギー分散型 x 線分析装置 (EDS) を用いて、組織観察及び組成変化の分析を行った。

3. 実験結果と考察

図 2 に 673K で照射した時効前後の (CoCrFeNi)₉₅Ti₁Nb₁Al₃ 微細組織を示す。比較のため、同じ条件での CoCrFeNi MEA の組織も示す。試料の平均厚さは 130nm であった。いずれの試料においては、673K で照射後に、転位ループが形成された。また、各試料においては、照射によって形成された欠陥の密度 ($1.2\text{--}1.3 \times 10^{22}/\text{m}^3$) はほぼ同じであった。CoCrFeNi の欠陥平均サイズ ($20 \pm 5\text{nm}$) はわずかに大きかった。時効しなかった試料と時効した試料の欠陥サイズはそれぞれ $15 \pm 2\text{nm}$ と $10 \pm 2\text{nm}$ であった。この結果から HEA においては、観察可能と不可能な析出物が転位ループの成長を抑制することが分かった。照射温度は 873K に上げると、各合金における欠陥の形成が大きく異なった。以前、報告されたように、MEA に Cr に富む析出物が形成された。時効がなし HEA においては、照射によって形成された転位ループの密度は $1.3 \times 10^{22}/\text{m}^3$ から $5.4 \times 10^{22}/\text{m}^3$ に減少した。転位ループの平均サイズは 15nm から 25nm に増加した。これらは、転位ループ密度とサイズの通常の温度依存性と同じである。しかし、時効した HEA においては、転位ループの形成が全く観察されず、平均サイズ 4nm の析出物だけが観察された。このサイズは時効により形成された析出物 (15nm) よりはるかに小さかった。従って、これらの析出物が照射によるものと考えられる。また、すべての試料においては、照射後に、透過型電子顕微鏡に付けたエネルギー分散型 x 線分析装置 (EDS) を用いて、組成分析を行った。いずれの試料においても、明確な偏析が観察されなかった。

以上の結果により析出させた (CoCrFeNi)₉₅Ti₁Nb₁Al₃ HEA が CoCrFeNi MEA より耐照射性が良くなったことが分かった。また、HEA においては、析出物が観察されなくても照射による転位ループの形成が抑制され、組織は安定する。

4. まとめ

時効により析出物が形成された析出強化型合金 (CoCrFeNi)₉₅Ti₁Nb₁Al₃ は、CoCrFeNi MEA より優れた耐照射性を持つことが期待された。本研究では、時効がなしとありの薄膜試料に 673K と 873K で高エネルギー重イオンにより照射し、その耐照射性を CoCrFeNi MEA と比較した。温度が低い 673K での照射においては、照射によって形成された欠陥の密度の差がほぼなかったが、HEA の方が欠陥の成長が抑制された。これに対して、873K での照射により CoCrFeNi MEA が顕著な偏析が観察された。HEA の優れた耐照射性が明らかになった。

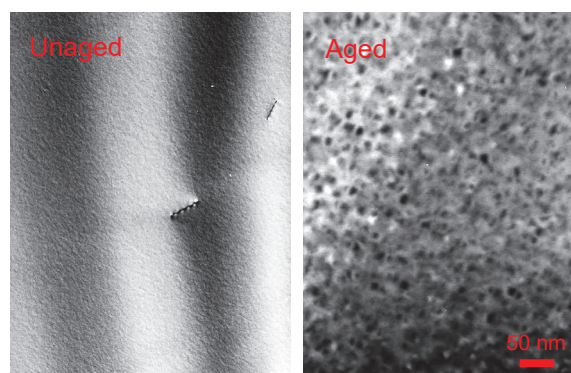


図 1 HEA における時効する前と後の微細組織

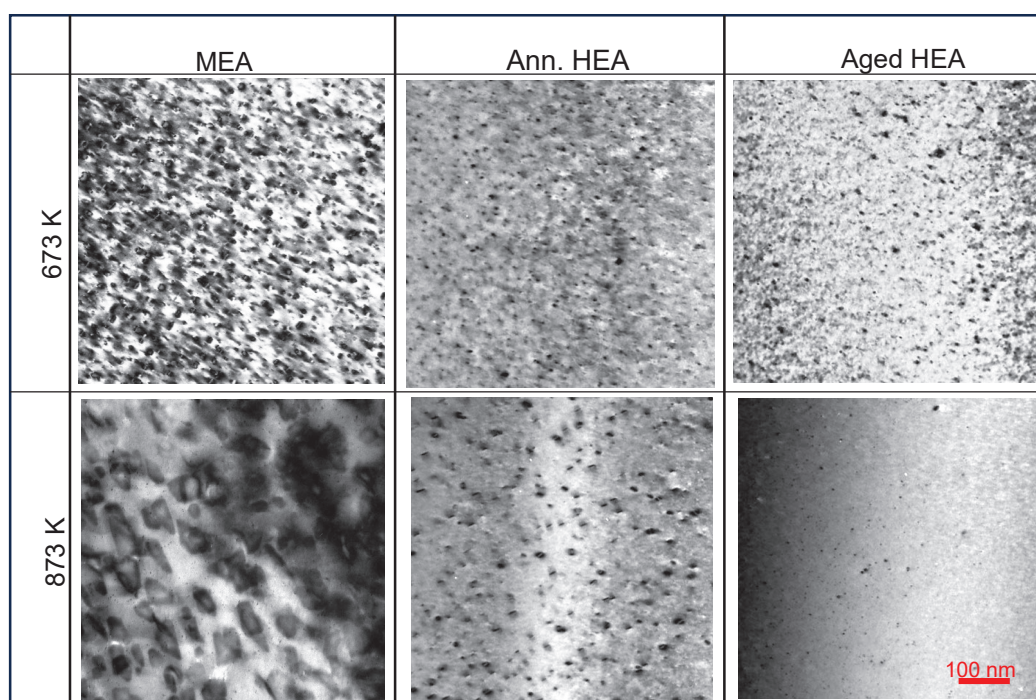


図 2 673K と 873K でイオン照射後の薄膜 MEA と時効がなし、ありの HEA の微細組織。観察領域の平均厚さと損傷はそれぞれ 130nm と 1dpa であった。

簡約化ドリフト MHD モデルによる捕捉粒子モード駆動輸送シミュレーション研究

量子科学技術研究開発機構 矢木雅敏

目的

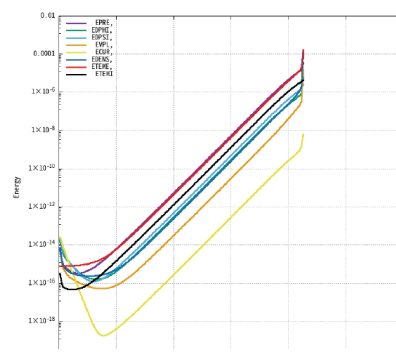
トカマク型核融合炉においては燃料供給のためプラズマ周辺部にペレット入射を予定しており、プラズマ周辺部に密度のハンプが形成され反転密度勾配が実現される。このような状況では粒子ピンチ（内向きの粒子フラックス）が起こることが理論的に示されている。粒子ピンチ効果を外部から制御できれば核燃焼プラズマ制御が可能となるのでこの研究は重要な研究課題と考えられる。本研究においては反転密度勾配駆動ドリフト波が不安定性として存在しうるか、この不安定性がどの程度の大きさの内向きのフラックスを作り出せるのか、シミュレーション解析により検討し、実験検証の可能性を探ることを研究目的とする。

研究成果

これまで粒子ソースをプラズマ周辺部へ印加し[1]、プラズマ乱流が駆動する粒子ピンチ効果を調べてきた。不安定性が駆動する準線形粒子ピンチ効果に着目したが、これは不安定性が存在する領域付近に限定されること、一方、非線形性による3波結合や乱流 spreading が非局所輸送に寄与することなどを明らかにした[2]。シミュレーション研究と並行して乱流モデルを拡張するため6場から8場へ拡張し、粒子輸送に寄与する捕捉電子応答を導入した。電子を2流体とみなし、通過電子(Circulating Electron)と捕捉電子(Trapped Electron)の密度及び温度をそれぞれ $n_{ec}, T_{ec}, n_{et}, T_{et}$ とすると準中性条件は $n_i = n_{ec} + n_{et}$ と書ける。ここで、 $n_{ec0} = f_{ec} n_{e0}, n_{et0} = f_{et} n_{e0}, f_{ec} + f_{et} = 1$ が成り立つ。さらに $T_{ec0} = T_{et0} = T_{e0}$ とする。電子に対する一般化ポテンシャルは、それぞれ $F_{ec} \equiv \phi - \frac{\delta}{f_{ec}} p_{ec}$ 及び $F_{et} \equiv \phi - \frac{\delta}{f_{et}} p_{et}$ で与えられる。これらを用いると連続の式は

$$\frac{dn_{ec}}{dt} = 2\beta f_{ec}[rcos\theta, F_{ec}] - \beta \nabla_{\parallel}(v + \delta f), \quad \frac{dn_{et}}{dt} = 2\beta f_{et}[rcos\theta, F_{et}], \quad \frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + [\phi,]$$

となる。捕捉電子は電流には寄与しないので電流に関する項は現れない。図に8場モデルにおける全揺動エネルギーの時間発展を示す。線形モードが発展し、非線形フェイズに入るところでオーバーフローにより計算が止まっている。今後、メッシュサイズや時間ステップなど、線形成長率の収束性を調べる必要があるがコードとしては動作することが確認できた。



図：全揺動エネルギーの時間発展

[1]矢木雅敏, 令和5年度共同利用研究成果報告第27号, 2023CR-FP-25.

[2]宮本琉耶, 糟谷直宏, 矢木雅敏, “トカマクプラズマの乱流粒子流束維持における非線形機構評価”, 第41回プラズマ・核融合学会年会、タワーホール船堀、東京, 2024/11/17-20.

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)

誘電体バリア放電式大気圧プラズマを応用した芸術作品の開発

九州大学 芸術工学研究院 栗山 斉

・目的

研究代表者は、九州大学の令和3年度大学改革活性化制度「メディアアートによるテクノロジーの芸術表現への昇華を通じた新しい価値の可視化」のプロジェクトメンバーである。本プロジェクトでは、芸術の拡張性と操作性に注目し、異なる分野や領域を結びつけ、大学全体を活性化させることを目指している。アートとテクノロジーを融合する研究を進め、素材や技術などのテクノロジー・シーズを芸術表現に昇華させ、新しい価値を可視化するためのプロジェクトチームを編成し、実践的な研究を推進してきた。本研究では、上記プロジェクトの一環として、応用力学研究所の核融合力学分野の研究者と協力し、プラズマに関する専門的な知識や技術を取り入れ、芸術表現に応用する実験的な造形手法を確立することを目指している。特に誘電体バリア放電式大気圧プラズマという現象に着目し、これを光の造形要素として活用することで、見えない大気を可視化し、不思議な自然現象を芸術表現として社会に提示することが計画されている。さらに、本研究によって本学の研究成果を広く社会に普及させることも目的としている。

・実験方法

「透明な断面観察装置」の開発

誘電体バリア放電式大気圧プラズマの断面を観察できる装置の開発を行った。これは、透明な素材を電極に用いることによって、側方からだけでなく、上方からも明滅を繰り返す誘電体バリア放電の断面を観察するための装置である。まず、塩水を半透明な電極として用いる実験から開始し、データを収集し分析を行った。次に、FTO 透明導電性ガラスを電極に用いる実験を行うことによって、ガラスの表面抵抗値の違いによるプラズマの見え方の差異を検証した。同時に、エーベルトフトガラス美術館（デンマーク）の協力を得ながら放電現象を用いた芸術作品の開発も行い、国内外で展示発表を行なった。

・実験結果

塩水を電極とする実験では十分な大気圧プラズマが発生し、良好な結果が得られた。しかし、長期間展示する作品の素材として水溶液は不向きである。そのため、FTO 透明導電性ガラスの使用を検討した。FTO 透明導電性ガラスはガラスの片面だけに導電性のコーティングが施されているため、誘電体（絶縁体）と電極が一体になった特性を有する。この特性を活かすことによって、複数のレイヤーからなる誘電体バリア放電を実現できることが分かった。

・考察

FTO 透明導電性ガラスは誘電体バリア放電に適した素材であり、造形の可能性や自由度が高くなる素材である。大容量の電源を用いれば、複数の FTO 透明導電性ガラスを積層し、立体的な誘電体バリア放電を現出することが可能となる。誘電体バリア放電の基礎的な実験結果を基にして、今後、芸術作品として展示発表するための設えや構造などを継続して検討する必要がある。

・研究成果報告

1. 栗山 斉（作品展示発表 [恒久的設置]）, 0=1 -tunnelling effect, Cartway Project, 230 SUSSEX ST, シドニー [オーストラリア], 2024 年 7 月 7 日
2. 栗山 斉（作品展示発表）, noise of the void [ver.2], WHEN YOU LOSE CONTROL, glas（エーベルトフトガラス美術館）, エーベルトフト[デンマーク], 2024 年 10 月 10 日～2025 年 3 月 9 日
3. 栗山 斉（作品展示発表）, 0=1 -trace of light, Intersecting Time, 東京藝術大学大学美術館, 東京, 2024 年 11 月 2 日～2024 年 11 月 17 日
4. 栗山 斉（雑誌掲載）, NEUES GLAS - NEW GLASS: art & architecture No.4/2024, NEUES GLAS - NEW GLASS: art & architecture No.4/2024, 2024 年 11 月 1 日
5. 栗山 斉（事業報告書掲載）, 株式会社現代企画室（2024 年 11 月）, pp46-47, ISBN: 978-4-7738-2410-0 C0070, 株式会社現代企画室（2024 年 11 月）, pp46-47, ISBN: 978-4-7738-2410-0 C0070, 2024 年 11 月 1 日

・研究組織

栗山 斉（九州大学芸術工学研究院、准教授、プロジェクトリーダー、
専門：現代美術・造形）

小菅 佑輔（応用力学研究所、准教授、プロジェクトとりまとめ、
専門：プラズマ物理）

恩地 拓己（応用力学研究所、助教、実験機器開発・実験担当、
専門：プラズマ工学）

松隈 浩之（九州大学芸術工学研究院、准教授、部局連携アドバイザー、
専門：コンテンツデザイン）

水田 雅也（九州大学芸術工学研究院、テクニカルスタッフ、実験機器制作補佐、
専門：現代美術）※2024 年 7 月より宮下 恵太と人員交代

藤墳 祥子（九州大学芸術工学研究院、テクニカルスタッフ、事務管理担当、
専門：アートマネジメント）※2024 年 7 月より井上 野花と人員交代

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

核融合炉における Cu 合金の役割は、その大きな熱伝導性や電気伝導性を有する特徴から非常に大きく、最近ではその高性能化や量産化研究がクローズアップされている。具体的には、W/Cu 合金のダイバータ構造体に資する高い中性子照射耐性や機械的な高強度を満たすことを指向したヒートシンクが挙げられるが、その他にも超伝導コイルに用いられる Nb₃Sn 等の各種超伝導素線の熱的・電氣的安定化材として視野に入れている。

超伝導コイルを構成する Nb₃Sn 素線には液体ヘリウムによる冷却性能や通電時のクエンチに対して細心の注意が払われ、残留抵抗比（Residual resistivity ratio: RRR）が 100 以上の純銅が素線に安定化材として付されている。この安定化材が、大きな熱伝導性や電気伝導性を維持しながら高い中性子照射耐性や機械的な高強度を満たせば、核融合環境下での高い通電安定性や線材強度の向上に寄与することができる。しかし、一般的な Cu 合金における機械強度と導電性の間にはトレードオフの関係があることが知られており、高い電気伝導性を維持しながら高強度化を図るには「粒子分散強化」や「析出強化」等が広く検討されている。

これまで我々は、幅広い分散粒子選択を意図とした機械的合金化（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、本研究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（Cu-0.15wt%Al₂O₃: Gridcop AL-15）との特性を比較する。

2. 実験方法

Gridcop（Cu-0.15wt%Al₂O₃）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⁺イオン照射実験を実施するために、照射実験条件を TRIM 計算コード（SRIM-2013）にて算出した。その後、照射実験に供する Gridcop 試料を核融合研で試作した W/Gridcop 接合構造体から切り出し、鏡面研磨を実施した。室温条件下で鏡面研磨された面に対して未照射、3 dpa 及び 10 dpa 相当の Cu²⁺イオン照射実験を実施した。

イオン照射後の Gridcop 試料は、Bruker TI-950 微小押し込み硬さ試験で硬度変化を検討した。また、一部の試料については、TEM による微細組織観察を実施し

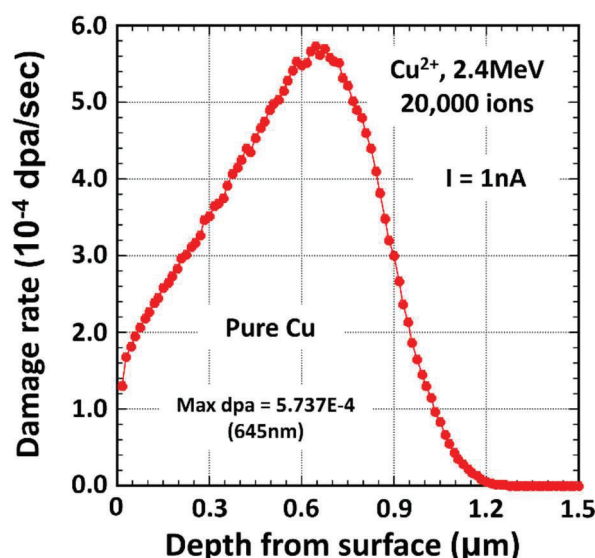


図1 TRIM 計算コードで見積もられた Cu 試料における Cu²⁺イオン照射損傷速度と試料深さの相関性

た。

3. 結果と考察

図 1 に TRIM 計算コードによって見積もられた Cu 試料表面から深さ方向に対する損傷速度を示す。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。Cu 試料における最大損傷速度は試料表面から 645 nm の深さで 5.74×10^{-4} dpa/sec と見積もられた。実際の Cu²⁺イオン照射実験では、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 3 及び 10 dpa の照射量を得ることとする。図 2 に、10 dpa 相当の室温下での Cu²⁺イオン照射した試料の典型的な STEM 像を示す。明瞭な照射による欠陥（転位ループ）とボイドが観察され、微細組織の変化が明らかとなった。現在、イオン照射量別の照射欠陥の数密度等の定量化を進めている。図 3 に未照射、3 dpa 及び 10 dpa 相当の室温下での Cu²⁺イオン照射実験後の Gridcop 試料における試料表面からの深さ方向への硬度変化を示す。試料表面から深さ方向の硬度は、Oliver-Pharr の関係に基づく荷重（ P ）-押し込み深さ（ h ）-曲線から硬度（ H ）と複合弾性率（ E_r ）が求められ、硬度は（1）式で求めた[1]。

$$H = P_{max} / A(h_c) \quad \text{--- (1)}$$

ここで、 P_{max} は最大押し込み荷重、 $A(h_c)$ は圧子と試料との接触面積を示す。3 dpa 照射後の試料における硬度はバ

ラつきが大きいものの、10 dpa 照射と同等の硬度を確認し、Cu²⁺イオン照射後の硬度は、未照射と比較して明瞭に増加し、イオン照射による硬化は 3 dpa で飽和する傾向を確認した。照射による硬度の増加は、図 2 に示したように、Cu²⁺イオン照射によって導入された転位が欠陥等で固定される“ピン止め”効果によるものと考えられる。現在、複合弾性率（ E_r ）の変化を解析ながら、バラつきの多い 3 dpa 照射試料の準備を進めている。

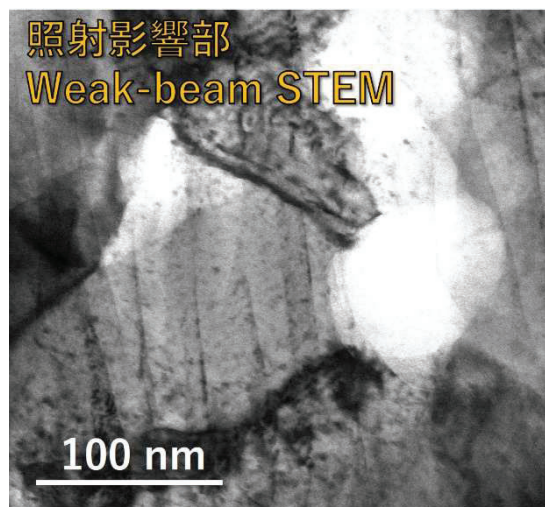


図 2 10 dpa 相当の室温下での Cu²⁺イオン照射後の Gridcop 試料の典型的な STEM 像

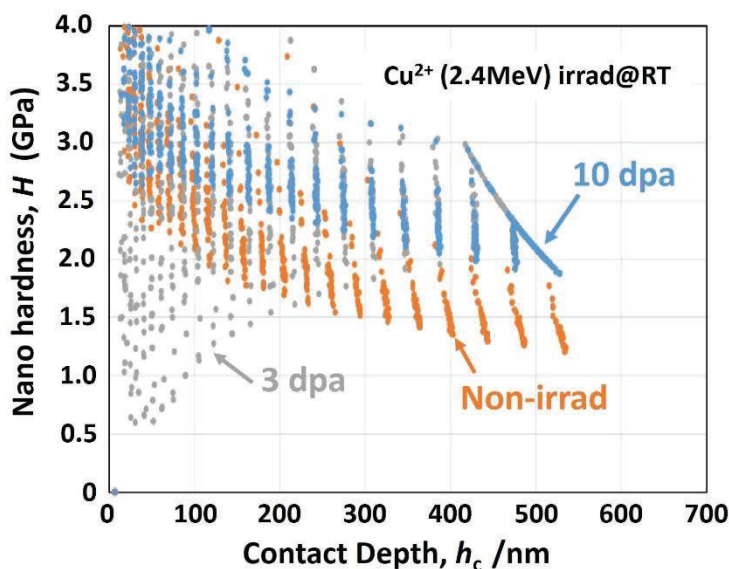


図 3 室温下での Cu²⁺イオン照射実験後の Gridcop 試料における試料表面からの深さ方向への硬度変化

[1] W. C. Oliver and G. M. Pharr, "An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments", *Journal of Materials Research*, vol. 7, (1992), pp.1564-pp.1583.

ベイズ推定を用いた位相空間トモグラフィの開発

核融合科学研究所 小林達哉

1. 研究目的

高温低衝突プラズマでは、波動-粒子相互作用により実空間と速度空間の間に張られる空間に構造が形成され、輸送や流れ場形成に影響を与える。位相空間構造の実測に向けて、速度空間計測器の高性能化[1, 2]及び解析方法の開発[3, 4]が進められている。従来の荷電交換分光計測では、スペクトルをガウシアンフィットし、さまざまな仮定・近似のもとでプラズマパラメータを推定していた。ところが、速度分布関数をガウシアンと仮定しない場合、これらの仮定や近似を用いることはできない。本研究では、荷電交換分光計測の模擬計測モデルを作成しベイズ推定フレームワーク (2DMAT/ODAT-SE) を用いた計測データモデルの逆問題解析を行った[5]。

2. 研究結果

図1に荷電交換分光計測の順問題ルーチン(プラズマパラメータを与え模擬計測データを返す)の概念図を示す。まず、速度分布関数またはイオン密度、温度、速度分布を入力パラメータとする。平衡より速度分布関数の実空間分布を得る。発光断面積とビーム分布を与え、局所発光分布を得る。視線情報と分光器での装置関数効果を考慮し、最終的に計測発光分布を得る。これらのプロセスには積分や畳み込みが含まれており、一般的にこの逆問題を解くのは困難である。

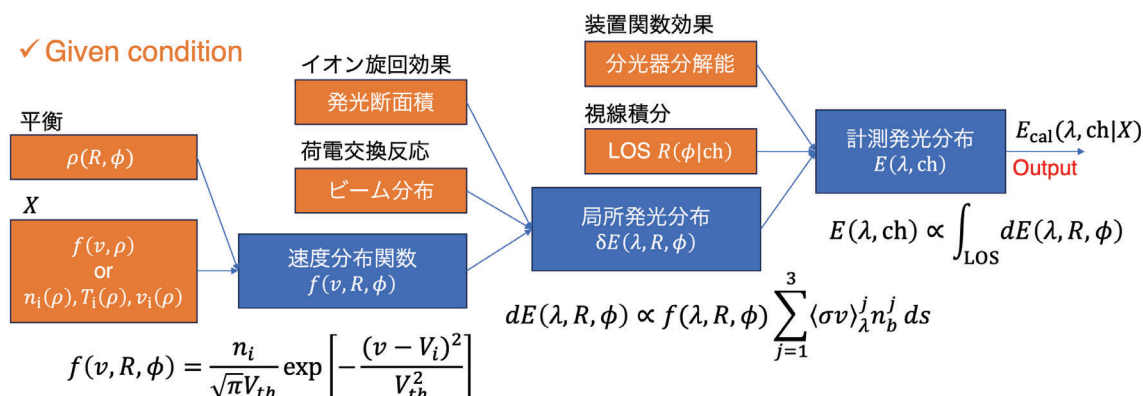


図 1. 荷電交換分光計測の順問題ルーチン

荷電交換分光計測原理の逆問題を解き、計測データからプラズマパラメータを推定することを考える。ここでは、ベイズ的手法の一種であるモンテカルロサンプリングを用いて、トライ&エラー的に逆問題解析を行った。図2に推定結果を示す。ここではデモンストレーションのため、イオン温度のみを推定パラメータとする。イオン温度を $T_i(\rho) = T_{i0}[1 - (\rho/\rho_0)^\alpha]$ として与える。ここで、LHD実験(#192384)で得られる温度分布に対応するように、 $X = [T_{i0}, \alpha] = [1.485, 2.517]$ を与え、“正解”の計測スペクトルを順問題ルーチンによって得る。次にレプリカ交換モンテカルロサンプリング法を用いてさまざまなXの値に対して順問題を解き、模擬計測スペクトルを得る。この模擬スペクトルと、実際の観測結果に対応する“正解”のスペクトルの差分の2乗平均平方根を最小化するようにXを探索する。図2では、探索範囲を決めるパラメータ τ を異なる2つの値として探索を行なった結果である。このように、広域探索と局所探索を組み合わせられることがレプリカ交換モンテカルロサンプリング法の利点である。得られた最適パラメータXには、近似による系統的誤差が入らない。また、点の分布から妥当なエラーバーも評価できる。今後は、温度分布形状や速度分布関数に関数系を仮定せずに推定する手法を開発する。また、ベイズ推定により位相空間トモグラフィ[4]などの計測器連携運転による分解能の高度化を目指す。

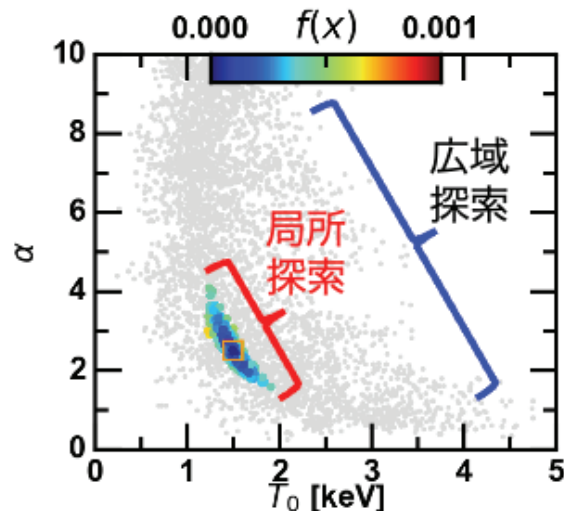


図2. LHDのイオン温度分布のパラメータ推定結果。

3. まとめ

ベイズ推定を用いた荷電交換分光計測の解析手法を開発した。まずプラズマ

パラメータから計測スペクトルを計算する、順問題ルーチンを作成した。その後、レプリカ交換モンテカルロサンプリング法を用いて逆問題を解き、計測スペクトルに対応するプラズマパラメータの推定を行なった。得られた最適パラメータには、近似による系統的誤差が入らないことが確認された。また、点の分布から妥当なエラーバーも評価できることを確認した。

研究組織

文 賛鎬（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] M. Yoshinuma, et al., Plasma Fusion. Res. 19, 1402037 (2024)
- [2] K. Ida, et al., Commun. Phys. 5, 228 (2022)
- [3] T. Kobayashi et al., Phys. Plasmas 30, 052303 (2023)
- [4] T. Kobayashi et al., PNAS 121, e2408112121 (2024)
- [5] Y. Motoyama et al., CPC 280, 108465 (2022)

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、その励起条件を評価する。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、イオン衝突周波数がイオンのバウンス周波数よりも大きい。このとき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。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。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。輸送のモデル化をし、帯状流の輸送に対する影響を調べる。

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 ν_e^* と ν_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、 $\rho = 0.47$ と $\rho = 0.65$ 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。 $\rho = 0.47$ と $\rho = 0.65$ でポロイダル波数が増加すると、実周波数が電子反磁性ドリフト運動方向からイオン反磁性ドリフト運動方向へ変化することがわかった。d-TEMモードが、すべての波数領域で、 $\rho = 0.81$ 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。

これまで、計算コストの削減のため、ベータ値をおおよそ0の値で解析を行っていた。計算コストを削減する必要がなくなったため、TASKで予測されるベータ値を用いて、解析を行なった。その解析結果を用い、熱粒子拡散係数のモデル化を行なっている。 j 種の熱輸送係数は、関数 $\chi_j/\chi_e^{GB} = C_{1j}\bar{T}^{a_j}/(C_{2j} + \bar{z}^{b_j}/\bar{T})$ でモデル化している。ここで、 $\bar{T}$ は乱流ポテンシャル揺動であり、 $\bar{z}$ は帯状流ポテンシャル揺動である。帯状流の影響は、波数が低いほど効果的であると考えられる。PLATOのd-TEM/ITGモードでは、すべての流束のスペクトルに関する解析結果で、 $k_y\rho_e = 0.005$ にピークを持つ。したがって、 b_e と b_i の値は同じような値である。一方LHDでのITGモードでは、 $b_i > b_e$ である。このとき、 Q_e のスペクトルは、 Q_i よりも大きなポロイダル波数の値でピークをとるからである。

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、カオスや乱流といった乱れた挙動が観測され、これらの非線形構造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、順列エントロピーを用いた解析（CH解析）を先行研究で開発したグロー放電装置の時系列データに適用した。

結果とまとめ

放電電流を制御することで揺動のパターンを変化させることのできる直流グロー放電プラズマを対象に実験・解析を行った（実験装置は昨年度までの共同研究で製作）。放電管中に励起される電離波動由来の自発光揺動を計測し、時系列データのパターンから揺動の性質を定量化できる順列エントロピーを用いたCH解析を適用した。図1は放電電流を変化させたときのCH統計量の変化を表しており、放電電流が変わるとともに変化する揺動の特徴がCH統計量の変化として評価可能であることを意味している。

また、本年度はフィードバック制御系が組み込まれたグロー放電プラズマ装置（長崎大学）の時系列データに対してもCH解析を行い、フィードバックの良悪を定量的に表す量としてCH統計量が妥当であることを示す結果を得ることが出来た。この結果を踏まえ、今後はCH統計量を基本としたプラズマの精密なフィードバック制御へ展開していく予定である。

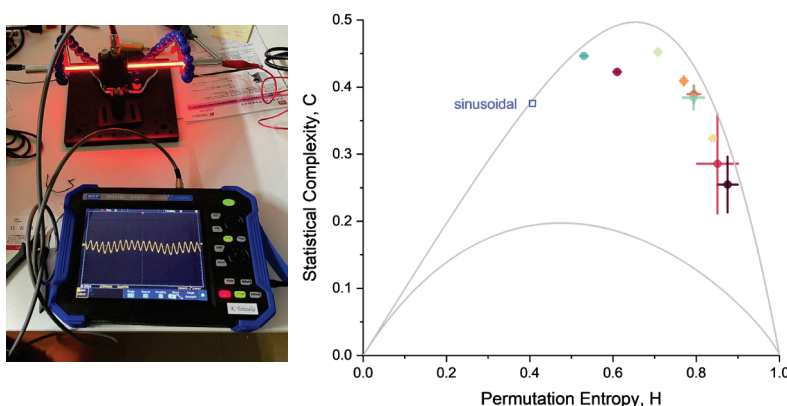


図1. 本共同研究で製作したデスクトップサイズのプラズマカオス制御実験用直流プラズマ発生装置（左）。放電管中に励起される電離波動のCH解析結果（右）。

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

昨年度改良を加え、試料加熱可能とした水素グロー放電水素注入装置を用い、金属タングステン (W) 試料に重水素放電注入実験を実施した。重水素放電注入した W 試料を昇温脱離ガス分析 (Thermal Desorption Spectrometry, TDS) し、重水素が注入されていることを確認した。

2. 実験

W 円板試料 (直径 5mm、0.7 mm³) を 1000°C、30min の真空焼鈍後、放電注入装置にセットし、試料を外部ヒータで加熱しながら重水素を放電注入した。W 試料の温度は、室温、100°C、200°C とし、放電条件は、放電電圧を 1.8 kV、重水素圧力を 0.5 Torr、放電時間 100min とした。放電実験後、W 試料を TDS 装置にセットし、試料を昇温速度 0.27 °C/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 に昨年取得した Ta と今回実施した W からの D₂ 昇温脱離スペクトル (m/e=4 のイオン電流値) を示す。Ta のイオン電流値は対数、W は線形表示とした。Ta では各注入温度で D₂ 放出が確認され、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った。一方、W では、室温注入で明確な D₂ 昇温脱離ピークが見られたが、Ta に比べ放出温度は約 300°C と低く、放出量は小さかった。また、100°C 注入で室温注入の約 1/10 に減少し、200°C 注入では D₂ 放出は見られなかった。以上のように、同一注入条件でも、Ta と W で重水素の注入量、放出挙動に大きな違いが見られた。

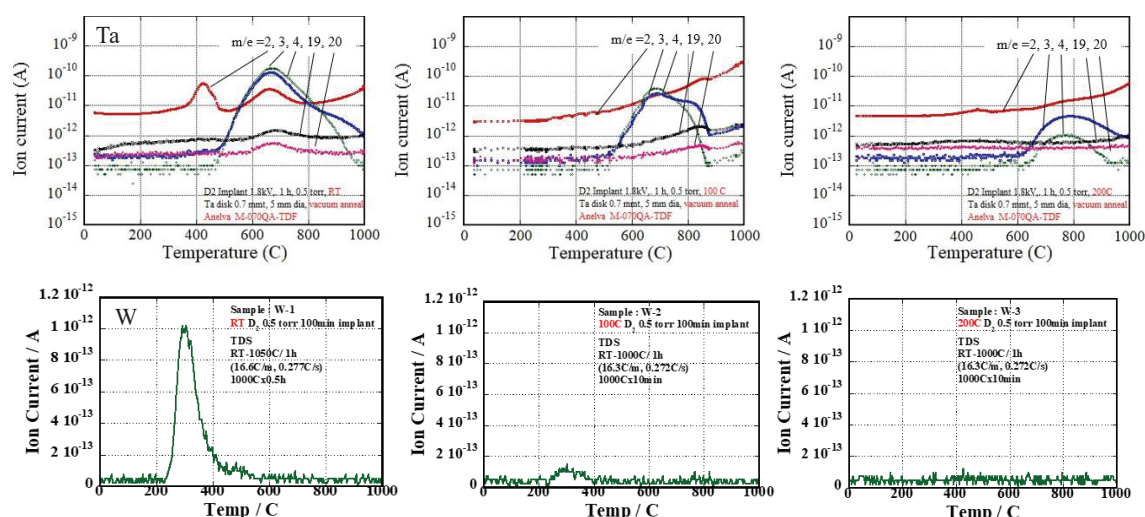


図 1 TDS 結果 (上：Ta、下：W 左：室温注入、中：100°C 注入、右：200°C 注入)

4. まとめ

W 試料を 200°C まで加熱しながらグロー放電水素注入装置を用いて D 注入を行い、TDS 法にて W 試料からの D₂ 放出実験を行った。昨年度実施した Ta 試料の結果と比較すると、D₂ 放出温度は低く、放出量も非常に小さく、W 試料と Ta 試料間の顕著な違いが見られた。

5. 研究組織

九大総理工：橋爪健一 大学院生：寺井響 九大応力研：渡邊英雄

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、T6 熱処理の冷却速度の異なる 3 種類の 7000 系アルミニウム合金材料を使用した。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 °C/min で冷却したものを 7H146A、空冷 30 °C/min で冷却したものを 7H146A2、空冷 20 °C/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⁽¹⁻³⁾。

表 1 7000 系アルミニウム合金材料の特性

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

2.2 STEM による 7000 系アルミニウム合金の微細組織観察

耐水素脆化特性の評価のためには、結晶粒界に存在する析出物の評価が重要となる。そこで、冷却速度が最も速い 7H146A と最も遅い 7H146A3 に対して、走査透過電子顕微鏡 (STEM) を利用して結晶粒界に存在する析出物の元素や形状、サイズを解析し、耐水素脆化特性との関係性を明らかにする。STEM の観察は、高い分解能を有し、EDS 分析も可能である。

3. 実験結果

STEM による 7000 系アルミニウム合金の観察結果

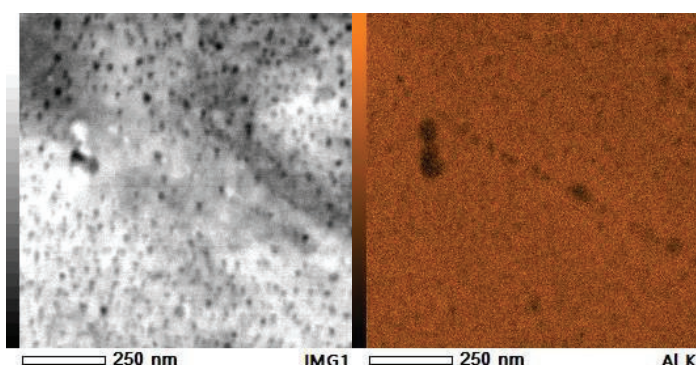
表 2 に結晶粒界の析出粒子の長径と短径、粒子間距離、面積、観察面全体における析出粒子の割合を示す。長径と短径の比が 7H146A は 1.63 倍、7H146A3 は 2.12 倍とともに楕円状に近い形状をしていることが確認できる。粒子間距離は 7H146A3 が 7H146A の 3.09 倍となっており、7H146A3 は 7H146A と比較して粗い分布であることが確認できる。また、粒子面積に関して、7H146A3 が 7H146A の 2.46 倍となっており、7H146A3 は析出粒子がより大きく析出している。また、析出粒子の面積比率は 7H146A3 が 7H146A の 1.09 倍であり、大きな差はみられなかった。このことから、冷却速度の増減によって試料全体における粒界析出物の総量は大きく変化しないが、冷却速度が遅くなるとより大きく粗に析出し、耐水素脆化特性を向上させることが明らかとなつた。

表 3 に示す元素分析に関して、Mg 元素が主成分であった 7H146A と比較して、冷却速度の遅い 7H146A3 の析出粒子の主成分は、Zn 元素であることが明らかとなった。また、Cu 元素も 7H146A より多く析出

しており、Cu 元素は、粒界と粒内の電位差を緩和し、応力腐食割れを抑制する効果があり、耐水素脆化特性を向上させたことが明らかとなった。

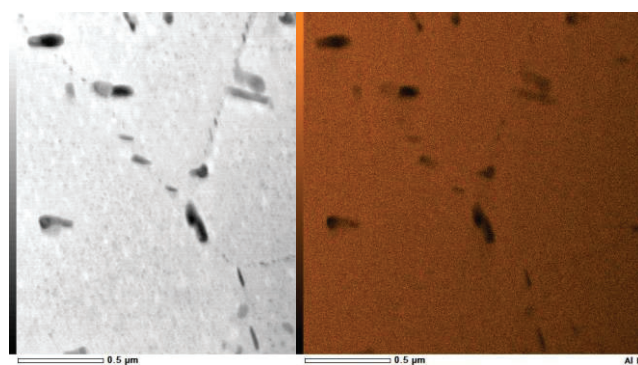
表 2 析出粒子のパラメータ

	長径[nm]	短径[nm]	粒子間距[nm]	粒子面積[nm ²]	面積比率[%]
7H146A	42.64	26.24	37.20	1672.70	2.63
7H146A3	92.11	43.49	115.09	4110.84	2.88
倍率	2.16	1.66	3.09	2.46	1.09



(a) 明視野像

(b) Al



(a) 明視野像

(b) Al

図 1 7H146A の STEM 画像

図 2 7H146A3 の STEM 画像

表 3 EDS による含有元素の含有率

元素[mass%]	Mg	Al	Si	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn
7H146A	1.79	88.38	0.24	0.15	0.39	1.78	0.49	6.78
7H146A3	2.02	87.25	0.14	0.21	0.29	1.11	0.60	8.38

4. まとめ

本研究では、構造材料の耐水素脆化特性に及ぼす熱処理の影響を究明するために、STEM を用いた微細組織の詳細な観察を行い、粒界析出粒子の解析・評価を行った。その結果、7000 系アルミニウム合金の T6 熱処理の冷却速度を遅くすることにより、

1. 結晶粒径の微細化
2. 粒界析出物の低密及び粗大化
3. 粒界析出物における Cu 元素の析出

が明らかとなった。以上の 3 つの観点によって、耐水素脆化特性が向上したことを明らかにした。

参考文献

- (1) 大野源也、車田亮、渡邊英雄、“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解明に関する研究”、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), OS4-(1), No. 403.
- (2) 大野源也、車田亮、田代一真、渡邊英雄、“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解明に関する研究”、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), OS4-(1), No. 402.
- (3) 田代一真、車田亮、渡邊英雄、“7000 系アルミニウム合金の疲労特性と冷却速度の関係”、日本機械学会関東支部第 32 回茨城講演会講演論文集, No. 240-2, (2024. 8. 30), OS2-(1), No. 15.

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

茨城大学学術研究院応用理工学野 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・動的な温度変化を受ける。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、損傷を抑えるためにはどのような W の特性を向上させる必要があるかなど 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】ITER の W ダイバータの表面は定常負荷時に再結晶温度を超え、表面近傍は再結晶が発生することが予想されている。本年度は ITER 仕様の純 W および再結晶 W について ELM 様熱負荷による損傷と引張特性の相関に関して考察した。同じ ELM 様熱負荷 (3MeVH、150 μ s、54 μ A、5Hz、FWHM: 約 7mm、21.5h) を ITER 仕様の純 W および再結晶 W に与え、この際発生する損傷を比較した。また、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°C 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、厚み 0.5 mm である。得られたデータから、引張強度、降伏強度、全伸びおよび均一伸びの温度依存性を求めた。

【結果】図 1 および図 2 には、ELM 様熱負荷後の純 W および再結晶 W の表面の SEM 像を示す。純 W では、結晶粒界の配向性により ND および TD 方向にき裂が形成され、そのき裂に囲まれた部分にはさらにき裂と凹凸が見られる。一方、再結晶 W では、結晶粒界に沿う円状のき裂や繰返し熱負荷による塑性変形や疲労によるすべり線や突き出しが見られる。図 3 および図 4 には、引張試験による降伏応力および全伸びの温度依存性を示す。ここで、SR は純 W、RC は再結晶 W である。降伏応力は 400°C 程度までは温度と共に加工し、延性領域 (II) では、ほぼ一定の値で、純 W は再結晶 W と比較し 4 倍程度大きい。また、全伸びは延性領域では、再結晶 W では約 50% 対して、純 W では約 10% 程度であることがわかる。強度特性としては、降伏応力が高く、また、全伸びが高いほど損傷は抑えられると考えられるが、純 W と再結晶 W では、相異なる特性を持っていることがわかる。粒界の配向性によるき裂形成や再結晶による粒界脆性など静的な引張試験には表れない特性については、ELM 様熱負荷の結果に相関が見られない。しかし、塑性変形による表面の粗面化などに関しては相関が見られ、引張試験から得られた応力・歪曲線の温度依存性を有限要素法を用いた弾塑性解析に利用することは有用であることが示された。

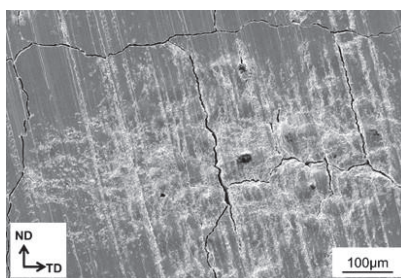


図 1 ELM 様熱負荷後の表面 (純 W)

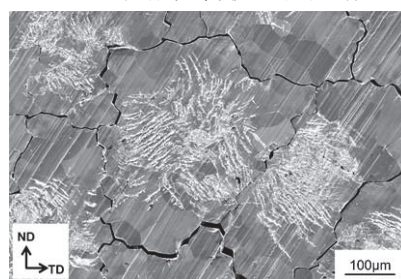


図 2 ELM 様熱負荷後の表面 (再結晶 W)

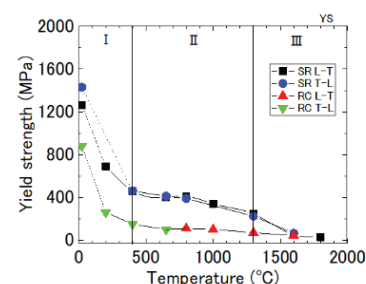


図 3 降伏応力の温度依存性

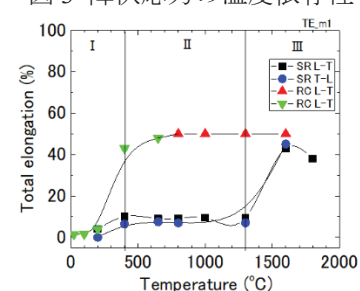


図 4 全伸びの温度依存性

PLATO トカマクへのモデル内包型平衡再構成手法の適応

京都工芸繊維大学 三瓶明希夫

研究背景、目的

限られた計測データを再現する平衡を見つけ出すのは、核融合プラズマ研究の主テーマの一つである。磁場閉じ込め核融合プラズマの平衡状態は、Grad-Shafranov 方程式と呼ばれる空間変数に関する 2 階の偏微分方程式を解くことにより求められる。ところが実際の磁気核融合プラズマに対し Grad-Shafranov 方程式を解く際、未知なパラメータも多く含まれ、また境界条件も複雑で、平衡状態を必要となる精度で求めることが非常に困難になっている。この場合、配置されたセンサーからの測定データを Grad-Shafranov 方程式を解く際に用い、プラズマの平衡状態を再構成する必要がある。

本研究では、PLATO 装置に生成されるトカマクプラズマを対象として、申請者が開発しているモデル内包型の平衡再構成手法[A. Sanpei, IEEE Access (2023)]を適用し、限定的な計測結果から内部構造を同定することを目的とする。本手法によって平衡についての研究を進めることで、最適磁場配位の探索、プラズマ位置・形状制御に対する最適な制御等が可能になると期待され、加えて、閉じ込め特性・揺動・不安定性の研究に寄与することが期待できる。

研究成果

今年度はトカマクの平衡再構成に必要な磁気計測システムが PLATO 装置においてまだ開発段階であり、実際の実験データを取得することができなかった。よって当初の研究計画を変更し、トカマクの平衡再構成に用いる計測システムの最適化に応用可能な新たな平衡再構成手法の開発に取り組んだ。

磁気プローブ等のセンサーを多く配置するにはコストがかかる一方、計測データが不足すると Grad-Shafranov 方程式(力学的平衡条件)を満たし、かつ計測データを誤差の範囲で矛盾なく再現する解が複数存在する状態が生じてしまう。このような場合はモデル内包型の平衡再構成手法を用いてもプラズマ内部構造を正確に評価することは難しい。本研究ではベイズ統計を用いて任意のトカマクと計測システムが与えられた状態において解空間の分布を直接計算することで、力学的平衡状態が 1 つに定まる条件で計測が行われているか否かを判断する手法の開発に取り組んだ。トモグラフィ計測においてはガウス過程回帰(GPR)を用いることでこのような解析が可能であることが知られている。平衡再構成においてもトロイダル電流要素の線形結合により順モデルを構築できる磁気計測データに関しては GPR の適用が可能である。よって、まず GPR を用いてこれら計測を再現する解空間を求めた。その後以下の式のような条件付き確率を導入した。

$$p(\mathcal{I}_{\text{GS}} | \mathbf{j}_p, d\mathbf{P}/d\psi, d\mathbf{F}^2/d\psi) \propto \exp \left(- \sum_{n \in \mathbf{x}_p} \frac{\left(j_{p,n} - 2\pi R_n \frac{dP_n}{d\psi} - \frac{\pi}{\mu_0 R_n} \frac{dF_n^2}{d\psi} \right)^2}{2\sigma_{j_{\text{GS}},n}^2} \right) \cdot \cdot \cdot (1)$$

この式は力学的平衡条件がポロイダル断面全てにおいて成り立つとき確率が大きくなる。GPRより得られた解を記述する確率分布関数に式(1)を掛け、マルコフ連鎖モンテカルロ法により数値的に Grad-Shafranov 方程式と磁気計測の両方を満たす解空間を求める解析コードを開発した。

開発したコードを用いて PLATO トカマクの平衡再構成における解空間の分布を計算した。この計算においては図 1 (a)の磁気計測システムを仮想的に配置した。赤道面におけるプラズマ電流の解空間を図 1 (b)に示す。この結果から図 1 (a)の磁気センサーの配置ではプラズマ中心部の電流分布が一意に決まらないことが分かる。一方、磁気面に関しては解空間の広がり小さく 1cm 程度の精度で磁気面の位置が決定できることが分かった。磁気センサーの配置を変えながらこのような解析を繰り返すことで平衡再構成用の計測システムの最適化が可能となる。

本研究内容は既に論文にまとめ、2024 年 11 月に国際誌 “Plasma Physics and Controlled Fusion” に掲載された。

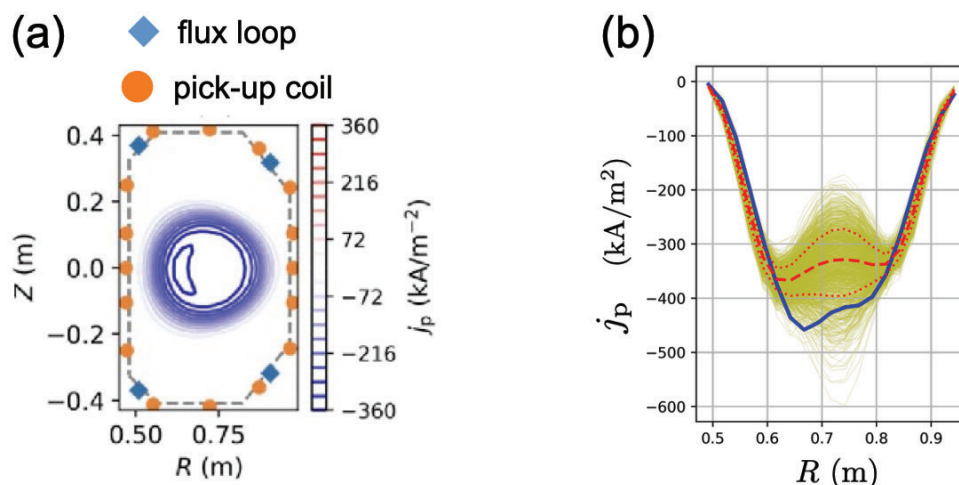


図 1 仮想的に配置したフラックスループとピックアップコイル(a)と赤道面における解空間のプラズマ電流分布。(b)における青線は入力として与えた真の電流分布。赤色の波線と点線はそれぞれ 50%と 1σ に対応する累積確率を表す。

本研究に関する学会発表と論文

- [1] 西澤敬之, 徳田悟, 三瓶明希夫, 長谷川真, 山崎広太郎, 藤澤彰英 “統計を用いた Grad-Shafranov 方程式の解空間の探索” 第 41 回 プラズマ・核融合学会 年会
- [2] T. Nishizawa, S. Tokuda, A. Sanpei, M. Hasegawa, K. Yamasaki, A. Fujisawa, "Equilibrium reconstruction of axisymmetric plasmas by combining Gaussian process regression and Markov chain Monte Carlo sampling", Plasma Physics and Controlled Fusion **67** (2025) 015006

宇宙・実験室プラズマにおける乱流描像の普遍性・特殊性

Description of turbulence in space and laboratory plasma: Universality and particularity

富山大学・学術研究部・教育学系 成行 泰裕

研究目的：

多様な波動が伝搬する媒質であるプラズマでは、乱流状態も多様性に富んでいる。一方で、一見して異なる乱流状態に共通する普遍的な構造の探求は、興味深い課題である。宇宙プラズマ乱流の中でも、太陽風プラズマ中の乱流は人工衛星による「その場」観測により、多くの性質が知られている。一方で、実験室プラズマにおいても乱流研究は中心課題の一つであり、重要な知見が多く得られている。本研究課題では、理論モデル・乱流統計などを接点として、宇宙・実験室プラズマにおける乱流描像の普遍性・特殊性の検討を行う。目標とするのは、実験室プラズマ研究の進展と宇宙プラズマ研究の進展を連動させるスキームを構築することである。

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：

プラズマ中の乱流の励起や大スケール流れの影響を簡便に記述するために、ランダム振動子[e.g., Kraichnan, 1964]によるモデル化が行われてきた[e.g., Krommes, 2009; Narita, 2017; Bourouaine+Perez, 2019]。各波数モードの成長・減衰は形式的に成長率(減衰率)と波数モードの複素振幅の積で表すことができるが、ここでは元になる系から求められた表式[e.g., Krommes+Kim, 2000]を議論するのではなく、確率モデルを用いた成長率の記述を考えた。具体的には、確率的波動成長理論[e.g., Robinson, 1995; 2006]の拡張について議論した。

確率的波動成長理論では成長率を確率過程で表すが、最も簡単な Ornstein-Uhlenbeck 過程の過減衰近似を用いたモデルでは、各モードのエネルギーの対数がガウス型の分布になる[e.g., Robinson, 1995; 2006; Cairns et al, 1998]。本研究ではまず、エネルギーの対数が非ガウスの分布に従うような確率モデルを検討し、非ガウスの分布をもたらす項がフーリエモードの発展方程式中に非線形項として現れることを確認した。

次に、磁場(電流)に対する確率的な外部駆動の数値モデルとして用いられている Langevin アンテナ[TenBarge et al, 2014]について、確率的波動成長理論のような乗算ノイズを含む場合への拡張を議論した。Langevin アンテナは実部・虚部それぞれに対して独立な加法ノイズをランダム力として与えているが、このような場合は極表示の変数(フーリエ振幅

(複素振幅の絶対値)とフーリエ位相)間のノイズに相関が生じ、フーリエ位相のランダム力にフーリエ振幅依存性が現れる[e.g., Gardiner, 2009]。ここでは、これらの Langevin アンテナの性質を整理し、乗算ノイズを含む形に拡張したモデルを示した。このモデルは、加法ノイズが無い場合は確率的波動成長理論に、乗算ノイズが無い場合は Langevin アンテナにそれぞれ対応している。

加えて、プラズマ乱流に関係して生じる突発現象に対する計数過程の適用についても議論を行った。このトピックについては、共同研究から関係者の範囲を拡大して実験室・磁気圏プラズマ中の突発現象についての小研究会(closed meeting)の形で議論を継続した。次年度以降は、新たな分野融合の研究集会の形で乱流描像の普遍性・特殊性の議論を深めることを計画している。

公表状況(学会発表) :

なし

研究組織 :

成行泰裕 (富山大)、佐々木真 (日大)、加藤雄人(東北大)、川面洋平(宇都宮大)、諫山翔伍 (九大)、羽田亨 (九大)、稲垣滋(京大)、小菅佑輔(九大)

基礎プラズマ装置 PANTA における高波数乱流励起実験

名古屋大学大学院工学研究科 河内裕一

要旨

本課題では、直線磁化プラズマ装置 PANTA において磁場制御を活用し、イオンのラーマー半径よりも小さいスケールの高波数乱流励起実験を行った。今年度は、特にパラメータスキャンや追加の解析に力を入れ、高波数乱流の質量依存性や非線形結合の特徴を明らかにした。そして、イオンバーンスタイン波と類似の特徴を持つ新たなモードを発見した。今後は、新規プローブの導入等を通じて、背景の流れや輸送との関係について調査を進める。

研究目的

磁化プラズマ中に発生する乱流は核融合炉における閉じ込め性能を決定づけるものとして研究が進められてきた。これまでのプラズマ乱流研究は、イオン実効ラーマー半径 ρ_s 程度以上の空間スケールを持つ乱流、すなわちイオンスケールの乱流を対象に実験が行われてきた。近年、イオン実効ラーマー半径 ρ_s よりもさらに細かいスケール、すなわち $k_\perp \rho_s \geq 1$ の高波数乱流が電子の熱輸送や異常加熱と関連するとされて注目されている。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、一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[1]。本研究の目的は、昨年度に続きパラメータスキャンを引き続き行い、モデルの構築に向けた高波数乱流の特徴づけとした。

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)を用いて高波数乱流実験を行った。典型的な放電磁場 900G に対して、より小さい磁場 225G を印加することにより高波数乱流が励起することが確認されている[1, 2](図 1 参照)。これまで、中性粒子ガス圧の依存性に調査しており、質量依存性について調査を行った。その後、放電に利用する希ガスを Ne, Ar, Kr, Xe と変えながら実験を行った。ガスを変更する際は、分光器を用いてスペクトル構造から放電で発光しているイオンを同定した。

高波数乱流の計測には空間分解能の高井周方向 64ch プローブを利用し、時間分解能の高いイオン飽和電流を計測した。得られたデータから、高波数乱流の時空間ダイナミクスをスペクトル解析によって特徴づけた。

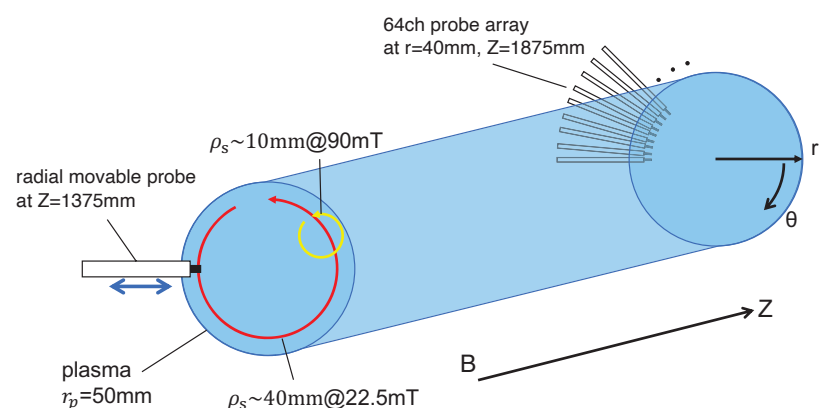


図 1: 高波数乱流励起実験の概要[2]

実験結果および考察

本研究で行った質量スキャンの結果を図 2 に示す。いずれのイオン質量においてもイオンサイクロトロン周波数よりも大きく、イオンラーマー半径よりも小さい構造を持つという高波数乱流の特徴が観測できた。ブロードなスペクトルと離散的なスペクトルがいずれのイオンでも確認できた。また、乱流スペクトルの分布の傾きは質量が重いほど急になっていることがわかる。これは、乱流の位相速度は質量が重いほど遅いということを意味しており、イオン音速や反磁性ドリフト速度の傾向と概ね一致することがわかった。また、離散スペクトルのピーク間周波数はいずれのイオンを利用した場合においても、イオンサイクロトロン周波数程度であることがわかった。このことから、離散ピークを持つ揺動はサイクロン運動に起因する不安定性により励起すると考えられる。

離散ピークの起源として、静電イオンサイクロトロン波のようなイオンサイクロトロン周波数を基本波に持つ揺動の非線形結合による高調波の生成、またはイオンバーンスタイン波の線形不安定による励起が考えられる。これらの区別のために、非線形結合強度をバイコヒーレンスにより評価した (図 3)。この結果から、離散ピークはイオンバーンスタイン波の線形不安定による励起であることが示唆された。今後は、ブロードな揺動および離散ピークについて、モデルの構築等を行う。

成果報告

本研究の成果は、査読有科学雑誌 Physics of Plasmas [3](DOI: 10.1063/5.0187997)および Plasma and Fusion Research [4](DOI: 10.1585/pfr.1201031)に掲載された。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)
- [3] Y. Kawachi et al., PoP 31, 044502(2024)
- [4] Y. Kawachi et al., PFR 19, 1201031 (2024)

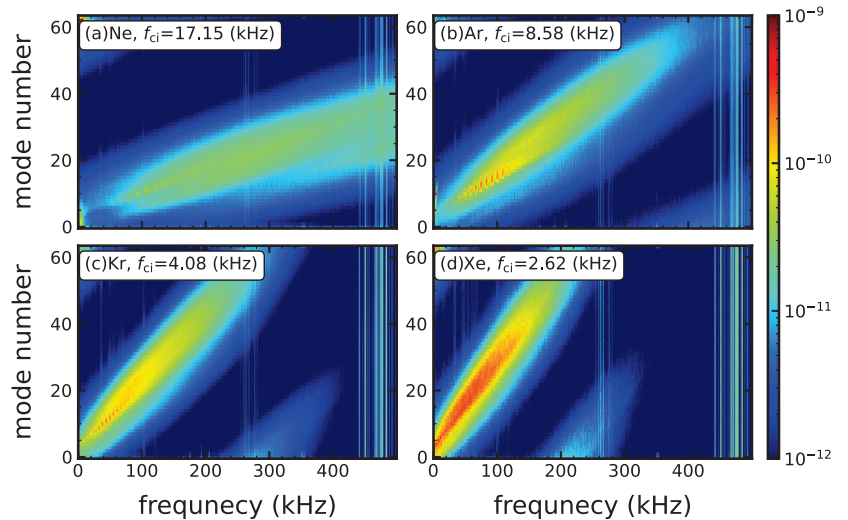


図 2 : 高波数乱流発生時の二次元スペクトルの質量依存性。

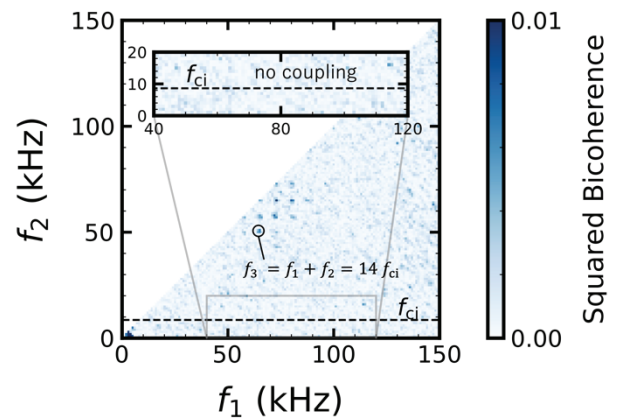


図 3 : 高波数乱流励起実験で得られたバイコヒーレンス

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。

地球磁気圏におけるプラズマは地磁気を介して電離圏プラズマと結合している。電離圏におけるプラズマの揺らぎが磁気圏におけるアルフベン波を励起し、このアルフベン波が電離圏におけるプラズマの揺らぎを増幅する現象をフィードバック不安定性と呼ぶ。フィードバック不安定性はオーロラのカーテン状や渦巻き状の自発的な構造形成を説明するための理論である。

フィードバック不安定性における磁気圏モデルに対しては、インピーダンスモデル、MHD モデル、二流体モデル、ジャイロ運動論的モデル、ジャイロ流体モデルが使用されてきた。特に、ジャイロ運動論的モデルとジャイロ流体モデルは、磁気圏におけるアルフベン波を運動論的アルフベン波として表現するために導入されたものであり、有限イオンラマ半径効果や電子ランダウ減衰などの運動論的效果がフィードバック不安定性の線形安定性や非線形発展に大きな影響を与えることが明らかにされている。

これまでの共同研究においては、地磁気を真っ直ぐな磁力線であると近似した磁気圏モデルに対して、ジャイロ運動論モデルを適用したフィードバック不安定性の安定性解析を実施した。本研究においては、地磁気をより現実的な双極子磁場であると近似した場合に解析を拡張することを目的とした。

【研究方法】

今年度の研究においては、地磁気に沿った、磁場、密度、温度の非一様性を加味できるように、磁気圏の平衡のモデルを拡張した。図 1 に双極子磁場に沿った計算空間メッシュと地磁気に沿ったアルフベン速度と電子熱速度の分布を示す。このような非一様な平衡に対してジャイロ運動論モデルを解いた。北緯 70° の位置の電離圏における $100\text{km} \times 100\text{km}$ の領域と、それに対応する磁気圏の領域に対してシミュレーションを実施し、電離圏におけるプラズマ流体の揺動と磁気圏におけるプラズマの速度分布関数揺動の時間発展を調べた。

次に、シミュレーション結果に対する解析を行なった。シミュレーションにおいては、地磁気が一様であると仮定された場合と比べて、非常に大きな電子の自由エネルギーが生成されることが観察された。そこで、エネルギー保存則に基づいた解析を行い、磁気圏の非一様性がどのような物理過程を介して、大きな自由エネルギーを生成しているかを分析した。

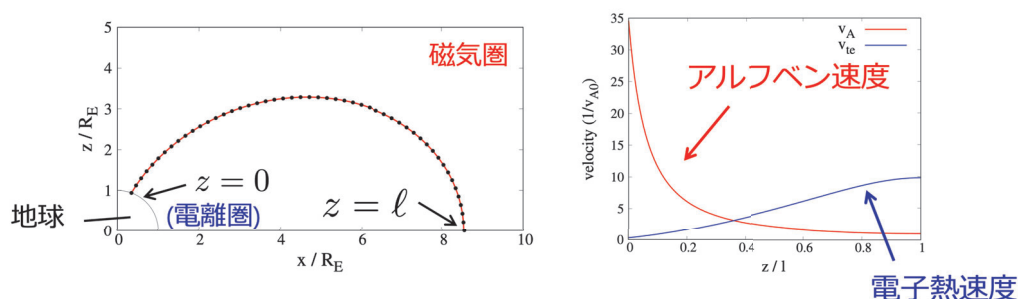


図 1 地磁気に沿った計算メッシュ（左図）、アルフベン速度と電子熱速度の分布（右図）

【研究結果】

図 2 に、磁気圏における地磁気に沿った密度揺動の分布、エネルギーとエネルギーソースの時間発展を示す。地磁気に沿って基本波に近い緩やかな空間分布を持った揺動が発達することが観察される。エネルギーの時間発展においては、アルフベン波を構成する電磁揺動エネルギーよりも、電子の自由エネルギーが一桁程度大きな値を取ることが観察される。このような大きな自由エネルギーの生成は、一様な地磁気を仮定した解析では観察されない。エネルギーソースの時間発展においては、フィードバック不安定性を駆動する電氣的仕事(電離圏における背景電場が駆動)よりも、熱力学的仕事が大きな割合を占めていることが観察された。

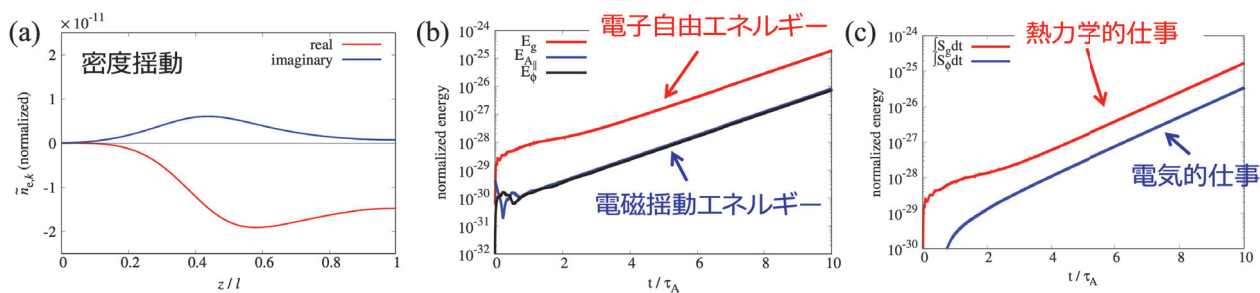


図 2 (a)磁気圏の密度揺動分布、(b)エネルギーの時間発展、(c)エネルギーソースの時間発展

図3に、図2で観察された電子自由エネルギーおよび熱力学的仕事の生成機構をまとめる。磁気圏-電離圏結合においては、電離圏における背景電場が電氣的パワーを励起し、磁気圏に運動論的アルフベン波を生じる。運動論的アルフベン波は、ランダウ減衰に代表される速度空間における微細構造を持つ。この速度空間の微細構造が地磁気に沿った平衡の非一様性と結合することによって、熱力学的パワーが生じる。この熱力学的パワーが大きな電子の自由エネルギーが生成する。

最後に、電子の自由エネルギーの物理的な意味について補足する。密度場、速度場、圧力場などの流体量は、速度分布関数の速度空間の積分量に相当する。本研究においては、速度分布関数を流体量に分解するエルミート展開の手法を導入した。その結果、高次の流体量の揺動が比較的大きな振幅で存在することが明らかになった。以上から、大きな電子および平衡の非一様性によって、非常に階層性の高い流体揺動

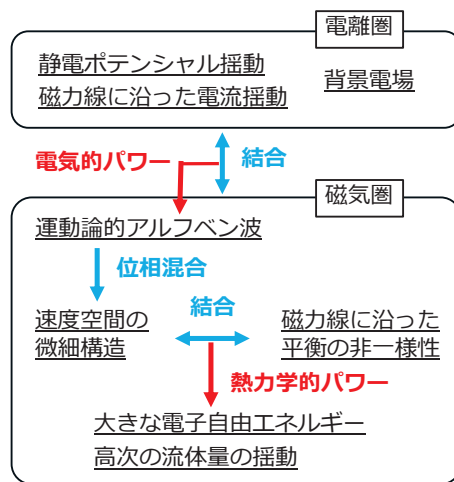


図 3 自由エネルギー生成機構

振幅で存在することが明らかになった。以上から、大きな電子自由エネルギーの生成は、運動論的効果および平衡の非一様性によって、非常に階層性の高い流体揺動場が形成されたと解釈することができる。

【まとめ】

磁気圏の非一様性を加味した場合について、ジャイロ運動論モデルを用いたフィードバック不安定性の線形安定性解析を行ない、フィードバック不安定性の発達とともに、非一様性に起因する電子の自由エネルギーが生成されることが新たに明らかになった。このような現象が、オーロラの構造形成や電子加速機構とどのように関わっているかを明らかにすることが今後の課題である。

高エネルギー重イオン照射を利用した量子ナノ構造作製のための基盤的研究

量子科学技術研究開発機構 高崎量子技術基盤研究所 圓谷 志郎

1. 目的

量子ドットをはじめとした量子ナノ構造は、情報通信やエネルギー分野等、幅広い分野での応用が期待されており、量子ナノ構造のサイズ・形状・組成・結晶性を精密に制御できる新しい作製法の開発が課題となっている。本研究では、イオンビームにより局所構造を制御したグラフェン[1,2]をナノ構造の生成核に用いることによって、ナノ構造のサイズ・形状・組成・結晶性等の精密制御を試みる。

本報告書では、イオンビーム照射により形成したグラフェンの局所構造を放射光分光手法等により明らかにした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ェ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技術基盤研究所のタンデム加速器を用いた。イオンビーム照射によってグラフェンに作製した局所構造は X 線吸収分光(XAFS)や第一原理計算等により評価した。

3. 結果および考察

図 1(a)-(c)に 10¹⁵ ions/cm² イオンビーム照射によって Cl をドーピングしたグラフェンの広域 X 線吸収微細構造(EXAFS)スペクトルを示す。理論計算で得られた曲線と実験結果が比較的一致していることから、図 1(d)の構造が妥当であることが示唆された。X 線吸収端近傍構造(XANES), XPS の結果もあわせて考えると、イオン照射に伴いグラフェンの炭素の結合が sp² C=C から sp³ C-C へと変化し塩素がドーピングされたことが分かった。

本研究では、高エネルギーイオン照射下の非平衡励起反応場を利用することで、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, 本田充紀, 水口将輝, 渡邊英雄, 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への異種原子ドーピング」, 第 85 回応用物理学会秋季学術講演会, 2024 年 9 月.
- 2) Shiro Entani, Tomitsugu Taguchi, Makoto Kohda, Shunya Yamamoto, “Atomic and electronic structure of ion-irradiated silicon carbides”, The 7th QST International Symposium -Quantum Technologies towards Harmonious Future-, 2024 年月.
- 3) Shiro Entani, Tomitsugu Taguchi, Makoto Kohda, Shunya Yamamoto, “XAFS study of the atomic structure of ion-irradiated silicon carbide”, Photon Factory Activity Report 2023, accepted.

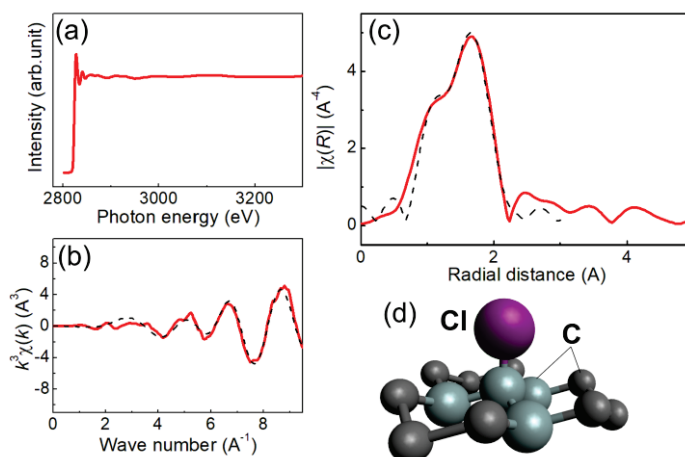


図 1 イオン照射により塩素をドーピングしたグラフェンの(a)Cl K 端 EXAFS スペクトル, (b)EXAFS 振動スペクトル, (c)塩素原子周りの動径分布関数。(c)EXAFS 解析および第一原理計算により求めた塩素ドーピンググラフェンの原子構造。

高温高压水と金属界面における物質移動現象の把握

九州大学大学院総合理工学研究院 片山一成

【緒言】

高温高压水は、原子力発電システムの熱媒体として広く利用されている。原子炉内では、ウランの三体核分裂等により水素の放射性同位体であるトリチウムが生成される。水素同位体は移動性が高いため、燃料被覆管を透過して一次冷却水に移行し、最終的には、復水器を通じて環境中に移行する。原子力発電所からのトリチウム放出量はモニタリングされており、規制値よりも十分に低いレベルで排出されている。しかしながら、福島第一原子力発電所からの処理水の海洋放出が国際問題となったこともあり、近年トリチウムに対する社会の関心は高く、より安全性に留意したトリチウムの管理・制御が望まれる。そのためには、トリチウムの基礎移動現象を理解し、トリチウム移行を抑制する対策を検討する必要がある。トリチウム挙動に関する研究は、これまでに多く行われているが、高温高压水と金属界面での移行は、腐食等の化学反応を含む複雑な物質移動が関与するため十分には解明されていない。本研究では、熱交換器材料として広く利用されているインコネル管を介した高温高压水間でのトリチウム移行速度を調べた。

【実験方法】

九州大学アイソトープ総合センター伊都地区実験室内に、二重管式透過実験装置を作製し、約 300℃、約 17MPa の高温高压水間でのインコネル管に対するトリチウム透過実験を実施した。図 1 に実験装置概略図を示す。ステンレス鋼管 (SS316 : 外径 1/2 インチ、長さ 300mm、厚み 1mm) に片封じのインコネル管 (Inconel600 相当合金管 : 外径 1/4 インチ、長さ 400mm、厚み 0.5mm) を挿入する構造で、インコネル管内 (透過 1 次側) に 33kBq/cc のトリチウム水を充填し、インコネル管とステンレス鋼管の間 (透過 2 次側) に軽水を充填して、ヘリウムで加圧した。密閉状態で、約 300℃ まで加熱することで約 17MPa まで昇圧し保持した。下部の 2 つのバルブを開・閉することで、軽水の一部を採取した。加熱後、不定期に軽水の一部を採取し、液体シンチレーションカウンターを用いてトリチウム濃度を測定した。1 回の採取で得られた軽水を 1cc ずつ 3 回抽出し測定した。

【結果及び考察】

図 2 に透過 2 次側軽水中のトリチウム濃度の時間変化を示す。加熱 5 日後には濃度上昇が観測され、緩やかに上昇速度が低下した。濃度上昇速度を透過有効面積で割ることで得られる透過流束は、 $10^{-15} \sim 10^{-16} \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ と求まった。この値は、先行研究[1]において約 5 倍のトリチウム濃度 (166kBq/cc) で行われた同様な実験での値と同程度であった。つまり、2 次側へのトリチウム透過流束に対する 1 次側トリチウム濃度の影響は見られなかった。トリチウムの透過は、インコネル表面でのニッケルと水との反応に伴うトリチウムガスの発生に起因すると考えている。同じ温度・圧力条件であればトリチウム濃度に比例してトリチウムガス発生量が増加し、トリチウム透過流束も増加すると予想される。発生したトリチウムガスは、1 次側に存在する僅かな気相部分に移行・滞留すると考えられるが、この気相体積の違いによって、透過に寄与するトリチウム分圧に違いが生じるのではないかと考えている。つまり、本実験体系では、トリチウム濃度だけではなく、透過 1 次側気相体積がトリチウム透過流束に寄与しているのではないかと推測される。

参考文献

[1] K. Katayama et al., *Journal of Nuclear Materials*, 565 (2022) 153723.

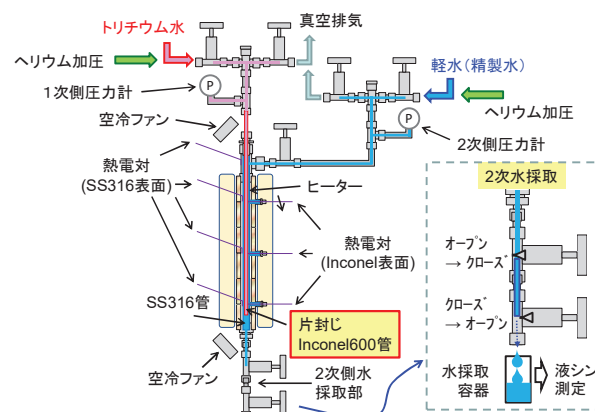


図 1 二重管式透過実験装置概略図

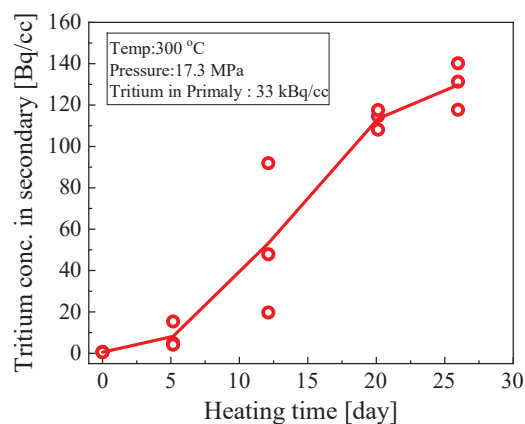


図 2 透過二次側のトリチウム濃度変化

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

九大・応力研の球状トカマク装置 QUEST は、運転開始時より真空容器壁から炭素材を完全に排除し、全金属壁という将来を見据えた条件下で実験を行い今日に至っている。QUEST はまた、高温壁による能動的な粒子制御実験が可能であり、粒子循環プロセスの理解と制御法の開発という、定常プラズマ維持に不可欠な知見の獲得に貢献してきた。QUEST の真空容器壁は、タングステン部とステンレス部から成る。近年タングステンの比率が高まってはいるものの、その大部分は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 (APS タングステン) 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られている。このためバルク材への交換が順次行われている。バルクタングステンを導入するに当たり本研究では、タングステン板とステンレスを核融合研で開発した「放電プラズマ焼結 (SPS)」で接合し、壁材として用いることを提案している。

2. 試験片の製作

昨年度、厚さ 1mm のタングステン板と 5mm のステンレス板の接合を試みたところ、タングステン側が凸となる大きな反りが生じ、最終的に応力開放に伴う剥離が、接合面に発生した。このため本年度は、昨年と同じ大きさの素材 (タングステン: 1mm×50mm×50mm、ステンレス: 5mm×50mm×50mm) を用いつつも、応力緩和のために接合面に挟み込むインサート (中間層) を、従来のニッケル単層インサートから、タングステン・銅混合粉末、銅箔、純銅粉末の3層構造インサートに変更した試験片を製作し SPS 接合を試みた。

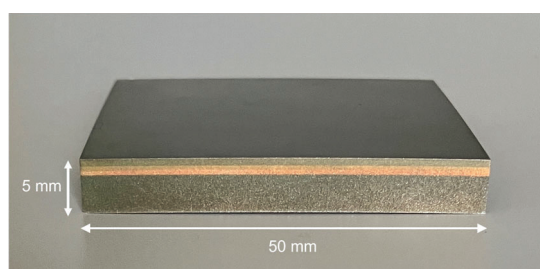


図1 接合試験片。上からタングステン (1mm)、多層中間層 (1mm)、ステンレス (5mm)。上に凸の反りが認められる。

3. 結果

上述の試験片を、900℃、20MPa (上下1次元)、水素雰囲気中で 30 分間 SPS 接合した。直後の目視および光学顕微鏡による観察で、接合に剥離等の欠陥は見られなかったが、図1に示すように僅かな反りは認められた。多層インサートの採用は、熱応力緩和という点で大きな効果が得られることが分かった。初期的な SEM 観察 (図2) によると、インサート部では、銅がタングステン粒子の間に良好に流れ込んでいることが分かった。

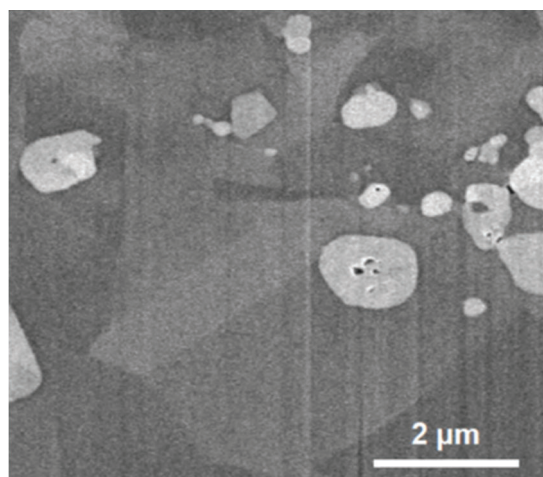


図2 インサート (タングステン・銅混合粉末) 部の SEM イメージ。白玉がタングステン。

4. 研究組織

核融合研: 森崎友宏 (代表者)、村瀬尊則、時谷政行
九州大学: 花田和明 (世話人)、島袋瞬、吉田直亮

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 吉田健太

1. 目的

原子力材料は高温かつ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確立することを目的としている。2022 年度は、九大での実験条件を想定した軽水炉压力容器鋼の 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 (銅合金) 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) および核融合炉用銅合金に 2022 年度に確立した WB-STEM/HRSTEM/STEM-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銅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。2024 年度は WB-STEM/STEM-EDS 分析を照射欠陥集合体の動的観察に応用することを目的とする。

2. 実験方法

本研究課題は、大洗センターで FIB マイクロサンプリングにより作製した試料について、予め WB-STEM 観察および $g \cdot b$ 解析を行うことで EDS 計測に最適となる領域および試料傾斜条件の探索を行った。2024 年度は Re-W(1100°C 中性子照射材) および軽水炉压力容器鋼 (中性子照射材、450°C 焼鈍後) 九大応力研に L 型輸送し、WB-STEM/STEM-EDS 分析を実施した。

軽水炉压力容器鋼試料には、中部電力浜岡原子力発電所 1 号機 UT (超音波探傷試験) ブロックを用いた。大電流アルゴンイオンビーム加工 (ArBlade5000, Hitachi High-Tech) および電子線後方散乱回折ひずみ分析 (EBSD-KAM Map) によりシャルピー衝撃試験破面に形成した亀裂先端の応力集中部を特定し、その周囲 50 μ m 程度の領域から、膜厚 200nm の薄膜試料を集束イオンビーム加工 (Ga-FIB-Helios, Thermo Fisher Scientific) でマイクロサンプリングした。その場観察には、傾斜追尾型 WB-STEM (ARM 200F, JEOL) を収束半角 6.2mrad のナノプローブモードで用いた。放射化試料対応の二軸傾斜試料ホルダーおよびヒーターコントロールユニット (EM08170HCU, JEOL) を用いた。転位の動的な挙動を動画で記録、独自開発したスキャン像用の画像補正 (MPPM 補正) 法を用いて解析した。

3. 実験結果および考察

粒界析出物に起因する転位ネットワークの形成および熱緩和過程を明らかにした。図表上に示される EBSD ひずみ解析はシャルピー破面の不均一なひずみ分布を示しており、亀裂先端では KAM 値 2.7° に達していることがわかる。WB-STEM 観察の結果、亀裂先端には転位密度 $2.5 \times 10^{16}/\text{m}^2$ を超える塑性変形が富 Mn 析出物近傍に形成していることを確認した (図 1 左下)。その場 WB-STEM 試験により、室温から 600°C まで空間分解能 0.4nm/pixel、時間分解能 1s/frame で熱緩和過程を調査したところ、焼鈍温度 500°C から 550°C において、富 Mn 析出物を繋ぐ新たな亜粒界形成を発見した (図 1 右下)。従来、理論計算では予見されていた界面に生じる塑性変形の不連続を幾何学的に埋め合わせるための GN 転位 (Geometrically Necessary dislocation) をナノ

スケールで動的に可視化した成果といえる。

以上の結果は *Materialia* 誌に共同論文として発表した。また日本原子力学会材料部会において学術写真賞を受賞した。

本研究で確認した破面上亀裂を破壊面の1例として、炭化物や酸化物など硬質第二相粒子界面やマイクロボイド/空隙表面など、不均一なひずみ分布を持った微細組織は数多く知られている。本研究で開発したその場 WB-STEM 観察によって、これらのメゾスコピック領域の微細組織が材料試験に及ぼす影響に関する新たな知見が獲得されることが期待できる。

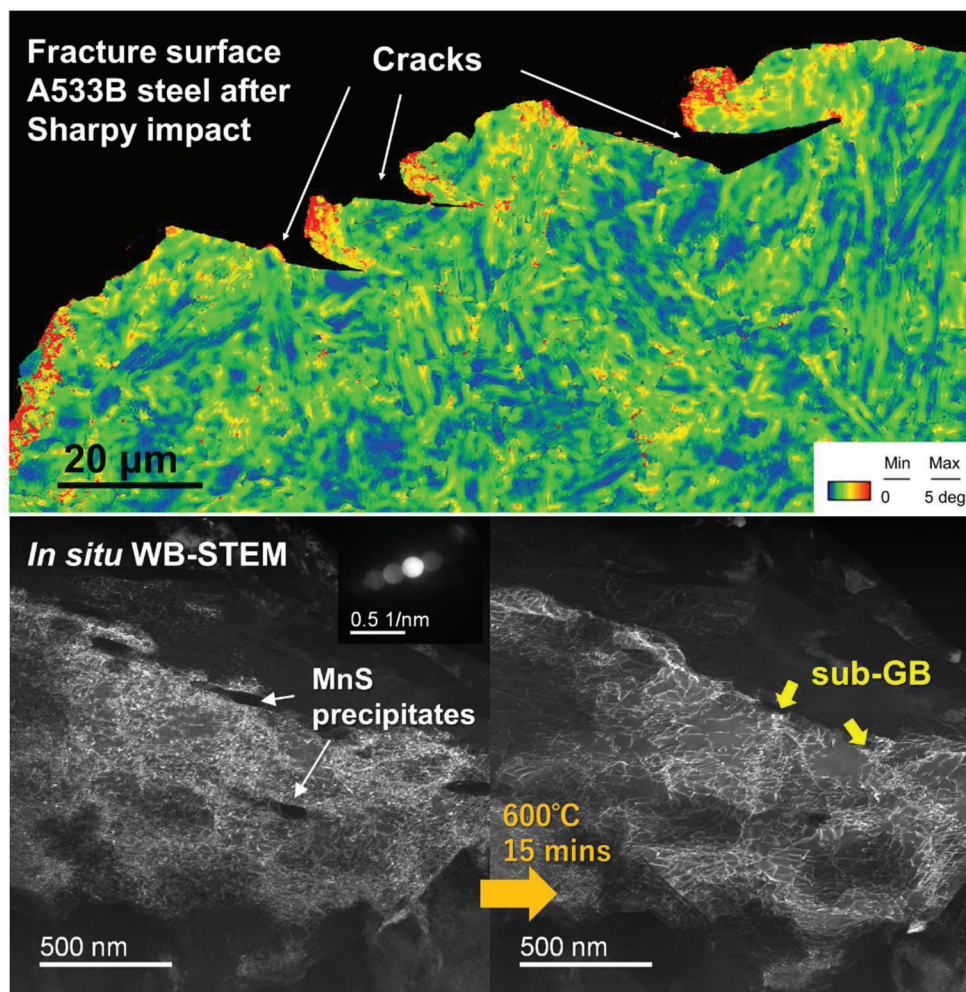


図 1 圧力容器 UT Block の断面ひずみ観察およびその場 WB-STEM 観察

MAX 相セラミックスの照射損傷に及ぼす結晶方位の影響

北海道大学 大学院工学研究院 池田 賢一

【目的】 MAX相セラミックスは、 $M_{n+1}AX_n$ ($n=1\sim3$) の一般式で示される三元化合物の総称である。ここで、MはTi、Cr、Zr、Nbなどの遷移金属元素、AはSi、Al、GeなどのAグループ元素、XはCもしくはNである。MAX相セラミックスは六方晶系の結晶構造を有し、結晶を構成する $M_{n+1}X_n$ 層とA層がc軸方向に積層するような層状構造を持つため、強い異方性を示すことが知られている。 $M_{n+1}X_n$ 層とA層がそれぞれ共有結合と金属結合を有することに起因して、セラミックスの性質と金属の性質を兼ね備えた特異な物質としても注目されている。いくつかのMAX相セラミックスでは室温環境での耐照射損傷性に優れているとの報告もあり、核融合炉材等の適用にも期待されているが、その結晶方位依存性など基礎的なデータが不足している状況である。研究代表者らは、これまでMAX相セラミックスの一種である Ti_3SiC_2 を対象に磁場中スリップキャストというコロイドプロセスを用いた手法により成形体を作製し、放電プラズマ焼結により結晶配向した焼結体の作製に成功している。本年度は、照射実験に用いるための配向焼結体ならびに試験片の作製を行った。また、応用力学研究所の重イオン照射装置を今後使用していくことを考え、核融合炉用ダイバータ材としての利用が期待されている酸化物分散強化銅合金とタングステンの接合体(ODS-Cu/W接合体)への銅イオン照射実験を行った。

【実験方法】 本研究では、市販の Ti_3SiC_2 (以降、TSCと表記)粉末(KANTHAL社製MAXTHAL(312))を用いた。TSC粉末、ポリエチレンイミン、エタノールを混合したスラリーを作製し、スラリーを流し込む型と多孔質アルミナモールドを共に超伝導マグネット内に設置し、回転させながら12Tの磁場をモールド水平方向から印可することでスリップキャストを行った。この成形体から放電プラズマ焼結装置(SPS)を用いて焼結体を作製し、磁場印可方向と垂直方向にTSCのc軸が配向していることを、XRDを用いて確認した。また、ODS-Cu/Wの接合体は、ODS-CuとしてGlidcop AL-15を選択し、W板を金属ろう(BNi-6)材で接合したものを対象とした。 Cu^{2+} イオンを室温環境でODS-Cuの照射量が0.3~10dpaになるように照射し、力学特性をナノインデンテーション試験により評価した。

【結果および今後の展望】 作製したTSCの配向焼結体をXRDによって配向度を確認した結果、スリップキャスト方向に底面(0001)が配向していることを確認できた。ビッカース硬さ試験機による配向方向による硬さの違いについて、様々な荷重で評価した結果、どの荷重においても底面が配向している面が最も高いことがわかった。また、底面と 90° および 45° の角度の面についても評価した結果、 45° の面が最も低いことがわかった。ODS-Cu/W接合体の照射実験を行った結果、図に示すように照射量が多いほど、試料表面から深さ方向への硬化量が高くなることが明らかになった。今後は接合体だけでなく、TSCの照射損傷に及ぼす結晶方位の影響等を検討する予定である。

【研究組織】

所内世話人: 渡邊英雄 研究協力者: 嶋田雄介(九州大学・准教授)、羽立周磨(北海道大学・学生)

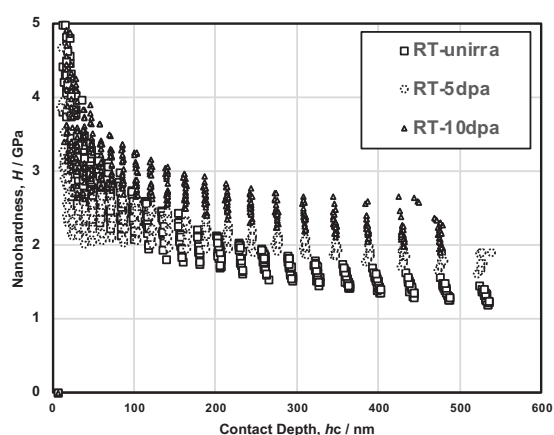


図 試料表面からの深さに対するナノ硬さの照射量依存性

磁化プラズマ中における磁力線平行・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

磁力線長の短い直線プラズマ装置や衝突率の低い SOL・ダイバータ領域では磁力線平行方向のイオン温度($T_{\parallel}$)と垂直方向のイオン温度($T_{\perp}$)の値は異なると考えられ、そのため $T_{\parallel}$ と $T_{\perp}$ それぞれの計測が必要である。本研究は Retarding field analyzer (RFA) を用いて 2 方向のイオン温度を一度に導き出す手法を開発する事を目指すもので、本年度は小型直線装置でも利用可能なコンパクトな RFA を製作し、イオン温度の計測に対するイオン流れの影響を明らかにするための実験を行った。

2. 成果

図 1(a)に示すように直径と奥行きがそれぞれ 6 mm と 5 mm 程度の小型の RFA を製作した。この RFA を用いて DT-ALPHA (東北大学) で生成したヘリウムプラズマの径方向計測を行った。図 1(b)に示すように、DT-ALPHA では $E \times B$ ドリフトにより円周方向のイオン流れが生じる。このようなプラズマに対して RFA を y 軸方向に移動させてイオン温度を計測したところ図 1(c)に示す結果を得た。ここで、上段のパネルは RFA よりも 15 cm 上流側に設置された静電プローブで得た電子温度および電子密度の径方向分布である。中段パネルに示すのは $E \times B$ ドリフトを仮定し n_e と T_e の分布から求めた周方向回転速度である。RFA のイオンコレクタが $+x$ 方向を向くとき (下段パネルの青)、 $y > 0$ mm の領域で RFA は回転流と正対する。反対に $y < 0$ mm ではイオンコレクタは回転流の下流側を計測する。図に示すように、コレクタが回転流と正対する場合には相対的に高いイオン温度が得られ、そうでない場合には低いイオン温度が得られた。この傾向はコレクタの向きを 180 度変化させた場合 (下段パネルの赤) でも確認できる。更に、回転流の存在しない $y=0$ mm ではコレクタの向きに関わらず同程度のイオン温度が得られる。シンプルな解析ではあるがイオン流れによる Shifted-Maxwellian により実験結果を説明できる事も分かっている。

3. 成果報告

- ① 加賀谷重考 他, 「Retarding field analyzer を用いたイオン温度計測に対するイオン流の影響の検証」, 日本物理学会第 79 回年次大会, 講演番号 16aB201-4
- ② 加賀谷重考 他, 「Retarding Field Analyzer によるイオン温度計測に対するイオン流の影響についての実験および 0 次元モデル検証」, 第 41 回プラズマ・核融合学会年会, 講演番号 20P12

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

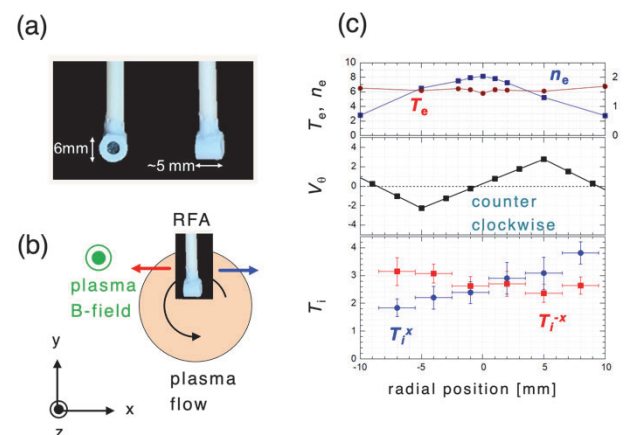


図 1. (a)製作した RFA, (b)イオン計測体系, および(c)計測結果。

QUEST プラズマに曝露した金属材料における水素の昇温脱離特性

九州大学大学院 総合理工学研究院 大宅諒

目的

プラズマ境界力学実験装置 QUEST (Q-shu University Experiment with Steady-State Spherical Tokamak) において、高温壁を用いた長時間放電が実施されており、長時間放電の維持のためには粒子バランスの保持が課題である。そこでは様々なプラズマ-壁相互作用が生起しており、特に壁材料における水素の吸蔵・放出現象が重要であり、その把握が求められている。

本研究では、壁材料における水素の吸蔵・放出のプロセスの解明とその制御を目的として、QUEST でプラズマに曝露した金属試料において、吸蔵された水素の昇温脱離特性を調べる。

実験方法

金属試料の表面状態は、水素の吸蔵・放出特性に大きな影響を与える。そこで、本年度は、QUEST で水素プラズマに曝露した金属試料について、表面分析を実施した。

過去のキャンペーン (2018S/S) にて、上部壁・赤道壁・下部壁に設置し、プラズマに曝露させた金属試料 (ステンレス SUS316, タングステン) を用いた。表面分析には、QUEST 実験棟に設置された走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope) を用いて、試料の表面形態を調べた。また、SEM に併設されたエネルギー分散型 X 線分析 (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) により、試料表面の元素分析を行った。

実験結果と考察

試料表面の元素分析の結果を、表 1 に示す。As-received 試料 (プラズマ曝露していない試料) と比べて、上部壁や赤道壁に設置した試料では、炭素や酸素などの不純物が確認された。特に、赤道壁においては顕著であり、表面に堆積層

表1 各金属試料における元素分析結果

材料	試料名・設置場所	元素の割合
SUS316L	As-received	Fe 67.0% Cr 18.6% Ni 11.2%
	2018S/S 上部壁	Fe 63.4% Cr 15.5% Ni 10.7% C 7.4%
	2018S/S 赤道壁	Fe 59.2% Cr 14.5% Ni 9.9% C 8.7% O 4.8%
	2018S/S 下部壁	Fe 63.1% Cr 15.6% Ni 10.7% C 7.7%
タングステン	As-received	W 94.4% O 6.3%
	2018S/S 上部壁	W 87.4% O 10.2%
	2018S/S 赤道壁	W 70.5% O 11.7% C 16.5% Fe 1.25%
	2018S/S 下部壁	W 94.6% O 5.4%

が形成されている可能性がある。また、下部壁に設置したタングステン試料は、As-received 試料と同様の元素割合であり、不純物は確認されなかった。そのため、ここでは、堆積層が形成されている可能性は低いと考えられる。

このような表面状態は、水素の吸蔵・放出プロセスに大きな影響を与える。次年度以降に昇温脱離実験 (Thermal Desorption Spectrometry) を実施する予定であるが、その結果を解釈するために重要な知見を得ることができた。

高度形状制御を目的としたトカマクの垂直位置制御用フィードバックシステムの開発

日本大学 加藤修平

研究背景、目的

プラズマのポロイダル断面を円形から変化させる形状制御はトカマクプラズマの高性能化の上で重要な手段となっている。形状制御より得られるトカマクのポロイダル断面を表す指標として三角度、楕円度がある。楕円度が上昇するとエネルギー閉じ込め性能が長くなることは広くして知られている。三角度に関しては ELM の制御に重要な役割を果たす可能性が指摘されている。また近年では負の三角度を持つプラズマを生成することでトカマク炉において長年の問題となってきた温度分布の硬直性を打ち破る良好な閉じ込めが得られることが報告されている。形状制御によりトカマクの高性能化が生じる機構の解明することは九州大学応用力学研究所が保有する PLATO 装置において最重要研究課題の一つとなっている。

形状制御を行う上で問題となるのが上下方向の安定性である。通常プラズマのポロイダル断面を円形から大きく変化させようとするプラズマが上下に移動し失われやすくなる。本研究では上下方向に対するプラズマ位置のフィードバックシステムを開発し、PLATO 装置において高い楕円度、三角度を持つプラズマを生成することを目指す。

本年度の成果

本研究では当初 PLATO 装置において既に実験に利用されている垂直磁場用コンデンサバンクを活用する計画であった。しかし 2024 年 6 月に CS コイル用コンデンサバンクにおいて地絡事故が発生した。垂直磁場用コンデンサバンクも CS コイル用コンデンサバンクと似た構造を持つため安全上の懸念から両コンデンサバンクともに大幅な改修を行った。このため本研究の開始が 11 月まで遅延することになった。

限られた研究期間の中で図 1 に示すようにハーフブリッジ構成の IGBT モジュール(Infineon 社製、型式 FF900R17ME7_B11、定格電圧 1.7 kV、定格電流 0.9 kA)を 2 つ組み合わせてフルブリッジインバータを作成した。IGBT モジュールの間には FPGA (Renesas 製 AP-RX62G-0A) を配置しており、高分解能 PWM により PI 制御を用いて PLATO の FP コイルに任意の電流波形を生成することを想定している。FPGA のプログラムにおけるフィードバック系の制御器は最大 20 kHz のサンプリング周期とし、PWM 分解能は約

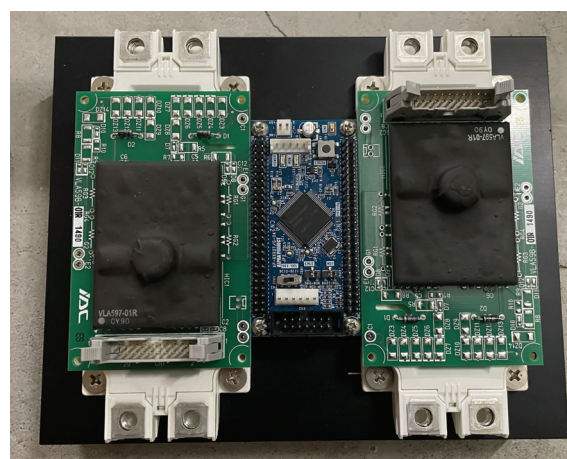


図 1 本研究で製作したフルブリッジインバータ。定格電圧 1.7kV、定格電流 0.9kA。

100 ns、比例ゲインと積分時間を独立に設定可能で、アンチwindアップ構成としている。さらに本フィードバック系の目標値（指令値）の入力方法は時系列プレマッピングデータ（最大1000点）またはアナログ電圧信号（最大5V, 12bit）の両方に対応している。一方、本フィードバック系における制御量はコイル電流信号のみならずアナログ電圧信号（最大5V, 12bit）であれば別な信号でも対応可能な構成としている。また、高電圧 IGBT モジュールのスイッチングに起因するアナログ電圧信号ノイズを除去すべく、すべてのアナログ電圧信号に対してAD変換後にデジタル一次ローパスフィルタを通した構成としている。

また本研究に加え、所内世話人の西澤敬之助教の行っている PLATO 装置におけるトカマク立ち上げに用いる電源開発をサポートしてきた。電力用半導体素子や電流計の選定を行い、安全性を確保しつつ電源の開発コストを抑えることに貢献した。研究成果に示す学会発表と論文に共著者として貢献した。

来年度の計画

来年度は図2に示す垂直磁場用コンデンサバンクの上段部に新たにコンデンサを配置し、今年度開発したフルブリッジインバータを接続してコイル電流の制御実験を行う。しかし来年度は所内世話人の西澤敬之助教が長期海外研修のため PLATO 装置にて迅速に作業を進めることが困難になることが予想される。状況に応じて研究協力者の名古屋大学河内祐一助教の協力を仰ぎ、名古屋大学のSOLEIL 装置にて電流制御実験を行うことを検討している。



図2 PLATO 装置の垂直磁場用コンデンサバンク

本年度の研究成果

- [1] 西澤敬之,...,加藤修平(14/21),..., 藤澤彰英 “PLATO トカマクの初期プラズマ” 第41回 プラズマ・核融合学会 年会
- [2] T. Nishizawa,..., S. Kato(14/21),... A.Fujisawa "Initial plasma achieved within engineering constraints in the PLATO tokamak" submitted to Fusion Engineering and Design

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物の候補材料として Fe-Cr 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。核融合炉ブランケットでは、プラズマ消失時に発生する電磁力の計算で磁気特性値の入力が必要となるが、磁性に与える照射影響の理解は進んでいない。ここで、核融合炉の過酷照射環境での損傷組織（はじき出し損傷やキャビティ形成）を模擬する手法として、イオン照射が有用である。しかし、損傷域が試料表層に限定されるため、損傷域のみの物性を分離して調べるのが難しい。解決策として、我々は高品位薄膜試料を作製し、イオン照射で薄膜全体を損傷させて磁気計測する研究手法を提案している。今回、膜厚の異なる Fe-Cr エピタキシャル薄膜試料を He⁺ 照射し、磁気ヒステリシス曲線の形状を比較し、照射効果の起源について詳しく検討した。

方法：基板に MgO(001)単結晶を用いて、超高真空中で電子ビーム蒸着を実施し、膜厚 200 nm の Fe および Fe-10%Cr 及び、膜厚 50, 100, 150, 200 nm の Fe-20%Cr 薄膜を作製した。その後、加速電圧 30keV の He⁺を室温で、最大照射量は 3×10^{21} He/m² で照射した。SRIM 計算より、最大損傷量は深さ 100 nm で 19 dpa で、膜厚 200 nm の薄膜内にヘリウムが残留する照射条件であることを確認した。照射前後の構造を EBSD、TEM で、磁化曲線を VSM で調べた。

結果及び考察：膜厚 200 nm の Fe, 10%Cr, 20%Cr 薄膜の断面 TEM 観察の結果、すべての試料で高密度のキャビティの形成を確認した。他方、Fe では照射前後で磁化曲線に変化は見られないが、10%Cr と 20%Cr では磁化曲線が傾き磁化困難になった。このことから、キャビティの形成自体は磁性に影響を及ぼさないが、形成に伴う Cr の原子分布の変化が関係していることが推察される。ここで磁化曲線が 2 成分（磁化困難成分と容易成分）の和からなるモデルを考え、解析を進めた。その結果、10%Cr および 20%Cr 薄膜では、磁化困難成分の体積分率が 6 割に及ぶことがわかった。次に膜厚を変えた Fe-20%Cr 薄膜を調べた。膜厚 200 nm 薄膜と同様に、150 nm 試料の磁化曲線は磁化困難な挙動が顕著に見られたが、50 nm 薄膜では見られなかった（なお、100 nm 薄膜は剥離し、測定できなかった）。2 成分モデルを適用し、それぞれの体積分率を求め、さらに 2 成分が薄膜内で 2 層に分かれて存在すると仮定し、それぞれの膜厚を求めた。その結果、膜厚が厚い試料では磁化容易成分の膜厚が一定（66 nm）と見積もられた。200 nm 薄膜の断面 TEM 観察結果から、照射後の薄膜の下部側でキャビティの形成が顕著であったことから、表面側の薄膜上部に磁化容易成分、基板側の薄膜下部に磁化困難成分の領域が形成し、Cr 偏析を伴ったキャビティが後者の磁化困難な挙動を引き起こしたと推察される。

成果報告：

Y. Kamada *et al.*, “Magnetic Hardening of Heavily Helium-Ion-Irradiated Iron-Chromium Alloys”, *Metals*, 14 (2024) 568 (12 pages). <https://doi.org/10.3390/met14050568>

Y. Kamada *et al.*, “Helium ion irradiation effects on microstructure and magnetism of BCC iron-based alloys”, IBMM2024, Jul 01-05, 2024, London, UK

梅山大輝ら、日本金属学会秋期講演大会(第 175 回) 概要集(2024)

組織：鎌田康寛, 村上武, 梅山大輝, 石田響揮, 吉田萩：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

1. 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。

2. 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、継続中の関連計測装置の整備と新規な方法の調査・提案をした。

3. 研究成果

3-1 多種レーザー変位計の検討と新規調達

以前の材料損耗研究、損耗開始閾値の詳細測定には、かなり少量の損耗量・絶対値を測定するために、K 社の変位計の使用が便利で役に立ち、現在プラズマ対向壁・核融合材料第 1 候補となっているタングステンの高エネルギー密度入射による損耗閾値の我々のグループの先行成果が、世界的にも注目された。現在もこの種の研究は、さらに、より有望なタングステン合金について、検討中で、近く、A 社との共同研究を開始予定である。

但し、より変位計遠距離設置の可能性と、より絶対値の大きな損耗量測定のために、或いは変位計と被測定材料との間に、例えば窓板などの隔壁が入ってくる場合の測定のために、K 社以外の変位計の併用を計画した。そこで、O 社の変位計が、最近の研究・開発の結果として、新製品が出ていることが判明したので、これらを発注し、まもなく入荷予定である。

3-2 制御と計測用 PC 機器の整備

長年使ってきた同上機器の OS は、多くが MS Windows XP であり、近年の PC 基本 OS に比べて旧式であり、特に 2025 年 10 月予定の Win10 サポート終了後は、セキュリティ確保上から、新 OS で稼働する PC 機器への切り替えが必須である。そこで、我々もとりあえず、1 系統のみ切り替えのために、ポータブル PC を発注し、現在、検収後の使用待ちである。これと前項の O 社変位計が揃う来週には、新変位計による損耗量測定と、大型核融合装置プラズマ対向壁の損耗対策安全モニターの研究に進むことができる。

3-3 新しい提案（単純変位計測から OCT 計測へ）

単層並びに多層複合材料へ OCT（光コヒーレントトモグラフィ）計測法を適用できれば、より高精度かつ厳しい環境下の材料測定ができる。但し、例えばタングステンなどの可視域不透明材料の場合には、光源自体の開発と随伴干渉計測法の開発が必要であるが、将来的に有望となる可能性が大きい。

4. 謝辞 本研究は、九州大学応用力学研究所と東京科学大学（旧・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^{A,B}、井澤靖和^B、徳永和俊^C、川路 均^D、平等拓範^{B,F}、野上修平^G、

^A 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 東京科学大学（旧・東京工業大学）・フロンティア材料研究所、^E 分子科学研究所、

^F 理化学研究所、^G アライドマテリアル。（2025/02/14/記）

3次元波数スペクトル計測と温度・密度・流速分布計測を用いた磁化プラズマ乱流の競合状態の解明

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揺動の波数情報や温度密度分布の情報から異なる声質を持つ磁化プラズマ乱流の競合状態の観測を行った。シミュレーション研究から磁化プラズマ中では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し、それらの揺動が示す競合を明らかにする必要があることを示唆している。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。

磁化プラズマ中の乱流競合状態を実験的に検証する例として、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を対象とした。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 $m=1$ 揺動は振幅がプラズマ中心部から周辺部に向けて伝播したり、空間構造が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。

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。 $M=1$ 揺動の振幅の伝播が $r=2.5$ cm あたりに到達する時間をクロックにして条件付き平均法を行い、structure function と modal coupling function 解析を行ったところ、 $m=1$ 揺動の振幅が伝播するのに合わせて非線形結合の強い領域がプラズマ周辺部に伝播し、 $r=3$ cm あたりに到達したところでプラズマ周辺部全体で非線形結合が強くなることを明らかにすることができた。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り、現在 Scientific Reports で査読中である。

トモグラフィを用いて揺動の性質をモードごとに分解して時空間構造を解析することが可能になったため、揺動の分類をするうえで重要な電子温度密度分布を取得する Thomson 散乱計測の開発を広島大学において行った。PANTA の電子温度密度分布を一度に計測することを目的としてトリプル分光器を用いた TV Thomson 散乱計測の模擬実験を広島大学の TPD 装置で行った。初期実験の結果、実験室温度によってレーザーの光軸が数 100 μm 程度ずれるために散乱光がスリットを通過する効率が変化するため密度計測の大きな誤差になることが明らかになり、場合によっては全く計測できない状態になることも明らかになった。これらの結果より、PANTA のような数 eV 程度の低温プラズマが持つ電子温度密度分布を一度に取得するためには、実験中にレーザー光軸の調整機構を導入するシステムが不可欠であると考えられる。

トロイダルプラズマにおける乱流揺動計測データの解析手法の 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。揺動計測において高い S/N 比を実現すれば、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可能である。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。本研究では、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 比の改善を目指す。将来的に、PLATO 装置における HIBP 計測においてプラズマ中の局所乱流揺動を計測し、更に多チャンネル放射光計測の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った。調整運転を実施し、二次ビームの計測に成功した。平衡電位分布を測定し、負電場が生じていることを確認した。また、10 kHz の電位揺動が観測され、これは磁気プローブやマイクロ波干渉計にも同時刻に見られていることから、プラズマ中の電位揺動を確かに計測していることを確認した。何らかの MHD 不安定モードが観測されていると思われる。プローブビーム電流を増大して、S/N 比を上げれば、プラズマ中の乱流揺動計測が今後期待できる。

タイ国において建設され、運転が始まったトカマク TT-1 において、HIBP を設置することを検討している。本年度より、TT-1 の共同研究者と TT-1 における HIBP の設計研究を開始し、議論を進めている。来年度より、イオンガン等、必要なコンポーネントを段階的に準備する。将来的には PLATO における電位揺動データと比較し、共通する物理特性と相違点について研究する。

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、解析手法の検討を進めている。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。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、実際の揺動パターンにも依存し、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。また、直線装置 PANTA 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。

低放射化バナジウム合金の照射誘起析出の探索及び制御

核融合科学研究所 長坂琢也

1. 目的

低放射化バナジウム合金—液体リチウム冷却ブランケットは、Li-6 同位体濃縮をしなくても十分な燃料トリチウム増殖比を得ることが可能で、化学毒性が懸念されるベリリウムや鉛といった中性子増倍材も不要であるところが他の形式には無い特長である。バナジウム合金の中性子重照射実験において、照射硬化とスエリングが 30 dpa 程度までは増加するものの、それ以降は低下する、いわば照射効果の巻き戻し現象が報告されている[1]。これらの巻き戻しは、通常の熱処理では得られない照射誘起析出物 (Ti_5Si_3) の析出物の形成と同期していることから、それが照射欠陥の有効なシンクとなっていると解釈されている。このような巻き戻し現象を上手く活用すれば、重照射環境で自己回復し長寿命のバナジウム合金の開発が可能と考えられる。しかし、詳細なメカニズムは未だ不明であり、中性子重照射の機会が得られないため再現実験もなされていない。本研究では照射条件を系統的に変化させることが比較的容易な重イオン照射を用いてこのような照射誘起析出を再現することから始め、そのメカニズムを明らかにし制御すること、さらに他にも有用な照射誘起析出がないか、探索することを目的とする。

2. 実験方法

核融合炉用バナジウム合金の第一候補組成を持つ参照材料 NIFS-HEAT-2 (V-4 重量%Cr-4 重量%Ti 合金, NH2)、高純度 V-4Cr-4Ti モデル合金 (Z44) 及び、それらの強度を保ちつつ長半減期放射性核種を生成する Ti の含有量を減らした V-10Cr-1Ti 合金 (ZX1) を照射試料とした。2024 年度は応用力学研究所の重イオン照射システムを用い、照射誘起析出とスエリングが期待される 500°C で 15 dpa の Cu^{2+} イオン照射を実施した。照射後に強磁性材料ナノクラスター評価システムを用いて微細組織観察を行い、照射誘起析出とスエリングを調査した。さらに、超微小硬度計 (ナノインデント) を用いて照射硬化を評価した。

3. 実験結果と考察

微細組織、硬さともに評価が終了しているのは 500°C で 15 dpa 照射した NH2 についてであり、その結果を図 1 と図 2 に示す。図 1 より 15 dpa では微小転位ループと考えられる照射欠陥集合体は観察されたが、スエリングの原因となるボイドや照射誘起の新たな析出物は観察されなかった。図 2 より、照射材の硬さは押し込み深さ依存性が大きく一定ではないが、深さ 50~150 nm の領域に注目すると非照射に比較して 4~6 倍の硬さを示しており、高密度の照射欠陥集合体に対応する顕著な照射硬化を確認できた。今後は照射量をさらに増やし、ボイドや照射析出物の発生及び、照射効果の変化を明らかにしていく予定である。

[1] H.M. Chung, J. Nucl., Mater. 239 (1996) 139-156.

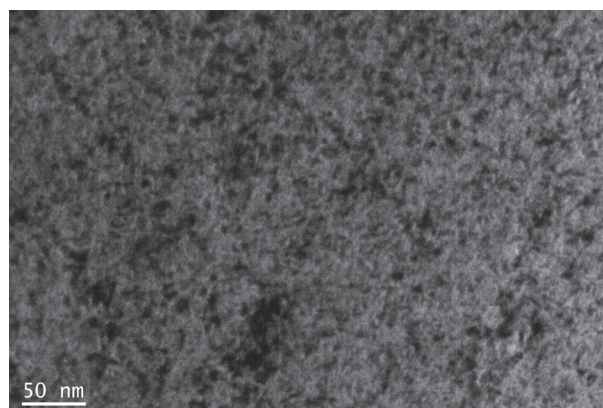


図 1 500°C で Cu^{2+} イオンを 15 dpa まで照射した V-4Cr-4Ti 合金 (NH2) で観察される照射欠陥集合体 (透過電子顕微鏡像)

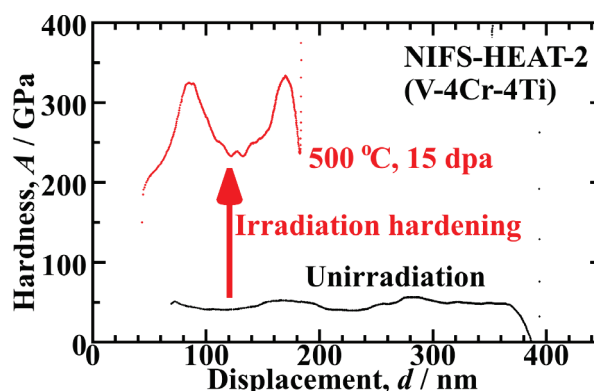


図 2 ナノインデントーション硬さの押し込み深さ依存性

画像解析による船側波形の計測技術の開発

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

波浪中の浮体や船舶に作用する流体力や動揺の計測技術はある意味完成された技術となっているが、近年の数値流体力学の進展に伴い、その結果を検証するためのより高精度な実験データが必要になって来ている。そこで切望されるデータは、浮体や船舶が造波する波や物体表面の圧力などの局所的な物理量であり、これらを計測・解析する新たな技術の開発が急務となってきている。

こうした背景を受けて実施したこれまでの共同利用研究において、光センシング技術を用いた新しい貼付型の圧力センサーを開発し、世界初の非定常圧力面分布計測に成功している¹⁾²⁾³⁾⁴⁾。その中で、水面を出入りする圧力センサーについては別途計測される船側波形を用いた処理が必要で、かつその計測精度が重要であることが分かってきた。そこで本研究では、高速度カメラを使用した船側波形を非接触で高精度に計測する新しい計測法を開発することを主目的とした研究を展開する。

また、使用する供試模型として従来船型の RIOS bulk carrier 模型船に加え、近年開発された短波長領域で抵抗増加低減が見られるという船首形状を持つ船型の 2 船型を用いた。船首形状の異なる船舶においても船側波形の計測に従来の画像解析手法が行えるか確認を行うと同時に、各船型における船体運動、抵抗増加、船体表面圧力等の計測も実施した。

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
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 2 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 2 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 2 年	実験補助
武本 昂大	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
春田 海里	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
沖 帆志隆	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

3. 実験の概要

2024 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。本実験で使用した供試模型船は、これまで使用してきた硬質発泡ウレタン製の RIOS bulk carrier 模型船と短波長領域で抵抗増加低減が見られる船首形状を持つ bulk carrier 模型船の 2 隻である。これら 2 船型は排水量は同一であり、喫水線以下は同形状で船首部のフレア部分のみが異なっている。以降は従来の RIOS bulk carrier 模型船を A 船型 (Type A)、短波長領域で抵抗増加低減が見られる船首形状を持つ船型を B 船型 (Type B) と呼称する。実験概要としてはこれら両船型の右舷側の ord. 9.5, ord. 9.75, stem 部分に歪式圧力センサを埋め込み右舷側と左舷側の一部には容量式波高計を設置し運動計測試験、強制動揺試験および波強制力試験を実施し、船側波形および圧力等を計測する。今回の実験では縦切り波形の計測も行っており、船体側面から 100mm 離れた位置に 6 本の容量式波高計を設置し船側波形や圧力の計測と同時に計測を行っている。また、縦切り波形の他に入射波の計測も行っている。

画像解析においては 2 種類の計測法を実施し、ステレオ画像解析を用いた Multifold 法では地上にカメラ 2 台と 6 台のレーザー墨出し器を設置し、断面追尾法においては曳航電車に 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 台を設置して計測を行った。

また、高速度カメラにて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黒色のテープまでのピクセル数が計測され、その後ピクセル数から実際の距離に変換することで船側波形の計測を行う。

3.1. 供試模型

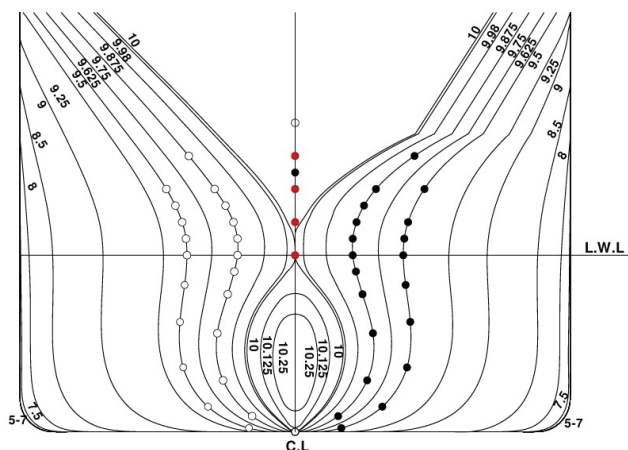
本実験で使用した供試模型を Fig. 1 に示す。また、Table. 1 に A 船型、B 船型の主要目及び Fig. 2 に船首部分の body plan を示す。また、body plan には歪式圧力センサの埋め込み位置も示しており 2 船型どちらにおいても ord. 9.5, ord. 9.75, stem の 3 断面の計 28 個埋め込みを行っている。A 船型 (左側) は白丸、B 船型 (右側) は黒丸で示しており、stem 部分における共通の埋め込み位置に関しては赤丸で示している。



Fig. 1: 供試模型 (上側:A 船型, 下側:B 船型)

Table 1: 供試模型主要目

L_{pp}	(m)	2.40
A_W	(m^2)	0.835
B	(m)	0.400
$x_B (= x_G)$	(m)	0.0510
d	(m)	0.128
KG	(m)	0.115
C_b		0.800
KB	(m)	0.662
∇	(m^3)	0.0983
κ_{yy}/L		0.250



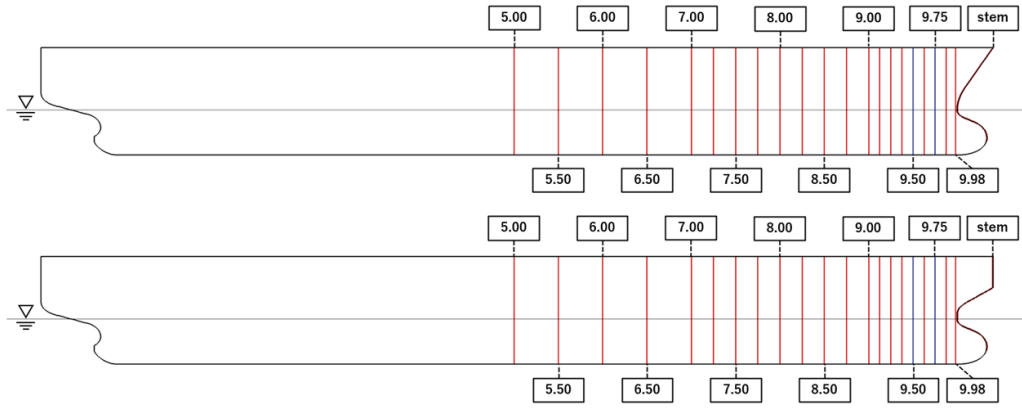


Fig. 3: 容量式波高計設置断面 (上側:A 船型, 下側:B 船型)

3.3. 高速度カメラによる船側波形計測

撮影に使用したカメラはDITECT 社製ハイスピードカメラ「HAS-U2(Fig. 4)」である．また，撮影時のカメラのコンディションを，Table. 2に示す．撮影にはDITECT 社製撮影ソフト「HAS-Xviewer」を使用し，撮影した映像の解析にはDITECT 社製画像解析ソフト「DIPP-MOTIN V/3D」を使用した．

カメラによる船側波形計測の方法としては，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画像解析における船側波形計測の仕組みである．従来は喫水線から黒色のテープまでの距離は実際に定規で測定した値を使用していたが，今回の実験では静水中における喫水線から黒色のテープまでの距離をカメラにて測定しその数値を基準として解析を行った．



Fig. 4: Camera(HAS-U2)

Table 2: Camera condition

No	項目	設定値
1	フレームレート [fps]	100
2	画面サイズ	1600 × 1200
3	シャッタースピード [s]	1/100(OPEN)
4	計測フレーム [f]	800
5	トリガーモード	Start & Positive

3.4. 運動計測試験

運動計測試験で使用した装置，計測システム図をそれぞれ Fig. 5, Fig. 6 に示す．運動計測装置においては模型船に作用する運動 (surge, heave, pitch) 及び前後のロッドに取り付けられたひずみゲージで船体長手方向にかかる抵抗値を計測している．トリガーはカメラ操作ソフトウェアがインストールされた PC と電気系のデータ収録器の両方に配線されており，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．本計測試験では $F_n = U/\sqrt{gL} = 0.18$ で模型船を曳航して実験を行っており，静水中と波浪中それぞれにおいて複数回航走し計測を行っている．

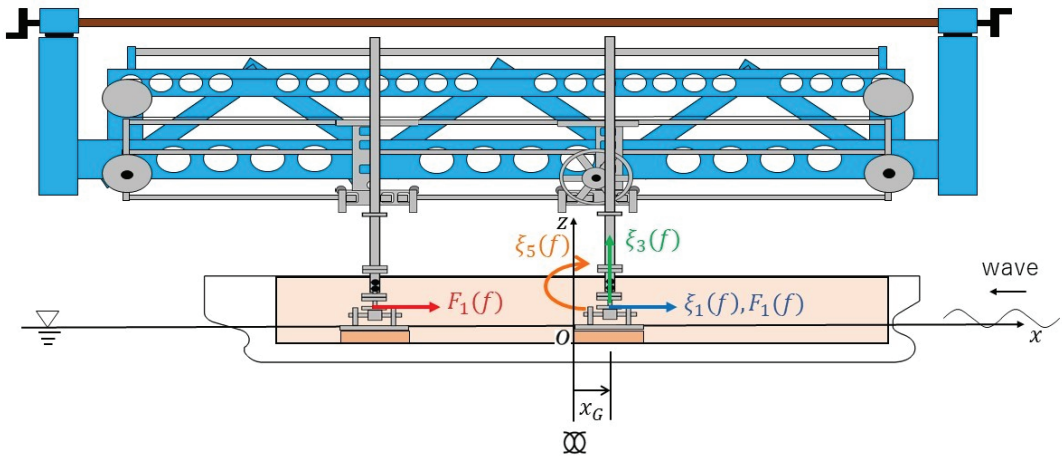


Fig. 5: 運動計測装置概略図

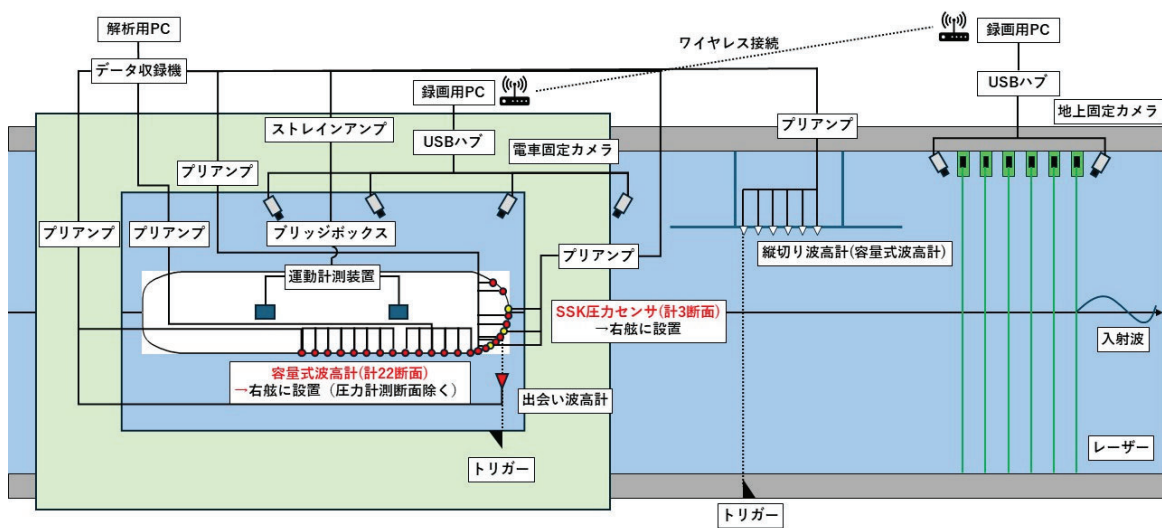


Fig. 6: 運動計測試験における計測システム図

3.5. 強制動揺試験および波強制力試験

強制動揺試験で使用した装置、計測システム図をそれぞれ Fig. 7, Fig. 8 に示す。強制動揺試験では2つのロードセルに検力計を接続し、これらを介して強制動揺装置と模型船を接続している。模型船の fore 側に接続した検力計からは surge, heave, pitch 方向への力を、aft 側に接続した検力計からは surge, heave 方向への力を計測している。トリガー等のシステムは運動計測試験と同様であり、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。また、強制動揺試験においても $F_n = U/\sqrt{gL} = 0.18$ で実験を行っており、静水中と波浪中それぞれにおいて複数回航走し計測を行っている。

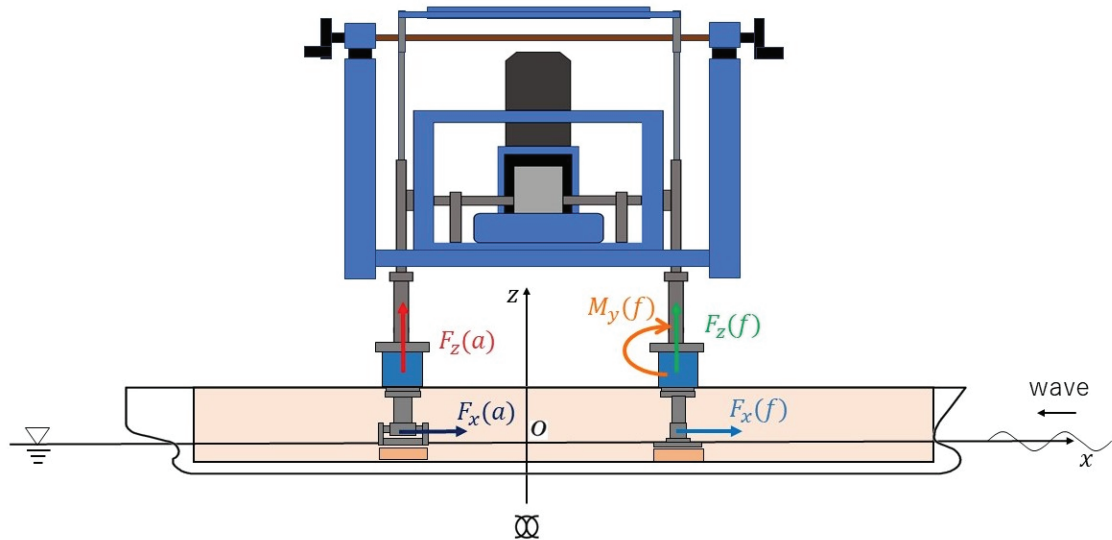


Fig. 7: 強制動揺装置概略図

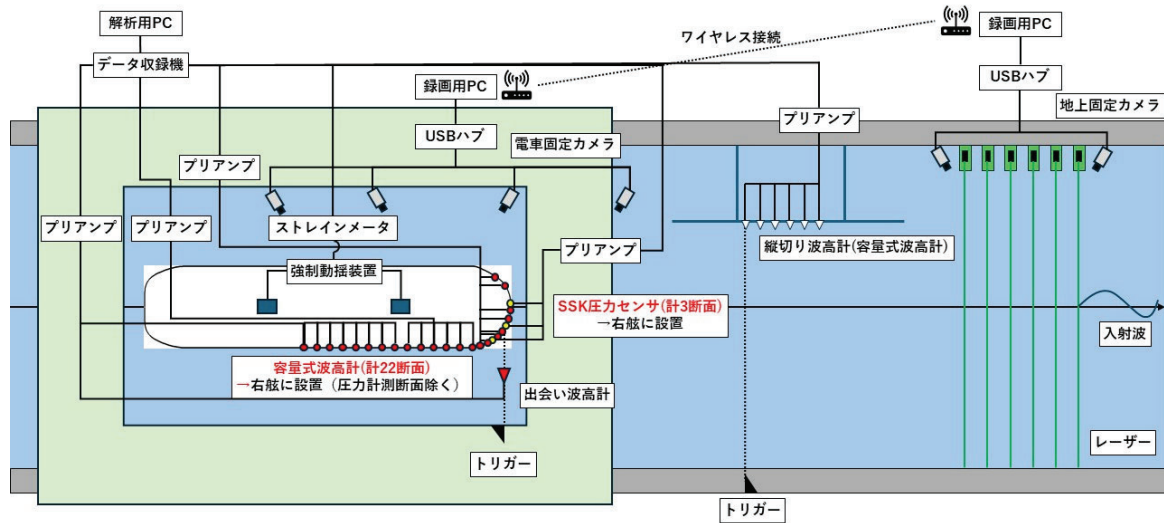


Fig. 8: 強制動揺試験における計測システム図

続いて本実験の計測条件について、Table.3 に示す. 強制動揺の heave, pitch の振幅はそれぞれ 0.01(m), 1.337(degs.) であり, 波強制力試験, 運動計測試験においては正面向い波で, 船体中心軸から左舷方向に $y = 320\text{mm}$ の位置に地上波高計 (縦切り波高計) を設置し地上波の計測を行った. 計測回数は運動計測試験においてはそれぞれの条件下で 2 回以上, 強制動揺試験, 波強制力試験においてはそれぞれの条件下で一回以上計測を行った.

Table 3: 実験条件

計測試験	フルード数	波向き	$\lambda/L (K_e L)$
運動計測試験	$F_n=0.18$	$\beta=180$ degs.	0.3,0.4,0.5,0.6,0.7,0.8,0.9,1.0,1.15,1.25
強制 heave 試験	$F_n=0.18$	-	0.5(33.72),0.7(21.27),0.9(15.20),1.2(10.44)
強制 pitch 試験	$F_n=0.18$	-	0.5(33.72),0.7(21.27),0.9(15.20),1.2(10.44)
波強制力試験	$F_n=0.18$	$\beta=180$ degs.	0.5,0.7,0.9,1.2

4. 結果と考察

続いて、本研究にて得られた実験結果を以下に示す。

4.1. 船体運動

Fig. 9 に本実験の運動計測試験で得られた 2 隻の船体運動の結果を示す。また、過去の実験結果として A 船型における 2012 年、2015 年度の結果も示している。Fig. 9 の縦軸は左から surge, heave, pitch のそれぞれの運動の無次元値と位相を示しており、横軸は波長船長比 λ/L を示している。Fig. 9 からわかるように、今回の実験結果では船体運動について 2 隻の模型船の間では大きな差はみられなかった。また surge, heave, pitch のいずれも過去の実験結果と合致していることが確認できる。

4.2. 波浪強制力

Fig. 10 に本実験の波強制力試験で得られた 2 隻の波浪強制力の結果を示す。また、過去の実験結果として A 船型における 2012 年の結果を示している。縦軸は左から surge, heave, pitch の方向への波強制力と位相を示している。横軸は波長船長比 λ/L である。こちらも波強制力の結果を確認すると 2 隻の模型船の間では大きな差はみられず、過去の実験結果とも合致していることが確認できる。

4.3. 付加質量および減衰力係数

Fig. 11, 12 に強制動揺試験で得られた 2 隻の付加質量および減衰力係数の結果を示す。また、過去の実験結果として A 船型における 2012 年の結果を示し、数値計算による結果も示している。高周波数域においては 2 隻の模型船の間では大きな差がなく合致していることが確認でき、低周波数域になると A35, A53, B53 などにおいて 2 隻の間に相違が確認できる。

4.4. 船体表面非定常圧力

続いて Fig. 13~16 に強制動揺試験、波強制力試験、運動計測試験にて得られた一次の非定常圧力分布の結果を示す。縦軸は上段が一次の非定常圧力の複素振幅の無次元値、下段が位相を示している。また、横軸は ord.9.5, ord.9.75 においては keel 位置を 0 度、喫水位置を 90 度としたときの角度を示しており、stem においては keel 位置を基準としたときのガース長を表している。A 船型、B 船型の結果はそれぞれ図中青線、赤線でそれぞれ示している。また、ここでは結果の一例として $\lambda/L = 0.7$ における結果を示している。結果を確認すると $\lambda/L = 0.7$ では $\theta = 90$ degs. から最大濡れ面波面にかけて B 船型の方が変動圧力振幅が小さいことが確認できる。また、位相に関しては強制 heave 試験においては平水中の波面付近において相違がみられた。

4.5. 波浪中抵抗増加

運動計測試験での歪式ゲージより得られた抵抗増加を Fig. 17 に示す。縦軸は抵抗増加の計測値を無次元化したものであり、横軸は波長船長比 λ/L である。なお、入射波振幅を 12mm とした計測した際抵抗増加のばらつきが大きくなったためここでは入射波振幅を 20mm としたときの波浪中抵抗増加の結果を示している。Fig. 17 を見ると短波長域で B 船型の方が若干ではあるが抵抗増加が小さくなっていることが分かる。

Fig. 18~21 には強制動揺試験、波強制力試験、運動計測試験において船体表面に設置した歪式圧力センサより得られた波浪中抵抗増加分布を示す。こちらも先程の船体表面非定常圧力の結果と同様 $\lambda/L = 0.7$ における結果を示している。抵抗増加の寄与が大きい stem に着目すると、B 船型の方が小さいという傾向が見られ特に運動計測試験により得られた結果からは顕著に現れていることが分かる。

4.6. 画像解析による船側波形計測

Fig. 22, Fig. 23 に地上固定カメラにより得られた 2 船型における運動計測試験での船側波形の計測結果を示す。縦軸は計測された波形データであり、上からフーリエ級数展開時の $\cos$ 成分, $\sin$ 成分, 定常成分である。また、横軸が船体中央を原点とする船体長手方向座標である。ただし、 $\cos$ 成分, $\sin$ 成分は入射波振幅で無次元化されていることに注意する。座標は船首方向を正とし、半船長で無次元化されている。グラフの赤線がカメラの計測結果であり、緑色のプロット点が容量線による計測結果である。また、ここでは結果の一例として $\lambda/L = 1.25$ における結果を示している。A 船型においては船首付近の $\cos 1$ 次成分, $\sin 1$ 次成分にて相違が確認されるが、定常成分においては良い合致が見られる。B 船型においても容量式波高計とは比較的合致していることが分かる。ただ A 船型と比較して定常成分の船首付近にて相違が確認されるが、これは B 船型のフレアのナックル部分の影響によるものであると考えられる。

続いて、Fig. 24, Fig. 25 に 2 船型において断面追尾法により得られた船側波形の結果を示す。図中赤丸がカメラによる結果を緑色のプロットが容量線による結果である。縦軸および横軸は Fig. 22, Fig. 23 と同じである。

5. おわりに

本研究にて得られた成果を以下に示す。

- (1) 本研究では、画像解析による船側波形計測手法の有効性と課題を検討した。その結果、容量式波高計による計測結果と概ね一致し、画像解析手法の再現性を示した。更に、解析周期の一致により更なる一致度の向上が確認された。しかし、一部の計測結果ではばらつきが生じ、画像解析プロセスにおける誤差、特に波浪条件、照明環境、撮影解像度の影響が示唆された。船型の違いも精度に影響し、Type B のようなナックルラインを持つ船型では、船首付近の波面検出が困難となることが明らかとなった。容量式波高計も真値計測に課題があるため、今後の課題は、高画質カメラや計測回数の増加による精度向上などが挙げられる。
- (2) 船首形状の異なる 2 隻の模型船において船体運動および波浪強制力に大きな差は見られなかったが、流体力係数においては特に低周波数域にて相違が確認された。また船体表面に設置した歪式圧力センサから得られた結果から、抵抗増加低減が見込まれる B 船型において、強制動揺試験、波強制力試験の added pressure 分布の比較を通して特に波強制力試験での試験結果で B 船型の added pressure が小さくなることが確認でき、抵抗増加低減に特に diffraction 問題での船体表面圧力の相違が寄与していることが分かった。加えて、非定常圧力の振幅においては、同調点近傍になるほどより B 船型の方が大きい値となる傾向や、非定常圧力の位相については、B 船型のナックル部分による碎波現象により、平水中の波面付近で A 船型との相違が見られた。

参考文献

- 1) Iwashita, H., Kashiwagi, M.: An Innovative EFD for Studying Ship Seakeeping, Proceedings of the 33rd IWWFEB, 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
- 3) Kurniawan T. Waskito, Masashi Kashiwagi, Hidetsugu, Iwashita, Munehiko Hinatsu: Prediction of Nonlinear Wave Loads Using Measured Pressure Distribution on Ship Hull, Applied Ocean

- 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

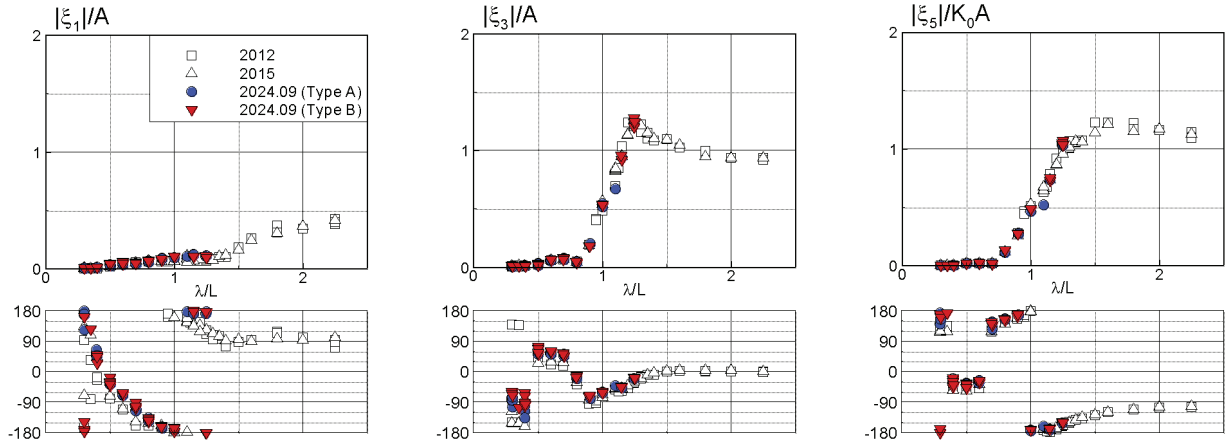


Fig. 9: 船体運動

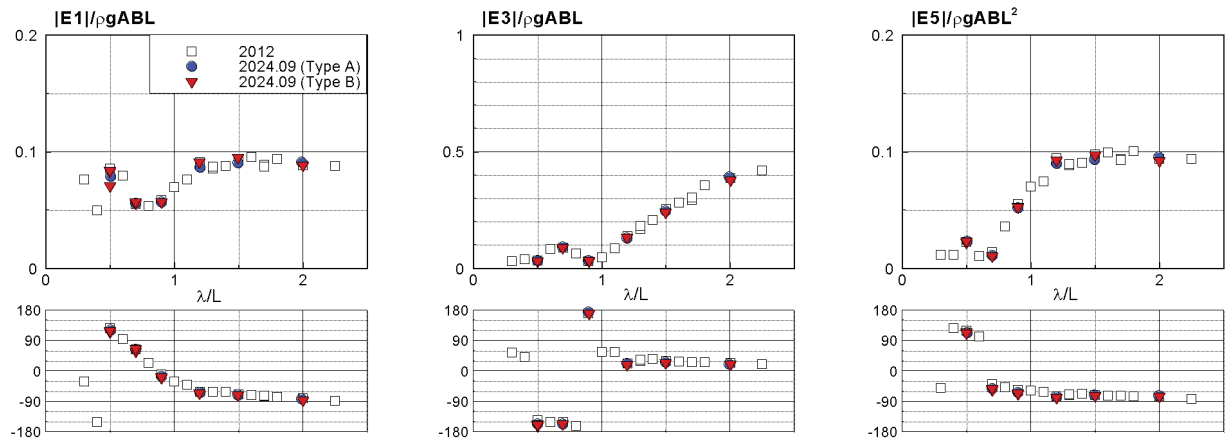


Fig. 10: 波浪強制力

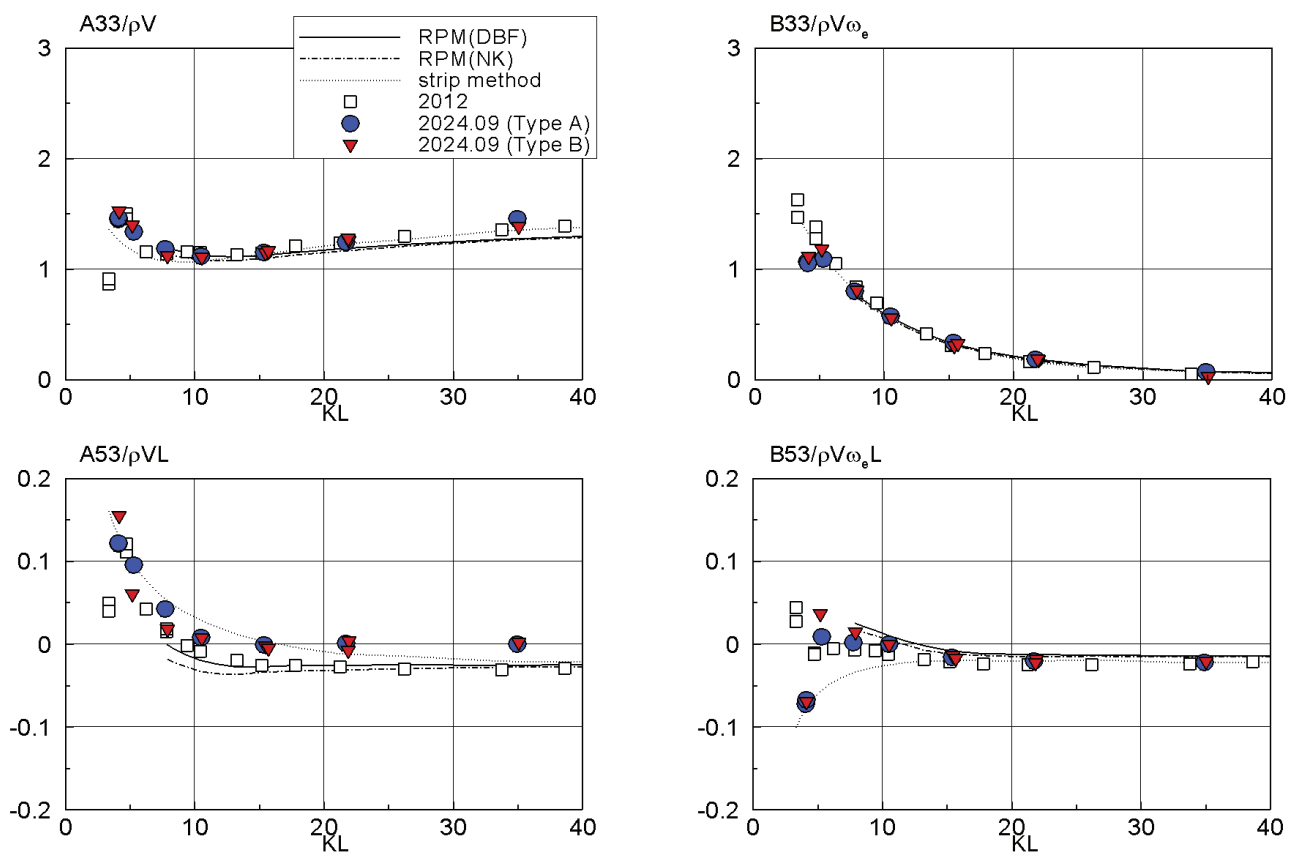


Fig. 11: 強制 heave 試験における付加質量および減衰力係数

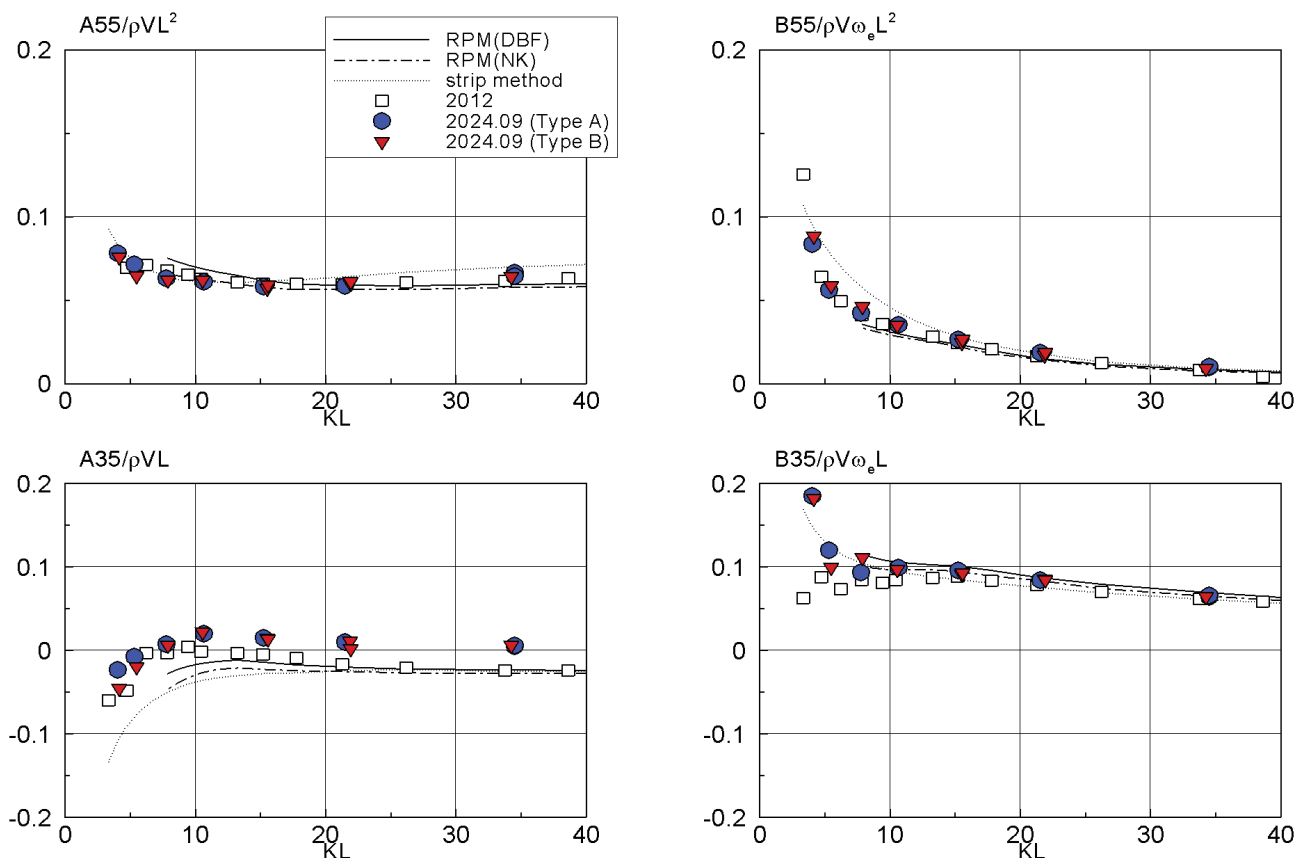


Fig. 12: 強制 pitch 試験における付加質量および減衰力係数

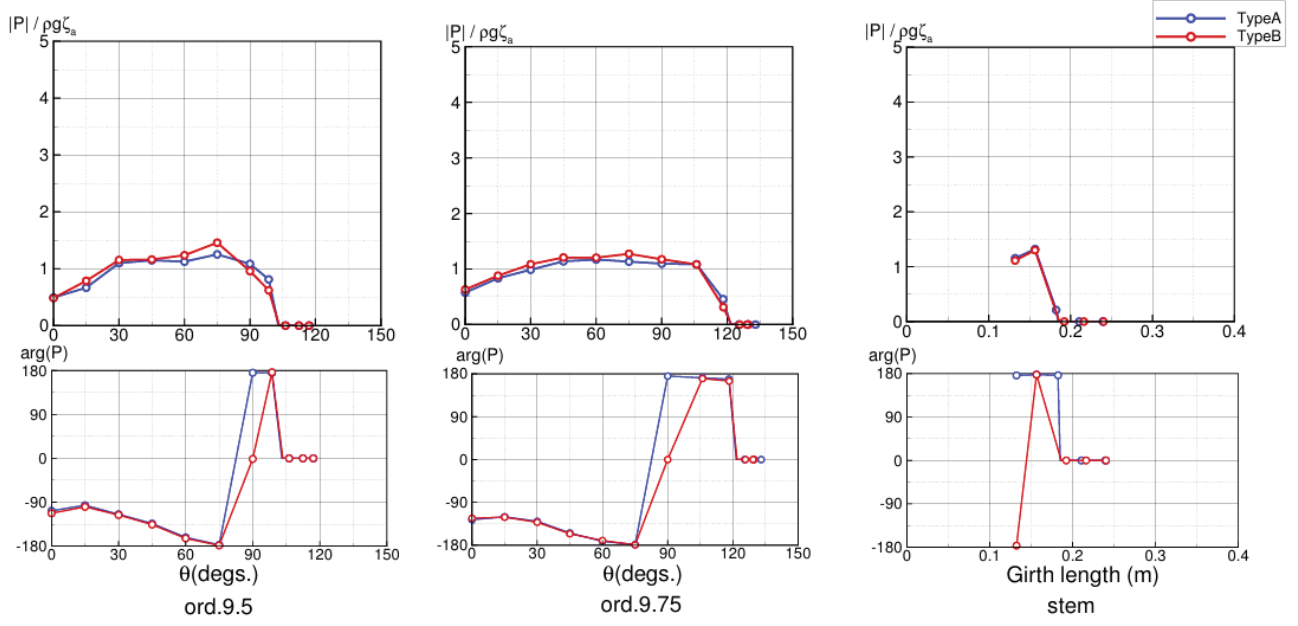


Fig. 13: 強制 heave 試験における船体表面非定常圧力, ($F_n=0.18$, $K_e/L = 21.27$)

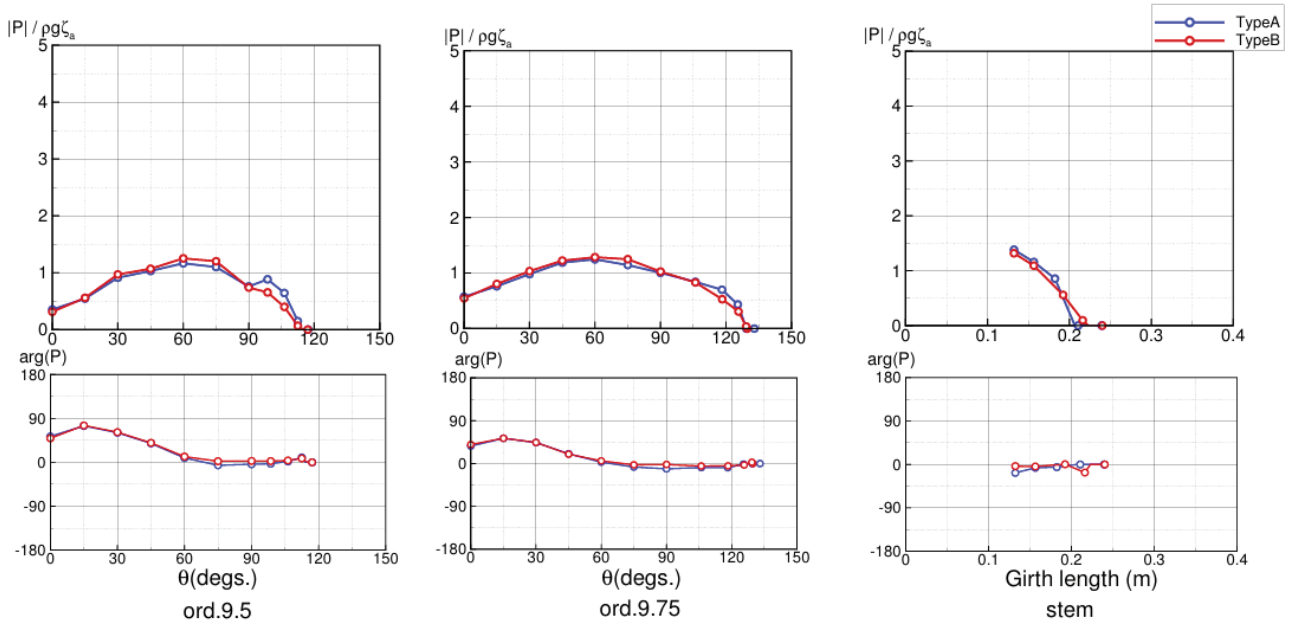


Fig. 14: 強制 pitch 試験における船体表面非定常圧力, ($F_n=0.18$, $K_e/L = 21.27$)

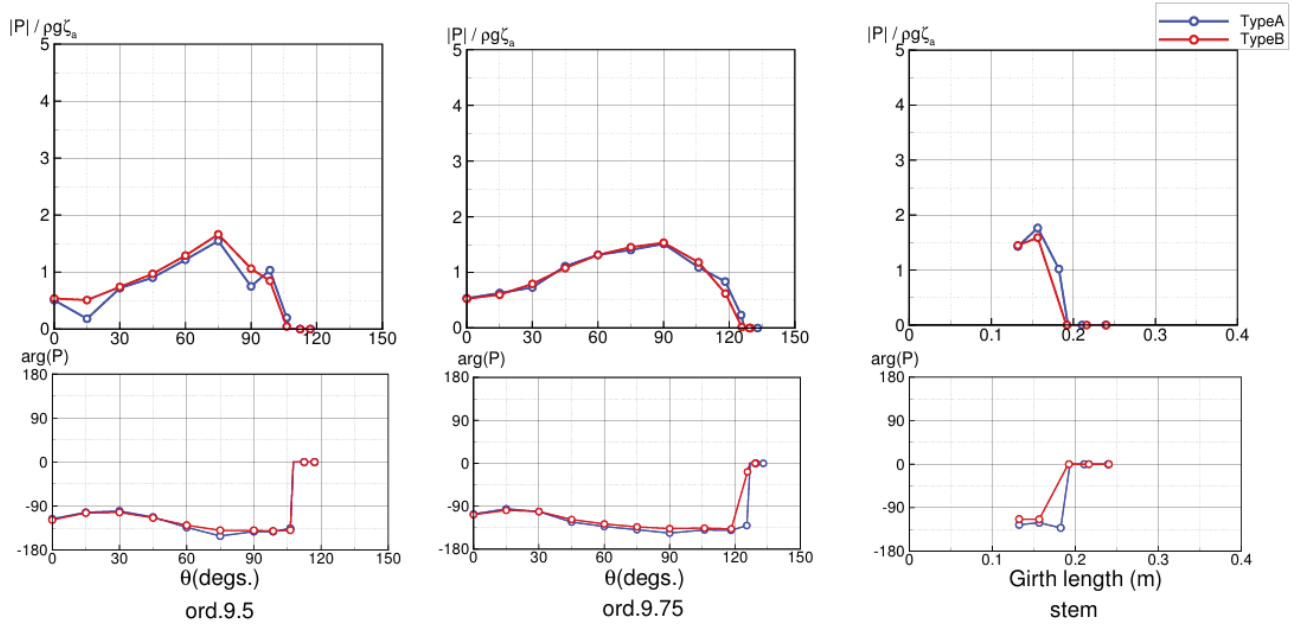


Fig. 15: 波強制力試験における船体表面非定常圧力, ($F_n=0.18$, $\lambda/L = 0.7$, $\beta=180$ (deg.))

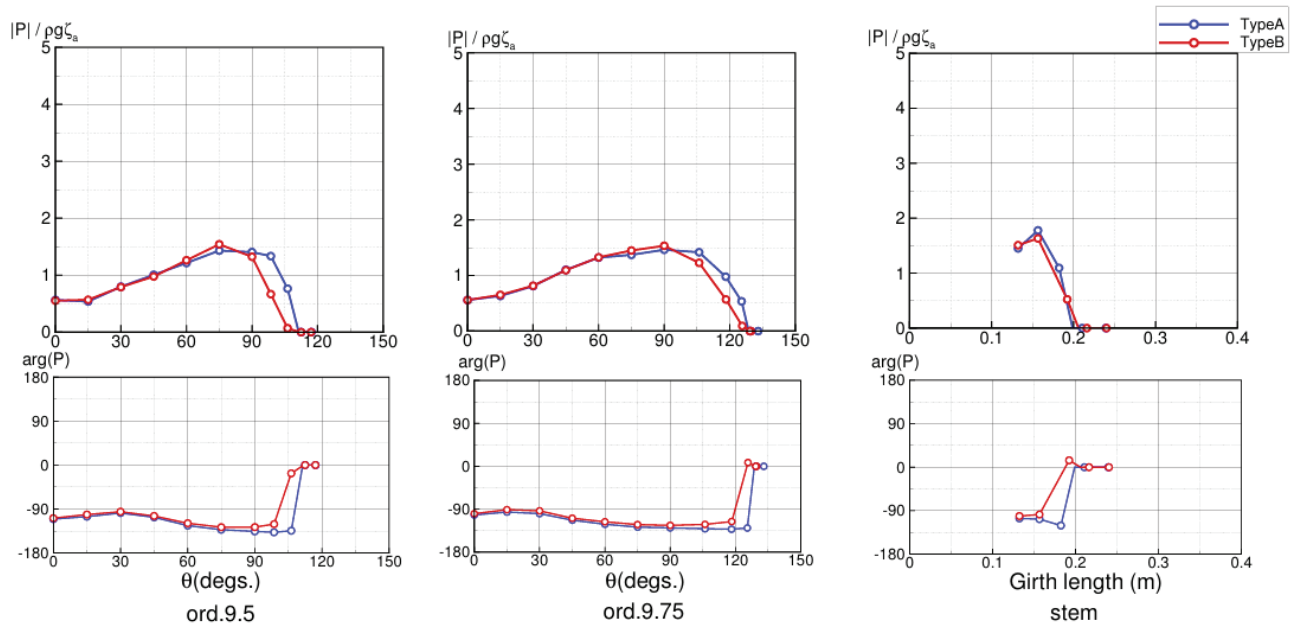


Fig. 16: 運動計測試験における船体表面非定常圧力, ($F_n=0.18$, $\lambda/L = 0.7$, $\beta=180$ (deg.))

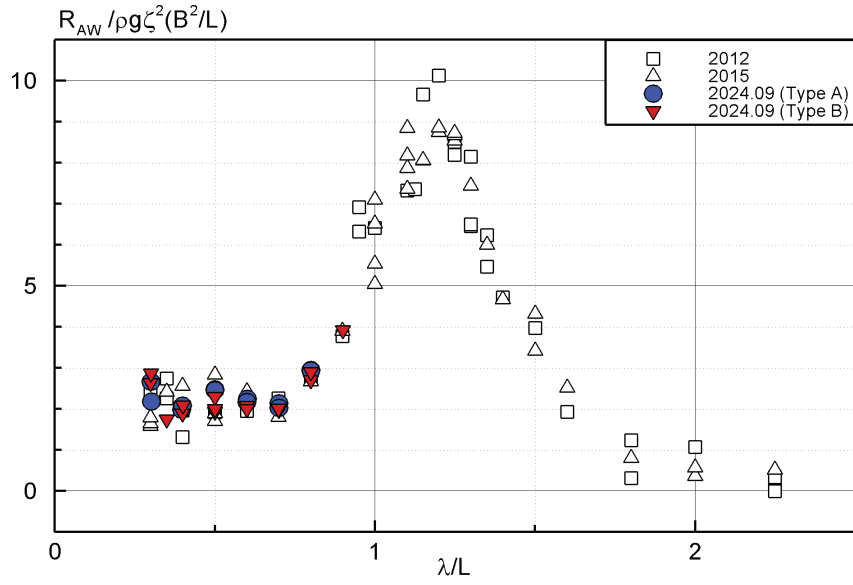


Fig. 17: 波浪中抵抗増加

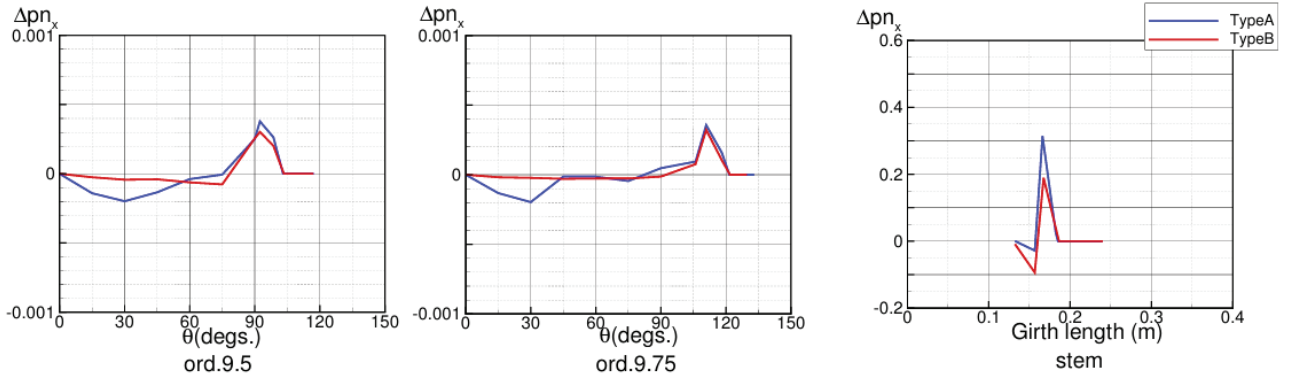


Fig. 18: 強制 heave 試験における波浪中抵抗増加分布, ($F_n=0.18$, $K_e/L = 21.27$)

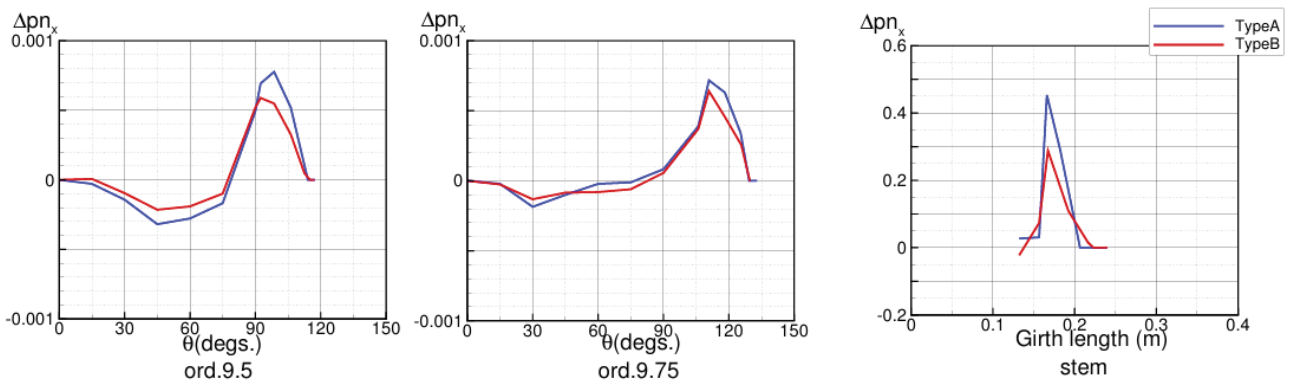


Fig. 19: 強制 pitch 試験における波浪中抵抗増加分布, ($F_n=0.18$, $K_e/L = 21.27$)

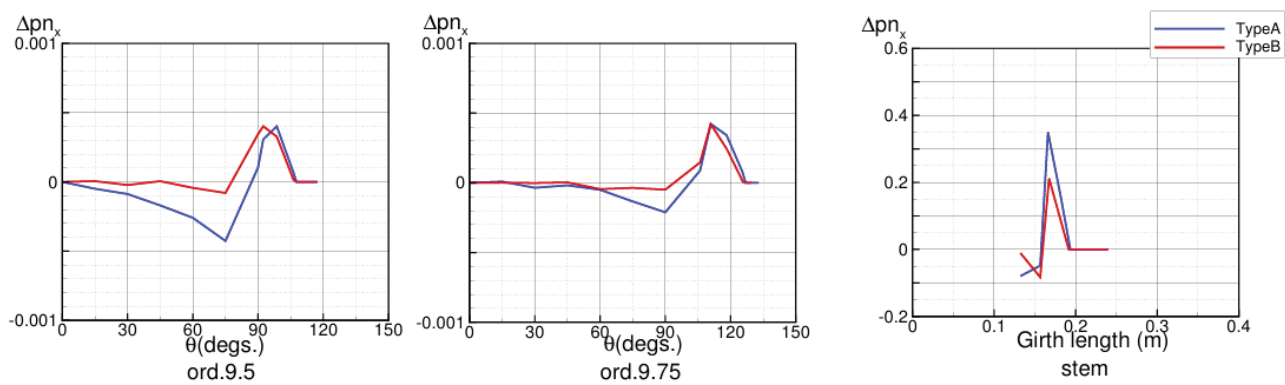


Fig. 20: 波強制力試験における波浪中抵抗増加分布, ($F_n=0.18$, $\lambda/L = 0.7$, $\beta=180$ (deg.))

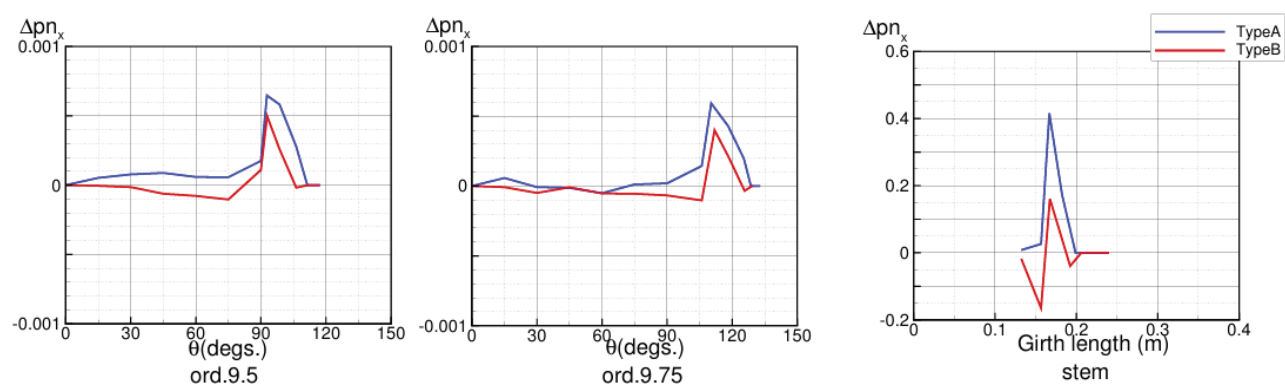


Fig. 21: 運動計測試験における波浪中抵抗増加分布, ($F_n=0.18$, $\lambda/L = 0.7$, $\beta=180$ (deg.))

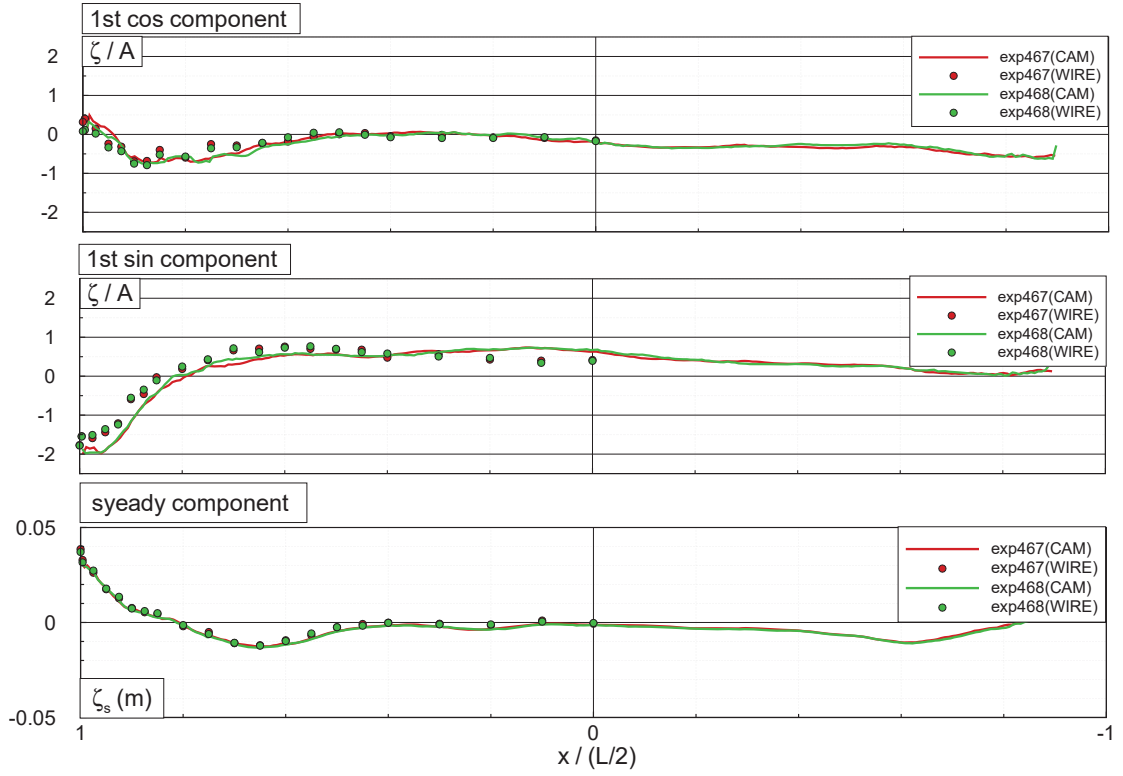


Fig. 22: Steady and Unsteady wave profile of Type A at $F_n = 0.18$, $\lambda/L = 1.25$, $\beta = 180$ (degs.)

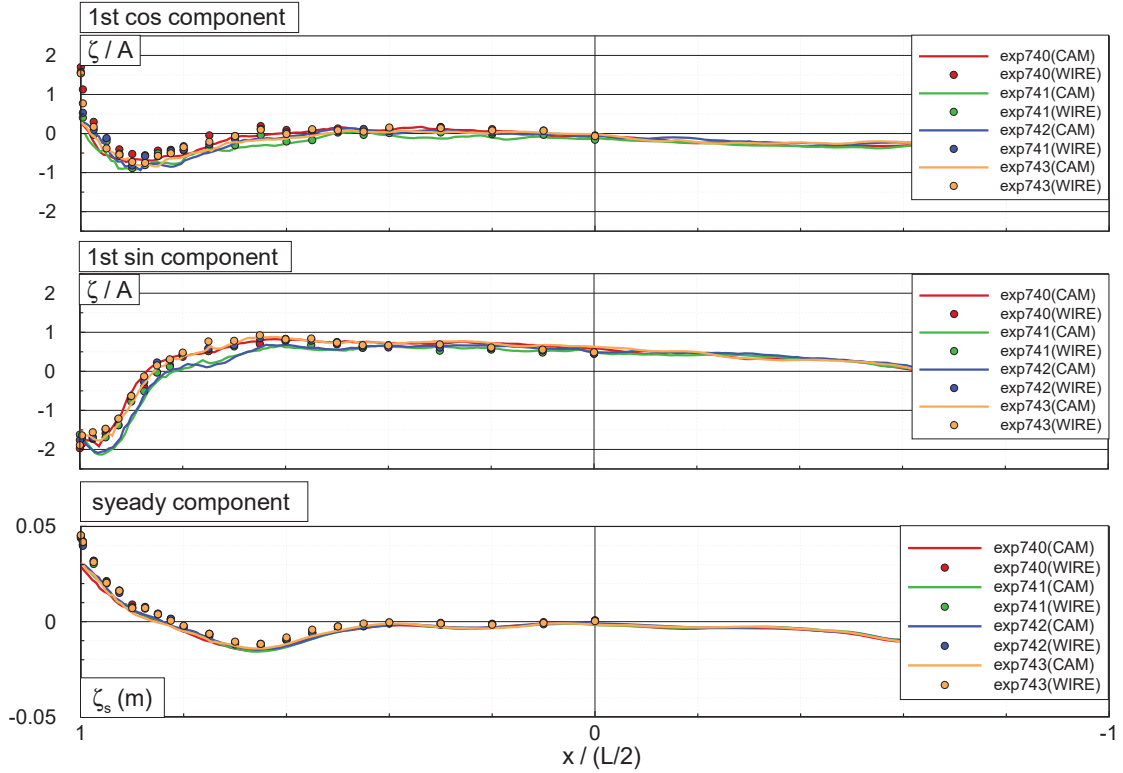


Fig. 23: Steady and Unsteady wave profile of Type B at $F_n = 0.18$, $\lambda/L = 1.25$, $\beta = 180$ (degs.)

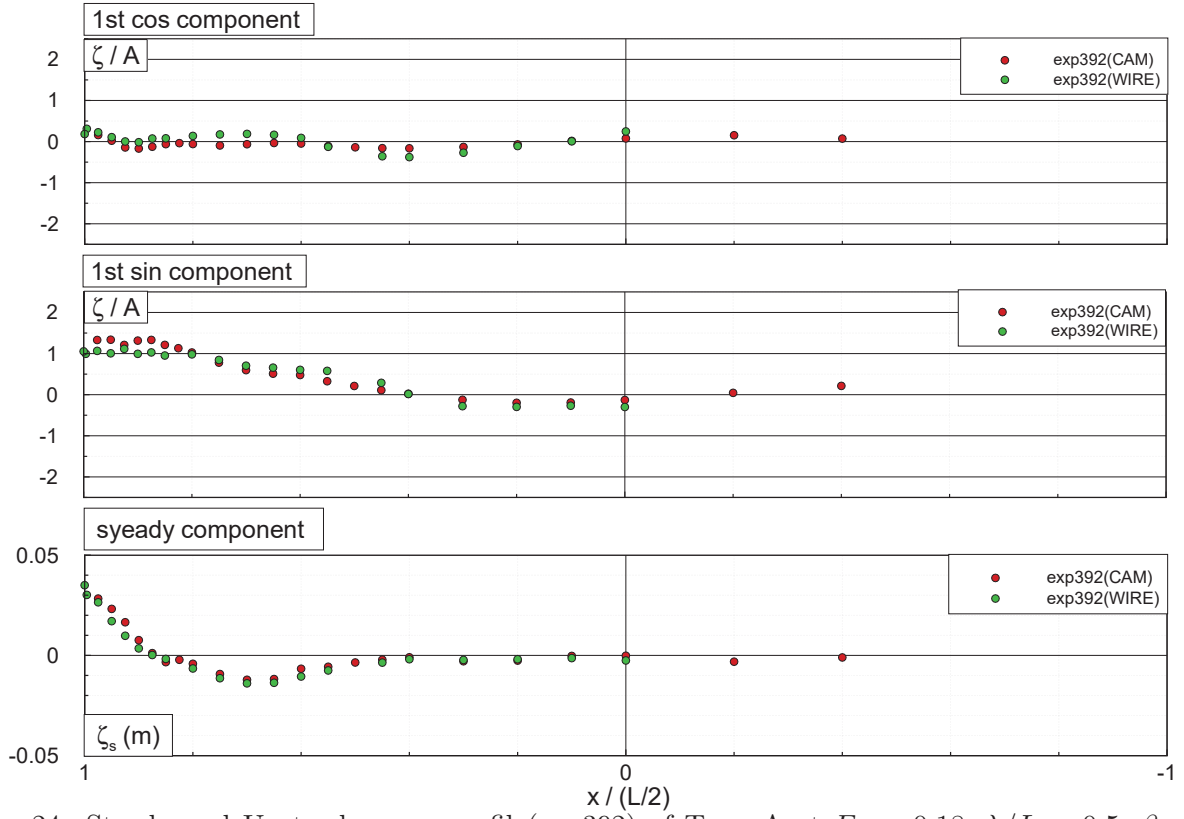


Fig. 24: Steady and Unsteady wave profile(exp392) of Type A at $F_n = 0.18$, $\lambda/L = 0.5$, $\beta = 180$ (degs.)

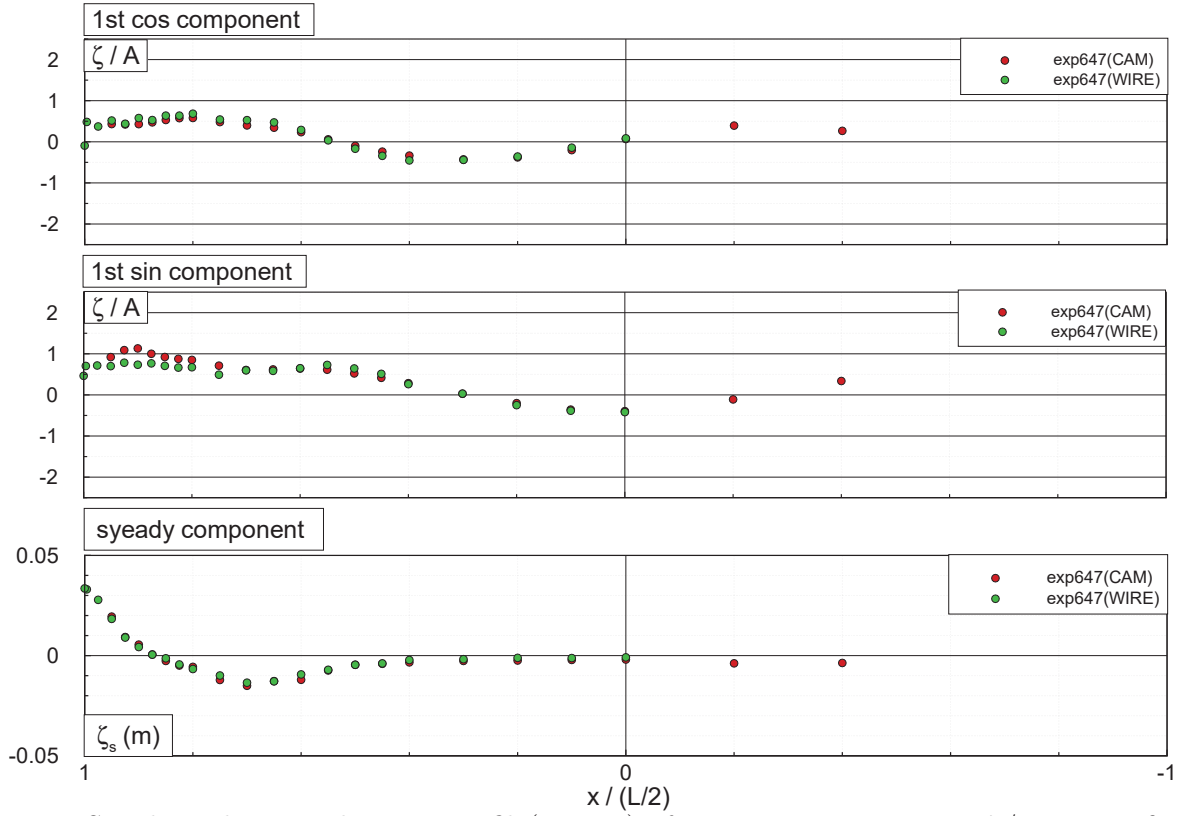


Fig. 25: Steady and Unsteady wave profile(exp647) of Type B at $F_n = 0.18$, $\lambda/L = 0.5$, $\beta = 180$ (degs.)

電気ウナギを模倣した積層ハイドロゲル電池を用いた機械的エネルギー変換システムの構築

崇城大学工学部機械工学科 中牟田侑昌

【緒言】従来の生体内に埋め込むタイプのバッテリーは生体組織と比較した際、非常に硬いものが多く、生体適合性と力学特性の両立を考慮して設計されたものが少ないように思われる。そのような中、近年、電気ウナギの発電器官を模倣した積層ハイドロゲル電池が開発された¹。優れた柔軟性と起電力が示されており、インプラントやウェアラブル製品等の新たな電源として可能性が示唆されている。しかしながら、ゲル電池の構造と電力特性の関係や力学特性、エネルギー変換機構を担う電池としての機能については明らかにされていない。そこで本研究では、ゲル電池内の NaCl 濃度と電力特性の関係を解明することで電池の高出力化を行い、ゲル電池の力学特性を解明することで積層ハイドロゲル電池を動力源とする機械エネルギー変換システムの構築について検討を行った。

【実験方法】アクリルアミドに NaCl などを混合した 4 種類の溶液を作製し、紫外線硬化剤を添加後、UV 照射によりゲル化させることで電池を構成するゲルを作製した。ゲル化にはアクリル板で作製した型を用いており、各ゲルのサイズは直径約 6 mm、厚さ約 2 mm である。次に、4 種類のゲルを順番に積層させることで積層ハイドロゲル電池を作製した。電力特性の測定においては、従来の小型走行ロボット等で使用されている小型のバッテリーと同等のサイズのゲル電池を作製し、直列回路と並列回路それぞれで最長 30 分間の電力特性を測定した。マルチメーター(HIOKI 社製 DT4282)を接続し、電圧と電流を測定している。また、NaCl の濃度を変更したゲル電池を作製し、NaCl 濃度が異なるゲル電池の電力特性を測定することでゲル電池内の NaCl 濃度が電力特性に及ぼす影響について検討した。そして、ゲル電池を構成するゲルに対して卓上型引張圧縮試験機(島津製作所 EZ-Test EZ-LX)による圧縮試験を実施した。応力ひずみ関係や圧縮弾性率を評価し、小型走行ロボットを用いた走行試験において運用可能な力学特性を有しているか検討を行った。

【結果と考察】ゲル中の NaCl 濃度を変更し、NaCl 濃度が異なるゲル電池の電力特性を比較したところ、濃度の増加とともに電流値及び電圧値の向上が確認された (Fig.1,2)。NaCl の濃度を増加させることで電力特性の向上が期待できると考えられる。ただし、NaCl 濃度向上により、電力特性が急速に低下する結果も確認されており、電解質変更や電池構造改良等が必要と考えられる。そして、各ゲルの力学特性を評価したところ、全てのゲルにおいて先行研究と同等または大幅な数値の向上が確認され、非常に優れた力学特性を示した (Fig.3)。NaCl 濃度の変更は力学特性に影響しないと考えられ、また、耐衝撃性も優れていることから小型走行ロボット等の走行試験においては、優れた力学特性を発揮し、屋外運用も可能であると考えられる。今後は得られた知見をもとに機械エネルギー変換システムを構築する予定である。

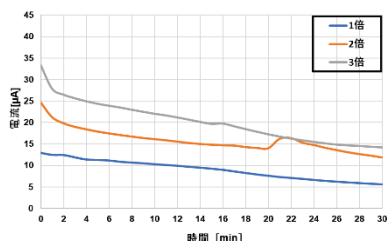


Fig.1 単電回路の電流の変化

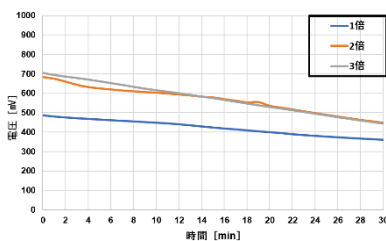


Fig.2 単電回路の電圧の変化

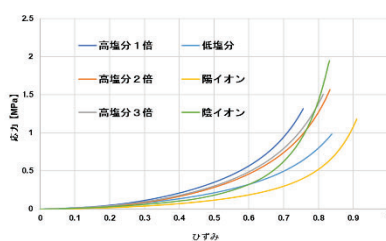


Fig.3 各ゲルの応力ひずみ図

【研究成果報告】本研究成果は 2024 年度に査読付き原著論文として学術誌に掲載されている²。また、国際会議を含む学術会議にて 5 件の発表を行った。

1 Thomas B.H Schroeder et al.: An electric-eel-inspired soft power source from stacked hydrogels, Nature552,214-218(2017).

2 元山斗夏良, 中牟田侑昌, 東藤貢.: 電気ウナギの発電器官を模倣した積層型ハイドロゲル電池の基礎研究. 臨床バイオメカニクス, 45 巻, pp.169-173, 2024.

κ -Ga₂O₃系混晶および超格子構造に関する第一原理計算

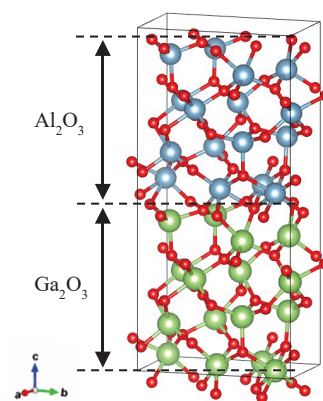
三重大学大学院工学研究科 河村貴宏

研究背景・目的

Ga₂O₃は約 5 eV の大きなバンドギャップを持つことから次世代の高周波、高出力デバイス用材料として注目されている。Ga₂O₃には α 、 β 、 γ 、 δ 、 κ の 5 つの構造多形が存在するが、その中でも κ -Ga₂O₃ は唯一強誘電体特性を持つため、他の構造とは異なる用途への応用が期待されている。しかしながら、 κ -Ga₂O₃ は研究の歴史が浅く、結晶成長技術の向上と共にその基本的特性の理解が必要である。そこで本研究では第一原理計算を用いて κ -Ga₂O₃/Al₂O₃ 超格子の電子構造解析を行い、格子歪みと超格子の組成、層厚がバンド構造に与える影響について検討を行った。

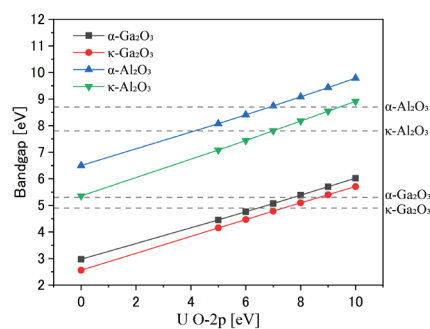
計算方法

計算には、第一原理計算プログラム Quantum ESPRESSO を用いた。図 1 にそれぞれ 40 原子で構成される κ -Ga₂O₃ と κ -Al₂O₃ を c 軸方向に積層させた κ -Ga₂O₃/Al₂O₃ 超格子モデルを示す。全方向に周期境界条件を適用することで、c 軸方向に Ga₂O₃ と Al₂O₃ が周期的に積層した超格子構造となる。この κ -Ga₂O₃/Al₂O₃ 超格子が κ -Ga₂O₃ または κ -Al₂O₃ 基板上に成長した際に基板拘束による格子歪みを受けた状態を想定して、ab 面内に 2 軸歪みが加わった状態のバンド構造および状態密度解析を行った。

図 1 κ -Ga₂O₃/Al₂O₃ 超格子の計算モデル

結果および考察

第一原理計算により求められたバンドギャップは、一般的に過小評価されることが知られている。本研究では現実的な値を得るために、DFT+U 法による補正を行った。この手法では、経験的に決められた U パラメータを設定する必要があるため、まずは適切なパラメータの検討を行った。 α および κ -Ga₂O₃ と α および κ -Al₂O₃ を対象にして、O-2p 軌道に設定した U パラメータとバンドギャップの関係を図 2 に示す。図中の破線は、Ga₂O₃ と Al₂O₃ のバンドギャップの報告値を示している。このような検討を行った結果、Ga-4s 軌道と O-2p 軌道にそれぞれ 1 eV と 7 eV の U パラメータを設定した時に報告値に近い値が得られたので、以下の計算はこの U パラメータの設定のもとに行った。

図 2 O-2p 軌道の U パラメータと Ga₂O₃ と Al₂O₃ のバンドギャップの関係

バンド構造に対する超格子の層厚の影響を調べるために、 κ -Ga₂O₃ と κ -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 つの超格子モデルを作成した。それらに対して無歪み (ab 面内方向は無歪み、c 軸方向には緩和) の状態で行った局所状態密度解析の結果をもとに、図 3 に示すバンド図 (バンドギャップの空間分布) を作成した。各図の下側は価電子帯、上側は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。グラフの横軸は c 軸方向の原子座標を示しており、図の左側が κ -Ga₂O₃ 層、右側が κ -Al₂O₃ である。また、図中に Ga₂O₃ 層と Al₂O₃ 層中央に

おけるバンドギャップと、界面における価電子帯と伝導帯のオフセットを記載している。超格子の層厚が増加するにつれて、 Ga_2O_3 層のバンドギャップは減少し、逆に Al_2O_3 層のバンドギャップは増加した。 Ga_2O_3 層および Al_2O_3 層内の格子歪みを調べたところ、超格子の層厚が増加するにつれて、 Ga_2O_3 層は c 軸方向に引張歪みを受け、 Al_2O_3 層は圧縮歪みを受けていることが分かった。この超格子の層厚変化に伴う Ga_2O_3 層と Al_2O_3 層内の格子歪みの傾向の違いが、各層のバンドギャップが逆の変化を示したことの原因だと考えられる。バンドオフセットに関しては、超格子の層厚が増加するにつれて価電子帯および伝導帯オフセットのどちらも増加する傾向がみられた。 Ga_2O_3 層の価電子帯上端、伝導帯下端のエネルギー準位はどちらも Al_2O_3 層の値よりも小さいことから、 $\kappa\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ 超格子は Type-II 超格子であることが分かった。

以上の $\kappa\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ 超格子の層厚に対するバンド構造の変化は、 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ 超格子においても同様の傾向がみられており [T. Kawamura et al., J. Cryst. Growth 626, 127477 (2024)]、 α 型と κ 型の構造による大きな違いは見られなかった。

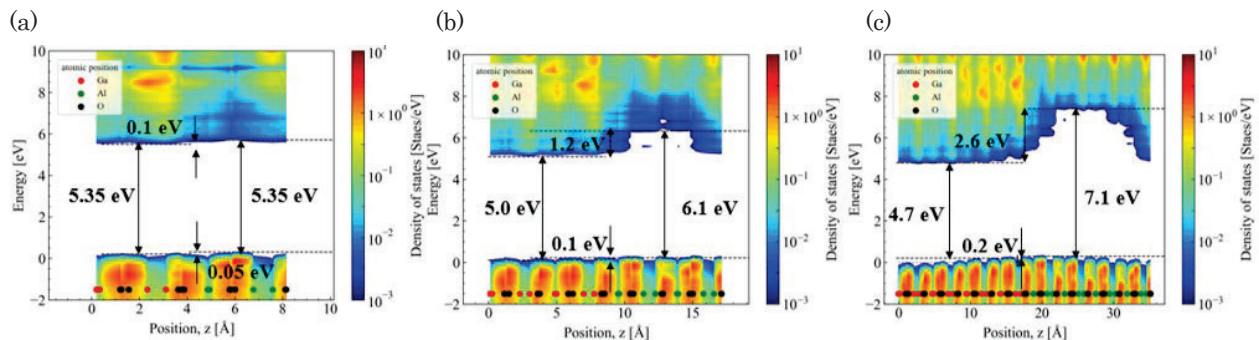


図 3 $\kappa\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ 超格子のバンド図 : (a) $0.5\text{Ga}_2\text{O}_3/0.5\text{Al}_2\text{O}_3$ 、(b) $1\text{Ga}_2\text{O}_3/1\text{Al}_2\text{O}_3$ 、(c) $2\text{Ga}_2\text{O}_3/2\text{Al}_2\text{O}_3$ 。
価電子帯上端をエネルギーゼロにしている。

研究成果報告

- 1) T. Nishimura, T. Kawamura, T. Akiyama, and Y. Kangawa, “Electronic Structures of $\kappa\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ Superlattices”, 10th International Conference on Light-Emitting Devices and Their Industrial Applications, LEDIAp-10.
- 2) T. Yamashita, T. Kawamura, T. Akiyama, and Y. Kangawa, “First-Principles Calculations of Bandgap Control of $\kappa\text{-Ga}_2\text{O}_3$ by Uniaxial Strain”, 10th International Conference on Light-Emitting Devices and Their Industrial Applications, LEDIAp-11.
- 3) T. Nishimura, T. Kawamura, T. Akiyama, and Y. Kangawa, “Band Structure Analysis of $\kappa\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ Superlattices”, 第 43 回電子材料シンポジウム, Th3-10.
- 4) T. Yamashita, T. Kawamura, T. Akiyama, and Y. Kangawa, “Effect of Lattice Strain on Bandgap of $\kappa\text{-Ga}_2\text{O}_3$ ”, 第 43 回電子材料シンポジウム, Fr1-12.

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・教授）
 研究協力者 西村健志（三重大学 大学院工学研究科・M2）
 研究協力者 山下拓真（三重大学 大学院工学研究科・M2）

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。特に、内部流がある条件で特定の周波数の加振を与えると加振方向だけでなく直交方向にも顕著な振動が生じる現象が観察され、不安定性との関連が考えられる。本研究ではこの現象に焦点を当てて、その振動特性やメカニズムを明らかとするために水槽実験を実施した。

実験方法

深海機器力学水槽に図1に示す実験装置を構築した。長さ4m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1.0-5.5m/sと取水流速を変化させた際の振動を計測する。本年度は新たに試験体の振動形状を計測するために合計8台の水中カメラを用いたモーションキャプチャシステムを構築した。

実験結果・考察

図2(a)に示すように、計測値と理論モデルを比較したところ、両者は十分一致し理論モデルの妥当性を確認できた。一方で、特定の周波数(1次固有周波数の1.1-1.5倍)で生じる図2(b)に示す加振直交方向 X に生じる挙動は理論モデルでは説明できない。図2(b)では前半に X, Y の振動が同期しているが、16周期目で崩壊した後に再度逆位相で同期し直す興味深い挙動が見られる。計測を通してこの直交方向の振動は位相差によって特徴付けられると考えられ、今後非線形の理論構築や実験の不確実性の整理が重要であることが得られた。

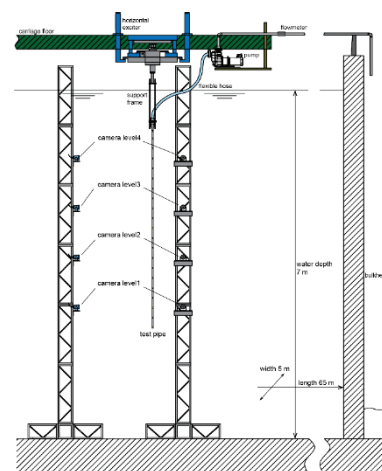


図1 実験装置

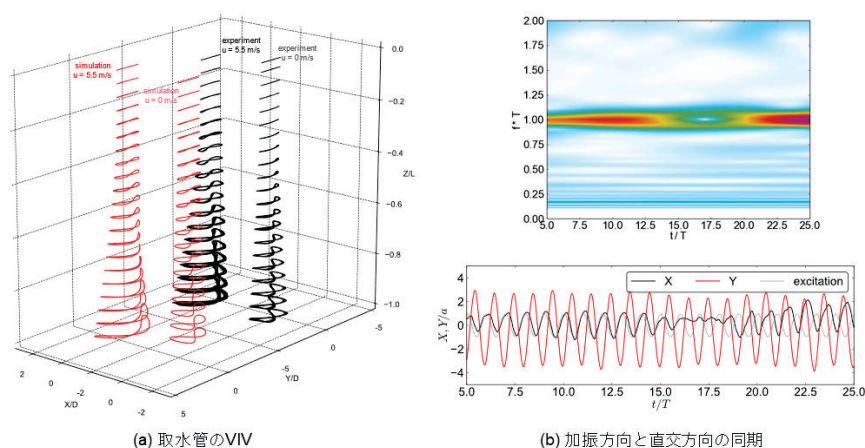


図2 実験結果

研究成果報告

Hisamatsu, R., Riveros-Jerez, C., Utsunomiya, T., 2025. THREE-DIMENSIONAL MODEL OF A HANGING COLD WATER INTAKE PIPE WITH INTERNAL FLOW AND TOP_END EXCITATION. OMAE2025-156557, June 22-27, 2025, Vancouver, Canada (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

海底探査システムを構築するうえで水中ビークルに求められるのが海底から一定の高度を保ち海底の地形に沿った姿勢で走査を行うことができる能力である。本研究では Fig. 1 に示す、縦方向の機動性を高めた多翼型水中ビークルを対象とし、制御性能を向上させるためモデル予測制御 (MPC: Model Predictive Control) を適用、実装し、その有効性を調査する。

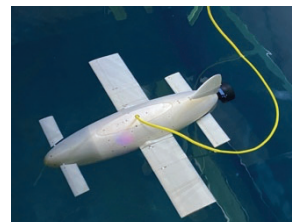


Fig. 1 Multi-Winged Vehicle

2. 水槽試験による運動制御性能の調査

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MPCシステムを多翼型水中ビークルに実装し、その運動制御性能の有効性を水槽試験で調査した。機体ピッチ角と速度にステップ状の目標値を与えた場合の水槽試験結果をFig. 2に示す。ピッチ角には振動見られるが目標値に追従しており定常偏差も少ない。ピッチ角振動の原因としては制御器を設計した際の評価関数の重みづけが適切でなかったことが考えられる。また、機体深度は制御入力に周期的に最大値、最小値を繰り返しており適切に制御されていない。これは、MPC制御系の内部モデルに用いたシステム同定モデルが実機の運動を正確に表現できていないためであると考えられる。

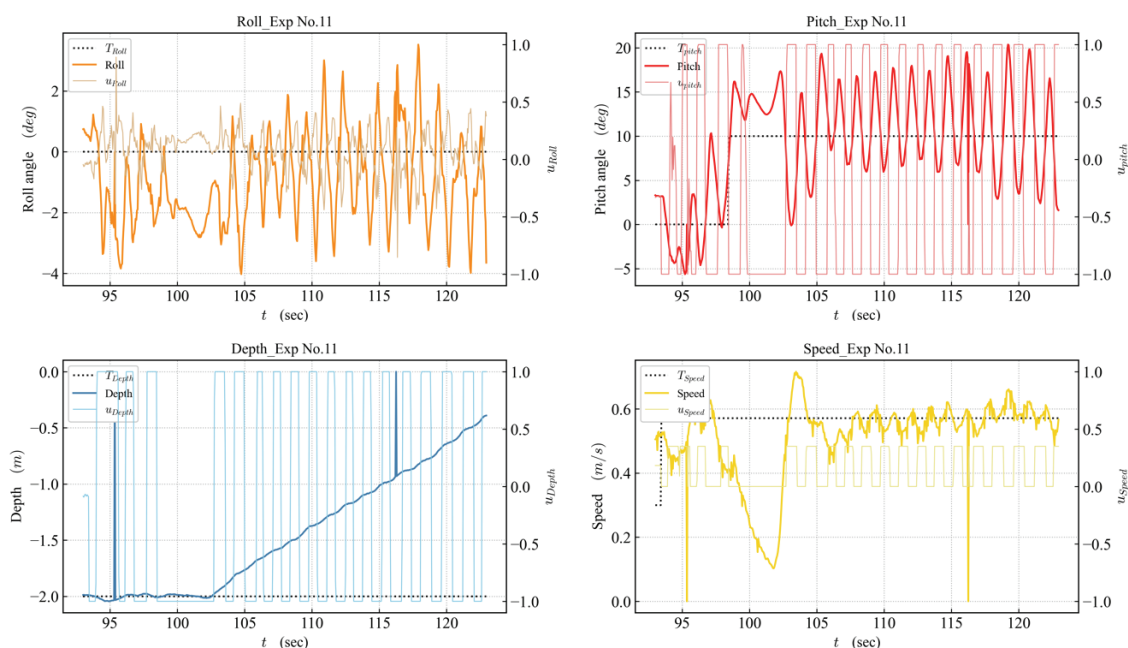


Fig. 2 Step response of the MPC system

3. 結言

多翼型水中ビークルにモデル予測制御系を実装し、その有効性を水槽試験により調査した。その結果、ピッチ角と機体速度の制御について一定の有効性が認められた。一方で、ピッチ角の振動や深度制御性能などに課題が残されており、MPCシステムの水中ビークルの運動制御の適用において運動モデルの同定精度が重要であることが確認された。今後は評価関数の重みの決定方法も含めて更に検討が必要である。

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つとなっている。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、正弦波 PWM インバータ動作時におけるモニタリングする手法を開発する。変動する出力電流条件下においてモジュールの劣化を観測する。従来、パワーモジュールの劣化評価試験では、実際のパワエレ回路動作ではなく、モジュール内に一定損失を繰り返し発生させた条件で試験が行われてきた。提案手法はインバータ動作を模擬し任意の電流・周波数における実温度・電流波形を用いてパワーモジュールの劣化を抽出できる点に特長がある。

提案手法を用いてパワーモジュールの劣化観測を行い、回路の動作条件（電流・電圧波形）と計測間隔、演算モデルの関係を明らかにすることで劣化検出技術を構築する。

本研究のパワーモジュールの高精度な劣化検出技術はパワエレシステムの設計最適化につながり、高寿命化と信頼性向上に大きく貢献する。

3. $V_{CE(sat)}$ 測定環境の構築

チョップ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 $V_{CE(sat)}$ 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. 正弦波 PWM インバータを用いた $V_{CE(sat)}$ とジャンクション温度測定

図 2 に示す正弦波 PWM インバータを用いてパワーモジュールの $V_{CE(sat)}$ およびジャンクション温度 T_j を測定した。インバータにおいては出力電流が IGBT に流れる区間と、還流ダイオードを流れる区間の二区間存在する。IGBT に流れる区間に $V_{CE(sat)}$ を検出する一方で、還流ダイオード導通区間は電圧が負となるため、 $V_{CE(sat)}$ 検出回路は 0 V を出力するようにした。

5. 測定結果

図 3 にインバータ出力電流振幅を(a) 80 A, (b) 100 A で動作させたときの $V_{CE(sat)}$ を示す。出力電流が IGBT に導通している期間では $V_{CE(sat)}$ が測定され、その瞬時値はインバータ電流瞬時値に追従して変化している。図 4 に $V_{CE(sat)}$ のピーク値を用いて温度変換した結果を示す。出力電流の 1 周期において電流が最大となる点で 1 点サンプリングし 50 周期(1 秒間), 50 点サンプリングし $V_{CE(sat)}$ のピーク値を 50 点測定している。取得した $V_{CE(sat)}$ と電流値を用いてジャンクション温度 T_j に換算している。

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} 測定環境の構築と正弦波 PWM 動作時における $V_{CE(sat)}$ とジャンクション温度測定環境を構築した。1200 V 75 A 定格の IGBT モジュールを使用した実験により、PWM インバータ連続動作時に $V_{CE(sat)}$ を測定できることを確認した。また、実験により所得した $V_{CE(sat)}$ から温度プロファイルを算出した。この成果は劣化要因の分離測定試験の基礎データとして活用する。

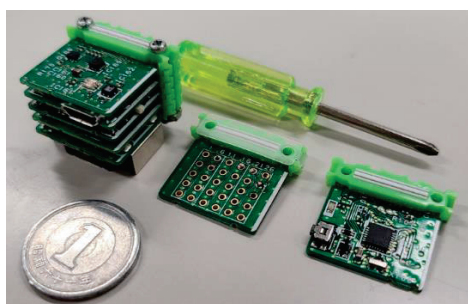


図 1: Leafony Basickit 2

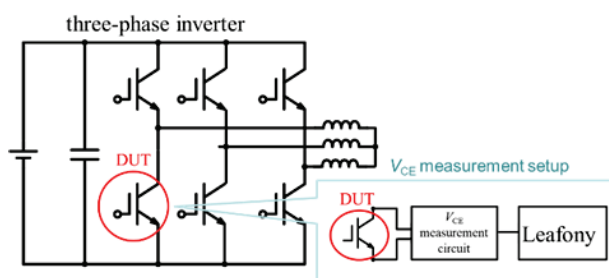


図 2: 正弦波 PWM インバータ試験環境

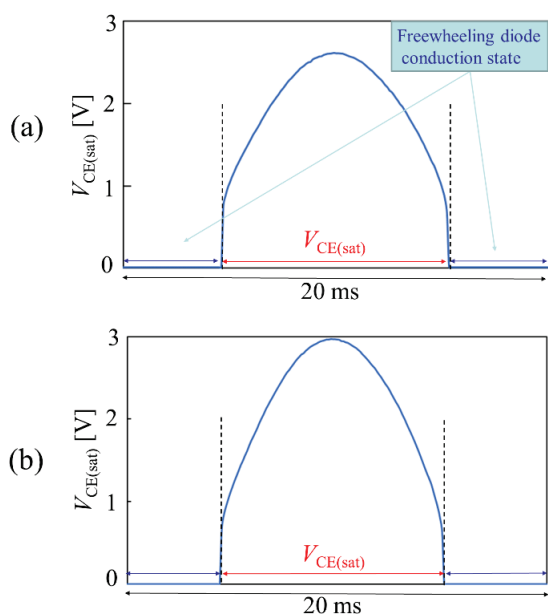


図 3: $V_{CE(sat)}$ 測定結果 (a) 80 A (b) 100 A

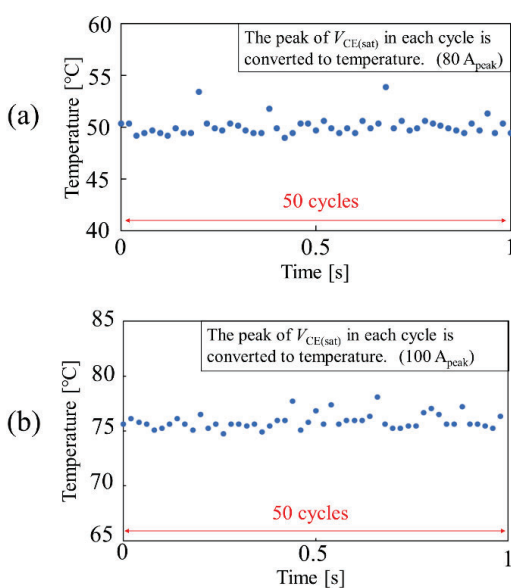


図 4: ジャンクション温度 T_j 測定結果

(a) 80 A (b) 100 A

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

The purpose of this study is to research the pattern of secondary fracture on fractured spines using CT-FEM. Load simulations on 3 different fractured spine models from patients' CT-images data were conducted. Simultaneously, compressive load simulations on single vertebral bones were also conducted to estimate their strength against load. Based on the analysis and comparison of these results, the feature of secondary fracture and some factors which may effect this process can be found.

2. METHODS

CT-FEM software MECHANICAL FINDER (Research Center of Computational Mechanics, Inc., Tokyo, Japan) was applied to extract models and conduct finite element analysis. Three 7-piece spine models where the fractured vertebrae is the center were created based on the CT-images of three patients with a mean age of 84 years old from Saga University Hospital. Making the fractured vertebra as the center, three spines of 7 pieces were extracted from CT-images data, which means from T9 to L3 in case No.1, from T10 to L4 in case No.2 and from T11 to L5 in case No.3. In each model, a process about the occurring of the secondary caused by a uniformly distributed load on the top of the spine piece was simulated in the finite elements simulation software. Then, compression load simulations were conducted respectively on four vertebrae which are respectively next to the top, bottom and fractured vertebra in each model.

3. RESULTS

In this study, bone fracture was the crack of cortical bones, which can be seen as a clear fracture line or a fracture zone formed by dozens of failed shell elements in the simulation. To judge whether a fracture is formed, definition was given in this simulation that if a group of failed shell elements are distributed continuously on one vertebra and the number is over 100, they can be recognized as a fracture in this vertebra and the first appeared failed shell elements in this group is regarded as the starting point of this fracture, as shown in Figure 1. According to this definition, strong relation between vertebra's strength against compressive load and fracture can be found in the result.

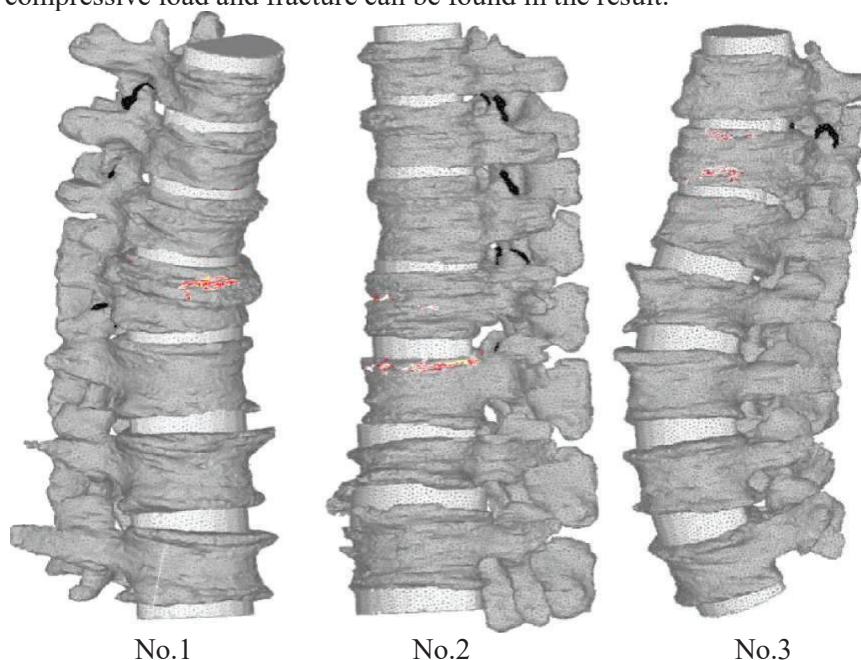


Figure 1 Bone fracture behavior in three different models

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. Introduction

Total hip arthroplasty (THA) is a common orthopaedics surgery performed as one of the solutions to late-stage hip diseases. Despite that, complications such as implant loosening and periprosthetic fractures after the arthroplasty are known to be the common causes of revision surgery. It is believed that the bone quality and implant designs might have a correlation with those complications. Recently, Todo research group had utilized the CT-based FEA to understand the biomechanical problems in the orthopaedic field. With this advanced computational software, FE model from different bone and implant designs could be developed. Thus, this study aims to investigate the bone damage mechanism developed from the CT image of two different patients with different types of THA implants by using finite element analysis.

2. Methodology

FE bone model was developed from the 61 and 87-year-old patient and denoted with bone X and Y, respectively. Inhomogeneous material properties were introduced in every element that form the FE bone model which was computed from the linear relationship between CT value and BMD. Then, the mechanical properties e.g., young's modulus was assigned to the element by using the established equations, hence enabling the non-linear FE analysis. Next, the THA models of bone X and Y were constructed and three different types of implants were introduced. Those implants were denoted by stem Z, stem K and stem B, where every implant has a different design and geometry. The stem of the implant was assigned according to the properties of titanium alloy while the femoral ball was based on the properties of alumina ceramic. Next, three different loading and boundary conditions were adapted from well-established studies. These conditions are lateral bending (LBC), torsion (TC), and falling (FC). A stepwise increment of load to failure was applied to all models. The analysis was terminated at the load after the complete failure of shell elements.

3. Results and discussion

Fig. 1 shows the internal failure of bone X and Y with stem Z, K and B at LBC. Significant damage elements can be seen in bone Y compared to bone X as resulting of poor bone quality. Major damage at the bone-stem interface of bone Y suggests a higher risk of implant loosening after the arthroplasty. Fig.2 shows the comparison of external failure in LBC. Damage elements at bone X only occurred at one location while two locations were observed at bone Y which also due to the effect of bone quality.

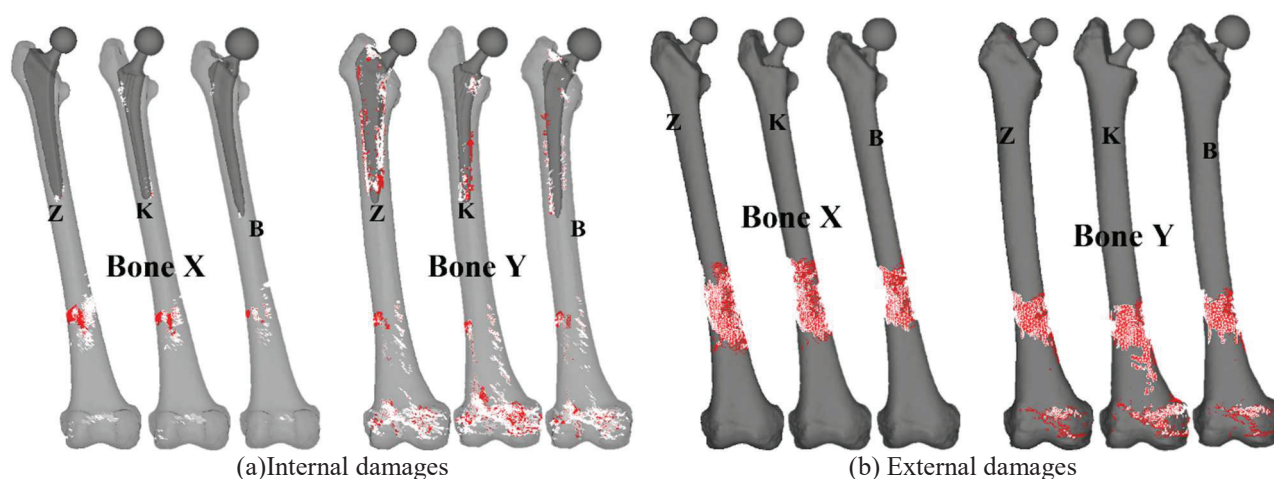


Figure 1 Distribution of microdamages

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

Mathematical relationship between mechanical properties of bone such as Young's modulus, E , and bone mineral density, BMD, has been utilized in CT-image based finite element analysis to construct more realistic computational models. For example, E - BMD relationship was determined experimentally using empirical formulae by Keyak et al, and has been used worldwide. However, the detailed mechanisms involved in the relationship have not been clarified yet. The principal objective of this study was therefore to develop such relationship using some microstructural and micromechanical models.

2. METHODS

It was firstly assumed that E can be distinguished into two main parts such as E_c of cortical bone and E_t of trabecular bone. Then, E_c and E_t were considered to be expressed as functions of basic Young's modulus, E_s , of bone tissue and porosity, p , where BMD was assumed to be correlated with p mathematically. E_c - p relationship was developed using the theory of poroelasticity which is an extension of elasticity for solid deformation with pores. On the other hand, of E_t - p relationship was constructed using an ideal structural model with a porous unit cell. Micromechanical model proposed by Wanger was also introduced to develop an E_s formula. The model incorporated the platelet-like geometry of 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 were modeled as orthotropic composite layers made up of thin rectangular apatite platelets within collagen matrix, and the classical orthotropic elasticity was used to calculate Young's modulus of the lamellae. The micromechanical model employed a modified rule-of-mixtures to account for the two types of lamellae. Moduli of collagen matrix and apatite platelets were also introduced into the micromodel.

3. RESULTS

For three different types of bone such as normal, osteopenia (OA) and osteoporosis (OP) bones, the theoretical model was applied to find their E - BMD relationships. E values tended to increase with increasing BMD as expected. It was also found that those theoretical results well coincided with the Keyak's results. Effects of diseases such as OA and OP on the E - BMD relationship were also clearly introduced using the theoretical model, suggesting that the developed model can be useful in clinical applications. The developed model was also compared with an experimental result of force-stroke curve as shown in Figure 1. It was shown that the theoretical model was well coincided with the experimental.

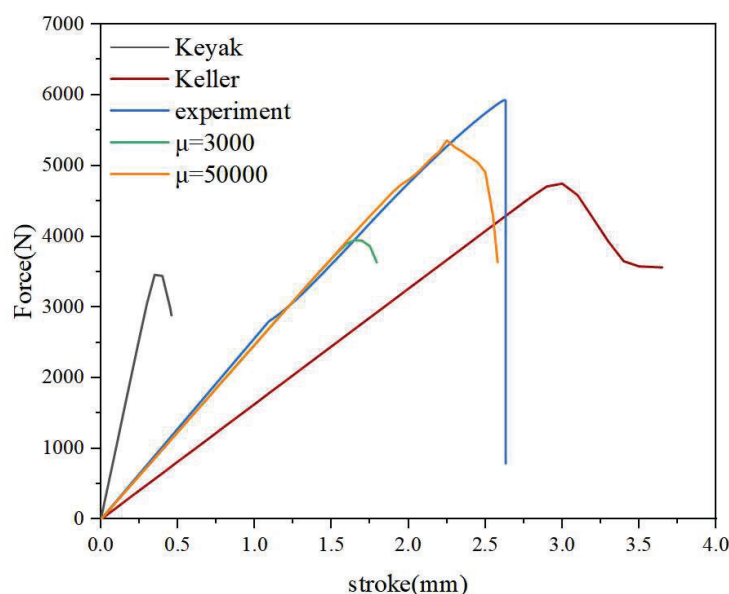


Figure 1 Comparison of force-stroke curves

CT-FEM を用いた変形性膝関節症に対する脛骨骨切り術の応力解析

大分大学整形外科 松田昌悟

1. 緒 言

内側開大式高位脛骨骨切り術 (OWHTO) と内側開大式粗面下脛骨骨切り術 (OWDTO) の Transverse cut において、脛骨関節面に平行に骨切りする場合と脛骨骨軸に垂直に骨切りする場合、どちらが脛骨、プレートに対して力学的に適しているか、有限要素法を用いて解析することである。

2. 解析方法

使用した CT データは、64 歳女性で K-L grade 2 の内側型変形性膝関節症、Hip-Knee-Ankle 角は 2 度内反で脛骨後方傾斜角 6 度の症例で解析した。プレート、スクリューの CAD データはアスピシヤス社のものを使用し、メカニカルファインダーを用いて有限要素解析を行った。OWHTO、OWDTO いずれも Transverse cut は脛骨関節面から 35mm の位置に設定し、外側皮質は 5mm 残し、10mm の幅で開大した。脛骨粗面は 15mm の厚みを持たせた。OWHTO と OWDTO それぞれ脛骨関節面に平行に骨切りしたモデルと、脛骨骨軸に垂直に骨切りしたモデルを作成した。さらにそれぞれ人工骨ありなしのモデルを作成し、計 8 モデルで解析した。境界条件はプレート、スクリュー間とスクリュー、骨間は固着させた。骨材料ヤング率はケヤックの式で換算し、メッシュサイズは全材料 2mm で作成した。プレート、スクリュー、人工骨のヤング率、ポアソン比などは過去の報告を参考に設定した。荷重条件として足関節を固定させ、両脚立位を想定し、脛骨関節面に垂直方向に 600N を荷重させた。

3. 結果と考察

図 1 にプレートに発生した応力分布を示す。OWHTO モデルと OWDTO モデルのいずれも骨軸に対して垂直に骨切りしたモデルの方が、脛骨ヒンジ部とプレート中央部分にかかる応力集中が少なかった。同様に脛骨の損傷要素数についても、骨軸に対して垂直に骨切りしたモデルの方が少なかった。transverse cut の矢状面角度は、骨軸に対して垂直に骨切りした方が適切であることが示唆された。

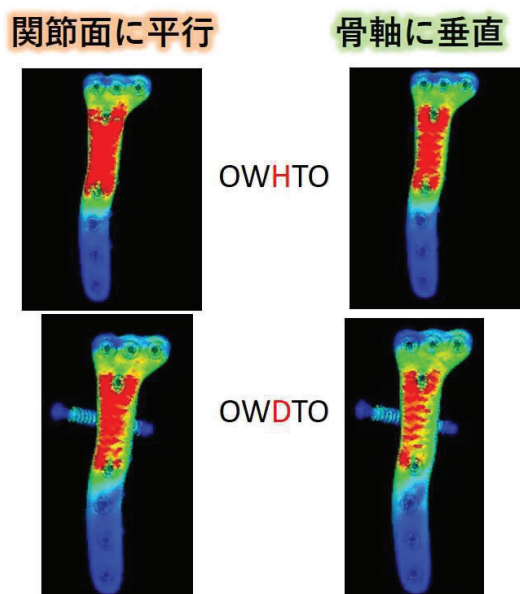


図 1 プレートに発生した応力分布状態

3次元有限要素法を用いた脆弱性骨盤骨折の検討

大分大学整形外科 川岸正周

1. 目的

骨盤骨折(FFP)は、交通事故や墜落外傷等の大きな外力が加わったときに生じることが知られているが、高齢者においては、転倒等の比較的軽微な外力の作用によっても生じる。FFPは高齢者のADLを急激に低下させ、長期臥床による合併症を生じ健康寿命に大きく関与することから、この骨折の発生メカニズムの理解と治療法の確立は本邦において急務と考えられる。FFPの発生メカニズムの解明は発生の予防に応用させることができ、各種固定方法の力学的な評価を行うことによって、より詳細かつ具体的に固定方法を評価することができる。本研究では、FEMを用いてFFPの発生メカニズムの解明を試みた。

2. 解析方法

本院で入院加療を受けた骨粗鬆症を有する外傷症例の骨盤CT画像データを用いた。得られたCT画像をMECHANICAL FINDER ver12に取り込む。ソフト上で骨盤モデルを作成し、骨はkeyakの式を使用してCT値から換算された物性値を設定し不均質性を再現、他の恥骨結合などの軟部組織は先行文献(Zhao Y, 2012, Injury)を参考に物性値を設定し粗鬆骨の骨盤モデルを作成した。作成したモデルに腸骨稜・坐骨結節・寛骨臼に合計14パターンの荷重条件を与えた。作成したモデルにFFP分類に順じた骨折線を加えてFFPモデルを作る。固定用インプラントを挿入して各種固定法の有用性の検討を行う。FFP分類のTypeIIc及びTypeIIIcに対する前方固定の有用性に関して解明し骨折は骨盤モデルに板状の弾性体を挿入することで再現した。IIc及びIIIcはIIcを1mm厚、IIIcを3mm厚の骨折線を挿入することで再現した。固定法はTS screwとしてφ6.5mmのCCSをS1領域とS2領域に挿入した。前方固定は恥骨上枝内に逆行性恥骨スクリューとして挿入した。前方固定を行ったモデルと行っていないモデルを作成し両側の股関節に立位荷重を想定して荷重をかけた際のモデルの安定性を応力分布と破壊要素数で評価した。

3. 結果

H型骨折などの典型的な骨折パターンの再現に成功した。骨盤全体の応力分布として4つのモデルそれぞれの、0～3MPaの応力分布コンター図を比較すると、骨折線1mm群と3mm群では大きく変わらなかったが、恥骨スクリューあり群となし群を比較すると、あり群では健側の閉鎖孔周辺と仙腸関節にも応力が分散されており、前方固定をおこなったモデルは健常側にも応力分散されており破壊要素数も少なかった。骨盤全体の破壊ソリッド数の4パターンの比較を行うと、1mm群よりも3mm群の方が破壊ソリッド数は多く、1mm 3mmそれぞれでは前方固定をした方が破壊ソリッド数は少なかった。スクリューのコンター図を比較すると、1mmでは前方固定ありなしでTSの応力分布及び破壊ソリッドに大きな違いはなかったが、骨折線3mmでは恥骨スクリューなしモデルは恥骨スクリューありモデルより骨折部周辺の破壊ソリッド及び応力集中が骨折部周辺におこっていた。

4. 考察

骨折発生のメカニズムの解明に関して今後はより詳細に解析することでカットオフを明らかにし、さらに症例を男性5例、女性5例に増やして一般化の妥当性も検討する。骨盤骨折の有限要素解析の報告では、APC IIの骨盤骨折モデルの解析報告で前方固定の有用性が示唆されていた。本研究はFFPの有限要素解析であるが、非脆弱性骨折の解析と同様に前方固定の有用性が示唆される結果が得られた。恥骨スクリューが挿入されたことにより前方成分・健側への荷重分散が行われている可能性が示唆された。また、有限要素法以外のバイオメカニカルな報告でキャダバー研究があり、前方固定に追加による骨盤の固定性の改善が示唆された上で、不安定性の高い斜骨折で前方固定を必要とする可能性が高いことが示されていた。

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. 緒 言

良性骨腫瘍の切除では、術後の骨の構造変化による力学的強度の低下のため、術後骨折を生じる危険性を念頭においた手術計画が必要である。術前の画像データを用いて、術後の骨強度の低下が予測できれば有用であるが、そのような手法は未だ確立されていない。そこで、良性骨腫瘍の手術の際に、切除部位のCT画像データを用いて術前と術後の数値モデルを作成し、有限要素法(FEM)を用いた骨強度低下の評価(CT-FEM)の有用性を検証した。

2. 方 法

症例は、骨線維性異形成に罹患した20歳の女性。画像検査では、右脛骨近位部前面の骨皮質内に長径5cm×幅3cmとその遠位に長径3cm×幅1cm大の腫瘍を認めた。CT画像データから骨の輪郭を抽出した3次元脛骨モデルを用いて、腫瘍切除部の形状が異なるモデル(直方体と楕円体)を作成した。そして、CT値から換算された要素単位での骨密度から力学特性値を評価した。境界条件として、垂直荷重とねじり荷重の2種類を用いた。また、損傷要素数が臨界値に達した時の荷重値を骨強度として定義した。

3. 結果と考察

術前と術後2年間の強度変化を図1に示す。術前の検討にて、近位部の腫瘍を直方体状に切除した場合は、角の部分での過度の応力集中により、垂直荷重条件では術前の92%、ねじり荷重条件では12%まで強度が大きく低下し、一方、楕円体形状の場合は応力集中の軽減のため、それぞれ、97%および23%に低下することが判明した。そこで、脛骨近位側の腫瘍を楕円形、遠位側の腫瘍を長方形に切除を行い、術後は、PTB装具装着下に捻じる動作を制限し、術後4か月で全荷重を行った。術後1年の解析では、垂直負荷の強度は術前の約60%まで回復した。骨腫瘍切除術は、切除方法・後療法など術者の経験をもとに主観的に行われることが多いが、この度の術前のCT-FEMによる検討により腫瘍切除の方法と術後の後療法が示めされ、術前のCT-FEMによる客観的な力学的評価は有用であると考えられた。今後のさらなる検討が必要である。

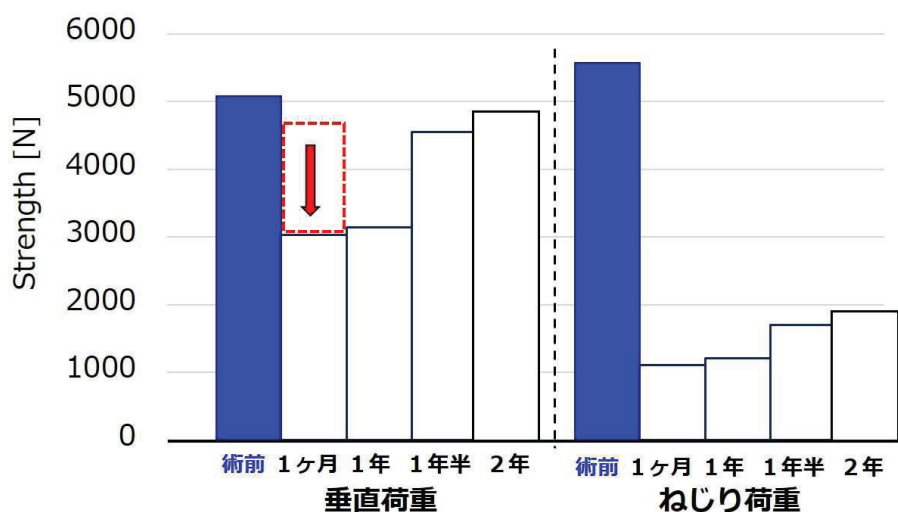


図1 術前と術後2年間の強度変化

2024CR-ME-13 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】近年の再生医療分野では、「細胞」・「足場材」・「成長因子」で人工的に組織を作製する組織工学に基づいた研究が多く展開され、特に「足場材」に関しては、実際の生体組織を脱細胞化させ、目的とする生体組織の構造を得る脱細胞化組織が注目されている[1]。我々はこのような実際の組織の骨格を足場材に用いるというコンセプトに基づき、野菜の骨格を用いた足場材について検討し、前年度の本共同利用研究にて報告している。この報告の中で3種類の野菜を採用し、圧縮弾性率、細胞数、ALP活性による評価および比較を実施した。その結果、3種類の野菜の中で有意に圧縮弾性率の高かったゴボウであったが、細胞増殖能については気孔径が Ciardelli らの報告[2]にある 100 μm 程度という最適値よりも大きいため十分な効果が得られていない。

そこで本研究では、ゴボウに着目し、気孔径が大きな点を解消するために、コラーゲン層を骨格内に導入した複合系足場材を作製し細胞増殖能の改善を試みた。

【方法】ゴボウをポンチで直径 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[3]。得られた試料を I 型コラーゲン溶液に浸漬させ、凍結乾燥後、化学架橋、ブロッキング処理をし、再度凍結乾燥したものを複合系足場材試料とした。得られた試料について、構造観察、細胞培養実験（細胞数）を実施した。

【結果と考察】構造観察結果よりゴボウのみの場合は、大小ランダムな気孔が観察され、コラーゲン層を導入すると、ゴボウの気孔内外で多孔質構造が観察された。細胞培養実験より、コラーゲン層の導入によって、細胞数は有意に高い値を示した。

【結言】本研究によって、ゴボウを骨格とした足場材にコラーゲン層、コラーゲン/B-TCP 層を導入することによって、コラーゲンによる多孔質構造が形成され、細胞増殖能を向上させることを明らかにした。

【参考文献】(1) Hsieh, D. J., Srinivasan, P. et al., (2021). Protocols for the preparation and characterization of decellularized tissue and organ scaffolds for tissue engineering. *BioTechniques*, 70(2), 107-115.

(2) Ciardelli, G., Gentile, P. et al., (2010). Enzymatically crosslinked porous composite matrices for bone tissue regeneration. *J Biomed Mater Res* 92A : 137-151.

(3) 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，東藤貢(2024)，植物組織を骨格とした3次元足場材の作製と評価，臨床バイオメカニクス，45，pp. 178-181.

風洞実験による沿岸近傍の洋上ウィンドファームと大気境界層間の相互作用の評価

近畿大学 工学部機械工学科 Goit Jay Prakash

1. 目的

洋上風力発電の多くは水深の浅い沿岸から数十メートルから数十キロ沖合に開発されるため、風車の発電電力量及び風車にかかる荷重に沿岸域の地形が及ぼす影響が重要になる。そこで、Goit & Önder (JRSE 2022) はラージエディシミュレーション (LES) を用いて大気境界層が陸から海へ遷移する課程で形成される内部境界層内の乱流場が洋上ウィンドファーム内のエネルギー輸送及び後流回復に寄与する研究成果を報告した。本研究では、数値計算結果の検証を行うために、風洞実験を用いて沿岸域の境界層流れを模擬し、形成される内部境界層が洋上ウィンドファームへ及ぼす影響について評価する。

2. 実験方法

使用された模型風車はロータ直径 $D = 0.25\text{m}$ およびハブ高さ $y_h = 0.267\text{m}$ であり、周速比 $\lambda = 4$ でパワー係数 (C_p) が最大となるように設計されている。実験は、流入風速を $U_0 = 5\text{m/s}$ とした。風速計測には KANOMAX 社製の CTA ユニットと熱線流速計用プローブ (0248-T5) を使用した。風速計測において、サンプリング周波数は 5kHz 、計測時間は 30 秒とした。実験は九州大学応用力学研究所にある地球大気動態シミュレーション装置 (境界層風洞) を用いて実施された。測定部入り口から流れ方向に 3m の範囲に 1 辺 $P = 45\text{mm}$ の木片ブロックが千鳥配置 (流れ方向およびスパン方向に $3P (=135\text{mm})$ の間隔) された。ウィンドファームを構成する 12 基模型風車は、設置された木片ブロックの最下流位置から 1.5m 下流の海上を模擬する滑面平板上に配置された (図 1 参照)。模型風車は整列配置され、風車間隔は流れ方向に $7D$ 、スパン方向に $4D$ とした。

3. 実験結果及び考察

図 2 にウィンドファーム内の模型風車ハブ高さ位置および模型風車全高高さ位置で計測された平均風速の流れ方向変化を示す。ハブ高さ位置において、 $0\text{m} < x \leq 3.8\text{m}$ の範囲において、平均風速は流入風速の 5m/s から 2m/s まで低下する。その後、 $x \geq 4\text{m}$ の範囲では平均風速 4.2m/s まで回復し、ほぼ一定となる。全高高さ位置では、 $0 < x \leq 3\text{m}$ の範囲で平均風速は流入風速 5m/s から緩やかに減少し、 $3\text{m} \leq x < 4\text{m}$ の範囲で平均風速 4.1m/s から約 2.0m/s へ急減少する。 $x \geq 4\text{m}$ では、平均風速は急増加・急減少している。各高さ位置での平均風速が流れ方向に急激加速や減速する原因としては、ウィンドファームに流入する境界層が風車全高を越える厚さまで発達していないためと考えられる。乱流強度 (図に示していない) は高さ位置によらず 1% ぐらいから 15% 程度まで増加する傾向である。

図 3 に本実験で計測した模型風車の行ごとの発電出力量と数値計算結果の結果を示す。1 行目 ($x \cong 1.5\text{m}$) から 2 行目 ($x \cong 3.2\text{m}$) にかけて発電出力は大きく (約 $40 \sim 60\%$) 低下する。2 行目から 3 行目 ($x \cong 5\text{m}$) にかけてわずかに上昇して 3 行目以降において各行の発電出力量はほぼ一定となる。数値計算による発電出力量は本実験結果よりも高いが、両者とも同様な傾向を示す。

尚、風車無しの場合の境界層及び内部境界層 (IBL) の発達についても評価した。内部境界層は平均風速と乱流強度分布の両方から算出したが、平均風速分布から求めた内部境界層の約 1.5 倍の厚さとなっている。

本研究の計測として、今後地形の影響を詳細に評価するため、上流側のブロック有無の場合の流れ場及び発電出力量を比較する。風車間隔と風車配置を変えたときに境界層とファーム内乱流場間の相互作用について考察をする。



図 1 風洞実験の様子

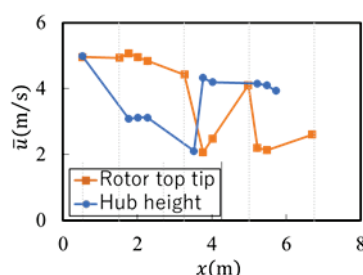


図 2. ウィンドファーム内風速の発達。

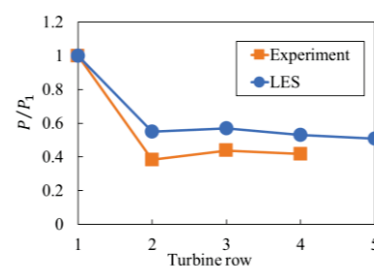


図 3. ウィンドファーム下流行毎の発電出力量。

4. 研究成果報告

■ 安本 勇輝, ゴイト ジェイ プラカス, 亀田 孝嗣, 内田 孝紀, 松島 啓二 "風洞実験による沿岸近傍の洋上ウィンドファームの評価", 日本機械学会 中国四国 学生会 第 55 回学生員卒業研究発表講演会, 徳島, 2025.

5. 研究組織

研究代表者: Goit Jay Prakash (近畿大), 所内世話人: 内田 孝紀, 共同研究者: 亀田 孝嗣 (近畿大), 研究協力者: 安本 勇輝 (近畿大)

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。この実現に向けて機体のサイジング、および機体形状に関する主翼平面の検討を行った。

2. 検討対象と評価方法

検討対象は、過去にバージニア工科大学とラフバラー大学の学生グループが共同で検討した空陸両用車「Pegasus」である。本研究では、この形状のモデリングを行い、機体の離陸性能・巡航性能・着陸性能に関わる飛行性能を満たすサイジングを実施する。そして、その結果より求めるとともに、流体計算による空力性能の評価を行う。

3. 実施状況と今後

図1にサイジングによって得られた翼面荷重 W/S 、パワー荷重 P/S の関係を示す。その結果、図8より離陸性能・巡航性能・着陸性能、そしてエンジン性能の全てを満たす領域が存在し、サイジングによる機体の成立性を示すことができた。このサイジング結果をもとに、機体形状を決定するため主翼平面に関する検討を行った。図2に主翼のアスペクト比(AR)を変更した際の揚抗比に関する結果を示す。その結果、 $AR=8$ が最も良く、図3のような機体形状を得た。

今後は、本研究で得た機体形状を風洞実験による空力計測を行う。そして、本結果で得た機体形状に関する妥当性を示す。

5. 研究成果報告

森澤征一郎, 兼久勇斗, "離島間を移動できる空陸用両車の実現可能性の検討と評価," 2C10, 第62回飛行機シンポジウム, 福井, 2024年10月15日~17日。

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)

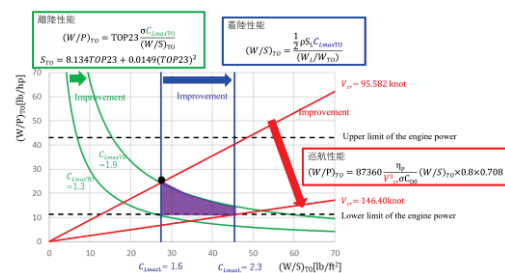


図1 飛行性能に基づくサイジング結果

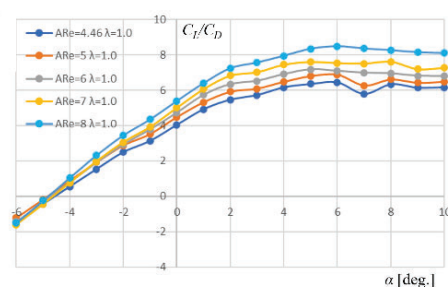


図2 機体の平面形状に関する空力性能

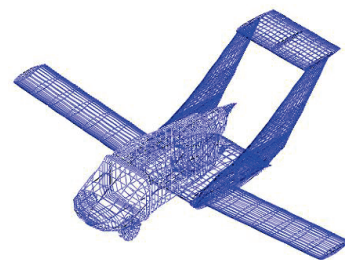


図3 サイジング結果より決定した機体形状

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

九州大学大学院歯学研究院歯学部門口腔保健推進学 高橋一郎

【研究の背景】

矯正歯科治療は、マルチブラケット装置という口腔内に装着する矯正装置により発生する矯正力を歯に伝達し、歯を動かすことによって不正咬合を改善するための治療である。この治療では、それぞれの歯に加わる力を適切に制御することが治療の成否に直結し、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の一つでもあるが、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、治療期間の短縮や拔牙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と再植立は骨の治癒期間を待つことが必要と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自身の歯周組織の性質・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。



図1

骨や歯などの生体硬組織は、場所により組成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。この個別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。これまでもこうした研究は行われてきたが、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、個体の特異性や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示してきた。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

われは個々の患者の骨の不均質性やスクリユーの植立位置、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、スクリユ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ユ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 24 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）のスクリユ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 のスクリユーのモデルを、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。スクリユ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ユ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・スクリユーと隣接歯根との距離・スクリユ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ユ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。

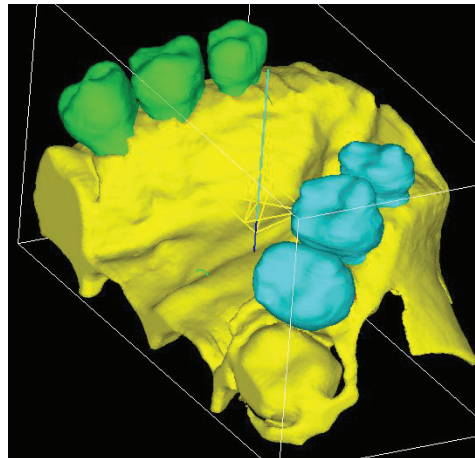
【結果および考察】

下顎骨に植立されたスクリユ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であり、歯槽骨内のスクリユー周囲の領域ではスクリユーから 0.5～1.0 mm の領域の最小主ひずみが適切な基準であると推察された ($R^2 = 0.8033$)。上下顎骨共に領域 2 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 $-474 \mu\text{strain}$ の場合、スクリユーが脱落する可能性は 5 %であった。一方、スクリユーが脱落する可能性は領域 2 の最小主ひずみが $-663 \mu\text{strain}$ で 50 %、 $-852 \mu\text{strain}$ で 95 %と予測された。スクリユー表面から 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ユ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ユーの脱落が起こることが明らかとなった。このことから、スクリユ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ることが示された。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、今後は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。口蓋骨正中においては歯根との近接リスクがないため、骨密度等の骨の性質がスクリュー成否により重要になると考えられる。また、口蓋正中には縫合があるため、スクリューと縫合との位置関係によるスクリュー成否の差があるのかについても検討していく予定である。



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。

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に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．

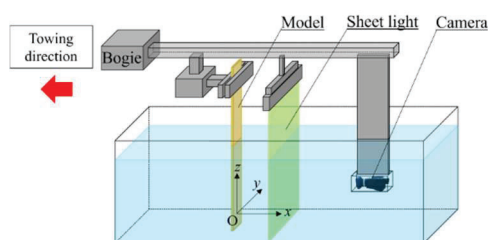


Fig. 1 Experimental apparatus.

3. 結果と考察

図 2 に，水槽実験において， $Re = 130 - 250$ で，迎角 $\alpha = 90\text{deg.}$ 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, $Re \geq 190$ 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 $Re \geq 190$ 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.

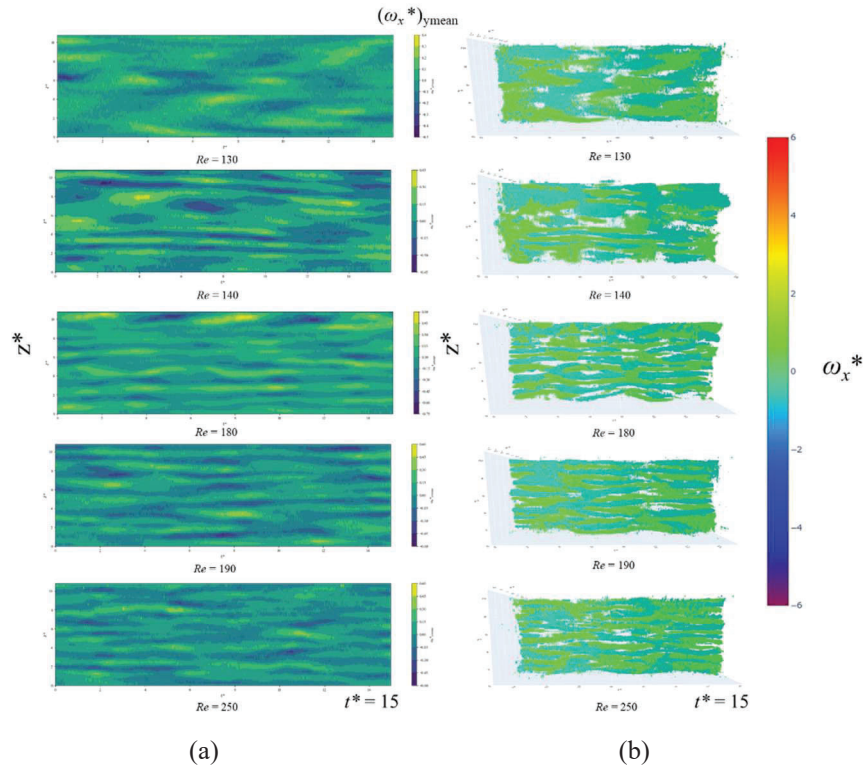


Fig. 2 Visualization of three-dimensional vortices structure.

4. まとめ

水槽実験を行い, 迎角 $\alpha = 90\text{deg.}$ 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.

セミサブ型浮体式洋上風車の CFD を用いた動揺解析の検証

九州大学・大学院工学研究院 久松 稜弥

研究目的

浮体式洋上風力発電の浮体式基礎構造物の設計の信頼性向上と効率化のために、流体力評価モデルと流体力係数の推定手法の追求は不可欠である。本研究では矩形断面部材を有するセミサブ型浮体を対象として、(1)矩形断面部材に対する流体力モデルの構築、(2)水槽実験による流体力係数の取得とその影響要因の調査、(3)CFD を用いたシミュレーション手法の構築と水槽実験による検証を目的とした研究を実施した。

水槽実験・考察

水平矩形柱部材の断面流体力係数とその影響要因を調査するために、図 1 に示す VoltturnUS-S セミサブ型浮体 lower hull の 1/62.5 縮尺模型を製作して曳航試験および規則波試験を実施した。流体力の計測には 3 分力計(日章電気製：容量 50kgf)を使用した。規則波試験では $KC < 2$ の範囲であっても抗力、慣性力係数が顕著に変化することを確認した。また、部材の pitch による影響を調査したところ、部材断面の長辺・短辺のそれぞれの投影方向の流体力成分への影響は僅かであった。このことから、規則波中ではこれらの方向ごとに Morison 式を適用する流体力評価が適当であると本研究では考えた。

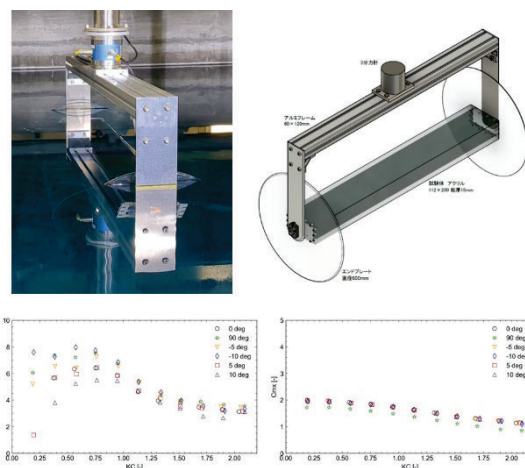


図 1 水槽実験の概要

数値解析

矩形断面部材の長辺・短辺の投影方向に対する修正 Morison 式を有限振幅解析が可能なように定式化し、マルチボディダイナミクスソルバーMBDyn に実装することでセミサブ型浮体の動揺解析モデルを構築した(図 2a)。また、OpenFOAM および拡張ライブラリ waves2Foam を用いて重合格子法, URANS による CFD 解析モデルを構築した(図 2b)。CFD 解析モデルについては事前に矩形, 円筒浮体の実験データと比較して動揺解析の妥当性を確認している。これらの解析モデルを用いてそれぞれ VoltturnUS-S セミサブ型浮体を対象に周期 10s, 波高 8m の規則波での動揺シミュレーションを行った。その結果、両者でよく一致する振幅が得られることを確認した。

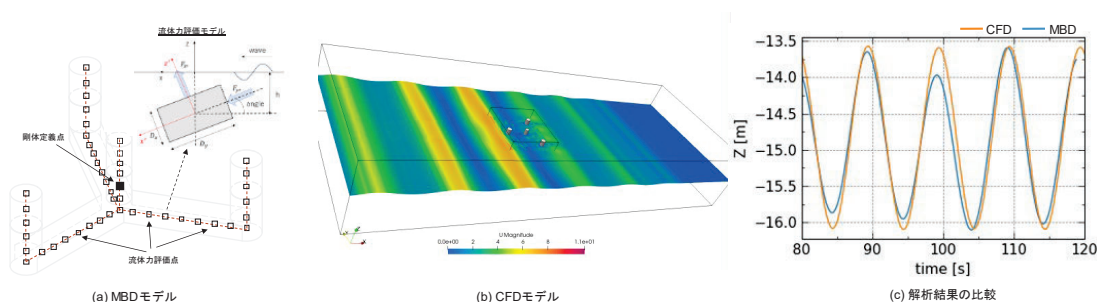


図 2 数値解析モデル

研究成果報告

山田寛人：MBDyn を用いた矩形部材に対する流体力評価式の検討, 2024 年度九州大学修士論文, 2025。
六車 凌：OpenFOAM を用いた浮体動揺解析, 2024 年度九州大学修士論文, 2025。

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

国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 牧緑

1. 背景と目的

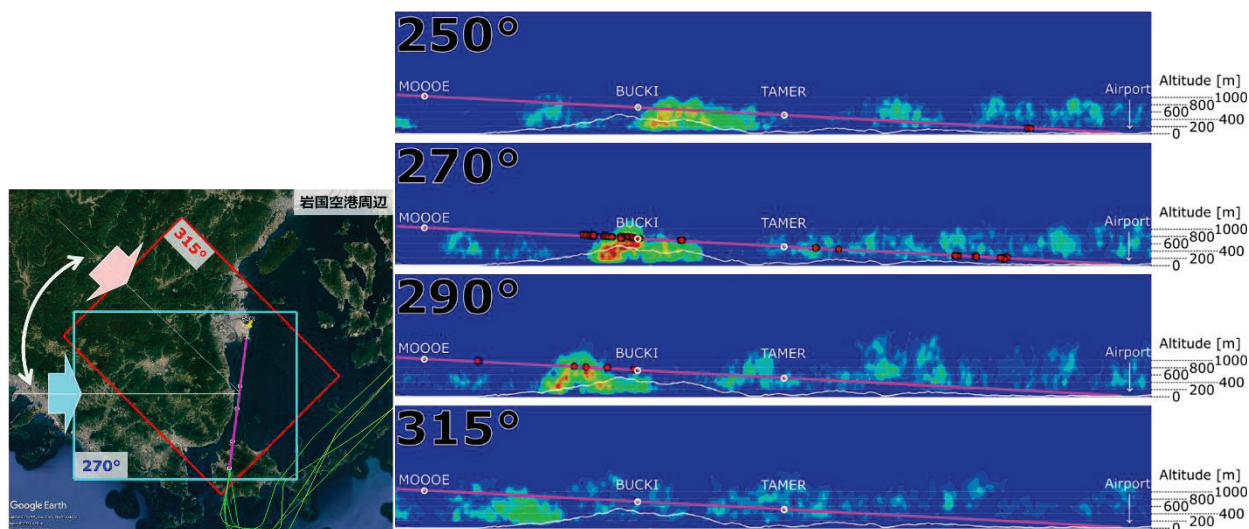
全国各地の沿岸空港で、低層乱気流に起因するインシデント情報が報告されている。運航各社は過去のフライトデータの統計的整理により独自のエアポートガイドを作成し、経験則の伝承とリスク低減に努めてきた。しかし、規程の範囲を越えた揺れや姿勢偏差が、どのような風条件の下で、どのようなメカニズムにより生じたのか、詳細は知られていなかった。力学的に地形性乱気流のメカニズムを解明できれば、滑走路や代替経路の選択、乗務員の状況認識能力向上により、潜在リスクの封じ込めが可能となる。

2. 研究の方法

エアラインより調査依頼のあった、山口県岩国飛行場進入経路上のシビア乱気流について、そのメカニズムを解明すべく、RIAM-COMPACT による風況 LES 計算と精度検証用現地 4 か所でのライダー風観測を実施した。

3. 解析事例

下図は、西からの流入風向を変化させたときの乱気流発生場所と乱気流強度の計算結果である。シビア乱気流については、フライトデータおよび現地ライダー観測（RHI 観測および上下風時間高密度観測）の結果と計算が良く一致していることが確認された。ただし、モデルート以下の乱気流については、周辺大気の状態により、乱気流見える化の精度が低下する可能性に注意が必要である。



左図：計算領域 右図：流入風向を変化させた場合の乱気流発生位置と強度
(右図の左上数字は流入風向、マゼンダ直線は飛行経路、背景に山岳地形が示されている)

4. 今後の展望

2年間の活動を通じて、実地形 LES 計算が空港低層風況の解析に有効であることを示すことができた。

本共同研究と関連した内田教授らとの連携により、強風の影響で欠航率の高い稚内空港の運航効率を、風力発電を活用して解決する研究提案を行い、外部資金の獲得に成功した（令和6年度交通運輸技術開発推進制度「風力発電設備の風速低減効果を活用した空港微気象制御システムの実現性に関する調査とシミュレーション評価」）。今後は、当該研究を進めることで九州大学応用力学研究所との連携を継続していく予定である。

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におけるボイドが、熱抵抗の劣化や疲労寿命にどのように寄与するのかを数値シミュレーションを併用して検討した。

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。図 3 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。実際に熱抵抗が初期値から 20% 上昇するまでのパワーサイクル繰り返し数を寿命とした場合の実測結果を図 4 に示しているが、ボイドの比率や形状ではなく、ひずみ量で寿命を整理する Coffine-Manson 則に従うことが明らかとなった。

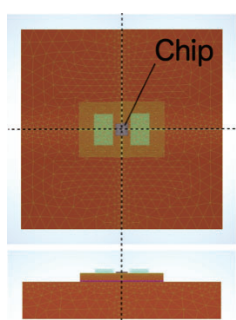


Fig.1 3D model

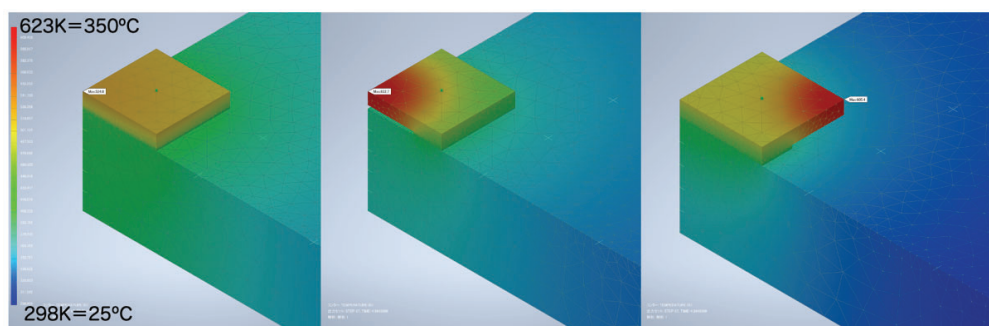


Fig.2 1/4 model of DUT with different void shapes(Left: Ref., Center: A, Right: B)

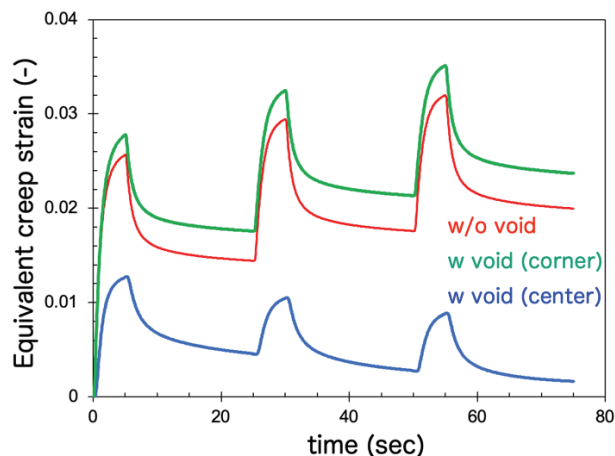


Fig.3 Strain histories during power cycles.

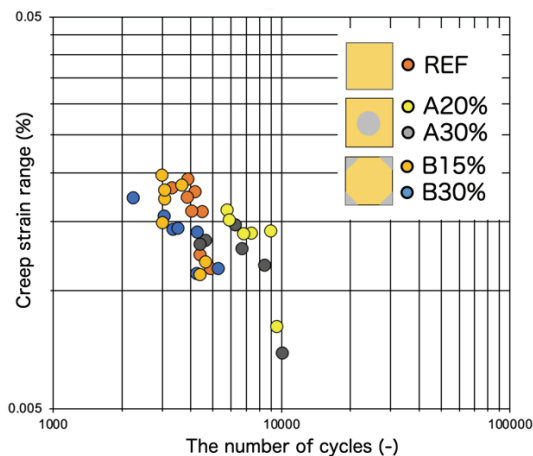


Fig.4 Relationship between lifetime and strain.

高ソリディティを有する抗力型垂直軸風車の性能予測に関する研究

弘前大学・地域戦略研究所 久保田 健

目的

抗力型の風車は低周速で回転する際に高いトルク係数を示すため始動性は良く、揚力型では対応できない低風速からでもエネルギー生成を可能とすることから、抗力型としての性能向上は未利用な低速風を資源化する研究と認識される。CFD 計算 (RANS: SSTk- ω) に際し、3 次元 CFD では風洞実験値とおよそ一致する結果が得られるのに対し、時間コストの安価な 2 次元 CFD では実験値と大きく乖離する。揚力型風車に対する 2 次元 CFD では実験値とおよそ整合する結果となることを踏まえれば、抗力型風車の特徴である高ソリディティ、すなわち閉塞効果の 3 次元性に起因していると考えられる。本研究では、高ソリディティを有する抗力型垂直軸風車の性能予測を 2 次元 CFD 結果から推測する手法の開発を目指し、今回、CFD 計算の参照用実験データを収集した。

方法

風洞実験は、地球大気動態シミュレーション実験棟において実施した。供試風車は図 1 の内挿図に示すように直線 8 枚翼の垂直軸型であって外直径は 300mm、上下天板の径は 310mm (厚さ 2mm) である。軸方向のスパン長は従前の値 (300mm) を基準に 50~450mm の 5 条件とした。なお、風車や支持架台を含めた風洞閉塞率は最大でも 2% 未満である。計測にはロータリーエンコーダ付きトルクメータ UTMII-1.0NmR (ユニパルス社製) を、周速比制御には直流式ヒステリシスブレーキ HB10 (小倉クラッチ社製) を用いた。測定は風速 7m/s で固定、周速比 0.05 刻みで実施し (いずれも公称値)、データは 1000C/sec で 30sec 保存した生値から整数周分を切り出して整理した。

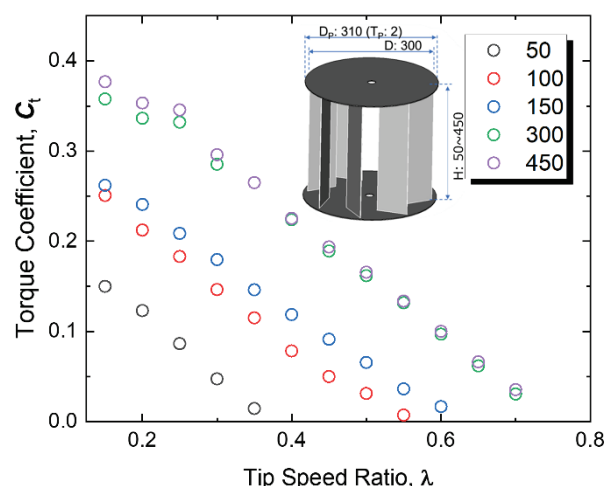


図 1 スパン長を変えた際の直線 8 枚翼の抗力型風車におけるトルク係数 C_t の周速比依存性。
(内挿図は実験に供した風車の外観イメージ)。

結果と考察

図 1 はスパン長を直径比で 0.167~1.5 とした風車におけるトルク係数の周速比依存性である。基準のスパン長 300mm から短くなるに連れ回転トルクが消失する臨界周速比は小さくなる様相を示し、性能ラインは低下方向へと遷移している。スパン長に対してトルク係数や臨界周速比、パワー係数には単純な線形的相関はみられないものの、並行して実施している 3 次元 CFD 計算においても同様の傾向が得られており、今後は実験と CFD 結果の可視化を組み合わせる解析を進める。また、スパン長 450mm のトルク係数曲線は基準とそれとほぼ同値であった。実証実験機の製作に重要な知見であるため、風車性能に影響を及ぼすアスペクト比の観点でも調査を進める。

研究成果報告

発表論文：5 件 (うち 1 件は修士学位論文、詳細は別紙参照)

研究体制

研究代表者：久保田 健 (弘前大学地域戦略研究所・教授)

所内世話人：内田 孝紀 (九州大学応用力学研究所・教授)

研究協力者：岡崎 衆介 (弘前大学理工学研究科・博士前期 2 年)、加藤 隆一 (同・博士前期 1 年)、
芳賀 巧己 (弘前大学地域共創科学研究科・修士 1 年)、工藤 遼磨 (弘前大学理工学部・4 年)

光ファイバー圧力センサーを用いた流速・波浪計の開発研究

長崎大学海洋未来イノベーション機構 経塚雄策

● 研究目的

海洋の利用拡大は、21 世紀の地球環境問題への対策として重要である。そのためには、まず海洋の情報の取得が必要であり、衛星を利用した広域の観測と海面ブイや海中ロボットなどによる海中データが求められている。長崎大学では、現在、潮流発電装置付きの海面ブイ（スマートブイ）の開発を行っており、将来的には多数のスマートブイを用いて海面における情報を面的に計測し、水産や海洋環境保全の目的で活用することなどを計画している。その時に、海洋の物理情報として重要なのが、流れと波浪である。本研究は、近年、発展してきた光ファイバー圧力センサーを用いて海の流れと波浪を計測しようとするもので、主には海面ブイに取り付けて使用することを目的とした計測器の開発研究である。

● 実験方法および平水中の実験結果

図 1 のように、正方断面(5x5)、L=1070mm のステンレスロッドの水面下に光ファイバー圧力センサーを 4 枚、水面上に歪ゲージを 4 枚貼り付けた流速計を用いて実験を行った。流向は流速計を取付けた回転台の角度を、 -30° から 90° までの範囲を 10° 毎に回転して行った。実験流速は、 $U=0.1\sim 1.0\text{m/s}$ の範囲を 0.1m/s 毎に変化させた。図 2 は歪ゲージから求められた流向の計測結果を示したものである。これから、流向は低速時においても非常に良い精度で求められることが分かる。この流向角度に対する圧力センサーの計測値から圧力係数($C_p=P/(\rho/2*U^2)$)を求め、プロットすると図 3 を得た。ここで、圧力センサーは 4 つあるが 4 つの最大値を上流側の値として採用した。図 3 において、 $U=0.6$, 0.7 , 0.8m/s の実験結果のみを用いたのは、これらの計測が安定していたためであり、精度の良い近似式を求めるためである。

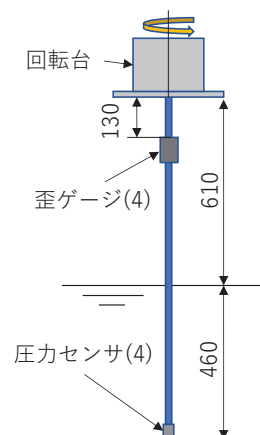


図 1 圧力センサー式流速計

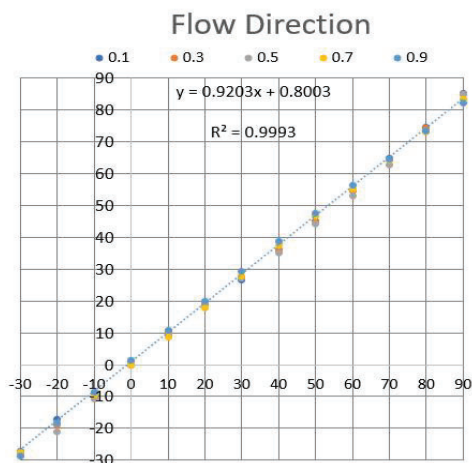
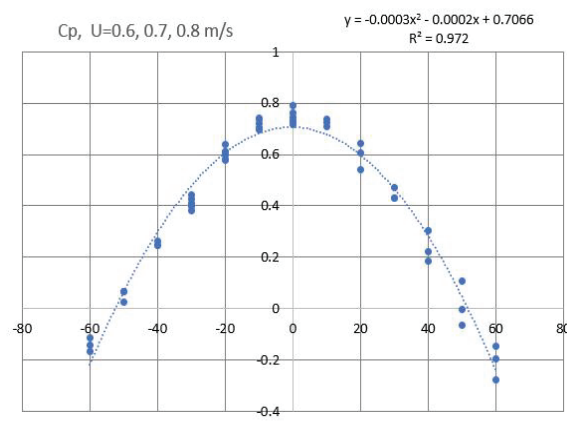


図 2 歪センサーから求められる流向

図 3 C_p 近似式 ($U=0.6, 0.7, 0.8\text{m/s}$)

流速を求める手順としては歪ゲージの計測値から流向角度が求められるので、図3の近似式を用いて $\theta = 0^\circ$ における C_p を求め、これと圧力の最大値($P = \rho gh$)から

$$U = \sqrt{2gh / C_p(0)} \quad (1)$$

として求めた。図4は、今回の全実験結果を流向角度ごとに(流速)と(近似式による推定値)の2乗誤差を求めたものであるが、 40° および 50° については誤差がやや大きくなった。

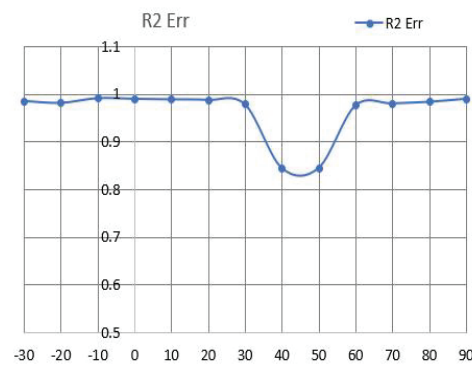


図4 流向と計測誤差

● 波浪中の実験結果

波浪中の実験は、水槽中に規則波($H_w = 0.04$ m, $T_w = 0.7, 1.0, 1.3$ s)を発生させて、その中で曳引車を $U = 0, \pm 0.5, \pm 1.0$ m/s で走らせて圧力を計測した。流向は $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ とした。図5は、圧力センサーの波形を例として示したものであるが、この圧力波形には電気的と思われる数ヘルツの信号が乗っている。この例は、 $U = 0.5$ m/s で波浪の伝搬方向とは逆方向に進行している場合であり、P01の波形だけがプラス側にシフトしている。また、波周期($T_w = 1.3$ s)よりも出会い波周期が短くなっている。波浪中のデータ解析法については、無意味な雑音を除くためクリティカルなデジタルフィルターを用いて解析する方法も試みたが、最終的にFFT(100Hz, $N = 2^{12}$)を用いたスペクトル解析を行った。

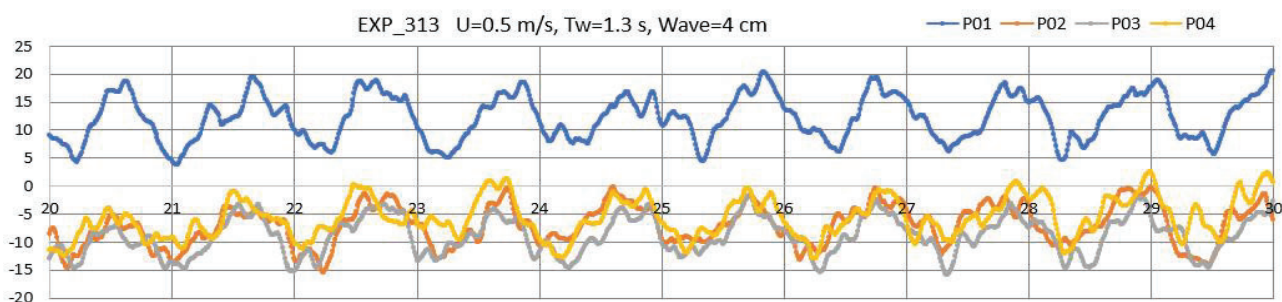


図5 圧力センサー計測波形(EXP_313, $U = 0.5$ m/s, $T_w = 1.3$ s, $H_w = 0.04$ m)

● 考察

図6は、今回行った規則波実験の中で実海域の条件に最も近いと思われる $T_w = 1.3$ s, $U = \pm 0.5$ m/s のスペクトルの結果を比較した。規則波なので結果は線スペクトルとなっているが、波と潮流が重なる場合には出会い波周期(T_e)は理論的に次式のように変化する。

$$\omega_e = \omega \pm \frac{\omega^2}{g} U \cos \chi \quad (2)$$

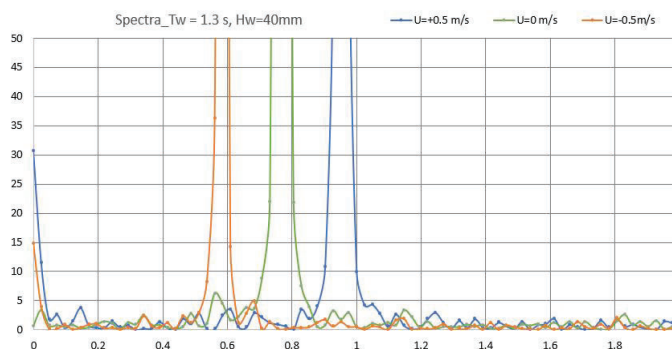


図6 圧力のスペクトル($T_w = 1.3$ s; $U = 0, \pm 0.5$ m/s)

図 6 は、流れの影響によって波浪の出会い周期が変化することを明確に示している。

実海域では、通常、波周期は 3 s 以上で、潮流は 2m/s 以下なので(2)による修正は必要ではないかも知れないが特殊な状況ではこの修正が重要となる場合も考えられる。その点、潮流と波浪の同時計測が可能な本システムには優位性があると思われる。

● 今後の開発について

今回の実験結果によって、ロッドに張り付けた歪ゲージと光ファイバー圧力センサーによる流速・波高計の精度と今後の改良点が明らかとなった。流速計については、断面が正方形の 4 面に圧力センサーを貼り付けて計測を行ったが、流向が 45° 方向の流速の精度がやや悪かった。この改良法としては、単純に 8 角形断面にして圧力センサーを 8 枚にすれば良いと思われるが、圧力センサーの大きさと 8 角形ロッドの 1 辺の長さの関係を考慮する必要がある。波高計としては、今回は波高 4 cm の規則波であることが分かっていたので、計測値に没水深度の修正をしないで使ったが、厳密にはその修正をする必要がある。さらに、本流速・波高計は、実海域での使用を目的としているためデータ処理および解析のためには装置内蔵のワンチップマイコンが必須であり、それらの開発も並行して行う必要がある。

● 研究組織

氏 名	所 属	職名・級号俸等 (院生は学年)	役割・ 担当分野
経塚雄策	長崎大学	特定教授	研究代表者・実験解析
若原正人	(株) シミウス	技術主幹	実験・圧力センサー
胡 長洪	九州大学	教授	所内世話人
合計 3 名			

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 超伝導・低温工学ユニット 平野 直樹

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、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。

昨年の本研究会では、核融合炉工学や水素利用の最新技術に関する講演会を実施したが、本年度は水素の製造、経済性、普及や核融合の経済性に着目した研究会を実施した。初日の講演会では、水素エネルギーや核融合技術の社会実装のために邁進する研究開発に関する講演を行い、翌日には水素エネルギー製品研究試験センター(HyTReC)を見学した。

2. 開催日時、場所、参加人数

(1) 日程： 10月2日(水) 13:20 – 17:10

10月3日(木) 10:00 – 11:30

(2) 場所：10月2日 九州大学筑紫キャンパス応用力学研究所2階大会議室

10月3日 水素エネルギー製品研究試験センター(HyTReC)

(3) 参加人数：10月2日 28名

10月3日 19名

3. 参加者リスト

1	秋田調	福島国際研究教育機構	その他
2	田口裕章	株式会社ジェック東理社	企業
3	鶴留武尚	住友重機械工業株式会社	企業
4	恵美雄一	川崎重工業株式会社	企業
5	吉田結	川崎重工業株式会社	企業
6	若井雅友	川崎重工業株式会社	企業
7	岸洋一	川崎重工業株式会社	企業
8	松本昌大	川崎重工業株式会社	企業
9	秋山淳司	川崎重工業株式会社	企業
10	成瀬良英	株式会社三五	企業
11	石井嘉人	株式会社ジェック東理社	企業
12	藤田雅和	川崎重工業株式会社	企業
13	植本崇之	川崎重工業株式会社	企業
14	上出 俊夫	清和印刷株式会社	企業
15	井上 彰太	アナリティカオルビス	企業
16	北口 仁	物質・材料研究機構	国研
17	吉田茂	核融合科学研究所	国研
18	大屋正義	関西学院大学	大学
19	木須隆暢	九州大学	大学
20	辻上博司(講師)	岩谷産業	企業
21	中島裕典(講師)	九州大学	大学
22	河合大洋(講師)	中部圏水素利用協議会	その他
23	原田耕佑(講師)	ENEOS	企業
24	後藤拓也(講師)	ヘリカルフュージョン	企業
25	芦川直子(講師)	京都フュージョニアリング	企業
26	平野直樹(オーガナイザー)	核融合科学研究所	国研
27	仲村直子(オーガナイザー)	核融合科学研究所	国研
28	花田和明(世話人)	九州大学	大学

*企業 18名、 大学 4名、 国研 4名、 その他 2名

4. 研究会プログラム

10月2日(水)

- 13:20-13:30 開会の挨拶 花田 和明（九州大学応用力学研究所）
- 13:30-14:05 水素製造技術の現状について 辻上 博司（岩谷産業）
- 14:05-14:40 水素燃料電池の基礎研究と応用 中島 裕典（九州大学）
- 14:40-15:15 中部圏水素利用協議会 河合 大洋（中部圏水素利用協議会）
- 15:15-15:25 休憩
- 15:25-16:00 エネルギー需給モデルを活用した新規技術の導入可能性評価 原田 耕佑（ENEOS）
- 16:00-16:35 核融合発電プラントのコストをどう考えるか 後藤 拓也（ヘリカルフュージョン）
- 16:35-17:10 核融合プラントからのエネルギー利用 芦川 直子（京都フュージョニアリング）
- 17:10-17:15 閉会の挨拶 平野 直樹（低温工学・超電導学会）
- カーボンニュートラルに向けた核融合研究の新展開に関する調査研究会主査

10月3日(木)

- 10:00-10:30 水素エネルギー製品研究試験センター(HyTReC)の紹介
- 10:30-11:30 設備見学

5. 発表概要

辻上 博司（岩谷産業）

「水素製造技術の現状について」

水素の最新マーケット状況について紹介された後に各種存在する水素製造技術の網羅的な説明がなされた。様々な機関が水素製造に関する研究開発を進めているが、どの方法も一長一短あり、水素の製造量や利用先などにより水素製造方法が選定されるとのことであった。また、水素ビジネスを牽引する岩谷産業の水素供給先などについても紹介があった。

中島 裕典（九州大学）

「水素燃料電池の基礎研究と応用」

水素の利用先の一つである燃料電池の先端開発状況について紹介がなされた。特に九州大学で進められている固体高分子型や個体酸化物型の技術動向や実証試験の現状について説明があり、これらが市場で利用されるためには、さらなる燃料電池の性能向上や価格低減が必要とのこと。さらに、燃料電池に必要な水素の規制緩和の必要性についても紹介された。

河合 大洋（中部圏水素利用協議会）

「中部圏水素利用協議会」

中部圏での水素インフラ構築のため民間企業 48 社が参画する中部圏水素利用協議会について紹介がなされた。中部圏水素協議会の構想では、伊勢湾の名古屋、四日市などの港で海外から輸入する水素を受け取り、豊田市などの三河地域にローリーなどで移送し、地域のパイプラインで水素を各工場に分配するサプライチェーンを検討しているとのこと。

原田 耕佑 (ENEOS)

「エネルギー需給モデルを活用した新規技術の導入可能性評価」

将来のエネルギーの定量的な需給分析として、エネルギー基本計画の策定でも利用される最適化型エネルギー需給モデルを利用した評価を実施。将来予測されている再エネや蓄電池を一定量電力系統に組み込み、アンモニア利用、合成燃料利用、CCS コスト等を加味した検討を行っており、電力コストに及ぼす影響の算定結果について紹介がなされた。

後藤 拓也 (ヘリカルフュージョン)

「核融合発電プラントのコストをどう考えるか」

既存発電プラントと核融合プラントの発電コストや建設コストを比較し、核融合プラントの発電コストから建設コストにフィードバックした検討を行っている。既存の発電所の建設コストより高くなる核融合プラントのコスト低減をはかるため、装置サイズの縮小などを試みる必要性が提案された。安全性や廃棄物の有無などコスト以外の比較も行い、核融合炉にはコスト以外の魅力があることも紹介された。

芦川 直子 (京都フュージョニアリング)

「核融合プラントからのエネルギー利用」

京都フュージョニアリングで現在進められている核融合炉のブランケット等から取り出される熱(模擬)を発電に結び付ける装置開発のプロジェクトについて紹介がなされた。2024 年にベースループ試験にて 500°Cの熱の取出しに成功し、次は MHD コイルを利用した実証試験に進むとのこと。京都フュージョニアリングでは、京都に縁の深い竹を用いた材料開発も実施中とのこと。

6. 本研究会による成果

本研究会では、核融合技術で発電と水素製造を同時に行うシステムの技術調査を進めており、今年度は核融合や水素製造の経済性に着目した講演会を開催した。特に、水素市場で活躍する専門家に講演を頂き、市場側から見た水素価格の在り方などについても議論を行い、今後の核融合および水素製造の研究開発の一助となる情報や考え方を入手することが出来た。翌日の水素エネルギー製品研究試験センターの見学では、超高压水素による容器の破裂試験設備や高压水素実験場の見学を行い、国内の最先端の技術を実際に見ることが出来た。

以上

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。別個にすすめられているこれらの問題に対して、本研究集会では共通の物理課題を探ることを目的とする。異なる問題に対して試みられているアプローチに対して、別の課題への応用可能性などについて探ることを目的とする。

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、今年度は対面によるワークショップを12月5日、6日に開催した。発表プログラム、概要については以下の通りである。

非線形プラズマ科学2024、応用力学研究所2階会議室、12.5-6 2024

12.5 (木曜)

13:30 – 13:40: 事務連絡

Session I: 【輸送、データ解析】

13:40 – 14:10: 小菅佑輔（九大、応研）、核融合プラズマにおける輸送の干渉（非拡散輸送）

核融合プラズマでは輸送の干渉がしばしば見られる。特に熱入力がある場合には、熱の輸送により温度分布の緩和が見られる一方で、粒子や運動量については様々な非線形構造が形成されるなど、いわゆる非対角的な輸送が起こる。本講演では、核融合で報告されている熱輸送とトロイダル運動量輸送の干渉（自発回転の生成）、磁化プラズマ実験で観測された運動量輸送と密度輸送の干渉（PVGによる密度ピーキング）を具体的な例として報告する。複合的な輸送プロセスが絡み合う問題に対して、エントロピーに着目することで統一的に時間発展を記述する方法について説明し、実験データ解析への応用事例についても議論する。

14:10 – 14:40: 小林達哉（核融合科学研究所）、核融合プラズマと過渡的輸送現象（非局所輸送）

核融合プラズマと過渡的輸送現象(非局所輸送)について発表した。核融合プラズマでの輸送研究の目的とその重要性、長年の研究課題とその解決のケーススタディについて詳細に説明した。特に、大型ヘリカル装置(核融合科学研究所)及び DIII-D(General Atomics, US)における実験研究結果について発表した。前者では、摂動加熱時に輸送フラックスに分岐現象が見られること。その分岐は乱流エネルギーの加熱パワーに対する顕著な依存性が原因となりうることを議論した。後者では、自発的閉じ込め改善現象(L-H 遷移)時に、グローバルな閉じ込め改善が観測されることを示した。その際、輸送フラックスの強い勾配依存性によりわずかな勾配変化で急激な輸送改善が引き起こされていること、それが連鎖的に起こりグローバルな閉じ込め改善を説明することを議論した。

14:40 – 15:10: 松本仁（福岡大学）、超新星爆発における乱流 α 効果により増幅された磁場の果たす役割

大質量星は進化の最終段階で重力崩壊型の超新星爆発を引き起こす。その爆発メカニズムには、星の最深部で形成された原始中性子星からのニュートリノによる加熱が重要な役割を果たすと考えられている。一方で、超新星爆発前後の恒星および中性子星には磁場の存在が確認されているが、爆発メカニズムへの寄与の理解は進んでいないのが現状である。本研究では、ニュートリノ輻射輸送込みの三次元電磁流体シミュレーションを用いて重力崩壊型超新星爆発のダイナミクスを調べた。その結果、ニュートリノ駆動による対流に強い運動学的ヘリシティが生じ、乱流 α 効果により指数関数的に増幅された磁気圧が爆発をサポートするという新しい爆発メカニズムを発見した。本講演ではそのメカニズムの詳細について報告する。

15:10 - 15:30: 休憩

15:30 – 16:00: 鈴木康浩（広島大学）、イメージプロセスによるオーロラのコヒーレント構造の抽出

オーロラの流動特性とそれに付随する電磁的特性を明らかにするために、地上から撮像された画像解析を行った。画像解析による velocimetry は流体力学における PIV が有名であるが、オーロラにトレーサ粒子を混入させることは難しいため、Optical Flow を適用した。Optical Flow は輝度の変化から、物体の移動を速度ベクトルとして求めるものである。Optical Flow をオーロラ画像に適用したところ、velocimetry に成功した。また、ディスクリットオーロラに現れる渦構造は、強いせん断流れにより駆動される強制渦であることが分かった。

16:00 – 16:30: 政田洋平（福岡大学）、太陽熱対流のトポロジカルデータ解析

位相的データ解析 (TDA) とは、トポロジーの視点からデータの特徴を捉え分類・定量化を行う解析手法であり、近年、科学諸分野への応用が進んでいる。TDA では、データを「穴」の集合として解釈し、穴構造のサイズや形状の情報をパーシステントホモロジーという数学理論に基づき代数化、特徴量として抽出する。これは、複雑なデータを階層的な「穴」を使って縮約する方法であり、フーリエ変換等の従来手法による特徴づけが難しい非周期的な局在構造を抽出するのに有効である。今回の研究会では、太陽熱対流の観測データに TDA を適用した結果について紹介する。我々の研究の結果、太陽表面には超高分解能観測でしか捉えることのできない『局在化した高速下降流領域』が存在することがわかった。

16:30 – 17:00: 古田原拓実 (日本大学)、プラズマ乱流シミュレーションにおける多重場特異値分解を用いた粒子・運動量輸送解析

磁場閉じ込めプラズマは乱流の構造形成に支配される。乱流-構造間の相互作用は ELMs や L-H 遷移等の突発現象を駆動する。構造形成の従来研究ではレイノルズ応力等の 2 次非線形性に着目されてきたが、基礎装置や境界プラズマでは更に高次の非線形性が重要となりうる。本研究では、高次非線形性を考慮した構造間相互作用の定量化により、突発輸送の駆動機構を調査した。基礎実験装置に基づく乱流シミュレーションから得られた密度場、ポテンシャル場、渦度場に対し多重場特異値分解を適用した。密度と径方向流れのモード毎の積から各モードの輸送への寄与を評価することで、突発輸送に対しインコヒーレントモードが重要であることが分かった。渦度方程式の 3 次非線形項の寄与を調査することで、インコヒーレントモードの励起に定常的な密度勾配と流れの結合が寄与することが分かった。

12.6 (金曜)

9:30 – 9:40: 諸連絡

Session II: 【波動、揺動一般】

9:40 – 10:10: 大貫陽平 (九大、応研) : 成層流体における小スケール不安定の非線形シミュレーション

海洋や大気といった安定に密度成層した流体を想定し、基本流に比べて十分小さな波長をもつ擾乱が起す小スケール不安定について、従来の WKB 近似に基づく線形安定性解析を拡張した非線形シミュレーションを導入した。このシミュレーションでは、局所線形近似した基本流とともに運動する座標系を設定し、変形する平行六面体領域において三方向に周期境界条件を設定することで、その内部での擾乱の時間発展をフーリエスペクトル法で計算する。基本流の大域的な構造を陽に解像しないため、擾乱の二次不安定による乱流遷移と粘性散逸を効率的に解像できるという利点がある。本講演では、内部重力波のパラメトリック不安定と楕円不安定の二種類の不安定現象についての計算を紹介し、海洋学的視点でその結果の解釈を議論した。

10:10 -10:40: 中島涼輔 (九大、地惑) : 回転球面上の 2 次元非圧縮 MHD 波の波線理論的アプローチ

地球の固有磁場は、地球内部の外核と呼ばれる液体金属層の流動によって生成・維持されている。そのため、地上で観測される地球磁場の形やその時間変化は、地球内部を知ることのできる数少ない道具の一つである。近年、地震学的な研究などから、外核の最上部は安定な密度成層をしているのではないかという説が提案されている。そこで、地球磁場変動を用いて外核最上部安定成層を理解することを目指し、そのような変動を引き起こしうる安定成層内の磁気流体波について考える。本発表では、背景の磁場分布によって、数年から数十年規模の地球磁場変動を引き起こす波は離散固有モードになれず、Alfvén 連続スペクトルへと変化することを示す。さらに、波線理論を用いて、なぜそのような長周期の波の離散固有モードが消えるのかを考察する。

10:40 – 11:10: 徳満優（九大、総理工）：対流不安定性における帯状流の発生とカオスとの関連

乱流の相互作用により励起される帯状流の理解とその制御メカニズムを把握することは、核融合発展における一つのキーファクターである。本報告では、熱対流による帯状流の励起機構に着目し、熱対流にて発生すると報告されているカオス現象と帯状流の関係性をプラズマの制御という観点で調査し、報告するものとする。

Rayleigh-Benard 対流を対象とした流体簡約化モデルから導出された、対流と帯状流の発生を記述する少数力学系モデルを数値的に解き、レイリー数への依存性を調査した。レイリー数を増加させるに従い、対流不安定生の発生、渦の傾きと帯状流の発生、カオス的時系列の生成、が確認された。対流胞励起の挙動と帯状流の発生メカニズムについて、その因果関係が明確に判断できない部分が潜在する為、今後は帯状流と対流のエネルギー交換や熱フラックスを鑑みた調査を進める。

11:10 – 11:40: 寺坂健一郎（崇城大学）：CH 解析を用いた揺動解析

揺らぎのあるプラズマの輸送を高速かつ緻密に制御するという観点では、時系列データから揺動の特徴を簡便かつ定量的に扱うことが出来る統計量の導入が望ましい。

CH解析は、揺らぎを含む時系列データをパターンで整理し、その確率分布から複雑性(C)とエントロピー(H)で揺らぎの特徴を定量化する方法である。本研究会では、実験的に様々な揺動パターンを実現できる直流グロー放電装置を用いて、プラズマの自発光信号のCH統計量を調べた結果について報告し、プラズマ制御へのCH統計量の導入の可能性について議論する。

11:40 – 13:00: 休憩

13:00 – 15:00: ブレイクアウトセッション

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。

3. 参加者リスト

参加者名	所属	学生
小林達哉	核融合科学研究所	
堀久美子	核融合科学研究所	
古田原拓実	日本大学	○
鈴木康浩	広島大学	
小菅佑輔	九州大学応用力学研究所	
辻英一	九州大学応用力学研究所	
山本勝	九州大学応用力学研究所	
Moon Chonho	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	
中島涼輔	九州大学理学府	
小山一輝	九州大学総合理工学府	○
徳満優	九州大学総合理工学府	○
肥田愛蘭	九州大学総合理工学府	○
福山隆雄	長崎大学	
三好裕杜	長崎大学	○
松本仁	福岡大学	
政田洋平	福岡大学	

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

富山県農林水産総合技術センター水産研究所 阿部隼也

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6年9月10日（火）、9月11日（水）

場所：①WEB 会議（ZOOM 開催 参加希望者に直接 URL を送付）

②九州大学筑紫キャンパス応用力学研究所 301 号室

概要：研究集会は、WEB 会場と現地会場を併設し、2 日間にわたって開催した。1 日目前半は、各府県担当者のお悩み相談会として、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。1 日目後半および2 日目は、研究発表および話題提供として、6 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 日目前半は、府県担当者が行う急潮情報、急潮および漁具被害の発生事例やドローンを用いた定置網のモニタリング等について、京都府、長崎県、神奈川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、観測機器の活用方法や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。

1 日目後半および2 日目は、高知県水産試験場有光氏および石川県水産総合センター仙北屋氏から各地先における急潮発生のメカニズムについて、福井県立大学兼田教授から若狭湾の流況解析結果について、気象庁気象研究所青木研究官により深層生成モデルを用いた急潮の分類について発表が行われ、それぞれの議題に対して活発な質疑応答がなされた。また、急潮対策用海洋レーダー（福井県立大学渡慶次准教授から）および網漁具水中動態解析システム（NaLA System）（北海道大学大学院高木教授から）について、紹介がなされた。

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】2024年9月10日（火）14:00～17:00, 9月11日（水）9:00～12:00

【場所】九州大学筑紫キャンパス応用力学研究所 3F（301号室）

【9月10日（火）14:00～17:00】

- ・開会挨拶および開催趣旨説明 14:00～14:05
- ・お悩み相談会 14:05～15:50
 - (1) 趣旨説明
 - (2) 自己紹介
 - (3) お悩み相談会
- ・研究発表及び話題提供
 - (1) 令和6年度に発生した急潮について 15:50～16:25
有光 慎吾（高知県水産試験場）
 - (2) 低気圧による急潮の発生事例について 16:25～17:00
仙北屋 圭（石川県水産総合センター）

【9月11日（水）9:00～12:00】

- ・研究発表および話題提供
 - (3) 福井県沿岸の流れの変化と観測体制の強化 9:00～9:35
兼田 淳史（福井県立大学 海洋生物資源学部）
 - (4) 福井県立大学で取り組む海洋レーダー研究と今後の展開 9:35～10:05
渡慶次 力（福井県立大学 海洋生物資源学部）
 - (5) 深層生成モデルを用いた急潮の分類 10:05～10:35
青木 邦弘（気象庁気象研究所）
 - (6) 網漁具水中動態解析システム（NaLA System）を用いた漁業技術高度化への取り組み 10:45～11:15
高木 力（北海道大学大学院 水産科学研究院）
- ・全体質疑および総合討論 11:30～11:50
- ・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 19 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
福井県立大学 海洋生物資源学部	兼田 淳史	現地
福井県立大学 海洋生物資源学部	渡慶次 力	現地
北海道大学大学院 水産科学研究院	高木 力	現地
気象研究所	青木 邦弘	現地
気象研究所	広瀬 成章	現地
気象庁 大気海洋部	坂本 圭	web
国立研究開発法人 水産研究・教育機構	清水 勇吾	web
国立研究開発法人 海洋研究開発機構	宮澤 泰正	現地
国立研究開発法人 情報通信研究機構	灘井 章嗣	web
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	倉垣 拓二	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
千葉県水産総合研究センター	大畑 聡	web
静岡県水産・海洋技術研究所	増田 傑	web
新潟県水産海洋研究所	佐藤 修	web
新潟県水産海洋研究所	丸山 克彦	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	現地
石川県水産総合センター	仙北屋 圭	現地
福井県水産試験場	梶原 大郁	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	web
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
京都府農林水産技術センター海洋センター研究部	山淵 航助	現地
鳥取県水産試験場	足立 惣平	web
島根県水産技術センター	山根 広途	web
高知県水産試験場	有光 慎吾	現地
高知県水産試験場	猪原 亮	web
福岡県水産海洋技術センター	長岡 光佑	web
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	高木 信夫	現地

課題番号：2024WS-A0-2

研究集会「地球流体における波動と対流現象の力学」の報告

研究代表者：伊賀 啓太（東京大学 大気海洋研究所）

・目的

近年の計算および観測技術の著しい進歩により、大気や海洋の小規模渦から大規模循環まで計算機上で再現できるようになり、リモートセンシングやその場観測の蓄積に伴い、さまざまな時空間スケールの観測データが入手可能になった。今日では、地球科学は、再現と検証の手段を得て、先端科学のひとつに変貌している。このような状況において、地球流体力学は、数値モデルや観測の膨大なデータを整理し統一的な理解を得るのに、重要な役割を担う学問である。本研究集会の目的は、複数の分野の地球流体力学に関連した研究者が一堂に集まり、相互に最新の情報を交換し、異なる分野研究の相互理解を深め、新しい学問の展開を模索するものである。

・概要

開催日時：2025 年 3 月 3 日（月） 13 時 30 分 ～ 17 時 40 分
2025 年 3 月 4 日（火） 9 時 30 分 ～ 16 時 30 分

開催場所：九州大学応用力学研究所（福岡県春日市春日公園 6-1）3 階講義室
地球流体力学研究集会の概要：本集会は九州大学応用力学研究所と東京大学大気海洋研究所の間で交互に開催される地球流体力学研究集会であり、今回は 26 回目にあたる。分野が異なる研究協力者の間の日程調整が難しかったが、2025 年 3 月 3 日と 4 日に計 18 件の講演を実施した。今回は、本研究所の小菅先生に実験室プラズマに関する講演を依頼した。プラズマ物理の中のいくつかの現象は地球流体力学との共通性があり、大気力学および海洋力学との親和性が高い。そこで、小菅先生にプラズマ物理のレビューや最新成果を、大気海洋の研究者に、50 分の講演・質疑応答していただいた。その他の通常講演も、質疑応答を含めて 30 分の時間を確保し、十分な議論ができるようなプログラム構成にした。今回は、ハイブリッドではなく、対面のみで実施した。

・実施内容

一日目は、流体物理を中心に、プラズマ、海洋乱流、渦の力学やトポロジー、月マントルや地球大気の大循環に関する講演があり、二日目は「対流圏」と「惑星大気」を中心に、温帯低気圧や台風の力学、数値計算技法、惑星大気に関する講演があった。今回、30 名の参加があり、十分な質疑応答や講演後の議論を行

い、多様な分野の研究者と交流を行うことができた。

研究集会の内容は以下のように要約される。1 日目は、研究代表者が本研究集会の趣旨説明した後、7 件の講演を行った。実験室プラズマにおける波動・流れ・非線形波動、海洋の水面波が引き起こす乱流の機構と特性、一般化された 2 次元流体系の点渦モデルにおける三個の渦の非自己相似合体、曲面上の 2 次元流体における渦度場のフィラメント化と流れ領域の曲率、回転成層流体のトポロジカル指数とバルク-エッジ対応、月の内部進化における火成活動を考慮した 3 次元部分球殻マントル対流モデル、大気大循環モデルでの北半球ブロッキング気候値再現実験に関する議論が行われた。

2 日目は、オホーツク海の二つ玉低気圧、温帯低気圧の構造・発達に対する下層環境風の影響、高渦位を伴う切離低気圧の併合と背景場との関係、台風全域 LES で急発達前に出現するメソ渦の解析、温帯低気圧化時に見られた寒冷渦下部から伸長する圏界面の折れ込みに対する降水帯の寄与、極を含む等緯度経度格子上の浅水波方程式に対する高速フーリエ解法、自動微分を用いた数値最適化と変分法データ同化、金星 AFES を用いた最近の研究紹介、金星中間赤外カメラ観測を想定した観測シミュレーション実験による感度調査、金星の紫外アルベドと大気運動の長期変動、火星の地表低気圧の出現頻度とダストストームの関係に関する議論が行われた。

7 名の大学院学生の発表があり、情報交換や教育の場としても良い機会であった。また、理論だけでなく、数値計算手法やデータ同化の応用まで広く議論ができた。今回の研究集会は、流体物理から地球流体にわたる広範なテーマが包括でき、自分の専門以外の研究をじっくり聞く良い機会を提供できたのではないかと思う。

以下に、プログラム、発表概要、参加者内訳を添付いたします。

九州大学応用力学研究所共同利用研究集会

地球流体における波動と対流現象の力学

日時： 2025 年 3 月 3 日（月） 13:30-17:40

3 月 4 日（火） 9:30-16:30

場所：九州大学応用力学研究所（福岡県春日市春日公園 6-1）3 階講義室

コンビーナー：伊賀 啓太（東京大学大気海洋研究所）

所内世話人：山本 勝（九州大学応用力学研究所）

プログラム

3 月 3 日（月）

13:30-13:40 *伊賀啓太(東京大)

趣旨説明

13:40-14:30 *小菅佑輔（九州大）

実験室プラズマにおける波動・流れ・非線形波動

14:30-15:00 *吉川裕（京都大）， 今村春香（京都大）

海洋の水面波が引き起こす乱流の機構と特性について

15:00-15:30 *岩山隆寛（福岡大）， 谷島尚宏（宇都宮大）， 渡邊威（名古屋工業大）

一般化された 2 次元流体系の点渦モデルにおける三個の渦の非自己相似
合体

休 憩

15:40-16:10 *漁野光紀（京都大）， 石岡圭一（京都大）

曲面上の 2 次元流体における渦度場のフィラメント化と流れ領域の曲率

16:10-16:40 *大貫陽平（九州大）， Antoine Venaille（ENS de Lyon）， Pierre Delplace
（ENS de Lyon）

回転成層流体のトポロジカル指数とバルク-エッジ対応

16:40-17:10 *于賢洋（東京大）， 亀山真典（愛媛大）， 宮腰剛広（海洋研究開発機構），

柳澤孝寿（海洋研究開発機構），小河正基（東京大）
月の内部進化：火成活動を考慮した 3 次元部分球殻マントル対流モデルの構築

17:10-17:40 *山崎哲（海洋研究開発機構），馬場雄也（海洋研究開発機構），山本絢子（桜美林大），Patrick Martineau（海洋研究開発機構），野中正見（海洋研究開発機構）
大気大循環モデルでの北半球ブロッキング気候値再現実験

懇親会（18:00～）

3 月 4 日（火）

9:30-10:00 *藤拓実（九州大），山本勝（九州大）
2001 年 3 月中旬に見られたオホーツク海の二つ玉低気圧について

10:00-10:30 *栃本英伍（気象庁気象研究所），Thomas Spengler（University of Bergen）
温帯低気圧の構造・発達に対する下層環境風の影響

10:30-11:00 *山本晃立（東京大），伊賀啓太（東京大）
高渦位を伴う切離低気圧の併合と背景場との関係について

11:00-11:30 *櫻井勇太郎（東北大），伊藤純至（東北大），宮本佳明（慶應大）
台風全域 LES で急発達前に出現するメソ渦の解析

休 憩

12:50-13:20 *入江健太（京都大），竹見哲也（京都大）
台風 Lionrock(1610)の温帯低気圧化時に見られた寒冷渦下部から伸長する圏界面の折れ込みに対する降水帯の寄与

13:20-13:50 *野村鈴音（京都大），榎本剛（京都大／海洋研究開発機構）
極を含む等緯度経度格子上の浅水波方程式に対する高速フーリエ解法

13:50-14:20 *榎本剛（京都大）

自動微分を用いた数値最適化と変分法データ同化

14:20-14:50 *杉本憲彦（慶應大），藤澤由貴子（慶應大），小守信正（慶應大），Jianyu Liang（理化学研究所），三好建正（理化学研究所），金星 AFES チーム
金星 AFES を用いた最近の研究紹介

休 憩

15:00-15:30 *藤澤由貴子（慶應大），杉本憲彦（慶應大），小守信正（慶應大），安藤紘基（京都産業大），高木征弘（京都産業大），村上真也（宇宙科学研究所），神山徹（産業技術総合研究所），前島康光（神戸大）
金星中間赤外カメラ観測を想定した観測シミュレーション実験による感度調査

15:30-16:00 *滝川有希（京都産業大），高木征弘（京都産業大），安藤紘基（京都産業大），佐川英夫（京都産業大），杉本憲彦（慶應大），神山徹（産総研），松田佳久（東京学芸大）
金星の紫外アルベドと大気運動の長期変動

16:00-16:30 *正生大輝（九州大），山本勝（九州大）
火星の地表低気圧の出現頻度とダストストームの関係について

発表概要(表題、講演者、要旨)(敬称略)

○実験室プラズマにおける波動・流れ・非線形波動

小菅 佑輔 (九州大)

プラズマ物理の中のいくつかの現象は地球流体力学との共通性があり、大気力学および海洋力学との親和性が高い。そこで、地球流体力学に関係しそうなプラズマの「帯状流」「乱流」「突発的に起こる波動」などのレビューや最新成果を紹介いただいた。

○海洋の水面波が引き起こす乱流の機構と特性について

吉川 裕 (京都大)

海洋の水面波が引き起こす乱流について、これまでの観測や実験、理論を簡単に紹介するとともに、講演者らが行った実験によって明らかになった(整理された)機構(波と流れの相互作用による乱流強化)と特性(乱流強度のパラメータ依存性)について紹介があった。

○一般化された2次元流体系の点渦モデルにおける三個の渦の非自己相似合体

岩山 隆寛 (福岡大)

距離の $3-\alpha$ 乗(ここで α は $0 < \alpha \leq 3$) で減衰していく流れを生じる点渦モデルにおいて、3個の渦の非自己相似合体を議論する。Euler 方程式から導かれる古典的な点渦($\alpha=2$)では、渦を結んでできる三角形が、相似形を保ったまま渦の重心に向けて収縮する自己相似合体が1800年代から知られており、また、非自己相似合体は生じないことが数学的に証明されている。本講演では、 $2 < \alpha$ では非自己相似合体が生じないこと、 $\alpha < 2$ で自己相似合体と非自己相似合体が生じることを示し、さらに $\alpha=1$ の表面地衡流系の場合について、渦の合体を理論的に詳しく調べた結果を報告した。

○曲面上の2次元流体における渦度場のフィラメント化と流れ領域の曲率

漁野 光紀 (京都大)

曲面上で自由運動する2質点間の距離の変化は曲面の曲率に影響される。同様の効果は、曲面上のEuler流体中の物質線の伸縮にも表れる。本研究では、曲率を持つ2次元トーラス上でEuler方程式を数値積分し、負曲率の影響により渦のフィラメント化が促進される例を得た。

○回転成層流体のトポロジカル指数とバルク-エッジ対応

大貫 陽平 (九州大)

慣性重力波の固有ベクトルが波数空間において非自明なトポロジーを示し、その結果として流体の側壁を伝わる波動モード(沿岸 Kelvin 波)が生じることを、量子ホール効果との類推で説明した。(Onuki et al. 2024, doi.org/10.1103/PhysRevResearch.6.033161)

○月の内部進化：火成活動を考慮した 3 次元部分球殻マントル対流モデルの構築

于 賢洋（東京大）

月内部のダイナミクスを理解するため、我々は火成活動の効果を反映させた 3 次元マントル対流モデルを初めて構築した。その結果、マグマ上昇がマントル対流を駆動し、その対流によってさらなるマグマ上昇が促進されることがわかった。

○大気大循環モデルでの北半球ブロッキング気候値再現実験

山崎 哲（海洋研究開発機構）

大気大循環モデル AFES を使って、様々な水平解像度・対流スキームを用いて北半球ブロッキングの気候学的再現性を調査している。同一の海洋境界条件で実験を行ったところ、ブロッキング発生頻度は移動性擾乱振幅に依存することがわかった。

○2001 年 3 月中旬に見られたオホーツク海の二つ玉低気圧について

藤 拓実（九州大）

2001 年 3 月中旬に見られたオホーツク海の二つ玉低気圧のライフサイクルや相対回転運動の特性について調査を行った。本事例は、2つのジェットが合流する環境場で見られる新しいタイプの二つ玉低気圧であることが分かった。

○温帯低気圧の構造・発達に対する下層環境風の影響

枡本 英伍（気象庁気象研究所）

1979 年－2016 年に太平洋で発達した温帯低気圧に対する下層環境風の影響を調べた。太平洋で発達する低気圧のうち、下層強風軸の左側合流域（L-CONF）で発達する低気圧が一番多く、左側分流域よりも強くなりやすいことがわかった。L-CONF で発達する低気圧は、温暖前線が強く、その付近で上昇流や非断熱加熱も強くなっていた。加えて環境の傾圧性も強いことで低気圧がより発達しやすいことがわかった。

○高渦位を伴う切離低気圧の併合と背景場との関係について

山本 晃立（東京大）

高渦位を伴う切離低気圧の維持過程を、他の切離低気圧との併合という観点から調査している。切離低気圧の 3 次元トラッキングと理想化実験を用いて解析したところ、背景場の水平シアが併合にとって好ましい条件であることが示唆された。

○台風全域 LES で急発達前に出現するメソ渦の解析

櫻井 勇太朗（東北大）

台風全域 LES において、急発達前の時間帯に水平シア不安定によるメソ渦が発生した。メソ渦は下層の台風中心への流入を妨げ、急発達の開始を遅らせた。メソ渦は渦度の中心と上昇流の中心が一致しない構造を持つ。

○台風 Lionrock(1610)の温帯低気圧化時に見られた寒冷渦下部から伸長する圏界面の折れ込みに対する降水帯の寄与

入江 健太（京都大）

本研究は 2016 年台風 Lionrock の温帯低気圧化時に寒冷渦から伸びていた圏界面の折れ込みの形成メカニズムを、台風と寒冷渦との間の降水帯に注目し、渦位収支解析により調査した。圏界面の折れ込みの形成過程において、潜熱加熱による渦位生成が寒冷渦の渦位場を再配置することが重要であった。

○極を含む等緯度経度格子上の浅水波方程式に対する高速フーリエ解法

野村 鈴音（京都大）

球面上のフーリエ変換は計算量削減に有効であるが、極を含む等緯度経度格子は極における微分の不連続や極付近に生じるノイズが難点である。本発表では、新たに考案した極における微分の計算方法とフーリエ変換を用いた全球等方フィルターを浅水波方程式モデルに適用した結果について示した。

○自動微分を用いた数値最適化と変分法データ同化

榎本 剛（京都大）

機械学習フレームワークに含まれる自動微分が、数値最適化や変分法データ同化に適用可能かを検討するために、ベンチマーク関数の最適化や理想化モデルの変分法データ同化を行った。自動微分を用いた結果は解析的な勾配を用いた解と同一であり、効率的な計算も可能であることが分かった。

○金星 AFES を用いた最近の研究紹介

杉本 憲彦（慶應大）

金星 AFES を用いた最近の研究の成果を紹介した。特に高解像度数値計算により、傾圧波からの自発的な重力波放射を調べた結果と、Bred Vector を用いたエネルギーサイクルについての結果について詳しく紹介した。

○金星中間赤外カメラ観測を想定した観測シミュレーション実験による感度調査

藤澤 由貴子（慶應大）

本発表では、金星大気データ同化システム「ALEDAS-V」を用いて、金星大気において空間的に偏りのある中間赤外カメラ観測データを適切に同化するために、観測システムシミュレーション実験における様々なパラメタスタディを行った結果を紹介した。

○金星の紫外アルベドと大気運動の長期変動

高木 征弘（京都産業大）

金星の紫外アルベドが10年スケールで長期変動し、この変動に同期するように雲頂付近の平均東西風速が変化することが指摘されている（Lee et al., 2019）。この金星の「気候変動」のメカニズムを明らかにするために、太陽加熱率の変化に対する大気運動の応答を、金星GCMを用いて調べた。

○火星の地表低気圧の出現頻度とダストストームの関係について

正生 大輝（九州大）

火星の大気再解析EMARSを用いて、火星の地表低気圧の出現頻度の気候学的な特徴を整理した。加えて、EMARSの中で見られた「地表低気圧の出現頻度」と「全球ダストストーム」との間の正のフィードバックについて検討した。

参加者の内訳(敬称略)

東北大2名（伊藤 純至、櫻井 勇太郎）、気象庁1名（栃本 英伍）、海洋研究開発機構1名（山崎 哲）、東大4名（新野 宏、伊賀 啓太、于 賢洋、山本 晃立）、桜美林大1名（森 厚）、慶応大2名（杉本 憲彦、藤澤 由貴子）、京産大1名（高木 征弘）、京大6名（榎本 剛、吉川 裕、石岡圭一、入江 健太、野村 鈴音、漁野 光紀）、神戸大1名（前島康光）、福大3名（岩山 隆寛、乙部 直人、新竹 貴哉）、九大8名（小菅 佑輔、大貫 陽平、遠藤 貴洋、広瀬 直毅、油布 圭、正生 大輝、藤 拓実、山本 勝）

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。対象の現象として、海面波、海面混合層、鉛直混合、内部波、潮汐、沿岸域の流動、中規模渦、西岸境界層、大循環、鉛直循環、物質循環といった、幅広いスケールの現象が挙げられる。最新の観測技術、計算機技術、数値計算技術により、これらの現象の把握が進んでいる。しかし、その力学の理解は、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うため、現象の把握や再現が必ずしも力学理解に直結していない。

本研究集会は、諸々の現象の力学理解のため、微細現象から惑星規模にかけての幅広いスケールを繋ぐ、多角的・包括的な海洋力学理論の再構築を目指している。この大きな目標に近づくため、前述のような多彩な課題に多様な手法で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つくった。そこで、諸々の海洋力学の課題について議論を深めるとともに、課題相互間の繋がりを探った。

研究集会の実施

2024年10月24日～27日の3泊4日の日程で、九重共同研修所・九大山の家にて、研究集会を、参加者全員が寝食を共にする合宿形式で行った。日程を長めに取り、講演と議論の時間を十分に確保することを意図した。また、合宿形式を採り、セッション外の時間にも参加者間で各種の議論や情報交換を可能にし、ひいてはセッションにおいても緊密かつ忌憚のない議論がしやすくなることを意図した。

研究集会には表1に示す9人が参加し、資料1に示す7件の研究発表が行われた。実際には資料1のプログラムを一部変更し、10月24日に山下氏の発表、25日に吉田氏の発表、26日に吉川氏、臼井氏、寺田氏、水田氏、磯辺氏の発表を、それぞれ行った。時間は講演と質疑を合わせて1題70分を目安とし、議論の進展に対応して調整した。

発表の話題には、混合層スケールから大洋スケールまでのもの、数値モデル、観測、理論解析の各種の手法が含まれた。参加者には、大学院生からベテランまでの幅広い年代、初参加者とリピーターが含まれ、バランスの取れた構成であった。研究発表それぞれに対して、緊密かつ活発な議論が行われた。若手の人たちも質疑に積極的に参加していたのが、印象的だった。

以上のように、参加者にとって、また海洋力学の発展にとって、濃厚で有意義な会になったと受け止めている。

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：2024 年 10 月 24 日（木）～27 日（日）

場所：九重共同研修所・九大山の家

〒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 24 日

17:00 まで 入所

17:30- 夕食

18:40-19:10 開会

10 月 25 日

7:30- 朝食

8:40-9:50 吉川 浩一朗（きっかわ，京大院理）
夏季田辺湾における乱流と水温構造の観測・解析

10:00-11:10 山下 覚（九大院総理工）
北西太平洋における海洋データ粗格子配置の検討

12:00- 昼食

13:10-13:50* 吉田 槇之助（北大院環境）
Interannual and long-term variability in the western part of the Weddell Gyre

14:00-15:10 臼井 健人（東大院理）
黒潮続流域での中規模渦内部のエクマン湧昇における地衡流シアの重要性

15:20-16:30 寺田 雄亮（東大院理）
東赤道太平洋における柳井波の鉛直伝搬と赤道中層東西流形成への寄与

17:30- 夕食

10 月 26 日

7:30- 朝食

8:30- エクスカーション・昼食

資料 1 研究集会のプログラム

10月26日（つづき）

14:30-15:40	水田 元太（北大地球環境） 東向ジェット中の渦－渦，渦－平均流相互作用
15:50-17:00	磯辺 篤彦（九大応力研） 微細マイクロプラスチックの動態学 ―観測からモデルの設計まで―
17:30	夕食

10月27日

7:30-	朝食・退所準備
9:00-9:30	総合討論
	退所

発表時間は質疑を含めて 70 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 25 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）

資料 1 研究集会のプログラム（つづき）

氏名	所属	職名	氏名	所属	職名
吉川 浩一郎	京大院理	学生 (D1)	水田 元太	北大地球環境	助教
山下 覚	九大院総理工	学生 (M2)	磯辺 篤彦	九大応力研	教授
吉田 慎之助	北大院環境	学生 (M1)	広瀬 直毅	九大応力研	教授
臼井 健人	東大院理	学生 (M2)	西垣 肇	大分大理工	准教授
寺田 雄亮	東大院理	学生 (D3)			

表 1 本研究集会の参加者

各講演の概要

- ・山下 覚（九大院総理工），北西太平洋における海洋データ粗格子配置の検討

海洋の観測データは空間的に疎らな情報であるため，水平面上で補間を施すことにより高分解能で図示しやすい情報へと変換されることが多い。観測データの多くは四角形状に配置されるが，等間隔での配置はそれ以外に三角形や六角形状も考えられる。まず，乱数で作成した等方的な仮想データをクリギング補間すると，三角形が誤差最小となった。さらに，高分解能モデルの海面高度および表面流速データを用いて同様に比較を行ったが，やはり三角形の再現性が最も優位となった。低解像データの格子点とそこから最も離れた地点との距離を各形状で比較すると，三角形が最小であることが要因だと考えられる。

- ・吉田 慎之助（北大院環境），Interannual and long-term variability in the western part of the Weddell Gyre
ウェッデル海における，陸起源の鉄分に富んだ融解水と南極オキアミの輸送を司る Antarctic Slope Current (ASC) の変動が生態系に与える影響は大きい³が，観測はあまり行われていないのが現状である。本研究では，モデルの出力データを用いて，ASC の経年変動および，より長期的な変動を定量的に考察した。具体的には，OFES2 の 1958 年から 2022 年までの月平均の海面高度データを解析した。その結果，先行研究で観測されていた ASC の強化が OFES2 では確認されたが，観測データと比べると OFES2 は Weddell Gyre の変動を再現できていなかった。このモデルにおいて，極域の大気強制は再現されていた。これより，再現がよくない理由は，風応力に依らない変動が存在するか，またはモデルのバイアスであることが示唆された。

- ・吉川 浩一郎（京大院理），夏季田辺湾における乱流と水温構造の観測・解析

夏季（主に 2023 年 8 月）の田辺湾にて，乱流と水温の観測を行った。京都大学防災研究所の白浜気象観測塔のデータも併せて用い，運動量フラックスや熱フラックス，そして波による強制力を特徴づけるストークスドリフト速度を計算した。海面加熱時の乱流運動エネルギー散逸率 ε は，風応力から得られる散逸率 $\varepsilon_{wind} = U_*^3 / \kappa |z|$ (U_* は風摩擦速度， $\kappa = 0.4$) だけでスケーリングできることが示唆されていた (Miller et al. 2023) が，実際の ε は ε_{wind} よりも小さかった。すなわち，海面加熱による ε の減少が示唆された。そもそもこのような粗いスケーリングは観測数の少なさに起因しており，今回の観測のように多くのデータを取ることで，スケーリングの改良へつながることが期待される。また観測された水温構造は熱フラックスとよく対応している一方，未だノイズを除去しきれていない点も多い。

- ・臼井 健人（東大院理），黒潮続流域での中規模渦内部のエクマン湧昇における地衡流シアの重要性
黒潮続流域は中規模渦の活動が活発な海域である。この海域の中規模渦は，亜表層から熱を鉛直方向に輸送し，海洋上層の熱構造を維持する上で重要な役割を果たしている。そのため，中規模渦に伴う鉛直流速を正確に推定することが重要な課題である。以前の研究では，渦内部における海洋の相対渦度を考慮した非線形エクマン湧昇の重要性が指摘された。しかし，渦による空間的な水温変動に伴う地衡シアは，風応力と部分的に釣り合うことでエクマン応答に影響を与えることが知られているが，この効果は含まれていないという問題があった。本研究では，海洋の相対渦度と地衡シアの両方を考慮したエクマン湧昇速度の新しい定式化を導出し，定式の妥当性を黒潮続流域の渦解像海洋モデルから得られた鉛直流速を用いて検証した。中規模渦内部の鉛直流速は，準地衡オメガ方程式で診断可能な成分と残差の摩

擦成分から構成される。その結果、高気圧性（低気圧性）渦における摩擦成分と非線形エクマン湧昇速度の空間相関 0.753 (0.697) よりも、新しい定式に基づくエクマン湧昇速度と摩擦成分の空間相関 0.901 (0.864) の方が高く、新しい定式に基づくエクマン湧昇速度によってより適切に中規模渦内部の鉛直流速を説明しうることが明らかになった。

・寺田 雄亮（東大院理）、東赤道太平洋における柳井波の鉛直伝搬と赤道中層東西流形成への寄与
東太平洋の中層（深さ 500-2000 m）において数十年平均した場として観測された赤道上の西向きの流れについて、その形成過程の検証を行った。表層及び中層の観測データ解析と数値実験により、東赤道太平洋では表層の熱帯不安定波のうち赤道波の分散関係を満たしたものが柳井波を励起し、さらに適当な鉛直波長を持つものが密度躍層を超えて中層に到達することが判明した。また中層に到達した柳井波は赤道上の西向きの流れを選択的に加速することによって数十年平均した場の形成にも寄与し、結果として赤道上に西向きの流れが形成されることが明らかになった。

・水田 元太（北大院環境）、東向ジェット中の渦－渦、渦－平均流相互作用
湾流や黒潮続流の様な東向ジェット中にはジェットの不安定によって生じる不安定波や Rossby 波などの様々な中規模擾乱が存在する。周波数帯ごとにエンストロフィー収支の解析を行った所、擾乱どうしの渦間相互作用によって、ジェットから発生した不安定波から Rossby 波が励起されることが示された。その際に upgradient な渦位輸送が発生することで、再循環が駆動される。Holland and Rhines (1980) などの従来の研究で指摘されていたエンストロフィーの移流は upgradient な渦位輸送を発生させるが、そのような渦位輸送は大部分が非発散な成分であり、再循環を駆動することには寄与しない。

・磯辺 篤彦（九大応力研）、深海を漂う微細マイクロプラスチックの観測と輸送モデル
太平洋での観測結果を踏まえて、サイズが 300 μm 以下の微細マイクロプラスチックの鉛直分布と輸送過程を再現するモデルの設計を紹介した。モデルには生物付着に伴う沈降を加えて、かつ分解に伴う生物膜の除去に伴う浮力の回復と、それによる上昇（ヨーヨー効果）を組み込んでいる。海水密度よりも重くなった強い沈降と、中性浮力に近い粒子の弱い沈降の再現を試みている。

謝辞

研究集会において、講演、質疑、合宿生活にあたっていただいた参加者の方々、準備と運営などにもご尽力いただいた磯辺篤彦教授らの九大応力研の方々に、代表者として感謝する。

九州大学応用力学研究所 研究集会報告書

課題番号：2024WS-A0-4

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／大学院総合生産科学研究科)

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、これまで長崎大学、名古屋大学、富山大学、鹿児島大学、愛媛大学、水産研究・教育機構、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。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6名、九州大学4名、愛媛大学3名、名古屋大学1名、鹿児島大学2名、水産機構資源研1名の計17名、オンラインでは長崎大学、水産機構資源研、日本海洋生物研究所、東京大学、福井県立大、MBRIJ、産業総合研究所、JAMSTEC から計26名、合計43名の参加があった。講演は2日間で12題であった（当初予定では13題であったが、参加予定者の1名が当日急病のため欠席した）。

2. 研究集会の概要

研究集会は2025年1月9日（木）～10日（金）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）は長崎丸・旧鶴洋丸を用いた日本海を中心にした日本、韓国、ロシア、米国からの国際共同研究プロジェクトであるCREAMSの紹介を行った。工藤（長崎大）は長崎丸航海で五島海底谷に設置した係留観測結果を講演し、中層に半日周期の変動があること、成層が強い時に平均流の極大があることなどを示した。郭（愛媛大）は東シナ海大陸棚斜面域に設置したTRBM係留計観測データの解析途中経過について講演し、黒潮からの分岐流の強さに季節変化があり、夏季に強く秋に弱まり、冬にまた上昇する傾向など紹介した。講演では陸棚斜面の地形の複雑さが流速・混合強度に影響を与えることが議論された。Luo（愛媛大）は南黄海で得られた大気経由の窒素降下量と植物プランクトン分布について講演し、その季節変化や環境パラメーターとの関係、河川水の影響含めた考察を示した。吉江（愛媛大）はこれまで黒潮流域・東シナ海周辺を中心に展開してきた硝酸塩センサーや多波長励起蛍光光度計のデータを用い、同海域にお

ける低次生態系の時空間変動に関する研究を紹介した。筒井（長崎大）は長崎丸実習航海中、研究用海水から得られる表層水中の Ca^{2+} 、 K^{+} についてのモニタリング結果について講演した。北島（水産機構資源研）は夏季東シナ海に出現する低塩分水塊に対する植物プランクトン群集の応答について講演し、2024 年の観測では河川水に由来する淡水流入と高水温水がプランクトン分布に影響を与えていること、また沖縄トラフ域でも亜表層のクロロフィル量が近年増加していることなどを示した。初日最後は遠藤（九州大学）より 2025 年度夏季に実施予定の長崎丸航海計画についての紹介と、その航海計画に関する船長との協議が行われた。

2 日目の講演では、石坂（名古屋大）が有明海湾奥部エリアにおけるリモートセンシングデータについて衛星（しきさい）と高解像度衛星（EARONET）の比較について講演した。講演では、海色データの利用について NASA の事例など含めて紹介し、EARONET の有用性について述べた。木田（九大応力研）は粒子追跡型モデルとオイラー型モデルを組み合わせた現在開発中のハイブリッド型全球生態系モデルについて講演した。本モデルでは、計算された栄養塩分布からその起源を逆追跡することが可能であるため、生態系を支える栄養物質などの陸域由来・海由来の境界線の線引きに貢献することなどが言及された。堤（鹿児島大）は黒潮・対馬暖流系から分岐する九州西岸部海域の近年の観測結果について講演し、黒潮内側域における中層での低温低塩分水の湧昇に伴う栄養塩増加や、九州沿岸域の黒潮流路観測について述べた。小針（鹿児島大）はかごしま丸などで展開してきた動物プランクトンや仔魚の食性含めた黒潮生態系研究について講演した。近藤（長崎大）は本研究集会の参加メンバーも多数参画して申請した東シナ海・日本海・オホーツク海の日本周辺縁辺海での白鳳丸三カ年計画のバックグラウンドや内容について紹介し、今後の連携強化の必要性について説いた。

全ての講演ののち、総合討論を行った。長崎丸やかごしま丸など練習船の存在は東シナ海周辺域の海洋観測を実行する上で欠かせない。近年、本研究集会では練習船船長の参加を推進することで研究者側の観測の意図や意義を船側に説明する機会を設けることができている。総合討論では、今後の研究集会でもこの取り組みを続けること、また将来的には鹿児島大のかごしま丸のオフィサーも招待するなどして、研究航海の円滑な遂行と研究のさらなる発展を目指すことなどが話し合われた。

九州大学応用力学研究所研究集会

「東アジア縁辺海の物質循環と生物・物理・化学過程」

場所: 九州大学応用力学研究所 3 階 301 号室 & オンライン(ハイブリッド開催)

日時: 2025 年 1 月 9 日(木) 13:10 ~ 18:00

10 日(金) 9:00 ~ 12:00

オンラインミーティング情報 (Zoom)

トピック: 1 日目: 東アジア縁辺海における物質循環と生物・物理・化学過程

時刻: 2025 年 1 月 9 日 13:10 PM ~ 大阪、札幌、東京

<https://riam-kyushu-u-ac-jp.zoom.us/j/82510729390>

ミーティング ID: 825 1072 9390

パスコード: EAsia-01

トピック: 2 日目: 東アジア縁辺海における物質循環と生物・物理・化学過程

時刻: 2025 年 1 月 10 日 9:00 AM ~ 大阪、札幌、東京

<https://riam-kyushu-u-ac-jp.zoom.us/j/88264860245>

ミーティング ID: 882 6486 0245

パスコード: EAsia-02

趣旨

東シナ海や日本海など東アジア縁辺海の海水循環は、太平洋含めた隣接海域の生物生産並びにそれを支える栄養塩動態に大きな影響を与えるため、同海域における生物・物理・化学過程を包括した研究は重要である。九州大学応用力学研究所では、東アジア縁辺海や太平洋側の黒潮域など周辺海域含めた海水の循環に関する研究を継続的に展開しており、これまで長崎大学、名古屋大学、富山大学、鹿児島大学、愛媛大学、水産研究・教育機構、水産試験場等の研究機関との共同研究も多く実施されている。そこで、今後の共同研究の更なる進展のため、これまで得られた成果の発表ならびに今後の観測計画に関する議論を行うための研究集会を開催する。東シナ海や日本海における調査では、長崎大学練習船長崎丸が重要な役割を担うことから、研究集会の場で話し合われる長崎丸観測計画については、研究者のみならず船舶運航側のオフィサーを含めて議論を行うことで、観測体制の強化が期待される。東アジア縁辺海を中心とした海域における生物・物理・化学過程を包括した研究の今後の展開を考える場として本研究集会を位置付ける。

1月9日(1日目)

- 13:10 – 13:15 **開会・挨拶及び開催趣旨説明** 近藤能子（長崎大）
- 13:15 – 13:40 **The Kakuyo Maru & Nagasaki Maru cruises in the CREAMS activity**
千手智晴（九大応力研）
- 13:40 – 14:05 **五島海底谷における係留観測結果一日周期変動と平均流の中層極大**
工藤楓己*・滝川哲太郎（長崎大）・千手智晴（九大応力研）・森井康宏・山脇信博・木下宰・合澤格・保科草太・丸山裕豊（長崎大）
- 14:05 – 14:30 **東シナ海の大陵棚における係留データから得られた流動場の季節変化**
郭新宇*（愛媛大）・Wang Shuya（東北大）・Luo Yifei（愛媛大）・遠藤貴洋（九大）・滝川哲太郎（長崎大）・森本昭彦（愛媛大）・仁科文子・堤英輔・中村啓彦（鹿児島大）
- ~~14:30 – 14:55 **TBA**
張勁*・Michael Julian Haryanto（富山大）~~
- 14:55 – 15:15 休憩
- 15:15 – 15:40 **Atmospheric nitrogen deposition and its contribution to phytoplankton biomass in the South Yellow Sea**
Luo Yifei*（愛媛大）・Shi Jie（OUC）・郭新宇（愛媛大）・Zhang Qingling（OUC）
- 15:40 – 16:05 **東シナ海陸棚斜面周辺における低次生態系の時空間変動**
吉江直樹*・山岡昂平・門田雅仁・細川琉平（愛媛大）
- 16:05 – 16:30 **東シナ海・西日本沿岸・内海の海水プロファイルに基づく海域特性**
山脇信博・筒井英人*・桑野和可・鈴木利一・合澤格・保科草太・丸山裕豊・木下宰・森井康宏（長崎大）
- 16:30 – 16:55 **夏季東シナ海に出現する低塩分水塊に対するプランクトン群集の応答**
北島聡*（水産機構資源研）・田中雄大（長崎大）・飯田茜・長谷川徹・清本容子・堀井幸子・西内耕・種子田雄（水産機構資源研）
- 16:55 – 17:15 休憩
- 17:15 – 18:00 **長崎丸航海計画について打ち合わせ**
進行: 遠藤貴洋（九大応力研）

懇親会

1月10日(2日目)

- 9:00 – 9:25 **有明海の衛星海色データへの海苔ヒビの影響:しきさいと高解像度衛星の比較**
石坂丞二（名古屋大）
- 9:25 – 9:50 **ハイブリッド型海洋生態系モデルの開発**
木田新一郎*（九大応力研）・干場康博(JAMSTEC)・松村義正(東大 AORI)・川崎
高雄（東大 AORI）
- 9:50 – 10:15 **黒潮-対馬暖流系から分枝する九州南西岸の沿岸流の観測:現在の取り組み
と今後の展望**
堤英輔*・中村啓彦・仁科文子（鹿児島大）
- 10:15 – 10:35 休憩
- 10:35 – 11:00 **黒潮生態系の理解へ向けて**
小針統（鹿児島大）
- 11:00 – 11:25 **白鳳丸・長崎丸など今後の東シナ海観測における連携について**
近藤能子（長崎大）
- 11:25 – 12:00 **総合討論**

閉会

（著者が複数の場合、発表者に*を記載）

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： 2024 年 12 月 2 日（月） 午後（13:30～17:45）

3 日（火） 午前（09:50～12:10）

開催場所： 九州大学 応用力学研究所西棟 6 階 多目的研究交流室（W601 号室）

参加者数： 2 日 38 名、 3 日 36 名 両日参加：34 名

3. 発表概要

今回は 14 件の講演応募があったが 1 件キャンセルが生じ、13 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のち 8 件の講演があった。最初の 4 件は津波観測の講演であった。JAMSTEC の王らは、東北地方太平洋地震津波の際の国交省の紀伊水道レーダのデータから同化により神戸での津波到来を 50 分前の観測値から推測できることを示した。愛媛大学のサハナは、レーダ観測におけるビーム方向ごとの誤差分布を考慮して同化することを検討し、南海トラフ地震モデルの津波を用いて評価した。その結果、考慮しない場合に比べて 19%向上することを示した。東京電力 HD の三好は、令和 6 年元日に発生した能登半島地震津波に対する柏崎刈羽発電所設置のレーダ観測での検知の可否を検証した。津波到来時刻前後はノイズが大きく津波の影響は判別できなかったが、ノイズが小さくなってからのレーダ観測流速を同化することで沿岸観測水位変化と近い結果を得た。愛媛大の玉山は、津波検知に関して流速変化パターンを機械学習する検知法を提案した。シミュレーションにより 2 台のレーダを用いた流速パターンから津波到来検知がリアルタイムで可能であることを示した。熊本大の濱田は、ドップラースペクトルからの流速自動読み取りを函館市汐首に設置したレーダに適用した。津軽海流流軸方向やその周辺海域での特異なスペクトルの扱いについて論じた。琉球大の櫻本は、海洋レーダ送受信機を FPGA で構築する際のデジタルフィルタの構成方法に関する検討を発表した。FPGA 内リソースをフルに使い、CIC フィルタを用いず FIR フィルタのみで構築

することでエイリアジングを抑制した有効な周波数特性を得た。三菱電機の高橋は、Helzel/WERA レーダのドップラースペクトルに混入する電源由来のアーティファクトに対して、海面からの信号を損ねることなく除去するためにアダプティブフィルタを適用し良好な結果を得た。琉球大の久木は、流速計測におけるドップラースペクトルのピーク周波数について、ストークス効果による非線形分散関係により正負のピークから求めた流速が異なる可能性があることを示し、波高によるその影響の度合いと補正方法について示した。

情報交換の時間では、JAMSTEC における 13.5MHz の CODAR/SeaSonde の無線局免許に関する総務省との調整に関しての話題があった。海洋レーダの利用を進めるためには無線局免許が必要であることから、それに関する情報を関係者で共有することと、免許行政に対する意見を上げていく必要がある。

2 日目は 5 件の講演があった。琉球大の渡久地らは、ドップラースペクトルの信号強度を用いた表層塩分計測の定量的評価を行った。風の影響を考慮した場合で RMSE が 4.4psu であること、表層塩分分布が流速パターンや既往研究と矛盾のないことを示した。北大院水産の中條は、JAMSTEC が運用する CODAR/SeaSonde のドップラースペクトルから短周期の流速を読み取を試みた。クロススペクトルを使用せずに精度を求めるのは限度があるような結果であった。JAMSTEC の金子は、むつ研究所で運用している津軽海峡レーダで観測された海況を紹介した。係留ブイとの比較から RMSD20-25cm/s 程度であることを示し、恵山局の低 SNR や系統的誤差について言及した。広島大の谷口は、宮崎県が運用する日向灘観測レーダの流速観測範囲をひまわり 8 号の海面水温データを用いて拡張する手法を発表した。流速場を 2 次元フーリエ級数表現して温度場と組み合わせる方法であり、データフュージョン手法として興味がある内容であった。神戸大の谷田は、大阪湾の環境に重要な残差流分布を知ることがを目的に、FMCOM でモデル化して求めた流速場と国交省が運用する大阪湾レーダの観測値との比較を行った。相違がある点については潮流、密度流、吸送流についてのモデルの再現性に関して課題があることを示した。

総合討論では、今回の発表のまとめと今後もこの研究集会の継続開催について話し合われた。

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：2024 年 12 月 2 日（月）午後 ～ 3 日（火）午前

会場：九州大学筑紫キャンパス

応用力学研究所西棟 6 階 多目的研究交流室（W601 号室）

=====

12 月 2 日（月）

13:30-13:35 趣旨説明

藤井智史（琉球大工）

13:35-13:55 紀伊水道における海洋短波レーダーを利用した津波早期警報

王宇晨・今井健太郎・堀川博紀(JAMSTEC)

13:55-14:15 紀伊水道における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

	ムハンマド イルハム サハナ(愛媛大防災情報研究センター)、日向博文(愛媛大工)、藤良太郎(国際航業)
14:15-14:35	柏崎刈羽原子力発電所に設置した単一の海洋レーダーによる令和 6 年能登半島地震の観測津波流速ならびにデータ同化について 三好大地・金戸俊道(東京電力 HD)、木村 達人(東電設計)
14:35-14:55	海洋レーダを用いた津波観測と機械学習による津波検知の検証 玉山涼華(愛媛大院理工)、日向博文(愛媛大工)、藤良太郎(国際航業)
14:55-15:15	休憩
15:15-15:35	津軽海峡レーダ観測における視線方向流速計算の自動化 濱田遮那(熊本大工)、長名保範(熊本大半導体・デジタル機構)、渡久地優(琉球大院理工)
15:35-15:55	海洋レーダ送受信機の FPGA 回路規模縮小のためのデジタルフィルタ実装と最適化 櫻本大翔(琉球大院理工)、長名保範(熊本大半導体・デジタル機構)、藤井智史(琉球大工/ORNIS)、石垣善教(ORNIS)
15:55-16:15	レンジドップラ応答に現れる電源由来アーティファクトの除去 高橋龍平・亀田洋志(三菱電機)、片岡智哉(愛媛大工)、藤井智史(琉球大工)
16:15-16:30	休憩
16:30-16:50	海洋レーダドップラースペクトルピーク周波数の検討 久木幸治(琉球大理)
16:50-17:10	一次散乱エコーが拡張した場合の視線流速算出について一考察 [キャンセル] 灘井章嗣(NICT 沖縄)
17:10-17:45	情報交換
12 月 3 日 (火)	
09:50-10:10	海洋レーダによる伊勢湾表層塩分の定量的評価 渡久地優(琉球大院理工)、藤井智史(琉球大工)
10:10-10:30	CODAR 社製 SeaSonde 海洋短波レーダーを用いた短周期流動場の検出に向けて 中條飛翔・阿部泰人(北海道大院水産)、金子仁・佐藤喜暁・佐々木建一(JAMSTEC)
10:30-10:50	JAMSTEC-MIO 海洋短波レーダーデータ解析の近況 金子仁・佐藤喜暁 (JAMSTEC)、橋向高幸(マリンワークジャパン)、佐々木建一 (JAMSTEC)
10:50-11:05	休憩
11:05-11:25	日向灘における海洋短波レーダデータとひまわり 8 号海面水温データを用いた海面流速場の再現 谷口直和・荒井正純・作野裕司・陸田秀実・濱田邦裕(広島大院先進理工)
11:25-11:45	HF レーダ及び FVCOM を用いた大阪湾の流況解析 谷田裕(神戸大院海事)、林美鶴(神戸大内海域環境教育センター)、廣川綜一(神戸大院海事)
11:45-12:10	総合討論

5. 参加者名簿

氏名	所属	氏名	所属
今井 健太郎	JAMSTEC	坪野 考樹	電中研
増田 千輝	神戸大	谷田 裕	神戸大
王 宇晨	JAMSTEC	玉山 涼華	愛媛大
ムハンマド イ ルハム サハナ	愛媛大	長名 保範	熊本大
渡邊 修一	日本海洋科学振興財団	河西 駿	ORNIS
広瀬 成章	気象研究所	佐々木 建一	JAMSTEC むつ研
猪原 亮	高知県水産試験場	濱田 遮那	熊本大
木村 達人	東電設計	山田 安之	気象庁
江淵 直人	北大低温研	藤井 智史	琉球大
油布 圭	九大応力研	中條 飛翔	北大水産
久木 幸治	琉球大理	印 貞治	日本海洋科学振興財団
三好 大地	東京電力 HD	井上 海斗	宮崎県水産試験場
谷口 直和	広島大	乾 翔駿	長崎大
工藤 楓己	長崎大	金戸 俊道	東京電力 HD
櫻本 大翔	琉球大	金子 仁	JAMSTEC むつ研
林 美鶴	神戸大	市川 香	九大応力研
滝川 哲太郎	長崎大	中山 智治	日本海洋科学振興財団
広瀬 直毅	九大応力研	万田 敦昌	三重大
福留 研一	富山高専	高橋 龍平	三菱電機
近貞 直孝	防災科研	松浦 邦明	気象協会

「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」報告

富山高等専門学校商船学科 福留研一

2024年12月3日から12月4日にかけて、九州大学筑紫キャンパスにおいて、応用力学研究所共同利用研究集会「日本周辺海域の海況モニタリングと波浪計測に関する研究集会」が開催された。全体では49名の参加者と12題の講演があり、九州大学内外からそれぞれ16名と33名が参加した。

初日の最初のセッションでは、1台のドローンに搭載した2つの光学カメラを用いたステレオ撮影による簡易で高精度な海洋波時空間分布計測の実証結果、人手と労力を要するCTD観測・ADCPライン観測に電動リールを適用して省力化する手法の検討および、船上の風向風速計が計測する船上構造物の影響を受けた風に対する補正式の検討など、新たな観測手法や従来の手法で得られた観測データの評価に関わる3題の講演があった。続く日本海のセッションでは、これまで蓄積された長期の水温・塩分観測資料に基づいた中部・東部日本海の低塩化トレンドの実証とその原因の検討、ADCP後方散乱強度解析による宗谷暖流域の動物プランクトン日周鉛直移動の抽出と季節変動の特徴、津軽暖流流量を推定する経験式の更新と流量変動の再評価、LADCP反復観測より得られた高解像度流速データを用いた近慣性内部波の鉛直構造の抽出、長期観測資料と衛星海面高度データを用いた日本海内部での栄養塩供給とそのプロセスの検討など5題の講演があった。二日目は富山湾における動物プランクトンのモニタリングと海洋教育教材への活用についての講演に続き、従来の衛星や調査船による海洋観測に対して漁船を用いた新たな海洋観測のデータ同化が海洋大循環モデルの精度へ与える影響の評価、男女群島における水蒸気連続観測を用いた五島灘における水蒸気フラックスと九州北部における降水の関係、係留観測結果を用いた五島海底谷における水平流の短周期変動及び季節内変動など、東シナ海における海況モニタリング結果を用いた講演が3題あった。

2日間を通して、日本周辺の海域において取得された様々な海況モニタリング結果を用いることで可能となった研究結果が多く示され、その重要性が改めて確認された。一方で、新たな観測・モニタリング手法の開発や既存のモニタリング手法で得られたデータの再評価についての講演や情報交換が行われたことにも大きな意義があった。技術の発展やコモディティ化により安価で簡易な海洋計測手法の開発と試行が進み、モニタリング手法も多様化が進む一方で、それらを効果的に活用するアイデアや得られたデータの評価について共有する場は今後重要となってくるであろう。今後とも、日本周辺海域の海況・波浪の研究に携わる研究者・関係者が一堂に会する集会となり、活発な議論と情報交換の場となることを期待する。最後に、本研究集会の開催を承諾して頂いた九州大学応用力学研究所、集会を開催するにあたりお世話して頂いた広瀬直毅教授をはじめとする諸氏に感謝する。

日本周辺海域の海況モニタリングと波浪計測に関する研究集会

====プログラム=====

九州大学応用力学研究所 研究集会

「日本周辺海域の海況モニタリングと波浪計測に関する研究集会」

(代表者：福留研一、九大応力研世話人：広瀬直毅)

日程：2024年12月3日(火)～12月4日(水)

開催場所：九州大学筑紫キャンパス

応用力学研究所西棟 6 階 多目的研究交流室 (W601号室)

(<https://www.riam.kyushu-u.ac.jp/center/access.html>)

-----12/3 (火) -----

13:30-13:35 趣旨説明

13:35-14:00

空中ドローンからステレオ撮影で海洋波の時空間分布を精度よく取得すること

○稲津大祐 (東京海洋大) ・澤田尚毅 (いであ)

14:00-14:25

電動リールを用いたCTD観測とADCPリバーボート河川断面流量観測

○坪野考樹 (電中研)

14:25-14:50

船上の風向風速計が計測する風を海上の風に補正する手法の確立

○増田千輝 (神戸大院) ・林美鶴・廣川綜一 (神戸大)

14:50-15:05 休憩

15:05-15:30

観測資料に基づく中部・東部日本海の低塩化トレンド

○和川 拓・井桁庸介・阿部祥子 (水研機構)

15:30-15:55

ADCP後方散乱強度解析による宗谷暖流域の動物プランクトン日周鉛直移動

○久賀みづき(北大低温研)・山口篤・松野孝平(北大院水産)・大島慶一郎(北大低温研)

15:55-16:20

津軽暖流流量の再評価

○西田芳則 (道総研中央水試)

16:20-16:30 休憩

16:30-16:55

津軽海峡西方海域でのLADCP観測が捉えた近慣性内部波の鉛直構造

○石橋功成 (九大総理工) ・千手智晴 (九大応力研)

16:55-17:20

日本海・大和海盆周辺の渦構造と栄養塩分布に関する研究

○矢部いつか (東京海洋大) ・和川拓 (水研機構) ・木田新一郎 (九大応力研)

17:20-17:40 情報交換

-----12月4日(水)-----

9:55-10:20

富山湾表層に生息する動物プランクトンのモニタリング
○福留研一・江田友香・保前友高（富山高専）

10:20-10:45

Observational system experiments comparing assimilation effects of professional and fishermen measurement data

○Tianran LIU（九大総理工）, Shin'ichiro KAKO（鹿児島大）, and Naoki HIROSE（九大応力研）

10:45-11:00 休憩

11:00-11:25

五島灘における水蒸気フラックスと九州北部における降水の関係ー男女群島における水蒸気連続観測ー
講演者氏名、所属(共著者を含む)：

○中室早希・万田敦昌(三重大)・飯塚聡(防災科研)

11:25-11:50

五島海底谷における係留観測結果ー近慣性周期変動と平均流の中層極大ー

○工藤楓己・滝川哲太郎（長崎大）・千手智晴（九大応力研）・森井康宏・山脇信博・木下宰・合澤格・保科草太・丸山裕豊（長崎大）

11:50-12:10 総合討論

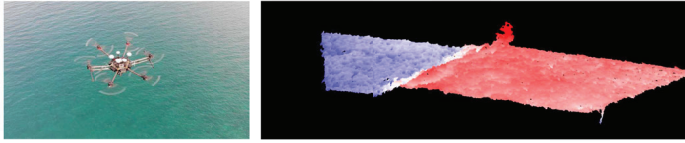
=====

	氏 名	所 属	懇親会	チェック欄
1	万田 敦昌	三重大学 生物資源科学部	○	
2	千手智晴	九州大学応用力学研究所		
3	玉山 涼華	愛媛大学		
4	ムハンマド イルハム サハナ	愛媛大学		
5	矢部いつか	東京海洋大学 学振特別研究員 (PD)	○	
6	久木幸治	琉球大理学部	○	
7	増田千輝	神戸大学大学院海事科学科 海事科学専攻 海洋・気象研究室 沿岸環境解析分野 修士1年	○	
8	和川 拓	水産研究・教育機構	○	
9	濱田 遮那	熊本大学		
10	久賀みづき	北海道大学低温科学研究所 海洋・海氷動態分野	○	
11	中條 飛翔	北大水産		
12	松浦邦明	一般財団法人日本気象協会事業本部社会・防災事業部	○	
13	稲津 大祐	東京海洋大学 学術研究院 准教授	○	
14	谷口 直和	広島大学		
15	福留研一	富山高等専門学校 商船学科	○	
16	江淵 直人	北海道大学 低温科学研究所	○	
17	藤井 智史	琉球大学工学部 教授	○	
18	林 美鶴	神戸大学	○	
19	刘 天然	九州大学応用力学研究所	○	
20	長名 保範	熊本大学		

	氏 名	所 属	懇親会	チェック欄
21	市川 香	九州大学応用力学研究所		
22	谷田裕	神戸大学海事科学研究科海事科学専攻 海洋安全システム科学コース 修士1年	○	
23	佐々木建一	国立研究開発法人海洋研究開発機構 地球環境部門 むつ研究所 研究所長	○	
24	中山智治	公益財団法人 日本海洋科学振興財団 むつ海洋研究所 海洋研究部 主任研究員	○	
25	渡邊修一	日本海洋科学振興財団	○	
26	印貞治	公益財団法人 日本海洋科学振興財団	○	
27	金子 仁	国立研究開発法人 海洋研究開発機構 (JAMSTEC) 地球環境部門 むつ研究所	○	
28	坪野考樹	電力中央研究所	○	
29	油布 圭	九州大学応用力学研究所		
30	西田 芳則	北海道立総合研究機構 中央水産試験場	○	
31	木田 新一郎	九州大学応用力学研究所		
32	梅田 裕生	九州大学総合理工学府		
33	石橋功成	九州大学総合理工学府		
34	乾 翔駿	長崎大学 水産学部 海洋物理学研究室所属 四年	○	
35	工藤楓己	長崎大学水産学部 4 年	○	
36	兼田 淳史	福井県立大学		
37	有村 仁志	九州大学総合理工学府		
38	山下 覚	九州大学総合理工学府		
39	広瀬 成章	気象研究所 全球大気海洋研究部	○	
40	大貫 陽平	九州大学応用力学研究所		

	氏 名	所 属	懇親会	チェック欄
41	広瀬 直毅	九州大学応用力学研究所	○	
42	古賀 大基	九州大学総合理工学府		
43	中畑 駿之助	九州大学総合理工学府		
44	辻 英一	九州大学応用力学研究所		
45	伊藤穂香	鹿児島大学	○	
46	宇佐見 壮平	九州大学総合理工学府		
47	磯辺 篤彦	九州大学応用力学研究所		
48	堤 英輔	鹿児島大学		
49	吉江 直樹	愛媛大学	○	
50				
51				
52				
53		参加者 合計 49名		
54		九大 16名(応力研 9名 総理工 7名)		
55		その他 33名		
56				
57				
58				
59				
60				

空中ドローンからステレオ撮影で 海洋波の時空間分布を精度よく取得すること



Sawada, Inazu, Wu, Ikeya, Okayasu (2024)
Air-borne stereo observation of ocean wave height
using two independent cameras from a single unmanned aerial vehicle
Journal of Marine Science and Technology

稲津 大祐(東京海洋大学)
澤田 尚毅(いであ元 海洋大)



Monitoring onshore/offshore 3D surface relief (DEM: digital elevation model)

Management of construction and agricultural sites
Monitoring volcanoes and active faults (geomorphology)
Post-disaster monitoring (i.e., landslides) (due to earthquakes, tsunamis, typhoons)
Coastal erosion and sedimentation (due to high waves and river runoff)

Remote sensing using manned/unmanned aircraft is necessary for local purposes

Light aircraft, helicopter



~10⁶ 円 / day use

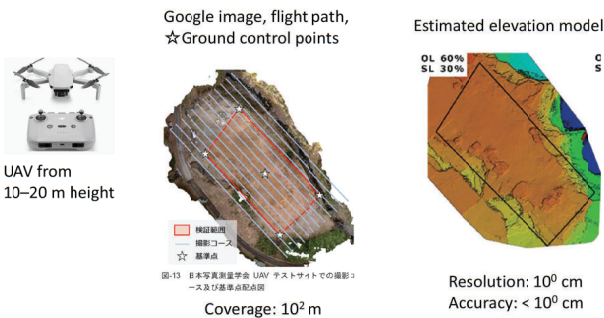
UAV/drone



~10⁵ 円 / vehicle

2

(Stereo) Photogrammetry or SfM/MVS (Structure from Motion/Multi View Stereo)
using optical photos taken from multiple viewpoints during (single-eye) UAV flight



Report by Geospatial Information Authority of Japan (GSI.go.jp)
菅井ほか(2017) UAVを活用した写真測量の精度検証. 国土地理院時報.

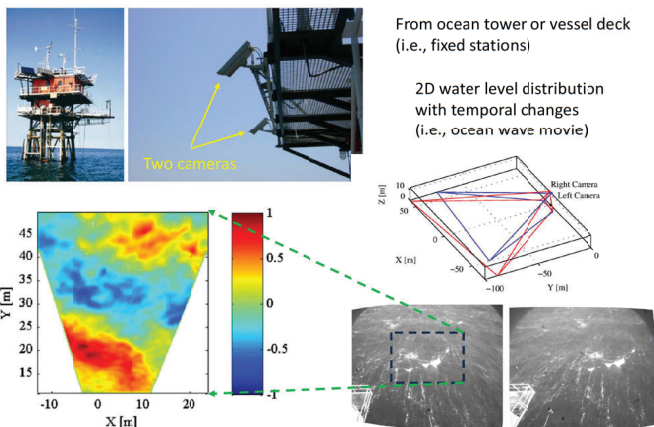
Onshore topography (not moving)

3

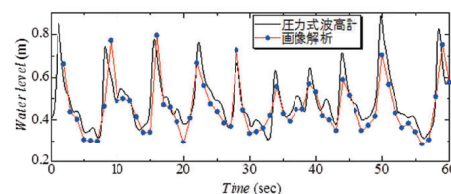
Offshore topography (moving water surfaces: ocean waves)
needs simultaneous observation from multiple viewpoints

4

Ocean wave measurement using stereo cameras
by WASS (Waves Acquisition Stereo System)
(Benetazzo et al. 2012; Bergamasco et al. 2017)



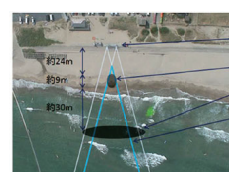
有田ほか(2011)ステレオ画像法を用いた砕波帯内の3次元波浪計測



Pointwise, independent
water level measurement

Stereo estimation

図-9 波高計設置地点の画像解析結果と波高計の比較



Stereo observation
from a fixed station at a beach

図-7 観測装置の配置図

6

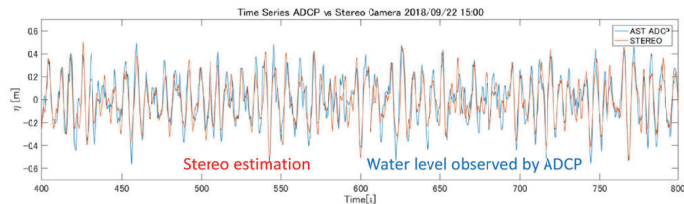
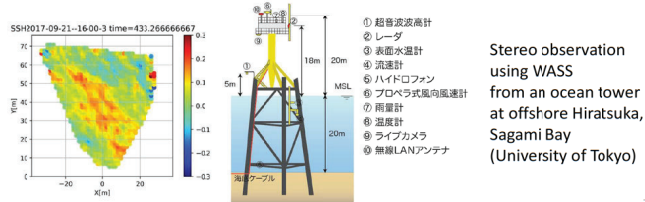


FIGURE 2 | Time series comparison of the surface elevation of the collocated ADCP (blue) and the stereo-reconstruction (red).



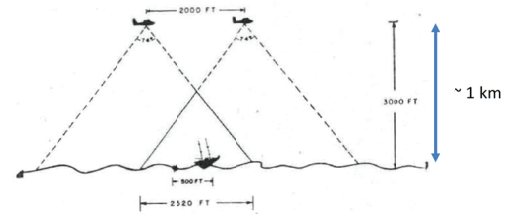
Stereo observation using WASS from an ocean tower at offshore Hiratsuka, Sagami Bay (University of Tokyo)

7

航空機(2機)からのステレオ海洋波計測の試み・コンセプト(具体成功例は見当たらない)

Marks & Claude (1955) Aerial stereo-photography and ocean waves. Photogrammetric Engineering.

満足な結果が得られなかった



UAVの利用でもっと自由に簡易な観測

2台のJAVを使った例
三戸部ほか 2019
Matsuba & Shimozono 2020

精度検証無し
精度がイマイチなど

8

三戸部ほか(2019)二台のUAVによるステレオ画像を用いた波浪観測手法の基礎的検討

$B = 6 \text{ m}, H(=D) = 20 \text{ m} \rightarrow B/D = 0.3$
 $B = 14 \text{ m}, H(=D) = 40 \text{ m} \rightarrow B/D = 0.35$

60 fps (frames per second)

DJI Phantom 4 Pro (x 2)



重量 / ペイロード
1.4 kg / 0.4 kg

精度検証 無し

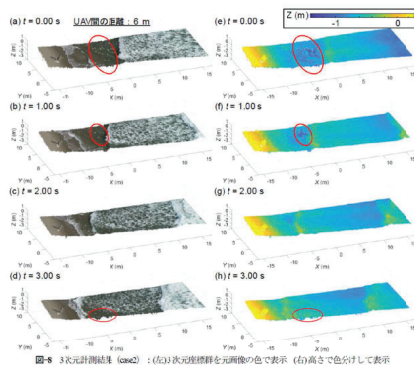


図-9 3次元計測結果 (case2) : (左) 3次元計測結果を元画像の色で表示 (右) 高さで色分けして表示

Matsuba & Shimozono (2020) Stereo Reconstruction of Surf Zone Waves Using UAV

$B = 10 \text{ m}, H = 50 \text{ m}, D = 60 \text{ m} \rightarrow B/D = 0.17$

30 fps

DJI Phantom 4 Pro (x 2)



重量 / ペイロード
1.4 kg / 0.4 kg

精度良く計測できているとはいえない

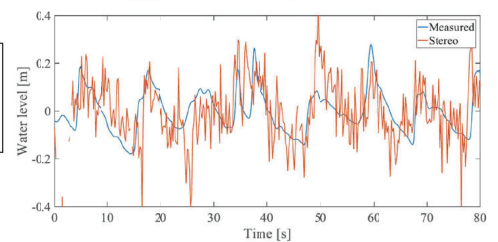


Figure 10. Comparison of the estimated water level with measured data by a wave gauge.

10

1台のUAVから簡易で正確な海洋波の計測の提案と実証

産業用ドローン
DJI Matrice 600 Pro

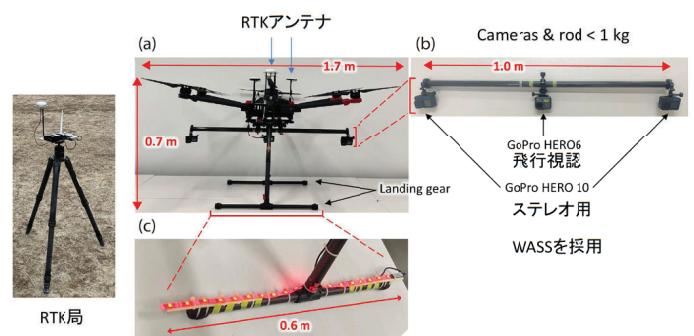
重量 / ペイロード
10 kg / 6 kg



澤田ほか(2023)第70回海岸工学講演会
UAVに搭載したステレオカメラによる海面形状推定
Sawada et al. (2024) J Mar Sci Tech
Air-borne stereo observation of ocean wave height
using two independent cameras from a single unmanned aerial vehicle

11

DJI Matrice 600 Pro
重量 / ペイロード
10 kg / 6 kg



LEC点減テーパー
2台のカメラの時刻同期に使用

ランディングギアを上げたときに
左右のカメラに写り込む配置

12

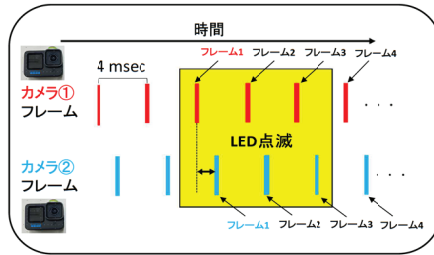
カメラ設定 GoPro HERO10

解像度 2704 x 1520 pixels
フレームレート 240 fps
シャッタースピード 1/3840 sec

時刻同期は
点滅光 (LEDライト) を利用

1/240 sec ~ 4 msec

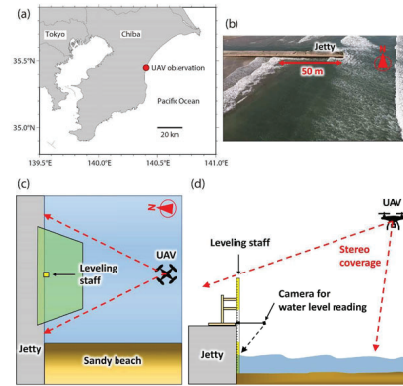
①のフレーム1と
②のフレーム1が
同時刻と扱う



事前に(カメラのマイクを使用した)背景音を使った時刻同期を試みたが失敗
プロペラの風切り音は左右のカメラで異なる音声となってしまうのかも...

13

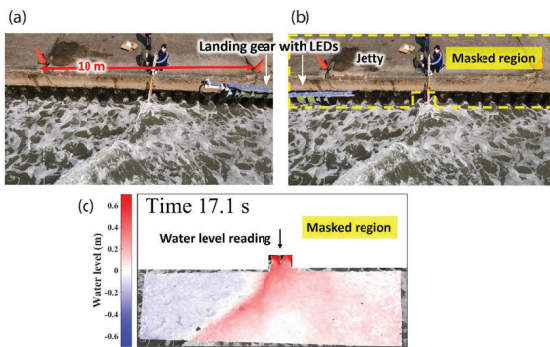
千葉県 長生郡 白子町 南白亀(なばき)川の河口の海岸で現地計測を実施



検証用のデータ:
防波堤にて測量スタッフの目盛を読む
Ground truth of water level

14

元画像とステレオ復元の例



15

Sawada et al. 2024 の付録動画 (150MB)
<https://doi.org/10.1007/s00773-024-01005-3>

16

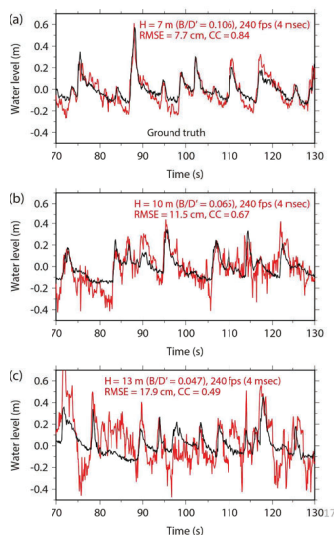
240 fps (4 msec 同期)
H = 7 m, B/D = 0.1 で
RMS: 7.7 cm

静止物体の計測と同品質の誤差で
ステレオ復元

H = 10 m
B/D = 0.065

高度Hを高くすれば
(B/H ~ B/D が小さい)
誤差が大きくなる(一応)

H = 13 m
B/D = 0.047

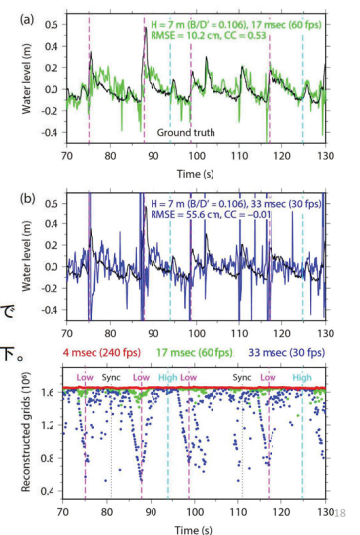


時刻同期の手を抜くと・・・
4 msec → 17 or 33 msec

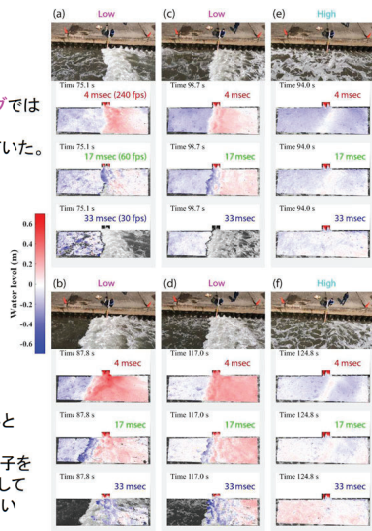
60 fps (17 msec 同期)
30 fps (33 msec 同期)で
誤差が大きくなる
スパイクノイズのタイミングに注目

33 msecでは、スパイクノイズのタイミングで
光学ターゲットのマッチング
できたグリッドの数(復元グリッド数)が低下。
17 msecもその傾向
4 msecでは計測期間全体で
安定した復元グリッド数

時刻同期の手を抜いても
安定して復元できている時間帯もある



復元グリッド数が
低下したタイミングでは
碎波フロントが
画像に多く表れていた。



安定して復元
できている時間帯では
碎波がほぼ見られない

厳しい時刻同期
(< 4 msec)の
画像セットでない
と碎波フロントの
早い速度の水粒子を
光学ターゲットとして
マッチングできない

水粒子を細かく早い動きを正確に捉えるために
時刻同期を正確(msec)にすることがまず必要。

両カメラが近過ぎれば、近距離にしかピントが合わない。
B/Dが大きいほど精度向上が期待できるが、
しかし離れ過ぎる(> 10 m)と、反射光が変わって見えてしまうため、
こちらうまく測れない原因になり得る。

三戸部ほか(2019)や Matsuba & Shimonozo (2020)

まとめ

1台のUAVからのステレオ撮影によって
簡易(GoPro 2台)で高精度な海洋波の時空間計測を実証
(空から成功した例は無かった)。
碎波をきちんと計測しようとすると、厳しい時刻同期($< \sim 4$ msec)が必要条件

展望

波高+波向 スペクトル
任意の場所((船が入れない)海岸・海域、沖合構造物周辺)での計測への利用

波・海岸の相互作用、特に、動的な過程の評価
波・(沖合)構造物の相互作用の評価

電動リールを用いた CTD観測とADCPリバーボー ト河川断面流量観測

電中研 坪野考樹

背景

- CTDの上げ下げ・ADCPのライン観測は人海戦術
 - 40m程度を何回もCTD上げ下げする(暑い日も寒い日も)。
 - 潮時毎にADCPライン観測は手で引く
 - ADCPは揺動が少ないほうがよいとされている。
- CTD+UAVウインチ
 - スピードはどの程度で巻くとよいのだろうか?
- リールが安くなった。
 - 5万弱で買える(Shimano 3000XP)。
 - PEラインが強い。
- おもしろい機材がでてきた。
 - Wiral-lite



目的

- CTD上げ下げに電動リールを適用
 - 上げスピードとCTDの水溫遅延の関係
- ADCPのライン観測にWiral-liteと電動リール適用
 - ヨー・トウ・船速等のhandwindとの違い



観測場所・日時

・尾駁沼

- ✓ 潮汐により海水流入・流入河川により複雑な混合過程
- ✓ 汽水域の炭素循環（物理循環・水質影響）
- ✓ 物質循環（多田ら, 2020）

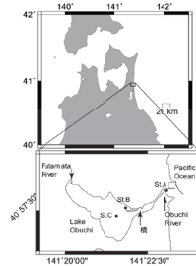
・CTD観測（8/28, 11/20）: St.C

・ADCP観測（8/27）: Obuchi River



尾駁沼の特長（植田ら, 2002）

- ✓ 青森県下北半島の中央
- ✓ 面積：3.7km²
- ✓ 水深：平均2.5m（最深部でも4.5m）
- ✓ 流入河川：二又川（最西部）
- ✓ 尾駁川（最東部：海域と接続、川幅25m程度。尾駁沼との接続部は1m未満）



CTD観測



・仕様器具CTD

- ・ RINKO-Profiler (JFE Advantech Co. Ltd.)
- ・ SonTek CastAway-CTD (xylem)

・電動リール：PLAYS XP3000 (Shimano) 8本撚りPE6号(90lb) + リーダー

1. RINKOで開始前・開始後計測（もちろん釣り竿・電動リール）
2. CA-CTDに変更，フリーフォール後，リールのスピード（モード1～3）で巻き上げ．CA-CTDは0.2秒間隔でdepth, 水温, 塩分を計測
3. 8月は手巻きで遅・中・速でやってもらった．
4. 水温プロファイルを検討する（塩分の計算に水温を使うから．）

水温・塩分の状況（RINKO-P）

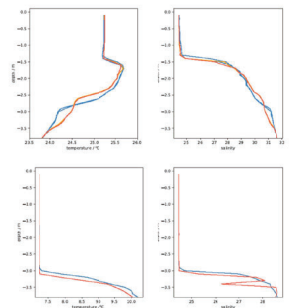
・8月

- ✓ 水深1～1.5mで河川水による躍層

・11月

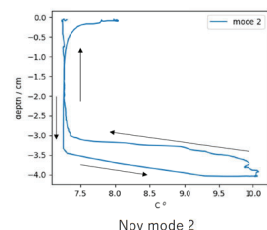
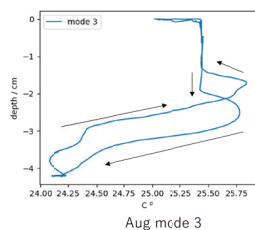
- ✓ 水深3mで塩分躍層

- ・ 水温の違いを見たいので，
✓ 8月：水深1mから2mを
✓ 11月：水深3.3mから2mを
抽出して比較・検討する．



自由落下とAWモード2, 3の水温CA-CTD

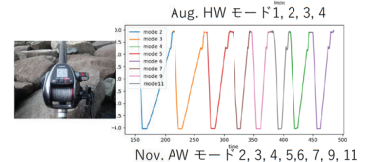
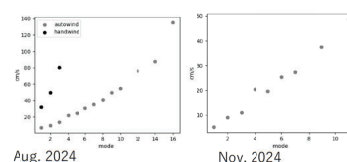
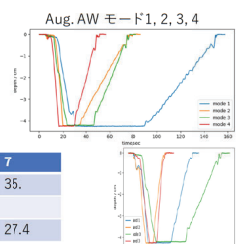
- ・ 自由落下早い => 水温が追従できない．
- ・ モード2, 3 => ゆっくりだといけそう．



リールの巻き上げスピード

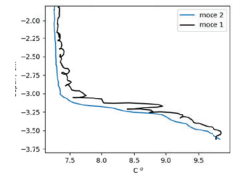
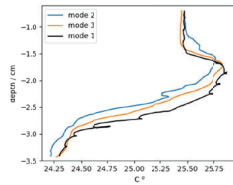
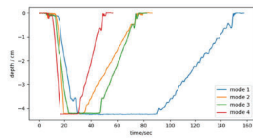
- ・ 上げスピード(cm/s)：安定期を抽出・LSM

	1	2	3	4	5	6	7
8月AW	6.9	9.8	13.7	21.8	24.6	30.5	35.
8月HW	32	49	80				
11月AW	5.1	9.1	11.1	20.4	19.6	25.4	27.4



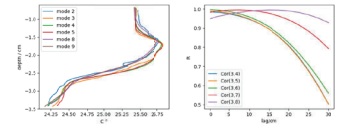
Mode 1

- モーターがスムーズではない、
- 竿と連動して振動する、
- 振動すると水温が良くない、
- 速度計算のときのLSMの誤差は大きい

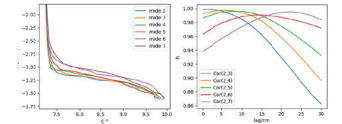


Mode 2～6の水温分布

- Mode 4以上 (20cm/s)
 - 躍層位置が上側にずれる
 - 水温が追隨できていない、
- 2.5cmピッチで内挿して水温計算後、ラグ相関をとると、
 - Mode 2(9-10cm/s), 3(11-13cm/s), 4(20cm/s)はラグがない、



		3	4	5	6	7
Aug	Mode 3	0	0	7.5cm	15cm	
Nov	Mode 2	0	2.5cm	7.5cm	15cm	22cm



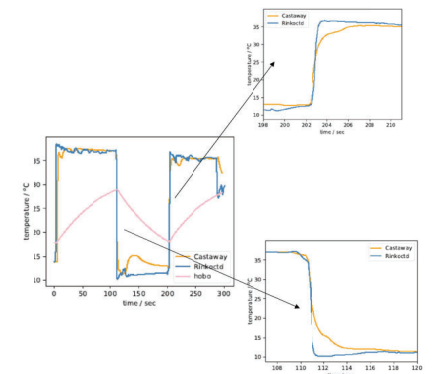
テスト実験（室内）

- お湯と水を入れたバケツを2つ用意、
- 交互にRINKOとCAを入れてみた、
- HOBO U20 (HOBO)も、



水温結果

- RINKOのほうが追従性がよい、
- CA半減期は1秒程度
- 最後は $\text{Exp}(-t/A)$
- 熱拡散のモデル（棒とか）最初の級数 $\text{Exp}(-t/A_i)$
- これでモデル化して、変分法を使えば、よりよい水温鉛直分布を推定できると思う、

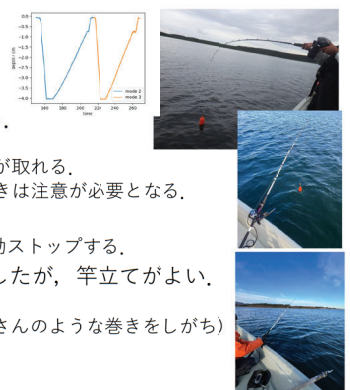


CTDまとめ：CAを用いる場合

- RWはモード2～3を選択すれば、解像度が高く、スムーズに計測できる、
- モード1は乱れるため、水温が乱れる。（鉛直揺動すると水温が乱れる、=>塩分も）
- リールの低速モードは、スムーズさをチェックしたほうがよい、
- Mode 2(9-10cm/s), 3(11-13cm/s)が相対的に良好なデータを得られるので、ウィンチ（UAV）の上げ下げは、このスピードを目標にする、
- 船上・陸上（UAV）にCTD置くときは、バケツに水を張っていれておく、
- 課題：データ同化でよい推定ができるのではないだろうか？

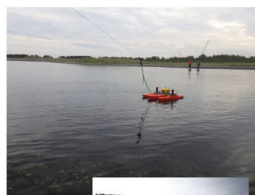
リールの設定から

- モード3 (11-13cm/s)で上昇させる、
 - 滑らかさでゆっくり
 - $0.2s \times 12 = 2.5 \text{ cm}$ ピッチで鉛直分布が取れる、
 - UAVもこれ以上のスピードで巻いたときは注意が必要となる、
- 竿の長さの工夫がいるかもしれない、
 - 投下した位置を0として、0.5m前に自動ストップする、
- 8月は手持ち・11月は竿立てで実施したが、竿立てがよい、
 - 疲れないう・ぶれない、
 - 巻き上げ時の竿のおくりがない（松方さんのような巻きをしがち）



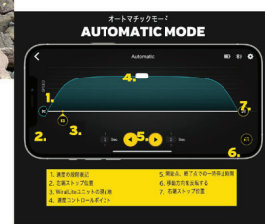
ADCP観測(8/27)

- 尾駁川河口の両端にガイドロープ (川幅は40m)
- リバーポート(RDI) + ADCP1200Hz(Teledyne RD Instruments) + rtkGPS(Hydro Systems Development, Inc.)
- 1. Wiral-lite(WIRAL TECHNOLOGIES)で往復: 1.5kgまでカメラを搭載できる.
- 2. 電動リールAutowind(左岸), handw (右岸)



WIRAL-Liteアプリ設定

- まずは、手動で運転して両端を設定する.
- アプリで、4.スピードを決めて、往復させる.
- アプリで、途中で止められるので、岸に着くたびにADCPの記録・設定を実施する.



WIRAL-Lite

- 低速 = > 中速 = > 高速

Mode	Speed	Direction
WL-IL	低速モード	左岸⇒右岸
WL-IR	低速モード	右岸⇒左岸
WL-mL	中速モード	左岸⇒右岸
WL-IR	中速モード	右岸⇒左岸
WL-hL	高速モード	左岸⇒右岸
WL-hR	高速モード	右岸⇒左岸



手巻きHW + 電動リール巻RW

- 左岸 = > 右岸

Mode	Speed	Direction
RW-m1	mode1	左岸⇒右岸
HW-I	低速モード	右岸⇒左岸
RW-m2	mode2	左岸⇒右岸
HW-m	中速モード	右岸⇒左岸
RW-m3	mode3	左岸⇒右岸
RW-m4	mode4	右岸⇒左岸



船速度 WL

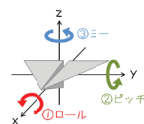
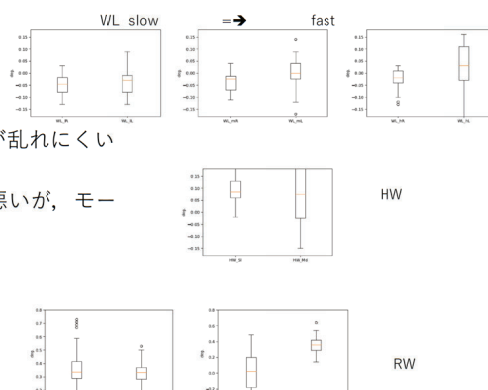
- 川中心を挟んで約20m分を抽出
- 手巻きより、WLのほうが船速の乱れが少ない.
- RWのモード1は船速が乱れる.
 - 理由は巻きのスムーズさ.
- 横断の層数は、遅いほうが解像度があがる.

2.3秒pitch	層数		U, std(U)	V, s'd(V)
WL-IL	48	低速モード	4.5, 2.	20., 1.7
WL-IR	48	低速モード	5.3, 1.8	19.8, 1.6
WL-mL	30	中速モード	6.7, 2.2	32., 1.5
WL-IR	30	中速モード	7.6, 3.4	31., 1.8
WL-hL	22	高速モード	8.7, 4.8	45., 4.3
WL-hR	22	高速モード	9.5, 4.6	43., 1.8

2.3秒pitch	層数		U, std(U)	V, s'd(V)
RW-m1	200	mode1	1.1, 4.5	4.6, 3.5
HW-I	88	低速モード	1.8, 1.0	9., 3.
RW-m2	107	mode2	2.1, 1.5	8.8, 1.9
HW-m	54	中速モード	4.7, 4.9	17., 1.8
RW-m3	76	mode3	1.6, 2.1	12.8, 1.9
RW-m4	66	mode4	3.5, 4.0	16., 2.2

Pitch

- WLは低速のほうが乱れにくい
- HWは乱れている.
- RWはモード1が悪いが、モード2が割とよい.

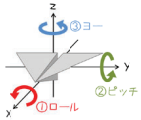


Roll

- WLは変わらない

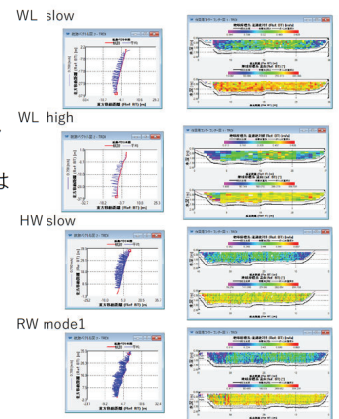
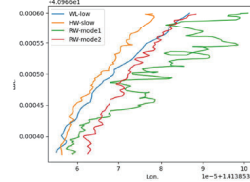
- HWは乱れている。ゆっくりはすごくよかった。

- RWはモード1が悪いが、モード2が割とよい。



航路の例

- RWのモード1の航跡が乱れている。
- リールの巻きがスムーズではないときがある。



1

リールまとめ

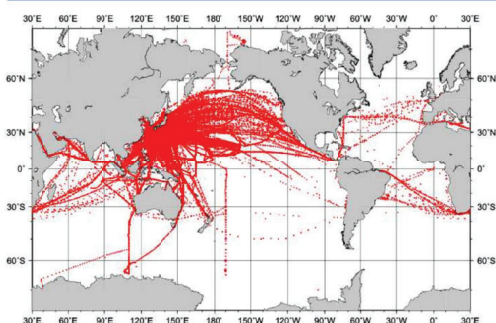
- WLは低速であれば横断の解像度が高く、スムーズに計測できる。
- WLはボートの前後にロープを付けていないので、引っ張り（河川流速も）を受けないため、スムーズ。
- HWは低速にできるが、船速に乱れが生じやすい。ただしそれほど揺れていない。
- RWはモード2〜3を選択すれば、解像度が高く、スムーズに計測できる。
- 両側を電動リールで実施すると、引っ張り（垂れたロープが流動で動く）も少なく、労力が減る。

船上の風向風速計が計測する風を 海上の風に補正する手法の確立

増田 千輝（神戸大学 大学院）
林 美鶴（神戸大学）
廣川 綜一（神戸大学）

研究背景

2



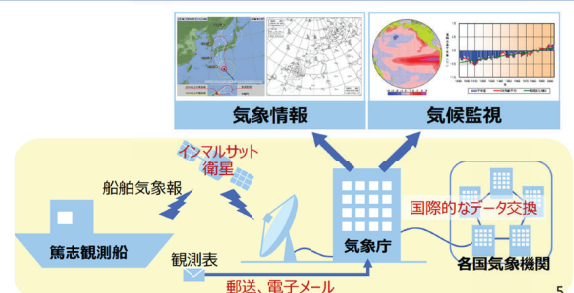
2015年における、
日本篤志観測船による
通報データの分布

引用元：「安全運航のための気象情報の活用について」
（気象庁、令和6年1月22日、高松地方気象台、p4）

船舶は海上の広範囲な気象データ取得に
において重要な役割を担っている

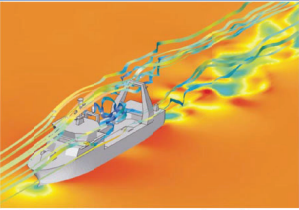
研究背景

3



引用元：「安全運航のための気象情報の活用について」
（気象庁、令和6年1月22日、高松地方気象台、p5）

船舶気象観測データは気象情報の作成や気候監視、
船舶の安全運航などに利用されている



引用元：Popinet et al. (2004)

船上の風向風速計は、船体と船舶の
船上構造物の影響（船体影響）を受けて
ゆがめられた風を計測する

全ての船舶について、船上の風向風速計が計測した風（船上風）のデータを、
船舶の影響を受けていない風（海上風）に補正して利用することが望ましい

最終目標

船上風を海上風に補正する、汎用性の高い手法を確立する

➤ 先行研究の紹介

- 深江丸の事例
- 海神丸の事例

➤ 現在行っている研究の紹介

➤ 今後の方針

➤ 先行研究の紹介

- 深江丸の事例
- 海神丸の事例

➤ 現在行っている研究の紹介

➤ 今後の方針

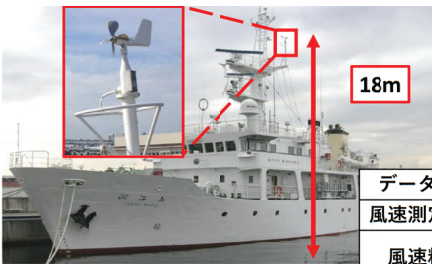
Correction of Shipboard Wind Speed and
Direction toward the Utilization of Big Data
(ビッグデータ利用に向けた船上風速・風向の補正)
(Hayashi et al.(2020))

目的

船舶の風データと、定点観測地点の風データから、
船上風の風向・風速を海上風の風向・風速に
補正する補正式を検討する

➤ 深江丸

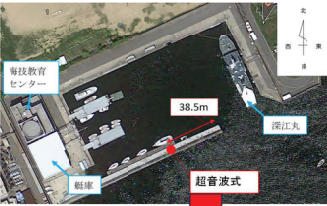
- ・ 神戸大学海事科学研究科附属の練習船
- ・ キャンパス内のポンド（貯水池）が拠点
- ・ 1987年10月に竣工し、2022年3月に引退



データ間隔	1秒（瞬間値）
風速測定範囲	2 ～ 60 m/s
風速精度	10m/s未満：± 0.5m/s 10m/s以上：5%
風向精度	5度

◆ 実験概要

実施場所	神戸大学深江キャンパス内ポンド
実施期間	2014年10月2日、3日、6日、9日、13～14日 （深江丸がポンドに停泊中の期間）
データ間隔	10分（平均値）

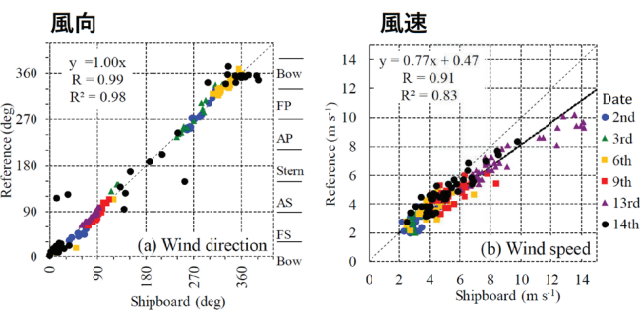


事前にプロペラ式と超音波式の機差と、
計測高度による差を除外して比較



データ間隔	10分（平均値）
風速測定範囲	0 ～ 60 m/s
風速精度	± 0.3m/sまたは0.3%の いずれか大きい方
風向精度	± 2度

◆ 風向と風速についての散布図



風向：ほぼ一致
風速：船上風が、リファレンスより1.3倍大きい

まとめ12

- 風向は船上とリファレンスでほぼ一致していた
- 風向に関わらず、船上では風速が1.3倍となった
- 風速は右舷側から風が吹くと誤差が大きかった
- 風速補正式は風向毎に求める必要がある

海神丸の事例14

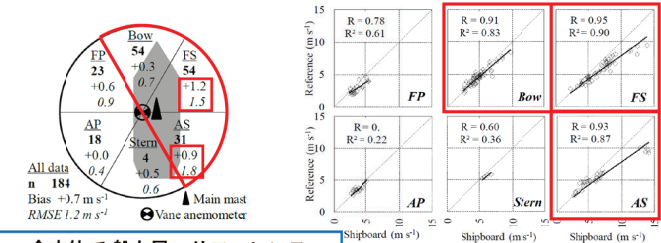
海神丸両舷の風向風速計が計測する風の特性(増田(2024))

Characterization of onboard wind by comparing two anemometers (2つの風向風速計の比較による船上風の特性評価) (Hayashi et al.(2024))

目的

海神丸に設置されている、2機の風向風速計の計測結果の差から、船上風の特性を明らかにする

◆ 風向毎の風速散布図



- 全方位で船上風 > リファレンス
- 右舷からの風の時Bias、RMSEともに大きかった
- データ数・風速範囲が十分な3方向についてのみ補正式を作成
- 船首 (Bow) の補正式と全データの補正式で傾きが10%程度違いがあった

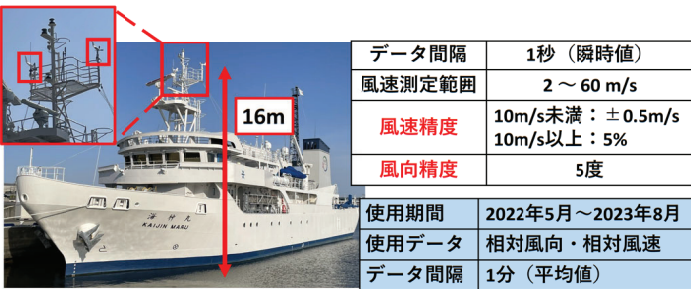
➡ 風向毎に補正式を求める必要がある

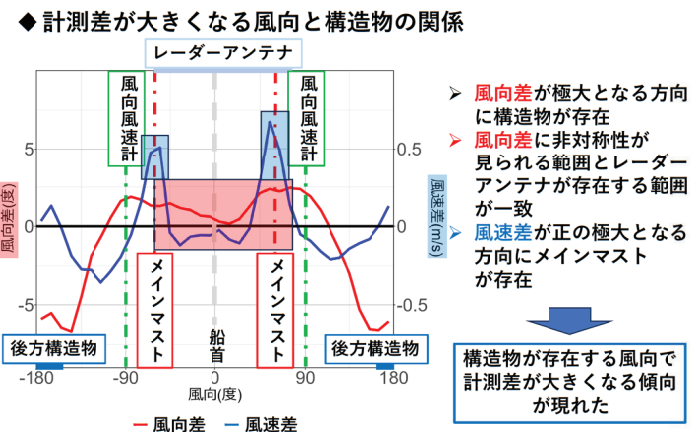
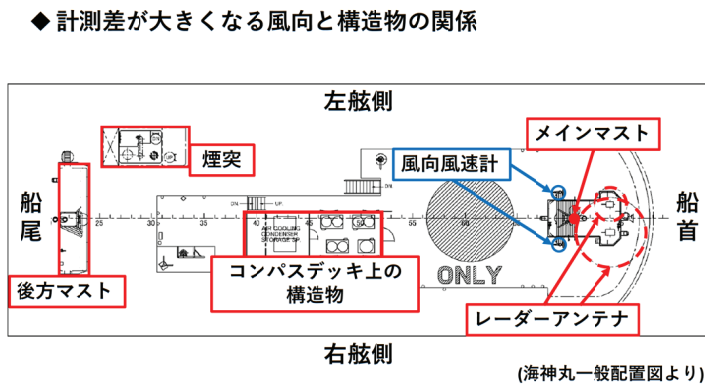
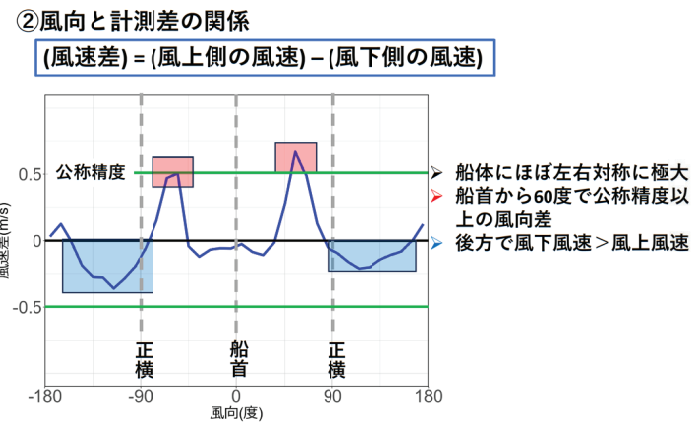
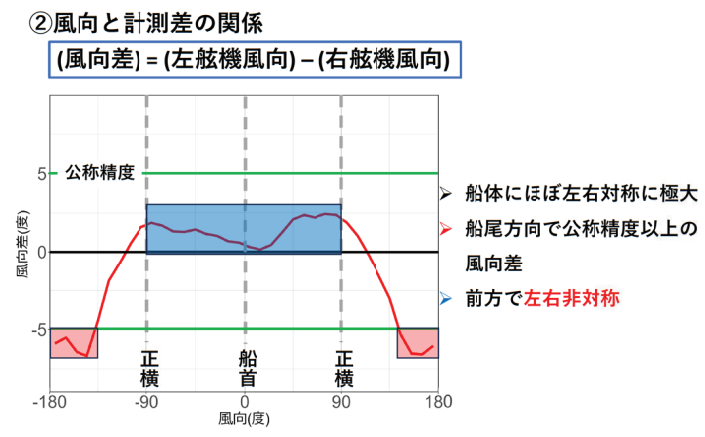
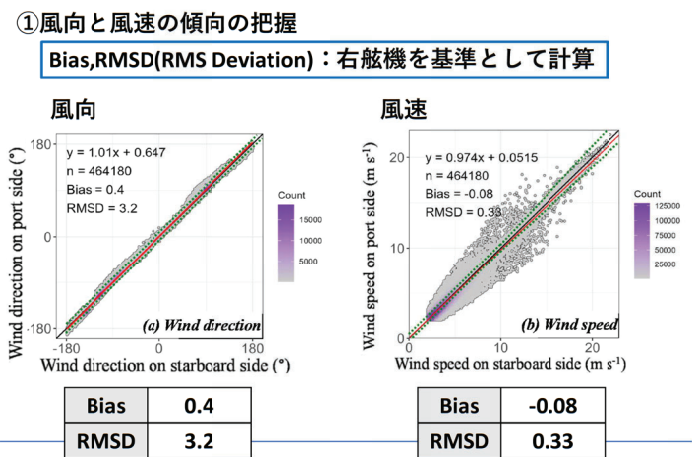
目次13

- 先行研究の紹介
 - 深江丸の事例
 - 海神丸の事例
- 現在行っている研究の紹介
- 今後の方針

海神丸の事例(増田(2024)、 Hayashi et al.(2024)) 15

- 練習船「海神丸」
 - ・ 2022年4月に竣工





- 構造物が存在している風向で、計測差が大きくなる傾向が現れた
- レーダーアンテナによって風向差の非対称性が発生している可能性がある

➤ 先行研究の紹介

● 深江丸の事例

● 海神丸の事例

➤ 現在行っている研究の紹介

➤ 今後の方針

目的

船舶の風データと、リファレンスの風データを用いて、船上風の風向・風速を海上風の風向・風速に補正する補正式を検討する

研究の流れ

① 船上風とリファレンスの比較

② 補正のためのモデルを作成

③ モデルの精度検証

データと手法

24

◆ 使用機器

鉛直ライダー（WINDCUBE V2.1）



データ間隔	0.8秒
測定高度	40 ~ 200 m(12高度) (任意の高度を選択)
風速測定範囲	0 ~ 60 m/s
風速精度	0.1 m/s
風向精度	2度
スキャニング角度	28 度

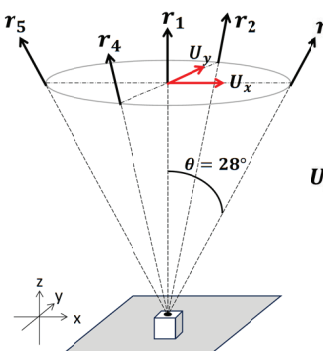
計測期間	2024年8月1日～
測定高度	40～70mは5m毎、 80～200mは10m毎

データと手法

25

◆ 使用機器

鉛直ライダー



- 0.8秒間隔でビームを5方向（鉛直→北→東→南→西の順）に照射
- 大気中のエアロゾルによる後方散乱を受信し、ドップラーシフトを計算
- 各視線風速から、風速を求める

$$U_x = \frac{r_3 - r_5}{2 \sin \theta} \quad U_y = \frac{r_2 - r_4}{2 \sin \theta} \quad U_z = r_1$$

θ : ビームの照射角度
 r : 視線風速（添え字は順番を示す）
 U_x : x軸方向の風速
 U_y : y軸方向の風速
 U_z : z軸方向の風速

データと手法

26

◆ 鉛直ライダーの設置位置

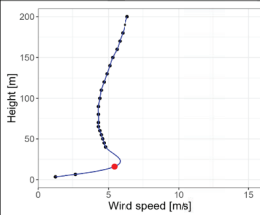


計測高度が異なるため、鉛直ライダーが計測した風速を高度補正する

データと手法

27

◆ 高度補正手法の検討

モニン・オブコフの相似則	$U_z = \frac{u_*}{k} \left(\ln \frac{z}{z_0} - \varphi \left(\frac{z}{L} \right) \right)$	ある高度の風速、気圧、気温、湿度、水温などの気象パラメータから、別高度の風速を推定する
スプライン補間を用いた内挿	 ● 実測値 ● 高度16mの推定値 — 補間により得られた曲線	与えられたプロットをすべて通るような、なめらかな曲線を作成する

◆ 高度補正手法の長所・短所

	長所	短所
モニン・オブコフの相似則	- 低高度の風速推定手法として、理論的に確立されている - 物理的な背景を反映している	- 接地境界層内（高度約100m以下）でのみ適用可能 - 様々なパラメータを正確に求める必要がある
スプライン補間	- 複雑なパラメータを計算する必要がない - 高高度のデータも推定に使用できる	- 物理的な背景を反映していない - 多くの観測高度が必要 - 低高度の風データが必要

➡ 低高度の風向・風速、気圧、気温、湿度、海面水温を計測

◆ 使用機器

超音波式風向風速計（WXT536）



CTD(Conductivity Temperature Depth) RINKO Profiler

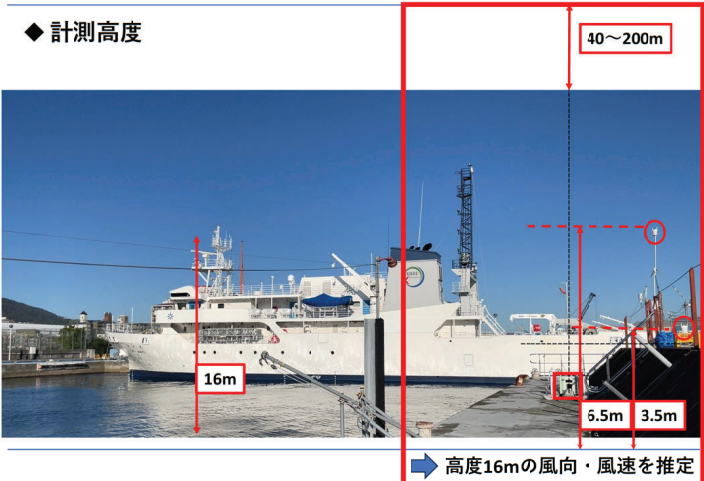


データ間隔	1分、4秒平均
風速測定範囲	0 ～ 60 m/s
風速精度	10m/sにおいて±3%
風向精度	10m/sにおいて±3度
その他計測項目	気圧、気温、 相対湿度、降水量

◆ 観測機器の設置位置



◆ 計測高度



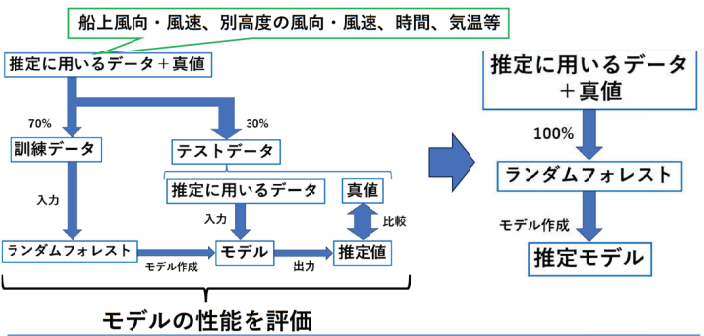
➡ 高度16mの風向・風速を推定

◆ 高度補正の精度検証



②補正のためのモデルを作成

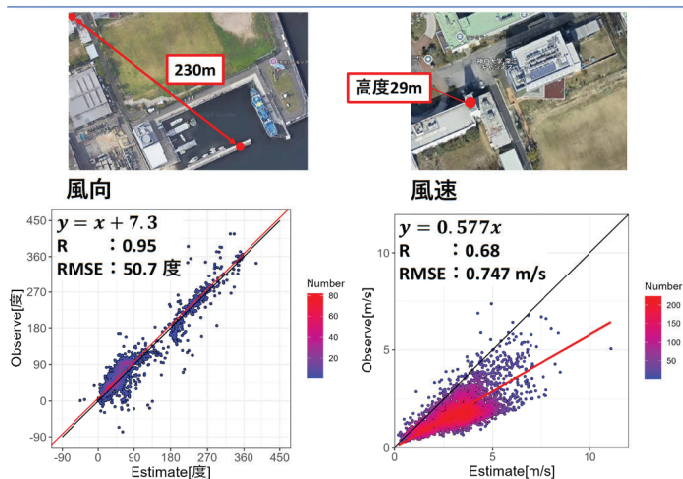
機械学習（ランダムフォレスト）を用いて、船上風や気象パラメータ等から「真値」を推定する各船舶のモデルを作成



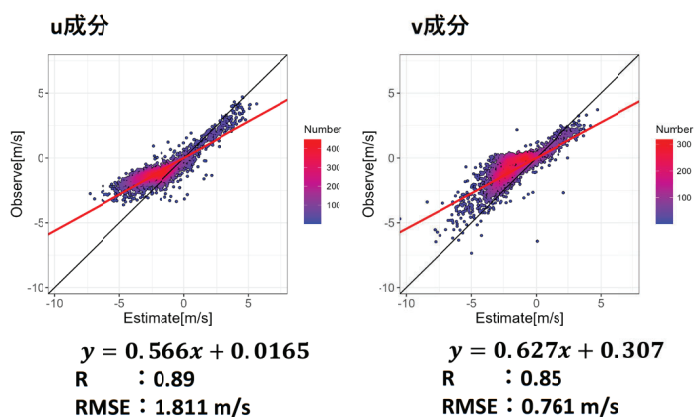
③モデルの精度検証

モデルから得られた海上風（推定値）と
海上の測定局が計測した海上風（真値）を比較し、
モデルの精度を検証

高度補正の精度検証



結果



結果



高度補正の精度検証に使用するのは不適

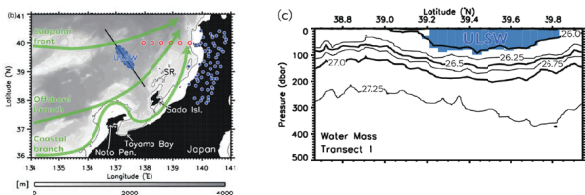
今後の方針

- ◆ 高度補正の精度検証を行い、使用する高度補正手法を決定し、高度補正を行うことで高度16mにおける「真値」を得る
- ◆ ランダムフォレストを用いて、海上風の推定モデルを作成
- ◆ 精度検証に用いる測定局を決定し、海上風（推定値）と測定局（真値）を比較

観測資料に基づく中部・東部日本海の低塩化トレンド

和川 拓、井桁庸介、阿部祥子
水産研究・教育機構 水産資源研究所 新潟

沖合域の上層で大量の低塩水を発見



◆水中グライダーで上層低塩水（ULSW）を発見（Wagawa et al., 2020）

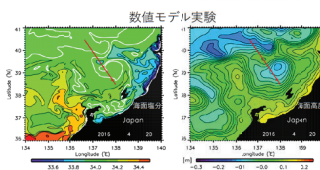
- 2016年4月
- 塩分34.0以下、水平規模は50 km程度、厚さ100 m以上
- この時期、この海域で、報告例なし
- 越冬しているの、単純な長江希釈水の移流ではない

中部・東部日本海の低塩化トレンド

モニタリングWS 3 Dec 2024

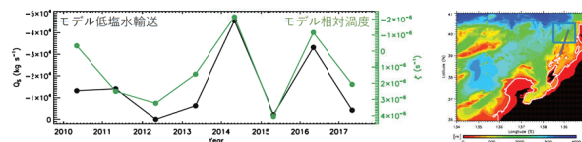
2

日本沿岸から渦により効率的に沖合へ輸送、経年変動あり



- ◆日本海側の東北・北陸地方
- 豪雪地帯
- 流量で日本のトップ5にランクインする4つの一級河川が沿岸域へ流入

Wagawa et al., 2024



中部・東部日本海の低塩化トレンド

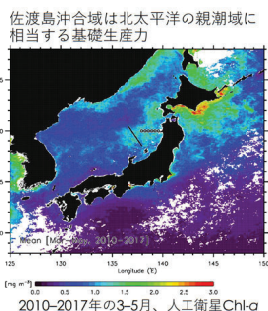
モニタリングWS 3 Dec 2024

3

河川水の沖合流出のインパクト

◆河川水

- 春先に大量に、水質の全く異なる海洋へ流入
- 豊富な栄養塩の供給
 - 物質循環を活性化
 - 植物プランクトンの一次生産、動物プランクトンの二次生産といった低次生物生産を高める
- 沿岸域の物理環境・物質循環・低次生物生産に影響
 - 驚きはない
- 沖合域に効率的に輸送するシステム
 - 沖合域の物理環境・物質循環・生態系へのインパクトは絶大



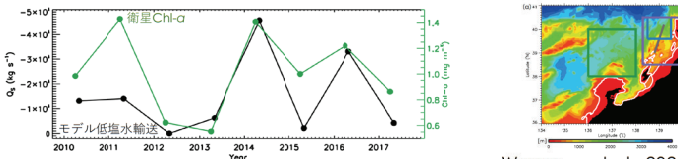
2010-2017年の3-5月、人工衛星Chl-a

中部・東部日本海の低塩化トレンド

モニタリングWS 3 Dec 2024

4

衛星Chl-a分布：モデル低塩輸送の変動と関連



Wagawa et al., 2024

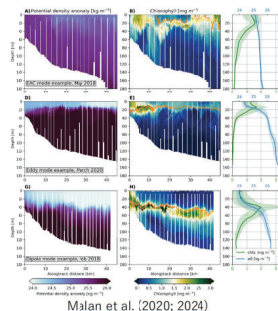
- ◆基礎生産への寄与
- ◆フロンティアである沿岸-沖合の水塊変動や海洋循環、物質循環や基礎生産変動
 - 本研究は、経年変動まで含めた関連性まで見出し、理解を一段階押し上げた
 - 湾流域 (Androulidakis et al., 2019) や東オーストラリア海流域 (Malin et al., 2020, 2024) では事例解析

中部・東部日本海の低塩化トレンド

モニタリングWS 3 Dec 2024

5

東オーストラリア海流域との類似点・相違点に発展性



Malin et al. (2020, 2024)

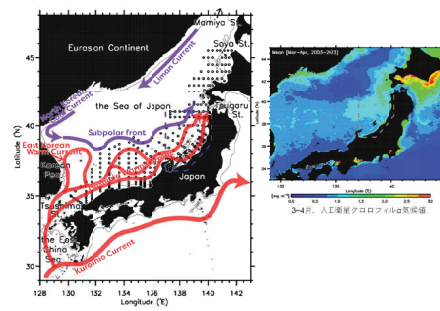
- ◆10年以上、29回のグライダー観測
 - 陸棚上の植物プランクトンブルーム
 - 大気CO₂を効果的に海洋へ吸収
 - 渦により、沖合かつ鉛直下方へ輸送
 - 炭素循環の新たなシステム
 - 気候変動や温暖化の理解向上
- ◆沿岸-沖合の水塊変動や海洋循環、物質循環や基礎生産変動に関する研究の、現時点でのトップランナー論文
- ◆日本海の渦による沿岸-沖合相互作用との類似点・相違点に焦点を当て、今後に共同研究

中部・東部日本海の低塩化トレンド

モニタリングWS 3 Dec 2024

6

河川水の沖合輸送に経年変動あり、次は長期変動に踏み込む



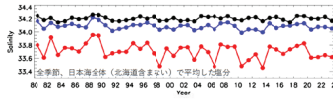
- ◆蓄積された歴史的な水研+道府県の毎月1回のCTD定線観測
 - JODC・KODC・GTSPも加えて、利用可能な全てのデータを解析
- ◆塩分の低塩化トレンドを実証・検証
 - その水平分布と（表層だけでなく）鉛直構造の特徴
 - 河川水の沖合流出が塩分の長期変動へ与えるインパクトを定量的に評価

中部・東部日本海の低塩化トレンド

モニタリングWS 3 Dec 2024

7

低塩化、渦の活性化



- ◆東北-北陸沖合域で平均した表層+亜表層塩分に有意な低塩化トレンド
 - 日本海全体だと有意なトレンドなし
 - 海盆スケール vs. 陸棚スケールという、水平スケールの違いによる異なる描像
 - ▷ 興味深い新しい視点、メカニズム説明の糸口

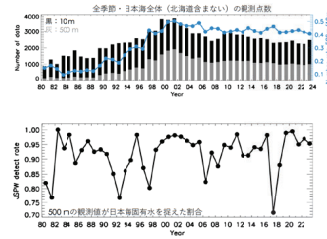
- ◆渦も活性化トレンド
 - 日本海全体よりも東北-北陸沖合域に限定した方がより活性化トレンド
 - 渦により河川水がどんどん沖合流出していることを示唆

中部・東部日本海の低塩化トレンド

モニタリングWS 3 Dec 2024

8

塩分観測値の精度検証



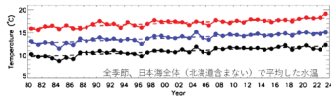
- ◆昔の塩分観測値の精度が懸念
 - 厳密な検証は不可能
- ◆日本海固有水の水質は変わっていないと仮定
 - 水深500 mにおいて、日本海固有水の水質 ($\sigma_\theta \geq 27.2 \text{ kg m}^{-3}$; $34.0 \leq S \leq 34.1$) を捉えた割合
 - 1980年以降、91.8%
 - ▷ 精度の根拠とはならないが、許容してもらう
 - ▷ 1980年以降を解析に用いる

中部・東部日本海の低塩化トレンド

モニタリングWS 3 Dec 2024

9

水温場は確かに高温化



- ◆東北-北陸沖合域で平均した海面水温に有意な高温化トレンド
 - 日本海全体でも高温化トレンド
 - ▷ 日本海全体の方がより顕著
 - 亜表層でも、高温化トレンド検出
- ◆渦の活性化トレンドとの関連
 - Wagawa et al. (2020, 2024)においても、ULSWは低温ではない
 - ▷ 低塩化トレンドと高温化トレンドの整合性
 - 加熱と渦活性度の関連性

中部・東部日本海の低塩化トレンド

モニタリングWS 3 Dec 2024

10

低塩化の原因は沿岸域

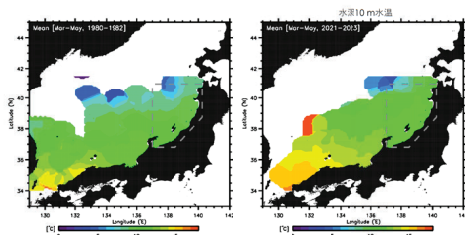
- ◆特に東北沿岸域で顕著

中部・東部日本海の低塩化トレンド

モニタリングWS 3 Dec 2024

11

高温化は日本海全体で



- ◆極前線付近（やや北側）で顕著なようにも見える
 - Matusura et al. (2024): 高温化は極前線上で弱く、その南北で強くなる
 - ▷ ジェットによる水平熱輸送、南北の渦による滞留時間増加

中部・東部日本海の低塩化トレンド

モニタリングWS 3 Dec 2024

12

河川流量に増加トレンド

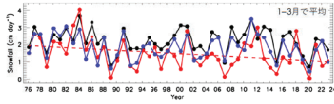
- ◆東北・北陸地域の、春季とその直前時期の河川流量が増加トレンド
 - 4月と5月を含めると、トレンドなし
 - この3河川は日本の河川流量トップ5にランクイン

中部・東部日本海の低塩化トレンド

モニタリングWS 3 Dec 2024

13

低塩化：沿岸域からの遠隔的な低塩水流出



中部・東部日本海の低塩化トレンド

- ◆酒田と秋田で降水量に有意な増加トレンド
 - 降水量増加により河川流量増加
 - 新潟にはトレンドなし
- ◆海上（佐渡北東）は減少トレンド
 - 低塩化は沿岸域からの遠隔的な低塩水流出
 - 沖合域の局所的な低塩強制ではない
- ◆降雪量は顕著なトレンドなし
 - 新潟ではむしろ減少トレンド
 - 温暖化で降雪から降雨化？
- ◆降水量増加の成因は？
 - 温暖化に伴う潜熱フラックス増加？
 - 潜熱フラックスの長期データなし

モニタリングWS 3 Dec 2024

14

低塩化が密度成層化に影響

- ◆Stratification Control Index (Caneil et al., 2022)
 - 水温・塩分それぞれの密度成層への寄与を評価
 - > 1 で水温、 < -1 で塩分による成層化が支配的
- ◆低塩化による密度成層強化トレンド
 - 塩分成層化(SCI ≤ -0.5)地点数：168 → 264 (1980-1982 → 2021-2023)
 - 混合層浅化により、海洋熱波を誘発？

中部・東部日本海の低塩化トレンド

モニタリングWS 3 Dec 2024

15

まとめ

- ◆蓄積された歴史的な水温・塩分観測資料を解析
 - 東北-北陸沖合域の表層・亜表層塩分に低塩化トレンド
 - 日本海全体だと有意なトレンドなし
 - 水温は確かに高温化トレンド；日本海全体でも高温化トレンド、日本海全体の方がより顕著
- 渦も活性化トレンド
 - 日本海全体よりも東北-北陸沖合域に限定した方がより活性化トレンド
 - 渦による河川水の沖合流出の増加トレンドを示唆
- 河川流量が増加トレンド
 - 陸上の降水量が増加トレンド；降雪量はトレンドなし：今後の課題
 - 海上の降水量にはトレンドなし
- ◆低塩化：沿岸域からの遠隔的な低塩水流出の影響が大きいことを示唆

今後の課題

- 渦の形成・活性化トレンドの力学機構
- 視点：沿岸捕撈波から惑星ロスビー波への遷移
- 低塩化による密度成層化が混合層を薄くし、貯熱量を下げ、海洋熱波を誘引する可能性

中部・東部日本海の低塩化トレンド

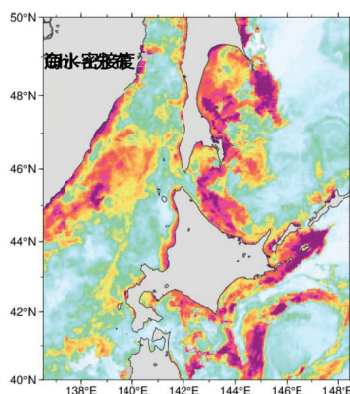
モニタリングWS 3 Dec 2024

16

ADCP後方散乱強度解析による宗谷暖流域の動物プランクトン日周鉛直移動

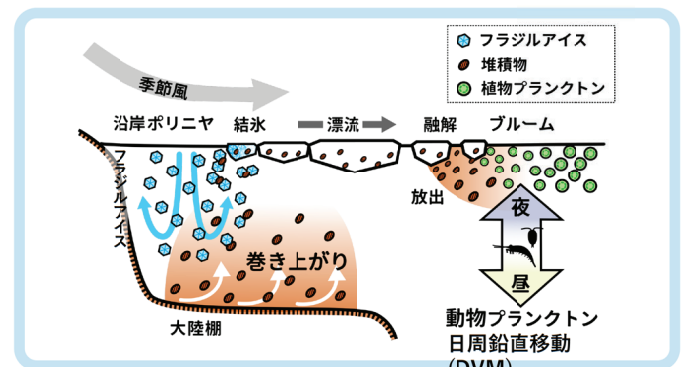
久賀みづき（北大低温研）
山口篤（北大院水産）
松野孝平（北大院水産）
大島慶一郎（北大低温研）

宗谷暖流域



- 日本海から対馬暖流水が流入
- 冬季は海氷に覆われる
- 海氷融解域で高生物生産

海水による物質輸送を介した生物生産



- 沿岸ポリニヤでの堆積物取り込みプロセス (Ito et al. 2017)
- 堆積物由来の鉄による植物プランクトンの成長促進 (Kanna et al. 2018)
- 海氷融解域での高生物生産 (Kishi et al. 2021)
- 沿岸起源海水の融解域で高生物生産 (Kuga et al. 2023)

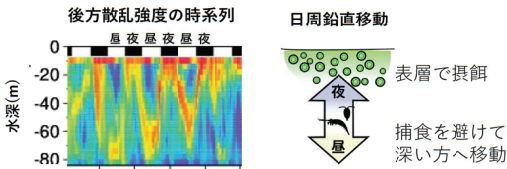
係留ADCP後方散乱強度による動物プランクトンの検出

方法 係留・海底設置ADCP⇒ 時間・鉛直分解能の高い
海水期を含む長期間データ

ADCPエコー強度から散乱体の後方散乱強度鉛直分布を取得

$$S_p = C + 10 \log_{10}((Tx + 273.16)R^2) - L_{DBM} - P_{DBW} + 2\alpha R + K_c(E - E_r) \quad \text{Deires(1999)}$$

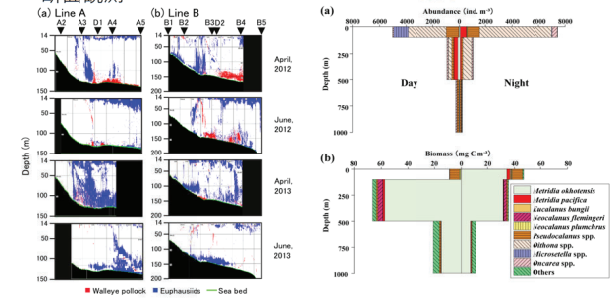
後方散乱強度に現れる動物プランクトンの
日周鉛直移動(DVM)パターンの特徴を抽出
(DVM = Diel vertical migration)



目的 通年の動物プランクトン活動を明らかにする

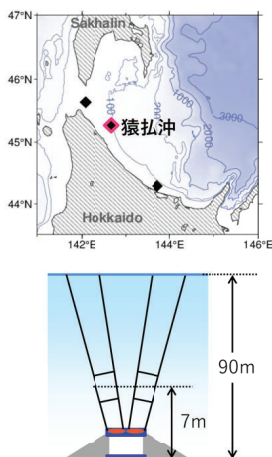
北海道オホーツク海沿岸域における 動物プランクトン日周鉛直移動(DVM)の先行研究

- 水上ら(2019)
魚探によるオキアミ類の
断面観測
- Kojima et al. (2022) プラン
クトンネットによるカイア
シ類層別採取



通年の連続的な観測, 海水期の観測はない

ADCP観測データ



ADCP: RDI WH-sentinel 300 kHz

海底設置 90m深

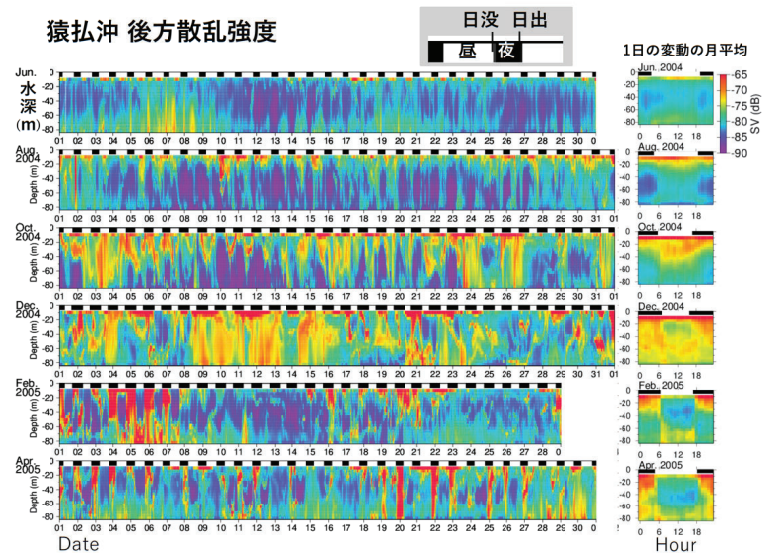
層厚: 4m

観測間隔: 1時間

期間: 2004年5月末から1年間

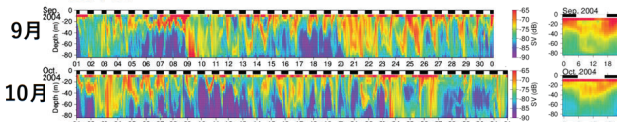
音速1500m/s / 周波数300kHz = 波長5mm

猿払沖 後方散乱強度

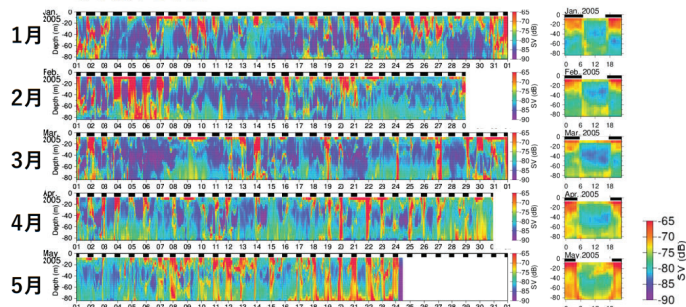


猿払沖 日周鉛直移動(DVM)の特徴

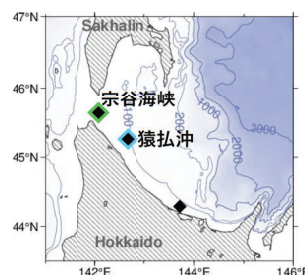
- 夏季浅いDVM



- 冬季深いDVM



宗谷海峡と猿払沖ADCPを比較して 動物プランクトンの日本海からの流入を検討



宗谷海峡

2006/09-2008/07

層厚 2m

1時間間隔

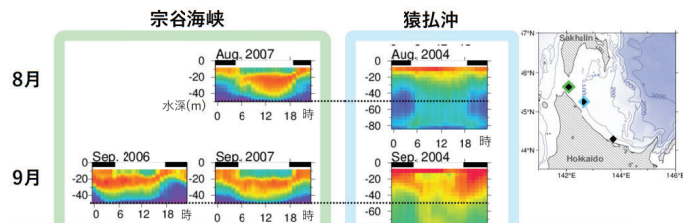
猿払沖

2004/05-2005/05

層厚 4m

1時間間隔

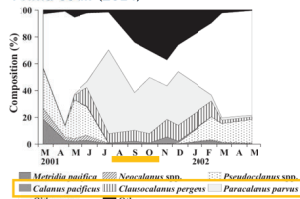
夏季の浅い日周鉛直移動



- 分布深度の同じ浅いDVM
- 日本海~オホーツク海にかけての沿岸域で夏季は暖水性種のカイアシ類が優占 (Arima et al. 2014, Hikichi et al. 2018, Asami et al. 2007)
- ⇒ 日本海から輸送された小型の暖水性プランクトン

日周鉛直移動する暖水性小型プランクトン種

石狩湾カイアシ類組成の季節変化 Arima et al. (2014)

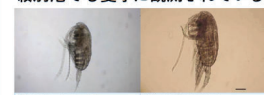


夏季に観測されている種

- *Paracalanus parvus*
- *Clausocalanus pergens*
- *Calanus pacificus*

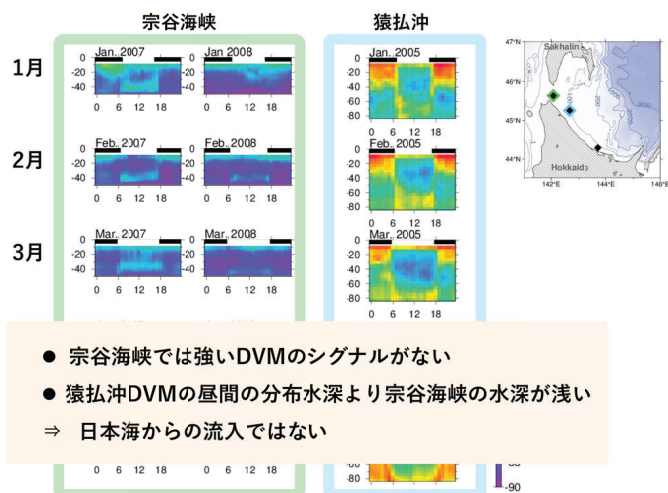


紋別港でも夏季に観測されている



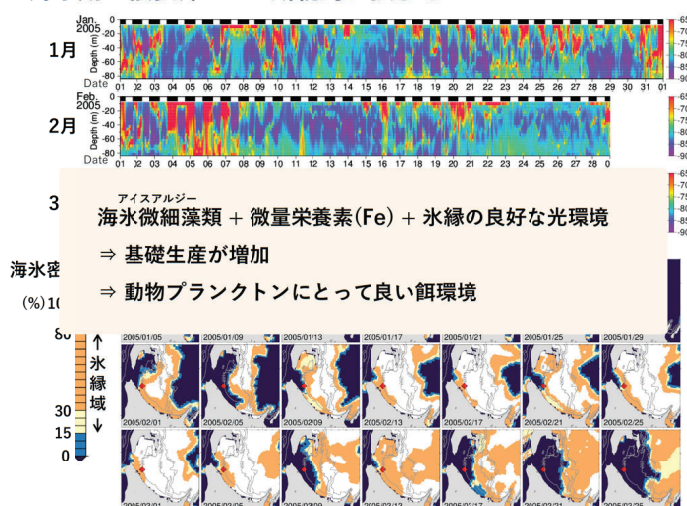
"オホーツクタワーの動物プランクトン情報"より
<http://okhotsk-mombetsu.jp/OKTower/plankton.html>

冬季の深い日周鉛直移動



- 宗谷海峡では強いDVMのシグナルがない
- 猿払沖DVMの昼間の分布水深より宗谷海峡の水深が浅い
- ⇒ 日本海からの流入ではない

海氷期の猿払沖DVM 断続的に強まる



アイスアルジー

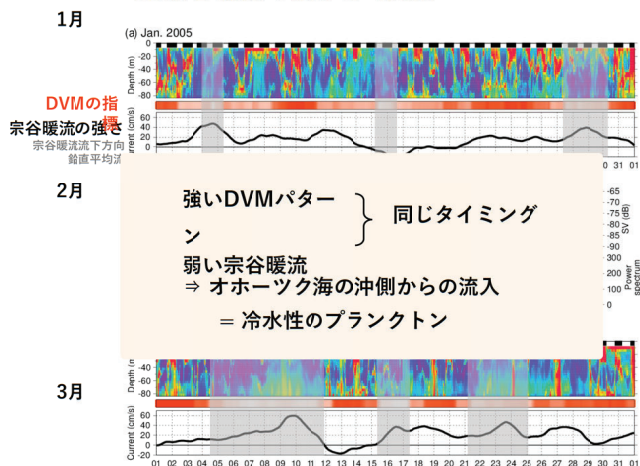
海水微細藻類 + 微量栄養素(Fe) + 氷縁の良好な光環境

⇒ 基礎生産が増加

⇒ 動物プランクトンにとって良い餌環境

海氷
(%)

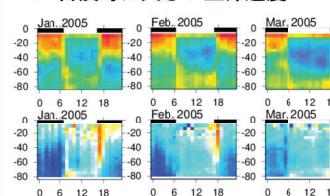
猿払沖DVMと宗谷暖流の強さとの対応



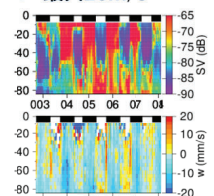
強いDVMパターン } 同じタイミング
弱い宗谷暖流
⇒ オホーツク海の沖側からの流入
= 冷水性のプランクトン

遊泳能力の高い大型の冷水性プランクトン種

- 日没時に大きい上昇速度



- 最大2cm/s



カイアシ類
Metridia okhotsensis
オホーツク海カイアシ類
出現個体数の60%
(Yamaguchi 2015)



カイアシ類
Metridia pacifica
0.8-11.8 mm/s(Wong 1988)
8-24 mm/s (Enright 1977)



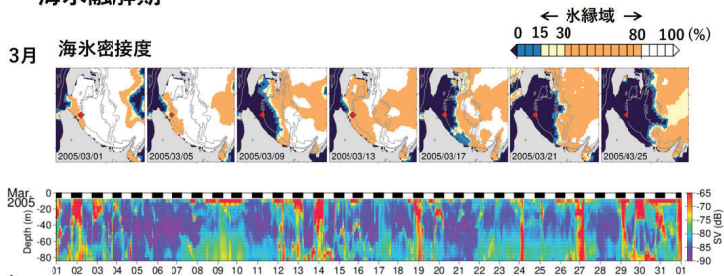
オキアミ類
Euphausia pacifica
2.2-3.5 cm/s
(De Robertis et al. 2003)



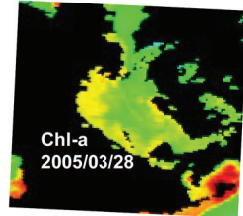
画像は嶋田ら(2023)より

海水融解期

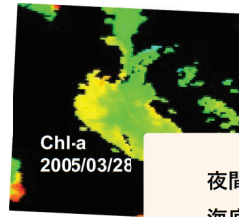
3月 海水密度度



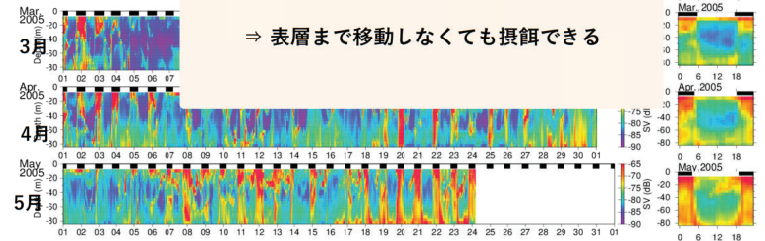
夜間に動物プランクトンが海
底から表層まで分布



海水融解期～春季ブルーム期



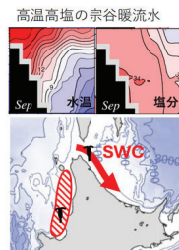
夜間に動物プランクトンが
海底から表層まで分布
⇒ 表層まで移動しなくても摂餌できる



まとめ ADCP後方散乱強度解析による 宗谷暖流域の動物プランクトンDVM

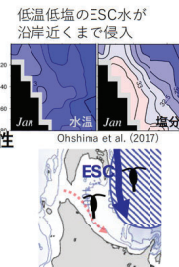
夏季(8~10月)

- 連続的な水深の浅いDVM
- 宗谷海峡とオホーツク海両方で観測
- ⇒ 日本海からの暖水性の小型動物プランクトンの流入



冬季(1~3月)+春季ブルーム期

- オホーツク海のみで深いDVMを観測
- 基礎生産の起点となる氷縁域に位置
- 宗谷暖流が弱まるタイミングでDVMが強まる
- ⇒ オホーツク海の冷水性の大型動物プランクトンの可能性



氷縁ブルーム・春季ブルームに伴う
動物プランクトン活動を捉えた

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

津軽暖流流量の再評価

道総研中央水試 西田芳則

流量を再評価するに至った経緯 年平均流量

日本海において、海峡を通過する流量は1990年代から精力的に調査され、その収支は概ね整合する。

海峡を通過する年平均流量

- 対馬海峡: 2.64 Sv (1997~2002) Takikawa et al. (2005)
- 2.65 Sv (1997~2007) Fukudome et al. (2010)
- 2.25±0.2 Sv 内海 (2018)
- 2.57±0.37 Sv (1975~2018) Shin et al. (2022)
- 津軽海峡: 1.5 Sv (1959~1999) 西田ら (2003)
- 宗谷海峡: 1.0 Sv (2004~2005) Fukamachi et al. (2008)
- 0.6 Sv (2006~2008) Fukamachi et al. (2010)
- 0.91 Sv (1965~2015) Ohshima and Kuga (2023)

流量を再評価するに至った経緯 季節・経年変動

海峡通過流量の季節変化は対馬海峡、宗谷海峡で大きく、津軽海峡で小さい。

海峡を通過する流量の季節変動幅

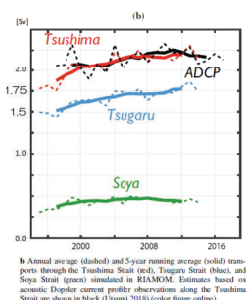
- 対馬海峡: 1.36 Sv (1975~2018) Shin et al. (2022)
- 津軽海峡: 0.3 Sv (1959~1999) 西田ら (2003)
- 宗谷海峡: 1.18 Sv (1965~2015)
- Ohshima and Kuga (2023)
- 津軽暖流流量の季節変動が小さいのは海峡の幅が狭いから

海峡を通過する流量の経年変動幅

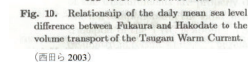
- 津軽海峡: 0.3 Sv (1959~1999) 西田ら (2003)

対馬海峡を通過する流量は増加傾向
0.1Sv/1C年 (1997~2012年)

⇒ 流量の増加分は主に津軽海峡から流出
Kida et al. (2021)



過去に深浦と函館の水位差 ($\Delta\eta$) から津軽暖流の流量 (Q) を算出する経験式を提案
過去の経験式をもとに津軽暖流流量の経年変化を推定
2003年に流量の不連続なジャンプ



2000年度平均成果改定前後での観測基準面の標高変化

	改定前	改定後	変化量
函館	-143.4	-155.7	-12.3
小樽	-198.2	-221.4	-23.2
稚内	-150.7	-163.2	-12.5
網走	-136.3	-150.7	-14.4
花咲	-169.8	-210.3	-40.5
釧路	-158.7	-189.5	-30.8
深浦	-134.9	-132.4	2.5

(cm)

(cm)

GPS併設検潮所の海面水位変化（函館）

出典：気象庁ホームページ（気象庁 | 潮汐・海面水位のデータ 地盤上下変動を補正した海面水位偏差の個別時系列グラフ（両館））

- T.P.は2000年度平均成果を基準
2003年以前の水位を2000年度平均成果基準T.P.の水位
に交換
- 2004年以降は水位差の算出に地盤上下変動を考慮
国土地理院電子基準点日々の座標値を引用
函館：02P204（桧潮所）
深浦：02O898（桧潮所から10km離れた地点）
- 最近のADCP4往復観測結果も追加
・2022年7月、2023年7月、2024年7月

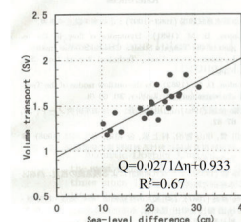
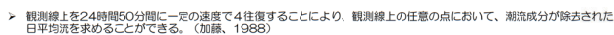


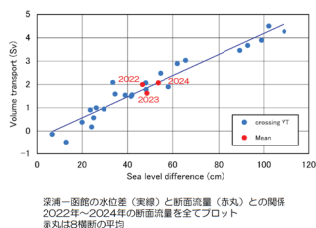
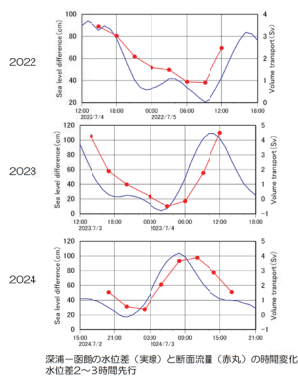
Fig. 10. Relationship of the daily mean sea level difference between Fukaumi and Hakodate to the volume transport of the Tsugaru Warm Current.

ADCP4往復調査実施日：2022年7月4～5日、2023年7月3～4日、2024年7月2～3日

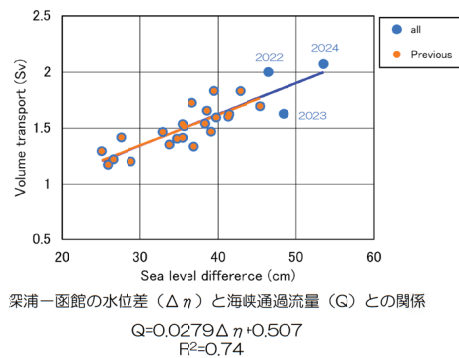


海面及び海底付近の流速の見積もり方法

水位差と断面流量

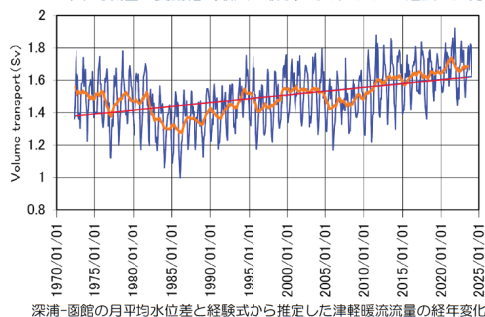


流量推定のための経験式の導出



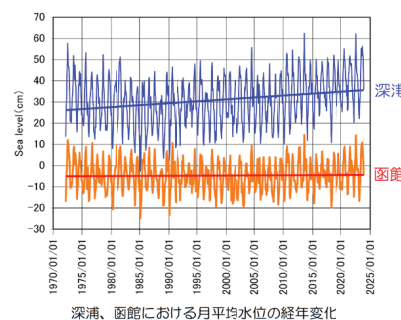
津軽暖流流量の推定

- ▶ 年平均流量は1.5 Sv 過去の知見と同じ
- ▶ 津軽暖流流量は増加傾向 0.047 Sv/10year
- ▶ 年平均流量の変動幅（最大-最小）は0.43 Sv 過去の知見より0.1 増加



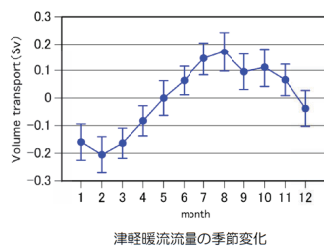
深浦、函館水位のトレンド比較

- ▶ 津軽暖流の流量が増加傾向にあるのは、深浦水位が上昇しているため



季節変化

- ▶ 流量の季節変動幅は約0.3 Sv
過去の知見と同じ



まとめ

- ▶ 津軽暖流の流量（ Q ）を水位差（ $\Delta \eta$ ）から推定する経験式を更新
 $Q = 0.0279 \Delta \eta + 0.507$ $R^2 = 0.74$
 - 2003年以前の水位を推定 深浦：T.P.上水位+2.5 cm
函館：T.P.上水位-12.3 cm
 - 地殻変動の影響を考慮
地盤変動量を用いて水位補正
- ▶ 津軽暖流の年平均流量は1.5 Sv（1977〜2023年）
- ▶ 津軽暖流流量のトレンドは正 0.047 Sv/10year
- ▶ 津軽暖流年平均流量の変動幅（最大-最小）は0.43 Sv
- ▶ 津軽暖流流量の季節変動幅は約0.3 Sv

津軽海峡西方海域でのLADCP観測が 捉えた近慣性内部波の鉛直構造

九州大学大学院総合理工学府 石橋功成
九州大学応用力学研究所 千手智晴

近慣性内部波

・主に海洋上の風によって励起される現象であり、全世界の海域に存在する

・日本海において深層において卓越することが確認されている
(TAKEMATSU et al., 1999; SENJYU et al., 2005; MORI et al., 2005)
海水の鉛直混合において非常に重要な要素

しかし、その深層における振る舞いについては不明な点が多い

なぜ未解明なのか

その要因は、これまでの流速の観測方法にある

○ 一般的な流速の観測方法

流速計を鉛直に複数設置し、観測

⇒ 深さ方向の分解能が低い

○ 新たな流速の観測方法

ADCPを水中に設置し、複数層を観測

⇒ 数千mに及ぶ範囲を測定することはできない

本研究では...

LADCP観測を連続して行うことで、高い時間、空間分解能を持つ流速データを取得

本研究の目的

LADCP反復観測により得たデータから、津軽海峡西方海域における近慣性内部波の鉛直構造を解明する

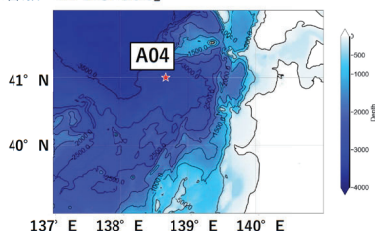
LADCP観測

CTDフレームにADCP(RDI社, Workhorse 300 kHz)を取り付けて海底付近まで降下させ、水平流速の鉛直分布を取得

- 観測日：2017/6/8 ~ 2017/6/9
- 観測船：北海道大学水産学部附属練習船「おしよ丸」
- 観測点：A04



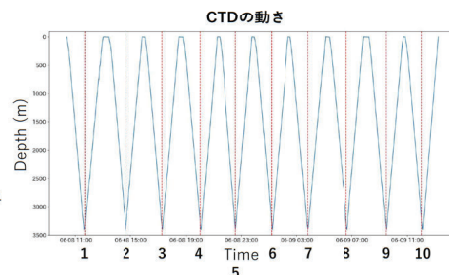
CTDフレームに取り付けたADCP



LADCP観測

- 観測区間：4~3356m (4mピッチ)
- LADCPデータ解析ソフト：LDEO ver. IX_14 (Thumherr, 2021)
- 観測時間：

- | | |
|----------------|-----------------|
| 1: 10:22-13:01 | 6: 23:55-02:23 |
| 2: 13:21-15:53 | 7: 02:31-05:04 |
| 3: 16:02-18:29 | 8: 05:20-07:50 |
| 4: 18:47-21:13 | 9: 08:13-10:41 |
| 5: 21:24-23:45 | 10: 10:50-13:14 |



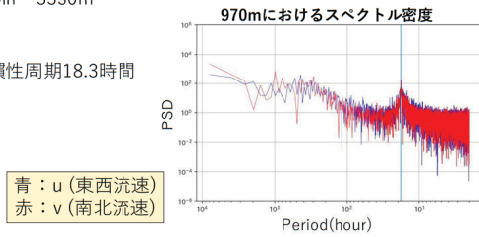
流速計による観測

本研究ではこの海域において卓越する周期を調べるために、LADCP観測に加えて、流速計による観測も行った

- 観測日：2017/6/7 ~ 2018/4/29 (LADCP観測：2017/6/8 ~ 2017/6/9)
- 観測深度：970m・2530m・3330m

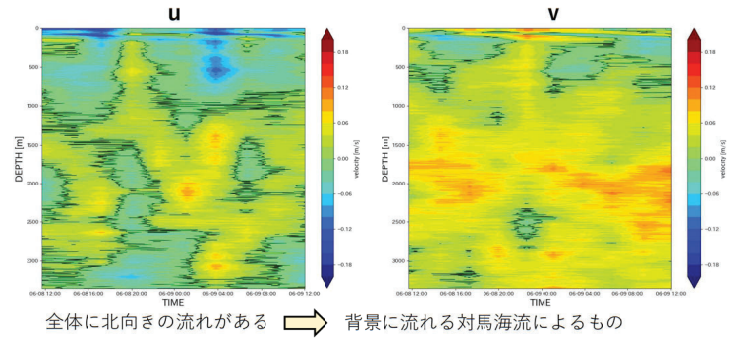
縦の青線：A04における慣性周期18.3時間

慣性周期が卓越している



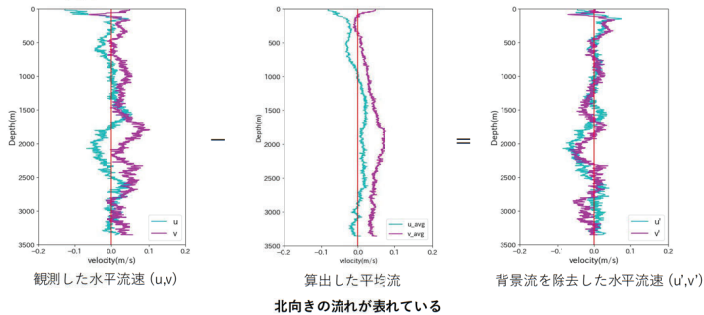
u, v の変動

10回のキャストで取得した水平流速の鉛直分布を用いて、時間-水深ダイアグラムを作成した

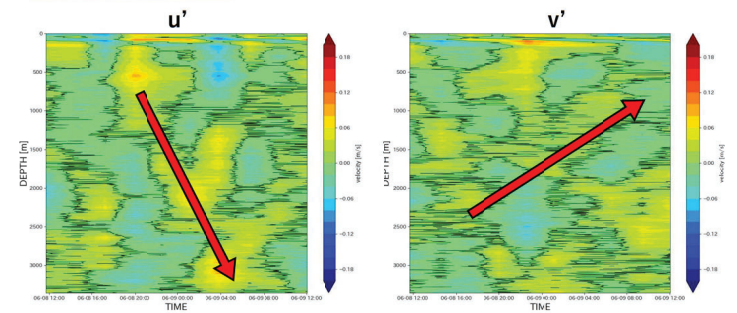


背景流の除去

【例：1回目のキャスト】



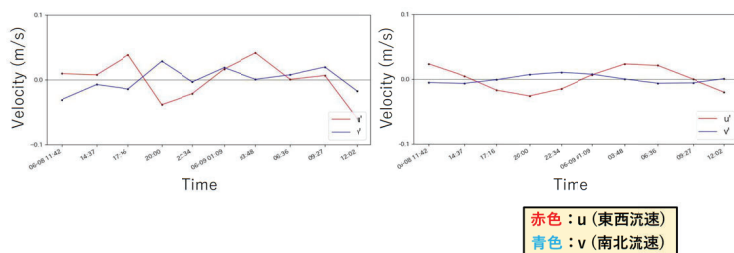
u', v' の変動



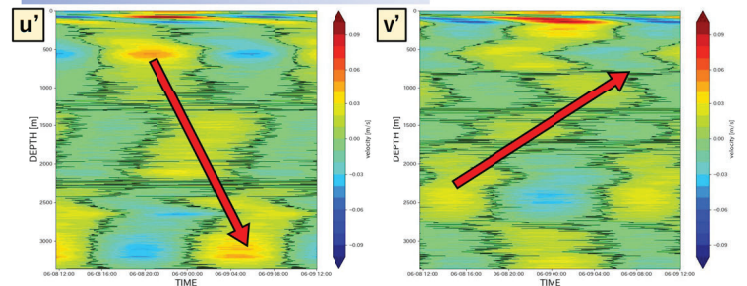
慣性周期成分の抽出

u', v' の各深度において、時間方向に慣性周期 (18.3時間) でフィッティングを行った

例：3000m の u', v' の時間変化



フィッティング後の u', v'



位相が上向きの波と下向きの波が存在することが示唆された

【傾き】(緩) 位相上向き (急) 位相下向き → 【鉛直波数】 位相上向き > 位相下向き

波の抽出

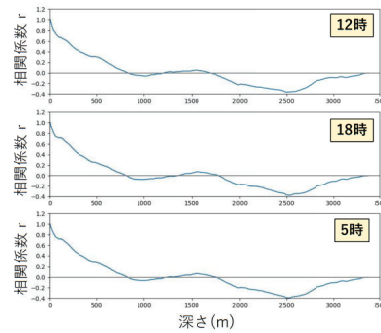
時間方向にフィッティングした u' , v' それぞれに、位相が上向きの波のみと下向きの波のみで時間と深さの2次元のフィッティングを行い、波を抽出

$$\text{位相上向き: } V(z,t) = A_1 \cos(m_1 z + \omega t - K_1)$$

$$\text{位相下向き: } V(z,t) = A_2 \cos(m_2 z - \omega t - K_2)$$

A_i : 振幅
 m_i : 鉛直波数
 K_i : 位相のずれ
 ω : 振動数
 z : 深さ
 t : 時間

自己相関による鉛直波数の決定



各時間において自己相関係数を求め、それを元に鉛直波数を求めた

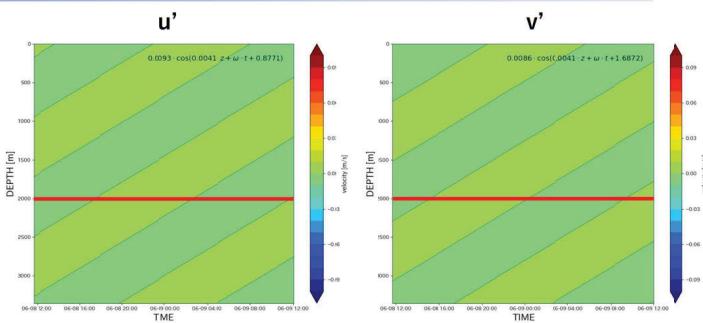
ピーク	波長
1. 1548m	1. 1548m
2. 2496m (-)	2. 4992m

波数 = 2π / 波長

【鉛直波数】位相上向き > 位相下向き

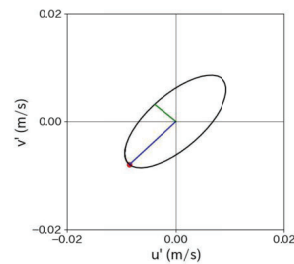
鉛直波数
位相上向き (m_1): 0.0041 m^{-1}
位相下向き (m_2): 0.0013 m^{-1}

2次元フィッティングにより分離した波(位相上向き)



ホドグラフ (位相上向き)

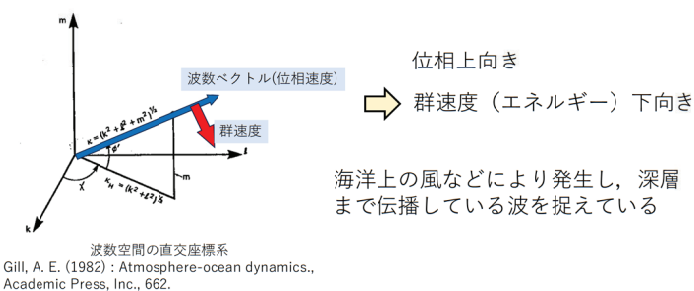
【2000m】



時計回りに回転

近慣性内部波を捉えている

内部波の位相速度と群速度の関係



観測した近慣性内部波の波長

分散関係式より、水平波長 λ_H を算出した

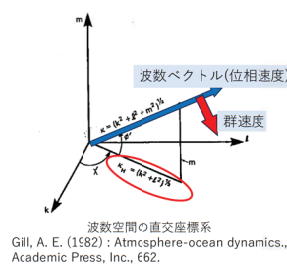
【分散関係式】

$$\omega^2 = \frac{N^2(k^2 + l^2) + f^2 m^2}{k^2 + l^2 + m^2}$$

$$\therefore c_H = (k^2 + l^2)^{1/2} = \left(\frac{(\omega^2 - f^2)m^2}{N^2 - \omega^2} \right)^{1/2}$$

$$\lambda_H = 2\pi / c_H$$

ω : 角振動数
 f : コリオリパラメータ
 N : 浮力振動数
 k, l : 水平波数
 m : 鉛直波数



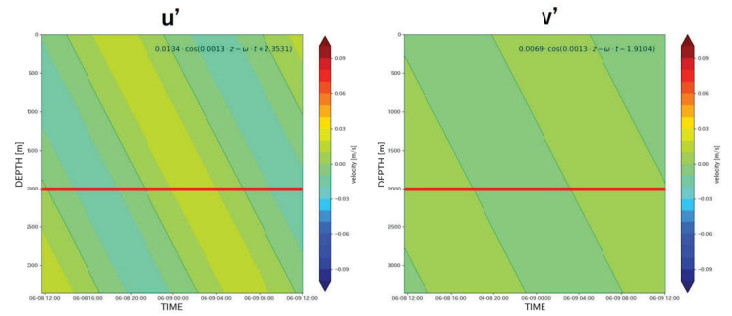
観測した近慣性内部波の波長

$$\begin{cases} \omega = 9.71 \times 10^{-5} \text{ [s}^{-1}\text{]} \text{ (スペクトル解析により求めた振動数を平均)} \\ f = 2\Omega \sin 41^\circ = 9.54 \times 10^{-5} \\ m = 0.0041 \text{ [m}^{-1}\text{]} \\ N = 2.66 \times 10^{-4} \text{ [s}^{-1}\text{]} \text{ (CTDで観測した密度から求めた値を, 1000m以深で平均)} \end{cases}$$

$$\kappa_H = (k^2 + l^2)^{1/2} = \left(\frac{(\omega^2 - f^2)m^2}{N^2 - \omega^2} \right)^{1/2} = 2.73 \times 10^{-4} \text{ [m}^{-1}\text{]}$$

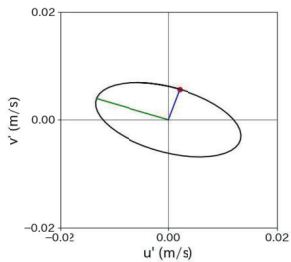
$$\lambda_H = 2\pi / \kappa_H = 23 \text{ [km]}$$

2次元フィッティングにより分離した波(位相下向き)



ホドグラフ (位相下向き)

【2000m】



反時計回りに回転している
北半球では物理的に考えにくい

解析の中で現れてしまった
アーティファクトなもので
あると考えられる

まとめ

津軽海峡西万の海域におけるLADCP反復観測で得たデータに対し、慣性周期でフィッティングを行った。

- 海洋上の風などにより発生し、深層まで伝播する近慣性内部波を観測した
- 自己相関より、鉛直波数は 0.0041 m^{-1}
- 分散関係式より、水平波長は 23 km

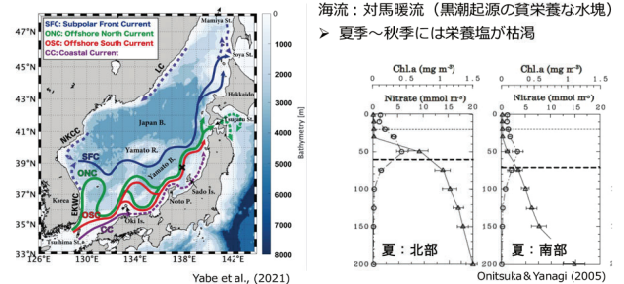
2024年12月3日 モニタリング研究集会

日本海・大和海盆周辺の渦構造と栄養塩分布に関する研究

矢部いつか¹、和川石²、木田新一郎³、長井健容¹

1. 海洋大、2. 水研機構、3. 九大応力研

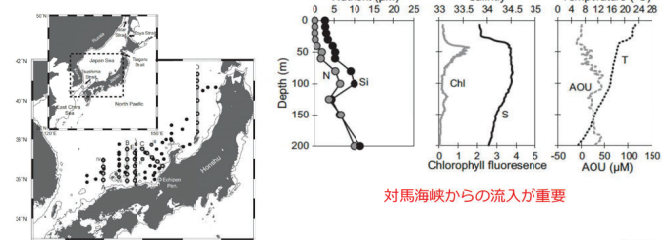
背景：日本海南部の海流と栄養塩分布



マイワシやスルメイカ・ブリなどが生息

背景：日本海内部の栄養塩の起源 (Kodama et al., 2015)

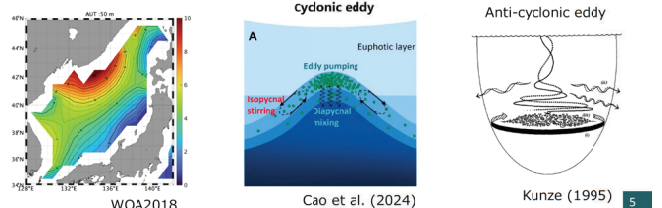
- 対馬暖流 (黒潮水・長江)
- 日本海内部 (中・深層)
- 河川水
- 大気



3

課題：

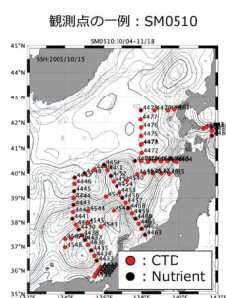
- 検討1：日本海内部での栄養塩供給について
 - 栄養塩豊富な北部の水塊が栄養塩を供給する
- 検討2：日本海南部の重表層に栄養塩を供給するプロセス
 - 低気圧性渦による湧昇が栄養塩を供給する
 - 高気圧性渦での近慣性内部波の増幅・砕波が栄養塩を供給する



5

解析データ

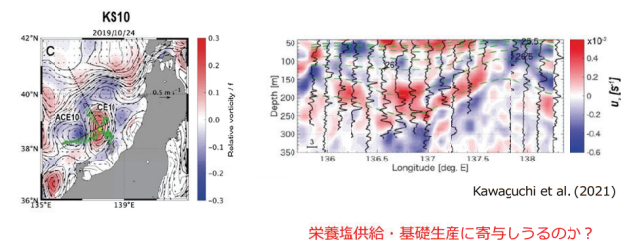
- 気象庁の海洋観測データ
 - 期間：1997-2022 (25年)
 - 年4回 (-2009年)
 - 海域：日本海中・東部
 - データ：水温、塩分、栄養塩 (NO₃, PO₄)
- 人工衛星の海面高度データ
 - 期間：気象庁データと同期
 - 解像度：0.25°x0.25°



7

背景：日本海内部の水塊混合 (Kawaguchi et al, 2020; 2021)

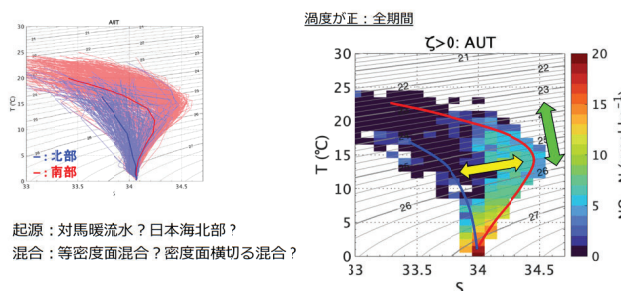
対馬暖流に関連する渦構造と近慣性内部波の相互作用
➢ 高気圧性渦底部で強い乱流混合が発生している。



4

目標：垂表層への栄養塩起源・混合プロセスは？

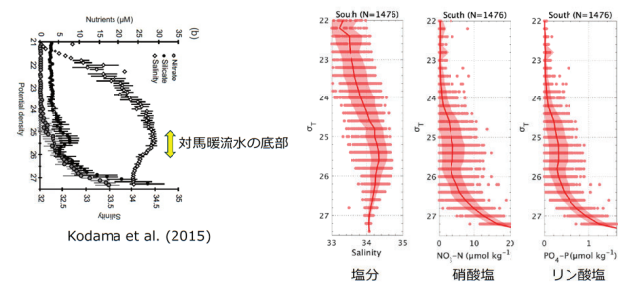
TSダイアグラム上で水温 $\Delta T=1^{\circ}\text{C}$ 、塩分 $\Delta S=0.1$ ごとに平均硝酸塩濃度を算出



6

確認：栄養塩プロファイル (密度座標)

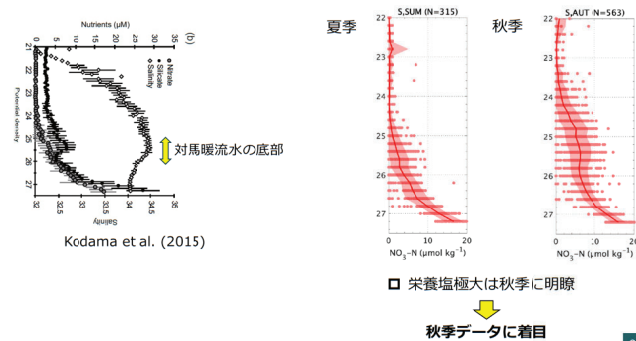
※40°N以南のデータに限定



□ NO₃, PO₄濃度は塩分極大の25-26σ_θ付近で高くなる。

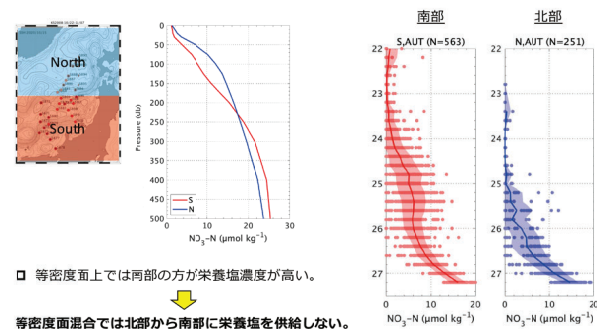
8

確認：栄養塩プロファイルの季節変化（密度座標）



9

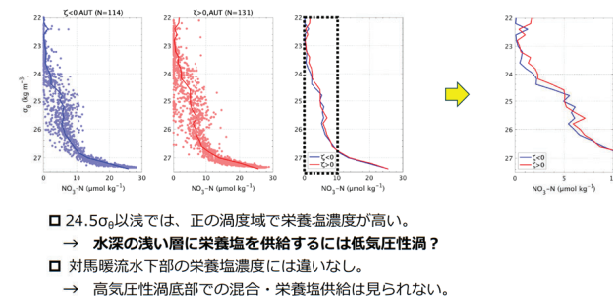
検討 1：北部の栄養塩豊富な水塊は栄養塩供給源となるのか？



11

検討 2：渦度で分けた栄養塩プロファイル（南部・秋季）

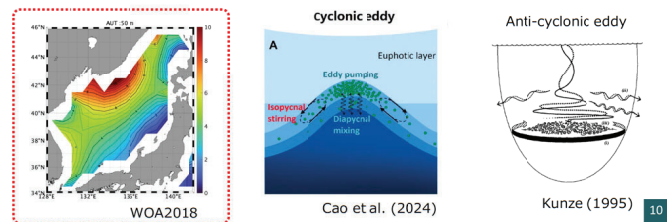
※人工衛星の海面高度データから計算した渦度で分類



13

課題：

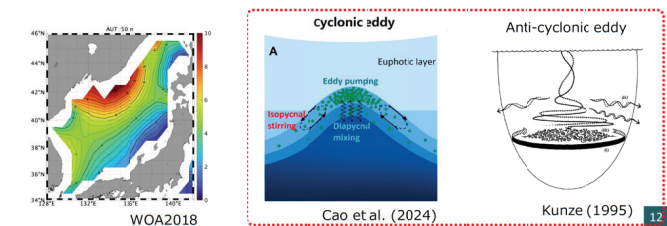
- 検討 1：日本海内部での栄養塩供給について
 - 栄養塩豊富な北部の水塊が栄養塩を供給する
- 検討 2：日本海南部の垂表層に栄養塩を供給するプロセス
 - 低気圧性渦による湧昇が栄養塩を供給する
 - 高気圧性渦での近慣性内部波の増幅・砕波が栄養塩を供給する



10

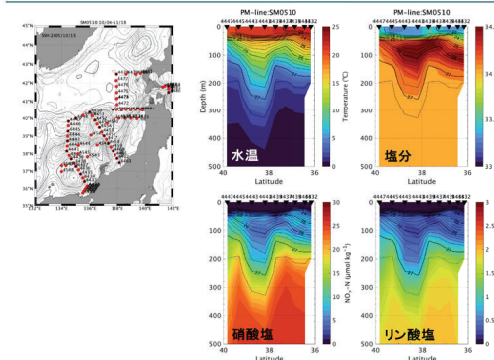
課題：

- 検討 1：日本海内部での栄養塩供給について
 - 栄養塩豊富な北部の水塊が栄養塩を供給する
- 検討 2：日本海南部の垂表層に栄養塩を供給するプロセス
 - 低気圧性渦による湧昇が栄養塩を供給する
 - 高気圧性渦での近慣性内部波の増幅・砕波が栄養塩を供給する



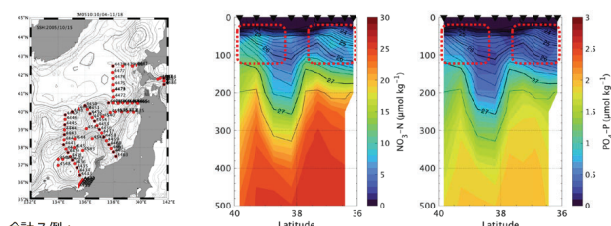
12

検討 2：水塊・栄養塩の鉛直断面図（SM0510）



14

検討2：栄養塩の鉛直断面図（SM0510）

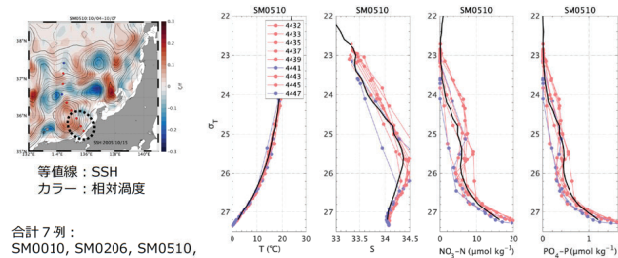


合計7例：
SM0010, SM0206, SM0510,
SM0810, SM1109, KS1308,
KS2008

- 栄養塩濃度が高いのは低気圧性渦の領域。
- その上部で局所的に栄養塩濃度が高い。
- 等密度面を横切るような栄養塩分布。

15

検討2：渦度で色分けした栄養塩プロファイル（SM0510）



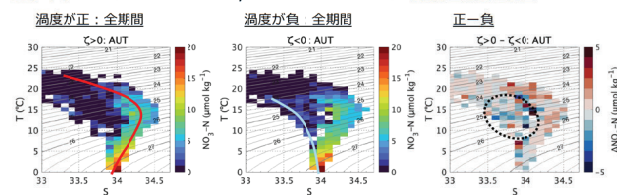
合計7例：
SM0010, SM0206, SM0510,
SM0810, SM1109, KS1308,
KS2008

- 渦度正の領域で栄養塩濃度が高い。
- 低気圧性渦の沿岸寄りの地点
- 対馬暖流水の塩分極大の上部
- 等密度面を横切る栄養塩供給の寄与

16

検討3：栄養塩の起源と混合プロセスを推定

TSダイアグラム上で水温 $\Delta T=1^{\circ}\text{C}$, 塩分 $\Delta S=0.1$ ごとに平均硝酸塩濃度を算出

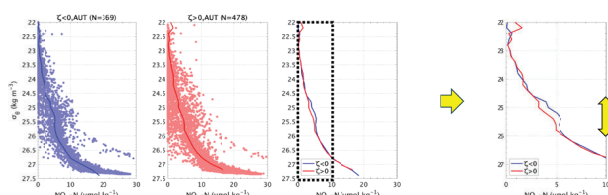


- 対馬暖流系の水塊で栄養塩濃度が高い。
- 対馬暖流水の上部（ $25\sigma_{\theta}$ 以浅）では、渦度が正の領域で硝酸塩濃度が高い。
- 密交面を横切るような栄養塩供給
- 日本海北部寄りの水塊では、渦度が負の領域で硝酸塩濃度が高い。
- 近慣性内部波による中層での栄養塩濃度の上昇

17

検討2：渦度で分けた栄養塩プロファイル（全域・秋季）

※人工衛星の海面高度データから計算した渦度で分類

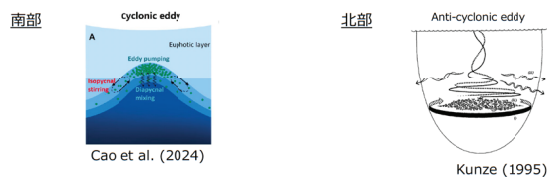


- $24.5-26.0\sigma_{\theta}$ では、負の渦度域で濃度が高い。
- 高気圧性渦底部での近慣性内部波の増幅・砕波が水塊混合・栄養塩供給につながっている？
- $24.5\sigma_{\theta}$ 以浅では、渦度による違いが見られない。
- 亜表層への栄養塩供給にはつながっていない？

18

まとめ

亜表層への栄養塩供給源・供給過程を明らかにするために観測データを解析した。



- 渦活動が活発で等密度面の凹凸が激しい。
- 渦度が正の領域で高栄養塩の水塊が湧昇
- 亜表層（ $-24.5\sigma_{\theta}$ ）で栄養塩濃度が高い

- 対馬暖流水底部の栄養塩の影響が小さい。
- 渦度が負の領域の中層（ $24.5-26.0\sigma_{\theta}$ ）で栄養塩濃度が高い
- 亜表層（ $-24.5\sigma_{\theta}$ ）への栄養塩供給には至らない

19

富山湾表層に生息する動物プランクトンのモニタリング

福留研一・江田友香・保前友高（富山高専）

- * 江田さんは10月より日本海洋事業の深海事業部に勤務、深海6500チームに配属
- * 本研究はJSPS科研費 JP23K02830の助成を受けたものです

モチベーション①

- モニタリング中
- ・富山湾表層のchl-a分布
 - ・富山湾表層の水温分布、塩分分布、光環境、栄養塩
 - ・富山湾表層の流れ場

表層のchl-a分布、説明できないことも多い

- ・動物プランクトンの摂食圧の空間的不均一さが効いている？

富山湾の水産資源の変動なんかに結び付けるには・・・

- ・動物プランクトンもモニタリングしたい

富山湾におけるプランクトン定量化の重要性

- ・カイアシは富山湾の優占種であり、そのカイアシは多くの魚種の仔稚魚期において、様々なタイミングで捕食されている



カイアシ（富山湾の優占種）

魚種	捕食時期
ウルメイワシ	5月～8月
マイワシ	3月～5月
コノシロ	5月
カタクチイワシ	3月～8月
ニギス	2月以外
マサバ	5月～6月
太刀魚	6月～9月

富山湾で仔稚魚期にカイアシを捕食している魚種と時期

モニタリングの目的

- ・富山湾における動物プランクトンの種別の割合や絶対量について、時期や場所による変化を明らかにする
- ・具体的には、本校練習船「若潮丸」を用いた富山湾湾央の定点における定期的な動物プランクトンの採取・分類・計数を行う手法を確立し、それに則り実際に量や種別の割合の季節的な変化を求める
- ・海洋教育教材について、モニタリングで得られた成果を反映させたアップデートを行う

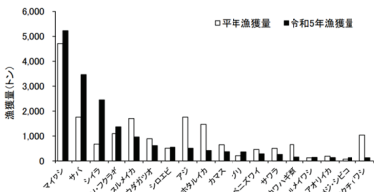
モチベーション②

- 日本人の海に関する関心の希薄化や海事人材の不足が問題視される中で、子供達に海洋に興味を持ってもらいたい！
- ・動物プランクトンは子供達の興味を引く題材の一つ
 - ・小中学生対象のイベントの際など、練習船「若潮丸」を用いた動物プランクトンの採集・観察を行ってきた

→各回で動物プランクトンの特性が異なることは見て取れるが、視覚的な特徴から分類を
はなすことや、種別の割合や絶対量と海洋環境の関係について考えるための知見は十分ではない

漁業が盛んな富山では、魚類の餌となるプランクトンの存在や種類、それを育む海洋環境を
理解し、持続的に活用できる資質を備えた人材を育成することは非常に重要
→富山湾の優占種や珍しい種類について注目して整理し、小中学生が海の環境や生き物に
ついて学び入り口となることを目標に、動物プランクトンを題材とした海洋教育教材の作
成に取り組み

富山湾におけるプランクトン定量化の重要性

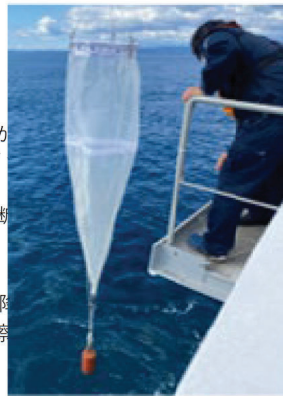
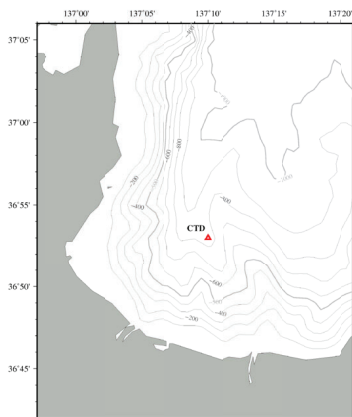


魚種	捕食時期
ウルメイワシ	5月～8月
マイワシ	3月～5月
コノシロ	5月
カタクチイワシ	3月～8月
ニギス	2月以外
マサバ	5月～6月
太刀魚	6月～9月

- ・動物プランクトンの調査による定量化を行うことは、安定的な漁獲量を維持するための指標となる
- ・その分布や量の季節変化は富山湾の生態系を把握する手掛かりの1つ

練習船「若潮丸」

- ・1995年竣工、全長53.59 m、総トン数 231 トン、最大航海速12.5 kt
- ・船員育成のための実習のほかに、海洋調査も行っている
- ・観測機器も搭載
 - ・ADCP (RDI社製VM150)
 - ・CTD (Conductivity Temperature Depth profiler)
 - ・メモリー型CTDのJFEアドバンテック製RINKO-Profilor (ASTD151)
 - ・AフレームとCTDウィンチを備えており、CTD投入時は、1.7LのCTD多筒採水器キャローセル12本を搭載し、任意の深度で採水可能
 - ・CTDウィンチのケーブル長は1100m
- ・ADCP、CTDによる観測は2005年から
- ・代船建造中（2025年4月竣工、2026年3月就航予定）



若潮丸におけるマクロプランクトン採集



若潮丸からの投入風景

- ・ 離合社製の改良型ノルパックネット
 - ・ 口径：45 cm (0.16 m³)、濾過部測長は195cm (円筒部65cm、円錐部130 cm)、網地はNMG52 (目合0.335 mm)
 - ・ 主に2mmより大きいマクロプランクトンの採集に用いられる
- ・ 250 mまで沈めて鉛直引き (巻き上げ速度毎秒1 m)



自転車のチューブで補修して使用しているコットエンド



濾水計

方針

- ・ 練習船である「若潮丸」および、機材や人的資源に乏しい本校研究室でプランクトン定量化を行う際に適した手法の開発
- ・ 定量評価を確実に行いつつ、安全かつ容易であること、できるだけ要する時間と手間を省くことを主眼に置いて検討
- ・ 2024年2月を除いた2023年12月から2024年6月まで、定点観測地点にて月に一回調査を行った

一般的なプランクトン定量化に関する手法 (文献より抽出)

- ① プランクトンネット、採水器などを用い、試料を採取
- ② 試料採取後、現地に於て、腐敗を防ぐために試薬 (アルコール、ホルマリンなど) による固定
- ③ 試料を濃縮するために、試料の静置沈殿を行い、上澄みを除去
- ④ 濃縮後の試料を顕微鏡、界線スライドグラスなどを用いて、分類・計数
- ⑤ 標本の作製、保存 (採取日、採取場所、採取者などを記載)
- ⑥ 調査結果の整理 (優先種、季節変化など)

検討を要する大きなポイント

- (1) 試薬による固定と試料の濃縮
- (2) 分類・計数

本研究では上記(1)に関して「安全かつ容易」、(2)に関して「時間と手間を省く」ことを主眼に置いて最適な手法を検討

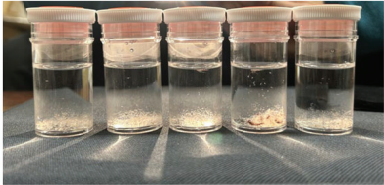
試料固定方法の検討

アルコール	
メリット	・ 入手が容易 ・ 保管の手間、危険性が少ない
デメリット	・ 濃度70 %以上に加え3回の置換を要するため、手間、時間、大量のアルコールを要する。 ・ 脱色作用があり、プランクトンの色素がぬけてしまい、プランクトンの判別が難しい ・ 海水とアルコールを混ぜるとアンチソルベント現象が起き、塩が発生し、プランクトン定量化の際に邪魔になる。(濃縮、計数の際に) ・ クラゲ脱水され、二次元でしか観察できなくなる。
ホルマリン	
メリット	・ 少量で固定が可能 ・ 色素が脱色しないため、プランクトンの判別を容易に行うことができる。 ・ クラゲがしなしなにならず、三次元でみることができる
デメリット	・ 危険な薬品であるため、保管、使用の手間がかかる ・ 中性ホルマリンにするために炭酸水素ナトリウムを混ぜ、pH試験紙で中性を示すようになるまで調整する必要がある

- 動物プランクトンの分類や計数、保存といった要素において、アルコールに関してはデメリット、ホルマリンに関してはメリットが大きい
→ 最も重要となる試料やデータの「正確さ」を担保するに当たっては、「安全かつ容易」であることを犠牲にしても、ホルマリンを使用すべき

分類・計数方法の検討

- 均一に分けた少量の試料から全体量を推測することで、時間と手間を省いてプランクトン定量化を行いたい
- 200 mlの試料を攪拌し、10.5 mlずつ5つの小瓶にわけて分類・計数を行った

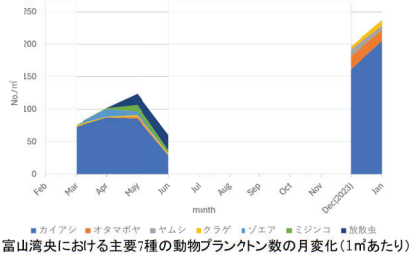


富山湾の動物プランクトン

- 先行研究から、日本海の動物プランクトンの種類については数ではカイアシ類が支配的であり、次いでヤムシ、オタマゴヤ等が季節的な消長を示すことが分かっている
- 富山湾における動物プランクトンの研究は特定の種に注目したものが多く、動物プランクトン全般の季節変動を扱っているものは少ない
- 30年前の調査ではあるが、Hirakawa et al. (1992)は我々の定点に近い測点において1年間の季節変動を求めており、比較対象となり得る
- 音響調査から日中は150-200m深に通年で存在する水温躍層付近に動物プランクトンが多くいることが経験的にわかっていたり、設備やシブタイムが限られているために、プランクトンネットは水深250mまでの鉛直引きとした

総数の推移

- 総数：冬季からいったん減少した後、春季に増加、夏季に向けて減少する傾向を示した



計数結果

2023/12/13(アルコール固定)の主要な動物プランクトンの割合

割合	1	2	3	4	平均
カイアシ	79.3	76.8	75.2	77.4	77.1
オタマゴヤ	8.1	10.8	10.3	9.7	9.7
ヤムシ	7.7	2.4	4.5	5.7	5.1
クラゲ	1.7	2.2	2.7	0.9	1.9
カイムシ	1.3	3.9	4.7	5.7	3.9

2024/1/17(ホルマリン固定)の主要な動物プランクトンの割合

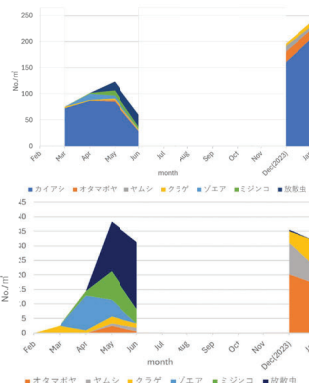
割合	1	2	3	4	平均
カイアシ	85.5	85.5	86.5	82.7	85.0
オタマゴヤ	6.0	8.4	6.7	7.6	7.2
ヤムシ	1.8	2.6	2.4	3.3	2.5
クラゲ	5.2	1.8	3.1	3.9	3.5
カイムシ	0.7	0.4	0.6	1.4	0.8

観測時における動物プランクトンの現存量

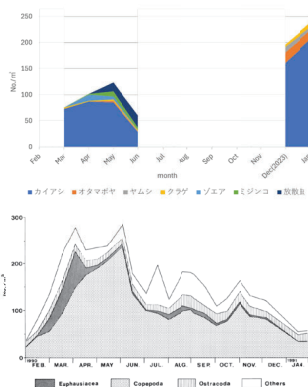
- 採集したサンプルにおいては現頻度の高かった七種を富山湾における主要七種として、各月の分類・計数結果から主要七種の1m³あたりの数を推計
- サンプル採取時の動物プランクトンの現存量には、気象・海象といった環境の状況によって変化する様々な要素が影響している
 - 観測時の環境条件を確認する目的で、観測時の富山湾海洋表層における気象・海象要素についても情報を収集
 - 日照時間は動物プランクトンの日周鉛直移動に関わってくることや、降水による湧への河川水の流入が増大し、淡水性のプランクトンなどが採集されることがあるため、日照時間、降水量についても記録
- 2023年の12月から2024年の6月までの半年間において、2月を除いた各月で動物プランクトンの採集に成功し、各月における優占種上位の種に関して分類・計数を行った

種別の季節的消長

- カイアシ類が最も多く、冬季から春季にかけては総数の80%、夏季に向けて総数が減少するに伴い50%程度まで減少
- 冬季にはオタマゴヤ、ヤムシがそれぞれ10%、3-5%程度を占め、クラゲも数%確認された
- 一方で春季から夏季にかけてこれらの種は大きく減少し、夏季にはノエア幼生やミジンコが増加する。季節によって主要な種が大きく変化する事が確認された
- 3~5月においてはカイアシ類のものと混ざれる卵が大量に採集されるなど、富山湾の幼生について確認されるなど、富山湾の主要な種であるカイアシ類のライフサイクルを示す試料についても記録することができた



- ・総数は冬季から春季にかけて増加してピークをこえる（本研究と異なる季節変動パターン）
- ・一方で、春季に増加した後、夏季にかけて減少する傾向や、カイアシ類がその大半を占めることなどは共通
- ・Hirakawa et al. (1992)では、夏季に表層から居なくなる冷水性種および、カイアシ類の日周鉛直移動による生物量や種組成の変化をなるべく排除する目的で500m深からの鉛直引きを行っている



考察

- ・本研究で扱っている動物プランクトンは、夏季には暖水種が主で、日周鉛直移動を行わないもしくは鉛直移動距離が小さい種に限られる

→冷水種（カイムシなど）およびカイアシ類に関しては過小評価となるが、海洋表層にて稚仔魚の成長を支える重要な種を捉えていることや、本校の対外イベントに限らず、子供を対象とした海洋教室は日中に海洋表層の現象を扱うことが多いため、そのような機会に参照する教材としては、不足の無いものといえる

Hirakawa(1990) カイアシのみ

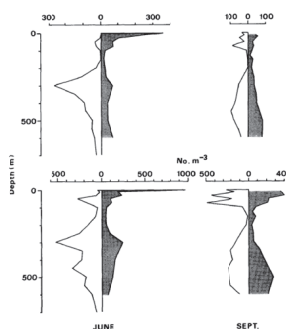


Fig. 3. Vertical distributions of total zooplankton biomass (upper) and individual number (lower) from daytime (open) and nighttime (shaded) samplings in June and September, 1986.

Hirakawa(1990) カイアシのみ

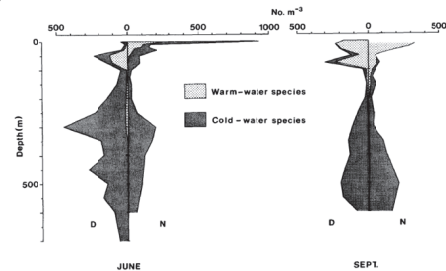


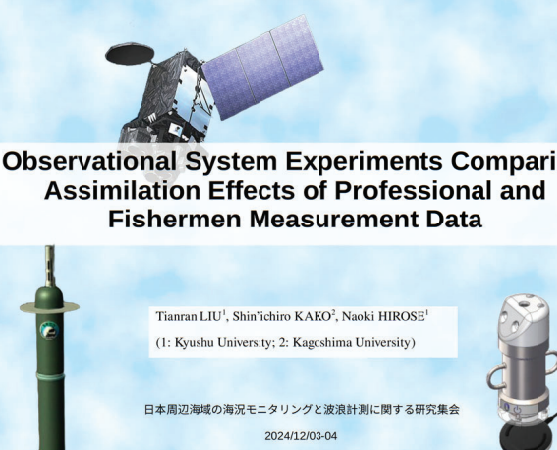
Fig. 4. Vertical distributions of total abundance and composition of warm- and cold-water copepod species groups from daytime (D) and nighttime (N) samplings in June and September, 1986.

考察

Kodama et al. (2018)

- ・日本海沿岸の長期にわたる動物プランクトンのデータから沿岸各地における種組成とその経年変動を求めた
- ・動物プランクトンの現存量や種組成に関しては、場所による特性や経年変化が大きい

→ Hirakawa et al. (1992)の調査に関しても1年間の調査結果であることから、本研究との差異は経年変動の範囲である可能性も否定できない



Observational System Experiments Comparing Assimilation Effects of Professional and Fishermen Measurement Data

Tianran LIU¹, Shin'ichiro KAKO², Naoki HIROS²
(1: Kyushu University; 2: Kagoshima University)

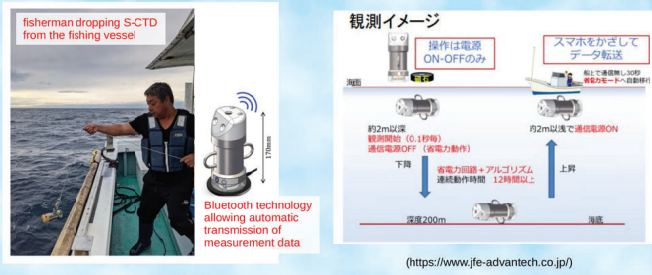
日本周辺海域の海況モニタリングと波浪計測に関する研究会
2024/12/03-04




Introduction

[01/19]

Hirose et al. (2024) established a system involving in-situ measurements by coastal fishermen. These real-time observations were used for improving the coastal ocean predictions to support the fishing activities.



(Fig. 1 in Hirose et al., 2024)

fishermen CTD:

lower accuracy, but cheaper and easier to operate

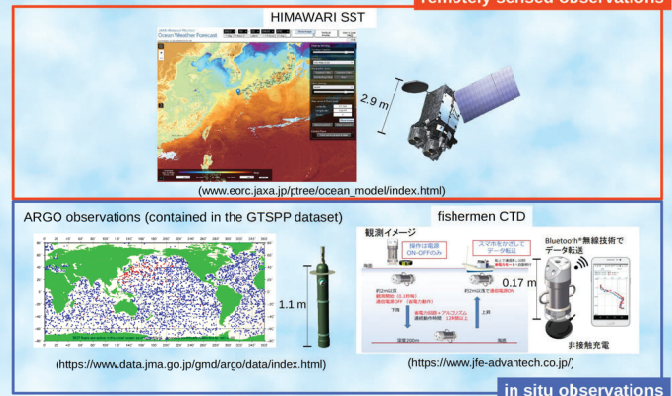
Introduction

[02/19]

regional ocean forecast systems with data assimilation (DA):

high-resolution ocean model + oceanographic data

remotely sensed observations



Introduction

[03/19]

observing system experiments (OSEs)

fishermen data vs professional data

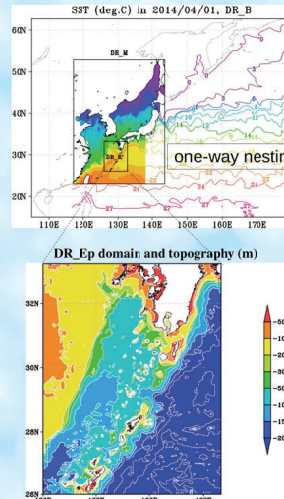


Purpose of this study:

The DA of fishermen CTD will be compared with that of other professional data for a regional ocean model southwest of Japan based on an approximate Kalman filter, to assess the potential of fishermen's observations in improving the representation of ocean state.

Model and Experiments

[04/19]



DR_Ep model: based on the Research Institute for Applied Mechanics Ocean Model (RIAMOM)

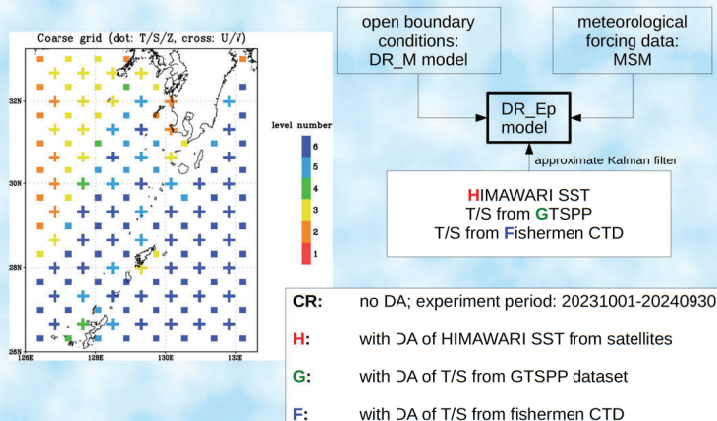
horizontal resolution: $1/60^\circ \times 1/75^\circ$ (about 1.5 km)

topography: JTOPO30 dataset

model parameter	value	unit
zonal grids number	400	
zonal resolution	1/60	$^\circ\text{E}$
meridional grids number	544	
meridional resolution	1/75	$^\circ\text{N}$
vertical levels number	114	
internal mode time step length	2	s
external mode time step length	60	s
cpu number	16	
Smagorinsky constant	0.17	
Prandtl number	1	
empirical coefficient α in Eq.17 of NK99	50	
empirical coefficient m in Eq.13 of NK99	100	
freezing point of seawater	-1.8	$^\circ\text{C}$
bottom drag coefficient	0.001	
earth radius	6370	km
gravitational accelerator	9.8	m/s^2

Model and Experiments

[05/19]

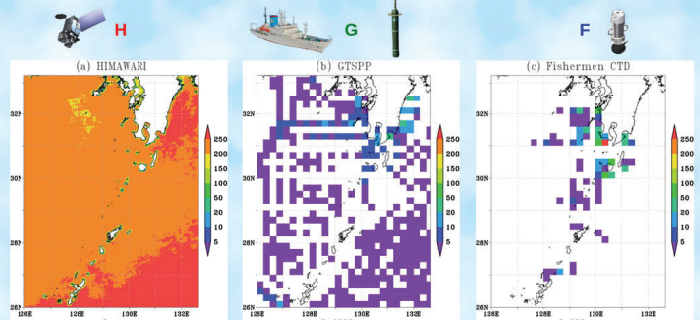


CR: no DA; experiment period: 20231001-20240930
H: with DA of HIMAWARI SST from satellites
G: with DA of T/S from GTSP dataset
F: with DA of T/S from fishermen CTD

Model and Experiments

[06/19]

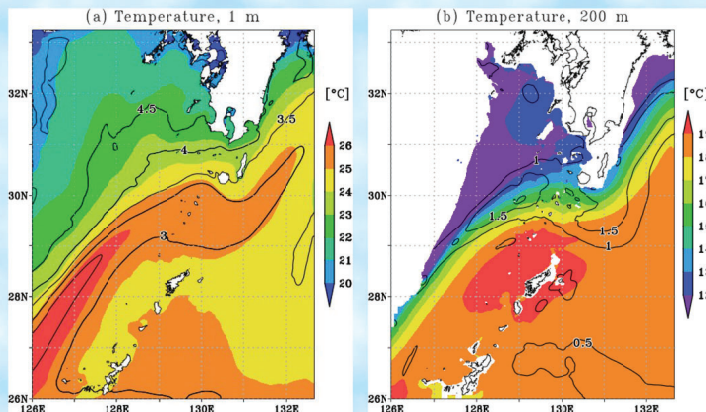
Observation numbers during experiment period for Himawari-8/9 SST and temperature and salinity profiles of GTSP and fishermen CTD



Results

[07/19]

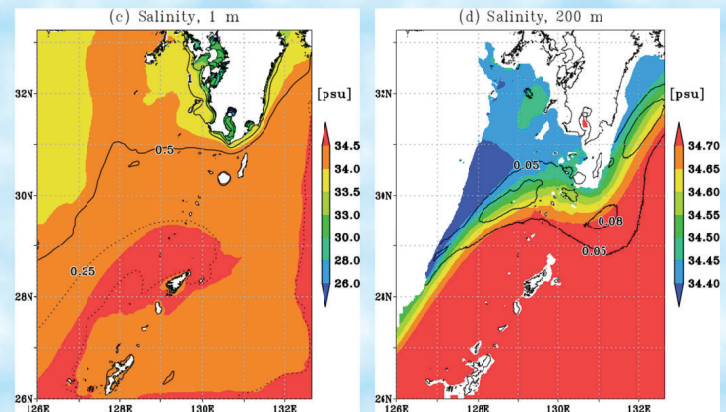
Annual mean and corresponding standard deviations of **temperature** (unit: °C) over the experiment period by **CR** at 1 m (left) and 200 m (right).



Results

[08/19]

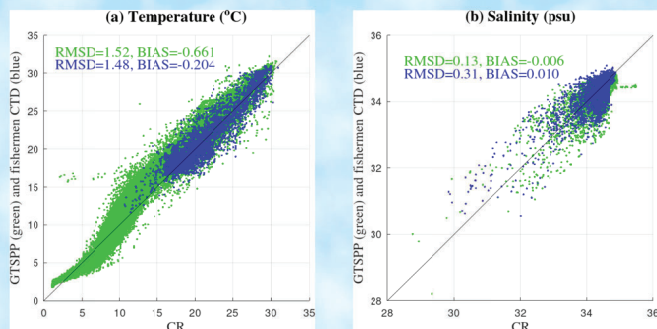
Annual mean and corresponding standard deviations of **salinity** (unit: psu) over the experiment period by **CR** at 1 m (left) and 200 m (right).



Results

[09/19]

Temperature (unit: °C) and **salinity** (unit: psu) scatter diagrams over depth shallower than 1000 m between the results of **CR** and **GTSPF/fishermen CTD**

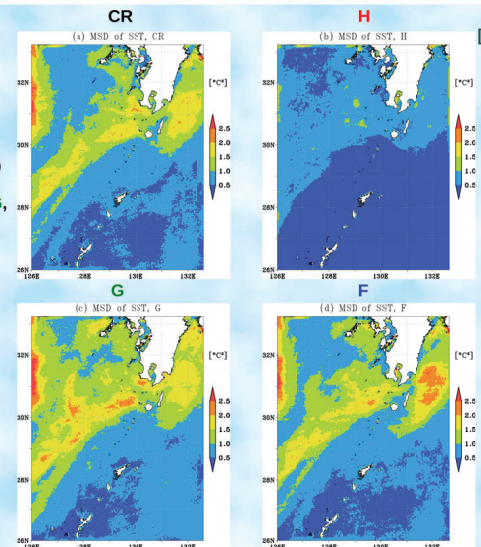


Results

[10/19]

MSDs of SST (unit: °C²)

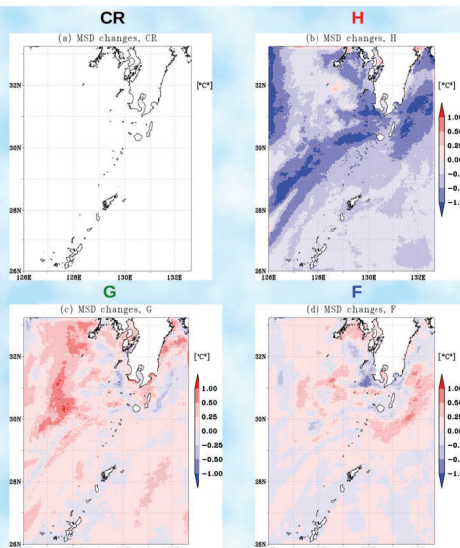
from results of **CR**, **H**, **G**, and **F** relative to SST of Himawari-8/9 satellites.



Results

[11/19]

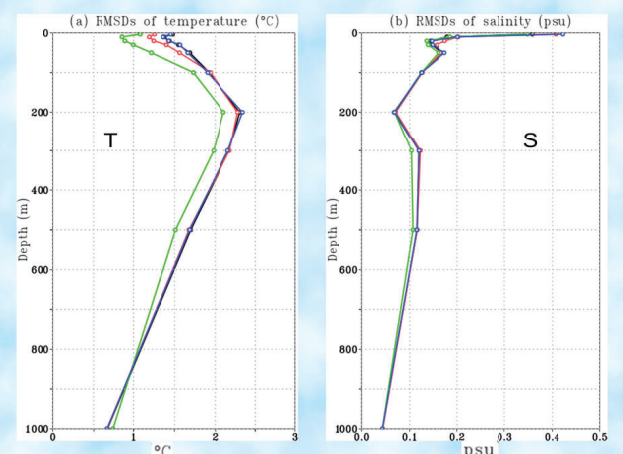
MSDs changes of SST (unit: °C²) from results of **CR**, **H**, **G**, and **F** relative to **CR**.



Results

[12/19]

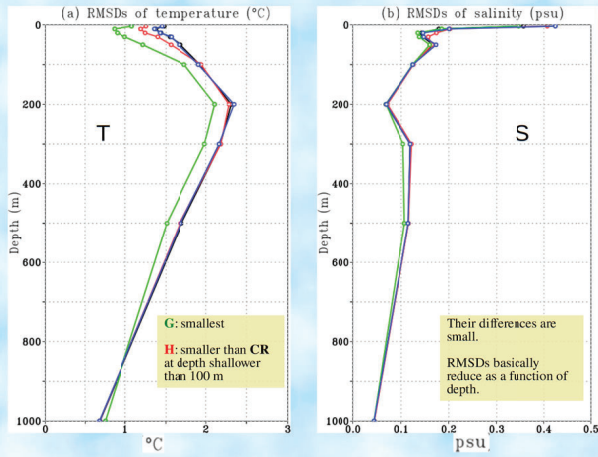
RMSDs of temperature (unit: °C) and salinity (unit: psu) from results of **CR**, **H**, **G**, and **F** relative to **GTSPF**



Results

[12/19]

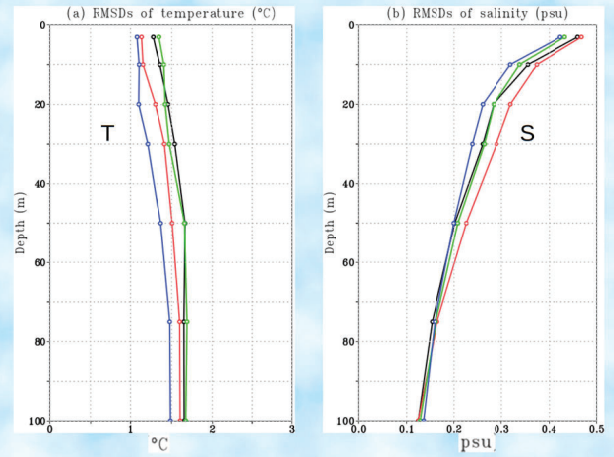
RMSDs of temperature (unit: °C) and salinity (unit: psu) from results of CR, H, G, and F relative to GTSP



Results

[13/19]

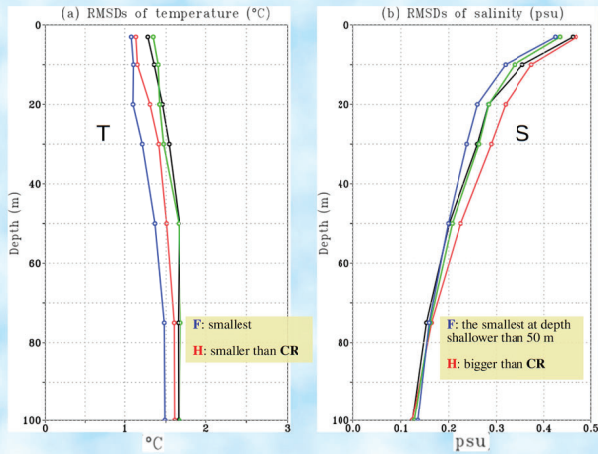
RMSDs of temperature (unit: °C) and salinity (unit: psu) from results of CR, H, G, and F relative to Fishermen CTD



Results

[13/19]

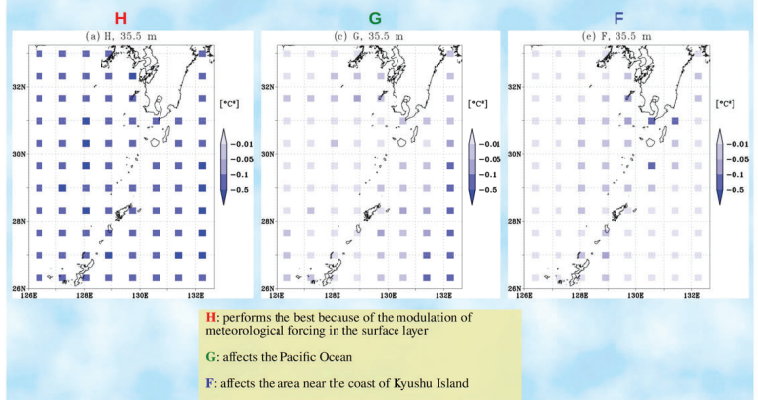
RMSDs of temperature (unit: °C) and salinity (unit: psu) from results of CR, H, G, and F relative to Fishermen CTD



Results

[14/19]

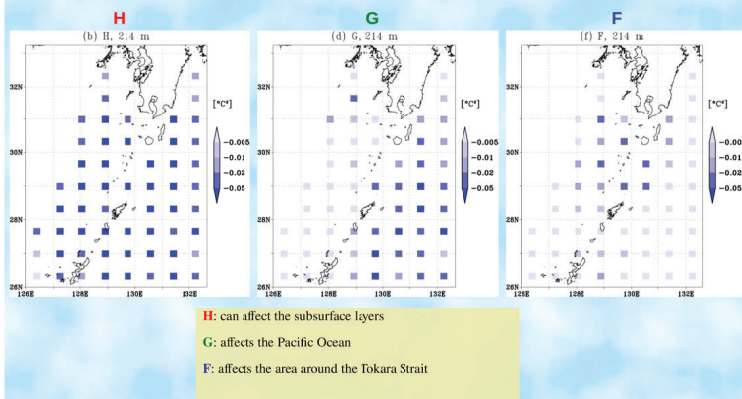
Diagonal values of model error covariance changing for temperature (°C²) at 35.5 m by H, G, and F



Results

[15/19]

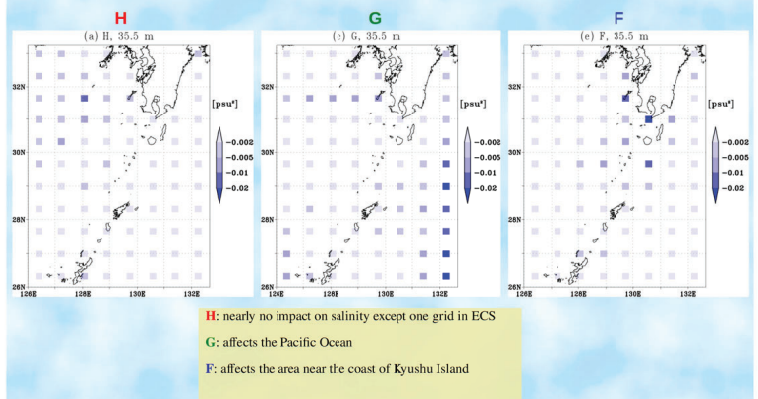
Diagonal values of model error covariance changing for temperature (°C²) at 214 m by H, G, and F



Results

[16/19]

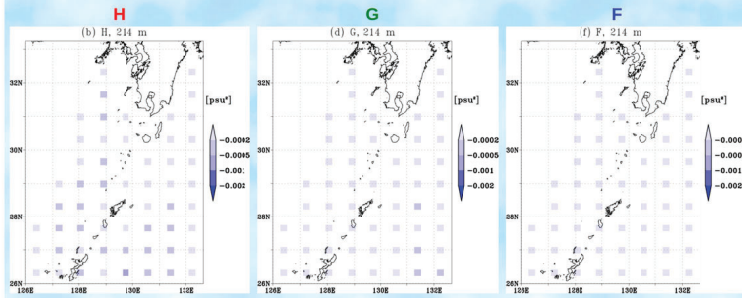
Diagonal values of model error covariance changing for salinity (psu²) at 35.5 m by H, G, and F



Results

[17/19]

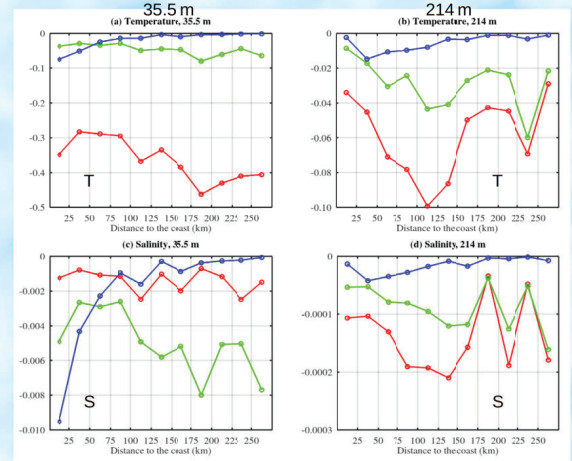
Diagonal values of model error covariance changing for salinity (psu²) at 214 m by H, G, and F



nearly no impact on salinity in subsurface layer

Results

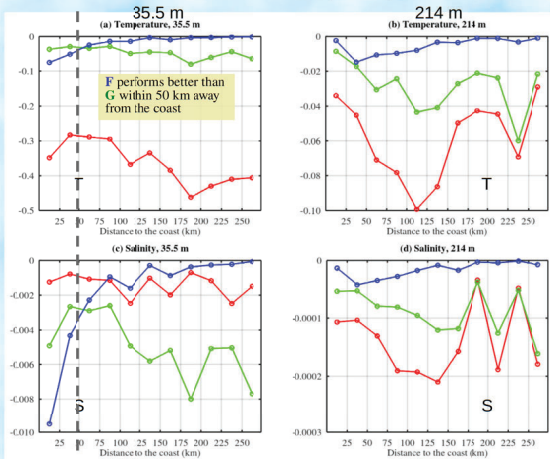
Diagonal values of model error covariance changing for temperature (unit: °C²) and salinity (unit: psu²) at 35.5 m and 214 m averaged as a function of distance (km) to the coast. The red, green, and blue lines stand for the results of H, G, and F, respectively. [18/19]



Results

[18/19]

Diagonal values of model error covariance changing for temperature (unit: °C²) and salinity (unit: psu²) at 35.5 m and 214 m averaged as a function of distance (km) to the coast. The red, green, and blue lines stand for the results of H, G, and F, respectively.



Summary

[19/19]

1. Observing system experiments were conducted to assess in situ observations of temperature and salinity profiles by fishermen CTD in terms of DA with a regional ocean model southwest of Japan. The DA results of fishermen CTD were compared with those of professional data.
2. The Himawari SST data improved the representations of temperature over the model domain.
3. The GTSP data mainly improved the representations of temperature and salinity in the open ocean.
4. The DA of fishermen CTD can improve the representation of temperature and salinity in the upper layer within 50 km from the coast more effectively than that of GTSP.



Thanks for your attention!

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
2024年12月4日(水)
九州大学応用力学研究所

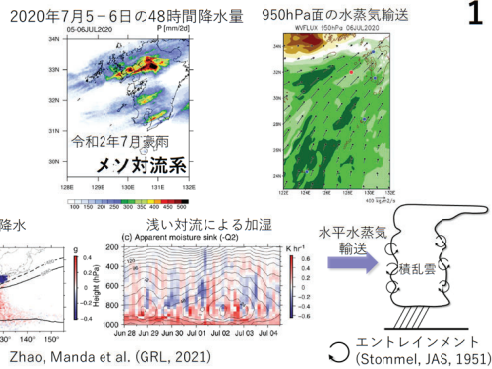
五島灘における水蒸気フラックスと九州北部における降水の関係
ー男女群島での水蒸気連続観測ー

中室早希(三重大), 万田敦昌(三重大), 飯塚聡(防災科研)

要点

①九州北部の大雨予測に
風上の離島での観測が有用

②風上の対流
活動の影響も？



1

研究背景 水蒸気観測の重要性

2

Yoshida et al. (MWR, 2021)

2020年6月24日～25日に長崎県で発生した降水イベントについて降水域の風上側(長崎半島の西端の野母崎)で観測された下層水蒸気の鉛直分布を気象庁メソ数値予報モデルに同化した結果、降水予測の改善が見られた



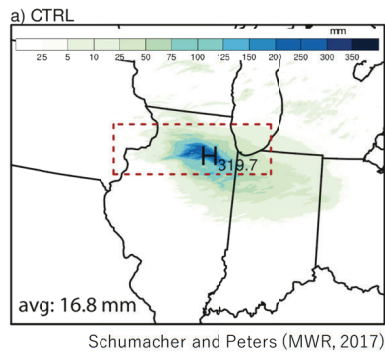
降水域の風上側における水蒸気観測が、降水量の予測精度向上に役立つ可能性

メソ対流系発生に関する地表面付近の水蒸気輸送の重要性 (研究例1)

3

米国中西部における大雨の典型的状況
を模したシミュレーション

右図：標準実験 (Control Run;
CTRL)における日雨量(24時間の
積算雨量)



メソ対流系発生に関する地表面付近の水蒸気輸送の重要性 (研究例1)

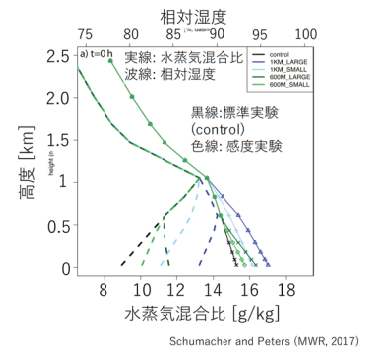
4

Control Runと感度実験 (Sensitivity Experiment)における水蒸気混合比の鉛直プロファイル

感度実験：標準実験と比較することで、実験条件の変化が結果に及ぼす影響を見るための実験

水蒸気混合比：
気塊に含まれる水蒸気の質量/水蒸気を除いた気塊の質量

鉛直プロファイル：
縦軸に鉛直方向の座標をとった折れ線グラフ

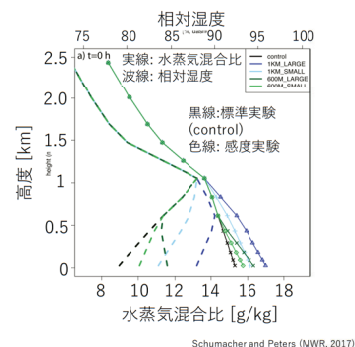


メソ対流系発生に関する地表面付近の水蒸気輸送の重要性 (研究例1)

5

Control Runと感度実験 (Sensitivity Experiment)における水蒸気混合比の鉛直プロファイル

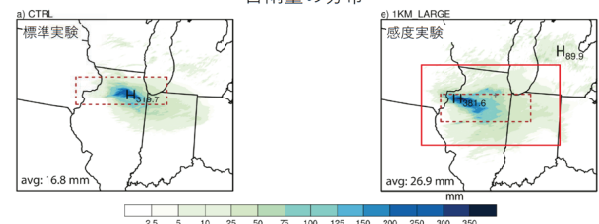
感度実験の設定
高度1km以下だけ水蒸気量を僅かに変える
鉛直積算した水蒸気輸送量の変化 $\approx 3.4\%$
(1KM_LARGEの場合)



メソ対流系発生に関する地表面付近の水蒸気輸送の重要性 (研究例1)

6

日雨量の分布



波線部領域平均: CTRL=16.8mm, 1KM_LARGE=26.9 → CTRL60%増加
波線部領域最大: CTRL=319.7mm, 1KM_LARGE=381.6 → CTRL20%増加
鉛直積算した水蒸気輸送量の変化 $\approx 3.4\%$
→ 降水量の増加率は水蒸気輸送量の増加率よりもはるかに大きい

Schumacher and Peters (MWR, 2017)

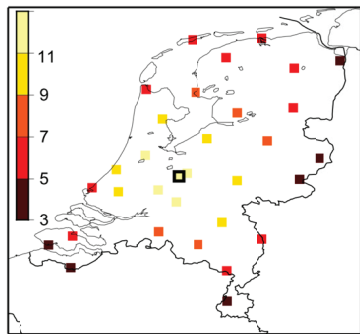
メソ対流系発生に関する地表面付近の水蒸気輸送の重要性 (研究例2)

先ほどの例は、ある特定の気象条件を状況をもったシミュレーション

→数多くの事例に関して実際の観測データを見たらどうなっているか

オランダにおける研究例 (データ解析)

右図：使用した観測データの測定点 (色は周囲7Ckm以内にある他の観測点の数)



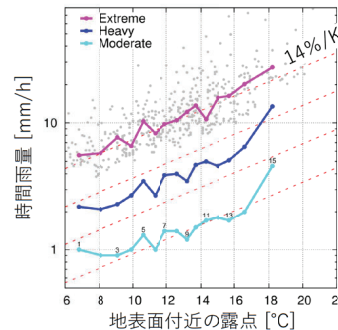
Lenderink et al. (Nature CC, 2017)

メソ対流系発生に関する地表面付近の水蒸気輸送の重要性 (研究例2)

地表面付近の湿度を使ったスケーリング

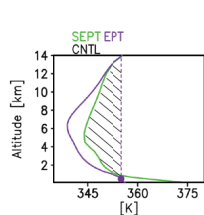
気温でなく、大気中の湿度を反映した指標である露点を用いると、理論値(破線)とデータ(実線)の対応がどの温度でも非常に良くなる。

下層水蒸気量が極端降水の際の雨量を決める上で重要であることを示唆している。



Lenderink et al. (Nature CC, 2017)

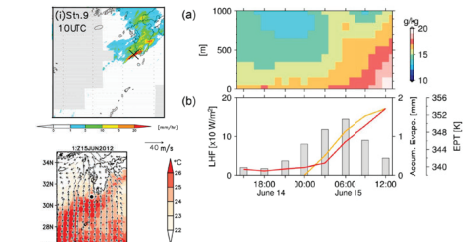
メソ対流系発生に関する地表面付近の水蒸気輸送の重要性 (研究例3)



斜線部

～紫点から気塊を持ち上げた場合の対流有効位置エネルギー (CAPE)

紫色の点 (下層の気塊の相当温度)が右によるとCAPE増加

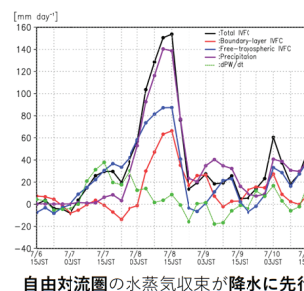


東シナ海上での加温によって、海面付近の相当温度上昇

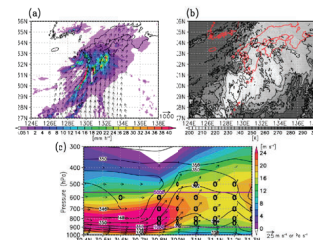
→静的不安定強化→降水強化

(Manda et al. Sci. Rep. 2014; Kunoki, Manda et al., JGR, 2015; Sato, Manda et al., MWR, 2016; Manda et al., Front. Clim., 2022)

9 研究の背景：自由対流圏への水蒸気輸送の効果



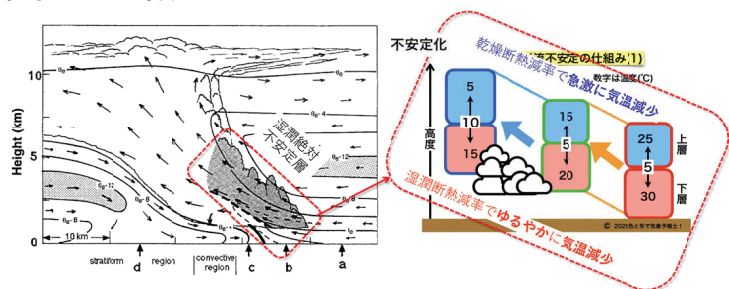
自由対流圏の水蒸気収束が降水に先行 Tsuji et al., 2021; Naka & Takemi, 2023



湿潤絶対不安定層 (MAUL) の形成

対流が成層を安定化する効果を上回る不安定化作用が必要 (例えば、冷氣プールの持ち上げ)

参考：スラブ対流



浮力以外の要因による上昇流が持続的に存在することが必要

米国中西部では冷氣プールがその条件を保障

梅雨前線周辺は地表面付近がほぼ飽和していることが多いため冷氣プールができることは稀

1. 研究背景 —現状の整理—

12

◎ 分かっていること

降水予測や過去の大雨事例の調査で降水域の風上側における水蒸気の流れの把握が重要なこと

◎ できていないこと

- 水蒸気の輸送経路における長期的な観測
- 上述のような観測データを用いた水蒸気フラックスと降水量の関係性の解明

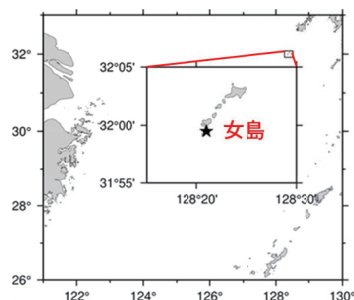
1. 研究背景 —本研究の目的—

13

女島は本研究で対象とする九州北部への水蒸気輸送に大きく関わる。

<目的>

- ① 女島における観測データの有用性を評価する。
- ② 女島における観測データを用いて、水蒸気フラックスと降水量の関係を定量的に示す。



2. データ

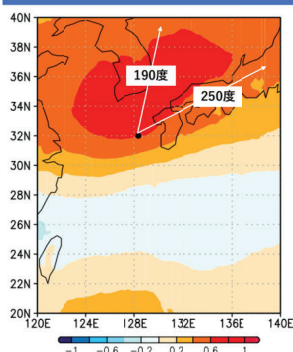
14

- **女島における地上観測**
 - ↳ 相対湿度、気温、気圧、風向・風速（10分毎）
- **MSM（解析値）**
 - ↳ 水平格子間隔（地上：5km 気圧面：10km）
- **解析雨量**
 - ↳ 水平格子間隔1km（MSMとの比較の際、水平格子間隔5kmに変更）
- **MIMIC-TPW2**
 - ↳ 衛星観測による可降水量、水平格子間隔 0.25°

対象期間：6/20～8/31（2020年）、6/1～8/31（2021・2022・2023年）
時間間隔：雨量1時間、その他3時間 ※以降時刻はUTC

3. 研究手法 —女島観測データの処理—

15

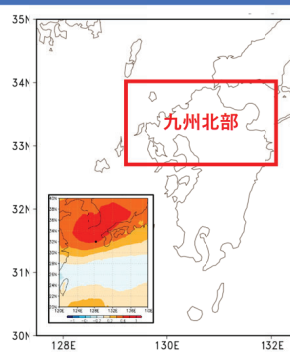


1. **異常値・外れ値を取り除く**
 - ↳ 時系列で明らかに異常値のデータを除く
 - ↳ (平均値) ± 3(標準偏差) 外のデータを除く
 2. **指定範囲の風向のデータを抽出する**
 - ↳ 九州北部の水蒸気輸送に関係がある風向を抽出する
- ※ 女島の水蒸気混合比(観測値)と周辺の可降水量(MIMIC)の相関係数の分布で、高い相関を示す **190度～250度** の範囲

黒点：女島の位置
色：女島の水蒸気混合比と周辺の可降水量の相関係数

3. 研究手法 —九州北部における「降水日」を定義・抽出—

16



- 東経 129.2°-132.1°、北緯 32.7°-34° の領域を九州北部と定義する
- ※ 左下図に示す、女島の水蒸気混合比(観測値)と周辺の可降水量(MIMIC)との相関係数の関係より高い相関が見られる範囲
- 九州北部における日雨量の領域平均が 1[mm] 以上となる日を「降水日」と定義する
- ※ 降水日として **計186日**が抽出

3. 研究手法 —「降水日」での解析に使用する値—

17

九州北部における雨量 [mm]

日雨量(00UTCを日界)：九州北部の範囲で領域平均を算出
3時間雨量：九州北部の範囲で3時間毎に領域最大値を求める
※異なる時間スケールの降水を見ることが目的

女島における水蒸気フラックス [g/m²/s]

日平均：九州北部における日雨量との関係を調べる際に使用
3時間毎：九州北部における3時間雨量との関係を調べる際に使用

4. 結果・考察

18

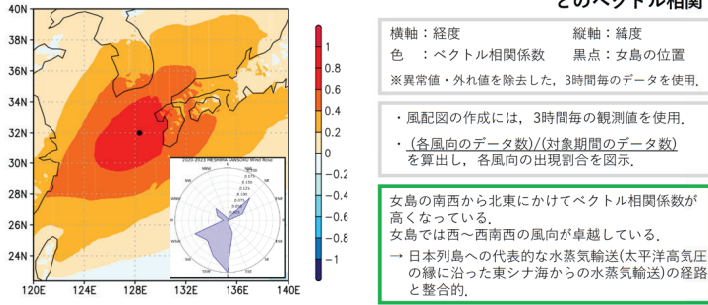
- ◎ 女島における水蒸気フラックス観測値の空間代表性
- ◎ 女島における水蒸気フラックスと九州北部における降水量の関係

4. 結果・考察

—女島における観測値の空間代表性—

19

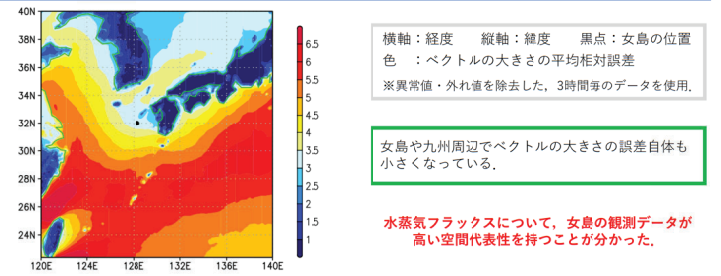
女島の水蒸気フラックス(観測値)と周辺の水蒸気フラックス(MSM解析値)とのベクトル相関



女島の水蒸気フラックス(観測値)と周辺の水蒸気フラックス(MSM解析値)についてベクトルの大きさの平均相対誤差

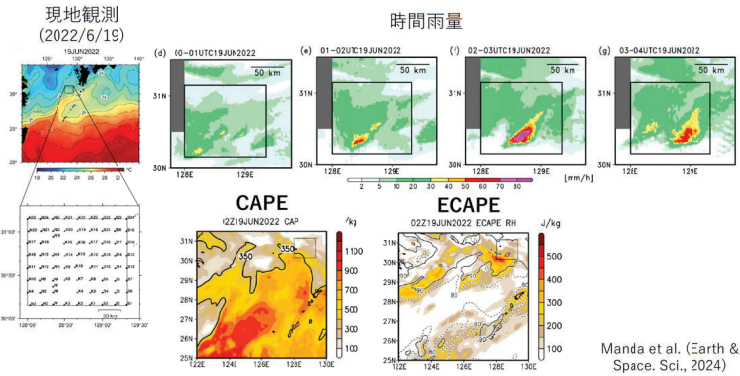
$$\text{平均相対誤差} E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\|\vec{F}_{iMSM} - \|\vec{F}_{iMESHIMA}\|}{\|\vec{F}_{iMESHIMA}\|}$$

N : 各点での時間データ数
 $\vec{F}_{iMSM}$: 各点での水蒸気フラックス(MSM解析値)
 $\vec{F}_{iMESHIMA}$: 女島での水蒸気フラックス(観測値)



風上からの湿潤気流の流入の影響

21



5. まとめ

22

目的① 女島における観測の有用性

- ・ 女島における水蒸気フラックスの観測により、九州北部を含む広範囲の水蒸気フラックスの把握に貢献できる。

目的② 女島観測値を用いた水蒸気フラックスと降水量の関係の定量化

- ・ 女島における水蒸気フラックスの観測が、九州北部における降水量を予測する上で有益となる。
- ・ 女島における水蒸気フラックスの鉛直分布が観測できれば、九州北部における降水量の予測精度がさらに向上する可能性。

五島海底谷における係留観測結果

—近慣性周期変動と平均流の中層極大—

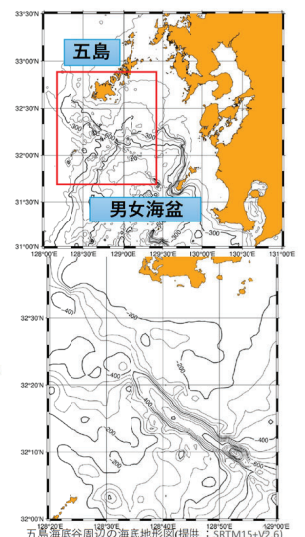
長崎大学水産学部 4 年 工藤楓己

滝川哲太郎 (長崎大) ・ 千手智晴 (九大応力研) ・ 森井康宏 ・ 山脇信博 ・ 木下宰 ・ 合澤格 ・ 保科草太 ・ 丸山裕豊 (長崎大)

はじめに

・ 五島海底谷 (Oiwane et al., 2011)

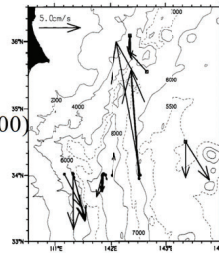
- ・ 五島の南20kmに位置
- ・ 谷幅：最大10km
- ・ 水深：最大約700m
- ・ 周辺の水深は120~200m
- ・ 東南東方向に50km伸び、水深700mで男女海盆の北西に達する。



はじめに

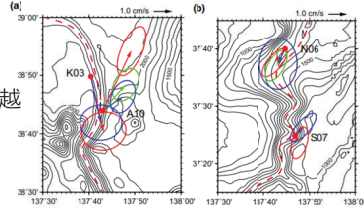
伊豆・小笠原海溝における係留観測 (Fujio et al., 2000)

水深:8000m超
深度5000mにおける平均流で、水深の浅いほうを右に見る流れが卓越



富山深海長谷における係留観測 (Senjyu, 2022)

水深:2000m超
谷幅:約10km
谷軸を境に流向が逆転し、水深の浅いほうを右に見る流れが卓越



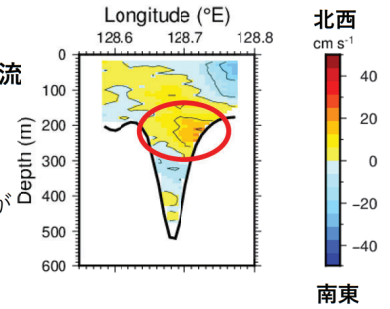
五島海底谷と同程度の谷幅でもコリオリカの影響を受けている

3

目的

- 2022年4月の五島海底谷の平均流
- 上層、下層：南東流
- 中層：北西流

海水の密度構造を反映して流向が逆転していると考えられている。

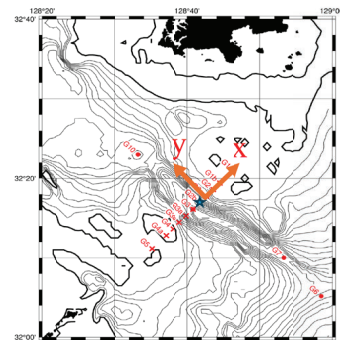


2024年4月24日から7月25日、3か月間の係留観測データを用いて水平流の短周期変動と季節内変動を明らかにする。

4

係留観測

- 使用船舶：長崎大学練習船「長崎丸」
- 係留系：ADCP, 電磁流速計（2台）
- 設置日：2024年4月24日
- 回収日：2024年7月25日
- 設置水深：360m
- 慣性周期：22.47時間



- CTD観測点であるG1からG5を結んだ線をx:cross-channelとし、北東側斜面を昇る向き正とした。
- x軸に直交する線をy:along-channelとし、陸棚側を正とした。

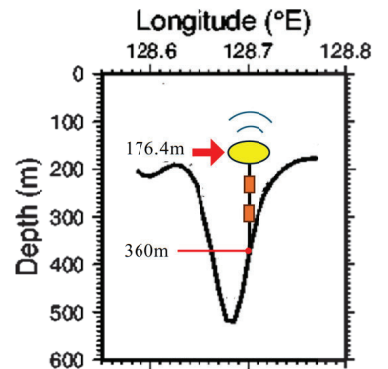
5

測器説明

- ADCP Sentinel IV (RDI)
- 観測間隔 30分
- バースト 120ping/2min
- 1時間平均
- 周波数 300kHz
- 設置深度 176.4m
- 層厚：6m
- 層数：24
- 深度170~24mまで測定

異常値除去

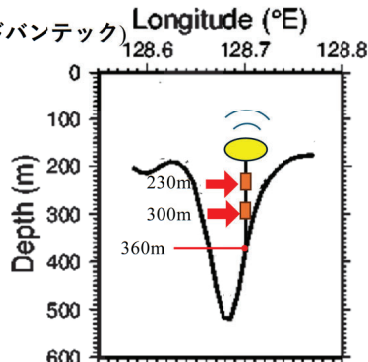
Percent good：80%以上を使用



6

測器説明

- 電磁流速計 Infinity-EM (JFEアドバンテック)
- 観測間隔 10分
- バースト 10測定/10sec
- 1時間平均
- 設置深度:230m(中層)
- 設置深度:300m(下層)



7

データ解析

- 25時間移動平均

平均流の中層極大の出現時間

- Wavelet解析

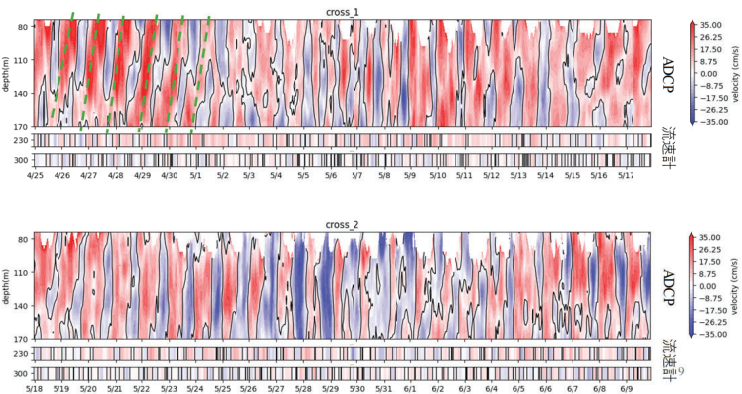
近慣性周期と潮汐変動の解析

バンドパスフィルター

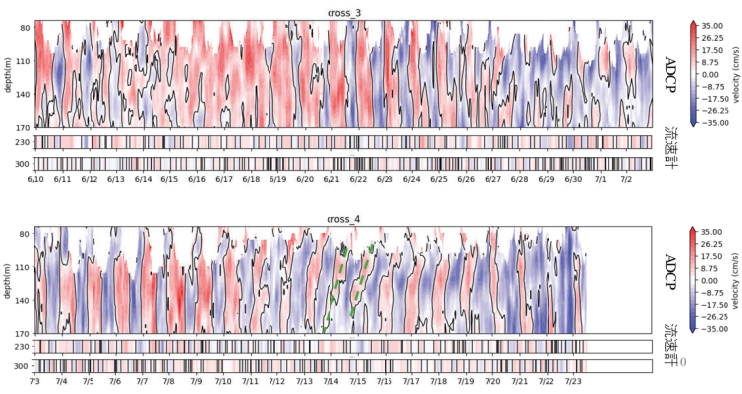
回転スペクトル解析

8

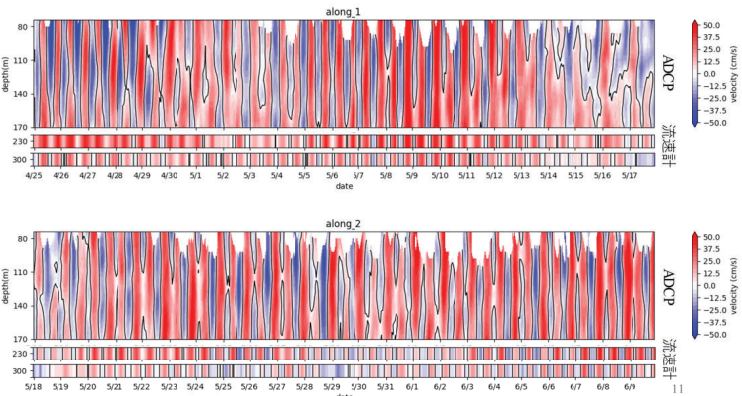
結果 ADCP,電磁流速計 x:cross-channel
日周期の変動が卓越している



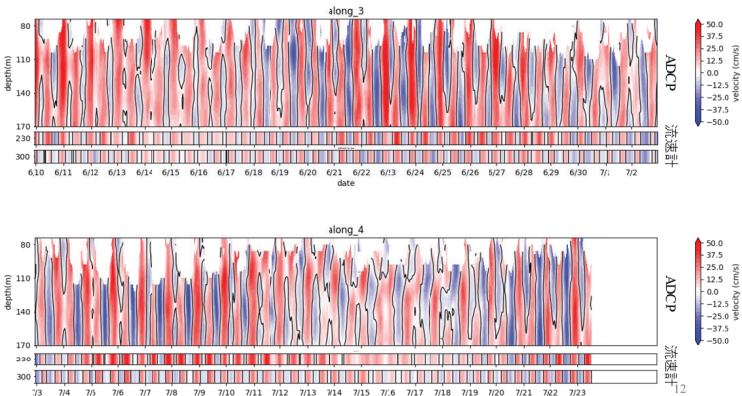
結果 ADCP,電磁流速計 x:cross-channel
日周期の変動が卓越している



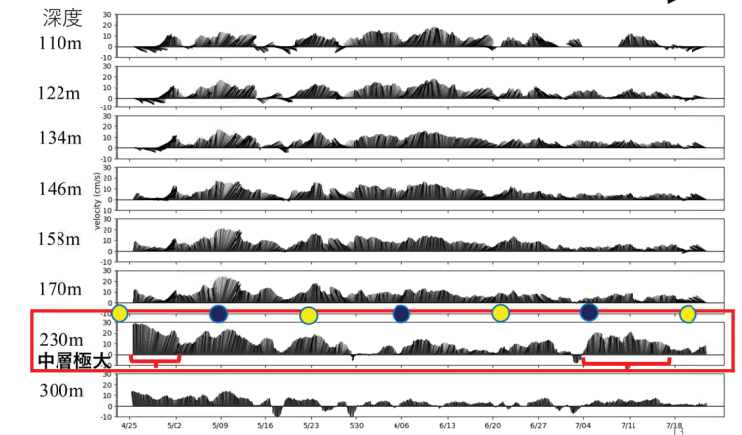
結果 ADCP,電磁流速計 y:along-channel
半日周期の変動が卓越している
順圧潮流



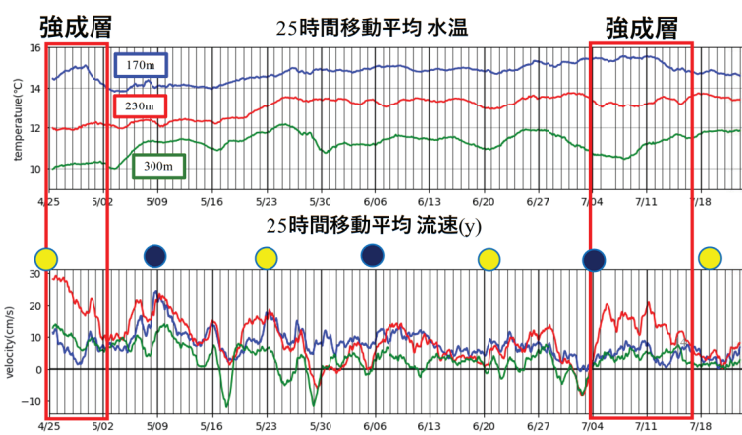
結果 ADCP,電磁流速計 y:along-channel
半日周期の変動が卓越している
順圧潮流



結果 ADCP 電磁流速計 25時間移動平均
中層(230m)において、平均流が極大になっている
流速: 20~30cm/s 持続時間: 最長10日程度



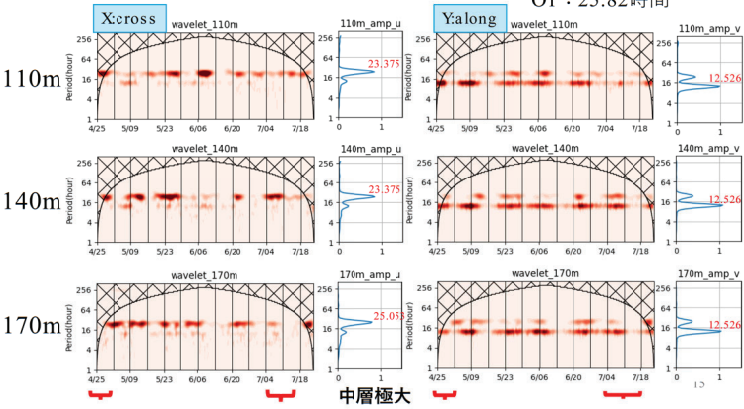
結果 ADCP 電磁流速計 25時間移動平均
温度成層が強いときに平均流の中層の極大が出現している。



結果 wavelet

日周期：x,yともにエネルギーがある
半日周期：xにエネルギーがない
→y：谷軸に沿った直線往復運動をしている

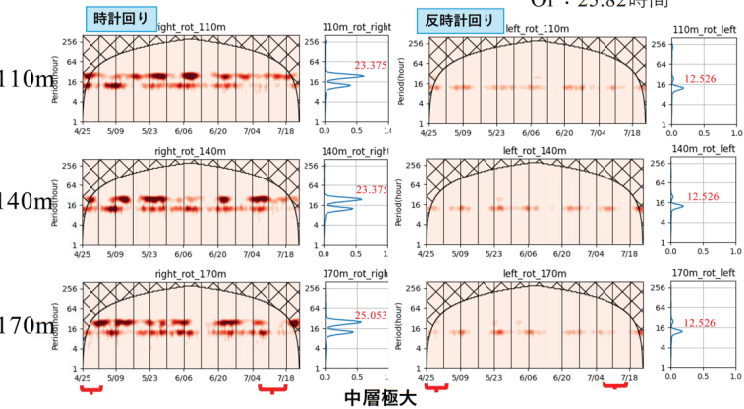
慣性周期：22.47時間
K1：23.93時間
O1：25.82時間



結果 回転スペクトル

時計回り：日周期、半日周期ともにエネルギーがある
反時計回り：日周期成分がない
→日周期変動：時計回りの円運動をしている

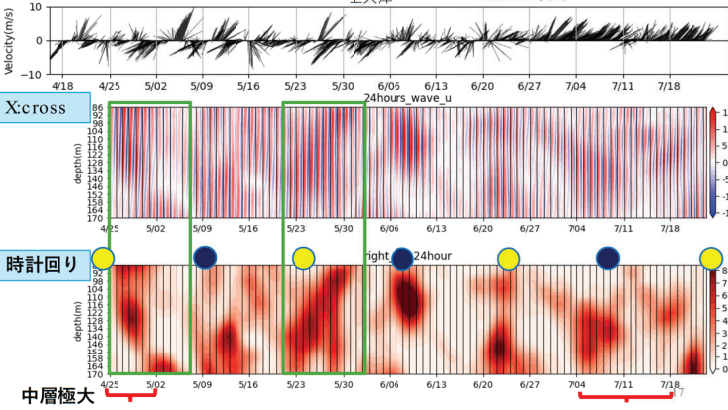
慣性周期：22.47時間
K1：23.93時間
O1：25.82時間



結果 20~27時間バンドパスフィルタ・回転スペクトル

20.35 21.81 23.38 25.05 26.9

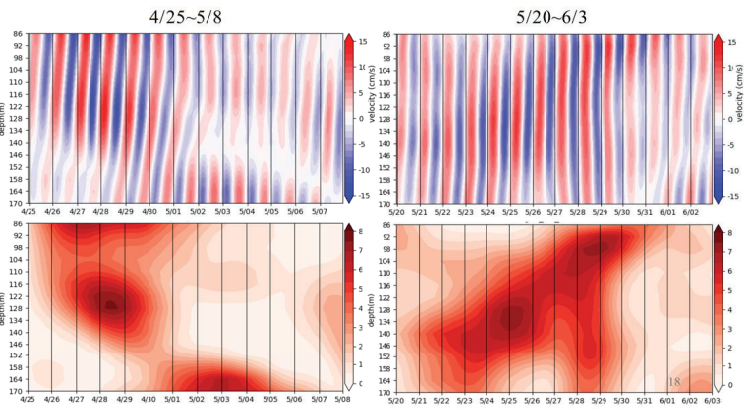
大潮時、時計回りのエネルギーが大きい
慣性周期：22.47時間
K1：23.93時間
O1：25.82時間



結果 20~27時間バンドパスフィルタ・回転スペクトル

20.35 21.81 23.38 25.05 26.9

上から下へのエネルギー伝播：上方向に位相伝播している
下から上へのエネルギー伝播：下方向への位相伝播はみえない



まとめ

陸棚方向への平均流の中層極大

- ・水温成層が強い：大きさ20cm/s~30cm/s、最長10日程度
- ・水温成層が弱い：観測されなかった

日周期変動

- ・時計回りの円運動をしているため、谷軸を横切る流れとなる
- ・大潮の際に深度170m付近で強くなり、鉛直混合を介して水温成層の強弱に寄与。
- ・上から下へのエネルギーの伝播は、位相が上向きに伝播していることから、風応力による近慣性を含んだ日周期変動であると考えられる。

地球環境力学分野
研究集会

2024WS-AO-7

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ィ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ュニティで共有するとともに、各分野がリンクすることによる新たなブレークスルーを生む機会を設けることを目的としており、これは、アジア域の化学輸送モデル研究の推進やモデル精緻化にとって非常に重要である。

研究集会の概要および成果

本年度は2025年2月27日（木）午後から28日（金）午前にかけて、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11題の発表が行われ、現地15名、オンライン約15名が参加した。

研究集会では、光化学オキシダント等を対象としたモデル間相互比較実験、長期シミュレーションによる経年変化解析、観測データ同化システムの開発、冬の黄砂の日本到来に関する解析をはじめとする様々な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、地方環境研究所を含む多くの機関からの参加があった。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ることが確認され、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 8 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：2025 年 2 月 27 日（木）13：30 頃～28 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/83411462068>

ミーティング ID: 834 1146 2068

パスコード: Vg79A2HL

主催：九州大学応用力学研究所全国共同利用研究集会（2024WS-AO-7）

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

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
を通じた地域大気汚染対策提言の試み」

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。

2 月 27 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

13:40-14:10 永島 達也（国立環境研）[ロング(どちらでも)]

2050 カーボンニュートラル環境の国内オゾン濃度への影響

14:10-14:40 嶋寺 光（大阪大）[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

14:40-14:50 休憩

14:50-15:20 入澤 大悟（明星大）[ロング]

関東地域における光化学オキシダントを対象としたモデル間比較研究について

15:20-15:40 高井 紫琉（明星大）[ショート]

近畿地方における光化学オキシダントを対象とした大気質モデルの精度検証

15:40-16:00 板橋 秀一（九大応力研）[ショート]

境界層過程に関連したモデル再現性の課題について

16:00-16:30 議論・まとめ・その他

2月28日（金）午前

座長：弓本 桂也（九州大学応用力学研究所）

09:00-09:30 茶谷 聡（国立環境研）[ロング]

濃度計算値の年々変動を対象としたモデル間相互比較

09:30-10:00 五藤 大輔（国立環境研）[ロング（どちらでも）]

NICAM-Chem/2 次元変分法を用いたエアロゾル同化システム開発

10:00-10:20 浦西 克維（北九州大）[ショート]

PMF モデルを活用した排出インベントリの不確実性推定の試み
ー九州地方（+近畿） in 2019-2020ー

10:20-10:30 休憩

10:30-10:50 山地 一代（神戸大）[ショート（どちらでも）]

北半球規模の大気質モデルを用いた北極圏 BC の変動解析
～中緯度からの輸送影響の観点より～

10:50-11:10 原 由香里（九大応力研）[ショート]

2018 年春季における越境大気汚染の島陰効果に関する数値的解析

11:10-11:30 弓本 桂也（九大応力研）[ショート（どちらでも）]

2022 年に到来した冬の黄砂について

11:30-12:00 議論・総括等、次回開催について

共同利用研究集会

第 22 回トロイダルプラズマ統合コード研究会

22nd 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 22 回目となるが、第 11 回よりトロイダルプラズマを対象を拡大し、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 21 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：2024 年 12 月 19 日（木）－ 20 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：27 件、参加者数：42 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 27 件の申し込みが集まった。本年より核融合エネルギーフォーラムサブクラスター会合は開催されなくなったので、統合コード研究会の単独開催となった。そのことを差し引くと件数は例年と同程度である。プログラム編成に時間的な余裕ができたので、全講演を口頭発表とした。昨年に引き続き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、遠方の研究者が Zoom を利用してオンラインで参加することも可能とした。

研究成果報告はどれも質の高いものであった。今回は韓国、中国、タイの 3 か国より参加があり、国際性豊かな研究会とすることができた。特にコアプラズマと周辺、ダイバータ領域を結合するシミュレーションについて熱心な議論があった。また、各種データ駆動手法の適用についても広がりが見られた。学生による講演も 13 件あり、口頭発表の機会として経験を積んでもらえたので、今後の活躍に期待が持てる。以下に研究成果講演内容を抜粋して列挙する。

本多は定常輸送コード GOTRESS を核とする統合モデル GOTRESS+における近年の機能面での進展や、今後の展開について紹介した。GOTRESS+は近年ユーザー数も増え、JT-60SA

や JA-DEMO の予測などに供されるようになった。

福山は統合コード TASK における波動解析および輸送解析の最近の進展について報告するとともに、モジュール統合の課題と今後の予定について述べた。

糟谷はトカマク核融合装置における不純物制御シナリオの検討のため、統合コード TASK を用いて複数種の不純物イオンの影響を考慮したうえでの輸送計算を実施した。JET トカマク装置プラズマ分布のもとでの不純物分布や、改善閉じ込めモード時の自己無撞着に決まる不純物分布を計算した。さらに核燃焼過程も含めた ITER トカマクパラメータの輸送計算で、周辺部で不純物密度が上昇したときのグローバルなプラズマ応答を評価した。

Hahm は高速イオンによる帯状流生成や応答、減衰の変化について、基本的な理論を丁寧に解説した。

田原は軌道追跡型 5 次元ドリフト運動論コード GNET に揺動電磁場による影響を考慮するための揺動項を導入し、トカマクプラズマにおける高エネルギー粒子の径方向拡散に対する揺動電磁場の影響を検証した。ドリフト波などイオンラーマ半径程度のスケール長を持つ代表的な微視的不安定性を模擬したモデル揺動を印加した場合の結果およびそれに対するモデリングについて議論した。

村上は 3 次や 4 次高調波加熱を含む GNET シミュレーションを行った。QUEST での高エネルギー電子生成における高調波加熱の役割について議論した。

相羽は JT-60SA 増強後に再開される初期研究フェーズにおける運転シナリオの実現のために必要な運転条件、特に周辺ペデスタルのプラズマ条件がプラズマ全体の運転パラメータに与える影響に着目して炉心統合シミュレーションによって評価・解析した結果を報告した。JT-60SA は 2023 年 10 月にファーストプラズマを達成し、現在本格的なプラズマ実験に向けた装置機器の増強作業を進めている。

桑宮はトカマクプラズマにおける高精度密度揺動計測法である位相コントラストイメージング(PCI)法について、乱流シミュレーションデータを用いて計測シミュレーションを行うコードの開発について報告した。JT-60SA トカマクにおける磁場平衡計算とジャイロ運動論シミュレーションコードによる揺動場を組み合わせた解析を行った。密度揺動の計測視線方向の線積分効果を評価することにより、PCI 計測で得られる信号の理解を図った。

堀岡は LHD 装置でのペレット入射放電の実時間シミュレーションを目標として統合輸送コード TASK3D の拡張を行った。NGS モデル及び溶発プラズモイドの運動計算モデルを用いてペレット入射による粒子ソース・熱ソース項を評価し、NBI モジュール等と組み合わせてペレット入射後の粒子輸送および熱輸送の統合シミュレーションを行った。将来的にはデータ同化システム ASTI と組み合わせた実時間予測を可能とする。

可児は核融合原型炉ではその設置場所等の制限から限られた計測器やアクチュエータでの多変数制御が必要であるので、統合コード TOTAL を用いて NB 入射パワーとペレット入射率を操作量、核融合出力と電子密度を制御量とした多変数 PID 制御ゲイン行列の計算を行った。多変数制御ゲインは操作量・制御量間の線形関係を仮定し、操作量のステップ応答をもとに算出した。計算された制御ゲインを用いて制御試験を行い値の評価を行った。

横山は Integrated Modelling Expert Group(IMEG)の報告を行った。これは ITER における統合モデリング専門家グループの会合であり、最近の話題について情報提供があった。

河村は SOLPS-ITER による JA-DEMO ダイバータモデリングの進展について報告した。

プラズマ工学の観点から原型炉とダイバータに関連する課題を紹介した後、SOLPS-ITER コードと JA-DEMO で使用されている SONIC コードとの予備的な比較や MPI 並列化効率の改善について報告した。

Si は JA-DEMO ダイバータ熱排出に関する SOLPS-ITER シミュレーション研究結果について報告した。ダイバータプラズマへのアルゴン導入量を変化させたときの定量評価から熱流束密度と電子温度が良好に制御できることを示した。

Wisitorsasak はトカマク不純物シミュレーションに向けたコアスクレイブオフ層(SOL)ーダイバータモデルの進展について報告した。SOL 領域では磁力線に沿った輸送のみを考慮することで問題の複雑さを軽減することができるので、流体記述に基づく動的 5 点モデルを SOL 領域における不純物計算へ拡張した。炉心における不純物輸送の境界条件として今後コアと SOL を結合した計算を行う。

矢本は IMPGYRO コードにおける SOL、ダイバータプラズマでのタングステン不純物輸送の運動論的モデリングについて説明し、背景プラズマのドリフトの影響を含む ITER プラズマタングステン輸送シミュレーションの予備的結果について議論した。

Choi は KSTAR トカマクの FIRE モードにおける閉じ込め改善に関する物理研究について紹介した。特に、非線形乱流ダイナミクスにおける高速イオン誘起希釈の役割について説明した。

Chen は上下非対称トカマクにおける電磁的測地音響モードについて議論した。周波数、磁場摂動、ラグランジュ変位を解析的に求めた。非円形状効果によって摂動の副成分がさらに誘起されることを示した。

小山は高閉じ込め運転モードの輸送障壁における短波長揺動について議論した。温度勾配と速度勾配に起因するモードが共存し得る系において、モードが不安定になるパラメータ領域や各モードの波数依存性について報告した。

宮本はトカマクプラズマにおける非線形結合と乱流伝播による内向き粒子流束の励起機構について議論した。プラズマ端近傍でピークした密度分布を導入した簡約 MHD コードによる乱流シミュレーションを行い、内向き乱流粒子流束の維持を示した。乱流の伝播によって弱乱流領域でも非線形的に揺動を励起し、粒子流束を駆動する非局所機構が働いていることを明らかにした。

登田はトカマクプラズマにおける散逸性捕捉電子モードによる乱流輸送モデリングの進捗について説明した。九大応力研 PLATO 装置パラメータを例として、電磁的ジャイロ運動論解析の結果から散逸性捕捉電子モード乱流による電子、イオン熱拡散係数や粒子拡散係数をモデル化した。帯状流の乱流に対する影響について考察した。

大谷は望んだ電子サイクロトロン波 EC 駆動電流分布を実現するために数理最適化手法の一つである遺伝的アルゴリズムを用いた自動構成手法を開発した。EC は多数の発信器の組み合わせで追加熱や局所的電流駆動を行うので有効な制御手法が必要となる。

古田原は乱流と構造間の相互作用により駆動される突発現象について、多重場特異値分解により少数自由度での駆動機構を調査した。三次非線形項に着目することで、高次相関が重要になりうること、インコヒーレントモードが突発輸送や帯状流形成に重要であることが分かった。

川村は MHD コード MIPS を用いて、バルーニングモード、キンクモード励起の有無に

違いが出る 3 条件でシミュレーションを行った。そして動的モード分解、フーリエ分解を用いて不安定性の時空間構造を提示した。

森下は核融合プラズマの複雑な挙動を制御するために、統合シミュレーションによる核融合プラズマのデジタルツインとデータ同化に基づいた適応予測制御システム ASTI の開発を行った。LHD プラズマの実時間予測モデルと LHD で行なった電子温度、密度、イオン温度の多変量制御実験について説明した。

市川は予測・制御システム ASTI によるデータ同化の手法をトカマクプラズマへ適用することを目指して、JT-60U の実験データを使用した予測シミュレーションを行った。

小澤は JFT-2M で観測された静電ポテンシャルデータを基に、帯状流の振動ブランチである測地線音波と乱流の相互作用について径方向のダイナミックスの抽出を行なった。シミュレーションしたデータとの比較により、それぞれの時空間構造は同期しており、波動運動論における乱流捕捉で予想される位相関係に矛盾しないことがわかった。

風見は乱流ダイナミックスの大域観測が不可欠であるので、深層生成モデルの一種である敵対的生成ネットワークと数値シミュレーションを組み合わせ、プラズマ境界部の局所計測物理量から大域乱流構造の推定を行った。推定結果からは、数値解と高い相関性が確認された。

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や他研究会との合同開催を視野に入れながら、来年度も第 23 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 19 日(木)

- 12:45 – 13:00 会議登録 Registration
- 13:00 – 13:05 事務連絡 Business announcement
- 13:05 – 13:10 はじめに (村上) Opening remark

(座長：村上)

- 13:10 – 13:35 講演 1-1 本多 (京大)
Progress and future development of the integrated model GOTRESS+
- 13:35 – 14:00 講演 1-2 福山 (京大)
Progress and issues of integrated code TASK for magnetically-confined plasmas
- 14:00 – 14:25 講演 1-3 糟谷 (九大)
Transport simulation for control of multiple kinds of impurities by using integrated code TASK

- 14:25 – 14:45 集合写真 group photo、休憩 break

(座長：糟谷)

14:45 – 15:10 講演 1-4 Hahm (SNU)
 Zonal flow dynamics in the presence of fast ions
 15:10 – 15:30 講演 1-5 田原 (京大)
 Kinetic modeling for energetic particle transport induced by electrostatic and magnetic fluctuations
 15:30 – 15:55 講演 1-6 村上 (京大)
 Multiple resonance heating and supra-thermal electron behaviors in QUEST

15:55 – 16:05 休憩 break

(座長：本多)

16:05 – 16:30 講演 1-7 相羽 (量研) online
 Status of operation scenario development for JT-60SA initial research phase
 16:30 – 16:45 講演 1-8 桑宮 (九大)
 Diagnostic simulation of experimental measurement of density fluctuations in tokamak plasma by phase contrast imaging using a gyrokinetic simulation code
 16:45 – 17:00 講演 1-9 堀岡 (京大)
 Integrated transport simulation of pellet injection discharge in LHD
 17:00 – 17:15 講演 1-10 可児 (名大)
 Investigation of multivariable control gain for fusion power and electron density control by NB injection power and pellet injection using TOTAL
 17:15 – 17:40 講演 1-11 横山 (核融合研) online
 Information from IMEG

17:40 散会

18:00 – 20:30 懇親会 (独楽蔵 JR 大野城駅近)

12 月 20 日(金)

(座長：福山)

9:00 – 9:25 講演 2-1 河村 (量研)
 Recent progress of JA-DEMO divertor modeling by SOLPS-ITER
 9:25 – 9:50 講演 2-2 Si (量研)
 SOLPS-ITER simulation study for power exhaust in JA-DEMO divertor
 9:50 – 10:15 講演 2-3 Wisitsorasak (KMUTT)
 Development of Core-SOL-Divertor model for simulating tokamak with impurities
 10:15 – 10:40 講演 2-4 矢本 (量研) online
 Kinetic modelling of W impurity transport in SOL/divertor plasmas by IMPGYRO code
 10:40 – 10:50 休憩

(座長：河村)

- 10:50 – 11:15 講演 2-5 Choi (KAIST)
Physics study of confinement enhancement in KSTAR FIRE mode
- 11:15 – 11:35 講演 2-6 Chen (USTC)
Electromagnetic geodesic acoustic modes in up-down asymmetric tokamaks
- 11:35 – 11:55 講演 2-7 小山 (九大)
Short-wavelength fluctuations on high-confinement mode
- 11:55 – 12:10 講演 2-8 宮本 (九大)
Excitation of inward particle fluxes with nonlinear coupling and turbulence spreading in tokamak plasmas
- 12:10 – 13:10 昼休み Lunch break

(座長：森下)

- 13:10 – 13:35 講演 3-1 登田 (核融合研)
Modeling of turbulent transport due to dissipative trapped electron mode in tokamak plasmas
- 13:35 – 13:50 講演 3-2 大谷 (京大)
Automatic configuration of ECCD using genetic algorithm
- 13:50 – 14:05 講演 3-3 古田原 (日大)
Particle and momentum transport analysis using multi-field singular value decomposition in plasma turbulence simulation
- 14:05 – 14:20 講演 3-4 川村 (九大)
Analysis of MHD instabilities using mode decomposition in tokamak plasmas
- 14:20 – 14:30 休憩

(座長：登田)

- 14:30 – 14:55 講演 3-5 森下 (京大)
Real-time prediction model and adaptive predictive control of LHD plasmas
- 14:55 – 15:10 講演 3-6 市川 (京大)
Extension of the data assimilation system ASTI for the real time prediction of tokamak plasmas
- 15:10 – 15:25 講演 3-7 小澤 (日大)
Nonlinear wave extraction of geodesic acoustic mode and turbulence modulation using conditional average method
- 15:25 – 15:40 講演 3-8 風見 (日大)
Estimation of global turbulence profile from partial measurements using generative adversarial networks in fusion plasmas

(Session Leader : 村上)

15:40 – 16:00 議論 Discussion

16:00 – 16:05 事務連絡 Business announcement

16:05 散会

5. 参加者リスト

氏名	所属	氏名	所属
朝倉伸幸	量研機構	村上定義	京大
林 伸彦	量研機構	本多 充	京大
相羽信行	量研機構	福山 淳	京大
河村学思	量研機構	森下侑哉	京大
矢本昌平	量研機構	田原康祐	京大
司杭 Si Hang	量研機構	市川龍	京大
横山雅之	核融合研	堀岡 勇杜	京大
沼波政倫	核融合研	大谷凜太郎	京大
登田慎一郎	核融合研	古賀麻由子	兵庫県立大
佐藤雅彦	核融合研	東郷訓	筑波大
奴賀秀男	核融合研	山田琢磨	九大
Taik Soo Hahm	SNU	糟谷直宏	九大
Gyungjin Choi	KAIST	小菅佑輔	九大
Apiwat Wisitsorasak	KMUTT	小山 一輝	九大
Chen Zhe	USTC	Di Matteo Donat	九大
可児和寿	名大	桑宮幸佑	九大
滝塚知典	阪大	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	川村祐介	九大
小澤一隆	日大	坂本孝介	九大
風見怜	日大	松井里樹	九大

研究集会「整形外科と応用力学の融合～骨折力学の臨床応用～」

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、2024年8月10日（土）にJR博多シティ会議室9階中会議室を会場として実施された。協賛として、日本臨床バイオメカニクス学会と日本骨折治療学会に、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45名であり、そのうち30名が整形外科医であり、5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研究動向について紹介があった。次いでRCCMの三又氏より有限要素法を用いた骨折の評価方法に関する紹介があった。午後のセッションの最初の講演は、工学者として骨折力学研究に取り組んでいる中部大学の安達教授より研究紹介があった。それ以降は、整形外科医という立場で骨折力学の臨床応用を実施されている方々より、上腕骨、前腕骨、脊椎、大腿骨、骨盤等の骨折問題への応用、ならびに骨粗鬆症治療への応用に関する研究成果の紹介があり、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3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。

3. プログラム

10:20 開会挨拶 横浜市大整形外科・稲葉 裕

1) 10:30-11:00 九州大学応用力学研究所・東藤 貢

「骨折を力学で考えるーミクロからマクロまでー」

2) 11:00-11:30 計算力学研究センター・三又秀行

「有限要素解析を用いた骨折評価ー基礎と要点ー」

昼食休憩 (70 分)

3) 12:40-13:10 中部大学機械工学科・安達和彦

「CT-FEM による転子部不顕性骨折の進展予測解析

ー厚さを無視できる骨折線のモデル化ー」

4) 13:10-13:40 仙台市立病院整形外科・佐野博高

「上腕骨近位端 4-part 骨折の発生機序に関する生体力学的検討」

5) 13:40-14:10 千葉大学整形外科・松浦佑介

「骨盤骨折に対する創外固定法と固定強度の比較」

6) 14:10-14:40 千葉大学整形外科・山崎貴弘

「背屈位ギプスが colles 骨折の転位を防ぐー有限要素解析による検討ー」

7) 14:40-15:10 嬉野医療センター・山口雄一

「BKP (Balloon Kyphoplasty) 後の隣接椎体骨折の有限要素解析

ーAVA スコアの力学的妥当性についてー」

休憩 (20 分)

8) 15:30-16:00 琉球大学整形外科・國吉さくら

「有限要素解析法を用いた大腿骨頸部骨折のバイオメカニクスの検討

ーFree torque の有無による評価ー」

9) 16:00-16:30 琉球大学整形外科・仲宗根 哲

「有限要素解析法を用いた脆弱性骨盤骨折のバイオメカニクス検討

ーTrans-sacral スクリュー法の新しい荷重支持概念ー」

10) 16:30-17:00 大分大学整形外科・川岸正周

「骨盤脆弱性骨折の再現による発生メカニズムの検討」

11) 17:00-17:30 門司メディカルセンター・鍋島貴行

「FEM でみる骨粗鬆症治療薬の骨への作用

ー骨密度に依存しない PTH 製剤の骨折予防効果の機序とは?ー」

17:30 閉会挨拶 九州大学応用力学研究所・東藤 貢

4. 参加者リスト

整理番号	氏名	所属	備考
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
3	伊藤陽平	横浜市立大学整形外科	実行委員
4	原 直樹	計算力学研究センター	実行委員
5	三又秀行	計算力学研究センター	実行委員、講演者
6	佐野博高	仙台市立病院整形外科	講演者
7	松浦佑介	千葉大学整形外科	講演者
8	山崎貴弘	千葉大学整形外科	講演者
9	仲宗根哲	琉球大学整形外科	講演者
10	國吉さくら	琉球大学整形外科	講演者
11	安達和彦	中部大学工学部	講演者
12	山口雄一	嬉野医療センター	講演者
13	鍋島貴行	産業医科大学整形外科	講演者
14	川岸正周	大分大学整形外科	講演者
15	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	備考
1	荒川郷彦	帝京大学医学部附属病院	一般参加
2	小川哲也	青森県立はまなす医療療育センター	一般参加
3	後藤昭一	LandTrading LLC	一般参加
4	加藤茂幸	広島国際大学	一般参加
5	米澤則隆	(株) スパインクロニクルジャパン	一般参加
6	鷺見宏介	横浜市立大学附属病院	一般参加
7	比嘉 昌	兵庫県立大学工学研究科	一般参加
8	伊藝尚弘	琉球大学整形外科	一般参加
9	金崎彰三	大分大学整形外科	一般参加
10	坪内優太	大分県立看護科学大学	一般参加
11	土肥憲一郎	福岡大学病院整形外科	一般参加
12	西 啓太	豊橋創造大学 保健医療学部	一般参加
13	清水 晃	大洲記念病院整形外科	一般参加
14	村上 聡	大洲記念病院整形外科	一般参加

15	塚本 学	産業医科大学整形外科	一般参加
16	小林孝巨	佐賀大学整形外科	一般参加
17	五所真之輔	大分大学医学部付属病院	一般参加
18	谷 勇樹	さぬき市民病院	一般参加
19	青木良記	聖霊病院	一般参加
20	小林駿介	福岡大学病院	一般参加
21	田中健誠	大分大学整形外科	一般参加
22	田中惇貴	神戸大学整形外科	一般参加
23	堀口智弘	帝人ナカシマメディカル (株)	一般参加
24	中牟田侑昌	崇城大学工学部	一般参加
25	藤尾侑輝	産業技術総合研究所九州セン ター	一般参加
26	遠藤大輔	長崎大学大学院医歯薬学総合 研究科	一般参加
27	片岡高志	大分大学医学部附属病院	一般参加
28	田原大輔	龍谷大学先端理工学部	一般参加
29	島 直子	兵庫県立リハビリテーション 中央病院	一般参加
30	荒平高章	九州情報大学	一般参加

Joint research of power balance and heat load distribution on QUEST and EAST tokamak

Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, WANG YUNFEI

Introduction

Power balance studies play a crucial role in the field of magnetically confined nuclear fusion. By accurately measuring and controlling the energy input and output in plasma, researchers can gain deeper insights into plasma heating, transport, and loss mechanisms, thereby optimizing plasma confinement performance and improving fusion reaction efficiency. This is critical for the design and operation of future fusion power plants, directly affecting their energy gain and economic feasibility.

Among the various magnetic confinement fusion devices, QUEST and EAST are two tokamaks capable of long-pulse discharge experiments. Long-pulse discharges are essential for simulating the steady-state operation of future fusion power plants, investigating steady-state plasma behavior, and validating relevant control techniques. Consequently, QUEST and EAST provide ideal platforms for power balance studies.

In high-parameter long-pulse discharges, selecting an appropriate plasma configuration is crucial for the safe operation of the device and the improvement of plasma performance. Compared to limiter configurations, divertor configurations can guide heat load to specifically designed divertor regions, preventing excessive localized heat load on the first wall. This extends the lifespan of the device and enhances plasma quality and discharge duration.

This joint research is structured around three main themes. The first theme focuses on developing a predictive model based on plasma equilibrium and machine learning techniques to determine the required poloidal field (PF) coil currents for achieving the target divertor configuration on QUEST. This model enables flexible divertor plasma control on QUEST and provides a transferable reference for other tokamaks.

The second theme aims to optimize QUEST's standard divertor configuration to accommodate higher energy injection and achieve higher plasma parameters, laying the groundwork for future high-performance operations on QUEST.

The third theme involves power balance analysis of long-pulse, high-parameter I-mode and H-mode discharges on EAST. By comparing the differences in heat load distribution across various confinement mode plasma, this study provides insights for optimizing heat load distribution in long-pulse discharges on EAST and other devices.

In summary, this research focuses on power balance and heat load distribution, utilizing the advanced tokamak platforms of QUEST and EAST to provide key technical and theoretical support for the efficient and safe operation of future fusion power plants.

Results

This study conducted an in-depth investigation across three themes, yielding the following major findings:

1. Predictive Model for PF Coil Currents Based on Deep Neural Networks

In tokamak devices, plasma is confined by magnetic fields, with PF coils used to control plasma shape and position. Accurately determining PF coil currents before experiments is crucial for achieving the desired discharge configuration. To this end, we propose a deep neural network (DNN)-based fast prediction method that takes the target plasma configuration as input and directly outputs the required PF coil currents, thereby improving the efficiency of configuration design.

Since only a limited number of divertor discharges have been achieved on QUEST, we employed a simulation-based approach to construct a sufficiently large dataset. In each case, different PF coil currents were input, and the Grad-Shafranov equation was solved using a plasma equilibrium code. If a valid solution was obtained, the corresponding plasma configuration information was recorded, forming the dataset. A deep neural network model was then trained on this dataset to obtain the predictive model. Performance validation results show that the model achieves high prediction accuracy, with errors mainly concentrated in the X-point region. This is attributed to the nature of X-points as magnetic saddle points, where numerical methods struggle to precisely determine their positions, leading to increased errors.

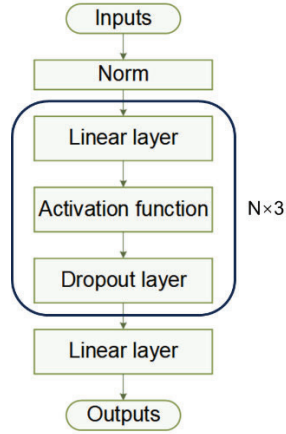


Figure 1. The schematic diagram of the DNN model.

2. Optimization of QUEST's Divertor Configuration

To meet the future demands of QUEST for higher energy injection and high-parameter plasma operation, careful consideration of divertor heat loads is necessary. Traditional divertor configurations exhibit magnetic flux compression at strike points, resulting in high peak heat flux density. To address this issue, we adopted the X-divertor configuration, which broadens the magnetic flux at the strike points, distributing heat flux over a larger divertor area and thereby reducing peak heat flux density.

Using the FreeGS code, we modified the divertor region of QUEST's future standard plasma model while maintaining the main plasma parameters and configuration. Subsequently, we employed the HEAT code to calculate the divertor heat load for both the original and modified configurations. The results indicate that the optimized divertor configuration effectively reduces peak heat flux. This research familiarized us with the complete workflow from configuration design to plasma-facing component (PFC) heat load calculations, providing strong support for the future upgrade of QUEST.

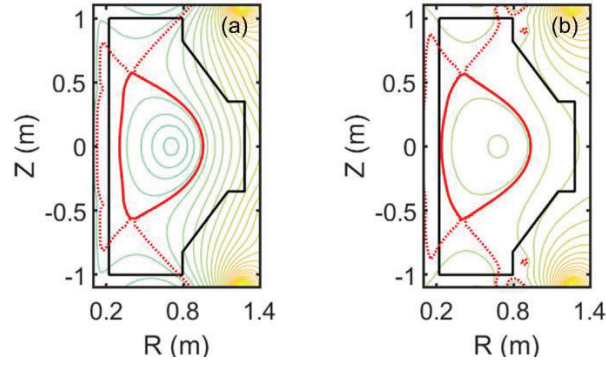


Figure 2. Subplot (a) represents the baseline divertor configuration of the future QUEST, while (b) depicts the X-divertor configuration, which is optimized based on (a). After optimization, the divertor peak heat flux density decreased from 3.0 to 1.9 MW/m².

3. Power Balance Analysis of Long-Pulse, High-Parameter Discharges on EAST

On EAST, long-pulse discharges have been successfully achieved, including a 1056-second I-mode discharge and a 408-second H-mode discharge. To assess the heat load on different PFCs, calorimetric diagnostics were primarily employed. This method measures the temperature difference between the inlet and outlet of the cooling water in different PFCs on EAST, and, combined with water flow rate and specific heat capacity, calculates the heat absorbed by the cooling water, thereby estimating the heat load on the corresponding PFCs during discharge.

For PFCs without water cooling, the HEAT code was used to simulate heat flux and radiation, enabling the determination of heat load on these components. Through these methods, approximately 90% of the injected power during long-pulse discharges on EAST was accounted for. In double-null (DN) configuration discharges, the divertor heat load accounted for approximately 70% of the total injected power, with significantly higher heat loads on the lower divertor than the upper divertor. Notably, in H-mode discharges, the lower divertor heat load was approximately 8% higher than in I-mode discharges. Additionally, radiative power in H-mode plasmas accounted for approximately 20% of the total power, which is twice that in I-mode discharges.

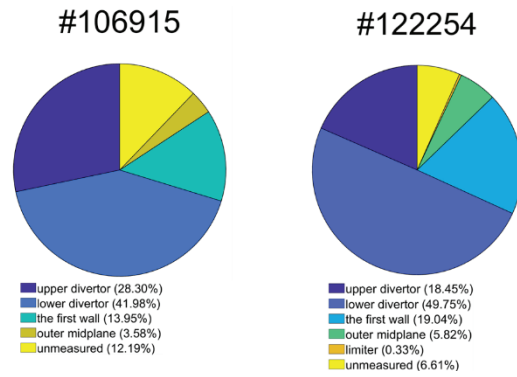


Figure 3. Heat load distribution on different PFCs in various confinement modes.

Conclusion

In this study, we conducted an in-depth investigation into power balance and heat load distribution in tokamak devices, leading to the following key findings:

1. Predictive Model for PF Coil Currents Based on Deep Neural Networks

We developed a deep neural network model that takes the target plasma configuration as input and directly predicts the required PF coil currents. This model significantly improves the efficiency of configuration design. While some errors remain in the X-point region, the overall prediction accuracy is satisfactory.

2. Optimization of QUEST's Divertor Configuration

By implementing the X-divertor configuration, we successfully reduced the peak heat flux density at the divertor strike points. This optimization supports future high-energy injection and high-parameter plasma operation on QUEST, laying the foundation for high-performance discharges.

3. Power Balance Analysis of Long-Pulse, High-Parameter Discharges on EAST

We conducted a detailed power balance analysis of EAST's long-pulse I-mode and H-mode discharges. The results indicate that divertor heat loads account for approximately 70% of the total injected power, with the lower divertor experiencing significantly higher heat loads than the upper divertor (DN configuration). Additionally, radiation power in H-mode discharges was approximately twice that in I-mode discharges.

These findings contribute to the efficient operation of tokamak devices and provide valuable insights for the design of future fusion power plants.

プラズマの自己組織化を支配する真の保存法則の探求

京都工芸繊維大学 工芸科学研究科 電子システム工学専攻 井上孟流

研究背景・目的

プラズマ中では、構成粒子の熱運動や集団運動に加え、電場や磁場など複数の形態でエネルギーが存在する。外部から加えられたエネルギーがさまざまな形態に分配され、プラズマの構造が自発的に形成される現象（自己組織化）が生じる。この現象は、エネルギー閉じ込め効率や安定性の向上に寄与する重要なプロセスである。

磁場配位に関しては、磁気ヘリシティ（磁場とベクトルポテンシャルとの内積）が保存されると提唱されている。この理論は、逆磁場ピンチやスフェロマックなどの実験室プラズマ、および太陽コロナなどの宇宙プラズマの磁場構造を定性的に説明する。しかし、逆磁場ピンチでの精密測定の結果、磁気ヘリシティは構造変形の前後で厳密には保存されていない例が報告されている[1]。一方、このような場合においても、磁気ヘリシティに速度場のねじれの寄与を加えた正準ヘリシティは保存される可能性が示唆されている[2]。ヘリシティの保存性を解明することができれば、磁場と速度場を統合したより一般的な自己組織化の記述が可能となる。

本研究では、九州大学応用力学研究所のトカマク装置 PLATO にてヘリシティの保存性の検証を計画している。PLATO 装置は、プラズマ銃による局所的な磁気ヘリシティの入射機構を備えており、磁気ヘリシティの空間分布や量を外部から制御可能である。

実施内容・成果

本研究期間中にヘリシティの保存則の検証に用いるプローブの開発が完了しなかったため、PLATO 装置での検証実験は実施できなかった。そのため、代替的な研究として、PLATO 装置のトカマクプラズマ性能向上に向けた工学的アプローチを実施した。

トロイダル磁場強度の増加は、トカマクプラズマの安定性の向上に寄与する。しかし、磁場を増加させると、電磁力が増加するため、コイル系の構造的安定性に影響を及ぼす可能性がある。そこで、本研究では三次元有限要素法を用いた電磁構造解析により、トロイダル磁場コイル、オーミック加熱コイルおよびポロイダル磁場コイルに流れるコイル電流が生成する磁場の計算およびそれらによって生じる電磁力と応力を評価した。これにより、PLATO 装置の実験時における構造的な安定性を調査する。

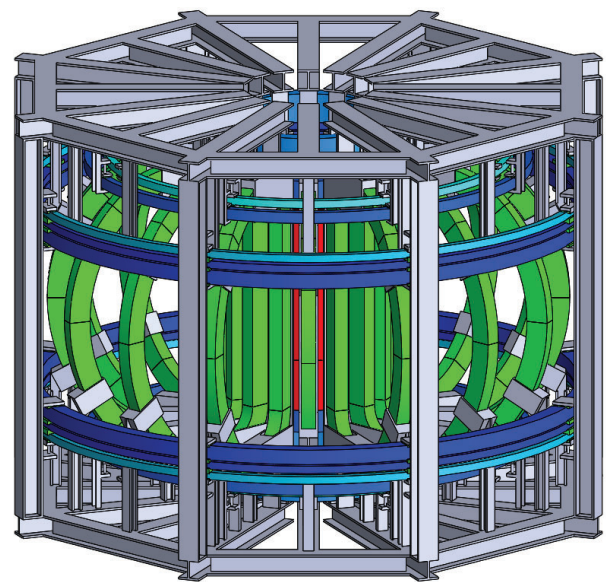


図 1. PLATO 装置のコイル系およびそれらの支持構造物の 3D CAD 図。

本解析は、有限要素法を用いたソフトウェア ANSYS による計算を行った。電磁解析モデルとして、コイル系はトロイダル磁場 (TF) コイル、オーミック加熱 (OH) コイル、ポロイダル磁場 (PF) コイルとして、H コイル、Q コイル、C コイル、F1 コイル、F2 コイルを採用した。構造解析では、これらのコイルに加えて、各コイルの支持具と支柱一式を簡易化してモデル化した。図 1 は構造解析モデルの 3D CAD 図を示している。

電磁解析では、TF コイルに基準電流値 0.6 kA (トロイダル磁場 0.25T 相当) またはその倍の 1.2 kA (トロイダル磁場 0.5T 相当) を設定し、OH コイル電流と PF コイル電流は実験時の値を使用した。これらの電流が流れた場合、コイルに加わる電磁力は 1 kN から 100 kN のオーダーとなり、フープ力や転倒力が確かに生じていることが確認された。

次に、この電磁解析を基に構造解析を実施し、各コイルに生じる応力を計算、評価した。解析では、5つの条件 (A~E) を設定し、それぞれのコイル電流の影響と応力分布を評価した。それぞれ、TF コイル電流のみ(0.6 kA, 1.2 kA)が 2 パターン(条件 A, B)、OH コイル電流と PF コイル電流の場合(条件 C)、すべての上記の TF コイルの 2 条件に加えて OH コイル電流と PF コイル電流を流した場合(条件 D, E)である。図 2 では、代表例として条件 D と条件 E におけるコイルに生じる相当応力の 3 次元分布を示している。条件 A では、TF コイル電流のみの場合、最大応力は 11.7 MPa であったが、条件 B では TF コイル電流を増加させると 46.7 MPa となり、電流値の 2 乗に比例して約 4 倍増加した。また、OH コイル電流と PF コイル電流の条件 C では、最大応力は 9.8 MPa であった。これらの値は銅の降伏応力 60 MPa に比べて十分に小さい。さらに、条件 D の実験時の値では、図 2(a)に示すように、最大応力は Q コイルに 51.1 MPa 生じている。これは条件 C より大幅に増加しており、TF コイルの変形が架台を介して Q コイルに影響を及ぼしていることが示された。このとき、TF コイルに生じる最大応力は 18.4 MPa であり、条件 A と比較して約 7 MPa 増加していた。この増加は、PF コイル電流によって発生する転倒力の影響を反映していると考えられる。対して、条件 E の TF コイル電流を 2 倍にした場合、TF コイルに生じる最大応力は 51.1 MPa、PF コイルでは 101.9 MPa であった。TF コイルの条件 B に対する条件 D の増加分は、条件 A と条件 D における増加分と同程度であることから、条件 D と同様に PF コイル電流の影響を反映していると考えられる。一方、PF コイルの最大応力は銅の降伏応力を超えていた。ただし、この最大値はメッシュの角で生じており、有限要素法による計算で発生する数値計算上のピーキングを表している可能性がある。ピーキング現象は、メッシュのサイズや配置の影響により、メッシュの角や辺に過剰な応力値

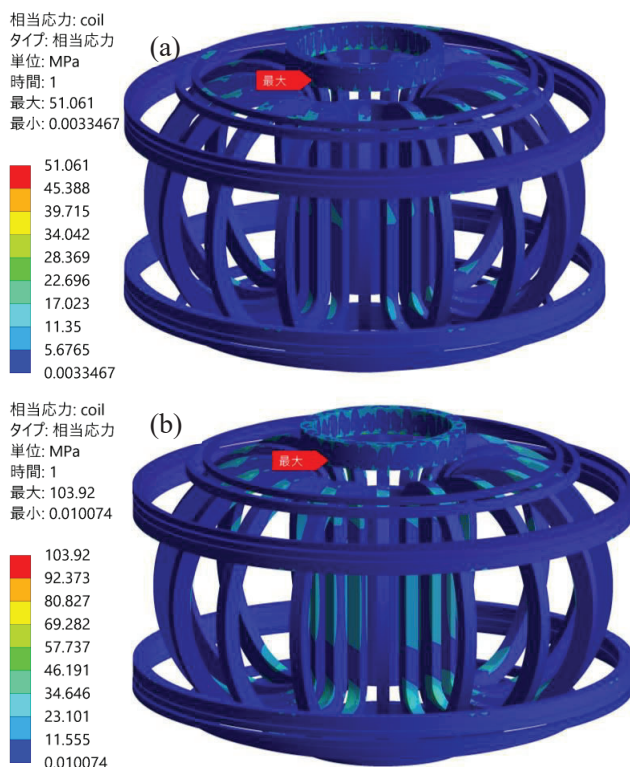


図 2. (a)条件 D、(b)条件 E におけるコイルに生じる相当応力の 3 次元分布。

が出力されることで発生する。このとき、理論上、同一メッシュ内では一意の値を取るはずだが、解析で急激な変動が確認される。実際、本解析でも最大値を持つメッシュ内の値を確認したところ、100 MPa から 30 MPa 程度まで、同一メッシュ内で値が変化していた。そのため、メッシュサイズの取り方やサイズを調節し、この値が実際に生じているかを明確にする必要がある。

本研究で実施した電磁構造解析の結果、現状の実験条件下ではコイルに生じる応力は降伏応力以下であり、構造的安定性は十分に維持されていると判断できる。一方で、TF コイル電流を 2 倍にした場合（トロイダル磁場では 0.5 T に相当）では、解析上で降伏応力を超える応力が観測された。これを解決するためには、より精密なモデルでの解析または追加の支持構造物の取り付けが求められる。仮に追加の支持構造物が必要になった場合でも、申請者が京都工芸繊維大学 RELAX 装置で提案した手法[3]を用いることで、局所的かつ最小限の支持具で補強可能である。

参考文献

- [1] H. Ji *et al.*, Phys. Rev. Lett. **75** (1995) 2945.
- [2] J. Linden *et al.*, Phys. Rev. Lett. **121** (2018) 035001.
- [3] T. Inoue *et al.*, Fusion Eng. Des. **184** (2022) 113285.

第一原理分子動力学法、自由エネルギーサンプリングと機械学習を組み合わせた GaN エピタキシャル成長に関する研究

シカゴ大学 石曾根 香菜

● 目的

窒化ガリウム(GaN)はワイドバンドギャップ半導体材料として知られ、紫外・青色発光ダイオードやレーザーダイオードなどの光学分野やエレクトロニクス分野での応用が期待されている。また、絶縁破壊電圧が高いことや高温下での高い構造安定性といった特徴を持つことから、GaN は次世代パワー半導体デバイスの材料として注目されている。しかし、実際の電子デバイス材料としての性能は期待されるより低い。この理由はエピタキシャル成長させた GaN 薄膜の品質が悪いためである。この改善のためには薄膜のエピタキシャル成長中の複雑な原子反応の機構を明らかにすることが必要である。研究代表者が所属する研究チームと応用力学研究所の寒川 義裕教授は以前に第一原理分子動力学シミュレーションを用いて GaN 表面での気相分子前駆体の吸着・解離プロセスについて共同で研究を行った。

現在、GaN 薄膜成長にはトリメチルガリウム(TMGa)とアンモニア(NH_3)を原料ガスとする MOVPE 法(有機金属気相成長法)が主流であるが、結晶成長時に大きな欠陥として複合欠陥ができることが知られている。本研究では表面近くに複合欠陥が存在する際の GaN での成長状態について第一原理分子動力学法を行うことにより、気相の分子前駆体が解離して GaN 結晶成長するときに起こる素過程を理解することを目的とする。また、近年コロナウイルスや細菌の RNA や DNA の吸収は超と一致する AlGaIn ベースの LED が注目を集めているが、AlGaIn/AlN 界面では組成が混ざり、原子レベルで平坦なヘテロ構造を得ることが課題となっている。本研究では、複合欠陥の存在がヘテロ界面付近の原子相互拡散に与える影響について理解することも目的とする。

● 研究方法

III 族窒化物半導体は MOVPE によって工業的に製造されるが、この反応には気相反応、表面反応、および固相中の拡散を伴う複雑なプロセスである。この複雑さのため、反応機構を明らかにするためには各ステップについて理解することが重要である。我々は主に表面反応と拡散反応について第一分子動力学シミュレーションとモンテカルロシミュレーションを組み合わせシミュレーションを行った。

GaN 表面付近の複合欠陥存在時の欠陥の移動と成長時の NH_2 吸着について理解するために、図 1 に示す構造について計算を行った。 V_N - V_Ga が第 2 層にある場合と V_N が第 2 層、 V_Ga が第 3 層にある場合についてそれぞれ 1300 K まで温度を上昇したときの欠陥の拡散について調べた。ま

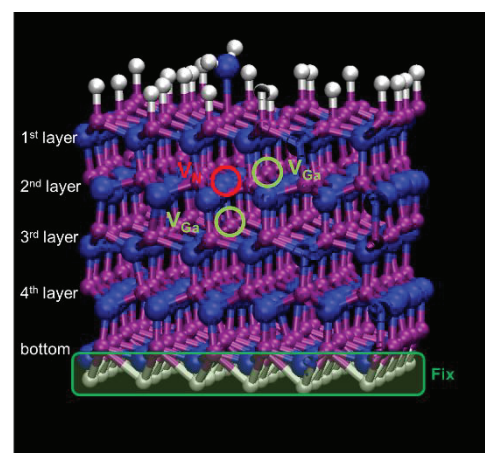


図 1 GaN に V_Ga - V_N が存在する際のシミュレーション構造。

た、表面付近の欠陥が結晶成長に与える影響を調べるため、表面に NH₂ を載せた際の分子の動きについても調べた。

AlGa_N/AlN 界面については欠陥存在時の原子の拡散についてモンテカルロシミュレーションを用いて分析を行った。

● 計算結果

GaN 中の複合欠陥について、1300 K 以下では初期位置から変化しないが、GaN 成長に使われる 1300 K では V_{Ga} が第 2 層と第 3 層の間でスイッチングする状態が確認され、その間 V_N は第 2 層から移動することはなかった。つまり、V_{Ga} が V_N の周囲を移動しながら拡散することが示唆された。また、V_N の上にある Ga 原子に吸着した NH₂ は 1300 K まで動かないが、1300 K ではその周囲の Ga 原子をホッピングしながら吸着することが分かり、表面付近の複合欠陥が GaN 成長機構に影響を与えることが明らかとなった。

また、AlGa_N/AlN 界面に欠陥が存在する場合、V_N のみの際には V_N は AlGa_N に移動するが、それらは Al と Ga の拡散には寄与しないため平坦なヘテロ界面が維持される。

V_(Ga,Al) のみの際には欠陥は AlN に移動するため、界面で Al が一部 AlGa_N が移動することによる陽イオンの拡散が一部界面にて確認された。一方、V_N+V_(Ga,Al) 複合欠陥が界面で存在する場合、V_N は AlGa_N を好み V_(Ga,Al) は AlN を好むためヘテロ界面に欠陥が集積する。V_(Ga,Al) は V_N よりも拡散障壁が低いために V_(Ga,Al) は V_N の周囲を移動し、AlGa_N から AlN への Ga の拡散が生じることでヘテロ界面の平坦性が失われる。しかし、これらの拡散は温度に大きく依存する。図 2 に示すように、複合欠陥が生じにくい

900~1000°C 未満の温度で薄膜を堆積することで複合欠陥

の生成を抑えることができ、平坦なヘテロ界面を生成できることが示唆される。

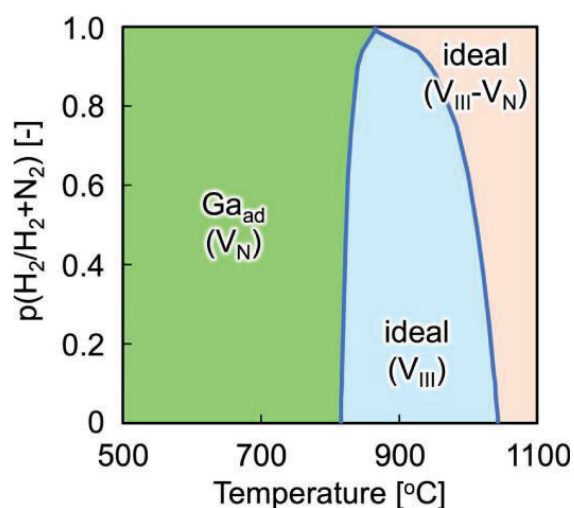


図 2 MOVPE で欠陥をもつ GaN 表面の相図。

● 研究成果報告

・学会発表

○Kana Ishisone, Mauro Boero, Kieu My Bui, Atsushi Oshiyama, Yoshihiro Kangawa, Kenji Shiraishi, “Computational investigation of GaN growth for power electronics applications”, 14th International Conference on Nitride Semiconductors, ThP-GR-LN5, Fukuoka (JAPAN), 11/12/2023-11/17/2023.

・論文発表

Y. Kangawa, A. Kusaba, T. Kawamura, P. Kempisty, K. Ishisone, M. Boero, “Influence of Intrinsic Point Defects Incorporated from Growth Surface on Atomic Interdiffusion and Unintentional Compositional

Gradient in AlGa_N/AlN Heterointerfaces”, Cryst. Growth Des. 2025, 25, 3, 740–746.

● 研究組織

石曾根 香菜	ストラスブール大学（2024 年 1 月よりシカゴ大学）
寒川 義裕	九州大学
Mauro BOERO	ストラスブール大学
草場 彰	九州大学