

共同利用研究成果報告

第 29 号



令和7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28年が経過しました。この間、毎年100～140件の共同利用・共同研究が行われ、多くの成果が得られました。2020年度以降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、2025年度に受け入れた共同研究者の人数は総計1,000名を超え、外国人研究者の数も96名でした。この報告書に示しますように、2025年度は、特定研究22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、36件（この36件に特定研究（分野融合）のうち海外機関に所属する研究者の2件を足した国際共同研究の実施総数としては38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12件行われ、それぞれについてまとめられています。若手キャリアアップ支援研究の代表者として、5名の採用（3名新規）を実施し、また博士課程学生SRAを1名、博士課程学生と博士課程に進学予定の修士課程学生RAを16名それぞれ採用する等、若手育成にも努力しています。

これらの成果の一部は、2026年6月26日に開催される「RIAM フォーラム 2026」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付けられ、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。

2026 年 3 月

九州大学応用力学研究所

所 長 寒川 義裕

令和7年度 共同研究（特定研究）一覧（目次）

新エネルギー力学分野					
No.	研究課題		代表者名	所内世話人 協力者数	頁
特定研究 1					
—	エネルギー材料開発を加速する材料情報学の開拓		統括責任者 九州大学 草場 彰		
2025S1-ME-1	サブ テ ー マ	結晶表面構造予測のための周期パターン列挙と最適化手法の開発	学習院大学 久保山 哲二	草場 彰 1名	13
2025S1-ME-2		高効率フルカラーLEDの実現を目指したInGaNエピタキシャル成長機構の微視的理解	京都大学 松田 祥伸	草場 彰 3名	17
2025S1-ME-3		分子レベルの材料情報学による結晶成長シミュレーション	京都大学 杉山 佳奈美	草場 彰 2名	18
2025S1-ME-4		AlGa _N 系MOVPE成長の炭素不純物取り込み機構解明のための反応プロセス解析	名古屋大学 新田 州吾	草場 彰 1名	19
2025S1-ME-5		不純物が添加されたGa ₂ O ₃ の電子構造解析	三重大学 河村 貴宏	草場 彰 3名	20
2025S1-ME-6		実験と計算の協調による (Al _x Ga _{1-x}) ₂ O ₃ 混晶MOVPE成長条件の解明	東京農工大学 熊谷 義直	草場 彰 2名	22

分野融合					
No.	研究課題		代表者名	所内世話人 協力者数	頁
特定研究 2					
—	流体・プラズマにおける非平衡現象と数値モデリング		統括責任者 小菅 佑輔 大貫 陽平		
2025S2-CD-1	サブ テ ー マ	中規模渦-風下波の相互作用に伴う中規模渦の減衰過程の数値シミュレーション	北海道大学 松田 拓朗	大貫 陽平 3名	24
2025S2-CD-2		金星大気波動のモデリング・解析	慶應義塾大学 杉本 憲彦	大貫 陽平 4名	25
2025S2-CD-3		データ駆動科学的手法を活用した乱流非線形過程のモデリング	日本大学 佐々木 真	小菅 佑輔 6名	26
2025S2-CD-4		直線磁化プラズマ装置PANTAを利用した高波数乱流が支配的な非平衡プラズマに関する実験研究	名古屋大学 河内 裕一	小菅 佑輔 3名	27
2025S2-CD-5		The role of symmetries in fluid and plasma systems	HKUST, HK SAR and National Oceanography Centre MAK Julian	小菅 佑輔 2名	29
2025S2-CD-6		地球外核最上部を伝播する磁気流体波の連続スペクトル減衰	九州大学 中島 涼輔	大貫 陽平 1名	30
2025S2-CD-7		揺らぎの熱力学に基づくエルニーニョ現象の予測限界の解析	東京科学大学 安田 勇輝	大貫 陽平 2名	31
2025S2-CD-8		海洋近慣性波の包括的理解に向けた力学・モデリング研究	東京大学 伊地知 敬	大貫 陽平 2名	32
2025S2-CD-9		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	小菅 佑輔 3名	33
2025S2-CD-10		外部制御されたエネルギーによる流体中の構造形成の考察	広島大学 鈴木 康浩	小菅 佑輔 6名	35
2025S2-CD-11		a) Triadic resonant instability of internal gravity waves in a stratified shear flow b) The Role of Turbulence in Ice Crystal Orientation and Scattering Properties	Indian Institute of Technology Madras ROY Anubhab	大貫 陽平 3名	36
2025S2-CD-12		非平衡プラズマの異スケール間乱流相互作用の研究	核融合科学研究所 徳沢 季彦	文 贊鎬 6名	37
特定研究 3					
—	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		
2025S3-CD-1	サブ テ ー マ	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	39
2025S3-CD-2		遺伝的アルゴリズムを用いた垂直軸風車配置の最適化に関する研究	鳥取大学 原 豊	朱 洪忠 3名	40
2025S3-CD-3		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操作システムの開発	佐賀大学 松田 吉隆	朱 洪忠 8名	41
2025S3-CD-4		トムソン散乱計測による密度温度分布計測の高空間分解能化のためのシステム開発	東京大学 江尻 晶	長谷川 真 3名	42

令和7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				
2025CR-CD-1	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係	佐世保工業高等専門学校 川崎 仁晴	花田 和明 3名	43
2025CR-CD-2	リチウム複合酸化物セラミックス粉末の水吸収・水素放出過程	名城大学 土屋 文	徳永 和俊 2名	45
2025CR-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 3名	47
2025CR-CD-4	核融合プラズマの揺動分布に対する数値計測と逆問題解析の基盤開発	核融合科学研究所 沼波 政倫	糟谷 直宏 1名	49
2025CR-CD-5	波成乱流の水槽実験	京都大学 吉川 裕	胡 長洪 3名	50
2025CR-CD-6	金属材料中の水素化物形成	若狭湾エネルギー研究センター 安永 和史	井戸 毅 4名	56

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				
2025CR-A0-1	海洋環境シミュレーション水槽を用いた波と気泡の相互作用の解明	兵庫県立大学 高垣 直尚	磯辺 篤彦 5名	57
2025CR-A0-2	日本海と東シナ海におけるイカ類の移動・回遊と再生産構造の解明	長崎大学 滝川 哲太郎	広瀬 直毅 2名	59
2025CR-A0-3	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	60
2025CR-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	62
2025CR-A0-5	海洋環境シミュレーション水槽を用いた飛散液滴生成機構の解明	岡山理科大学 岩野 耕治	磯辺 篤彦 4名	63
2025CR-A0-6	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 3名	64
2025CR-A0-7	相互比較観測から得られるエアロゾルの光学的特性の気候影響評価	富山大学 青木 一真	竹村 俊彦 2名	65
2025CR-A0-8	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 1 3名	66
2025CR-A0-9	九州北部地域における化学輸送モデルを用いた植物に対するオゾンへのリスク評価と指標植物を用いたリスクの現場検証	長崎大学 山口 真弘	板橋 秀一 2名	68
2025CR-A0-10	海洋が九州北部のメソスケール対流系の構造に及ぼす影響に関する研究	三重大学 万田 敦昌	山本 勝 1名	69
2025CR-A0-11	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	70
2025CR-A0-12	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	71
2025CR-A0-13	東シナ海から日本海へ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	千手 智晴 7名	72
2025CR-A0-14	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	73
2025CR-A0-15	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 1名	74
2025CR-A0-16	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	77
2025CR-A0-17	黒潮が海岸・海底地形から受ける影響の統合的理解—分岐、湧昇、混合の連動構造—	鹿児島大学 中村 啓彦	遠藤 貴洋 6名	78
2025CR-A0-18	Tidal impacts on wintertime 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	82
2025CR-A0-19	Cross-shelf Kuroshio Intrusion and Its Impact on the Marine Ecosystem	富山大学 Jing Zhang	遠藤 貴洋 3名	85
2025CR-A0-20	表面波・内部波の生成・伝播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	87
2025CR-A0-21	Legacyおよび新規POPsの大気輸送挙動と濃集メカニズムに関するモデリング研究	北九州市立大学 伊藤 理彩	板橋 秀一 5名	88
2025CR-A0-22	雲仙岳に発生する霧の日変化・季節変化に関する衛星データ解析と地上観測との比較	長崎大学 河本 和明	岡本 創 1名	89

2025CR-A0-23	大島瀬戸周辺における流れの鉛直構造の解明	大島商船高等専門学校 酒井 秋絵	千手 智晴 1名	90
2025CR-A0-24	インド亜大陸北東部におけるプレモンスーン期の季節内変動とその地域性の解明	東京大学 木口 雅司	江口 菜穂 3名	91
2025CR-A0-25	北極海表層流の海洋表層ドリフターとSWOT海面高度計による推定	東京大学 小平 翼	市川 香 1名	93

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				
2025CR-FP-1	プラズマ対向材ODS-W/Cuの力学特性に及ぼす照射の影響	京都大学 徐 虬	徳永 和俊 1名	95
2025CR-FP-2	核融合プラズマにおける熱と乱流の非拡散的伝搬の研究	京都大学 金 史良	小菅 佑輔 1名	97
2025CR-FP-3	小型Retarding field analyzerを用いたPANTAプラズマのイオン温度空間分布の計測	東北大学 高橋 宏幸	文 賛鎬 2名	98
2025CR-FP-4	トカマクプラズマにおける散逸捕捉電子モードによる乱流輸送のモデルを用いた研究	核融合科学研究所 登田 慎一郎	糟谷 直宏 2名	99
2025CR-FP-5	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	井戸 毅 3名	100
2025CR-FP-6	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 2名	101
2025CR-FP-7	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	井戸 毅 5名	103
2025CR-FP-8	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 賛鎬 2名	104
2025CR-FP-9	ヘリコンプラズマ生成の時空間発展と中性粒子枯渇の影響に関する研究	九州大学 諫山 翔伍	小菅 佑輔 9名	106
2025CR-FP-10	MAX相セラミックスおよびODS-Cu/W接合体の力学特性に及ぼす照射の影響	北海道大学 池田 賢一	井戸 毅 4名	107
2025CR-FP-11	原子力材料の力学特性に及ぼす照射の影響	福井大学 渡邊 英雄	井戸 毅 4名	108
2025CR-FP-12	粒子シミュレーションによる境界領域輸送ダイナミクスの研究	核融合科学研究所 長谷川 裕記	糟谷 直宏 1名	110
2025CR-FP-13	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	井戸 毅 3名	111
2025CR-FP-14	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 賛鎬 1名	112
2025CR-FP-15	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 6名	113
2025CR-FP-16	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 小林 達哉	藤澤 彰英 2名	117
2025CR-FP-17	トカマクプラズマにおけるMHD不安定性間の相互作用のシミュレーション研究	核融合科学研究所 佐藤 雅彦	糟谷 直宏 2名	119
2025CR-FP-18	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	120
2025CR-FP-19	機械学習によるレンズレスマイクロ波イメージング画像再構成手法の研究	兵庫県立大学 古賀 麻由子	糟谷 直宏 1名	121
2025CR-FP-20	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 2名	122
2025CR-FP-21	種々の熱入射法による材料表面の高エネルギー密度入射損耗解析法の開発	応用ながれ研究所・レーザー技術総合研究所 糟谷 紘一	徳永 和俊 5名	123
2025CR-FP-22	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	124
2025CR-FP-23	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 4名	126

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				
2025CR-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 3名	127
2025CR-ME-2	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	136
2025CR-ME-3	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	137
2025CR-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 3名	138
2025CR-ME-5	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 2名	139
2025CR-ME-6	GaN/AlN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	140
2025CR-ME-7	次世代パワーエレクトロニクスシステム用劣化要因解析技術	九州工業大学 長谷川 一徳	齋藤 渉 1名	141
2025CR-ME-8	極低レイノルズ数翼の革新的空力特性向上の為の基礎研究	同志社大学 平田 勝哉	内田 孝紀 4名	143
2025CR-ME-9	風車大型化を見据えたべき乗則に従わない風速プロファイルの研究	筑波大学 日下 博幸	内田 孝紀 3名	145
2025CR-ME-10	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 3名	146
2025CR-ME-11	データサイエンスに基づく医療工学研究	九州情報大学 荒平 高章	東藤 貢 1名	149
2025CR-ME-12	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	150
2025CR-ME-13	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	151
2025CR-ME-14	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 1名	152
2025CR-ME-15	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	153
2025CR-ME-16	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 1名	154
2025CR-ME-17	高温動作パワーモジュールの接合損傷予測	近畿大学 穴戸 信之	齋藤 渉 1名	155
2025CR-ME-18	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創製	崇城大学 中牟田 侑昌	東藤 貢 4名	156
2025CR-ME-19	腰椎、骨盤、大腿骨から構成される大規模モデルの構築と整形外科バイオメカニクス研究への応用	横浜市立大学 稲葉 裕	東藤 貢 3名	157
2025CR-ME-20	小型微風力発電用柱状物体の3次元周囲流れに関する実験的研究	三重大学 鎌田 泰成	内田 孝紀 3名	158

令和7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
2025WS- 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 4件・28名	応用力学研究所 (対面)	2026. 1. 26- 2026. 1. 27	159
2025WS- CD-2	非線形プラズマ科学研究会2025	核融合科学研究所 小林 達哉	小菅 佑輔 10件・20名	応用力学研究所 (対面)	2025. 12. 15- 2025. 12. 16	163
2025WS- CD-3	プラズマ・地球流体における乱流・波動の計測と理論モデル	富山大学 成行 泰裕	小菅 佑輔 12件・34名	応用力学研究所 (対面・遠隔併用)	2025. 11. 5- 2025. 11. 6	166

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
2025WS- AO-1	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 7件・35名	応用力学研究所 (対面)	2025. 12. 3- 2025. 12. 4	172
2025WS- AO-2	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	日本自動車研究所 森川 多津子	原 由香里 15件・31名	応用力学研究所 (対面・遠隔併用)	2026. 2. 26- 2025. 2. 27	175
2025WS- AO-3	地球観測衛星による大気・海洋・陸面相互作用に関する研究集会	NICT 金丸 佳矢	道端 拓朗 32件・39名	応用力学研究所 (対面・遠隔併用)	2025. 12. 23- 2025. 12. 24	179
2025WS- AO-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 17件・46名	応用力学研究所 (対面・遠隔併用)	2026. 1. 5- 2025. 1. 6	183
2025WS- AO-5	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	神奈川県水産技術センター相模湾試験場 田村 怜子	千手 智晴 5件・46名	応用力学研究所 (対面・遠隔併用)	2025. 9. 9- 2025. 9. 10	189
2025WS- AO-6	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 12件・13名	九重共同研修所 九大山の家	2025. 10. 23- 2025. 10. 26	193
2025WS- AO-7	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・44名	応用力学研究所 (対面)	2025. 12. 4- 2025. 12. 5	200

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
2025WS- FP-1	第23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 57件・102名	応用力学研究所 (対面・遠隔併用)	2026. 1. 7- 2026. 1. 9	246

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
2025WS- ME-1	エピタキシーの基礎学理	徳島大学 鈴木 良尚	寒川 義裕 4件・5名	JR博多シティ 9階会議室3 (対面・遠隔併用)	2025. 7. 8	255
2025WS- ME-2	整形外科と応用力学の融合～骨折力学の新展開～	横浜市立大学 稲葉 裕	東藤 貢 11件・41名	JR博多シティ 9階中会議室 (対面)	2025. 7. 26	256

令和7年度 若手キャリアアップ支援研究一覧（目次）

分野融合				
No.	研究課題	代表者名	所内世話人 協力者数	頁
2024EC-CD-1	流れの可視化技術のプラズマ乱流トモグラフィへの応用	核融合科学研究所 西村 大輝	西澤 敬之 3名	260

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
2024EC-EA-1	Long-term Statistics of Snowfall Microphysical Features for EarthCARE validation activities	National Research Council of Italy, Institute of Atmospheric Sciences and Climate (CNR-ISAC) Non-permanent Researcher BRACCI Alessandro	佐藤 可織 3名	263
2024EC-EA-2	Dynamical Understanding of Troposphere-Stratosphere Interactions During Sudden Stratospheric Warmings (SSWs): Modulation of the Tropical Convection and Tropical Cyclone Activity	Seoul National University postdoc (from March 2024) CHO Hyeong-Oh	江口 菜穂 2名	279

特定研究 1【新エネルギー】

研究テーマ：エネルギー材料開発を加速する材料情報学の開拓（新規）

Pioneering Materials Informatics to Accelerate Energy Materials Development

統括責任者：草場 彰（新エネルギー力学分野）

Integrator : Akira Kusaba (Renewable Energy Dynamics)

概要：計算科学とデータ科学の融合により、新材料の発見が飛躍的に加速すると期待されています。従来のように、各研究者が特定の材料に焦点を当てて合成手法の開発やプロセス設計を行うアプローチでは、新材料の発見に対して研究者の数が不足し、未来に有用な材料が社会実装されずに埋もれていくことになります。

本特定研究では、量子力学、熱統計力学、機械学習に基づいた結晶成長シミュレーター構築の自動化と高度化を2つの柱とし、要素技術の開発を進めます。この高度化には、最新の計測実験とのコラボレーションも不可欠です。これにより、まず自動的に材料開発が進行し、スクリーニングされた特に有望な材料や、さらなる高品質化が望まれる材料のみ、研究者によって高度に解析されるという、材料開発の未来像を目指します。

結晶表面構造予測のための周期パターン列挙と最適化手法の開発

学習院大学計算機センター 久保山哲二

1 目的

半導体結晶成長プロセスにおける表面構造のモデル化は、材料工学における重要な課題の一つである。結晶表面上の原子配置は、材料の電子物性・光学特性・熱伝導性などに直接的な影響を及ぼすため、安定な表面構造を効率的に予測する手法の確立が求められている。しかし、考えうる原子配置の数は周期セルの拡大や構成元素の増加に伴って組合せ的に爆発するため、全候補を網羅的に評価することは現実的でない。

本研究では、原子スケールでの表面構造を効率的に予測するための新しいアプローチとして、無限平面上の周期構造に着目した構造列挙アルゴリズムと、そのアルゴリズムを利用した予測手法の開発を目指している。具体的な研究目的は以下のとおりである。

- 結晶表面における周期構造を効率的に列挙するアルゴリズムの開発
- 離散構造の類似度を定量化する新しい指標の設計と、その類似度計算を高速化するアルゴリズムの実装
- 開発したアルゴリズム群をベイズ最適化による適応的実験計画法に組み込み、結晶成長における表面構造探索に応用すること

これらを通じて、結晶成長プロセスにおける表面構造予測の精度向上と計算効率の改善を実現し、材料開発の効率化に貢献することを目的としている。

2 研究方法

本年度は、上記の研究目的に対して二つの方向から研究を推進した。

2.1 ベイズ最適化と第一原理計算による原子配置探索

六角格子上の原子配置の効率的探索に向けて、ベイズ最適化と密度汎関数理論（DFT）に基づく第一原理計算を組み合わせた手法を開発した。対象系として、グラフェンと六方晶窒化ホウ素（h-BN）の合金系である h-BCN を選定した。h-BCN 系は、導電性のグラフェンと絶縁性の h-BN の中間的な性質を示し、組成だけでなく原子配置によってもバンドギャップが金属的挙動から半導体的挙動まで大きく変化する興味深い材料系である。

探索空間は (3×3) 周期・組成比 h-BN/graphene = 2 の条件下で定義し、18 サイトに B 原子 6 個、N 原子 6 個、C 原子 6 個を配置する全候補数は約 571 万通りに達する。この膨大な候補空間から安定構造を見出すため、原子配置をベクトル表現に変換するエンコーディング手法が鍵となる。本研究では、従来の one-hot エンコーディングに対して、近傍原子の情報とドメイン知識（B-N 結合が安定化に寄与するという知見）を組み込んだ DKNA（Domain Knowledge-assisted Neighbor-Atom）エンコーディングを新たに提案した。DKNA エンコーディングでは、各サイトの原子占有情報に加え、最近傍 3 サイトの元素情報を重み付きで付加することで、次元数を増加させることなく局所的な原子環境の特徴を表現できる。

ベイズ最適化においては、ランダムに選んだ 2 構造を初期データとし、ベイズ線形モデルによるエネルギー予測と Thompson サンプリングによる次候補選定を繰り返すことで、安定構造の効率的な探索を

行った。

2.2 大規模ベクトル集合に対する高速近似最近傍探索

原子配置をベクトル表現に変換した場合、探索空間が拡大するにつれてベクトル集合の規模も急速に増大する。たとえば、h-BCN 系では (3×3) 周期で約 571 万通りの候補があるが、より大きな周期セルや異なる組成を考慮すると候補数はさらに爆発的に増加する。このような大規模なベクトル集合に対して、類似構造の高速検索を行うことは、ベイズ最適化における獲得関数の評価や特徴空間の効率的な走査にとって不可欠である。

この課題に対応するため、二段階フィルタリング手法（ダブルフィルタリング）を開発した。本手法は以下の二段階から構成される。

- **第一段階（スケッチフィルタリング）**：選択されたピボットに基づく短いバイナリスケッチ（16～20 ビット）を用いて、非対称距離の昇順にスケッチを列挙し、候補を n_{c1} 件に絞り込む。ピボットの選定には、焼きなまし法に類似した確率的最適化手法（AIR 法）を用いて識別能力の高いピボット集合を探索した。
- **第二段階（量子化射影フィルタリング）**：次元削減された射影の 1 ビット量子化（QSMAP）を用いて、第一段階の候補から上位 n_{c2} 件を選出する。QSMAP はスケッチ値の順にソートして格納されており、第一段階で選ばれた候補の QSMAP が連続メモリ領域に配置されるため、キャッシュ効率の高い距離計算が可能となる。

最終的に、 n_{c2} 件の候補に対して 8 ビット量子化ベクトルを用いたリランキングを行い、上位 k 件の近傍を出力する。

3 研究結果

3.1 h-BCN 系における安定配置の発見

DKNA エンコーディングを用いたベイズ最適化により、全候補約 571 万通りのうちわずか 714 構造（約 0.0125%）をサンプリングした段階で、探索空間内で最も安定なジグザグ型ストライプ配置を発見した。この配置は、秩序化した h-BN 上に炭素原子がストライプ状に導入された構造であり、混合エネルギーは 0.168 eV/atom（波動関数カットオフ 60 Ry での再計算値）であった。

さらに、異なる周期性の下でアームチェア型ストライプ配置（混合エネルギー 0.157 eV/atom）も発見した。これらの構造はいずれも、同一組成・同一周期の先行研究で報告されたモデル（0.44 eV/atom および 0.28 eV/atom）と比較して格段に安定である。また、B-N および C-C 結合数を最大化するという既知の安定化則とも整合しており、発見された配置の妥当性が裏付けられた。

バンド構造の解析から、ジグザグ型では 1.95 eV、アームチェア型では 1.05 eV のバンドギャップが算出された。これらの値は先行研究で報告された同一組成でのバンドギャップの範囲（PBE レベルで 0.98～1.82 eV）と整合しており、同一組成でも原子配置によって電子物性が大きく異なることが改めて確認された。

主成分分析（PCA）による最適化挙動の解析では、第一主成分（PC1）の絶対値の増加に伴って混合エネルギーが減少する傾向が観察され、DKNA エンコーディングが探索空間内に BN ネットワークの秩序性

と C 配置の特徴を適切に埋め込んでいることが確認された。また、ベイズ最適化の進行に伴い、サンプルが PC1 の絶対値の小さい領域（不安定構造）から大きい領域（安定構造）へと移動していく様子が観察され、ベイズ線形モデルが構造と安定性の関係を適切に捉えていることが示された。

3.2 ダブルフィルタリングによる高速近似最近傍探索

ダブルフィルタリング手法の性能を、SISAP 2025 Indexing Challenge の枠組みで評価した。PUBMED23 データセット（約 2400 万件、384 次元ベクトル）を対象に、16 GB RAM・8 コア CPU の制約下で実験を行った。

20 ビットスケッチ、192 次元 QSMAP（1 ビット量子化）を用い、 $n_{c1} = 300,000$ 、 $n_{c2} = 1,000$ の設定において、 $\text{recall}@30 = 82\%$ を平均遅延 1.23 ms/クエリで達成した。インデックス構築時間は 1 分 10 秒未満であり、総メモリ使用量は約 11.1 GB に収まった。

さらに、4 GB 以下のメモリ制約下でも実用的な性能が維持されることを確認した。4 GB RAM では 384 ビット QSMAP を用いて $\text{recall}@30 > 75\%$ を 6.2 ms/クエリで達成し、2 GB RAM でも 192 ビット QSMAP により $\text{recall}@30 = 73\%$ を 17 ms/クエリで実現した。これらの結果は、本手法が厳しい資源制約下でもスケーラブルに動作することを示している。

4 考察

本研究の二つの成果は、結晶表面構造の探索という目標に対して相補的な役割を果たしている。

DKNA エンコーディングとベイズ最適化の組み合わせは、原子配置のベクトル表現にドメイン知識を組み込むことで、膨大な候補空間から効率的に安定構造を発見できることを実証した。特に、one-hot エンコーディングでは最適化が有効に機能しなかったのに対し、DKNA エンコーディングでは明確な収束傾向が観察されたことは、エンコーディング手法の設計が探索性能に決定的な影響を与えることを示している。

一方、ダブルフィルタリングは、大規模ベクトル集合に対する高速な近似最近傍探索を限られた計算資源下で実現する手法である。h-BCN 系では (3×3) 周期で約 571 万通りの候補配置が存在するが、より大きな周期セルや多様な組成を考慮すると候補数はさらに増大する。このような大規模配置空間において、エンコードされたベクトル間の近傍探索を高速に行うことは、ベイズ最適化における類似構造の参照や、特徴空間内での効率的な探索に不可欠であり、ダブルフィルタリングはまさにこの要求に応える基盤技術として位置づけられる。

現在、次年度に向けた継続研究として、六角格子上の周期的タイリングパターンの群論的分類にも取り組んでいる。具体的には、 6×6 の斜交座標格子上に定義されたトーラス面におけるひし形タイルの配置パターンについて、並進群 $T \cong \mathbb{Z}_6 \times \mathbb{Z}_6$ と二面体群 D_6 の半直積 $G = T \rtimes D_6$ （位数 432）を対称群として考え、全 456 通りのパターンが 7 個の等価類（軌道）に分類されることを示した。この分類において、鏡映変換における向きの変換規則をタイルの占有領域の幾何学的解析から厳密に導出し、解集合が D_6 対称性のもとで完全に閉じていることを証明した。さらに、各等価類の軌道サイズ（12, 72, 144）に基づく配置エントロピーの計算により、高温極限における各原子配置の出現頻度を正しく評価するための重み付け手法を導出した。すなわち、等価類の代表元のみを用いた列挙計算において、軌道サイズによる重み補正を施すことで、対称性を考慮した統計力学的に正しい出現確率を得ることができる。この手法は、結晶成長シミュレーションにおける表面構造の熱力学的安定性評価に直接的に応用可能であり、ベイズ最適化による探索

と組み合わせることで、エネルギー的安定性とエントロピー的寄与の双方を考慮したより現実的な表面構造予測の実現が期待される。

5 研究成果報告

本研究の成果として、以下の 2 件の論文が出版された。

1. N. Higuchi, Y. Imamura, T. Shinohara, K. Hirata, T. Kuboyama, “Double Filtering Using Short and Long Quantized Projections,” *Lecture Notes in Computer Science* (SISAP 2025), vol. 16134, pp. 424–432, 2025. DOI: 10.1007/978-3-031-06069-3_35
2. T. Hara, A. Kusaba, Y. Kangawa, T. Kuboyama, D. Bowler, K. Kawka, P. Kempisty, “Exploration of Stable Atomic Configurations in Graphene-like BCN Systems by Density Functional Theory and Bayesian Optimization,” *Crystal Growth & Design*, vol. 25, no. 16, pp. 6719–6726, 2025. DOI: 10.1021/acs.cgd.5c00703

6 研究組織

研究代表者：久保山哲二（学習院大学計算機センター）

研究分担者：草場彰（九州大学応用力学研究所）

高効率フルカラーLEDの実現を目指した InGaN エピタキシャル成長機構の微視的理解

京都大学 大学院工学研究科 松田祥伸

【研究背景・目的】 窒化物半導体 InGaN を活性層とする発光デバイスの発展は目覚ましく、高効率な青色および緑色 InGaN LED が実現されている。一方、より高 In 組成を必要とする赤色では発光効率が大幅に低下する。その一因として、In リッチ InGaN 活性層の結晶成長中に発生する高密度の結晶欠陥(非発光センター)が指摘されている。In リッチ InGaN 活性層の高品質化に向けて、高温成長と高 In 組成を両立する結晶成長条件を明らかにする必要があるが、In 組成を決定する結晶成長機構の全容は未だ解明されていないために、最適な結晶成長条件の探索は手探りの状況が続いている。そこで、本研究の目的は、成長表面の原子構造と In 組成の相関を明らかにすることで、微視的な観点から In 組成決定機構に迫り、高温成長と高 In 組成を両立する結晶成長条件の解明につなげることである。

【実験方法】 様々な結晶面方位上に成長した InGaN 層の In 組成を実験的に評価すると同時に、結晶成長シミュレーターを用いて、成長表面の原子構造と In 取り込み過程との相関関係を理論的に解析する。これらの結果を互いにフィードバックすることで、原子レベルでの In 組成決定機構の解明を目指す。

【実験結果】

①In 取り込みの面方位依存性の実験的評価：連続的な面方位変化を有する凸レンズ型の GaN マイクロ構造を(0001)面 GaN テンプレート基板上に形成し、その上に有機金属気相成長法を用いて InGaN 量子井戸構造を結晶成長した。その結果、結晶成長条件を適切に制御することで、マイクロ構造の中心付近にある(0001)面上では赤色発光、外側に向かってオフ角が大きくなるにつれて短波長化し、オフ角 10 度前後では青色発光になることを明らかにした。本結果は、In 組成の面方位依存性による幅広い In 組成変調の可能性を示しており、応用上もフルカラー集積に向けた重要な基礎的知見であり、論文投稿中である[成果 2]。

②結晶成長シミュレーターによる理論解析：凸レンズ型マイクロ構造における In 組成の面方位依存性のメカニズム理解に向けて、第一原理計算による理論解析を行った。(0001)微傾斜面における In 吸着原子の挙動を計算した結果、In 吸着原子は N 終端されたステップ端の近傍の原子サイトにおいて安定化する傾向にある、という微視的描像が示唆された。本成果は、InGaN 成長層の In 組成を決定する結晶成長機構の全容解明に向けた重要な知見であり、論文としての出版に至った[成果 4]。

【研究成果報告】

1. Y. Matsuda, M. Funato, Y. Kawakami, Appl. Phys. Lett. 127, 021103 (2025).
2. Yoshinobu Matsuda, Akitoshi Takahama, Mitsuru Funato, Yoichi Kawakami, ACS Photonics, *under review*.
3. Y. Kangawa, A. Kusaba, T. Akiyama, S. Nitta, M. Iwaya, H. Miyake, P. Kempisty, M. A. Chabowska, H. Popova, M. Zaluska-Kotur, Appl. Phys. Express 19, 010101 (2025).
4. H. Nishizawa, Y. Takei, A. Kusaba, P. Kempisty, Y. Kangawa, Surf. Sci. 767, 122930 (2026).

分子レベルの材料情報学による結晶成長シミュレーション

京都大学大学院工学研究科 杉山佳奈美

1. 研究背景・目的

窒化ガリウム(GaN)は、もっとも重要な半導体材料のひとつであり、その薄膜の製造には有機金属気相成長(MOVPE)法が広く用いられている。MOVPE 初期過程では、まず原料ガスであるトリメチルガリウム(TMGa)やアンモニアが、キャリアガスである水素と反応し分解する。そして分解生成物が表面上に吸着し反応する。より高品質で、欠陥のない高純度な材料を得るために、GaN 薄膜の形成過程の理解は重要な課題である。しかし反応機構は多数の分子が関与し非常に複雑で、機構の推定は困難である。そこで本研究では、ひとつの初期構造から多数の構造や経路を自動で発見可能な反応経路自動探索(GRRM)プログラムを用いて、GaN 結晶成長の初期過程における副反応を含めた結晶成長シミュレーションを系統的に実施する。

2. 計算方法

GRRM23 プログラムを用いて、次の気相反応・表面反応について探索と解析を行った。気相反応については、TMGa 1 分子に、アンモニア・水素を数分子加えた系を対象とした。計算レベルは B3LYP/6-31G(d,p)とした。また GaN(0001)面上のアンモニア分子分解反応についても同様に探索を行った。スラブモデルで系を記述し、簡単のため探索の際表面の原子はすべて固定した。汎関数は PBE-D3、基底関数は DZP とした。各探索結果について速度論解析を用いて機構解析を行った。

3. 計算結果・考察

まず気相分子の探索では、2413 の安定構造が含まれる複雑な反応経路ネットワークを得た。また速度論解析から、TMGa のメチル基が順にアンモニアと反応し、最終的に $\text{Ga}(\text{NH}_2)_3$ または $\text{GaH}(\text{NH}_2)_2$ が生成する経路が速度論的に有利であった。そして、その他の中間体や副生成物については速度論的な寄与が小さいことがわかった。また表面反応の計算では、結合組み替えとマイグレーション過程を同時に考慮した解析から NH_3 が表面上で $\text{NH}+2\text{H}$ へ分解する経路が得られた。

4. 研究成果報告

招待講演 2 件

[1] 杉山佳奈美, 固体材料の反応経路ネットワーク構築と解析, レア・イベントの計算科学 第 8 回ワークショップ, 2025 年 11 月, 鳥取.

[2] Kanami Sugiyama, Theoretical Analysis of the Initial Process of GaN Crystal Growth by Using a Systematic Reaction Path Search, APATCC11, 2025 年 4 月, 神戸.

他国内学会 2 件, 国際学会 4 件

5. 研究組織

研究代表者: 杉山佳奈美 (京都大学) 研究協力者: 草場彰、佐藤南帆 (九州大学)

AlGaIn 系 MOVPE 成長の炭素不純物取り込み機構解明のための反応プロセス解析

三重大学 研究基盤推進機構 半導体・デジタル未来創造センター 新田州吾

目的

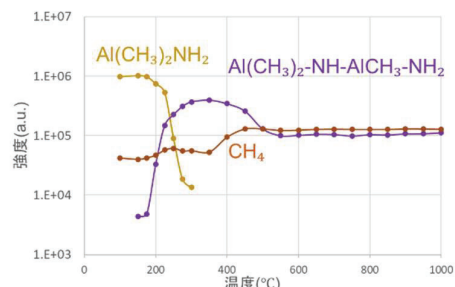
AlN および高 Al 組成 AlGaIn は深紫外 LED、LD 等の光デバイスおよび高信頼性電子デバイスの材料として、既存エネルギーの高効率利用あるいは、新エネルギー技術および通信技術に必要な耐環境デバイスとして期待されている。これらのデバイスに用いられる結晶薄膜は、有機金属気相エピタキシー(MOVPE)法によって成膜されるが、材料あるいは原料固有と MOVPE 成長装置に起因する問題により、物性値通りのデバイス特性を発揮させる事が難しい。本研究では原料ガスの気相反応から結晶基板上の表面反応までの結晶成長メカニズムの解明を目的とする。実験的には超高分解能飛行時間型質量分析装置による気相反応解析技術の構築と反応解析を行う。得られた実験データは成長モデリングの高度化にも貢献し、窒化物半導体 MOVPE 結晶成長プロセスの統一的な理解を目指すことを最終目的とする。

実験方法

超高分解能飛行時間型質量分析装置(TOF-MS, KANOMAX 社製 infiTOF)を用いて、AlN の原料であるトリメチルアルミニウム (TMAI, $\text{Al}(\text{CH}_3)_3$) と NH_3 の気相反応解析を行った。反応炉として内径 26 mm の石英管を用い、30 cm 長のヒータによる加熱を行い、温度による TMAI の反応を質量分析により観察する。キャリアガスとして N_2 、 H_2 、 D_2 (重水素) を用い、圧力は大気圧、総流量は 2000 sccm とし、室温における流速は約 3 cm/sec である。 D_2 は H_2 の同位体分子であり、これを用いることにより、TMAI の反応種の水素が NH_3 由来であるか、キャリアガス由来であるかを識別することができる。反応炉内のガスを内径 1 mm の細い石英管によりサンプリングし、内径 150 μm のシリカ製キャピラリーチューブにより TOF-MS に導入して、分子種の特定と検出強度の温度依存性を分析した。

実験結果

まず NH_3 を導入せずに、キャリアガスが N_2 の場合と H_2 の場合で TMAI の分解温度の比較を行った。その結果、分解温度は N_2 と H_2 で変化がなく 400℃であった。このことから TMAI は H_2 キャリアガスからの H 供給による分解すなわち CH_3 基の離脱が促進されることがわかった。TMGa の場合は顕著な分解温度低下を示したことから、Al-C 結合が非常に強いことが示唆される。次に H_2 をキャリアガスとして TMAI 10.3 $\mu\text{mol/min}$ 、 NH_3 2230 $\mu\text{mol/min}$ を供給して 100℃から 1000℃で分析を行った結果を図に示す。150℃以下において質量 74.056, $\text{Al}(\text{CH}_3)_2\text{-NH}_2$ が支配的に観察され、低温においても TMAI と NH_3 の反応が顕著であることが確認された。150℃～250℃では質量 131.063, $\text{Al}(\text{CH}_3)_2\text{-NH-Al}(\text{CH}_3)_2\text{-NH}_2$ 、質量 115.038, $(\text{Al}(\text{CH}_3)_2\text{-NH})_2$ の複合体が検出された。これらは一部が 400℃程度で減少するものの、一部は 1000℃まで安定に存在することがわかった。これらの反応は TMAI を形成する CH_3 基を CH_4 として放出することで反応、分解が進行することが確認された。

図 TMAI/ NH_3 / H_2 反応種検出強度の温度依存性

考察

実験結果から、TMAI と NH_3 は低温から反応し、Al-N 結合を維持した状態で熱による分解反応が進行することが明らかとなった。Al と N を 2 個ずつ含む複合体分子が観察されたい一方で、本実験の範囲においては Al と N を 3 個以上含むような大きい複合体・重合体は観察されなかった。よって AlN 成長における気相反応は Al-N を 2 つ含む比較的小さい複合体分子が支配的であり、この構造が高温においても安定であることが示唆された。これらの複合体の形成は草場研究室の理論計算においても予測されており、今後の議論により実験結果と理論のすり合わせから、成長メカニズムの解明を進めていきたい。また、観察された複合体が結晶成長表面において成長に寄与しうるか否か、さらには C 取り込みにどの用に影響し得るかについて、今後理論的解析と協力した検討を進めたい。

研究成果報告

1. 古川遼 他, “飛行時間型質量分析計による AlN の有機金属気相成長法における気相反応解析”, 日本結晶成長学会 ナノ構造・エピタキシャル成長分科会 第 17 回ナノ構造エピタキシャル成長講演会, Fr-P18, 利尻富士町総合交流促進施設りふら, 2025/7/18.
2. 新田州吾, “窒化物半導体 MOVPE における原料分子の気相反応解析”, 日本結晶成長学会 ナノ構造・エピタキシャル成長分科会 第 17 回ナノ構造エピタキシャル成長講演会, 招待講演 Fr-I2, 利尻富士町総合交流促進施設りふら, 2025/7/18.
3. S. Nitta, “Gas-phase reaction analysis in nitride semiconductor MOVPE”, Invited, ISPlasma2026, Meijo University, 2026/3/5.

不純物が添加された Ga_2O_3 の電子構造解析

三重大学大学院工学研究科 河村貴宏

研究背景・目的

$\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ は 4.5–4.9 eV の大きなバンドギャップを有し、絶縁破壊電界も約 $8 \text{ MV}\cdot\text{cm}^{-1}$ と高いことから、高耐圧パワーデバイス用材料として期待されている。一方で、キャリア移動度が小さいことや、熱伝導率が低いといった課題も指摘されている。これらの課題を解決するため、結晶性の向上、ドーピング条件の最適化、高熱伝導性基板との接合などの方策が提案されており、実用化に向けた研究が進められている。 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の物性は、不純物や格子欠陥の存在によって大きく変化する。伝導性制御を目的とした不純物ドーパントに加え、空孔や侵入型欠陥といった点欠陥も電子構造や輸送特性に影響を及ぼすため、それらの影響を評価することが重要である。本研究では、第一原理計算を用いて $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 中に存在する各種不純物および点欠陥が電子構造に及ぼす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。 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 完全結晶の格子定数を基準とし、primitive cell を $2\times 2\times 2$ に拡張したスーパーセル (80 原子、図 1 参照) を用いた。 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ には四面体配位および八面体配位の 2 種類の Ga サイトと (Ga(I)、Ga(II))、3 種類の O サイト (O(I)、O(II)、O(III)) が存在し、不純物や空孔の種類によって安定に置換されるサイトは異なる。本研究ではドナーとして Si、Sn、F、またアクセプターとして N を検討対象とし、置換サイトの選定は先行研究を参考にした (表 1 参照)。なお、欠陥の電荷状態は全て中性とした。不純物を 1 個導入した後、セルサイズを固定したまま原子座標のみを最適化し、バンド構造および状態密度 (Density of states、DOS) の解析を行った。その際、実験値と比較可能なバンドギャップを再現するため、DFT+U 法による補正を適用した。Ga 3d 軌道および O 2s 軌道に対してそれぞれ $U_{\text{Ga-3d}} = 13 \text{ eV}$ 、 $U_{\text{O-2s}} = 7.5 \text{ eV}$ の U パラメータを設定した。この条件下で得られた $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の Γ 点におけるバンドギャップは約 4.8 eV となり、報告値と良く一致した。

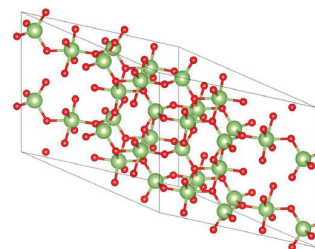


図 1 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の計算モデル。緑丸が Ga 原子、赤丸が O 原子。

表 1 不純物の置換サイト

不純物	置換サイト
Si	Ga(I)
Sn	Ga(II)
F	O(I)
N	O(II)

結果および考察

図 3 に、 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 完全結晶、Si 不純物、Sn 不純物、および F 不純物を含む各モデルのバンド構造と状態密度を示す。縦軸はフェルミレベルを 0 eV としている。Si、Sn、F を含む場合、フェルミレベルが伝導帯下端近傍に位置しており、これらの不純物がドナーとして機能していることが分かる。これらの結果に基づき、バンド曲線の曲率から電子有効質量を求めた結果を図 4 に示す。なお、有効質量の異方性を評価するため、a、b、c 軸方向ごとの値を評価した。その結果、完全結晶と比較して Sn 不純物の導入により電子有効質量は約 4% の増加が確認されたが、その変化は比較的小さい。一方、Si および F 不純物による影響はほとんど無かった。次に、図 5 に N 不純物を含む場合のバンド構造と状態密度、およびホール有効質量の結果を示す。フェルミレベルおよび価電子帯上端近傍に、N 不純物由来のエネルギー

準位が形成されていることが確認された。完全結晶におけるホール有効質量は顕著な異方性を示し、b 軸方向が最も大きく、次いで a 軸、c 軸方向の順であった。一方、N 不純物を含む場合には異方性が大きく変化し、a 軸および c 軸方向では有効質量が増加したのに対して、b 軸方向では有効質量が大きく減少し、完全結晶で約 20 であった値が 0.646 まで低下した。

したがって、Si、Sn、および F 不純物は $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の電子有効質量に与える影響が比較的小さいのに対し、N 不純物は価電子帯近傍の電子構造を大きく変化させ、ホール有効質量およびその異方性に顕著な影響を及ぼすことが明らかとなった。

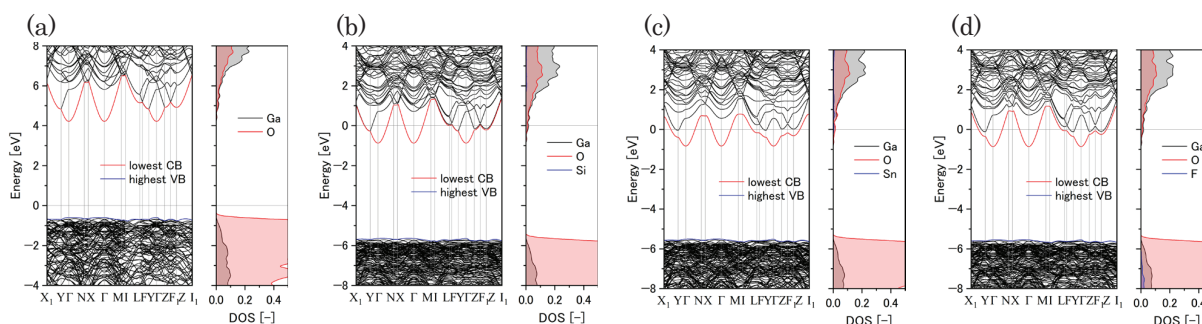


図3 バンド構造と状態密度: (a) $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 完全結晶, (b) Si 不純物, (c) Sn 不純物, (d) F 不純物. バンド図中の赤色および青色の線は、それぞれ伝導帯 (CB) の最下位バンドおよび価電子帯 (VB) の最上位バンドを示している。

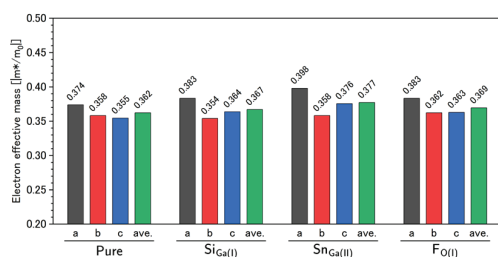


図4 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の電子有効質量

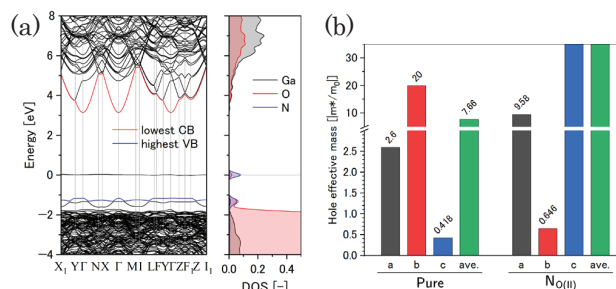


図5 (a) N 不純物を含む $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ のバンド構造と状態密度、および(b) ホール有効質量

研究成果報告

- 1) T. Kawamura, T. Akiyama, A. Kusaba, Y. Kangawa, First-Principles Calculations of Effective Mass of Impurity-Doped Ga_2O_3 , 21st International Conference on Crystal Growth and Epitaxy, H27
- 2) 河村 貴宏, 秋山 亨, 草場 彰, 寒川 義裕, $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 中の点欠陥による電子構造への影響, 第 86 回応用物理学会秋季学術講演会, 10a-N105-5
- 3) 河村 貴宏, 秋山 亨, 草場 彰, 寒川 義裕, $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 中の点欠陥に起因する電子構造変化, 第 54 回結晶成長国内会議, 11p-B14

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・准教授)

所内世話人 草場 彰 (九州大学 応用力学研究所・准教授)

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 寒川義裕 (九州大学 応用力学研究所・教授)

実験と計算の協調による $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$ 混晶 MOVPE 成長条件の解明

東京農工大学大学院工学研究院応用化学部門 熊谷義直

・ 目的

$\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 結晶は大きなバンドギャップ (4.5 eV) に起因する 8 MV/cm という炭化ケイ素 (SiC) や窒化ガリウム (GaN) の数倍の絶縁破壊電界強度を有している。そのため低損失な次世代パワーデバイス作製用結晶として期待されている。特に、 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ よりバンドギャップが大きい $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$ との混晶 $\beta\text{-(Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$ と $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 界面に発生する二次元電子ガスを用いる高周波・高出力トランジスタの開発が注目されている。よって種々の手法で結晶成長が試みられている。

結晶成長の見地からは、その量産性・スループットの高さから、他材料系でも多用されている有機金属気相エピタキシー (Metalorganic Vapor Phase Epitaxy: MOVPE) 法による $\beta\text{-(Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$ 混晶成長技術の確立が急務である。しかしながら、 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ および $\beta\text{-(Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$ の MOVPE 成長の研究は最近になって始まったばかりである。その理由はキャリアガスに水素 (H_2) を用いることができない酸化物の MOVPE では、Ga および Al の有機金属化合物の分解が速やかには進まず成長層が炭素で汚染されることへの懸念と、有機金属化合物と酸素の激烈な反応により制御が不可能なのではといった懸念にあった。そこで Ga および Al の有機金属化合物の分解・燃焼メカニズムの調査と理解が非常に重要となっている。

・ 実験方法

アルゴンをキャリアガスとする減圧ホットウォール MOVPE 装置の基板直上部から差動排気でガスをサンプリングし、高分解能飛行時間型質量分析計で解析した。炉内圧力は 20 Torr とし、Al 源としてトリメチルアルミニウム (TMAI) を 48.4 $\mu\text{mol/min}$ で供給した。基板部の温度は 200 – 1100°C とした。 $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$ 結晶を成長を試みる場合には、O/Al 供給比 10 – 500 となるように酸素分子 (O_2) を供給できるようにした。

・ 実験結果

まず Ar キャリアガスで TMAI のみを炉内へ供給し、その分解メカニズム解明を実施した。TMAI の熱分解は 500°C 以上で生じたが、二量体関連のピークは強度は減少するものの 1000°C 付近まで観測された。また、分解に伴い生成される炭化水素としてはメタン (CH_4) が主であった。また、実験を繰り返し実施する中、石英製の原料供給ノズル内に光沢のある黒色結晶が堆積し、最終的に石英と堆積物の熱膨張係数差によりノズルが割れてしまった。よって、 Al_2O_3 結晶成長の検討はできなかった。

・ 考察

上記の TMAI の熱分解挙動は、既に解析を終えている Ga 源であるトリメチルガリウム (TMGa) の分解 [Y. Terauchi and Y. Kumagai et al., Jpn. J. Appl. Phys. **64**, 125503 (2025)] とは全く挙動が異なっていた。TMGa の場合、二量体のピークは測定されず、575°C 以上で急激に熱分解が生じ、メチルラジカルの均等開裂とそれに続くエタン生成と脱水素反応でエチレンとメタンが形成される。また、ノズル内に堆積物は生じない。TMAI では末端メチル基が均等開裂し生成されるメチルラジカルが二量体を架橋するメチル基の水素を奪ってメタンとなり、その過程で二量体が Al の炭化物になっていくものと推察される。よって、 $\beta\text{-(Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$ 混晶の MOVPE 成長の Al 源としては、二量体を形成せず、 β -水素脱離により自己分解するトリエチルアルミニウム (TEAI) が適していると考えられる。現在、その分解メカニズム解明を行っている。その結果を受け、今後、研究協力者、所内世話人らと共同で炉内反応の熱力学解析モデルを構築し、混晶成長の気相－固相分配関係を理論と実験の両面から検討する。

・ 研究成果報告

令和 7 年度は装置の構築、予備実験、データ解析がメインで学会・論文発表は令和 8 年度以降に予定している。

・ 研究組織

熊谷義直 (東京農工大学大学院工学研究院 応用化学部門)
富樫理恵 (上智大学 理工学部 機能創造理工学科)
草場彰 (九州大学 応用力学研究所)

特定研究 2 【分野融合】

研究テーマ：流体・プラズマにおける非平衡現象と数理モデリング（新規）

Mathematical modeling of non-equilibrium phenomena in fluids and plasmas

統括責任者：○小菅 佑輔（核融合力学分野）

大貫 陽平（地球環境力学分野）

Integrator : Yusuke Kosuga (Nuclear Fusion Dynamics)

Yohei Onuki (Earth Environment Dynamics)

概要：自然界における多くのシステムでは外部駆動が存在し、しばしば平衡状態からかけ離れた遠非平衡状態にあります。太陽からのエネルギー注入のある惑星流体や、外部加熱が存在する核融合プラズマなどは典型的な非平衡系の例です。このようなシステムの振る舞いを理解するためには、現象の観測に加え、その背後にある物理過程を理解するための数理モデル研究が必要不可欠です。

本特定研究では、流体やプラズマ、より広くは連続媒質（アクティブマター等）を対象とし、個別に展開されている研究を互いに共有することで、両者に共通する非平衡系に関する学理を追求し、環境変動予測や核融合エネルギー開発などの応用のための確かな基盤を築くことを目指します。

中規模渦-風下波の相互作用に伴う中規模渦の減衰過程の数値シミュレーション

松田 拓朗

北海道大学 地球環境科学研究所

1. イントロダクション

南極周極流 (ACC) は東西方向に境界を持たず、三大洋間のトレーサー輸送を担っている。そのため、ACC の流量を決定するメカニズムは精力的に議論されてきた。近年の研究から、ACC の流量は海底摩擦の増加とともに増大することが示唆されている。Marshall et al. (2017)は、この直感に反する性質は渦の散逸が原因であると考察した。彼らは運動量バランスのために渦活動を一定値に維持する必要があると考えた。摩擦を増加しても渦活動を一定に保つためには傾圧エネルギー変換を増加させる必要がある。傾圧エネルギー変換は流量が大きいほど増加する。これらのことから、摩擦が増加した場合には運動量バランスのためにより大きな流量が必要である。そのため、中規模渦の散逸過程を理解することは ACC の流量を決定する上で重要である。

しかし、この解釈には不十分な点がある。渦エネルギーが全て傾圧変換によって生成されているという仮定である。実際の ACC では順圧変換も存在しており、無視できることは自明ではない。しかし、これまでの研究では摩擦と ACC のエネルギーバランスの関係は調べられていなかった。

このような状況を踏まえて、本研究では数値実験に基づき、摩擦と渦エネルギーの関係を調べて、渦の散逸過程が果たす役割を明らかにする。

2. 手法

MITgcm を用いて、ガウシアン型のリッジを持つ β 面上の Reentrant Channel を作成して、線形摩擦係数と傾圧エネルギー変換の関係を調べる。本研究では傾圧エネルギー変換を擾乱による鉛直密度フラックスで診断する:

$$\text{VEDF} = -g\overline{\rho'w'}.$$

・'は時間平均からの偏差として定義した擾乱項を表す。

さらに、順圧エネルギー変換は

$$\text{BTR} = \rho_0 [-\overline{u'u'} \cdot \nabla \bar{u} - \overline{v'u'} \cdot \nabla \bar{v}]$$

として定義した。渦エネルギー生成は傾圧エネルギー変換と順圧エネルギー変換の和で定義される。

3. 結果

数値モデルの中で摩擦係数を変えて、渦エネルギー生成における傾圧変換の割合を調べた。Figure 1 に示すように、高摩擦域では傾圧変換が渦エネルギー生成をほとんど説明しており、先行研究の仮定が成立している。一方、低摩擦域では順圧変換の寄与が無視できず、傾圧変換の割合は 70 % 以下に留まっている。これは、摩擦の減少に伴い定在蛇行とそれに伴う水平シアが強化されて順圧不安定が生じるためである。そのため、低摩擦域において先行研究のメカニズムは成立しない。中間的な摩擦域では、摩擦の増加とともに傾圧変換の割合が増加しており、渦の減衰過程は摩擦に敏感に応答することを示唆する。

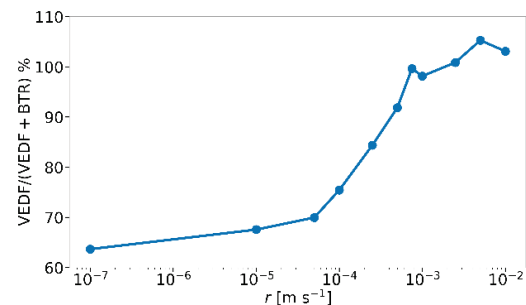


Figure 1 摩擦係数と渦エネルギー生成における傾圧変換の割合の関係。

4. 考察

本結果は渦の減衰過程は摩擦の強さに依存することを示唆する。特に、現実的な摩擦域は傾圧変換の寄与率が摩擦に強く依存している。そのため、海底摩擦を作る要因の一つである中規模渦と風下波の相互作用過程を陽に表現したモデルを作成して、中規模渦の減衰過程をより詳細に調べる必要がある。

金星大気波動のモデリング・解析

慶應義塾大学法学部 杉本憲彦

目的：金星は、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 日である。また大気部分は、二酸化炭素を主成分とし、約 92 気圧にも達し、地球と大きく異なっている。高度 45-70km 付近には厚い雲層が全球を覆っていて、大気循環の全貌は明らかになっていない。さらに、大気全体が自転を追い越す方向に約 4 日周期(～100m/s)で回転し、「スーパーローテーション」と呼ばれるが、その成因は解明されておらず、地球流体力学的にも興味深い。2015 年に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。これらの波動の 3 次元構造や働き、理論的解釈が急務である。本研究では、モデル、観測、データ同化、理論を駆使して、金星の大気波動の解明を目的にする。

方法：これまでに我々は、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)の開発に成功した。本研究では、①あかつき観測データを AFES-Venus に同化し、あかつきで観測される様々な時空間スケールの金星大気波動を再現する。②AFES-Venus 単体での高解像度計算で、大気重力波を含めたより細かいスケールの波動現象の再現を試みる。③数値モデルで得られた様々な波動について、3 次元構造や働きについて解析し、その理論的な解釈を行う。④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波動を疑似観測データとして同化する観測シミュレーション実験(OSSEs)を行い、同化で波動を再現可能な観測条件の提示や、新規観測ミッションの立案も行う。

結果：2025 年度は、あかつき紫外画像から得られる風速の同化を、様々な観測期間に拡張して試行した。そして、各期間の風速が改善されるのみならず、波動の再現についても、その可能性を見出し、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を調べた結果を論文化し、投稿中である。さらに、Bred Vector を用いた、金星大気擾乱のエネルギーサイクルを調べた成果が、論文として出版された。

考察：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。我々の同化結果は、様々な期間の風速の時間変動だけでなく、波動の再現にも成功している可能性があることから、今後はスーパーローテーションの時空間変動に対する波動の働きに関する解析を進められると考えている。さらに、Bred Vector を用いたエネルギー解析では、東西平均することなく、ローレンツエネルギーサイクルに対応した、エネルギー変換の定量的評価が可能になる。特に、熱潮汐波がもたらす東西方向の温度構造によって、朝側半球で傾圧・傾圧エネルギー変換が大きくなることを世界で初めて見出した。将来的には、ロスビー波・ケルビン波の結合不安定との関連性の調査が重要になると考えられる。

研究成果報告：

- Liang, J., N. Sugimoto, and T. Miyoshi, **Unveiling Energy Conversions of the Venus Atmosphere by the Bred Vectors**, *Geophysical Research Letters*, Vol.52, (2025), e2024GL112663, doi:10.1029/2024GL112663.
- Ando, H., K. Noguchi, T. Imamura, M. Takagi, N. Sugimoto, Y. Matsuda, S. Tellmann, M. Pätzold, R. K. Choudhary, and M. Antonita, **Vertical propagation of Venusian thermal tides above and below clouds revealed by Akatsuki radio occultation**, *Journal of Geophysical Research: Planets*, Vol.130, (2025), e2025JE009165, doi.org/10.1029/2025JE009165.

他に投稿中論文 4 報、招待講演 6 件（うち 1 件は 2026 年 2 月予定）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

データ駆動科学的手法を活用した乱流非線形過程のモデリング

日本大学生産工学部 佐々木真

背景・研究概略

磁場閉じ込め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重要な問題である。本研究では、磁場閉じ込めプラズマにおける「時空間ダイナミクス」に着目した研究成果を紹介するとともに、近年発達してきた人工知能を用いたシミュレーション特性についても成果を述べる。

研究成果

磁場閉じ込めプラズマにおける乱流は、しばしば突発的輸送を引き起こし、その素過程の理解や制御は重要な問題となっている。本研究では、基礎プラズマを模擬する3次元乱流シミュレーションを実施し、ケルビン・ヘルムホルツ型乱流が支配的となる乱流飽和状態に着目した。この飽和状態において、局所的な粒子輸送の確率密度関数を評価すると、大きくガウス分布から逸脱しており、強い突発性を伴うことを確認した。その突発的粒子輸送を駆動する揺動構造を特定すべく解析を行なった。特異値分解を多重場に拡張し、更に階層型クラスタリングを併用する事で[1]、乱流場を、背景・帯状流・コヒーレント揺動・非コヒーレント揺動の4つの自由度に系統的に縮約した。これらの全ての組み合わせが駆動する輸送を評価したところ、非コヒーレント揺動が突発的輸送を駆動していることを突き止めた[2]。

次に、物理情報組み込みニューラルネットワークを用いた多次元シミュレーションの計算時間特性の調査を行なった。核融合プラズマを始めとする高温プラズマでは、粒子間の衝突が効かず、波動粒子相互作用が顕著となる6次元のブラソフ方程式を解くことが必要となる。しかしながら、6次元位相空間をプラズマ全域に渡り、閉じ込め時間程度の計算をすることは、現在最高峰のスーパーコンピュータを用いても非常に困難である。そこで、ここではニューラルネットワークを使用するシミュレーション手法に着目した。この方法は、空間全域をメッシュに切る必要がなく、高次元になったとしても、計算量が空間の次元数の冪にスケールしない特性がある。本研究では、拡散方程式を例に取り、空間次元数を1から6次元まで変化させ、各次元における計算時間を差分法と比較した。5次元以上では差分法に比べ高速に計算可能であることを示した。

[1] A. Okuno, M. Sasaki, Phys. Plasmas, 32, 032502 (2025).

[2] T. Kodahara, M. Sasaki, +, Plasma Phys. Control. Fusion, 67, 065012 (2025).

[3] K. Wada, M. Sasaki, K. Yano, Plasma Fusion Res. 20, 1203047 (2025).

直線磁化プラズマ装置 PANTA を利用した 高波数乱流が支配的な非平衡プラズマに関する実験研究

名古屋大学大学院工学研究科 河内裕一

目的：磁化プラズマ中における乱流が引き起こす非線形現象の理解は、核融合炉における輸送制御の高度化や、磁気圏・宇宙プラズマのダイナミクス解明に不可欠な基礎課題である。近年、研究代表者を中心とした独自の実験により、従来は観測が困難であった、空間スケールがイオンラーマー半径よりも小さい高波数乱流（サブイオンスケール乱流）の実験的観測に成功した[1-4]。本研究では、これら高波数乱流に内在する非線形現象について、実験的手法を用いてその基礎物理過程を詳細に解明することを目的とする。

実験方法：本研究で対象とする高波数乱流は、従来 PANTA で研究されてきた乱流と比べて時間スケールが短く、既存の計測器では時間応答が不十分であるという課題があった。具体的には、対象とする高波数乱流の周波数帯域が数十～数百 kHz であるのに対し、乱流に伴う電場揺動を評価するための浮遊電位計測の時間応答は約 10kHz にとどまり、乱流駆動粒子輸送を正確に評価できなかった。この応答遅れは、プラズマと計測器の間のインピーダンス(抵抗)と同軸線の寄生容量により、ローパスフィルタ形成するために、引き起こされる。今年度はこの課題を解決するため、真空内部にオペアンプを配置してプラズマと計測器の間のインピーダンスをオペアンプの小さい出力インピーダンス変換を行う高速浮遊電位計測器を新たに開発した。九州大学直線磁化プラズマ装置 PANTA において高波数乱流実験を実施し、本計測器を用いた性能評価およびプラズマ計測を行った。

実験結果: 開発した計測回路の周波数特性を示す Bode 線図を図 1 に示す。従来 PANTA で使用してきた計測回路では、ゲインが約 100 kHz 付近から低下し、位相は約 10 kHz から遅れが生じることが確認された。この位相遅れは、当該周波数帯における乱流駆動輸送の正確な評価を困難にする要因であった。一方、新たに開発した高速浮遊電位計測回路では、従来回路と比較して約 100 倍の周波数帯域が実現されている。特に、位相特性が 1 MHz までほぼフラットである点が大きな特徴であり、これにより数百 kHz 帯までの乱流駆動粒子輸送の評価が可能となった。九州大学直線磁化プラズマ装置 PANTA における初期実験により、従来回路と比較してゲインおよび位相特性の顕著な向上が確認された。今後は、本計測器を用いた実プラズマ実験データの詳細解析を進める予定である。

研究成果報告

- [1] Y. Kawachi et al., Scientific Reports **12**, 19799 (2022)
- [2] Y. Kawachi et al., Plasma Fusion Research 65, **28**, 115001 (2023)
- [3] Y. Kawachi et al., Physics of Plasma **31**, 044502(2024)
- [4] Y. Kawachi et al., Plasma Fusion Research **19**, 1201031 (2024)
- [5] Y. Kawachi et al., Plasma Fusion Research under review

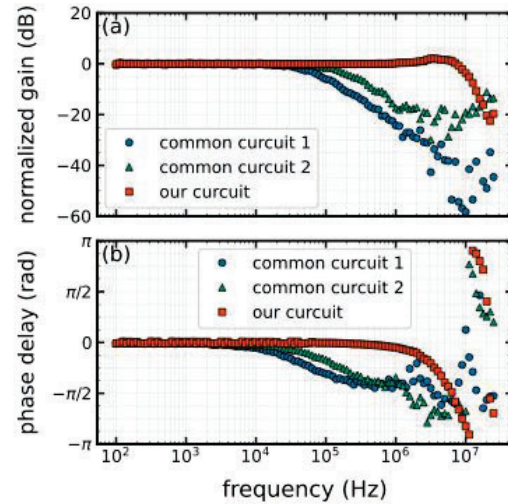


図 1：ゲインと位相遅れの周波数特性 (Bode 線図)。従来回路は丸と三角、新規開発した回路は四角で指定している

The role of symmetries in fluid and plasma systems

Julian Mak

Hong Kong University of Science and Technology, and
UK National Oceanography Center

The present problem is motivated by the work of David et al (2022), who identified that the two-layer quasi-geostrophic system naturally possesses discrete symmetries (in combinations of Charge, Parity and Time) akin to those symmetries in quantum systems, and investigated the consequences imposed by the symmetries on the resulting solutions of the associated linear baroclinic instability problem. Given a natural interpretation of baroclinic instability (and more generally shear instabilities) in terms of interaction Counter-propagating Rossby Waves, the present work considers the associated consequences of discrete symmetries on the resulting wave interactions, initially for baroclinic systems, but eventually for the wider class of shear instability problems.

To kickstart the project, Julian Mak made a research visit to RIAM in September 2025, to coincide with the 2025 AAPPs-DPS event in Fukuoka where Julian Mak was a plenary speaker for one of the sessions. The trip involved discussing with Prof. Kosuga and Onuki on laying the foundations into more general collaboration, but also specifically in formulating the Phillips two-layer quasi-geostrophic system in terms of Counter-propagating Rossby Waves variables, resulting in a dynamical system where the variables of interest are the wave couplet amplitudes and phases. Amplitude-phase equations analogous to the work of Mak et al (2024) for the sloped Eady problem were derived, and the problem of normal mode growth and transient non-normal mode growth, with a particular focus on phase shifts between the wave couplets, is currently under consideration by Julian Mak as well as his MPhil student Jiahui Yin. It is anticipated there will be two articles attributable to the funded project to be submitted by the end of the 2026 calendar year. Further work on this front involving stratified shear instabilities, related instabilities problems in magnetohydrodynamics/plasma systems, and more general considerations of general wave-action variables and exploring the role of discrete symmetries in the Hamiltonian formulations of the analogous continuum systems is being considered and will be pursued in due course.

地球外核最上部を伝播する磁気流体波の連続スペクトル減衰

神戸大学 大学院システム情報学研究所 中島涼輔

目的 地球外核内部を伝播する磁気流体波における連続スペクトル減衰の重要性を検討することを目的とする。地球の固有磁場は、外核を満たす液体金属の流れにより時間変化していると信じられている。特に、外核最上部には安定成層がある可能性が指摘されており、その層に沿って伝播する遅い磁気 Rossby 波は数年から数十年周期をもつ地球磁場変動の原因として重要視されている。そのような波動の数値モデルと実際に観測される磁場変動を比較すれば、地球内部の様子を推定することが可能である。特に、外核最上部安定成層に関する知識は、地球ダイナモはもとより地球の熱・化学進化史を理解する上でも重要な要素である。一方、研究代表者の最近の研究 (Nakashima & Yoshida, 2024, *Geophys. Astrophys. Fluid Dyn.*) により、最上部安定成層を伝播する遅い磁気 Rossby 波は、これまでの研究で想定されてきたような固有モードとしては存在できない可能性が指摘されている。これは、遅い磁気 Rossby 波が Alfvén 波連続スペクトルに同化し、連続スペクトル減衰を生じることに起因する。これまでの地球内部物理学では Alfvén 波連続スペクトルにあまり関心を向けてこなかったため、このような連続スペクトル減衰が地球磁場変動に及ぼす影響を新たに評価し、地球内部推定を改めなければならない可能性がある。

方法 外核最上部安定成層を伝播する磁気流体波における連続スペクトル減衰を理解する第一段階として、その重要性を定性的に評価するため、本研究ではなるべく簡単化された方程式系を用いて調査を行う。具体的には、回転球面上の水平 2 次元非圧縮理想磁気流体の方程式に対して、東西方向磁場を背景場として与え線形化することにより、最上部安定成層の磁気流体波をモデル化する。本研究では特に、遅い磁気 Rossby 波の共鳴減衰に対応する quasi-mode を調べることで、連続スペクトル減衰の重要性を評価する。ここで quasi-mode とは、連続スペクトルの存在により厳密な意味での固有モードとしては存在できないが、指数関数的に減衰しながら固有モードに似たふるまいを示す括弧付きの「モード」のことである。Nakashima & Yoshida (2024) では、従属変数の緯度依存部分に対して Legendre 陪多項式展開を用い、固有モードを数値的に計算している。quasi-mode を調査するためには、既存のプログラムコードに対して以下の 2 点を変更する必要がある。

- (1) まず、緯度方向座標を複素数に拡張し、背景場分布を表す関数を解析接続する。その上で北極から南極までの計算領域を複素緯度平面上の曲線へと変形し、その曲線上に対して固有値問題を解く。この方法により、第 2 Riemann 面上に存在する quasi-mode に対応する極を数値的に求めることが可能となる (例えば、Crawford & Hislop, 1989, *Ann. Phys.*)。
- (2) 上記の方法では変形された複素緯度を用いて方程式を座標変換するため、Legendre 陪多項式はもはや都合の良い直交多項式ではなくなる。そのため、離散化手法を Chebyshev 多項式を用いた選点法へと変更する。

結果 Fig. 1 に背景磁場分布が $B_\phi \propto \sin \theta \cos \theta$ 、東西波数が $m = 2$ 、Lehnert 数が $\alpha = 0.3$ の場合の固有値 (無次元角周波数) を示す。ここで、 θ は余緯度、 ϕ は経度である。また、複素緯度平面上での計算領域の変形のさせ方は、東進波 (角周波数 > 0) の因果律が満たされるように、 $\mu = s + is(s^2 - 1)$ と設定している (ここで、 $\mu = \cos \theta$ であり、 $-1 \leq s \leq 1$ が計算領域である)。Fig. 1 から、座標変換により変形された Alfvén 波連続スペクトルに加え、quasi-mode の極も計算されていることが確認できる。さらに、様々な Lehnert 数に対して同様の計算を行い、角周波数と Lehnert 数の関係を表すグラフにおける quasi-mode のブランチを追跡した。その結果、quasi-mode のブランチの位置は Nakashima & Yoshida (2024) で指摘された「blue upward wedges」の位置と一致することがわかった。「blue upward wedges」は、Alfvén 波連続スペクトルの中でも磁場エネルギーが運動エネルギーに比べ優勢な範囲であり、遅い磁気 Rossby 波に近い特徴をもつ。

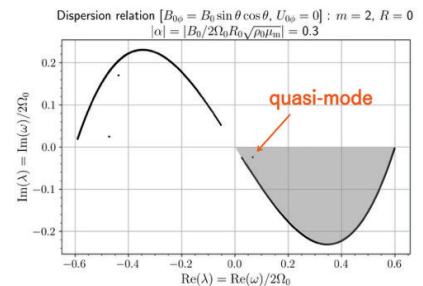


Fig. 1: 背景磁場分布 $B_\phi \propto \sin \theta \cos \theta$ 、東西波数 $m = 2$ 、Lehnert 数 $\alpha = 0.3$ の場合の固有値。縦軸と横軸は、それぞれ無次元角周波数の虚部と実部を表す。計算領域の変形のさせ方は、東進波の因果律が満たされるものを選んでいる。

考察 Nakashima & Yoshida (2024) では、外核最上部安定成層を伝播する遅い磁気 Rossby 波は固有モードとして存在できないと結論づけている。しかし、本研究により、それらの波動は quasi-mode としてある程度の時間、固有モードのように存在することが示された。地球磁場変動との比較を行う場合は、より定量的な議論を行うため磁気流体浅水系での計算が望まれるが、本研究と同様の方法を用いて quasi-mode を計算できると考えられる。今後は方程式系の拡張を行うとともに、強制を含んだ数値シミュレーションを実行することで、どのように波が励起され、どのような減衰挙動を示すのかを調べる予定である。

研究成果報告 中島涼輔, 回転球面上の 2 次元非圧縮 MHD 波の quasi-mode, 非線形プラズマ科学研究会 2025, 九州大学応用力学研究所, 2025 年 12 月

研究組織 中島涼輔 (研究代表者)、大貫陽平 (所内世話人)

揺らぎの熱力学に基づくエルニーニョ現象の予測限界の解析

海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門 安田勇輝

【目的】

今年度の目的は、熱帯太平洋における気候変動である「エルニーニョ・南方振動 (ENSO)」の季節性を、確率的力学モデルと揺らぎの熱力学の枠組みに基づいて理解し、来年度以降に本格的に行う「予測限界の理論的評価」につながる基礎的な結果を得ることである。特に、今年度は複雑な数値モデルを直接扱うのではなく、最小限の変数で構成される低次元モデルを用いて、季節性と不確実性の関係を整理することを目的とした。ENSO のピークが冬季に集中する傾向や夏季に予測が困難となる性質が、どのような力学的・統計的構造から生じるのかを理論的に調べ、来年度に多変数の力学モデルへ拡張する際の評価指標と手順を整備する準備段階として位置づけられる。

【実験方法】

今年度は、観測データに基づいて推定された低次元モデルを対象とし、その確率的時間発展を理論的に解析した。具体的に、系の季節変動を取り入れたうえで長時間の数値積分を行い、アンサンブル平均や分散などの統計量の時間変化を評価した。さらに、揺らぎの熱力学に基づく不等式を用いて、不確実性の時間変化と不可逆性との関係を明らかにした。

【実験結果】

低次元モデルにおいて、季節変動を与えた場合には統計量に明瞭な年周期構造が現れることを確認した。特に、不確実性の増減が特定の季節に抑制される傾向が見られ、実際に観測される ENSO の季節性と整合的な振る舞いが再現された。また、不確実性の時間変化が不可逆性と結びついており、その関係が理論的不等式によって上から制約されることを示した。これにより、季節性が単なる太陽などの強制の変動だけでなく、確率過程としての時間発展の構造と関係している可能性が示唆された。

【考察】

本年度の成果は、ENSO の季節性を、モデルの詳細に依存しない一般的な制約として捉え直すための基礎を与える。特に、不確実性の変化が不可逆性とトレードオフの関係を持つという視点は、将来的に多変数モデルや大規模データ解析へ拡張する際の理論的指針となる。今年度は低次元モデルに限定したが、得られた理論的結果は、多変数モデルや多様な観測データを用いた解析へ自然に拡張可能であると考えられる。来年度は、本年度に整備した理論枠組みと評価手順を、気候モデル出力に基づく多変数モデルへ適用し、空間的構造を含む予測限界の定量評価へと発展させる予定である。

【研究成果報告】

本年度の成果は「A Stochastic-Thermodynamic Constraint on the Seasonal Phase Locking of the El Niño-Southern Oscillation」として取りまとめ、査読付き国際論文誌 *Journal of Climate* へ年度内に投稿予定である。

【研究組織】

木戸晶一郎 (JAMSTEC) がデータ整備やデータ解析を担当し、大貫陽平と来年度から加わる予定の漁野光紀が理論解析を担当し、安田が統括を行っている。来年度もこの体制で継続予定である。

海洋近慣性波の包括的理解に向けた力学・モデリング研究

東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻 伊地知敬

目的

地球の自転を復元力とする近慣性波は、海洋内部に普遍的に存在し、強い流速鉛直シアを伴うことで乱流混合を引き起こし、熱や溶存物質の輸送を通じて生態系や気候変動を含むあらゆる環境形成に重要な役割を果たすと考えられている。海洋中の近慣性波の駆動源は多岐にわたり、代表的なものとして、表層の吹送流や波浪、深層を伝播する内部潮汐波、海底近傍の山岳波が挙げられる。しかしながら、これらの駆動源からの近慣性波の励起・伝播・散逸過程にはそれぞれ未解明な点が数多く残されており、海洋中の近慣性波を包括的に理解するにはほど遠いのが現状である。本研究では、所内世話人の大貫を中心として開発を進めている、近慣性波に関わる物理素過程の表現に特化した近似方程式系（縮約モデル）の完成に向けて、研究代表者・研究協力者がそれぞれ個別に研究している深海励起源近傍・表層の波浪に由来する近慣性波の知見を持ち寄り、現段階での縮約モデルの検証と改良を行う。

方法・結果

深海パート（研究代表者担当）

まず、これまでに伊豆・小笠原海嶺において取得した流速・密度の全水深にわたる連続上げ下ろし観測データから、約 24 時間周期の近慣性波成分を調和解析により抽出し、その波数や伝播特性を調べた。観測データから抽出した近慣性波は複雑な位相構造を持っていた。鉛直モード展開・回転スペクトル解析の結果、観測前に通過した大気擾乱に由来する下方伝播する鉛直低次モード成分、半日内部潮汐とのパラメータ共振に由来する上下両方向に伝播する鉛直高次モード成分、さらに、上方伝播する中間モードが重ね合わさっていることがわかった。この上方伝播する中間モードと上下両方向に伝播する高次モードが重なる深さ 800m 付近で乱流が強化されることも、並行して取得した乱流フロートによる観測データから明らかになった。観測された上方伝播する中間モードの近慣性波は、上方伝播する内部潮汐および下方伝播する鉛直低次モードの近慣性波と位相同期しており、従来見逃されてきた大気擾乱と潮汐との相乗効果によって、深海乱流が強化される可能性を示唆している。この成果は国際誌に掲載されている。

このように観測された大気擾乱起源の近慣性波と内部潮汐との相互作用の空間的広がりや持続期間を明らかにするために、MITgcm による風および潮汐によって駆動される高解像度 3 次元数値シミュレーションを進めている。現状、観測された近慣性波の大まかな再現には成功しており、今後、より詳細な解析を進める予定である。

表層パート（研究協力者担当）

波浪と近慣性波の相互作用の基盤となる問題として、波浪によって強制される海洋運動に関する理論的・数値的研究に取り組んだ。ストークスドリフト速度を外的に与える波平均方程式系をロスビー数が小さい条件のもと線形化すると、波浪の寄与は古典的なエクマンポンピングの問題に帰着できることを明らかにした。日本近海の波浪ハインドキャストデータで海洋モデルを駆動すると、低気圧イベントに伴って $0(1)\text{m}^2/\text{s}$ の輸送を伴う沿岸流動が地形性ロスビー波として表れ、風応力による海洋へのエネルギー入力を数%~10%程度修正すると見積もられた。上記の成果をまとめ国際誌に投稿し、受理された。

研究組織

研究代表者：伊地知 敬（東京大学）

研究協力者：藤原 泰（神戸大学）

所内世話人：大貫 陽平（九州大学）

成果報告

Ijichi, T., Inoue, R., & Furushima, Y. (2025). Phase-locked internal-wave triads observed in the Izu-Ogasawara Ridge: Implications for interplay between tides and winds. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 130, e2025JC022501.

<https://doi.org/10.1029/2025JC022501>

Fujiwara, Y., Matsumura, Y., & Tamura, H. (2026). Wave-driven ocean currents: how the conservative effects of Stokes transport induce large-scale currents. *Progress in Earth and Planetary Science*, in press

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 では、異常輸送を増大するストリーマーから、秩序構造である孤立波へと自発的に遷移する現象が観測されている。この遷移過程では、広帯域なストリーマーと、特定周波数を持つ孤立波やその前駆体（トリガーモード）が混在し、複雑に非線形相互作用を行っている。従来の解析手法では、周方向プローブと径方向プローブの相互相関において「周波数」のみに着目して解析を行っていたため、同一周波数帯に異なるモードが混在する場合、それらを分離して空間構造を議論することは困難であった。そこで本研究では、周方向プローブアレーによるモード分解能を活用し、「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相関構造を再構成する新解析法を開発・適用した。この手法により、遷移の引き金となる「トリガーモード」の微細な空間構造（位相の節など）や、ストリーマーと孤立波がエネルギーをやり取りする際の空間的な重なり具合を明瞭に分離・可視化することが可能となり、遷移メカニズムの解明に大きく貢献するものである。

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、ストリーマーおよび孤立波が交互に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中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 0.5 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

本研究では、イオン飽和電流の時空間構造変化に基づき、ストリーマーから孤立波への遷移過程を「ストリーマー部」「遷移直前」「孤立波部」「逆遷移」の 4 段階に定義し、詳細なスペクトル解析を行った。まず、2 次元スペクトル解析および短時間フーリエ変換（STFT）を用いた時間発展解析により、遷移直前の区間において特異なスペクトル変動が観測された。具体的には、図 1 にスペクトル図を示すように、通常ストリーマー成分の周波数が低下（減速）すると同時に、それよりも高周波帯域に位置する「HF

（High Frequency）ストリーマー成分」が顕著に出現した。

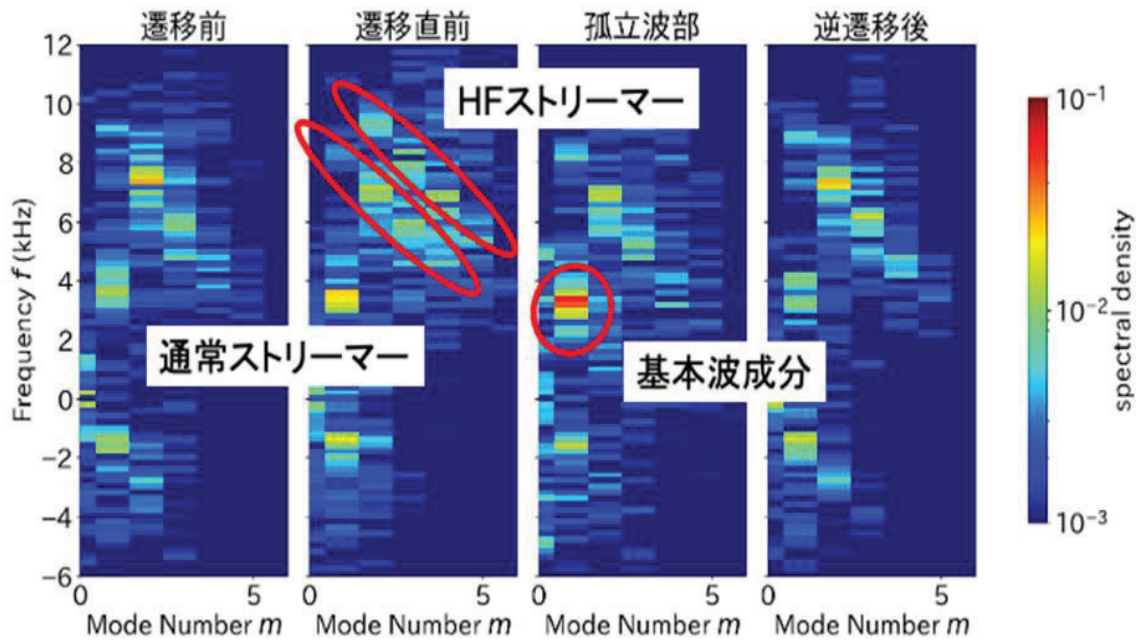


図 1 遷移前, 遷移直前, 孤立波部, 逆遷移後の 2 次元スペクトル図

また、この時期に $m = 1$ モードにおいて 1.6 kHz 成分が先行して励起され、その後、孤立波の基本波である 3.2 kHz 成分が支配的になる過程が捉えられた。特に高次モードにおいては、HF ストリーマー成分が通常ストリーマー成分の強度を上回る現象が確認された。次に、HF ストリーマー成分の生成メカニズムを解明するため、バコヒーレンス解析による非線形結合の評価を行った。その結果、新たに励起された $m = 1, 1.6$ kHz 成分と、減速した通常ストリーマー成分との間に、極めて強い非線形結合が確認された。この結合は周波数整合条件を満たしており、結合後の周波数が HF ストリーマー成分と一致することから、両者の結合が HF ストリーマー生成の直接的な要因であることが示唆された。さらに、遷移のトリガー候補である $m = 1, 1.6$ kHz 揺動成分の物理的特性を特定するため、位相相関断面解析を実施した。その結果、当該成分はプラズマ半径 $r = 30$ mm 付近に明瞭な位相の節を有することが判明した。この空間構造は、先行研究においてストリーマー形成に関与するとされる「メディエーター」の特徴と合致し、鏡対称となるものである。以上の結果より、本遷移現象は、減速した通常ストリーマーとトリガーモード（メディエーターと鏡対称構造）との非線形結合によって HF ストリーマーが生成され、その後孤立波構造へと移行する一連のプロセスであることが明らかとなった。

4. 研究成果報告

- [1] 山田琢磨他, “直線プラズマにおける乱流解析の新手法の開発と突発現象の解明”, 日本物理学会 第 80 回年次大会, 16aB159-3, 広島大学 (Sep 16-19, 2025).
- [2] T. Yamada *et al.*, “Observation of Transitions in Meso-Scale Structures Formed in Plasma Turbulence”, 9th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics, B2-5-I1, Fukuoka (Sep 21-26, 2025).

5. 研究組織

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

外部制御されたエネルギーによる流体中の構造形成の考察

広島大学大学院先進理工系科学研究科 鈴木康浩

目的

核融合プラズマや地球流体は、外部にエネルギーソースを持ちながら、同時に散逸によるエネルギーシンクが損失する。そのため、巨視的にはエネルギーバランスが成立したとしても、微視的にはエネルギーバランスは破れ、非常にダイナミカルな流動をする非平衡系である。この微視的なエネルギーバランスの破れとダイナミクスは、時として巨視的な構造形成を伴い、不安定性やエネルギー損失として現れる。例えば、核融合プラズマでは、核融合反応を起こすべくプラズマ中心部を強力に加熱するが、加熱により形成された急峻な温度勾配が不安定性や電磁乱流を駆動する。駆動された不安定性や電磁乱流は温度勾配を緩和し駆動力が消失する。したがって、この系は一種の自励振動にあるとも考えられる。このような現象は、自然科学や工学分野おいていたるところに現れ、その理解が学術的観点のみならず、工学においても重要である。

本共同研究では、プラズマと熱流体を対象とし、微視的に非平衡な状態にある系に対し、非振動的に加えられた外部エネルギーソースに対する系の応答を観察する。そして、そこに現れる構造形成を考察し、数理モデル化する。数理モデルは、プラズマと熱流体以外で現れる構造形成、例えば地球流体などへ適用し、モデルの検証を行う。

本年度の成果

令和7年度は、スーパーコンピュータの冷却に利用される、空気を作動流体とした自由噴流に対し、低次元化した乱流構造を抽出する研究を進めた。

乱流の低次元モデル化は、多くの場合で直交固有値分解（POD）や動的モード分解（DMD）などが用いられるが、自由噴流は周囲の流体を巻き込みつつ発達するため、非定常性が強く非線形である。そのような乱流に、線形モード結合である POD や DMD を適用してもうまく低次元化できない事例が指摘されていた。非定常性が強い非線形システムにおいてどのように低次元化を行うかについて様々な方法が提案されているが、本研究では経験的モード分解（EMD）に注目した。EMD は、POD や DMD のように直交基底関数を元に展開する物ではなく、「経験的」という名前の通り、時系列データから AM-FM 振動成分を抽出する。従って、フーリエ解析のような先験的に決められる基底(三角関数)ではなく、データに適応的で事後的に決定される基底である。この基底を使うことで、自由噴流の乱流構造の低次元化に成功した。この、EMD はバーストなどを伴う非定常性の強いプラズマ乱流構造の低次元化においても有効と考えられる。

まとめと今後の展望

今年度、乱流構造の低次元化に EMD を用いることで成功したことにより、今後、任意の乱流構造に対しても EMD の基底を用いた構造抽出が可能となった。来年度は、実際に自由噴流に脈動を加えた場合と、高周波を重畳したプラズマ乱流に EMD を適用する。

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 for the wave elevation (η):

$$\nabla^2 \eta = -\frac{U_z}{(c-U)}(\eta_x^2 - 2\eta_z + \eta_z^2) - \frac{N^2}{(c-U)^2} \eta \quad (1)$$

Assuming a periodic solution of countably infinite discrete modes, the DJL equation can be simplified to a Taylor-Goldstein equation for each discrete mode. The TG equation is solved analytically and discrete IGW mode eigenfunctions are obtained in terms of Bessel functions for the linear base-flow. The dispersion relation is solved numerically.

To study the triadic resonance interactions (TRI) including modes from the continuous spectrum, the weak shear limit has been chosen ($|\bar{U}_z^*| \ll N$), allowing the use of the WKBJ approximation. A Lagrangian coordinate system (ξ, ζ) is used, which simplifies the analysis by reducing the material derivative to a form that does not involve vertical differentiation:

$$\bar{D}_t = \partial_t + \bar{u}^L(\zeta) \partial_\xi \quad (2)$$

The analysis shows that for short-wavelengths, the triadic-resonance instability is spatially localized at a particular vertical level ζ_r . The governing equations are written in the vicinity of this level by stretching the coordinates to $\eta = \sqrt{q/\delta}(\zeta - \zeta_r)$. The resulting equation for the perturbation amplitude $A(\eta)$ is derived as:

$$A_{\eta\eta}(\eta) + A(\eta)((\eta + i\Lambda_0)^2 - (\Lambda_2 + i)) = 0 \quad (3)$$

Solutions for this localized instability are obtained in terms of parabolic cylinder functions $U(v, \pm\mu)$. Recent results imply that, unlike the no-shear case which yields discrete real eigenvalues ($\lambda' = \pm\sqrt{-I_0 I_1}$), the presence of shear ($q \neq 0$) may result in no discrete eigenvalues for this problem. We speculate that the shear-flow tends to weaken the resonant instability at short wavelengths and are currently examining possible transient growth of perturbations through numerical solutions of the slow-time evolution equations.

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.

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.
- Muppirala, H., Patibandla, R., & Roy, A., (2025) On the generation of free-surface waves by instabilities in quadratic shear flows. *Under review*.

Conference presentations

- Roy, A., Patibandla, R., Subramanian, G., The flow field due to a sedimenting particle in a stratified fluid: insights into drift and drag, *Particulates across Scales: Mathematical Modeling, Computation, and Applications*, Banff, Canada, Jul 2025.

RIAM host: Yohei ONUKI

非平衡プラズマの異スケール間乱流相互作用の研究

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には、様々なスケールを持つ乱流を同時に観測し、それらの間の相互作用について調べることが必要である。これを達成するため、プラズマと非接触なマイクロ波を用いた計測手法の開発を行っている。ドップラーレーダーはミクロスケール乱流強度とメゾスケールの流れを



図1：PANTA装置に設置したX-band フェーズドアレイアンテナと周波数コムとを組合せた新開発ドップラーレーダー装置。

同時に観測できる手法であり、両者の相互作用を調べるのに最も適切であり、マイクロ波の周波数を変化させることで半径方向の任意の場所での相互作用を調べることができる。さらに、プラズマへの入射角度を可変にするフェーズドアレイアンテナと同時多周波数発振が可能な周波数コム技術とを組み合わせることにより、異なる波数の乱流の同時観測が可能になると考えられ、この計測手法の実証を今回PANTA装置のプラズマを対象に試みた。

2. ドップラーレーダー計測結果

マイクロ波の周波数帯はPANTA装置の電子密度に合わせてX-band(8-12GHz)として、この帯域用のフェーズドアレイアンテナを作成し、PANTA装置の水平ポートに設置した(図1)。このアンテナは周波数を僅かに変化させることで放射角度(θ)を垂直方向にスキャンすることができる。同時に異なる周波数のマイクロ波を入射するとことで、プラズマの回転(メゾスケール)に伴うレーダー信号のドップラーシフト周波数 $\omega_D = -2v_{\perp}k_0 \sin(\theta)$ は変化することになる。図2に10GHz前後の40MHz間隔で放射したマイクロ波信号のドップラーシフトの周波数スペクトルを示す。図のように放射角度が+3度から-3度へと変わるに連れて、ドップラーシフトが1.5MHzを挟んで高周波数から低周波数側へと反転して行っている様子が分かり、本計測手法のプラズマ実験での実証試験に成功した。今後、本計測器を用いて、乱流間の相互作用について調査する。

3. 論文発表

1. T. Tokuzawa, *et al.*, “Cross-scale nonlinear interaction and bifurcation in multi-scale turbulence of high-temperature plasmas”, *Comm. Phys.* **8**, 394 (2025).
2. T. Nasu, T. Tokuzawa *et al.*, “Verification of Background Noise Estimation Method in W-Band Millimeter-Wave Back-Scattering System”, *Plasma Fus. Res.* **20** 1202056 (2025).

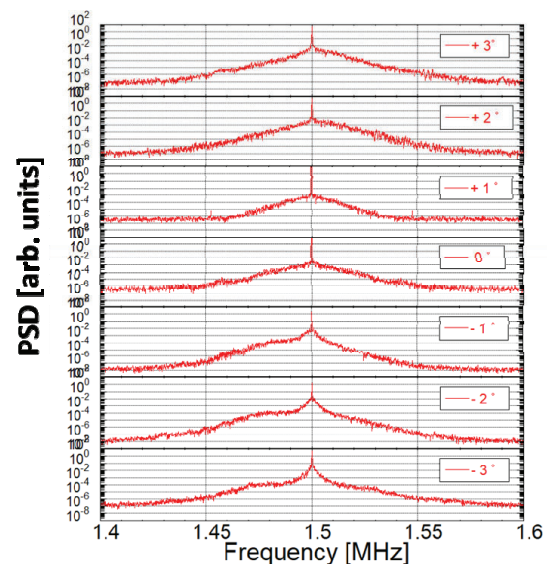


図2：9.95-10.19GHzのそれぞれの周波数成分から得られたドップラーシフト周波数スペクトル。IF周波数を1.5MHzに設定している。

特定研究 3 【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

(2 年目)

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。

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

九州大学の球状トカマク(ST)装置 QUEST では経済性の高いコンパクトな ST 核融合炉の実現を目指したプラズマ実験が実施されている。ST 装置ではプラズマを閉じ込めるためのトロイダル電流の駆動手法を確立させなくてはならず、近年 QUEST では同軸ヘリシティ入射(CHI)による電流駆動研究が行われている。QUEST の CHI では真空容器下部の入射領域において容器壁とバイアス電極を接続する入射磁束を形成して高電圧を印加することにより入射磁束に沿って入射電流を駆動させる。トロイダル磁場とポロイダル磁場によって形成される入射磁束に沿って入射電流が流れることでトロイダル電流も駆動し、プラズマ中への電流入射により磁束は大きく容器内へ発展して最終的に閉じ込め配位が形成される。

CHI 放電における発展磁束を解析するためには図 1(a)に示されるように容器壁からバイアス電極へ流れる入射電流の分布を知る必要があり、QUEST ではその入射電流分布を容器壁に設置した磁気センサーアレイで計測している。これまでは CHI 放電が軸対称であることを仮定し、容器壁に設置した B_{tor} 磁気プローブでのトロイダル磁場の計測データより入射電流分布が求められた。150 kA のトロイダル電流が駆動する QUEST での典型的な CHI 放電では主要プラズマ中に流れる約 15kA の入射電流が磁気センサーアレイにより計測された。この時電極電圧を印加するキャパシター電源から約 30kA の電流が供給されており、すなわち供給電流の半分しかプラズマ発展に寄与していない。2025 年度は磁気センサーアレイにロゴスキーコイルを増設してこの入射電流分布計測の信頼性の検証を行った。図 1 の(b)の S1 から S7 の○印の位置にロゴスキーコイル、□印の位置に B_{tor} 磁気プローブを設置した。キャパシターから供給される電流 I_{cap} に対し、主要プラズマ中に流れる電流 I_{inj} , I_{cs} , I_{top} 、及び外側容器壁間でのアーク放電、セラミックギャップでの沿面放電などによる流出電流 I_{ab} , I_{creep} が図 2 のように求められた。入射電流ピーク時におけるプラズマ噴出は主に電流 I_{inj} により生じており、その際同程度の流出電流 I_{ab} , I_{creep} が流れている。磁束解析のために必要となる正確な電流がロゴスキーコイルにより計測され、そのデータとの比較によりある程度の B_{tor} 磁気プローブの信頼性も示された。この結果から、キャパシターからの供給電流 I_{cap} のうちの実質的な入射電流と、増加する閉じ込め電流の寄与による発展配位の形成過程が解析された。

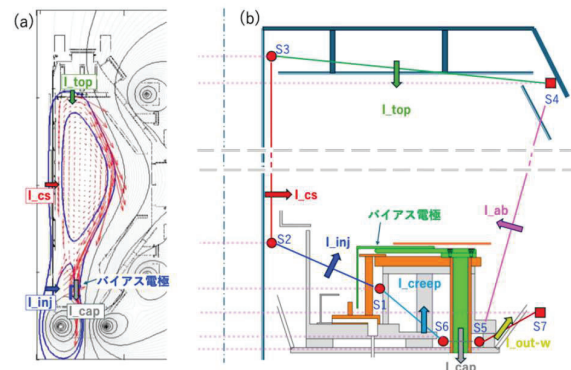


図 1 QUEST の CHI 放電における、(a)入射電流による発展磁束と(b)磁気センサーアレイ

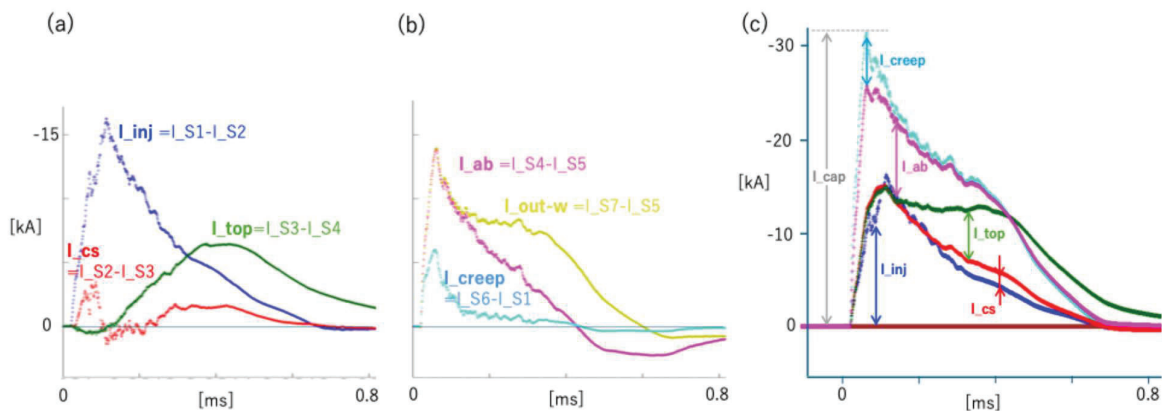


図 2 磁気センサーアレイの計測結果、(a) 主要プラズマ中に流れる電流 I_{inj} , I_{cs} , I_{top} 、(b)その他流出電流 I_{ab} , I_{creep} , I_{out-w} 、(c)供給電流 I_{cap} の入射電流配分

遺伝的アルゴリズムを用いた垂直軸風車配置の最適化に関する研究

鳥取大学 工学部 機械物理系学科 原 豊

1. はじめに

垂直軸風車(VAWT)は近接配置で出力を強め合う効果が知られている。本研究では単独の VAWT 周囲の数値流体力学(CFD)解析の結果を重ね合わせて、ウインドファーム(WF)の流れ場を高速に再現する手法を開発した。これに遺伝的アルゴリズム (GA) を組み合わせて風車の最適配置を探索する解析システムの開発を行った。模型実験用のミニチュア風車(直径 50 mm)を対象として、一風向条件および実際の風向分布データに対する最適配置を求めた。

2. 解析方法

当初は、単基の二次元(2D)の VAWT ロータの CFD の結果を重ね合わせていたが⁽²⁾、2D-CFD では実際の三次元(3D)の風車には適用が難しいことが判明した⁽¹⁾。そこで対象風車の 3D-CFD の結果を平均化して得た凝縮した二次元流れデータを使用する手法を提案し予測精度を向上した⁽³⁾。さらに独自開発した GA の計算コードを組み合わせて、VAWT-WF の最適な風車配置の探索システムを開発した。

3. 主な結果

例えば、仮想 WF のサイトを 500 mm × 500 mm の正方形内(図 1 a, c の赤枠)とする。一風向条件(風速: 10 m/s)で 6 基の VAWT ロータを含む WF の場合は、最適配置は主流に対してカウンターダウン(CD)ペアが配列するものになった(図 1 a)。この場合、単独ロータと比較して平均出力は約 11%増加した。一方、風向分布(図 1 b)を与えた場合は、最適配置はまばらなものになり、年間発電量は単独風車に風車基数を掛けたものよりも小さくなった。

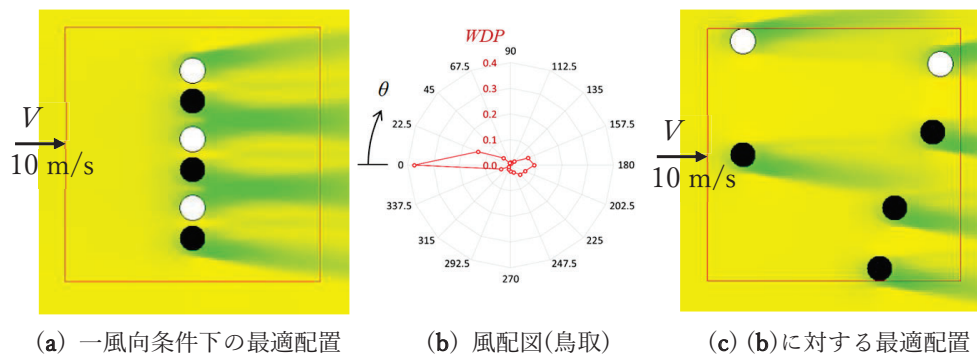


図 1 開発した最適配置探索の結果の例 (6 基の場合: ●は時計方向回転, ○は反時計方向回転)

【研究成果報告】

(1) Moral MD Shameem, Inai Hiroto, Hara Yutaka, Jodai Yoshifumi, Zhu Hongzhong, Prediction of flow field and rotor performance of three-rotor parallel layout of experimental miniature vertical axis wind turbines by a fast computation method, The Eleventh JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference (J-K TFEC11), Okinawa, Japan, Extended Abstract, 1428, 2025.11.22-25, Okinawa, Japan.

(2) 原豊, モラル・モハメッド シャミム, 稲井寛人, 上代良文, 朱洪忠, 遺伝的アルゴリズムを用いた二次元ミニチュア垂直軸型ロータの配置最適化, 第 47 回風力エネルギー利用シンポジウム, D3-2, 2025.11.27-28, ビジョンセンター新橋.

(3) モラル・モハメッド シャミム, 稲井寛人, 原豊, 上代良文, 朱洪忠, 三次元 CFD から得られた平均速度データを用いた実験用ミニチュア VAWT クラスターのロータ性能の予測, ターボ機械協会 第 93 回松江講演会, 9338, 2025.12.1, 島根県民会館.

【研究組織】

原 豊	代表者	鳥取大学	教授
上代良文	協力者	香川高専	教授
Moral Md. Shameem	協力者	鳥取大学	D3
朱 洪忠	所内世話人	九州大学応用力学研究所	准教授

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 遠隔操作システムの開発

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する。化石燃料等を用いず海水のみを熱源とするため、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ことから、プラントの遠隔地からの監視・操作が必要となる。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きているが、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操作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操作システムを、先行研究の遠隔監視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）からなる。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。本研究において遠隔操作機能を追加したシステムの Web ブラウザ表示画面を Fig.1 に示す。遠隔地の PC の Web ブラウザ上で指令値を入力・送信する機能を追加した。

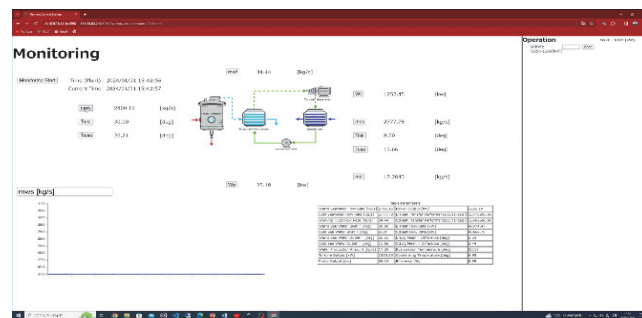


Fig. 1 遠隔操作システム Web ブラウザ開発画面

結果 本研究で開発した遠隔操作システムの動作を確認するために、遠隔操作実験を実施した。実験を通して、データ取得の正確性およびデータ表示に関して評価し、十分な性能が得られていることが確認された。

研究成果報告 第 68 回自動制御連合講演会、2025 年度(第 78 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）、王瑞敏（佐賀大学）、恵良朋也（佐賀大学）、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）

トムソン散乱計測による密度温度分布計測の高空間分解能化のためのシステム開発

東京大学大学院新領域創成科学研究科 江尻 晶

1. 背景

磁場閉じ込め高温プラズマにおいて、プラズマ中の温度および密度の不均一性によって駆動される乱流は、輸送を増大させ、閉じ込め性能を劣化させる。閉じ込め性能のスケーリングはプラズマのアスペクト比に依存することが知られており、支配的な乱流機構の理解は、乱流輸送低減を目指した将来の核融合炉における装置設計の最適化において極めて重要である。九州大学にある QUEST 装置は、比較的大型の真空容器を有する球状トカマクであり、アスペクト比を柔軟に変更可能である。現在、重イオンビームプローブやドップラー反射計などの乱流計測器の開発が進められているが、乱流の駆動源および輸送を定量的に評価するためには、電子密度分布および電子温度分布の高精度計測が不可欠である。トムソン散乱計測は、電子密度および電子温度の空間分布を直接計測できる基幹計測であり、QUEST では本課題代表者らがこれまでに計測器の設計、設置、運用および解析を担ってきた。しかし、現行システムでは空間方向のチャンネル数が 8ch に限られており、プラズマ半径約 300mm に対して有効な計測点は 3 点程度に留まっている。

本研究ではトムソン散乱計測による密度温度分布計測の高空間分解能化を目指して、本年度はシステムの構築および初期データの取得を行った。

2. 検出器掃引システム

空間分解能の向上には、チャンネルの増設や擬似的な計測視線数の増加といったアプローチが挙げられる。本研究では、QUEST の定常運転特性を活用し、放電中に計測位置を掃引する手法を提案する。構築したシステムを図 1 に示す。本システムでは、検出用ファイバーユニットを遠隔制御可能な 2 軸ステージ上に配置し、定常放電中に視線を掃引することでチャンネル間の空白を補完する。また、用いた 2 軸ステージは位置情報を取得できないため、ステージ位置は上部に設置したカメラで評価する。ファイバーユニットを最外視線 ($R=422\sim1093\text{mm}$) から最内視線 ($R=329\sim1039\text{mm}$) まで移動させるには、2 軸ステージ (速度 $<10,000\text{step/s}$) を x 軸方向に 3,000step、y 軸方向に 12,000step 掃引する必要がある。掃引時の計測点数は放電の持続時間に依存し、例えば定常状態が 1.2s 維持される場合、 $\Delta R=10\text{mm}$ でプラズマ小半径方向に 30~40 点のデータ取得が期待できる。

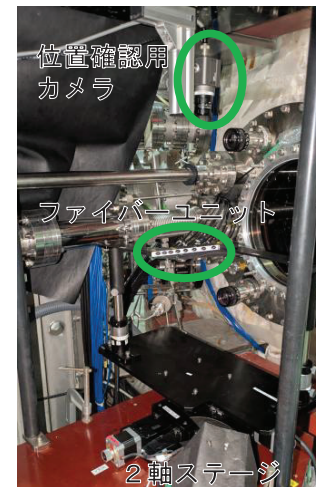


図 1 2 軸ステージを用いた検出器掃引システム。

3. 初期計測結果

初期計測を実施したプラズマの放電時間は $t=2.1\sim3.2$ 秒、定常状態は $t=2.8\sim3.0$ 秒であった。本実験では、最外視線から最内視線までの掃引を $t=1\sim3$ 秒の 2 秒間で行った。図 2 は、計測した電子密度および電子温度分布の時間発展を示している。今回の設定では、 $t=2.2\sim3.0$ 秒における計測位置の移動距離は $R=50\text{mm}$ であった。定常状態に限れば移動距離は 10mm に留まったが、強磁場条件下においてもシステムが支障なく動作し、計測視線を適切に掃引できることを確認した。

4. まとめ

本研究では、トムソン散乱計測の高空間分解能化を目指して検出器掃引システムを開発し、動作確認および初期計測を行った。今後は、高い掃引速度における安定稼働のためのシステム改良および解析コード開発を行う。

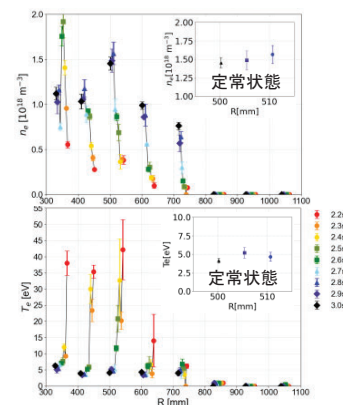


図 2 電子密度 (上)、電子温度 (下) の主半径方向分布。色の違いは測定時刻の違いを表す。

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、小林昶門
National Institute of Technology, Sasebo College
H. Kawasaki, S. Takeichi, K. Kobayashi

1 概要

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。スパッタリングによる薄膜作製法は、低温プラズマの応用例として代表的なものである。高密度の固体ターゲットを用いた薄膜作成に関しては様々な研究が行われて来たが、粉体ターゲットを用いたスパッタ法による機能性薄膜の作製は、近年行われ始めた新しい方法であり、成膜機構が明確ではない。特に成膜速度の変化や膜の特性等が、通常のスパッタ成膜法とは異なる点が多く、作製される薄膜の制御が容易でない。一方、多元素混合薄膜や低融点材料、傾斜機能薄膜などの作製に、粉体ターゲットを用いた薄膜作成法を利用すれば比較的容易かつ安価に目的の薄膜が作成できる。我々はこれまでに、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、通常のスパッ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、成膜が進み、ターゲット表面がスパッタされた後では、成膜機構が異なる事が明らかになった。これは、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ためだと考えられる。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。本報告では、成膜前後の粉体ターゲットの表面状態の変化を詳しく調べることで、粉体ターゲットによる薄膜作製機構を解明した。

2 実験装置

成膜には通常の高周波マグネトロンスパッタリング薄膜作製装置を用いた。基板として SUS304 および分析用の Si 基板の 2 種類を用い、ステンレス製のターゲットホルダ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 13.56 MHz、パワー 100 W 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 2.0 cm 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。

今回は、透明導電性にも利用されている酸化亜鉛 (ZnO) 薄膜の作製に加えて酸化ニッケル (NiO) のターゲットを用いた薄膜の作製も行った。また、AZO 薄膜として、 Al_2O_3 と ZnO の混合粉末ターゲットを用いて、スパッタリング成膜法により作製した。

3 実験結果

3-1 ターゲットの表面形状変化

ZnO の粉末を圧縮して固体ターゲットとし、酸化亜鉛薄膜を作製した。成膜時間は変化させ、基板は加熱しなかった (すなわち室温で使用した)。このときのターゲット表面の SEM 像を図 1 に示す。成膜後の表面はイオンによるスパッタの後が見られる。NiO の粉末をそのままターゲットとし

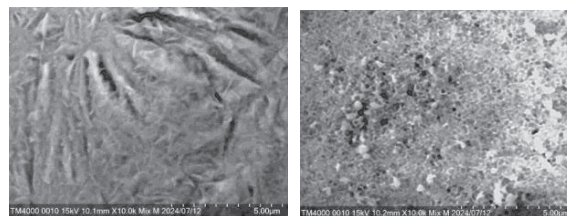


図1 ZnO の粉末を圧縮した固体ターゲット表面変化

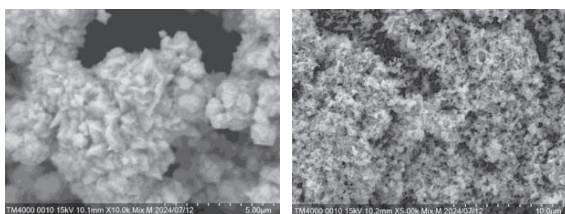


図2 NiOの粉末ターゲットの表面変化

た変化の様子を図2に示す。図から、スパッタされた跡と、表面の凹凸状態が大きく変化していることがわかった。これは薄膜の平坦度に影響を及ぼす可能性があることを示唆している。

3-2 ターゲットの密度と作製された薄膜の透明度・導電率の関係

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、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3と図4は、それぞれ非交換粉体ターゲットと交換粉体のターゲットを用いて作製した薄膜の透過率を示している。非交換粉体のターゲットを用いた場合の透過率は成膜時間が長くなると60%以下まで低下した。交換粉体ターゲットを用いた場合の成膜速度は、120分後までに80%程度を維持している。この結果は昨年示した結晶性の結果（非交換粉体のターゲットでは結晶性が落ちる）とほぼ同じ傾向であることを示している。

図5にはターゲットの密度と作製した薄膜の抵抗率と透明度の関係を示した。結果から、大まかにはプレスしたターゲットの方がしなないものよりも透明性、抵抗率ともによくなることがわかる。しかしながら、明確な規則性は見られなかった。より詳細は成膜機構の解明が必要であることがわかった。

4. まとめ

酸化亜鉛(ZnO)薄膜の作製に加えて酸化ニッケル(NiO)のターゲット、および Al_2O_3 とZnOの混合粉末ターゲットを用いて、AZO薄膜をスパッタリング成膜法により作製した。その結果、ターゲットの状態が成膜とともに変化し、膜質も影響されることがわかった

謝辞

この研究の一部は、本研究は、九州大学応用力

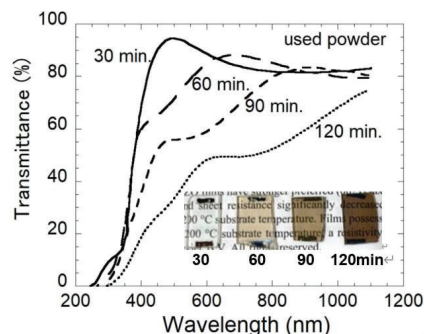


図3 非交換粉体ターゲットを用いて作製した薄膜

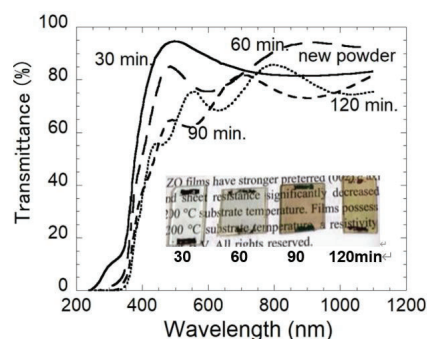
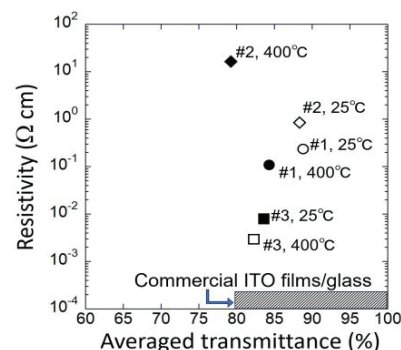


図4 交換粉体のターゲットを用いて作製した薄膜



#1: 未処理、#2: 乾燥、#3: プレス (15MPa)
ターゲットの密度、黒塗: 非交換、白抜: 交換

図5 ターゲット条件と抵抗率と透明度の関係

学研究所の共同利用研究の助成、科学研究費補助金基盤(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] T. Satake, et al, e-Journal of Surface Science and Nanotechnology, Vol. 21(3), p. 218 (2023).
- [2] T. Satake, et al, Int. J. Rec. Dev. Eng. Tech. (IJRDET) Vol. 14(8), p42 (2025).
- [3] H. Kawasaki, et al, Int. J. Rec. Dev. Eng. Tech. Vol. 15(9), p.16 (2025).

リチウム複合酸化物セラミックス粉末の水吸収・水素放出過程

Water absorption and hydrogen desorption processes of lithium complexed oxide ceramics powders

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、最近、本研究室では、室温においてリチウム-ジルコニウム酸化物(Li_2ZrO_3)を大気中に放置したところ、約 10 wt%の水(H_2O)が吸収され、水素(H_2)が約 423 K の加熱で生成されることを発見した。この事実は、 H_2O から H を低エネルギーで生成可能であることを示唆している。しかしながら、生成された H_2 量は約 1×10^{-6} ml/g と極めて少ない。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、イオン照射により Li_2ZrO_3 中の構成 Li および O 原子を弾性的にはじき出し、原子レベルの Li および O 空孔欠陥を形成させ、常温における H_2O 吸着および解離、さらに生成された H の拡散および蓄積能力を向上させるとともに、重量増加(WG: Weight Gain)法、電界放出形走査電子顕微鏡(FE-SEM: Field Emission-Scanning Electron Microscope)、飛行時間型反跳粒子検出(ToF-ERD: Time of Flight-Elastic Recoil Detection)法、X 線回折(XRD: X-ray Diffraction)、昇温脱離(TDS: Thermal Desorption Spectroscopy)法およびガスクロマトグラフィー(GC: Gas Chromatography)法を用いて、空気暴露された Li_2ZrO_3 における H_2O 吸収および H_2 放出機構に対するイオン照射効果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 1100°C 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)、 $a=c=0.541$ nm、 $b=0.903$ nm および 2.54 g/cm³ であった。次に、寸法 $\phi 8 \times 1.0$ mm³ の Li_2ZrO_3 (2.53 g/cm³) を真空中で 623 K まで加熱して残留水素を取り除いた後、293 K の室温において 20 keV の窒素(N_2^+)イオン(10 keV N^+ イオン)を約 1×10^{18} ions/cm² の照射量まで照射して、試料表面にラジカルを形成させた。次に、293 K の室温および 80 %の相対湿度(R.H.: Relative Humidity)の恒温恒湿器内で空気に曝した後、電子天秤を用いた WG 法、FE-SEM、ToF-ERD 法および XRD により、各空気暴露時間に対する N^+ イオン照射 Li_2ZrO_3 の重量、表面形態、H、Li、C、N、O、Zr 等の各元素濃度分布および結晶構造を測定した。

次に、約 100 日(約 3 ヶ月)間まで空気暴露された Li_2ZrO_3 を Ar 雰囲気において 673 K まで加熱し、 Li_2ZrO_3 からの H_2 放出開始温度および放出量を Q-mass を用いた TDS 法および GC 法により調べた。得られた結果から、表面改質された Li_2ZrO_3 試料表面の H_2O 分解、H 吸収および蓄積、 H_2 放出に関する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 80 %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、 N^+ イオン照射 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。約 3 ヶ月後における重量増加の割合は Li_2ZrO_3 試料の重量増加の割合(約 21 wt%)の約 1.2 倍(約 25 wt%)に達することがわかった。FE-SEM 像より、 Li_2ZrO_3 試料の表面が N^+ イオン照射により僅かに活性化されており、微細な結晶成長が約 3 ヶ月間の空気暴露時間後に観測された。また、ToF-ERD 法により、空気暴露された N^+ イオン照射 Li_2ZrO_3 試料表面の H 濃度は、空気暴露時間の増加とともに増加し、約 3 ヶ月後において未照射 Li_2ZrO_3 試料表面の H 濃度よりも約 10 倍高いことがわかった。従って、空気暴露による重量増加の要因の一つは、 H_2O 分解および吸収特性がイオン照射による Li および O 空孔形成により向上されたためと考えられる。

引き続き、空気暴露された未照射 Li_2ZrO_3 および N^+ イオン照射 Li_2ZrO_3 試料を Ar 雰囲気中で加熱したときに得られた 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

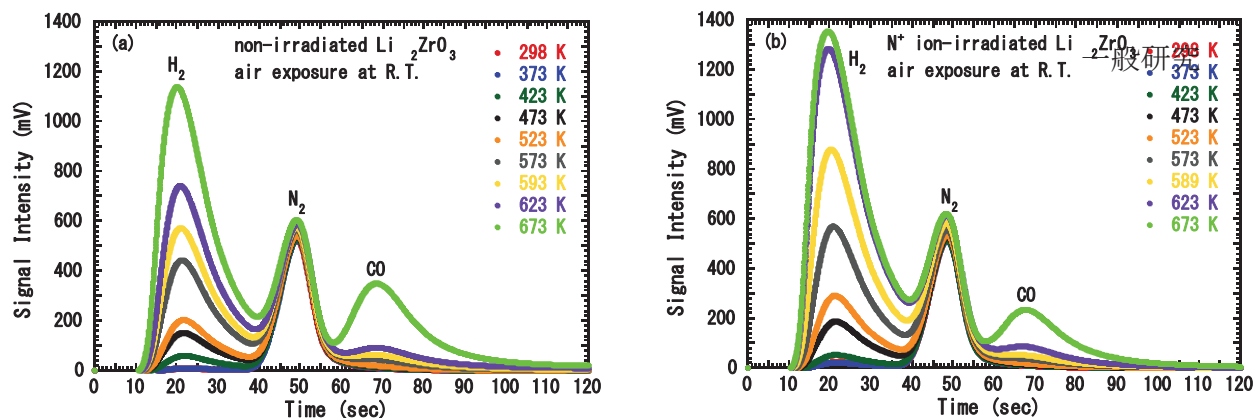


図1 室温で空気暴露された(a) Li_2ZrO_3 および(b) N^+ イオン照射 Li_2ZrO_3 試料を Ar ガス雰囲気中で 673 K まで加熱したときに得られたにおける GC スペクトル。

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 N^+ イオン照射 Li_2ZrO_3 試料からそれぞれ約 423 K および 573 K の低温で放出していることがわかる。さらに、図 2(a)に示すように、 N^+ イオン照射 Li_2ZrO_3 試料からの H_2 放出量は未照射 Li_2ZrO_3 試料からの H_2 放出量の約 2 倍であることがわかった。この H_2 放出量の増加は、常温における H_2O の解離が活性化された表面によって向上され、生成された多量の原子状の H がバルク内に拡散して蓄積されたと考えられる。また、図 2 (b)に示すように、 N^+ イオン照射 Li_2ZrO_3 試料からの CO 放出量は未照射 Li_2ZrO_3 試料からの CO 放出量より若干減少することがわかった。これは、Li の表面偏析がイオン照射による欠陥形成により抑制され、常温 H_2O 分解により生成された水酸基(OH)との反応による LiOH および Li_2CO_3 層の形成が生じ難くなるためと考えられる。

まとめ 623 K まで真空加熱して残留水素を取り除いた後、室温において 10 keV の N^+ イオン照射による表面改質された Li_2ZrO_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、FE-SEM、ToF-ERD、XRD、TDS および GC 法を組み合わせ調べて。 N^+ イオン照射された Li_2ZrO_3 試料の重量増加量の割合は、室温および 80 %R.H. の相対湿度の空気雰囲気下の条件において、約 3 ヶ月の空気暴露時間に対して未照射 Li_2ZrO_3 試料の重量増加量(約 21 wt%)の約 1.2 倍(約 25 wt%)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 Li の表面への偏析、Li 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 が約 323 K の低温で放出され、その H_2 放出量はイオン照射効果による表面積の増大によって未照射 Li_2ZrO_3 試料の H_2

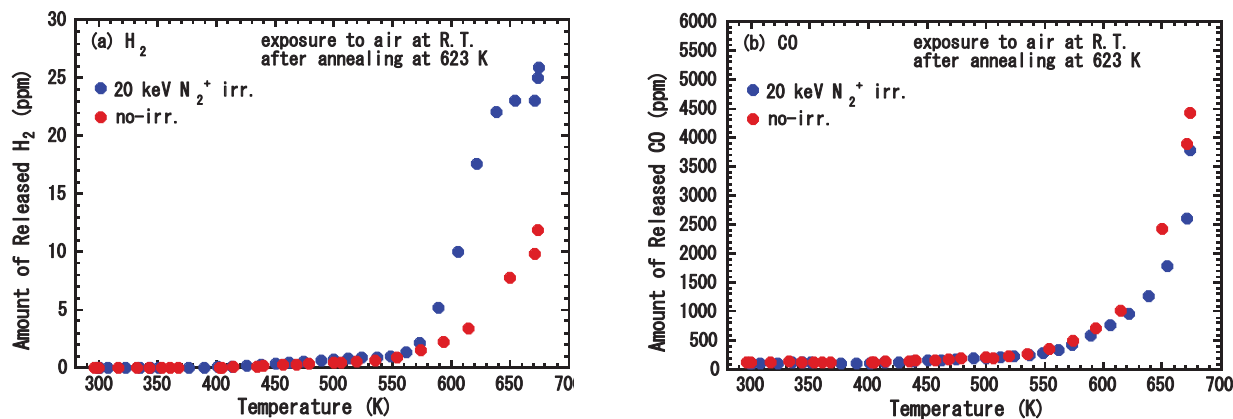


図2 空気暴露された Li_2ZrO_3 および N^+ イオン照射 Li_2ZrO_3 試料からの(a) H_2 および(b) CO 放出量における温度依存性。

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

水素はこれからのエネルギー源として注目される一方、原子力発電分野においては反応の副産物的に材料中にエネルギーを持って侵入すると、材料の機械的強度劣化等につながることからその挙動解析は重要な課題の一つである。特にタングステンなど一部の金属では空孔型欠陥内に複数の水素を捕獲すること（多重捕獲 MP : Multi Trapp と呼ぶことにする）などが第一原理計算などから示唆されている。核融合材料候補であるタングステンで起こりうるこのような特異な現象は不明な点が多い。さらに合金材料においてMP その構造配置や安定性は複雑で、ほとんどわかっていない。加えて、軽元素である水素は実験的な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ほとんど前例がない。これまで我々は理論計算において MP が起こるとされる B2 型規則構造の Fe-Al 合金に対し電子照射により空孔を導入した後に電気化学的に水素を注入し、材料内に蓄積される水素量が増加する過程で、低速陽電子消滅測定などを用いて、単空孔内での複数の水素捕獲 MP の可能性を示す結果を得てきた。しかし、このような陽電子の実験結果において、化合物合金での欠陥構造と水素の配置について空孔に加え反構造欠陥(ASD : Anti-site defect 置換型欠陥)と水素との相互作用を考えた場合に、実際には複数の組み合わせの原子配置の可能性も考えられるが、それらの特定にも至っていない。またこれまでの計算では安定な Fe 空孔中心に計算を実施してきたが、本年度は異なる空孔種での水素捕獲に対する構造や安定性、ASD の組み合わせにおける安定構造などについて計算による検討を行った。

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)を用い計算を行った。扱う原子は Al:64、Fe:64 の計 128 個の金属原子で B2 構造を作成し、H 原子を 1 個もしくは 2 個空孔に隣接した位置に初期構造として配置し、このうち Fe もしくは Al 原子を取り除いて空孔としたセルを、周期的境界条件を設定して原子位置の緩和位置とエネルギー計算を行った。求めた水素原子位置を基に構成した B2 型の Fe-Al 合金に陽電子を 1 個入れて super imposed atom method による陽電子波動関数を求めた。得られた陽電子の波動関数と電子との消滅率の逆数から陽電子寿命を求めた。

結果

今回の計算では Al 空孔自体が極めて不安定で、Al 空孔は第一近接の Fe 原子と位置交換して Fe 空孔 (V_{Fe}) として置き換わり鉄原子が ASD を形成した配置の方が安定であることがわかった。Fe 原子が Al 空孔と置換した ASD- V_{Fe} ペアに水素 1 個が捕獲（空孔周囲の八面体位置）された原子配置

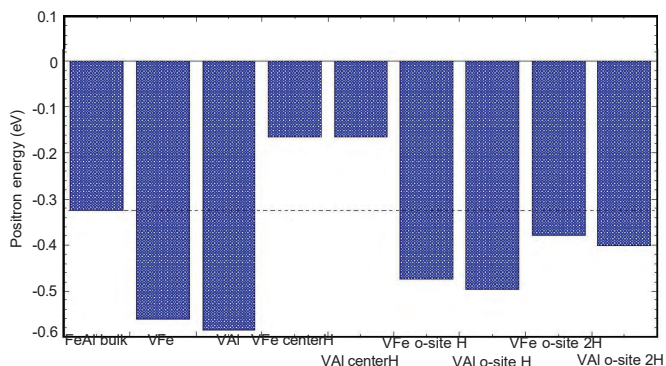


図 1 Fe-Al 中の欠陥での陽電子エネルギー計算結果

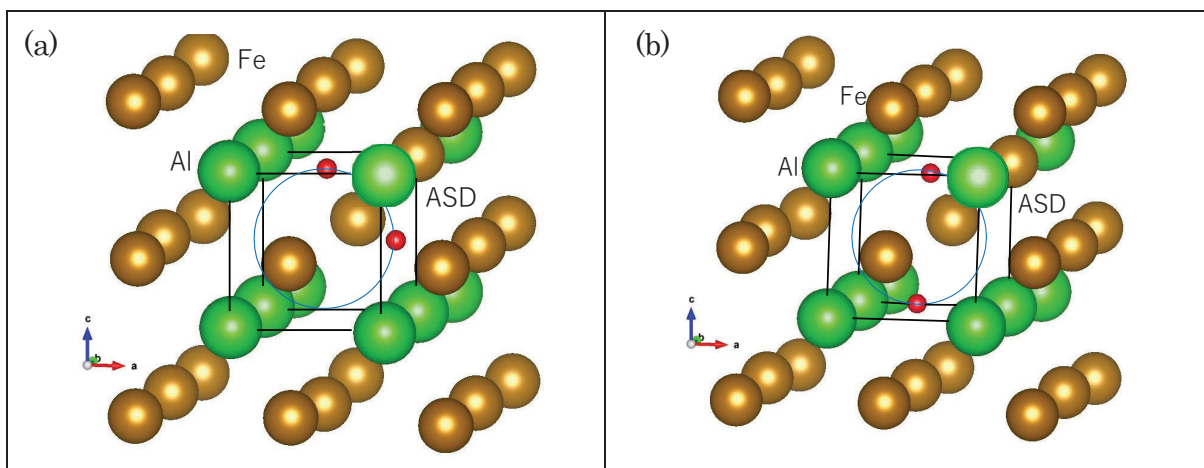


図2 第一原理計算で求められた (a) ASD- V_{Fe} ペアの近接した八面体位置で捕獲された2個の水素と、(b) ASD- V_{Fe} ペアの対面する八面体位置に捕獲された2個の水素の安定位置

で、これは ASD の無い Fe 空孔中の水素の捕獲位置とほとんど違いはなかった。また ASD を含まない Fe 空孔に1個の水素原子が捕獲された場合の陽電子寿命値が 176 ps であったのに対し、ASD- V_{Fe} ペアに1個の水素が捕獲された場合は 179 ps と僅かに高い値を示した。この違いは実験で明確に区別できるほどの大きさでは無かった。一方、陽電子のエネルギー状態を比較した結果を図1に示す。この結果から、空孔の八面体位置に水素が捕獲されると僅かにエネルギー値が上昇して陽電子の空孔への捕獲が浅くなっている。しかし2個の水素捕獲でも 0.1 eV 程度バルクより低いことから、これらの欠陥の検出は可能であると考えられる。次に図2は ASD- V_{Fe} ペアに捕獲された2個の水素の配置の緩和配置の計算結果を示す。この ASD- V_{Fe} ペアの原子配置の組み合わせは全部で7通りありそのうち最もエネルギーの低い2つの配置での緩和計算結果を示す。図1(a)は空孔中の最も近接する2つの八面体位置に水素原子が配置し、もう一つの配置として(b)のように対面する八面体位置に2つの水素原子が配置する2つの配置でほぼ同じエネルギー値で安定化しており、ASD を伴う Fe 空孔への複数の水素捕獲の配置は1つではないことが示された。

謝辞：本研究は九州大学応力研の共同利用の助成を受け、同研究所の大澤一人先生及び京大複合原子力研の徐虬准教授との共同研究として実施された。

成果発表

- 1) 「非化学量論組成の B2 型 Fe-Al 金属間化合物における水素原子捕獲状態の研究」田嘉信 2024 年度大阪公立大学修士論文 (2025)
- 2) 「Fe-Al 合金への水素イオン照射による注入水素の空孔捕獲」堀史説、田嘉信、徐虬、大澤一人、安永和史、斎藤勇一、日本金属学会 2025 年 3 月 東京
- 3) “Trapping state of hydrogen implanted into B2 ordered $Fe_{50}Al_{50}$ alloy containing supersaturated vacancies” F. Hori, S. Hirayama, J. Tian, Q. Xu, A. Kinomura, K. Ohsawa, K. Yasunaga, The 20th International Conference on Positron Annihilation, 2025 Jun. Takamatsu.
- 4) “In-situ measurement of stress relaxation in hydrogenated bulk iron by gamma-ray induced positron annihilation spectroscopy” F. Hori, S. Araki, Q. Xu, Y. Taira, The 20th International Conference on Positron Annihilation, 2025 Jun. Takamatsu.

核融合プラズマの揺動分布に対する数値計測と逆問題解析の基盤開発

核融合科学研究所 研究部

沼波 政倫

研究目的

磁場核融合プラズマにおいて、プラズマの熱・粒子輸送の物理理解と予測は依然として重要課題である。運動論に基づくシミュレーションによって一定の輸送評価は可能となっているものの、実験結果との比較による検証では、予測精度や基礎物理の解明に未解決の課題が残されている。特に、シミュレーションに必要な計算資源の制約は依然として大きく、本質的な物理を維持しつつ現実的な計算規模での輸送予測手法の確立が求められている。本研究では、シミュレーション結果から逆問題的にモデルを推定する基盤を開発するとともに、既存の数値計測手法も活用し、輸送予測手法の実現につなげることを目的とする。

研究方法

磁場閉じ込めプラズマ輸送の主因は微視的乱流であるため、ジャイロ運動論に基づく大規模シミュレーションを実行することで輸送評価は行われる。しかし、得られる数値解は高次元パラメータ空間上での時間発展軌道であり、このままでは本質的な物理の理解は困難である。そこでここでは、従来議論してきた簡約輸送モデルに注目した。これは、乱流揺動・帯状流・輸送係数の3次元パラメータ空間に高次元解を縮約したものであり、さらにその縮約軌道が束縛された空間に制限されていることが確認されている。令和7年度は、この縮約軌道のモデリングおよび軌道を導く方程式系を、逆問題として自動回帰モデルや類似性解析などのデータ科学手法を用いて推定することに取り組んだ。

研究成果

ジャイロ運動論シミュレーションから得られた縮約軌道が描く束縛空間を表現する数理モデルを構築し、乱流揺動と帯状流が輸送係数に与える影響を現象論的に満たす最小形を決定した。また、揺動・帯状流・輸送係数の時間発展には時間的ラグが存在することが分かり、それを明示的な時間遅れとして組み込んだモデルを構築した。その結果、乱流揺動は帯状流に先行し、最終的に輸送係数に反映されるという機序が、データ上およびモデル予測精度の観点から最適であることが示された。さらに、時系列データに対する Granger causality を評価したところ、乱流揺動と帯状流の時間遅れ幅と定量的に一致する領域で最も強い因果性が確認された。

さらに、モデルに追加の自由度を持たせることで、帯状流の輸送への影響を表すパラメータを最適化する際に、他パラメータ空間でのモデル誤差を積分した量を最適化する手法を導入した。その結果、パラメータの可能値域を従来モデルの仮定と定量的に一致させることが可能であることを確認した。加えて、縮約軌道を再現する方程式系を、非線形ダイナミクスの疎同定アルゴリズム SINDy を用いて導出する試みも行い、各変数のデータ処理上の課題を明らかにした。

今後は、縮約軌道に加えて、数値計測手法で得られるデータに対しても同様の解析を行う予定である。これらの成果は、第一原理乱流計算の高次元解析や低次元モデル化の基盤となり、さらなる逆解析研究への展開が期待される。

波成乱流の水槽実験

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）。我々は、独自に行った直接数値計算（Imamura et al. 2025）により、波の粘性減衰に伴う平均流への運動量輸送（仮想波応力）により生じたシア一流と水面波が相互作用することで、二次循環が生じ、水が混合されることを見出した。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。数値実験では考慮していない波による気側の変動の影響（例えば Fujiwara 2024）かもしれない。また、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考えられる。

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2021年度より実施した。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。残念ながら、深海水槽では周期1秒以上の波しか造波できないため、Imamura et al. (2024)や Dai et al. (2010)と同じ周期0.44秒の波と直接比較する実験は行えないが、側壁や反射波の影響を排除して水槽実験を行うこと、水槽実験で流動（乱流）構造と乱流混合を同時に計測することは重要である。これまで、マイクロバブルを用いた流動（乱流）構造の可視化と水温計アレイによる成層構造変化の計測、超音波流速計による流速の短周期時間変動（乱流変動）の直接評価を行った。今年度をこの研究の最終年度として、これまでの結果をまとめて報告する。

実験方法

周期1秒（波長1.56 m）、振幅最大4 cmの波を造波機で発生させ、造波器からおおよそ29mの位置に超音波流速計（Nortek 社製 Vector）、50Hz水温計、29連水温計アレイを設置して計測を行った（図1～3）。超音波流速計の計測は水中の散乱体からブラッグ散乱した音波を用いるが、深海水槽には十分な量の散乱体がない。そこで水中にマイクロバブルを発生させることにした。既成のマイクロバブル発生装置は粒径が大きく浮力が大きすぎたため、粒径が小さいマイクロバブルを発生する装置を、技術職員の野田氏・前田氏に作成して頂いた。水温は50Hzの水温計と29連水温計アレイで計測するが、これらも野田氏・前田氏に作成して頂いた。マイクロバブルを既成の装置を用いて発生させ、グリーンレーザーを照射させることで、流動（乱流）構造の可視化も行った。また、風を発生させ、風の効果も調べた実験も補助的に行った。

水槽実験 全体図

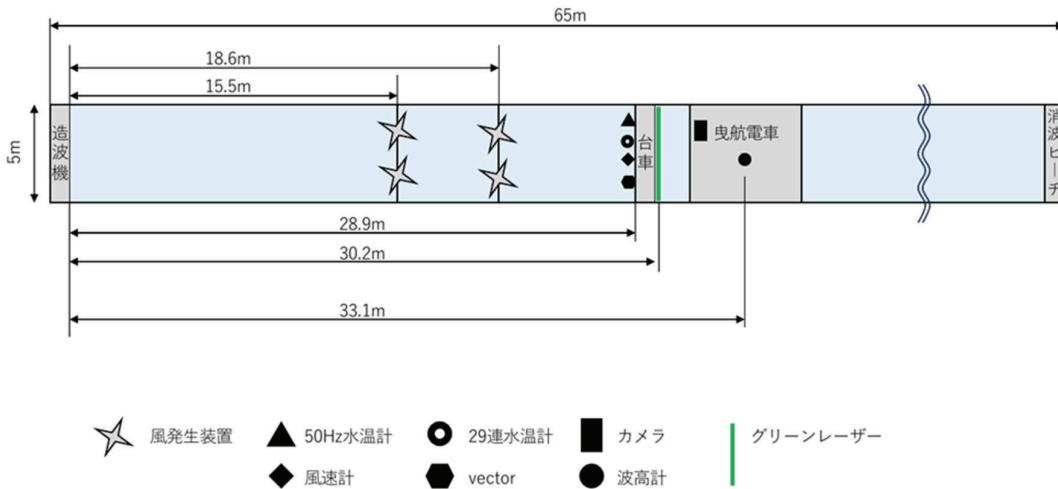


図1 水槽実験全体図（水平図）。左の造波器で図中右向きの波を発生させる。中央の星印にある送風器は右向きの風を生成する。造波器から約 29mの位置に、流速計、水温計、風速計を設置して水中の流速、水温、風速を計測する。曳航台車で波高を計測しつつ、グリーンレーザーを照射することで視覚化されたマイクロバブルをカメラで撮影する。

水槽実験 台車周辺拡大図（深さ）

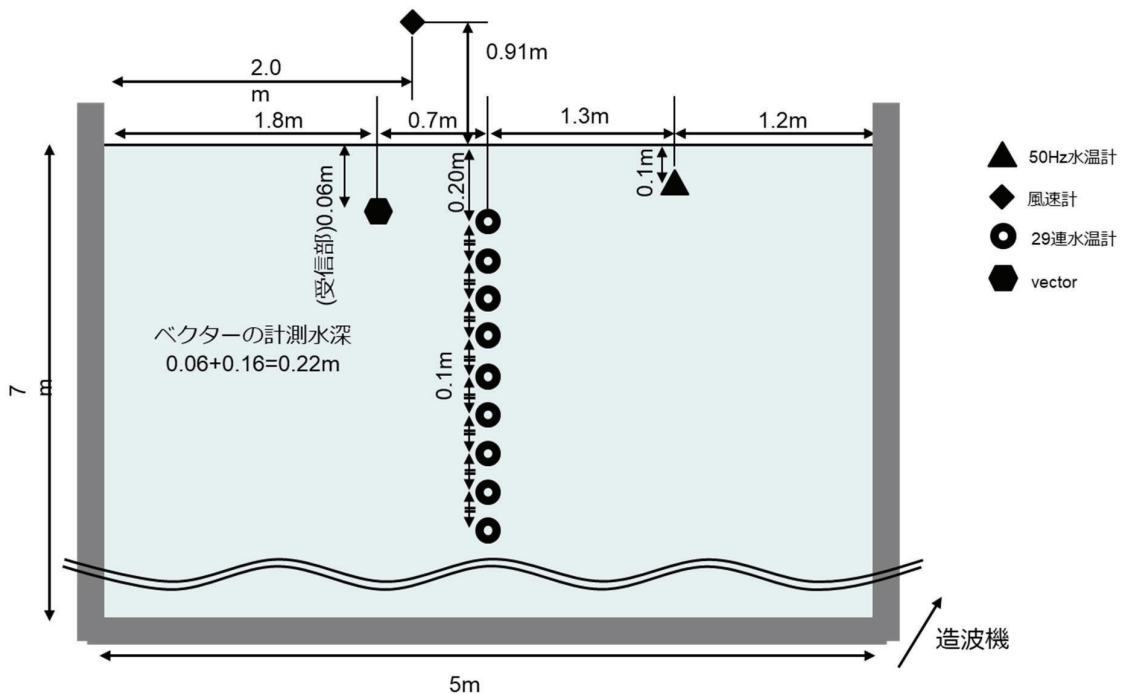


図2 水槽実験全体図(鉛直断面図)。左から超音波流速計、29連水温計アレイ、50Hz 水温計。29連水温計は、深度20cm までは1cm 間隔で20個の水温計が設置してある(図では省略)。

水槽実験 電車周辺拡大図（奥行きあり）

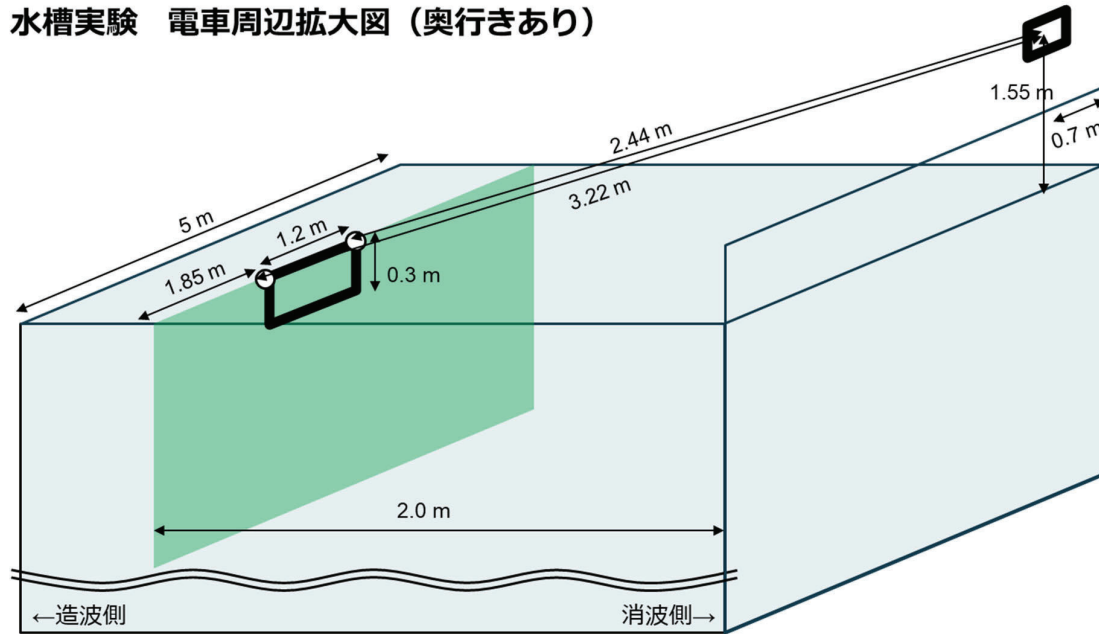


図3 水槽実験全体図。緑色の面がグリーンレーザー照射面。台車に設置したカメラ（図右上）で動画撮影を行う。

実験結果

図4は水温計アレイで捉えた水温変化の一例である。水温変化をそのまま図示すると、波の軌道運動による周期1秒の上下振動が目立ち水温変化が見にくいため、波周期で平均した水温を図示している。波の到達時刻（180s頃）以前に見られた水面付近の高い水温が、波到達時刻以降に低下していること、逆に深い層（例えば水深10cm）での水温が上昇している様子が見て取れる。波到達前後の水温変化は波の到達前の水温変化に比べて有意に大きいことから、これらの水温変化は波によるものであると結論付けられる。波の軌道運動による上下運動のみではそのような熱輸送を引き起こせないことから、波が二次的に乱流を引き起こし混合を引き起こしている可能性が示唆される。この結果は先行研究（Dai et al. 2010）と定性的に同様である。

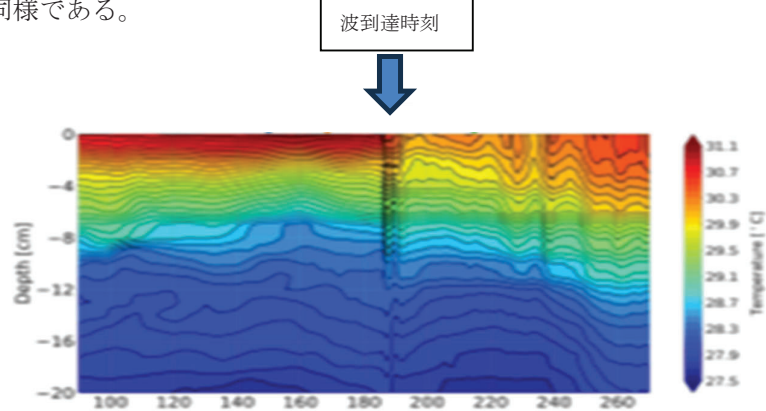


図4 水温の時間深度変化。横軸は時間（単位は秒）、縦軸は深度（単位はcm）。造波器からの波が到達するのは180s頃。

図5は超音波流速計で計測した深度22cmでの流速のパワースペクトルである。最も精度の高い鉛直流速成分（緑線）に着目すると、波の到達前（緑細線）には低かったパワーレベルが、波到達後（緑太線）にはどの周波数帯でも増加している様子が見て取れる。パワーのピークは波の周期に対応する1Hzに見られるが、2Hzから10Hzの高周波数帯でも有意に増加しており、さらにその傾きは $-5/3$ 乗に近い。波数ではなく周波数を横軸としているため、直接的に慣性小領域での乱流と結びつけることはできないが、これらの結果は、波の軌道運動に加えて、より高周波の乱流運動が波によって引き起こされたことを強く示唆するものである。

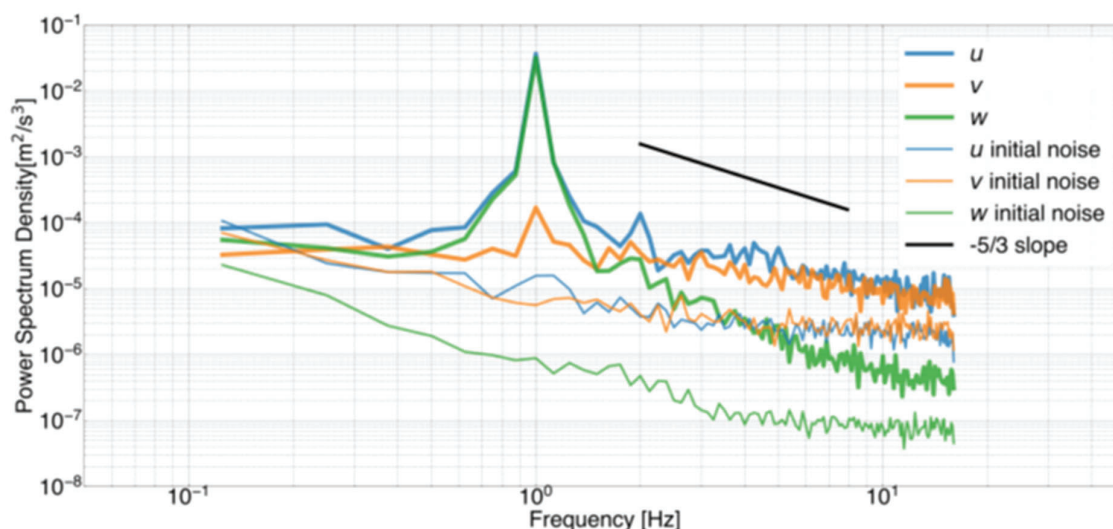
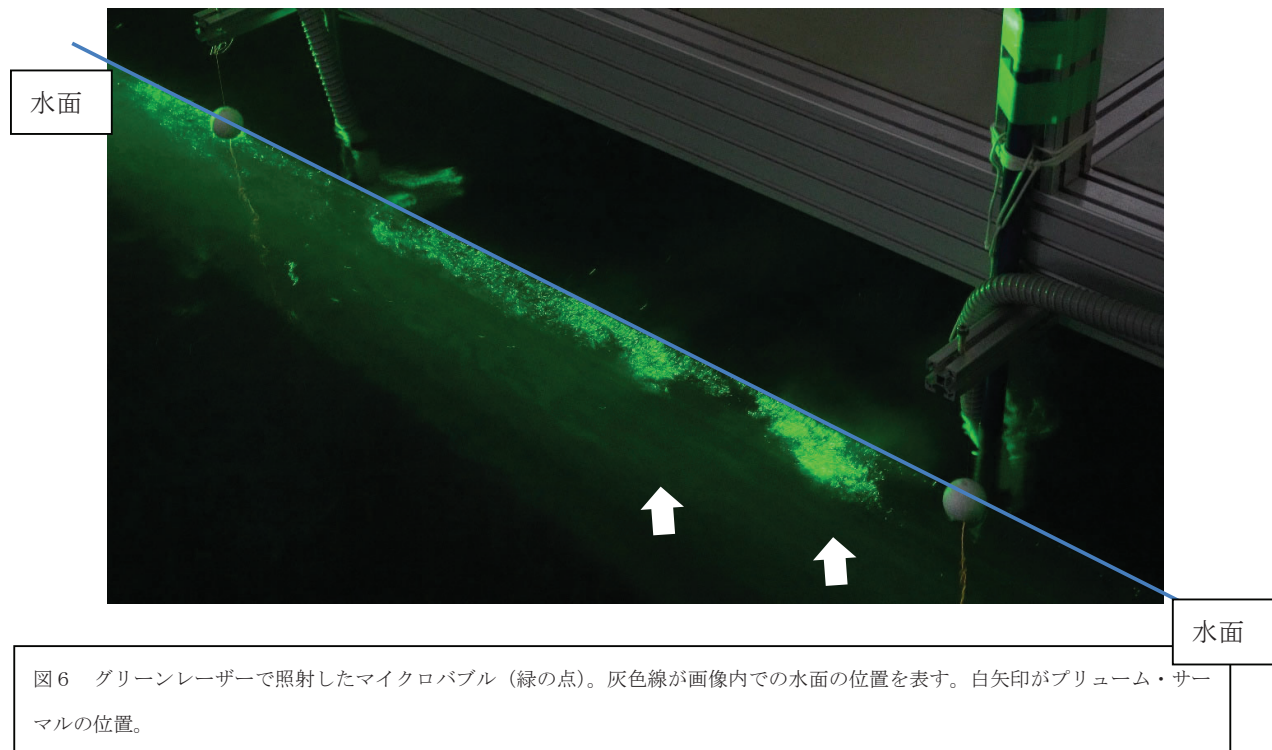


図5 超音波流速計で得られた流速のパワースペクトル図。横軸は周波数（単位は Hz）、縦軸はパワー（単位は $\text{m}^2/\text{s}^2\text{Hz}$ ）。青線が波の伝播方向成分、オレンジが伝播方向と直交する水平成分、

図6は水中に浮遊させたマイクロバブルをグリーンレーザーで照射した際の画像である。マイクロバブルは浮力のため波到達前は主に水面付近を漂っているが、波到達後、軌道運動で揺さぶられながら、徐々に下方に移動する。特徴的なのは、下方への移動が水平一様に生じるのではなく、プリュームまたはサーマル状に局所的に生じることである。下方移動が生じている間隔を画像から読み取ると、およそ等間隔であり、また時間とともに増大する傾向が見られた。これらは、波が引き起こす二次循環の性質と、定性的にも定量的にも良く一致していた。



結論

以上の結果から、水面波は波の伝播方向に軸を持つロール状の二次循環を引き起こすこと、その二次循環は乱流を付随すること、この乱流により水が混合され熱が下方に輸送されること、を水槽実験で確認した。これは Imamura et al. (2025)の直接数値実験の結果と同様であった。これらの結果は、水面波が単に水面を上下させるだけではなく、鉛直混合も引き起こすことを示すものである。風の弱い時期に海面水温が異常に高温化する海洋熱波と呼ばれる現象時に、水面波が海面水温を下げる役割を果たしている可能性が考えられる。今後は現場海洋での定量評価が重要である。

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。おかげさまで水面波が生成する乱流に関して体系的な実験を行うことができました。また胡教授には深海水槽を利用する機会を与えて頂きました。記して感謝いたします。

参考文献

Babanin AV, Haus BK (2009) On the existence of water turbulence induced by nonbreaking surface waves. J Phys Oceanogr 39:2675–2679. <https://doi.org/10.1175/2009JPO4202.1>

Dai D, Qiao F, Sulisz W et al (2010) An experiment on the nonbreaking surface-wave-induced vertical mixing. J Phys Oceanogr 40:2180–2188. <https://doi.org/10.1175/2010JPO4378.1>

Fujiwara Y, Yoshikawa Y, Matsumura Y (2018) A wave-resolving simulation of langmuir circulations with a nonhydrostatic free-surface model: Comparison with Craik-Leibovich theory and an

alternative Eulerian view of the driving mechanism. J Phys Oceanogr 48:1691–1708.
<https://doi.org/10.1175/JPO-D-17-0199.1>

Fujiwara Y. Dynamics of turbulence production by attenuating interfacial gravity waves observed in air–water coupled wave-resolving simulation. Journal of Fluid Mechanics. 2024;999:A97. doi:10.1017/jfm.2024.934

Imamura, H., Yoshikawa, Y. & Fujiwara, Y. Direct numerical simulations of the nonbreaking surface-wave-induced turbulence. Ocean Dynamics 75, 25 (2025). <https://doi.org/10.1007/s10236-025-01674-7>

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4回生 今村 春香

金属材料中の水素化物形成

公益財団法人若狭湾エネルギー研究センター 安永和史

1. 緒言

Zr 合金は軽水炉の燃料被覆管材料として利用されている。炉内で使用中の Zr 合金は、表面から水素を吸収して水素化物が形成され機械的性質が変化する可能性がある。水素化物が被覆管の円周方向に沿って形成されるように、被覆管は円周方向に特定の結晶面が配向するように製造されている。しかし、被覆管の内圧が上昇し円周方向に引張り応力がかかる状態では、水素化物が被覆管表面に垂直な方向に並ぶ傾向があり、亀裂が発生・進展した場合には表面に達する方向となる。Zr は水素との親和性が高く、不純物として含有するため熱処理の時点でも水素化物が形成されている。今回、水素化物の形成挙動に関する基礎的な情報を得るために、Zr 合金に熱処理の時点で存在する既存の水素化物の形成状態について調査した。

2. 実験方法

実験に用いた Zr 合金は Zry-4 試料で、形状は直径 3 mm、厚み 100 μm の円盤形である。熱処理条件は、 3.0×10^{-4} Pa の真空中において 630°C で 2h である。Zry-4 試料は、集束イオンビーム (Focused ion beam; FIB) 法により薄膜化し、微細組織を観察することにより、既存の水素化物の形成状態について調査した。Zry-4 試料の微細組織の観察には透過型電子顕微鏡 (Transmission Electron Microscope; TEM, JEM-2010) を用い、明視野像、電子線回折像を取得した。

3. 結果および考察

図 1 は、Zry-4 に不純物として含まれる水素が水素化物 (ZrH_x) として析出している状態を捉えた明視野像で、同一領域から得られた電子線回折像を左上に挿入している。明視野像は、 $[2\cdot1\cdot10]$ 入射の条件で電子線を照射して得ており、水平方向に平行な面が c 面 (c-plane) である。矢印で示すように水素化物は、薄いレンズ状の形状を呈している。Zr 合金中の水素化物は、六方最密構造である母相の c 面 $\{0001\}$ が晶癖面でこの面に沿って形成されるが、水素化物は c 面から傾斜して観察されている。そこで、水素化物の長軸長さと c 面からの傾き・角度を測定した。c 面からの角度は、反時計方向を正とした。図 2 は、水素化物の長軸の長さ (nm) を c 面からの角度 (degree) に対して表示した結果である。角度は $-16.5 \sim 21.1^\circ$ の範囲に分布し、c 面から傾斜した方向にも成長している。角度の符号が異なる水素化物が、4 (負) : 5 (正) とほぼ同数存在していることは、水素化物の形成が c 面に対して対称であることを示している。さらに、水素化物の長軸長さと c 面からの角度に相関がみられないことから、水素化物の成長方向は、形成の初期段階で決定されることが示唆される。

4. まとめ

Zry-4 試料に元来含まれる水素化物は、その長軸が晶癖面である c 面から傾斜した状態で存在した。すなわち、応力が付加されていない条件で水素化物が形成された場合でも、c 面に垂直な方向に成長する成分をもつことが明らかになった。今後、他の六方最密構造をもつ金属材料についても水素化物の形成挙動を調査する予定である。

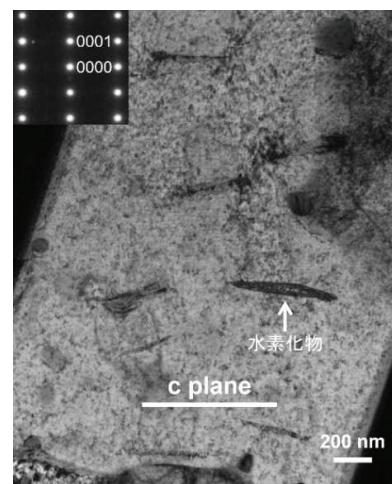


図 1 Zry-4 中の既存の水素化物

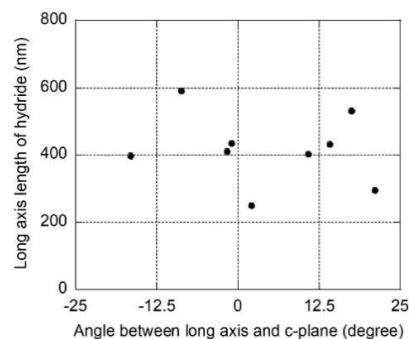


図 2 Zry-4 中の水素化物の長軸の長さ、c 面からの角度の分布

海洋環境シミュレーション水槽を用いた波と気泡の相互作用の解明

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、外乱を除去可能な海洋環境シミュレーション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、造波装置と外置き型多連ファンの設置と動作検証を実施し、造波の程度を風速・波高・水位・差圧測定を通して検証した。

・ 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、外乱を除去可能な海洋環境シミュレーション水槽を使用することが重要である。しかし、本水槽では、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実験水槽を使用して、波の持つ性質を示す統計量が同じ波を風波水槽入口から何度も送ることで長い吹送距離で発生する波を再現する、いわゆるループ法の確立を目的とする。今年度は、共同利用の実験水槽にて、造波装置と外置き型多連ファンの設置と動作検証を実施した。ループ法を用いる場合の、通常風速下における風波の発達の検証を実施した。

・ 実験方法および実験結果

ループ法実験は、造波装置（図1）と多連ファン（図2）を用いて実施した。波高測定により得られた計測データを造波装置の入力値として再利用することで実質的なフェッチ F を伸展させた。また、再現精度の向上を図るため、造波装置の設置位置に起因するスペクトルのズレを各ループで補正を行った。その結果、スペクトルのピークが実質的なフェッチ F の増加に伴い発達し、低周波側へとシフトした。これは、 F が大きくなるにつれて、波の持つエネルギーが増大し、波長が長くなり風波が発達していることを示している。表1のとおり本試験における実験条件をまとめた。なお、本表には、同利用機器の利用初期（2017年度）からの実験条件の概要も参考として掲載した。

Table 1: Maximum wind velocity in RIAM wind-wave tank. Different fan were used for the periods 2017–2024 and 2025. 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_{loop} [num]	N [rpm]	F [m]	U_∞ [m/s]	U_{10} [m/s]	u^* [m/s]
<i>Takagaki et al.</i> (2017)	TW	0	1300	6.5	14.0	22.8	-
RIAM Report (2019)	TW	0	1700	6.5	22.2	36.8	-
RIAM Report (2020)	TW	0	1600	33	24	37.6	1.9
RIAM Report (2021)	TW	0	1700	33	25	43.5	2.2
RIAM Report (2022) and <i>Takagaki et al.</i> (2023)	TW	0	1700	20	24.0	40.3	2.0
<i>Ikeda et al.</i> (2024)	TW	0	1700	20	22.9	-	-
<i>Ikeda et al.</i> (2024)	SDS	0	1700	20	24.0	-	-
<i>Kurihara et al.</i> (2024)	TW	0	1700	5.5	21.52	-	-
<i>Kurihara et al.</i> (2024)	TW	0	1700	6.5	21.46	-	-
<i>Kurihara et al.</i> (2024)	TW	0	1700	19	24.01	-	-
<i>Kurihara et al.</i> (2024)	TW	0	1700	20	24.09	-	-
<i>Kurihara et al.</i> (2024)	TW	0	1700	33	24.04	-	-
<i>Kurihara et al.</i> (2024)	SDS	0	1700	5.5	21.94	-	-
<i>Kurihara et al.</i> (2024)	SDS	0	1700	6.5	21.83	-	-
<i>Kurihara et al.</i> (2024)	SDS	0	1700	19	23.49	-	-
<i>Kurihara et al.</i> (2024)	SDS	0	1700	20	23.40	-	-
<i>Kurihara et al.</i> (2024)	SDS	0	1700	33	23.49	-	-
<i>Present</i>	TW	0	-	35	3.3	-	-
<i>Present</i>	TW	1	-	70	3.3	-	-
<i>Present</i>	TW	2	-	105	3.3	-	-



Fig. 1: Wave generator.



Fig. 2: Multi fan.

・目的

近年、日本周辺のイカ類、特にスルメイカの主漁場と漁獲量が大きく変化している。多くの研究者は海水温の上昇にこれらの原因を求めているが、高水温がどのようなプロセスでイカの移動や回遊に影響を与え、場合によっては資源減少の要因になったかを具体的に示した事例は未だない。そこで、本研究では、海水温の変化が海流の変化を引き起こし、その結果としてイカの移動と回遊が変化したと考え、数値海洋モデルをもちいてイカ類の移動・回遊と再生産構造に関する仮説を構築する。次いで、この仮説をもとにイカ類の主漁場と漁獲量の変化の原因を明らかにする。

・実験方法

九州大学共同利用機器(九州大学比較社会文化研究院)であるフィールドエミッション電子プローブマイクロアナライザ(JXA-8530F)を用いて、大韓民国カンヌン沖で2023年9月15日に漁獲されたスルメイカ15個体から摘出した平衡石の微量元素(カルシウムとストロンチウム)を測定し、サンプル個体が経験した水温を推定した。また、平衡石の輪紋を計数し、日齢とふ化日を推定した。これらの結果をもとに、海流によるイカ類の移動と回遊をシミュレーションするために、九州大学応用力学研究所のスーパーコンピュータシステムを利用した。基本データとして東シナ海・日本海のデータ同化モデルによる海況予報・解析値データセット(DREAMS データ)を使用し、3次元海洋大循環モデルとしてRIAM Ocean ModelでLagrangian粒子追跡実験を行い、サンプル個体の移動経路を推定した。

・実験結果

平衡石の微量元素分析(カルシウムに対するストロンチウムの割合)結果から、サンプル個体が幼生時に経験した水温は漁獲直前に経験した水温とほぼ同じであることが明らかになった。また、ふ化日は同年2月23日頃と推定された。漁獲場所から粒子逆追跡実験を行ったところ、推定ふ化日に該当する水温海域(20℃～22℃)に分布していたのは1万個の粒子のうち281個で、分布海域は主に東シナ海北部から中部の大陸棚縁辺部であった。これらの粒子が実験期間(204日)に移動した経路の水温変化は、サンプル個体の平衡石微量元素分析から推定した水温変化とよく一致していた。粒子281個の移動経路の緯度経度重心は、リリース後カンヌン沖から一時東の対馬海盆へ移動したあと、対馬海峡を経て、五島西部沖、そして大陸棚縁辺に沿って南下していた。

・考察

平衡石の微量元素分析と粒子逆追跡実験から推定したサンプル個体のふ化場所は、水産庁が実施している資源評価調査の報告内容と矛盾しなかった。つまり、サンプル個体は冬季発生群(1月～3月ふ化)であり、東シナ海北部から中部の大陸棚縁辺でふ化していることが確かめられた。サンプル個体が最も低い水温を経験していたのは、甌島西方、五島南部海域を北上している4月頃であった。その後、経験水温は上昇し、対馬海盆海域で最も高く、カンヌン沿岸に近づくにつれて低下していた。この推定移動経路は、韓国水産研究院で想定されている韓国日本海側におけるスルメイカ漁場形成の考えとおおむね一致していた。

粒子順追跡実験を東シナ海北部から実施した場合、一般的に多くの粒子が対馬海峡を北上後、日本海に広く拡散する。それにもかかわらず、これまで韓国東岸のカンヌン沖から大和堆にかけての海域では大量のスルメイカが漁獲されてきた。この要因は、対馬海盆海域でほぼ常時発生している冷水や暖水の渦構造によってスルメイカが移動途中で補足されるからと考えられる。そして、渦構造の変化によって一部が半島方向へ運ばれ、また反対の大和堆方向へ運ばれるからであろう。

一方、近年は対馬暖流の強化によって、特に対馬暖流第3分枝(東韓暖流)の北偏が確認されている。この現象によって、若齢のスルメイカが対馬海盆海域に捕捉されず、日本海北西部へ過剰に運ばれている可能性がある。スルメイカが成熟し産卵して正常な再生産を行うためには、対馬海峡へ戻ることが必要である。よって、大量の若齢個体が日本海北西部まで移送された場合、対馬海峡へ回帰する産卵親が減少するだろう。産卵場として確認されているのは対馬海峡と東シナ海北部から中部の大陸棚縁辺部であることから、夏季に対馬海盆など近辺の海域に分布する個体が多ければ多いほど、安定した再生産が行われるはずである。今後、対馬海盆海域とスルメイカの資源減少との関係を精査する必要がある。

・研究成果報告

なし

・研究組織

研究代表者	滝川 哲太郎	長崎大学	准教授	研究統括
所内世話人	広瀬 直毅	九州大学応用力学研究所	教授	粒子追跡実験
研究協力者	山口 忠則	長崎大学	特任研究員	平衡石分析

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田辺湾における冗長観測によって、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。今年度は抽出した観測事例をより詳細に調べ、うねりと風波の相対的な強度が異なる状況での大気境界層（ABL）に系統的な変化がみられるかどうかについて検討する。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系統的に変化させる関係性があることが分かった。

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。有効な観測事例の中からうねりと風波の相対的な強度関係が異なる典型的な 3 つの事例を詳細に調べた（表 1）。それぞれ (A) うねりが弱い事例、(B) うねりが強く風波が弱い事例、(C) うねりと風波の両方が存在する事例である。また、2014 年の白鳳丸航海（KH-14-1）において観測した波浪の情報から得た Swell-Windsea Strength Index (*SWSI*) と風波と海上風の方向の関係（参照：2022 年度報告書）が今回の観測事例においても成立するかどうかを検討した。

表 1：観測塔におけるうねりと風波の相対的な強度の関係に基づいて抽出した典型的な事例。(A) はうねりが弱い事例、(B) はうねりが強く風波が弱い事例、(C) はうねりと風波がいずれも強い観測事例。

	Date	time	wind	swell	windsea
(A)	Apr. 12, 2023	17:30	7.0	0.3	<
(B)	May, 30, 2023	9:30	3.0	0.8	>
(C)	Aug., 30, 2024	9:30	8.7	0.8	<

結果の概要

図 1 は、表 1 に示した観測事例における 1 時間の海上風速変化と鉛直構造を示している。ここで、海上風鉛直構造を対数分布則を前提とした傾度法に基づいて計算し、実測値と比較した。事例 (A) が高くなるほど風速は高くなり、全体的に傾度法による各高度風速推定値は観測値と大きな乖離はない。事例 (B) は一貫して風速は弱く、徐々に風速が上昇するものの 4m/s を超えていない。この時間帯は 13m 風が他高度より低くなっており、通常対数則とは全く異なる変化をしていることがわかる。鉛直構造を見てみるとこの傾向は顕著であり、明らかに 6m と 4m の高度の風が加速されている。結果的に、傾度法で計算した鉛直構造は、選択した高度によって全く異なった鉛直構造が計算されている。事例 (C)

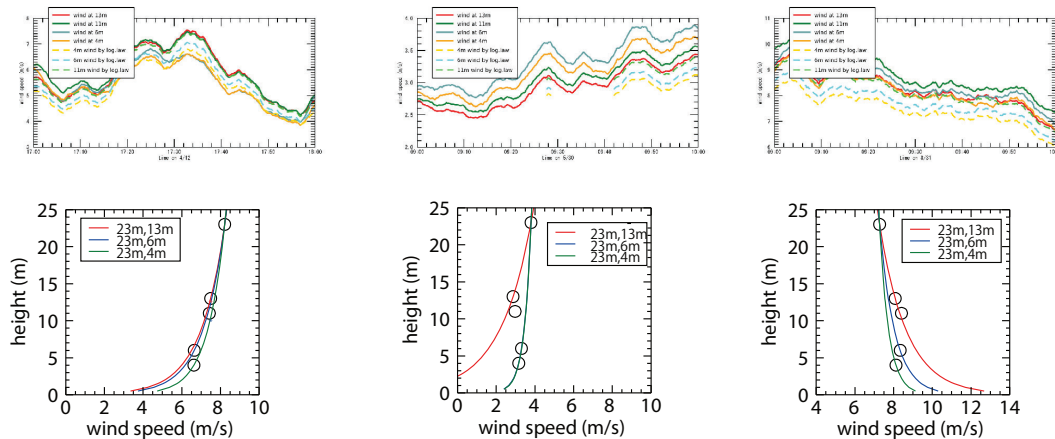


図 2：（上図）表 1 に示した時刻を含む 1 時間の風速変化（上左）2023 年 4 月 12 日 17 時～18 時、（上中）2023 年 5 月 30 日 9 時～10 時、（上右）2024 年 8 月 31 日 9 時～10 時。実線は観測値、破線は対数則から計算した推定値を示す。それぞれ（赤）13m、（青）11m、（緑）6m、（橙）4m の高度のものを示す。

（下図）表 1 の時刻を挟む 20 分間の時間平均風速（○）と観測塔 3 次元風速計（23m）と（赤）13m 風、（青）6m 風、（緑）4m 風から対数則によって計算した風速鉛直構造を示す。

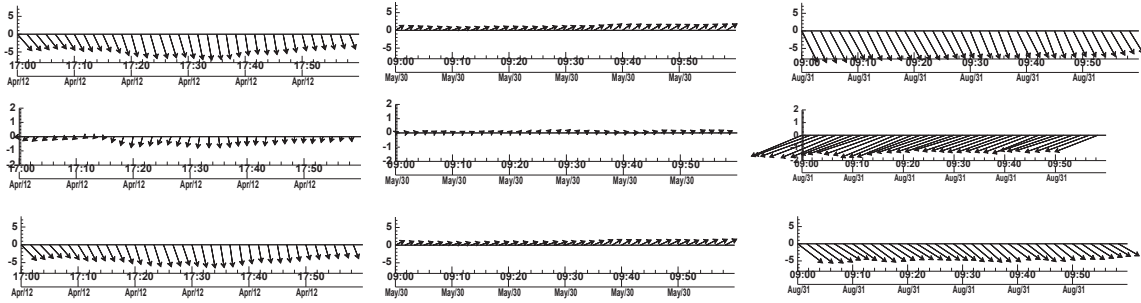


図2：ケース A-C の（上）11m 高度風ベクトル（上向きが北向き風），（中）4m 高度風から見た 11m 高度風の相対風ベクトル（上向きは 4m 風に対して 11m 風が同じ方向であることを示す），（下）4m 高度風ベクトル（上向きが北向き風）．横の配置は図 1 と同じ

に関しては，当初 8m/s 以上の海上風であったものが徐々に弱まる．海上風が強いため風波も発達しているが，事例（C）はうねりも強い．事例（A）と事例（B）（C）の違いに，うねりの強さが関係していることが強く示唆される．

次に，うねりによる下層風の風向への影響を確認する．図 2 は（A）－（C）それぞれの場合の 1 時間の風ベクトル変化を示している．図 2 の上と下のパネルはそれぞれ 11m 高度と 4m 高度における風ベクトル，中段のパネルは 11m 風に対する 4m 風の相対風ベクトルである．（A）と（C）はほぼ北西風であり，（B）のみ南西風である．11m 高度と 4m 高度の風ベクトル自体は同様な変化をしているように見えるが，相対ベクトル（中断）を見ると，（A）は両高度の風は同一方向で，4m 風の方が弱い．これは古典的な ABL の風速構造にほぼ合致する．一方，（C）では 4m 高度風が 11m 高度風に較べて反時計回りに 100° 程度回転している．うねりの方向（北東向き）を考慮すると，4m 風ベクトルがうねりに影響されて反時計回りに回転しているという解釈と整合性がある．（B）では，風速自体が小さいが，4m 風の相対風ベクトルは 11m 風と逆向きになっており，これはうねりの方向に 4m がわずかではあるものの加速されていることと整合性がある．

この関係を，既報の白鳳丸航海（KH-14-1）時に得られた SWSI と海上風と風波の方向差の関係に当てはめた．SWSI は下記のような指標である．

$$swsi = \left(\frac{h_s}{h_w} \frac{f_s}{f_{w*}} \right)^2 \cos \theta_s, \quad (1)$$

ここで， h と f はそれぞれ波高と周波数を表し，添え字はうねり(s)と風波(w)を示す． θ_s はうねりと 10m 高度海上風の角度を表す．図 3 に，KH-14-1 の観測結果（○）に今回の観測結果（☆）を重ねた図を示す．ただし，風波の方向は 4m 風向と一致すると仮定し，10m 高度風は 23m と 4m の海上風から傾度法で推定した．これらの仮定の下ではあるが，図 3 に示したように，ほぼ整合的な関係にあることが分かった．これまでの共同研究において外洋で得られた，うねりによる下層風の回転が ABL の詳細な観測によっても確認されたと評価できる．今後は，観測塔で得られた冗長観測の結果を半自動的に集約し，統計的な手法を用いてさらに結果を確認する予定である．

謝辞：本観測は京都大学防災研究所附属白鳳丸航海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：1 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

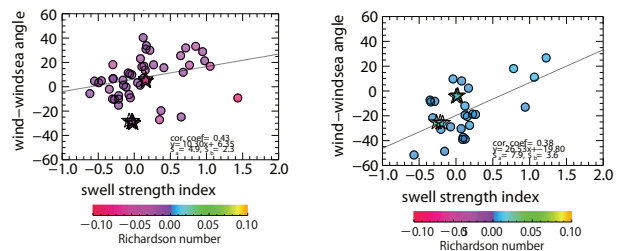


図3：swsi に対する風と風波のなす角度の依存性．点の色はリチャードソン数(Ri)を示し（左： $Ri < 0$ 、右： $Ri > 0$ ），強不安定($Ri < 0.01$)を除いて示している．点線は線形回帰直線を示す．○は KH-14-1 の観測値，☆は今回のデータを表す．

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。豊後水道の潮汐フロント域で生じる活発な鉛直混合は、底層の栄養塩の有光層へ輸送し、このことが高い生物生産性の要因となる。この栄養塩は豊後水道南部の黒潮域の中層水に由来する。本研究では黒潮中層水が豊後水道底部に供給されるプロセスとそれに対する乱流混合の寄与を明らかにするために、豊後水道南部において水質と乱流の観測を実施した。

研究内容 2025 年の 7 月に長崎大学水産学部練習船「長崎丸」、11 月に鹿児島大学水産学部練習船「かごしま丸」を用いて、豊後水道南部の陸棚端周辺海域において乱流混合の観測を行った。複数の観測線や定点での 25 時間観測を実施したが、本稿では豊後水道陸棚端から陸棚斜面を南北に切る A01-A09 観測線で得られた結果について報告する (図 1 a)。乱流微細構造プロファイラ TurboMAP-L を用い、海面下から海底直上までの乱流運動エネルギー散逸率 ϵ の計測を行うとともに、船底超音波ドップラー流速計によって流速を計測した。

結果 7 月、11 月の両方の観測で陸棚端に位置する A05 測点では、海底上 20-30 m にわたり $10^{-7} \text{ W kg}^{-1}$ を超える著しい乱流混合が生じていた (図 2)。A05 測点で観測が行われたのはいずれも干潮時であったが、底層では強い流れが生じており、地形によって強化される内部潮汐によって乱流混合が生じている可能性が示唆された。そのため A05 測点の底層 (深度 100-150 m) で得られた平均的な浮力振動数 N の値 (Fig. 1 b) を基に、海域で卓越する M_2 潮汐の周波数 (ω_{M_2}) を持つ内部潮汐の海底強化の可能性を検討した。内部潮汐波の理論では、海底上を伝搬する内部潮汐のエネルギーの伝搬角度 $\gamma = \sqrt{\frac{\omega_{M_2}^2 - f^2}{N^2 - \omega_{M_2}^2}}$ が海底斜面の傾きと一致する場合、エネルギー密度が上昇し、鉛直シアと乱流混合が強化され得る (Baines 1998; Lien and Sanford 2001)。

7 月と 11 月のいずれの成層条件の場合も、内部潮汐の伝搬角度と海底斜面の傾きが一致するのは、観測線では A05 測点付近であった (図 1 a)。観測で得られた成層構造が水平方向に一様に分布しているとする、この条件を満たす海底斜面は豊後水道南の 150 m 等深線に沿って分布しており、 M_2 内部潮汐の強化が広く起こる可能性が示唆された。

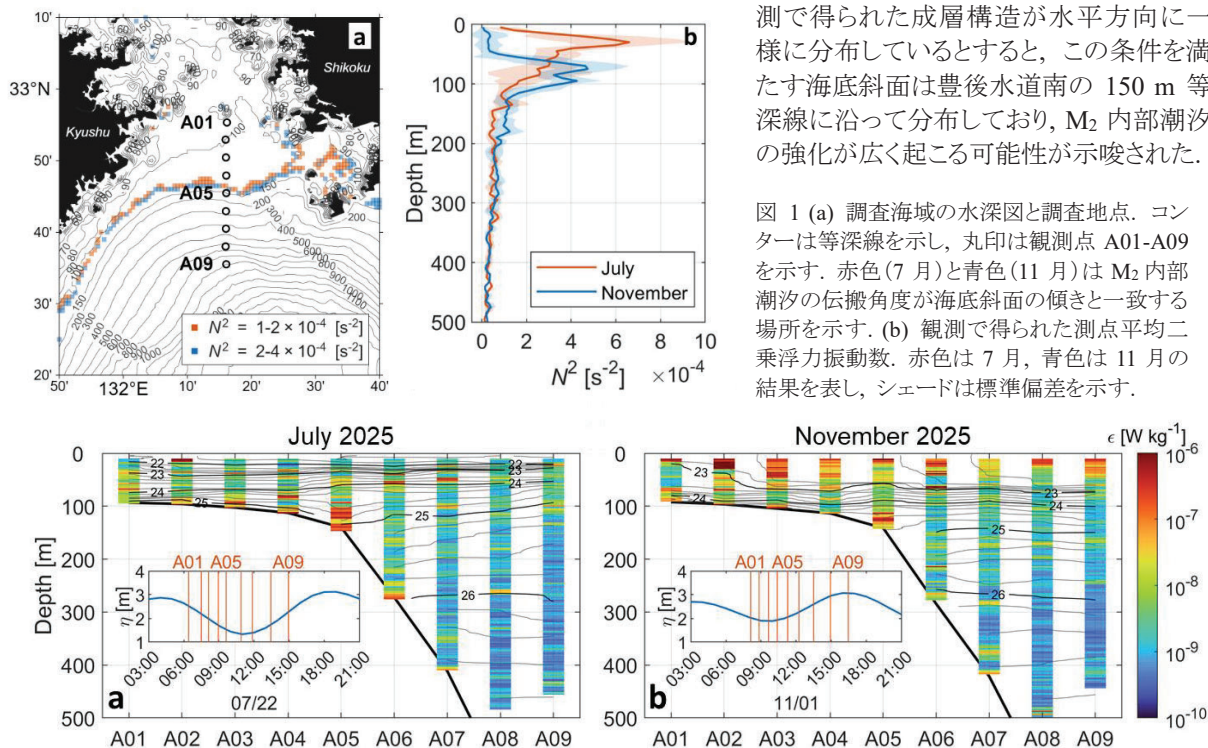


図 1 (a) 調査海域の水深図と調査地点。コンターは等深線を示し、丸印は観測点 A01-A09 を示す。赤色 (7 月) と青色 (11 月) は M_2 内部潮汐の伝搬角度が海底斜面の傾きと一致する場所を示す。(b) 観測で得られた測点平均二乗浮力振動数。赤色は 7 月、青色は 11 月の結果を表し、シェードは標準偏差を示す。

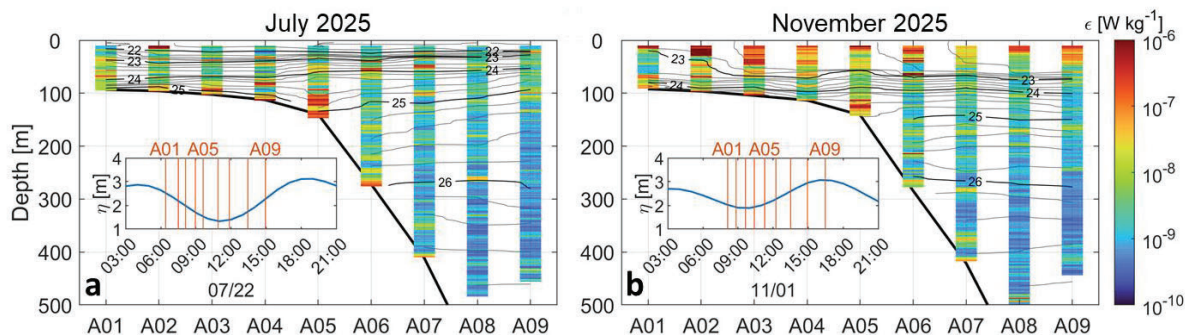


図 2 2025 年の (a) 7 月と (b) 11 月に A01-09 測点で得られた乱流運動エネルギー散逸率の鉛直断面分布。カラーは散逸率を示し、コンターは σ_θ で表したポテンシャル密度、黒線は海底を示す。図中の青線グラフは宇和島観潮所における実測潮位 (気象庁データ提供)、赤線は観測時刻を示す。

海洋環境シミュレーション水槽を用いた飛散液滴生成機構の解明

岡山理科大学大学院 理工学研究科 システム科学専攻 岩野耕治

・要旨

大気海洋間における熱の輸送に及ぼす飛散液滴の影響を評価するためには、風速や波高、乱流強度等の種々の要因が液滴の発生機構に及ぼす影響を明らかにする必要がある。今年度は、応用力学研究所の共同利用水槽において、造波装置により生成した水面波が、回流装置と乱流格子を用いて液側に人工的に生成した乱流場に及ぼす影響を調査した。

・序論

大気海洋間における熱の輸送に及ぼす飛散液滴の影響を評価するためには、風速や波高、乱流強度等の種々の要因が液滴の発生機構に及ぼす影響を明らかにする必要がある。しかしながら、実海洋環境では詳細な計測が難しいことに加え、環境が時々刻々変化するため観測データから種々の影響を個別に抽出し正確に評価することは難しい。そこで、本研究では、安定した海洋環境を再現可能な海洋シミュレーション水槽を用いて本課題に取り組むことを目的とした。今年度は、造波装置と回流装置を用いて水面波が液側乱流に及ぼす影響の調査を行った。

・実験方法および実験結果

水槽上流部の液側に角棒製の乱流格子（格子棒間隔160 mm）を設置した（図1）。回流装置を用いて液側に0.22 m/sの水流を発生させ、乱流格子下流に一様等方性に近い乱流場を生成した。さらに、造波装置を用いて、周波数1.0 Hz、波高27 mmの正弦波を発生させた。格子から6.5 m下流の位置において小型の電磁流速計を用いて主流方向流速の時系列データを取得した。流速は水深25 mmから300 mmの範囲で測定した。なお、本実験では送風機は使用していない。図2に、結果の一例として造波時と非造波時の水深25 mmにおける速度変動のパワースペクトルを示す。図より、造波の有無によらず1.0 Hz以下の領域に慣性小領域と考えられる $-5/3$ 乗の傾きが確認できる。また、造波時には水面波による軌道運動に対応する卓越周波数と高調波に対応するピークが見られる。さらに、造波時にはそれらのピーク以外の周波数でもパワーの増加がみられ、 $-5/3$ 乗の傾きの領域が高周波側に拡大していることが確認できる。このことから、水面波から液側の乱流へとエネルギー輸送が起こった可能性が示唆された。

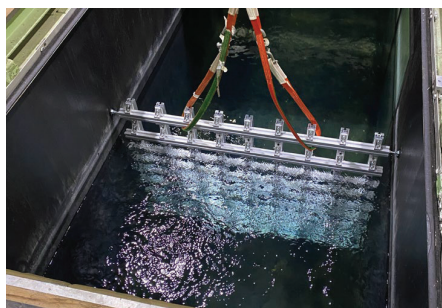


Fig. 1: Turbulence generating grid.

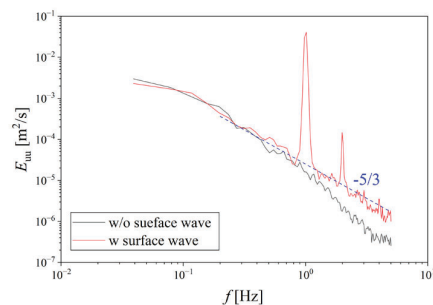


Fig.2: Power spectrum velocity fluctuation.

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

HF レーダと人工衛星による沿岸海域の諸現象を明らかにすることを目的に、(1) 人工衛星水温データを用いた播磨灘に出現する明石海峡による潮汐フロントの時空間特性の解析と、(2) HF レーダと 3 次元海洋モデル FVCOM を用いた大阪湾の残差流場の解析を行った。

2. 方法

- (1) JAXA「ひまわりモニタ」の 1 時間平均海面水温(SST)で、2 潮汐以上に渡って播磨灘の 90% でデータが得られている連続データを抽出した。昨年度は 1 ケースについて解析を行ったが、本年度は 2015 年 7 月～2025 年 9 月の該当データを検索し、5 ケースが該当した。キャニーエッジ検出手法によりエッジ検出を行い、検出されたエッジ分布と SST 分布から潮汐フロントを特定した。明石海峡からフロントまでの西方向・南方向距離、フロントに囲まれた水塊の面積と平均水温を定量化した。
- (2) FVCOM により、2015 年の大阪湾の流動をシミュレーションした。計算水位を観測潮位で、計算流速を海峡部の潮流推算値で、残差流分布を HF レーダによる海面流~求めたに基づく残差流で検証した。また密度流と吹送流を個別に計算し、これらを HF レーダによる海面流から差し引いて潮汐残差流を求め、残差流 3 成分の寄与率分布を月毎に求めた。

3. 結果

- (1) 明石海峡での潮流流速と西方向距離との相関から、(東西距離) = $a \times (\text{流速}) + (\text{転流時の西方向距離})$ の関係を見出した。また 2 潮汐間の平均潮流振幅と、 a 、及び転流時の西方向距離とに高い相関関係があった。これにより、播磨灘に現れる潮汐フロントの西方向位置は、明石海峡での潮流流速と平均潮流振幅から推定可能である事が示唆された。
- (2) 計算潮位は観測潮位と、位相、水位とも一致した。海峡部の計算流速は、潮流推算値の約半分程度だった。残差流として沖ノ瀬環流を再現したが、湾奥からの密度流と思われる流れが相対的に強く現れた。湾奥への河川流入に起因する密度流である河口循環流に付随して形成される西宮沖環流について、河川流量が多い夏季には底層水が大阪沿岸側から流入し、その場合は形成されないことが示唆された。いずれの月も、沖ノ瀬付近では潮汐残差流の寄与が大きく、湾奥と湾南部、及び淡路島沿岸で密度流の寄与が大きかった。吹送流は 1 月に湾中央付近で寄与がやや大きくなった。

4. 学会・研究会等発表

- ・谷田ら、FVCOM を用いた大阪湾の流況解析～潮流の精度評価～、JpGU2025
- ・谷田ら FVCOM を用いた大阪湾における流況場の再現性評価、愛媛大学瀬戸内水産環境研究集会
- ・谷田ら、FVCOM を用いた大阪湾における流況場の再現性評価、日本海洋学会 2025 年度秋季大会
- ・Hirokawa and Hayashi, Spatial and temporal characteristics of tidal fronts tracked by edge detection, 9th French-Japanese Symposium of Oceanography
- ・谷田ら、FVCOM を用いた大阪湾の流況解析、九大応研「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」
- ・谷田ら、3 次元海洋モデル FVCOM を用いた大阪湾の流況解析、香川大学沿岸海洋研究集会

5. 研究組織

林美鶴	神戸大学	准教授	廣川綜一	神戸大学	技術職員
周号然	神戸大学	博士前期課程 2 年	磯辺篤彦	九州大学	教授

相互比較観測から得られるエアロゾルの光学的特性の気候影響評価

富山大学学術研究部理学系 青木一真

要旨

地球温暖化が起因とする気候影響や気象災害は、毎日のように報道され、私たちの生活にも多大な影響を及ぼしている。エアロゾルによる生活に及ぼす影響は、気候変動のみならず、喘息疾患や心疾患による健康影響など多義にわたっており、とりわけ、九州北部地方は、大陸から複合的に影響を受けやすい場所にある。モデルに利用している二つの観測機器の相互比較を行い、地上検証の評価を行った結果、概ね、良い相関が示された。

1. はじめに

2003 年からは九大応力研において、太陽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。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ことがわかっている。本研究では、九大応力研屋上で観測している2台（NASAと九大）の観測機器から相互比較解析を行い、エアロゾルの光学的特性のモデル（SPRINTARS）の検証として用いられている二つの地上観測データの相互比較検証を目的とする。

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、2025年1月から12月までの九大応力研（春日(KSG)）における二つの観測機器の0.5 μm のエアロゾルの光学的厚さ（AOD(0.5)）の月平均値を示したものである。春高く、秋に低い季節変化が例年通りであり、3月の黄砂や7月の越境汚染など広域影響が光学的に高くなっていることが示された。SKYRADとAeronetの二つの観測機器の月平均値は、概ね、良い相関を示しているが、瞬時での相関は良いものの月平均値では、若干、違う月もあったので、モデルでの検証利用の際、注意が必要である。

11月のSKYRADは、測器の制御系の故障で欠測であった。

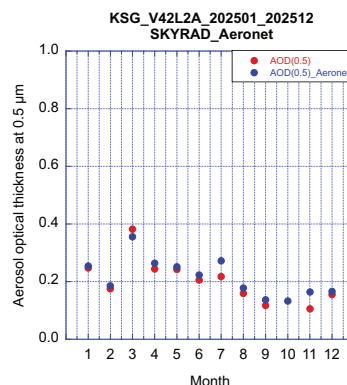


Fig. 1春日 (KSG) のSKYRADとAeronetの
2025年のAOD(0.5)の月平均値

4. 研究成果

Aoki et al: Comparison between ground-based and satellite solar aureole measurements of aerosol optical properties (AGU2025, New Orleans, 2025.12.17)

Aoki.K and F. Cario, Conoscere per proteggere - Knowledge as the key to protection "Climate change" (Osaka EXPO Italian Pavilion at CNR DAY, Osaka, 2025.09.19), [Invited Talk]

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)

短波海洋レーダを利用した若狭湾の海況観測

福井県立大学 渡慶次 力

1. 目的

若狭湾では、岸近くにおいてブリやサワラなどを対象とした定置網漁が行われ、沖合ではズワイガニやカレイなどを対象とする底曳網漁が盛んである。これらの漁場における海況の把握を目的として、福井県沿岸における海況情報システムの構築や、高解像度数値モデルを用いた急潮対策を進めてきた。現在、若狭湾ではリアルタイム観測ブイや係留系観測により把握している一方で、沖合の海況については調査船「福井丸」による船舶観測の結果や、DREAMS（九州大学）などの高解像度モデルの計算結果を参考にしている。しかしながら、沖合の海況を連続的に把握することはできていない。2025 年、新たに若狭湾に短波海洋レーダが ORINS 株式会社により設置され、沖合における表層流および波高が把握可能となった。そこで本研究の目的は、短波海洋レーダによって、漁業にとって重要な情報となる「強い流れ」や「渦」の発生状況を把握できるかを明らかにすることとした。

2. データと方法

分析には、若狭湾初期解析用データセット（ORINS 株式会社，2025）を利用した。図 1 には、若狭湾における短波海洋レーダのアンテナの設置状況および測定範囲を示す。若狭湾中央部から東部にかけての表層流および波高を把握できるよう、レーダのアンテナは若狭湾の東岸および南岸の 2 か所に設置されている。図中の赤い外枠は表層流の計測範囲を示し、内側の斜線部は表層流と波高の両方が計測される範囲を示している。

本データセットには、これらの範囲内における表層流速および波高がグリッドデータとして含まれており、表層流および波高の空間分布ならびにその時間変動特性について解析を行った。

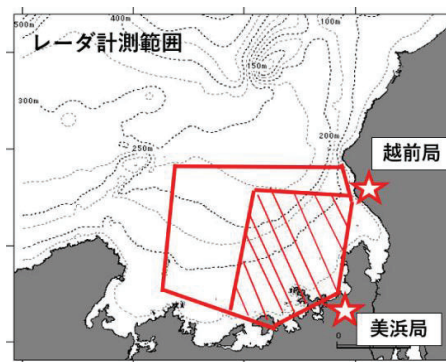


図 1 短波海洋レーダの計測範囲
外枠が表層流の計測可能範囲で、斜線は表層流と波高の両方が計測される計測できる範囲である。

3. 結果

若狭湾では、渦や一時的な強い流れが発生することが知られている。これらの現象は、漁具の破壊などの被害を引き起こす可能性があり、水産業における防災対策と深く関わる物理現象である。これらの物理現象に着目してデータ解析を行った結果、短波海洋レーダにより、渦の発生および移動、ならびに一時的な強い流れの時間変化を捉えられていることが確認された。

例として、図 2 に 2025 年 7 月 3 日の観測結果を示す。湾中央部には時計回りの渦が形成されており、渦の北側では流速 50 cm/s を超える強い流れ（図中の赤色ベクトル）が確認された。データを時系列的に解析した結果、渦の時間変化についても把握することができた。渦は約 2 日間にわたって強さを維持したまま停滞した後、南側から流れが弱まり、次第に消失したことが確認された。

また、定置網漁場が分布する岸近くにおいても強い流れの発生が確認された。図 3 には、2025

年 7 月 17 日 9 時の観測結果を示す。若狭湾東部の沿岸に沿って、流速 50 cm/s を超える強い流れが帯状に発達していたことが把握できた。

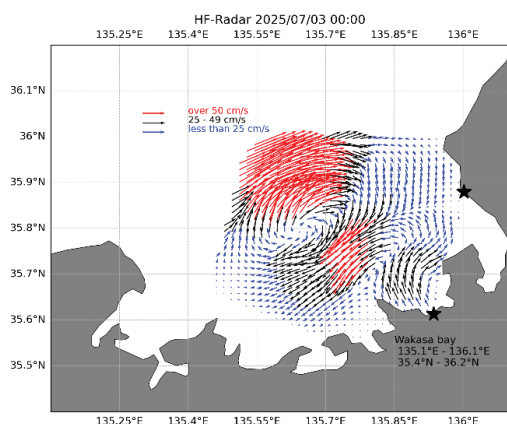


図 2 若狭湾に形成された渦（2025 年 7 月 3 日 0 時）。赤いベクトルは流速 50cm/s 以上を意味する。

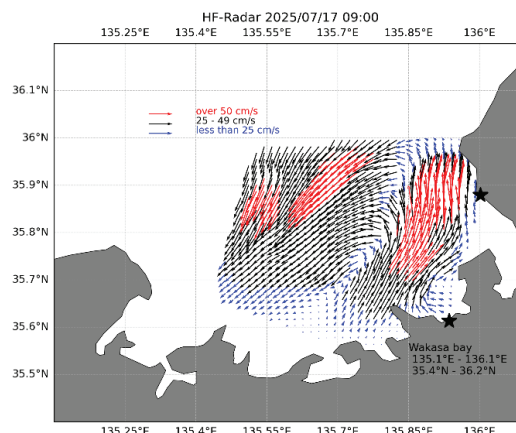


図 3 若狭湾東岸に形成された強い流れ（2025 年 7 月 17 日 9 時）。

分析の結果、短波海洋レーダにより、沖合で発生する渦や岸近くの強い流れを把握できることが確認された。これにより、底引き網漁業や定置網漁業において、有効に活用できる可能性が高いと考えられる。今後は、具体的な利用方法の検討や冬季や波高のデータを含めた活用についても検討を進める予定である。

4. 成果報告等

兼田淳史・横川将太・渡慶次力・藤井智史・梶原大郁、若狭湾海況情報における短波海洋レーダの活用, 2025 年度海洋学会秋季大会, 2024.9（函館市）等

5. 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

九州北部地域における化学輸送モデルを用いた植物に対するオゾンのリスク評価と 指標植物を用いたリスクの現場検証

長崎大学 総合生産科学域 山口真弘

【目的】光化学オキシダントの主成分であるオゾン (O_3) は現状レベルの濃度で感受性の高い植物の成長や生理機能を低下させることが報告されている。このような植物に対する O_3 のリスクは、化学輸送モデルによって推計された O_3 濃度から算出される植物影響評価のための曝露指標に基づいて評価することができるが、そのリスク評価結果の現地調査による検証は行われていない。そこで本研究課題では、越境大気汚染によって比較的高濃度の O_3 が観測される九州北部地域を対象に、(1) 化学輸送モデルを用いて推計された O_3 濃度に基づいて植物に対する O_3 のリスクを評価し、(2) 現地において指標植物を用いた O_3 の植物影響モニタリングを実施することでその評価結果を検証することを目的とした。

【実験方法】

(1) 化学輸送モデルを用いた植物に対する O_3 のリスク評価

九州における O_3 濃度の時空間分布の推計には大気質モデル CMAQ を用いた。この計算結果をもとに、QA/QC によるスクリーニングをかけた常監局の O_3 観測データによって大気組成再解析データセットを作成した。このデータセットを用いて植物影響評価のための O_3 曝露指標を算出し、リスク評価を行った。

(2) 指標植物を用いたリスク評価結果の現場検証 (植物影響モニタリング)

植物影響モニタリングに利用する指標植物としてインゲンマメ (*Phaseolus vulgaris* L.) の O_3 感受性の異なる 2 品種 (感受性品種 S156, 耐性品種 R123) を用いた。モニタリングは長崎大学環境科学部屋上と九州大学応用力学研究所屋上で実施した。インゲンマメを 1.4 L ポットに播種し、屋外で栽培した。長崎大学ではさらにオープントップチャンバーを用いたオゾン曝露実験も行った。ガス処理区は O_3 除去フィルターを用いて浄化した空気を曝露する浄化空気区と O_3 を含む野外空気を曝露する野外空気区を設けた。長崎大学では 2025 年 4 月 18 日～6 月 18 日、九州大学では 5 月 15 日～7 月 2 日に栽培し、期間中に葉の写真撮影し、 O_3 による可視障害の定量的評価のための画像解析を行った。

【結果と考察】

(1) 曝露指標に基づいた植物に対する O_3 のリスク評価

再解析データを利用したオゾン曝露指標は、元の数値モデルを利用した場合の指標と比較すると、より良い再現性 (高い確度) を有していることが明らかになった。この再解析データを用いて九州を対象に AOT40 (40 ppbv を超える 1 時間値の超過分の積算値) を算出した。対象期間はコムギへのリスクを考慮してその開花期前後 3 ヶ月 (3～5 月) とした。その結果、九州全域においてヨーロッパで定められている農作物を対象としたクリティカルレベル (3 ppm hr, コムギの収量 5%低下相当) を超過しており、 O_3 による減収リスクが示された。

(2) O_3 の植物影響モニタリング

いずれの実験場所においても、インゲンマメの葉に O_3 による可視障害が発現しており、 O_3 の植物影響が確認された。この影響を定量的に評価する手法を確立するために、撮影した葉の画像を赤 (R)、緑 (G)、青 (B) の画像に分解し、各色で輝度のヒストグラムを得た。赤や青において、 O_3 による可視障害が発現に伴って高い輝度の割合が増加するというヒストグラムの変化が認められた。そこで各色の葉の輝度を 5 (青) または 6 分割 (赤, 緑) し、それぞれに含まれるピクセル数の全範囲の総ピクセル数に占める割合 (%) を算出した ($D_1 \sim D_5$ または D_6)。この輝度の分布割合の変化を O_3 特有の変化として検出するために、それぞれの分布割合について耐性品種の値に対する感受性品種の比をとり (S/R 比)、対象葉の出葉後から撮影日までの積算 O_3 曝露量 (6～18 時の 1 時間値の積算値, SUM00) との関係性を調べた。その結果、青色の D_2 の S/R 比と SUM00 との間に有意な負の相関が認められ ($R^2 = 0.696$, $n = 6$, $p < 0.05$)、 O_3 害の指標としての有用性が示された。さらに、 O_3 による影響が最も軽微であったと考えられるときの青色の D_2 の S/R 比 (1.0, SUM00 = 4551 ppb hr) の 95%信頼区間の下限值が 0.91 であったため、この値を基準として青色の D_2 の S/R 比から O_3 害の発現の有無を判断できると考えられる。

【研究成果報告】 発表論文 1 件 (卒業論文), 学会発表 2 件 (国内 1 件, 国際学会 1 件)

【研究組織】 代表: 長崎大学 総合生産科学域 准教授 山口真弘 / 所内世話人: 九州大学 応用力学研究所 助教 板橋秀一 / 研究協力者: 山梨大学 大学院 総合研究部 准教授 黄瀬佳之

海洋が九州北部のメソスケール対流系の構造に及ぼす影響に関する研究

三重大学生物資源学研究所 万田 敦昌

研究目的： 四方を海に囲まれた日本では、海洋からの熱・水蒸気供給が夏季に発生する豪雨に強い影響を及ぼすことが示唆されている(Manda et al. 2014 Sci Rep; Manda et al. 2022 Frontiers in Climate)。このため、日本近海における最近の急激な海洋温暖化が豪雨に及ぼす影響を解明することが急務である。九州北部の豪雨を引き起こす大気現象のなかでも特に、メソスケール対流系に分類される線状降水帯の予測は難しく、数日にわたり移動・発達する大雨の一生において比較的「長時間維持される降水帯」と「短時間で構造が変わる降水帯」では、そのメカニズムを切り分けて議論する必要がある。本共同利用申請では、水温の長期変化が九州の大雨に及ぼす影響について研究実績のある申請者（万田）と九州北部の沿岸海洋の降水の研究実績がある世話人（山本、Yamamoto 2020, 2022 Atmos Res）と共同で、九州北部で見られる「長時間維持される降水帯」と「短時間に構造が変わる降水帯」のメカニズム解明を目指す。本年度の研究目的は、2021 年 8 月 12 日から 15 日にかけて九州北部に甚大な被害をもたらした豪雨事例および、2022 年 7 月 18 日に対馬海峡で発生した豪雨事例の要因を明らかにすることである。前者は停滞前線の影響が強く降水帯が比較的長時間維持される事例として、後者は地上付近の前線との関連性が弱く、短時間に降水帯の構造が変化する事例として取り上げた。加えて、海況の変動の影響を調べる感度実験を行うことで、申請者が現在進行中の研究（水温の長期変化と九州の大雨の関係および梅雨前線帯における大気メソスケール過程）の力学的な理解がさらに深まることが期待される。

手法： 降水レーダや衛星観測（降水量や積算水蒸気量）のデータより、降水帯の構造や環境場を調べる。次に、上記 2 事例を高解像度領域気象モデル(WRF-ARW)で再現する。さらに、海水温の平年値を用いた感度実験と前述の再現実験結果を比較することで、周辺域の海況変化が降水帯に与える影響を明らかにする。

結果と議論： 今年度の共同研究では、まず東シナ海と北太平洋西部の海面水温偏差が 2021 年 8 月に九州北部で発生した記録的な豪雨に及ぼす影響を数値シミュレーションによって解明した(Manda et al. 2025 J. Oceanogr.)。東シナ海北部の高水温偏差は梅雨前線帯に沿って東進したメソ低気圧を強化するとともに、降水域への水蒸気輸送を強める働きがあることが分かった。さらに東シナ海南部や周辺海域の水温偏差は、風の鉛直シアを増幅させ、対流活動の維持に寄与することを明らかにするとともに、日本南方の冷水偏差域上空を通過する気塊の不安定性が強化されるという新たな知見を得た。2022 年 7 月の事例では、18 日朝方(19UTC17JUL2022)に降水帯の南西側の縁で地上風収束線が生じ、降水はその収束線に隣接する発散域で見られた。その発散域の内部では、海峡を横切る地上風収束線に対して 60–90 度に傾く細かい収束が生じる。発散域内部の細かい収束に対応するような微細で筋状に強化される降水は、海峡を横切る降水帯とほぼ直角な走行をもつ。この降水帯は、黄海の湿潤域（黄海上の高可降水量の領域）から九州へ伸びる湿潤域の帯の中で形成された。2022 年 7 月 18 日夕方(07UTC18JUL2022)の降水帯は、対馬海峡に沿った地上風収束線上で形成された。朝方の黄海の湿潤域は、夕方には南下し、対馬海峡を通過し日本海へ広がった。このように対馬海峡全体が湿潤な状況で、対馬海峡に沿った収束に伴う線状降水が維持された。2022 年 7 月の事例においても、東シナ海北部から対馬海峡にかけて強い高水温偏差が観測され、この水温偏差は九州周辺の降水量を増加させるだけでなく、強い降水帯の発生位置をより南に移動させる働きがあることが分かった。以上の結果は、東アジア縁辺海の海況をより精密に把握することが豪雨予測の精度向上に不可欠であることを示唆しており、2022 年 7 月の事例についても 2021 年 8 月の事例と同様に、海洋が降水システムに及ぼすインパクトを精査する必要がある。

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、2024 年度には波長 355 nm の HSRL システムの導入を行なった。今年度は、HSRL システムの安定運用に向けたデータ品質管理を強化するとともに、波長 355 nm HSRL の信号解析を行った。具体的には、干渉縞の鮮明度がエアロゾル後方散乱に比例することを利用し、エアロゾル後方散乱の抽出を行った。

【結果】

図 1 に 2024 年 9 月に応力研ライダーで観測された波長 355 nm の粒子（雲・エアロゾル）後方散乱係数の時間高度断面図を示す。昼夜連続で粒子後方散乱係数を測定できることを示しており、ラマンライダーからの高感度化に成功した。複雑なエアロゾル高度分布の変動（9 月初旬）や大気境界層の日変化（9 月中旬）、自由対流圏における長距離輸送エアロゾル層（9 月 27 日頃）等を観測できており、化学輸送モデルとの比較やデータ同化に資するデータが得られた。今後は、消散係数や偏光解消度を含むエアロゾル光学特性の長期データ解析を進めるとともに、さらなる高感度化や安定運用を目指してシステムの改良を進めていく方針である。

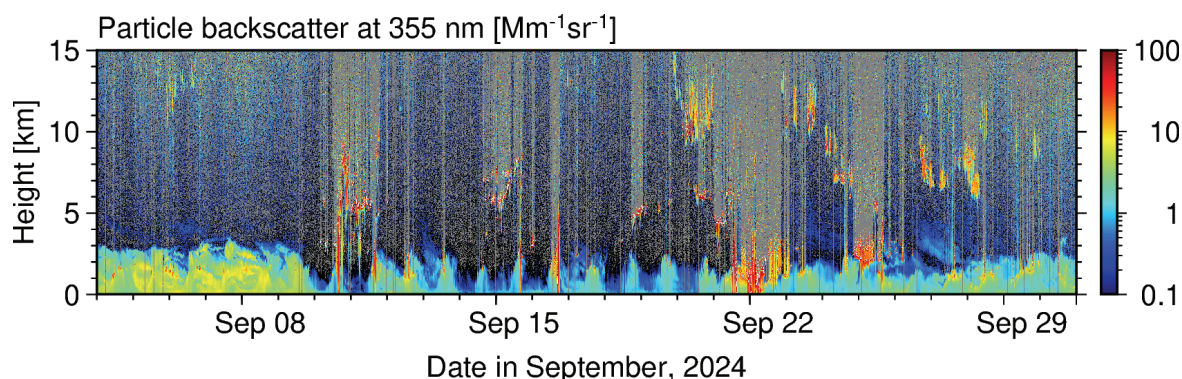


図 1 応力研校スペクトル分解ライダー（波長 355 nm）で 2024 年 9 月に観測された粒子後方散乱係数の時間高度断面図

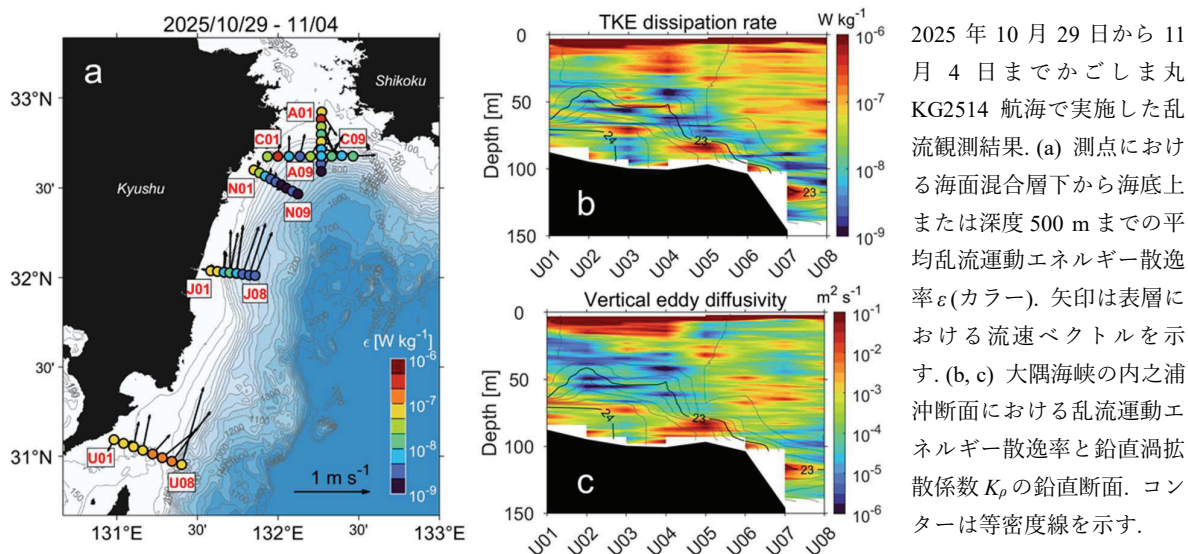
沿岸海洋の密度躍層における乱流混合の定量化

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る栄養塩の有光層への供給に寄与するため生態系の形成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、昨年度調査を実施した大隅海峡での再度の調査に加え、九州東岸から豊後水道南部の沿岸から沖合の黒潮域間の移行域を含む広域での調査を実施した。

研究内容 2025 年 10 月 28 日から 11 月 6 日にかけて実施された鹿児島大学水産学部附属練習船「かごしま丸」 KG2514 航海において、図 1 a に示す大隅海峡の内之浦沖 (U01-U08)、宮崎県一ツ瀬川沖 (J01-J08)、延岡市沖 (N01-N09)、豊後水道南部の陸棚端～斜面域上の東西線 (C01-C09) 及び南北線 (A01-A09) に観測断面を設定し、乱流観測を実施した。乱流の計測は TurboMAP-L (JFE Advantech 社) を用いて行い、海面から自由落下させ、海底に着底するかまたは深度約 500 m までの乱流シアの計測値を得た。これより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 海上風による海面混合層の影響を除いた混合層下から海底上または深度 500 m までの平均乱流運動エネルギー散逸率の分布を図 1a に示す。大隅海峡を除き、散逸率には沿岸から沖合にかけての勾配が見られ、期待されたように、沿岸で海底境界層乱流によりエネルギー散逸が高まる傾向であった。しかし、豊後水道南部での A05 測点や C02 測点では底層でも密度躍層が存在し、内部潮汐の強化によって局所的に強い乱流が生じていた。一方大隅海峡でも、大隅分枝流 (山城ら 2008) や黒潮の影響により底層に密度躍層が形成されていた (図 1 b, c)。この躍層 (23.0~23.4 σ_θ 等密度面) の周辺では乱流運動エネルギー散逸率で $10^{-6} \text{ W kg}^{-1}$ 、鉛直渦拡散係数で $10^{-1} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ に達する著しい乱流が生じていた。この強乱流は海底摩擦により直接的に乱流が励起された訳ではなく、密度逆転に起因する対流不安定によって生じていた。これは内部潮汐のような内部重力波の砕波か、もしくは慣性不安定のような非地衡流系の不安定に起因して発生したかは同定できなかったが、いずれにしても沿岸～沖合の移行域では底層の密度躍層付近においても強い乱流混合が生じている実態が明らかとなった。



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

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。近年では、長崎県五島列島の南方に位置する五島海底谷における観測研究を進めている。本報告では、五島海底谷で行った海洋観測の実施状況をまとめる。

五島海底谷の谷幅と最大水深は、それぞれ約 10 km と約 700 m である (図 1)。表 1 に、2022 年以降の観測項目を示す。谷を横切る方向 (Cross canyon) と谷に沿う方向 (Along canyon) に観測線を設けており、基本的に Cross canyon の測線で CTD 等の観測を行っている。シップタイムに余裕があるときは、航走 ADCP データから潮流成分を除去し平均的な流動構造を得るために、Cross canyon 測線を 25 時間で複数回往復している。これまで、流速等の係留観測は、谷の東西両斜面で行ってきた。ただし、2025 年の東側斜面に設置した ADCP-150 kHz は正常なデータを取得できなかった。また、詳細な海底地形データを得るために、マルチビーム測深機による海底地形探査も行った。

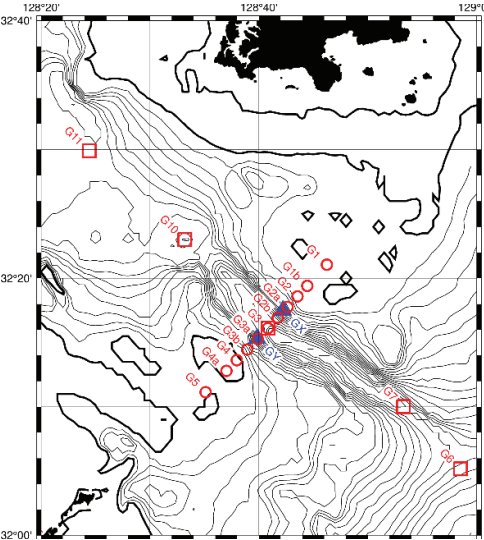


図 1. Cross canyon (○) と Along canyon (□) の測点。▲は係留点。

研究組織

長崎大学

滝川哲太郎 (研究代表者)

九州大学 応用力学研究所

千手智晴 (所内世話人),

遠藤貴洋 (研究協力者)

愛媛大学 沿岸環境科学研究センター

森本昭彦 (研究協力者)

福岡県 水産海洋技術センター

江崎恭志 (研究協力者)

山口県 水産研究センター

渡辺俊輝, 廣畑二郎,

田中健太郎 (研究協力者)

表 1. 2022 年以降に実施した観測。

	Date	Mooring	CTD/XCTD/XBT	25hr Ship-ADCP	Multibeam
N089	2022/04/24-28	-	CTD (C)	75 & 300 kHz	-
N112	2023/05/23	-	XCTD/XBT (C)	-	-
K912	2023/06/12-14	-	25hr CTD-section (C)	300 kHz	-
N132	2024/04/22-26	Deploy (GX)	XCTD (C), CTD (A)	75 & 300 kHz	✓
N137	2024/07/23	Recover	CTD (C)	-	-
N140	2024/08/08	-	CTD (G7)	-	✓
N141	2024/09/13	-	CTD (G7)	-	✓
N150	2025/04/19-23	Deploy (GX, GY)	Rinko-profiler (C)	75 & 300 kHz	-
N157	2025/08/13	Recover	XCTD/CTD (C)	-	-

(Cross or Along canyon)

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簡略化や出力プロダクト数の低減などの制約がある。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、円偏光レーザーを用いた円偏光測定モードでの多重散乱計測が挙げられ、システムへの拡張を図ってきた。今年度は、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直線偏光測定モードでの多重散乱ライダーへ円偏光測定システムを導入し、両モード測定を並走した定常観測を企図していたが、円偏光測定システムにおいて課題となっていた安定的な光学アライメントの調整および信号校正を確立するには残念ながら至らなかった。安定的な定常運用に向けて、引き続き検討を進めていく。

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検証・改良を進めた。ここでは、大気粒子層の識別子や光学パラメタ（消散係数、後方散乱係数、偏光解消度など）が検証された。衛星・地上間で概ね良い一致が見られ、ATLID 用大気粒子推定アルゴリズムの妥当性が示された。一方で、雲・エアロゾルの誤識別や偏光解消度を過大評価するケースがあるなどの幾つかの課題も示され、これらの課題に対してアルゴリズムの改良が実施された。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 1 件、学会・研究会発表 4 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）

RIAM JOINT RESEARCH REPORT SUMMARY (English Form)

1. Research ID: 2025CR-AO-15

2. Research Title: 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 (A hybrid dynamical-statistical modeling approach for understanding tropical basin interaction)

3. Category: Standard

4. Applicants

Affiliation: ¹Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ²University of Tokyo

Name: Ingo Richter¹

5. RIAM Attendant: Hiroki Tokinaga

6. Summary (150~200 words in Japanese or 100~150 words in English):

Interaction among the tropical ocean basins has a profound influence on modes of interannual variability, such as El Niño/Southern Oscillation (ENSO), and contributes to shaping the patterns of future climate change. The present project has used global climate models and simpler data-driven models to study these interbasin interactions. Linear inverse models (LIMs) were used to emulate the behavior of complex climate models. The results show that LIMs are capable of reproducing some aspects of climate models, such as interbasin interaction, while only requiring a fraction of the computational costs. This framework will form the basis of future investigations.

Global change projections were examined with respect to how Pacific-Atlantic interactions change. It was found that ENSO's influence on the tropical Atlantic strengthens substantially under global warming. Using a simple statistical framework, it was found that this can lead to higher predictability of the tropical Atlantic on interannual time scales.

*) Submit either one of Japanese or English forms.

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

It is increasingly being recognized that variability patterns in the tropical ocean basins, such as El Niño-Southern Oscillation (ENSO), mutually influence each other through atmospheric pathways. These interbasin interactions shape the development of ocean variability on seasonal to multi-decadal time scales. Therefore, a deeper understanding of the underlying pathways and mechanisms is expected to contribute to more skillful seasonal predictions, and may also lead to a better understanding of how the climate system will react to changes in greenhouse gas concentrations.

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

In previous work (also partly funded by a RIAM Join Research Grant), 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.

The LIM framework has been used to emulate the behavior about 40 global climate models and these simulations have been analyzed. A manuscript is currently in preparation by a collaborator at JAMSTEC (Shoichiro Kido). The work has been presented at several international conferences, including the Pan-CLIVAR meeting in Indonesia (see reference under 4.).

2.2 Extending the LIM framework

In collaboration with researchers at Tohoku University and JAMSTEC, the LIM framework has been extended to represent the seasonal cycle and the persistence of stochastic processes (Lien et al. 2026). These refinements improve the seasonal forecast skill of LIMs and should also enhance their ability to emulate global climate models.

2.3 Projected strengthening of El Niño's influence on the tropical Atlantic

Using the output from global climate change projections, we have investigated how the interactions between the tropical Pacific and the tropical Atlantic change. The results show that the El Niño's influence on the tropical Atlantic strengthens substantially as deep convection becomes more concentrated in the western tropical Pacific. Based on a simple statistical prediction scheme, we show that this can lead to increased predictability of the tropical Atlantic. The results have been presented at several international conferences (see 4.) and a manuscript is currently in preparation.

2.4 Design of global climate model experiments for the study of interbasin interaction

In 2024 and 2025, the PI led the development of the experiment design for global climate model simulations that study interbasin interaction. This experimental protocol has been published in the journal *Geoscientific Model*

Development (Richter et al. 2025).

2.5 Review of interbasin interaction and the role of the Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC)

The PI participated in a review of interbasin interaction with a focus on the role of El Niño and AMOC. The study has been published in the journal Ocean-Land-Atmosphere Research (Hu et al. 2025).

2.6 International Workshop at the University of Tokyo

The PI and RIAM Host Tokinaga co-organized an international workshop on interbasin interaction at the University of Tokyo. There were about 25 in-person participants and 15 online participants.

3. Refereed publications resulting from the project

Lien, J., H. Ando, I. Richter, and S. Kido, 2026: Noise persistence in a cyclostationary linear inverse model framework and its impact on ENSO evolution and prediction skills. J. Atmos. Sci., e250066, <https://doi.org/10.1175/JAS-D-25-0066.1>, in press.

Aixue H., I. Richter, and 12 co-authors, 2025: Unraveling the Complexity of Global Climate Dynamics: Interactions among El Niño–Southern Oscillation, Atlantic Meridional Overturning Circulation, and Tropical Basins Across Different Timescales. Ocean-Land-Atmos Res. 2025;4:0096.DOI:10.34133/olar.0096

Richter, I., and 18 co-authors, 2025: The Tropical Basin Interaction Model Intercomparison Project (TBIMIP), Geosci. Model Dev., 18, 2587–2608, <https://doi.org/10.5194/gmd-18-2587-2025>.

4. Selected conference presentations

I. Richter, Ping Chang, Takahito Kataoka, Shoichiro Kido, Noel Keenlyside, Yu Kosaka, Yuko Okumura, Hiroki Tokinaga, Tomoki Tozuka, Isabelle Vilela, “Strengthening ENSO influence on equatorial Atlantic variability in global warming projections”, 2025 International Workshop on Interbasin Interaction, University of Tokyo, Tokyo, Japan, 2025/12/3

S. Kido, I. Richter, Y. Kosaka, T. Tozuka, H. Tokinaga, and P. Chang, “Emulating GCM Experiments with reduced-complexity models: Insights into tropical interbasin interactions”, Pan-CLIVAR Meeting 2025, Bali, Indonesia, https://pan-clivar2025.sciencesconf.org/data/Abstract_book_revised_22Sept.pdf, 2025/9/24

I. Richter: Introducing TBIMIP, “The Tropical Basin Interaction Model Intercomparison Project”, Pan-CLIVAR Meeting 2025, Bali, Indonesia. https://pan-clivar2025.sciencesconf.org/data/Abstract_book_revised_22Sept.pdf, 2025/9/24

I. Richter, “Robustness of Atlantic Niño mechanisms in global warming projections”, BACO-2025 Meeting, Busan, South Korea, 2025/7/23

Richter, I., N. Keenlyside, T. Tozuka, Y. Okumura, C. Wang, P. Chang, S. Kido, and H. Tokinaga, “Re-evaluating the two-way interaction between the tropical Atlantic and Pacific”, APL-ICAR Workshop, Yokohama, Japan, 2025/7/10

4. Project members

P-I: 海洋研究開発機構 Ingo Richter

世話人: 九州大学 時長 宏樹

【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、BVOC は成分が多岐にわたる上、精度よく観測することが難しく大きな不確実性をもつ。従来の化学輸送モデルでは BVOC 放出量算出モデル MEGAN を用いて BVOC 放出量を推定することが多いが、MEGAN は植生割合や葉面積指数(LAI)を入力値としているため、LAI を予報的に計算できるモデルを用いることで落葉樹を中心に BVOC 放出量の精度が向上する可能性がある。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 BVOC 放出量を成分別に計算し、富士北麓フラックス観測サイトの観測値と比較して、モデルの再現性を検証するとともに、組成や季節変化の特徴を評価することを目的とする。

【方法】

国立環境研究所の富士北麓フラックス観測サイト(標高 1100 m)の林齢約 70 年のカラマツ林(落葉針葉樹)を対象に、VISIT で各成分別に BVOC 放出量を計算した。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、酢酸、アセトアルデヒド、ギ酸、ホルムアルデヒドである。VISIT に入力する気象データは、JRA55 再解析値を非静力学地域気候モデル(NHRCM)の境界値に用いた再現計算結果を利用した。VISIT の再現計算は 2011~2015 年の 5 年間実施した。富士北麓フラックス観測サイトでは CO₂ フラックスの観測に加えて、2011 年にモノテルペンのフラックス観測が行われており、これらの観測値と VISIT の再現計算結果を比較した。

【結果と考察】

富士北麓における気象観測値と NHRCM の計算値を比較した結果、NHRCM は降水量をやや過大評価したが、気温を高精度に再現した。同サイトの生態系純生産量(NEP)について観測値と VISIT の計算値を比較した結果、VISIT は NEP の極大値をやや過小評価するものの季節変化は観測値とよく整合した(図 1)。VISIT

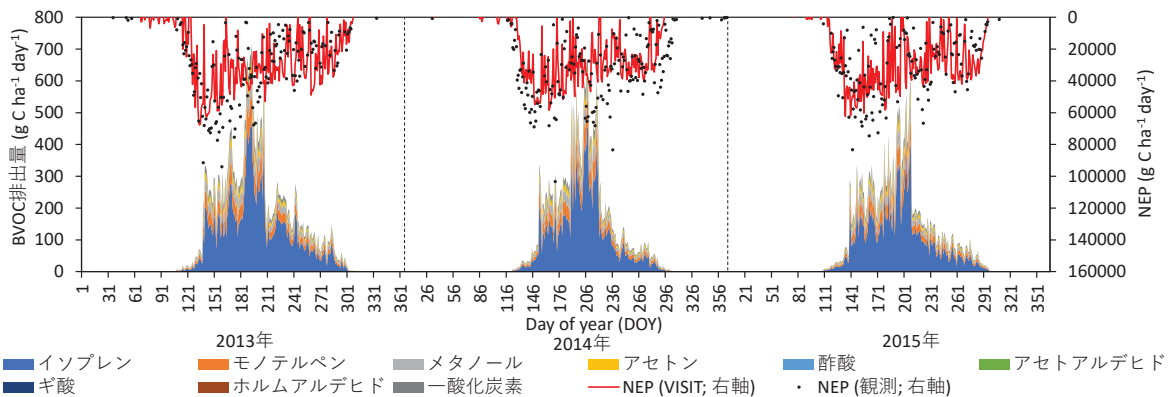


図1 VISIT で計算された 2013~2015 年の富士北麓フラックス観測サイトにおける日々の BVOC 放出量と NEP。

の BVOC 放出量は夏季に最も多く、イソプレンが 61%、モノテルペンが 15% を占めた。BVOC 放出量は気温が上昇すると指数関数的に増加することが知られているが、この増加割合はモノテルペンよりイソプレンの方が大きかった。2011 年夏季のモノテルペン放出量について、VISIT の計算値と観測値を比較した結果、VISIT はベース値を再現するもののピーク値を再現できず過小評価した(図 2)。この原因については不明であるが、VISIT 内での BVOC 放出量の扱いや日内変動の考慮などを検討して精度を向上させた上で、化学輸送モデルと統合させることが今後の課題である。

【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。

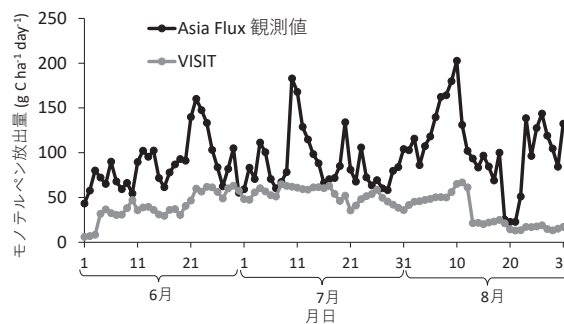


図2 富士北麓フラックス観測サイトの 2011 年夏季のモノテルペン放出量に関する観測とモデルの比較。

黒潮が海岸・海底地形から受ける影響の統合的理解—分岐、湧昇、混合の連動構造—

鹿児島大学水産学部 中村 啓彦

目的

黒潮は、西岸境界流として、北太平洋西端の大陸棚斜面に束縛されてルソン島沖から日本南岸へ北上する。北太平洋の西端には、南シナ海、東シナ海、日本海など複数の縁辺海が隣接しており、海岸線や大陸棚斜面の形状は複雑である。これらの複雑な地形の周辺では、黒潮流路の多重性や分岐、湧昇流や後流渦（剥離渦など）が形成され、黒潮の運動エネルギーが効果的に小規模現象へ流れて散逸していると考えられる。これまでの研究により、多重流路（台湾北東沖、九州東岸沖、東海沖など）や分岐流（台湾暖流、対馬暖流、琉球海流など）については、国際的に複数の観測と理論研究が行われてきた（図 1）。それに対して、湧昇流や後流渦、それに伴う水平・鉛直混合過程の研究は遅れているが、筆者らの直近の研究により、島嶼や海山のみならず、岬や海岬（大陸棚斜面が沖へ突き出した海底地形の名称）といった地形が、黒潮の分岐、湧昇、後流渦と水平・鉛直混合に重要な役割を果たしていることがわかってきた。

本研究の目的は、黒潮が海岸・海底地形から受ける影響として、流れの分岐、湧昇、後流渦とその消滅過程で起こるエネルギー散逸の連動構造を、観測、理論、数値計算から統合的に理解することである。

昨年度までの研究内容

筆者らは、2023～2024 年度の 2 年間、海洋再解析データ（JCOPE 2M）を用いて、海岬が黒潮の流動に与える影響を調べた（2024 年度入葉名修論）。この解析結果の概要を図 2 に示す。東シナ海の大陸棚斜面にある「海岬 C」（4 つある海岬の中で北緯 28.4 度に位置するもの）で非常に強い湧昇が起こっている（図 2b）。また、この「海岬 C」の後流では顕著に黒潮が加速され、「海岬 C」の大陸棚側では黒潮分岐流（対馬暖流の起源流）の種になりそうな強流域が形成されている（図 2a）。「海岬 C」の湧昇は密度面を横切るように恒常的に存在しており、湧昇速度を見積ったところ、 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ m/s と非常に大きいことがわかった（図 2c）。

上記の解析結果は、2 つの重要な海洋学的意味を持つ。一つ目は、北太平洋の子午面循環の理解に対する意味である。子午面循環を維持する重要なメカニズムは、高緯度域で海中に沈み込んだ海水を低緯度域で表層に湧きあがらせる仕組みである。北太平洋には、子午面循環を担う代表的水塊として北太平洋中層水がある。筆者らは、これまでの研究により（Nakamura et al. 2013, Nishina et al. 2016, Inoue et al. 2020, Nakamura et al. 2021）、オホーツク海で沈み込んだ北太平洋中層水を表層へ戻す仕組みとして、沖縄トラフの黒潮全体で観測される強い鉛直混合の重要性を指摘してきた（鉛直混合は、表層から中深層へ浮力を供給するため湧昇流を引き起こす）。それに対し、大陸棚斜面の海岬での湧昇は、黒潮内側域に局在する現象なので湧昇面積は小さいが、湧昇速度（ $10^{-3} \sim 10^{-4}$ m/s）は鉛直混合による湧昇速度（ $\sim 10^{-6}$ m/s）（間接推定値：Nakamura et al. 2013）の約 100~1000 倍大きいと推測できる。また、密度面を横切るように恒常的に存在するので、子午面循環の一部として機能し得る。この点で、海岬での湧昇流は強い鉛直混合を伴うことが含意されており、その物理プロセスにも注目される。東シナ海にある 4 つの大きな海岬を合わせると、海岬での湧昇量は鉛直混合による湧昇量を超えると推測できる。つまり、「海岬」は子午面循環という北太平洋スケールの対流現象に対しても重要な役割を果たしている可能性がある。

二つ目の意味は、湧昇流は海洋生物生産を支える深層から表層（有光層）への栄養塩供給過程を支配する点である。太平洋や大西洋などの大洋の東岸境界域では、風により大規模な沿岸湧昇流が形成されるため、沿岸湧昇理論が発展し生物生産量予測に関する応用研究も進んでいる。しかし、大洋の西岸境界域では、東岸境界域のように大規模な風による沿岸湧昇は起こらないため、西岸境界域での湧昇流研究は発展していない。北太平洋中層水は、基礎生産（植物プランクトンの増殖）に必要な栄養塩や鉄分に富んだ海水である。筆者らが、海岬での湧昇による有光層への栄養塩フラックスを、図 2b の湧昇速度と過去の栄養塩観測データを用いて見積もったところ、深度 200 m で ~ 370 mmol/m²/day であり、世界最大規模と言われている黒潮がトカラ海峡の海山に衝突するときにかかる湧昇流による栄養塩フラックス（Hasegawa et al. 2021）より大きい可能性があることがわかった。

今年度の研究結果

本研究では、図 2 で示した「海岬 C」での黒潮の加速・分岐・湧昇の特徴を、鹿児島大学附属練習船「かごしま丸」を用いた各種海洋観測により定量的に把握するとともに、それらを包括的に説明できる力学モデルを提案することを一つの目標にしている。この一環で、湧昇域周辺とその下流で栄養塩分布の観測を行い、湧昇に伴う大陸棚上への栄養塩供給量を定量化し、黒潮域周辺の基礎生産過程の視点から海岬の役割も考察する。

今年度は、来年度以降の本格的観測（大型研究費申請中）の予備調査として、「かごしま丸」を用いて 2025 年 6 月に「海岬 C」周辺で水平流速分布と栄養塩（硝酸塩）分布の船舶観測を実施した（図 3）。この予備調査は、日韓共同の黒潮流動観測の中で行った。日韓共同観測では、黒潮内の内部重力波場から黒潮フロントや黒潮流軸の長期変動に至る幅広い時空間スケールの黒潮変動を観測することを目的として、2020 年 6 月より 4 台の係留型 ADCP（超音波ドップラー多層流速計）を北部沖縄トラフの黒潮流域に設置している。この観測網では、「海岬 C」の近傍に ADCP を設置しており（図 3：KCM4 係留点）、このデータを「海岬 C」周辺の黒潮の挙動を把握するために利用できる。ADCP データの回収は、毎年 6 月の「かごしま丸」航海で、ADCP のメンテナンスとともに行っている。

予備調査では、「かごしま丸」により「海岬 C」周辺をジグザグ航走しながら船舶搭載型 ADCP で流速の水平成分を観測し、その水平発散量より鉛直流速を見積もる方法の妥当性を評価した。今回の観測では、シップタイムの制約からジグザグ航走範囲が限られたため、図 2a に示されるような顕著な水平流の加速現象は捉えられなかった（図 4）。次年度以降の本格的観測に対する教訓として、黒潮の加速域を絞り込むための航走方法を考える必要があること、航走中の潮汐流の影響を評価する方法を考える必要があることが挙げられる。一方、「海岬 C」での高栄養塩分布の存在については、その一端を捉えることに成功した（図 5）。図 5 は、水塊の上下運動による見かけの水平分布を排除するために、 1025 kg/m^3 の密度面（140-300 m 深）での NO_3 分布を示している。日韓共同観測を優先的に実施したことから、比較対象となる大陸棚縁辺部の栄養塩観測点が限られているが、「海岬 C」付近は他海域に比べて極めて栄養塩（ NO_3 ）量が高いことが分かる。

来年度以降、大型科学研究費の獲得に成功した段階で、鉛直流速を計測可能な超音波ドップラー多層流速計（ADCP センチネル V/1000 kHz と 500 kHz）を、「海岬 C」の約 200 m 深の海底に係留し、海底直上約 25 m～60 m までの鉛直流速を数 m 間隔で直接観測する予定である。また、本研究の研究協力者がこれまで行ってきた、海山（トカラ海峡の平瀬）や島嶼（屋久島・種子島など）が黒潮の湧昇や鉛直混合を引き起こすメカニズム研究と比較することで、黒潮が海岸・海底地形から受ける影響の統合的理解に繋げる。

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）

参考文献

- Hasegawa, D., Matsuno, T., Tsutsumi, E., Senjyu, T., Endoh, T., Tanaka, T., et al. (2021). How a small reef in the Kuroshio cultivates the ocean. *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL092063.
- Inoue, R., Tanaka, T., Nakamura, H., Yanagimoto, D., Fujio, S., & Yasuda, I. (2020). Microstructure and mooring observations of enhanced mixing in the Kerama Gap. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125, e2019JC015553.
- 入口葉名 (2025), 北部東シナ海陸棚斜面における黒潮中層水の湧昇スポット, 2024 年度鹿児島大学農林水産学研究科修士論文.
- Nakamura, H., A. Nishina, Z. Liu, F. Tanaka, M. Wimbush, and J.-H. Park (2013), Intermediate and deep water formation in the Okinawa Trough, *J. Geophys. Res. Oceans*, 118, 6881–6893.
- Nakamura H (2020) Changing Kuroshio and its affected shelf sea: a physical view. In: Chen CT, Guo X (eds) *Changing Asia-Pacific marginal seas. Atmosphere, Earth, Ocean and Space*. Springer, Singapore, pp 265–305
- Nakamura, H., Inoue, R., Nishina, A. et al. (2021), Seasonal variations in salinity of the North Pacific Intermediate Water and vertical mixing intensity over the Okinawa Trough. *J Oceanogr* 77, 199–213.
- Nishina, A., H. Nakamura, J.-H. Park, D. Hasegawa, Y. Tanaka, S. Seo, and T. Hibiya (2016), Deep ventilation in the Okinawa Trough induced by Kerama Gap overflow, *J. Geophys. Res. Oceans*, 121.

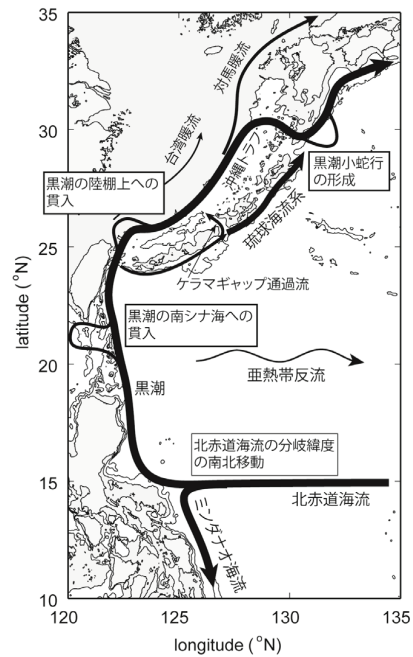


図 1. 黒潮の特徴：代表的な分岐流、多重流路. Nakamura (2020)を改変.

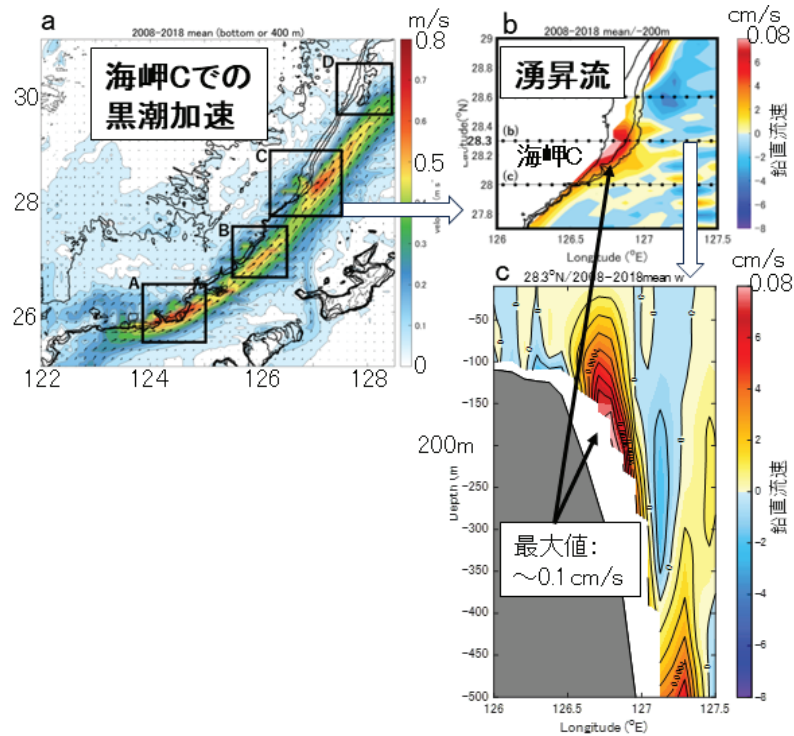


図 2. (a) 東シナ海の 4 つの海岬 (□領域) と海岬突端で形成される黒潮加速現象 (カラー：海底または 400m 深の流速). (b) 海岬 C の 200m 深の湧昇流. (c) 海岬 C を横切る東西断面の湧昇流. JCOPE2M 再解析データの気候学的平均値。(2024 年度入学修論より)

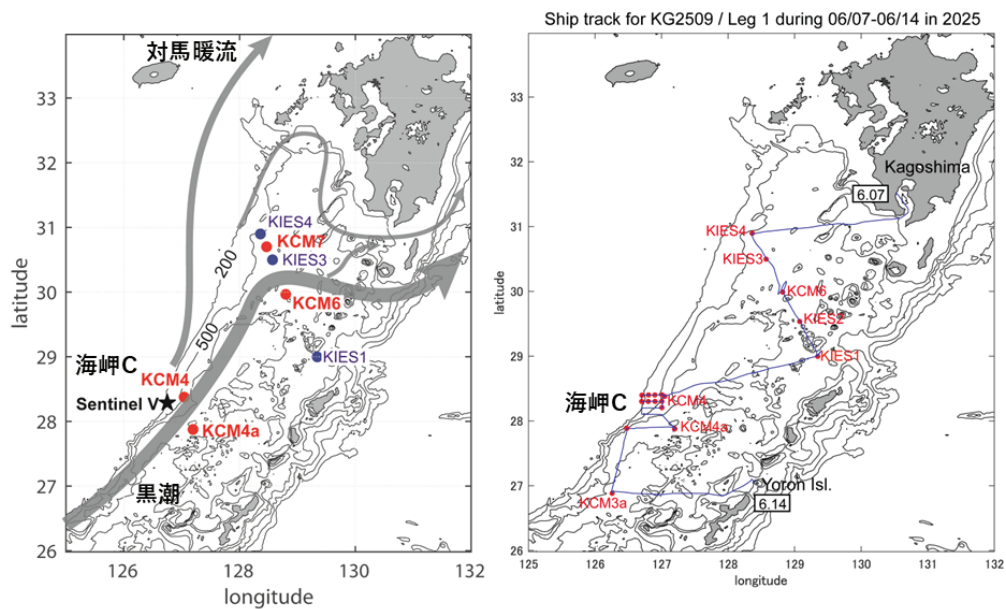


図3. 2025年6月の「かごしま丸」の観測の概要. (左) ADCP 係留点 (赤点). (右) Leg1 (6月7日～14日) のかごしま丸の航跡 (青) と停船観測点 (赤). 海岬 (C) 近傍でのジグザグ航路を示す.

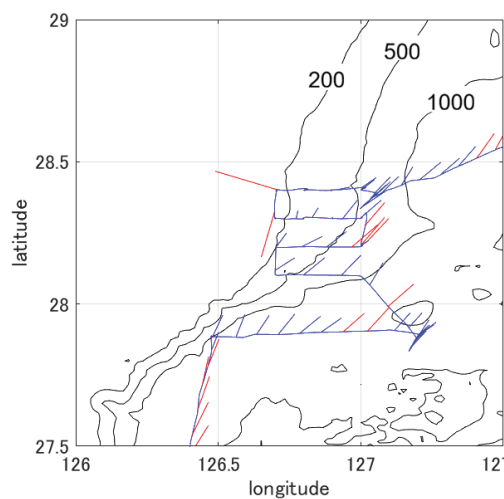


図4. 2025年6月「かごしま丸」航海での船舶搭載 ADCP 観測による「海岬C」付近の流速分布 (160 m 深) (赤スティック：流速 ≥ 1 m/s, 青線スティック：流速 ≤ 1 m/s).

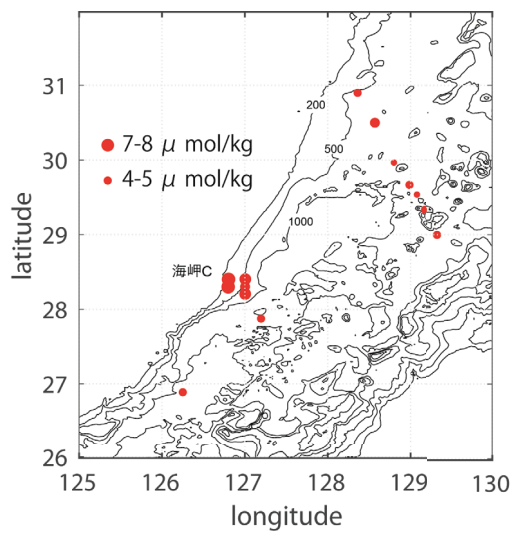


図5. 2025年6月「かごしま丸航海」での栄養塩 (NO_3) 分布 (1025 kg/m^3 の密度面上).

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

Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Hung-Wei SHU

Abstract

In the Bering Sea, the wintertime mixed layer is crucial for regional heat balance, yet its interaction with tidal forcing remains poorly understood. Baseline numerical simulations reveal that omitting tidal forcing results in insufficient mixed layer development and a significant warm bias (+20% increase in ocean heat content) in subsurface dichothermal and mesothermal waters. To isolate the driving physical mechanisms, we conducted sensitivity experiments applying tidal-derived vertical diffusion coefficients independently to the Aleutian Straits and the Bering Sea Shelf within a non-tidal model. Results demonstrate that tidal mixing in the Aleutian Straits dictates basin-wide hydrography, driving vertical salinity homogenization down to 600 m. It suppresses the vertical stratification, deepening the wintertime mixed layer and thus cooling the mesothermal water by supplying surface cold water to subsurface. Conversely, mixing isolated to the Shelf restricts mixed layer development and sustains the high temperature in subsurface. While Aleutian Strait mixing dominates overall basin cooling and stratification breakdown, persistent high surface salinities in the isolated Strait case highlight the critical role of subsequent interactions with shelf-modified water masses. Accurately representing these localized tidal processes is essential for future high-latitude ocean modeling.

1. Aim of research

Wintertime mixed layer in subpolar to polar regions plays a pivotal role in both the ocean cooling (Miura *et al.*, 2002) and fostering marine habitats (Stafford *et al.*, 2022). Despite its significance, our understanding of its interaction with tide remains limited, particularly regarding the pronounced impact of diurnal tide on water properties modification in high-latitude regions (Vigan and Ohshima, 2021; Nakamura *et al.*, 2004) such as the Bering Sea (Nakamura *et al.*, 2010). This study addresses this gap by comparing the tidal and non-tidal forced configurations of the Bering Sea through a high-resolution ocean general circulation model covering the entire North Pacific.

2. Method

To investigate the tidal impacts on the Bering Sea, we employed the CCSR Ocean Component Model, known as COCO (Hasumi, 2006), featuring elastic-viscous-plastic rheology-based sea ice dynamics (Matsuda *et al.*, 2015) and coupled with tidal oscillation on the pressure gradient term. Model results underwent validation against an Objective Analysis Dataset (Ishii *et al.*, 2017). Operating on a curvilinear coordinate grid, the COCO model covers the Pacific Ocean from 10°S to 67°N, and 100°E to 90°W, achieving eddy-permitting horizontal resolution (~15km) in the Bering Sea. The vertical grids consist of 84 layers, including 7 sigma coordinate layers in the uppermost 35 m depth. Atmospheric forcings are derived from monthly-averaged climatology provided by the Ocean Model Intercomparison Project (OMIP) (Röske, 2005, 2006). The river runoff is monthly-averaged value from Dai and Trenberth (2002).

The tidal forcing of the K1 constituent is incorporated through the tidal potential (ξ) in the barotropic momentum equation. The tidal potential is written as $\xi = K \sin 2\theta \cos(\sigma t + \lambda)$ for the diurnal tide, where θ and λ are the latitude and longitude, respectively, with the amplitude $K=0.14\text{m}$. The surface mixed layer is parameterized using a turbulent closure scheme by Noh and Kim (1999). In the tidal case, the tidal potential increases vertical shear along with continental shelf and straits, leading to enhanced vertical diffusivity.

Finally, to conduct our analysis, given the momentum equation with/without tidal component (ξ) as tidal/non-tidal cases, we first simulated the model over 60-year period using the climatology OMIP dataset without tidal component and restarted with Tidal/Non-Tidal simulations for 20 years, focusing on the latest 10 years for in-depth analysis. The validation process involved averaging the an Objective Analysis Dataset ProjD (Ishii *et al.*, 2017).

3. Results

3.1. Overview of the Bering Sea temperature structure

By averaging the August over last-10 years simulation, the Non-Tidal case exhibits higher sea surface temperature (SST) over the Bering Sea compared to the Tidal case. The warming is more pronounced over the Aleutian Arc,

exceeding 1°C, where the tidally-enhanced vertical mixing dominates (Nakamura *et al.*, 2010). It suggests that the tidal forcing potentially redistributes heat vertically as Alaska Stream flows through straits, influencing the scale of winter mixed region.

To assess the overall differences in the Bering Sea water mass structure between two cases, we averaged an oceanic objective-analysis product (ProjD) 1980–2000 August for validation, given the abundance of observation data during the summertime. Examining a cross-section from the northwest coast to the Aleutian Island’s major strait, Amukta Pass, distinct water masses become apparent, including cold dichothermal water (enclosed by the 3°C isotherm) and warm mesothermal water underneath. Since the dichothermal water is formed from winter mixed layer and covered with summer surface warming (Miura, Suga and Hanawa, 2002), it then reflects the scale of winter mixed layer. In the ProjD, dichothermal water extends from the northeast coast to the Aleutian Islands, while mesothermal water underneath remains below 4°C. Simultaneously, warm surface water (4°C isotherm) penetrates only the subsurface layer above the Amukta Pass. Although both two model cases have warmer tendency on the southern Bering Sea on August after 10 years simulation, however, only the Non-Tidal case sees warm surface water intruded into the entire basin, resulting in mesothermal water temperature exceeding 6°C, compared to less than 4.5°C in the Tidal case. Considering the over 1°C differences between mesothermal water and the water on the Amukta Pass in the Tidal case, it suggests that mesothermal water is modulated through the winter mixing.

This water mass differences results in ocean heat content differences in the Bering Sea. By estimating the ocean heat content (OHC) from sea surface to 800 m depth, we find tidal case to reproduce the seasonal cycle of heat content changes in the upper ocean, with only $3.48 \pm 0.87\%$ differences compared to ProjD. However, the Non-Tidal case has $20.36 \pm 1.39\%$ increase than ProjD. Furthermore, as spatial distribution, the contraction of dichothermal water in the Non-Tidal case, confined between 50-200m and located only on the west coast ($<180^\circ\text{E}$), indicates a shallower winter mixed layer than in the Tidal case. Conversely, dichothermal water in the Tidal case distributes from 50m to 400m, covering most of the region where the Non-Tidal case shows mesothermal water above 4°C on the west coast. This wide-distribution of dichothermal water in Tidal case suggests that the cold-water was supplied to subsurface sufficiently, influencing surface to mesothermal layer temperatures. Tidal impacts extend beyond the Aleutian Islands, where tidal activity is vigorous, to the basin-wide winter mixed region.

3.2. Winter mixed layer development

To understand the cause of the deepened winter mixed layer and its correlation with mesothermal water temperature influenced by tidal impacts, we examine the seasonal cycle of water properties from September to March, averaged over 10 years to illustrate the development of winter mixed layer. Given that the magnitude of winter mixing is dictated by buoyancy flux, predominantly influenced by salinity in high-latitude area, the water properties display the salinity differences in the cross-basin section. Beginning in September, preceding the winter mixing period, a distinct salinity contrast is evident in the Non-Tidal case, delineated by the upper boundary of its mesothermal water. This pattern persists until November, with water above the Non-Tidal case’s mesothermal layer being fresher than those in the tidal case. As winter mixed layer envelops the Bering Sea in January, the 3°C isotherm aligns with the upper boundary of the mesothermal water in the Non-Tidal case, confirming that the winter mixing cools the surface layer, and mesothermal water remains where winter mixing does not approach. In contrast, the Tidal case exhibits a disparity between the 3°C and 4°C isotherms, indicating deeper winter mixed layer and a thinner mesothermal layer. Towards the end of the winter mixing period, examining the mesothermal water upper boundaries of both cases reveals that, while the surface in the east side ($>180^\circ\text{E}$) does not drop below 3°C, the Tidal case experiences broader and deeper surface cooling, resulting in a thinner and deeper mesothermal water layer. Moreover, the salinity difference surpasses 0.5 between the areas of black and yellow/red contours, which is the region influenced by winter mixing in the Tidal case but not in the Non-Tidal case. This suggests that due to shallower winter mixed layer, deeper salinity does not mix into the upper layer in the Non-Tidal case, rendering this region saltier. The simulated winter mixed layer development in both cases illustrates that the Tidal case experiences deeper winter mixed layer.

Examining the salinity vertical structure reveals that the Non-Tidal case has a fresher surface layer and a saltier subsurface, precisely aligned with the upper boundary of the mesothermal water. It indicates that the intensified stratification in the Non-Tidal case constrains turbulent kinetic energy. As per the Richardson number (see method), the reduction in vertical diffusivity corresponds to an increased in vertical buoyancy diffusion. It thus results in a shallower winter mixed layer, retaining most of the mesothermal water underneath in the Non-Tidal case.

3.3 Contributions of Tidal Mixing in the Strait and Shelf Regions

To determine the specific locations and processes by which tidal forcing homogenizes vertical salinity and facilitates the development of the wintertime mixed layer, we conducted a series of sensitivity experiments. Because

tidal forcing enhances vertical diffusivity across both the Aleutian Islands and the Bering Shelf, we isolated these regions by selectively applying the AHV from a fully tidal model into a non-tidal baseline model.

- **Transition Case (Control):** When full tidal forcing was introduced to the non-tidal baseline, the wintertime mixed layer developed robustly within five years. Concurrently, basin temperatures were reduced to levels comparable to the fully tidal case.
- **Strait Case:** Applying tidal AHV exclusively to the Strait area resulted in a significantly slower deepening of the wintertime mixed layer compared to the Transition case, taking approximately ten years to reduce subsurface temperatures. Additionally, surface temperatures gradually increased during this period, which was closely associated with a corresponding rise in surface salinity.
- **Shelf Case:** Applying tidal AHV exclusively to the Shelf area failed to develop the wintertime mixed layer, leading to subsurface temperatures that remained higher than the baseline.
- **Strait + Shelf Case:** The combined application of tidal mixing to both regions yielded hydrographic outcomes that closely mirrored the isolated Strait case.

Overall, these results demonstrate that tidal mixing within the Strait area is the dominant driver of the observed hydrographic changes, effectively overriding the influence of the Shelf area. Furthermore, the distinct difference in the mixed layer deepening rate between the isolated Strait case (10 years) and the full Transition case (5 years) implies that advection driven by tidal currents also plays a highly significant role in the region's overall mixing and thermal distribution processes.

4. Summary and Discussions

Our analysis reveals that tidal impacts induce a broader and deeper winter mixed layer, leading to the cooling of the entire basin and significantly influencing the heat stored within mesothermal waters. Notably, these tidal effects are not confined to the continental shelf but extend throughout the wider basin. The sensitivity experiments demonstrate that tidal mixing within the Aleutian Straits is the dominant driver of vertical salinity homogenization. This localized mixing suppresses vertical stratification, thereby facilitating the development of the wintertime mixed layer. However, an interesting anomaly emerged in the isolated Strait case, where both temperature and salinity increased within the surface layer. A comparison of the interannual seasonal cycles reveals that the deepening of the wintertime mixed layer is accompanied by a distinct increase in upper-layer salinity. Because the inflow from the Pacific is already vertically homogenized by tidal mixing in the Aleutian Straits, this excess surface salinity cannot originate from the straits; rather, it must be transported from the Shelf region.

We propose the following mechanism to explain this surface salinity increase: As the Pacific inflow is vertically homogenized in the Strait, surface salinity increases along the gradient from the basin toward the shelf. This elevated surface salinity preconditions the shelf waters, leading to enhanced brine rejection during wintertime sea ice formation. Consequently, the shelf waters become progressively saltier. Finally, the ongoing water mass exchange between the shelf and the basin transports this high-salinity water back into the upper layers of the basin, driving the observed salinity increase. To fully validate this proposed mechanism, a comprehensive salinity budget estimation, including the advective transport generated by tidal currents, will be required. Investigating the quantitative relationship between this advection and interannual sea ice variations represents the next critical step for this research program.

5. Research Collaborator

Representative Hung-Wei SHU

RIAM advisor Shinichiro KIDA

Collaborator:

Hiroaki TATEBE, *Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology*

Humio MITSUDERA, *Hokkaido University*

Tomohiro NAKAMURA *Hokkaido University*

Satoshi OSAFUNE, *Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology*

Tomonori AZUMAYA, *Japan Fisheries Research and Education Agency (Kushiro station)*

Shinya KOUKETSU, *Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology*

Cross-shelf Kuroshio Intrusion and Its Impact on the Marine Ecosystem

富山大学 大学院理工学研究部 張 勁

1. Dynamics of Water Mass and Nutrient Exchanges in a Day on a Continental Shelf, Quantified using Rare Earth Elements

The East China Sea (ECS) provides essential biological resources for its local fishery and contributes to biodiversity in its surrounding seas, mainly through the Kuroshio Current (KC/KW), which regulates cross-shelf (CS) material transport on various scales. A range of phenomena is involved, and a different mix of processes occurs at each time and location, which makes CS exchanges complex and variable. One valuable approach is to investigate in situ high-resolution time-series observations of REEs as a proxy of the water mixing and coupled with hydrological and physical observations at the shelf break—a method unprecedented worldwide that can resolve water dynamics over a single tidal cycle, which is important for the local material budget.

The results are: **(1)** Hydrodynamic processes influence the distribution of chemical and physical properties in the bottom water of ECS on an hourly basis. **(2)** Reintroduction of deep Kuroshio Water (KIW) during the onshore flow was notable for its high nutrient content. **(3)** During the observation, net DIN and DIP fluxes from the Kuroshio region (KW) were 5.59 and 6.69 times larger than the DIN and DIP fluxes from the continental shelf water (MSW) on a daily basis.

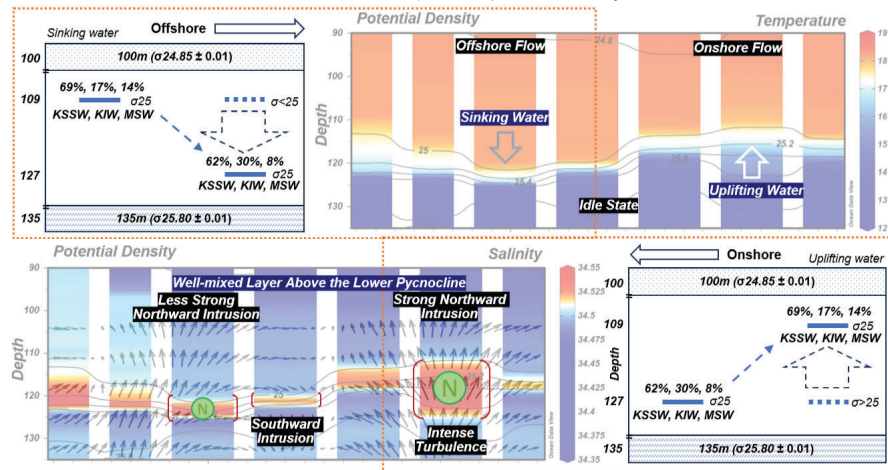


Figure 1. Schematic view of uplifted and downsunken pycnocline in the dynamic layer at the shelf break of the ECS due to onshore and offshore flows leading to water mass invasion/intrusion. Offshore flow is associated with the sinking of isopycnals, while onshore flow corresponds to uplifted isopycnals. Sectional views of temperature and salinity, contoured with potential density anomaly (solid black line) and embedded uv current diagram, highlight the enhanced turbulence and the regulation of KW and MSW, which drive CS fluxes of nutrients (N letter inside the green circle) on a daily basis. (Haryanto et al., 2026 *in prep.*)

2. Oceanic Interaction Between KC and Bungo Channel

The Bungo Channel is located in southwestern Japan between Shikoku and Kyushu Islands and connects the Pacific Ocean to the Seto Inland Sea. There is a

continental shelf slope south of the Bungo Channel along which the KC. The marine environment in the Bungo Channel is influenced by perturbations of the KC, such as KC meander and frontal eddies, and surface and bottom intrusions occur from early summer to autumn. It is thus urgent to clarify the interaction between the KC and the Bungo Channel and to understand oceanic processes by which nutrient is supplied from the KC to the euphotic zone in the Bungo Channel. Some biochemical parameters analyzed are REEs, Nd-isotopes, radium (Ra), nutrients, dissolved oxygen, and water stable isotope analysis, collected from two cruises: NS-25-155 in Summer 2025 using the T/S Nagasaki Maru and KG-25-14 in autumn 2025 using the Kagoshima Maru. 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 (ADCP) and microstructure profilers were utilized to help interpret physical forcings further.

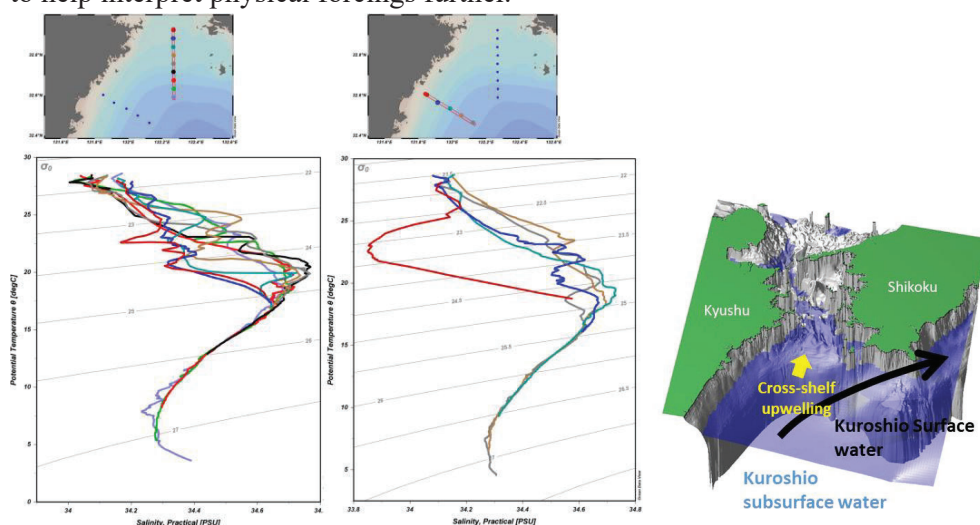


Figure 2. Temperature-Salinity (TS) diagram of A line and N line during the NS-25-155 summer cruise using the T/S Nagasaki maru (left) and schematic view of CS exchanges in Bungo Channel (right) (taken from Tsutsumi et al., 2025).

3. Healthy, Productive, and Sustainable Asian Marginal Seas (WESTPAC)

In FY 2025, chairwoman Prof. Jing Zhang and her team under the Intergovernmental Oceanographic Commission for the Western Pacific (IOC-WESTPAC) program have done tremendous work to advance health, productivity, and sustainability in the Asian marginal seas. A special issue has been published and is being updated regularly in the Elsevier scientific journal of Progress in Oceanography (Cite score: 7.2; IF: 3.6). As of January 2026, 20 articles have been published discussing various topics from nutrient dynamics and sources, material transport, including the influence of the Kuroshio current and other factors.

In addition, a scientific session entitled Marine Environmental Changes in the Western Pacific and Its Marginal Seas: Roles of Global Climate Change Versus Anthropogenetic Impacts (OS41) will be hosted by the main convener, Prof. Jing Zhang, in the AOGS 2026 meeting in Fukuoka, August 2026, with an expected number of abstracts of 25.

表面波・内部波の生成・伝播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

本研究では、水の波に対する地形の影響に関して、気象津波の生成・伝播過程における海底勾配の影響や、堤背後域及び河川に進行する波に対する平面地形の影響等を調べた。このうち、本報告では、河道内に進行して河川を遡上する津波、すなわち、河川津波に関して得られた知見を述べる。河川津波は、陸上を遡上する津波と比較して伝播速度が大きく、遡上距離が長くなり、内陸部まで浸水被害を発生させる可能性がある。しかしながら、河川津波の陸上浸水を含む挙動に関しては、未解明な点が多い。そこで、CADMAS-SURF/3D を適用した 3 次元数値解析を実施し、次の 2 点に関して研究を行なった。

- (1) 河川津波に対する河川流の影響（小杉・柿沼, 2025a）
- (2) 河川津波の浸水面積を低減する手法（小杉・柿沼, 2025b）

(1) では、河川流の流速が、河川津波の最大水位、すなわち、津波高さや、沿川地域の浸水面積に与える影響を比較・検討した。数値解析では、一様断面を有する河道が海域に接続された単純地形を対象とし、河川流を生成して定常状態が得られた後、海域から津波を入射した。

まず、陸上浸水が生じない場合、河川流の流速が大きいほど、河川津波の津波高さが増加し、伝播速度が低下した。そして、対象とした条件では、河川流による津波高さの増加に、入射波の波高との相関が見られた。しかしながら、河川津波の伝播速度の低下量は、入射波の波高にあまり依存せず、概ね河川流の流速と等しくなった。また、河川津波が分裂して生じた分裂波も、第 1 波と同様に、河川流によって伝播速度が低減することが確認された。

次に、陸上浸水が生じる場合、河川流によって津波高さが増加するため、河川流の流速が大きいほど、河口に近い区域の河川横断方向への浸水範囲が広がった。他方、上流側では、河川流の流速の差による浸水面積の違いが低減した。従って、河川流がある場合も、浸水域は、河口付近に限定された。なお、総浸水面積は、河川流の流速が大きいほど大きくなった。

また、(2) では、これまであまり検討されてこなかった、河川津波の防護手法に関して検討した。すなわち、河口付近に堅固な橋梁等の構造物を設置し、河川津波の峰の一部の進行を阻害することによって津波高さを低減し、沿川地域の浸水被害を軽減させる方法を提案した。モデル地形を対象とした 3 次元数値解析によって、橋梁状構造物の厚さや幅の違い、また、海岸堤防や河川堤防の有無が、河川津波の津波高さ及び陸上の浸水に与える影響を調べた。

河口付近に橋梁状構造物を設置した場合、河川津波が橋梁状構造物に衝突すると、その上流側で河川津波の津波高さが低減した。この原因として、次の二つが挙げられる。一つは、河川津波の峰の一部が橋梁状構造物に衝突し、波のエネルギーの一部が跳ね返されることである。そして、もう一つは、河川津波が橋梁状構造物の下方を通過する際に、流速の水平成分が大きくなり鉛直成分が低減して、橋梁状構造物の上流側で最大水位が低下することである。この津波高さの低減は、特に、橋梁状構造物の河川縦断方向の幅に大きく依存し、その幅が大きいほど、橋梁状構造物の津波高さ低減効果が大きくなった。

更に、橋梁状構造物を複数基設置することにより、陸域への浸水被害を軽減する方法に関して検討した。2 基の橋梁状構造物に、海岸堤防と、河口から沖側の橋梁状構造物に至る区間の河川堤防を併設する方法を提案したが、これは、より効果的、かつ、経済的な河川津波対策になると考えられる。

研究成果（論文）

小杉淳悟・柿沼太郎 (2025a): 河川流を考慮した河川津波の数値解析, 土木学会論文集, 81 巻, 17 号, 25-17015.

小杉淳悟・柿沼太郎 (2025b): 橋梁等の構造物を用いた河川津波の被害軽減に関する数値解析的研究, 土木学会論文集, 81 巻, 18 号, 25-18098.

1. 目的

残留性有機汚染物質 (POPs) は、大気を介して極域まで長距離輸送され、生態系への影響が懸念されている。2023 年にはプラスチック製品に添加される紫外線吸収剤の UV-328 も、高い疎水性と難分解性から POPs として規制されるようになった。特に自動車は UV-328 の含有量・使用量が極めて多く、主要な排出源である。だが、規制以前に製造・流通した製品には、現在も UV-328 が含有され、製品の使用・廃棄段階を通じ、環境中へ排出されている。一方、そのライフサイクル全体の排出量については、地域差を考慮した定量的評価が十分に行われておらず、排出実態の把握が課題である。そこで本研究では、UV-328 の主要な排出源の自動車を対象とし、地域間における廃棄物管理の差が、ライフサイクルを通じた UV-328 の総排出量に及ぼす影響を定量的に評価することを目的とした。また、ヘキサクロロベンゼン(HCB)疑似物質をトレーサーとしたモデル実験を用い、2024 年度に波照間において、ストックホルム条約で規制が導入された 2004 年当時とほぼ同程度の濃度で検出された Legacy POPs の大気中挙動を検証することを目的とした。

2. 方法

排出源を先進国および発展途上国に区分し、物質の流入・蓄積・流出を明らかにするため、マテリアルフロー解析を用い、UV-328 の市中ストック量および環境排出量を推計した。具体的には 1999–2003 年の自動車保有台数を初期ストック、2005–2018 年の新車投入台数を投入量とし、ワイブル分布¹⁾に基づいて廃車台数および市中ストック量を算出した。車両中のプラスチック重量、ポリマー組成、および UV-328 添加濃度は文献値²⁾³⁾⁴⁾を参照し、先進国および発展途上国の廃棄物管理体制の違いを反映させた。車両 1 台あたりの UV-328 含有量 M_{uv328} (kg/台) は以下の数式 (1) により定義した。

$$M_{uv328} = \sum_a \sum_p (W_{total} \times R_a \times r_{a,p} \times C_{a,p}) \quad (1)$$

ここで、 W_{total} : 車両 1 台あたりのプラスチック総重量、 a : 用途区分 (外装・内装) p : ポリマー種、 R : プラスチック重量比、 $r_{a,p}$: 用途 a におけるポリマー p の構成比、 $C_{a,p}$: 用途 a ・ポリマー p ごとの UV-328 添加濃度である。使用段階では外装プラスチックからの摩耗排出を、廃棄段階では焼却・埋め立て・不法投棄等の処理方法別に排出係数を適用して排出量を推算し、廃棄物管理水準の違いによる排出量の差を比較した。また、輸送・沈着過程のみの影響を評価するため、Community Multiscale Air Quality (CMAQ) モデルを用い、化学反応を考慮しない HCB 疑似物質トレーサーによる解析を行った。分子量 1 g/mol の仮想不活性物質を設定し、反応なしの条件のもとで沈着の有無を切り替えた感度解析を実施した。具体的には、輸送・拡散のみを考慮した Case A (反応なし・沈着なし) と、乾性沈着を含む Case B (反応なし・沈着あり) を設定した。排出は単一カテゴリとして扱い、2023 年に年間 1 Tg 相当を連続排出する spin-up を行った。2024 年を評価期間とし、前年度排出物質の残存および輸送挙動 (carryover) を解析した。

3. 結果と考察

自動車由来の UV-328 の排出量を推計した結果、先進国の年間総排出量は対象期間中の 2014 年に最大 3.2×10^3 kg、発展途上国では、使用禁止後の 2036 年に最大 1.5×10^5 kg に達することが推算された。後者の年間排出量は前者の約 4.7×10 倍であり、この差は主に廃棄物管理体制の違いに起因すると考えられる。先進国ではサーマルサイクル (廃棄物焼却に伴う熱回収) やコントロールダンピング (管理型埋め立て) により適正に処理され、使用中の摩耗等に伴う大気および水域への排出が総排出量の 96.2% 以上を占めていた。一方、発展途上国では廃棄後の野焼きに起因する大気・水域・土壌への排出が総排出量の 93.7% を占めていた。これは途上国において廃棄物管理体制が十分に整備されておらず、非管理型処理 (野焼き) が広く行われている実態を反映していると考えられる。また、条約による規制後も過去に投入された市中ストックが将来にわたり継続的な環境負荷源となり得ることを示している。また、HCB 類似物質については、2024 年に排出量をゼロとした条件下では、発生源近傍における濃度は速やかに減少した。一方で、極域では濃度の増加が確認され、前年に排出された物質が大気輸送を通じて全球規模で循環・残存していることが示された。

4. 研究成果報告

岡田 桜和 (2026) マテリアルフロー解析による自動車由来の UV-328 の排出量評価と地域差、北九州市立大学卒業論文、pp.1-43.

松井 響加 (2026) メトキシクロルの環境中における微生物および光分解挙動、北九州市立大学卒業論文、pp.1-50.

伊藤理彩、板橋秀一、松木篤 (2025) 能登半島地震前後の大気微粒子に含まれるヒ素の化学種と起源、第 30 回大気化学討論会、予稿集 O3-11、東京大学

5. 研究組織

伊藤 理彩	准教授	北九州市立大学 国際環境工学部
板橋 秀一	助教	九州大学 応用力学研究所
岡田 桜和	4 年生	北九州市立大学 国際環境工学部
松井 響加	4 年生	北九州市立大学 国際環境工学部
笹川 基樹	主幹研究員	国立環境研究所 地球システム領域
高澤 嘉一	環境標準研究室 室長	国立環境研究所 環境リスク・健康領域

雲仙岳に発生する霧の日変化・季節変化に関する衛星データ解析と地上観測との比較

長崎大学大学院 総合生産科学研究科 河本和明

[目的]

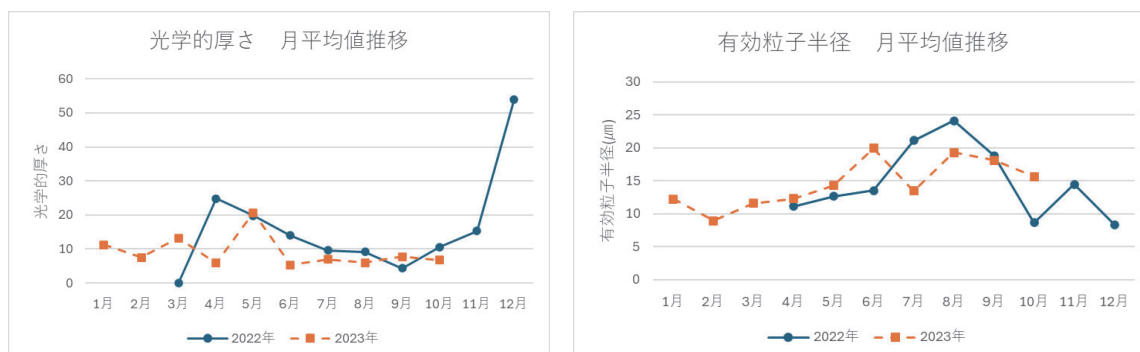
地球大気放射収支の重要な決定要因の一つは雲や霧である。そのため地球の気候の維持や変動を調べるには、その発生頻度などの特徴の理解が重要である。霧は「地表に接した雲」であり、雲の代替物と捉えることができる。また雲仙岳は霧が頻繁することで知られている。これまで研究代表者らは霧を対象として雲仙岳サイトで地上直接観測を行ってきた。気象衛星ひまわりは日本が打ち上げ、データ管理を行なっている静止衛星であるため、雲仙岳サイトを高時間分解能で観測することができる。よって本研究では、ひまわりデータを用いて雲仙岳に発生する霧の特性の日変化・季節変化を明らかにし、地上観測データとの関連性を調査することを目的とする。

[方法]

解析対象は雲仙ロープウェイ周辺 5 km 四方とし、2022 年 3 月～2023 年 10 月の期間について観測を行った。衛星データとして、ひまわり 8・9 号の雲特性プロダクト(光学的厚さ、雲頂温度・高度、有効粒子半径)を用い、地上では Cloud Particle Sensor (CPS)により霧粒の個数濃度と粒径を 10 分間隔で取得した。さらに気象台の視程・気温・湿度等も併用した。CPS で霧が検出され、かつ雲頂高度が 2 km 以下の条件を満たす場合のみ衛星データを抽出し、重み付け平均によって同一格子に統合することで、霧に対応する衛星物理量を選別し解析した。

[結果と考察]

季節変化として、霧は梅雨期および秋季に長時間持続する傾向が強く、左図に示すように光学的厚さは概ね 30 未満、雲頂高度は 1.5～2.0 km に集中し、層状の低層雲として存在することが確認された。雲頂温度は地表気温の季節変化とよく対応し、霧が地表付近の熱環境の影響を強く受けることが示唆された。また右図に示すように夏季には水蒸気量増加により有効粒子半径が大きくなる一方、エアロゾル分布の影響で高度依存性が見られた。次に日変化として、霧は主に夜間から早朝にかけて発生・持続し、日中は日射による昇温と混合の強化によって減少・消散する傾向がみられた。これは放射冷却による地表付近の冷却と水蒸気凝結が夜間に強まり、日中は気温上昇に伴って霧粒が蒸発するという熱力学過程を反映した結果である。ただし衛星推定値と CPS 観測値の相関は弱く、観測高度や推定アルゴリズムの違いが不確実性要因であると考えられる。



[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・地上データの解析・全体のまとめ)

岡本創(九州大学 応用力学研究所、雲相推定・解析手法についてのアドバイス)

大島瀬戸周辺における流れの鉛直構造の解明

大島商船高等専門学校 酒井秋絵

目的 大島瀬戸は広島湾西端に位置する狭窄海峡であり、起伏に富んだ海底地形上に非常に強い潮流が通過する海域である。このような強流は海水の鉛直混合を促進していると考えられる。広島湾では近年、海洋生物にとって重要な藻場の減少や漁獲量の低下が問題となっており、藻場再生活動が進められている。藻場の育成には栄養塩の供給が不可欠であり、海峡部における鉛直混合や栄養塩輸送の役割を明らかにすることは重要である。本研究では、大島瀬戸における成層構造および流速の鉛直構造を観測し、潮流による混合特性と栄養塩の鉛直輸送への寄与を明らかにすることを目的とする。

方法 各潮時における水温と流れの鉛直構造を比較するため、2025年7月18日（中潮の弱流時）と12月5日（大潮の強流時）に大島瀬戸における水温と流れの観測を大島商船高等専門学校の練習船「大島丸」で実施した。この海域は東航時と西航時で通航できる海域が異なり、海峡部の中央に設けられたC線を境に東航時は南側、西航時は北側と通航しなければならない。そこで、C線上に最西端のStn. 0から最東端のStn. 5の計6点の観測点を経度0.25分ごとに設定し、投下式水温計XBTを用いた水温観測を実施した。また、船底に設置された超音波流速計ADCPを用いて船底から海底までの流れを観測した。

2025年7月18日は行き（Run1）は転流時、帰り（Run2）は南西向き1m/s程度の時に観測を実施した。Run1ではStn. 1, 2, 4で投下、Run2ではStn. 4, 1でXBTを投下した。2025年12月5日は西向き強流時に連続してRun1とRun2を観測した。Run1ではStn. 1, 2, 3, 4, 5で投下、Run2ではStn. 5, 4, 3, 2, 1, 0でXBTを投下した。

結果と考察 観測された東西流および南北流の鉛直断面を図1に示す。7月観測では、Run1およびRun2ともに海峡中央の最強流域でも流速は1.5 m/s以下であった。Run間で海底地形が異なって見えるのは、通航航路の違いによるものである。一方、12月観測では全体的に7月よりも流速が強く、大島大橋直下の最浅部（Stn.2とStn.3の間）において最大3.2 m/sの西向き流が観測された。大島大橋東側（Stn.3～5付近）は比較的水深が深く、表層から海底まで流速は1 m/s未満と、海峡内では相対的に穏やかな流れが分布していた。

7月の水温分布を図2に示す。表層が最も高温で、深度とともに1～2℃低下する明瞭な成層構造が確認された。Run1では橋の西側（Stn.1）より東側（Stn.4）の方が高温であったが、Run2では逆の傾向を示した。特にStn.4では、Run1において躍層下部（約10 m）で22.7℃であったのに対し、Run2では21.4℃と約1.3℃低下していた。これは、転流時のRun1に比べ、西向き流が卓越したRun2では、浅く閉鎖的で高水温の広島湾水が海峡へ流入した影響と考えられる。また、Run1のStn.2ではStn.1およびStn.4より低水温が観測された。これは橋脚や起伏の大きい海底地形に起因する局所的な流動構造の影響と推察される。

12月の水温分布を図3に示す。水深1 m以深では $18.05 \pm 0.05^\circ\text{C}$ のほぼ一様な水塊が形成されていた。表層よりも水中の方がやや高温であり、大気による表層冷却と鉛直混合の影響が示唆された。本研究では、西向き・東向きそれぞれの弱流時および強流時の比較を通じて、潮流に伴う混合特性の解明を試みた。しかし、観測時期が7月と12月であったため、潮時の違いに加えて季節変動の影響を含んでいる可能性がある。本海域南方の伊予灘では、冬季には大気冷却により成層が崩壊し、春から夏にかけて成層が強化され、海底に低温水塊が保持されることが報告されている（Zhu et al., 2022）。したがって、12月の強流時に観測された均質な水塊は、潮流混合によるものではなく、季節的要因に起因する可能性も否定できない。今後は夏季の強流時観測を実施し、潮時の影響と季節変動を切り分けて比較検討する必要がある。

研究組織 研究代表者：酒井秋絵（大島商船高等専門学校 助教）

所内世話人：千手智晴（応用力学研究所 准教授）

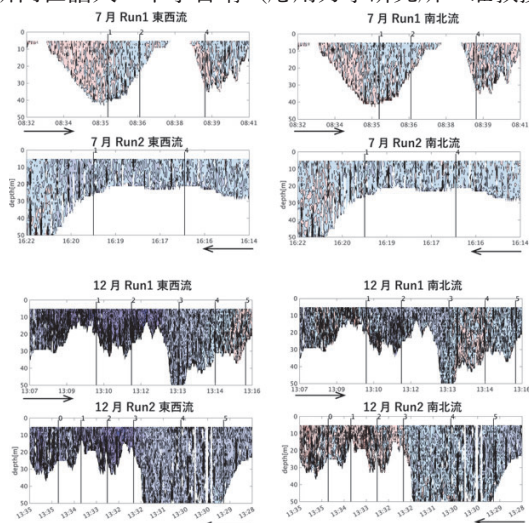


図1 2025年7月18日と12月5日に観測した東西流と南北流の鉛直断面図。横軸を時間軸として図の右手が東側となるようにし、時間の経過方向を矢印で示した。Stn. 0～5におけるXBT投下時刻を実線で示す

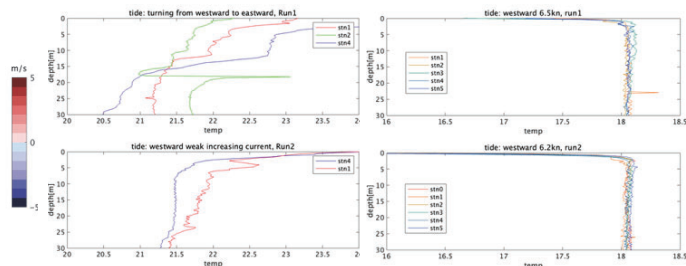


図2 2025年7月18日に観測された水温の鉛直分布 (Run1とRun2)

図3 2025年12月5日に観測された水温の鉛直分布 (Run1とRun2)

インド亜大陸北東部におけるプレモンスーン期の季節内変動とその地域性の解明

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降水の季節内変動は、主にモンスーン期を対象に行われてきた（例えば Fujinami et al., 2011）。一方で、近年プレモンスーン期の降雨災害が顕著かつ地域性も大きいため、社会活動への影響が深刻さを増している。特にバングラデシュやインド・アッサム州では、季節内変動の活発期に時に竜巻を伴うような激しい擾乱（Mahanta & Yamane, 2020）が発生しており、本現象の観測強化と共に現象理解が求められている。

このようなプレモンスーン期の季節内変動は、インドシナ半島では上層の偏西風擾乱と下層の水蒸気収束との関連が指摘されている（Kiguchi et al., 2016）が、インド亜大陸北東部における研究はほとんどない。また、この現象はモンスーンの開始との関係が指摘されており、現象の理解が求められている。

そこで本研究の目的は、我々の研究グループ（SOHMON、<https://sites.google.com/view/sohmon>）がインド亜大陸北東部に展開する雨量計ネットワークと本事業でこれまでに収集した雨量データ、さらに対象地域で実施されているゾンデデータや 2024 年 5 月 29 日に打ち上げられたばかりの EarthCARE などのリモートセンシングを援用し、インド亜大陸北東部におけるプレモンスーン期の降水特性とその季節内変動を探り、その鉛直構造の解析を通じた現象の理解を図る。

バングラデシュから西ベンガル州においては、気候学的観点から下層の収束帯（ドライライン）のプレモンスーン期のメソ擾乱の要因として示されている（Akter and Tsuboki, 2017）。また我々の初期的解析から、季節内変動の要因として偏西風と下層の水蒸気フラックス、さらにアッサム州やメガラヤ州においてはメガラヤ高地による地形効果が考えられる。そこで本研究では、偏西風と下層の水蒸気フラックス、降水量の相互相関関係を、気候学的な解析及びイベント解析を通じて明らかにする。今年度は事例解析として、プレモンスーン期に雨量の多かった 2017 年、2020 年を対象に解析を進め、インド亜大陸北東部平野部と山岳域における背景場の影響と地形効果の各要因を定量的に明らかにする。

2. 結果

事例解析を抽出するため、雨量データからの抽出を試みた。広範囲で利用可能な APHRODITE を使用した。対象地点は、ベンガル湾からヒマラヤまでの異なる降雨特性を持つ、ダッカ、シレット、シロン、グワハティとした。対象年はまず 1979～2007 年について今年度は解析した。29 年間のデータを用いて、ばらつきを定量的に評価するために、平均値と標準偏差（ σ ）を用いた。正規分布を仮定し、 $\pm 1\sigma$ を超えるイベントはやや稀な事象、 $\pm 2\sigma$ を超えるイベントは統計的に稀な事象とみなした。その結果、1983、1984、1988、1991、1993、2000 を抽出した。ここでは、2000 年の時系列を示す（図 1）。

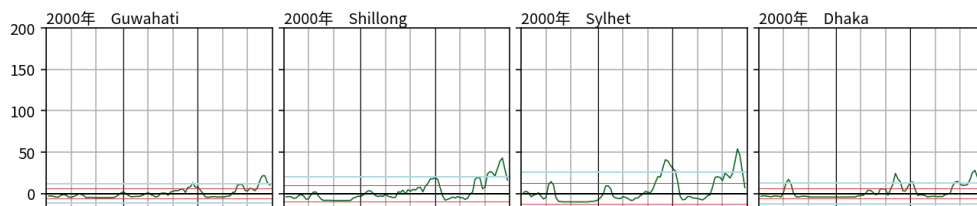


図 1：2000 年 3～5 月の 3 日間移動平均した、29 年平均からの降水量偏差（単位：mm/day）の時系列。赤色と青色の線は、それぞれ $\pm 1\sigma$ と $\pm 2\sigma$ を表す。

多雨年における環境場を示すため、半月平均した風の場合（300hPa、500hPa、925hPa）を ERA5 から、0 度～北緯 35 度、東経 60～150 度を抽出した。本報告では、2000 年のプレモンスーンの多雨イベントのうち、4 月下旬のイベントについての解析結果を示す。Kiguchi et al. (2019) で指摘されている 300hPa 面を見ると、4 月 21～25 日に、中緯度システムのトラフが対象地域の西に位置し、4 月 26～30 日には対象地域の上空にトラフが移動している（図 2）。その後 5 月 11～15 日にかけて東へ移動した。一方、Kiguchi et al. (2019) で示された下層（925hPa）への南西風の卓越は、4 月 21～25 日から 5 月 1～6 日にかけて強化されている（図 3）。一方、インド・アッサム地方は、東～南東風が卓越し、鉛直シアが増加していることが示唆された。

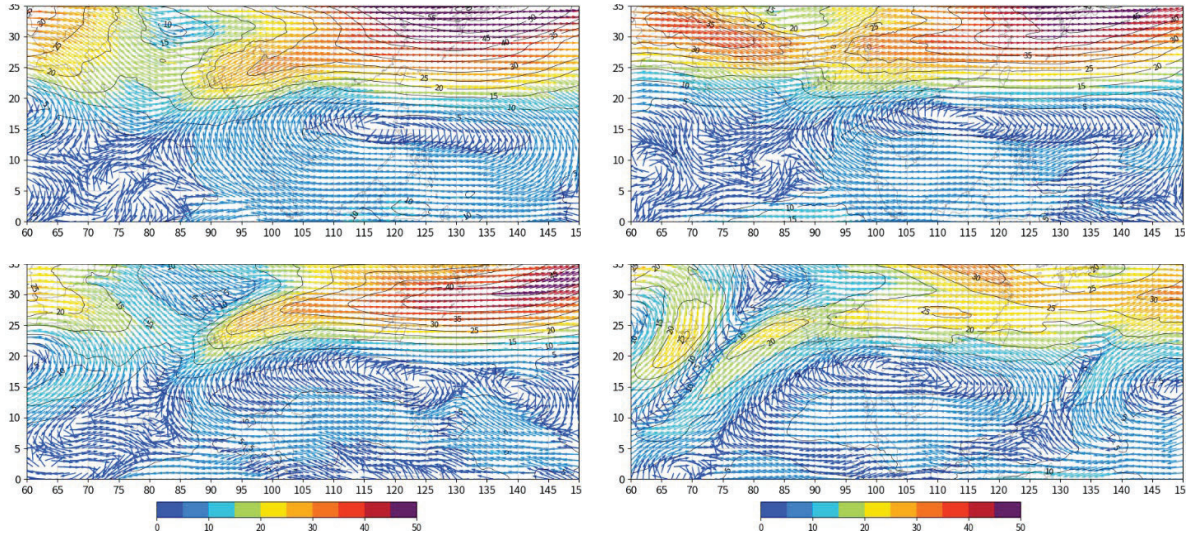


図 2 : 300hPa 面の (左上) 4 月 21~25 日、(右上) 4 月 26~30 日、(左下) 5 月 1~5 日、(右下) 5 月 6~10 日における半月平均風系図 (単位 : m/s)。

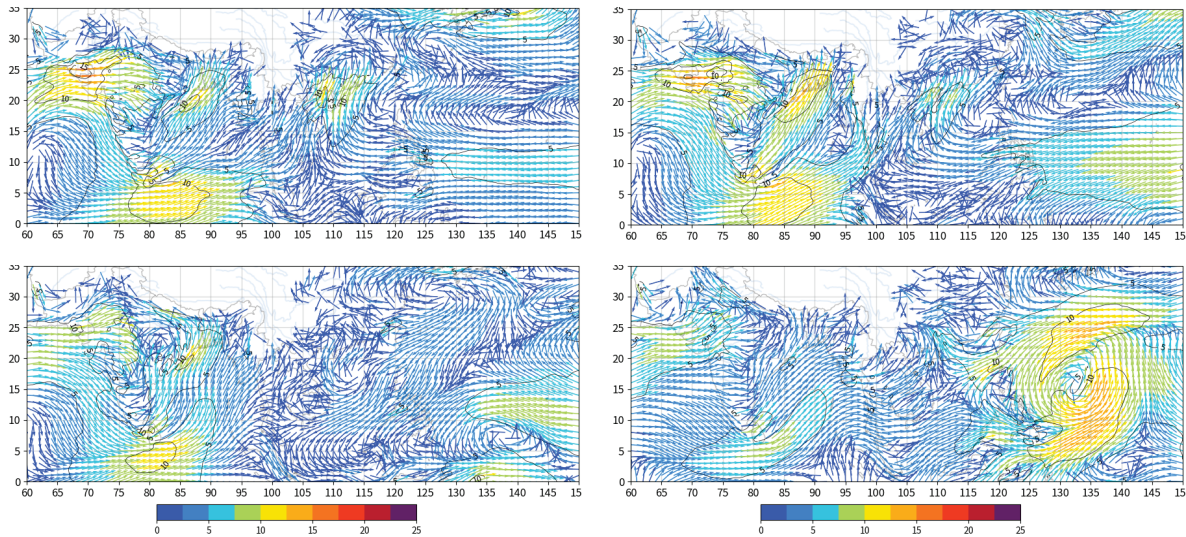


図 3 : 図 2 と同じ。ただし、925hPa 面。

4. まとめ

本研究で実施された事例解析は、Kiguchi et al.(2019)がインドシナ半島で示した総観場の影響を、本研究の対象地域でも同様のことが言えることを示した。今後は、プレモンスーン期に雨量の多かった事例解析で明らかにした背景場と地形効果の鉛直構造を調べるため、ゾンデデータ、AWS 及び EarthCARE データを用いて明らかにする。また、2008 年以降のデータから最近のプレモンスーン期に雨量の多い年を抽出し、同様の解析を実施する。

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によって実施された。

北極海表層流の海洋表層ドリフターと SWOT 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

海洋表層流は熱・淡水・物質循環に重要な役割を果たし、特に北極海では、表層流が海水分布や氷縁域の力学過程に大きな影響を与える。近年、高解像度観測を可能にした SWOT 衛星はサブメソスケール渦の検出を可能にしているが、極域での検証例は依然として少ない。本研究では、氷縁域における渦構造と海水漂流特性を現場観測と SWOT データを組み合わせることで解析し、氷縁域の渦構造と海水の漂流特性に関する知見を観測により得ることを目的に研究を行った。

2 手法

2023 年 9 月 17 日、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。氷縁域の海水は NOAA Ice Chart によれば海水密度度が 40-60% であった。衛星 SIC では検知されておらず、比較的高い海水温と、その大きな空間勾配が影響しているものと考えられる。

現場観測データに加え、SWOT (Surface Water and Ocean Topography) 衛星による海面高度 (SSH: Sea Surface Height) データも用いた。使用したデータは Level-3 (V2, フィルタ処理済み) プロダクトであり、約 120 km のスワス幅にわたり、約 2 km 間隔の空間分解能で観測が行われている。なお、9 月 22 日から 27 日にかけてはデータの欠測が確認された。これは衛星のバッテリー充電等の運用上の理由による観測中断によるものと考えられる。

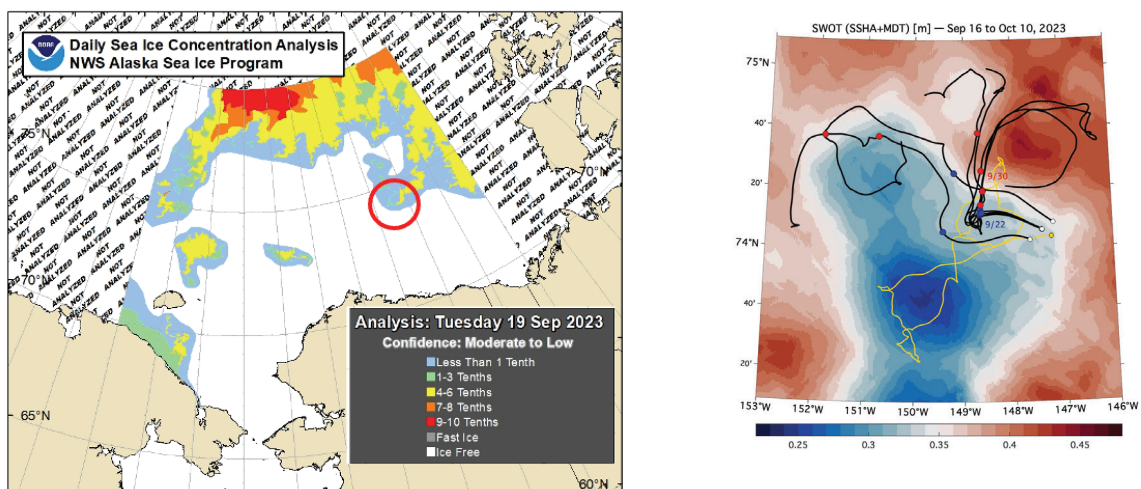


Fig. 1 (左) ブイ展開時の西部北極海の海水分布とカナダ海盆の展開地点 (赤丸) (右) 北極海カナダ海盆に投入されたドローグ付き漂流ブイの軌跡 (黒線) と SWOT 海面高度計による学的海面高度の推定結果

3 結果

展開された漂流ブイはすべて、展開後 2 日間続いた東風で西に移流し、2 地点目で投入した 5 基は風が収まると渦に捕捉される形となった (Fig. 1)。これらは展開から約 2 週間後に生じた南風に伴い渦から放出されるが、放出地点の違いにより、その後異なる渦に伴う流れで漂流した。一方で 2 地点から 5 海里離れた北と南の地点から展開されたブイは展開から 2 週間ほど速度の変化はあるが西に漂流し続けた。

SWOT L3 プロダクトは、直径 50 km 未満の多数の渦構造を明瞭に捉えた。ブイ漂流軌跡は SWOT から推定された力学的海面高度の等値線と良い一致を示した。海面高度変動は約 0.1 m、空間スケールは数十 km であり、推定されるロスビー数は約 0.02 と小さい。このことから、本海域の比較的大きなスケールの流れは地衡流平衡に近い状態にあると考えられる。

一方で、ブイの渦への捕捉および放出は風向変化に対応しており、吹走流が渦ダイナミクスを調整する役割を果たしている可能性が示唆された。

4 考察

漂流に対する風、波、流れの影響を考察した。風については ERA5 大気再解析を参照してエクマン吹走流を推定し、波はドリフターと同時に展開した波浪ブイ (Fig.1, 黄色線) の観測結果にもとづいてストークスドリフトを推定し、流れは成因が複数に分けられると考えられるが、定量的に推定できるものとして SWOT 観測に基づく地衡流を推定した。近慣性周期高周波の運動は全体的な漂流に与える影響が限定的であるため、本研究では 25 時間平均の流速成分に着目した。

風、波、流れそれぞれの展開されたブイ地点における時系列変動を確認すると、風および波浪による漂流は空間的な変動が小さい一方で、流れは顕著な空間勾配を示すことが確認できた。また、大きさについては吹走流と地衡流が同程度の大きさであり、ストークスドリフトはそれらに比べると限定的であるが、無視できない程度と考えられる。以上の結果から、氷縁域における海水および浮体の漂流は、地衡流に支配される大局的構造の上に、風による吹走流およびストークスドリフトが寄与し決定されることが示された。したがって、極域における漂流予測および海水縁変動の再現には、地衡流・吹走流・ストークスドリフトを統合的に考慮する必要がある。

5 成果報告

観測データが比較的少ない北極海の漂流データを得ることができ、結果から海水変動の物理的理解に資する海水の漂流に関する知見を得ることができた。また、SWOT は極域付近において軌道が収束する特性を有しており、その結果、高緯度域では観測頻度が相対的に高くなるという利点がある。本研究対象域は高緯度に位置するため、比較的高頻度の観測データを得ることができた。

また、2025 年度中は、下記の通り、関連する口頭発表を実施した。

- Kodaira, T., Waseda, T., Fujiwara, Y., Ichikawa, K., Kimizuka, M., Kawaguchi, Y., Nose, T., Fujiwara, A., Wind, wave, and current effects on sea ice drift based on multiple drifting buoys deployed in the Canada Basin, the eighth International Symposium on Arctic Research (ISAR-8), October 28-31, 2025, Hachioji.
- 小平翼, 早稲田卓爾, 藤原泰, 君塚政文, 市川香, 川口悠介, 藤原周, 北極海カナダ海盆上における浮体の漂流と水平拡散, 日本海洋学会 2025 年度秋季大会, 9 月 21 日-25 日, 2025.

プラズマ対向材 ODS-W/Cu の力学特性に及ぼす照射の影響

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
徳永 和俊

1. 目的

核融合炉の工学的実用化における中核的課題の一つは、ダイバータ材が極限的な環境下において、長寿命かつ高信頼性で運転できるかどうかにある。現在、ダイバータには主として W/OFHC/CuCrZr の複合構造が採用されているが、W と Cu は物理特性の差が著しく、特に線膨張係数(CTE)の大きさ不一致に加え、冶金学的な非相溶性も相まって、使用中に界面で高熱応力が生じやすく、亀裂、剥離、さらには溶解を引き起こし、ITER などの核融合装置の運転安全性を深刻に脅かす。従って、高強度、高い熱的安定性、耐照射性、ならびに高効率な熱管理性能を兼ね備えた新規接合技術および材料の開発が強く求められている。本研究では、W と Cu 合金の間に W-Cu 機能傾斜材料 (FGM) 中間層を導入し、CTE の遷移領域を形成することで、従来の異種界面における組成の急激な不連続を、連続的な組成勾配に置き換え、材料組成および物理特性の段階的な移行を実現した。FGM 試料について、高エネルギー重イオンを照射し、照射による硬さの変化を調べた。

2. 実験方法

FGM 中間層を入れた W/Cu 合金を作製した。具体的に、まず ODS-W 基材表面にナノ化処理を施してナノ多孔構造を形成し、その後、ODS-W と CuCrZr の間に W-50wt. %Cu (W-50Cu) を中間層として導入し、放電プラズマ焼結法 (SPS) 技術を用いて三層構造の ODS-W/W-50Cu/CuCrZr 接合体 (FGM-2 と記す) を作製した。比較のため、表面ナノ処理を施した ODS-W/Cu/CuCrZr 接合体 (FGM-0) も作製した。厚み 0.3mm、5mm Φ ディスク試料をインゴットから切り出し、片面を鏡面研磨した。これらの試料に対して、2.4MeV の銅イオンにより 673K で 2.2×10^{19} ions/m² まで照射を行った。図 1 に、Cu イオン照射による Cu 側および W 側の損傷と深さの関係を示す。Cu 側では、表面から約 700nm の位置に損傷ピークが現れ、そのピーク損傷量は約 4.8dpa であった。一方、W 側では、表面から約 400nm に損傷ピークが位置し、ピーク損傷量は約 3.2dpa であった。照射の後に、ナノインデンテーション装置 (ENT-1100a, Elionix) を用いて、FGM-0 および FGM-2 接合体の重イオン照射前後における各領域のナノインデンテーション硬さを測定した。試験に用いた最大荷重は 10 mN、圧痕深さは約 200 nm とし、各領域で 5 点測定を行い、その平均値を採用した。

3. 実験結果と考察

図 2 には、照射前後における接合体各領域のナノインデンテーション硬さ分布を示す。オレンジ色のデータ点は硬さ増分 (ΔH) を表し、各領域の照射感受性を反映している。結果から、照射によりすべての領域で硬さが全般的に増加することが確認されたが、FGM-2 接合体はより優れた耐照射硬化特性を示した。具体的には、FGM-0 接合体では ODS-W 領域および CuCrZr 領域の ΔH がそれぞれ 123.9 HV と 33.1 HV であったのに対し、FGM-2 接合体では対応する値が 84.9 HV および 26.8 HV に低下した。一方、W-50Cu 中間層では、W 相の ΔH が 124.6 HV と ODS-W 基体の 84.9 HV を大きく上回り、Cu 相の ΔH も 59.5 HV と CuCrZr 基体 (26.8 HV) より明らかに高かった。これらの結果は、中間層材料の照射硬化効果が基体材料よりも強いことを示している。FGM-2 接合体が示す優れた耐照射損傷性および照射硬化抑制特性は、複数の協同的なメカニズムに起因している。W-50Cu 中間層は重要な応力緩衝領域として機能し、熱応力および照射応力を効果的に再分配・散逸させることで、界面におけるき裂の発生および進展を抑制し、照射脆化を緩和するとともに、ODS-W および CuCrZr 領域の硬化度を低減する。また、W-Cu 系は相互拡散が小さいため、界面構造の安定性が維持される。中間層内部に存在する「カリフラワー状」Cu 構造は、構造的安定性自体は低いものの、照射欠陥を捕獲する能力を有しており、局所的な耐照射性を向上に寄与すると考えられる。一方、このような機構を欠く純 Cu 中間層は、原子移動度が高く、欠陥形成エネルギーが低いため、格子歪み、原子はじき出し損傷、さらには照射誘起非晶化が生じやすく、顕著な照射硬化を引き起こす。その結果、極端な照射条件下において単一の中間層として用いることが制限される。さらに、ODS-W 基体中の La₂O₃ 分散相は照射欠陥を高効率で捕獲し、CuCrZr では Zr/Cr 析出相が耐硬化特性を高める。これらの機構が相乗的に作用することで、高温照射環境下における FGM-2 接合体の構造安定性および力学特性が確保されている。

4. まとめ

本研究では、ダイバータ複合材料の高温特性を向上させることを目的として、中間層を入れた ODS-W/W-50Cu/CuCrZr 接合材を開発した。その結果、本接合材は ODS-W/Cu/CuCrZr 接合材と比較して、より優れた耐照射特性を示すことが明らかとなった。今後は、熱特性に関する実験結果も含めて検討を進め、最適なダイバータ複合材料の構築を目指す。

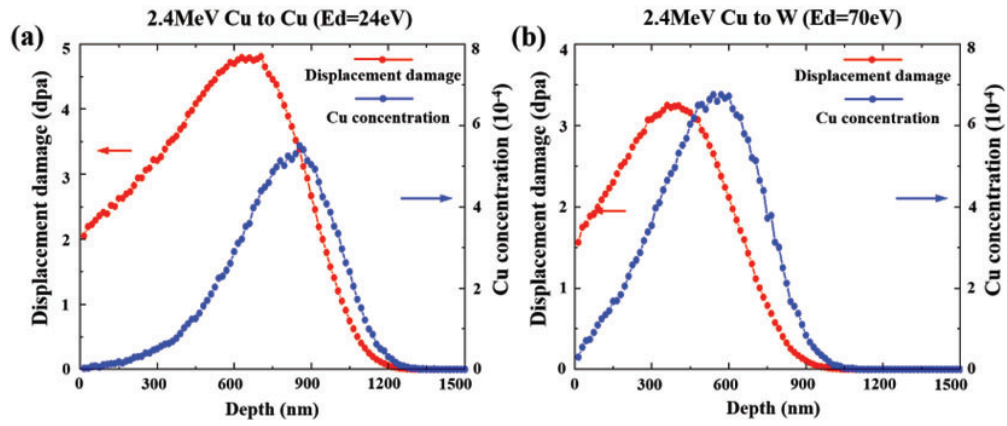


図 1 2.4MeV の銅イオン照射した Cu 側と W 側の損傷

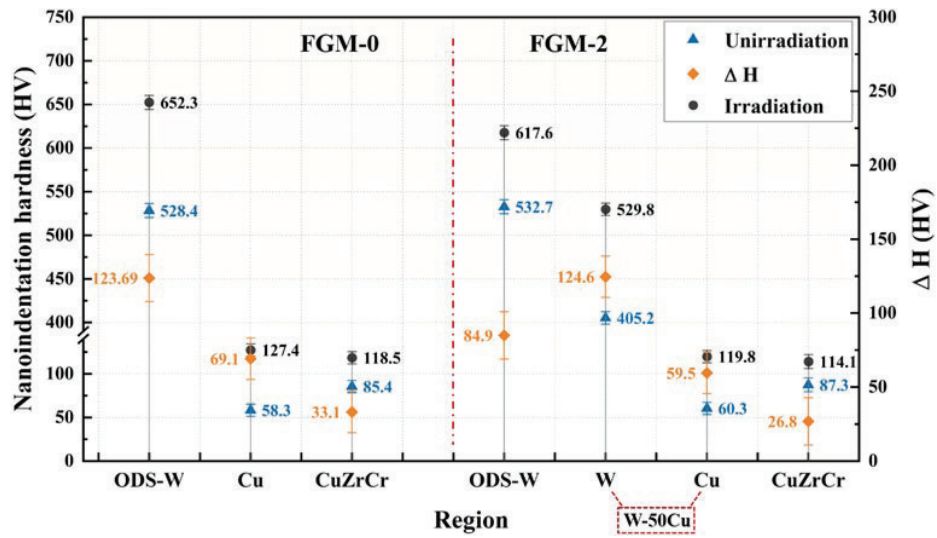


図 2 重イオン照射前後における FGM-0 および FGM-2 接合体の各領域のナノインデンテーション硬さ

核融合プラズマにおける熱と乱流の非拡散的伝搬の研究

京都大学 金史良

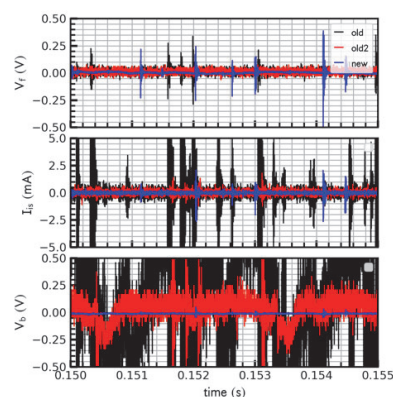
目的

近年の核融合プラズマ研究では、乱流輸送の大域的な効果、例えば乱流伝播や乱流捕捉、雪崩輸送現象などに注目が集まっており、実験観測も増えてきている[F. KIn et al., Nucl. Fusion 63, 2023]。一方で、実験で観測される大域的な輸送現象が、どのような物理機構によって駆動されているかは明らかとなっていない。特に、熱の伝搬がどのように乱流と相互作用しているか、その素過程を明らかにする必要がある。本研究では、ヘリオトロンJ装置や DIII-D 装置を用いて、輸送と乱流の同時計測を実現し、物理モデリングとの比較により背景物理機構の解明を進めていく。

研究の進捗状況

ヘリオトロンJ装置では、プローブを用いた乱流と輸送の同時計測を目指している。同装置では、漏れ磁場の影響によりケーブル配線が長くならざるを得ず、それに起因する各種ノイズが揺動計測に大きな影響を与えてきた。本年度は特に、プローブ全体のノイズレベル低減を目的として、同軸ケーブルのシールド材の変更およびケーブル長の短縮、電源・回路構成・グラウンド方式の見直しといった改造を実施した。右図に示すプラズマ非存在時の計測結果（青：今年度データ）から、浮遊電位、イオン飽和電流、トリプルプローブ用バイアス電位のいずれにおいても、ノイズレベルが大幅に低減していることが確認できる。改良後のプローブを用いて実験データの取得を進めており、現在解析を行っている。

一方、DIII-D 装置では、雪崩輸送の物理機構解明を目的とした物理実験の実施に向けて実験提案書を作成した。共同研究者との議論を通じて研究意義および実現可能性を精査・整理した結果、提案は承認された。BES と ECEI を用いた乱流と輸送の同時計測及び IRTV による SOL 領域への影響調査が主なテーマとなっている。現在、来年度の実験実施に向けて、具体的な実験内容および手順の準備を進めている。



図：プラズマ着火前のプローブデータの時系列

Digging Under the Avalanche

F. KIn¹ and P.H. Diamond²¹Institute of Advanced Energy, Kyoto University²Department of Astronomy & Astrophysics and Physics, UC San Diego

Abstract

Avalanches are intermittent, spatio-temporally extended transport events that occur near criticality (resonance) in driven, dissipative systems. Avalanches have been observed in confined plasmas such as DIII-D, and long have been studied by simulation and theory, since they could cause breaking of gas-bubble confinement sealing. We propose an experiment to elucidate the dynamics of avalanching. Since avalanching involves temperature profile evolution, in turn driven by turbulence, avalanching and turbulence spreading must be coupled. As avalanches propagate, spreading enables increased transport while transport triggers more spreading. We propose to illuminate the relation between an 'avalanching event' and a 'spreading event' by utilizing combined ECE (Electron Cyclotron Emission) and BES (Beam Emission Spectroscopy) studies on DIII-D. BES velocimetry will be used to diagnose spreading. The relation between the full suite of the heat and spreading flux is of special interest. The aim is to understand how an avalanche propagates in space and time—indeed to 'dig under the avalanche'.

Facility Choice
Check all that apply:

- ☒ DIII-D
☐ BPSF
☐ WPPF
☐ MPRL

図：DIII-D 実験提案書の

→ページ

小型 Retarding field analyzer を用いた

PANTA プラズマのイオン温度空間分布の計測

東北大学大学院工学研究科 高橋宏幸

1. 目的

PANTA ではイオン温度勾配に由来する不安定性(ITG モード)の制御や観測を目指した実験が進められている. ITG モードの成長率はイオン温度に依存するため, 実験を通して ITG モードに関する理解を深めるためにはイオン温度の計測が必要である. そこで本研究では retarding field analyzer (RFA) を用いたイオン温度の計測に着目する. (1) PANTA のプラズマ径に対して十分小さい小型の RFA を開発し, (2) イオン温度を計測するための適切な電位構造を調査し, そのうえで(3) PANTA で生成したアルゴンプラズマのイオン温度を計測することを本研究の目的とした.

2. 成果

直径と奥行きがそれぞれ 8 mm および 6 mm の円筒型ヘッド部の内部に, 4 枚のグリッドと 1 枚のイオンコレクタが格納された RFA を開発した(図 1). プラズマ対向グリッドから順にグリッド 1 からグリッド 4 とすると, グリッド 1 には 635 mesh/inch, グリッド 2 から 4 には 200 mesh/inch の金網が溶接されている. 各グリッドおよびコレクタには独立に電圧が印加可能である. この RFA を用いて行った初期実験結果の一例を図 2 に示す. RF パワーは 4 kW とした. グリッド 1~4 およびコレクタの電位は浮遊電位, -70 V, ± 100 V, -100 V および -50 V とした. RFA のヘッドはプラズマ中心からおよそ 2 mm の位置に設置した. イオン捕集部は装置下流に向けた. 図 2(上)は得られた I - V 特性の一例で, グリッド 3 の電位がプラズマ電位以下のときイオン飽和電流が得られることが確認できる. 反対に十分に大きい電位のときは電流値が 0 に収束することも確認できる. 図 2(下)に示すように, 初期的な解析では 1.2 eV なるイオン温度を得ることに成功した. 今後はこの値の妥当性の検証を進める.

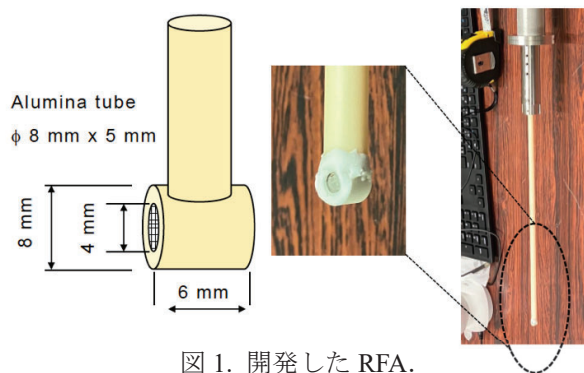
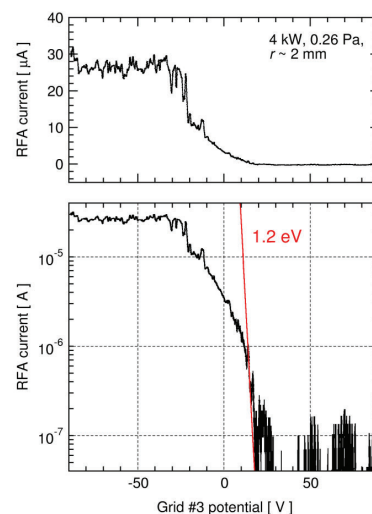


図 1. 開発した RFA.

図 2. 取得した I - V 特性の一例.

3. 成果報告

- ① 加賀谷重考 他, 第 42 回プラズマ・核融合学会年会, 3p16
- ② S. Kagaya *et al.*, Physics of Plasmas, **32**, 112103 (2025)

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

トカマクプラズマにおける散逸捕捉電子モードによる乱流輸送のモデルを用いた研究

核融合科学研究所 登田慎一郎

1 研究目的

乱流輸送はトロイダルプラズマ研究における重要課題の一つである。乱流輸送はジャイロ運動論解析を用いて広く研究されている。捕捉電子モード (TEM) は低波数領域、 $k\rho_i \leq 1$ で駆動される。ここで k は波数、 ρ_i はイオンのジャイロ半径である。規格化電子衝突周波数が 1 未満の TEM は、高衝突領域において散逸性 TEM(d-TEM) と呼ばれる。このモードは電子衝突による散逸によって駆動され、イオンはバナナ領域に存在する必要はない。d-TEM は、イオン温度勾配 (ITG) モードが励起される領域よりも低いポロイダル波長領域で観測される。九州大学応用力学研究所の PLATO 装置を用いたプラズマ実験が実施されている。PLATO 装置での統合コード (TASK コード) が予測するプラズマでは、電子衝突周波数は典型的に電子バウンス衝突周波数より小さく、イオン衝突周波数はイオンバウンス衝突周波数より大きい。先行研究では、PLATO で予測されたこれらのプラズマにおいて d-TEM が励起されることが確認されている [1]。本研究では、局所的なジャイロ運動論解析に GKV コード [2] を用い、運動論的電子の応答に関するシミュレーションを実施した。(多くのジャイロ運動論解析がイオン温度勾配 (ITG) モードや無衝突捕捉電子モード (c-TEM) プラズマについてされている。) 本研究の目的は、トカマクプラズマにおける d-TEM/ITG プラズマの乱流輸送の簡約化モデルを得ることである。なぜならあまり多くのジャイロ運動論解析が d-TEM/ITG プラズマについて行われていないからである。これらの簡約化輸送モデルは、統合コードに適用され、プラズマ分布の予測を行うことができる。

2 研究成果

トカマク装置における d-TEM/ITG プラズマの簡約化モデルを提唱した。ジャイロ運動論解析を行う際、衝突の効果は洲鎌衝突モデル演算子を用いた。簡約化モデルは、磁気シア、混合長概算に関連する量、および帯状流の線形応答の特性量に依存する関数である。磁気シアの効果は、簡約化輸送モデルにおいて新たに重要な要素として組み込まれた。乱流輸送に対する帯状流の影響を検証するため、流束のポロイダル波長依存性を検討した。衝突周波数が比較的高いトカマク装置における二種類の安全係数に対し、非線形および線形シミュレーションを実施した。粒子拡散係数とエネルギー拡散係数の輸送モデルは非線形シミュレーション結果から示される。輸送モデルにおけるエネルギー・粒子輸送への帯状流の影響は、非線形シミュレーション結果の流束スペクトルから同等と判明した。線形シミュレーション結果により、線形成長率や実周波数などから d-TEM プラズマと ITG プラズマが同定された。帯状流の減衰時間も示されている。乱流ポテンシャル揺動は、混合長概算値と磁気シア s に関連する量によってモデル化される。帯状流ポテンシャル揺動は、乱流が帯状流のソースとみなして、帯状流減衰時間と乱流ポテンシャル揺動によってモデル化される。磁気シアおよび混合長概算値に関連する量、ならびに帯状流減衰時間に基づく粒子拡散係数とエネルギー拡散係数の簡約化モデルが構築される。そのモデルはトカマク装置における d-TEM/ITG プラズマの非線形シミュレーション結果を再現する。本研究で構築した簡約化モデルでは、拡散係数をモデル化する際に用いる二つの安全係数プロファイルが異なるため、磁気シアの効果を新たに有用な要素として組み込んだ。したがって、本研究で構築した簡略化モデルは、異なる安全係数プロファイルに対応するよう拡張されている。

3 今後の課題

c-TEM プラズマで輸送モデルを構築する場合、d-TEM プラズマおよび ITG プラズマにおける帯状流の影響が c-TEM プラズマと異なる点について、輸送モデルを用いて議論できる。c-TEM プラズマにおける簡略化モデルの構築は今後の課題とする。

[1] S. Toda et al., Phys. Plasmas **31**, 032511 (2024)[2] T. -H. Watanabe and H. Sugama, Nucl. Fusion **46**, 24 (2006)

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
九州大学応用力学研究所 井戸 毅
大阪公立大学 渡邊英雄

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大学共通参照材料 NIFS-HEAT-2 (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。表 1 に合金の化学組成を示す。Z44、ZX1 については注目する照射誘起析出物 Ti_5Si_3 の構成元素である Si 以外は分析中であるが、Cr、Ti 濃度については配合値、C、N、O 濃度についてはこれまで同じ原料で製作した合金の分析値を参考値として示している。2025 年度は、これまでに応用力学研究所の重イオン照射システムを用いて Cu^{2+} イオン照射試料に追加照射を実施し、最高 60 dpa までの照射硬化データを取得した。

3. 実験結果と考察

図 1 にナノインデンテーション硬さの照射損傷量依存性を示す。照射損傷量の単位は dpa (displacement per atom) であり、2.4 MeV の Cu^{2+} イオンによる損傷のピーク位置、深さ 800 nm における評価値である。NH2 では 15 dpa までの硬度しか評価していないが、Z44 及び ZX1 では 60 dpa まで照射硬化が損傷量とともに増加し、過去に中性子照射で観察されているような 30 dpa 以上での硬度の低下は確認できなかった。照射誘起析出物の構成元素である Ti 濃度を変化させても同じ硬度となることから、Ti を含む照射誘起析出は生じていないと推定できる。実際に 15 dpa では析出は生じていないことを確認しており、今後はより高照射量の試料の評価を進めるとともに、中性子照射とイオン照射の照射硬化挙動が異なる原因を探る予定である。[1] H.M. Chung, J. Nucl., Mater. 239 (1996) 139-156.

表 1 V 合金の化学組成

ID	V	Cr*	Ti*	Si	C	N	O
NH2	Bal.	4.02	3.98	270	69	122	148
Z44	Bal.	(4)	(4)	370	(100)	(50)	(200)
ZX1	Bal.	(10)	(1)	400	(100)	(50)	(200)

*mass%, 他は mass ppm, ()内は未分析で配合値または推定値を示す

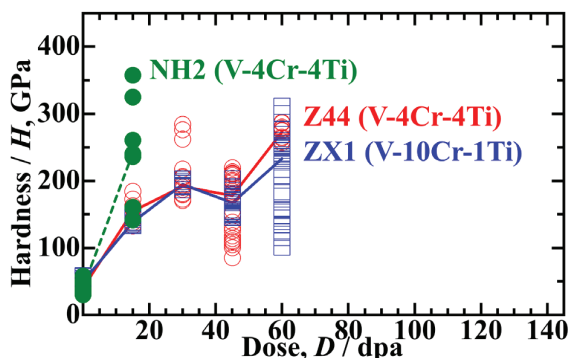


図 1 ナノインデンテーション硬さの照射損傷量 (dpa: displacement per atom) 依存性

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

PLATO トカマクにおいてコンデンサ放電を行うと D コイルの電流波形が誘導の影響で正しく出力されない現象が確認された(図 1)。これは、プラズマの位置制御を行う上で操作性を悪

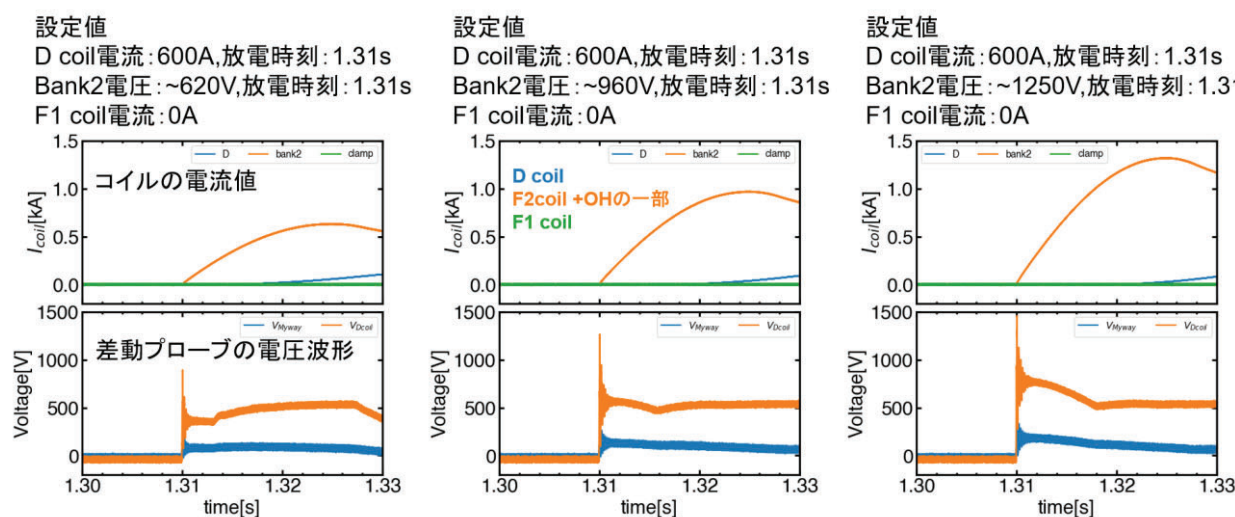


図 1 これまでのコンデンサバンク放電の概要 (D coil 単独で運転する場合、コンデンサバンクの電圧を上げると誘導の影響で D coil 電流の立ち上がりのタイミングが遅くなる)

くするするため解消しなければならない。そこで本実験では、PLATO のフィードバック制御コイル(F1 コイル)に別電源 2 台を直列に接続し、最大 1 kV, 35 A を F1 コイルに通電することで D コイルに与えられる誘導の影響が緩和するかを調査した。D コイル単独での運転と比較して、別電源を併用した場合の方が数 ms 程度コンデンサバンク放電から D コイルへの誘導の影響が緩和された(図 2)。今後は各コイル電源の設定値(放電のタイミング等)のパラメータスキャンを行い、より誘導の影響が緩和されるパラメータ設定を探索する。

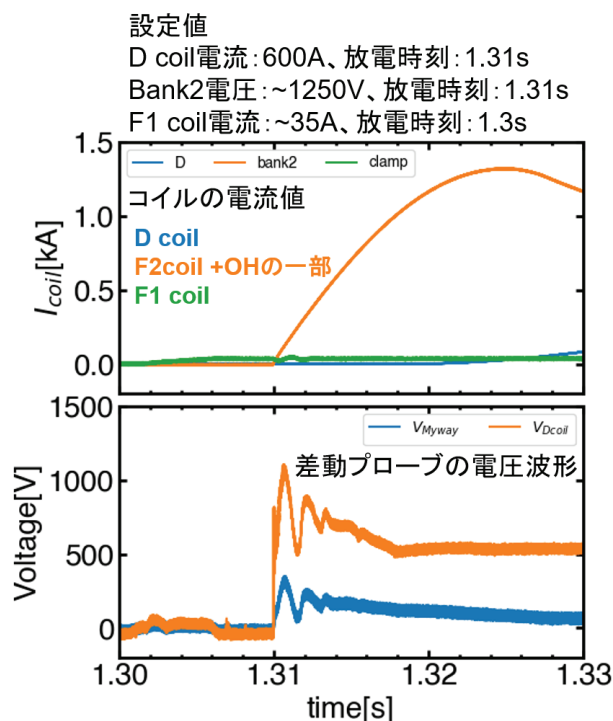


図 2 別電源(Myway 電源)を併用することで D coil に与えられる誘導の影響が若干緩和(数 ms 程度)した

本年度の研究成果

- [1] S. Kato, D. Shiojima and T. Kawaguchi, "Magnetic Field Coil Power Supply Using a Flywheel Generator With a Planetary Gear and a Low-Rated Inverter," in *IEEE Trans. on AS*, vol. 36, no. 3, pp. 1-5, Art no. 5000105, doi: 10.1109/TASC.2025.3628589.
- [2] T. Nishizawa, ..., S. Kato, ..., A. Fujisawa, "Initial plasma achieved within engineering constraints in the PLATO tokamak," *Fusion Engineering and Design*, Volume 219, 2025, 115222, ISSN 0920-3796, <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2025.115222>.

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鉄クロム合金があり、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（Fe-8Cr-2W 合金）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ある。しかし、損傷域が表層に限られるため、損傷域の物性を分離して調べるのが難しい。それに対して我々は高品位なモデル合金薄膜を作製してイオン照射し、磁気計測を行う研究手法を提案している。これまで、膜厚の異なる Fe-20%Cr 薄膜を He⁺照射して磁化曲線の形状を比較し、照射による磁化の困難化（磁気的な硬化）と厚さ依存性を明らかにしてきた。今回、Cr キャップ層を用いた Fe-10%Cr モデル合金の薄膜を新しく設計し、He⁺照射して硬化現象の起源を検討した。

方法：原子層レベルで平坦な MgO(001)単結晶上に、超高真空中で電子ビーム蒸着を実施し、試料①：Fe-10%Cr (膜厚 200nm)、試料②：Cr (膜厚 0, 50, 100, 150, 200, 250nm) / Fe-10%Cr (膜厚 120nm)薄膜を作製した。その後、加速電圧 30keV の He⁺を室温で、照射量はそれぞれ① 0.75×10^{21} He/m²、② 1.5×10^{21} He/m²で照射した。SRIM 計算より、試料①では損傷量は深さ 75 nm で 5 dpa で、深さ 125 nm で残留ヘリウム量がピークをとることを確認した。従って、試料②では、Cr キャップ層の膜厚が 0 から 100nm の試料では、Fe-10Cr 層内の残留ヘリウム量が多く、膜厚が 150 から 250nm では少ない設計となる。これらの試料について、照射前後の構造を EBSD、TEM、XRD で、磁性を VSM で調べた。

結果及び考察：試料①の EBSD 測定より、MgO 上に bcc 構造の合金がエピタキシャル成長したこと、結晶構造と方位は照射で変化しないことを確認した。XRD 測定より、照射後に(002)_{Fe10Cr}のピーク位置が低角側にシフトした。このことは、He⁺照射した薄膜の格子間隔が膜面垂直方向に広がったことを示している。TEM 観察より、照射後の試料で高密度のキャビティを確認した。照射前後の試料全体の磁性を VSM により測定した結果、照射により保磁力が増加し、磁化の困難化が生じた。試料②については、TEM 観察および XRD 測定より、Cr キャップ層の膜厚が 0 から 100nm の試料では Fe-10%Cr 層内のキャビティ量が多く、150 から 250nm の試料ではキャビティ量が少ないことを示唆する結果が得られ、SRIM 計算の予測の妥当性を確認した。さらに磁化測定の結果、前者では磁化の困難化が見られたのに対し、後者では未照射材と同様の磁化曲線が得られた。これらのことは、キャビティ量が多いほど磁化の困難化が生じることを示している。前年度の研究で、Fe-20%Cr 薄膜の場合、キャビティ周辺での Cr の偏析を示唆する結果を得ている。ブランケット材の Cr 組成に近い今回のモデル合金薄膜においても、He⁺照射によりキャビティの形成と Cr 偏析が生じ、それが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, H. Ishida, S. Yoshida, T. Murakami, H. Watanabe, Y. Shiratsuchi, “Effects of cavity formation on the magnetism of iron and iron-chromium alloys”, ICFRM-22, Sep 28 - Oct 3, 2025, Shizuoka, Japan

山崎健太, 鎌田康寛, 村上武, 渡辺英雄, 赤瀬善太郎, 安堂正己, 野澤貴史, “過酷イオン照射した Fe-Cr モデル合金及び F82H 鋼の断面磁区観察”, 日本金属学会 2025 年秋期講演大会(第 177 回) 北大, 2025.9.17-19.

組織：鎌田康寛, 村上武, 石田響揮, 吉田萩, 渡辺英雄: 岩手大, 井戸 毅：九大

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領域では、プラズマ粒子が波に捕捉され波の運動に影響を与えることが理論的に予測されている。この波動-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が進められている[1, 2]。速度分布関数揺らぎの高精度計測のためには、ハードウェア開発に加え、解析手法の改良も必要である。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[3]、ベイズ推定フレームワークを用いた逆問題解析を行った。

2. 研究結果

逆問題解析のベンチマークのため簡易的なパラメトリック推定を実施した先行研究[3]とは異なり、本研究では速度分布関数の多次元・直接推定を実施した。プラズマ小半径-トロイダル速度の2次元空間に分布するプラズマイオン密度を対象とし、それぞれ24点及び31点の格子点を設けての推定を行った。744次元空間でのノンパラメトリック推定には、高次元推定において従来のランダムウォーク型メトロポリス法より効率的に事後確率分布を探索できる、ハミルトニアンモンテカルロ法を適用した。また、先行研究[4]に習い、計算メッシュ上でパラメータ分布が滑らかになるとの事前知識を、ガウス過程により実装した。

解析手法の有用性を検討するため、LHD 実験観測(#192384)に基づいた速度分布関数のテストデータを作成し、実際の観測ジオメトリを用いてベンチマークテストを行った。まず、速度分布関数に非マクスウェル成分を加え、対応する計測結果を計測モデル[3]で計算する。次に、その計測結果を再現する速度分布関数をベイズ推定した。結果を正解データと比較し、与えた非マクスウェル速度分布関数が得られていることを確認した。図1に結果の例を示す。異なる規格化小半径座標($r=0.7, 0.8$)で推定値が正解とよく一致していることが示されている。荷電交換分光計測には視線積分や畳み込みが含まれており、逆問題解析は不良設定問題となる。このような場合でも、モンテカルロサンプリングにより、観測スペクトルを説明する速度分布関数を誤差付きで推定することに成功した。

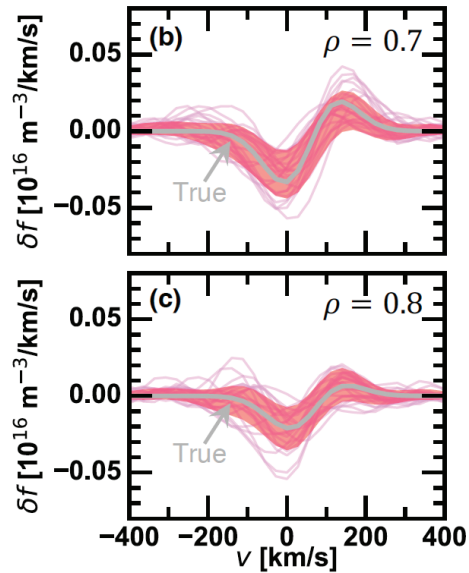


図1. テストデータを用いた速度分布関数非マクスウェル成分のベイズ推定結果。灰色が正解データ、桃色が抜粋したサンプル点、赤領域が平均と標準偏差を示す。

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] K. Ida, et al., Commun. Phys. **5**, 228 (2022)
- [2] T. Kobayashi, et al., PNAS **121**, e2408112121 (2024)
- [3] T. Kobayashi et al., submitted to Rev. Sci. Instrum. (2025)
- [4] T. Nishizawa et al., Phys. Plasmas **28**, 032504 (2021)

2025CR-FP-9

2025CR-FP-9 ヘリコンプラズマ生成の時空間発展と中性粒子枯渇の影響に関する研究

九州大学総合理工学研究院環境流体工学部門

氏名 諫山 翔伍

・研究目的

ヘリコン放電における高効率生成機構の解明を目的とする。特に TG 波による初期加熱と密度上昇がヘリコン波の雪崩的伝搬を誘起するシナリオを検証する。PANTA 条件に適合した三流体モデルを高度化するとともに、多点・ラングミュアプローブにより電子温度・密度の時空間発展を計測し、中性粒子枯渇が駆動する密度振動との比較を行う。

・研究結果

三流体モデルの多次元化に向けて数値計算の高速化を実施した。ヘリコン放電の流体計算では、高密度領域において電荷緩和時間に起因する時間ステップ制約が存在し、電子流体の陰解法計算が計算コストの主要なボトルネックとなっていた。従来は逆行列を直接法で求めていたが、これをクリロフ部分空間法による反復解法 (Jacobian-Free Newton-Krylov (JFNK)) へと置き換えることで、従来比約 300 倍の高速化を達成した (図 1)。現在は低密度領域において陽解法との比較を行い、計算結果の妥当性を検証している。実験では、アンテナ近傍のプラズマ端部に 8~10 MHz の静電振動が観測され (図 2)、9 MHz で励起した TG 波との関連が示唆されており、さらなる検証を進めている。

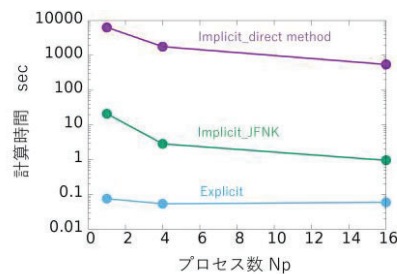


図 1 直接法 (implicit_direct method) とクリロフ部分空間法 (implicit_JFNK method) における並列計算性能の比較

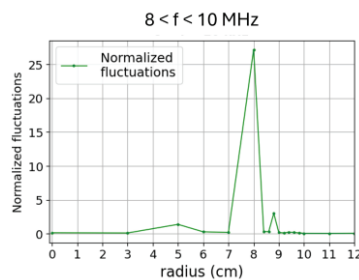


図 2 イオン飽和電流スペクトル強度 ($8 < f < 9$ MHz) の空間分布

・研究組織 (共同研究者)

文 賛鎬 (九大応力研、准教授)、新谷 一郎 (九大応力研、技術職員)、Di Matteo Donato (九大応力研、博士課程 2 年)、緒方 天政 (九大応力研、学部 4 年)、河野 凌 (九大総理工、修士 2 年)、小菅 佑輔 (九大応力研)、成行 泰裕 (富山大学)、稲垣 滋 (京都大学)、佐々木 真 (日本大学)、川面 洋平 (東北大学)、篠原 俊二郎 (東京農工大学)、羽田 亨 (九州大学)、加藤 雄人 (東北大学)

MAX 相セラミックスおよび ODS-Cu/W 接合体の力学特性に及ぼす照射の影響

北海道大学 大学院工学研究院 池田 賢一

【目的】

$M_{n+1}AX_n$ ($n=1\sim3$) の一般式で示される三元化合物の総称である MAX 相セラミックスは、六方晶系の結晶構造を有し、 $M_{n+1}X_n$ 層と A 層が c 軸方向に積層する層状構造を有するため、強い異方性を示すことが知られている。また、セラミックスの性質と金属的性質を兼ね備えた特異な物質としても注目されている。数種類の MAX 相セラミックスには、耐照射損傷性に優れた特性を有しているとの報告があり、核融合炉材料への適用が期待されているが、結晶方位依存性など基礎的なデータが不足していることが課題である。また、酸化物分散強化銅合金(ODS-Cu)は、高温強度に優れ、中性子照射下における劣化が少ないことに加え、高い熱伝導性を有していることから、タングステン(W)との接合体としてのダイバータ材への利用が期待されている。今年度は、MAX 相セラミックスの Ti_2AlC 配向焼結体の作製および、そのビッカース硬さの結晶方位依存性評価に加え、昨年度実施した ODS-Cu/W 接合体への重イオン照射領域におけるナノインデンテーション試験による力学特性評価を実施した。

【実験方法】

本研究では、市販の Ti_2AlC (以降、TAC と表記) 粉末 (KANTHAL 社製 MAXTHAL(211)) を用いた。TAC 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、12T の磁場を鋳込み方向から平行に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、磁場印可方向と平行方向に TAC 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 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 $0.3\sim10dpa$ になるように照射した。照射後試料について、その力学特性をナノインデンテーション試験の Partial Unload 法により評価した。

【結果および今後の展望】

TAC 配向焼結体の XRD による配向度を評価した結果、鋳込み方向に底面が配向していることが確認できた。ビッカース硬さの配向方位依存性を評価した結果、 c 軸方向からの硬さが最も高く方位によって硬さが異なることが明らかになった。その傾向は、昨年度実施した Ti_3SiC_2 の傾向と類似していた。これらの配向焼結体について今後、重イオン照射実験を実施することを検討している。

ODS-Cu / W 接合体の重イオン照射領域の深さ方向におけるナノ硬さを Partial Unload 法により評価し、Nix-Gao プロットによるバルク相当硬さを解析した。その結果、 $1dpa$ より大きな照射量では、ほぼ同じ硬さを示すことがわかり、硬化量が飽和することが明らかになった。この結果は、ナノインデンテーション試験を実施することで、バルク相当硬さを簡便に評価することができることを示しており、新規開発合金の評価に有効であることが確認できた。なお、今後は純銅による評価との比較を行うとともに、使用環境と考えられる $300\sim500^\circ C$ での照射実験を行い、その力学特性を評価することを検討している。

【研究組織】

所内世話人: 井戸 毅

研究協力者: 渡邊 英雄 (大阪公立大学)、嶋田 雄介 (九州大学・准教授)、羽立 周磨 (北海道大学・院生)

原子力材料の力学特性に及ぼす照射の影響

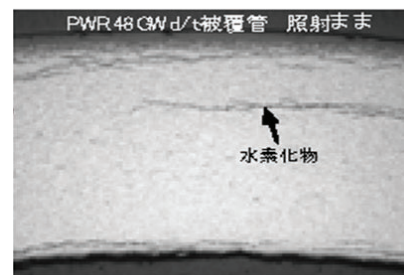
Effect of Irradiation on Mechanical Properties of Nuclear Materials

福井大学 渡邊 英雄

1. 緒言

国内外の材料試験炉を用いた中性子照射は困難な状況にある。九州大学応用力学研究所では、軽水炉実機環境を模擬したイオン照射施設の改良を行い、各種の材料照射が可能である。下の写真は、PWR 照射環境下で、48GWd/tの領域まで使用した燃料被覆管の断面写真である。被覆管割れの原因となる水素化物は表面にほぼ平行に分布しているが、照射量が増加するにつれて水素化物の形態が変化し、割れることが懸念されているが、この現象の解明には、水素注入と照射効果を同時に明らかにする必要がある。

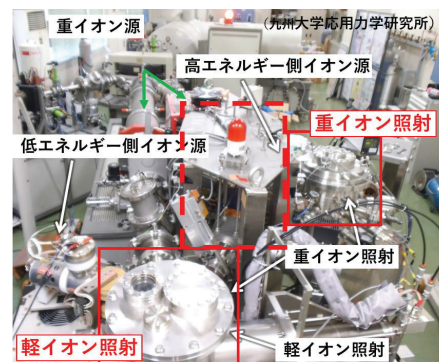
応用力学研究所では、これまでのプラズマ壁相互作用を想定した2重照射場に新たに $\sim 40\text{KV}$ のイオン源を設置した結果、燃料被覆管照射を模擬したイオン照射が可能となった。本研究では、ジルカロイ2に重イオン・水素イオンを照射し、水環境を模擬した照射方法の検討を開始したのでその成果について述べる。



2. 実験方法

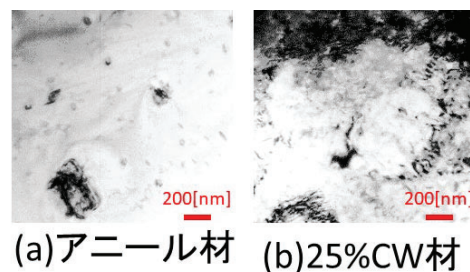
本研究では $\text{Zry2}(\text{Zr}-1.5\text{Sn}-0.15\text{Fe}-0.1\text{Cr}-0.06\text{Ni})$ を使用し、いずれも実験時の試料表面が c 面になるように作製した。STEM-EDS マッピング用試料は、Zry2 の板材を厚さ 0.15mm まで研磨後、直径 3mm に打ち抜いて作製した。TDS 用試料及び TEM 観察用試料は、Zry2 の板材をそれぞれ厚さ約 0.5mm、0.15mm に圧延後、 $5 \times 10\text{mm}$ に切断、直径 3mm に打ち抜きを行い作製した後、化学研磨(フッ硝酸)及び熱処理(630°C , 2 時間, 真空焼鈍)を施した。

重イオン照射には九大応力研所内設置の HVEE 社製タンデム型加速器を使用し、 3.2 MeV の Ni^{3+} イオン、照射強度 $1.0 \times 10^{-4}\text{ dpa/s}$ とした。軽イオン照射には同所内設置の軽イオン入射装置を使用し、 $5.0 \sim 40.0\text{ keV}$ の D_2^+ イオン、照射フルエンス $1 \sim 10 \times 10^{21}\text{ ions/m}^2$ 、照射温度は室温とした。



3. 実験結果

図1に熱処理材(a)及び冷間加工材(b)の内部組織を電子顕微鏡にて観察した結果を示す。冷間加工により、高密度の転位網が形成されていることが分かる。本研究では、冷間加工により転位を導入し、これによる水素のトラッピング効果について考察した。図2(a)に10%冷間加工(CW)材に D_2^+ を 5keV , RT, $3 \times 10^{21}\text{ ions/m}^2$ 照射した後、さらに(b)に D_2^+ を 5keV , 300°C で $3 \times 10^{21}\text{ ions/m}^2$ 照射した後及び(c)に D_2^+ を 40keV , RT で $3 \times 10^{21}\text{ ions/m}^2$ 照射した後の TDS の結果を示す。



これまでに、大気中から吸収した水素の放出温度は 300～600℃付近であるが、 D_2^+ 照射により 400℃～700℃で HD(Mass 3), 700～900℃付近で D_2 (Mass 4)の脱離があることを報告している。今回、CW によって転位を導入したことにより、200～500℃付近と 600～1000℃付近の2つに重水素ガスの脱離を確認した。また、 Ni^{3+} イオン照射により照射欠陥を導入した試料では、 D_2^+ のみの照射では確認できなかった更に低い温度での脱離ピークを確認した。

以上のことより、200～500℃での低温で起きる脱離は照射及び冷間加工により導入された転位にトラップされたものであること、また、700℃付近の放出ピークは、材料深部に侵入し形成された水素化物の放出ピークであることが、組織観察から確認されており、本研究より、入射イオンの加速電圧の制御及び転位の導入により、材料中での水素の挙動を評価できることが分かった。

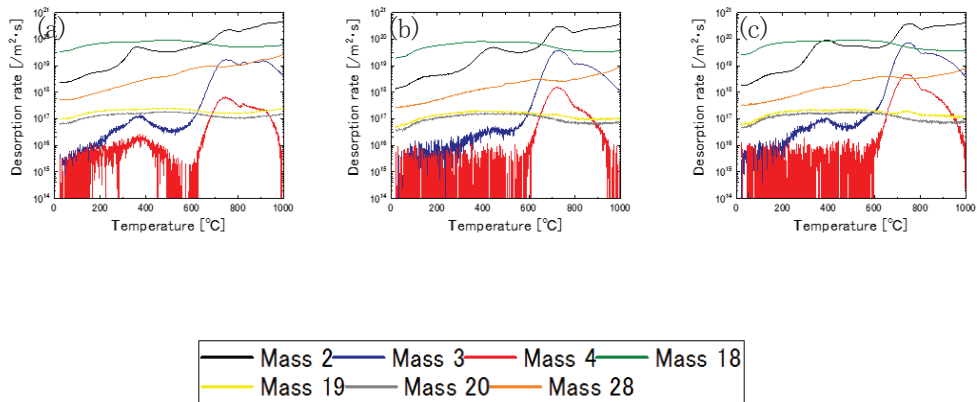


図2. 各条件での TDS の結果

研究成果報告

1. 保全学会年会 2025 年 7 月(島根大学) 渡邊英雄 他
 2. 日本原子力学会秋期大会 2025 年 9 月(北九州) 渡邊英雄 他
 3. 日本原子力学会春期大会 2026 年 3 月予定(熊本大学) 渡邊英雄 他
- その他
1. 川内原発 2 号機 40 年超運転に関する新聞報道 西日本新聞社 朝刊(2025 年 11 月 29 日)

以上

研究目的

磁場閉じ込め核融合炉を実現するためには、炉心プラズマの高性能化のみならず、周辺プラズマの挙動理解、それに基づく制御手法の確立が必要不可欠である。一方、我々は、境界領域において観測されている磁力線に沿ったフィラメント状構造（プラズマブロブ、ホールと呼ばれ、非拡散的な径方向プラズマ輸送を担っていると考えられている）について、3次元静電粒子コードを用いた研究を進めるなど、境界領域プラズマにおける微視的過程に着目したシミュレーション研究を行ってきた。本課題では、最近の実験でも示されている非接触過程と径方向輸送の連関などに焦点を当て、運動論的ダイナミクス、原子分子過程、大域的構造形成など、境界領域輸送現象における多階層にわたる物理過程について、それぞれ対応した手法を検討、開発し、その統合により、境界領域輸送ダイナミクスの理解をめざす。具体的には、非接触過程と径方向輸送間の大域的ダイナミクスの研究を進めるとともに、3次元静電粒子コードを用いた超大規模計算により、フィラメント形成の物理過程や様々な物理条件とフィラメント輸送の相関を調べ、より普遍的な運動論的効果の理解等をめざす。

研究方法

本研究では、境界領域を模擬する3次元静電粒子シミュレーションコード（**Upgraded Particle-in-Cell 3-dimensional Simulation Code for Boundary Layer Plasma Dynamics**（up3bdコード））の開発を進め、これを主に用いて、境界領域のプラズマダイナミクスについて調べる。本シミュレーションでは、 z 軸に平行な外部磁場を与え、 x 方向に磁場勾配 ∇B を設定する。また、 $x=0$ の境界面（第一壁に相当）、 $z=0$ 、及び、 L_z の境界面（ダイバータ板に相当）を粒子吸収境界としている。粒子の初期分布としては、 z 軸に平行な円柱状の高密度領域（ブロブ）や低密度領域（ホール）を与えるもの、 x 方向に密度勾配を持つものなどを設定することができる。本コードは、1次元、または、2次元方向に領域分割が可能な分散並列化されたコードであり、ゆえに、大規模な系の計算が可能である。

研究結果・考察

本年度は、2025年7月に稼働開始した核融合科学研究所の新プラズマシミュレータ（PS）へのup3bdコードの移植を実施した。新PSサブシステムA（CPUはIntel Xeon 6980P）への移植では、コード最適化をしない段階で、前システム（SX-Aurora TSUBASA）に比して、実行効率がおおよそ1.9倍となった。また、小規模な計算ではあるが、図1に示したようにスケーリングの測定もおこなった。プロセス数が128から512に大きくなると、やや性能が下がるように見受けられるが、これは、128プロセスまでは1ノード内で計算が収まっているためであると考えられる。今後は、ボトルネック箇所の特定、大規模計算でのスケーリング計測、さらに、サブシステムBへの移植（GPGPU化）や素過程導入などを推進する予定である。

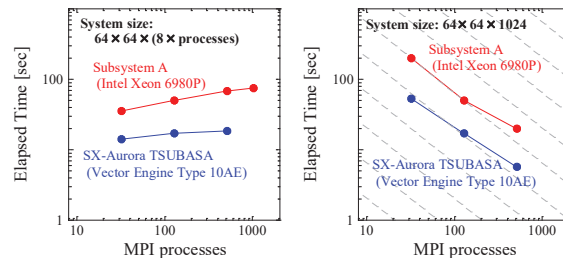


図 1: 弱スケーリング（左）と強スケーリング（右）。青が前システム、赤が新システムの結果。計算はフラット MPI 並列で実行した。

研究成果報告

- ・ H. Hasegawa and S. Ishiguro, J. Adv. Simulat. Sci. Eng. **12**(1), 275-284 (2025).
- ・ H. Hasegawa, Proc. of 44th International Conference on Simulation Technology, 351-354 (2025).

研究組織

研究代表者：長谷川裕記（核融合研）、 研究協力者：糟谷直宏（九州大学）

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

H₂O/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 に 10¹⁴ ions/cm² イオンビーム照射によって酸素官能基をドーピングしたグラフェンの X 線吸収端近傍構造 (XANES) スペクトルを示す。C K 端の XANES スペクトルでは、 $\pi^*(C=C)$ のピーク強度が著しく減少し、 $\pi^*(C-OH)$ や $\sigma^*(C=O)$ 由来の顕著な構造が観察された。O K 端の XANES スペクトルでは、 $\sigma^*(O-C)$ や $\pi^*(O=C)$ 由来の構造の強度が X 線の入射角により変調することが分かった[3]。XPS やラマン分光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 sp^2 C=C から sp^3 C-C へと変化し特定の酸素官能基がドーピングされたことが分かった (図 1(c))。

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酸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). [3] S. Entani, *et al.*, Beilstein J. Nanotech. **16**, 1082 (2025).

成果報告

- 1) 圓谷志郎, 滝沢優, 好田誠, 「高エネルギーイオン照射法による窒化炭化ホウ素の作製」, 第 86 回応用物理学会秋季学術講演会, 2025 年 9 月。
- 2) Shiro Entani, Mitsunori Honda, Masaki Mizuguchi, Hideo Watanabe, Takeshi Ohshima, Makoto Kohda, “Formation of Cl-C Chemical Bonds by High-Energy Heavy Ion Irradiation of KCl/Graphene Heterostructure”, ACS Omega, **10**, 21537 (2025).

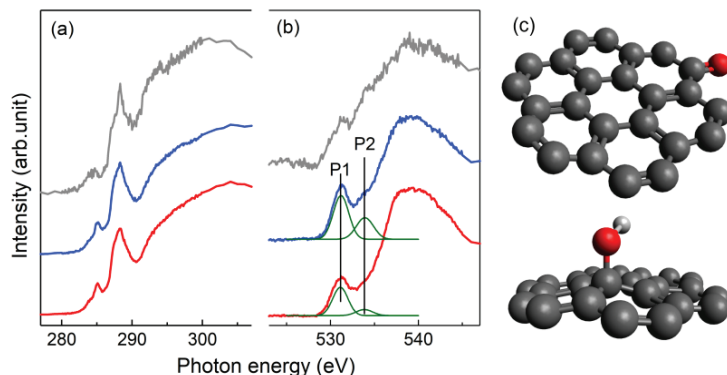


図 1 (a) C K 端および (b) O K 端の XANES スペクトル。イオン照射により酸素官能基をドーピングしたグラフェン試料について、X 線の入射角度を垂直入射 (0°, 赤線) および斜入射 (60°, 青線) として取得したスペクトルを示す。比較対象として、酸化グラフェン薄膜の参照スペクトル (灰色) を併記する。(c) XANES および Raman, XPS 解析結果に基づいて推定される酸素官能基の導入構造を模式的に示した原子構造モデル。

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性質を持つ磁化プラズマ乱流の競合状態の観測を目的としている。磁化プラズマ中では異なる種類の揺動が同時に存在する可能性が数値シミュレーション研究から明らかにされている。そのためプラズマの大域的な輸送特性を解明するためには、揺動の種類を同定することと揺動の時間発展をプラズマ断面全体にわたって同時計測することが必要となる。そのために本研究ではトモグラフィ 2 系統を用いた乱流 3 次元計測と温度・密度・流速分布計測の同時計測を計画している。本年度の研究では過去のトモグラフィデータを用いた解析と、トモグラフィ 2 系統同時計測を目指した視線配置の改善および空間分解能の評価を行った。

本研究で対象とする磁化プラズマ中の乱流競合状態の例として、直線磁化プラズマ装置 PANTA で観測された周方向モード数 $m=1$ 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。この現象では $m=1$ 揺動の振幅が突発的に増加し、それに伴って $m=4$ 構造のサイドバンドモードの振幅が増加することが明らかになった。非線形結合の時間的な変化を明らかにするために $m=1$ 揺動の振幅が伝播に合わせた条件付き平均法を用いたところ、 $m=1$ 揺動の振幅伝播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、Scientific Reports に採録が決定した(K. Yamasaki et al., Scientific Reports **15**, 19751 (2025))。

また、トモグラフィを用いた乱流空間構造観測を行う上で、正確な再構成を行うこととトモグラフィで観測できる空間構造の分解能を定量的に評価しておくことが必要である。正確な再構成を行うためには計測視線配置誤差や相対感度の影響を取り込んだ投影行列が必要となる。そこで本研究では細い冷陰極管とアクチュエータを用いて投影行列を実測し、配置誤差や相対感度の影響を直接計測により投影行列に取り込む手法を考案した。また、得られた投影行列の写像の性質を用いることで、トモグラフィで観測できる空間構造の制限を定量的に評価する方法を考案した(K. Yamasaki, et al., Measurement Science and Technology **37**, 015403 (2026))。

上記の手法を用いて、本研究で導入する新たなトモグラフィ計測視線の投影行列を取得し、空間分解能の評価も行った。新たに導入するトモグラフィ計測視線は既存のトモグラフィ視線と平行にならないあらたな計測視線アレイを 3 組導入した。既存のトモグラフィでは周方向モード数 $m=4$ の空間構造を正確に再構成できないことが実験結果から明らかになっていた。本年度行った投影行列実測データを解析したところ、既存のトモグラフィでは $m=4$ 構造が特定の位相にある状態しか再構成できないことが明らかになった。また、新たに計測視線アレイを 3 組導入することで $m=4$ 構造が任意の位相角においてある程度正確に再構成可能になることが投影行列の解析と実際に取得した実測データから明らかになった。本研究で遂行した新たなトモグラフィ計測視線の性能評価は、本研究実施責任者の指導学生の卒業研究としてまとめられており、現在投稿論文の準備を進めている。

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

本研究は、現代美術における放電現象を用いた造形表現の実践を基盤とし、応用力学研究所核融合力学分野の研究者との共同研究を通して、プラズマに関する専門的知見と芸術表現を接続する実験的造形手法の確立を目的とするものである。研究代表者は、九州大学令和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として、アートとテクノロジーを横断する研究を継続してきた。

2024-2025年度の共同利用研究では、誘電体バリア放電式大気圧プラズマを中心に、観察および造形のための装置開発と、学内外の研究者・技術者との共同研究体制の整備を進めてきた。これにより、透明電極を用いた観察系の構築や、展示を想定した装置構成の検討など、作品化に向けた基礎的条件を蓄積することができた。

一方で、誘電体バリア放電によって得られた知見を、より再現性の高い条件知として整理し、不安定性（時間的明滅、空間パターンの変化、遷移など）を意図的に芸術表現へ導入するため、2025年度の途中から放電管制作環境を整備し、研究対象を低压封入ガス放電管へ段階的に拡張し、これまでの成果を作品化可能な条件知へと接続するための基盤整備を目的に据え、研究を進めた。

・実験方法

2025年度前半は、2024年度に引き続き、誘電体バリア放電を対象とした実験を実施した。透明電極材料としてFTO透明導電性ガラスを用い、表面抵抗値や配置条件の異なるガラスを組み合わせることで、放電の分布や点状発光の明滅挙動がどのように視覚的差異として現れるかを比較観察した。あわせて、展示空間での提示を想定し、電源制御装置の検討および配線構成の整理を行い、作品模型を制作することで、光の現象を造形として成立させるための構成条件を検討した。

これと並行して、年度途中より研究の拡張として、複数の低压真空管を平行に配置し、高周波電源で励起する実験を行った。その結果、発光が一定状態に固定されず、不規則な明滅や発光パターンの変化を伴いながら推移する挙動が観察され、人工的な装置でありながら自然現象に近い印象を与える視覚効果が得られた。

本年度後半は、こうした不安定で変化し続ける光を、偶発的な現象としてではなく、芸術表現として扱える要素へと転換するため、低压封入ガス放電管の制作環境整備に着手した。関東のネオン管加工業者より機材一式を譲り受け、ガラス管加工、電極処理、真空排気および混合ガス封入工程を行える基盤を構築した。今後は、不安定発光（時間的明滅、空間パターン形成・移動、放電モード遷移）を造形要素として整

理するため、封入条件（ガス種、ガスの混合比率、ガラス管形状）および電気条件（電圧、電流、周波数）を定量的に記録・参照できる枠組みを整備する予定である。

さらに、デンマークのエーベルトフトガラス美術館の協力を得て、ガラス加工技術と放電現象を組み合わせた試作・検討を行い、素材の厚みや形状、表面処理の違いが発光の見え方や印象に与える影響についても検討を加えた。

・実験結果

誘電体バリア放電を用いた実験において、FTO 透明導電性ガラスの表面抵抗値および配置条件の違いによって、放電の分布や点状発光の明滅様相に明確な視覚的差異が生じることが確認された。発光は均一な光として現れるのではなく、点在する微小な発光が不規則に出現・消失を繰り返す形で観察され、その分布密度や明滅のリズムは電極構成に応じて変化した。

複数枚の FTO 透明導電性ガラスを組み合わせた構成では、導電性や印加電圧の条件によっては誘電体バリア放電が安定して発現せず、発光が観測されない場合も確認された。この結果から、積層構成においては材料特性と電源条件の組合せが発光挙動に大きく影響することが明らかとなった。

一方、展示空間での提示を想定した作品模型では、プラズマアクチュエータの原理（Surface DBD）を応用した構成を採用し、長い一本の線状に連続する誘電体バリア放電を発生させることができた。この構成では、比較的、視認性が高く安定した発光が得られ、展示用装置として有効な発光様相が確認された（図 01）。

また、低圧真空管を用いた高周波励起の実験では、発光が一定状態に固定されず、時間の経過とともに明滅の周期や空間パターンが変化する挙動が観察された。複数の放電管を平行に配置した構成では、各管の発光が同期する場合と、わずかに位相のずれた状態で推移する場合が見られ、全体として予測困難でありながら、視覚的には秩序を感じさせる発光の動きが立ち現れた（図 02）。

これらの観察結果から、放電条件のわずかな違いによって生じる不安定性が、視覚的な単調さを回避し、鑑賞者の注意を持続的に引きつける光の挙動として機能することが確認された。特に、時間的に固定されない発光の変化は、装置が自律的に振る舞っているかのような印象を与え、芸術表現における重要な視覚的特性となり得ることが示唆された。

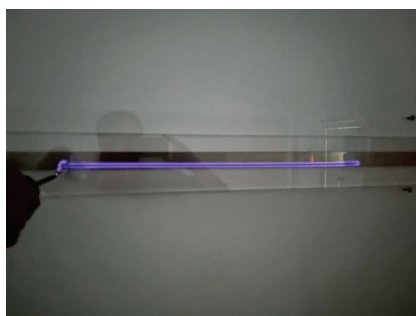


図 01

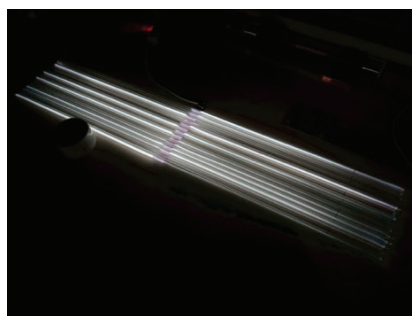


図 02

・考察

本研究で得られた結果から、誘電体バリア放電および低圧放電における発光現象は、単なる安定した光源としてではなく、条件のわずかな違いに応じて変化し続ける不安定で予測不可能な現象として捉えることが有効であることが示された。特に、点状発光の明滅や空間パターンの変化、不規則な同期・非同期の切り替わりといった挙動は、視覚的な単調さを回避し、鑑賞者に時間的な体験を伴う光の知覚をもたらす要素として機能する。

誘電体バリア放電に関しては、電極構成や材料特性、電源条件の違いが発光様相に直接的に反映されることが確認された。これにより、発光を完全に均質化・固定化するのではなく、一定範囲の不安定性やゆらぎを内包させることで、人工的な装置でありながら自然現象に近い印象を生み出せる可能性が示唆された。一方で、Surface DBD を応用した構成では、視認性と安定性を確保しつつも不規則な線状発光が得られ、展示環境において光の存在感を明確に提示できることが確認された。これらの結果は、安定性と不安定性を用途に応じて使い分ける設計指針の有効性を示している。

また、低圧真空管を用いた高周波励起実験で観察された不安定発光は、発光が時間的に固定されず、条件や経過時間に応じて変化し続ける点に特徴がある。このような挙動は、従来の照明的な光とは異なり、装置自体が自律的に振る舞っているかのような印象を与える。芸術表現の文脈においては、作者がすべてを制御するのではなく、現象の振る舞いを一定程度委ねることで成立する表現の可能性を示している。

以上の考察から、本研究で扱った放電現象は、安定性と不安定性、制御と偶発性の間に位置する領域において、芸術的に有効な造形資源となり得ることが明らかとなった。2025 年度後半に着手した低圧封入ガス放電管の制作環境整備は、こうした不安定発光を偶然の産物としてではなく、再現可能な条件知として整理するための基盤であり、次年度以降における条件体系化研究および作品制作へと接続される重要な段階に位置づけられる。

・研究成果報告

1. 栗山 斉（作品展示発表）, Breathing, Re-aksi, Soemardja Gallery, バンドン[インドネシア], 2025 年 9 月
2. 栗山斉（作品展示発表）, Pawon Project, Sendratani 2025, Petong Art House Nongkojajar, パスルアン[インドネシア], 2025 年 11 月
3. 栗山斉（新聞掲載）, 公益財団法人隈科学技術・文化振興会 選考委員紹介, 西日本新聞（朝刊）, 2025 年 3 月 30 日
4. 栗山斉・坂口照好・坂口恵子（講演およびワークショップ企画・運営・登壇）, 光をつくる／光で考えるーネオン管加工の技術と美学ー, 九州大学大橋キャンパス, 2025 年 12 月

・研究組織

栗山 齊（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（九州大学応用力学研究所・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（九州大学応用力学研究所・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）

藤埴 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）

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 小林達哉

1. 研究目的

プラズマ中の輸送は、乱流によって引き起こされていると考えられる異常輸送が支配的である。即ち、異常輸送の原因として、ドリフト不安定性に代表されるミクロスケールの乱流が考えられている。このため、閉じ込め性能と乱流揺動の関係を物理的に明らかにすることが、トーラスプラズマの閉じ込め性能の改善のために望まれている。この目的を達成するため、多数の乱流計測器が考案され、導入・運転されている。乱流輸送と流れ場の関係を理解する上で重要なデータを提供するものとして、重イオンビームプローブ(HIBP)が活用されている。本研究では、過去にHIBPを用いて取得された乱流データを解析し、流れ場と乱流の相互作用に関する理論モデルを検証した。

2. 研究結果

本研究では、JFT-2M トカマクの H モード放電で観測された、乱流と電場($E \times B$ フロー速度)のデータを解析した[1]。図1の上図は、乱流周波数スペクトル、下図は $E \times B$ フロー速度の半径方向分布をそれぞれ表す。左は L モード、右は H モードの場合に対応する。近年簡約流体モデルで開発された理論モデル[2]において、断熱係数が 1 を上回る場合、乱流は $E \times B$ シアが強い部分で抑制され、 $E \times B$ フローが負の曲率をもつ部分に捕捉されることが示されている。今回の実験に

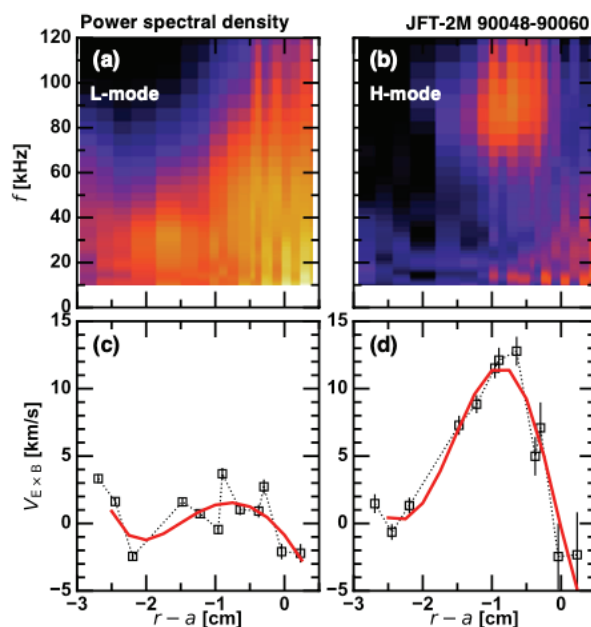


図1. (a,b) 乱流スペクトルおよび(c,d) $E \times B$ フローの半径方向分布。左が L モード、右が H モードの場合。 $E \times B$ フローの正符号は電子反磁性ドリフト方向に対応。

おける断熱係数は 40 程度で、電子が比較的自由に磁力線方向に移動し、ポテンシャル揺動と電子密度揺動が同期する領域に対応する。このような場合、抵抗性ドリフト波が不安定かすることが実験的に示されている。ExB フローが成長する H モードにおける乱流スペクトル分布[図 1(b)]を見ると、乱流は理論予測通りシア部分で抑制、負曲率部分で残留していることが示されている。実験条件に対応するパラメータ領域で、簡約流体モデルをもとに開発された固有値モデルにより乱流シミュレーションを行った結果、実験を再現する乱流ダイナミクスが観測された。すなわち、理論モデルの妥当性が確認された[3]。

研究組織

井戸毅（九大応力研）、藤澤彰英（九大応力研）

参考文献

- [1] T Ido, et al Nucl. Fusion 46 512 (2006)
- [2] M Sasaki, et al., Nucl. Fusion 66 026050 (2026)
- [3] T Kobayashi, submitted to Plasma Phys. Control. Fusion (2026)

トカマクプラズマにおける MHD 不安定性間の相互作用のシミュレーション研究

核融合科学研究所 研究部 佐藤雅彦

核融合プラズマにおいて高ベータ状態を安定に維持するためには、MHD (磁気流体力学) 不安定性の理解と制御が不可欠である。実際のトカマクプラズマでは、内部キンクモードやバルーニングモードなど複数の不安定性が同時に励起される場合があり、それらの非線形相互作用が MHD 不安定性の非線形発展に重要な役割を果たす可能性がある。本研究は、複数の MHD 不安定性が共存する条件下において、それらの相互作用が各モードの非線形発展に与える影響を数値シミュレーションにより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 を対象とした三次元非線形 MHD シミュレーションを実施した。統合輸送コード TASK/EQU モジュール[1]を用いて構築した、内部キンクモードおよびバルーニングモードがともに線形不安定となる MHD 平衡を初期条件として用いた。非線形計算には MHD コード MIPS[2]を適用し、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=クッタ法を用いた。

$n=1$ のキンクモードおよび $n \sim 12$ のバルーニングモードが不安定となる条件の下で、磁気レイノルズ数 $S=10^5$ および $S=10^6$ に対して数値計算を行った。図 1 に各トロイダルモードの運動エネルギーの時間発展を示す。初期段階では、 $(m, n) = (1, 1)$ の内部キンクモードの線形成長が確認される。しかし、 $n \sim 12$ のバルーニングモードの線形成長率は内部キンクモードよりも大きいため、バルーニングモード間の非線形モード結合により生成される $n=1$ 成分が、内部キンクモード固有の成分を上回るようになる。その結果、 $n=1$ 成分は内部キンクモード単独の場合よりも早く増大する。その後、バルーニングモードが非線形飽和に達すると、それらの非線形モード間結合によって駆動されていた $n=1$ 成分の増大は停止し、内部キンクモード固有の成長が支配的となる。この段階における内部キンクモードの成長率は、初期の線形成長率よりも低下している。この成長率の低下は、バルーニングモード飽和後も高次モードが残存し、 $n=1$ 成分から高次モードへのエネルギー輸送が生じているためであると考えられる。さらに、ローパスフィルターを適用して $n > 6$ の成分を除去し、バルーニングモードの影響を人為的に抑制した場合との比較も行った (図 2)。その結果、 $n=1$ モードの最終的な飽和振幅は、バルーニングモードの有無にほとんど依存せず、ローパスフィルターの有無にかかわらずほぼ同一であることが分かった。今後は、バルーニングモード飽和後における内部キンクモード ($n=1$) の成長過程に着目し、モード間のエネルギー輸送機構について、より詳細な解析を行う予定である。

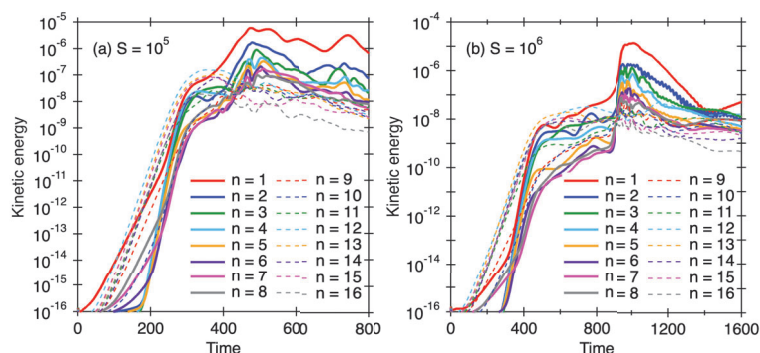


図 1. トロイダルモードごとの運動エネルギーの時間発展。磁気レイノルズ数 S は (a) $S=10^5$ 、(b) $S=10^6$ 。

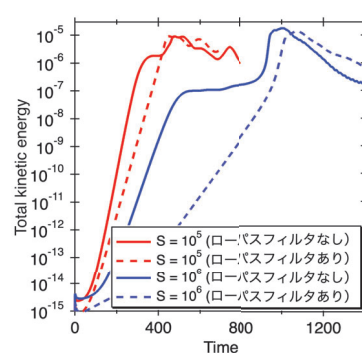


図 2. 全運動エネルギーの時間発展に対するローパスフィルターの影響。

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

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

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

核融合科学研究所 森崎友宏

1. 研究の目的

球状トカマク装置 QUEST は、運転開始時より全金属壁環境下で実験を遂行し、粒子循環プロセスの理解とその制御法の開発という定常プラズマ維持研究の進展に貢献してきた。2015 年には壁温 473K で6時間放電に成功している。QUEST の真空容器壁はタングステン部とステンレス部で構成されている。タングステン部の大半は、APS タングステンと呼ばれる溶射材で、表面に多数の細孔存在するため多量のガスを吸着し、粒子循環に大きな影響を与えることが指摘されているため、バルク材の導入が進行しつつある。

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

2. センタースタック用試験片の製作

昨年度は、1mm×50mm×50mm のタングステンと 5mm×50mm×50mm のステンレスの SPS 接合を試みた。応力緩和のための3層構造インサートインサート(中間層)の導入により接合は成功したものの、僅かな反りが発生した。このため本年度は、これまでに QUEST で別方法での製作(接合)実績のある厚さ 0.1mm のタングステンを用いてセンタースタック用の接合材を製作することにした。

実機の製作を行う前に、直径 10mm の試験片(図1)の接合を行ってガス吸蔵特性を調べた。中間層には Ni を使用し、タングstenは製造元の異なる4種を用いた。

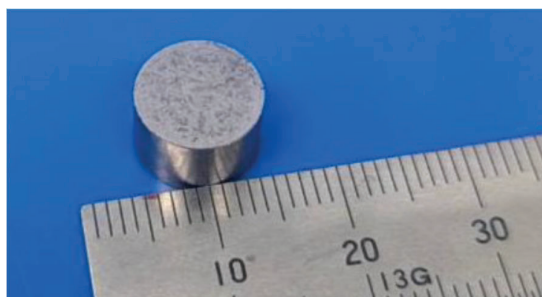


図1 直径 10mm、厚さ 1mm のタングステンと 6mm ステンレスの接合試験片

3. 結果

上述の試験片に、九大応力研の加速器を用いて重水素イオンビーム照射を行い、昇温脱離ガス分析 (TDS) を行った結果を図2に示す。照射イオンのエネルギー、流量量は 3keV、 $1 \times 10^{21}/\text{m}^2$ であった。図中の各色はそれぞれ異なる製造元のタングステンに対応し、○マークは参照用に計測した純タングステンのデータである。今回 SPS 接合を行った4種類のタングステン全てにおいて、純タングステンと同程度のガス吸蔵特性であることが示され、接合性能に問題の無いことが明らかになった。

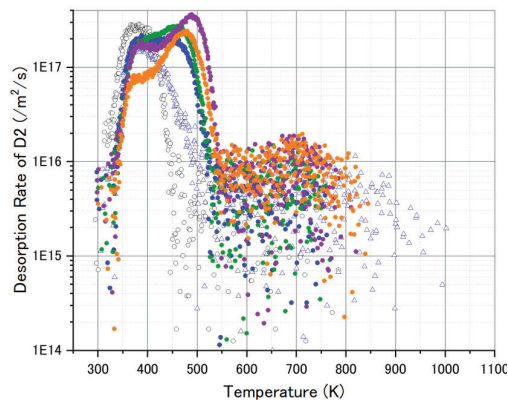


図2 タングステン-ステンレス接合試験片の D イオン照射後の TDS の結果

4. 研究組織

核融合研： 森崎友宏、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

機械学習によるレンズレスマイクロ波イメージング画像再構成手法の研究

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ミクロスケールの擾乱からマクロスケールの乱流成長まで高分解能で計測を行う必要がある。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

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 (Ar プラズマプラズマ、He プラズマプラズマ) 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。畳み込み層のフィルタサイズと層数を変更しながら学習を行い、RMSE(平均平方二乗誤差)と MAE(平均絶対誤差)の 2 つのエラー値を用いてその精度を比較した。

3. 実験結果および考察

全てのケースで RMSE, MAE 共に He プラズマよりも Ar プラズマの方が小さい結果となった。同じ受容野である 5×5 の 1 層と 3×3 の 2 層、 7×7 の 1 層と 3×3 の 3 層でのエラー値を比較すると、Ar プラズマでは小さいフィルタを複数層重ねる方がエラー値は低くなったが、He プラズマでは殆ど差は見られなかった。また Ar プラズマでは 3×3 の 4 層が、He プラズマでは 3×3 の 3 層が最もエラー値が低くなった。

図 1 に示されるように、He プラズマでは Ar プラズマに比べて高精度の画像再構成が出来ない。この原因を考察する為、教師データであるプラズマ密度分布画像を解析した。

その結果、Ar プラズマではピクセル毎の画素値がガウシアン分布に従っているのに対し、He プラズマでは画素値が小さい範囲に偏っていることがわかった。このため、He プラズマの再構成画像は全体的に教師画像よりも暗くなっていると考えられる。また Ar プラズマはピクセルごとの画素値の分散が小さいのに対し、He プラズマは分散が大きいことが明らかとなった。そのため He プラズマのデータは Ar プラズマのデータに対して構造の多様性があり、学習が難しいと考えられる。今後は、He プラズマのプラズマの明るいデータに対して重みづけを行うことでデータの偏りを解消する、Encoder-decoder 型などの異なるモデルを用いて学習を行うなどして更なる精度向上を目指したいと考えている。

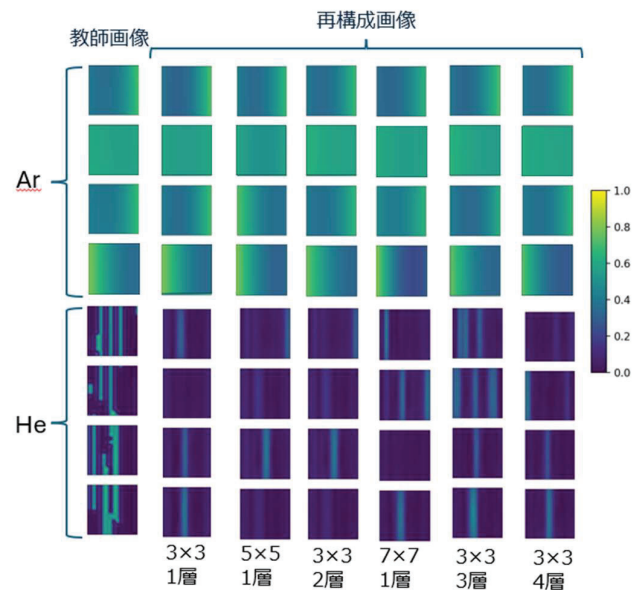


図 1 Ar プラズマと He プラズマの再構成画像

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 において長時間放電が実施されている。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り、特にプラズマ対向壁における水素の吸蔵・放出現象が重要だと考えられている。本研究では、実機におけるプラズマ対向壁の現象を理解するため、(1)QUEST の対向壁に金属試料を設置し、(2)プラズマ曝露後試料について吸蔵された水素の昇温脱離特性を調べた。

QUEST への試料設置とプラズマ曝露

本年度に行われた実験期間のうち、春夏期（2025 年 7 月 3 日～9 月 16 日, Shot No.54449～55493）と秋冬期（2025 年 11 月 18 日～12 月 2 日, Shot No.53846～56026）の 2 回、QUEST の対向壁に金属試料を設置した。金属試料として、タングステン(W)・ステンレス(SUS316L)・モリブデン(Mo)を用いた。それらを、試料ホルダーに取り付けた後、QUEST 対向壁の上部壁と下部壁に設置した(図 1)。試料は、実験期間中に軽水素(H_2)プラズマに曝露され、終了後(大気開放後)に速やかに取り外した。現在、試料の表面分析を実施している。

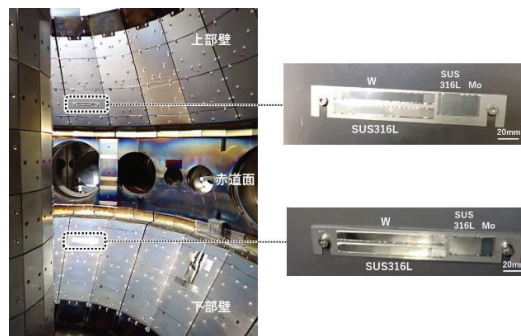


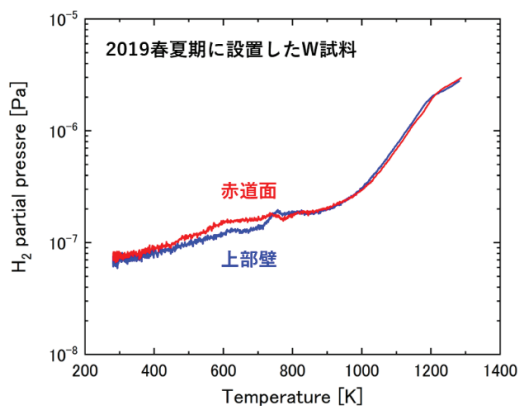
図 1 2025 秋冬期に設置した試料

プラズマ曝露後の W 試料の昇温脱離分析

過去(2019 春夏期)に QUEST の上部壁と赤道面に設置してプラズマ曝露した W 試料について、昇温脱離分析(Thermal Desorption Spectrometry)を実施した。本分析は、真空中($\sim 10^{-7}$ Torr)で、試料を室温から 1000°C (1273K)まで、昇温速度 1K/s で加熱した。その際、試料から脱離したガスを四重極形質量分析計で分析した。

図 2 に、上部壁と赤道壁に設置した W 試料における H_2 の昇温脱離特性を示す。500～700K で、 H_2 の脱離に差が見られた。これが試料の違いに起因するかどうかを、プラズマ曝露していない試料との比較等により、検討する予定である。また、1000K 以上の H_2 の増加は、加熱部に石英管を持つ分析装置特有のもので、石英管を透過して大気から流入した H_2 が検出されている。

一般に、 H_2 分圧はバックグラウンドが高く、 H_2 の脱離を測定することは難しい。そのため、その影響をどのようにして除去するか、慎重な真空度の管理とデータの解釈が必要である。

図 2 2019 春夏期に設置した W 試料における H_2 の昇温脱離特性

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、これらを入手し、真空蒸着装置を東京科学大学より移設し、予備的測定を開始した。

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、2 系統のみ切り替えのために、ポータブル PC を用意した。これと前項の O 社変位計が揃ったので、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めるようになった。

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。但し、中間段階の OCT 測定器は、1 千万円程度を支払えば、市販品を用いる研究も可能であることが判った。

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・部門長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。謝意を表します。

5. 国際会議の日本招致 高出力レーザーシステムと応用に関する第 23 回国際会議を 2026 年 8 月に岡崎で開催するための準備を進めた。

6. 研究組織 糟谷紘一^{A,B}, 井澤靖和^B, 徳永和俊^C, 川路 均^D,

^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 東京科学大学フロンティア材料研究所
(2026/02/01/記)

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 那珂フュージョン科学技術研究所 西村征也

【研究目的】

天体近傍の宇宙空間や磁場閉じ込め装置においては、高温プラズマが背景磁場に磁化された状態にある。このような磁化プラズマにおいては、磁気流体力学的（MHD）不安定性が発生する。磁場閉じ込め装置の一つであるトカマクにおいては、MHD 不安定性であるテアリングモードやバルーニングモードの発達によってプラズマの性能が大きく変化する。特に、バルーニングモードの性質を理解することは、トカマクにおける周辺輸送を制御する上で重要である。より具体的には、トカマクの周辺部分においては周辺局在モード（ELM）と呼ばれるバルーニングモードの駆動する繰り返すバースト現象が発生する。ELM はダイバータの熱的損耗の主因となっており、その発生機構や特性を理解することが、ITER などの先進トカマクで重要な研究課題となっている。

これまでの共同研究においては、簡約化二流体モデルを用いた MHD 不安定性の非線形シミュレーションを行うコード R2F（Reduced 2-Fluid）の開発を進めてきた。ここで、簡約化二流体モデルはスカラー場の方程式系であり、数学的に扱いやすく、かつ数値的に安定にシミュレーションを実施することが可能である。そのため、MHD の理論・シミュレーション研究に多用されている。昨年までの成果として、抵抗性バルーニングモードの非線形シミュレーションを実施し、シアフローが乱流の径方向広がりを抑制する物理機構を明らかにした。今年度は、さらにシミュレーションモデルを熱源を含むように拡張して、圧力勾配が維持・回復する物理を追加することで、ELM の繰り返すバーストを再現することを試みた。

【研究方法】

R2F コードの解く簡約化二流体モデルは、渦度方程式、一般化されたオームの法則、圧力の発展方程式によって構成される。渦度、ベクトルポテンシャルの磁力線に平行な方向の成分、電子圧力が未知数であり、流れ関数と電流の磁力線方向の成分は渦度の定義式（ポアソン方程式）とアンペールの法則によって定まる。渦度方程式に含まれる曲率項によってバルーニングモードが駆動される。本研究においては、ELM の挙動を再現するために、加熱とシンクを表現する項を圧力方程式に追加した。また、シアフローは平衡の静電ポテンシャルによって駆動される。

R2F コードの概要は以下である。各変数はポロイダル方向とトロイダル方向に複素フーリエ級数展開されており、振幅は時間と小半径方向の位置のみの関数である。複素フーリエ級数展開されたモデル方程式に対して、小半径方向の微分を有限差分法で処理し、時間微分項にルンゲクッタ法を適用する。ポアソン方程式を LU 分解を用いた手法によって解く。非線形項の計算においては擬スペクトル法を適用して実空間において評価する。実空間と波数空間の変換においては FFT を用いる。

【研究結果】

図 1 に、圧力と安全係数および平衡のポロイダルシアフローの小半径方向分布、それらの分布を用いた場合のバルーニングモード乱流の発達に伴う運動エネルギーの時間発展を示す。シアフローがない場合（ $\alpha=0$ ）の場合には、初期のバースト後には準定常的な運動エネルギーの発展になっており、加熱と乱流輸送が釣り合っていること示唆している。一方、シアフローがある場合（ $\alpha=1.5$ ）の場合には ELM に類似した繰り返すバーストが発生しており、シアフローによって準定常性が失われていることが分かる。

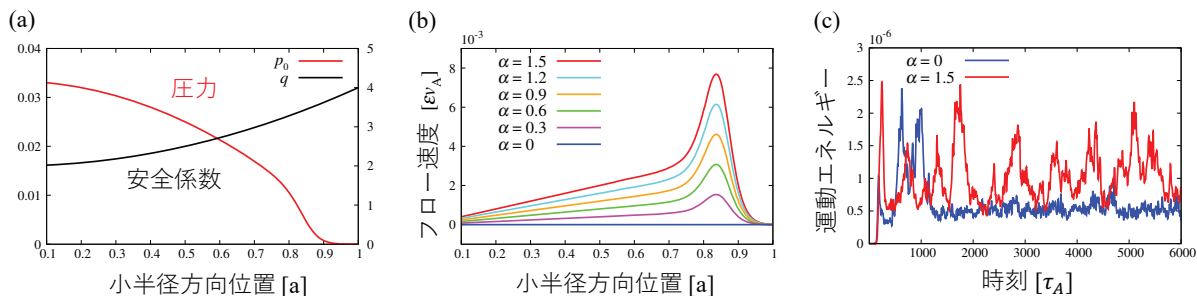


図 1 (a) 圧力と安全係数の小半径方向分布、(b) 平衡のポロイダルシアフローの小半径方向分布、(c) 乱流の運動エネルギーの時間発展

図 2 にポロイダル断面における圧力揺動の時間発展のカラーコンターを示す。シアフローが存在しない場合には、時間が経過してもほぼ同じ渦構造が維持されていることが分かる(図 2(a))。運動エネルギーの準定常性は、渦構造とそれによる対流輸送の準定常性に起因することが分かる。一方で、強いシアフローが存在する場合には、比較的大きな渦構造が形成されてバースト的な熱輸送が発生し、バースト後には渦構造が強く減衰することが分かる(図 2(b))。

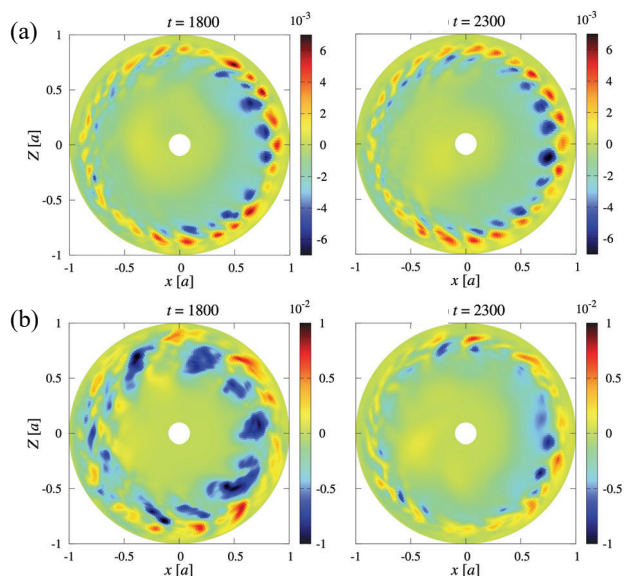


図 2 圧力揺動のポロイダル断面のカラーコンター: (a) シアフローが存在しない場合 ($\alpha = 0$)、(b) 強いシアフローが存在する場合 ($\alpha = 1.5$)

解析的な議論によると、強いシアフロー存在する場合には、図 2(b)のような径方向に伸びた渦構造は短いタイムスケールで切断されて、輸送能力を失うことが分かる。従って、シアフローによる渦構造の準定常性の破壊が、ELM のような繰り返すバーストの特性を再現する上で重要であることが明らかになった。

【まとめ】

簡約化二流体シミュレーションコード R2F を用いたバルーニングモードの非線形シミュレーションを行い、熱源とシアフローの共存下において、乱流が ELM に類似した繰り返すバーストの特性を示すことを明らかにした。より現実的なポロイダル形状を扱い、バースト周期などの定量的予測を行うことができるようにコードを拡張することが今後の課題である。

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。前回の共同研究においてイオン温度勾配駆動ドリフト波存在下において通過電子の非断熱応答が内向きのフラックスを作る可能性に関して検討してきた。本研究においては、捕捉電子の非断熱応答を考慮し、内向きのフラックスの生成機構を調べるとともに、モデルの応用例として PLATO 装置における輸送シミュレーションを行うことを目的とする。

研究成果

昨年度の共同研究で、モデルを定式化しコード開発を行った[1]。本年度は、2025 年 7 月から運用が開始したプラズマシミュレータ（以下 PS）[2]へのコード移植およびチューニングを精力的に進めたのでその成果の一部を報告する。PS においてサブシステム A は Intel Xeon 6980P から構成されるメニーコア CPU システム(1CPU 128 コア)であり、サブシステム B は AMD MI300A で構成される APU システムである。両システムとも国内大型計算機センターで初めて導入されたものであり、チューニングに対する知見は皆無である。コードは 2 次元領域分割法に基づくが、エネルギー量を評価するため、それぞれのプロセスにおいて不連続メモリー空間にあるデータをグローバル変数へ転送する必要があった。JFRS-1 (Intel Xeon Skylake)では特に目立たなかった通信時間が 4 ノードを超えると顕著になりコードの性能を律速することが明らかになった。このため MPI_BCAST から MPI_ALLGATHERV へ通信方法を変更し、データの pack/unpack を行う処理を通信前後に追加した。この改良により 4 ノードを超えても性能の劣化が見られなくなった。AMD MI300A では Fortran コンパイラーが開発段階であること、OpenACC はサポートされていないため OpenMP で GPU 化を進める必要があることなど、CUDA で開発されたコードはそのまま動作しない問題があった。このため、GPU 化するべきサブルーチンを C に書き換え、C から HIP をコールするような大幅なコードの書き換えを進めている。現状においては、サブシステム A の 1 ノードに対し、サブシステム B の 4APU（1 ノード相当）のコードの性能比は 1.2 倍程度であり、更なる改良が必要であるがプロダクトランが可能なレベルまでチューニングが進んでいる。内向きの粒子ピンチ効果に関しては、これまでプラズマ周辺部に密度分布にハンプを生成し、反転ドリフト波 (ITG を含む) による粒子輸送を調べてきたが、局所的には粒子ピンチ効果が観測されたが中心部までは及ばなかった。非線形効果による乱流スプレッディングも限定的であった。捕捉電子による粒子輸送は逆アスペクト比のべき乗に比例するのでコアで輸送は減少すると推測される。今後の課題として密度ピーキングを作り出すための別の機構、例えばプラズマ回転やフラット q 分布による効果も複合的に検討していく必要があるだろう。

[1] 矢木雅敏, 令和 6 年度共同利用研究成果報告第 28 号, 2024CR-FP-2.

[2] IFERC-CSC スーパーコンピュータの概要: <https://www.qst.go.jp/site/rokkasyo/46853.html>

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)

画像解析による船側波形の計測技術の確立

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

波浪中推進性能の優れた船舶開発を目的として、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貼付型の圧力センサ（FBG 圧力センサ）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⁾。今回はこのセンサと埋め込み式の歪式圧力センサを用いて、船首形状の異なる2船型で船体表面圧力を計測することを一つの目的としている。

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。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確立することを主目的とした研究を展開する。本研究では主に、画像解析による船側波形計測機器の拡張を行い、計測可能周期の増大および信頼性向上を図った。

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、各船型における抵抗増加、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
武本 昂大	広島大学先進理工系科学研究科 輸送・環境システム専攻	修士1年	実験補助
春田 海里	広島大学先進理工系科学研究科 輸送・環境システム専攻	修士1年	実験補助
藤田 大地	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
高田 泰知	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
萩森 雄之介	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

2025年度の9月、および11月に九州大学応用力学研究所の深海機器実験水槽 ($L \times B \times d = 65 \times 5 \times 7$ 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 C 船型 (Type C) と呼称する。実験は大きく二つのパートに分かれており、前半パートでは、これら両船型の左舷側に歪式圧力センサを埋め込み、右舷側には容量式波高計を設置し、運動計測試験を実施することで、船体表面圧力や船側波形の計測を行った。同時に船体左舷側の船側波形を画像解析により取得した。後半パートでは、右舷側に光センシング技術を用いた圧力センサーを貼付し、運動計測試験を実施することで、船体表面圧力の多点計測を行った。また、どちらのパートでも縦切り波高計を設置することで、入射波と船体周りの非定常波形を同時計測した。

画像解析においては、ステレオ画像解析を用いた multifold 法を行った。本手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、出会い波周期1周期分の波を計測する機構を2つ設置し、合計2周期の船側波形を計測した。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 に両船型の主要目, 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.9.0, ord.9.5, stem の3断面に埋め込みを行っている. A 船型(左側)は白丸, C 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:C 船型)

Table 1: 供試模型主要目

Item	Value
L_{pp}	2.400 m
B	0.400 m
d	0.128 m
∇	0.098 m ³
C_b	0.800 -
A_w	0.835 m ²
x_G	0.051 m
KG	0.115 m
κ/L_{pp}	0.250 -

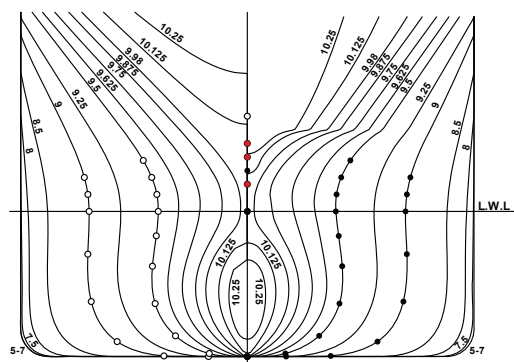


Fig. 2: Body plan と歪式圧力センサの設置位置 (左側:A 船型, 右側:C 船型)

3.2. 運動計測試験

運動計測試験で使用した装置は Fig. 3, また実験全体の計測システム図を Fig. 4 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. 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.

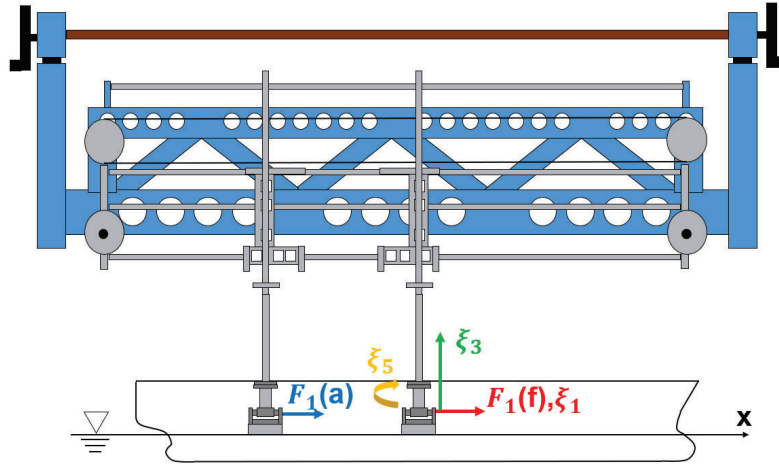


Fig. 3: 運動計測装置概略図

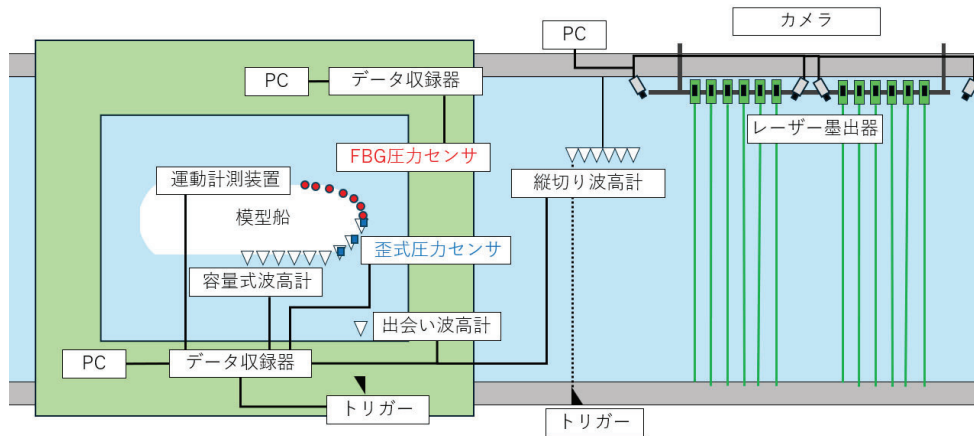


Fig. 4: 運動計測試験における計測システム図

3.3. 計測条件

実験条件については、Table 2 に示したとおりである。前半パートの運動計測試験での計測では、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）を設置し入射
波の計測を行った。後半パートも前半パートと同様に正面向い波で計測を実施したが、地上波高計（縦
切り波高計）は左舷側に FBG 圧力センサを貼付していたため、安全面から $y = 591\text{mm}$ の位置に設置し
た。またどちらの計測でも船体中心での波振幅が 12mm となるように造波機に信号を送り、入射波中を
曳航させている。

Table 2: 実験条件

λ/L ($K_e L$)	フルード数	波向き	計測回数 (TypeA)	計測回数 (TypeC)
0.3	$F_n=0.18$	$\beta = 180\text{degs.}$	6	6
0.4	$F_n=0.18$	$\beta = 180\text{degs.}$	5	3
0.5	$F_n=0.18$	$\beta = 180\text{degs.}$	4	5
0.6	$F_n=0.18$	$\beta = 180\text{degs.}$	5	8
0.7	$F_n=0.18$	$\beta = 180\text{degs.}$	3	5
0.8	$F_n=0.18$	$\beta = 180\text{degs.}$	7	5
0.9	$F_n=0.18$	$\beta = 180\text{degs.}$	5	6
1.0	$F_n=0.18$	$\beta = 180\text{degs.}$	6	6
1.15	$F_n=0.18$	$\beta = 180\text{degs.}$	5	5
1.25	$F_n=0.18$	$\beta = 180\text{degs.}$	4	4
1.3	$F_n=0.18$	$\beta = 180\text{degs.}$	3	-
1.4	$F_n=0.18$	$\beta = 180\text{degs.}$	4	-

3.4. 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. 5)」である. また, 撮影時のカメラのコンディションを, Table. 3 に示す. 撮影には DITECT 社製撮影ソフト「HAS-Xvierwer」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, 船体に照射されるレーザー光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 multifold 法を実施した. そして, その長さを静止水面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.

カメラ2台を, 6台のレーザー墨出し器を挟むように左舷側水槽壁に固定した, 船体と6本のレーザー光が画角内に収まるように角度を調整し固定した. 6本のレーザー光により照射される任意船体位置における波高を基に, 出会い波1周期分の波を2次オーダーまでのフーリエ級数で表現する. 本研究ではこの機構を拡張し, 2台のカメラで6台のレーザーを挟む構成を2セット用い, 合計4台のカメラにより計測を行うことで, 出会い波2周期分の波を計測した.

また, 画像解析による船側波形計測試験は前半パートのみで実施した.



Fig. 5: Camera(HAS-U2)

Table 3: Camera condition

Parameter	Value
フレームレート	200 fps
画面サイズ	1920 × 1080 pixels
計測フレーム数	1,030
シャッタースピード	open
トリガーモード	start & positive

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. 波浪中抵抗増加

Fig. 6 に運動計測試験の際に歪ゲージによって計測された抵抗増の結果を示す。左図は、今回両船型で計測した全ての計測回の抵抗増加、右図は、各船型で波長船長比ごとに平均値を算出し、Spline 補間曲線で結んだものである。両グラフともに、過去に A 船型で計測した抵抗増加を波長船長比ごとに平均値を算出し、Spline 補間した曲線を、データの整合性の確認のため示している。この2つのグラフの縦軸は抵抗の無次元値であり、横軸は波長船長比である。今年の実験で抵抗増加を求める際に用いた平水中での抵抗値は、A 船型が 0.26883kgf、C 船型が 0.27004kgf である。この2つのグラフから、今年の計測はばらつきがあるものの平均値を算出した際に過去の A 船型の平均値と近いことから、整合性の高い計測であったことが分かる。また、A 船型と C 船型を比較すると、短波長域と $\lambda/L = 1.15$ で僅かではあるが C 船型に優位性が確認できる。

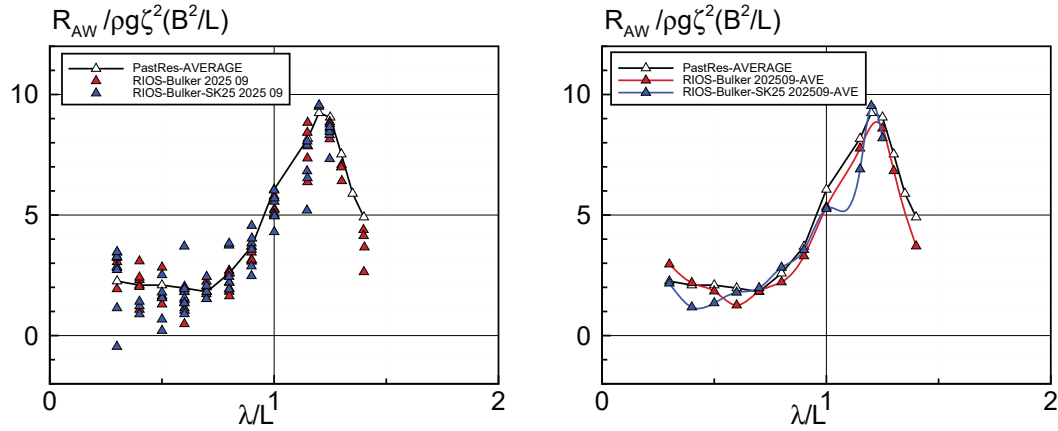


Fig. 6: 左図:歪ゲージで計測された抵抗増加 $F_n=0.18$, $\beta=180\text{deg}$. 右図:歪ゲージで計測された抵抗増加の波長船長比ごとの平均値 $F_n=0.18$, $\beta=180\text{deg}$.

4.2. 船体表面圧力

続いて Fig. 7 に後半パートの運動計測試験で得られた定常圧力（ゲージ圧）を示す。上段は歪式圧力センサの結果、下段は FBG 圧力センサの結果である。それぞれ、左から順に ord. 9.0, ord. 9.5, stem の3断面の結果を例として示している。縦軸は定常圧力（ゲージ圧）、横軸は Deckline を基準としたときのガース長を表している。A 船型、C 船型の結果はそれぞれ図中赤線、青線で示している。また、ここでは結果の一例として $\lambda/L = 1.15$ における結果を示している。この結果から、歪式圧力センサの結果を正と見なした時、FBG 圧力センサでは多少のばらつきがみられるが、この三断面に関してはある程度の整合性が確認できる。ただし、計測した時間帯によっては、時間経過とともにドリフトしているものやノイズのひどいセンサが含まれているため、解析の方法は今後検討が必要である。これは、水温と気温の差（温度干渉影響）の影響を受けやすいことやセンサの老朽化が進んでいたことが原因として考えられる。また両船型での結果を比較した際に、僅かではあるが相違がみられる。この差異を分かりやすく可視化したコンター図を Fig. 8 に示す。左図が A 船型、右図が C 船型の結果である。このコンター図は、今回模型船に設置した全ての歪式圧力センサと FBG 圧力センサを用いて作成している。このコンター図から、C 船型では A 船型と比較して、stem 近傍で圧力低減が確認できる。

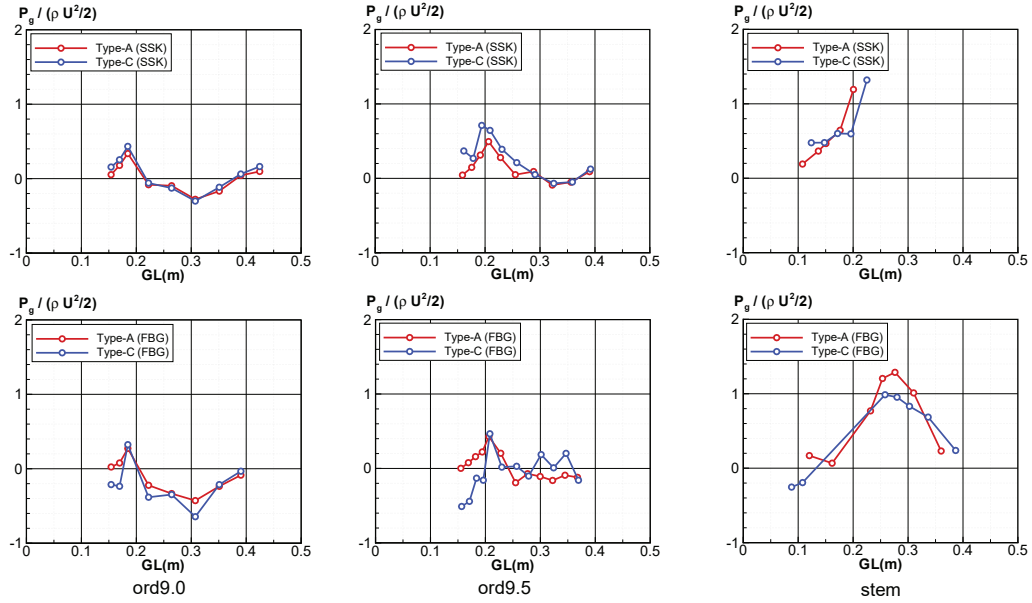


Fig. 7: $\lambda/L = 1.15$ で ord.9.0, ord.9.5, stem の3断面で計測された定常圧力（ゲージ圧）（上段：歪式圧力センサ，下段：FBG 圧力センサ）

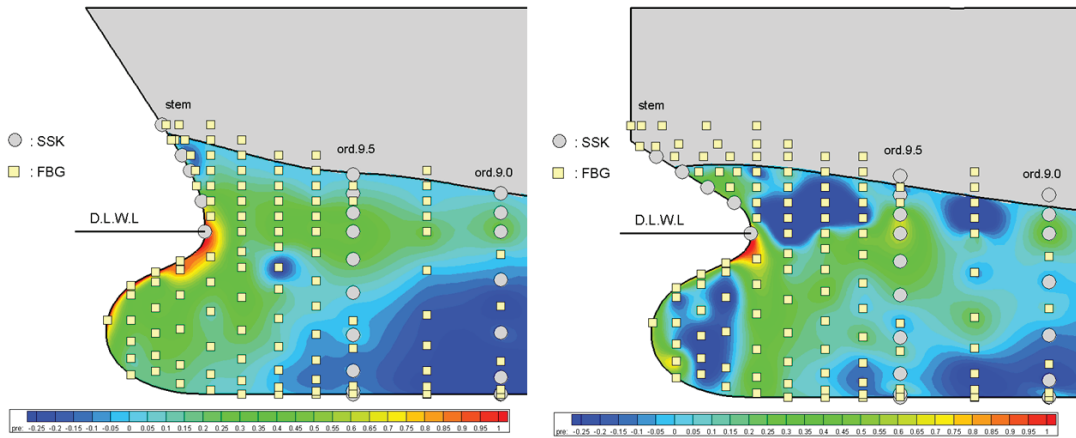


Fig. 8: $\lambda/L = 1.15$ の時の船体表面に掛かる定常圧力（ゲージ圧）のコンター図（左図：A 船型，右図：C 船型）

4.3. 画像解析による船側波形計測

Fig.9, Fig.10, Fig.11 は、画像解析および容量式波高計による波長船長比 $\lambda/L=1.25$ における船側波形フーリエ係数分布結果である。Fig.9 は、消波側レーザー 6 本を用いて測定した 1 周期目の船側波形について、両計測手法ともに同一条件の 3 度にわたる曳航試験から得られた 3 周期分の結果を平均したものである。Fig.10 は、造波側レーザー 6 本を用いて測定した 2 周期目の船側波形について、両計測手法ともに同一条件の 3 度にわたる曳航試験から得られた 3 周期分の結果を平均したものである。Fig.11 はこれら全 6 周期分の平均値を線やプロットで示し、標準誤差をエラーバーで示したものである。

図は上から順に、波形データをフーリエ級数展開した際の 1 次成分，2 次成分，定常成分を示している。横軸は計測断面の位置，縦軸はフーリエ係数の無次元値である。横軸は船体中央を基準とした x 座標

値を船長の半分で無次元化している。また、縦軸の無次元化は船体中央 ($x = 0$) における入射波振幅で除することにより行っている。実線及び破線は画像解析による結果を、シンボルは容量式波高計による結果を示す。

Fig.9 および Fig.10 において、画像解析および容量式波高計の結果は、定常成分、非定常成分ともに非常に高い一致を示した。Fig.11 においてもそれぞれの平均値は高い一致が確認された。また、標準偏差は両手法ともに船首部で大きくなっていることが確認できる。これは船首部では船側波形の波振幅が大きくなるため、計測毎のばらつきが相対的に大きくなるためと考えられる。

定常成分については、相関係数 $r=0.994$ 、二乗平均平方根誤差 $RMSE=0.0017$ となり、手法間での系統的な差異は殆ど確認されず、非常に高い一致を示した。cos1 次成分、sin1 次成分については、相関係数はそれぞれ 0.946、0.994、 $RMSE$ はそれぞれ 0.131、0.104 であり、非常に良好な一致を示した。以上のことから、本画像解析手法 (multifold 法) は、平均水位のみならず波形変動においても十分な計測精度を有していることが確認された。

定常成分の全断面、および非定常成分の船首付近において、両手法のエラーバーが重複しており、画像解析による計測値が容量式波高計の測定精度範囲内で一致していることが確認された。画像解析手法においては、計測装置の改良によりレーザー墨出器を 12 個用いることで、複数周期の船側波形の計測が可能となり、複数周期の平均化によって、信頼性の高い計測結果が得られた。また、1 度の曳航試験で 2 周期分の船側波形を計測することが可能となった。これらのことから、画像解析手法を用いることで容量式波高計と同程度の精度を保ちつつ、波高計よりもはるかに多い断面において船側波形計測が可能であることが実証された。

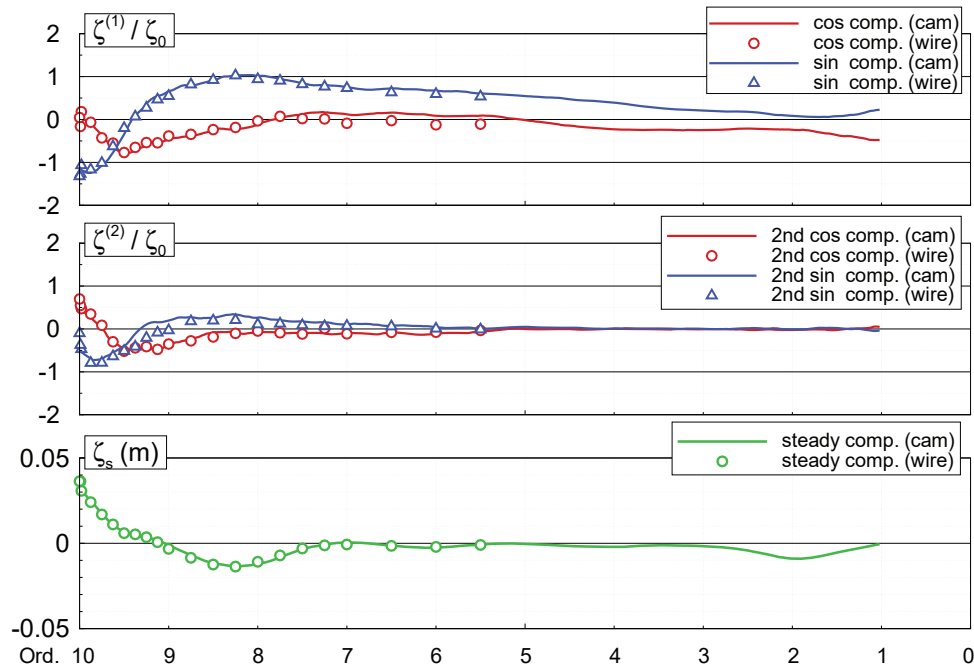


Fig. 9: Steady and unsteady wave profile (1T component) at $F_n=0.18$, $\lambda/L=1.25$. $\chi=180$ degs.

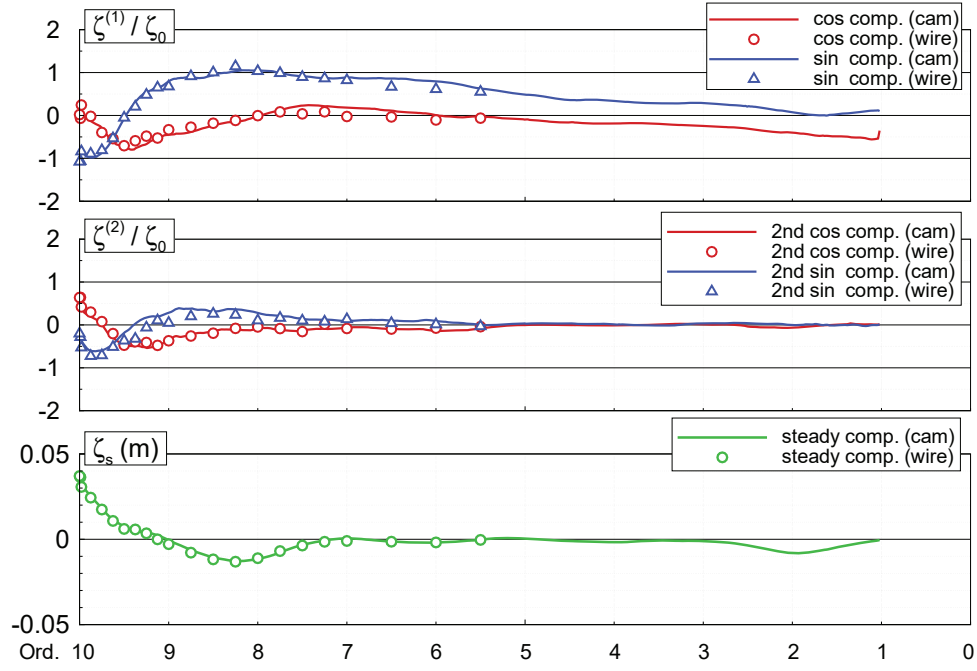


Fig. 10: Steady and unsteady wave profile (2T component) at $F_n=0.18$, $\lambda/L=1.25$. $\chi=180$ degs.

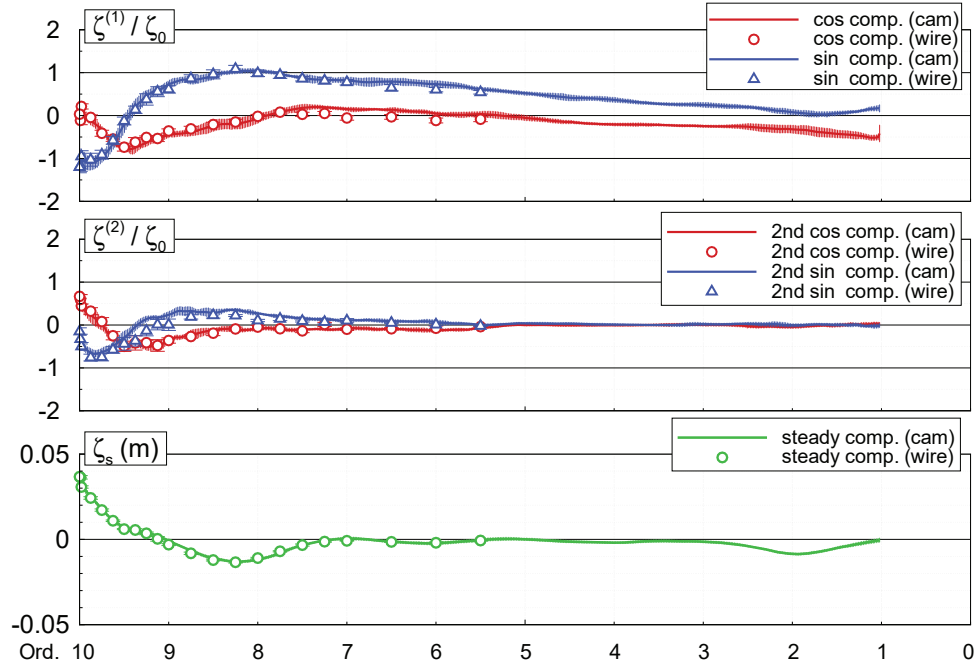


Fig. 11: Steady and unsteady wave profile at $F_n=0.18$, $\lambda/L=1.25$. $\chi=180$ degs.

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, 改良した計測システムによる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. 計測システムを拡張することで, 複数周期の船側波形を精度よく計測することができた. また, 船体全域にわたり高密度な計測が可能であるという顕著な利点を有し, 従来の容量式波高計では困難であった連続的な船側波形分布の取得を実現した. さらに, 非接触計測であるため船体への損傷がなく, 定常成分および非定常成分の両方において高い計測精度が確認された. 船首部において画像解析手法で若干の誤差が見られたが, その要因として照明条件の変化, 船体曲率による表面張力の影響が考えられる. これらの課題に対しては, 照明条件の最適化や画像処理方法の改良により, さらなる精度向上が期待できる.
- (2) 船首形状の異なる 2 隻の模型船において運動計測試験を実施することで, 船首形状の違いが船体表面圧力や抵抗増加などの耐航性能に及ぼす影響を調べた. 抵抗増加を 2 線形で比較すると, わずかに短波長域と特定の波長船長比において C 船型の優位性を確認することができた. C 船型で抵抗増加低減が確認できた波長船長比での, 歪式圧力センサと FBG 圧力センサを用いた船体表面圧力の計測結果では, stem 近傍で 2 船型の定常圧力分布に差異が見られ, C 船型の優位性が確認できた.

参考文献

- 1) Iwashita, H., Kashiwagi, M.: An Innovative EFD for Studying Ship Seakeeping, Proceedings of the 33rd IWWF, 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 Research, 101, pp1-20, 102261, 2020, 査読有
- 4) Hidetsugu Iwashita: Innovative Measurement of Unsteady Pressure Distribution on Ship-Hull Surface and Its Use for Hydrodynamic Study on Seakeeping, Invited-Speaker Lecture No.4, The 33rd Symposium on Naval Hydrodynamics, 19-23 October, 2020, 招待講演

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メートル沖合に開発されるため、風車の発電出力および風車にかかる荷重に対して沿岸域の地形が影響を及ぼす。境界層が陸から海へ遷移する際、内部境界層(ABL)が形成されるが、ABL と洋上ウィンドファーム内に形成される流れが相互作用を行うことで流れ場全体が非常に複雑になっている。本研究では、風洞実験によって沿岸域の境界層流れを模擬し、模型風車を設置した条件下でウィンドファーム内の流れを計測し、形成される ABL と風車後流についての評価を行う。

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 $y_h=0.175\text{m}$ 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 I 型プローブおよび X 型プローブが使用された。風速は、サンプリング周波数 10kHz 、計測時間 30 秒で計測された。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 4m の範囲に木片ブロックを設置することで陸上が模擬された。ウィンドファームを模擬する 12 基の模型風車は、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。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 1 に、1 行目風車の上流— $1D$ ($D=0.25\text{m}$)、1 行目および 4 行目の風車後流の $0.5D$ 、 $3D$ 位置における鉛直方向の主流方向平均風速 $\bar{u}$ および乱流強度 I の分布を示す。縦軸は、ハブ高さ ($y_h=175\text{mm}$) で無次元化されている。1 行目風車上流— $1D$ 位置では、鉛直方向に通常の乱流境界層の流れに近い分布となっている。1 行目風車下流の $0.5D$ 位置では、ロータ部分で顕著な速度欠損が生じ、平均風速分布は複雑な形状を示すと同時に、乱流強度も大きく増加する。下流 $3D$ および $6D$ (図に示していない)位置においては、ハブからブレード最上付近まで乱流強度が高くなっている。4 行目の風車後流では、1 行目と同様、下流 $0.5D$ 位置で速度欠損が生じ、1 行目よりも高い乱流強度となっている。下流 $3D$ 位置では、平均風速分布が 1 行目の風車に比べて回復されている。

本報告書には示していないが、模型風車の行ごとの発電出力量を計測し既存の数値計算結果と比較も行った。数値計算結果では、1 行目から 2 行目にかけて発電出力は約 40% 低下する。その後、2 行目から 3 行目にかけてわずかに上昇し、3 行目以降は、各行の発電出力量はほぼ一定となる傾向を示す。本実験で得られた結果は、1 行目から 2 行目にかけて発電出力は約 50% 低下し、数値計算結果と同様の傾向を示した。2 行目から 3 行目では発電出力量はほぼ一定で、3 行目から 4 行目にかけてわずかに回復する。発電出力量がわずかに回復する風車の行は、実験のほうが後方に移動している。

更に、境界層が陸から海へ遷移する場合と海から陸へ遷移する場合洋上ウィンドファームの発電効率にどのような違いを生じるかを評価するため、上流にブロック無しの流れ場及び発電出力量の計測も行っている。しかし、海風の時の流入風が低乱流境界層である必要がある。これを再現するために、ウィンドファームから上流 5.5m にスパン方向にハブ高と同じ高さのスパイアーを設置し鉛直シアを再現した。

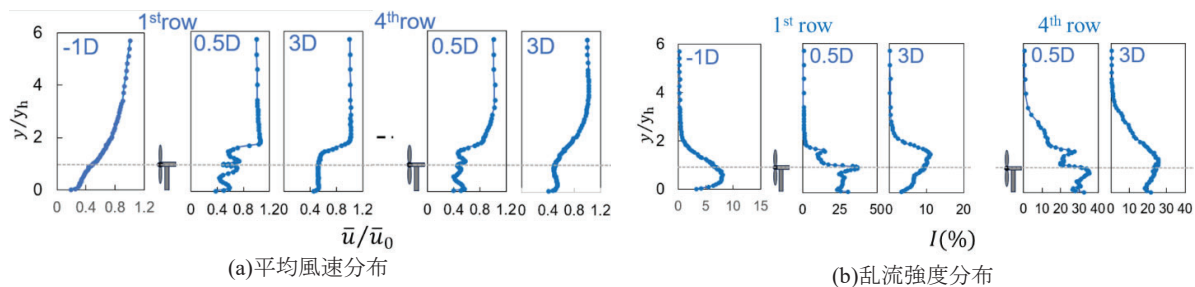


図 1 ウィンドファーム内境界層、内部境界層及び風車後流の発達

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 "風洞実験による沿岸域の乱流場がウィンドファームへ及ぼす影響の評価", 第 35 回 日本流体力学会 中四国・九州支部講演会 福岡大学, 2025.
- 安本 勇輝, ゴイト ジェイ プラカス, 亀田 孝嗣, 内田 孝紀 "沿岸域の乱流場がウィンドファームへ及ぼす影響の評価に関する風洞実験", 日本機械学会 中国四国支部 第 64 期総会・講演会, 広島, 2026.

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), 中島 慎之助 (近畿大)

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

近年、沈没船探査や海底資源探査、環境モニタリング等の水中ミッションは重要性を増しており、ROV による高精度かつ安全な航行のための技術、特に障害物回避能力の向上が求められている。本研究では、単眼カメラと深層学習モデルによる障害物認識を基盤に、ベクトル場ヒストグラム法 (VFH) による安全方向選択と LQI 制御器による推力配分を統合した低コストかつリアルタイムな障害物回避手法を提案し、水槽試験により、その有効性を確認する。

2. 障害物回避システムの性能評価

水中環境における障害物情報の取得にはYOLO V8を使用した。障害物の模型として三角形のPLAボードを用い、教師データとして陸上写真 150 枚、水中写真 300 枚をアノテーションしYOLO-8nモデルに学習させた結果、陸上および水中のいずれにおいても対象の認識が可能であること確認した。

障害物を特定した後、そのエッジを検出して回避の最適経路を計画するため、セグメンテーションモデルSegFormerを使用した。マスク画像を教師データとしてモデルに学習させた結果、エッジを含めた障害物の対象領域を適切に検出できることを確認した。障害物の位置および形状が特定された後、水中ビークル進行方向の決定には VFH (Vector Field Histogram) アルゴリズムを使用した。水中進行時に取得した画像をFig. 1に示すような二次元平面に射影し、独自の重み付け関数を用いることで安全な進行方向を算出する。YOLO-Seg-VFH システムからデータを読み取り、ROV を制御するためにLQI (Linear Quadratic Integral) 制御手法を採用した。すなわち、一般的なLQRから状態空間を拡張した拡大系の状態空間を作成、システム同定により各行列を算出し、LQIゲイン K を求めて制御則を構築した。

Blue Robotics社が開発したBlueROVを使用し、Pythonプログラムによって通信およびYOLO, VFHなどのモジュールを統合したシステムを構築した。障害物模型を配置してROVに実装した障害物回避プログラムの水槽試験 (Fig. 2) を実施した結果、記録されたプロペラ推力の変化および画像認識の結果より、障害物の検出に応じて適切な回避行動が実行されていることが確認され、本システムは試験環境下において想定どおりに機能し、障害物回避に有効であることが示された。

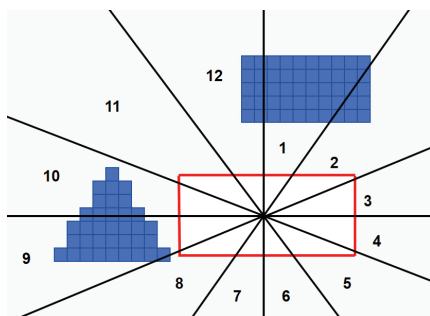


Fig. 1 VFH algorithm

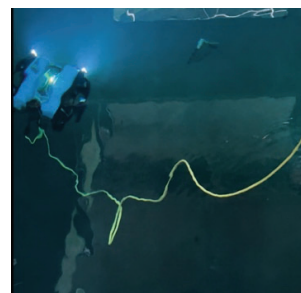


Fig. 2 Tank experiment

3. 結言

水中ビークルの障害物回避を対象とし、画像認識から推力制御までの制御システムを構築した。すなわち、深層学習に基づく障害物検出および領域分割結果を入力として、VFHにより安全方向を算定し、LQI制御によりスラスト推力を決定する。水槽試験により、本手法が低コストの視覚センサのみを用いて実環境に近い条件下で安定した障害物回避行動を実現することを確認した。

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ことが本研究の目的である。内部流による不安定振動は確認されなかったものの、取水中の管に加振を加えた際には応答特性が大きく変化し、非線形系特有の分岐現象が見られることが分かっている。本年度の実験ではこの現象に着目し、その再現性や実験の不確実性を確認する水槽実験を行った。

水槽実験

深海機器力学実験水槽に図 1 に示す実験装置を構築した。長さ 4 m 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付け、強制変位励振下で 0.0-7.0 m/s と取水流速を段階的に変化させた際の振動を 8 台の水中カメラを用いてモーションキャプチャする。また、流速強制動揺装置の加振周期を掃引させることで分岐現象を確認する。



図 1 水槽実験の概要

実験結果・考察

本実験中に強制動揺装置に Yaw 軸周りの微小な回転運動が生じていることが分かったが、その影響は無視できる程度であった。加振周期を掃引させた実験の結果、周波数を下げる際と上げる際に明確な分岐が発生することが明らかとなった(図 2 左)。また、管内流速を変化させた結果、分岐は流速 4.0 m/s 以上で顕著に表れることが確認された(図 2 右)。管内流を考慮した取水管の解析モデルは小さい振幅への分岐枝とはよく一致しているが、大きい振幅への分岐枝は再現できない。今後はこの分岐現象の再現のため、パイプの振動形状や管内流の慣性力、渦による流体力の非線形性を考慮した解析モデルの検討が重要となる。

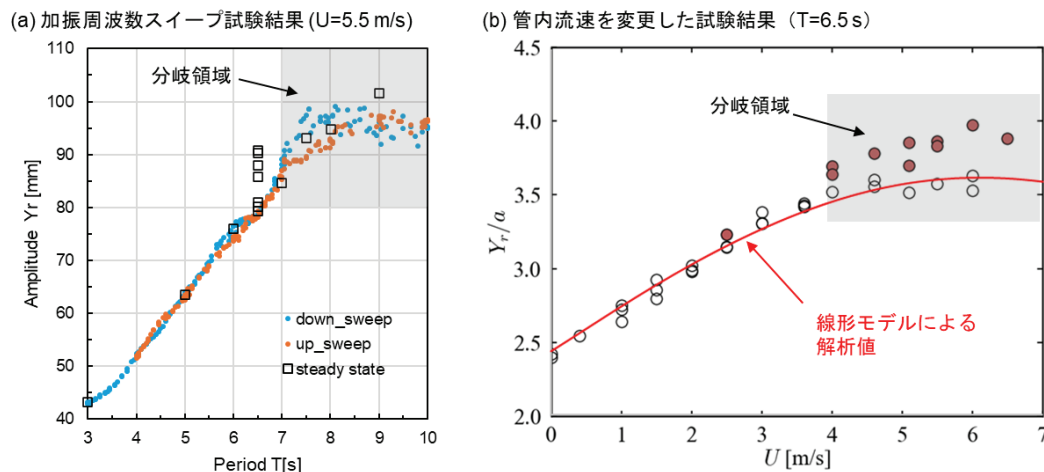


図 2 実験結果 (パイプ下端の変位)

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セミサブ型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。本年度はセミサブ型浮体の流力弾性応答、特に波の高調波成分が弾性モードを励起する場合の応答特性の調査とそれに対する数値解析モデルの検証を目的に研究を行った。

水槽実験

弾性相似模型を用いた水槽実験による現象の調査と数値計算モデルの構築、検証を行った。実機は 25MW 規模の風車を搭載する 4 カラム型のセミサブ型浮体を想定している。縮尺比 1/50 でローハル部を分割バックボーン方式とした弾性相似模型として製作した。バックボーンにはアルミパイプを使用し、浮体の外装浮力材は樹脂を用いた 3D プリンターで製作した後、防水用の塗装を施した。また、RNA を含むタワーの 1 次曲げモードの固有周波数が相似となるように選定した塩ビ製タワーと錘を模型に搭載している(図 1)。

深海機器力学実験水槽で水平ばねによって浮体模型を係留し、自由動揺試験、モード計測試験、規則波試験を実施した。計測センサにはバックボーンに貼付したひずみゲージと各カラム上のモーションキャプチャを用いている。



図 1 水槽実験の概要

実験結果と考察

実験では各部材の曲げ応答には顕著な高調波成分が含まれており(図 2 左)、波荷重の高調波成分と模型の弾性モードが共振することでこれらの応答が生じたと考えられる。ローハルとタワーを梁要素とし、流体力を Morison 式で評価する数値解析モデルを作成し、水槽実験結果と比較を行った。波浪回折・発散や側壁の影響が小さいと考えられる波周期では線形応答の範疇では解析と実験のよい一致を確認したが(図 2 右)、高次応答については実験結果を十分に説明できないものがあった。今後、解析では説明できない高次応答現象を明らかにすると共に、実験では不規則波応答についても調査を行いたい。

研究成果報告

若狭理功：浮体式洋上風力発電施設の流力弾性応答における非線形影響に関する水槽実験，九州大学修士論文，2025。

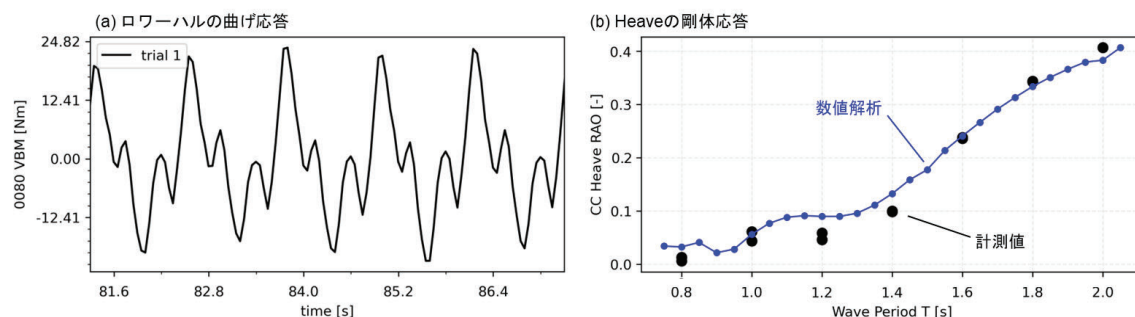


図 2 実験と数値解析の比較

GaN/AlN 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】

AlN/GaN ヘテロ接合は高出力・高周波デバイス (HEMT 等) で重要である一方、成長・熱処理過程で生じる界面近傍の混晶化が特性劣化や信頼性に影響し得る。しかし、界面混晶化を駆動する原子移動がどの欠陥 (単空孔/複合空孔) を介して、どの経路で起きるかは十分整理されていない。

本研究では、AlN/GaN 界面における混晶化を、複合空孔 ($V_{Ga}-V_N/V_{Al}-V_N$) を介した拡散として捉え、形成エネルギーと反応障壁の両面から、混晶化が起こりやすい条件・経路を明確化する。

【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、界面近傍の複合空孔欠陥 (V_{Ga} or $V_{Al}-V_N$) の形成エネルギーを算出した。各モデル中の構造間を移動する反応障壁ポテンシャルを CI-NEB 法を用いて算出した。

【結果】

形成エネルギーの位置依存を比較した結果、単空孔および複合空孔は界面近傍で相対的に安定化する傾向が見られ、欠陥が界面近傍に集まりやすい可能性が示唆された。さらに、ウルツ鉱の極性 (III 族終端/V 族終端) と基板 (格子定数) を組み合わせた 4 種の界面モデルで検討したところ、欠陥の安定化の度合いは界面条件に依存して変化し、界面の原子配列が欠陥存在確率を左右し得ることが分かった。

得られた拡散障壁は経路により幅を持ち、概ね 1.9–4.5 eV 程度の範囲を示した。したがって、熱処理条件によっては界面近傍での拡散が進行し得ることが示唆される。経路の性質に着目すると、III 族 (Al/Ga) 拡散を伴う経路は Al と Ga の相互侵入に直接結びつくため混晶化へ強く寄与し得る一方で、N 拡散のみが主となる経路は III 族副格子の入れ替わりを直接駆動しないため、混晶化への寄与が相対的に小さいと整理できる。

【研究成果】

- [1] 藤田 大輝、小田 将人、寒川 義裕、"AlN/GaN 界面における原子拡散の理論的解明"、第 17 回ナノ構造エピタキシャル成長講演会、Th-P17、総合交流促進施設りぷら
- [2] 佃 秀太、小田 将人、寒川 義裕、"窒化ガリウムにおける負電荷状態での $V_{Ga}-V_N$ 欠陥反応解析"、第 17 回ナノ構造エピタキシャル成長講演会、Fr-P7、総合交流促進施設りぷら
- [3] D. Fujita, M. Oda, and Y. Kangawa, "Elucidation of the Intermixing mechanism in AlN/GaN interfaces", The 26th Asian Workshop on First-Principles Electronic Structure Calculations, 188, Epocal Tsukuba.

【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・M2): 計算の実行、解析
 佃秀太(和歌山大学・M2): 計算の実行、解析
 寒川義裕(九州大学・教授): 計算の実行、解析

次世代パワーエレクトロニクスシステム用劣化要因解析技術

2025CR-ME-7

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）機器の普及拡大が必要不可欠であるがパワエレ機器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。パワエレ機器を構成するパワー半導体デバイスの故障は、パワエレ機器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、パワーモジュールの劣化要因を解析する技術の構築である。

2. 研究の具体的方法

パワエレ機器の動作状態におけるパワーモジュールの劣化観測技術として、チョッパ回路連続動作時における熱抵抗増加とボンディングワイヤの電気抵抗増加を個別にモニタリングする手法を開発する。チョッパ回路動作中にパワーモジュールの温度を計測するセンス回路を作製し、モジュール内で発生する損失を演算し、そこからパワーモジュールの熱抵抗の変動量を求めることで、モジュールの劣化を観測する。従来、パワーモジュールの劣化評価試験では、パワーモジュールのオン電圧が用いられてきたが、その要因である熱抵抗増加とボンディングワイヤ抵抗増加が分離できていなかった。提案手法はパワーモジュール非通電時の温度情報を用いることで、これらの劣化要因を分離できる点に特長がある。提案手法を用いてチョッパ回路連続動作状況におけるパワーモジュールの劣化観測を行い、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機器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. チョッパ回路を用いた熱抵抗とボンディングワイヤ抵抗の分離観測

図 1 に測定環境の回路図を示す。パワーデバイスには 1700 V 6in1 IGBT モジュールを使用している。 $V_{CE(sat)}$ を測定するために、OP アンプを用いて構成した検出回路と超小型・定電圧で動作する Leafony Basickit 2 を用いて測定する。IGBT のジャンクション温度を変化させるため、図 1 中の Q_1 を DUT(Device Under Test) として、最初の 1 秒間のみ通電させて温度上昇を行い、残りの 2 秒間で、温度下降させるのとともに DUT の $V_{CE(sat)}$ 測定に必要な定電流を維持させるために並列接続された Q_2 を 100 回に 99 回、DUT を 100 回に 1 回スイッチングさせる。

$V_{CE(sat)}$ はボンディワイヤ抵抗 R_{wire} による電圧降下とチップでの電圧降下 V_{chip} の和で表される。

$$V_{CE(sat)} = R_{wire} \cdot I_C + V_{chip} \quad (1)$$

ここで、 I_C はコレクタ電流である。ボンディングワイヤの劣化により R_{wire} が増加するため、ワイヤでの電圧降下は増加する。はんだ層の劣化により熱抵抗が増加することで、スイッチング時のジャ

ンクション温度は上昇する。 V_{chip} は温度依存性を持つため、ジャンクション温度の上昇に伴って増加する。劣化前後の $V_{\text{CE(sat)}}$ を測定することで劣化の検出が可能である。

図 2 に劣化前後での IGBT を用いて回路動作させた場合の DUT の $V_{\text{CE(sat)}}$ の変化を示す。スイッチング周波数を 20 kHz, 出力電流を 54 A として実験を行った。劣化前と比べて、劣化後の $V_{\text{CE(sat)}}$ が増加している。温度一定となる T_2 で V_{chip} の変化量はゼロと見なせるため、 $V_{\text{CE(sat)}}$ の変化量 $\Delta V_{\text{CE(sat)}}$ の平均値を ΔV_{wire} とすると、 $\Delta V_{\text{wire}} = 0.138 \text{ V}$ であった。これは R_{wire} の増加に起因しているため、劣化前と比較して $2.56 \text{ m}\Omega$ 増加したことを確認した。

4. 正弦波 PWM インバータを用いた $V_{\text{CE(sat)}}$ と出力電流検出回路の構築

図 3 に三相正弦波 PWM インバータを対象として $V_{\text{CE(sat)}}$ と出力電流検出回路を示す。DUT(Device Under Test) に $V_{\text{CE(sat)}}$ 検出回路と Leafony を接続し、電流測定回路も同一の Leafony に接続することで $V_{\text{CE(sat)}}$ と出力電流を同期して測定を行う。DUT のオン時間の中心でサンプリングトリガを Leafony に送信することで、測定のタイミングと主回路の動作を同期させる。

図 4 に出力電流とジャンクション温度測定結果を示す。ジャンクション温度は前述のボンディングワイヤ抵抗 R_{wire} を予め分離測定し、チップでの電圧降下 V_{chip} に起因する温度を算出している。

6. まとめ

本研究では、パワーモジュールの劣化要因を解析するために、チョップパ回路を用いた熱抵抗とボンディングワイヤ抵抗の分離観測を行った。1200 V 75 A 定格の IGBT モジュールを使用した実験により、ボンディングワイヤ抵抗のみを分離観測できることを確認した。正弦波 PWM インバータを用いた $V_{\text{CE(sat)}}$ と出力電流検出回路を構築し、出力電流の変動するインバータ条件においてもボンディングワイヤ抵抗を考慮したジャンクション温度測定可能な環境を実現した。

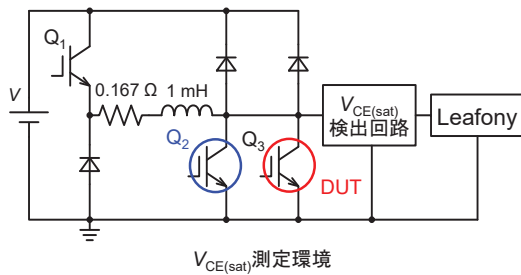


図 1: チョップパ回路を用いた $V_{\text{CE(sat)}}$ 測定環境

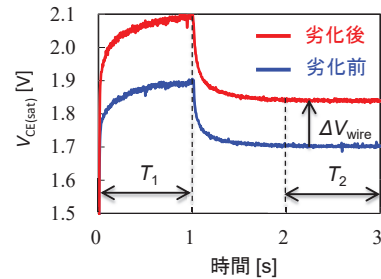


図 2: モジュール劣化前後における $V_{\text{CE(sat)}}$ 測定結果

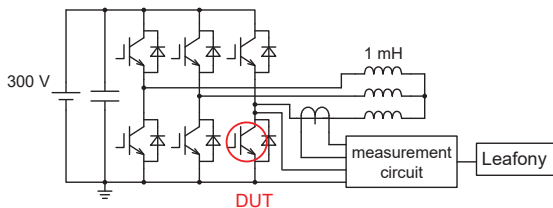


図 3: 4. 正弦波 PWM インバータを用いた $V_{\text{CE(sat)}}$ と出力電流検出回路

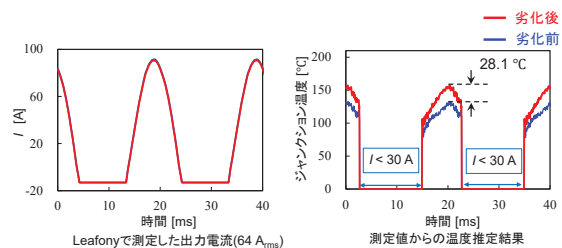


図 4: 出力電流とジャンクション温度測定結果

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
 同志社大学 理工学部 松波 龍志
 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-乱流遷移などに関係した複雑かつ無視できない Re 効果のため，未だ充分ではない．本研究では，翼まわりの流れの 3 次元構造について，水槽を用いた可視化実験を行い，得られた画像に PIV 計測を施し，そのデータを解析することで，3 次元渦構造を可視化し， Re により分類する．

2. 実験方法

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

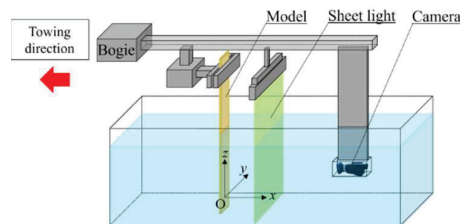


Fig. 1 Experimental apparatus.

3. 結果と考察

図 2 に，水槽実験において， $Re = 100 - 300$ 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 翼弦長下流である．図 2 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量 $(\omega_x^*)_{y\text{mean}}$ を可視化した時空間図である．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, $Re = 100, 125$ は渦構造が不明瞭な領域, $Re = 150, 175$ では渦の正負が時間, スパン方向に入れ替わり, $Re = 200$ では渦の正負が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, $Re \geq 225$ では, 入れ替わらない時間が長い箇所を確認できる. $Re = 150, 175$ と $Re \geq 225$ 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. また, $Re = 100, 125$ では明確な二次渦構造を確認できないことから準2D的な領域と考えられる. よって, $Re = 125 - 150$ にかけて, 準2D的構造から Mode A に似た構造, $Re = 175-225$ 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られる.

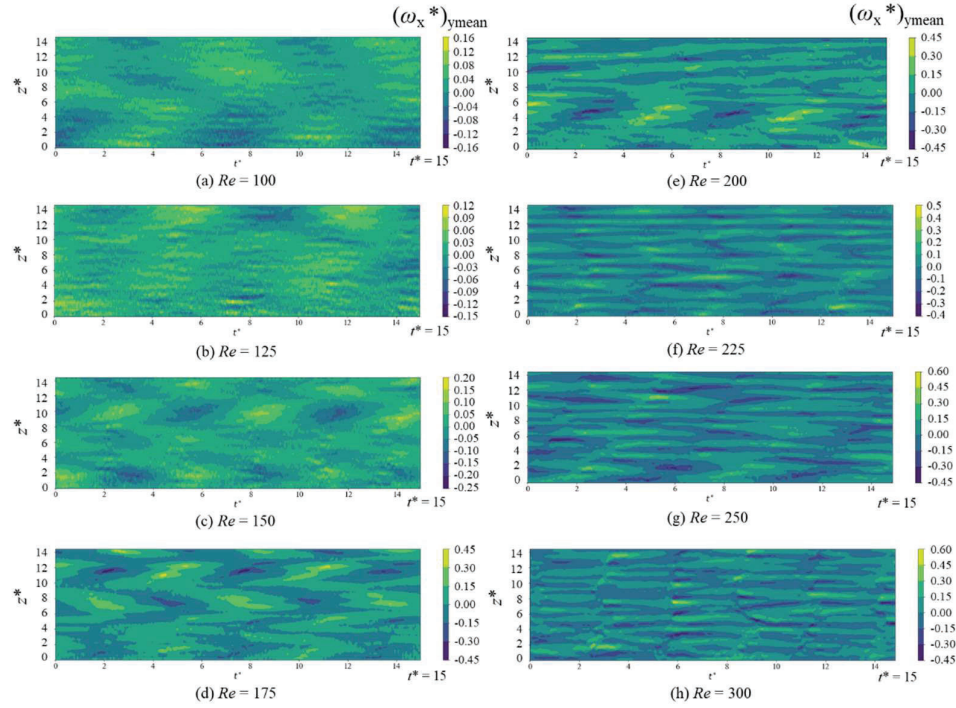


Fig. 2 Visualization of three-dimensional vortices structure.

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, $Re = 125-150$ にかけて, 準2D的構造から Mode A に似た構造, $Re = 175-225$ にかけて Mode A に似た構造から Mode B に似た構造へ変化を確認した. 今後, $Re \leq 100$, $Re = 125-150$, $175-225$ 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.

風車大型化を見据えたべき乗則に従わない風速プロファイルの研究

筑波大学 計算科学研究センター 日下 博幸

● 目的

現行の国際電気規格（IEC）や日本の第三者機関の認証、また実務上の発電量評価などでは、べき乗則を考慮することが多い。しかし、風力発電機が大型化することによって、べき乗則に従わない風（Low Level Jets やだし風・安定時の風速の鉛直プロファイル）などが、風力発電機が受風する確率が高くなると思われる。そこで、本研究では、高層鉄塔データとだし風が吹く場所に LiDAR と風向風速計を設置し、べき乗則に従わない風速の鉛直プロファイルが風力発電機に与える影響を調査した。

● 方法

荒川だしと呼ばれる、山岳地域特有のべき乗則に従わない風が吹くことがある、新潟県村上市の村上市立荒川中学校の屋上に風向風速計と LiDAR を設置して弱い荒川だしを観測し、解析を実施した。

● 結果

2025/3/21～3/27 の1週間で、弱いだし風事例（べき乗則に従わない事例）は5事例観測され、その内1事例は接地層の高度である、約150 mの高度まで谷筋に沿った風が大半を占めていた。この事例が発生時は、風速の鉛直プロファイルの構造上、ハブ高が上昇するにつれ、仮想風力発電機のグロス発電量が低下することが示された。

● 考察

本研究では弱いだし風事例と風向が谷筋に沿っていないべき乗則に従わない事例を研究対象として発電量に与える影響を考察した。弱いだし風事例は山越え気流である可能性が高いため、風向が谷筋に沿っていないべき乗則に従わない事例と比較して、乱流強度が大きかった。これは先行研究より、弱いだし風事例は、グロス発電量と疲労荷重の増加に寄与すると考えられる。

● 成果文献と発表リスト

【査読付き国際論文】

なし

【国際学会発表】

静居 竜大, 中村 祐輔, 内田 孝紀, 日下 博幸. (2025). べき乗則に従わない風速の鉛直プロファイルの研究—荒川だしの LiDAR 観測データの事例解析—, 第47回風力エネルギー利用シンポジウム

● 謝辞

本研究を実施するにあたり、新潟県村上市教育委員会のみなさま、ならびに村上市立荒川中学校のみなさまのご助力をいただきました。この場をお借りしてお礼を申し上げます。

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果に直結し、動かすべきではない歯を適切に動かさないように制御することが重要である。この動かしたくない歯を動かさないという概念を「固定」という。「固定」を適切にコントロールするのは大変困難であり、この能力を身につけることが矯正歯科医として最も重要なことでもあるが、それを劇的に改善したのが歯科矯正用アンカースクリュー（以下、スクリュー(図1)）である。近年、スクリューの出現により、治療期間の短縮や抜歯および外科矯正の機会の減少など、矯正歯科治療は重要な進歩を遂げつつある。スクリューは患者の協力を必要とせず絶対的な固定を実現できるなど多くの利点があり、現代矯正歯科治療の主役の一つであるといっても過言ではない。一方で、治療期間中のスクリューの脱落は骨の治療期間を待つことになり治療期間の延長、あるいは治療アウトカム達成率の低下の要因となる。スクリューの脱落率は13.4%-20.1%との報告があり、脱落因子として患者性質・植立方法・スクリュー形状など様々な因子が挙げられてはいるが、スクリューの脱落を予測することは未だ困難であるというのが現状である。



図1

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

脱落に関連する機械的パラメータおよび臨床的リスク因子の解析を行った。

【目的】

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

【資料および方法】

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

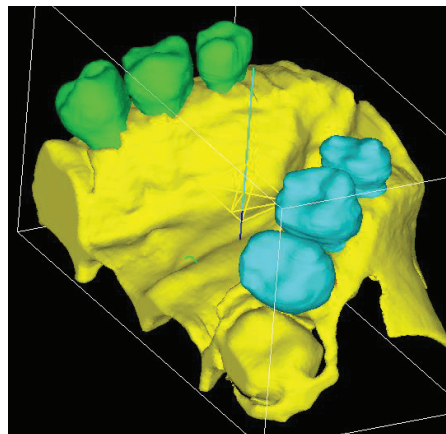
【結果および考察】

下顎骨に植立されたスクリュー成否の評価基準として、機械的パラメータは最小主ひずみ、歯槽骨の領域では領域 2 (0.5～1.0 mm) が適切であると推察された($R^2 = 0.8033$)。上下顎骨共に領域 2 (0.5～1.0 mm) の主ひずみにおいて成功群と脱落群の間に差があると考えられた。予測式によると、領域 2 の最小主ひずみが $-474 \mu\text{strain}$ の場合、スクリューが脱落する可能性は 5 %であった。一方、スクリューが脱落する可能性は領域 2 の最小主ひずみが $-663 \mu\text{strain}$ で 50 %、 $-852 \mu\text{strain}$ で 95 %と予測された。スクリュー表面から 0.5～1.0 mm の範囲の骨の主ひずみの増大が、上下顎骨ともにスクリューの脱落に最も関連しており、下顎骨では上顎骨よりも小さな主ひずみでスクリューの脱落が起こることが明らかとなった。このことから、スクリューの脱落には主応力や相当応力よりも主ひずみが重要な役割を果たしていることが示された。次に、臨床的因子がスクリューの周囲の骨の主ひずみに与える影響を検討した。患者の骨密度、スクリューと隣接歯根との距離、スクリューの垂直的植立角度が上下顎骨ともに主ひずみに有意に関連していた。スクリュー植立

前に CT 撮影を行い骨密度が低い部位への植立を避け、スクリユ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ユーを傾斜させて植立することでスクリユ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】

スクリユ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ユ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ユーのガイドラインにおいても指摘されている。このような問題に対して、ブタの下顎骨にスクリユ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ユ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ユーを植立し、スクリユ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ユ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、スクリユーと縫合との位置関係によるスクリユ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、スクリユ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、患者毎にスクリユー植立前に最適な植立部位や荷重量、スクリユ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。



2025CR-ME-11 データサイエンスに基づく医療工学研究

九州情報大学 荒平 高章

【緒言】 皮膚創傷に対して、消毒をしない、乾かさない、水道水でよく洗うという 3 原則に基づく治療法が普及している。現在、ハイドロゲル、ハイドロコロイド、ハイドロポリマーなど、ドレッシング材と呼ばれる創傷部の被覆材が用いられている^(1,2)。ドレッシング材に求められる性質としては、ゲルやフィルムを形成できること、保水力が高いこと、生体適合性に優れること、生分解性を有することなどがあり、現在アルギン酸ナトリウムを用いたハイドロゲルなどが利用されている⁽³⁾。そこで本研究では、天然高分子の中でも九州で多く採取されているスイゼンジノリを由来とするサクランに着目した⁽⁴⁾。サクランには保水性・抗炎症性・高粘性などの特徴があることから、ドレッシング材として有用であると考えられる。そこで本研究では、この天然高分子サクランが足場材として有用かどうかについて基礎的評価を行った。

【方法】 4%アルギン酸ナトリウム水溶液 (Alg4) と、2%アルギン酸ナトリウム水溶液 (Alg2) にそれぞれサクラン (0.5%, 1%, 2.5%) を混合させたものを、48well プレートに充填し、その上から 1%塩化カルシウム水溶液を充填しアルギン酸ナトリウムを架橋させた。架橋後、ウェルプレートから試料を取り出し、1 分後に試料を撮影し、得られた画像から Image J を用いて試料の直径を計測した。ウェルプレートの直径と試料の直径をもとに膨潤率を算出した。また圧縮試験 (500 N のロードセルで 1 mm/min) を行い、得られた荷重値、変位値から、応力-ひずみ曲線を作成し、曲線の初期線形領域における傾きからヤング率を算出した。

【結果】 サクランの濃度が高くなるにつれて試料の直径は大きくなる傾向を示した。アルギン酸ナトリウムの濃度が小さい方が膨潤率は高くなる傾向にあり、サクランの濃度が大きいほど膨潤率は高くなる傾向を示した。アルギン酸ナトリウムは反応の過程で塩化カルシウムによる架橋作用によって収縮する性質があるため、濃度の高い Alg4 の方が直径・膨潤率ともに低い値となったと考えられる。また、圧縮試験の結果より、サクラン含有量が 1%のものが最も高い弾性率を示した。

【結言】 本研究で作製した足場材は、膨潤効果に優れた材料であることが明らかとなった。この膨潤効果が皮膚組織における創傷部位の被覆材料や、他の組織の欠損部位の補間材料として有用であると考えられる。

【参考文献】 (1) Fayyazbakhsh, F., & Leu, M. C. (2020). A brief review on 3D bioprinted skin substitutes. *Procedia Manufacturing*, 48, 790-796.
(2) Si, H., Xing, T., Ding, Y., Zhang, H., Yin, R., & Zhang, W. (2019). 3D bioprinting of the sustained drug release wound dressing with double-crosslinked hyaluronic-acid-based hydrogels. *Polymers*, 11(10), 1584.
(3) Shojaee M., Navaee F., Jalili-Firoozinezhad S., Faturechi R., Majidi M., Bonakdar S., *Mater. Sci. Eng. C Mater. Biol. Appl.*, 48,158-164 (2015).
(4) Sornkamnerd, Saranyoo, et al. "Micropatterned cell orientation of cyanobacterial liquid-crystalline hydrogels." *ACS applied materials & interfaces* 10.51 (2018): 44834-44843.

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・理工学研究科 久保田 健

目的

高ソリディティを有する抗力型の風車の CFD 計算において、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ゴールに据えて、CFD 計算と実験データの蓄積を継続中であって、今回 1/3 寸法となる直径 100mm の風車を風洞実験に供した。

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 に示すような直線 8 枚翼の垂直軸型であって外直径は 100mm、上下は丸天板を用いず梁構造（厚み 2mm）で翼を支持している。軸方向のスパン長は従前の値（300mm）を基準に 75~225mm の 4 条件とした。

トルク計測には UTMII-1.0NmR（ユニパルス社製）を、周速比制御には HB10（小倉クラッチ社製）を用いた。

CFD 計算は Ansys-FLUENT を用いて URANS (SST $k-\omega$) で行った。メッシュ設定等はここでは割愛するが、風車 0.5deg/step で 4 周、残差判定閾値を 10^{-4} 、計算最終時間ステップにおける y^+ は 0.87~1.09 であった。

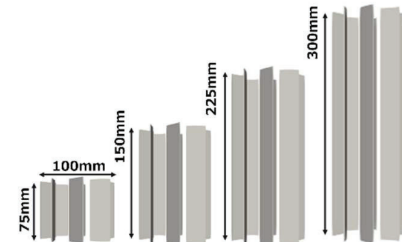


図 1 実験に用いた風車外観と寸法

結果と考察

図 2 は時計回転する風車が最大トルクを発生しているアジマス角におけるスパン方向へ流れの分布で、それぞれ風車端部から 5%位置として表示している（CFD 計算）。流れは図の左から風車に流入するが、ロータ内部でスパン方向に負の値を示すことからソリディティ影響で流入風はロータ内へ流れ込みにくくなっていることが分かる。またスパン長を無次元化した上でのコンター図からはスパン長が長いほど濃淡は薄く、外部流体の流入が少ないことが分かる。実験結果についてここでは詳細に示さないが、スパン長/直径アスペクト比の大きな風車でパワー係数や終端周速比が高い値を示す実験傾向について、CFD 結果よりその起源を得ることができたと考える。

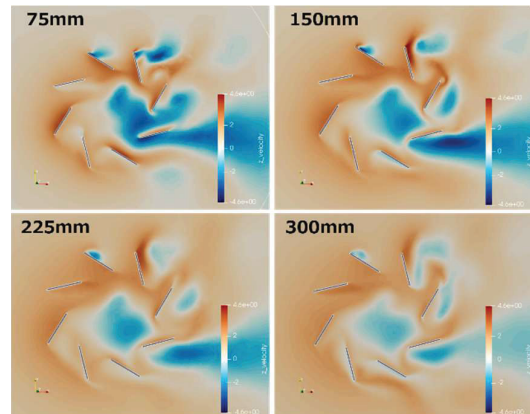


図 2 風車端部から 5%位置におけるスパン方向（z 方向）の速度場

研究成果報告

発表論文：3 件（うち 2 件は修士学位論文）、学会発表：2 件、詳細は別紙参照。

研究体制

研究代表者：久保田 健（弘前大学理工学研究科・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・博士後期 1 年）、加藤 隆一（同・博士前期 2 年）、

芳賀 巧己（弘前大学地域共創科学研究科・修士 2 年）、阿部 真知（弘前大学理工学部・4 年）

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) の Transverse cut において、遠位の皮質が骨折することを外側ヒンジ部骨折と呼ぶが、その力学的メカニズムについては不明な点が多い。本研究では、CT-FEM を利用して OWHTO 後に生じる骨折のメカニズム解明を目的としている。

2. 解析方法

使用した CT データは、内側型変形性膝関節症の 64 歳女性である。プレート、スクリューの CAD データはアスピシャス社のものを使用し、Mechanical Finder を用いて有限要素解析を行った。OWHTO において、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。脛骨関節面に平行に骨切りしたモデル (A) と、脛骨骨軸に垂直に骨切りしたモデル (B) 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た (C と D)。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。骨のヤング率と降伏強度は Keyak 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 にプレート周辺での骨の微視損傷分布を示す。白が引張損傷、赤が圧縮損傷を示している。引張損傷、圧縮損傷ともに脛骨関節面に平行に骨切りしたモデルの方が発生数が多く、特に圧縮損傷は 2 倍程度の大きな差が生じていた。また、人工骨を挿入した方が、微視損傷の発生が少ない傾向にあった。

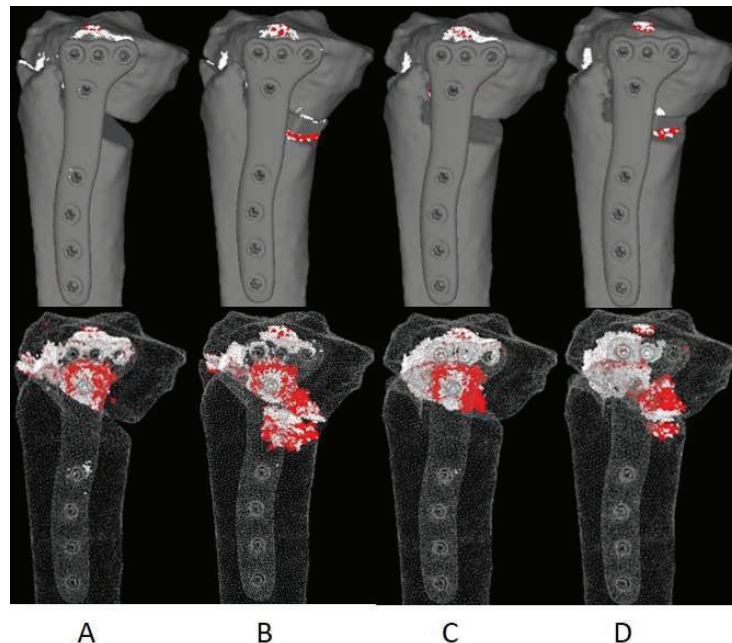


図 1 プレートの周囲に発生した骨の微視損傷の分布状態

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

It is well known that the macroscopic mechanical properties of bone are closely related to the micro- and macrostructural features. However, no theoretical model has been developed to correlate the mechanical properties and the structural characteristics. In the present study, a theoretical model was developed to correlate the elastic modulus of bone and a structural property such as BMD along with the mechanical and structural properties of carbonate apatite and collagen.

2. Theory

In this theoretical modeling, cortical bone is firstly considered as an ideal poroelastic medium along with the theory of composite material. Based on the poroelasticity, the elastic modulus of cortical bone can be obtained as a function of the elastic modulus, E_s , of bone tissue without pores, and the porosity of cortical bone. On the contrary, the cubic strut model was introduced into the modeling of trabecular bone. The elastic modulus of trabecular bone can be expressed as a function of E_s , and the porosity of trabecular bone. The volume fraction of bone tissue V_{BT} can be expressed as a function of porosity. Then, by assuming a linear relationship, we get the Young's modulus-BMD relationship. According to Wanger's model, the bone tissue is considered to be a three-layer structure of lamellae consisting of thick and thin lamellae. Then, based on the concept of the theory of composite material, E_s can be expressed using the volume fractions and the elastic moduli of thin and thick lamellae. The elastic moduli can be calculated from the longitudinal modulus, the transverse modulus, and the shear modulus of the lamellae. Those parameters are also expressed as functions of the elastic moduli of the apatite platelets and the collagen matrix, along with Padawer and Beecher theory.

3 Results and discussion

Results of calculation of the Young's modulus-BMD relationship are shown in Figure 1. The variational tendencies of E with increasing BMD obtained from the hybrid models are basically consistent with the empirical formulae of Keyak and Keller, and the predicted values are lying between the Keyak and Keller's values. These results validate the theoretical models. It is interesting to note that when BMD is low, the variational trends of the three theoretical results are more similar to that of Keller formula, while they are consistent with Keyak formula when BMD is high. It is thus concluded that the E-BMD relationship can be well predicted by using the macroscopic models, and the effects of bone quality on the E-BMD relationship can be controlled by using the microscopic model.

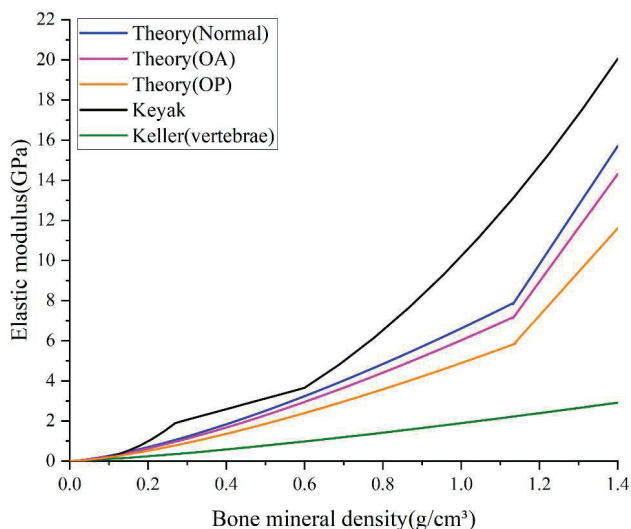


Fig.1 Variation of Young's modulus with BMD from PB model.

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

In this study, previously, two femoral bone models with different bone quality were developed from CT images of two female patients. Three different stem models of THA were then implanted into the bone models and their FE models were analyzed using nonlinear theories under four different falling conditions. Effects of bone quality, stem design and falling condition on the femoral damage mechanism were then investigated.

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, the falling loading and boundary conditions were adapted from well-established studies. The analysis was terminated at the load after the complete failure of shell elements.

3. Results and discussion

Distributions of element failures with stem I and stem III are shown in Figure 1. The damaged solid elements expressed the distribution of internal micro-damages of bone at both the initial and final stages of fracture, while the damaged shell elements indicated the distribution of external micro-damages of the outer surfaces at the final stage of fracture. It was observed that the initial damages were concentrated in the region close to the shoulder of the THA stem in bone X, despite having different implant designs. The damage initiation was seen to be scattered at several locations along the stems. At the fracture stage, it was found that the micro-damage formation occurred at the trochanteric region in all the THA models of both bone X and bone Y. This type of fracture mode drew a parallel view to type A_G in the Vancouver Classification of periprosthetic fracture.

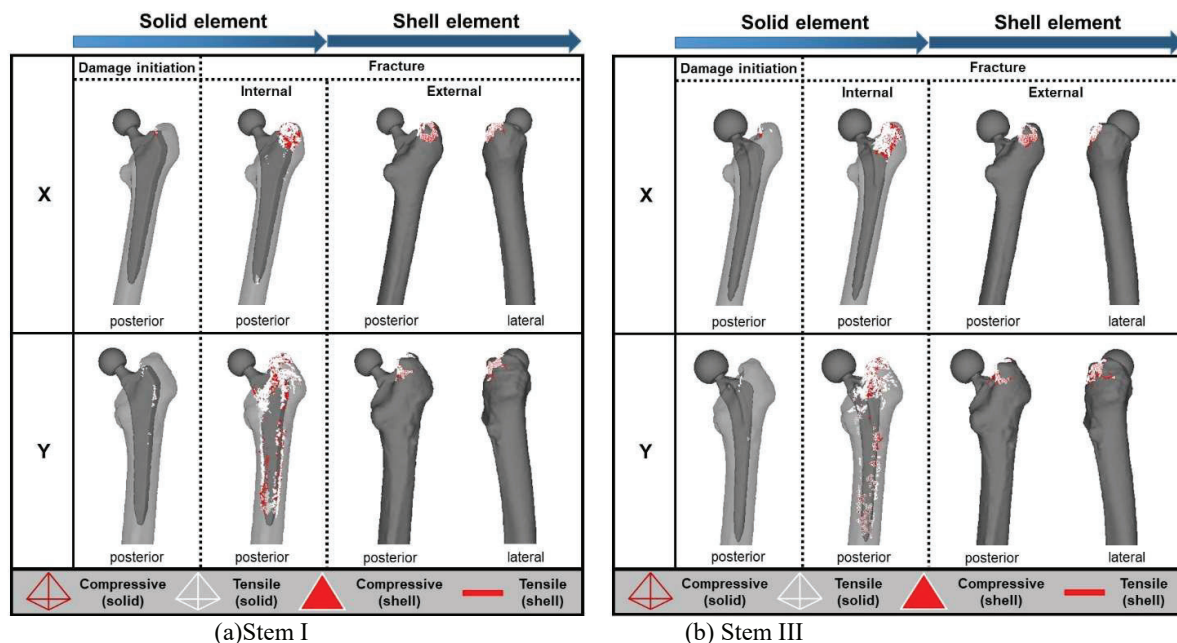


Figure 1 Distribution of element failures in bone X and Y.

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 (RCCM) 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 from Saga University Hospital. Making the fractured vertebra as the center, three spines of 7 pieces were extracted from CT-images, 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

Figure 8 shows that the bending movement took place surrounding the fracture. In case No.1, the fractured part was T12 where the primary fracture occurred. It's a typical case that due to the geometric deformation from the primary fracture, the structure of fractured vertebra becomes unstable and prone to deform by a load again. In case No.2, L2 and L1 were fractured simultaneously and the fracture was more obvious in L2, which fits the vertebrae strength ranks that L2 held the weakest strength in case No.2. In case No.3, the deflection was not obvious because the movement was constrained in x-y plane on the top of the spine in case No.3 in order to avoid a consequence that a large backward deflection appears in the simulation, which contradicts a fact that the spine is limited by the muscles and ligaments in human's body and it's hard to be bend backward. By making such a constraint, the bending moment increased slowly and was not so significant that the main load type was compression in case No.3. As a consequence, T12 was the first fractured vertebra because it held the weakest strength in case No.3 and it bore the largest normal compressive load according to force analysis.

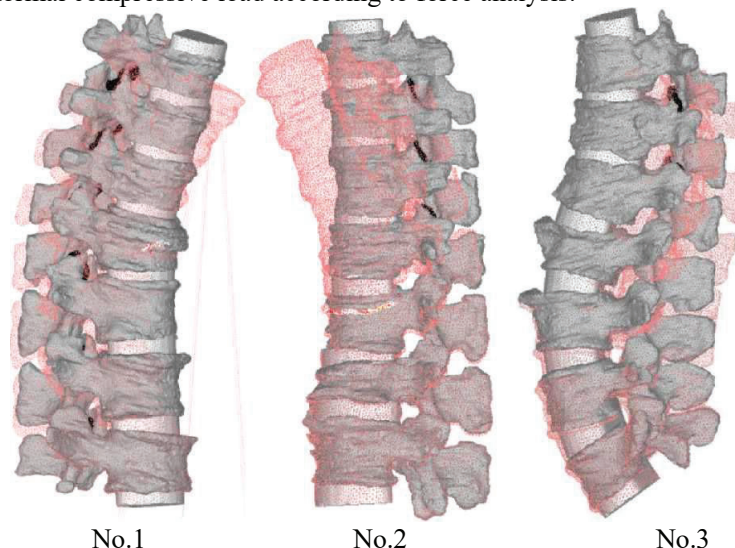


Figure 1 The deformation in three cases.

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上部接続の劣化とデバイス下部のハンダ接続の劣化がそれぞれ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

半導体チップとハンダ接合部からなる 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 1 に示す。半導体チップ上部のワイヤ接続が一部切断、動作停止した状態を模擬するため、それを除いた領域にのみジュール発熱を仮定し、発熱時の温度分布およびひずみ分布を求めた。図 2 は左から順にハンダ接合部の損傷がない状態(E05r)、ワイヤ切断領域(OFF 領域)直下にボイドが発生した状態(E05a)、チップ中央にボイドが発生した状態(E05b)、ON 領域直下にボイドが発生した状態(E05d)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分布を示しているが、損傷の駆動力として考えられるひずみ振幅の大きさは、OFF 領域の近くで高いことがわかる。これは損傷の進行速度が OFF 領域で加速されることを示している。一方で、実際に発熱部の熱抵抗が初期値から 20% 上昇するまでを寿命とした場合、OFF 領域は熱抵抗に寄与しないため、その寿命はひずみの最大値ではなく、ON 領域のひずみ状態に律速されることを示唆する。

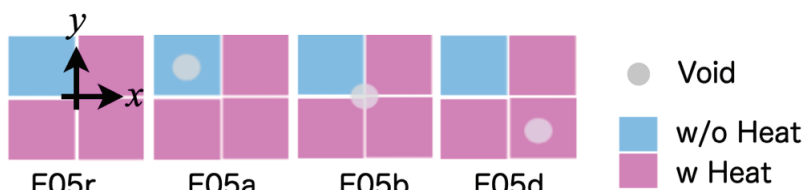


Fig.1 Operation condition with different void under the Si chip.

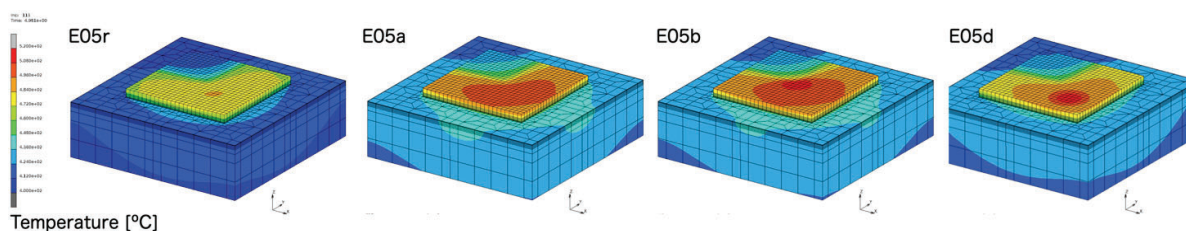


Fig.2 Temperature distribution at ON phase.

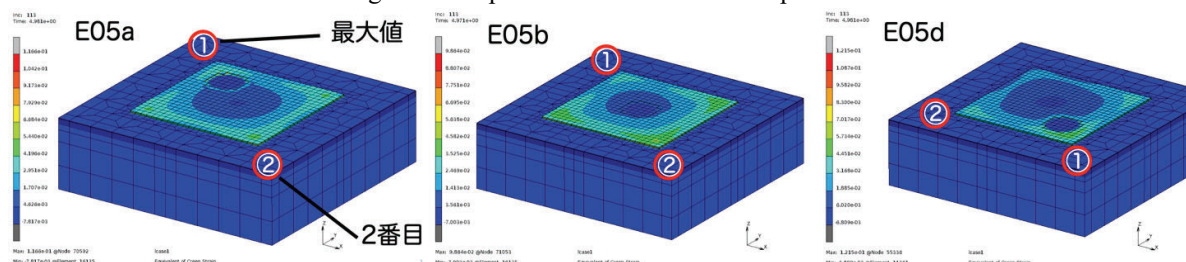


Fig.3 Creep strain distribution at ON phase.

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創製

崇城大学工学部機械工学科 中牟田侑昌

【緒言】近年, Schroeder らにより, 電気ウナギの発電器官を模擬した積層ハイドロゲル電池が報告され, 柔軟性と十分な起電力を両立する新しいソフト電源として注目されている. 本電池は, 電解質の濃度勾配を駆動力としてイオンが高濃度側から低濃度側へ移動し, 界面で電荷配列が変化することで電位差が生じる (Fig.1). 従来の生体内電源は硬質なものが多く, 生体組織との力学的不適合や装着部の負担が課題となり得るが, ゲル電池は指で曲げられるほど柔軟であり, インプラントやウェアラブル機器への応用可能性が示唆されている. 一方, 本研究の最終的な目標は, 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を構築し, 電気化学的エネルギーから機械的エネルギーへの変換効率を評価することである. そのためには, まず電池単体としての電力特性および力学特性を明確に把握する必要がある. そこで本研究では, 電解質材料を NaCl から二価イオンを有する CaCl_2 へ変更し, イオン価数の増大が電力特性に及ぼす影響を解明するとともに, 圧縮試験を通じて多価イオンによるゲルネットワーク補強が力学的適合性に与える効果を明らかにすることを目的とした.

【実験方法】ゲル電池の高出力化と力学特性評価のため, 電解質の異なるゲル電池を作製し比較した. ゲルは, 高塩分 ($\text{NaCl}/\text{CaCl}_2$), 低塩分 ($\text{NaCl}/\text{CaCl}_2$), 陽イオン選択性 (AMPS), 陰イオン選択性 (APTAC) の計 6 種を用意し, 所定量のモノマー溶液に硬化剤を添加後, レーザー加工により孔を設けたアクリル板型に注入し, UV 照射により硬化させた. 硬化後, 厚さ 2 mm のゲルを積層し, 両端に銅板電極を配置して単電セルを構成した. 電力特性はデジタルロガー (GL220) を用い, 30 分間測定して 1 分毎の電圧・電流を記録した. また, 外部負荷に対する電池としての機能確認として, 回路に 100 Ω 抵抗を組み込んだ条件でも測定した. 力学特性は, 厚さ 2 mm の各ゲルを対象に卓上型引張圧縮試験機 (EZ-Test EZ-LX) を用い, 1 mm/min で圧縮し応力-ひずみ関係等を評価した.

【結果と考察】まず, 100 Ω 抵抗を接続した負荷条件においても, 測定開始時から十分な電圧・電流が得られ, 30 分後も安定して電力を供給した. これより, 本デバイスが外部負荷に対して電力を供給する電池として機能することが示された. 次に, 電解質材料の違いによる電力特性を比較したところ, NaCl 系に比べ CaCl_2 系で電圧・電流とも高い値を示し, 30 分後の低下も小さい傾向を示した (Fig.2, Fig.3). CaCl_2 が高出力を示した要因として, (1)二価イオンにより同モル濃度でも電荷キャリア密度が高いこと, (2) Ca^{2+} と高分子鎖との静電相互作用が強く, 界面近傍のイオン分布が安定化し電位差が増大した可能性, (3) CaCl_2 の吸湿性により含水率が維持され, イオン移動環境が安定化して内部抵抗低減に寄与した可能性が考えられる. さらに圧縮試験では, NaCl 系と比べ CaCl_2 系で最大ひずみが高濃度・低濃度ともに向上し, 特に低濃度条件では最大圧縮応力が大きく増加するなど, 概ね全条件で力学特性の向上が確認された. これは多価イオンによるゲルネットワーク補強の効果と考えられ, 柔軟性と強靱性を両立する力学的適合性の高い生体電池としての可能性が示唆された. 加えて, 本研究では作製した積層ハイドロゲル電池を用いた電子機器の起動試験にも成功しており, 小型 LED や簡易モジュールの駆動を確認した. 計測上の起電力に留まらず実用的電源としての成立性を裏付ける成果である. これらの結果は, 今後予定しているモーター駆動試験や小型ロボット走行試験における機械的エネルギー変換効率評価に向けた重要な基盤データとなるものであり, 本研究の最終目的である機械エネルギー変換システム構築への有効なステップであると位置付けられる.

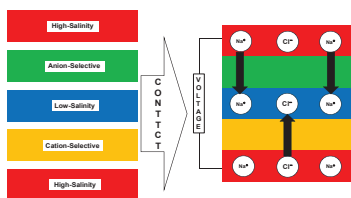


Fig.1 Power Generation Mechanism

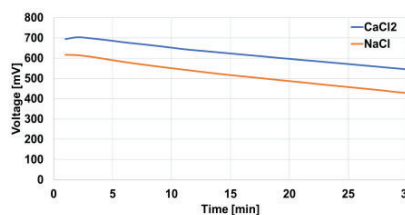


Fig.2 Change in voltage value over time

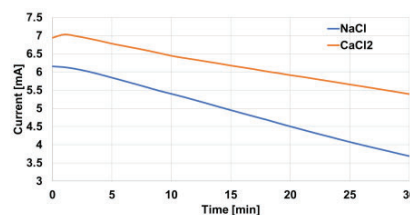


Fig.3 Change in current value over time

【研究成果報告】本研究成果は 2025 年度に学術会議にて 3 件の発表を行った.

(さらに 1 件査読付き国際会議にて発表予定であり, 採択済である).

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

腰椎、骨盤、大腿骨から構成される大規模モデルの構築と
整形外科バイオメカニクス研究への応用

横浜市大整形外科 稲葉 裕

1. 緒 言

Hip-Spine Syndrome については、様々な臨床報告がなされているものの、力学的観点から議論した報告は少ない。このような背景から本研究では、高齢者の CT データを基に、大腿骨・骨盤・腰椎を含む 3 次元モデルを構築し、有限要素解析を用いて両足立ちおよび片足立ちにおける立位姿勢の変化が腰椎の応力分布に与える影響を検討した。

2. 解析方法

81 歳男性の CT 画像を Mechanical Finder ver.13 で読み込み、大腿骨 2 個、寛骨 2 個、仙骨 1 個、第 1 腰椎から第 5 腰椎までの椎骨 5 個を含む 3 次元有限要素モデルを作成した。椎体間および各関節間には、椎間板や各関節軟骨等の軟部組織を挿入した。骨の各部位と軟部組織の力学モデルとして線形弾性モデルを採用した。骨のヤング率は Keller らによる椎体の計算式を用いて各要素の骨密度から算出した。荷重条件として、1800N が衝撃力として作用したと仮定した。両足立ちの場合は、左右の大腿骨遠位部に均等に 900N を負荷し、片足立ちの場合は、左大腿骨遠位部のみに 1800N を負荷した。拘束条件として、第 1 腰椎上部の椎間板と椎体突起を完全拘束し、左右の大腿骨遠位部は、内転筋結節より下の領域を対象に鉛直方向以外の移動を拘束した。

3. 結果と考察

立位姿勢の異なる 2 種類の境界条件での相当応力分布を Fig.1 に示す。両足立ちの条件下では仙腸関節周囲、および椎体 (L1, L4, L5)、大腿骨近位部を中心に高い応力が確認され、相当応力は全体的に左右に均等に分布している傾向を示した。一方、片足立ちの条件下では、荷重を負荷した左足側に高い応力が偏在し、非対称な分布が認められた。これらの結果は、大腿骨、骨盤、腰椎が軟部組織を介して力学的に相互に作用を及ぼし合う状態であることを示唆している。

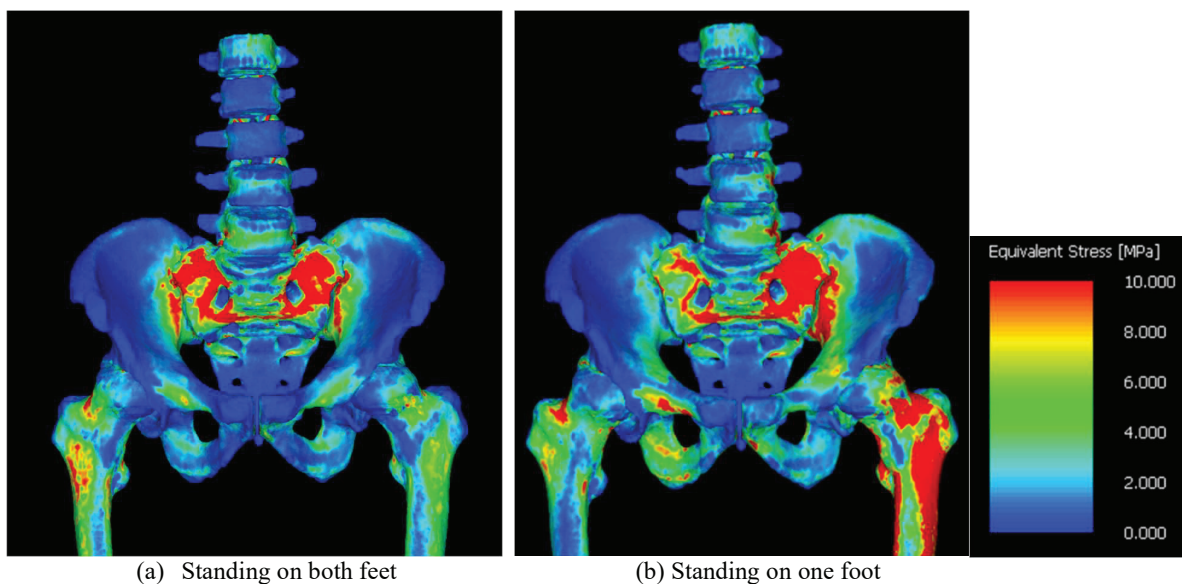


Fig.1 Equivalent stress distribution on the surfaces.

小型微風力発電用柱状物体の3次元周囲流れに関する実験的研究

三重大学 大学院 工学研究科 機械工学専攻 鎌田泰成

目的

IoT センサの電源として、電池に代わる超小型発電機の活用が求められている。身の回りの振動を電気エネルギーへ変換する振動発電は、外部電源を必要とせず、昼夜や天候に左右されない電源として期待されている。本研究では、空気や水の流れによって振動が発生するあらゆる物体に適用でき、環境中に普遍的に存在するエネルギーから微弱な電力を取り出せる可能性があることから流体力学振動発電に着目した。

本研究室にて行われた先行研究で熱線流速計を用いた多点同時計測により、低速ギャロッピングが発生する柱状物体の振動特性と周囲流れ場の関係が考察されている。しかし、課題として低速ギャロッピング発生時における振動物体周囲の3次元流れ場は未解明な点が多く、片持ち支持の振動矩形柱における3次元揚力分布と周囲流れ場の関係は不明確である。先行研究において、柱状物体の高さ方向にわたる揚力係数分布の計測から、上端部における循環および揚力係数は上端から放出される渦の影響により急激に減少することが示唆されている。そこで本研究では、柱状物体上端部の形状に着目し、上端から放出される渦を抑制することで揚力係数および発生させるエネルギーの向上を図る。具体的には、風車翼において翼端渦の制御効果が示されているチップベーンを柱状物体上端部に適用し、その効果を実験的に評価する。

実験方法

本研究では、吹出風洞内に設置した柱状物体（主流方向長さ $D=16[\text{mm}]$ 、主流直交方向長さ $H=40[\text{mm}]$ 、高さ $L=200[\text{mm}]$ ）を板ばねで弾性支持し、主流直交方向（Y 方向）に一自由度で振動させた。ここで、主流方向を流れ方向（X 方向）、物体が振動する方向を主流直交方向（Y 方向）、物体の高さ方向をスパン方向（Z 方向）と定義する。柱状物体上流に設置した2本のI型熱線流速計を主流直交方向（Y 方向）、スパン方向（Z 方向）に移動させ、柱状物体前面の周囲流れを測定した。また、熱線流速計より測定した2点の誘起速度から循環および揚力係数を求めた。なお、本研究で求めた揚力係数分布は、柱状物体が主流直交方向（Y 方向）の負側最大変位から正側最大変位へ移動する振動半周期のみを対象としている。さらに、同時に板ばねに取り付けたひずみゲージより振動変位データを取得し、併せて評価した。

実験結果

辺長比 $D/H=0.4$ の柱状物体はチップベーン無し、チップベーン有りいずれにおいても、主流直交方向（Y 方向）の負側最大変位から振動変位の中心位置まで移動するときに高い揚力係数を示した。また、揚力係数はスパン方向位置 Z/L （翼端付近）の増加にしたがい大きくなる。特に、スパン方向位置 $Z/L=0.8$ で最大値を示した。また、いずれの柱状物体も揚力係数は振動変位の負側最大変位から正側最大変位まで移動するにしたがい減少した。さらに、チップベーン有り柱状物体の揚力係数は、チップベーン無し柱状物体に比べていずれのスパン方向位置において $0.1\sim0.2$ 程度増加した。

考察

本結果より、柱状物体は主流直交方向（Y 方向）の負側の最大変位から振動の中心位置まで移動する過程において、平均的に高い揚力係数を示しており、つまり大きな推力発生で、風からエネルギーを受け取っていると考えられる。

また、揚力係数はスパン方向上端部で大きくなるため、上端部における柱状物体の構造と3次元的な流れ構造が揚力発生に関与していると推察される。これは、上端部の振動変位は下端部に比べ大きく、流れと直交方向に移動する物体により誘起される渦および循環の強さに影響を与えている可能性がある。よって、柱状物体上端部付近の形状を工夫することでより高い揚力係数を得られる可能性がある。加えて、振動変位が小さい下端部の形状も変更することで柱状物体全体の揚力係数を増加させられる可能性がある。

さらに、チップベーンによる揚力係数の増加は、全スパン方向位置 Z/L で確認でき、上端部から放出される渦が制御され、循環が維持あるいは強化されたことを示していると考えられる。したがって、チップベーンを取り付けることでより多くのエネルギーを風から受け取れる可能性がある。

核融合および水素エネルギー利用を兼ね備えた複合施設を利用する社会のあるべき姿

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、および持続可能なエネルギー社会の実現に向け、核融合発電の早期実現に向けた注目度が増している。他方、核融合エネルギーは核分裂炉の代替えとしてベースロード電力として使用するという説明が続いている。近年の電気料金の高騰、持続的なエネルギー資源を輸入することへの懸念などの社会情勢の変化を背景に、まだ商用化されていない発電方法の開発競争がベンチャー企業を中心に活発化している。これらの状況を踏まえた議論をすることなく、核融合発電が社会実装されるのは困難である。社会からのニーズがあってそこ、次世代エネルギーが利用されれば、社会から求められるエネルギー形態を有するプラントとして核融合炉の設計を現時点から検討を進めておく必要がある。核融合反応から得られる熱から製造する水素は製造時に CO₂ を排出することのないグリーン水素であり、カーボンニュートラル社会への貢献が大いに期待される。また、重水素トリチウムを燃料とする核融合炉では、運用開始後はトリチウムの自己増殖を目指す。重水素は海水に含まれており、無尽蔵である。つまり海に囲まれている日本が、これまでの輸入に頼るのではなく、エネルギー資源を自国でまかなうことが可能となり得る。

本講演会では一昨年度より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講演を行っており、今年度は産業分野でそれぞれ取り組む講師の方々に講演を依頼した。講演会の翌日には九州大学の水素エネルギー国際協力センターの見学を実施した。

2. 開催日時、場所、参加人数

1. (1) 日程： 2026 年 1 月 26 日 (月) 13:30 – 17:00 講演会 + QUEST 装置見学
1 月 27 日 (火) 10:00 – 11:00 見学会
- (2) 場所：1 月 26 日 九州大学 筑紫キャンパス応用力学研究所 QUEST 棟会議室
1 月 27 日 九州大学 水素エネルギー国際協力センター
- (3) 参加人数：1 月 26 日 27 名
1 月 27 日 19 名

3. 参加者リスト

1	花田和明（世話人）	九州大学	大学
2	平野直樹（オーガナイザー）	核融合科学研究所	国研・機構
3	仲村直子（オーガナイザー）	核融合科学研究所	国研・機構
4	西村 美紀	京都フュージョニアリング	企業
5	本坊 亮吉	J-フュージョン	企業
6	森 裕貴	日本水素ステーションネットワーク	企業
7	井上 恭豪	NEDO	国研・機構
8	石山 敦士	早稲田大学	大学
9	大屋 正義	関西学院大学	大学
10	鳥居 武史	（株）アイシン	企業
11	小畑 慶人	三菱電機	企業
12	大橋 義正	（株）アイシン	企業
13	中村 美幸	Faraday Factory Japan	企業
14	梅野 高裕	九州大学	大学
15	八島 滋	東陽テクニカ	企業
16	池 康宏	川崎重工業	企業
17	田口 裕章	ジェック東理社	企業
18	泊瀬川 晋	Gauss Fusion GmbH	企業
19	川島 健司	イムラ・ジャパン	企業
20	宮崎 大輔	ナガセテクノエンジニアリング	企業
21	吉野 政俊	日本オートマテック・コントロール	企業
22	市川 雅幸	日本オートマテック・コントロール	企業
23	王 世淳	日本オートマテック・コントロール	企業
24	菱沼良光	核融合科学研究所	国研・機構
25	小川 敬	日本水素ステーションネットワーク	企業
26	小林 翔太	JERA O&M	企業
27	大山 達也	トクヤマ	企業
28	高林 卓様	助川電気工業	企業

*企業 20 名、 大学 4 名、 国研・機構 4 名

4. 研究会プログラム

1月26日(月)

- 13:30-13:40 開会の挨拶 花田 和明 (九州大学応用力学研究所)
- 13:40-14:10 水素ステーションの現状と今後の取組について 森 裕貴 (JHyM)
- 14:10-14:40 水素技術開発に関する NEDO の取り組みと今後の方向性 井上 恭豪 (NEDO)
- 14:40-14:50 休憩
- 14:50-15:25 フュージョンエネルギー産業の創出に向けて 本坊 亮吉 (J-フュージョン)
- 15:20-15:55 核融合エネルギーの産業応用可能性と社会実装に向けた課題
-京都フュージョニアリングの活動を例にとって- 西村 美紀 (京都フュージョニアリング)
- 15:50-16:00 閉会の挨拶 平野 直樹 (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)
- 16:00-17:00 QUEST 見学

1月27日(火)

- 10:00-11:00 九州大学 伊都キャンパス 水素エネルギー国際協力センター見学

5. 発表概要

森 裕貴 (JHyM)

「水素ステーションの現状と今後の取組について」

日本水素ステーションネットワーク合同会社(JHyM)および水素ステーションの現状について紹介された。特に、水素ステーションの整備の遅さや水素価格がなかなか下がらないことの理由について説明があった。今後は自家用車から商用車へ燃料電池自動車に移行するとのことであった。

井上 恭豪 (NEDO)

「水素社会実現に向けた政策動向と NEDO における研究開発プロジェクト」

日本政府の水素基本戦略や法律の内容や国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)組織について紹介された。水素を作る、運び、使うに分けてそれぞれ NEDO プロジェクトや基金を用いて開発が進んでいるとのこと。近年の地産地消での水素利活用プロジェクトが進んでいるとの説明であった。

本坊 亮吉 (J-フュージョン)

「フュージョンエネルギー産業の創出に向けて」

一般社団法人フュージョンエネルギー産業協議会(J-フュージョン)では、フュージョンエネルギーの市場創出に向けた企業を中心に活動を行う協議会で、現在 100 組織以上が参画している。政策提言や法律の策定などに注力しているとの説明であった。

西村 美紀 (京都フュージョニアリング)

「核融合エネルギーの産業応用可能性と社会実装に向けた課題」

京都フュージョニアリングの会社概要やプロジェクトのコンセプトについて説明された後に、核融合の

現行の課題や技術レベルについて紹介があった。京都フュージョニアリングではプラズマを作った後の発電までの技術開発だけでなく、最近ではプラズマの磁場閉じ込めについても開発を始めたとの説明があった。



写真 1. QUEST 見学の様子



写真 2. 水素ステーション前での集合写真

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、今年度は水素や核融合分野の政府、協議会、国プロジェクトの動向をテーマに講演会を開催した。水素や核融合のそれぞれの分野では、当該組織で政策提案や開発の方向性について議論がなされていることを理解した。1/26 の講演会後に QUEST の見学を行い、水素分野の関係者からは、核融合が想定よりも進んでいることが興味深かったとのコメントを頂いた。1/27 の水素エネルギー国際協力センターでは、九州大学で行われている燃料電池や水素ステーションの見学があり、核融合分野の関係者からは、水素の社会実装の現状や課題が分かり良かった、との感想を得た。

以上

非線形プラズマ科学研究会 2025

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モデルに迫る研究テーマも扱う予定である。

2. プログラム

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15日、16日に開催した。発表プログラム、講演題目については以下の通りである。

非線形プラズマ科学2025、応用力学研究所2階会議室、12.15-16 2025

12.15 (月曜)

13:30 – 13:40: 事務連絡

Session I: 【乱流観測、輸送】

13:40 – 14:10:

遠藤貴洋（九州大学）「海洋乱流がもたらす鉛直混合の観測手法」

14:10 – 14:40:

堤英輔（鹿児島大学）「海洋の海底境界層乱流と潮汐現象」

14:40 – 15:10:

鈿持尚輝（核融合科学研究所）「磁場閉じ込めプラズマにおける非局所輸送を媒介する乱流構造の直接観測」

15:10 -15:40:

小山一輝（九州大学）「核融合プラズマにおける速度勾配と温度勾配が駆動する不安定性の競合と輸送干渉」

15:40 - 16:00: 休憩

Session II: 【宇宙プラズマ、データ解析】

16:00 - 16:30:

諫山翔伍（九州大学）「Physics Informed Neural Networks (PINNs)による MHD リコネクション動的構造の再構築」

16:30 - 17:00:

佐々木真（日本大学）「核融合閉じ込めプラズマの輸送研究におけるデータ駆動科学的研究の事例紹介」

12.16（火曜）

9:30 - 9:40: 諸連絡

Session III: 【惑星流体、熱対流】

9:40 - 10:10:

堀久美子（核融合科学研究所）「ガス惑星対流熱輸送における帯状流・ねじれ振動の影響」

10:10 - 10:40:

中島涼輔（神戸大学）「回転球面上の2次元非圧縮 MHD 波の quasi-mode」

10:40 - 11:10:

徳満優（九州大学）「シア熱対流における間欠的熱輸送とその制御」

11:10 - 11:40:

宇佐見壮平（九州大学）「状態方程式の非線形性を考慮した水平熱対流の数値実験」

11:40 - 13:00: 休憩

13:00 - 15:00: ブレイクアウトセッション

3. 発表概要

Session I: 【乱流観測、輸送】

乱流の時空間ダイナミクスや輸送への影響について、海洋と実験室プラズマの双方から観測結果の報告があった。乱流強度の発展方程式について、乱流散逸の直接計測が報告（遠藤貴洋）され、プラズマからは空間的な伝搬の観測について報告があった（釧持尚輝）。境界層領域における乱流散逸の観測についても報告があり、潮汐との関連が議論された（堤英輔）。乱流が輸送を駆動する結果、輸送が干渉する事例（運動量輸送と密度輸送）について報告された（小山一輝）。

Session II: 【宇宙プラズマ、データ解析】

本セッションでは、幅広い問題に適用可能となるデータ解析についての発表があった。PINNsを用いることで、磁気再結合を記述する方程式を推定する手法について報告があった（諫山翔伍）。突発的な揺動励起や輸送について、特異値分解を複数の物理量へ拡張した研究結果が紹介された（佐々木真）。

Session III: 【惑星流体、熱対流】

プラズマや流体系における対流、波動、流れなどの研究成果が報告された。木星における深さ方向の構造の時間発展と帯状流の時間変動について、観測結果及びモデリング研究について報告があった（堀久美子）。地球磁場の変動の原因として、地球内部を伝搬するアルフヴェン波に注目し、連続スペクトルによる散逸の有無に関する詳細な解析について報告された（中島涼輔）。熱対流現象に関する数値実験報告があり、対流と帯状流の相互作用の結果カオス的な輸送が起こることや（徳満優）や、状態方程式を拡張し非線形的な効果を含めた計算結果について報告があった（宇佐見壮平）。

4. 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	
釦持尚輝	核融合科学研究所	
佐々木真	日本大学	
堤英輔	鹿児島大学	
松本仁	福岡大学	
中島涼輔	神戸大学	
小菅佑輔	九州大学応用力学研究所	
遠藤貴洋	九州大学応用力学研究所	
恩地拓己	九州大学応用力学研究所	
池添竜也	九州大学応用力学研究所	
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	
諫山翔伍	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	○
小山一輝	九州大学総合理工学府	○
末継寅英	九州大学総合理工学府	○
宇佐美壮平	九州大学総合理工学府	○
堀本竜也	九州大学総合理工学府	○

プラズマ・地球流体における乱流・波動の計測と理論モデル

富山大学 成行 泰裕

1. 目的

宇宙天体におけるプラズマを伝搬する波動や乱流は多様であり、エネルギーや運動量の輸送・変換における役割も様々である。実験室プラズマにおいても波動・乱流の理解は重要な課題であるが、宇宙天体プラズマとの共通点(普遍性)と相違点(特殊性)には未解明な点も多く、分野融合を軸にした理解を進める必要がある。

一方で、人工衛星による「その場」観測や地磁気などの地上観測を軸にした宇宙プラズマの研究は地球物理学の一分野として発展してきた側面があり、「宇宙天気」など地球流体に関係する概念からの影響も大きい。現在では、人工衛星による「その場」観測の範囲が太陽圏外や太陽近傍まで広がるにつれて天文学・天体物理学との融合が自然に進んでいるが、今後の宇宙環境利用の進展を考えると地球流体とのアナロジーから学ぶことは多く、現代的な視点から宇宙天体プラズマの地球物理学的側面を捉えなおす必要がある。また、電気推進機関などの宇宙工学的観点まで含めると、中性流体研究における最先端の知見を共有する意義はさらに広がる。

そこで本研究集会では、分野融合を軸にした新たな研究シーズの創出や共同研究の立ち上げを目指し、プラズマ・地球流体中の波動・乱流現象に関する計測・データ解析および理論・数値モデルを題材にした分野融合について議論する場を提供する。宇宙プラズマ分野が各分野との接点となる研究集会になるため、地球電磁気・地球惑星圏学会波動分科会の後援を予定している。

2. 概要

本研究集会は 2025 年 11 月 5(水)-6(木)にかけて、対面・遠隔のハイブリッド(九州大学応用力学研究所 6 階 W601・Zoom)で開催された。当日のプログラムおよび講演概要は以下の通りである:

九州大学応用力学研究所研究集会

「プラズマ・地球流体における乱流・波動の計測と理論モデル」プログラム (2025.10.24)

○場所: ハイブリッド(九州大学応用力学研究所 6 階 W601・Zoom)

○日時: 2025 年 11 月 5(水)-6(木)

○後援: 地球電磁気・地球惑星圏学会波動分科会

○世話人: 成行泰裕, 松清修一, 小菅佑輔

○タイムテーブル

<11/5(水)>

9:30-10:30 受付

10:30-10:35 趣旨説明

10:35-11:00 成行 泰裕, 「太陽風磁気流体乱流の統計理論の現状と課題」

本講演では、太陽風乱流の非線形波動・乱流双方の側面について概観した後、磁気流体乱流の統計理論の立場から現状の理解を整理した。非等方な波数スペクトルを持つ磁気流体乱流の現象論として良く知られている Goldreich-Sridhar[1995]の EDQNM(eddy-damped quasi-normal Markovian approximation)と直接相互作用近似を用いた Nakayama[1999]の関係について示した後、べき指数や residual energy・cross-helicity との関係について議論した。最後に、グローバルの太陽風モデルを構築する際に必要になる一点クロージャを用いたモデルを考える際の課題について述べた。

11:00-11:45 稲垣 和寛, 「空間非一様性を伴う流体乱流における運動ヘリシティを介した乱流応力輸送」

プラズマや地球流体の物理において乱流による実効的な応力がもたらす運動量輸送は重要な役割を果たす。本講演では乱流応力の数値モデル表現の立場から、中性流体において、保存量である運動ヘリシティが運動量輸送におよぼす効果を議論した。特に、乱流場の運動ヘリシティと系の剛体回転の相互作用により、回転軸方向の平均速度が生成、維持される現象の数値計算を軸とした解析を行った。乱流応力の生成・輸送機構の解析から、運動ヘリシティが圧力と関連した項を媒介して運動量輸送に影響をおよぼすことを明らかにした。また、この効果は回転系における線形波動である慣性波と密接に関連するものであることを示し、物理的起源を明らかにした。ヘリシティのような鏡映非対称量を媒介とした乱流輸送効果は遍在すると期待され、本研究の成果はその物理的解釈の一つを与えるものとなっている。

11:45-13:30 昼休み

13:30-14:15 遠藤 貴洋, 「海洋乱流の観測手法の紹介」

海洋循環の強さやパターンは、鉛直拡散係数や鉛直粘性係数の時空間分布に大きく依存する。本講演では、これらの時空間分布の見積もりに向けた、海洋乱流の観測ならびにデータ解析手法の概要を紹介した。まず、乱流運動エネルギー散逸率の計測例として、乱流微細構造プロファイラーに搭載したシアープローブと、海底に設置した音響ドップラー流速プロファイラー(ADCP)による観測結果を、次に、乱流運動エネルギー生成率の計測例として、海底に設置した ADCP で得られたデータに分散法を適用した結果を紹介した。さらに、これらの観測結果から鉛直拡散係数や鉛直粘性係数を見積もる手法と、その際に用いられる混合効率の見積もりを目的とした、高速応答水温計による水温分散の散逸率の計測手法を紹介した。最後に、屈折率密度センサーを用いた海洋乱流観測の可能性を提示した。

14:15-14:40 竹広 真一, 「波動とシア不安定: 波相互作用と過剰反射」

2次元平行流の不安定性を理解するため、音波の伝播を議論した。線形シア流中で音波の伝播を数値計算した結果、波束を臨界点に向かって入射させると、振幅が増大した反射波が返ってくる過剰反射現象が観測された。この振幅増大は、波の運動量保存則から理解できる。さらに、入射側の後方に反射壁を配置すると、波が繰り返し臨界点に入射することで指数的な振幅増大、すなわち不安定化につながることを示された。このメカニズムから見積もった増幅率は、固有値問題の解として得られる不安定モードの成長率と整合的であった。加えて、運動量保存則からは、変曲点定理など、いくつかの積分定理が導かれることを示した。

14:40-15:05 休憩

15:05-15:50 吉川 顕正, 「宇宙磁場情報幾何学の開拓」

15:50-16:15 Takashi Tanaka, 「S-M-I 結合系におけるトポロジーと運動論効果」

太陽風-磁気圏-電離圏結合系において、太陽風の変動がどのように電離圏まで伝えられるかを考察した。この系は磁場とプラズマで構成されており、基本的には MHD で記述される。太陽風と磁気圏は起源の異なった磁化プラズマであり、その接触に際してヌルが発生する。ヌルとヌルを結ぶセパレーター上で凍結の原理が破れ、相互作用が発生する。その結果磁気圏にエネルギーが流入し、磁気圏対流が発生する。磁気圏対流にはダイナモが付随し、電離圏との間に FAC の交換が起こる。これによって電離圏では、磁場変動とオーロラが発生する。テーターオーロラはヌル構造が電離圏変動を与える典型例である。サブストームは太陽風変動が磁気圏内でのヌル発生を伴って、FAC 結合の変動として電離圏に伝えられるものである。

16:15-16:40 中原 寛太, 「強磁場環境下における相対論的電子・陽電子プラズマ中のアルフベン波のパラメトリック不安定性」

宇宙空間に普遍的に存在する大振幅アルフベン波は、高エネルギー宇宙線加速に重要な役割を果たすと考えられている。本研究では、強磁場環境における大振幅アルフベン波のパラメトリック不安定性に着目し、1次元 PIC シミュレーションにより調査した。磁化パラメータと親波の振幅を様々に変えた計算を行ったところ、パラメータによって崩壊不安定性の起こり方が定性的に変わることを見出した。発表では、この崩壊過程のパラメータ依存性について報告する。

16:40-17:05 Fan Yumeng, 「Plasma instabilities in a two-dimensional bounded system」

In collisionless magnetic reconnection, magnetic field fluctuations observed along the current sheet inside magnetic islands have been reported but cannot be explained by the Weibel instability because they show a finite wave number in the outflow direction. Here we account for weak electron magnetization inside the island current sheet, extract local plasma parameters from 2D PIC simulations, and perform enlarged-domain simulations. By analyzing the fluctuation morphology, k - ω spectra, and growth rates and comparing them with linear dispersion relations, we show that these fluctuations are consistent with the oblique electron firehose instability.

17:05-17:10 議論

<11/6(木)>

9:30-9:55 諫山 翔伍, 「Physics-Informed Neural Networks (PINNs) を用いた MHD リコネクション構造の再構築」

本講演では、Physics-Informed Neural Networks (PINNs) を用いて、限られたその場観測データから磁気リコネクションに伴う二次元 MHD 構造の時空間発展を再構成する手法を紹介した。数値シミュレーションを用いた検証を通じて、観測点を上流・下流に適切に配置することが再構成精度を大きく向上させ、衛星間隔より微細な構造も復元可能であることを示した。これらの結果は、将来の多点衛星観測ミッションにおける観測配置設計や、磁気リコネクション物理の理解深化に貢献するものである。

9:55-10:20 河野 凌, 「深層学習手法 PINNs によるプラズマ二流体計算」

ヘリコンプラズマ源は、高密度かつ低温のプラズマを安定に生成できることから、核融合、電気推進機、宇宙模擬実験など多様な応用が期待されている。一方で、実験ではプラズマ密度がおおよそ 10^{19} m^{-3} にとどまる密度限界が報告されており、この現象を正確に理解するためにはプラズマ-中性流体間の相互作用を正しく捉える必要がある。密度限界の物理解明に向けた数値計算では、高密度領域で一般的に用いられる陰解法に基づくニュートン法の計算負荷が大きく、多次元解析が困難である点が現状の課題となっている。そこで本研究では、プラズマ流体計算の高速化に向け、深層学習手法 PINNs (Physics-Informed Neural Networks) を用いたプラズマ二流体計算モデルの基礎を構築する。特に本発表では、現在開発中の計算モデルについて、規格化手法および境界条件が予測精度に与える影響について議論する。

10:20-10:45 休憩

10:45-11:30 佐藤 直木, 「Scattering Theory in Noncanonical Phase Space: A Drift-Kinetic Collision Operator for Weakly Collisional Plasmas」

After developing a scattering theory for grazing collisions in general noncanonical phase spaces, we introduce a guiding center collision operator in five-dimensional phase space designed for plasma regimes characterized by long wavelengths (relative to the Larmor radius), low frequencies (relative to the cyclotron frequency), and weak collisionality (where repeated Coulomb collisions induce cumulatively small changes in particle magnetic moment). The collision operator is fully determined by the noncanonical Hamiltonian structure of guiding center dynamics and exhibits a metriplectic structure, ensuring the conservation of particle number, momentum, energy, and interior Casimir invariants. It also satisfies an H-theorem, allowing for deviations from an equilibrium Maxwellian distribution due to the nontrivial kernel of the noncanonical guiding center Poisson tensor, spanned by the magnetic moment. We propose that this collision operator and its underlying mathematical structure may offer valuable insight into the study of turbulence, transport, and self-organizing phenomena in both laboratory and astrophysical plasmas.

11:30-12:15 Yohei Kawazura, 「無衝突 Alfvén 乱流における加熱チャンネル」

本講演では太陽風・降着流・銀河団ガスなどの天体プラズマにおける無衝突乱流加熱の物理機構を概説した。ジャイロ運動論に基づいたランダウ減衰や速度空間での位相混合といった基本的な加熱過程に加え、高ベータ領域での圧力非等方性粘性や、Alfvén 波の不均衡が生む「ヘリシティバリア」が引き起こすイオンサイクロロン加熱などの最新の非ジャイロ運動論的モデルも紹介した。

12:15-12:20 議論

3. 参加者リスト

研究者名	所属機関名	学生
稲垣 和寛	同志社大学	
成行 泰裕	富山大学	
樋口 颯人	QunaSys Inc.	
遠藤 貴洋	九州大学・応力研	
川面 洋平	宇都宮大学	
佐藤 直木	NIFS	
松清 修一	九州大学・総理工	
中原 寛太	九州大学・総理工	○
諫山 翔伍	九州大学・総理工	
河野 凌	九州大学・総理工	○
松井 里樹	九州大学・総理工	○
大貫 陽平	九州大学・応力研	
福本 康秀	九州大学・IMI	
Fan Yumeng	九州大学・総理工	○
吉川 顕正	九州大学・理	
竹広 真一	京都大学・数理研	
文 賛鎬	九州大学・応力研	
小山 一輝	九州大学・総理工	○
新谷 一郎	九州大学・応力研	
小菅 佑輔	九州大学・応力研	
佐藤 秀	同志社大学	○
飯島 陽久	名古屋大学	
Yasuhiro Ohta	神戸大学	
漁野 光紀	京都大学・理地惑	○
Takashi tanaka	九州大学	
溝上 雄大	九州大学	○
佐口 隼斗	東北大学	○
高岡 正憲	同志社大学	
伊集院 拓也	九州大学	○
Atsushi Sekimoto	岡山大学	
Ryosuke Nakashima	神戸大学	
川上 航典	九州大学	○
Fumiko Otsuka	九州大学	
徳満 優	九州大学	○

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設置や運用・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 年以上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： 2025 年 12 月 3 日（水） 午後（13:45～17:00）

4 日（木） 午前（10:00～11:30）

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： 3 日 32 名、 4 日 32 名 両日参加：28 名

3. 発表概要

今回は 8 件の講演応募があったが 1 件キャンセルが生じ、7 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 5 件の講演があった。電力中央研究所の新井田らは、沿岸域の環境影響評価のために高解像度計測が可能する UHF 帯周波数を利用したレーダの開発についての現状を報告した。送受信機に高速 AD・DA モジュール USRP を使用し、FMCW 波連続送受信を可能にするために受信アンテナ方向に大きく減衰する指向特性を持つ送信アンテナが必要になるが、その特性確認を実施した。三菱電機の亀田らは、海象観測用の海洋レーダの受信スペクトルから洋上船舶の検出追尾に関して、その手法と検証結果について述べた。多重仮説追尾方式を用いて中型船に対しての追尾精度率が約 80%と評価できることを示した。日本工営のサハナは、海洋レーダの流速計測において 2 局の視線方向流速のなす角度により非一様な観測誤差を生じるが、その効果が津波伝搬時のデータ同化にどのように影響するかについて論じた。JAMSTEC の王らは、2024 年 8 月 8 日の日向灘地震で発生した津波に関して、海底地震津波観測網 N-net と宮崎県海洋レーダのデータを用いて震源インバージョンを行った。同海洋レーダは海況モニタリング用に 1 時間に 17 分間しか稼働していないため、同期間中 1 分ごとの流速値を使って計算したが過少評価されることが示された。北大院水産の中條らは、JAMSTEC が運用する CODAR/SeaSonde のドップラースペクトルから独自に 10 分ごとの短時間流速データを求め、親

潮由来の冷水塊の津軽海峡への流入過程を確認することを試みた。75 分間データを用いた標準プロダクトでは見えなかった、津軽海峡向けへ流入する流れが検出されたことを示した。

情報交換の時間では、琉球大の藤井から ORCA (Ocean Radar Conference for Asia-Pacific) 2026 の開催に向けての議論されていることが報告された。現時点では 2026 年 10 月頃にベトナムでの開催が有力である。

2 日目は、3 件の講演が予定されていたがキャンセルが 1 件あり、2 件の話題提供となった。JAMSTEC の金子は、むつ研究所で運用している津軽海峡レーダの現状と観測結果について述べた。周波数改修後の 3 基の CODAR/SeaSonde については本免許に向けて調整中であり、汐首局と木古内局が新たに稼働し始めたことが報告された。また、CODAR/SeaSonde の観測と係留観測との比較について受信 3 アンテナの SN 比との関係を詳説し、視線方向流に関して SN 比によるフィルタリングにより相関、RSMD とともに改善することを示した。福井県立大の兼田らは、若狭湾における海洋レーダの流速データをリアルタイム観測ブイ、数値モデル DREAMS と比較検討し、おおよそ整合性が取れることと、広域な流況を知るうえで有効であること示した。しかし、ブイやモデルと大きく異なる場合も存在し、今後の検討が期待される。

総合討論では、今回の発表のまとめと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：2025 年 12 月 3 日 (水) 午後 ～ 4 日 (木) 午前

会場：九州大学筑紫キャンパス

応用力学研究所西棟 6 階 多目的研究交流室 (W601 号室)

=====

12 月 3 日 (水)

13:45-13:50 趣旨説明

藤井智史 (琉球大工)

13:50-14:20 沿岸域の環境影響評価のための UHF 帯海洋レーダの開発

新井田靖郎・坪野考樹 (電力中央研究所)、藤井智史 (琉球大工/ORNIS)、
御手洗哲司 (沖縄科学技術大学院大学)、石垣善教 (ORNIS)

14:20-14:50 海洋レーダによる洋上船舶の継続追尾

亀田洋志・高林佑樹・半谷政毅・今津智成 (三菱電機)、河西駿・藤井智史 (ORNIS)

14:50-15:20 Tsunami Data Assimilation and Forecast in the Kii Channel Using High-Frequency Radar: Bathymetry Effects on the Propagation of Measurement Errors
Irham Sahana (日本工営)、Ryotaro Fuji (国際航業)、Hirofumi Hinata (愛媛大工)

15:20-15:35 休憩

15:35-16:05 海洋短波レーダーを用いた 2024 年日向灘地震の津波震源インバージョン

王宇晨・今井健太郎 (JAMSTEC)、藤井智史・渡久地優 (ORNIS)

- 16:05-16:35 海洋短波レーダーによるドップラースペクトルからの流速導出と冷水流入現象の解釈
中條飛翔・阿部泰人（北大院水産）、金子仁・佐藤喜暁・佐々木建一（JAMSTEC むつ研究所）
- 16:35-17:00 情報交換

12月4日(木)

- 10:00-10:30 津軽海峡周辺における海洋短波レーダを用いたモニタリング研究事例の紹介
金子仁・佐々木建一・佐藤喜暁（JAMSTEC むつ研究所）、橋向高幸（マリンワークジャパン）
- 10:30-11:00 短波海洋レーダを利用した若狭湾の海況観測
兼田淳史・横川将太（福井県大海洋生資）、渡慶次力（福井県大海洋生資/ORNIS）、藤井智史（琉球大工/ORNIS）、梶原大郁（福井水誌）
- 11:00-11:30 総合討論

5. 参加者名簿

氏名	所属	氏名	所属
広瀬 成章	気象研究所	江淵 直人	北大低温研
中山 智治	日本海洋科学振興財団	印 貞治	日本海洋科学振興財団
渡邊 修一	日本海洋科学振興財団	長名 保範	熊本大
市川 香	九大応力研	今井 健太郎	JAMSTEC
王 宇晨	JAMSTEC	佐々木 建一	JAMSTEC むつ研
坪野 考樹	電力中央研究所	新井田 靖郎	電力中央研究所
中條 飛翔	北大水産	谷田 裕	神戸大
ムハンマド イ ルハム サハナ	日本工営	北島 輝	熊本大
亀田 洋志	三菱電機	藤井 智史	琉球大
刘天然	九大応力研	油布 圭	九大応力研
金子 仁	JAMSTEC むつ研	川崎 陽暉	九大総理工
広瀬 直毅	九大応力研	伊藤 陽太	北大水産
能戸 亮太	北大水産	工藤 楓己	長崎大総合生産科学
福留 研一	富山高専	稲津 大祐	東京海洋大
木田 新一郎	九大応力研	兼田 淳史	福井県立大
横川 将太	福井県立大	林 美鶴	神戸大
久賀みづき	水産研究・教育機構	滝川 哲太郎	長崎大
久木 幸治	琉球大理		

2025WS-AO-2

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：自動車研究所 森川多津子

所内世話人：原由香里

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や、ドローンを利用した境界層内オゾンや先駆物質の観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2026年2月26日（木）午後から27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15題の発表が行われ、現地16名、オンライン約15名が参加した。

研究集会では、日本国内のSLCF含む大気汚染物質の排出量インベントリに関する最新の知見や、乾性沈着速度の化学輸送モデル内における取り扱いの現状と課題、また光化学オキシダントのモデル間相互比較や感度レジームに関する解析、第3世代対流圏化学再解析データの開発に関する発表など、非常に様々なトピックについての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9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：2026年2月26日（木） 13:30～17:30

27日（金） 9:30～12:15

主催：九州大学応用力学研究所全国共同利用研究集会（2025WS-AO-2）

共催：大気環境学会 大気環境モデリング分科会

大気環境学会 気候変動研究会

開催方法：ハイブリッド形式（対面+Zoom）

Zoom 接続情報：

<https://riam-kyushu-u-ac-jp.zoom.us/j/87093344420>

ミーティング ID: 870 9334 4420

パスコード: KHR62zqb

対面開催場所：九州大学応用力学研究所 2 階会議室

プログラム

2月26日（木）午後

座長：板橋 秀一（九大応力研）

13:30-13:40 開会にあたって / 写真撮影

13:40-14:00 森川 多津子（JARI）[ショート]

国内の大気汚染物質排出インベントリと SLCF インベントリ

14:00-14:20 櫻井 達也（明星大）[ショート]

衛星 AIS を利用した船舶排ガスインベントリ（特に BC）の算定

14:20-14:40 速水 洋（早稲田大）[ショート]

インドシナ半島の乾性沈着速度

14:40-14:50 休憩

座長：森川 多津子（JARI）

14:50-15:10 森野 悠（国立環境研）[ショート]

PM_{2.5} 長期曝露データ構築

15:10-15:30 山地 一代（神戸大）[ショート]

数値シミュレーションと常時観測データに基づく社会的変化に伴うわが国の
大気質応答評価

15:30-16:00 入澤 大悟（明星大）[ロング]

都市域での光化学オキシダントを対象としたモデル間比較研究

16:00-16:10 休憩

座長：速水 洋（早稲田大）

- 16:10-16:30 河野 なつ美 (埼玉県環境科学国際センター) [ショート]
都市発展と大気汚染物質が都市型豪雨の再現性に与える影響解析
- 16:30-17:00 板橋 秀一 (九大応力研) [ロング]
離島における地表面近傍のオゾン濃度再現性の改善に向けて
- 17:00-17:20 永島 達也 (国立環境研) [ショート]
MICS-Asia 第4期におけるAQモデル相互比較実験計画
- 17:20-17:30 講評/スケジュール案内

2月27日(金) 午前

座長：原 由香里 (九大応力研)

- 09:30-09:50 徐 懋 (九大応力研) [ショート]
首都圏における大気中アンモニア観測と大気質モデルによる発生源寄与解析
- 09:50-10:20 嶋寺 光 (大阪大) [ロング]
最近の指導学生の研究紹介 (O₃感度レジーム、硝酸塩と海塩、スギ花粉飛散、
インドネシア屋外バイオマス燃焼、タイPM_{2.5}バイアス補正)
- 10:20-10:40 弓本 桂也 (九大応力研) [ショート]
大気汚染物質広域監視システムデータを用いたPM_{2.5}の健康影響評価
- 10:40-10:50 休憩

座長：弓本 桂也 (九大応力研)

- 10:50-11:10 原 由香里 (九大応力研) [ショート]
ゴビ砂漠におけるダストホットスポットの数値再現実験
- 11:10-11:30 五藤 大輔 (国立環境研) [ショート]
2つの雲モデルに起因する硫酸塩エアロゾルと雲・放射相互作用の不確実性
～夏季アジアの事例～
- 11:30-12:00 関谷 高志 (海洋研究開発機構) [ロング]
第3世代対流圏化学再解析データの開発とその大気物質循環研究への応用
- 12:00-12:15 講評/次回開催について

地球観測衛星による大気・海洋・陸面相互作用に関する研究集会

情報通信研究機構 金丸佳矢

1. 開催の経緯と目的

我が国の地球観測衛星のプロジェクトは活発に動いており、その実績を基に将来の衛星プロジェクトが計画・提案されている。一方で、宇宙開発は技術実証の場から産業活動の場へ移り始めており、国内では衛星地球観測コンソーシアムの設立や宇宙戦略基金の創設などの産学官連携が加速している。今後は個々の衛星プロジェクトだけでなくプロジェクト間の連携や産業界との協力を主導することが将来の地球観測分野を担う若手・中堅研究者に求められるだろう。

上記の背景を踏まえ、本研究集会では地球観測衛星を利用した大気・海洋・陸面分野において、様々な経験をもつシニア研究者から現在または今後の地球観測衛星分野で活躍する中堅・若手研究者(学生を含む)が参加し、新たな研究連携や将来の衛星プロジェクト形成への発展目指した研究集会を開催した。

2. 研究集会の概要

2025年12月23日から同24日にかけて、九州大学応用力学研究所にて「地球観測衛星による大気・海洋・陸面相互作用に関する研究集会」を開催した。研究集会は現地とオンラインのハイブリッド形式で実施し、学生10名を含む計38名が参加した（現地参加は20名程度）。海外（アメリカ・フランス）からも3名がオンラインで参加した。まず、招待講演としては現在運用中の衛星ミッションの歴史や開発が進む衛星ミッションの進捗状況、将来の衛星ミッションの検討について5件の発表を頂いた。また、一般般公演として研究分野は大気分野が多数を占めるが陸面や海洋、雪氷分野も含めて計27件の発表があった。発表内容については、センサー・アルゴリズム開発といったプロダクトを作り出す内容に加えて、そのプロダクトを利用する解析研究や数値モデル開発と多岐にわたった。さらに、地球観測分野に関連する国研や民間事業者の職務紹介の発表を設けることで、参加した学生が将来のキャリアパスを考える契機となることを意識した企画も実施した。

今回の研究集会は2日間の開催としたが、講演希望者が多く議論の時間の確保が難しかったこと、オンライン参加者も多かったことから、議論を活発化させるためにリアルタイムで入力可能な質問シートを参加者全員に共有し、現地とオンライン参加のコミュニケーションの向上や意見交換の効率化を図った。この取り組みは一定の効果があり、発表者に対して多くのコメントが書き込まれ、限られた時間内でも効率的な意見交換を行うことが出来た。

以上のように、本研究集会を企画するにあたり様々な試行をし、今後に向けた課題や発展を参加者で共有しつつ研究集会を終えた。研究交流としての意義は当初の通り達成することが出来たが、地球観測衛星が社会的に価値あるデータを取得しているからこそ科学的な意義だけでなく社会に対するインパクトについて意識しつつ研究を進めることが必要であろう。こうした活動を支援いただいた本枠組みに感謝しつつ、本報告の終わりとする。

研究集会：地球観測衛星による大気・海洋・陸面相互作用に関する研究集会

場所：九州大学筑紫キャンパス応用力学研究所 西棟 W601 およびオンライン

日時：2025 年 12 月 23 日 13:00～24 日 16:00

代表者：金丸 佳矢

所内世話人：道端 拓朗

プログラム

12 月 23 日（火）

13:00-13:05	事務連絡	
13:05-13:35	富井 直弥	超広帯域電波デジタル干渉計（SAMRAI）ミッションの概要
13:35-14:05	江口 菜穂	小型衛星大気観測ミッションについて
14:20-14:35	山地 萌果	新規衛星ミッション立上げにかかる最近の動向と文科省出向お仕事紹介
14:35-14:50	緒方 一紀	衛星横断型データ提供システム（JAXA Earth API）の紹介および進捗
14:50-15:00	山内 晃	次世代降水レーダ衛星(PMM)と GPM 運用の現状報告
15:00-15:10	成田 愛子	キャリアセミナー：リモートセンシングを活かした仕事紹介
15:10-15:20	三田堂人	キャリアセミナー：リモートセンシングエンジニアの育成・仕事紹介
15:30-15:45	堀田 陽香	EarthCARE CPR による雲ドップラー速度の気候的な描像
15:45-16:00	伊藤 誠人	静止衛星ひまわりを用いた熱帯における鉛直積算水蒸気量推定アルゴリズム開発
16:00-16:15	京野 祐大	マイクロ波放射計による水蒸気量推定
16:15-16:30	中西 萌々花	EarthCARE 観測データを用いた雲頂に過冷却水滴層を持つ雲の放射特性評価
16:30-16:45	江崎 雄大	EarthCARE4 センサー観測による大気の三次元放射効果の評価
16:45-17:00	林 浩希	マイクロ波放射計による降水強度推定
17:00-17:15	桃井 裕広	衛星エアロゾルリモセンにおける地表面不均一性の影響
17:15-17:30	日置 壮一郎	3MI による可視・近赤外偏光多方向観測の気象業務への貢献

12 月 24 日（水）

9:00-9:05	事務連絡	
9:05-9:35	石坂 丞二	海色衛星ミッションの将来について
9:35-9:50	山上 遥航	衛星観測と数値モデルを用いた海洋経年変動の研究
9:50-10:05	平田 憲	海氷 BRDF の衛星リトリーバルを目指して
10:05-10:20	議論	
10:35-10:50	山本 雄平	静止軌道衛星による都市・植生研究について

10:50-11:05	笹川 大河	陸域観測のための静止地球環境計測衛星連携について
11:05-11:20	山本 晃輔	全球陸域シミュレーションでの利用を見据えた地表水観測プロダクトの検討
11:20-11:35	武藤 裕花	アンサンブルデータ同化を活用した GSMaP の雨量計補正
11:35-11:50	棚田 和玖	光学衛星観測に基づく火災エアロゾル・雲間接効果の解析
13:00-13:30	井村 裕紀	EarthCARE プロジェクトの軌跡と展望
13:30-14:00	Shaik Allabakash/Hengheng Zhang	EarthCARE CPR and ATLID: Science results
14:00-14:15	武藤 正剛	海洋生態系がつなぐ大気・海洋相互作用 (EarthCARE によるエアロゾル観測への期待)
14:15-14:30	青木 俊輔	EarthCARE-GPM を複合利用した降解析
14:30-14:45	小原 慧一	W, Ku, Ka レーダとミリ波放射計の複合利用による雲氷・固体降水リトリバーバル
15:00-15:15	辻 泰成	GPM/DPR を用いた降雪強度推定に関する研究
15:15-15:30	金丸 佳矢	衛星シミュレーターを Python で動かす
15:30-15:45	道端 拓朗	GPM Simulator によるモデル・観測比較
15:45-16:00	菊池 麻紀	次世代雲観測衛星ミッションの検討
16:00	講評・閉会	

研究集会参加者一覧。

所属	氏名
北海道立総合研究機構	大屋祐太
北海道大学	京野祐大
東北大学	江崎雄大
富山大学	辻 泰成
宇宙航空研究開発機構 (JAXA)	井村裕紀 富井直弥 武藤正剛 山内 晃 山地萌果
情報通信研究機構 (NICT)	金丸佳矢
東京大学 / JAXA	堀田陽香
千葉大学	笹川大河 林 浩希 山本雄平
海洋研究開発機構 (JAMSTEC)	緒方一紀 山上遥航
名古屋大学	石坂丞二 伊藤誠人
三重大学	後藤彩月
九州大学	Shaik Allabakash Hengheng Zhang 蔡 穎 江口菜穂 中西萌々花 道端拓朗
オンライン (国外)	日置壮一郎 桃井裕広 平田 憲
オンライン (国内)	ほか 11 名

2025WS-AO-4

九州大学応用力学研究所 研究集会報告書

課題番号：2025WS-AO-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および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の推進は海洋環境・水産資源の将来を占う上で重要である。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、富山大学、鹿児島大学、愛媛大学、名古屋大学、水産教育・研究機構、水産試験場等の研究機関との共同研究も多く実施されている。そこで、今後の共同研究の更なる進展のため、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共同観測計画に関する議論を行うことを目的とした。特に、今年度は、同分野の研究の発展には次世代の研究を支える学生含めた若手研究者の育成が必須であるという観点から、若手研究者の参加を積極的に促した。また、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ため、長崎丸観測計画についての話し合いは、研究者のみならず船舶運航側のオフィサーを含めて協議することで、観測体制を強化することを目指した。

本研究集会は2026年1月5～6日にかけて対面・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5名、九州大学6名、愛媛大学6名、鹿児島大学4名、水産機構2名の計23名、オンラインでは九州大学2名、長崎大学7名、水産機構3名、東京大学1名、東京海洋大学2名、福井県立大1名、JAMSTEC1名、名古屋大学1名、富山大学1名、愛媛大学1名、京都大学1名、鹿児島大学1名、北海道大学1名の計23名、合計46名の参加があった。講演は2日間で17題であった。

2. 研究集会の概要

研究集会は2026年1月5日(月)～6日(火)にかけて九州大学応用力学研究所で開催された。初日は主に東シナ海・日本海を中心とした縁辺海や黒潮域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および2028年度に東シナ海で予定されている白鳳丸研究航海計画についての紹介と意見交換を行った。初日は以下のような講演が行われた。王(九大応力研)は気象庁の気象予報モデルを用いて、日本海の風応力に、数日～数十日スケールの卓越周期が存在し、その周期帯ごとに現れる特徴的な空間分布などについて報告した。神村(九大応力研)はルソン海峡での係留観測から得られた流速データを解析し、卓越する鉛直モードや流速の鉛直構造が空間的に異なることなどを報告した。中島(愛媛大)は長崎丸航海などで取得した豊後水道での水温、塩分、流速データを用いて、再解析モデルデータJCOPET-DAとの比較を行い、モデルデータを水塊分布の把握に利用する際には注意が必要であることなどを示した。滝川(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、中層に見られる平均流に大潮-小潮と同期した2週間変動が見られることなどを示した。梶山

(鹿児島大)は長崎丸航海で取得した東シナ海大陸棚上の流速、乱流データを用いて、海底エクマン層内の渦粘性係数の評価を行った。小針(鹿児島大)は黒潮フロント擾乱に伴う沿岸水移流が生物群を輸送し、黒潮フロント域に集積することが、黒潮生態系の生産力維持に重要な過程となることを指摘した。伊藤(鹿児島大)は北部薩南海域における小型浮魚類仔魚の分布要因を検討し、仔魚密度は、餌となる動物プランクトンの豊富な鹿児島湾中央部で多いことが明らかとなった。山岡(愛媛大)は長崎丸などで行った東シナ海大陸棚周辺での多項目観測によって、夏季成層期の陸棚斜面域で見られる亜表層クロロフィル極大の形成に対する局所的な栄養塩供給の影響などを示した。姜(愛媛大)は長崎丸航海で東シナ海陸棚縁辺に設置した係留系 ADCP の後方散乱強度データを用いて、動物プランクトンによる日周鉛直移動パターンの季節変動などを示した。樋口(愛媛大)は眼球および耳石の同位体解析と環境 DNA 解析から、植食性魚類の生態を明らかにするため、アイゴを対象とした研究展開を進めていることが紹介された。初日最後は近藤(長崎大)より 2028 年白鳳丸縁辺海航海についての紹介と、遠藤(九州大)より 2026 年度夏季に実施予定の長崎丸航海、加えてその計画に関する船長との協議が行われた。

2 日目の講演では太平洋の数値モデル研究成果に加え有明海を含めた東シナ海周辺域の物理・生物・化学研究についての成果発表が行われた。木田(九州大)は黒潮の出発点である北赤道海流の分岐緯度の分散が風速場と比較して小さい理由について数値モデル解析により調べ、傾圧ロスビー波だけでは誘発されない順圧波も重要であることなどを示した。堤(鹿児島大)は有明海における環境異変に与える M2 潮汐の減少の評価のため潮位観測データを 1 次元湾モデルから定量化し、有明海では M2 潮汐によるエネルギー散逸が平均的に 10%減少していることなどを示した。山口(水産機構)は有明海における植物プランクトンによる基礎生産量の変動要因について現場観測や培養実験で得られたデータを機械学習を用いて解析した結果、水柱内光合成活性には懸濁物元素比が重要でレッドフィールド比に近いほど高活性になることなどを示した。筒井(長崎大)は長崎丸航海で得られた東シナ海トロール試料で採取されたカイロウドウケツの仮根と人工繊維の関係について調べ、これらの繊維は主に魚網由来であることなどを示した。Haryanoto(富山大)はオンライン発表にて長崎丸東シナ海航海で得られた海水試料中の Rare Earth Elements (REEs) の動態について報告し、潮汐により栄養塩が東シナ海陸棚上に輸送されることなどを定量的に示した。松本(長崎大)はオンライン発表にて長崎丸航海で得られた表層研究用海水中のプランクトン分布を PlanktoScope で調査した結果を紹介し、PlanktoScope の性能は現場プランクトンの組成を簡易的に調べる点では十分な能力を有していることなどを示した。北島(水産機構)は東シナ海エリアの CK 観測線における夏季メソ動物プランクトンの長期変動について調べ、組成の違いが海域による違いのみならずクロロフィル濃度や大陸からの淡水供給の影響を受けている可能性などについて示した。

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は、我が国縁辺海の海洋観測を実行する上で欠かせないものである。近年、本研究集会では長崎丸練習船船長も加わった研究成果発表会や航海計画相談を進めており、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。また、今年度は学生発表を奨励したことで、研究集会へ多くの学生が参加することができた。研究分野の発展には若手研究者の参画が不可欠であることから、今後もそのように進め、さらなる共同研究への発展に繋げる場としたい、という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：2026 年 1 月 5 日（月）13:00 ～ 18:00

6 日（火）9:00 ～ 12:00

オンラインミーティング情報（Zoom）

トピック：東アジア縁辺海研究集会（1 日目）

時刻：2026 年 1 月 5 日 13:00 PM 大阪、札幌、東京

Zoom ミーティング情報

<https://riam-kyushu-u-ac-jp.zoom.us/j/83313846528>

ミーティング ID: 833 1384 6528

パスコード: EAsiaMS-1

トピック：東アジア縁辺海研究集会（2 日目）

時刻：2026 年 1 月 6 日 9:00 AM 大阪、札幌、東京

Zoom ミーティング情報

<https://riam-kyushu-u-ac-jp.zoom.us/j/89030566594>

ミーティング ID: 890 3056 6594

パスコード: EAsiaMS-2

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および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の推進は海洋環境・水産資源の将来を占う上で重要である。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、富山大学、鹿児島大学、愛媛大学、名古屋大学、水産教育・研究機構、水産試験場等の研究機関との共同研究も多く実施されている。そこで、今後の共同研究の更なる進展のため、これまで得られた成果の発表ならびに今後の共同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。同分野の研究の発展には、次世代の研究を支える学生含めた若手研究者の育成が必須であることから、若手研究者の参加を積極的に進める。さらに、東シナ海や日本海における調査では、長崎大学練習船長崎丸が重要な役割を担うため、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協議することで、観測体制を強化する。東アジア縁辺海・黒潮域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5日(1日目)

- 13:00 – 13:05 **開会・挨拶及び開催趣旨説明** 近藤能子（長崎大）
- 13:05 – 13:25 **日本海の海洋変動に関わる風応力の時空間変動**
王浩同*・千手智晴（九大応力研）
- 13:25 – 13:45 **ルソン海峡の東側海嶺で発生する内部潮汐の特性**
神村将生*・千手智晴（九大応力研）
- 13:45 – 14:05 **2025 年夏及び秋の豊後水道沖における船舶観測データと再解析データの比較検討**
中島隆之介*・郭新宇（愛媛大 CMES）・遠藤貴洋（九大応力研）・仁科文子（鹿児島大）
- 14:05 – 14:25 **五島海底谷を通過する中層潜流**
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）
- 14:25 – 14:45 **東シナ海大陸棚上海底エクマン層内の渦粘性係数プロファイルの推定**
梶山稜輔*・堤英輔（鹿児島大）
- 14:45 – 15:00 休憩
- 15:00 – 15:20 **水産資源変動に影響を与える黒潮生態系～黒潮パラドックス＋黒潮レジームシフト～**
小針統（鹿大水産）
- 15:20 – 15:40 **北部薩南海域における動物プランクトン現存量・生産力・分類群組成の空間変動**
伊藤穂香*（鹿大院農林水産）・堤英輔・久米元・小玉将史（鹿大水産）・一宮睦雄・小森田智大（熊科大環境）・小針統（鹿大水産）
- 15:40 – 16:00 **東シナ海大陸棚斜面周辺における低次生態系の時空間変動**
山岡昂平*（愛媛大 CMES）・吉江直樹（愛媛大 PIAS）・郭新宇（愛媛大 CMES）・小森田智大（熊科大）・大西秀次郎（愛媛大 CMES）
- 16:00 – 16:20 **Seasonal variation of diel vertical migration of zooplankton from ADCP backscatter data at the East China Sea shelf break**
姜牧言*・郭新宇（愛媛大 CMES）・小針統（鹿大水産）・吉江直樹（愛媛大 PIAS）
- 16:20 – 16:40 **温帯域で増加する植食性魚類の行動生態解明を目指して**
樋口富彦（愛媛大）

- 16:40 – 16:55 休憩
- 16:55 – 17:30 **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）
- 17:30 – 18:00 **2028 年白鳳丸縁辺海航海に向けた打ち合わせ**
進行:近藤能子（長崎大）

懇親会

1月6日(2日目)

- 9:00 – 9:20 **The seasonal cycle of the North Equatorial Current bifurcation point, the origin of Kuroshio**
木田新一郎*・Shih-Nan Chen(九大応力研)
- 9:20 – 9:40 **有明海における M2 潮汐とその増幅機構の長期変化**
堤英輔(鹿児島大)
- 9:40 – 10:00 **有明海における基礎生産量の季節的特徴と変動要因**
山口聖*・岡村和磨(水産機構技術研)・増淵隆仁(水産機構資源研)
- 10:00 – 10:15 休憩
- 10:15 – 10:35 **東シナ海トロールで採取されたカイロウドウケツ Euplectellidae sp. (海綿動物門 Porifera 綱 Hexactenellida 目)仮根に取り込まれた人工繊維片と体サイズの関係**
山脇信博・松下吉樹・森井康宏・合澤格・保科草太・眞角聡・丸山裕豊・木下幸・筒井英人*(長崎大)
- 10:35 – 10:55 **Overlooked Tidal-induced Water and Nutrient Dynamics in a Continental Shelf, Quantified using Rare Earth Elements**
Michael Julian Haryanto*・Jing Zhang(富山大)・Takahiro Endoh(九大応力研)・Naoki Yoshie(愛媛大 PIAS)・Shimpei Otsuka・Keiji Horikawa(富山大)・Takeshi Matsuno(九大応力研)
- 10:55 – 11:15 **PlanktoScope を利用した九州西方海域のプランクトン分布の解析**
松本早織*・和田実(長崎大)・北島聡(水産機構資源研)・鈴木利一・丸山裕豊・眞角聡・合澤格・木下幸・山脇信博・森井康宏(長崎大)
- 11:15 – 11:35 **CK 線における夏季の動物プランクトンの長期変動**
北島聡・西内耕・清本容子・長谷川徹・飯田茜・堀井幸子・種子田雄(水産機構資源研)
- 11:35 – 12:00 **総合討論**

閉会

(著者が複数の場合、発表者に*を記載。オンラインでの発表のタイトルに下線。)

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

神奈川県水産技術センター相模湾試験場 田村怜子

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7年9月9日（火）、9月10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発表および情報交換を実施した。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、5 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 46 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収集体制や急潮被害の事例等について、鳥取県、神奈川県、京都府から発表があった。さらに1 日目後半は話題提供として、新潟県水産海洋研究所 丸山氏から新潟における急潮研究と漁具額に関する発表、高知県水産試験場 有光氏から令和7年度の黒潮の動きと急潮に関する発表が行われた。各話題に対して各府県から観測体制や維持管理状態、漁業者が使用している漁具についての情報収集方法などについて議論が行われ、参加者からの情報共有と意見交換が行われた。

2 日目は気象庁、富山県、北海道大学からそれぞれ急潮に関する情報提供方法や現場で安価に利用できる測定機器開発、定置網の耐候性能向上に関する研究の発表があり、本研究集会メンバーのほか、漁業関係者をはじめとした水産関係団体の希望参加者も発表を聞けるように調整が行われた。

総合討論やその後の議題では、本研究集会での担当者レベルおよび専門家も交えた意見交換が非常に有意義であるという意見が多く見受けられた。また、今年度初めて行った水産関係団体など外

部参加者も参加できるような形態での集会開催の試みについても今後も引き続き取り組む方向で一致した。最後に、来年度からも継続して本研究集会を開催できるよう、参加メンバーで協力することを確認し、集会を終了した。

本研究集会の開催は、普段交わることがない府県や官庁・大学関係者などが一堂に会する場として非常に貴重かつ有意義であり、今まで得られなかった知見や事例を参加者全員に共有できる重要な集まりであることを改めて強く認識した。また、参加メンバーによる情報共有や意見交換が、府県担当者の海況に関する根底的な課題の解決や知識の底上げ、急潮対策についての新たな着想となるとともに、地域のニーズを踏まえた急潮対策などの研究の発展にも役立てられると期待される。以上の成果に加え、本研究集会終了後にも機会があれば参加者同士が課題解決のために協力できるような人脈の確立ができたことも大きな成果と考えられる。

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た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】2025 年 9 月 9 日（火）13:30 ～ 17:00, 9 月 10 日（水）9:30 ～ 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）

ZOOM を利用したオンライン会議併催

<9 月 9 日（火）13:30-17:00>

- ・開会挨拶および開催趣旨説明 13:30～13:35
- ・お悩み相談会 13:35～16:00
 - (1) 趣旨説明
 - (2) 自己紹介
 - (3) お悩み相談会
- ・研究発表および話題提供
 - (1) 新潟県における急潮研究と漁具被害等について 16:00～16:30
丸山 克彦（新潟県水産海洋研究所）
 - (2) 令和 7 年度の黒潮の動きと急潮について 16:30～17:00
有光 慎吾（高知県水産試験場）

<9 月 10 日（水）9:30-12:00>

- ・研究発表および話題提供
 - (3) 気象庁で新たに提供を検討している「急潮」に関する情報について 9:30～10:00
七海 仁美（気象庁大気海洋部 環境・海洋気象課 海洋気象情報室）
 - (4) 安価な IoT 技術を用いた定置漁場の流れの推定 10:00～10:20
小塚 晃（富山県農林水産総合技術センター水産研究所）
 - (5) 定置網の耐候性能向上に向けた基礎的研究 10:20～10:50
五味 伸太郎（北海道大学海洋生物資源科学部門）
- (休憩 10:50-11:00)
- ・全体質疑および総合討論 11:00～11:50
- ・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 46名参加（うち23名現地参加）

機関名	氏名	出席形式
北海道大学水産科学研究院	高木 力	web
北海道大学大学院水産科学研究院	五味 伸太郎	現地
北海道大学環境科学院	八重樫健吾	web
九州大学応用力学研究所	千手 智晴	現地
九州大学応用力学研究所	広瀬 直毅	現地
九州大学応用力学研究所	木田新一郎	現地
京都大学	坂田 圭	web
気象庁気象研究所	広瀬 成章	現地
気象庁気象研究所	青木 邦弘	web
気象庁大気海洋部環境・海洋気象課海洋気象情報室	七海 仁美	現地
札幌管区气象台	—	web
福岡管区气象台	花房 瑞樹	現地
福岡管区气象台	清家 裕喜	現地
海洋研究開発機構	宮澤 泰正	web
水産研究・教育機構	日下 彰	web
水産研究・教育機構	清水 勇吾	web
神奈川県水産技術センター相模湾試験場	田村 怜子	現地
神奈川県水産技術センター企画研究部企画指導課	草野 朱音	現地
新潟県水産海洋研究所	丸山 克彦	現地
新潟県水産海洋研究所 丸山 克彦現地	大江	web
富山県農林水産総合技術センター水産研究所	小塚 晃	web
富山県農林水産総合技術センター水産研究所	野原 葉	現地
石川県水産総合センター	仙北屋 圭	web
福井県水産試験場海洋資源研究センター	梶原 大郁	現地
三重県	笹木	web
三重県水産研究所	宮本	web
京都府農林水産技術センター海洋センター	鈴木 千恵	web
京都府農林水産技術センター海洋センター	上野 陽一郎	現地
京都府農林水産技術センター海洋センター	山渕 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	森脇 和也	現地
高知県水産試験場	有光 慎吾	現地
福岡県水産海洋技術センター	江崎 恭志	web
福岡県水産海洋技術センター	黒川 皓平	現地
福岡県水産海洋技術センター	上町 竣太郎	現地
福岡県水産海洋技術センター	上村 翼	現地
佐賀県玄海水産振興センター	豊福 太樹	現地
佐賀県玄海水産振興センター	牟田 圭司	現地
□崎県総合水産試験場	高木 信夫	web
日東製網株式会社	石戸谷博範	現地
株式会社海洋総合研究所	蓮沼 啓一	web
		他web参加5名

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・化学的性質、大気との相互作用、物質輸送、生物・水産環境など、海洋についての知見は近年飛躍的に増え続けている。具体的な現象として、表層混合層過程、潮汐、沿岸域の流動、中規模変動、西岸境界層、大循環などが挙げられる。幅広い水平・鉛直・時間スケールの、物理的現象、物質循環、生物過程が含まれる。この進展は、最新の観測技術、計算機技術、数値計算技術の成果と言える。しかし、その力学の理解は、その知見の増大に遅れている。多くの現象は複雑な要因や過程を含むため、現象の把握や再現を力学理解に結び付けるのは容易でない。そのためには、更なる多大で綿密な考察と議論が必要である。

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た。この大目標に近づくため、多彩な課題に多様な手法で取り組む研究者たちが、ブレイ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進めるとともに、課題相互間の繋がりを探った。

研究集会の実施

2025年10月23日～26日の3泊4日で研究集会を、九重共同研修所・九大山の家において、参加者全員が寝食を共にする対面・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。発表時間は1題60分を基本とした。議論の活発化を意図し、講演35分・質疑25分を目安とした。柔軟な進行を可能にすること、研究発表以外の時間にも密な議論や情報交換をしやすいことを狙い、対面・合宿形式とした。

研究集会には表1に示す13人が参加し、資料1に示す12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、仲俣氏、吉田氏、吉川氏、劉氏、広瀬氏の発表を10月25日に行った。発表の話題は多様性に富んでいた。現象のスケールは表面波から混合層、中規模変動、大洋スケールなど広範にわたった。手法は数値モデルを軸とするものが多かったが、観測のものもあった。数値モデルは理想化型から現実再現型まで、演題それぞれの色があった。

参加者は、大学院生の若手からベテランまで幅広く、参加歴では初めての人から常連の人までがあり、多様かつバランスの取れたメンバーだった。人数としても適切で、忌憚のない議論が活発に行われた。寝食を共にすることが、所属機関や年齢の壁をあまり感じず話しやすい場を作ることにより、貢献したと思われる。

参加者の方々には、講演・議論・共同生活すべての面で、会の進行に協力的に、かつ楽しんで携わっていただいた。加えて、九大応力研の方々には、準備・運営に大いに尽力いただいた。参加者に恵まれて、良い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：2025 年 10 月 23 日（木）～26 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 23 日

17:00 まで 入所
17:30- 夕食

18:30-18:40 開会
18:40-19:40 臼井 健人（東大理）
地衡流シアを考慮したエクマン応答

10 月 24 日

7:30- 朝食

8:30-9:30 西川 拓海（京大理）
混合層下部における乱流混合と表面波に関する研究

9:40-10:40 仲俣 翔登（京大理）
砕波のシミュレーションに向けた運動量保存を考慮する弱圧縮スキームでの
気液二相流数値計算

10:50-11:30* 西垣 肇（大分大理工）
台風に励起される近慣性波動による内湾への海水進入

12:00- 昼食

13:00-14:00 吉田 慎之助（北大環境）
南極周極流のエネルギーバランス：境界条件の影響

14:10-15:10 吉川 浩一郎（京大理）
海面加熱時の乱流強度の鉛直分布と大気境界層との比較

15:20-16:20 刘 天然（九大応力研）
Comparison of Non-Breaking Wave Induced Mixing Schemes Used in a Regional Ocean Model
around Japan

16:30-17:10* 広瀬 直毅（九大応力研）
北西太平洋データ同化における粗格子配置の検討

17:30- 夕食

資料 1 研究集会のプログラム

10月24日（つづき）

18:30-19:30 中野 英之（気象研）
黒潮／黒潮続流を再現できる海洋の将来予測データセットについて

10月25日

7:30- 朝食

8:30- エクスカーション・昼食

15:00-16:00 牛島 悠介（愛媛大沿岸セ）
海洋モデルの高解像度化に伴う北太平洋上層の高温化とその過程に関する研究

16:10-17:10 寺田 雄亮（JAMSTEC）
赤道中層ジェットの鉛直位相伝播

17:30- 夕食

18:30-19:30 磯辺 篤彦（九大応力研）
海洋マイクロプラスチックの粒子－生態系モデル

10月26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 60 分です。ただし、*印のものは短めの時間です。
天気予報等によってエクスカーションを 10 月 24 日に変更する場合があります。
その他、変更の場合があります。

代表者：西垣肇（大分大理工）
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
臼井 健人	東大理	学生 (D1)	中野 英之	気象研	室長
西川 拓海	京大理	学生 (M2)	刘 天然	九大応力研	特任助教
仲俣 翔登	京大理	学生 (D1)	(Tianran Liu)		
吉川 浩一朗	京大理	学生 (D2)	辻 英一	九大応力研	助教
(きっかわ)			広瀬 直毅	九大応力研	教授
吉田 慎之助	北大環境	学生 (M2)	磯辺 篤彦	九大応力研	教授
寺田 雄亮	JAMSTEC	PD 研究員	西垣 肇	大分大理工	准教授
牛島 悠介	愛媛大沿岸セ	助教			

各講演の概要

・ 臼井 健人（東大理），地衡流シアを考慮したエクマン応答

黒潮続流域は中規模渦の活動が活発な海域である。中規模渦は内部に強い鉛直流を伴い、栄養塩の輸送を通した生物活動の維持や、サブダクションを強化することでモード水の形成に寄与するなど重要である。これまで、中規模渦内部の特に表層付近での鉛直流（エクマン湧昇）を適切に見積もる理論の研究を行ってきており、風応力の回転のみではなく、海洋の渦度や水平密度勾配による地衡流のシアなどの効果を取り入れた定式を導出した。この理論は渦粘性係数に依存するため、この渦粘性係数の鉛直変化を考慮して定式の検証を行った。新たな定式は約 110 m での準地衡流成分を引いた鉛直流を従来の理論より適切に説明することが可能であることが明らかになった。

・ 西川 拓海（京大理），混合層下部における乱流混合と表面波に関する研究

混合層下部(遷移層)における乱流混合について、その生成源として内部波の碎波に注目し、数値実験を行った。内部波の生成メカニズムとしてラングミュア循環による励起と三波共鳴による励起を考え、それぞれのメカニズムを単独で再現する実験を行ったところ、いずれのメカニズムも再現できた。ラングミュア循環に関しては先行研究における固体表面実験(表面波はストークスドリフトで表現)との比較を行い、励起される内部波のエネルギーレベルが異なっていることを確認した。この差の要因については解析中であるが、現時点では表面波の減衰の有無が候補として挙げられる。また、今後実施するものとして二つのメカニズムの相互作用に関する対称実験があるが、ラングミュア循環の再現における固体表面実験と自由表面実験の差のために意味のある解析をするまでに至っていない。

・ 西垣 肇（大分大理工），台風に励起される近慣性波動による内湾への海水進入

台風に励起される陸棚海水の内湾への進入について、観測と数値モデルで検討した。三陸海岸の大槌湾の底層で、台風の通過後に顕著な水温変動が観測された。台風に対する海洋の応答を数値モデル実験で調べたところ、この水温変動の特徴をよく再現できた。以下のメカニズムが示唆された；台風の通過に伴って、近慣性周期の内部波の風下波が生成する。その流れはほぼ慣性振動流で、鉛直構造は鉛直第 1

モード的である。下層の流れが最初に岸向きになるとき、それが海岸境界にぶつかり、沿岸に湧昇流と水温躍層の上昇をつくる。

・中野 英之（気象研），黒潮／黒潮続流を再現できる海洋の将来予測データセットについて
文科省温暖化プロジェクトで作られた(Jamstec+気象研の)海洋モデルの予測データについて初期解析と共に紹介した。これらは CMIP のモデル(水平解像度 1 度から 0.25 度)とは違い、黒潮続流離岸を表現できるモデルである。FORP-NP10（北太平洋 10km 解像度）と JPN02（日本近海 2km 解像度）は気候予測データセット 2022 の一部として dias で公開中であり、日本の気候変動 2025 等で使用されている。d4PDFv2_ocn は現在先端プログラムで作成中のデータセットであり、気候予測データセット 2027 の海洋部分として公開される予定である。

・仲俣 翔登（京大理），砕波のシミュレーションに向けた運動量保存を考慮する弱圧縮スキームでの気液二相流数値計算
砕波のような激しい界面変化を伴う流れは、数値的に解く際、非圧縮条件から現れる楕円型方程式に多くの計算時間が費やされる。本発表では、この問題を解決しうる手法として近年提案されている弱圧縮スキームによって水面波の砕波を数値的に解いた。その結果、砕波を概ね再現できたが、運動方程式が非保存型であることが原因と思われる運動量輸送の過剰評価も示唆された。そこで、運動量保存型の数値スキームを簡易的に実装しテスト計算を実施したところ、非物理的な流れの挙動を抑える結果が得られ、計算精度の改善が示された。

・刘 天然（九大応力研），Comparison of Non-Breaking Wave Induced Mixing Schemes Used in a Regional Ocean Model around Japan
The effects of two non-breaking wave induced mixing schemes were compared based on numerical experiments by a regional ocean model around Japan, in order to improve the representation of upper ocean state. One scheme is derived from wave orbital motion, and another is derived from Langmuir circulation. Both schemes modifies the TKE budget model by adding the mixing effect terms by wave orbital motion and Langmuir circulation, and the Langmuir circulation scheme also amplifies the mixing length scale. This study attempts to clarify which scheme is the best. This problem is still in debating currently.
Three experiments were designed. The control run, named as CR, uses Noh and Kim scheme for TKE budget. The experiment LC has additional mixing effect of Langmuir circulation, and the experiment OM has additional mixing effect of wave orbital motion. The simulation period is from 2018/01/01 to 2018/09/30. The analysis period ranges from 2018/04/01 to 2018/09/30.
The results were compared with HIMAWARI SST and temperature profiles of GTSP data. These comparisons indicated that both schemes enhanced the vertical mixing in the upper layer. OM significantly overestimated the vertical mixing in the upper 10 m, but performed better than LC between 20 m and 30 m. The mixed layer depth of simulations and observations was also estimated for comparison. The result showed that for cases with low Langmuir number, so wind is weak, LC performed better than OM. This may be because LC involved the local wind effect, but OM not.

・吉田 槇之助（北大環境），南極周極流のエネルギーバランス：境界条件の影響

メソスケールの粗い海底地形（ラフネス）が南極周極流のエネルギーバランスに与える影響は十分に議論されていない。本研究では、南極周極流を理想化したモデルを用いて感度実験を行い、ラフネスの影響を評価した。ラフネスによりジャイアが形成されず、ポテンシャルエネルギーへの供給と傾圧エネルギー変換が強化された。線形安定性解析を行ったところ、ラフネスにより傾圧不安定の成長率が約 1.3 倍に増加していることがわかった。また、SST 緩和を導入した実験の結果、Jouanno and Capet (2020) の再解釈を行い、南北等密度面勾配の違いはエネルギーでは説明できないことが示唆された。これは大気海洋相互作用におけるラフネス効果が逆転する可能性を示す。

・広瀬 直毅（九大応力研），北西太平洋データ同化における粗格子配置の検討

観測であれ、数値モデルであれ、データ同化であれ、予算や時間には限りがある、つまり研究資源は有限である。そこで観測点やデータ同化の粗格子も、限られた観測点・計算点となるため、できるだけ精度良く配置したいものである。本研究では、正三角形・正方形・正六角形のどれが等間格子配置として有利かを統計的に調査した。乱数で理想データを作成し、3種類の粗格子配置でサンプリングした後にクリギング補間（最適内挿法）を実施し、元データの再現性を評価すると、△と□が高精度で、○の誤差が大きくなった。渦解像モデルの海面高度や水平流速成分でも同様の傾向であった。カルマンフィルターを近似する粗格子として△と□のどちらが有利か実験した。

・吉川 浩一郎（京大理），海面加熱時の乱流強度の鉛直分布と大気境界層との比較

2023 年と 2024 年の夏季田辺湾にて流速と水温を計測し、乱流運動エネルギー散逸率 ε と混合層深度を推定した。混合層内の ε の水深依存性を調べたところ、大気中で成立している Monin-Obukhov 相似則が示す値に比べて、海洋における ε は小さいことが示された。さらに LES による数値実験を行ってこの原因について調査した。その結果、ラングミュア乱流の効果を再現した実験と、太陽放射の透過性を考慮した実験では、観測と同様に ε が小さくなる傾向が見られた。上記の結果は、大気と同様のスケールングでは、海面加熱時の海洋内の乱流混合を過大評価する可能性を示している。

・牛島 悠介（愛媛大沿岸セ），海洋モデルの高解像度化に伴う北太平洋上層の高温化とその過程に関する研究

本研究では、渦非解像海洋モデルと渦解像海洋モデルにおける北太平洋亜熱帯域上層水温の違いを解析した。気候学的平均流に沿って上層の熱収支を評価した結果、両モデルにおいて平均流による移流が循環域の加熱を支配しており、これらの加熱と海面冷却が釣り合っていた。しかし、渦解像モデルでは黒潮続流が強化され、その結果として東向き水温低下が抑制されていた。この抑制は、ラグランジュ的視点からみると、黒潮続流の強化により、平均流に沿って輸送される水塊が強い表面冷却を受ける時間が短縮されるため、黒潮続流域で温められた水が亜熱帯循環域内部へ運ばれ、上層の温暖化が促進されると解釈される。

・寺田 雄亮 (JAMSTEC), 赤道中層ジェット有位相伝搬

大西洋赤道上的中層(深さ約 500 - 2000 m)で観測された、数百メートルごとに東向きと西向きの流れが重なった赤道中層ジェットは数年の周期で変動しており、その位相は下向きに伝播することが報告されている。位相伝搬の原因を調査するため、数値モデルを用いて赤道中層ジェットを再現する実験と、海底に散逸を加えた実験を実施した。その結果海底摩擦が有る場合に位相は上向きに、無い場合は下向きに伝搬する結果が得られた、この結果は赤道中層ジェットの位相伝搬がエネルギー散逸の起こる位置に感度があることを示唆している。

・磯辺 篤彦 (九大応力研), 微細マイクロプラスチックの観測とモデリング

サイズが 10~300 μm の微細マイクロプラスチック(sMP)を、その浮遊濃度を北太平洋の 0-1000m で多層採取した海水より抽出した。鉛直分布は塩分分布と似た曲線を示し、生物過程に伴って中性浮力になった sMP の along-isopycnal subduction による海洋中層に広がった海洋輸送を窺わせた。数値モデリングによる再現と今後の課題について紹介した。

「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」報告

富山高等専門学校商船学科 福留研一

2025 年 12 月 4 日から 12 月 5 日にかけて、九州大学筑紫キャンパスにて九州大学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」を開催した。全体で 44 名、九大内外からそれぞれ、15 名と 29 名が参加した。

初日は 8 題の講演があり、最初のセッションでは、自由波非線形分散関係の外洋域における検証により線形とのずれが最大となる波高の存在が示唆されること、五島海底谷東側斜面で観測された中層潜流が大潮時に形成された水温勾配によって駆動されること、ペーリング海峡の通過流量では海水直下のエクマン層における非地衡流成分が重要となることについて、HF レーダーや CTD、航走・係留 ADCP、衛星マイクロ波放射計等によるモニタリング結果等を用いた 3 題の講演があった。続くセッションでは、宗谷暖流下流域の亜慣性流速変動とその季節変動特性がサハリン沖および宗谷海峡起源の沿岸捕捉波の重ね合わせて説明できること、対馬・宗谷海峡での流速変動について亜慣性周期においても冬季にサハリン岸沿いの風が宗谷暖流を駆動し対馬海峡へ伝搬する連動機構があること、地球温暖化に伴い冬季の海面熱フラックスや混合層深度が変化することで北西太平洋の季節変動サイクルが変化していることについて、潮位、HF レーダー、海底設置 ADCP、衛星海面水温や海洋再解析データ等を用いた 3 題の講演があった。初日最後のセッションでは、春季の東北-北陸沖合域の低塩化が沿岸域からの遠隔的な低塩水流出に起因し、混合層の浅化・高生産性が生じていたこと、GNSS アンテナと船首方位の回転軸の位置の相違に起因する見かけの Sway の影響を適切な除去により、航行する船舶の左右ドリフトから海洋表層流れを精度よく抽出できることについて、蓄積された歴史的な水温・塩分観測資料や水中グライダー観測、船舶の位置・船首方位等を用いた 2 題の講演があった。

二日目は、大阪湾の残差流場についての非構造格子モデル FVCOM を用いた流況場の再現性評価、DREAMS-M 出力による粒子追跡実験とヤリイカの平衡石に残された台風の痕跡を用いたヤリイカの成長モデルの検討、山陰沖日周潮流の円運動と陸棚波理論解、日本周辺海域モデルにおける波成混合の調査などについて、日本周辺海域を対象とした海況モデルや海底設置 ADCP 等を用いた 4 題の講演があった。

本年度も 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た研究結果が多く示された。加えて、従来行われてきたモニタリング結果から得られたデータの再評価や新たな活用法についても議論され、情報交換が行われたことにも大きな意義があった。今後とも、日本周辺海域の海況・波浪の研究に携わる研究者・関係者が一堂に会する集会となり、活発な議論と情報交換の場となることを期待する。最後に、本研究集会の開催を承諾して頂いた九州大学応用力学研究所、集会を開催するにあたり世話人を引き受けて頂いた広瀬直毅教授をはじめとする諸氏に感謝する。

====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：2025年12月4日（木）～12月5日（金）

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）

(<https://www.riam.kyushu-u.ac.jp/center/access.html>)

* 先だって行われるレーダー集会後に時間をおいて開催します。

-----12/4（木）-----

13:30-13:35 趣旨説明

13:35-14:00

自由波非線形分散関係の検証と検討

○久木幸治(琉球大理学部)

14:00-14:25

五島海底谷東側斜面で観測された中層潜流

○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）

14:25-14:50

海氷直下の境界層を考慮したベーリング海峡通過流量の見直し

○早川晃平・島田浩二（東京海洋大）

14:50-15:05 休憩

15:05-15:30

宗谷暖流下流域の垂慣性流速変動メカニズム

○久賀みづき(水研機構), 大島慶一郎(北大低温研), 江淵直人(北大低温研), 深町康(北大北極センター)

15:30-15:55

日本海通過流における3海峡でのコヒーレントな垂慣性流速変動

○大島慶一郎(北大低温研)・吉川裕(京大院理)・久賀みづき(北大低温研)・深町康(北大北極セ)

15:55-16:20

Changes of Seasonal Cycle in the Western North Pacific

○Zhuang Chuyuan（九大総理工）・Kida Shinichiro（九大応力研）

16:20-16:30 休憩

16:30-16:55

水中グライダー観測による日本海沖合域への河川水流入の定量化

○和川 拓・井桁庸介・久賀みづき（水研機構）・竹内茉莉香（NOC）・永井 平・阿部祥子・井口直樹・中江美里（水研機構）・児玉武稔（東大院農学生命）・本多直人（水研機構）

16:55-17:20

変針を考慮して船舶ドリフトから表層海流を推定することについて

○稲津大祐・島田浩二（東京海洋大）

17:20-17:40 情報交換

-----12月5日(金)-----

9:55-10:20

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（神戸大内海セ）・廣川綜一・高橋祐生（神戸大院海事）

10:20-10:45

ヤリイカ（*Heterololigo bleekeri*）の平衡石に残された台風リンリン（2019年）の痕跡

○山口忠則（長崎大学水産）・Hong-Ryeol Shin（公州大）・広瀬直樹（九大応力研）、滝川哲太郎（長崎大水産）

10:45-11:00 休憩

11:00-11:25

山陰沖日周潮流の円運動と陸棚波理論解

○滝川哲太郎・小濱颯月（長崎大）・森本昭彦（愛媛大CMES）・遠藤貴洋（九大応力研）

11:25-11:50

日本周辺海域モデルにおける波成混合の調査

○広瀬直毅・劉天然（九大応力研）・吉川裕（京都大）・LEE, Eunjeong (KIAPS)

11:50-12:10 総合討論

=====

日本周辺海域の海況モニタリングと波浪計測に関する研究集会

2025年12月4日～12月5日

	氏 名	所 属	e-mail	懇親会	チェック欄
1	江淵直人	北海道大学 低温科学研究所		○	
2	坪野 考樹	電中研		○	
3	中山 智治	日本海洋科学振興財団むつ海洋研究所		○	
4	渡邊修一	日本海洋科学振興財団むつ海洋研究所		○	
5	横川将太	福井県立大学			
6	工藤楓己	長崎大学総合生産科学研究科1年		○	
7	印 貞治	日本海洋科学振興財団むつ海洋研究所		○	
8	久木幸治	琉球大学理学部物質地球科学科		○	
9	小濱 颯月	長崎大学水産学部		○	
10	広瀬 成章	気象庁気象研究所		○	
11	和川 拓	水産研究・教育機構		○	
12	兼田 淳史	福井県立大学			
13	北島 輝	熊本大学 工学部			
14	大島慶一郎	北海道大学 低温科学研究所		○	
15	林 美鶴	神戸大学		○	
16	滝川哲太郎	長崎大学			
17	稲津大祐	東京海洋大学		○	
18	早川晃平	東京海洋大学 修士2年		○	
19	辻英一	九州大学応用力学研究所			
20	広瀬直毅	九州大学応用力学研究所		○	

	氏 名	所 属	e-mail	懇親会	チェック欄
21	藤井 智史	琉球大学		○	
22	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		○	
23	久賀みづき	国立研究開発法人 水産研究・教育機構 水産資源研究所 水産資源研究センター		○	
24	谷田 裕	神戸大学大学院海事科学研究科 (修士2年)		○	
25	庄 楚縁	九州大学総合理工学府地球環境理工学メ ジャーD1		○	
26	木田新一郎	九州大学応用力学研究所		○	
27	刘天然	九州大学応用力学研究所			
28	市川 香	九州大学応用力学研究所			
29	川崎晴暉	九州大学総合理工学府地球環境理工学メ ジャーM1			
30	大貫陽平	九州大学応用力学研究所			
31	山口忠則	長崎大学水産学部		○	
32	倉垣拓二	JFEアドバンテック株式会社			
33	福留研一	富山高専専門学校 商船学科		○	
34	河野凌大	九州大学総合理工学府地球環境理工学メ ジャーM1			
35	Tahira Irfan	RIAM			
36	山渕航助	京都府農林水産技術センター海洋セン		○	
37	久田 哲二	京都府農林水産技術センター海洋センタ		○	
38	中畑駿之助	九州大学総合理工学府地球環境理工学メ ジャーM2			
39	船越裕紀	京都府農林水産技術センター海洋センタ		○	
40	千手智晴	九州大学応用力学研究所			

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

2025年12月4日～12月5日

	氏 名	所 属	e-mail	懇親会	チェック欄
41	乾 翔駿	九州大学総合理工学府地球環境理工学メ ジャーM1		○	
42	磯辺 篤彦	九州大学応用力学研究所			
43	宇佐見壮平	九州大学総合理工学府地球環境理工学メ ジャーM2			
44	渡慶次 力	福岡県立大学 海洋生物資源学部			
45					
46					
47			参加者 合計 44名		
48			九大 15名(応力研 9名 総理工 6名)		
49			その他 29名		
50					
51					
52					
53					
54					
55					
56					
57					
58					
59					
60					

自由波非線形分散関係 の検証と検討

琉球大学理学部
久木幸治

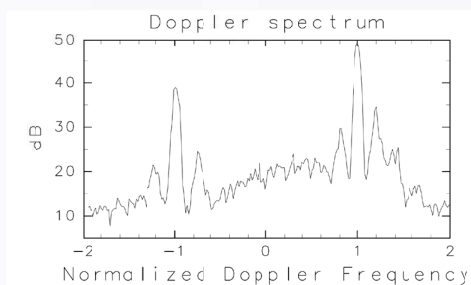
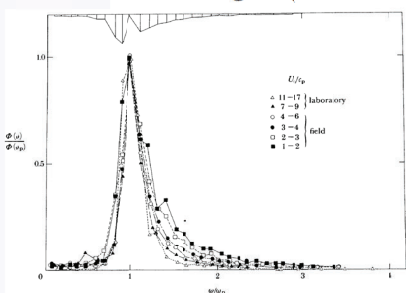
目次

- はじめに
- 定式化
- 外洋域における検証
- **数値計算による検討**
- まとめと課題

$$\eta = a \cos(kx - \omega t) + \frac{1}{2} k u^2 \cos(2(kx - \omega t)) + \frac{3}{8} k^2 u^3 \cos(3(kx - \omega t))$$

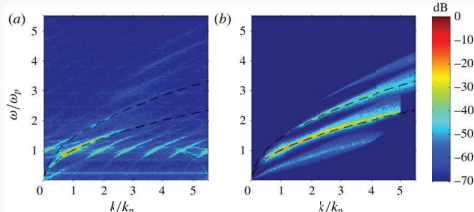
$$\omega^2 = gk$$

$$\omega^2 = gk(1 + k^2 a^2)$$



ドップラースペクトル× $S(k)$ (近似)
波の角周波数=ドップラー角周波数
 $S(k)$ KL スペクトル
 k 水平波数ベクトル
 k_0 入射電波水平波数ベクトル

過去の研究例
 Magnusson et al. (2015) 3D
 非線形関係



$$\Delta c_{L62} \approx \Delta c_{L62}^* = \pm 2 \int_0^{k_B} \omega(k) k S(k) dk \pm 2 k_B \int_{k_B}^{\infty} \omega(k) S(k) dk.$$

TABLE 2. Correlation coefficients (with 95% confidence intervals) between HFR radial currents and AWAC currents (U_{AWAC}) to which the different possible contributions of the Stokes drift were added. In the right section, $U_{HFR} \propto U_{AWAC} + \Delta c_i$ [where $i = (L16, L1, L62)$ for one-half of the surface Stokes drift, the weighted depth-averaged Stokes drift and the filtered surface Stokes drift respectively], the second line indicates the correlation coefficients that have been calculated with the approximations to the nonlinear corrections. The best correlations for each radar station are highlighted in boldface type. The bearing offsets are given for each radar-mounted current meter pair.

HFR site	Moorings	U_{HFR} vs U_{AWAC}			U_{HFR} vs $U_{AWAC} + \Delta c_i$							
		r	$\Delta\theta$	r'	U_{HFR}	$\Delta\theta_{L16}$	$\Delta\theta_{L1}$	$\Delta\theta_{L62}$	Δc_{L16}	Δc_{L1}	Δc_{L62}	$\Delta\theta_{L62}$
WERB												
PAB	Bic (winter 2017)	0.63 ± 0.02	-4°	0.62 ± 0.03	0.73 ± 0.03	-3°	0.80 ± 0.03	-1°	0.75 ± 0.04	-3°	0.74 ± 0.04	-3°
					0.70 ± 0.04		0.79 ± 0.03		0.73 ± 0.04		0.71 ± 0.04	
PAO	Forestville (winter 2017)	0.30 ± 0.03	-3°	0.2 ± 0.04	0.80 ± 0.04	-4°	0.90 ± 0.03	-4°	0.87 ± 0.02	-4°	0.84 ± 0.02	-4°
					0.78 ± 0.04		0.88 ± 0.05		0.86 ± 0.03		0.83 ± 0.02	
CODAR												
PAP	Forestville (winter 2017)	0.17 ± 0.03	-12°	0.2 ± 0.06	0.81 ± 0.05	0°	0.96 ± 0.03	0°	0.83 ± 0.03	0°	0.77 ± 0.02	0°
					0.84 ± 0.04		0.80 ± 0.05		0.75 ± 0.04		0.75 ± 0.04	
PAP	Saint-Ulrich (summer 2013)	0.91 ± 0.02	-1°	0.93 ± 0.03	0.93 ± 0.03	-1°	0.93 ± 0.03	-1°	0.93 ± 0.02	-1°	0.93 ± 0.02	-1°
					0.92 ± 0.02		0.93 ± 0.03		0.93 ± 0.02		0.93 ± 0.02	

過去の研究例

$$\Delta c_{L62} \approx \Delta c_{L62}^* = \pm 2 \int_0^{k_B} \omega(k) k S(k) dk \pm 2 k_B \int_{k_B}^{\infty} \omega(k) S(k) dk.$$

$$\Delta c_2 = \int_0^{\sigma_2} 2E(\sigma) \sigma k d\sigma + \int_{\sigma_1}^{\infty} 2E(\sigma) \sigma k_2 d\sigma,$$

1方向波浪

$$\nabla^2 \phi = 0$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2}(\nabla \phi)^T \cdot (\nabla \phi) = -g\eta \quad \text{at } z = \eta$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + (\nabla \phi)^T \cdot (\nabla \eta) = \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad \text{at } z = \eta$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad \text{at } z = -\infty$$

$$\nabla \equiv \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)^T \quad \nabla^2 \equiv \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}.$$

$$\nabla^2 \phi = 0$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2}(\nabla \phi)^T \cdot (\nabla \phi) = -g\eta \quad \text{at } z = \eta$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + (\nabla \phi)^T \cdot (\nabla \eta) = \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad \text{at } z = \eta$$

$$\phi(\mathbf{x}, z, t) = \int_{\mathbf{K}} dA(\mathbf{K}) \exp(i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{x} - \omega t) + kz),$$

$$\eta(\mathbf{x}, t) = \int_{\mathbf{K}} dB(\mathbf{K}) \exp(i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{x} - \omega t))$$

$$\mathbf{K} = (\omega, \mathbf{k})$$

$$W(\mathbf{K}) + \int_{\mathbf{K}_1} F(\mathbf{K}, \mathbf{K}_1) S_{\mathbf{K}}^{(1)}(\mathbf{K}_1) d\mathbf{K}_1 = 0$$

$$\mathbf{K} = (\omega, \mathbf{k}) \quad \mathbf{K}_n = (\omega_n, \mathbf{k}_n)$$

$$W(\mathbf{K}) \equiv g - \frac{\omega^2}{k}$$

$$F(\mathbf{K}, \mathbf{K}_1) = -\frac{4[f_2(\mathbf{K}, \mathbf{K}_1)]^2}{W(\mathbf{K} - \mathbf{K}_1)} - f_3(\mathbf{K}, \mathbf{K}_1, -\mathbf{K}_1) \\ - f_3(\mathbf{K}, \mathbf{K}_1, \mathbf{K}) - f_3(\mathbf{K}, \mathbf{K}, \mathbf{K}_1)$$

$$S_{\mathbf{K}}(\mathbf{K}) = S_{\omega, \mathbf{k}}(\omega, \mathbf{k})$$

$$f_2(\mathbf{K}, \mathbf{K}_1) = \frac{1}{2} \left[\omega^2 - \omega\omega_1 + \omega_1^2 - \omega\omega_1 \langle \mathbf{k}, \mathbf{k}_1 \rangle \right. \\ \left. - \omega(\omega - \omega_1) \langle \mathbf{k}, \mathbf{k} - \mathbf{k}_1 \rangle - \omega_1(\omega - \omega_1) \langle \mathbf{k}_1, \mathbf{k} - \mathbf{k}_1 \rangle \right]$$

$$f_3(\mathbf{K}, \mathbf{K}_1, \mathbf{K}_2) = \frac{1}{4}(\omega^2 k_1 + \omega_2^2 k_2) + \frac{1}{2}\omega_1 \omega_2 (k_1 + k_2) - \frac{\omega}{4k}(\omega_1 k_1^2 + \omega_2 k_2^2) \\ - \frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2) |\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2| \left(\omega_1 \langle \mathbf{k}_1, \mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 \rangle + \omega_2 \langle \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 \rangle \right) \\ - \frac{1}{2}\omega(\omega_1 + \omega_2) \frac{(\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{k}_2)}{k} \\ + \frac{1}{2}\omega |\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2| \left(\langle \mathbf{k}, \mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 \rangle \left[\omega_1 \langle \mathbf{k}_1, \mathbf{k} + \mathbf{k}_2 \rangle + \omega_2 \langle \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 \rangle \right] \right. \\ \left. - \frac{1}{2}k\omega_1 \omega_2 \left(\langle \mathbf{k}, \mathbf{k}_1 \rangle + \langle \mathbf{k}, \mathbf{k}_2 \rangle \right) \right) \\ + \frac{1}{2}\omega_1 \omega_2 \left[|\mathbf{k} - \mathbf{k}_1| \langle \mathbf{k}_1, \mathbf{k} - \mathbf{k}_1 \rangle \langle \mathbf{k}_2, \mathbf{k} - \mathbf{k}_1 \rangle \right. \\ \left. + |\mathbf{k} - \mathbf{k}_2| \langle \mathbf{k}_1, \mathbf{k} - \mathbf{k}_2 \rangle \langle \mathbf{k}_2, \mathbf{k} - \mathbf{k}_2 \rangle \right].$$

$$\langle \mathbf{a}, \mathbf{b} \rangle \equiv \frac{\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}}{|\mathbf{a}| |\mathbf{b}|}.$$

水平波数空間

$$W(\mathbf{K}) + I(\mathbf{K}) = 0$$

$$\mathbf{K} = (\omega, \mathbf{k}) \quad \mathbf{K}_n = (\omega_n, \mathbf{k}_n)$$

$$W(\mathbf{K}) \equiv g - \frac{\omega^2}{k}$$

$$I(\mathbf{K}) \equiv \int_{\mathbf{K}_1} F(\mathbf{K}, \mathbf{K}_1) S_{\mathbf{K}}^{(1)}(\mathbf{K}_1) d\mathbf{K}_1$$

$$I(\mathbf{K}) = \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\infty} \tilde{F}(\mathbf{K}, \mathbf{K}_1) S_{\omega, \theta}^{(1)}(\omega_1, \theta_1) d\omega_1 d\theta_1$$

$S_{\omega, \theta}^{(1)}(\omega, \theta)$: 角周波数 ω , 伝搬方向 θ に対する 1 次方向スペクトル

$$\tilde{F}(\mathbf{K}, \mathbf{K}_1) = \frac{1}{2}(F(\mathbf{K}, \mathbf{K}_1) - F(\mathbf{K}, -\mathbf{K}_1))$$

$$S_q(q)$$

水平波数空間

$$W(\mathbf{K}) + I(\mathbf{K}) = 0$$

$$\mathbf{K} = (\omega, \mathbf{k}) \quad \mathbf{K}_n = (\omega_n, \mathbf{k}_n)$$

$$W(\mathbf{K}) \equiv g - \frac{\omega^2}{k}$$

$$I(\mathbf{K}) \equiv \int_{\mathbf{K}_1} F(\mathbf{K}, \mathbf{K}_1) S_{\mathbf{K}}^{(1)}(\mathbf{K}_1) d\mathbf{K}_1$$

$$I(\mathbf{K}) = \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\infty} \tilde{F}(\mathbf{K}, \mathbf{K}_1) S_{\omega, \theta}^{(1)}(\omega_1, \theta_1) d\omega_1 d\theta_1$$

水平波数空間 $\mathbf{K}$ に関する 1 次元積分
従来の研究 [10] の結果に基づいて、初期値 $W(\mathbf{K})=0$ とする。
水平波数空間 $\mathbf{K}$ を与えて、 $W(\mathbf{K})+I(\mathbf{K})=0$ を次の方程式として解く。

$$c = \frac{\omega}{k}, \text{ 線形位相速度 } c_0(\omega) = \frac{g}{\omega} \text{ として}$$

$$W(\mathbf{K}) \equiv g - \frac{\omega^2}{k} = -g \frac{c - c_0(\omega)}{c_0(\omega)} = -g \frac{\Delta c(\omega)}{c_0(\omega)}$$

$$W(\mathbf{K}) + I(\mathbf{K}) = 0 \quad I(\mathbf{K}) \equiv \int_{\mathbf{K}_1} F(\mathbf{K}, \mathbf{K}_1) S_{\mathbf{K}}^{(1)}(\mathbf{K}_1) d\mathbf{K}_1$$

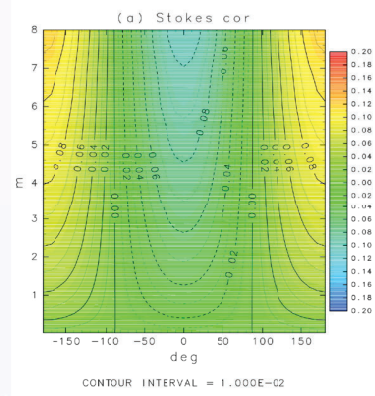
$$\frac{\Delta c(\omega)}{c_0(\omega)} = \frac{c - c_0(\omega)}{c_0(\omega)} = \frac{I}{g}$$

$$c_0(k) = \sqrt{\frac{g}{k}}$$

$$\Delta c(\omega) = \frac{I}{\omega}, \quad \Delta c(k) = c - c_0(k) \simeq \frac{I}{2\sqrt{gk}}$$

$$\Delta c(\omega) \simeq 2\Delta c(k)$$

$$\frac{\Delta c(\omega)}{c_0(\omega)} = \frac{c - c_0(\omega)}{c_0(\omega)} = \frac{I}{g} \quad I(\mathbf{K}) \equiv \int_{\mathbf{K}_1} F(\mathbf{K}, \mathbf{K}_1) S_{\mathbf{K}}^{(1)}(\mathbf{K}_1) d\mathbf{K}_1$$



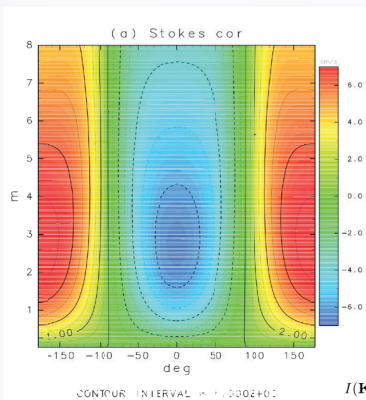
$$W(\mathbf{K}) = 0$$

$$W(\mathbf{K}_1) = 0$$

$$\mathbf{K} = (\omega, k)$$

$$\cos^{2s}\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

$$W(\mathbf{K}) + I(\mathbf{K}) = 0$$



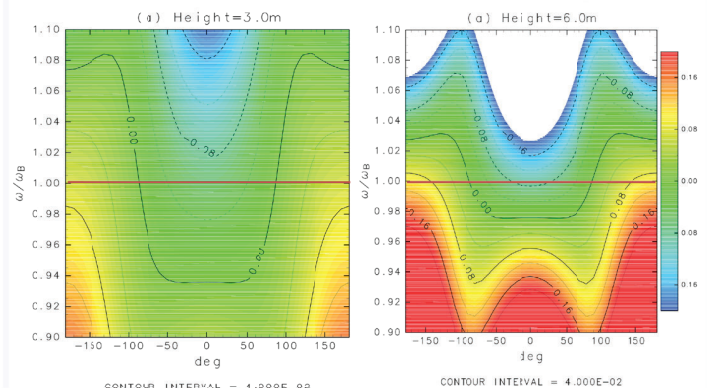
$$W(\mathbf{K}) \equiv g - \frac{\omega^2}{k}$$

$$W(\mathbf{K}_1) = 0$$

$$\mathbf{K} = (\omega, k)$$

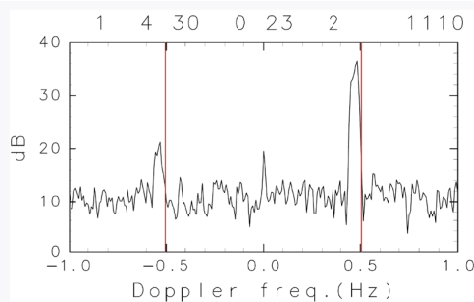
$$I(\mathbf{K}) \equiv \int_{\mathbf{K}_1} F(\mathbf{K}, \mathbf{K}_1) S_{\mathbf{K}}^{(1)}(\mathbf{K}_1) d\mathbf{K}_1$$

$$I(\mathbf{K}) = \int_{\mathbf{K}_1} F(\mathbf{K}, \mathbf{K}_1) S_{\mathbf{K}}^{(1)}(\mathbf{K}_1) d\mathbf{K}_1$$



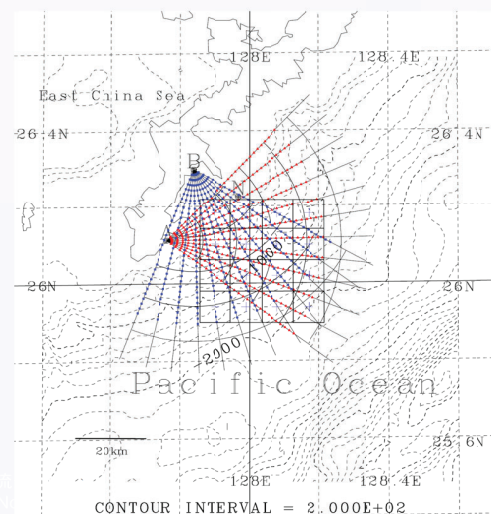
$$\omega_B = \sqrt{2gk_0}$$

$$\mathbf{K} = (\omega, k)$$

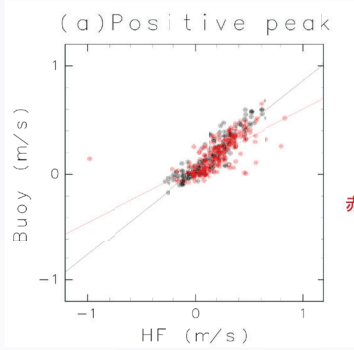


$$\omega_B = \sqrt{2gk_0}$$

$$\omega_{DP} = \omega_B - 2k_0 U_r$$



視線方向流速(正のピーク)



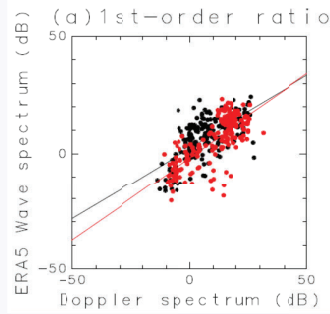
赤:レーダB

時間= 0.000000 , 数= 201, Av= 0.205936 , 0.184894 , RMS= 0.143896 , SI= 0.590999

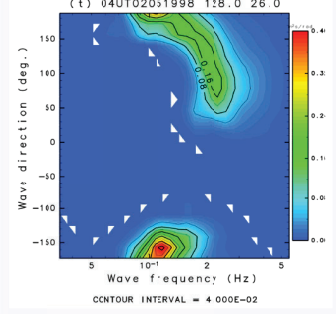
相関= 0.6880481 , 数= 201, Av= 0.205936 , 0.184894 , RMS= 0.143896 , SI= 0.590999

波浪スペクトル

$$I(\mathbf{K}) = \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\infty} \tilde{F}(\mathbf{K}, \mathbf{K}_1) S_{\omega, \theta}^{(1)}(\omega_1, \theta_1) d\omega_1 d\theta_1$$

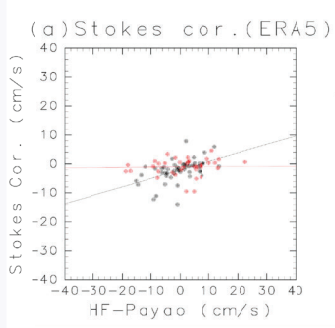


赤:レーダB



波浪スペクトル

二波数成分の Stokes 相関係数 (ERA5) とレーダ観測との比較
比較: 二波数成分の Stokes 相関係数



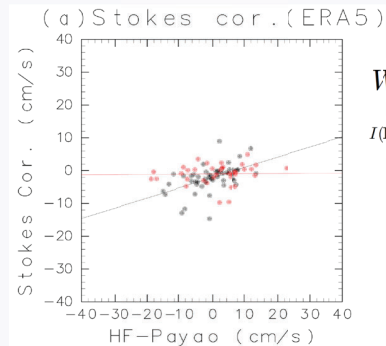
$$W(\mathbf{K}) + I(\mathbf{K}) = 0$$

二波数成分の Stokes 相関係数

赤:レーダB

時間= 0.000000 , 数= 50, Av= 0.142392 , 0.000000
RMS= 5.807241 , SI= 0.000000
相関= 4.2192236E-02, 数= 38, Av= -1.628185 , -1.014686 ,
RMS= 20.33623 , SI= -12.48444

二波数成分の Stokes 相関係数 (ERA5) とレーダ観測との比較
比較: 二波数成分の Stokes 相関係数



$$W(\mathbf{K}) + I(\mathbf{K}) = 0$$

$$I(\mathbf{K}) \equiv \int_{\mathbf{K}_1} F(\mathbf{K}, \mathbf{K}_1) S_{\mathbf{K}}^{(1)}(\mathbf{K}_1) d\mathbf{K}_1$$

$$W(\mathbf{K}) = 0$$

赤:レーダB

時間= 0.000000 , 数= 50, Av= 0.142392 , 0.000000
RMS= 5.807241 , SI= 0.000000
相関= 4.4455666E-02, 数= 38, Av= -1.628185 , -1.015559 ,
RMS= 20.33774 , SI= -12.48538

$$W(\mathbf{K}) + I(\mathbf{K}) = 0$$

$$I(\mathbf{K}) \equiv \int_{\mathbf{K}_1} F(\mathbf{K}, \mathbf{K}_1) S_{\mathbf{K}}^{(1)}(\mathbf{K}_1) d\mathbf{K}_1$$

単一方向に伝搬する波

$$I(\mathbf{K}) = \int_c^k \tilde{F}_-(\mathbf{K}, \mathbf{K}_1) S_k^{(1)}(k_1) dk_1 + \int_k^{\infty} \tilde{F}_+(\mathbf{K}, \mathbf{K}_1) S_k^{(1)}(k_1) dk_1$$

$$\begin{aligned} \tilde{F}_-(\mathbf{K}, \mathbf{K}_1) &= -2\omega_1^2 \left\{ \frac{(\omega_1 - \omega)^2}{W(\mathbf{K} - \mathbf{K}_1)} + \frac{\omega^2}{W(\mathbf{K} + \mathbf{K}_1)} \right\} \\ &\quad + \omega_1^2 k_1 + 2\omega\omega_1 k_1 - \omega_1^2 k \quad k > k_1 \\ \tilde{F}_+(\mathbf{K}, \mathbf{K}_1) &= -2\omega^2 \left\{ \frac{(\omega - \omega_1)^2}{W(\mathbf{K} - \mathbf{K}_1)} + \frac{\omega_1^2}{W(\mathbf{K} + \mathbf{K}_1)} \right\} \\ &\quad + \omega^2 k + 2\omega\omega_1 k - \omega^2 k_1 \quad k < k_1 \end{aligned}$$

$$W(\mathbf{K}) + I(\mathbf{K}) = 0$$

$$I(\mathbf{K}) \equiv \int_{\mathbf{K}_1} F(\mathbf{K}, \mathbf{K}_1) S_{\mathbf{K}}^{(-)}(\mathbf{K}_1) d\mathbf{K}_1$$

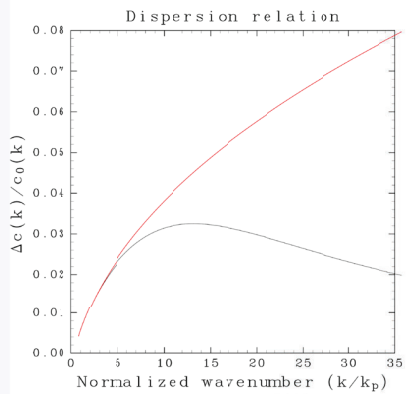
単一方向に伝搬する波

$$I(\mathbf{K}) = \int_0^k \tilde{F}_-(\mathbf{K}, \mathbf{K}_1) S_k^{(1)}(k_1) dk_1 + \int_k^{\infty} \tilde{F}_+(\mathbf{K}, \mathbf{K}_1) S_k^{(1)}(k_1) dk_1$$

W(K)=0とすると

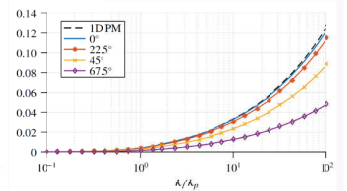
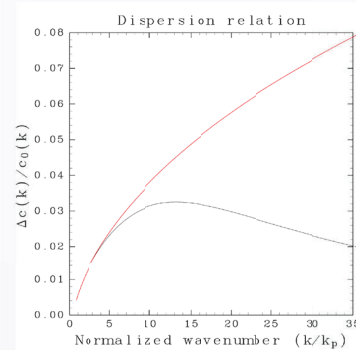
$$\begin{aligned} \tilde{F}_-(\mathbf{K}, \mathbf{K}_1) &= 4\omega\omega_1 k_1 \quad \text{for } k \geq k_1 \\ \tilde{F}_+(\mathbf{K}, \mathbf{K}_1) &= 4\omega\omega_1 k \quad \text{for } k < k_1 \end{aligned}$$

Longuet-Higgins (1962) & (1963)
Phillips & Saffman (1967)



赤線:Iの計算でW(K)=0。

線幅の半値波数k=π/aの方程式
Wiki:|k|=0の解



Stationary and transient (2019) JPL

高次方程式の解法 (Mathematica, Maple, SageMath, etc.)

$$\begin{aligned}\nabla^2 \phi &= 0 \\ \frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} |\nabla \phi|^2 + g\eta &= 0 \quad \text{at } z = \eta \\ \frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \phi \cdot \nabla \eta - \frac{\partial \phi}{\partial z} &= 0 \quad \text{at } z = \eta\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial \psi_s}{\partial t} + g\eta + \frac{1}{2} |\nabla_h \psi_s|^2 - \frac{1}{2} w_s^2 (1 + |\nabla_h \eta|^2) &= 0 \\ \frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla_h \psi_s \cdot \nabla_h \eta - w_s (1 + |\nabla_h \eta|^2) &= 0\end{aligned}$$

$$\psi_s(\mathbf{x}, t) = \phi(\mathbf{x}, \eta, t) \quad w_s(\mathbf{x}, t) = \partial \phi / \partial z \Big|_{z=\eta}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial \psi_s}{\partial t} + g\eta + \frac{1}{2} |\nabla_h \psi_s|^2 - \frac{1}{2} w_s^2 (1 + |\nabla_h \eta|^2) &= 0 \\ \frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla_h \psi_s \cdot \nabla_h \eta - w_s (1 + |\nabla_h \eta|^2) &= 0\end{aligned}$$

$$\phi(\mathbf{x}, z, t) = \sum_{m=1}^M \phi^{(m)}(\mathbf{x}, z, t) \quad w_s = \sum_{m=1}^M w_s^{(m)}$$

$$\phi^{(1)}(\mathbf{x}, 0, t) = \psi_s(\mathbf{x}, t)$$

$$\phi^{(m)}(\mathbf{x}, 0, t) = - \sum_{n=1}^{m-1} \frac{\eta^n}{n!} \frac{\partial^n}{\partial z^n} \phi^{(m-n)}(\mathbf{x}, z, t) \Big|_{z=0} \quad (m=2, \dots, M)$$

$$w_s^{(m)} = \sum_{n=0}^{m-1} \frac{\eta^n}{n!} \frac{\partial^{n+1}}{\partial z^{n+1}} \phi^{(m-n)}(\mathbf{x}, z, t) \Big|_{z=0}$$

$$\phi(\mathbf{x}, z, t) = \sum_{m=1}^M \phi^{(m)}(\mathbf{x}, z, t) \quad w_s = \sum_{m=1}^M w_s^{(m)}$$

$$\phi^{(1)}(\mathbf{x}, 0, t) = \psi_s(\mathbf{x}, t)$$

$$\phi^{(m)}(\mathbf{x}, 0, t) = - \sum_{n=1}^{m-1} \frac{\eta^n}{n!} \frac{\partial^n}{\partial z^n} \phi^{(m-n)}(\mathbf{x}, z, t) \Big|_{z=0} \quad (m=2, \dots, M)$$

$$w_s^{(m)} = \sum_{n=0}^{m-1} \frac{\eta^n}{n!} \frac{\partial^{n+1}}{\partial z^{n+1}} \phi^{(m-n)}(\mathbf{x}, z, t) \Big|_{z=0}$$

$$\nabla^2 \phi^{(m)} = 0$$

$$\phi^{(m)}(\mathbf{x}, z, t) = \sum_k \sum_l c_{k,l}^{(m)} \exp(\kappa_{k,l} z) \exp(ik_x x) \exp(ik_y y)$$

$$k_x = \frac{2\pi k}{L_x} \quad k_y = \frac{2\pi l}{L_y} \quad \kappa_{k,l} = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$$

$$\frac{\partial^n}{\partial z^n} \phi^{(m)}(\mathbf{x}, z, t) \Big|_{z=0} = \sum_k \sum_l c_{k,l}^{(m)} \kappa_{k,l}^n \exp(ik_x x) \exp(ik_y y)$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial \psi_s}{\partial t} + g\eta + \frac{1}{2} |\nabla_h \psi_s|^2 - \frac{1}{2} w_s^2 (1 + |\nabla_h \eta|^2) &= 0 \\ \frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla_h \psi_s \cdot \nabla_h \eta - w_s (1 + |\nabla_h \eta|^2) &= 0\end{aligned}$$

$$(w_s^2)^{(m)} \simeq \sum_{n=1}^{m-1} w_s^{(n)} w_s^{(m-n)}$$

$$w_s^2 (1 + |\nabla_h \eta|^2) \simeq \sum_{m=1}^M [(w_s^2)^{(m)} + \sum_{m=1}^{M-2} (w_s^2)^{(m)} |\nabla_h \eta|^2]$$

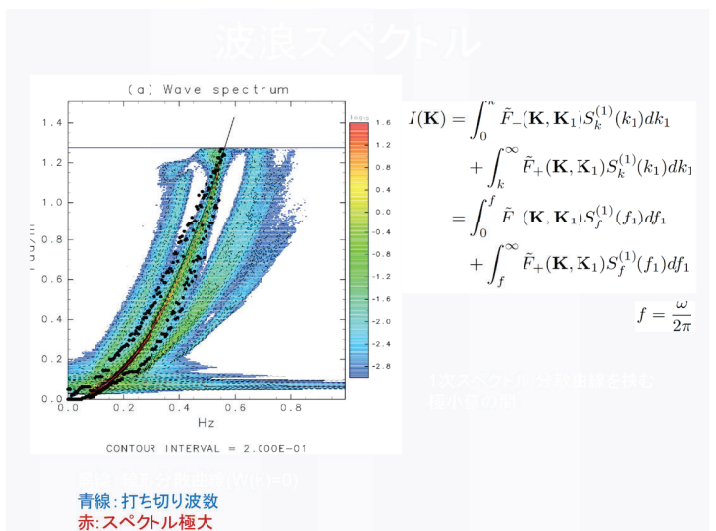
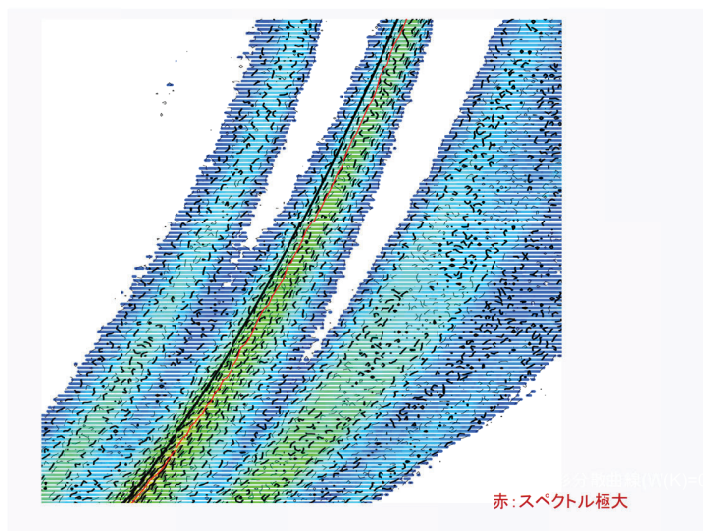
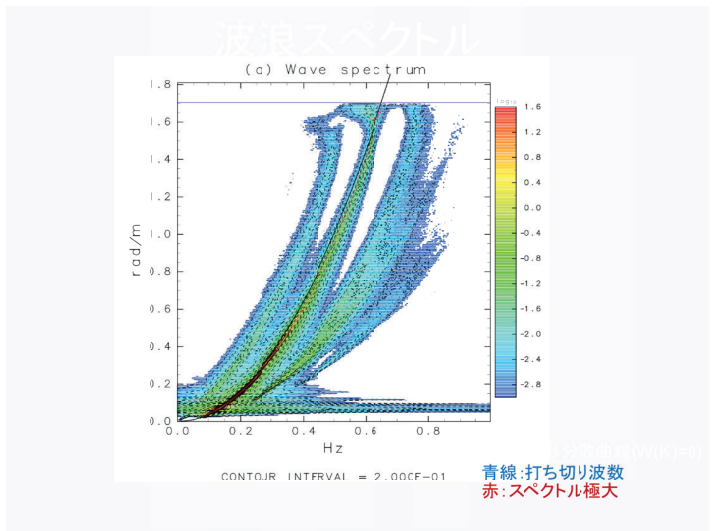
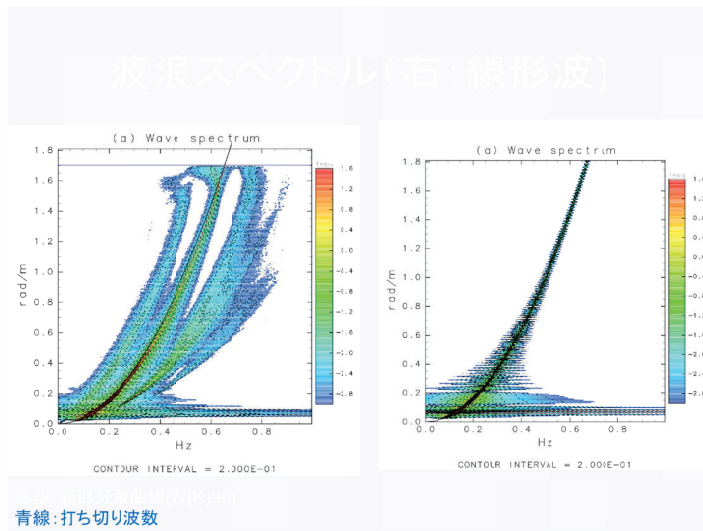
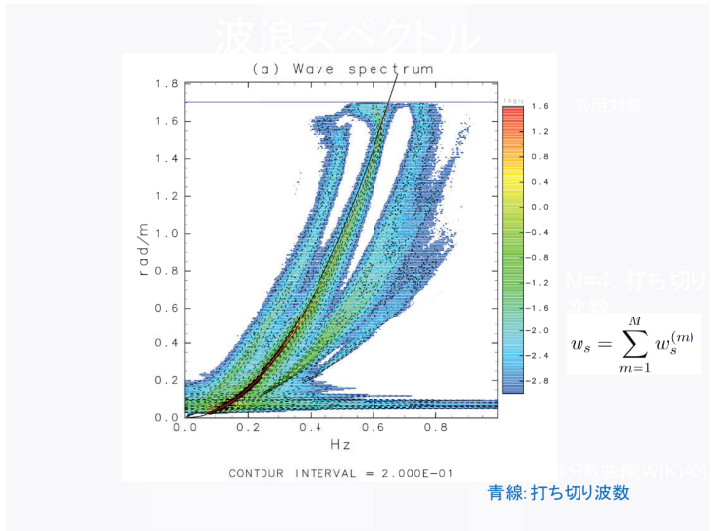
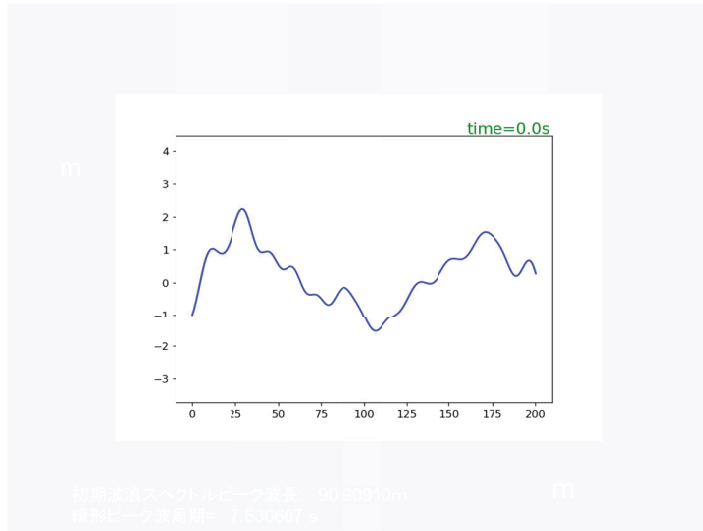
η と φ に関する微分方程式

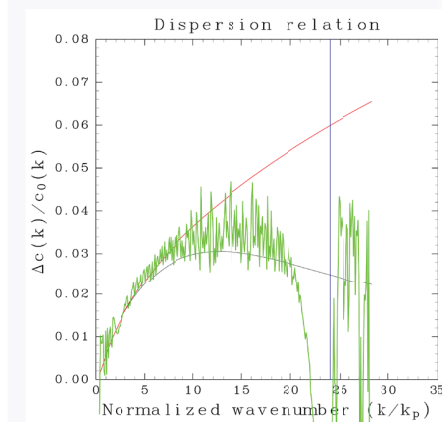
格子点数の2倍の個数の要素からなるベクトル関数

Runge-Kutta法で解く

初期値: 線形波

スペクトルを与えてランダムな位相の波の重ね合わせ





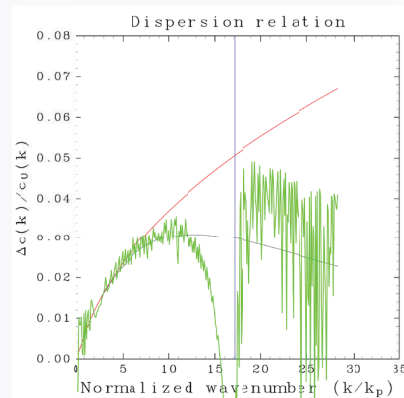
M=4 打ち切り波数

赤線: I の計算で $W(K)=0$

① の方程式

緑: 波長スペクトル極値
(尾根) から求めた
位相速度差

青線: 打ち切り波数



M=5 打ち切り波数

赤線: I の計算で $W(K)=0$

① の方程式

緑: 波長スペクトル極値
(尾根) から求めた
位相速度差

青線: 打ち切り波数

まとめと今後の課題

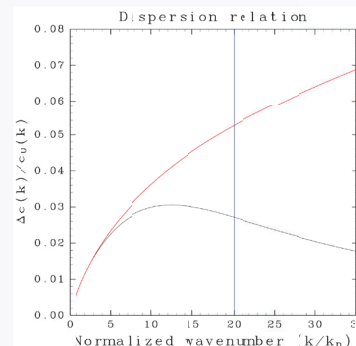
- 自由波の非線形分散関係 (ストークス補正)
- 線形波とのずれが最大となる波高 (ピーク周波数) が存在。
- 一次散乱比と ERA5 波長スペクトルの $\pm 2k_0$ のスペクトル比は一致。
- スペクトル比が近いケースではストークス補正とレーダー-流速計の流速差の相関が高くなる。

まとめと今後の課題

- 高波数では規格化したストークス補正の減少が数値シミュレーションと今回の計算で再現。
- 今後の課題
- 個々のドップラースペクトルについて検討 (ピークの検出、一次散乱の広がりなど)。
- 打ち切り波数の影響。

終わり

積分上端を設定 (青)



$$I(\mathbf{K}) = \int_0^n \tilde{F}_-(\mathbf{K}, \mathbf{K}_1) S_k^{(1)}(k_1) dk_1 + \int_k^\infty \tilde{F}_+(\mathbf{K}, \mathbf{K}_1) S_k^{(1)}(k_1) dk_1 = \int_0^f \tilde{F}_-(\mathbf{K}, \mathbf{K}_1) S_f^{(1)}(f_1) df_1 + \int_f^\infty \tilde{F}_+(\mathbf{K}, \mathbf{K}_1) S_f^{(1)}(f_1) df_1$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi}$$

五島海底谷東側斜面で観測された 中層潜流

長崎大学総合生産科学研究科 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20 kmに位置

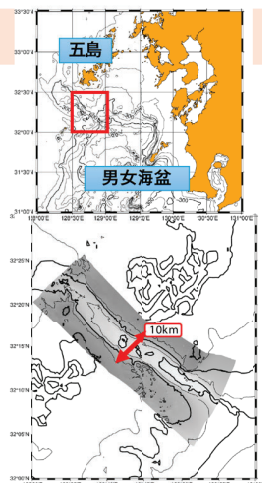
谷幅：最大10 km

水深：最大約700 m

周辺的水深：120~200 m

東南東方向に50 km伸び、

水深700 mで男女海盆の北西に達する。



長崎丸による五島海底谷調査
出典：日本海洋データセンター (JODC),
J-DOSS, 500mメッシュ水深データ (J-EGGS00)

はじめに

富山深海長谷における係留観測 (Senju, 2022)

水深：2000 m 超

谷幅：約10 km

谷軸を境に流向が逆転、

水深の浅いほうを右に見る流れ

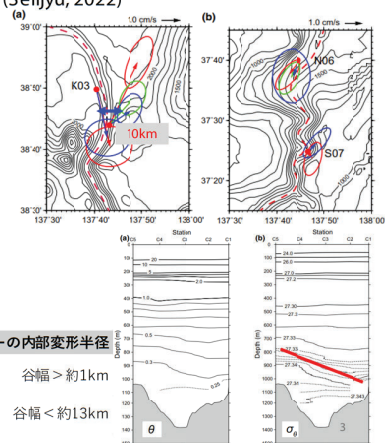
①谷の東西の密度差

②コリオリ力の影響を受ける

↓

五島海底谷に近い谷幅でも

コリオリ力の影響を受けている



	潮汐	成層	ロスビーの内部変形半径
富山深海長谷	小さい	弱い	谷幅>約1km
五島海底谷	大きい	強い	谷幅<約13km

目的

航走ADCP観測結果 (2022年4月24日)

潮汐流を除いた日平均流

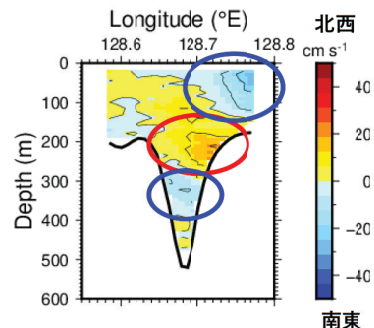
五島海底谷通過流

【流速分布】

上層・下層：南東流

中層：北西流

⇒表層に現れない潜流



五島海底谷の中層潜流の構造と時間変動を調べる

係留観測 (2024年)

係留観測

使用船舶：長崎大学練習船「長崎丸」

係留系：設置期間 2024年4月24日~7月23日

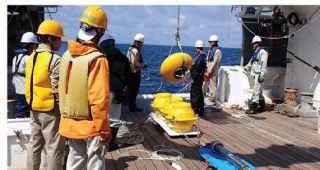
設置水深 347.5 m

ADCP SentinelV(RDI)

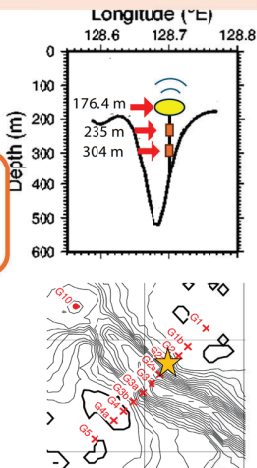
設置深度：176.4 m 120~170 mを多層で測定

電磁流速計 Infinity-EM(JFEアドバンテック) ×2

設置深度：235 m (中層), 304 m (下層)



係留系投入時の様子



係留観測 (2025年)

係留観測

使用船舶：長崎大学練習船「長崎丸」

係留系：設置期間 2025年4月21日~8月13日

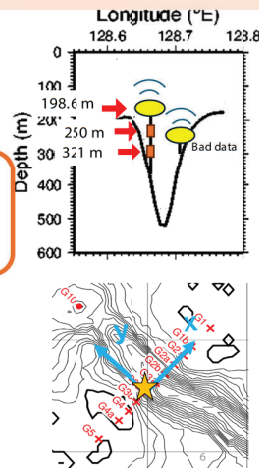
設置水深 371.8 m

ADCP SentinelV(RDI)

設置深度：198.6 m 120~191 mを多層で測定

電磁流速計 Infinity-EM(JFEアドバンテック) ×2

設置深度：250 m (中層), 321 m (下層)



※1時間平均した流速・水温データを用いる

CTD観測点、G1からG5を結んだ線

※x:cross-channel, 北東側斜面を昇る向きを正
X軸に直交する線

※y:along-channel, 陸側側面を正

CTD観測・航走ADCP25時間往復観測

使用船舶：長崎大学練習船「長崎丸」

XCTD観測（設置時）

2024年4月24日（G1~G5, 11測点）

2025年8月13日（G1~G5, 10測点）

CTD観測

2022年4月25日（G1~G5, 7測点）

2024年7月23日（G2~G4, 7測点）

2025年4月21日（G1~G5, 11測点）

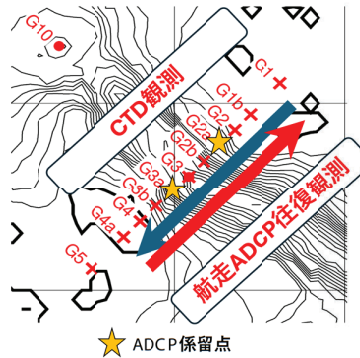
航走ADCP25時間往復観測

実施日：2022年4月24~25日

2024年4月23~24日

2025年4月20~21日

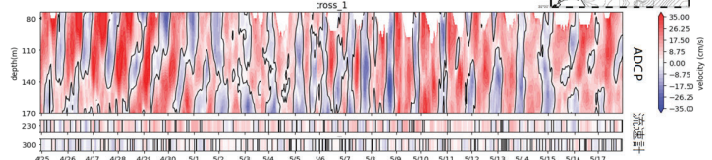
G1~G5を往復



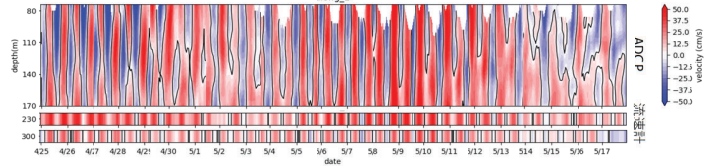
7

結果 ADCP, 電磁流速計-東側斜面

x成分: 谷を横切る流れ 日周期の変動が卓越



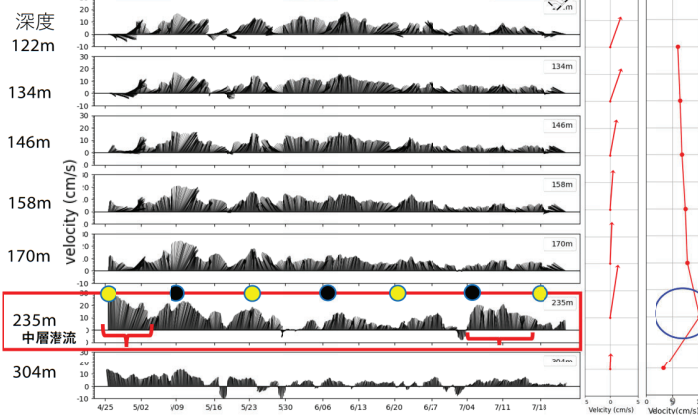
y成分: 谷に沿う流れ 半日周期の変動が卓越、順圧潮流



結果 25時間移動平均-東側斜面

中層(235m)において、平均流が極大

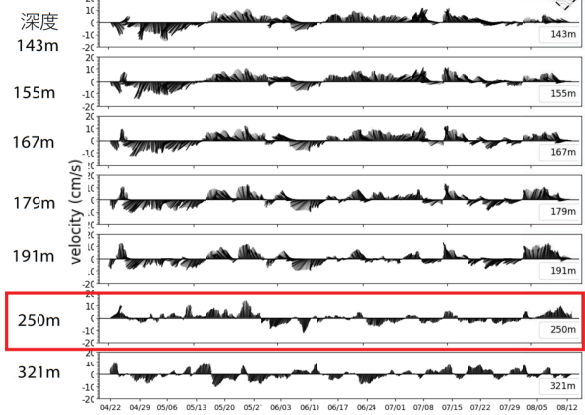
流速：20~30 cm/s 時間変動：約2週間周期



結果 25時間移動平均-西側斜面

中層の流速は小さく、

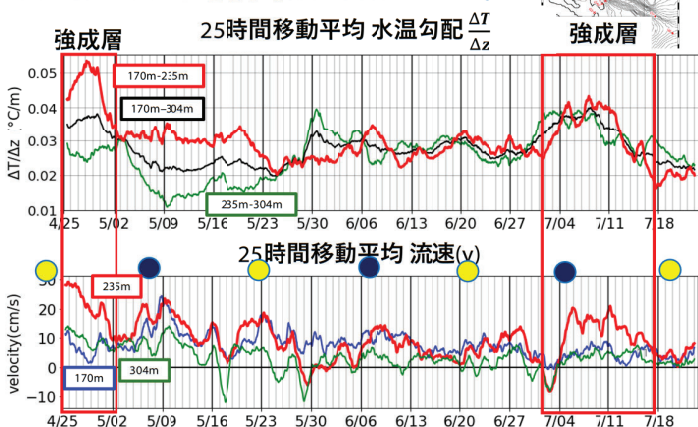
2週間の変動は確認されなかった



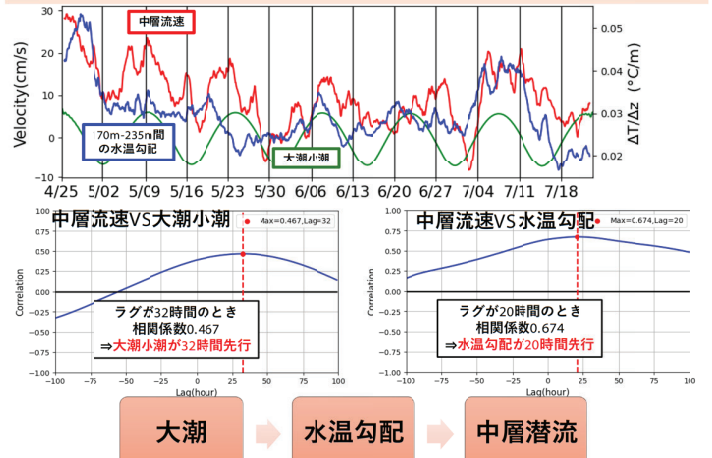
10

結果 25時間移動平均-東側斜面

水温勾配が大きいときに潜流が出現している。

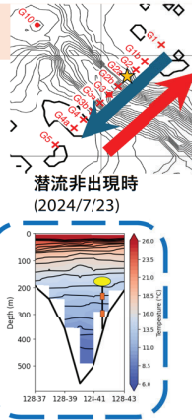
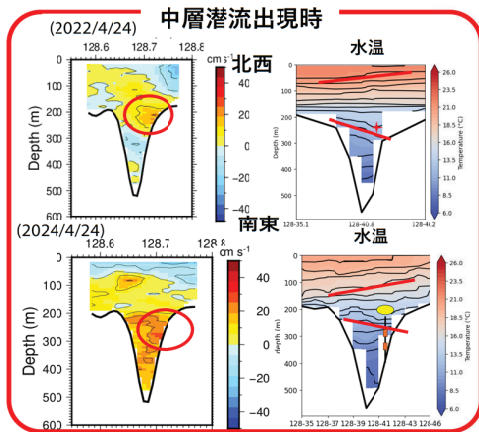


結果 ラグ相関



結果 CTD・航走ADCP

中層潜流出現時、中層において等温線が傾斜

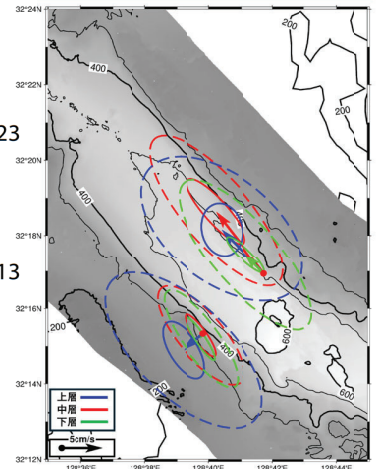


結果 東西斜面の平均流

63%信頼区間誤差楕円
実線：1時間
破線：25時間移動平均

東側斜面：2024.4.24～2024.7.23
地形に捕捉された
大陸棚に向かう流れ

西側斜面：2025.4.21～2025.8.13
全層で平均流が小さい



まとめ

【潜流】

深度：200～300m程度の陸棚に向かう流れ

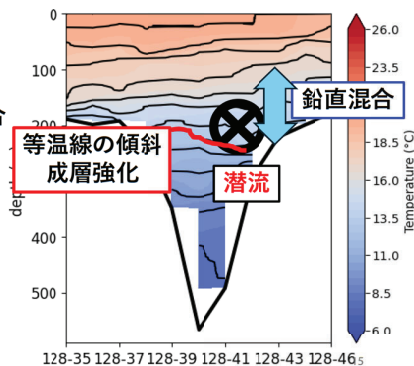
流速：20～30cm/s

時間変動：約2週間周期

大潮により谷縁で鉛直混合

↓
等温線が傾斜し、
中層で成層が強化

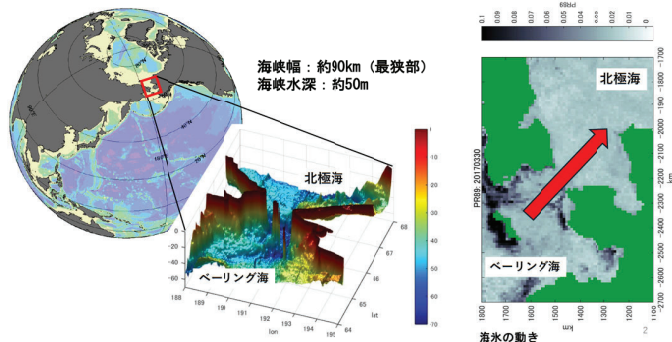
↓
コリオリの効果を受け、
斜面を右に見る潜流



海水直下の境界層を考慮した ベーリング海峡通過流量の見直し

早川 晃平*, 島田 浩二*
*東京海洋大学

ベーリング海峡を通過する太平洋冬季水



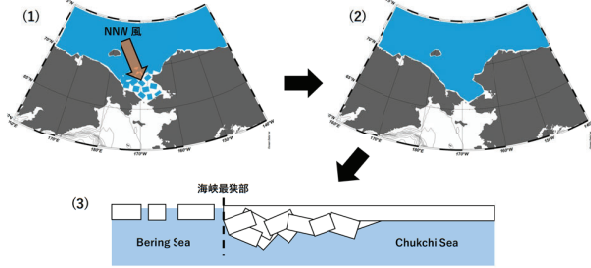
研究の目的

- 疑問点① 海水が存在する場合と開水面の場合を切り分けることなく
海峡流量変動の議論を進めてもよいのか
- 疑問点② 海水被覆下で、海峡流量に対するエクマン流の寄与を
過小評価していないか
(地衡流平衡のみを考えることは適切か)

目的：ベーリング海峡が海水に覆われている場合に注目し、
開水面の場合とは異なる海峡流量変動メカニズムを検討すること

冬のベーリング海峡における海水変動

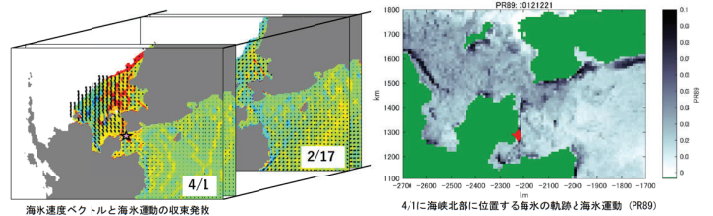
- ・ベーリング海峡の流れに影響する海水の状態が変化するプロセス
- 海水が海峡周辺でラフティングを経験することで（力学的に）下面凹凸が発達する



4

海水の追跡

衛星の輝度温度データから得られた海水速度ベクトル → 海水をラグランジュ的に追跡が可能



海水速度ベクトルと海水運動の収束発散

海水が通過したグリッドで

・ $SIC = 1$

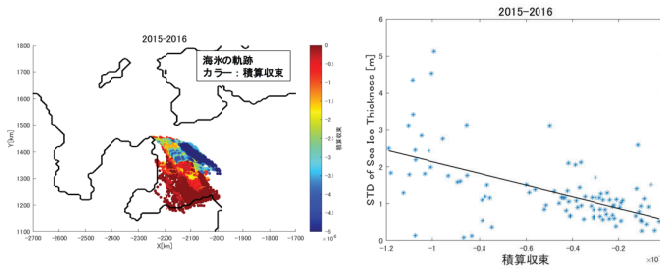
の時に海水収束を積算

・ $\text{div} = \frac{\partial u_i}{\partial x} + \frac{\partial v_i}{\partial y} < 0$

本研究では4/1以前に
海峡北部 (66.617° N 168.75° W) に存在する海水
に対して逆追跡（時間方向にさかのぼる）

5

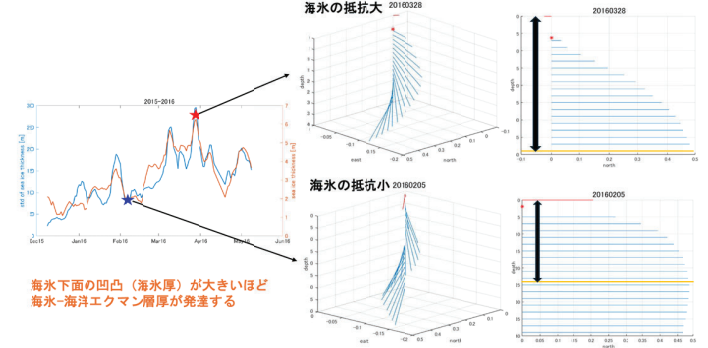
海水の積み重なりと海水下面凹凸



海水の力学的成長によって海水下面凹凸（海水厚）が発達

6

流速の鉛直構造と海水



海水下面の凹凸（海水厚）が大きいほど
海水-海氷エクマン層厚が発達する

非地衡流バランスの方程式

流速を地衡流成分と非地衡流成分に分ける
 $v = v' + v_g$

非地衡流バランスの運動方程式は
 $-f_0 v' = A_v \frac{\partial^2 u'}{\partial z^2} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial^2 p'}{\partial z^2}$

粘着境界条件として表層 ($z=0$) で
 $u_t = u(z=0) = u' + u_g$, $v_t = v(z=0) = v' + v_g$
を与えて運動方程式を解く。

またエクマン層厚 $\delta_E = \sqrt{\frac{2A_v}{f_0}}$ より

$$\begin{aligned} u'(z) &= e^{\frac{z}{\delta_E}} \left\{ (u_t - u_g) \cos \frac{z}{\delta_E} - (v_t - v_g) \sin \frac{z}{\delta_E} \right\} \\ v'(z) &= e^{\frac{z}{\delta_E}} \left\{ (u_t - u_g) \sin \frac{z}{\delta_E} + (v_t - v_g) \cos \frac{z}{\delta_E} \right\} \end{aligned}$$

海水による海面応力を得る

流速と海面応力の関係は、
 $A_v \frac{\partial u'}{\partial z} = \frac{\tau_x}{\rho_0}$, $A_v \frac{\partial v'}{\partial z} = \frac{\tau_y}{\rho_0}$

これに先ほど得られた
 $u'(z) = e^{\frac{z}{\delta_E}} \left\{ (u_t - u_g) \cos \frac{z}{\delta_E} - (v_t - v_g) \sin \frac{z}{\delta_E} \right\}$
 $v'(z) = e^{\frac{z}{\delta_E}} \left\{ (u_t - u_g) \sin \frac{z}{\delta_E} + (v_t - v_g) \cos \frac{z}{\delta_E} \right\}$

を代入すると

$$\tau_x = \frac{\rho_0 f_0 \delta_E}{2} \left\{ (u_t - u_g) - (v_t - v_g) \right\}$$

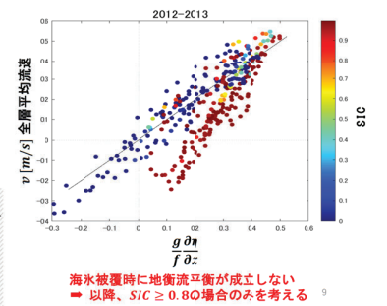
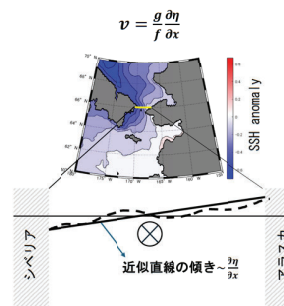
$$\tau_y = \frac{\rho_0 f_0 \delta_E}{2} \left\{ (u_t - u_g) + (v_t - v_g) \right\}$$

⇒ 海水温度、地衡流速、エクマン層厚から
海面応力が得られる

8

ベーリング海峡における運動方程式

地衡流平衡を前提として考えるなら圧力傾度項と北向き鉛直平均流速がバランスする



海水被覆時に地衡流平衡が成立しない
⇒ 以降、 $SIC \geq 0.80$ 場合のみを考える

9

海氷海洋間の応力を考慮する

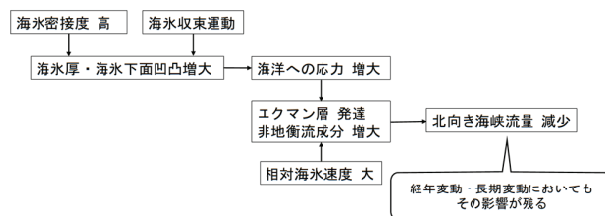
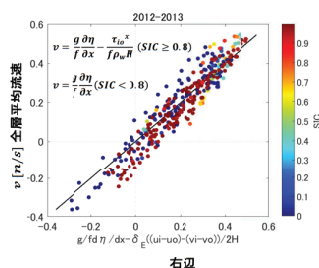
海氷が存在し「海氷速度=表層流速」の場合
貼着境界条件を考える

$$-fv = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\tau_b^x}{\rho_w h}$$

$$v = \frac{g}{f} \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\tau_{lo}^x h}{f \rho_w E}$$

$$\tau_{lo}^x = \frac{\rho_w f_0 \delta E}{2} \{ (u_l - u_g) - (v_l - v_g) \}$$

$f_0: 66^\circ N$
 u_g, v_g : 地衡流速



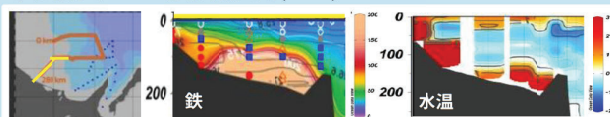
海氷に覆われる状況では、開放水面下とは異なり
エクマン層における非地衡流成分が重要となる

宗谷暖流下流域の亜慣性流速変動メカニズム

久賀みづき(水研機構), 大島慶一郎(北大低温研),
江淵直人(北大低温研), 深町康(北大北極センター)

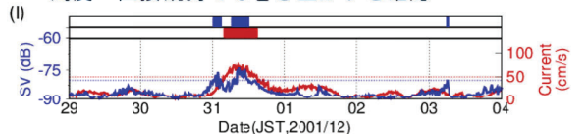
背景: オホーツク海の鉄の供給プロセス

宗谷暖流域からの鉄供給仮説 今井(2023)



ADCP観測データから
宗谷暖流下流域でも積物巻き上がり

オホーツク海の北風連吹による沿岸捕捉波
濁度の直接観測でも巻き上がりを確認



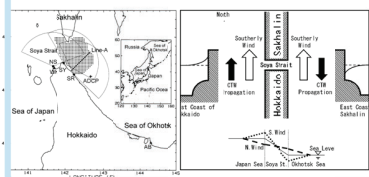
背景

宗谷暖流 日本海とオホーツク海の水位差が駆動力
宗谷海峡から北海道陸棚に捕捉された流れ

数日周期變動

Ebuchi et al. (2009)

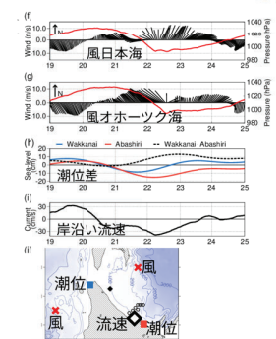
- Subinertial変動も水位差駆動
- サハリン東岸と北海道西岸の南北風に励起されたCTWによって水位差がセットアップ
- 宗谷海峡HFレーダー, ADCP(上流)



下流の数日周期変動

Kuqa et al. (2025)

- ・ 水位差増加による流速変動が不明瞭

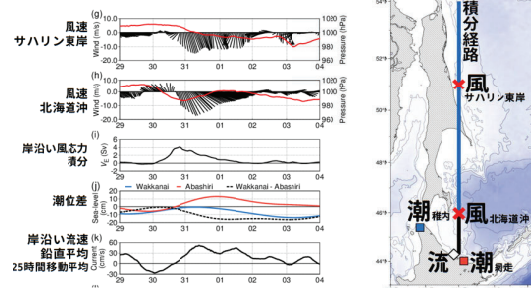


背景

下流の数日周期変動

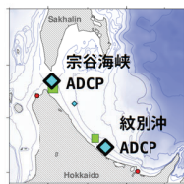
Kuga et al. (2025)

- ・ 南風連吹によるCTWによって流速強化



下流でサハリン東岸～北海道沖CTWによって変動

順圧流速：宗谷海峡 vs. 宗谷暖流域下流

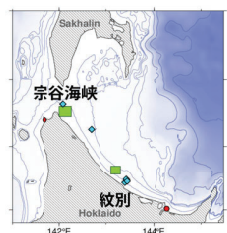


→ 宗谷海峡流速変動の下流への伝播が不明瞭

下流の数日周期流速変動が何に支配されているのか

- 宗谷海峡起源のCTWは下流まで伝播する？
- サハリン東岸～北海道沖CTWの寄与は？
- 両者の重ね合わせ？

目的 流速データから上流と下流の位相差を計算し
CTWの位相速度と比較して
下流の数日周期流速変動を解釈



- ◆ ADCP流速
- レーダー流速

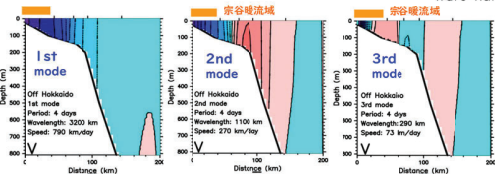
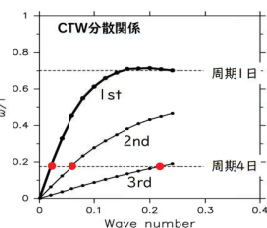
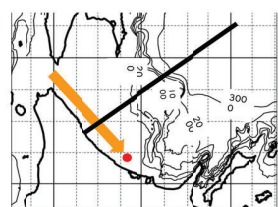
ADCP

- 宗谷海峡
2006-2008
- 猿払沖
2004-2005
- 紋別沖
2004, 2005, 2006 冬季

HFレーダー

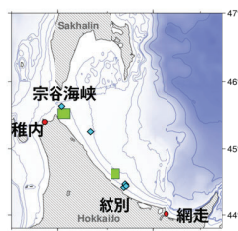
- 宗谷海峡
2003-2022
- 紋別沖
2004-2018

宗谷暖流域での沿岸捕捉波の構造



宗谷暖流の範囲(岸から30~40km)では順圧的な構造をもつ

目的 流速データから上流と下流の位相差を計算し
CTWの位相速度と比較して
下流の数日周期流速変動を解釈



- ◆ ADCP流速
- 潮位

順圧的なCTW伝播

- ⇒ ADCP流速鉛直平均
- ⇒ 上流と下流の同時観測データ
宗谷海峡・紋別沖
2006~2007

潮汐を除いた数日周期の変動

- ⇒ 25h平均

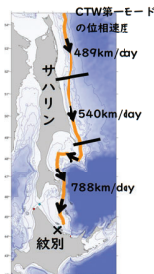
風

ERA5 hourly 10m風

水位

潮位計(稚内, 網走)

サハリン沖から宗谷暖流下流域へのCTW伝播を確かめる

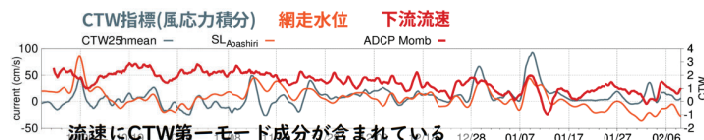


オホーツク海北西部からサハリン東岸陸棚上の数日周期の岸沿い風応力によってCTW第一モードが励起される (Vizuta et al. 2005)

紋別沖でのCTWの指標

サハリン～北海道沖の経路でCTW伝播時間分潮ったEkman輸送を積分

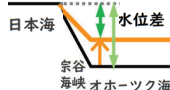
$$CTW指標(t) = \int \tau_l(t - \Delta t) (\rho f) dl, \quad \Delta t(n) = \sum_{n'=1}^n \frac{\Delta t(n')}{c}$$



流速にCTW第一モード成分が含まれている

下流水位はCTW第一モード指標と同期⇒ CTW第一モードの伝播あり

サハリン沖からのCTW伝播の下流への影響



① サハリン沖CTWの伝播

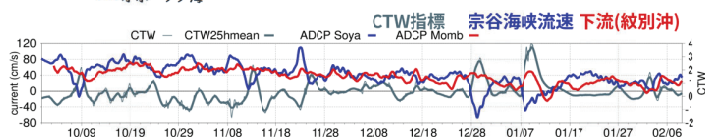
沿岸潮位上昇↑ + 下流で流速増加

沿岸潮位上昇による海峡水位差減↓

② 水位差減少による海峡起源CTW伝播

下流で流速減少

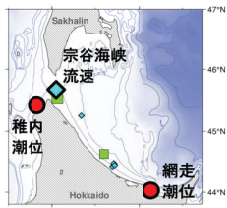
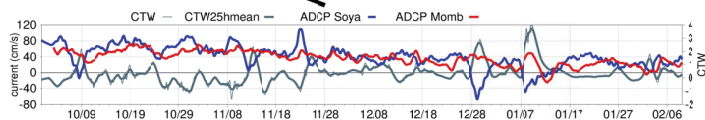
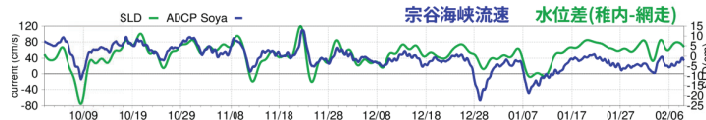
打ち消し合う方向に変化



宗谷海峡の順圧流速は水位差で駆動

宗谷海峡からのCTW伝播を確認したい

$$\text{下流変動} = \text{サハリン沖CTW} + \text{海峡起源CTW}$$



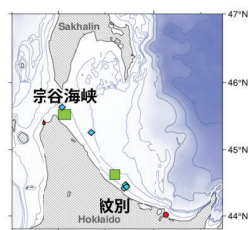
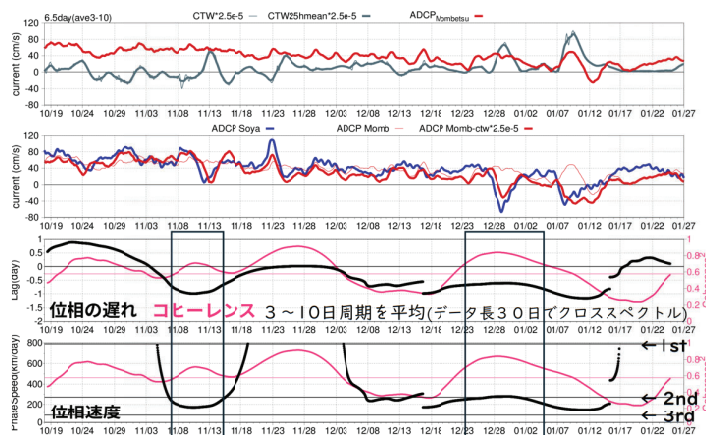
宗谷海峡での流速フラックスは
圧力変動として下流まで伝播するはず



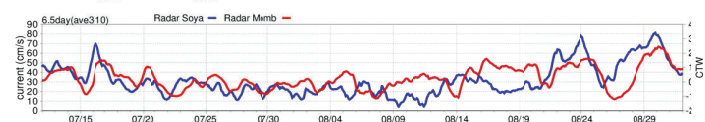
サハリン～北海道沖から伝播するCTWを引くと
下流の流速が宗谷海峡と同様の数日周期変動パターン

宗谷海峡から下流域へのCTW伝播

レーダー流速ではどうか



- HFレーダー
 - 宗谷海峡
2003-2022
 - 紋別沖
2004-2018
- 領域平均して25h平均



順圧流速では見られなかった
数日周期の流速変動の伝播見える

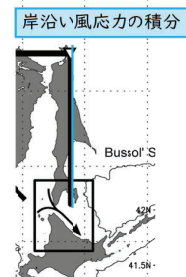
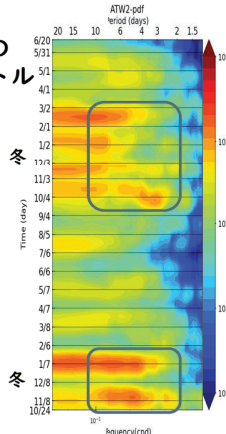
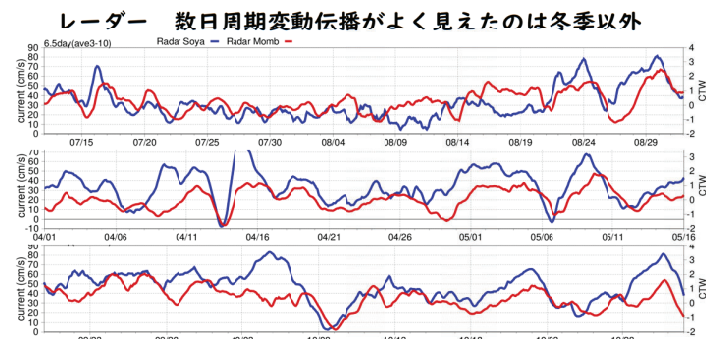
ADCP 10~2月

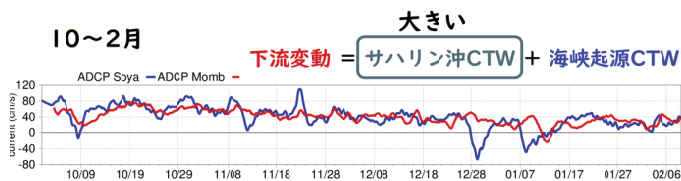
サハリン沖CTWの季節性



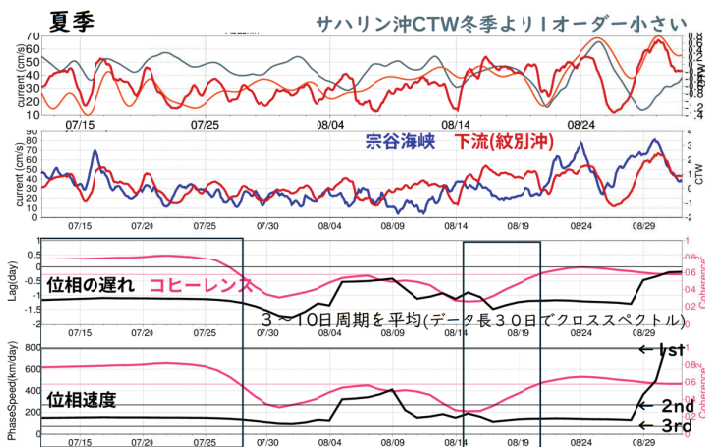
岸沿い風積分の パワースペクトル

冬季強く
春夏弱い





宗谷海峡から下流域へのCTW伝播



まとめ 宗谷暖流下流の数日周期流速変動

- サハリン沖CTWの伝播と宗谷海峡からのCTW伝播の重ね合わせ
- 岸沿い風応力の弱い季節は下流で海峡からの位相伝播が明瞭
- 岸沿い風応力の強い冬季はサハリン沖CTWによる変動と宗谷海峡からのCTWの変動が打ち消し合い、下流の流速変動が弱まる
- 宗谷海峡からCTW 2nd, 3rd モードが下流に伝播

九大応力研究集会
2025年12月04日

日本海通過流における3海峡でのコヒーレントな亜慣性流速変動

Coherent subinertial velocity variations in the three straits under the Japan Sea Throughflow System

大島慶一郎 (北海道大学 低温科学研究所) · 吉川裕 (京大院理学研究科) · 久賀みづき (北海道大学 低温科学研究所) · 深町康 (北海道大学 北極域センター)

今後レーダーデータ使って長期の解析

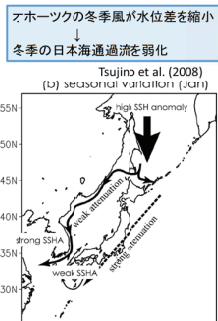
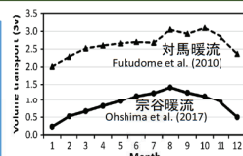
サハリン沖CTWと海峡起源CTW寄与の季節変動を調べる

日本海通過流としての宗谷暖流と対馬暖流: 同様(振幅・位相とも)な季節変動

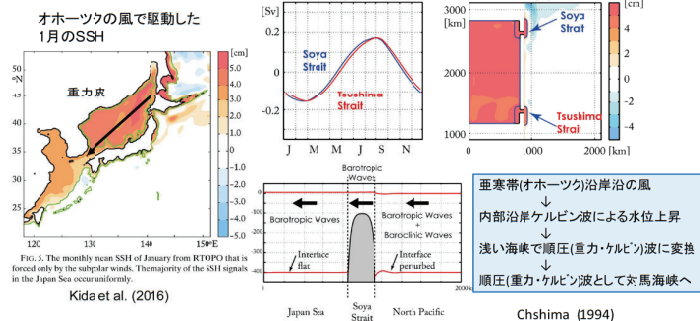
対馬暖流系

日本海通過流
Japan Sea Throughflow
Kida et al. (2016)
Tsujino et al. (2008)

水位差駆動
Minato & Kimura (1980)
Toba et al. (1982)
Chshima (1994)

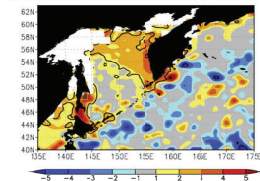


2層モデルによる日本海通過流の季節変動メカニズム Kida et al (2016)



冬季の水位は全オホーツク陸棚域で同期して変動

12月のSSHのRegression map: サハリン沖に対して



Nakanowatari & Ohshima (2014)

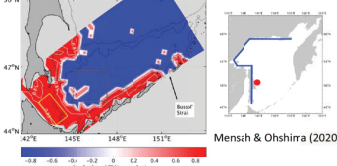
冬季、ATW(岸沿い風積分)と宗谷暖流流量(水位差推定)は有意な相関あり

宗谷暖流: ATWとの相関: 0.59
Ohshima & Kuga (2013)

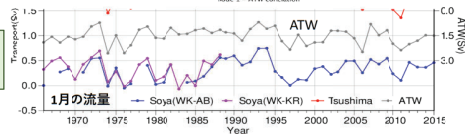
岸沿い風応力の積分(ATW)で水位は決まる

ATW (Arrested Topographic Wave)

Correlator map: ATWとSSHのmode 1



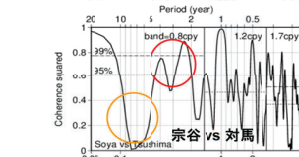
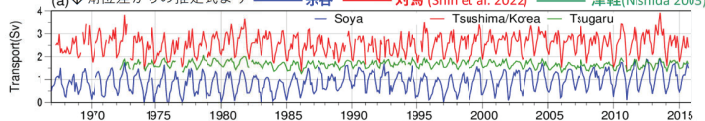
Menshi & Ohshima (2020)



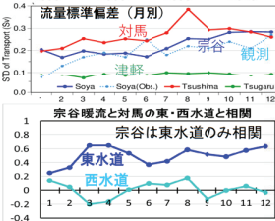
中長期(1ヶ月~4年)では宗谷暖流と対馬暖流は連動 (1ヵ月平均データから)

Ohshima & Kuga (2023)

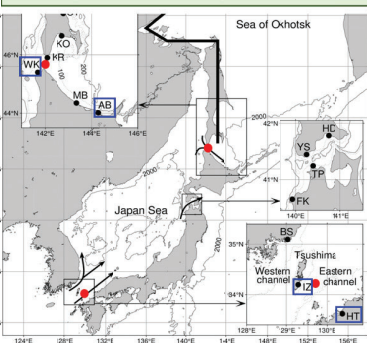
(a) ↓ 潮位差からの推定式より



2-4年周期で対馬と宗谷がリンクして変動

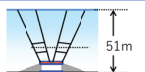


宗谷海峡と対馬海峡東水道で約10ヶ月の同時測流
: 2006年9月24日~2007年7月19日



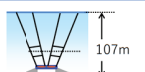
海底設置によるADCP観測

宗谷海峡:
2006年9月23日~2008年7月23日



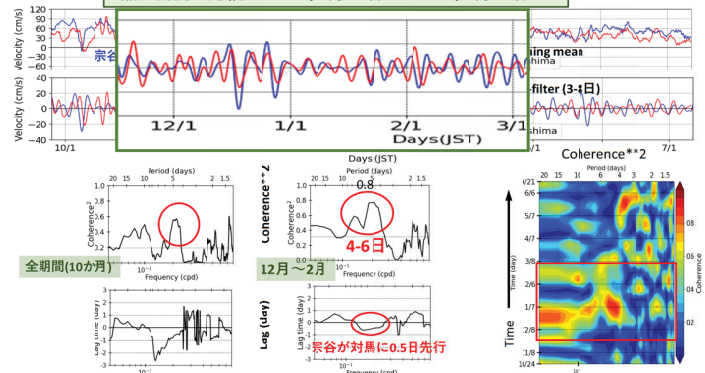
Fukumachi, Ohshima et al. (2010): Volume transport in the Soya Strait during 2006-2008. J. Oceanogr., 66, 685-696.

対馬海峡東水道:
2006年7月21日~2007年7月20日

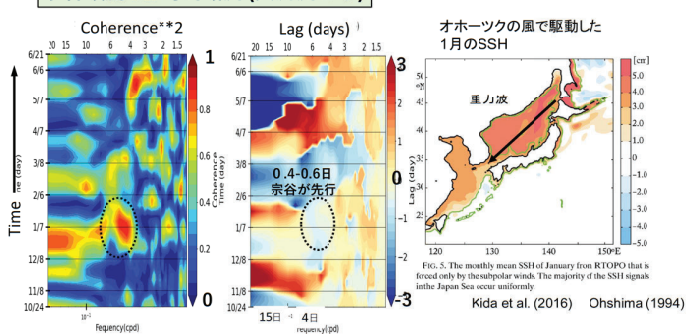


Matthews & Yoshikawa (2012): Synergistic surface current mapping by spaceborne stereo imaging and coastal HF radar. GRL, 39, L17606.

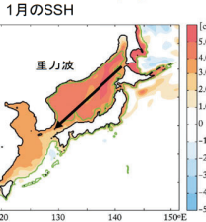
2点の測流の比較: 2006年9月24日~2007年7月19日



宗谷暖流 vs. 対馬暖流 (実測流より)



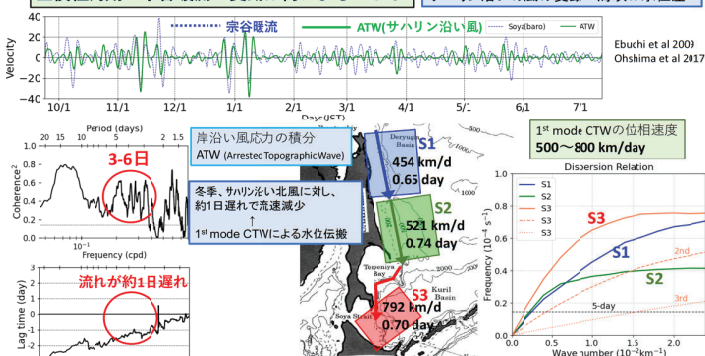
オホーツクの風で駆動した1月のSSH



Kida et al. (2016) Ohshima (1994)

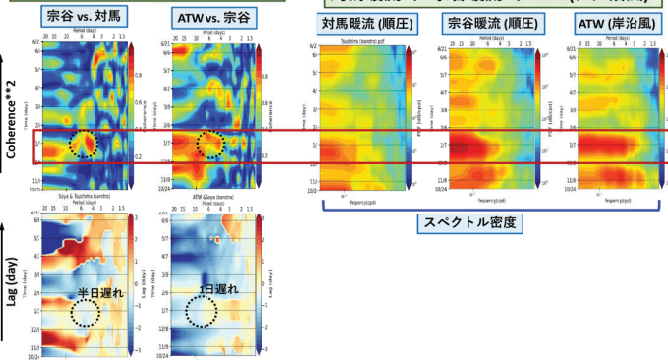
準慣性周期の宗谷暖流の変動は何によるのか?

サハリン沿いの風の変動→海峡の水位差



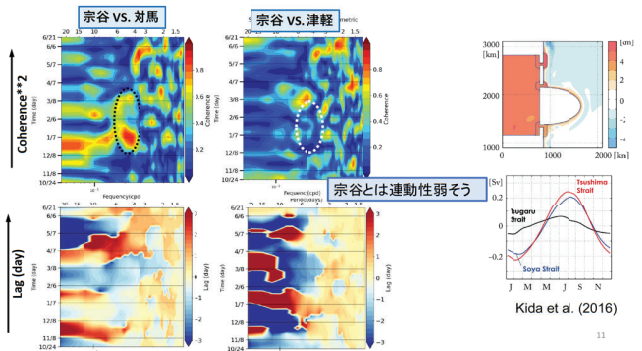
Ebuchi et al 2009
Ohshima et al 2017

クロス・ケルとスペクトル密度の時系列



津軽暖流とは連動しているのか？

同時観測はないので、深浦一函館の水位差を指標として使用

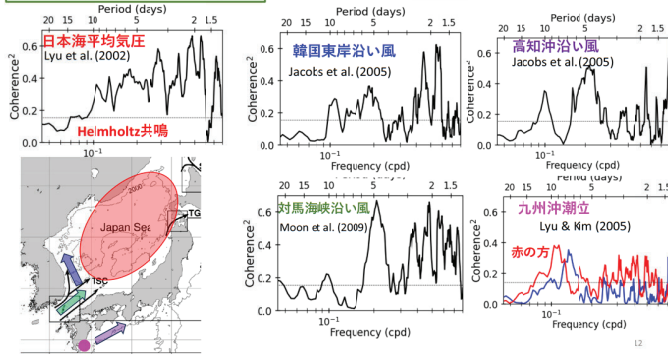


Kida et al. (2016)

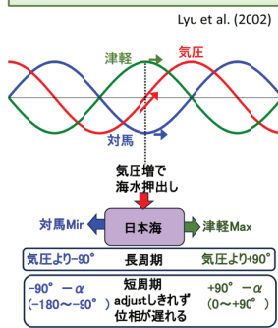
11

対馬海流変動を決める要因は？

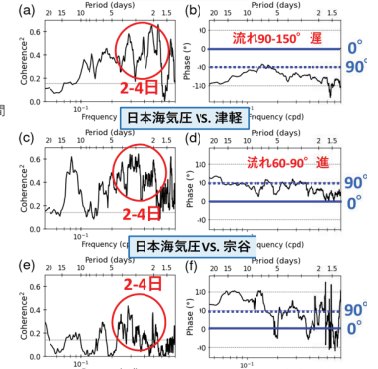
対馬海流(順圧)とのコヒーレンス



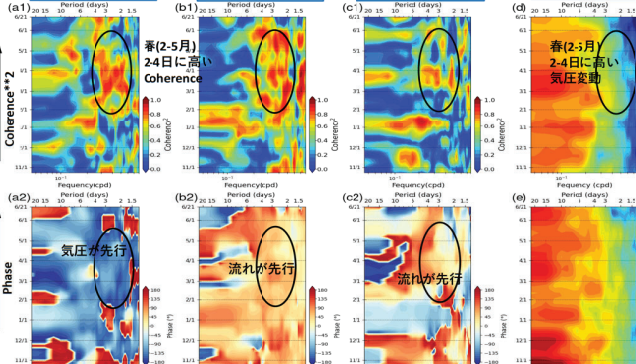
日本海平均気圧によるHelmholtz共鳴



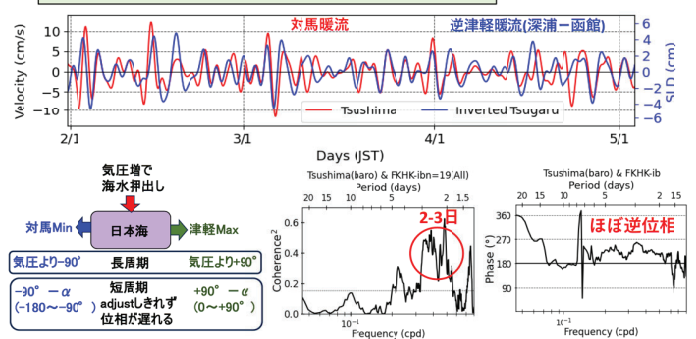
日本海気圧 vs. 対馬

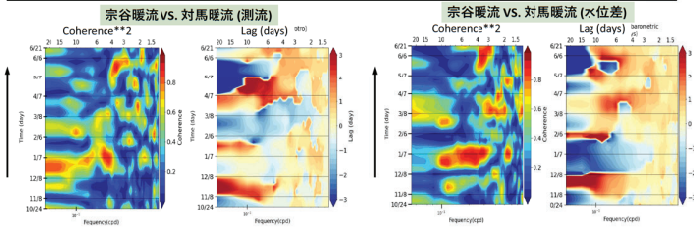
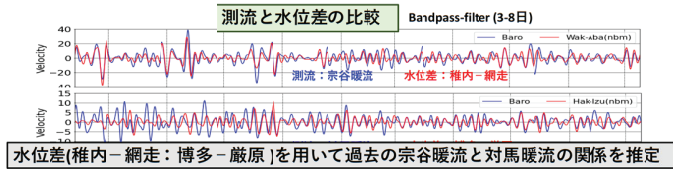


日本海気圧 vs. 対馬

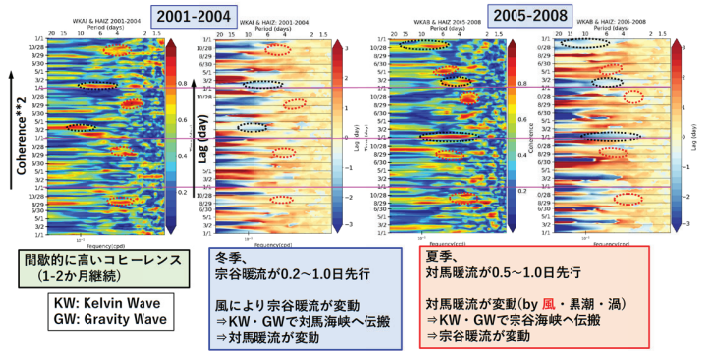


対馬暖流 vs. 津軽暖流 (2~3日のBandpass filter)

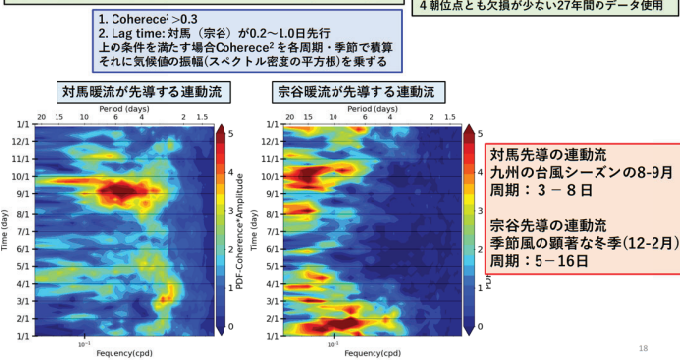




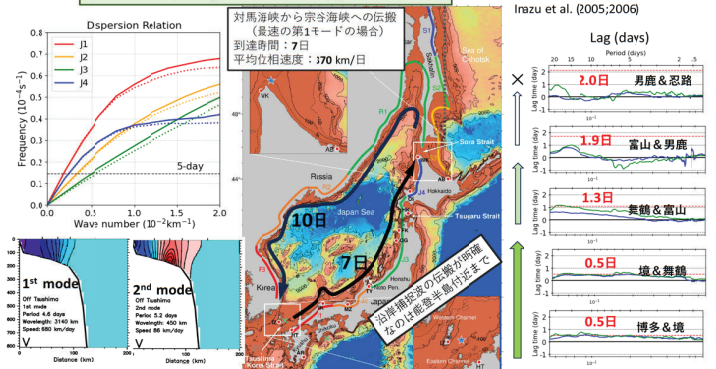
長期水位差データからの宗谷暖流と対馬暖流の関係 (特にその季節性) の推定



長期水位差データより推定される運動流の季節・周期特性



沿岸捕捉波(CTW)の運動流への役割は小さい!



まとめ

- 宗谷暖流と対馬暖流の同時測流データから、冬季以下のような運動機構があることが示唆
サハリン岸沿い風 → CTW → 宗谷海峡水位差 → 宗谷暖流変動 → 重力波 → 対馬暖流変動
(周期 4-8日；宗谷から対馬へは約半日で伝搬)
- 日本海平均気圧に対して、25日周期において、Helmholtz共鳴を生じている (特に春季)
対馬だけでなく、津軽・宗谷においてもシグナルえられる
- 海峡での潮位差から両海流の変動関係を評価することがある程度可能 (長期データの解析)
顕著な季節性；8-9月：対馬先導 (3-8日周期)；12-2月：宗谷先導 (5-15日)
- CTW (沿岸捕捉波) は、海峡間の運動には効いてなさそう
伝搬するのに最短で、対馬から宗谷へは約7日、宗谷から対馬へは約10日
対馬からの伝搬は能登半島あたりまで

今後の課題

- 対馬の西水道はどうか？
- 長期の海峡間水位差データの活用
2-1. 津軽との運動は？
2-2. 三つの海峡でのHelmholtz共鳴の実態の解析

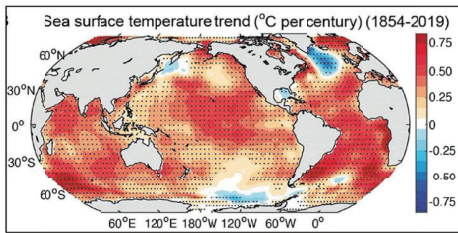
Changes of Seasonal Cycle in the Western North Pacific

○ 庄 楚縁 (九州大学・総合理工学府)
Zhuang Chuyuan

太田 新一郎 (九州大学・応用力学研究所)

2025/12/04

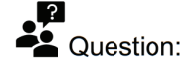
Trend of Sea Surface Temperature



[Garcia-Soto et al., 2022]

Under Global Warming, Ocean is getting Warmer

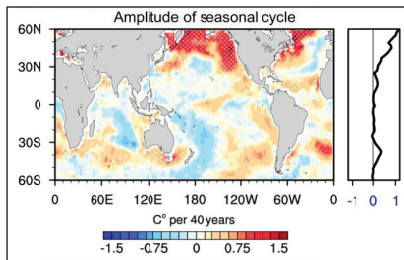
The seasonal cycle of the SST
is also an essential part of climate
e.g. longer winters / short summers can
trigger marine heatwaves & change biological activities



Question:

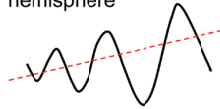
Is the **Seasonal Cycle** of the
Ocean **Changing**?

Previous Study



[Liu et al., 2024]

✓ **Intensified** seasonal
cycle in the Northern
hemisphere



✓ Stronger than the annual
mean warming trend

0.75 >> 0.25 (trend) °C per 40 years

The goal of this study

Use observation/reanalysis data and clarify:

1. How the seasonal cycle is changing in the **Western North Pacific (WNP)**.
2. How the **length (phase) of seasons** is changing.

Data used for analysis

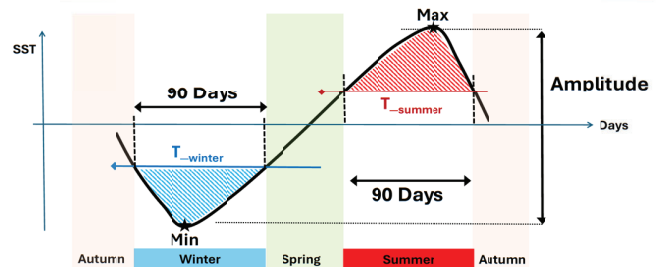
➤ Compare two periods:

Early period: 1982-2004 Late period: 2005-2024

- Sea Surface Temperature:
OISST [Huang et al., 2021]
- Ocean temperature, mixed layer depth, and surface heat flux:
ORAS5 reanalysis [Zuo et al., 2019]

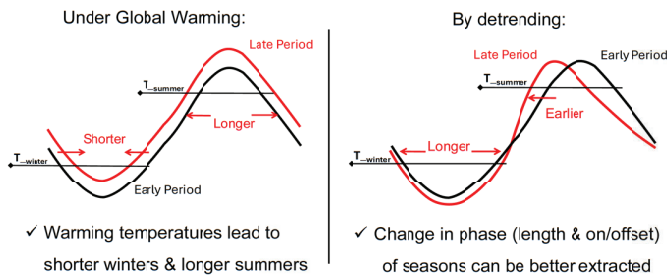
	OISST	ORAS5
Period	1982-2024	1982-2024
Temporal Resolution	Daily	Monthly
Spatial Resolution	0.25° × 0.25°	0.25° × 0.25°

Define seasons using data from early period



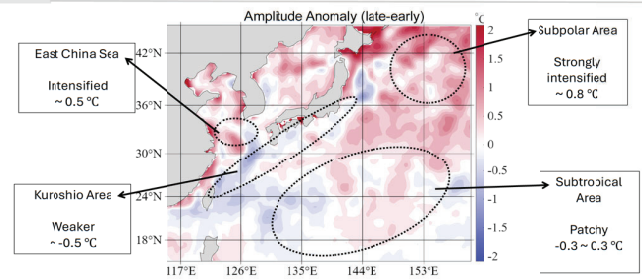
- ✓ Winter/Summer: 90 days that includes min/max
→ T_{summer} & T_{winter} are defined

Evaluating the change in seasonal length

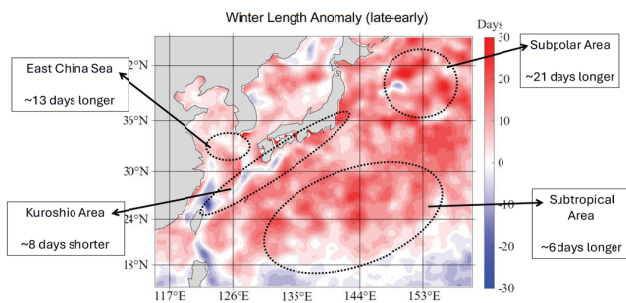


Result:

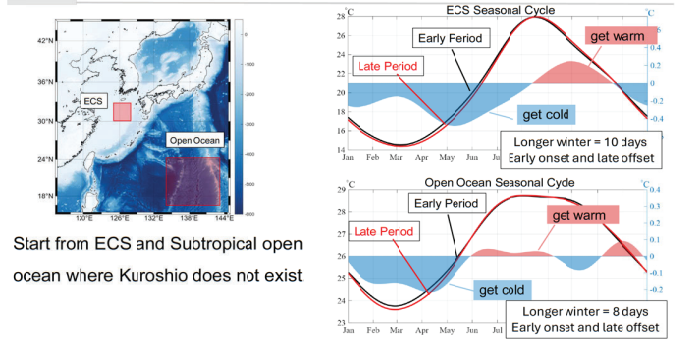
Seasonal Cycle Intensified across the WNP



Winter got longer across the WNP



Why did the Seasonal Cycle Change?



The impact of external heat source

Mixed layer heat budget equation

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{Q}{\rho C_p h} + \text{advection} + \text{mixing}$$

T : mixed layer temperature
 Q : surface heat flux
 h : mixed layer depth

By partitioning the terms to annual mean & seasonally varying component

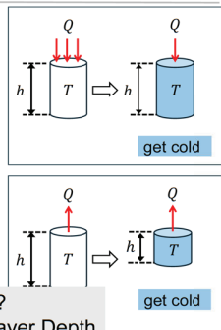
$$T = \bar{T} + T_{sc}, \quad Q = \bar{Q} + Q_{sc}, \quad h = \bar{h} + h_{sc}$$

$$\Delta \left(\frac{Q}{h} \right) = \frac{\Delta \bar{Q}}{\bar{h} + \bar{h}_{sc}} - \frac{Q_{sc}}{(\bar{h} + \bar{h}_{sc})^2} \Delta \bar{h} + \alpha$$

Change due to reduced surf

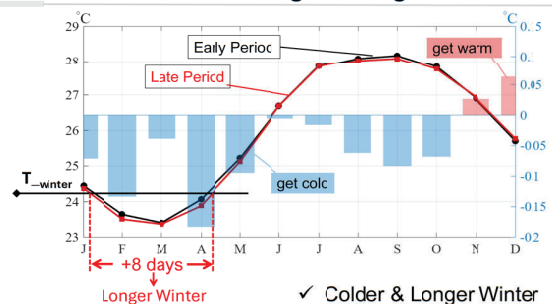
Which is more dominant?

Changes in Heat Flux or Mixed Layer Depth

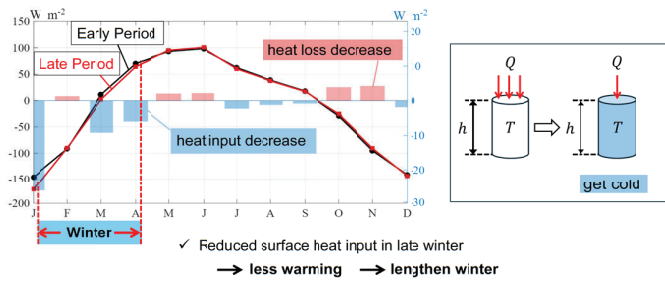


Result (1): Open Ocean

Winter gets longer

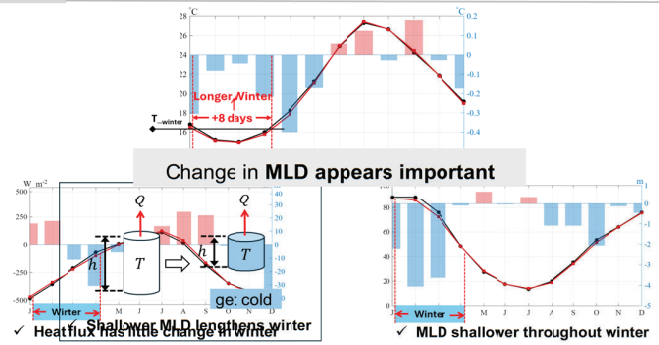


Reduced Surface Heat Input Lengthens Winter



In Open Ocean, change in **heat flux** appears important

Result (2): ECS Shallower MLD Lengthens Winter



Conclusion

➤ Winter is getting longer across Western North Pacific:

1. Changes in Surface Heat Flux dominates in the Open Ocean.
2. Changes in Mixed Layer Depth dominates in the ECS.

※ Future work:

- 1) Quantitatively examine the heat budget.
- 2) Examine the seasonal cycle change in Kuroshio area.

水中グライダー観測による 日本海沖合域への河川水流入の定量化

和川 拓¹

井桁 庸介¹・久賀 みづき¹・竹内 茉莉香²・永井 平¹・阿部 祥子¹
井口 直樹¹・口江 美里¹・児玉 武稔³・本多 直人¹

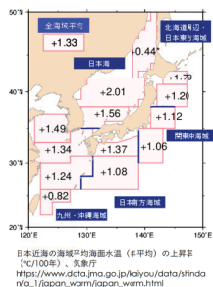
- 1: 水研
- 2: NOC
- 3: 東大院農学生命

日本海沖合域への河川水流入

モニタリングWS 4 Dec 2025

1

日本海は温暖化が最も顕著な海の1つ；内部は？塩分は？

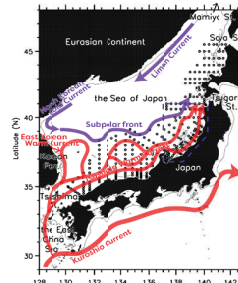


日本海沖合域への河川水流入

モニタリングWS 4 Dec 2025

2

約50年間分の歴史的な水温・塩分観測データ

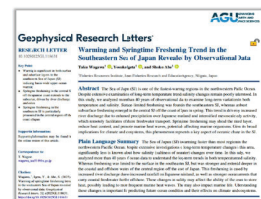


日本海沖合域への河川水流入

モニタリングWS 4 Dec 2025

3

◆蓄積された水研 + 道府県の毎月1回の
水温・塩分定線観測
— JODC・KODC・GTSPPPを加えて、利用可
能な全てのデータを解析



春季の東北-北陸沖合域に顕著な低塩化トレンド

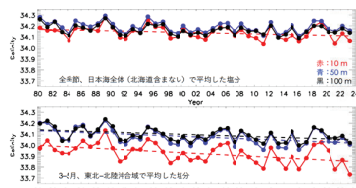


Table 8a. Seasonal trends of temperature (°C) per 10 years and salinity (psu) per 10 years at three depths in the T-10 region (T10) and the S-10 region (S10) (1980-1982) and T10, S10, and S10 (1980-1982) is excluded due to missing data. Annual trends are calculated from February to November.

Variable	Season	10 m	50 m	100 m
T (T10)	Spring (Mar-May)	1.6	1.5	1.3
	Summer (Jun-Aug)	1.9	1.8	1.2
	Autumn (Sep-Nov)	2.2	2.0	0.9
	Annual (Dec-Nov)	1.4	1.7	0.80
S (S10)	Spring (Mar-May)	-0.10	-0.12	-0.07
	Summer (Jun-Aug)	0.1	0.1	0.1
	Autumn (Sep-Nov)	0.1	0.1	0.1
	Annual (Dec-Nov)	0.1	0.1	0.1
T (S10)	Spring (Mar-May)	1.5	1.6	1.7
	Summer (Jun-Aug)	2.2	2.0	2.1
	Autumn (Sep-Nov)	2.8	2.6	2.4
	Annual (Dec-Nov)	1.8	2.0	1.4
S (S10)	Spring (Mar-May)	-0.04	0.1	0.1
	Summer (Jun-Aug)	0.1	0.1	0.1
	Autumn (Sep-Nov)	0.1	0.1	0.1
	Annual (Dec-Nov)	0.1	0.1	0.1

Bold values indicate statistically significant trends ($p < 0.05$). n.s. = not significant ($p > 0.05$).

◆日本海全体だと表層にだけ有意な低塩化トレンド

◆東北-北陸沖合域で平均した表層+亜表層塩分には有意な低塩化トレンド

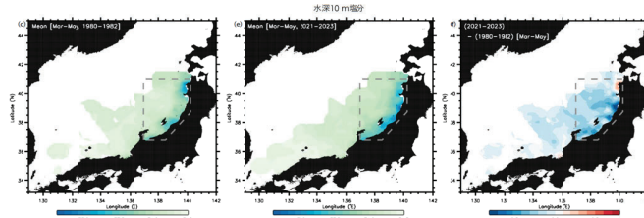
- 春季だけが顕著
- 対馬暖流強化トレンドだと高塩化しようだが、結果は逆センス

日本海沖合域への河川水流入

モニタリングWS 4 Dec 2025

4

春季低塩化の原因は沿岸域



◆特に東北沿岸域で顕著

- 背景場が低塩化、降水量・河川流量増加に起因

◆その沿岸域から伸びるように、沖合域でも低塩化

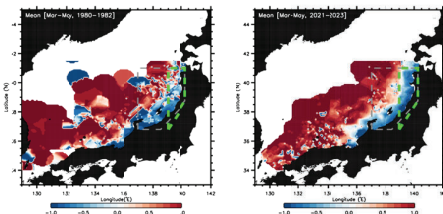
- (極前線・対馬暖流強化に伴う傾圧性増加による) 渦活性化に起因

日本海沖合域への河川水流入

モニタリングWS 4 Dec 2025

5

低塩化が密度成層化に影響



$$SCI = \frac{N_0^2 - N_1^2}{N_0^2 + N_1^2}$$

$$N^2 = -\frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial z} = N_0^2 + N_1^2$$

$$N_0^2 = g\alpha \frac{\partial \theta}{\partial z}$$

$$N_1^2 = -g\beta \frac{\partial S}{\partial z}$$

◆Stratification Control Index (Caneill et al., 2022)

- 水温・塩分それぞれの密度成層化への寄与を評価

→ > 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化トレンド

- 塩分成層化 ($SCI \leq -0.5$) 地点数: 168 → 264 (1980-1982 → 2021-2023)

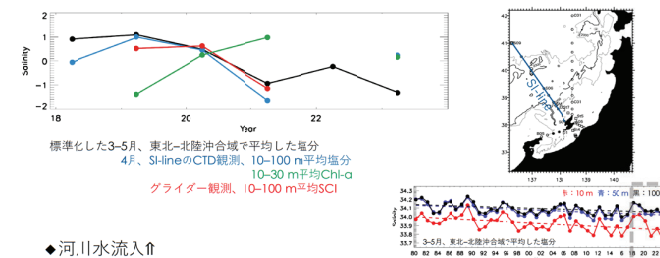
- 低塩化による混合層浅化により、海洋熱波を誘発しうる

日本海沖合域への河川水流入

モニタリングWS 4 Dec 2025

6

河川水流入の影響の長期変動についてはOK、次は現象としての確度を上げ、気候・生産へのインパクトを定量化する



◆河川水流入↑

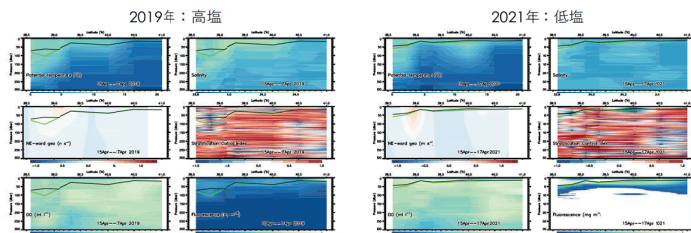
- 沖合塩分↓、塩分による密度成層化↑、基礎生産↑

日本海沖合域への河川水流入

モニタリングWS 4 Dec 2025

7

船舶観測ではそもそも沖合の低塩パッチを分解できない



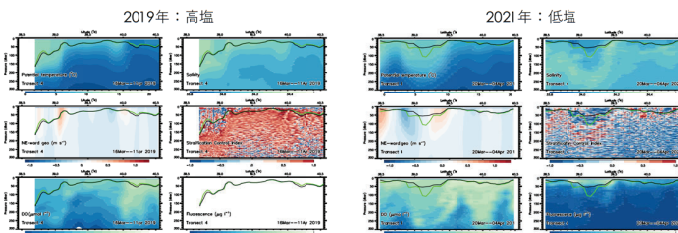
◆センサ豊富なのは強み

日本海沖合域への河川水流入

モニタリングWS 4 Dec 2025

8

河川水流入は沖合域の密度成層に影響：グライダー（船舶の10倍の分解能）



◆2021年は河川水流入↑：沖合塩分↓、塩分による密度成層化↑

- 塩分による混合層内で基礎生産↑

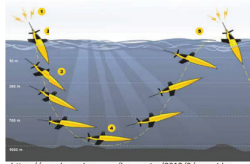
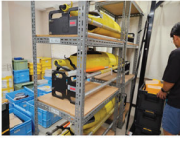
- バリアレイヤー

日本海沖合域への河川水流入

モニタリングWS 4 Dec 2025

9

水中グライダーは無人の海洋観測ロボット：3台所有



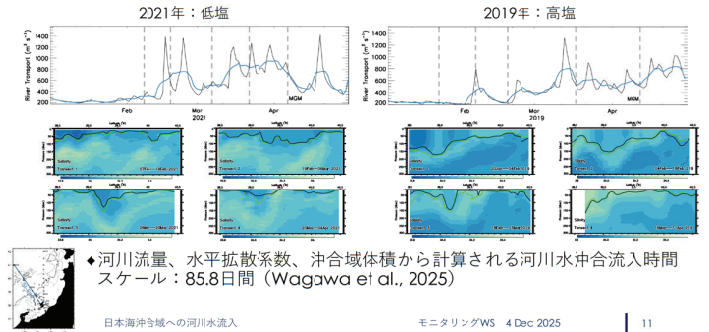
1. 調査船では難しい海が荒れる季節でも、
 2. 高頻度で、
 3. 水平的に広範囲を、
 4. 海面だけでなく鉛直内部構造も
- モニタリング可能

日本海沖合域への河川水流入

モニタリングWS 4 Dec 2025

10

春の沖合域塩分場：1-2ヶ月前からの蓄積河川流量



日本海沖合域への河川水流入

モニタリングWS 4 Dec 2025

11

まとめ

- ◆蓄積された歴史的な水温・塩分観測資料を解析
 - ー春季の東北-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
 - ー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
 - ー陸上の降水量と河川流量も増加トレンド
 - 海上の降水量にはトレンドなし
 - ー渦も活性化トレンド
 - 渦による河川水の沖合流出の増加トレンドを示唆
- ◆東北-北陸沖合域の低塩化の成因：沿岸域からの遠隔的な低塩水流出
- ◆春季の沖合域塩分場は1-2ヶ月前からの蓄積された河川流量の影響を受ける
- ◆河川水が沖合域へ流入 ⇒ 密度成層へ影響、混合層浅化、生産性高まる

今後の課題

- ー渦の形成・舌性化トレンドの力学機構
- ー降水量増加機構、融雪時期遷移

日本海沖合域への河川水流入

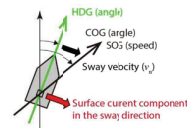
モニタリングWS 4 Dec 2025

12

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@RIAM

2025年12月4日 16:55-17:20

変針を考慮して船舶ドリフトから表層海流を推定することについて



稲津 大祐・島田 浩二

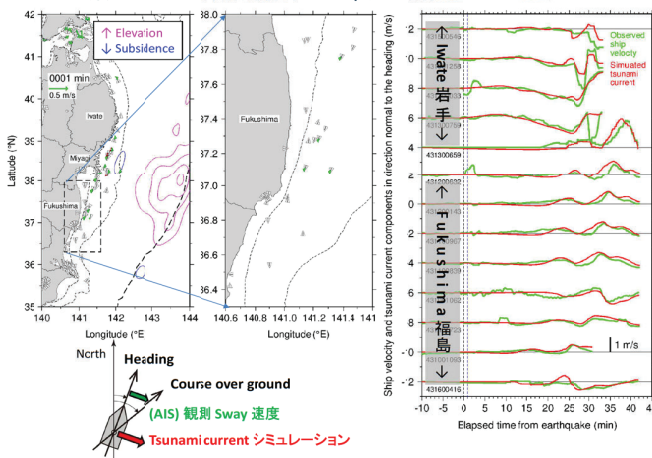


東京海洋大学



1

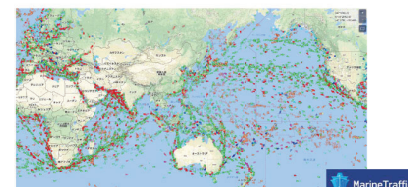
船舶AISデータで津波の流れ(> 0.3 m/s)が計測 (Inazu et al. 2018)



船舶AISデータ(位置-船首方位)で
津波の流れが定量計測できる (Inazu et al. 2018)が完全ではない。

変針(船首方位(yaw/heading)の時間変化~時間微分)の
影響を受ける (Inazu et al. 2020)。
GNSSアンテナ(不動点)と
yaw回転軸の水平位置(動いてしまう)に違いがあるため。

AISの元データになる、航行データ(緯度・経度、船首方位)の詳細分析を実施した。
AISデータから津波や海流をうまく抽出するためのノウハウ提供。



3

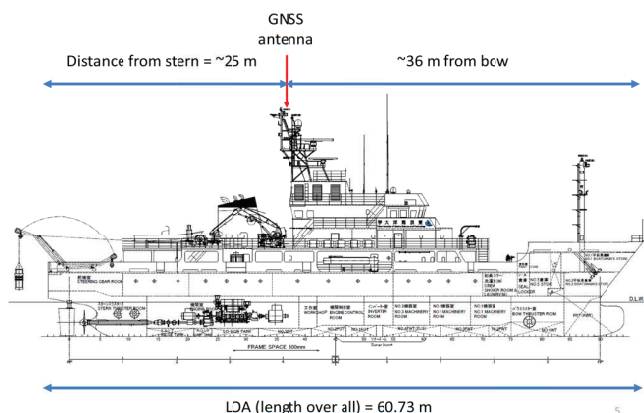
東京海洋大学 練習船 汐路丸 IV



総トン数: 775トン
全長: 60.73 m
幅: 11.10 m
深さ: 6.50 m
航行速力: 12 kt

4

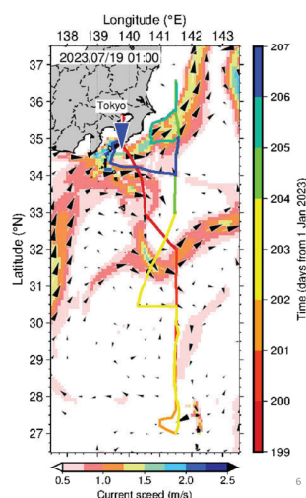
Shioji Maru IV



5

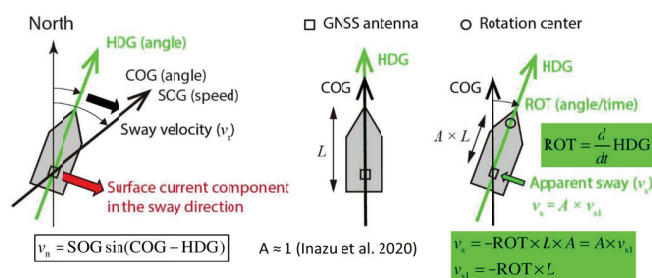
汐路丸 SJ-23-24 次航海
2023年7月19日 (Day 199)
~7月26日 (Day 206)
大学院 外洋観測実習

Hourly "Surface Merged Ocean Current"
by Copernicus Marine Service (CMEMS)
も色付け



6

Sway速度 (v_n) (左右ドリフト) は津波(表層海流)の流れを反映



対地速度、対地方向 Speed / Course Over Ground (SOG/COG) は、GNSS位置由来
船首方位 (yaw/heading) は、(光ファイバジャイロ)コンパス由来

流れが無くても、変針の際、
回頭角速度 (Rate of Turn) 由来の (見かけの) sway (v_s) が発生
-> 表層流れを見たい場合、補正の対象

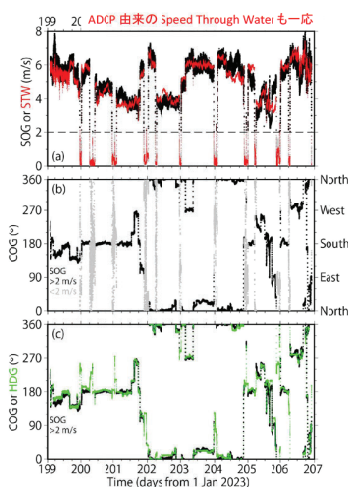
7

対地速度 (SOG)
対地方向 (COG)
船首方位 (HDG)

基本的に ~12 kt で移動
所々で (ほぼ停止し)
実習メニューを消化

低速 (SOG < 2 n/s) で
COGが交まりにくい

HDG ≈ COG だが
この差に注目



8

回頭角速度 (ROT)

$$ROT = \frac{d}{dt} HDG$$

COG - HDG

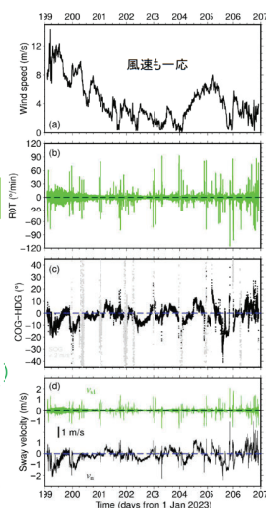
見かけの Sway (特に v_{s1})

A ≈ 1

L = 60.73 m for 汐路丸

$$v_n = SOG \sin(COG - HDG)$$

Sway (v_n)



9

v_n と v_{sl} との関係

$$v_{sl} = -\text{ROT} \times L$$

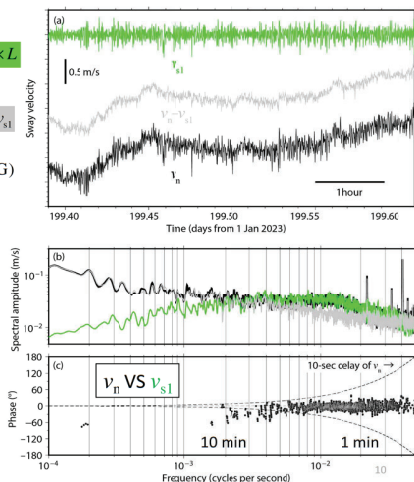
$$A \approx 1$$

$$v_n = v_{sl}$$

$$v_n = \text{SOG} \sin(\text{COG} - \text{HDG})$$

$v_n = v_{sl}$ は
< 10 分の周期帯の
ノイズがかなり軽減

< 10 分の周期帯で
 v_n と v_{sl} との相関が高く
位相差はゼロ (< 10 秒)



v_n と v_{sl} との関係 (最適な A)
速度 (SOG) に依存

$$v_n \approx A \times v_{sl}$$

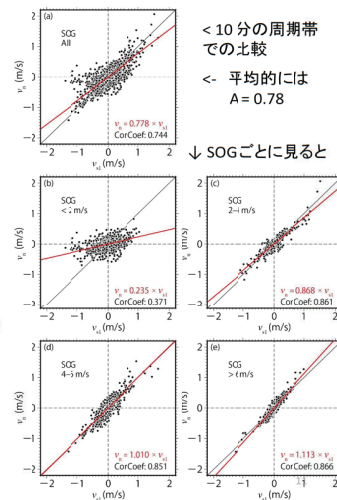
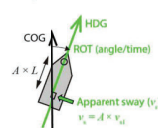
$$\text{回帰係数 } A = A(\text{SOG})$$

SCG が大きい

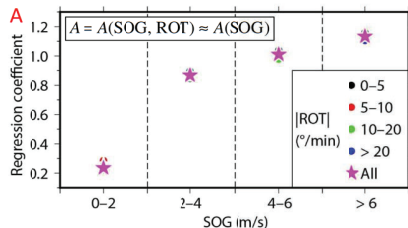
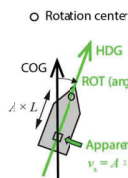
-> A も大きい (yaw 軸が前進)

yaw 回転軸の位置は
船首から見て

When SOG < 2 m/s, A = 0.24, 22 m 後方
> 6 m/s, A = 1.11, 32 m 前方



v_n と v_{sl} との関係 (最適な A)
角速度 (ROT) には依存せず



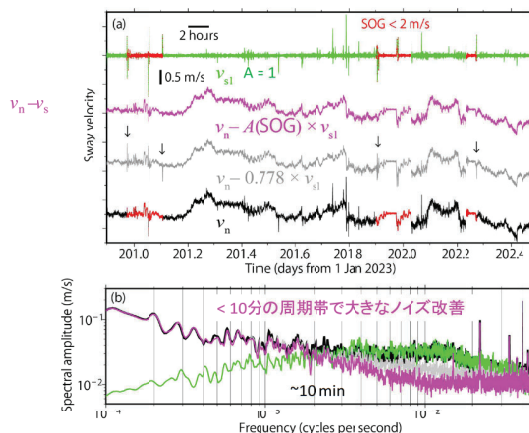
SOG が大きい

-> A も大きい (yaw 軸が前進)

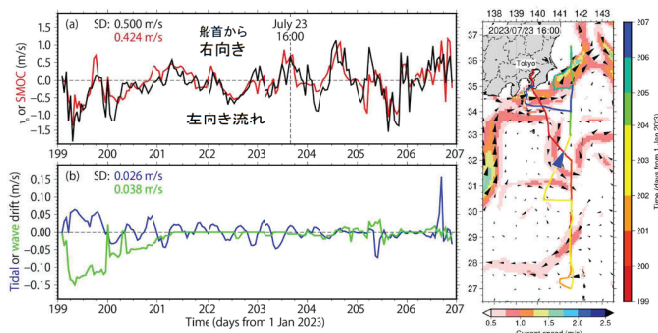
Zinchenko et al. (2023) による
理論的説明と整合

Zinchenko et al. (2023) First Point position determination and its use for manoeuvring a vessel

A(SOG) を用いて v_n から v_{sl} の影響を補正



(> 10 分の) 海流はよく測れている (A(SOG) の恩恵なし)



SMOC: Eulerian current + Tidal current + Wave (Stokes) drift

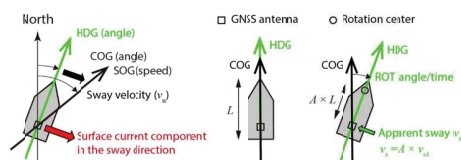
まとめ

航行する船舶の Sway 速度 (v_s) から海洋表層流れをうまく抽出したい

GNSS アンテナと船首方位 (yaw) の回転軸の位置が
違うことに起因する見かけの Sway (v_s) の影響を適切に取り除く必要
回転軸の位置は、SOG が早いほど前に移動することが肝

(汐路丸では) 約 10 分以内の周期帯では、注意が必要
 v_n そのままだよりは「 $v_n - A(\text{SOG}) \times v_{sl}$ 」を評価するとよい
(長い周期帯では影響は気にしなくてよさそう)

AIS データを用いた場合でも同様
(一応) ADCP のデータ処理の際にも考慮するとよさそう



FVCOMを用いた 大阪湾における流況場の 再現性評価

谷田 裕⁽¹⁾, 林 美鶴⁽²⁾, 中田聡史⁽³⁾, 廣川 裕一⁽¹⁾, 高橋 祐生⁽¹⁾
(1)神戸大学大学院海事科学研究科 (2)神戸大学内湾域環境教育研究センター, (3)国立環境研究所

2026/2/16

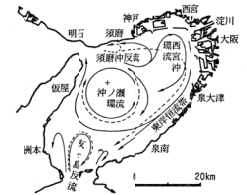
本研究は、愛媛大学共同研究の支援を受けました。
This work was supported in part by the Collaborative Research Program of Etime University.

1

背景

大阪湾の残差流分布

数十年分の定点や船舶による観測データから、右図のように表層・底層それぞれの残差流分布が概念的に示された。



出典：藤原(1989),
大阪湾の恒流と潮流・渦

潮汐残差流、密度流、吹送流が残差流場を形成

→これらの要因の河川流量や日射量、風といった要素は季節によって変化
こうした外的要因の季節変化が残差流場に季節変化をもたらすのか、あるいはどの程度変化をもたらすのかは十分に明らかになっていない

→ 3次元海洋物理モデルFVCOMを用いて、大阪湾における月ごとの立体的な残差流分布図を作成し、月あるいは季節ごとの違いを明らかにすることを目的とする

FVCOMの流況場の再現性を実観測との比較により評価・検証し、感度実験等を通してFVCOMの特性を踏まえて、流況場の再現性の向上に取り組む

2024/2/16

2

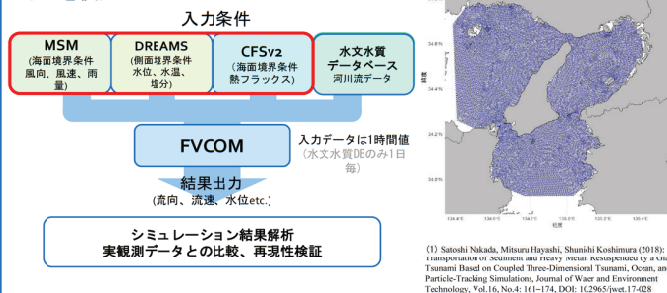
背景

FVCOMについて

(Finite-Volume primitive equation Community Ocean Model)

有限体積法による非構造格子の海洋数値モデル

今回のモデルは中田ら(2018)⁽¹⁾のモデルのグリッド情報を一部変更したものを使用



(1) Satoshi Nakada, Mitsuru Hayashi, Shunichi Koshimura (2018):
comparative assessment of oceanic and riverine mesoscale responses to a storm
Tsunami Based on Coupled Three-Dimensional Tsunami, Ocean, and
Particle-Tracking Simulation, Journal of Water and Environment
Technology, Vol. 16, No. 4: 141-174, DOI: 10.21965/jwet.17-028

2026/2/16

3

データ・手法

バージョン: ver. 4.4.7

計算期間: 2015年度 5月1日～7月1日 (スピンアップ1か月)

使用期間: 2015年度 6月1日～6月30日

初期条件: 水温・塩分は今回定点データの5月の値を参考に、水温15度、塩分32psu

計算の時間ステップ:

1.0s (外部モード),

10s (内部モード)

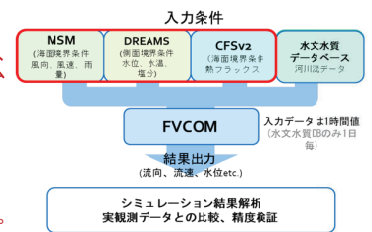
出力間隔: 1時間

今回使用したDREAMSの水位データは、FVCOMの計算結果と実観測とのタイムラグ相関の結を基準に、大阪でのFVCOMと実観測との位相が0となるように、側面境界から与える際に

播磨灘側: 239分

紀伊水道: 35分

のタイムラグを与えて計算を行った。



2024/2/16

4

FVCOMへの各種データ入力

FVCOMの計算に用いているデータは以下の通り

ファイル名	内容	元データ
area_cor.dat	ノード座標情報	—
area_grd.dat	ノードとセルの対応情報	—
area_dep.dat	各ノードの深さ	—
area_obc.dat	開境界ノード	—
area_spg.dat	スポンジノード指定	—
sigma.dat	鉛直方向座標の設定	—
RIVERS_NAMELIST.nml	河川情報および各河川での層ごとの流量割合	—
river_j.nc	各河川の流量	水門水質DB
srf_cnd_j_2015.nc	海表面からの風、熱収支、雨	CFSv2
obc_at2015.nc	播磨・紀伊水道の水位	DREAMS (or 実観測)
obc_ts2015.nc	播磨・紀伊水道の水温・塩分	DREAMS

2026/2/16

5

データ・手法

FVCOMの潮流、および流況場(潮流+密度流+吹送流)の再現性評価・検証は以下の観測値やデータとの比較を行う。

潮流 流速: 潮流推算(明石、紀伊海峡)、
HF(海洋短波)レーダの表層流速値の調和解析結果

潮位: 沿岸の定点潮位観測値(予測値)

流況場 流速: HF(海洋短波)レーダの表層流速値、

を用いる。

FVCOMの流況場の再現性を評価し、再現性が低い場合はその要因を明らかにするとともに、入力条件変更を行いFVCOMの流れ場の再現性向上を目指す

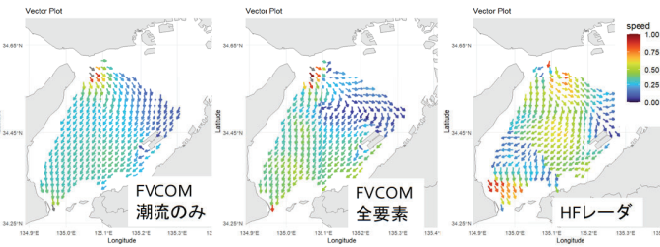
2024/2/16

6

FVCOMの流速過小

HFvsFVCOM(1時間値比較)

全ての流動要素を入力してFVCOMで計算した結果をHFレーダ観測値と比較すると、**いずれの時刻においてもFVCOMの流速の方が小さく、かつ特定の時刻で流況も一致しない場合があった。**



2026/2/13

7

結果(HFレーダ観測値との比較)

HFvsFVCOM(残差流比較)

HFレーダ：沖ノ瀬還流が確認

FVCOM：湾奥からの流れが卓越、沖ノ瀬還流が不明瞭。

東岸の流速は両者とも0.1~0.15 m/s程度、

湾全体ではFVCOMの残差流速はHFレーダに比べ小さい。

側面水位のみによるFVCOMの潮流の計算結果

残差流(潮汐残差流)は、沖ノ瀬還流の裏側は再現、西側は確認できず

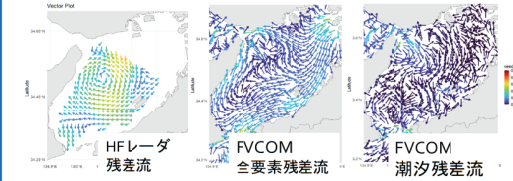


図2：6月の残差流分布
(25時間移動平均をさらに平均化したもの)

流れ場の再現性は潮流成分の過小が原因、FVCOMの潮汐残差流では、明石海峡からの南流が強く表れ、湾西側で弱いことから、特に紀伊水道側からの上げ潮流が弱いことが再現性を低下させていると考えている。
潮流の再現性向上に向け、潮位変動の比較・変更を行い検証した

2024/2/16

8

各地点での潮位変動比較(FVCOM vs 実観測潮位)

各地点での潮位観測値とFVCOM(潮流のみ)の水位を比較した結果、**変動のパターン、位相は一致した一方で、E潮不等の振幅に違い**があらわれた。姫路：高潮時の振幅過小

赤：FVCOM
青：実観測値

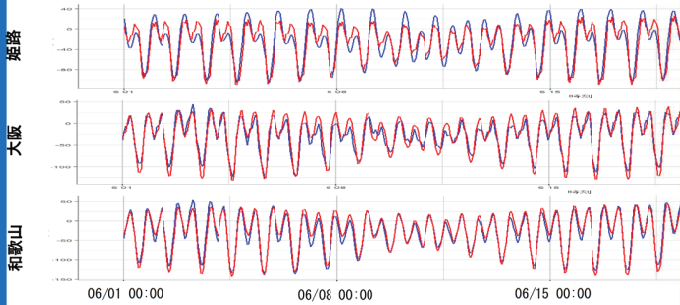


図9：各地点でのFVCOM、実観測水位の時系列変化

2026/2/13

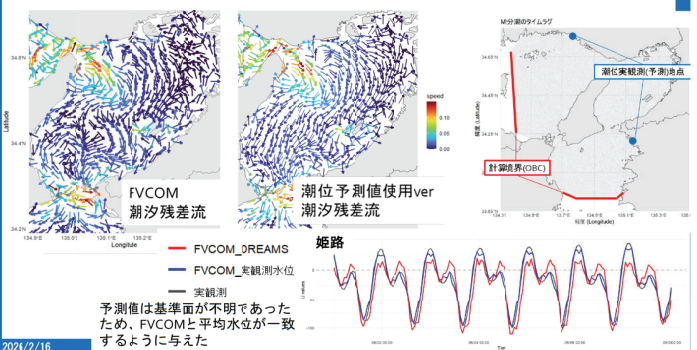
9

潮位予測値(実観測)を用いた計算結果

湾南側の流れ場は変化し、収束がなくなり流れ場が変化した一方で、依然として流速は過小であり、沖ノ瀬還流が改善されなかった。

潮位データには実測を用いるのが良いが、流速を上げるには潮位以外の変更が必要

→側面からの流量・流速を与えることで流速を増加させることを試みる



予測値は基準面が不明であったため、FVCOMと平均水位が一致するように与えた

2024/2/16

FVCOMへの側面流速・流量(meanflow)の導入

水位のみ：側面水位データ 水位+meanflow：側面水位データ+meanflowデータ

側面水位データ

cbc_et2015.nc

meanflow データ

側面流量 (casename_meanflow.dat)
側面流速 (casename_tide_uv.dat)
水位データ (casename_tide_el.dat)
水位補助データ (casename_elj_abc.dat)
セル情報 (casename_tids_cell.dat)
ノード情報 (casename_tide_noce.dat)
(リスタート時 (casename_restart_mf.dat))

DREAMS

より作成

潮汐のみ

計算時の

FVCOMの

条件使用

(リスタート時 (casename_restart_mf.dat))



データはいずれも毎時

側面の流量・流速を入れる場合は開境界の条件をOBCType2にしなければいけない。(潮汐のみの計算の場合は1)

Type1
Active
Sea level is specified at the OB. For example, tidal amplitude and phase (original FVCOM setup).
Type2
Clamped (ASL-OLP)
Bardley and Rindogel (1981)
ξ=ξ at OBC.

2026/2/13

meanflowデータの作成方法

側面流量 (casename_meanflow.dat) :

データ名	内容
①dmqdis(m/s)	各セルでの鉛直積分した総流量
②mfdist(無次元)	各セル、各層における流量割合

対象年(2015年)は、DREAMSの3次元の水平方向流速(m/s)の毎時データが入手できなかったため、2次元流速を鉛直方向の代表値として境界断面積をかけたことで側面流量を求めている。

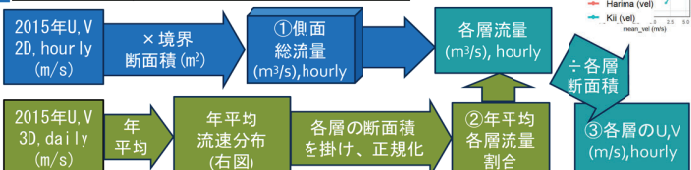
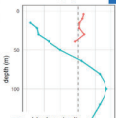
③側面流速 (casename_tide_uv.dat) :

データ名	内容
u,ubar, v,vbar	各セル・層における流速(u,v)と鉛直平均流速(ubar, vbar)

右図：年間鉛直P

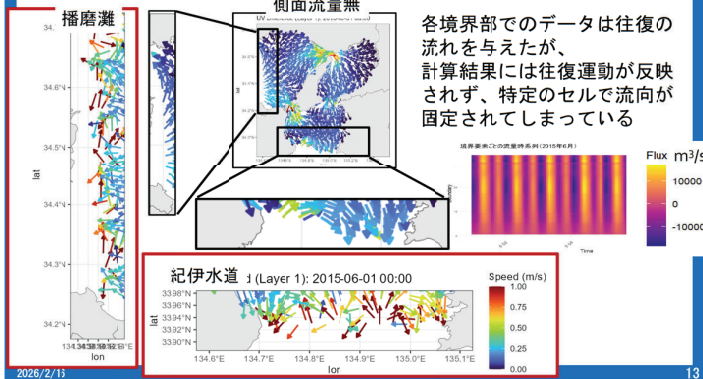
流出入は境界線

に対し垂直方向



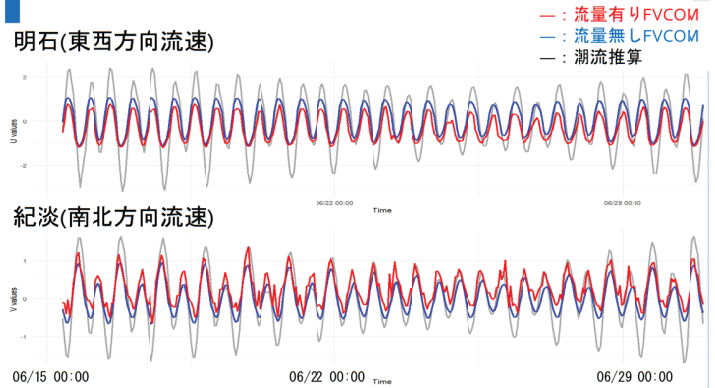
側面流速に関する問題点・不明点

計算期間中、境界部で流向がほぼ変化しないセルがあった
紀伊水道からの上げ潮流が卓越し、下げ潮流が弱まっている。



側面流速を加えた場合の海峡部流速

5月1日～7月1日の間で境界部の流向がほぼ変化しない
紀伊水道からの上げ潮流が強い一方で、下げ潮流が弱まっている。



まとめ・今後の方針

まとめ

- FVCOMの流速が実観測と異なる要因は潮流の過小にあり、残差流場では密度流の影響が卓越
- FVCOMの側面水位を実観測にした場合、湾南側の流れ場は変化した。実観測では無かった収束域が無くなり流れ場が改善した。このため、側面水位は実観測潮位を用いるのが良いと考えられる。
- 側面境界から流速を与える試みを行ったが、各境界における潮汐周期での海水の往復は再現できなかった
- 紀淡海峡の上げ潮流流速は潮流推算値に近い値となったが、明石海峡の上げ・下げ潮流、紀淡の下げ潮流は依然として過小であった。

今後の方針

- mean_flowデータの調整・変更
- 他の月での検証

側面流速に関する記述

FVCOMマニュアルより境界条件について

The first method

same as that used in the original OBC setup of FVCOM.

The second method

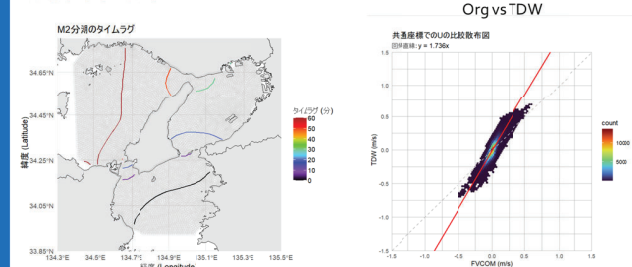
- the vertically integrated flux at the open boundary
first computed according to the mass conservation law in the continuity equation
- the vertically averaged velocity in the external mode
then calculated using the fully nonlinear momentum equations
- The perturbation velocity, which is defined as the difference between the 3-D and 2-D currents
determined using the linear momentum equations.

In order to calculate the flux at the open boundary, the ghost cells are added at the open boundary in which the velocity is specified as the same value and direction in the open boundary cell. In fact, the perturbation velocity is solved in the no-gradient condition.

補足

結果

振幅変更の結果

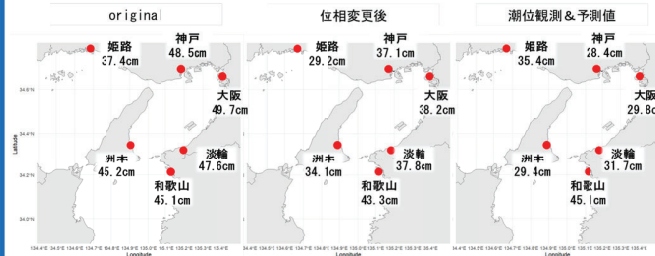


位相変更を行わずに側面境界での潮位振幅を2倍にした場合、各海峡での流速はoriginalに比べて1.6倍～1.7倍となった
このとき潮汐波伝播速度に変化は無し→位相変更には影響しない

結果

位相変更の結果

FVCOMと予測値の、M2分潮成分の振幅差分 (FVCOM—予測値)



大阪湾内の振幅過大が、境界の位相変更によって改善されている

2026/2/13

26

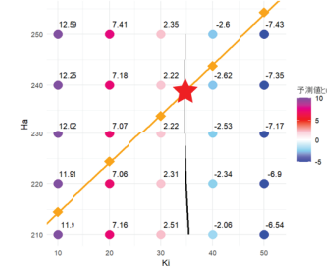
結果

位相変更の結果

最も湾奥の観測点である大阪におけるM2の位相差を基準に、

最も良いタイムラグを決定する

大阪におけるM2分潮成分潮位



紀伊水道側タイムラグ一定の場合：
ある播磨灘のタイムラグにて大阪での
FVCOMと予測値との位相差が極小値とな
り、最適なタイムラグが求められる。

→Kiを変化させて同様に検証し、極小か
つ予測値との位相差が0となるタイムラ
グを求めた

黒線：FVCOMと予測値位相差 0

橙線：各Kiにおける極小値

赤星：最適なタイムラグ

播磨灘側の潮位変動を239分、紀伊水道側の潮位変動を35分遅らせた場合
が大阪での実観測に対する位相差が最も小

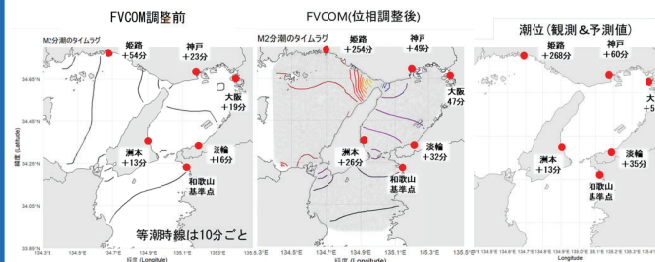
2024/2/16

27

結果

位相変更の結果

播磨灘を239分、紀伊水道を35分ずらした場合の各地点での
M2分潮成分の振幅、潮波伝播速度の比較



位相変更によって潮波の伝播速度が改善され、実観測に近づいている。

2026/2/13

29

結果

地形変更の結果、各海峡部での流速は以下のように変化

地形変更と位相変化によって流速過小が改善

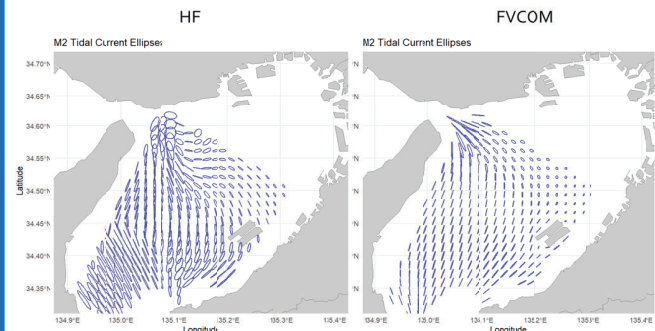
→ただし、依然として過小であるため、側面境界の潮位振幅変更を行う必要
がある

	original	地形変更後	地形・位相 変更後	潮流推算
明石海峡	0.29 m/s	0.29 m/s	0.58 m/s	1.17 m/s
紀淡海峡	0.23 m/s	0.20 m/s	0.34 m/s	0.68 m/s

2024/2/16

30

潮流楕円



2026/2/13

33

ヤリイカ (*Heterololigo bleekeri*) の平衡石に残された 台風リンリン (2019年) の痕跡

○山口 忠則 (長崎大学水産)・Fong-Ryeol Shin (公州大)・
広瀬直毅 (九大応力研)、滝川 哲太郎 (長崎大水産)

ヤリイカ *Heteroligo bleekeri*



ケンサキイカ *Uroteuthis edulis*



写真(エギングHP)

ヤリイカ対馬暖流系群(水産庁資源評価)



1. 大規模な回遊を行わず、産卵場と索餌場の深湛移動が中心
2. 好適な水温は、9～12℃ (7～18℃)
3. 夏から秋には主に 100～200 m 水深帯の大陸棚上に分布し索餌
4. 産卵は、本州日本海側では 2, 3 月を中心に 1～5 月
5. 産卵場は沿岸の岩礁域などに形成

ヤリイカ対馬暖流系の漁獲状況(水産庁資源評価)

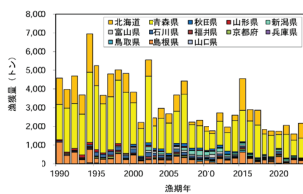
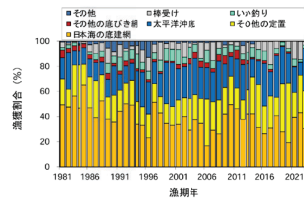
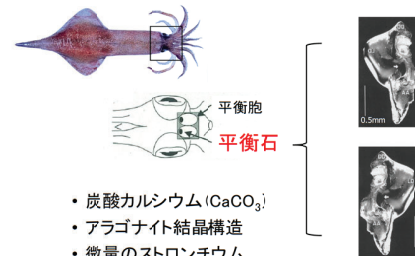


図3 漁獲量の推移 (1990～2023年漁期)
石川県、島根県および山口県は主要産地の集計値。2023年漁期は一部推定値を含む(補足資料2)。



補足図1-2 青森県における漁法別の漁獲量割合の推移 (1981～2023年漁期)
青森県の集計値であり、図5に示した漁獲量(年合計)を調査年度別漁獲量割合(割合)より集計)とは異なるとなる。

材料と方法

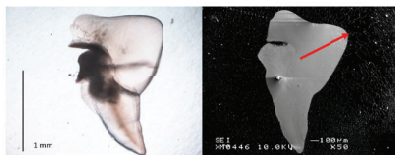


- ・炭酸カルシウム(CaCO_3)
- ・アラゴナイト結晶構造
- ・微量のストロンチウム
- ・日周成長

5

鏡面研磨

炭素蒸着



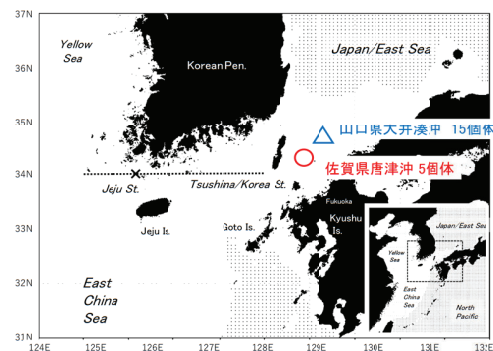
ライン分析
加速電圧 10.0kV
ビーム径 5μm
間隔 5μm

- ・輪紋計数 →
日齢とふ化日を推定
- ・Sr/Ca比測定 →
経歴水温と負の相関



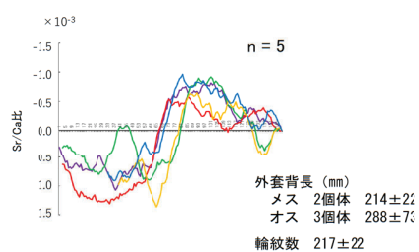
日本電子 JXA-8900RLS

6

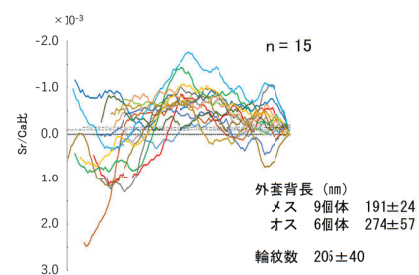


133E 134N

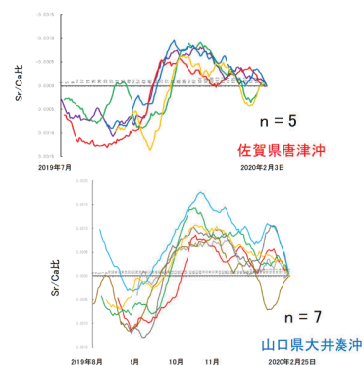
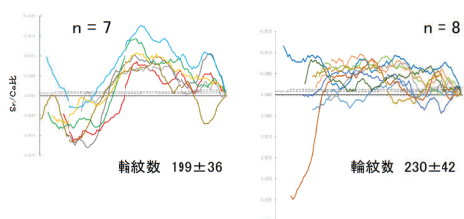
佐賀県唐津沖 2020年2月3日



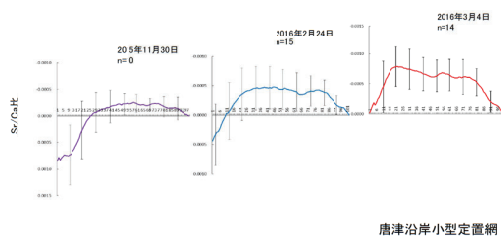
山口県大井湊沖 2020年2月25日



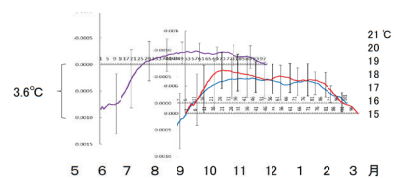
2パターンに分類



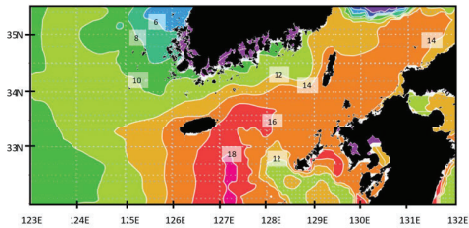
ケンサキイカ平衡石Sr/Ca比の変化



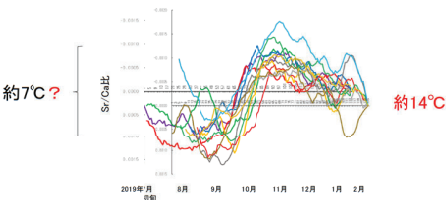
ケンサキイカの経験水温変化



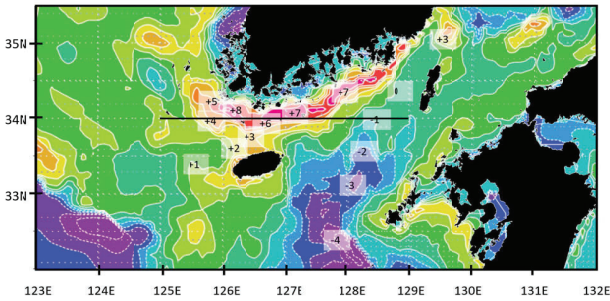
2020年2月3日(漁獲日)の底層水温(DREAMS_M)



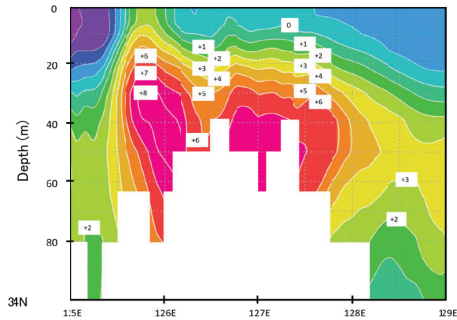
ヤリイカの経験水温変化



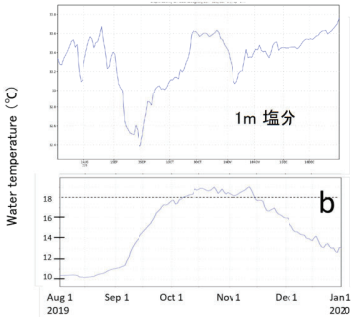
2019年9月1日～10月1日の底層水温変化 (DREAMS_M)



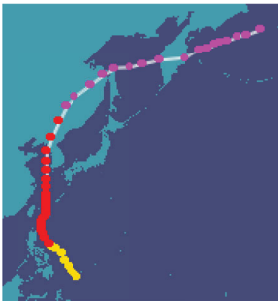
2019年9月1日～10月1日の鉛直水温変化 (DREAMS_M)



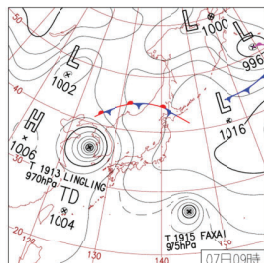
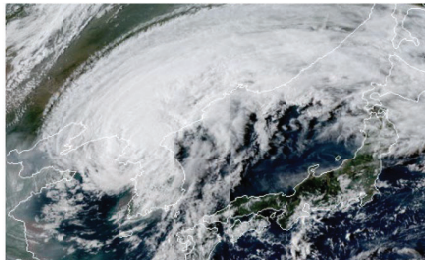
126E、34Nにおける1mと81m水深 (DREAMS_M)



第13号台風リンリン(2019年)の経路



衛星画像と天気図(気象庁)



7日(土)奄美・四国で短時間大雨
台風第13号が黄海を北上し、南から
湿った空気が流れ込む、高知県三崎
76mm/1hは9月1位、鹿児島県笠立
73.5mm/1h。本州は概ね晴れ。西日
本～東日本は猛暑日続く。西日

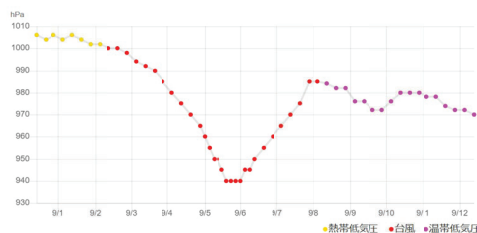
韓国での被害



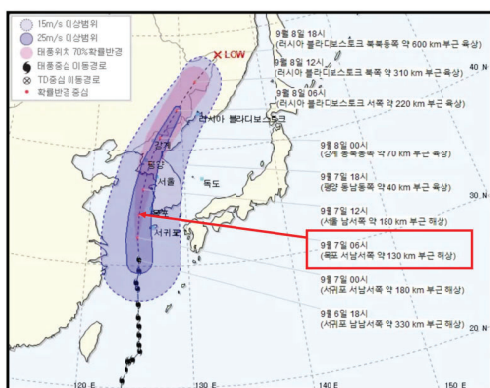
北朝鮮での被害



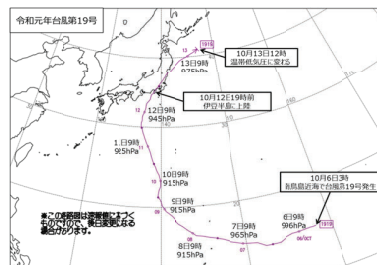
中心気圧の変化グラフ



5日14時には宮古島に940hPa、10分平均風速46m/sで上陸。宮古空港では瞬間最大風速61.2m/s
6日12時まで勢力を維持したが、その後、弱体化が始まり
7日3時ごろ済州島西海上では10分平均風速41m/s



令和元年東日本台風(台風第19号)



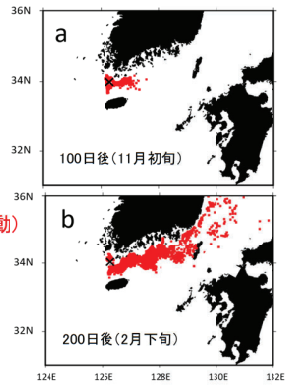
死者・行方不明者は108人



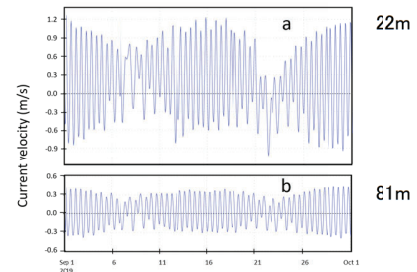
経路と○印は強に似た日の9時、●印は21時の位置を示している
※この経路図は速報値に基づいたものであり、後日確定したものを別途公表する

粒子追跡実験

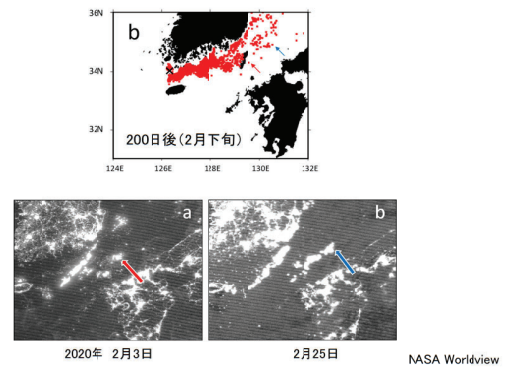
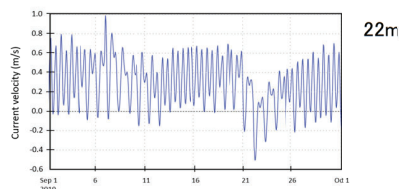
- DREAMS_M: Hourlyデータ
- 日周鉛直運動
6時～18時: 流速0 (海底に定位)
18時～6時: 水深22m流速 (索餌行動)
- 2019年8月1日に126E、34Nから10,000個をリリース



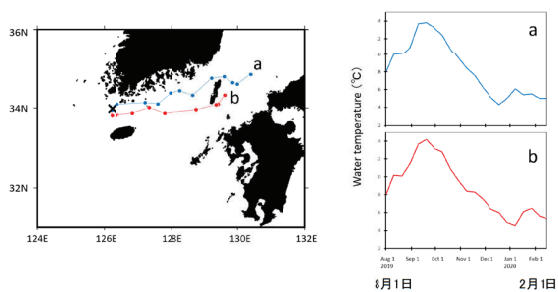
済州海峡(126E、34N:リリース点)の東西成分流速



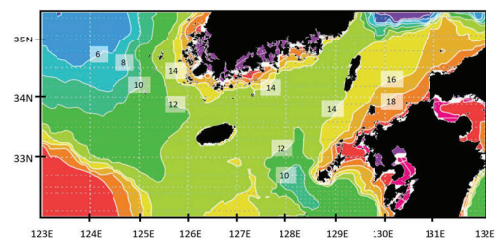
西水道(127.5E、34N)の東西成分流速

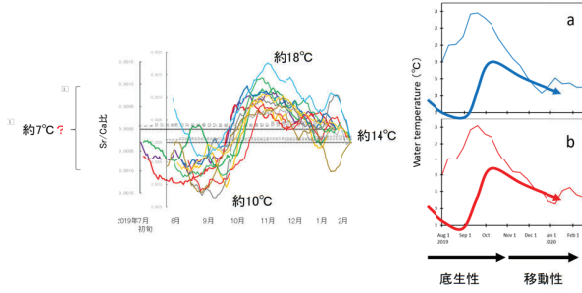


粒子の移動経路と水温変化(水深22m)

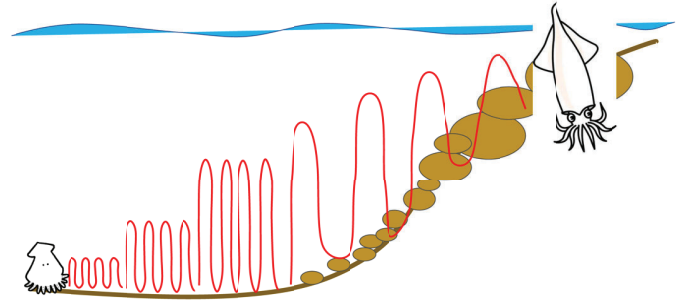


2019年7月1日(ふ化時期)の底層水温(DREAMS_M)





ヤリイカの成長モデル



山陰沖日周潮流の円運動と陸棚波理論解

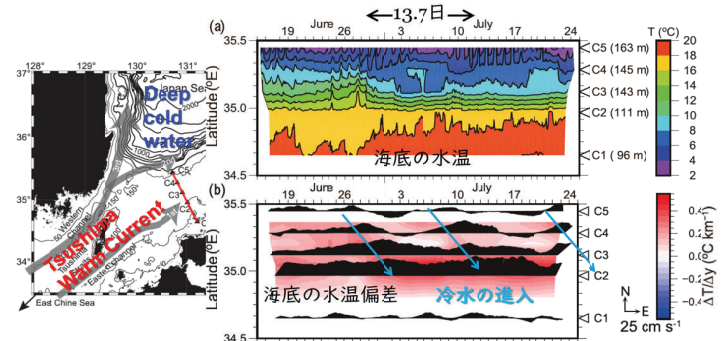
滝川哲太郎・小濱颯月（長崎大学）
森本昭彦（愛媛大学CMES）
遠藤貴洋（九州大学RIAM）

2025.12.4-5 九州大学応用力学研究所 共同利用研究会
「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会」

山陰沖の2週間変動

Takikawa et al. (2021), JGR

日周潮内部潮汐による大潮－小潮変動 → 対馬暖流の2週間変動



底冷水の陸棚への進入 ← 斜面を横切る流れ

山陰沖の日周潮流

Isoda & Maruyama (1993), JO

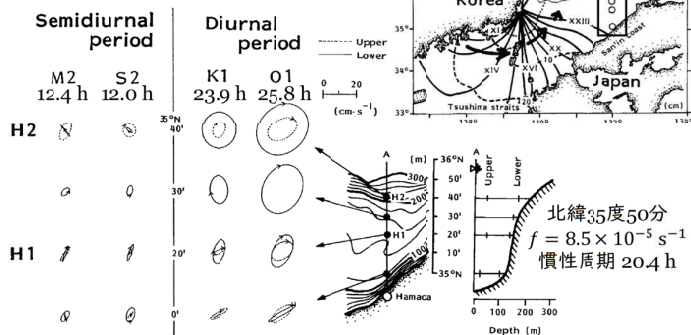


Fig. 5. Tidal current ellipses for M₂, S₂, K₁, and O₁ tides on the shelf off Hamada. Ellipses at 35°00' N and 35°30' N are calculated using the current data obtained from the observation in 1989 (Isoda et al., 1992).

K₁, O₁潮流：陸棚縁の下層で大きな時計回り円運動

陸棚波の理論解

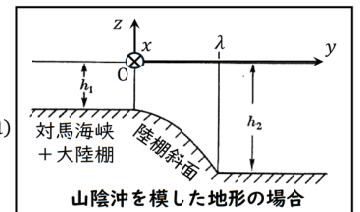
Buchwald & Adams (1968)

$$\begin{aligned} \text{線形} \quad & \begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} - f v = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial t} + f u = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} \\ \frac{\partial (Hu)}{\partial x} + \frac{\partial (Hv)}{\partial y} = 0 \end{cases} \\ \text{非発散} \quad & -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times v)_z - \frac{f}{H} v \cdot \nabla H = 0 \end{aligned}$$

$$H = \begin{cases} h_1, & \text{陸棚} (y < 0) \\ h_1 e^{2\gamma y}, & \text{斜面} (0 \leq y < \lambda) \\ t_2, & \text{沖合} (\lambda \leq y) \end{cases}$$

$$\text{流線関数 } \Psi = \psi(y) e^{i(kx - \omega t)} \quad \text{波長: } 2\pi/k$$

$$\begin{cases} Hu = -\frac{\partial \Psi}{\partial y} \\ Hv = \frac{\partial \Psi}{\partial x} \end{cases} \quad \psi(y) = \begin{cases} A_0 e^{ky}, & (y < 0) \\ e^{by} (A_1 \sin my + A_2 \cos my), & (0 \leq y < \lambda) \\ A_3 e^{-k(y-\lambda)}, & (\lambda \leq y) \end{cases}$$



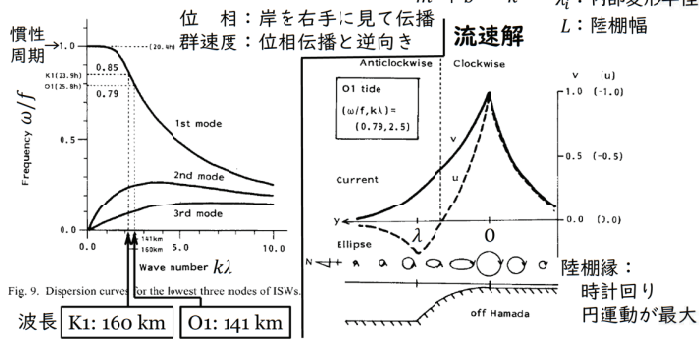
山陰沖を模した地形の場合

岸沖スケール： $2\pi/k$ （陸棚上）、 $2\pi/m$ （斜面, 1st mode）

$\psi(y)$ の連続性を境界条件 → 分散関係・流速解 $(m(k): k \text{ の関数})$

日周潮陸棚波の理論解 (順圧・非発散?) IM93

分散関係 $\frac{\omega}{f} = \frac{2bk}{k^2 + m^2(k)^2 + b^2}$ 境界条件 $\tan ml = \frac{2mk}{m^2 + b^2 - k^2}$ 成層パラメーター $S = \lambda_i/L = 0.24 < 1$



内部陸棚波 interior shelf waves (ISWs), IM93
二重ケルビン波 double Kelvin waves, 磯田・川上 (1995), 沿岸海洋研究ノート

内部陸棚波 interior shelf waves (順圧・非発散)

Buchwald & Adams (1968), Proc Roy Soc A

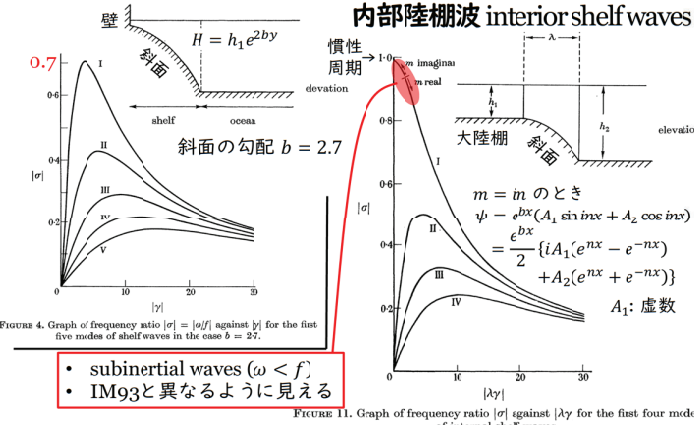
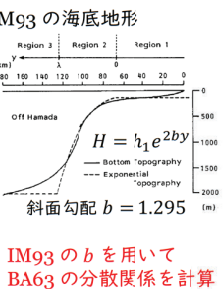
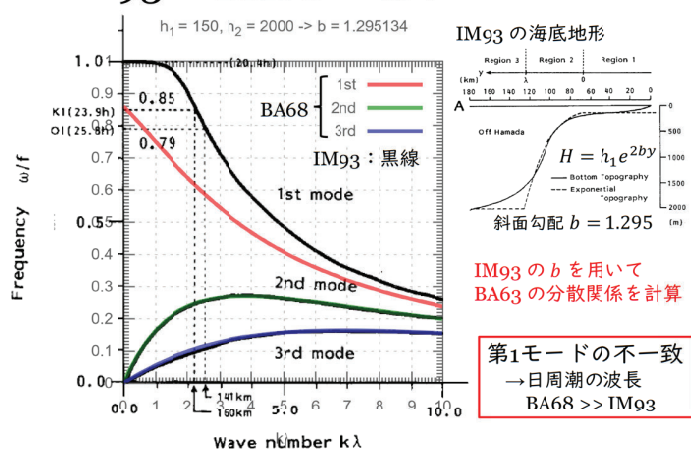


FIGURE 11. Graph of frequency ratio $|\sigma|$ against $|\lambda|$ for the first four modes of internal shelf waves.

- subinertial waves ($\omega < f$)
- IM93と異なるように見える

IM93 と BA68 の分散関係



第1モードの不一致
→ 日周潮の波長
BA68 >> IM93

二重ケルビン波 double Kelvin waves

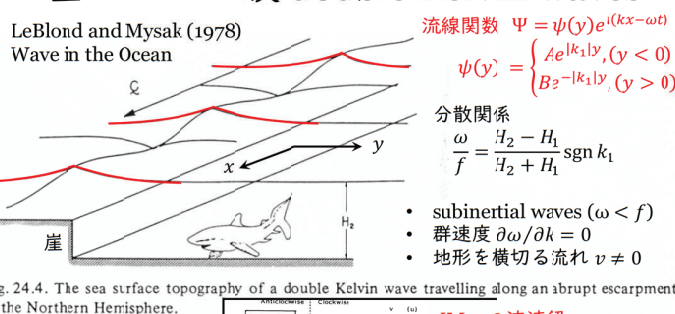
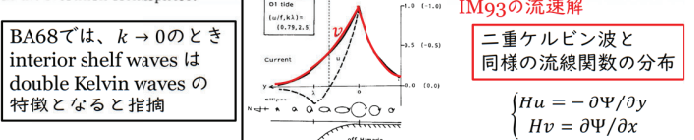


Fig. 24.4. The sea surface topography of a double Kelvin wave travelling along an abrupt escarpment in the Northern Hemisphere.



BA68では、 $k \rightarrow 0$ のとき interior shelf waves は double Kelvin waves の特徴となると指摘

IM93の流速解

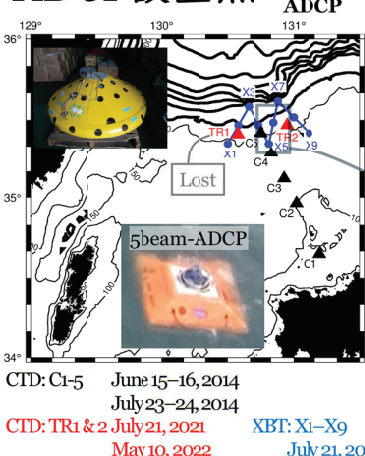
二重ケルビン波と 同様の流線関数の分布

$$\begin{cases} Hu = -\partial \Psi / \partial y \\ Hv = \partial \Psi / \partial x \end{cases}$$

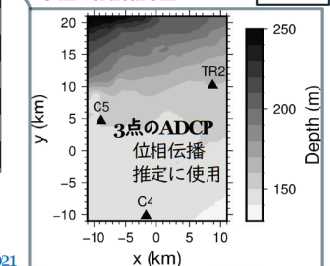
目的

- 山陰沖の海底設置ADCPデータ
 - 日周潮流の鉛直構造・水平分布
 - 日周潮流の位相伝播
- 陸棚波理論解との比較

ADCP設置点

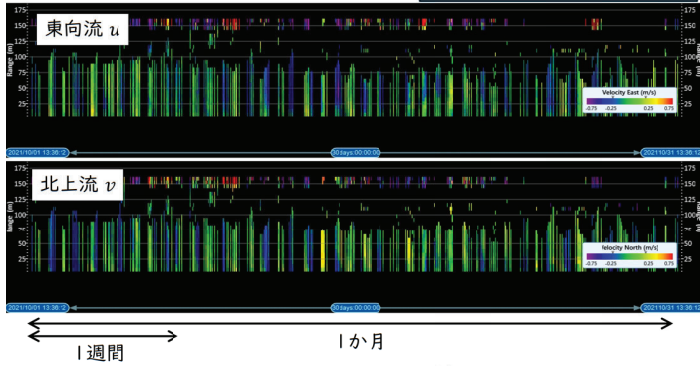


C1-5: mid-June-late-July 2014
R/V Shinsei-maru, JAMSTEC
(Takikawa et al., 2021, GRL)
10-min interval -> 1-h average
(60-200 pings/ensemble, SE<0.5 cm/s)
8 m vertical bin (C4 & 5)



流速の生データ TR2

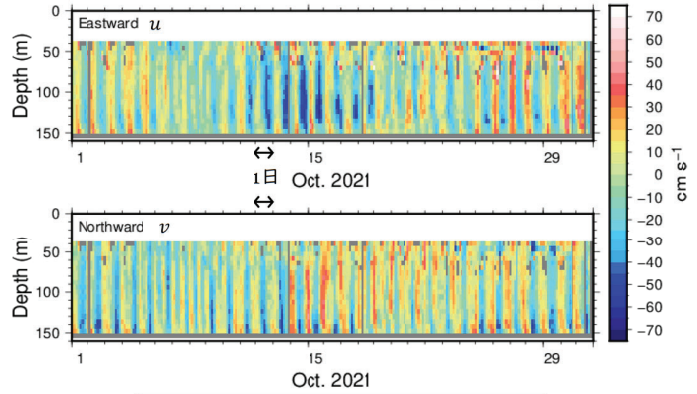
【pingのエラー】
pingの発信が途中で止まる。
または ping が発信されない。



- 1 ensemble あたり 1 ping 以上のデータを使用
(単pingの精度: 3.32 cm/s)
 - 5つのビームから水平流を計算
- 30分間隔のデータを作成 (欠測あり)

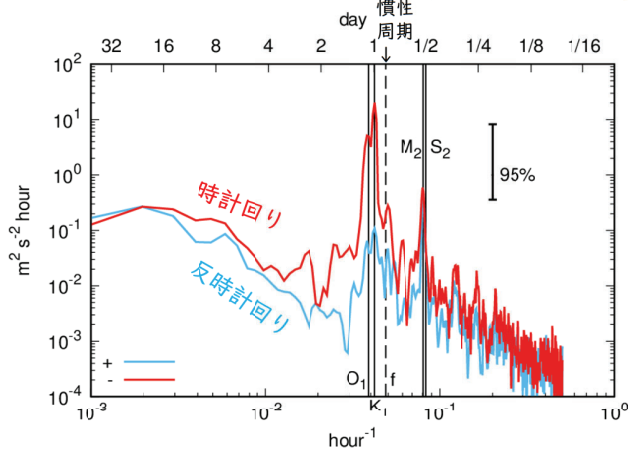
流速の時系列 TR2

- データ間隔30分 (欠測あり)
- 描画: 3時間平均



u, v ともに1日周期の変動が卓越

流速のパワースペクトル C5, 12: m depth



潮流調和分解

観測流速 $v = (u, v)$

$$\begin{cases} u = \bar{u} + \sum_{n=1}^N (a_{1,n} \cos \omega_n t + b_{1,n} \sin \omega_n t) + \varepsilon_1 \\ v = \bar{v} + \sum_{n=1}^N (a_{2,n} \cos \omega_n t + b_{2,n} \sin \omega_n t) + \varepsilon_2 \end{cases}$$

最小二乗法

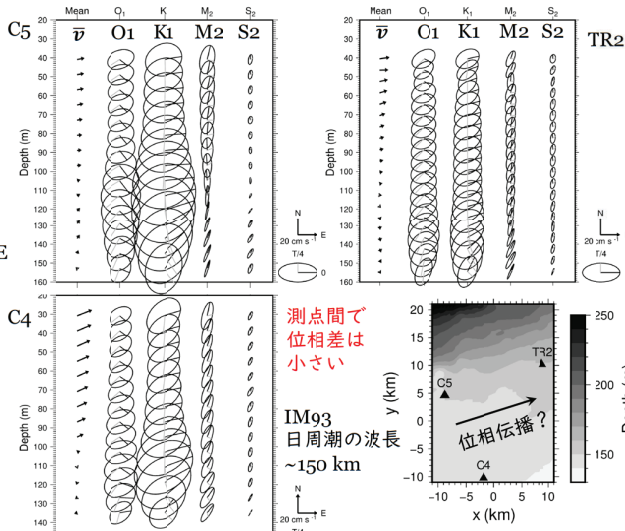
誤差 $(\varepsilon_1, \varepsilon_2) \rightarrow \text{minimum}$

平均流 $\bar{v} = (\bar{u}, \bar{v})$ と7分潮に分解

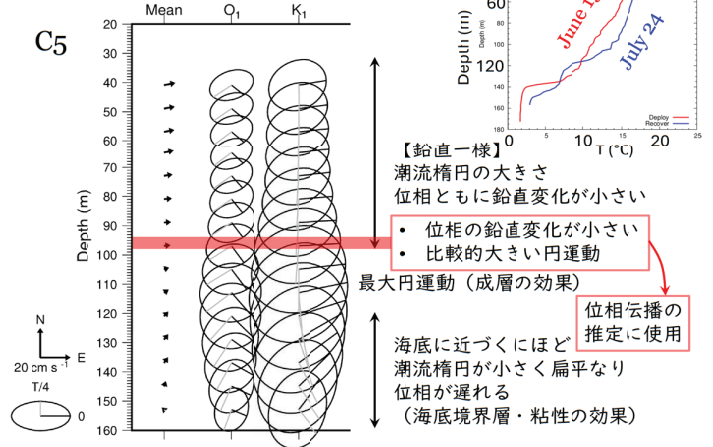
($N = 7: Q_1, O_1, K_1, N_2, M_2, S_2$)

潮流楕円

135°E 基準



日周潮流楕円の鉛直構造



【鉛直一様】
潮流楕円の大きさ
位相ともに鉛直変化が小さい

- 位相の鉛直変化が小さい
- 比較的大さい円運動

最大円運動 (成層の効果)

海底に近づくにほど
潮流楕円が小さく扁平なり
位相が遅れる
(海底境界層・粘性の効果)

位相伝播の向きの推定方法

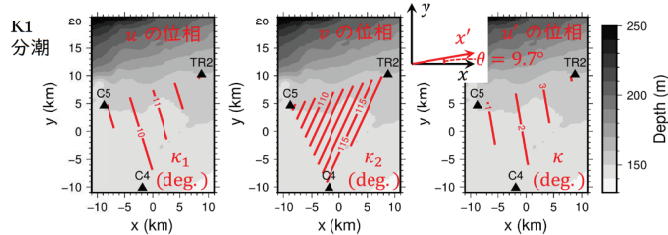
ある分潮の $\begin{cases} u = a_1 \cos \omega t + b_1 \sin \omega t = (a_1^2 + b_1^2)^{1/2} \cos(\omega t - \kappa_1) & \kappa_1: u \text{ の位相} \\ v = a_2 \cos \omega t + b_2 \sin \omega t = (a_2^2 + b_2^2)^{1/2} \cos(\omega t - \kappa_2) & \kappa_2: v \text{ の位相} \end{cases}$

x 軸を θ 回転させた軸を x' とすると、分潮流の x' 成分は

$$u' = (a_1 \cos \theta + a_2 \sin \theta) \cos \omega t + (b_1 \cos \theta + b_2 \sin \theta) \sin \omega t = U' \cos(\omega t - \kappa)$$

$\kappa = \text{atan2}(b_1 \cos \theta + b_2 \sin \theta, a_1 \cos \theta + a_2 \sin \theta)$

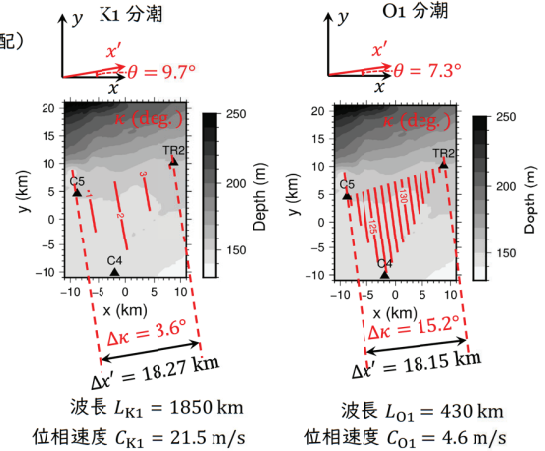
3つの観測点の位相の基準を合わせたのち (135°E 基準)、
波面 (等位相線) と伝播方向流速 u' が直交するように θ 決定 (平面進行波の定義)



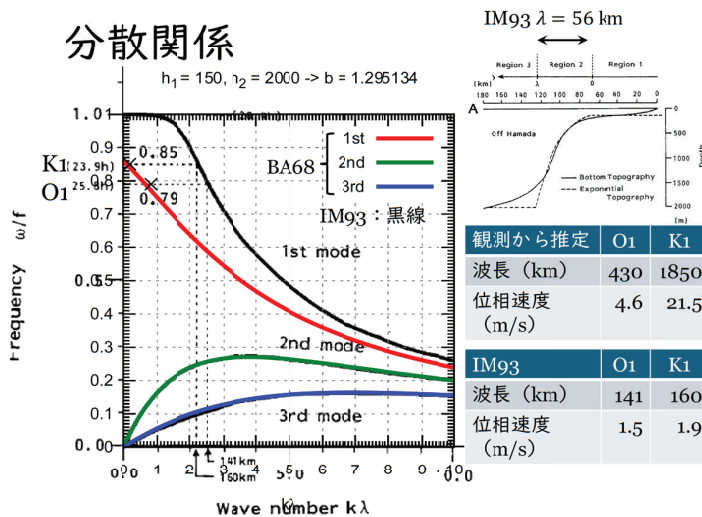
日周潮流の位相伝播

波数
(位相の水平勾配)
 $k = \frac{\Delta \kappa}{\Delta x'}$

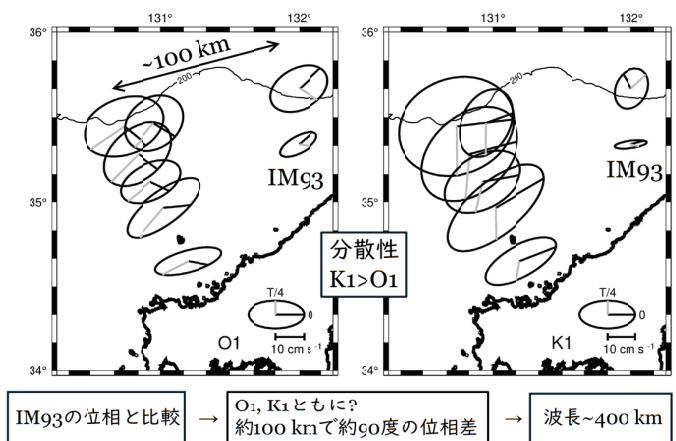
位相速度
 $C = \frac{\omega}{k}$



分散関係

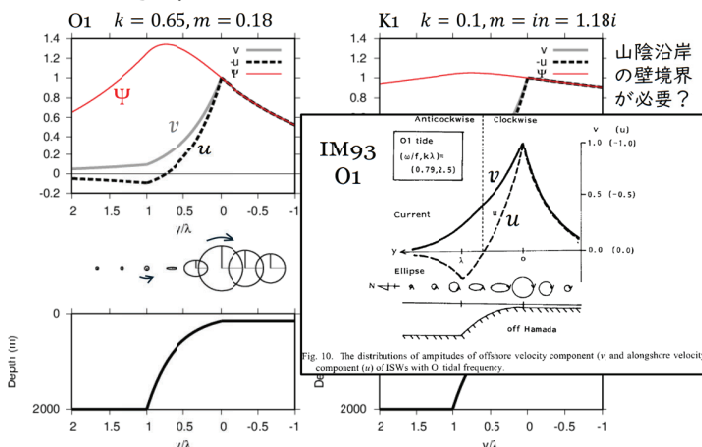


日周潮の空間分布 50 m 深



流速解

岸沖スケール l/λ : $1/k\lambda$ (陸棚上)、 $1/m\lambda$ (斜面)



まとめ

- 山陰沖陸棚縁の日周潮流の鉛直構造
 - 円運動・下層で大きい (Isoda & Maruyama, 1993)
 - 海底付近: 楕円が小さくなり扁平・位相の遅れ
- 分散関係・流速解
 - Buchwald & Adams (1968) の internal shelf waves と一致
 - 流速解の分布は、IM93 と同様に double Kelvin waves の特徴
- 日周潮流の波長・位相伝播

観測から推定	O1	K1	IM93	O1	K1
波長 (km)	430	1850	波長 (km)	141	160
位相速 (m/s)	4.6	21.5	位相速 (m/s)	1.5	1.9

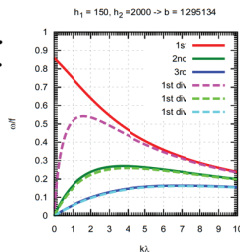
陸棚の長さに対して大きすぎる?

- IM93の潮流楕円の位相と比較

→ O1, K1ともに波長~400 km?

発散を許すと

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} - fv &= -g \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial t} + fu &= -g \frac{\partial \eta}{\partial y} \\ \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial Hu}{\partial x} + \frac{\partial Hv}{\partial y} &= 0\end{aligned}$$



強発散の場合、流線関数 ψ を定義可能か分からない？地衡流からのズレは大きいと思う。矛盾がありそうだが、流線関数 $\psi = g\eta/f$ として、Duchwald & Adams (1958) に習って分散関係も導出してみる。

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} - \frac{1}{H} \frac{\partial H}{\partial y} \frac{\partial \psi}{\partial y} + \left(\frac{f}{H\omega} \frac{\partial H}{\partial y} - k^2 - \frac{1}{\lambda_e^2} \right) \psi = 0$$

分散関係に以下となる。

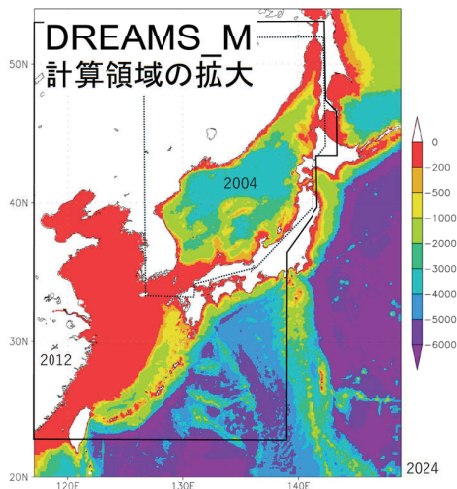
$$\frac{\omega}{f} = \frac{2bk}{k^2 + m^2 + b^2 + \lambda_e^{-2}}$$

→海面変位 η で導出した Drivdal et al. (2016), JPOの分散関係と同様 (ノルウェー西岸)

日本周辺海域モデルにおける波成混合の調査

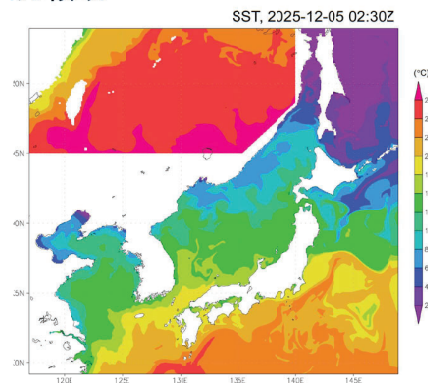
広瀬直毅・劉天然(九大応力研)・吉川裕(京大)・LEE, Eunjeong (KIAPS)

謝辞: 科研費22H0178A(吉川裕代表「海洋水面波が引き起こす乱流混合の相似則と日本周辺気候に与える影響の評価」)の助成を受けました。

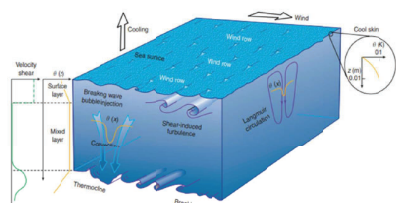
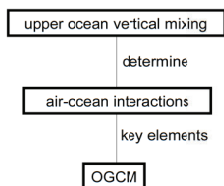


新DREAMS_M

注: 出力領域



Background



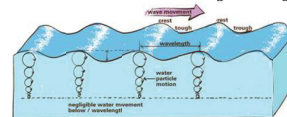
(from Moum and Smyth, 2001, doi:10.1006/rwos.2001.0136)

← この粗さで波成混合効果？
本研究では鉛直混合効果のみ調査
(運動方程式への波作用は無視)

k	Δz (m)	中心深度
1	2	1
2	3	3.5
3	3	6.5
4	4	10
5	6	15
6	8	22
7	8	30
...	...	...
40	960	5674

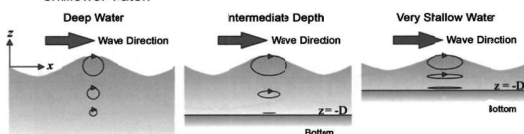
(a) wave orbital motion

The wave orbital motion is the process that water particles follow a circular or elliptical path along the wave direction, with the energy moving forward but the water itself returning to its original position.



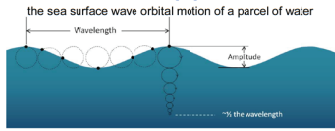
(from <https://sciencebb.weebly.com/>)

The orbital motion is strongest at the surface and decreases with depth, disappearing at a depth of about half of the wavelength, and it changes from a circular path in deep water to a flatter ellipse in shallower water.



(Ahmed et al., 2010)

(a) wave orbital motion



Turbulence can be produced by the wave orbital motion vertically at the scale of the wavelength (Babanin, 2006, 2017).

modified turbulence kinetic energy (TKE) budget equation (Stoney et al., 2018):

P : TKE production from shear

$$P = \nu (M^2 + \alpha N^2) + \frac{W}{T_w} \quad W = bk \left(\frac{\omega h_w}{2} e^{kz} \right)^3 \quad \omega = \frac{2\pi}{T_w}$$

$$k = \frac{4\pi^2}{gT_w^2} \quad b = 0.0014$$

where ν is the turbulent viscosity, M is the shear frequency, and αN^2 is a parameterization of the breaking of internal waves, first suggested by Melor (1989). For this study, we add the term W to parameterize the wave-induced mixing:

h_w : significant wave height

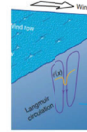
T_w : peak wave period

h_w and T_w are from CWM output provided by JMA
CWM: Coasta Wave Model, $0.05^\circ \times 0.05^\circ$

Similar (but complicated) scheme of Qiao (2004, 2010) has been applied in famous OGCMs such as MOM4 or NEMO.

[6]

(b) Langmuir circulation

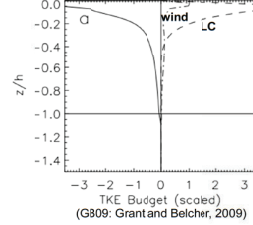


Langmuir circulation (LC), the alternating horizontal roll vortices basically along the wind direction, is one of the most important characteristics of the upper ocean mixed layer (Noh et al. 2016).

theory of LC
(Craig and Levich, 1976):
interaction of Stokes drift and wind-driven surface shear current

$$u_s \times \omega$$

LC can enhance vertical mixing greatly



Fujiwara and Yoshikawa (2020) investigated the dynamics of wave-current mutual interaction based on wave-resolving simulations of monochromatic surface waves and Langmuir circulations.

[7]

(b) Langmuir circulation

additional term in TKE equation
(Choi et al., 2022):

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_q \frac{\partial E}{\partial z} \right) + K_m \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right)^2 - K_h \frac{\partial B}{\partial z} - \varepsilon$$

$$+ K_m \left(\frac{\partial U}{\partial z} \frac{\partial u_s}{\partial z} - \frac{\partial V}{\partial z} \frac{\partial v_s}{\partial z} \right)$$

amplification of mixing length scale:

$$K_m = S_m q l \quad \frac{1}{l} = \frac{1}{l_s} + \frac{1}{l_E} \quad l_s = \kappa \Gamma (|z| + z_0)$$

$$\Gamma = 1 + A_{LC} La^{-2} \quad A_{LC} = 0.49 \text{ (Choi et al., 2022)}$$

Langmuir number (La) indicates the relative importance of wind-driven shear and Stokes drift in generating turbulence

$$La = \sqrt{\frac{u_s}{u_s}} \quad u_s: \text{Stokes drift}$$

LC velocity scale (GB09):

$$u_{*L} = \sqrt[3]{u_s^2 u_s}$$

$$u_s = \frac{\sqrt{\tau_x^2 + \tau_y^2}}{\rho_c} \quad u_s = \frac{2\pi^3 h_w^2}{g T_w^3}$$

The wind stress $\vec{\tau}$ is derived from MSM/GSM output + Kondo (1975)

h_w and T_w are from CWM output provided by JMA

[8]

共同利用研究集会

第 23 回トロイダルプラズマ統合コード研究会

23rd 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/>)。本共同研究集会は、この核燃焼プラズマ統合シミュレーションに関する研究成果を報告するものである。各年度のプロジェクト活動状況および次年度の活動計画を含めて議論している。毎年開催しており、今回で第 23 回目となる。そのうち、第 2 回～第 8 回および第 11 回～第 22 回を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。核燃焼プラズマ統合シミュレーションの包括的なアプローチに関する進展とともに、第 11 回から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研究報告および議論をしている。今回は核融合科学研究所の共同研究集会として毎年実施されてきている「閉じ込め・輸送研究会」と合同開催とすることで、より広く実験研究も含めた核融合プラズマの閉じ込め・輸送にかかわる内容を包含し、規模を拡大して実施した。

2. 開催日時

開催日程：2026 年 1 月 7 日（水）－ 9 日（金）

開催場所：九州大学筑紫キャンパス 総合研究棟 C-cube 1 階 筑紫ホール、応用力学研究所 2 階大会議室 および オンライン

講演数：57 件、参加者数：102 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 3 日間にわたって開催した。今回は「閉じ込め・輸送研究会」との合同開催としたので、例年の倍近い講演 57 件の申し込みが集まった。当初全講演を口頭発表とする予定でいたが、多くの講演希望が集まったことから一部講演はポスター発表としてプログラムを構成した。また、多くの参加者を収容するために九州大学筑紫ホールを現地主会場として、ハイブリッド開催とした。会場の都合で一部、応用力学研究所を主会場とする時間帯も設定せざるを得なかったが、その時もオンライン中継をするサテライト会場を設けることで収容スペースを確保した。例年通り、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。トロイダルプラズマ統合モデリングの進展を俯瞰する特別講演や ITPA(国際トカマク物理活動)セッションを設けたことが

今回の特徴である。

研究成果報告はどれも質の高いものであった。今回はカナダ、韓国、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。特に実験研究も含めたプラズマ物理機構や装置運転に関する手法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17件あり、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。

Choi は高速イオン存在下における ExB 階段構造の安定性理論解析を行った。波動運動論モデルを用いて、階段構造維持に必要な飽和 ExB せん断流の臨界レベルを導出し、KSTAR 実験と比較した。

Froese は General Fusion 社の磁化ターゲット核融合試験装置 LM26 を紹介した。この装置は、固体リチウムライナーに同軸ヘリシティ注入を行い、シータピンチコイルで圧縮することでトロイダルプラズマを生成する。

安斎はベジアンネットワークによりプラズマの内部状態と時間発展を表現し、核融合炉最適運転シナリオ検討シミュレーションにおける経路探索手法を構築した。

矢木は糟谷による本特別講演の趣旨説明に続いて、核燃焼プラズマ統合コード研究会発足の経緯、これまでの取り組み、今後の取り組みに関し、日本国内における原型炉研究開発の現状や ITER rebase line の状況などを踏まえて議論した。

二谷は短時間スケールでプラズマの崩壊と外側への流出を引き起こす MHD 不安定性について、MIPS コードを用いたシミュレーションを行った。

徳永は QST 六ヶ所所で推進している、原型炉研究開発の情報基盤としてのフュージョンインフォマティクスセンター計画について紹介した。スパコン・遠隔実験システム・実験データストレージを融合する取り組みと今後の展望について説明した。

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。

沼波は数値シミュレーションにより得られた乱流の解軌道が特定の部分空間に束縛されるという観測事実に基づき、乱流輸送を記述する縮約空間を構成した。そしてその縮約空間上でダイナミクスが閉じる有効力学系を、最小限の関数表現として記述する可能性について議論した。

佐々木は密度限界近傍にあるプラズマは断熱極限から流体極限への遷移点付近となることが実験で知られているので、Hasegawa-Wakatani モデルに基づく2次元乱流シミュレーションから抵抗性ドリフト波の帯状流相互作用を調査した。帯状流による乱流捕捉の様相が断熱係数に依存して分岐することを見出した。

Chung は球状トカマク用ニューラルネットワークベースの電子熱輸送モデルの検証を行った。時空間的な非局所性とマルチスケール乱流を捉えることができることを確認した。

相羽は統合コード GOTRESS+を改良して炉心-ペデスタル-SOL/ダイバータ領域の統合解析を実現した。JT-60SA 初期研究フェーズの高閉じ込め運転モードについて解析し、不純物入射の影響評価とペデスタル密度分布予測も可能にしたことで、高性能プラズマとダイバータ熱負荷制御の両立ができることを定量的に示した。

成田は H モードプラズマペデスタル領域における圧力と磁場平衡の時間発展を予測する統合シミュレーションの開発状況について説明した。MHD 安定性を考慮しながら輸送方程

式を解くモデルとそのシミュレーション結果を示した。

藤田は発電実証を行う FAST 計画で計画されている装置について、TOTAL コードを用いてプラズマ運転条件を検討し、予定核融合性能を達成できる見通しを得た。

福山は統合コード TASK の最近の進展として、積分形誘電率テンソルを用いた運動論的波動解析、DD 放電プラズマ立上げの輸送シミュレーション、IMAS インターフェースへの対応等について報告した。

Wisitorsasak は不純物効果を考慮したトカマクプラズマのシミュレーションに向け、動的 5 点モデルを拡張し、コア層とスクレイプオフ層 (SOL) を効果的に結合した。放射冷却と中性粒子ダイナミクスを組み込むことで、コア-SOL-ダイバータ領域を結合した複雑な不純物輸送を捉えることができる。

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 を用いて輸送計算を実施した。ITER トカマク装置の核燃焼プラズマに対して不純物イオンの影響を評価し、先行研究と同様、不純物中心蓄積のない結果を得た。また、乱流輸送の評価ルーチンとして TGLF およびその代理モデルを導入することで、より信頼性の高い計算を高速に行う基盤構築を図った。

登田は PLATO 装置における電磁的ジャイロ運動論解析を行った。散逸性捕捉電子モードやイオン温度勾配モード乱流による電子やイオンの熱・粒子拡散係数をモデル化した。

河村は荷電交換水素原子の数値輸送研究を行った。核融合プラズマ中の水素同位体イオンは装置壁で中性化し、分子や原子の形で再度プラズマ中に戻り、解離・電離・荷電交換などの反応が起き、炉心深くにも少数ながら侵入することが実験的に知られている。開発した数値輸送モデルを LHD 装置で検証し、原型炉(JA DEMO)を含めた装置サイズ効果の影響を評価した。

村上は QUEST において観測されている 200keV を超える高速電子発生機構として ECH 高調波の影響を調べた。多重共鳴の効果を含む GNET コードの結果は、実験結果と良い一致を示した。

奴賀はヘリカル型装置のプラズマ電流が非誘導電流成分かそれを妨げる誘導電流成分かを計測で区別できないので、計算によって評価した。コード開発の状況、モデル計算によるベンチマーク、実験への適用例や MSE などの計測結果との比較を説明した。

杉山はイオンのエネルギーが高くなると、弾性散乱の微分断面積は Rutherford 断面積と異なるので、核弾性散乱により生じる非 Maxwell 成分の近似解析解を導出し数値解との比較を行った。得られた式は、核弾性散乱の高温プラズマへの影響の評価やプラズマ診断に簡便に利用できる。

Jung は KSTAR 実験の 3 次元磁場印加による制御に関して、大域的ジャイロ運動論シミュレーションを行った。磁気島生成がより強いせん断流の発生を引き起こし、熱流束が抑制されることが示された。

川村は統合コード TASK にジャイロ流体コードおよびその代理モデルの導入を実施した。トカマク型核融合炉内に侵入した不純物輸送の理解および制御に利用するシミュレーションにおいて、様々な質量や電荷を有する多種イオンの効果を含む乱流輸送モデルの導入が必要であり、その初期段階として主プラズマの輸送について評価した結果を説明した。

田中はトカマク壁面材料として使用されるタングステンの挙動について、統合コード

TOTAL を整備し、タングステン密度分布や輸送特性を定量的に評価した。JT-60U 装置実験の軟 X 線分布の計算値と計測値の比較を行った。

平位は電子サイクロトロン波の最適入射条件を高速に解析する手法の確立を目指し、律速となるフォッカープランク方程式に基づく速度分布解析に代わる代替モデルを作成した。

坂本はトカマクにおける分布平坦化に対する共鳴面位置の影響を調査するために、簡易 MHD コード R6F を用いて、共鳴面と温度勾配の相対位置を変化させた際の複数種不安定性の相互作用について評価した。

安井は核融合原型炉では多変数制御ロジックの構築が必要であるので、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とした制御試験を行った。2 種類の手法の比較を行った。

太田はレンズレスマイクロ波ホログラフィ手法における、マイクロ波受信信号からの対象物画像再構成のための畳み込みニューラルネットワークによる推定モデルを開発した。直線型プラズマ装置 PANTA シミュレーションデータへの適用結果を説明した。

中田は核融合プラズマ中の高速イオン挙動を解明するため、FIDA 計測のシミュレーションデータを用いて、畳み込みニューラルネットワークにより分光データから高速イオンの密度分布を推定するモデルを構築した。

林は GENE を用いたトカマク揺動計算と計測器模擬ルーチンを組み合わせて位相コントラストイメージング計測の模擬を行った。JT-60SA 装置を対象に計測信号における密度揺動スペクトルの見え方を提示した。

以上の講演に加え、閉じ込め・輸送研究会から参加の研究者の講演もあり、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の導入や協力関係の構築を視野に入れながら、来年度も第 24 回研究会を閉じ込め・輸送研究会と合同で開催するべく応用力学研究所共同研究に応募することとした。

4. 研究集会プログラム

・1 月 7 日(水)

12:30 – 12:55 会議登録 Registration

12:55 – 13:00 事務連絡 Business announcement

(閉じ込め・輸送に関する研究会 2025)

「応用力学研究所 2 階 大会議室」にて

(座長：前山)

13:00 – 13:05 はじめに 前山 伸也 (核融合研) Opening remark

13:05 – 13:30 講演 1-1 釧持 尚輝 (核融合研)

非局所輸送におけるメディエータとして作用する乱流の実験的同定

13:30 – 13:55 講演 1-2 伊藤 公孝 (中部大)

輸送ヒステリシスと亜臨界乱流

13:55 – 14:15 講演 1-3 講演取り消し canceled

14:15 – 14:25 休憩 break

(座長：釧持)

14:25 – 14:50 講演 1-4 前山 伸也 (核融合研)

例外点における電子温度勾配不安定性とイオンバーンシュタイン波の結合

14:50 – 15:15 講演 1-5 河内 裕一 (名大)

逆磁場ピンチプラズマにおけるトロイダル帯状流と乱流の時空間ダイナミクス

15:15 – 15:35 講演 1-6 古田原 拓実 (日大)

トカマクプラズマにおける ELM バーストを伴う抵抗性ドリフトバルーニングモード乱流のモード縮約

15:35 – 15:55 筑紫ホールへ移動、休憩 move to Chikushi Hall, break

以降、「総合研究棟 C-cube 1 階 筑紫ホール」にて

(座長：河内)

15:55 – 16:20 講演 1-7 永岡 賢一 (核融合研)

CHD プラズマ実験計画

16:20 – 16:45 講演 1-8 小林 達哉 (核融合研)

磁場閉じ込めプラズマ速度分布関数のベイズ推定

16:45 – 17:10 講演 1-9 米田 亮太 (NTT 研究所)

Decision Transformer を用いたトカマクプラズマ制御と運転安定性の予備的評価

17:10 – 17:20 休憩 break

(座長：小林(達))

17:20 – 17:45 講演 1-10 高部 英明 (阪大)

レーザー核融合統合コードの物理「Physics integrated code for laser fusion」

17:45 – 18:10 講演 1-11 東井 和夫 (核融合研)

EAST トカマクプラズマにおける低域混成波電流駆動(LHCD)電力変調と周辺局在化モードに対する SOL 幅とダイバータストライク線位置の過渡応答

18:10 – 18:35 講演 1-12 渡邊 智彦 (名大)

マルチスケール乱流相互作用と捕捉電子モードへの同位体効果

18:35 – 19:00 講演 1-13 徳沢 季彦 (核融合研) online

クロススケール乱流間相互作用に関する LHD 実験結果報告と CHD での計画

19:00 散会

・1月8日(木)

「総合研究棟 C-cube 1 階 筑紫ホール」にて

(ITPA セッション)

(座長：相羽)

9:00 – 9:05 講演 2-1 吉田 麻衣子 (量研) online

趣旨説明

9:05 – 9:30 講演 2-2 今寺 賢志 (京大)

近年のグローバルジャイロ運動論シミュレーション研究の動向

9:30 – 9:55 講演 2-3 本多 充 (京大)

粒子輸送を考慮した定常輸送コード GOTRESS の機能拡張

9:55 – 10:20 講演 2-4 成田 絵美 (京大)

プラズマ周辺部の乱流揺動解析と輸送モデル開発に関する共同活動

10:20 – 10:30 休憩 break

(座長：本多)

10:30 – 10:55 講演 2-5 相羽 信之 (量研)

ITPA 周辺ペデスタル TG での最近の話題について

10:55 – 11:20 講演 2-6 小林 政弘 (核融合研)

LHD のデタッチメント運転時の閉じ込めプラズマ挙動

11:20 – 11:35 講演 2-7 吉田 麻衣子 (量研) online

ITPA Special issue の作成中にでた輸送研究の重要課題

11:35 – 11:50 休憩 break

11:50 – 13:30 ポスター講演 Poster

(筑紫ホール前ロビー、コアタイム：奇数番号 11:50-12:40 偶数番号 12:40-13:30)

13:30 – 13:45 休憩 break

(閉じ込め・輸送に関する研究会 2025)

(座長：今寺)

13:45 – 14:10 講演 2-8 瀬戸 春樹 (量研)

Turbulence Burst in Resistive-Drift-Ballooning Mode Driven ELM Crash

14:10 – 14:35 講演 2-9 西村 征也 (量研)

平衡フローの駆動するバルーニングモード乱流のバーストダイナミクス

(核燃焼プラズマ統合コード研究会)

(座長：村上)

14:35 – 15:00 講演 3-1 Gyungjin Choi (KAIST)

A theory of fast ion population on ExB staircase stability
15:00 – 15:25 講演 3-2 Aaron Froese (General Fusion)
Modeling and reconstruction of plasma compression in the LM26 device at General Fusion
15:25 – 15:45 講演 3-3 安齋 亮慶 (京大)
Consideration of the operational scenario planning with Bayesian network

15:45 – 15:55 休憩 break

(特別セッション)

(座長：糟谷)
15:55 – 16:05 趣旨説明 糟谷 直宏 (九大)
Introduction
16:05 – 17:05 特別講演 1 矢木 雅敏 (量研)
Past, present and future of Burning Plasma Simulation Initiative (BPSI)

17:05 – 17:25 集合写真 group photo、休憩 break

(核燃焼プラズマ統合コード研究会)

(座長：糟谷)
17:25 – 17:50 講演 3-4 二谷 辰平 (量研)
3D non-linear simulations of MHD instabilities in magnetically confined plasma
17:50 – 18:15 講演 3-5 徳永 晋介 (量研)
Vision and current status of the informatic research center for fusion energy research
18:15 – 18:40 講演 3-6 横山 雅之 (核融合研)
Report of IMEG

18:40 散会

19:20 – 21:20 懇親会 (独楽蔵 JR 大野城駅近)

・1月9日(金)

「総合研究棟 C-cube 1 階 筑紫ホール」にて

(核燃焼プラズマ統合コード研究会)

(座長：成田)
9:00 – 9:25 講演 4-1 沼波 政倫 (核融合研)
Effective dynamics on a reduced space for plasma turbulent transport
9:25 – 9:50 講演 4-2 佐々木 真 (日大)

Bifurcation of turbulence trapping by zonal flows near density limit

9:50 – 10:10 講演 4-3 Huiwon Chung (SNU)
Development of a data-driven neural network model for electron thermal transport in NSTX

10:10 – 10:20 休憩 break

(座長：沼波)

10:20 – 10:45 講演 4-4 相羽 信行 (量研)
H-mode operation scenarios in JT-60SA initial research phase predicted by integrated core-pedestal-SOL/divertor simulation

10:45 – 11:10 講演 4-5 成田 絵美 (京大)
Development of models for time-dependent simulations of the pedestal region

11:10 – 11:35 講演 4-6 藤田 隆明 (名大)
Study on plasma operation conditions in the FAST device with TOTAL code

11:35 – 12:00 講演 4-7 福山 淳 (京大)
Recent progress of integrated code TASK

12:00 – 12:45 昼休み Lunch break

(座長：藤田)

12:45 – 13:10 講演 5-1 Apiwat Wisitsorasak (KMUTT)
Development of core-SOL-divertor model for simulating tokamak plasmas with impurities

13:10 – 13:35 講演 5-2 糟谷 直宏 (九大)
Transport simulation of impurities in nuclear fusion tokamak devices by using integrated code TASK

13:35 – 14:00 講演 5-3 登田 慎一郎 (核融合研)
Modeling of turbulence transport by dissipative trapped electron and ion temperature gradient modes in tokamak plasmas

14:00 – 14:25 講演 5-4 河村 学思 (量研)
Numerical transport study of charge-exchange neutrals in fusion devices

14:25 – 14:35 休憩 break

(座長：河村)

14:35 – 15:00 講演 5-5 村上 定義 (京大)
Simulation study of ECH multiple resonance heating and energetic electron generation in the QUEST spherical tokamak

15:00 – 15:25 講演 5-6 奴賀 秀男 (核融合研) online
NBCD simulation in the LHD

15:25 – 15:50 講演 5-7 杉山 翔太 (量研)
Approximate analytical expression for knock-on tail
15:50 – 16:10 講演 5-8 Min Ki Jung (SNU)
Global gyrokinetic study of KSTAR disruptive plasmas

(Session Leader : 村上)

16:10 – 16:25 議論 Discussion

16:25 – 16:30 事務連絡 Business announcement

16:30 散会

16:30 – 17:00 個別の議論 Discussion

5. 参加者リスト

氏名	所属	氏名	所属	氏名	所属	氏名	所属
河村学思	量研機構	持永祥汰	原子力機構	高瀬治彦	東芝エネルギーシステムズ	森崎友宏	核融合研
山下湧志朗	量研機構	宮本琉耶	ソニーセミコン	龍野智哉	電気通信大	永岡賢一	核融合研
杉山翔太	量研機構	藤澤彰英	九大	伊藤公孝	中部大	江本一磨	核融合研
相羽信行	量研機構	糟谷直宏	九大	坂東隆宏	三菱電機	小西優祐	核融合研
徳永晋介	量研機構	花田和明	九大	岡林秀明	京大	小林政弘	核融合研
二谷辰平	量研機構	荒川弘之	九大	河津智也	京大	小林達哉	核融合研
矢木雅敏	量研機構	山田琢磨	九大	金建希	京大	前山伸也	核融合研
林 伸彦	量研機構	小菅佑輔	九大	金史良	京大	田中謙治	核融合研
横山雅之	核融合研	Chanho Moon	九大	今寺賢志	京大	東井和夫	核融合研
沼波政倫	核融合研	長谷川真	九大	猪塚祐	京大	徳沢季彦	核融合研
渡邊清政	核融合研	LIN HANQING	九大	徳山和映	京大	鈎持尚輝	核融合研
登田慎一郎	核融合研	坂本孝介	九大	宮田良明	科学技術振興機構	糟谷紘一	応用流れ研
奴賀秀男	核融合研	川村祐介	九大	吉田麻衣子	量研機構	米田亮太	NTT研究所
小林将人	核融合研	大本昂良	九大	松岡清吉	量研機構		
Aaron Froese	General Fusion Inc.	杉谷宏子	九大	瀬戸春樹	量研機構		
Gyungjin Choi	KAIST	日永田美子	九大	西村征也	量研機構		
Apawat Wisitsorasak	KMITT	峯和代	九大	大谷芳明	量研機構		
Huiwon Chung	SNU	大澤源人	九大	杉山聖	名大		
Min Ki Jung	SNU	三好裕杜	九大	河内裕一	名大		
滝塚知典	TFuEL	小山一輝	九大	渡邊智彦	名大		
御手洗修	東海大	Donato Matteo	九大	服部健一	ヘリシティX		
藤田隆明	名大	山口貴大	九大	高部英明	阪大		
安井和寿	名大	木下稔基	九大	古田原拓実	日大		
田中晴也	名大	永島芳彦	九大	吉見一慶	東大		
平位元	名大	井戸毅	九大	本山裕一	東大		
福山淳	京大	杉田暁	中部大	奥和田輝	九大		
稲垣滋	京大エネ理工	佐々木真	日大				
安齋亮慶	京大工	太田有哉	兵庫県立大				
成田絵美	京大工	中田洋輝	兵庫県立大				
村上定義	京大工	朝野景	福岡県				
本多充	京大工	古屋篤史	富士通				
		久保田哲行	富士通				

応用力学研究所共同利用研究集会 2025WS-ME-1
「エピタキシーの基礎学理」

Fundamental Principles of Epitaxy

鈴木良尚（徳島大学）

Yoshihisa Suzuki (Tokushima University)

2025年7月8日（火）に、JR博多シティ会議室3（福岡市博多区博多駅中央街1番1号9F）における対面とオンラインとのハイブリッド形式にて、日本結晶成長学会との共催により応用力学研究所共同利用研究集会「エピタキシーの基礎学理」が開催された。

研究集会のテーマは、「エピタキシーの基礎学理」とした。世の中に普及している電子デバイス、光デバイス、パワーデバイスなどの固体素子では一般に異種材料（ヘテロ）接合界面が用いられており、その平坦性、急峻性がデバイス特性、素子寿命に影響を与えることが知られている。これらのデバイス構造の作製・製造は薄膜成長（エピタキシー）技術によって支えられているが、そのプロセス、メカニズム、特にナノスケール現象とメゾスケール現象の相関は十分に理解されていないのが実情である。今回の研究集会では、量子力学の視点および統計熱力学の視点から、ナノスケール現象とメゾスケール現象について議論し理解を深めることを目的とした。ここで得られる知見、共通理解は学術的のみならず工業的にも重要となる。

当日は、最初に日本結晶成長学会の佐崎元会長（北海道大学）から開会の挨拶をいただき、講演が開始された。研究集会では、秋山亨先生（三重大大学）より「III族窒化物半導体エピタキシーに対する量子論的アプローチ：ステップおよびキンクの影響」、佐藤正英先生（金沢大学）より「ステップの蛇行」、阿久津典子先生（九州大学）より「カイネティック・ラフニングの新展開ー原子的スムーズかつ熱力学的ラフなファセット化ラフ面ー」、Magdalena Załuska-Kotur 先生（Institute of Physics, Polish Academy of Sciences, Poland）より「Shaping Crystal Surface: How Energy Landscapes Drive Pattern Formation」の講演をいただいた。各講演に対して、量子力学の視点、統計熱力学の視点から活発な議論がなされ、それぞれの学術基盤を有す研究者（参加者）の相互理解が深まった。



Fig. 会場（JR博多シティ）外観



Fig. 日本結晶成長学会長の挨拶の様子

研究集会「整形外科と応用力学の融合～骨折力学の新展開～」

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、「骨折力学の新展開」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3回目の研究集会であり、2025年7月26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整形外傷学会（旧日本骨折治療学会）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41名であり、そのうち28名が整形外科医、4名が工学系研究者、9名が医療機器メーカーからの参加であった。

11名の講演者のうち、8名が各病院で臨床に従事する整形外科医であり、各医師の専門分野に関連する臨床と深く関係がある問題に対して、CT画像を利用した有限要素法を応用した研究成果に関する内容であった。また3名が工学系研究者であったが、工学系研究者による講演内容も整形外科医との共同研究によるものであり、実際の臨床に根差した研究内容であった。各講演において会場から多くの質問がなされ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、これまでと同様の臨床応用に関する内容に加え、今後の新しい展開について議論する場を設ける予定であり、整形外科バイオメカニクスの分野をリードする研究会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 千葉大学整形外科・松浦佑介

「前腕骨骨幹部骨折治療を考える」

2) 11:00-11:30 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（第2報）
－関節窩・腱板を含めたモデルを用いた解析」

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」

4) 13:10-13:40 帝京大学整形外科・荒川郷彦

「有限要素解析による外側型脛骨高原骨折 Schatzker type 1 と 3 の再現」

5) 13:40-14:10 神戸大学整形外科・田中惇貴

「有限要素解析を用いた内側閉鎖式楔状遠位大腿骨骨切り術における
術中ヒンジ骨折の検討」

6) 14:10-14:40 関門医療センター・坪根 徹

「踵骨脆弱性骨折の発生機序の探求」

7) 14:40-15:10 計算力学研究センター・三又秀行

「大腿骨骨幹部骨折髓内釘挿入術における力学的評価
－抜釘時期と偽関節手術の検討－」

休憩（20分）

8) 15:30-16:00 昭和大学整形外科・谷 聡二

「シンプルなモデルから始める有限要素解析
－椎体骨折からスクリュウ引き抜きまで－」

9) 16:00-16:30 琉球大学整形外科・國吉さくら

「有限要素解析法を用いた骨盤骨折に対する新たな創外固定法の力学的検討」

10) 16:30-17:00 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骨折進展様式の解析」

11) 17:00-17:30 九州大学応用力学研究所・東藤 貢

「全置換型人工股関節と表面置換型人工股関節の比較
－骨リモデリングと骨損傷の観点から－」

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

(1) 実行委員と講演者

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	鷺見宏介	こども医療センター	実行委員
5	原 直樹	計算力学研究センター	実行委員
6	三又秀行	計算力学研究センター	実行委員、講演者
7	佐野博高	仙台市立病院整形外科	講演者
8	松浦佑介	千葉大学整形外科	講演者
9	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	田中惇貴	神戸大学整形外科	講演者
12	荒川郷彦	帝京大学整形外科	講演者
13	谷 聡二	昭和医科大学整形外科	講演者
14	坪根 徹	関門医療センター	講演者
15	安達和彦	中部大学工学部	講演者
16	東藤 貢	九州大学応用力学研究所	世話人、講演者

(2) 一般参加者

整理番号	氏名	所属	備考
1	崔 賢民	横浜市立大学整形外科	一般参加
2	三井英央	横浜南共済病院	一般参加
3	山根裕則	横浜市立大学整形外科	一般参加
4	大屋慶知	福岡大学整形外科	一般参加
5	今井裕太	LandTrading LLC	一般参加
6	村田喬亮	LandTrading LLC	一般参加
7	中牟田侑昌	崇城大学工学部	一般参加
8	荒平高章	九州情報大学	一般参加
9	鈴木 卓	帝京大学救急医学講座	一般参加
10	今村アツシ	名古屋市立大学整形外科	一般参加
11	川岸正周	大分大学整形外科	一般参加
12	片岡佑太	福岡大学整形外科	一般参加
13	崔 賢民	横浜市立大学整形外科	一般参加
14	久我尚之	相生会宮田病院整形外科	一般参加
15	藤森翔大	横浜市立大学整形外科	一般参加
16	杉浦 剛	桜十字八代リハビリテーション病院	一般参加
17	遠藤 大輔	長崎大学大学院医歯薬学総合研究科	一般参加
18	池戸佑太	メイラ株式会社	一般参加
19	大木裕人	ミズホ株式会社	一般参加
20	井田敬大	福西会病院整形外科	一般参加
21	青木良記	聖霊病院	一般参加
22	鍋島貴行	門司メディカルセンター	一般参加
23	山根 崇	和田精密歯研株式会社	一般参加
24	前野純彦	京セラメディカル事業部	一般参加
25	西本 純	京セラメディカル事業部	一般参加

流れの可視化技術のプラズマ乱流トモグラフィへの応用

核融合科学研究所 西村大輝

研究背景

乱流と流れの構造形成ダイナミクスは対象・スケールを問わず広く研究の対象となっており、流れ場の可視化技法の開発が進められてきた。特に流体の画像計測データに対してパターン追跡を行い、流れ場を推定する手法はプラズマ・大気・海洋分野で共通して用いられている。九州大学応用力学研究所で開発が行われているプラズマ乱流トモグラフィ計測に対しても応用が進められており、本課題では以前に提案した手法の高度化を図った。

手法

直線装置 PANTA では乱流トモグラフィ計測が開発されており[1,2], 直径 10 cm のプラズマ断面全体に渡って局所的なプラズマ光とその揺動を計測することに成功している。これまでに、得られた揺動パターンの発展からプラズマの回転速度を推定するための手法として Rotational Movement Analysis(RoMA)が提案されている[3]。RoMA では以下のように、関数展開を用いることによって連続した速度場を推定することが可能である。一方で、画像全体に対して関数をフィッティングするため、詳細な構造は平滑化されてしまう可能性がある。そこで、本課題では RoMA を基に画像の各点で直接局所的な速度場を推定する局所法をテストし、比較を行った。

これらの手法では得られた揺動パターンの空間勾配から Lagrange 微分によって予測される微小時間後の揺動パターンと実際に観測された揺動パターンの残差を最小にする速度場を最小二乗法によって推定する。予測パターンは式(1)によって表される

$$\hat{\varepsilon}(\vec{r}, t + \Delta t) = \varepsilon(\vec{r}, t) - v_r(\vec{r}, t) \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \right) \Delta t - \frac{v_\theta(\vec{r}, t)}{r} \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial \theta} \right) \Delta t. \quad (1)$$

ここで $\vec{r} = (r, \theta)$ であり、 $\varepsilon(\vec{r})$ は発光分布である。残差は空間点もしくは時間点について次のように定義される

$$\chi^2 = \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^M \left(\eta(\vec{r}_k, t_j) + v_r(\vec{r}_k) \frac{\partial \varepsilon(\vec{r}_k, t_j)}{\partial r} \Delta t + \frac{v_\theta(\vec{r}_k)}{r} \frac{\partial \varepsilon(\vec{r}_k, t_j)}{\partial \theta} \Delta t \right)^2. \quad (2)$$

ここで、 $\eta(r, \theta, t) = \varepsilon(r, \theta, t + \Delta t) - \varepsilon(r, \theta, t)$ である。RoMA ではプラズマ断面で速度場が次のように基底関数によって展開されるとして、展開係数の推定を行った

$$\begin{aligned} v_r &= \frac{\partial \Phi}{\partial r}, \\ v_\theta &= \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} + \frac{\partial \psi}{\partial r}. \end{aligned} \quad (3)$$

ここで Φ と ψ は速度ポテンシャル関数と渦流れを記述する関数である。この場合、速度場は $\vec{v} = \nabla \Phi + \nabla \times \vec{A}$ と表される。対象が円筒プラズマであるため、基底には Fourier-Bessel 関数を用いた。局所法では関数展開を用いずに、式(2)を直接速度について時間点のみを最小二乗法のサンプルとして解いた。

結果

PANTA で封入ガス圧 3.0 mTorr, 磁場 1300 G, RF パワー 6 kW の条件で生成された Ar プラズマのトモグラフィデータに対し各手法で速度場を推定した結果について述べる. トモグラフィで得られた揺動パターンのスナップショットの例を図 1 に示している.

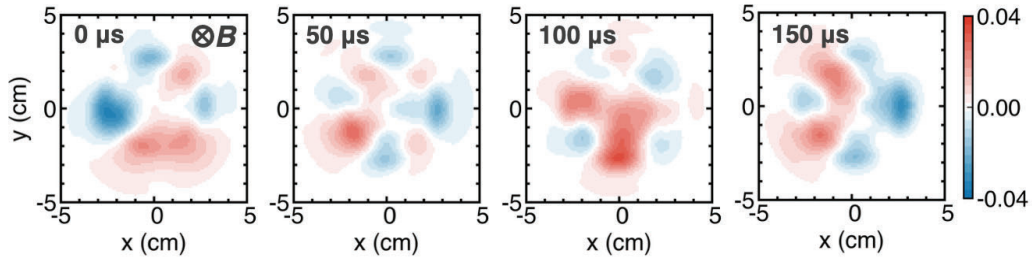


図 1. トモグラフィで得られた揺動パターンのスナップショットの例. 空間方向に補完している.

トモグラフィデータから従来手法(RoMA)と局所法(Local)で推定した, ある空間点における周方向速度の時間発展を図 2 に示す.

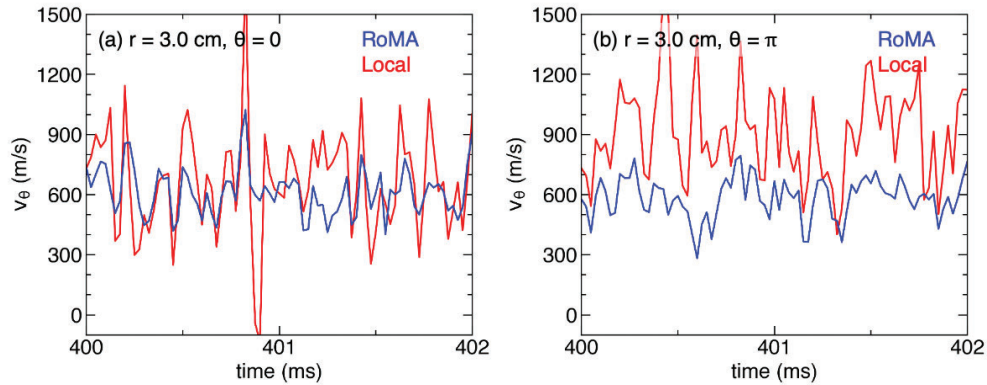


図 2. 各手法で推定された周方向速度の時間発展. (a) $r = 3 \text{ cm}$, $\theta = 0$ での推定速度. (b) $r = 3 \text{ cm}$, $\theta = \pi$ での推定速度. 青は従来手法(RoMA), 赤は局所法(Local)の結果

ここで, 各点の推定には $1 \mu\text{s}$ 間隔の連続した 50 枚の画像を用いた. さらに RoMA の場合は画像上 90 点の空間点を用いており, 基底関数の数は AIC を基に決定した[3]. それぞれの推定結果に差異が見られ, 局所的に解いた場合にゆらぎが大きい. これは関数展開による平滑化の有無が反映されていると考えられる. 図 3 には推定された速度の周波数スペクトルを示している. $\theta = \pi$ の場合には両手法とも $f = 1.6 \text{ kHz}$ にコヒーレントなピークが見られるが, $\theta = 0$ では RoMA の場合に同ピークが不明瞭である. また, 速度揺動の絶対値評価には推定誤差の定量化が必要である. 図 4 には時間平均した周方向速度の空間分布を示している. 両者ともに空間非対称性がみられており, 局所的に解いた場合はより詳細な構造を示している.

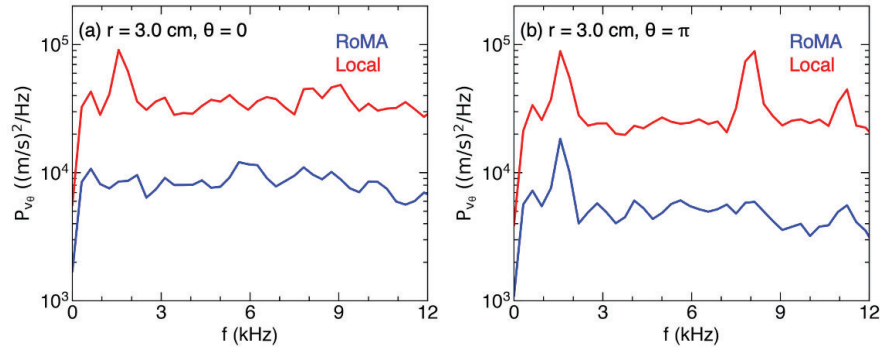


図 3. 各手法で推定された周方向速度の周波数スペクトル. (a) $r = 3 \text{ cm}$, $\theta = 0$ での推定速度. (b) $r = 3 \text{ cm}$, $\theta = \pi$ での推定速度. 青は従来手法(RoMA), 赤は局所法(Local)の結果

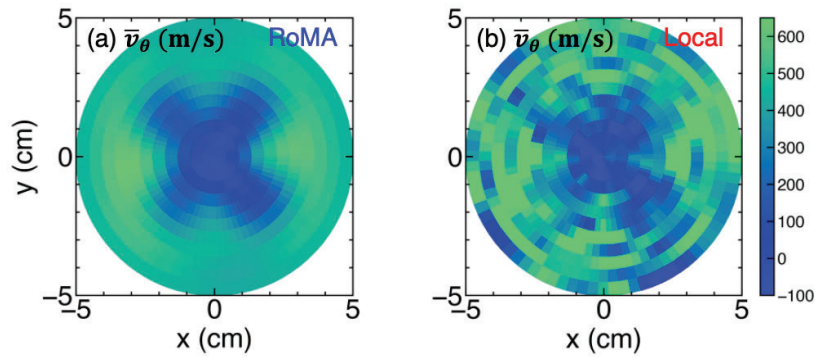


図 4. 時間平均した推定周方向速度の空間分布. (a) RoMA の結果, (b)局所法の結果.

議論とまとめ

乱流トモグラフィで得られた揺動画像からプラズマの回転速度を求める手法 RoMA に対して関数展開を用いず、局所位置で時間点のみをサンプルとして最小二乗法を解く改良を検討した. 実際の PANTA で得られたトモグラフィデータに応用し、従来手法よりも詳細な速度の構造を推定できる可能性が示唆された. 推定された値の検証はこれからの課題であり、検証方法としてプローブ計測との比較や、人工データやシミュレーションデータの利用が考えられる. RoMA の場合でも基底関数を増やすことにより詳細な構造は得られる可能性があるため、比較が必要である. 局所法は基底関数を用いないため、直交性が問題になる楕円度や三角度を持つトカマクプラズマへの応用も可能である. 本課題にて応用力学研究所で実験が行われている PLATO トカマクに乱流トモグラフィの敷設を行った. 現在 $\text{H}\alpha$ 光の計測に成功し、初期結果が得られている. 今後本手法の応用を進めていく.

- [1] A. Fujisawa *et al.*, Plasma Phys. Control Fusion **58**, 025005 (2016)
- [2] K. Yamasaki *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **11**, 1-9 (2021)
- [3] D. Nishimura *et al.*, Plasma Fusion. Res. **19**, 1201005 (2024)

成果

D. Nishimura, *et al.*, “Rotational movement analysis for cylindrical plasma images obtained with tomography”
9th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics, 21-26 Sep, 2025, Fukuoka (招待講演)

国際化推進共同研究概要

〔採択番号〕 2024EC-EA-1

タイトル： Long-term Statistics of Snowfall Microphysical Features for
EarthCARE validation activities

研究代表者： BRACCI Alessandro

所内世話人： SATO Kaori

研究概要：九州大学応用力学研究所は、2024年5月に打ち上げが成功した、日欧共同の地球観測衛星EarthCAREのJAXA標準・研究プロダクトの開発を担っている。本研究は、地上観測が困難な南極大陸において、マイクロレインレーダとディストロメータを複合利用した衛星検証手法の確立と、JAXA雲・降水プロダクトの検証を目的としている。衛星搭載雲レーダでは、地表面クラッタ等の影響により地表面付近(レーダ・ブラインドゾーン)の観測が困難なため、地表面降水量や積雪相当水量の推定に不確定性が存在する。開発した手法を用い、レーダ・ブラインドゾーンの情報を含んだ雲レーダ観測量プロファイルや降水特性、大気鉛直速度の長期データセットを構築し、JAXA雲・降水プロダクトの検証を実施した。今後はさらに本研究を発展させ、EarthCARE衛星による地上降水量推定精度の向上に寄与する。

Long-term Statistics of Snowfall Microphysical Features for EarthCARE validation activities

Dr. Alessandro Bracci

National Research Council of Italy, Institute of Atmospheric Sciences and Climate

Rome, Italy

Summary

This research activity is rooted in long-term work conducted in the Antarctic environment, where the combination of scientific relevance and severe logistical constraints makes high-quality precipitation observations both essential and difficult to obtain. The JAXA/ESA EarthCARE mission offers a unique opportunity to advance the understanding of cloud and precipitation vertical structure, including ice and mixed-phase precipitation, thanks to its highly sensitive 94-GHz Cloud Profiling Radar (CPR) with Doppler capability and a synergistic multi-sensor payload. In this context, the validation of satellite retrievals is a key prerequisite for ensuring the reliability of EarthCARE products over remote regions such as Antarctica.

Retrieving snowfall properties from remote sensing remains challenging because snow microphysics varies widely and the relationships linking particle properties to electromagnetic observables are uncertain. Nevertheless, remote sensing is indispensable in Antarctica, where routine in situ precipitation measurements are sparse and expensive to maintain. Satellite observations therefore represent the primary source of continent-wide precipitation information, reinforcing the need for validation strategies based on robust, affordable, and widely deployable ground-based instrumentation. Satellite-borne radars provide high-resolution vertical profiles of clouds and precipitation: CloudSat pioneered 94-GHz W-band profiling, and EarthCARE, launched in May 2024, extends these observations with a more sensitive Doppler CPR.

Within this framework, our different joint research programmes have investigated how two instruments commonly available at Antarctic stations, the 24-GHz Micro Rain Radar (MRR) and a optical laser disdrometer, can be combined to support the validation of satellite W-band radar observations, including Doppler products. In the first joint research programme (2022, led by Dr Baldini), we developed the K2W methodology, which uses ground-based measurements to simulate 94-GHz reflectivity and Doppler profiles. The initial evaluation showed that K2W can reproduce CloudSat-equivalent reflectivity with a mean difference of ~ 0.2 dB at the lowest CPR range bin (within ± 12.5 min and 25 km of the overpass). K2W also provides W-band Doppler velocity profiles below 1 km with a typical uncertainty below ~ 0.2 m s⁻¹, supporting its use to assess EarthCARE CPR Doppler performance and related Level-2 precipitation products in polar conditions. The methodology was refined through conference presentations and published in *Remote Sensing of Environment* in 2023.

To further test the robustness and transferability of K2W, the second joint research programme (2023, led by Dr Baldini) extended the approach beyond Antarctica by applying it to additional climatic contexts, including the Arctic. A key case study is Ny-Alesund, where a ground-based 94-GHz radar operates alongside complementary instrumentation. The application of K2W to a snowfall dataset from Ny-Alesund is being documented through a summary manuscript and was also presented as a poster at the EGU General Assembly 2024.

Building on the outcomes of the previous developments, this Early Career Joint Research project strengthens EarthCARE validation by adopting a long-term statistical perspective, which is essential to

overcome the intrinsic limitations of satellite/ground coincidence in space and time. The activity focuses on the Italian Antarctic Station “Mario Zucchelli” (MZS) and aims at producing multi-year statistics of snowfall microphysical properties and vertical radar observables (reflectivity and Doppler velocity). The main objective is to characterize how precipitation signatures evolve in the lowermost atmospheric layers, where spaceborne radars are impacted by near-surface blind zones (ground clutter and attenuation), and to quantify the role of near-surface sublimation (virga) in controlling how much snowfall effectively reaches the surface. These reference statistics provide a physically consistent basis for meaningful comparisons between EarthCARE products and ground-based observations, directly supporting validation activities in polar environments (pp. 3-8).

In parallel, the project addressed three methodological aspects that are critical for the validation of EarthCARE CPR products at MZS (pp. 9–15). First, we investigated the choice of data-selection windows and relative time shifts, identifying temporal and spatial averaging strategies that maximise representativeness between spaceborne and ground-based observations and quantifying the sensitivity of validation metrics to window size and offsets. Second, we implemented and tested an optimisation of the K2W algorithm to improve numerical stability and reduce sensitivity to small perturbations in the input configuration. Third, we developed an approach for air vertical motion estimation by decomposing Doppler velocity into reflectivity-weighted particle terminal fall speed and vertical air motion using the MRR–Parsivel synergy, consistently with the decomposition provided by selected EarthCARE products.

I - Long-term Statistics in support of the EarthCARE validation activities

Rationale

Here we analyse multi-year measurements collected with a vertically pointing Micro Rain Radar (MRR) at Mario Zucchelli Station (MZS), Antarctica, with the specific aim of assessing how near-surface processes may affect satellite retrievals of surface snowfall. The available dataset covers the 2020–2024 period; however, a major power outage in 2022 produced extended gaps and potential seasonal imbalance. For this reason, year 2022 is excluded, and the analysis is performed on four austral years (2020–2021 and 2023–2024), ensuring a more consistent sampling across seasons. Austral summer (DJF) is the best-sampled season, consistent with the period of peak station occupancy and easier maintenance conditions, which improve data continuity.

Methods

MRR profiles are obtained by averaging the native 1-minute observations to 5-minute resolution to reduce high-frequency variability while preserving the evolution of snowfall events.

Surface snow-rate (SR) estimates are derived by applying four different Ze–SR relationships to the reflectivity measured at the lowest usable range gate. The four parameterisations are intentionally selected to span a broad range of plausible Antarctic snowfall conditions and to explore the uncertainty envelope in SR retrievals. In particular, the chosen relationships sample:

- (i) different Antarctic coastal sites (MZS and Dumont d’Urville);
- (ii) different MRR vertical sampling set-ups (e.g., different vertical resolutions and lowest usable range gates such as 100 m/300 m and 35 m/105 m);
- (iii) different assumptions on particle habit and degree of aggregation, representative of pristine versus aggregated snow.

Virga events are defined as cases with valid hydrometeor signatures aloft in the vertical column, but with no detectable signal at the lowest considered range gate (105 m), consistent with precipitation sublimating before reaching the surface. To classify an event as surface precipitation, the signal must be present at the lowest usable gate and in the two adjacent gates above it (a vertical-continuity requirement), to reduce contamination by ground clutter or sporadic noise. Cases where a signal appears only at the lowest gate, without vertical continuity, are treated as ground noise and excluded from precipitation statistics. Conversely, situations limited to the lowest gate are separately tracked as “lowest-level virga” and included in the overall virga counts.

Results

Occurrence of sublimation

The median, mean, and the 5th–95th percentile envelope of the 5-min aggregated MRR profiles provide useful insight into microphysical processes occurring in the lowermost cloud layers (Figure 1). The pronounced decrease in Ze occurrence from about 1000 m down to 100 m a.g.l. is a clear signature of sublimation, likely favoured by drier near-surface conditions associated with katabatic flows, which prevent a substantial fraction of snowfall from reaching the ground. In contrast, the increase toward the surface in mean fall velocity and Doppler spectral width may indicate particle growth and/or riming in the presence of supercooled droplets. Over the analysed period, the MRR detected a hydrometeor signal 12%

of the time, while precipitation reaching the lowest usable range gate occurred 7% of the time. Virga events exhibit a larger interannual variability, ranging from 3.5% to 5.7% (Table 1).

Seasonality and annual trends

Seasonal composites of Ze profiles (Figure 2) show a marked difference at the lowest range gate, with mean Ze values in austral autumn and winter (MAM and JJA) about 4 dBZ higher than in austral summer (DJF). Interestingly, the median spring profile (SON) resembles the winter profile around 1000 m, but approaches the summer profile close to the surface, suggesting a season-dependent modulation of near-surface processes. Austral summer is also characterised by slightly faster fall speeds ($\approx +0.1 \text{ m s}^{-1}$) and larger Doppler spectrum widths ($\approx +0.05 \text{ m s}^{-1}$), consistent with warmer and moister conditions. Clear monotonic annual trends are not expected over a four-year window; however, the Doppler-velocity distributions show an apparent grouping, with 2020–2021 exhibiting fall velocities about 0.25 m s^{-1} higher than 2023–2024 across most of the vertical column.

Effects of evaluating the virga phenomenon at different levels

How does virga identification change when the height of the lowest usable range gate is increased? Table 2 compares virga statistics obtained using the 105 m gate with those derived using higher “virtual” lowest gates: 140 m, 315 m (representative of the lowest bin in the 100-m configuration commonly used in Antarctica), and 490 m, which is close to the lower boundary of the EarthCARE CPR blind zone. Figure 3 shows the corresponding continuous behaviour from 105 to 560 m. The occurrence of virga increases by more than 7% when moving from 490 m down to 105 m a.g.l., with roughly half of this increase concentrated in the final step near the surface (as also highlighted by the red curve). Ground-noise cases, as defined above, remain consistently below 3%.

Estimates of accumulated Snow Water Equivalent

Snow Water Equivalent (SWE, mm) is computed at 5-min resolution using reflectivity at the lowest selected MRR range gate. The different Ze–SR relationships yield a wide spread in SWE estimates (Figure 4). The relationships derived using our instrumentation (Aggregates and Pristine) provide the lowest SWE estimates, followed closely by that calculated at DDU (particularly in 2023), while ERA5 reanalysis produces even higher totals. Focusing on 2023, the year with the most continuous data coverage, the SWE excess associated with using a higher lowest range gate is about 25 mm, which exceeds the typical confidence interval (8–9 mm).

Conclusions

The four-year MRR data collected at MZS provides clear evidence that near-surface sublimation is a key process in coastal Antarctica and has direct implications for spaceborne radar validation. Overall, the ground-based MRR detects a hydrometeor signal in ~12% of all 5-min samples, but only ~7% show precipitation reaching the lowest reliable radar bin (105 m a.g.l.). Virga accounts for ~4.8% of all samples, corresponding to roughly ~40% of the radar-detected columns.

These statistics are especially relevant for EarthCARE CPR validation, because the CPR cannot reliably observe the lowermost few hundred metres due to the near-surface blind zone. When the lowest considered range gate is raised from 105 m to 490 m a.g.l. (a height representative of the lowest EarthCARE-reliable range bin), the inferred virga fraction decreases by more than 7 percentage points. This indicates that a substantial portion of sublimation occurring between 500 m and 100 m is likely missed by satellite radars, potentially biasing the interpretation of precipitation that arrives at the surface when relying on radar profiles alone.

The impact is not only qualitative but also propagates into surface accumulation estimates. For 2023, shifting the lowest gate from 105 m to 490 m increases annual SWE by 20–40 mm, an effect larger than the uncertainty associated with the Ze–SR parameterisation confidence intervals (largely driven by ice microphysics assumptions). Consequently, near-surface sublimation introduces a measurable, process-based uncertainty term that should be explicitly accounted for when validating EarthCARE snowfall products over MZS, and more broadly over Antarctica.

These findings motivate the development of a transfer (or correction) function to link radar observables measured aloft (i.e., at the lowest satellite-reliable bin) to surface-reaching snowfall, using the high-vertical-resolution perspective provided by ground-based profilers. Such a transfer is expected to be season-dependent and likely site-dependent, and it can be supported by the growing availability of MRR systems across Antarctic stations. Integrating these long-term statistics with the K2W framework will strengthen EarthCARE validation by enabling consistent comparisons between satellite CPR products and ground-based observations, particularly in the critical near-surface layer where satellites are intrinsically blind.

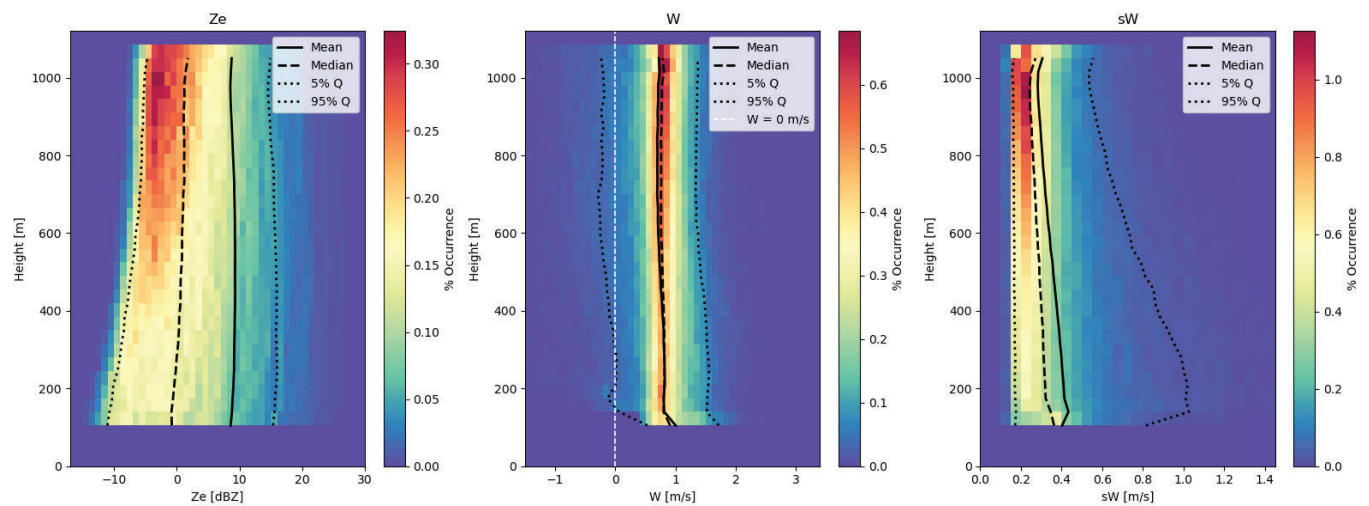


Figure 1: Overall distribution of the vertical profiles of equivalent reflectivity (Ze), Doppler vertical velocity (W) and Doppler spectral width (sW)

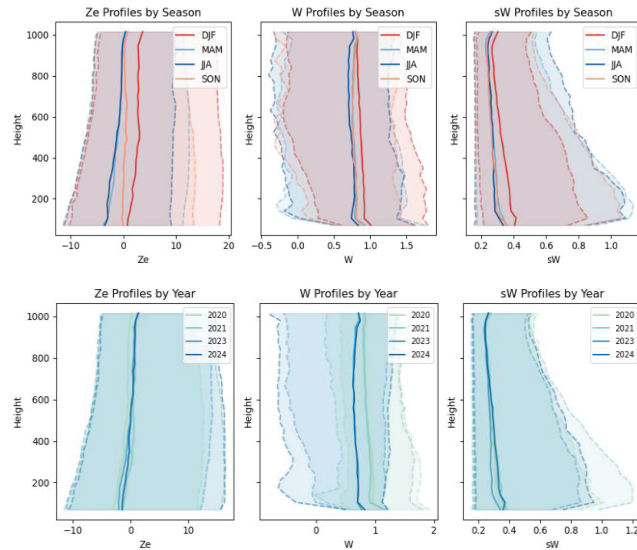


Figure 2: Median and 5-95% profiles of Ze, W and sW divided by season (top row) and year (bottom row).

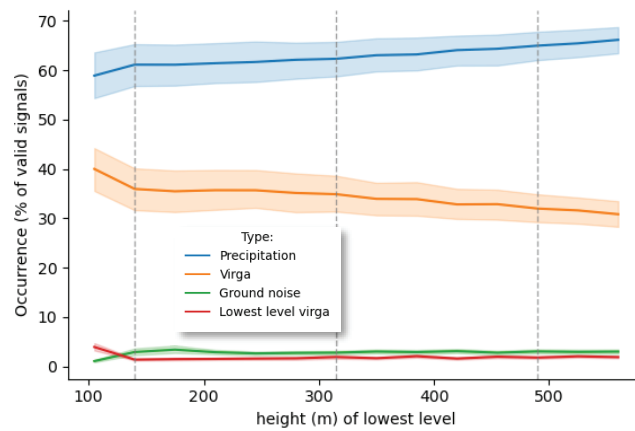


Figure 3: Variation of relative occurrences of virga and precipitation events depending on the height of the lowest range gate considered.

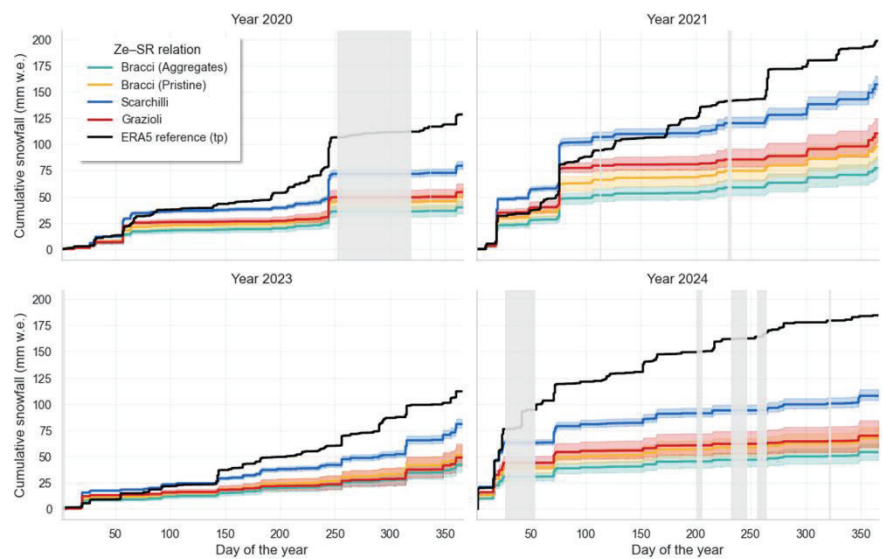


Figure 4: Snow water equivalent (SWE) accumulation for 2020, 2021, 2023 and 2024 at MZS.

Table 1: Occurrences of precipitation and virga at MZS, from MRR data aggregated at 5 minutes.

Year	Valid data counts	5 min-samples with precip.	Precip. (%)	5 min-samples with virga	Virga (%)
2020	85136	6166	7.24	4062	4.77
2021	100991	7597	7.52	5799	5.74
2023	103680	7064	6.81	3634	3.50
2024	86273	5772	6.69	4542	5.26
Overall	376080	26599	7.07	18037	4.80

Table 2: Occurrences of precipitation and virga considering different heights as lowest range gates.

Height (m)	Precip Count	Precip %	Precip change from est. at 490m	Virga Count	Virga %	Virga change from est. at 490m	Noise Count	Noise %
105	26599	58.9	-5.87 (%)	18037	39.94	+7.68 (%)	524	1.16
140	27519	60.94	-3.83 (%)	16334	36.17	+3.91 (%)	1307	2.89
315	27976	61.95	-2.82 (%)	15923	35.26	+3.00 (%)	1261	2.79
490	29252	64.77	0 (%)	14568	32.26	0 (%)	1340	2.97

Table 3: Total SWE accumulation (mm) for year 2023, calculated at different height levels of the MRR profile and with different Ze-SR relationships. Estimates inside round brackets come from the confidence intervals of the relations parameters. Percentages inside square brackets are the gain in snow amount with respect to the estimate performed at 105 m.

Ze-SR relation	105 m	315 m	490 m
Bracci 2022 (Aggregates)	41.84 (35.03, 49.02)	52.69 (44.50, 61.30) [+26 %]	59.37 (50.50, 68.69) [+42 %]
Bracci 2022 (Pristine)	51.12 (43.06, 60.22)	64.87 (55.04, 75.84) [+27 %]	73.55 (62.77, 85.45) [+44 %]
Grazioli 2017	48.88 (40.72, 62.14)	64.37 (54.75, 79.72) [+32 %]	75.41 (65.72, 91.21) [+54 %]
Scarchilli 2020	80.87 (77.29, 86.06)	102.99 (98.66, 109.34) [+27 %]	117.09 (112.40, 124.07) [+45 %]
ERA5 (tp)	112.07 (estimated at the ground)		

II - EarthCARE validation activities

Motivations

1. What temporal and spatial averaging scales provide the most representative comparison between spaceborne and ground-based observations of the same phenomena? How sensitive are the validation results to the averaging-window length and to relative time/space offsets?
2. Is the K2W methodology numerically stable and conceptually robust at its current stage of development, across a broad range of snowfall conditions?
3. Can the MZS experimental setup support a separation of the measured Doppler velocity into (i) the reflectivity-weighted particle terminal fall speed and (ii) the vertical air motion, consistent with the decomposition provided by some EarthCARE products?

Methodologies and Results

1) Data-selection windows and relative time shifts

EarthCARE travels at approx. 7.68 km s^{-1} and, for the analysed sample, its ground track reaches a minimum distance of 6–20 km from MZS. CPR vertical profiles are integrated every 1 km of horizontal ground track, while the MRR is a vertically pointing, non-scanning ground instrument with 1-min temporal resolution.

A meaningful comparison between satellite and ground-based profiles therefore requires harmonising spatial and temporal scales, while accounting for (i) the characteristic time/space scales of snowfall variability, (ii) advection, and (iii) the fact that the instruments effectively sample different parts of the column (CPR 20.000 to 500m vs MRR 1050 to 105m).

To address this representativeness problem, we defined four adjustable parameters: two integration-window widths and two relative time shifts among the three observing systems. The degrees of freedom are:

- `cpr_scale`: integration length along the satellite track (expressed in seconds of flight time or equivalently in km);
- `mzs_scale`: temporal averaging window at the station (minutes), applied consistently to the two ground instruments;
- `dm`: time delay between CPR and MRR (CPR → MRR);
- `dp`: time delay between MRR and Parsivel (MRR → Parsivel).

The windows of integration develop along the satellite track for the CPR products (its width expressed either in decimal seconds of flight time or in km on the ground), and along the time elapsed at the ground station (in minutes) for the two ground instruments.

Spatial scales along the track are connected to the temporal scales at the ground by the meteorological conditions and advection motions, and by the temporal scales of the microphysical processes involved in precipitation. Since the precipitation physically starts falling inside the EarthCARE observation window,

then reaches the MRR window and only later arrives at the Parsivel measurement point, delays are built in a consecutive way. All the windows (before applying the delays) are centred symmetrically around the time of the closest overpass distance. Distances are calculated as geodetics over the terrestrial geoid. Temporal windows at the ground are kept of the same total width between each other.

The four variables were initially set up to best-guess values in accordance to the a-priori considerations reported above:

	<i>cpr_scale</i>	<i>mzs_scale</i>	<i>dm</i>	<i>dp</i>
<i>First guess</i>	3.91 s (30 km)	40 min	10 min	10 min
<i>Optimal</i>	5.21 s (40 km)	60 min	5 min	10 min

Given the high number of total permutations, they are examined two at a time, letting the other two to the default values guessed from a-priori considerations.

Contour-based sensitivity maps (Figures 1 and 2) summarise the scores derived from scatterplots built using the overlapping CPR and MRR profiles from the three analysed cases, with results aggregated as the mean across a set of EarthCARE CPR Level-2 products (CCLPjBB, CFMReAB, CCLDeBB, ACAPeBB). By construction, this aggregation is not intended to isolate the role of specific meteorological conditions (e.g., wind direction, exact overpass geometry, or local advection). Instead, the goal is to identify robust representativeness scales for EarthCARE–ground comparisons, avoiding case-by-case tuning and condition-dependent optimisation.

Each map explores the sensitivity of the comparison metrics (e.g., correlation, RMSE, bias, and number of matches) to the chosen averaging/selection parameters. Markers highlight the main configurations tested: the a-priori best-guess setting, the best-performing point for each individual map/metric, intermediate trial configurations explored during iterations, and the final selected compromise configuration, which is the set adopted for subsequent analyses and is reported in the table above.

Overall, the sensitivity patterns indicate that increasing the ground delay relative to EarthCARE tends to reduce RMSE, but often at the expense of introducing a more negative bias. Additional promising solutions appear for either smaller Parsivel delays or smaller MRR delays, but not simultaneously, and these solutions are generally less stable across products and cases. For this reason, the final choice prioritises robustness and consistency over maximum performance in a single metric, providing a practical configuration for EarthCARE validation activities at MZS.

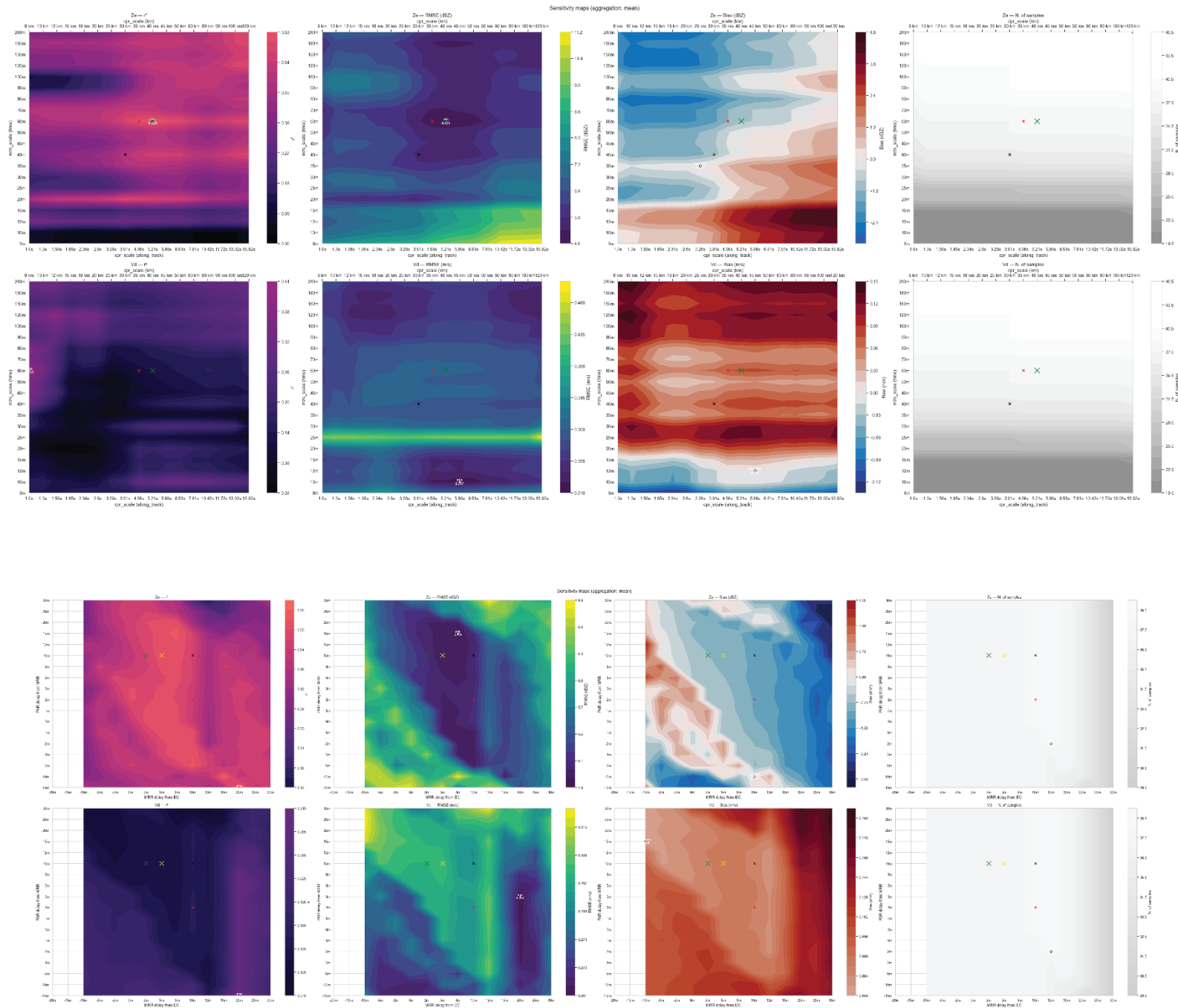


Figure 1-2: Contour maps from the sensitivity analysis of the EarthCARE–MZS co-location strategy. The panels show how the CPR–MRR comparison scores vary with the selected averaging windows and relative time shifts, aggregated over the analysed cases and averaged across CPR Level-2 products. Markers indicate the first-guess setting, best-performing points, and the final selected configuration.

2) Optimization of the K2W Algorithm

The original implementation of K2W presented in Bracci et al. (2023) was found to be highly sensitive to (i) the power-law fit of the mean $V(D)$ relationship derived from the disdrometer and (ii) small shifts along the Doppler-velocity axis used in the conversion factor (i.e., the x -axis shift in the right-column diagnostic plots). As a consequence, minor changes in data-selection settings (e.g., averaging windows or relative delays) could lead to disproportionately large variations in the reconstructed W-band profiles. To improve numerical stability and reduce sensitivity to small perturbations, several mitigation strategies were implemented.

First, the power-law fit of the weighted-mean $V(D)$ relation was performed using a Trust Region Reflective (TRF) optimisation (SciPy, Python), adopting data-driven adaptive initial guesses and constraining the parameters within physically realistic bounds. TRF is generally robust; however, a fallback to the “dogbox” algorithm was also implemented. If neither optimiser converges or if the available points are insufficient for a reliable fit, a second fallback assigns the power-law parameters (a , b) from the literature, allowing the K-to-W conversion to be performed also when precipitation does not reach the surface (virga). Additionally, disdrometer points associated with unrealistically high snow fall speeds (above 5 m s^{-1}) are excluded as outliers.

Second, because K2W is defined only for positive (downward) fall velocities (consistent with the imposed $V(D)$ power-law constraint), the Doppler spectral reflectivity η was previously cropped on the negative-velocity side, which can introduce inconsistencies in the reconstructed W-band profiles, particularly for Doppler velocity and, to a lesser extent, reflectivity. While a more physically consistent correction would require removing the vertical-air-motion contribution from η (so that negative velocities are no longer present in the hydrometeor reference frame), a provisional mitigation was adopted: the K-band spectrum is filtered to retain only the positive (downward) velocity component before applying the K2W conversion. This ensures spectral consistency between input and output and prevents artefacts driven by asymmetric cropping.

Finally, because low-reflectivity conditions are characterised by reduced SNR and increased uncertainty in locating the Doppler-spectrum peak, a reflectivity threshold of -11 dBZ is applied when estimating V_{air} (see Section 3), to reduce noise-driven biases in the decomposition.

As illustrated in Figure 1, the disdrometer-derived PSD and the fitted $V(D)$ relationship directly control the shape of the K2W conversion factor. In particular, the diagnostic plots highlight how the conversion factor exhibits a very sharp dependence on Doppler velocity, and how applying a smooth spectral mask helps regularise the transformation and reduce sensitivity to small shifts along the velocity axis.

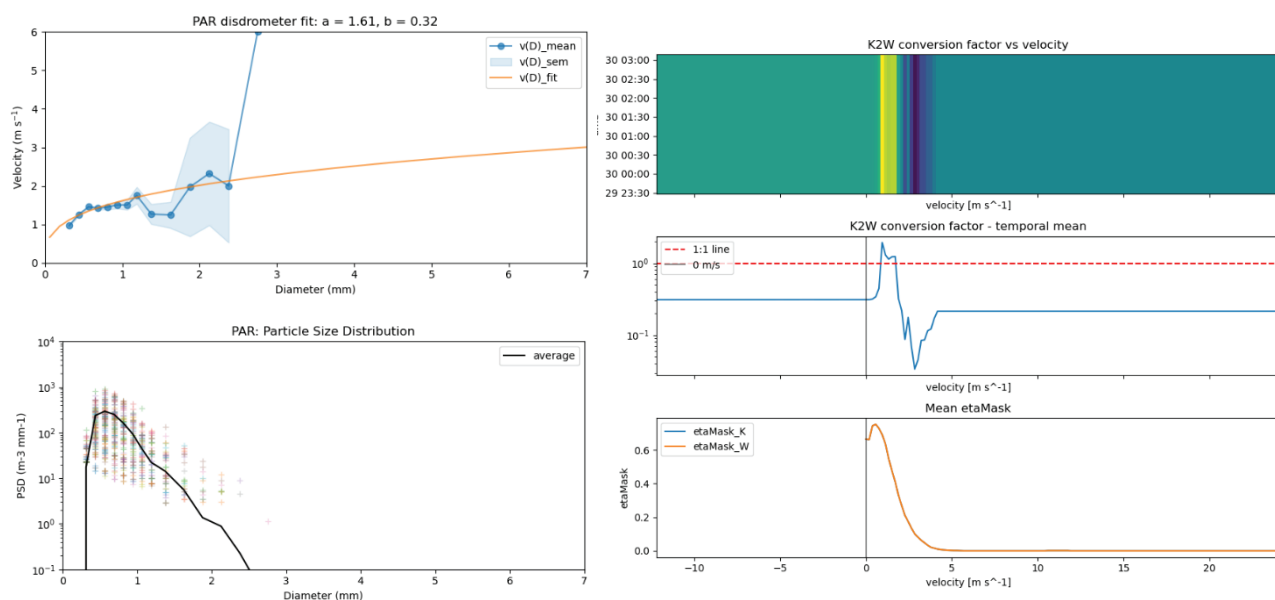


Figure 1. Example of intermediate variables used in the K2W processing for an EarthCARE overpass. Left panels: Parsivel particle size distribution (PSD) with the time-aggregated mean (top) and the corresponding fitted $V(D)$ power law using the disdrometer-derived mean fall speeds (bottom; shaded area indicates the uncertainty on the mean). Right panels (top to bottom): K2W conversion factor as a function of Doppler velocity over the analyzed time window (here constant by construction for the scene), its temporal mean (logarithmic scale), highlighting the sharp dependence on velocity, and the smooth spectral mask following Maahn and Kollias (2012) applied to the Doppler spectrum.

3) Air Vertical Motion Estimation

Following the decomposition adopted in the JAXA Level-2 ATBD, the measured Doppler velocity can be expressed as:

$$V_d = V_{tz} + V_{air} \quad (1)$$

We applied this decomposition to the MRR observations following Adirosi et al. (2016), exploiting the co-located Parsivel laser disdrometer as an independent constraint on particle terminal fall speed.

The method relies on the following assumptions:

1. **Zero vertical air motion at the surface**

At ground level (0 m a.g.l.) the vertical air velocity is assumed to be zero, consistent with mass continuity (no flow penetrates the ground).

2. **Parsivel provides a proxy for terminal fall speed**

The Parsivel installation height is assumed negligible, so that Parsivel-derived fall speeds can be interpreted as terminal velocities of individual particles. Their weighted mean is taken as a proxy for the reflectivity-weighted terminal fall speed of the population, denoted $V_{tz}(\text{PAR})$.

3. **Vertically uniform air motion in the MRR layer**

The vertical air velocity V_{air} between 100 m and 1000 m a.g.l. may differ from zero but is assumed constant with height within this layer. Under this assumption, vertical variations in V_d measured by the MRR are attributed to changes in V_{tz} (microphysics) rather than to variations in V_{air} .

4. **Near-surface Doppler–terminal mismatch is driven by air motion**

The difference between the MRR Doppler velocity at the lowest reliable bin (105 m) and $V_{tz}(\text{PAR})$ is assumed to be caused primarily by vertical air motion at that level, rather than by microphysical changes, scattering-model limitations, or sampling of different air parcels due to advection.

Within this framework, the vertical air motion is estimated as:

$$V_{air}^{est} = V_d(\text{MRR}, 105 \text{ m}) - V_{tz}(\text{PAR}) \quad (2)$$

A height-dependent estimate of the terminal fall speed from the MRR is then obtained by removing the estimated air motion from the Doppler velocity profile:

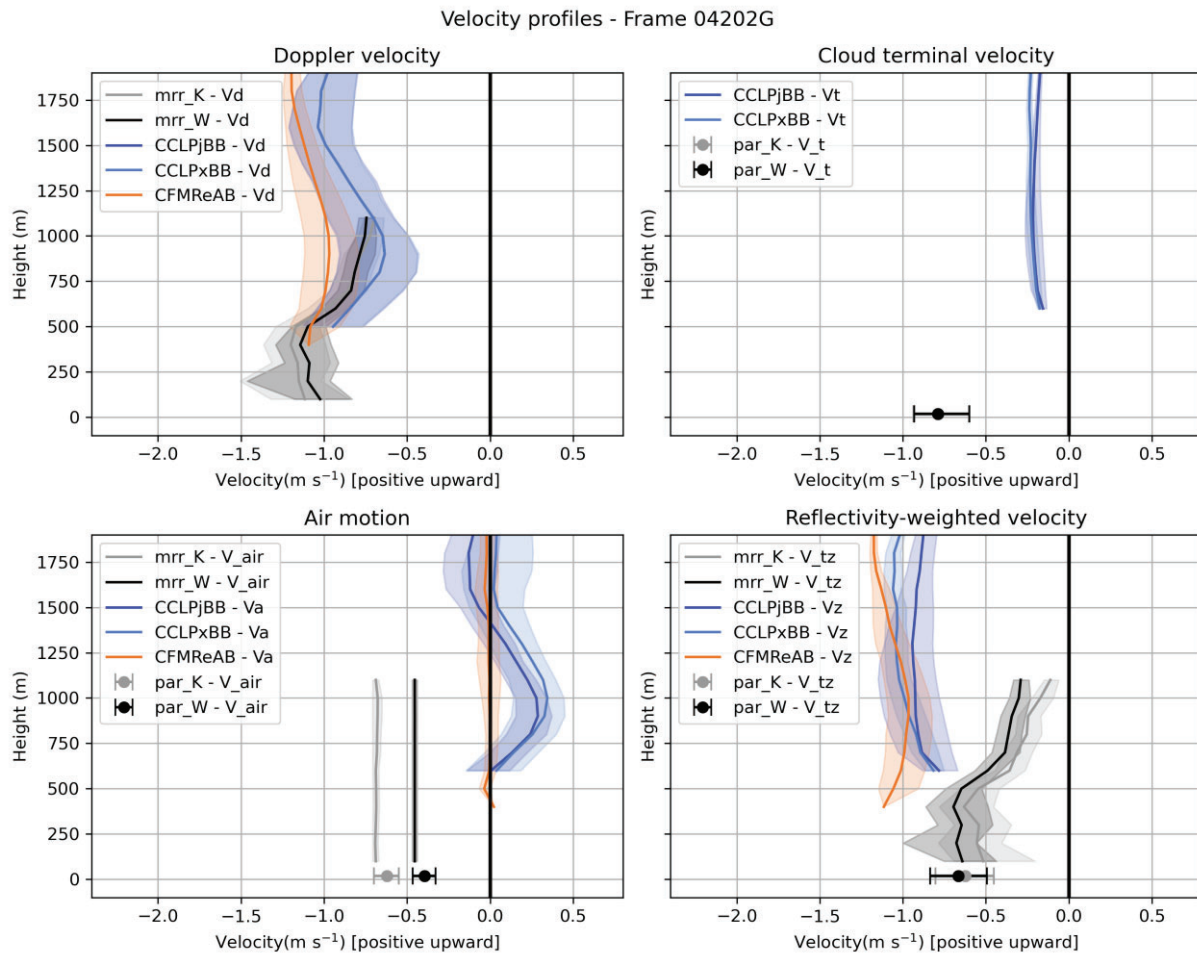
$$V_{tz}^{est}(\text{MRR}, z) = V_d(\text{MRR}, z) - V_{air}^{est} \quad (3)$$

By definition, V_{tz} should not be negative (upward). However, Eq. (3) can yield negative values when $V_{air}^{est} > V_d(\text{MRR}, z)$ at some heights. In those cases, V_{tz}^{est} is flagged as invalid and set to NaN.

The derived quantities can be compared directly with EarthCARE Level-2 outputs:

- V_{tz}^{est} can be compared with sedimentation velocity (ESA products) and with the JAXA terminal-velocity proxy obtained as difference between Doppler velocity and cloud_air_velocity_1km;
- V_{air}^{est} can be compared with difference between Doppler velocity and sedimentation_velocity (ESA products) and with cloud_air_velocity_1km (JAXA products).

Figure 1 provides an example of the Doppler-velocity decomposition applied to co-located MRR and Parsivel observations and its comparison with EarthCARE CPR Level-2 products. In this case, the MRR Doppler velocity profiles (K-band and K2W-derived W-band) are consistent with each other in the lowest kilometre and are generally more negative than the CPR Doppler estimates, highlighting the impact of sampling/representativeness differences and near-surface limitations. Using the Parsivel-derived terminal fall speed at the surface as a constraint, we estimate a near-surface vertical air motion of about 0.6 ms^{-1} (downward). Subtracting this term from the MRR Doppler profile yields a height-dependent reflectivity-weighted terminal velocity V_{tz} , which can be compared directly with sedimentation velocity. The comparison illustrates how the MRR–Parsivel synergy can provide an independent, physically consistent separation of microphysical fall-speed variability from vertical-air-motion effects, thereby supporting the interpretation and validation of EarthCARE Doppler-based products over MZS.



国際化推進共同研究概要

〔採択番号〕 2024EC-EA-2

タイトル： Dynamical Understanding of Troposphere-Stratosphere Interactions
During Sudden Stratospheric Warmings (SSWs): Modulation of the Tropical
Convection and Tropical Cyclone Activity

研究代表者： CHO Hyeong-Oh

所内世話人： EGUCHI Nawo

研究概要：本研究では、全球雲解像度モデルNICAMによるラグアンサンブルモデルシミュレーション実験のデータを用いて、2019年の南半球成層圏突然昇温現象SSWが北半球の熱帯対流および台風活動に及ぼす影響について調査した。SSW発生時の南半球極渦の弱化は、熱帯下部成層圏の冷却を伴う。これは熱帯UTLSの静的安定性を弱め、北半球熱帯における深層対流および台風活動の活発化に好ましい条件を提供する。台風活動の活発化は、深層対流が優勢な北太平洋西部で確認されている。この結果は、成層圏シミュレーションの成功が、熱帯対流および台風の季節内予測を改善できることを示している。

本研究は、アンサンブル実験によって、初期値の違いがその後の力学場の変動幅を与えることを利用し、南半球SSWが北半球の台風活動をどのように変調させるかについての独自のヒントを提供する。成層圏は対流圏よりも予測可能性が長いいため、本研究で検討したSSWと台風の関連性は、台風予測のさらなる精度向上につながる可能性がある。このような関係は、SSWとTCの関係を示唆する兆候が見られる一方で、別途研究する価値がある。

Report: RIAM joint research (Early Career, type B)

The Research Title: Dynamical Understanding of Troposphere-Stratosphere Interactions
During Sudden Stratospheric Warmings (SSWs): Modulation of the Tropical Convection and
Tropical Cyclone Activity

Applicant: Hyeong-Oh Cho, from Seoul National University, Seoul, Republic of Korea

RIAM advisor: Nawo Eguchi

Abstract

This study investigates the predictability of the Southern Hemisphere (SH) stratospheric sudden warming (SSW) event in September 2019 and its impact on tropical cyclone (TC) activity over the North Pacific. Using high-resolution lagged-ensemble forecasts from the Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM), a total of 96 ensemble members are categorized into two groups based on their success in capturing the SSW event. The ensembles that accurately predicted the SSW exhibit a pronounced temperature decrease in the tropical lower stratosphere, which resulted in reduced static stability and enhanced tropical deep convection. This SH SSW-related enhancement of tropical convection results in increased genesis of TCs over the North Pacific and frequent TCs visiting the Korean peninsula and western Japan. The findings highlight the influence of SH SSW on tropical convection and TC activity during the boreal summer, suggesting potential implications for seasonal forecasting in the North Pacific region.

Research Purpose

This study aims to investigate the dynamical processes underlying troposphere-stratosphere interactions during Sudden Stratospheric Warming (SSW) events, with a particular focus on their modulation of tropical convection and TC activities. SSW is one of the most dramatic events in the atmosphere, typically involving rapid warming with the breakdown of the stratospheric polar vortex. SSWs influence not only stratospheric circulation but also surface climate for up to 2 months. While previous studies predominantly emphasized the impacts of SSW over the mid- to high-latitudes in the same hemisphere, however, SSWs also can modulate convective activity over the tropics in the opposite hemisphere. To discuss the climate impacts in the troposphere by SSWs more quantitatively, we need an integrated understanding of the entire atmosphere on a global scale. By better understanding the interaction processes between the troposphere and stratosphere associated with SSW, we can further develop a comprehensive understanding of the entire atmosphere which has been poorly understood currently. Therefore, we explore the dynamics of atmospheric interaction of the SSW events between polar to tropical circulation.

Data and Methods

The Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM; Tomita and Satoh 2004; Satoh et al., 2008, 2014) version 16 is used in this study. Both 6-hourly JRA-55 and the 3-hourly fifth generation European Centre for Medium-Range Weather Forecast atmospheric reanalysis (ERA5) fields are used to initialize the model from 20th to 27th August 2019, this allows a total of ensembles with JRA-55 32 and 64 ensembles with ERA5, respectively. Each ensemble is independently regarded. The 30-day simulation was performed. Temperature,

zonal wind, and vertical velocity are analyzed on pressure levels. The outgoing longwave radiation (OLR), i.e., the upward longwave flux at the top of the atmosphere, is also examined. The 3-hourly output is daily averaged.

The TCs are autonomously tracked in the NICAM system with the following criteria. The TC is detected when the maximum wind speed at 850 hPa is faster than 17.5 m s^{-1} , temperature deviation is warmer than 8 K, relative vorticity at 850 hPa is stronger than $3.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, and the height of the central location is less than 10 m (personal communication with Dr. Yamada at JAMSTEC). The $5^\circ \times 5^\circ$ grid box in latitude and longitude from the TC center is counted to calculate the horizontal distribution of mean TC frequency and genesis.

Results

In September 2019, a minor SSW occurred in the SH. Unlike the NH, the SH has recorded only one major SSW in 2002 since observations began. Because SH SSWs are very rare, it is also meaningful to analyse minor SSWs that do not manifest until the zonal-mean zonal wind reversal at the edge of the vortex. Though the 2019 SH SSW event is referred to as a minor event, its wind deceleration was comparable to that of the 2002 SH SSW (Lim et al., 2020), with the warmest polar temperature anomaly in September since satellite observations began (Noguchi et al., 2020). Moreover, the zonal-mean zonal wind at 50°S was reversed from westerly to easterly, affecting the troposphere in a major way (Rao et al., 2020). Although SSWs in SH are not frequent, when they occur, they can impact the tropics as well as the Antarctic and midlatitudes in SH.

It is possible that the SH SSW event can affect NH TC activities as TCs are most active in the boreal late summer to early fall. Since it is difficult to establish a causal relationship with

a case analysis, the numerical model study is inevitable. In previous studies (Noguchi et al., 2020; Yoshida and Mizuta, 2021), cumulus parameterization was used in numerical experiments. It has been pointed out that cumulus parameterization makes a difference in the response of cumulus activity in the tropics to the stratospheric dynamic field. This study eliminates this effect by using a reliable cloud resolution model that does not use cumulus parameterization.

And the case of the 2019 SH SSW event, even though the SH polar vortex substantially weakened, it did not exhibit the reversal of zonal-mean zonal wind at 10 hPa and 60°S, so it is classified as a minor warming event. Instead, zonal-mean zonal wind at 10 hPa and 50°S (Rao et al., 2020) is reversed to easterly. Therefore, this study did not indicate an explicit onset of 2019 SH SSW.

Figure 1a shows the time series of zonal-mean zonal winds at 50°S and 60°S in 2019 for JRA-55 reanalysis. The climatological values are also indicated in green. The Antarctic polar vortex continued to weaken from the end of August, showing about 60 m/s of zonal-mean zonal wind deceleration at 60°S until mid-September (Figure 1a). However, it did not cross the zero line. Nevertheless, it exhibits a substantial vortex weakening enough to refer to this case as a minor SSW. At 50°S, the wind direction is switched from westerly to easterly (e.g., Rao et al., 2020) with a comparable wind deceleration to that in 60°S. Such a rapid deceleration of the zonal wind appears not only at a specific vertical level but also throughout the stratosphere, showing the breaking of the polar vortex (Figure 1b). Consistent with this polar vortex weakening, the polar-cap averaged temperature increases, showing a positive anomaly of about 40 K or higher in the middle stratosphere by mid-September (Figure 1c). At the same time, the lower stratospheric temperature in the NH tropics decreases (Figures 1d, e); this see-saw-like temperature change between the SH polar stratosphere and NH tropical stratosphere indicates

an enhanced stratospheric meridional circulation. It is important to note that the cooling in the tropical lower stratosphere destabilizes the UTLS. This can strengthen deep convection over the region where deep convections frequently develop (Figure 1f).

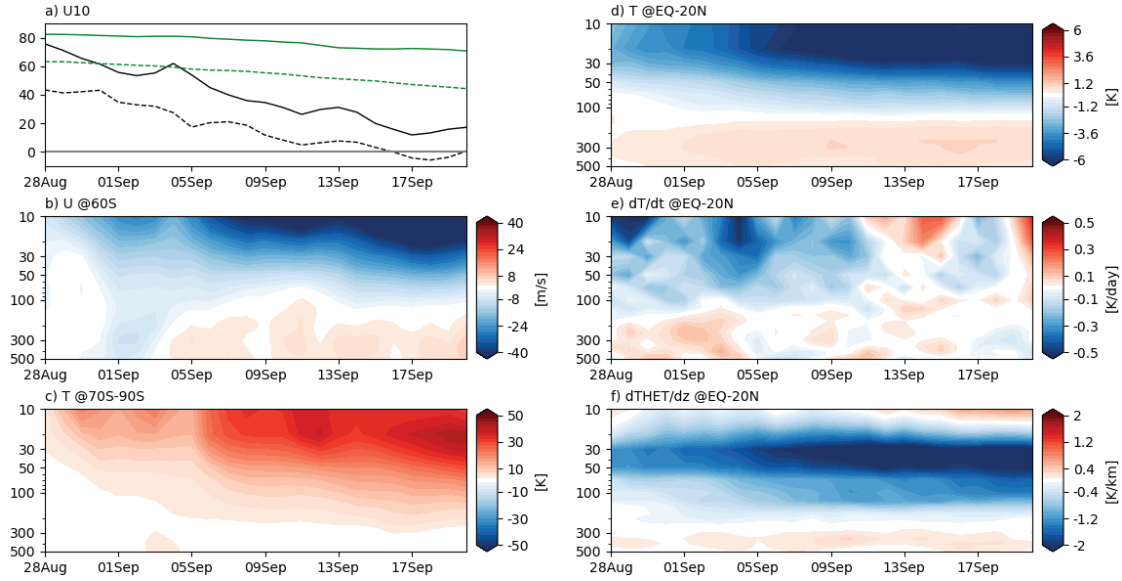


Figure 1. Time series of zonal-mean zonal wind at 10 hPa and 50°S, 60°S for 2019 and climatology: a), pressure-time cross sections of b) zonal-mean zonal wind at 60°S, c) polar cap (70°S to 90°S) temperature, d) NH tropical (equator to 20°N) temperature, e) NH tropical temperature tendency, and f) derivative of NH tropical potential temperature with respect to height for JRA-55 reanalysis.

The time evolution of the zonal-mean zonal wind and temperature in the SH polar stratosphere and the stratospheric temperature in the NH tropics simulated by NICAM is illustrated in Figure 2. There is no noteworthy difference between ensembles in the zonal wind until the 4th of September. After that, ensemble spread increases in both JRA-55 and ERA5

initializations. Some ensembles show a rapid wind deceleration, while others show a gradual wind deceleration (Figures 2a, d). In former ensembles, polar-cap averaged temperature rapidly increases within two weeks (Figures 2b, e) as in observation.

The stratospheric cooling in the tropics also differs significantly in amplitude and timing depending on the ensemble (Figures 2c, f). The later-initialized ensembles tend to better simulate polar vortex weakening, polar-cap temperature increase, and tropical stratospheric cooling in the SSW period. This propensity is somewhat anticipated, as the later-initialized ensembles might have a relatively small bias and better simulate the SSW. However, their differences are not only determined by the initialization time, as some ensembles initialized early well predict polar vortex weakening than those initialized after that time and vice versa.

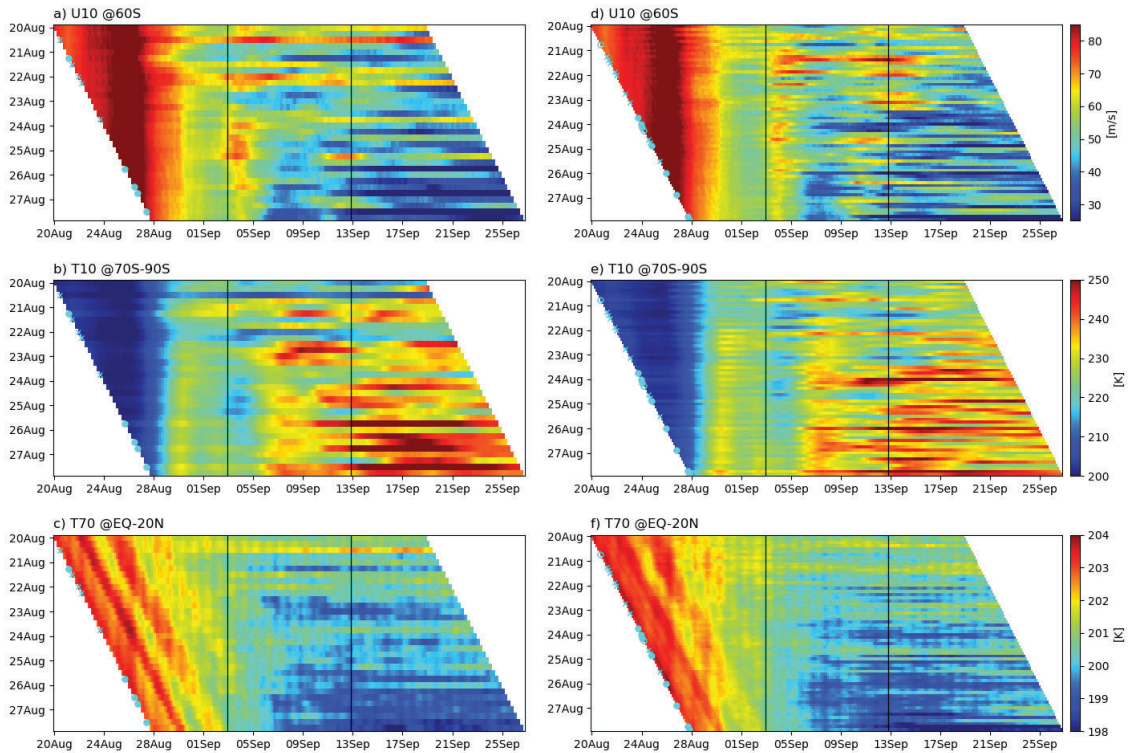


Figure 2. Time evolution of NICAM prediction results by their initialization date: (top) zonal-

mean zonal wind at 10 hPa and 60°S, (middle) polar cap temperature at 10 hPa, and (bottom) temperature at 70 hPa over the equator to 20°N. Initialized by JRA-55 (6-hour interval) are shown in the left column, and ERA5 initialization (3-hour interval) results are shown in the right column. Black vertical lines denote the 3rd of September and 12th of September, which denote the period of defining NICAM_SSW and NICAM_noSSW groups.

To determine the effect of the SH SSW on tropical convection and TC activities, the difference between the ensembles that simulate SSW (hereafter NICAM_ySSW) and those missed SSW (hereafter NICAM_nSSW) is examined. More specifically, NICAM_ySSW and NICAM_nSSW are defined as the ensembles with their zonal-mean zonal wind at 10 hPa and 60°S from 4 to 17 September (black vertical lines Figures. 2) are lower 25% and upper 25%, respectively, in each initialization dataset (JRA-55 and ERA5). Although model output is available since 28th August, the data only after 4th September is analyzed to avoid bias in the early period.

The relationship between the polar vortex intensity and polar/tropical stratospheric temperature is presented in Figure 3. The time-averaged 10-hPa polar-cap temperature, during 4th-17th September, is related to the zonal-mean zonal wind at 10 hPa and 60°S are shown for each initialization. Not surprisingly, the polar stratospheric wind and temperature are negatively correlated, with a correlation coefficient of -0.97. This value is statistically significant at the 99% confidence level. The mean of NICAM_ySSW ensembles shows zonal wind (44.7 m/s) and temperature (234.3 K), close to reanalysis (green triangles in Fig. 3), distinctly distinguished from stronger vortex and colder stratosphere for the mean of NICAM_nSSW. The SH polar stratospheric wind and the NH tropical temperature at 70 hPa are positively correlated. Although their correlation coefficients are not large (0.83 for JRA-55

initialization and 0.73 for ERA initialization), they are still statistically significant at the confidence level of 99% (Figures 3b, d). Such a positive correlation indicates that a weak polar vortex accompanies a cold tropical stratosphere, as shown in Figure 1. The ensemble mean of NICAM_ySSW shows a relatively cold tropical stratosphere, contrasting with relatively warm in the case of NICAM_nSSW.

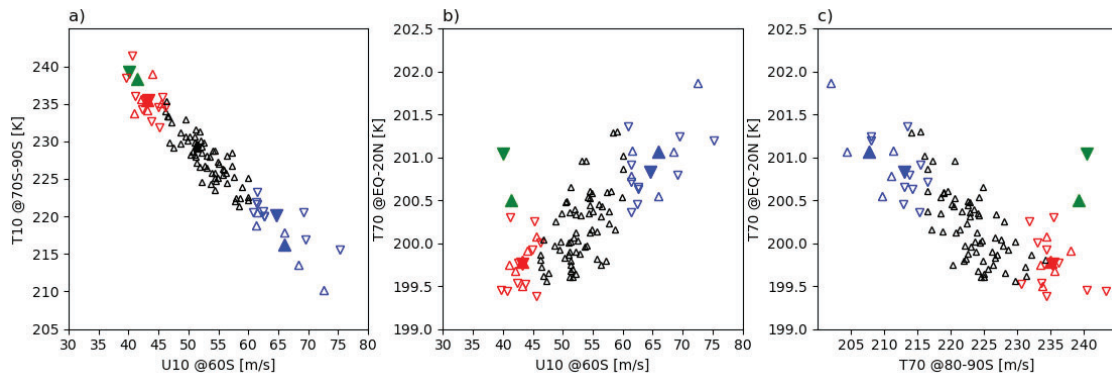


Figure 3. Scatterplots of time-averaged variables during 4-17 September in each ensemble: a) zonal-mean zonal wind at 10 hPa and 60°S versus PCT at 10 hPa, and b) zonal-mean zonal wind at 10 hPa and 60°S versus zonal-mean temperature at 70 hPa over the equator to 20°N. The upper and lower triangles denote JRA-55 initialization (6 hourly) and ERA5 initialization (3 hourly), respectively. The red (blue) triangles represent NICAM_SSW (NICAM_noSSW) ensembles.

Figure 4 presents the differences between NICAM_ySSW and NICAM_nSSW ensembles as a function of pressure and time. A systematic difference is observed in the polar-cap temperature (Figure 4a). From September, a negative difference also becomes prominent in the tropical lower stratospheric temperature (Figure 4b). A significant cooling in the tropical lower

stratosphere is particularly evident from the end of August, which was maximized on 5 September 2019. This temperature difference results in the negative potential temperature derivative with height at 100 hPa from 3rd September to mid-September, leading to reduced static stability in the tropical lower stratosphere and the TTL region (Figure 4c). It is speculated that reduced static stability in the NH tropics (equator to 20°N) may allow more active deep convection and TC genesis.

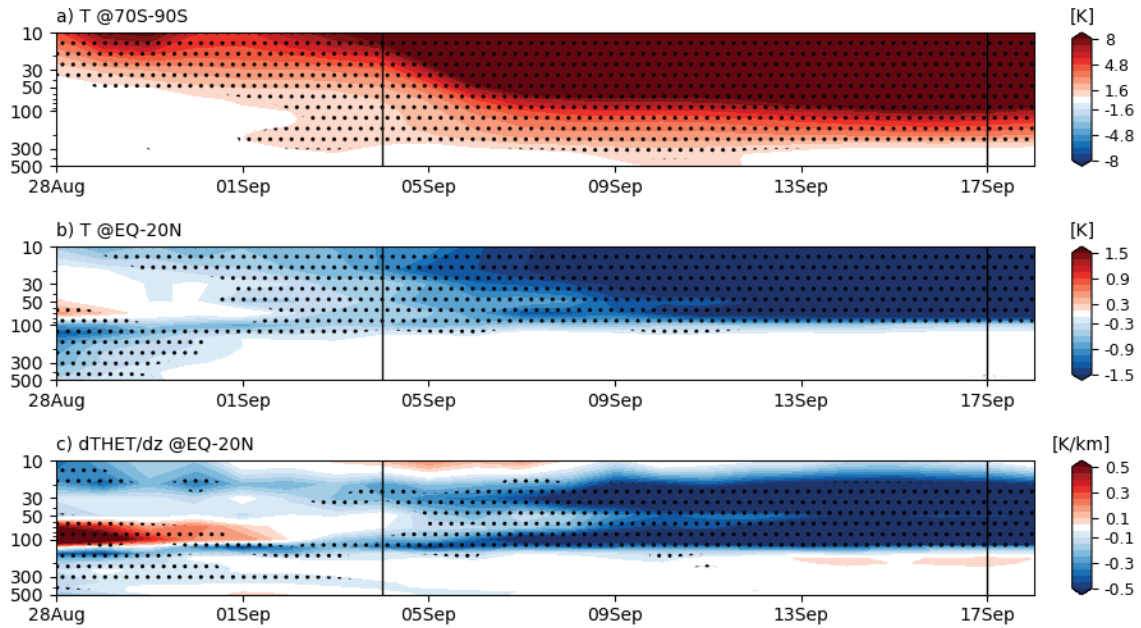


Figure 4. Pressure-time cross sections of lagged-ensemble mean differences of the NICAM_ySSW from the NICAM_nSSW prediction: a) polar cap (70°S to 90°S) temperature, b) NH tropical (0 to 20°N) temperature, and c) derivative of potential temperature with respect to height. The area with a statistical significance of difference larger than 95% (Welch's t-test) is denoted by dots.

The impact of the 2019 SH SSW on TC activities is investigated in Figure 5 by comparing

TCs in NICAM_ySSW and NICAM_nSSW ensembles. The TC genesis and frequency maps averaged from 4 to 17 September are particularly illustrated for NICAM_ySSW, NICAM_nSSW and their difference. Both NICAM_ySSW and NICAM_nSSW ensembles show that TCs frequently form over the tropical North Pacific and North Atlantic, move northwestward, and turn to the northeast in midlatitudes (Figures 5a, b). The TC differences between NICAM_ySSW and NICAM_nSSW are characterized by the broad positive areas centered from 20°N and 170°E and reaching the Korean peninsula and Japan (Figure 5c). They are accompanied by negative differences in the east. Such track changes are associated with a westward movement of TC genesis. The TC genesis increased around 15°N and 140°E but decreased in the northeastern region of this area. Here, it is important to note that the amplitude of the positive difference is more prominent than that of the negative one. It indicates that TC genesis is also enhanced in the western region. Although positive and negative frequency patterns are also observed in the North Atlantic, the TC difference in this region appears less systematic.

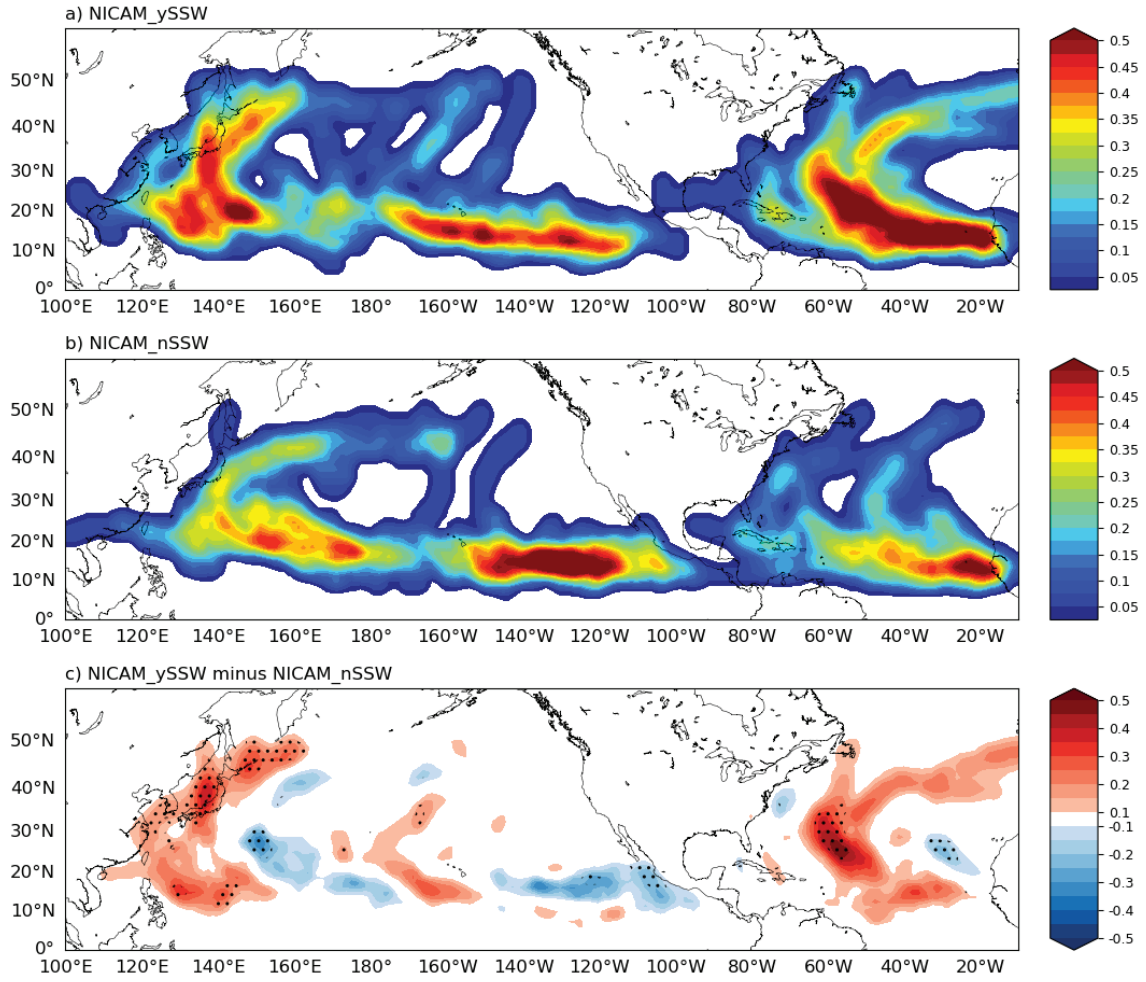


Figure 5. The horizontal distribution of TC frequency (shading) and genesis (contour): a) NICAM_ySSW, b) NICAM_nSSW, and c) NICAM_ySSW minus NICAM_nSSW which is generated from 4 September to 17 September. Black dots in c) denote the statistically significant areas in TC genesis at a 95% significance level.

Summary and discussion

The present study examines the possible influences of the 2019 SH SSW on the NH tropical convection and TC activities using the high-resolution lagged-ensemble model simulations. The weakening of the SH polar vortex accompanies the cooling in the tropical

lower stratosphere. It weakens the static stability in the tropical UTLS and provides a favorable condition for enhanced deep convection and TC activities in the NH tropics. The enhanced TC activity is found over the western North Pacific, where deep convection is prevailing. This result indicates that a successful stratosphere simulation can improve the subseasonal prediction of tropical convection and TCs.

This study provides a unique hint of how the SH SSW can modulate the NH TC activities. Since the stratosphere has longer predictability than the troposphere, the SSW-TC linkage explored in this study may provide an additional TC prediction skill. Such a relationship deserves a separate study while a hint of the SSW-TC relationship is presented. Nevertheless, the results here have several limitations. It is necessary to investigate the dynamical explanation for the difference in TC activities.

Conference presentations

The content of the research was presented at 28 May 2024 in JpGU.

Title: “Possible Impact of the 2019 Southern Hemisphere Stratospheric Sudden Warming on Tropical Cyclone activities over the western North Pacific”