

[27]全国共同利用研究成果報告

<https://hdl.handle.net/2324/7431319>

出版情報：全国共同利用研究成果報告. 27, pp.1-, 2024-03. Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

バージョン：

権利関係：



海洋環境シミュレーション水槽とループ法を使用した吹送距離延長法の確立

兵庫県立大学大学院工学研究科機械工学専攻 高垣直尚

・要旨

大気海洋間の運動量・熱輸送量を計測し正確にモデル化するためには、外乱を除去可能な風波水槽を使用することが重要である。今年度は、応用力学研究所の共同利用水槽にて風速・波高・水位・差圧・温度・湿度測定を実施した。さらに、運動量収支法および熱収支法を用いて水面を通して通過する運動量フラックスおよび熱フラックスを測定した。また、界面活性剤を使用してこれらの輸送量を変化させることができるかの検証を行った。

・序論

海洋や河川上で風シアが生成要因となって発生する風波の発達は、大気海洋間の運動量・熱・物質輸送に影響を及ぼすことから、この各種の輸送量を計測し正確にモデル化するためには、外乱を除去可能な風波水槽を使用することが重要である。しかし、風波水槽では、水槽長さの 100 m 程度までしか風波を発達させることは出来ず、実際の海洋での風波 (30 km 程度発達し続ける) を、現在の風波水槽で生成することは不可能である。そこで本研究では、九州大学応用力学研究所の海洋シミュレータ水槽を使用して、波の持つ性質を示す統計量が同じ波を風波水槽入口から何度も送ることによって長い吹送距離で発生する波を再現する、いわゆるループ法の確立を目的とする。今年度は、ループ法を用いない場合の、高風速下における、風波気液界面を通しての運動量・熱輸送量の測定を行った。また、界面活性剤を使用してこれらの輸送量を変化させることができるかの検証を行った。

・実験方法および実験結果

実験・解析は、吹送距離は20mの地点において、ファン回転数100回転から最大の1700回転において、実施された。表1に、2018-2023年度の最高風速等の値を示す。特に、今年度初めて界面活性剤を使用した場合の実験を実施し一部の風速測定を行った。図1に、海上10mでの風速と抗力係数の関係を示す。図より、低風速から高風速までのすべての風速帯において、過去の他の水槽における測定値 (Takagaki *et al.*, 2012) と非常によく一致することがわかる。今後は、台風シミュレーション水槽にて伝熱実験を行い熱輸送機構の解明や輸送量の制御にも挑戦する。

・成果報告 (論文、学会発表リスト等)

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

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

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

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

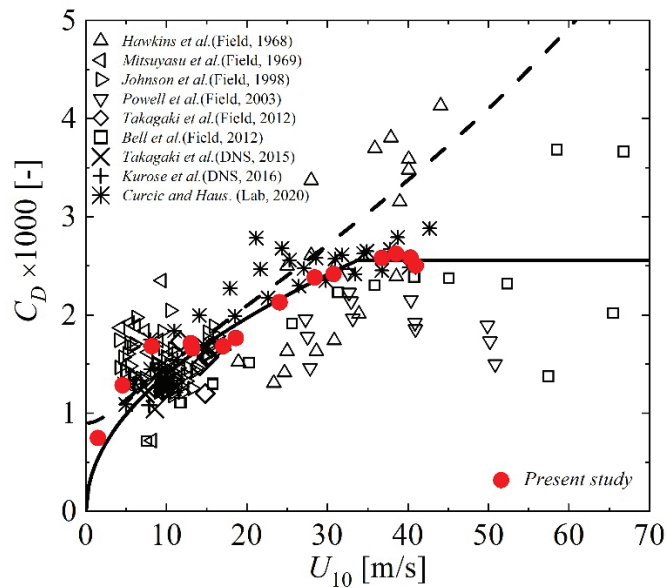


Fig. 1: Relationship between 10-m height wind speed U_{10} and drag coefficient C_D . This figure is reproduced based on Fig. 12 of Takagaki et al. (2023).

長崎県雲仙での現場観測によるエアロゾル特性と雲の熱力学相の関係

長崎大学大学院水産・環境科学総合研究科 河本和明

[目的]

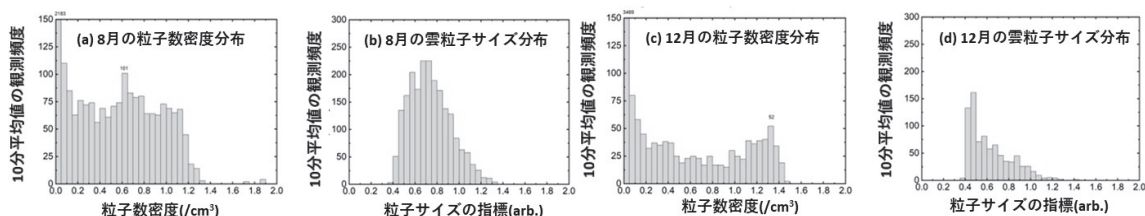
気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第6次報告書でも示されている通り、気候の将来予測において最も不確かな要素の一つが雲の扱いである。これまで行った一般研究によって、能動型衛星データから推定したエアロゾル種ごとの絶対量(消散係数)と雲粒子の熱力学的相(水滴または氷晶のいずれか。以後は雲相と呼ぶ)との比較から、同じ温度でもダスト消散係数が高い方が氷晶の割合が高いことがわかった(Kawamoto et al., 2020)。つまり同じ温度でもダスト量が多い方が高い凍結効率を示す。衛星データからは広域にわたって雲頂付近のバルクな状況が示されるが、現場観測を用いたエアロゾルと雲の詳細な直接比較も求められる。本研究では、地上に接した雲である霧を対象に、長崎県の雲仙岳で行われている霧粒の現場観測から、まずは霧粒子特性の特徴を明らかにする。

[方法]

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

[結果と考察]

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



[参考文献]

Kawamoto, K., Yamauchi, A., Suzuki, K., Okamoto, H., & Li, J. (2020). *Geophys. Res. Lett.*

[研究組織]

河本和明(長崎大学大学院水産・環境科学総合研究科、衛星データの解析・全体のまとめ)

岡本創(九州大学 応用力学研究所、雲相推定手法についてのアドバイス)

本研究では中山智喜長崎大学准教授のご協力を得た。

瀬戸内海の伊予灘と豊後水道における乱流観測

研究代表者 愛媛大学沿岸環境科学研究センター 郭 新宇

背景と目的

潮汐混合と浮力加入間のバランスの空間的な違いから形成される潮汐フロントは、世界中の内湾や陸棚上に存在し、物質の循環を通じて生物生産に寄与する。前年度までの共同利用研究では、豊後水道には $0.05\text{ }^{\circ}\text{C m}^{-1}$ に及ぶ著しい水温フロントが存在し、その周辺で強い鉛直流と乱流混合が生じていることが明らかにされた。本研究ではこのような潮汐フロント域における強乱流による栄養塩輸送の定量評価を目的し観測を実施した。

研究内容

2023年5月9–11日(小潮期)と16–18日(大潮期)に、豊後水道の速吸瀬戸南部に形成される潮汐フロントの調査を愛媛大学沿岸環境科学研究センター練習船「いさな」航海で実施した。フロント域の定点において、乱流微細構造プロファイラ TurboMAP-5 と水中紫外線硝酸塩アナライザ Deep SUNA-V2 による乱流と硝酸塩濃度の計測を行った。観測時には舷側から超音波ドップラー流速計を吊り下げ、垂表層までの水平・鉛直流速を高精度に計測した。TurboMAP で計測した乱流シアから鉛直渦拡散係数 K_z を Osborn (1980) の式によって見積もり、SUNA による硝酸塩濃度値 C_{NO_3} と合わせ硝酸塩フラックス $F_{NO_3} = -K_z \partial C_{NO_3} / \partial z$ を求めた。

研究内容

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

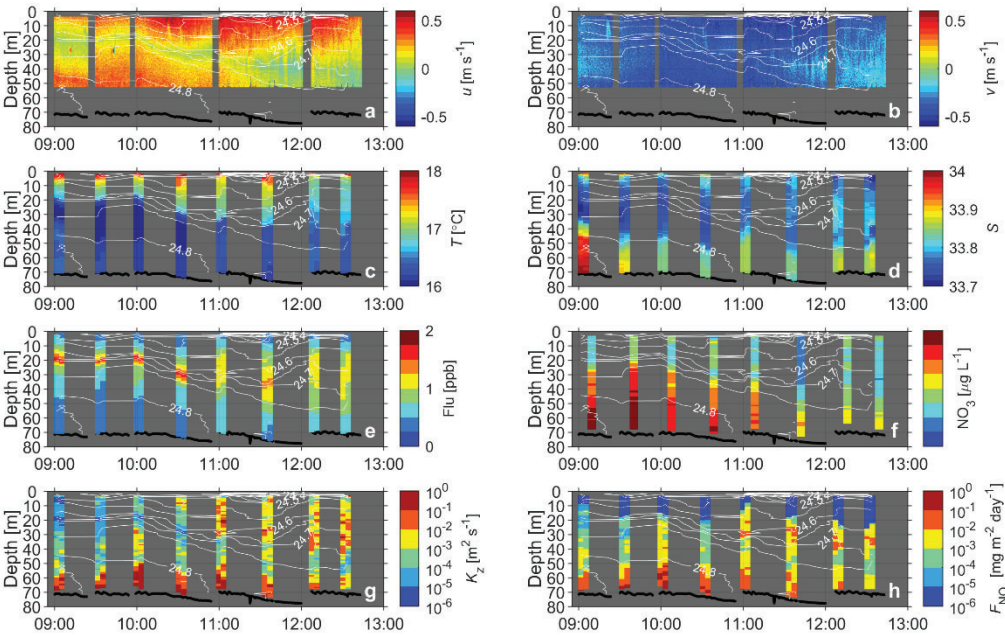


図1 2024年5月16日に豊後水道のA10測点で実施した乱流と流速、硝酸塩濃度の観測結果。(a) 東西流速, (b) 南北流速, (c) 水温, (d) 塩分, (e) 蛍光光度, (f) センサー計測硝酸塩濃度(未校正), (g) 鉛直拡散係数, (h) 上向き乱流硝酸塩フラックス。図中の白線は海水密度(σ_θ), 黒線は海底の位置を示す。

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

福井県立大学 渡慶次 力

1. 目的

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

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

2. データと方法

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

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

3. 結果

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

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

4. 今後の展開

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

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

5. 成果報告等

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

6. 研究組織

| | | | |
|-----|---------------------|-------|--------|
| 代表者 | 福井県立大学 | 准教授 | 渡慶次 力 |
| 世話人 | 九州大学応用力学研究所 | 准教授 | 千手 智晴 |
| 協力者 | 京都府農林水産技術センター海洋センター | 主任研究員 | 熊木 豊 |
| 協力者 | 京都府農林水産技術センター海洋センター | 副主査 | 野口 俊輔 |
| 協力者 | 京都府農林水産技術センター海洋センター | 技師 | 丸山 香野子 |
| 協力者 | 京都府農林水産技術センター海洋センター | 技師 | 木下 直樹 |
| 協力者 | 福井県水産試験場 海洋資源研究センター | 主任研究員 | 松宮 由太佳 |
| 協力者 | 福井県水産試験場 海洋資源研究センター | 研究員 | 岩崎 俊祐 |
| 協力者 | 福井県水産試験場 海洋資源研究センター | 研究員 | 元林 裕仁 |
| 協力者 | 福井県水産試験場 海洋資源研究センター | 主事 | 前川 龍之介 |
| 協力者 | 福井県立大学 | 教授 | 兼田 淳史 |
| 協力者 | 気象研究所 | 研究官 | 広瀬 成章 |
| 協力者 | 九州大学応用力学研究所 | 教授 | 広瀬 直毅 |

東アジアモンスーンが励起するマルチスケール黒潮変動

鹿児島大学水産学部 中村 啓彦

目的 東シナ海における黒潮の運動エネルギーは、夏季に大きく秋・冬季に小さい顕著な季節変動をもつ。この季節変動は、黒潮上の風応力が黒潮の大・中規模現象を駆動する入口の仕組みと、黒潮の運動エネルギーが乱流スケールにカスケードダウンし散逸する出口の仕組みで支配されており、入口と出口の仕組み、そして双方を繋ぐエネルギー遷移の仕組みを統合的に調べる必要がある(中村 2017)。黒潮の運動エネルギーを乱流へ供給するプロセスとしては、海峡域における黒潮と海山間の相互作用に起因した内部波の砕波 (Tsutsumi et al. 2017, Hasegawa et al. 2021, Nagai et al. 2017; 2021, Takahashi et al. 2024) に加え、陸棚斜面域における対象/慣性不安定を通じ放出される近慣性内部重力波の砕波 (Nakamura et al. 2021) 及び地形性渦の放出に伴うシア・対流不安定混合 (Inoue et al. 2024) が考えられるが、その全容を明らかにするためには、黒潮流域におけるエネルギー散逸過程の解明が必要である。本研究は、現場観測と数値実験によって、黒潮の運動エネルギーの散逸過程を明らかにすることを目的とする。

研究内容 上記の一連の過程を観測することを1つの目的として、日韓共同で、2020年6月より北部沖縄トラフの黒潮流域に4台のADCP (RDI社製/WH-LR 75KHz)を設置している(図1:現在,継続中)。さらに、2022年6月~2023年6月の1年間、Thermistor String (RBR社製: Centro TX deep)と流速計 (FSI社製: 3D-ACM)で構成された係留系を、KCM5の500~600m深に設置した(図2)。Thermistor Stringは、1本のケーブルに水温センサーが3m間隔で24個取り付けられており、係留期間中、同期したデータが10秒毎に1つのデータロガーに保存された。ADCP観測網により、冬季に黒潮が不安定化するとき黒潮の擾乱から近慣性内部波が励起されるかどうかを確かめ、Thermistor Stringにより、近慣性内部波エネルギーの増減が乱流強度の増減に繋がっているかどうかを確かめた。さらに、3次元数値海洋モデル (MITgcm: Marshall et al. 1997)を用いて観測結果を再現し、その力学過程を調べている。

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

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

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

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

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

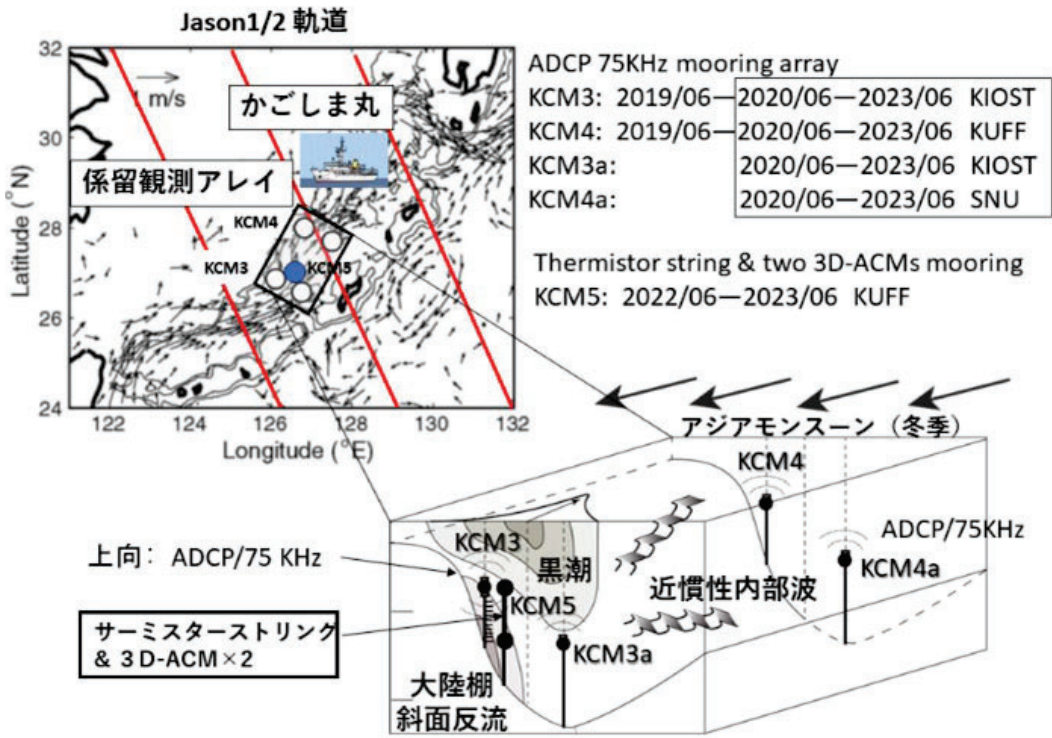


図1. マルチスケール黒潮変動の係留観測網.

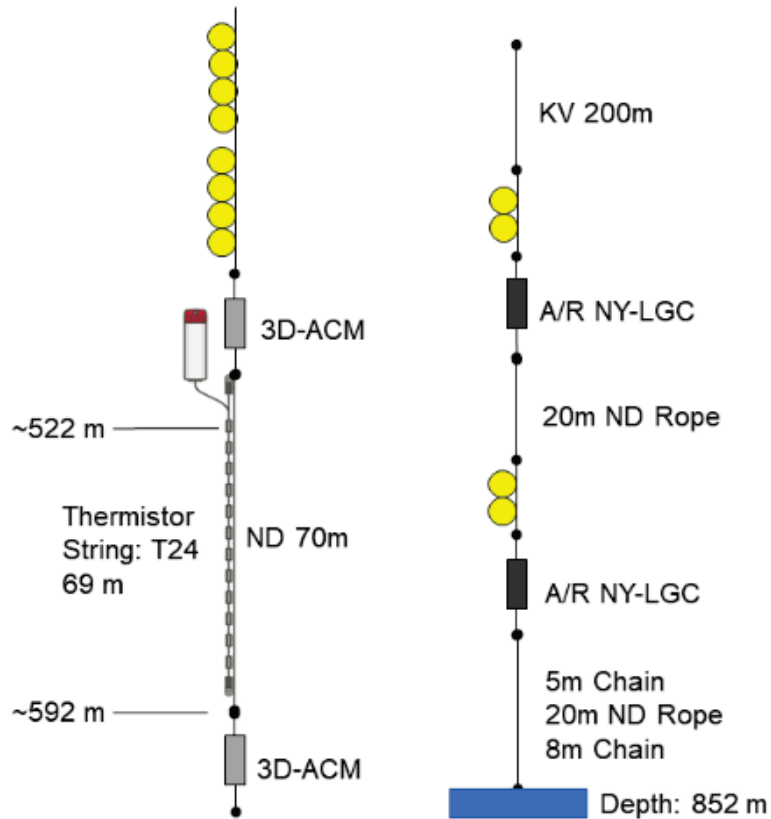


図2. KCM5の係留系模式図 (Thermistor stringと2台の3D-ACM).

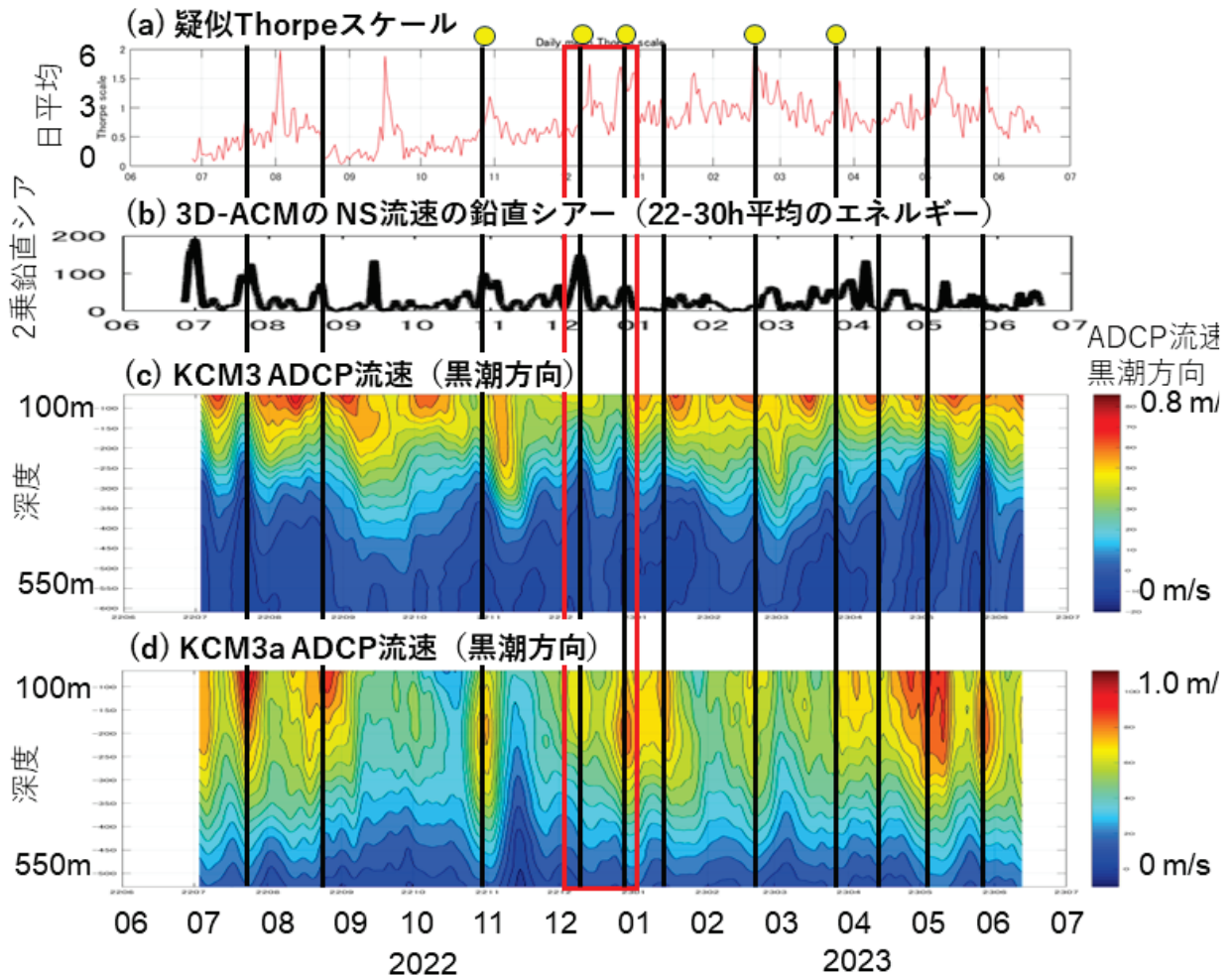


図 3. KCM5 における (a) Thermistor String データより計算された疑似 Thorpes スケール (10 秒毎の値の日平均値), (b) 3D-ACM データより計算された近慣性周期帯 (22~30 時間) の鉛直シア一強度 (上側と下側の流速差の 2 乗), (c) KCM3 の ADCP 流速 (黒潮方向成分), (d) KCM3a の ADCP 流速 (黒潮方向成分)。黒縦線は黒潮の沖向きシフトを示す。黄色丸印 (a 上端) は、黒潮の沖向きシフト、近慣性内部波エネルギーが大きいイベント、疑似 Thorpe スケールが大きいイベントがおおよそ一致している事例を示す。赤枠は、図 4 の期間を示す。

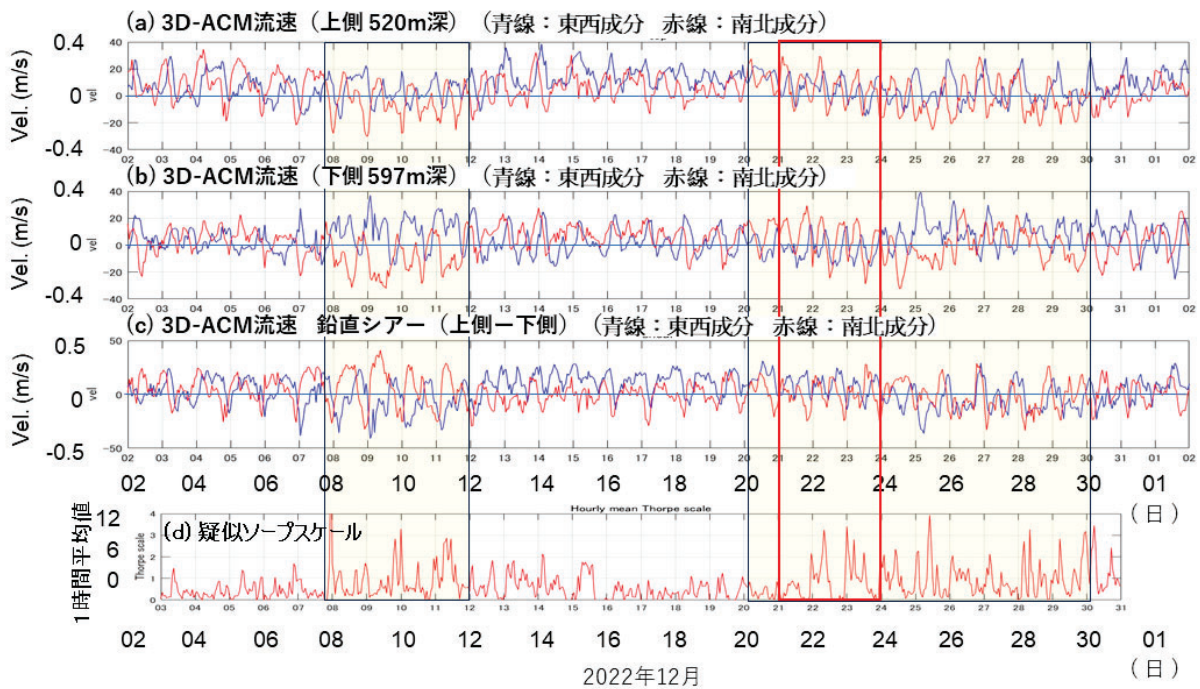


図 4. 2021 年 12 月 2 日～2022 年 1 月 2 日の 1 か月間における，KCM5 の (a) 上側 (520 m 深) と (b) 下側 (597m 深) の 3D-ACM 流速 (青線：東西成分，赤線：南北成分)，(c) 鉛直シアー (上側一下側)，(d) 疑似 Thorpe スケール (10 秒毎の値の 1 時間平均値)。黄色網掛は，黒潮下層に南下流が出現した期間と疑似 Thorpes スケールが大きい期間を示す。赤枠は，図 5 の期間を示す。

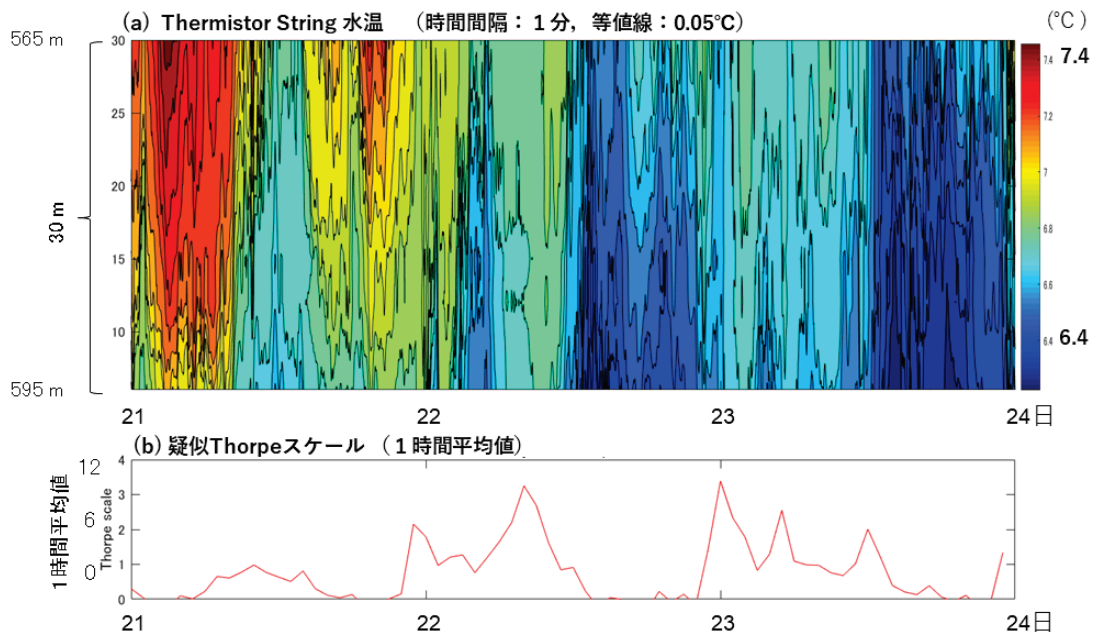


図 5. 2021 年 12 月 21～23 日の 3 日間の Thermistor String の (a) 水温変動 (565 m～595m の 30m を抽出) (時間解像度 1 分，C.I. = 0.05°C)，(b) 疑似 Thorpe スケール (1 時間平均値)。疑似 Thorpe スケールが大きくなると，成層が弱くなり高温化する特徴が認められる。

うねりと風波が同時に存在する状況での GNSS 反射強度への影響の観測研究

京都大学大学院理学研究科 根田昌典

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。これまでの研究で、うねりと風浪が共存する状況において風向と風波の方向に系統的な差が生じることがわかってきた。風波が海上風に駆動されるならば、うねりの存在下では風応力と一般的な 10m 高度風との間に成立する対数分布則自体が変化する可能性がある。今年度は、和歌山県田辺湾にある観測塔に設置した複数高度の風ベクトル観測のデータをもとにして、うねりの存在下での海上風ベクトルプロファイルが対数則からどのように乖離するかについて検証する。

手法の概要

表 1：観測装置設置状況

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

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

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

複数高度海上風ベクトル観測装置の設置は断続的に複数回行った (表 1)。これらの観測は本研究で得られた研究結果を発露として獲得につながった外部資金によって実施された。温暖期の観測に加え、2022 年冬季の強い北西風の状態を観測することを予定していたが、天候により設置できないまま 2023 年 3 月になってから設置した。しかし、2023 年の観測時には非常に強いうねりによって設置した風速計の下側フレームが損傷を受けたために観測を中断することとなった。予定外の修理が必要となり、本研究の経費を利用して再設置を行った。これにより 2023 年冬季の観測を実施することができた。この観測は現在も継続しているため次年度に詳しく解析する予定である。

結果の概要

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

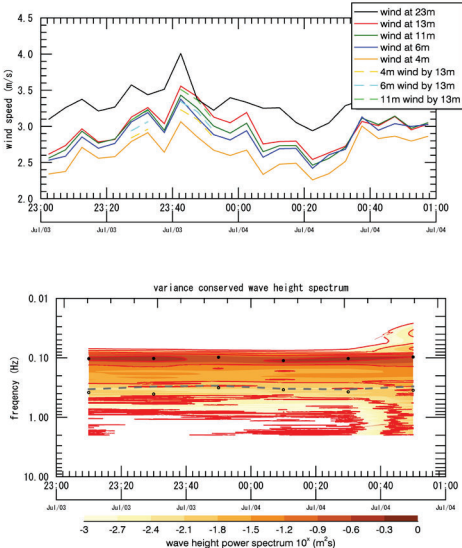


図 1：2022 年 7 月 3 日 23 時—4 日 1 時までの (上) 複数高度風速 (黒:23m, 赤:13m, 緑:11m, 青:6m, 黄:4m) と (下) 波高スペクトル密度。点線は遮断周波数、黒点は風波とうねりのピークを示す

ことができる。図1に示した期間においては、海上風はほぼ東風であった。このため、うねりと風波の方向は135度程度であったと推定できる。

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

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

であり、ここから摩擦速度(u*)は以下の式で与えられる。

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

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

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

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

研究成果報告

口頭発表：1件(別紙論文リスト参照)

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 助教
 所内世話人：市川香：応用力学研究所 准教授

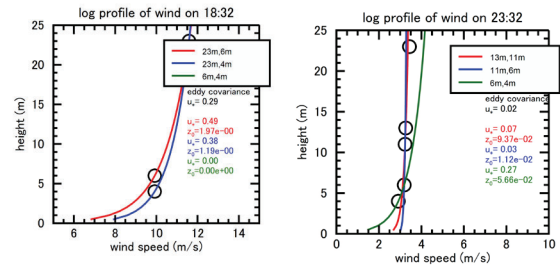


図2：(左) うねりのない状態(2021年11月8日18:30)の海上風鉛直構造と(右) うねりがある状態(2022年7月3日23:30)での海上風鉛直構造。○は風速観測値、赤:(13m・11m)、青(11m・6m)、緑(6m・4m)の各線は2高度風速から推定した風速プロファイルを示す。

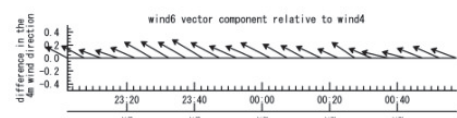


図3：図1と同じ期間における4m高度風ベクトルに対する6m高度風ベクトルの差分ベクトル。同一風向である場合に矢印が上を向くように描画している。

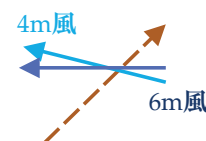


図4：うねりと海上風向き関係の模式図。うねりの方向は茶色の点線矢印で示す。

等密度面モデルを用いた陸域海洋統合物質循環モデルの構築

京都大学・総合生存学館 山敷 庸亮

1. 研究目的

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

陸域 - 汽水域 - 沿岸域と流れる河川水の動態を再現する数値モデルとして、既存の河川モデルと海洋モデルを結合する手法では潮汐に伴う変動や成層構造の再現することが難しい。しかもパラメータチューニングを必要とするため、観測データが限られている島嶼域では適応が困難である。そこで本課題では、山岳地域から海洋に至る間に劇的に変化する流れのレジームの再現に欠かせない Shallow Water Equation を上流域から下流域まで連続的に適用する河川海洋一体型モデル(JORRO, Kida & Yamashiki, 2015)を用いる。そして豪雨時における島嶼域の河川水流出イベントが再現できるユニバーサルなモデルを構築する。

2. 解析手法

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

3. 解析結果

(1) 流路幅の調整 & 背景流の生成

熊本周辺を通過した台風時における流出過程を再現するため、2015年9月6日から2015年9月12日までの降雨データを用いて計算を行った（図1）。流路幅をこれまで180m一定で構築していたため、川幅の狭い上流域の流れが遅くなり、ピーク流量が生じるタイミングが遅れていることがわかった。そこで流路幅を90mに変更したところ流れが早くなったが、グリッド間で流路が接続できていない区間が生まれてしまい、洪水が発生してしまっていた。そこで地形勾配と高度情報をもとに流路をよりスムーズに接続、かつ高低差が逆にならないように調整した。また高解像度地形を利用するうえで、局所的に窪地が生じていたため、ARCGISを用いたスムージングを行った（図2）。この前処理によりカルデラ域から斜面域への流れが現実的に再現できるようになった。

また平水時の流れを再現するため 1mm/hour または 0.5mm/hour の弱い雨を一定で降らせるようにした。これはスピニアップに相当し、トライアンドエラーから 0.5mm/hour が現実的な平水時流量を再現することがわかった。

(2) CDRMV3.1.1 との比較

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

4. 考察

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

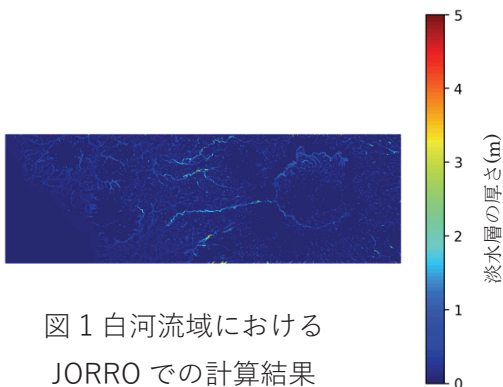


図1 白河流域における JORRO での計算結果

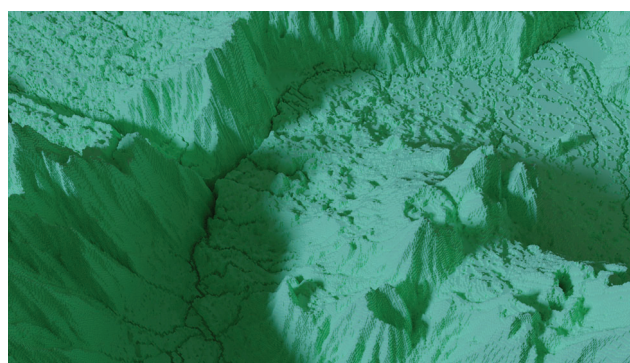


図2 白川上流域の地形データ

5. 研究成果

学会発表

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

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

研究組織

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

沿岸海洋の密度躍層における乱流混合の定量化

鹿児島大学水産学部 堤 英輔

背景と目的 大陸棚や内湾、沿岸域における乱流混合は、熱や淡水、物質の輸送を通じて海洋環境に深く関わる。特に密度躍層における乱流混合は、下層の栄養塩を有光層へ供給することで海域の基礎生産を支え、また底層へ酸素を供給し貧酸素水塊の消長に関わるため海洋生態系に果たす役割が大きい。しかし、その定量化は未だ十分でなく、現実的な乱流混合の定式化が必要である。本研究では、沿岸海洋の密度躍層周辺で生じる乱流混合の定量化を目的として、乱流微細構造計測データの解析を行う。

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

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

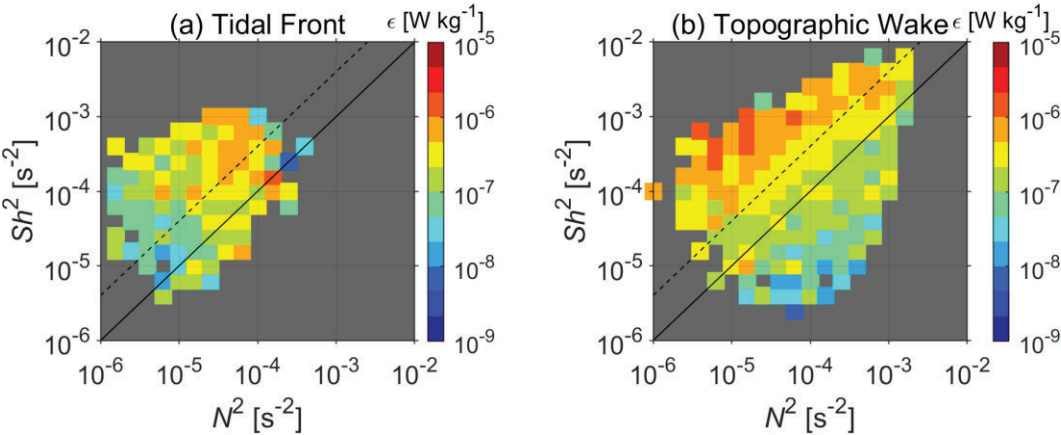


図1 豊後水道において観測された乱流運動エネルギー散逸率 ϵ の、2乗浮力振動数 N^2 と 2乗鉛直シア Sh^2 との関係。(a) 豊予海峡南部の潮汐フロント域における結果、(b) 宇和島市沖の御五神島回りの地形性ウェーク域における結果。実線と破線はそれぞれ勾配リチャードソン数が1と1/4となる境界を表す。

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

海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門 Ingo Richter

Background

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

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

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

Aims of the current research project

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

Methods

1) Data

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

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

2) Composites

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

Results

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

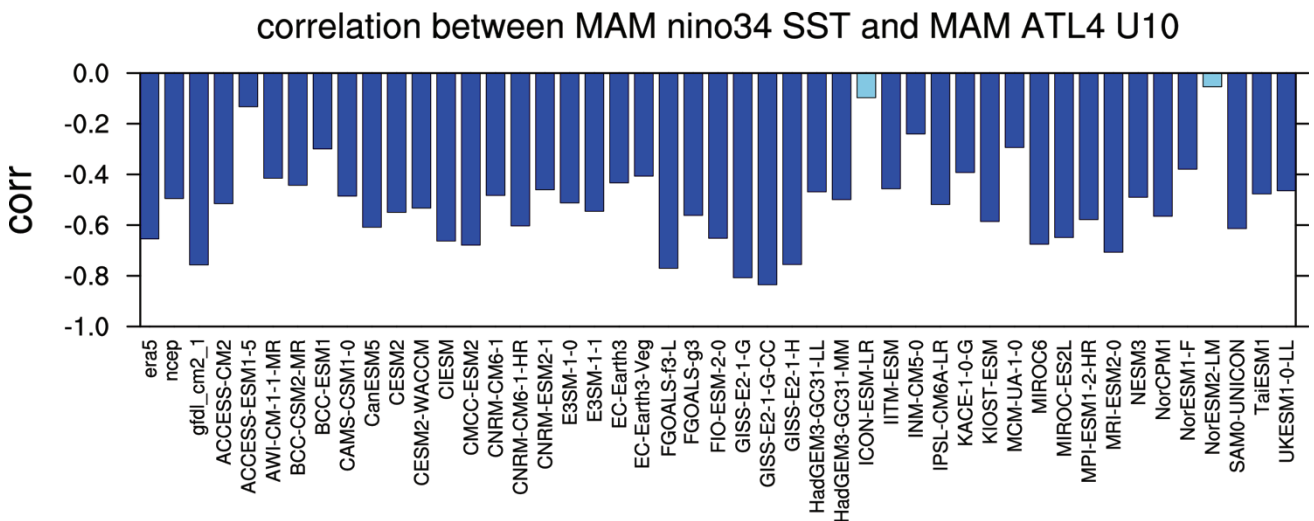


Figure 1. Correlation between MAM Niño3.4 SST and MAM ATL4 (45W-20W, 3S-3N) surface zonal wind anomalies in the ERA-5 and NCEP reanalyses (leftmost two bars), the GFDL CM 2.1 model (a previous generation climate model) and 44 CMIP6 models.

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

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

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

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

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

Additional activities

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

Achievements

Articles in peer-reviewed journals

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

Conference presentations

1. Ingo Richter, Shoichiro Kido, Tomoki Tozuka, Hiroki Tokinaga, Yu Kosaka, Ping Chang: Revisiting the inconsistent influence of ENSO on the equatorial Atlantic. Ocean Sciences Meeting, New Orleans, USA; 2024/02/20
2. Ingo Richter, Yu Kosaka, Hiroki Tokinaga, Shoichiro Kido: Toward quantifying the tropical Atlantic influence on ENSO. APL-ICAR-CMCC Workshop, Yokohama, Japan; 2023/08/07
3. Ingo Richter, Shoichiro Kido, Tomoki Tozuka, Hiroki Tokinaga, Yu Kosaka, Ping Chang: Evaluating interbasin linkages with GCMs and LIMs. CLIVAR/TBI Science Meeting, Guangzhou, China; 2023/11/21

Meetings organized

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

References

Cai, W., and Coauthors, 2019: Pantropical climate interactions. *Science*, **363**, eaav4236,

<https://doi.org/10.1126/science.aav4236>.

Chang, P., Y. Fang, R. Saravanan, L. Ji, and H. Seidel, 2006: The cause of the fragile relationship between the Pacific El Niño and the Atlantic Niño. *Nature*, **443**, 324–328, <https://doi.org/10.1038/nature05053>.

Enfield, D. B., and D. A. Mayer, 1997: Tropical Atlantic sea surface temperature variability and its relation to El Niño–Southern Oscillation. *J. Geophys. Res.*, **102**, 929–945, <https://doi.org/10.1029/96JC03296>.

Kido, S., I. Richter, T. Tozuka, and P. Chang, 2022: Understanding the interplay between ENSO and related tropical SST variability using linear inverse models. *Climate Dyn.*, **61**, 1029–1048, <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06484-x>.

Lübbecke, J. F., and M. J. McPhaden, 2012: On the inconsistent relationship between Pacific and Atlantic Niños. *J. Climate*, **25**, 4294–4303, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00553.1>.

Tokinaga, H., I. Richter, and Y. Kosaka, 2019: ENSO influence on the Atlantic Niño, revisited: Multi-year versus single-year ENSO events. *J. Climate*, **32**, 4585–4600, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0683.1>.

2023CR-A0-10

逆推計手法による東アジア域排出量データベースの高度化に向けた研究

一般財団法人電力中央研究所 サステナブルシステム研究本部 板橋 秀一

1. 目的

2000年代に増加の一途であった中国の窒素酸化物（NO_x）排出量は、2011年から減少傾向に転じている（Zheng et al., 2018）. 一般に排出量データは経済統計資料等をもとに構築される（ボトムアップ法）ため、その推計には数年を要する問題点がある. この問題に対して、準リアルタイムの衛星観測データを拘束条件とした逆推計（トップダウン法）が有用となる. 本共同利用研究では、激変する東アジアの排出量を継続的に把握するため、逆推計手法を構築してNO_x排出量データを近年まで更新することを目指している. 継続6年目となる今年度は、先行研究である Itahashi et al. (2019) で報告していた中国・インドのNO_x排出量のトレンドを更新するため、長期衛星計測データの解析を2023年にまで延伸し、さらに中国の将来排出量推計値と比較した. ここではその内容を報告する.

2. 手法

Aura 衛星に搭載された OMI センサーによる対流圏 NO₂ カラム量（大気柱総量）を用いた. 解析には Level 3 の 0.25°×0.25°の日別の格子点データを用い、日別値から月平均値、年平均値を算出した. 解析対象は2005年から2023年までとした. また、中国清華大学が中心となって開発している共有社会経済パス（Shared Socioeconomic Pathways; SSP）での複数シナリオに基づく将来排出量推計値（Tong et al., 2020）を利用した.

3. 結果と考察

中国およびインドについて、2005年から2023年までのNO₂カラム量の経年変化を示す（図1）. 中国については、2011年をピークにNO₂カラム量が減少傾向に転じ、一方でインドは2018年までは緩やかな増加傾向であった. 新型コロナウイルス感

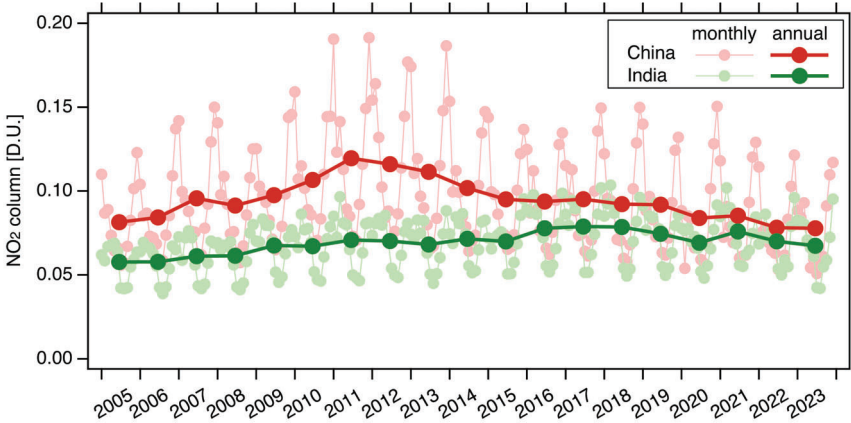


図1. 中国・インドの2005年から2023年までのNO₂カラム量の経年変化.

染拡大の影響を受けたと考えられる 2020 年を含み、インドは近年ではほぼ横ばいの傾向にあることがわかった。結果として、2021 年以降の中国とインドの国平均の NO_2 カラム量は、年平均値として近い値となっていることが示された。

脱炭素化に向けた CO_2 排出削減と同時に、大気汚染物質排出量も変化していくことが考えられる。中国の NO_x 排出量は、SSP3 (地域対立) のシナリオを除いて減少するものと予測されている (図 2a)。このような複数シナリオ下の排出量予測と、現在までの NO_x 排出量の指標と見なせる NO_2 カラム量について、2015 年値で規格化して比較を行った (図 2b)。その結果、現在までの中国の NO_x 排出量は SSP5 (従来型発展) をやや上回る推移をたどっていることが明らかとなった。

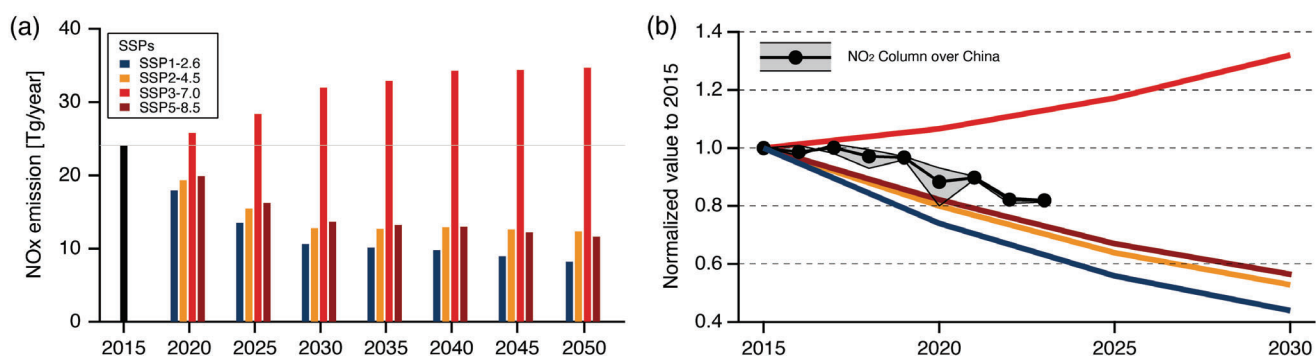


図 2. (a) 4 つの SSP シナリオ下での 2050 年までの中国の人為起源 NO_x 排出量の将来予測値。

(b) 2015 年値で規格化した NO_2 カラム量 (黒色, 図 1) および人為起源 NO_x 排出量 (a) の変化率。

4. まとめ

衛星計測による中国とインドの NO_2 カラム量の解析を延伸し、中国の人為起源排出量の将来予測値と比較した。今後は、逆推計手法により近況までの NO_x 排出量を推計し、中国とインドという世界的に見て重要な発生源の排出実態をいっそう把握していく必要がある。

・参考文献

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

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

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

陸域から外洋への水・栄養輸送に気候変動がもたらす影響

富山大学 大学院理工学研究部 張 勁

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

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

1. Dynamics of bottom waters in the time series station and low-oxygen water in the subsurface layer observed during the 2023 NS23-117 cruise

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

Some preliminary results obtained are as follows: (1) based on the simple mixing model by using temperature and salinity combined with Heavy Rare Earth Elements (HREEs), it is found that temporal factors and physical forces might

significantly influence the variability of the KIW and KSSW intrusion into the shelf area, thus influencing biological activity in the area, (2) Part of the low-oxygen water on the outer shelf is originated from KSSW and MSW. Nutrient (DIN, DIP) contribution in low-salinity, low-oxygen waters in the subsurface layer of the ECS is further required to quantify the material budget in the area.

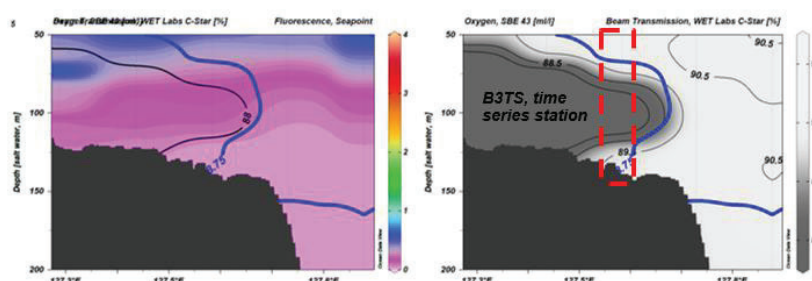


Figure 1. Sectional view of fluorescence contoured with $DO < 3.75$ and transmission $< 88\%$ (left); Sectional-contour view of %transmission, contoured with $DO < 3.75$ (right).

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

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

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

代表者：東京大学 大学院工学系研究科 木口 雅司
所内世話人：九州大学 応用力学研究所 江口 菜穂

1. 研究の目的

インド亜大陸における約 100 年間の降水量データから北半球夏季インドモンスーンに伴う降水システムの変化が Fukushima et al. (2019) によって報告されている。一方で、ここ 30 年間で、北半球夏季 (7-9 月) のアフリカ大陸からアジアモンスーン域の対流活発域が北進していることが明らかとなっている (Kodera, Eguchi et al., ACP, 2019; Kodera, Eguchi et al., JMSJ, 2021)。

本研究対象とするインド亜大陸東北部とインドシナ半島は、インドモンスーンの下流にあたり、かつ準 2 週間周期変動 (QBO) や BSISO などの季節内変動の始点にあたる。またこの地域は特異な地形による地形性の降水システムが顕著にみられる地域で、長期的な気候変動による循環場の変化がこの地域の降水システムをどう変化させているか、またその影響が高緯度側の気象場や気候場にどのような影響をもたらしているのか明らかにしたい。一方で、熱帯域の長期変動であるインドダイポールや ENSO の影響も強く受けているので、熱帯域の経年変化との関連の調査も目指す。

本研究では、研究対象地域における地上降雨量データを収集し、アジアモンスーン降雨データベースを作成し、各現業機関の了承を得て、他の研究にも使用できるようデータベースをレポジトリサイトにて公開することを目指し、さらに季節サイクルなどの長期トレンド解析を試行する。本研究で開発するデータベースは、APHRODITE (Yatagai et al., 2012) より長い期間 (APHRO_V1101 は 57 年間) のデータとなり、より長期の解析が可能となる。さらに、衛星観測データ (TRMM 等) や既存の雨量プロダクト (APHRODITE 等) を用いて、作成したアジアモンスーン降雨データベースの検証を実施しつつ、季節進行が先行研究の結果と類似しているかどうかの確認を行う。また、本研究の研究目的の達成に十分な精度を持っているか、検討することを目的とした。昨年度に引き続き COVID-19 の影響を受けて研究対象地域におけるデータ収集や特に重要である各現業機関のデータ公開に向けた了承を得るための交渉が大幅に遅れている。そのため、本報告では、既に入手した雨量データと衛星観測データ TRMM との検証結果と、インド西ベンガル州周辺におけるトレンド解析結果が最終的に論文として採択されたのでその成果について報告する。

2. メガラヤ高地における降水データの検証

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

3. インド西ベンガル州周辺におけるトレンド解析

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

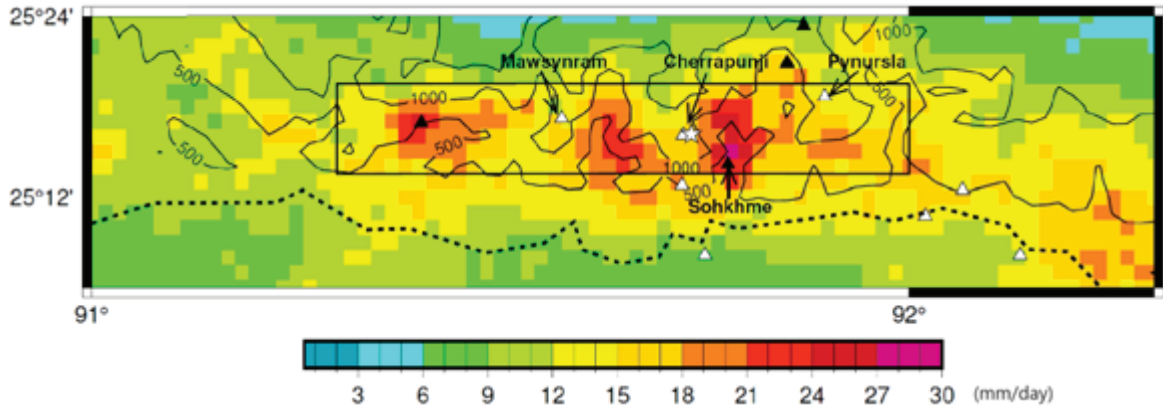


図 1 : Hirose and Okada (2018) が作成した TRMM 降雨レーダーによるインド北東部のメガラヤ高原南部の雨量気候分布。黒実線は 500 m 毎の標高を表す。図 2 で使用した Cherrapunji と Sohkhme を含む雨量計地点が▲や△、☆印で示される。Cherrapunji の町に設置された雨量計地点は 2 地点あり、☆がインド気象局 Cherrapunji 観測所内に設置された雨量計である。

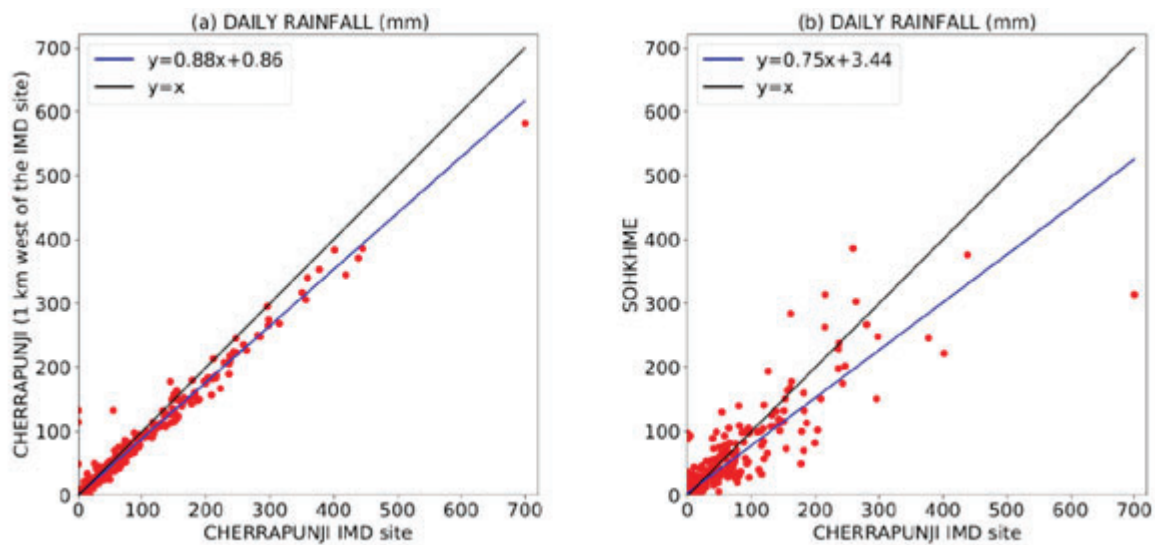


図 2 : 横軸にインド気象局 Cherrapunji 観測所内に設置した雨量計のデータを取り、縦軸に同じ日の (a)気象局より西の台地内に設置した雨量計データと(b)気象局の南東 6km の谷の中の村 Sohkhme に設置した雨量計データをそれぞれ示す。黒実線は $y=x$ 、青実線は回帰直線を表す。

4. まとめ

本研究では、地上観測データと衛星観測データとの関係性を検証した。また、インドにおけるトレンド解析を実施し、過去に観測されている、モンスーンの開始がより早まり、終了がより遅れる傾向が、将来も続き、またモンスーンの雨季の期間が長くなる結果が得られた。

5. 研究組織

| | | |
|-------|-------|------------------------|
| 研究代表者 | 木口 雅司 | 東京大学 大学院工学系研究科 上席研究員 |
| 所内世話人 | 江口 菜穂 | 九州大学 応用力学研究所 准教授 |
| 研究協力者 | 村田 文絵 | 高知大学 理工学部 准教授 |
| 研究協力者 | 林 泰一 | 京都大学 東南アジア地域研究研究所 連携教授 |

謝辞

本研究は、九州大学応用力学研究所の共同利用研究の助成の他に、JSPS 科研費 JP26220202、地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム (SATREPS)、国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST) / 独立行政法人国際協力機構 (JICA)、JICA の人材育成奨学計画 (The Project for Human Resource Development Scholarship) によって実施された。

九州北部地方における火山性エアロゾルの光学的特性の影響

富山大学学術研究部理学系 青木一真

要旨

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

1. はじめに

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

2. 観測・解析概要

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

3. 結果・考察

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

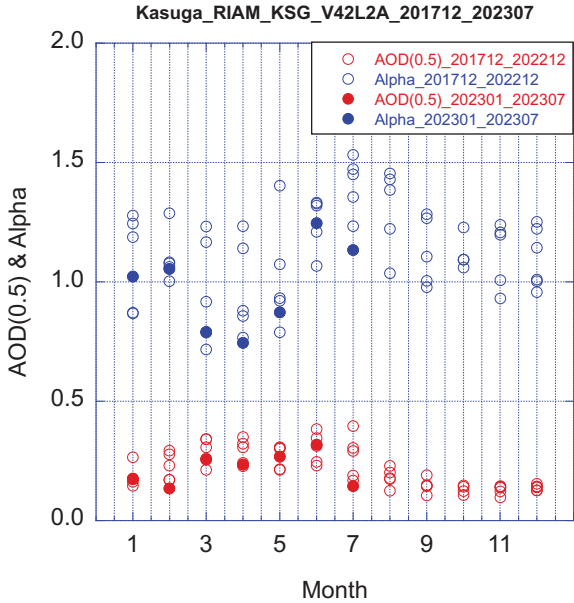


Fig. 1 RIAM屋上のAOD(0.5)とAlphaの月平均値

4. 研究成果

Aoki, K., M. Momoi and T. Takemura., AOGS2023, Singapore, (2023. 08. 03) 【招待講演】

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)

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

長野県環境保全研究所自然環境部 栗林正俊

【目的】

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

【方法】

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

【結果】

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

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

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

【考察】

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

【研究成果報告と研究組織】

別紙の発表論文・学会発表リストに記載のとおり。

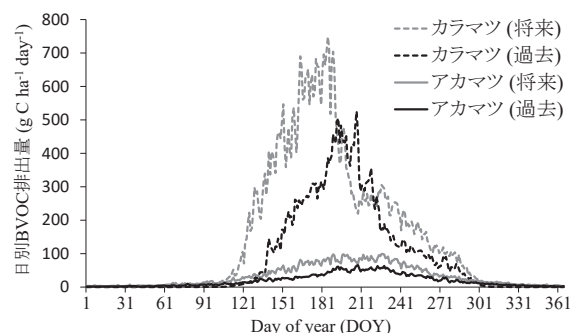


図1 VISIT で計算された富士北麓カラマツ林と富士吉田アカマツ林における過去(2011~2015年)と将来(2046~2050年)の日別 BVOC 排出量の季節変化。

海洋マルチドリフターを用いた海洋漂流現象に関する研究

東京大学 大学院新領域創成科学研究科 小平翼

1 目的

海難事故による原油流出や震災時における瓦礫流出、放射性物質等の海洋汚染を検討する上で海洋の流動場、そして漂流プロセスの把握は非常に重要である。本共同研究では漂流予測手法の高度化を目的として、室内実験や海洋観測塔付近における実験により、漂流に対する海流・潮流、波浪、風、それぞれの影響の定量化を試みる。今年度は波浪と海洋表層流を測定するドリフターの開発および展開に加えて、海上風を計測するのに適した浮体形状の検討に焦点を当て、予備実験ならびに平塚海洋観測等付近にて計測試験を実施した。

2 手法

これまで申請者が開発してきた波浪ブイに抵抗体を付与することにより波浪と海洋表層流を同時に計測する波浪漂流ドリフターの開発に取り組んだ。具体的には Fig. 1 で示されるような小型ドリフターの上部に波浪計測センサボックスを搭載させ、GPS と IMU データから漂流に関する情報ならびに波浪に関する情報を計測するものとした。波浪の計測は、浮体に取り付けた慣性計測装置 (IMU) により加速度、角速度、地磁気をそれぞれセンサ座標系 3 軸に対して 16Hz で計測を行うことにより実施した。波浪計測は 30 分ごとに 1024s の間行い、データは SD カードに記録される。得られたデータに基づいて鉛直加速度を計算し、周波数空間で 2 階積分を行うことにより変異のパワースペクトル密度を推定した。

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

3 実験結果

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

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



Fig. 1 開発した波浪漂流ドリフター

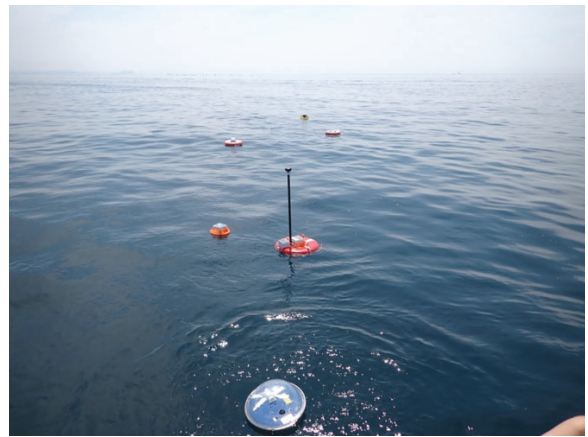


Fig. 2 柏キャンパス環境棟屋上での予備実験の様子(左)と平塚海洋観測棟付近での展開の様子(右)

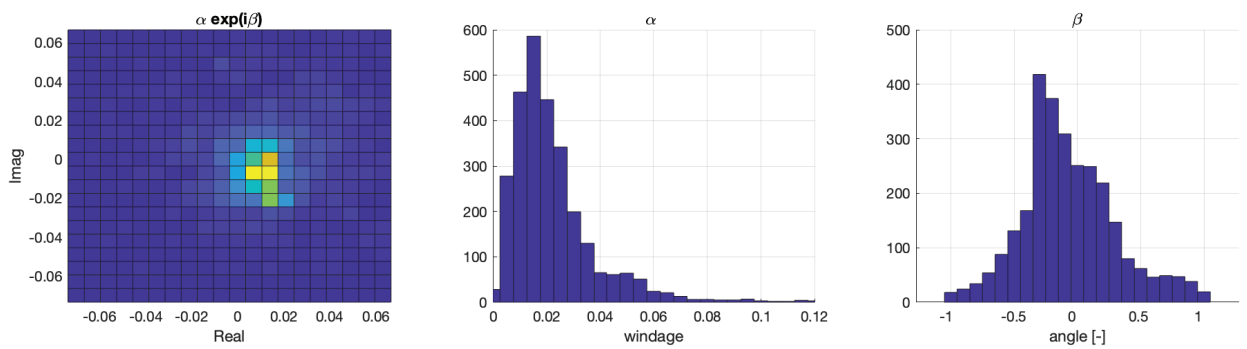


Fig. 3 開発した波浪漂流ドリフターのWindage (複素数形式)

4 成果報告

下記の通り、論文発表を実施した。

Tsubasa Kodaira, Tomotaka Katsuno, Takehiko Nose, Motoyo Itoh, Jean Rabault, Mario Hoppmann, Masafumi Kimizuka & Takuji Waseda (2023) An affordable and customizable wave buoy for the study of wave-ice interactions: design concept and results from field deployments, Coastal Engineering Journal, DOI: 10.1080/21664250.2023.2249243

津波による海底堆積物の再懸濁が海洋環境に与える影響

神戸大学 内海域環境教育研究センター 林 美鶴

1. 目的

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

本研究の目的は、海底堆積物が津波により巻き上げられる事による栄養塩溶出の変化を明らかにすることである。大阪湾3箇所海底堆積物を採取し、洗掘と津波後の再堆積を模擬したコアを作成し、栄養塩溶出速度や間隙水中栄養塩濃度鉛直分布の現状（コントロール）との比較を行った。

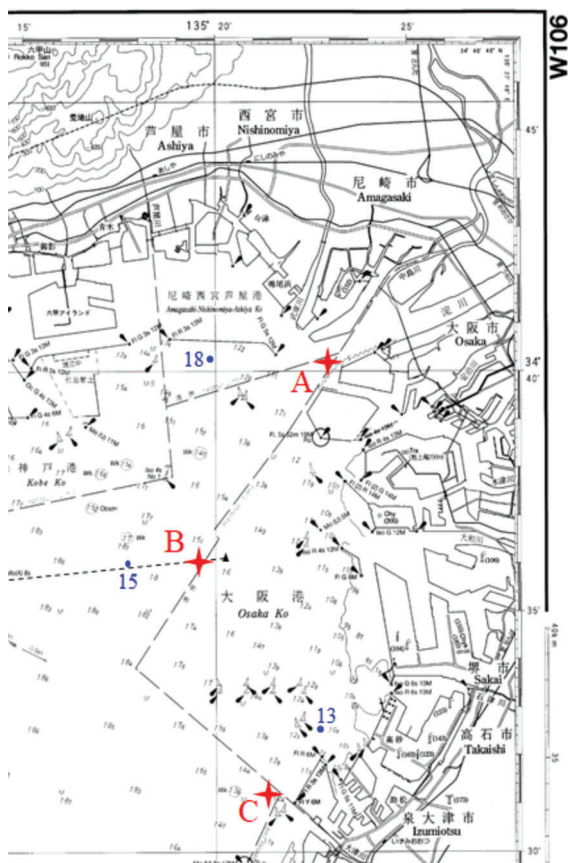


図2 溶出実験装置

図1 採泥・採水地点

2. 方法

図1に示すA,B,Cの3地点でコアサンプリングと、海底直上水の採水を行った。先行研究の堆積物巻き上げ・輸送シミュレーション結果から、A地点では堆積物の洗掘が、B・C地点では再堆積が起これると予想され、B・C地点は底質が異なる。A・C地点で各3本、B地点で6本の堆積物コアを採取した。採取したコアで、現状を表す「コントロール」コア、津波により表層堆積物が2cm洗掘された状態を想定

した「洗掘」コア、洗掘された堆積物が再堆積した状態（表層堆積物を曝気し被せた）を想定した「再堆積」の3種類のコアを作成した。いずれのコアも、採水・濾過した現場海水で堆積物上を満たし、溶存酸素・水温センサー、プロペラ、採水チューブを入れ、シール・オイルで密封した。プロペラ回転数 20 rpm（堆積物が巻き上がらない速度）で、直上水をかき混ぜて均一にした。図2の通りにコアを並べ、実験室内温度を夏季の平均的な泥温 23°Cに保った。直上水中の溶存酸素飽和度が 0%になった後、毎日 2 回直上水の採水を行うと共に採水量の海水を曝気した現場海水で補充し、溶出実験を行った。コアサンプリング直後、及び溶出実験 1 週間後に、コアを表面から 1cm ずつ 3 層に切り分け、遠心分離機にかけて間隙水を採取した。B 地点のコアは 40 日後まで溶出実験を行った後、間隙水を採取した。採水した現場海水、直上水、間隙水は直ちに濾過して冷凍保存し、後にアンモニア態窒素 (NH₄-N)、硝酸態窒素 (NO₃-N)、亜硝酸態窒素 (NO₂-N)、リン酸態リン (PO₄-P)、ケイ酸塩 (SiO₂)、溶存態炭素 (NH₄-N)、及び溶存有機体窒素 (DOC) の各濃度を測定した。これら無機塩の溶出速度を、コアインキュベート法と数学モデル法によって推定した。

3. 結果

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

4. 成果報告

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

5. 研究組織

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

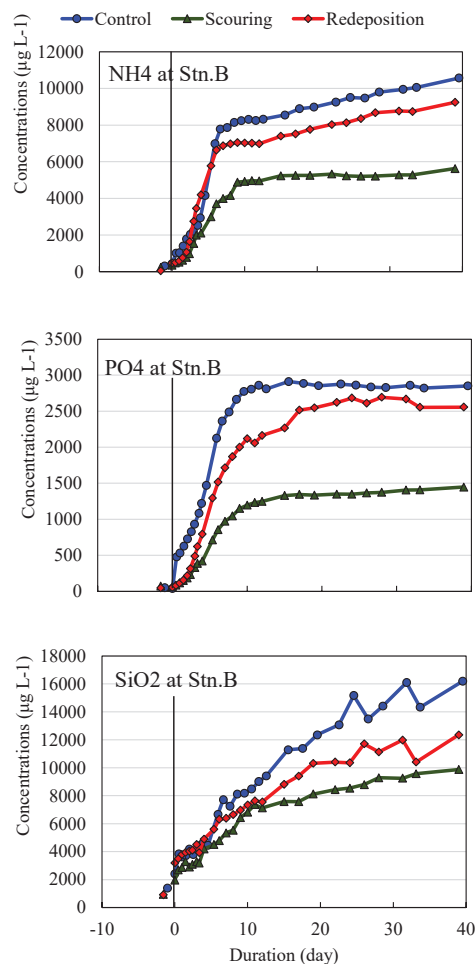


図3 直上水中濃度の時間変動

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

研究代表者 鹿児島大学学術研究院理工学域 柿沼太郎

研究の目的

辻・及川は、2層流体における弱非線形・弱分散モデルを用いて、孤立波の2次元相互作用の数値解析を行ない、ソリトン共鳴に伴ってステムが生成し得ることを示した。これに端を発したこれまでの共同研究において、非線形性及び分散性が強い内部波が相互作用する場合を対象として、変分原理に基づく波動方程式系を適用した数値解析により、孤立波の2次元相互作用に起因するステムの生成や、生成されたステムの挙動に関して調べてきた。そして、2層流体において、ステムの振幅増幅率が **critical level** により抑制されること等が示された。ところで、長周期の表面波及び内部波が生成・伝播する東シナ海といった実海域は、様々な地形によって構成されているが、こうした水深の変化が、非線形波動の2次元伝播やソリトン共鳴にどのような影響を与えるのかに関しては、不明な点が多い。そこで、今年度は、様々な形状の海底地形が、表面波や内部波の伝播過程に与える影響を数値解析によって調べる。本研究で明らかにしようとする非線形波の挙動特性は、東シナ海の大陸棚近傍や九州西岸域を対象とした波・流れ場の研究、例えば、現在、辻が行なっているモデル計算に基づく研究等に対して、基礎的知見を与えることが期待される。

研究の具体的方法

具体的には、表面波や内部波を対象とし、次の各事項を目的として研究を進めた。

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

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

主要な成果

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

ミュレートした。

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

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

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

研究成果報告

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

辻 英一: 東シナ海における順圧-傾圧エネルギー変換の解析, 京都大学数理解析研究所 RIMS 共同研究(公開型)「非線形波動現象の数理とその応用」, 2023.

Kakinuma, T. Numerical simulation of surface and internal wave excitation due to an air pressure wave. *Geol. Earth. Mar. Sci.* 5(3), 1-5, 2023.

Kakinuma, T. and Hisada, M. A numerical study on the response of a very large floating airport to airplane movement. *Eng* 4(2), 1236-1264, 2023.

参考文献

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

組 織

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

東シナ海から日本海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

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

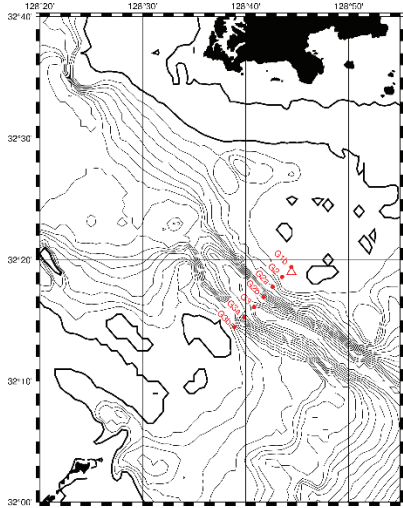


図1. 観測点。△がADCP設置点である。

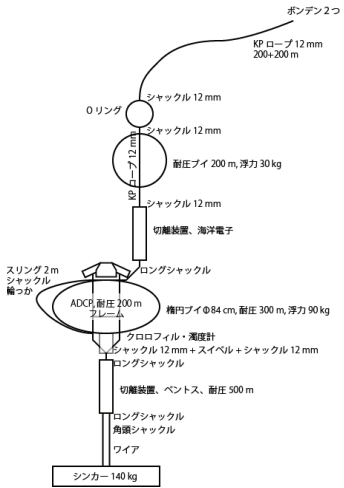


図2. 係留系の概略図。ADCPより上部は設置後に切り離される。

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

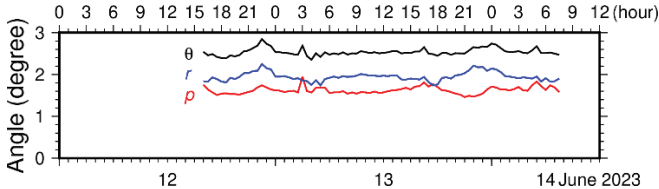


図3. pitch (p) と roll (r) の時系列。ADCPの傾き θ は、 $\cos \theta = \cos p \cos r$ とした。

- | | | |
|------|-------------------|----------------------------|
| 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 | 池浦 繁 (研究協力者) |
| | 山口県 水産研究センター | 渡辺俊輝, 和西昭仁 (研究協力者) |

高スペクトル分解ライダー技術を用いたエアロゾル高度分布観測システムの構築

国立環境研究所地球システム領域 神 慶孝

【本研究の目的】

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

【方法】

本研究では、波長 532 nm と 355 nm の 2 波長で動作する HSRL システムを導入する。ミー散乱と大気分子からのレイリー散乱を分離して測定するため、波長 532 nm ではヨウ素吸収フィルターを、355 nm では干渉計を高分解能分光素子として用いる。2021 年度に波長 532 nm の HSRL システムを応力研ライダーに導入し、連続観測を開始している。今年度は波長 355 nm の HSRL システムの導入を進めるとともに、波長 532 nm の HSRL 観測データの解析を行った。レイリー散乱信号の高度減衰量からエアロゾル消散係数を抽出し、全散乱（ミー散乱+レイリー散乱）信号とレイリー散乱信号の比をとることで後方散乱係数を抽出した。さらに、体積偏光解消度と後方散乱係数から粒子偏光解消度を導出した。また、消散係数と後方散乱係数の比（ライダー比）を計算した。

【結果】

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

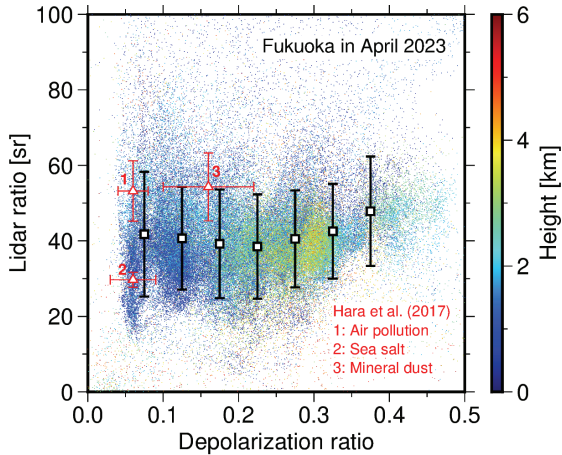


図 1 2023 年 4 月に九大 HSRL で観測されたライダー比と偏光解消度の散布図

【今後の展望】

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