

[26]全国共同利用研究成果報告

<https://doi.org/10.15017/6796417>

出版情報：全国共同利用研究成果報告. 26, 2023-03. 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

海洋や河川上で風シアが生成要因となって発生する風波の発達は、大気海洋間の運動量・熱・物質輸送に影響を及ぼすことから、この各種の輸送量を計測し正確にモデル化するためには、外乱を除去可能な風波水槽を使用することが重要である。今年度は、応用力学研究所の共同利用水槽にて水位・差圧の同時測定を行い、運動量収支法を用いて、砕波した水面にかかる摩擦速度の推定を昨年度よりも高精度に行った。また、伝熱実験の準備を行った。

・ 序論

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

・ 実験方法および実験結果

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

・ 成果報告（論文、学会発表リスト等）

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

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

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

Table 1: Maximum wind velocity in RIAM wind-wave tank. Values of U_∞ 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).

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

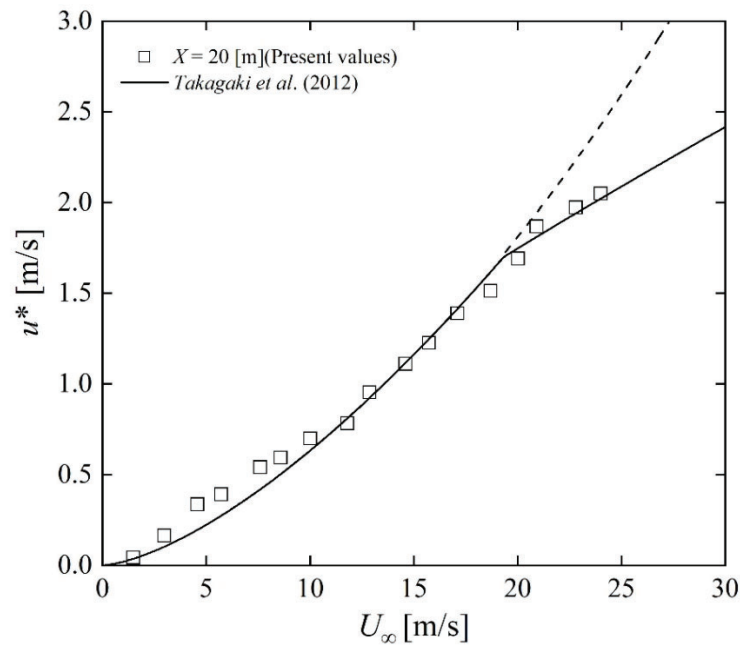


Fig. 1: Relationship between freestream wind speed U_∞ and friction velocity u^* at $x = 20$ m.

瀬戸内海の伊予灘と豊後水道における乱流観測

研究代表者 愛媛大学沿岸環境科学研究センター 郭 新宇

背景と目的

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

研究内容

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

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

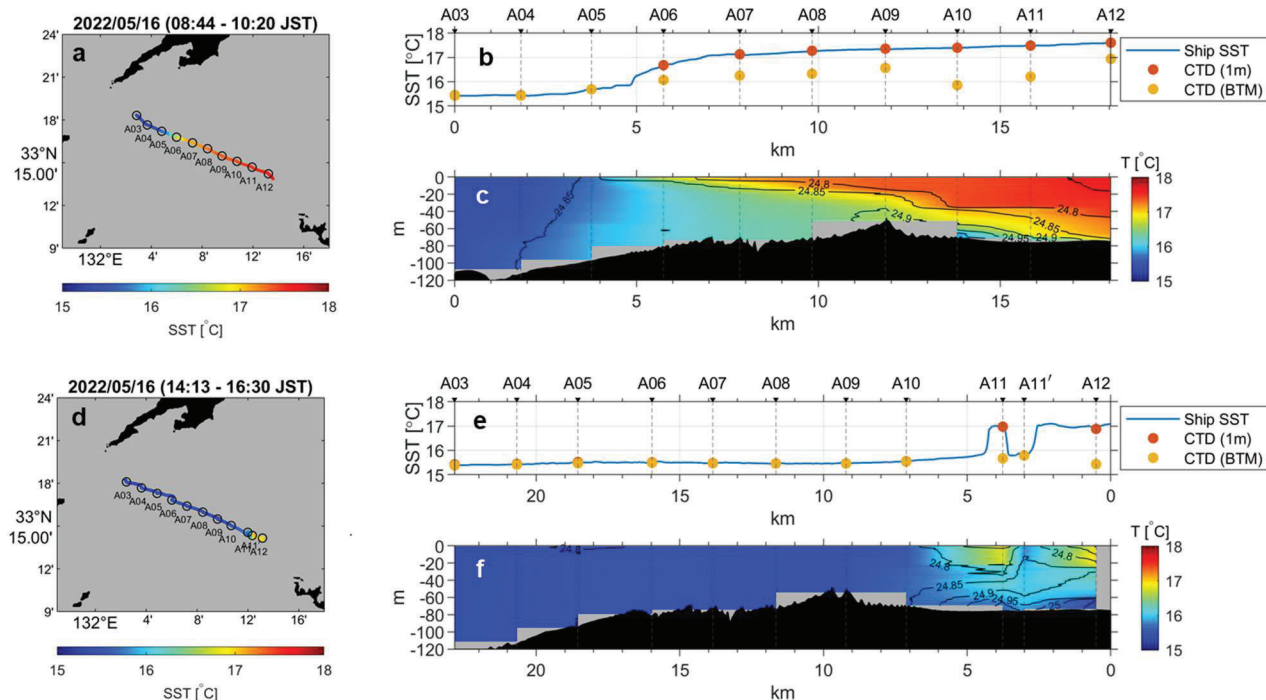


図1 2022年5月16日大潮期の(a-c)上げ潮から下げ潮、および(d-f)下げ潮から上げ潮にかけての調査で得られた水温分布。(a, d) 航跡上の海面水温マップ。(b, e) 船舶搭載の水温計とCTDによる水温、(c, f) CTDによる水温の断面図。横軸と縦軸は航跡に沿った距離及び深度であり、等値線は海水密度(σ_t)を示す。

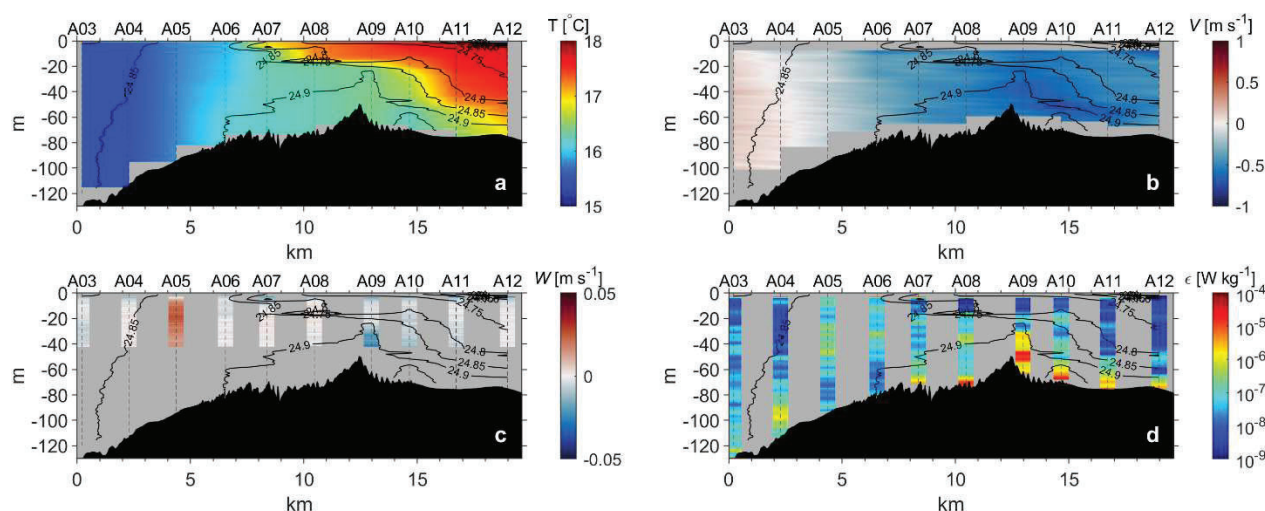


図2 5月17日の下げ潮から上げ潮にかけて実施した乱流計 TurboMAP と流速計 ADCP による断面観測結果。(a) 水温、(b) 船底に設置された 300-kHz ADCP で計測された観測断面に沿う方向の流速 V (北西向きを正とする)、(c) 舷側から吊り下げた 600-kHz ADCP で計測された鉛直流速 W (上向きを正とする)、(d) TurboMAP-5 で計測された乱流運動エネルギー散逸率 ϵ 。各図中の黒実線は海水密度 (σ_t)、黒いシェードは海底地形を示す。

研究組織

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

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

気象研究所 気象観測研究部 石元裕史

・要旨および目的

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

・研究方法

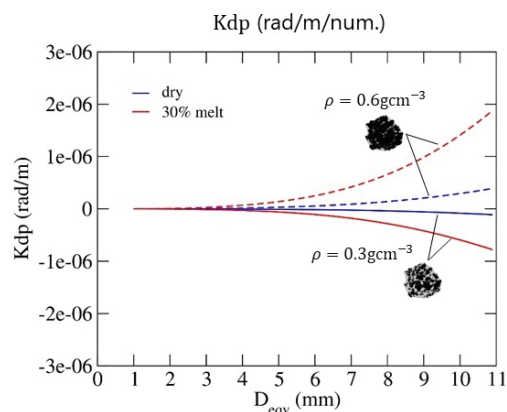
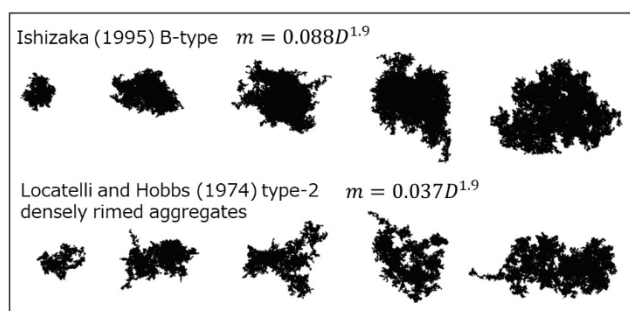
氷晶・降雪粒子散乱特性については、粒子形状の精緻化（あるいは高度化）や散乱計算手法などについて検討し、散乱特性計算はその一部を気象研側が実施する。計算結果はデータベースとし大気物理研究室側に提供する。レーダ波長での粒子散乱特性は DDA または FDTD 法を用い、ライダー波長では気象研の幾何光学近似法 (GOA) および改良幾何光学近似法 (GOIE) を高度化して計算する。その計算結果をもとに大気物理研究室の物理モデルや放射伝達計算手法の改良などを支援する。

・研究結果

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

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

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



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

参考文献

- [1] Ishimoto H., S. Adachi, S. Yamaguchi, T. Tanikawa, T. Aoki, and K. Masuda, 2018: Snow particles extracted from x-ray computed microtomography imagery and their single-scattering properties. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 209, 113-128.
- [2] Shishko.V.A, D.N.Timofeev, A.V.Konoshonkin, N.V.Kustova, N.Kan, I.V.Tkachev, K.Masuda, H.Ishimoto, H.Okamoto, A.G.Borovoi. 2022: Backscattering characteristics of optical and electromagnetic waves in joint sensing of cirrus clouds by a polarizing lidar (0.355 μ m) and a 94GHz radar. *Atmospheric and Oceanic Optics*, Vol.35-6, 775-781.

・研究組織

研究代表者 気象研究所 石元裕史

研究協力者 九州大学応用力学研究所 佐藤可織

研究協力者 九州大学応用力学研究所 岡本 創

波浪と GNSS 反射信号との対応関係の観測

京都大学大学院理学研究科 根田昌典

目的

本研究は、海表面の水位変動（水位と波浪）によって GNSS 反射波が受ける影響の評価する研究の一環として実施する研究である。波浪と GNSS 反射波強度の関係に影響を与えうる海上風とうねりとの非等方的な関係について評価する。今年度も実地観測が困難であったため、過去に得られた波浪の 2 次元スペクトルに代表される詳細な波浪情報を用いて解析を行い、うねりの存在が風波の状態に与える影響を評価する。平成 30 年度の共同利用研究の結果得られたうねりの波形勾配と風波のエネルギーの関係をさらに詳細に検討し、風波エネルギーに加えてうねりの非等方的な影響に着目する。

手法の概要

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

$$u_{w*} = \frac{H_s^2}{gB^2T_s^3} \quad (1)$$

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

結果の概要

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

$$\bar{E}_w = b_{w*} \tilde{W}_*^{a_{w*}} \quad (2)$$

$$\bar{E}_{w10} = b_{x10} \tilde{X}_{10}^{a_{x10}} \quad (3)$$

ここで、 $\bar{E}_w$ は風波の無次元エネルギー、 $\tilde{W}$ と $\tilde{X}$ はそれぞれ無次元の波齢とフェッチであり、添え字の*と 10 はそれぞれ風波摩擦速度と 10m 風速で無次元化されていることを示す。 a と b はそれぞれ経験的に決定される係数を表す。KH-14-1 の観測データを用いてそれぞれの係数を求めた。図 1 はこの関係式からの個々の観測データの乖離をうねりの波形勾配に対して調べたものである。波齢とエネルギーの関係からの乖離については系統的な傾向はみられないが、フェッチとの関係については、波形勾配が大きい場合に無次元エネルギーが減少する傾向がみられる。式(2)と式(3)はそれぞれ風波のエネルギーに関する経験則であるが、波齢との関係については波の状態に関するものであるのに対して、フェッチとの関係については風波の励起に関する関係であることに注意すると、このような差異は風から風波へのエネルギー輸送の組み込み方が影響していると考えられる。これには輸送係数とともに風波が風向となす角度にも関係していると予想される。

うねりがエネルギー輸送の関係に影響する可能性として、うねりによる大気海洋境

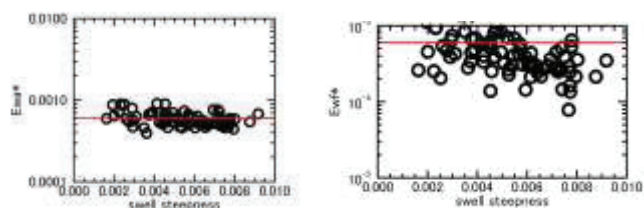


図 1: (左) 風浪エネルギーと波齢との関係式（赤線）からの乖離（縦軸）に対するうねりの波形勾配（横軸）との関係。(右) は同様に風浪エネルギーとフェッチの関係式からの乖離を示す。

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

$$swwsi = \left(\frac{h_s}{h_w} \frac{f_s}{f_w} \right)^2 \cos \theta_s, \quad (4)$$

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 はうねりと海上風の角度を表す.

図 2 は $swwsi$ に対する無次元波浪エネルギーと海上風と風波のなす角度の依存性を示す. 強不安定状態 ($Ri < -0.01$) では $swwsi$ に対するこれらの依存性はほとんどないため描画から除いている. 図中には線形回帰直線も示したが, 風波エネルギーとの関係における回帰直線は統計的に有意ではなかった. 一方, 海上風と風波のなす角度に関しては有意な相関 (0.5) を得た. この関係からは, うねりと海上風の方に大きな差がある場合には, 風波の方向は海上風に対してうねりの進行方向に向かって屈折する傾向がみられる. これがうねりによる抵抗係数への影響に起因するのであれば, うねりによる非等方的な影響によって風応力の方向が変化する一方で, 風波のエネルギーに対応する応力の大きさに与える影響は相対的に弱い可能性が高い. $swwsi$ を構成する各要素の相対的な重要性を検討するために (4) 式から波高比, 周波数比, うねりと海上風の角度をそれぞれ単独で除いた指数で同様の評価をしたところ, どの要素を除いても図 2 のような相関関係は悪化したため, 海上風の方に対する風波の方向の屈折に対してはこれらの各要素がそれぞれ影響していることも分かった (図は非表示).

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

$$\vec{u}_{s*} = \mathcal{R}(\theta_s) \begin{pmatrix} \vec{u}_{b*} \cos \theta_s - A_p \cdot swwsi \cdot c_{ps} \\ \vec{u}_{b*} \sin \theta_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \vec{u}_{b*} - A_p \cdot swwsi \cdot \cos \theta_s \cdot c_{ps} \\ A_p \cdot swwsi \cdot \sin \theta_s \cdot c_{ps} \end{pmatrix} \quad (5)$$

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

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

研究成果報告

口頭発表: 4 件 (別紙論文リスト参照)

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

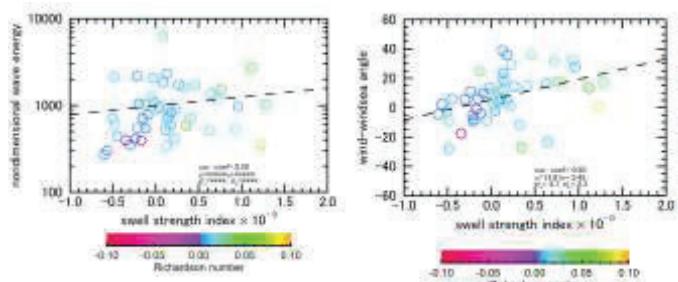


図 2: $swwsi$ に対する (左) 無次元風浪エネルギーと (右) 風と風波のなす角度の依存性. 点の色はリチャードソン数 (Ri) を示し, 強不安定 ($Ri < -0.01$) を除いて示している. 点線は線形回帰直線を示す.

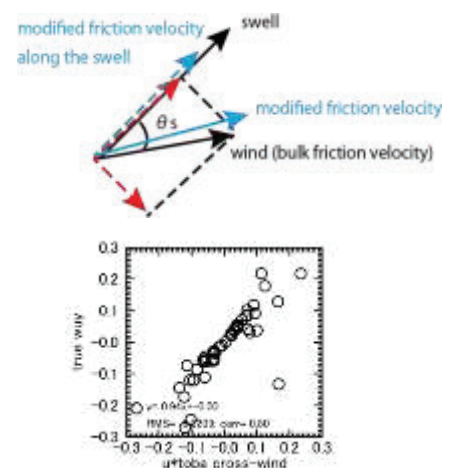


図 3: (上) 修正摩擦速度の概念図と (下) その海上風直交成分 (縦軸) と風波摩擦速度の海上風直交成分の対応

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

公益財団法人 環日本海環境協力センター 小塚 晃

1. 目的

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

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

2. 方法

本研究では、図 1 の範囲における高解像度海洋同化モデル DREAMS_K (以下、DR_K) を作成し、富山湾内を水平解像度 500m、鉛直方向を水深 1~1092m (61 層) とし、流向・流速、水温、塩分を計算した。降水は気象モデルの降水量データを同化し、さらに河川の淡水流入量を変化させるため富山湾に流れ込む 5 つの一级河川における実際の日別河川流量データを同化した(図 1)。モデルにおいて、各河口部の地形を南側に 0.5~2 km 程度掘り込み、実際の河口での水の混合を再現した。

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

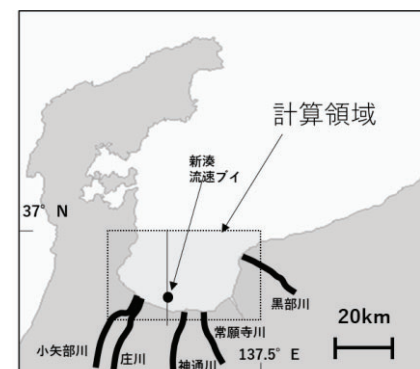


図 1. 計算領域と観測点の位置図

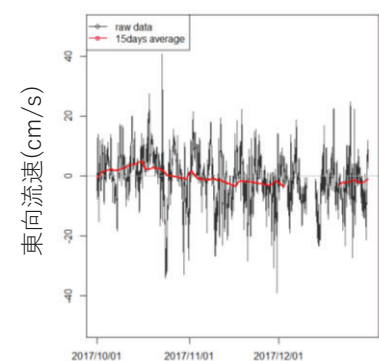


図 2. 新湊ブイにおける実測流速と
15 日平均流速

3. 結果および考察

新湊ブイの実測した東西流速の 15 日平均流速は、10 月中旬に反時計回り（東向き）に 5 cm 程度で流れているが、10 月下旬に時計回り（西向き）に変化し、12 月上旬に最大で 3 cm 程度の大きさをもっていることが分かった。10 月 23 日に最大の 38 cm を記録し、このとき台風 21 号が日本に接近していた。

DR_K のシナリオ 1 において、新湊ブイと同場所、同期間の東西流速を調べると、10 月上旬に反時計回り（西向き）に流れ、その後時計回り（東向き）に約 2 cm で流れたのち、10 月下旬に反時計回り（西向き）に変化し、その流れは 12 月にかけて弱まっていた。実測値と比較すると、東向き流速が 2 cm 程度小さかったが、流向の反転する時期は概ね一致していた。モデルにおいても、台風 21 号接近に伴う強い流れが確認できた。

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

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

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

今回の研究により、富山湾内の海上風や河川からの淡水流入が富山湾内に冬季に発生する時計回りの流れの強化している可能性が示された。モデルでは対馬暖流沿岸分枝の影響は同じとして計算したが、実際には富山湾周辺海域における沿岸分枝の流路も富山湾内の流れ場に影響を与えと考えられる。今後、観測データを解析し、富山湾内の流れ場に対する風や淡水流入の影響を検証し、富山湾の海洋環境の解明につなげていきたい。

4. 研究成果報告

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

5. 研究組織

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

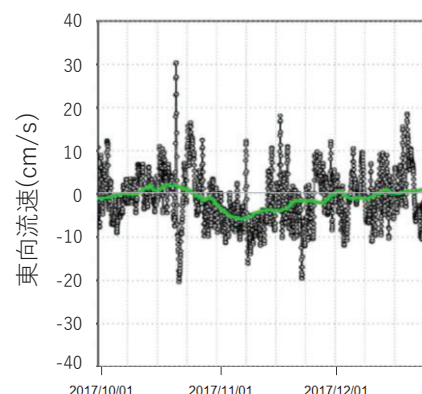


図 3. 図 2 と同場所、同期間における DR_K の実測流速と 15 日平均流速

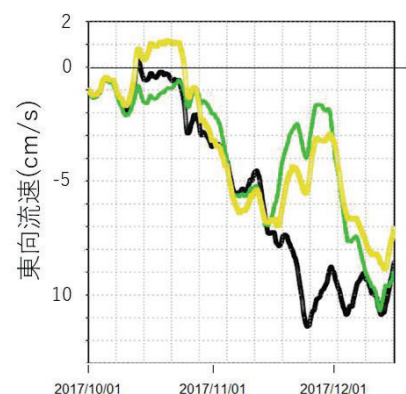


図 4. 新湊沖 50m 深におけるシナリオごとの 15 日平均流速 黒:シナリオ 1、緑:シナリオ 2、黄:シナリオ 3

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

福井県立大学 海洋生物資源学部 田中祐希

1. はじめに

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

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

2. 定式化

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

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{H} \nabla^2 \psi_T + \nabla \frac{1}{H} \cdot \nabla \psi_T \right) + f \left[\frac{1}{H} \nabla^2 \phi + \nabla \frac{1}{H} \cdot \nabla \phi - J \left(\frac{1}{H}, \psi_T + \psi_S \right) \right] = 0, \quad (1)$$

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

$$C_{S \rightarrow T} = \rho_0 \psi_T \left[\frac{f}{H} \nabla^2 \phi + \nabla \frac{f}{H} \cdot \nabla \phi - J \left(\frac{1}{H}, \psi_S \right) \right] = -\rho_0 \psi_T \frac{f}{H} [w_S(0) - w_S(-H)], \quad (2)$$

(ρ_0 は基準密度)が得られる。式(2)は、外部モードと海底地形との相互作用で生じる鉛直流 w_S による渦柱の伸縮に伴って、外部モードから内部モードへのエネルギー変換が生じることを表しているものと理解できる。

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

$$C_{S \rightarrow bc} = \int_{-H}^0 \rho' g w_S dz, \quad (3)$$

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

3. クリル海峡への適用

北太平洋とオホーツク海とを結ぶクリル海峡は、世界で最も強い日周潮起源の鉛直乱流混合が存在する海域として知られている。クリル海峡における鉛直乱流混合は、北太平洋中層水の形成や北太平洋中・深層の子午面循環、さらには北太平洋を中心とした広い領域における十年規模の気候変動に重要な役割を果たすことが指摘されている。Tanaka et al. (2010)は、高解像度の3次元数値シミュレーションによって、クリル海峡における日周 K_1 潮汐のエネルギー散逸率を 23 GW と見積もった。しかしながら、これまで subinertial な内部潮汐へのエネルギー変換率を表す有効な定式化が存在しなかったため、この散逸のうちどの程度が内部潮汐を経由して生じているのかは明らかにされていなかった。

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

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

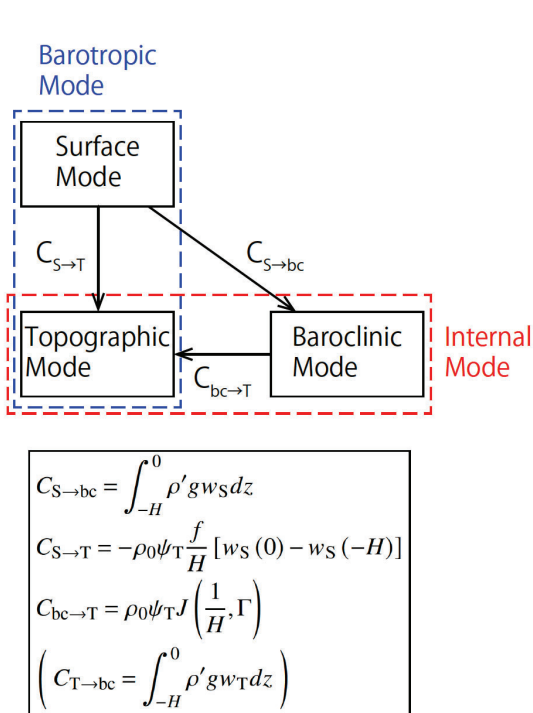


図1: 本研究で得られたエネルギーダイアグラム。

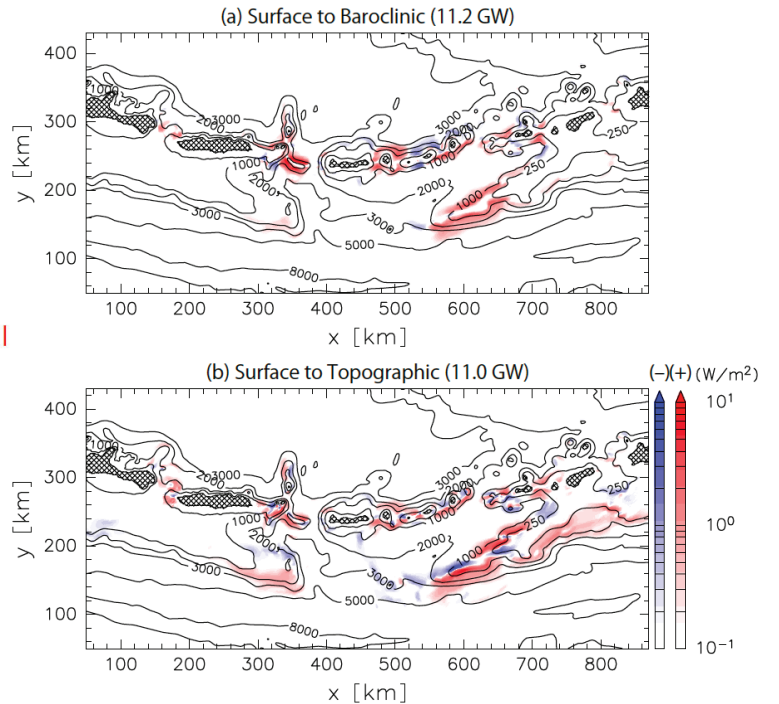


図2: クリル海峡における外部モードから(a)傾圧モード、(b)地形モードへのエネルギー変換率。

2022CR-AO-7

逆推計手法による東アジア域排出量データベースの高度化に向けた研究

一般財団法人電力中央研究所 サステナブルシステム研究本部 板橋 秀一

1. 目的

中国における窒素酸化物 (NO_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) が, その推計には数年を要する問題点がある. この問題に対し, 準リアルタイムの衛星観測データを拘束条件とした逆推計 (トップダウン法) が有用である. 本共同利用研究では, 激変する東アジア域の排出量推移を継続的に把握するため, 逆推計手法を構築して NO_x を対象に排出量データベースを近年まで更新することを目指している. 継続 5 年目となる今年度は, 新型コロナウイルス感染症が広まった 2020 年 1 月以降, 感染症対策のために経済活動状況などが目紛しく変化している近況までを捉えるため, 長期衛星計測データをもとに 2022 年までデータ解析を延伸した. ここではその内容を速報的に報告する.

2. 手法

Aura 衛星に搭載された OMI センサーによる対流圏 NO_2 カラム量 (大気柱総量) を用いた. 解析には Level 3 の $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ の日別の格子点データを利用し, 日別値から月平均値, 年平均値を算出した. 解析対象は 2005 年から 2022 年までとした.

3. 結果と考察

日中韓 3 カ国について, 2005 年から 2022 年までの国毎に平均した NO_2 カラム量の経年変化を示す (図 1). 中国については, 2011 年をピークに NO_2 カラム量は減少傾向であり, ボトムアップ推計

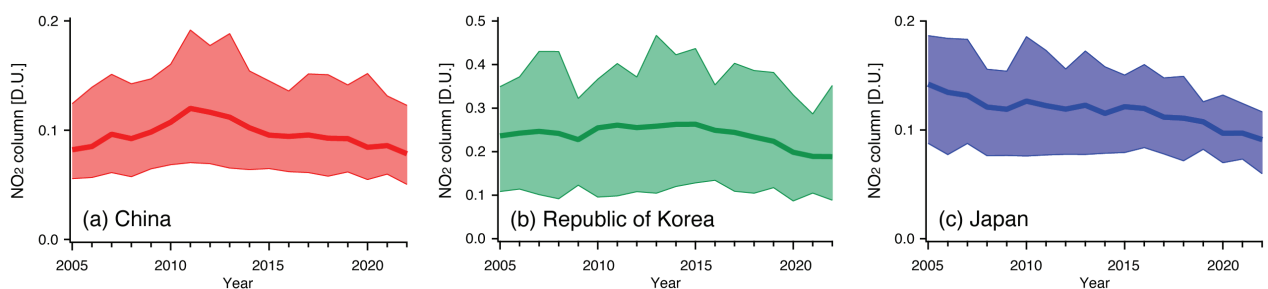


図 1. (a) 中国, (b) 韓国, (c) 日本における 2005 年から 2022 年までの NO_2 カラム量の経年変化. 実線は年平均値を, 月平均最大および最小値の範囲を示す.

による NO_x 排出量推計結果 (Zheng et al., 2021) とも整合していた。韓国はほぼ横ばいであったが、2016 年以降、緩やかな減少傾向を見せた。また、日本は単調な減少傾向を示した。

特筆すべきは、新型コロナウイルス感染拡大初期の 2020 年と比較して、2021 年・2022 年と日中韓 3 カ国で減少傾向が続いていた点である。この点を明瞭にするため、2005 年平均値で規格化した NO_2 カラム量を解析した (図 2)。中国、韓国、日本のいずれについても、2022 年平均の NO_2 カラム量は解析対象の過去 18 年間で最小となることが明らかとなった。中国については、2022 年平均値は 2005 年平均値を初めて下回ることとなり、 NO_x 排出総量としての変化量を推計する必要がある。韓国と日本も 2022 年平均値は過去最小であり、経済活動状況等とも照合させ、 NO_x 排出量としての実態の解明を進める必要がある。新型コロナウイルスの感染拡大以降、社会状況が急変しているが、準リアルタイムの衛星計測データの長期解析から近況までの情報を得ることができた。

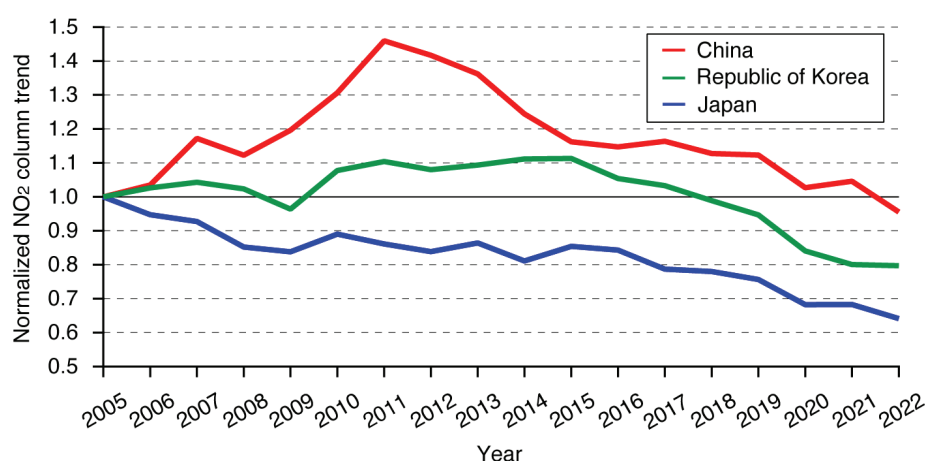


図 2. 2005 年平均値で規格化した NO_2 カラム量の経年変化。

4. まとめ

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

・参考文献

- Zheng, B. et al.: Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of clean air actions, *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 14095–14111 (2018).
- Zheng, B. et al.: Changes in China's anthropogenic emissions and air quality during the COVID-19 pandemic in 2020, *Earth Syst. Sci. Data*, 13, 2895–2907 (2021).

若狭湾におけるズワイガニ資源の季節・経年変動の特徴

福井県立大学 渡慶次 力

1. 目的

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

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

2. データと方法

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

3. 結果

3.1 季節変化

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

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

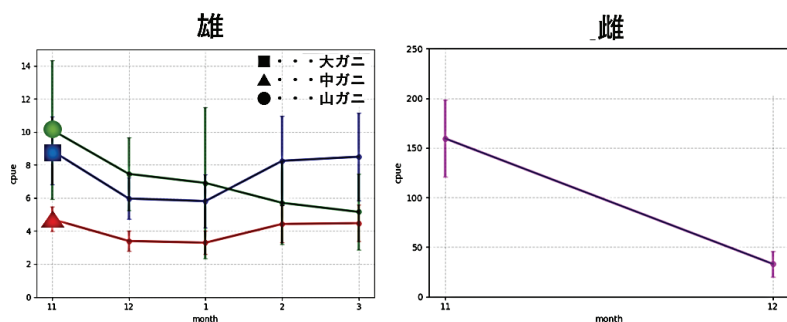


図1 ズワイガニ漁期中の月平均CPUEの季節変化(図中のポイントは平均値、バーは標準偏差値)

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

3.2 経年変動

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

ち、雌雄の漁場は、経年的に位置が変わらず、その資源密度が異なることが分かった。

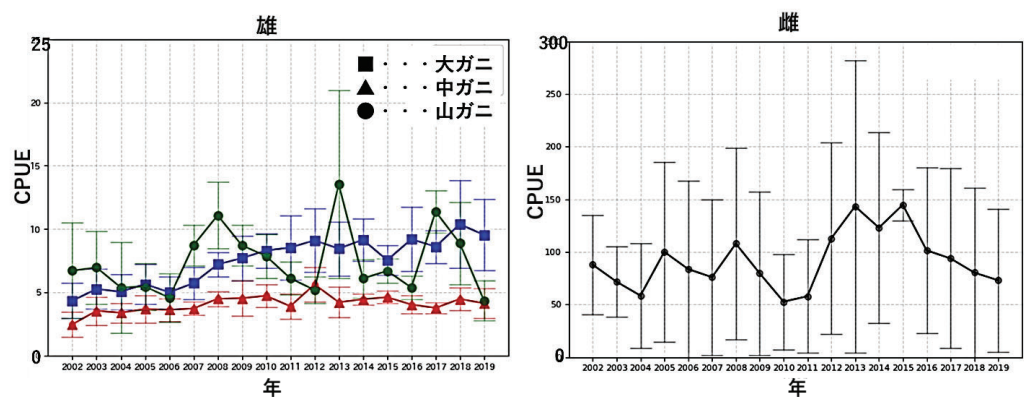


図2 ズワイガニ漁期中の年平均 CPUE の変動 (図中のポイントは平均値、バーは標準偏差値)

4. 今後の展開

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

5. 論文等 なし

6. 研究組織

代表者 福井県立大学
 世話人 九州大学応用力学研究所
 協力者 京都府農林水産技術センター海洋センター
 協力者 京都府農林水産技術センター海洋センター
 協力者 福井県水産試験場
 協力者 福井県水産試験場
 協力者 福井県水産試験場
 協力者 福井県立大学
 協力者 九州大学応用力学研究所

准教授
 准教授
 副主査
 技師
 部長
 研究員
 主事
 教授
 教授

渡慶次 力
 千手 智晴
 野口 俊輔
 木下 直樹
 河野 展久
 岩崎 俊祐
 前川 龍之介
 兼田 淳史
 広瀬 直毅

東アジアモンスーンが励起するマルチスケール黒潮変動

鹿児島大学水産学部 中村 啓彦

目的 黒潮流量は夏季に多く、秋～冬季に少ないという観測事実がある。従来のスベルドラップ理論で予測される流量の季節変動はこの観測事実と位相が 180 度異なるが、この矛盾は従来の理論の枠組みでは説明することができない。黒潮の季節変動は、黒潮上の風応力が黒潮の大・中規模現象を駆動する入口の仕組みと、黒潮の運動エネルギーが乱流スケールにカスケードダウンし散逸する出口の仕組みで支配されており、入口と出口の仕組み、そして双方を繋ぐエネルギー遷移の仕組みを統合的に調べる必要がある（中村 2017）。黒潮エネルギーの散逸過程については、近年海峡域における地形間相互作用に起因した内部波の砕波（Nagai et al. 2017, Nagai et al. 2021）に加え、陸棚斜面域における対象/慣性不安定から生じる内部慣性重力波の砕波（Nakamura et al. 2021）が考えられるが、その全容を明らかにするためには、流れと乱流の現場観測に加え、数値実験によるプロセスの解明と検証が必要である。前年度までの研究から、トカラ海峡において平瀬と呼ばれる海山（鉛直スケール 500 m, 水平スケール 10 km）上を黒潮が流れることでその背後に渦と内部重力波が生じ、黒潮エネルギーの散逸に寄与する可能性が示唆された。このような背景を踏まえ今年度の研究では、渦と内部波生成に代表される流れと海底地形間の相互作用を経由した黒潮の運動エネルギーの散逸過程を明らかにすることを目的とする。

研究内容 鹿児島大学水産学部練習船「かごしま丸」KG1915 航海（2019 年 11 月 16–25 日）において、トカラ海峡の平瀬で生じる流れと地形の相互作用に関するデータを取得するため、3 台の超音波ドップラー流速計（ADCP, Teledyne RDI 社）と 19 台の水温塩分計（MicroCAT, SeaBird Scientific 社）を用いた係留系による時系列観測を実施した。係留系は平瀬下流側の水深約 350 m の地点に設置し、深度約 180 m の位置に立ち上げたポールブイの上下に ADCP を取り付けることで深度約 50 m から 300 m までの流れを計測した。また、海底からポールブイまでのチェーンに水温塩分計を 6 m 間隔で組み込み、6 秒間隔でサンプリングすることで乱れを含む水温塩分変動を計測した。このデータを基に乱流長さスケール Ellison scale を計算し、Ivey et al. (2018) の方法によって鉛直渦拡散係数 K_p を推定した。観測結果の解釈のために、MITgcm（Marshall et al. 1997）を用いた理想化数値実験を実施した。計算領域に平瀬の地形を配置し、現場観測（Tsutsumi et al. 2017）に基づいて理想化した黒潮を開境界から入力し黒潮と平瀬地形間の相互作用を再現した。潮汐の効果を考慮するため、開境界から半日周期潮汐および日周期潮汐を入力する実験も実施した。計算領域は $240 \text{ km} \times 180 \text{ km} \times 600 \text{ m}$ とし、平瀬背後の擾乱を解像するよう格子幅を水平 200 m 鉛直 5 m とした。粘性・拡散については、背景の鉛直粘性・拡散係数を $1 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ とし、内部波の砕波による密度逆転から Thorpe scale 法に従って鉛直粘性・拡散係数を強化する Klymak and Legg (2010) の乱流スキームを適用して求めた。水平粘性・拡散係数は $1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ で一定とした。

結果 図 1 に KG1915 航海で得られた観測結果を示す。海域で卓越する半日周期の潮汐は、黒潮の流れに対して干潮時に加速し、満潮時に減速する関係にあった。黒潮の流れは表層 200 m をジェット状に南東へ流れる一方で、その下部では半日周期の潮汐変動が支配的であり、平均的には黒潮に対して反流となっていた。この表層の黒潮ジェット下部における半日周期変動は水温にも見られた。鉛直拡散係数の推定値からは、 $10^{-2} \sim 10^{-1} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ の著しい乱流拡散が得られたが、概ね 2 タイプに分類ができ、それぞれの発生には潮汐との対応が認められた。一方は満潮から下げ潮にかけて 250 m 以深の比較的深い層で生じる対流不安定乱流であり、もう一方は干潮時に 200 m 付近の黒潮ジェットの鉛直シア層で生じるシア不安定乱流であった。理想化数値実験はこのような海域の流れと鉛直拡散の変動を良く再現しており、この実験結果の解析から、平瀬下流で観測された流れと拡散に支配的な半日周期変動については、地形背後の渦流が主な要因であることが分かった（図 2）。すなわち、平瀬を乗り越えられない黒潮は、平瀬側方を回り込む流れとなるが、潮汐の効果によって振動境界層を形成し平瀬背後に渦を放出する。このような渦は背景の流れ場により下流に移流されるとともに水平的に傾けられ、鉛直シア層と鉛直不安定層を形成することが明らかとなった。これらのシア層と不安定層が、観測されたシア不安定乱流や対流不安定乱流の発生に寄与していると考えられた。

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

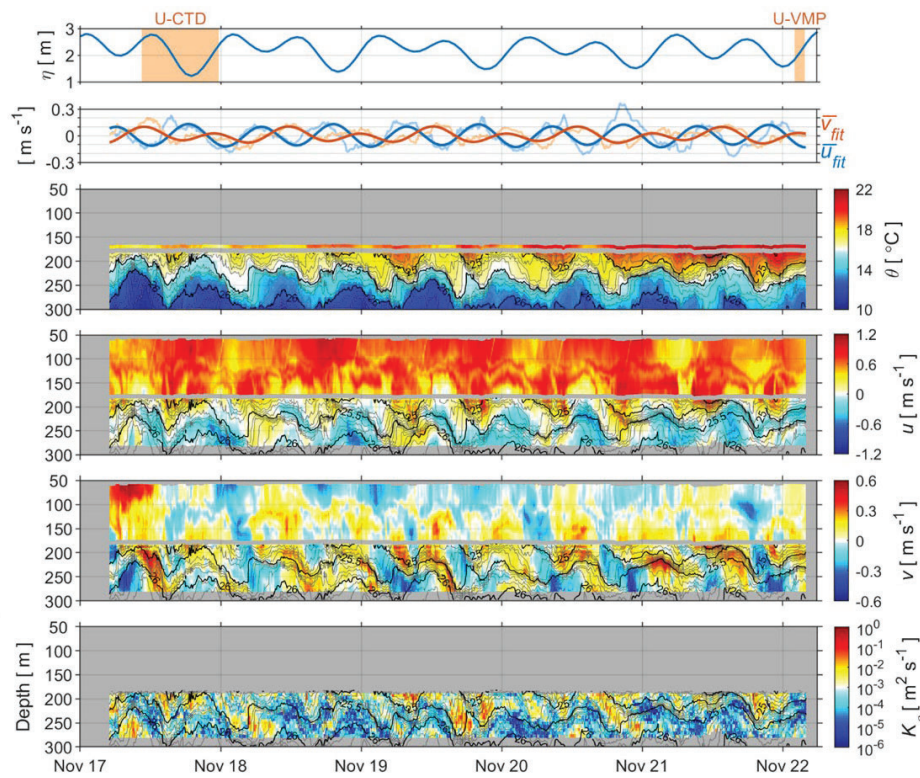
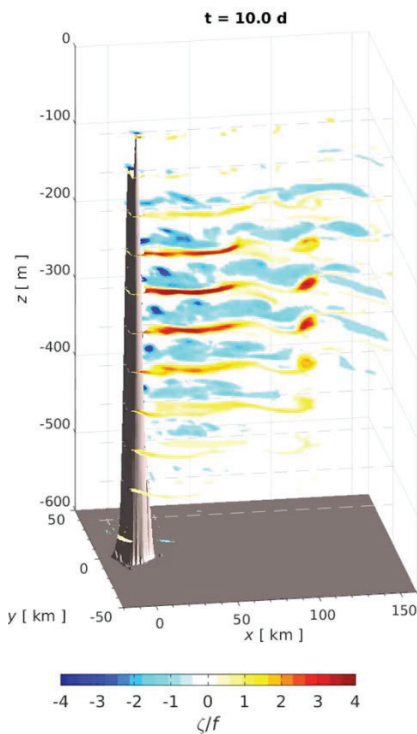
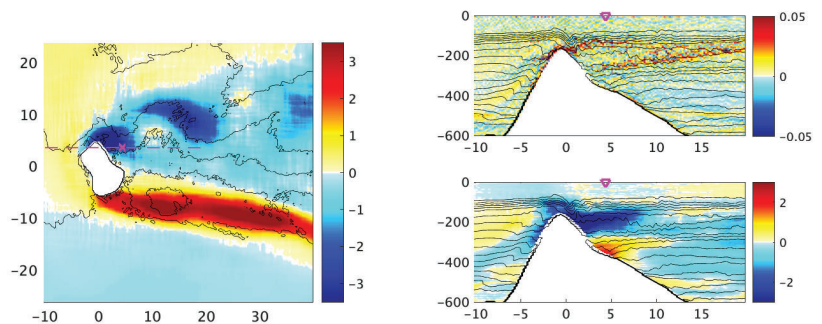


図1 2019年11月17日から21日にかけてトカラ海峡の平瀬上で実施した係留観測結果。(a) 係留点近傍の中之島験潮所における観測潮位 η 。(b) 超音波流速計で得られた流速の鉛直平均値。(c) 水温塩分計で得られたポテンシャル水温 θ 。(d) 主軸方向の流れ成分 u 。(e) 短軸方向の流れ成分 v 。(f) Ellison スケール法によって推定した鉛直渦拡散係数 K_p ($=0.09 L_E^2 Sh$, L_E : Ellison スケール, Sh : 流れの鉛直シアの絶対値)。

(a) $t = 10.000$ day



(b) $t = 16.375$ day (下げ潮：黒潮加速時)



(c) $t = 16.625$ day (上げ潮：黒潮減速時)

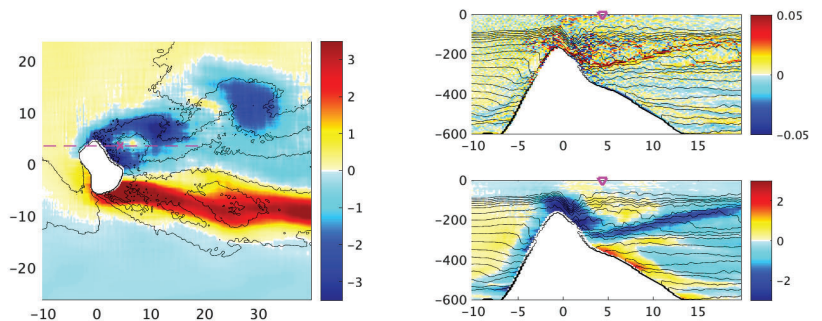


図2 黒潮と潮汐、海山間の相互作用の理想化実験の結果。(a) 計算開始後10日時点におけるコリオリ周波数で無次元化した相対渦度の鉛直成分 ζ/f の3次元分布。(b) $t = 16.375$ 日における無次元渦度 ζ/f の200m 深水平断面図(左図)、主軸方向流速の鉛直シア $\partial u/\partial z$ (右上図)と無次元渦度 ζ/f の $y = 0$ kmにおける鉛直断面図。(c) (b)と同様。ただし $t = 16.625$ 日のもの。

Clarifying mechanisms for the tropical basin interaction using climate model simulations

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

1. Aims of the current research project

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

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

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

2. Methods

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

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

3. Results

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

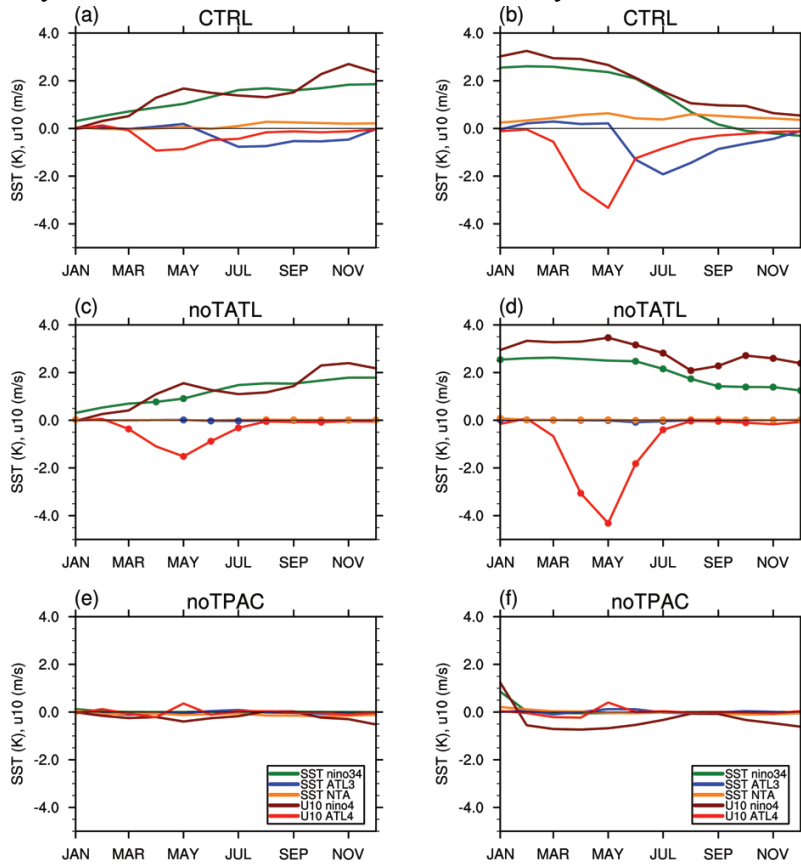


Figure 1. Results from perfect model hindcast experiments with selective SST restoring. In the CTRL simulation, the model evolves freely over the 12-month forecast. In noTATL, the SSTs in the tropical Atlantic are restored to climatology, while in noTPAC, SSTs in the tropical Pacific are restored to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

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

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

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

Achievements

Articles in peer reviewed journals

1. Richter, I., Y. Kosaka, S. Kido, and H. Tokinaga (2022): The tropical Atlantic as a negative feedback on ENSO, Climate Dynamics, <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06582-w>.
2. Kido, S., Richter, I., Tozuka, T., and P. Chang (2022): Understanding the interplay between ENSO and related tropical SST variability using linear inverse models. Climate Dynamics, <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06484-x>

Conference Presentations

1. Hiroki Tokinaga, Shoshiro Minobe, Youichi Tanimoto, Malcolm Roberts (2022): Evaluation of the Pacific Decadal Oscillation in the HighResMIP-PRIMAVERA model simulations. JpGU Meeting 2022.
2. Shiozaki Masahiro, Hiroki Tokinaga, Masato Mori (2022): The influence of the tropical Indian Ocean warming on the Western Pacific teleconnection pattern. JpGU Meeting 2022.
3. Ingo Richter, Yu Kosaka, Hiroki Tokinaga, Shoichiro Kido (2022): Reexamining the tropical Atlantic influence on ENSO in perfect model prediction experiments. JpGU Meeting 2022.

津波による海底堆積物の再懸濁が海洋環境に与える影響

神戸大学 内海域環境教育研究センター 林 美鶴

1. 目的

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

本研究の目的は、津波が溶出現象に与える影響を明らかにすることであり、大阪湾で採取した堆積物を用いて津波後の再堆積を模した溶出実験を行い、アンモニア態窒素 ($\text{NH}_4\text{-N}$) とリン酸態リン ($\text{PO}_4\text{-P}$) の溶出速度を定量化した。また、津波前後の溶出の変化が基礎生産に影響する可能性について考察した。

2. 方法

大阪港の岸和田航路で採取された浚渫土を実験試料とした。底質は粘土質シルトで硫化水素臭があり、大阪湾奥の底質を代表している。図1に示す「コントロール」と「再堆積」の2種類のコアを各3本作成した。コントロール・コアは、採取した堆積物を高さ30cmまで入れて、現状の海底を表現している。再堆積コアには採取した堆積物を28cm入れ、採取した堆積物の一部を曝気、静置して再堆積物させ、これを2cm被せることで津波後の再堆積を表現した。コアを水槽に置いて水を張り、夏季の平均的な泥温 23°C に保った。いずれのコアの上部も人工海水で満たし、シリコン製の蓋で密封した。蓋には溶存酸素センサー、プロペラ、及び2本の採水チューブを取り付けた。プロペラで直上水をかき混ぜ均一にした。直上水中の酸素飽和度から、DO飽和度が0%に達して還元状態になった後、初日、2日目、5日目の3回、直上水を採水した。片側の採水チューブから人工海水 (50ml) を注射器で注入し、もう一方のチューブから押し出された直上水を注射器に採水し、濾過した。溶出実験後に直上水を抜き取り、コア内の堆積物を表面から1cmずつ3層を切り取って、遠心分離機にかけて間隙水を分離、濾過した。

採取した直上水及び間隙水を、 $\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{PO}_4\text{-P}$ のパックテストの試薬で反応させ、分光光度計で吸光度を計測した。人工海水を用いて作成した標準溶液で検量線を作成し定量化した。 $\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{PO}_4\text{-P}$ の溶出フラックスは、コアインキュベート法と数学モデル法によって推定した。

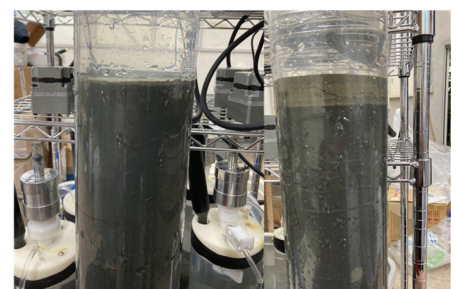


図1 コントロール・コア (左) と再堆積コア (右)

3. 結果

全てのコアで直上水中 $\text{NH}_4\text{-N}$ ・ $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度が上昇した。コアインキュベート法により推定した溶出速度を図2に示す。 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ とも溶出速度は、いずれの評価期間においても、コントロール・コアに比べ再堆積コアの方が小さく、全期間で求めた場合、 $\text{NH}_4\text{-N}$ は71%、 $\text{PO}_4\text{-P}$ は62%に低減した。 $\text{NH}_4\text{-N}$ は還元状態で硝酸塩に変化するが、海中に巻き上げられることで還元反応が進まなかった可能性や、堆積物底層からの $\text{NH}_4\text{-N}$ の拡散に時間を要した可能性が考えられる $\text{PO}_4\text{-P}$ は、堆積物表面が酸化的な場合に酸化膜が形成され、これに $\text{PO}_4\text{-P}$ が吸着された可能性が考えられる。酸素消

費が進むと消滅するため、吸着していた PO₄-P が遊離して、後半に PO₄-P の溶出速度が大きくなったと考えられる。

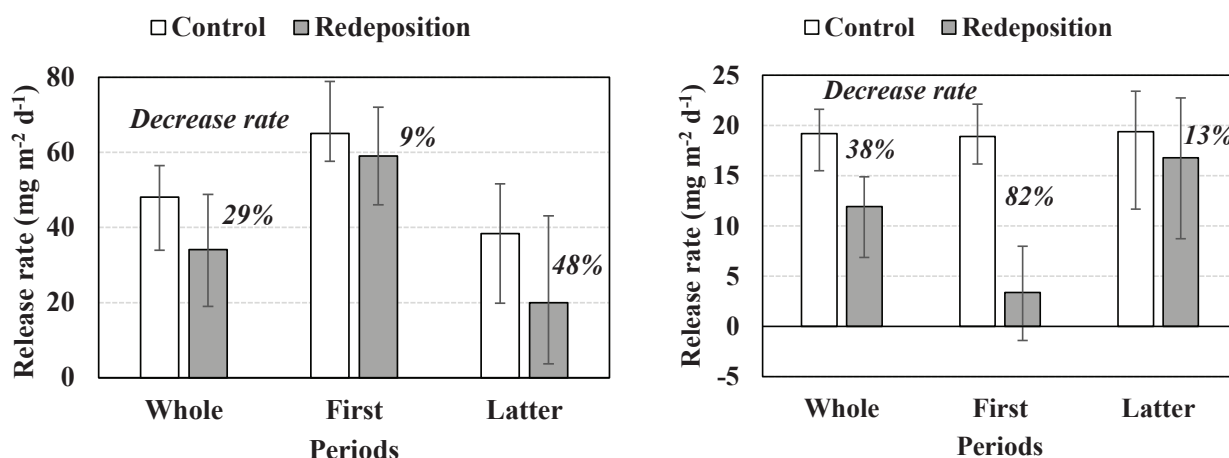


図2 NH₄-N（左）と PO₄-P（右）の溶出速度

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

4. 考察

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

5. 成果報告

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

6. 研究組織

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

等密度面モデルを用いた陸域海洋統合物質循環モデルの構築

京都大学・総合生存学館 山敷 庸亮

1. 研究目的

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

2. 解析手法

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

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

3. 解析結果

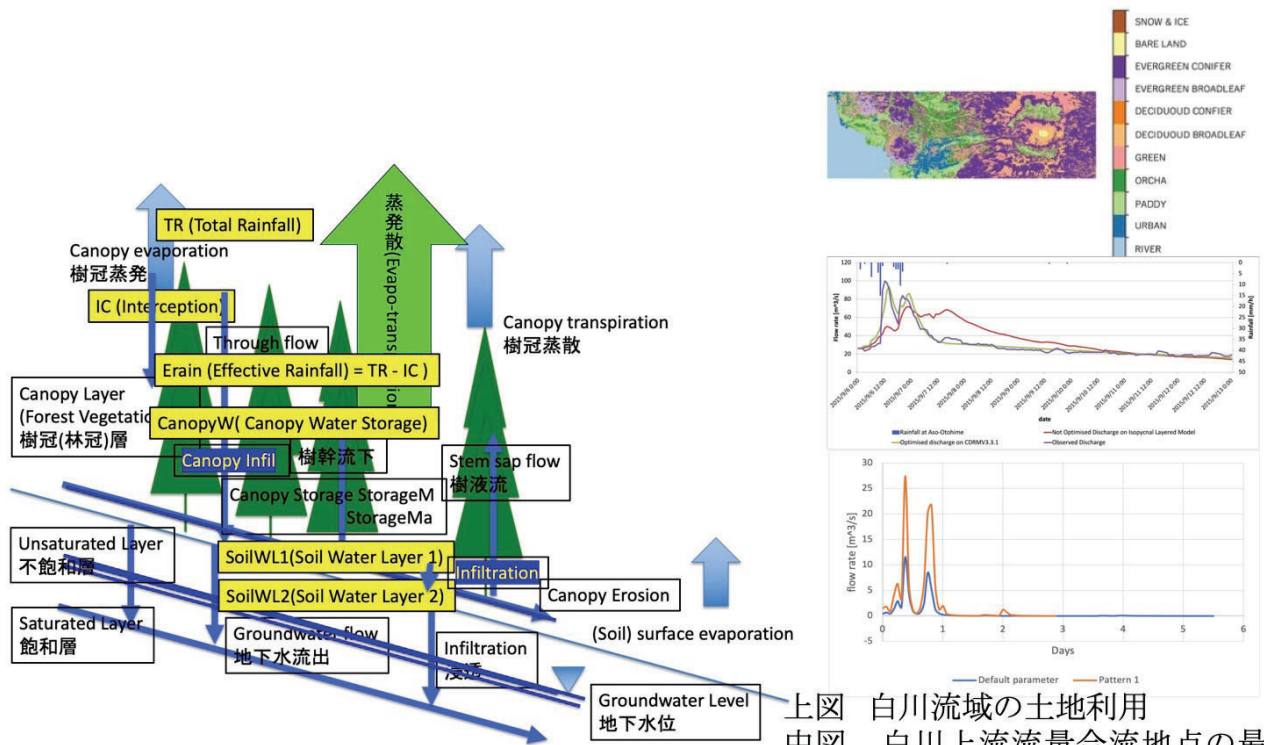
(1) 昨年度と同様陸面過程は一律 60%の雨水が土壌へと到達すると仮定し、さらに一定量でより土壌深くまで吸収される効果と大気へ蒸発する効果が導入してある。計算結果は、ピーク時間が遅れる傾向を示しており、遅れの要因として考えられる底面摩擦を改善する上で、サブグリッドスケールのモデルにどのような摩擦係数を導入するかは引き続き課題である。孤島における流出過程の再現に応用するため、まずは ASTER-GDEM の高解像度地形データ(水平解像度 30m)をもとに屋久島、石垣および西表島の流出モデルを構築した。昨年度構築したモデル(90m)では解像することが難しかった小規模河川を忠実に再現することが可能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

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

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

4. 考察

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



左図 表面流出モジュールの概念図

上図 白川流域の土地利用
中図 白川上流流量合流地点の最適化適用・不適用の結果 (CDRMV3)
下図 白川上流部合流地点流量合流地点の最適化適用・不適用の結果 (ISOPYCNAL)

5. 研究成果

学会発表

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

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

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

論文発表

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

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

研究組織

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

地上ライダー観測を用いた雲相とダスト量の関係の定量化

長崎大学大学院水産・環境科学総合研究科 河本和明

[要旨]

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

[目的]

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

[方法]

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

[結果と考察]

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

[参考文献]

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

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

[研究組織]

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

岡本創（九州大学 応用力学研究所、雲相推定手法についてのアドバイス）の2名である。

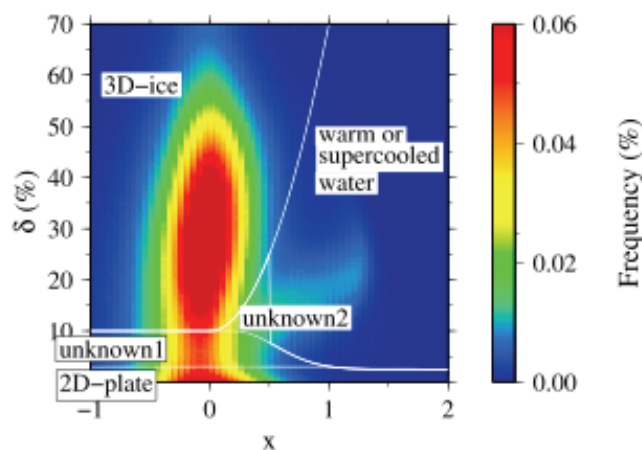


図1 Yoshida et al. (2010)による分類図

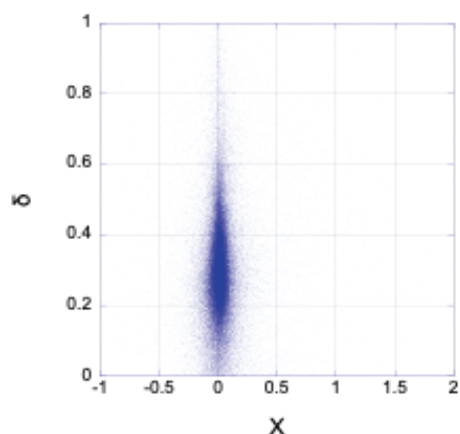


図2 230Kより低い雲層温度の場合

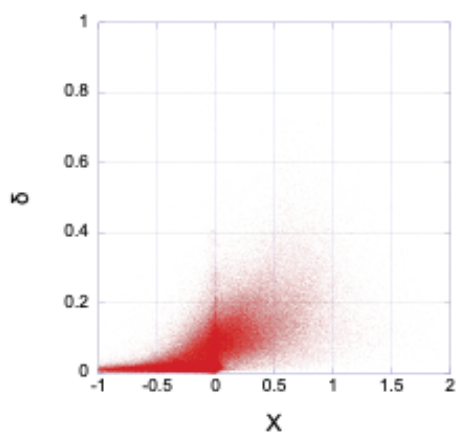


図3 280Kより高い雲層温度の場合

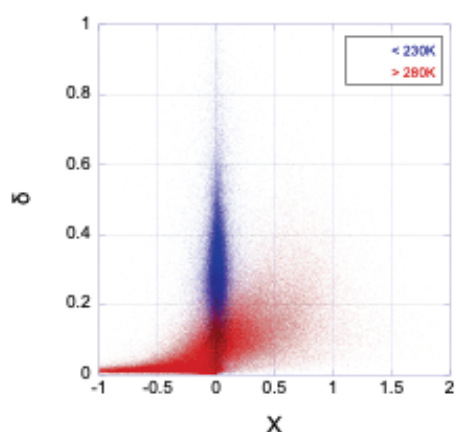


図4 図2と図3の重ね合わせ

表層海洋ドリフターを用いた沿岸表層海流の観測

東京大学 大学院新領域創成科学研究科 小平翼

1 目的

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

2 実験方法

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

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



Fig. 1 波浪計測試験に利用した各種機器(左)と展開の様子(右)

3 実験結果

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

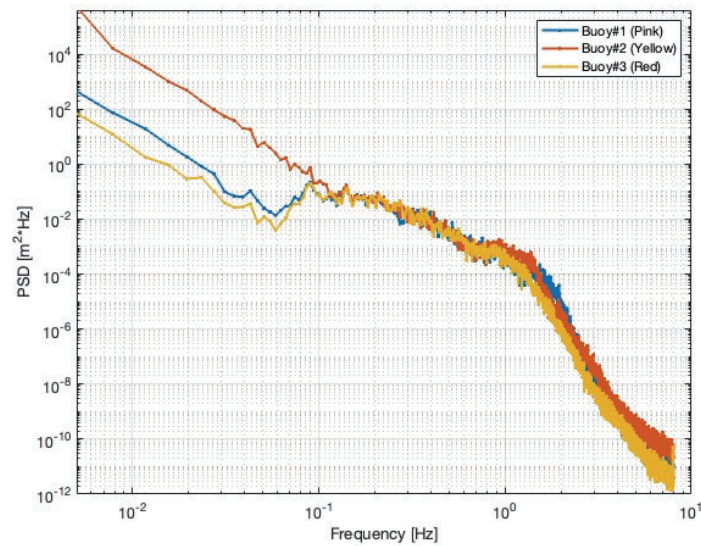


Fig. 2 異なる浮体形状を用いた IMU による波浪計測結果

4 考察

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

5 成果報告

下記の通り、関連する口頭発表を実施した。

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

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

対馬暖流域における山陰沖合－沿岸間の海況変動を把握するための観測研究

長崎大学 滝川哲太郎

1. 目的

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

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

2. 海底設置 ADCP の回収

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

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

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

3. ADCP データ

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

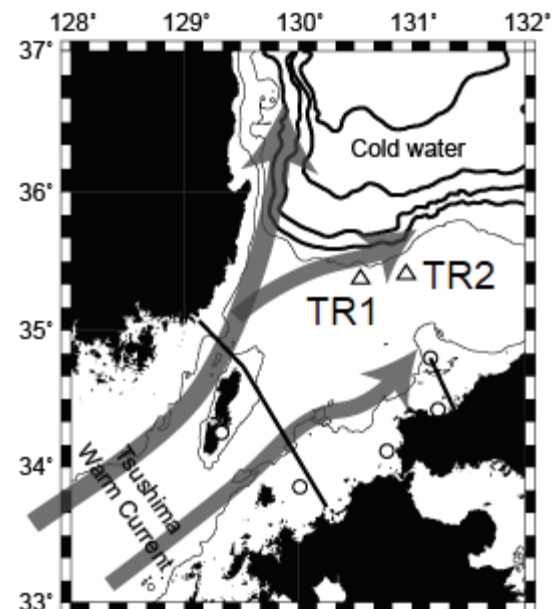


図1. 継続的に行われている観測網（直線：フェリー航路、○：定点モニタリング）と、2021～2022年のADCP設置点△。

周潮流が顕著に現れている。今回、ping 数が少ないことから、鉛直流については十分な精度が得られないと考えられる。

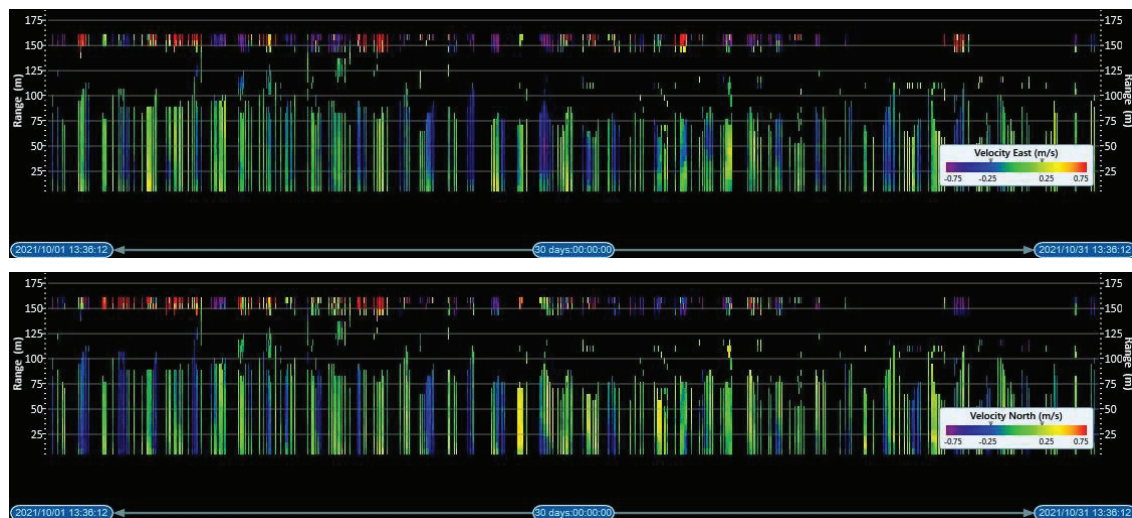


図 2. 2021 年 10 月の生データの例（上図：東向流速、下図、北向流速）。流速データが存在する部分はカラーで表示されている。

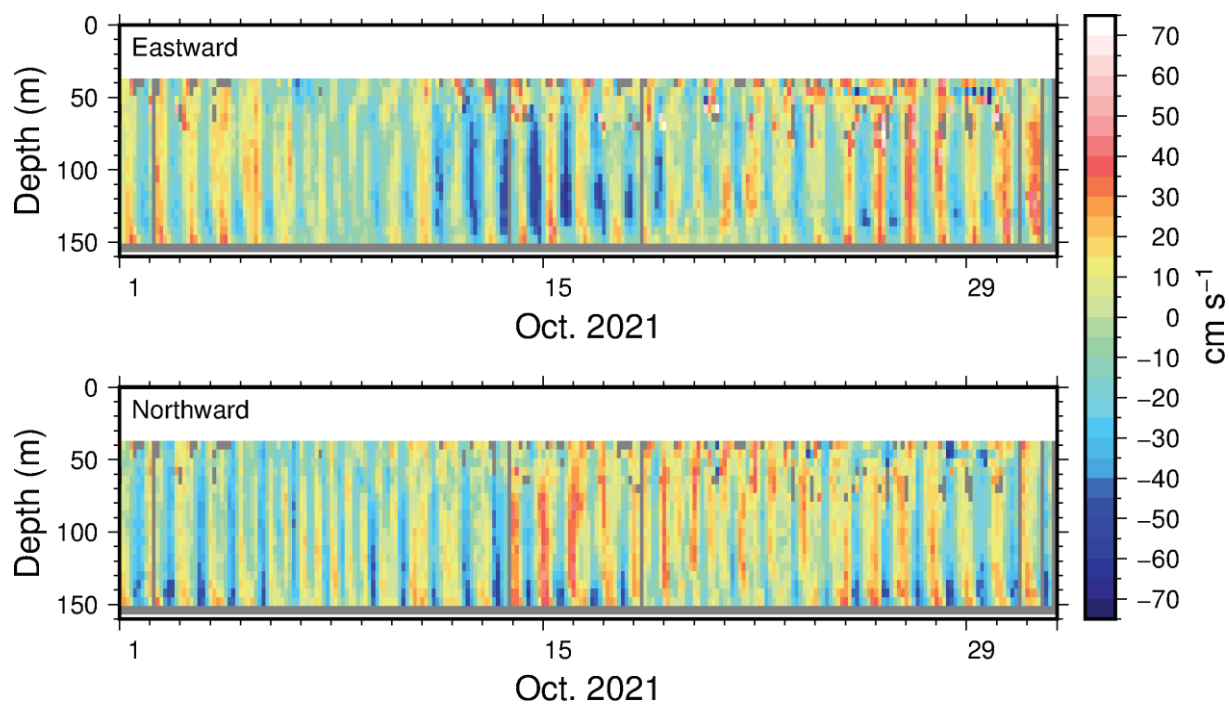


図 3. 一次処理した流速データの例（上図：東向流速、下図、北向流速）。

研究組織

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

滝川哲太郎（研究代表者）
千手智晴（所内世話人），遠藤貴洋（研究協力者）
森本昭彦（研究協力者）
池浦 繁（研究協力者）
渡辺俊輝，廣畑二郎（研究協力者）

沿岸海洋の密度躍層における乱流混合の定量化

東京大学大気海洋研究所/鹿児島大学水産学部 堤 英輔

背景と目的 大陸棚や内湾、沿岸域における乱流混合は、熱や淡水、物質の輸送を通じて海洋環境に深く関わる。特に密度躍層における乱流混合は、下層の栄養塩を有光層へ供給することで海域の基礎生産を支え、また底層へ酸素を供給し貧酸素水塊の消長を促すため生態系に果たす役割が大きい。その定量化は未だ十分でない。本研究では、沿岸海洋の密度躍層周辺で生じる乱流混合の定量化を目的として、乱流微細構造計測データの解析を行う。昨年度までに日本周辺の複数の海域で得られた乱流観測結果について、海域間比較を行ったところ、豊後水道で計測された乱流は、流れのシアや成層強度に関して同等の条件下で比較して、東シナ海陸棚上や三陸陸棚上において得られた値よりも高い乱流エネルギー散逸率と鉛直拡散係数が得られた。この原因として、豊後水道では急峻な地形と強い潮汐により生じた渦や内部波などの擾乱が直接的に乱流を生じている可能性が考えられたが、詳細は不明であった。本年度はこの点について研究を進めるべく、地形が流れ場と乱流に影響を与えている豊後水道と三陸沿岸において乱流の観測を実施した。

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

結果と考察 豊後水道の調査海域周辺では、御五神島やリアス海岸に潮流が作用し、流下方向に島影渦とウェークが形成されていた。また、御五神島一帯は冷水域となっていたことがひまわり衛星データから確認された。全観測点における流れの鉛直シアと浮力振動数の平均値は、それぞれ $Sh^2 = 7.3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-2}$, $N^2 = 9.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-2}$ であり、乱流運動エネルギー散逸率と鉛直渦拡散係数の平均値はそれぞれ $\varepsilon = 1.0 \times 10^{-7} \text{ W kg}^{-1}$, $K_\rho = 2.6 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ であった (図 1a, b)。三陸の調査海域である大槌湾沖は、重茂半島のリアス海岸沿いを南下する津軽暖流の風下ウェークに位置し、三陸沿岸に沿って形成された冷水帯中に位置していた。係留した流速計のデータからは、内部潮汐によるバロクリニックの潮汐流が流れ場に卓越していた。流れの鉛直シアと浮力振動数の平均値は $Sh^2 = 7.4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-2}$, $N^2 = 8.8 \times 10^{-5} \text{ s}^{-2}$ であり、乱流運動エネルギー散逸率と鉛直渦拡散係数の平均値はそれぞれ $\varepsilon = 1.1 \times 10^{-8} \text{ W kg}^{-1}$, $K_\rho = 3.7 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ であった (図 2a, b)。これらの 2 海域は、鉛直シアや成層の強度は平均的に同等であるが、乱流量 (ε, K_ρ) については豊後水道の方が 1 オーダー程度大きかった。乱流量は 2 海域ともに鉛直シアに正の依存性、成層強度 (浮力振動数) に負の相関を持つ Gregg (1989) パラメタリゼーション型の (Sh, N) 依存性を持つことが分かった。この理由として 2 海域は共に流れ・地形間の相互作用に起因する高次モードの流れのシアが卓越する点が考えられた。

研究組織 堤 英輔 (東京大学大気海洋研究所*研究開始時/鹿児島大学水産学部*現所属, 研究代表者), 千手智晴 (九州大学応用力学研究所, 所内世話人), 遠藤貴洋 (九州大学応用力学研究所, 研究協力者)

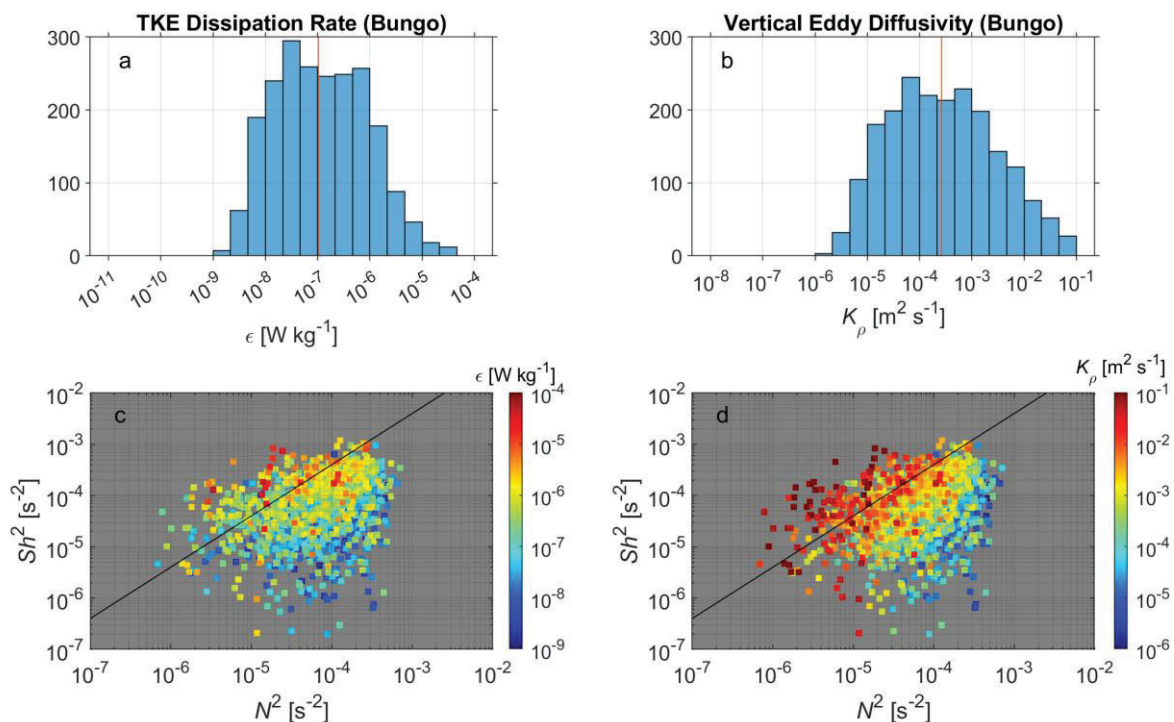


図1 豊後水道における乱流観測結果. (a) 乱流運動エネルギー散逸率 ϵ と (b) 鉛直渦拡散係数 K_ρ のヒストグラム. (c) 乱流運動エネルギー散逸率 ϵ と (d) 鉛直渦拡散係数 K_ρ の二乗浮力振動数 (N^2) と二乗鉛直シア (Sh^2) に対する依存性. 実線は勾配リチャードソン数 ($Ri_g = N^2 / Sh^2$) が 1/4 となる境界を表す.

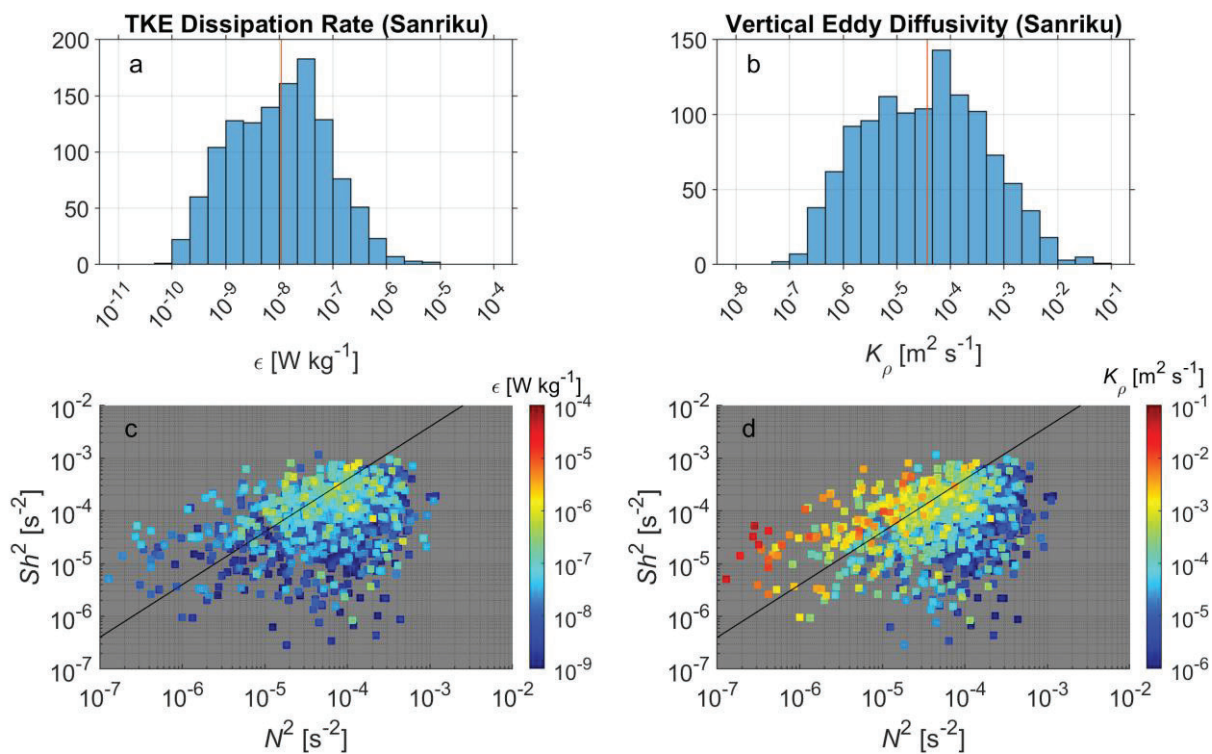


図2 図1に同じ. ただし三陸沖における結果.

国際共同研究体制の構築

地球温暖化に起因する東シナ海の成層構造と物質循環の変化に関する研究

富山大学 大学院理工学研究部 張 勁

Establishment of international cooperative research: changes in stratification and material cycle in the East China Sea related to global warming

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

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

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

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

The preliminary results obtained are as follows: Low-oxygen water has been identified for the summer months of the ECS outer shelf. Based on mixing model

combined with rare earth elements (REEs), as they allow a good distinction between different water masses, the origins of low-oxygen water were quantified. We determined that the low-oxygen water on the outer shelf mainly originated from Kuroshio Subsurface Water and confirmed the contribution of coastal water. Moreover, the influence of factors on the formation of this low-oxygen water may include water stratification, water mixing, organic matter remineralization, spring tide and so on.

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

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



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

高スペクトル分解ライダー技術を用いたエアロゾル高度分布観測システムの構築

国立環境研究所地球システム領域 神 慶孝

【本研究の目的】

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

【方法】

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

【結果】

図 1 に 2020 年 8 月に HSRL で測定された大気エアロゾルの消散係数と後方散乱係数の時間高度断面図を示す。また、各波長（波長 355 nm、532 nm）の消散係数と後方散乱係数の比（ライダー比）も示している。ライダー比は大気エアロゾルの粒径分布や化学組成、形状に依存するため、大気エアロゾル特性を詳らかに調べるための重要なパラメータである。ライダー比の 1 ヶ月間平均値は波長 355 nm で 63.6 ± 11 sr、波長 532 nm で 58.2 ± 13 sr であった。また、オングストローム指数の 1 ヶ月平均値は 1.52 ± 0.7 であった。これらの結果から、観測期間中では硫酸塩や硝酸塩などの粒径が小さいエアロゾルが支配的であったと考えられる。また、大気エアロゾルの光学的厚さは波長 355 nm で 0.40 ± 0.2 、波長 532 nm で 0.23 ± 0.12 であった。これはスカイラジオメーターで測定された光学的厚さ（ 0.41 ± 0.2 、 0.23 ± 0.12 ）とよく一致している。

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

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

【今後の展望】

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

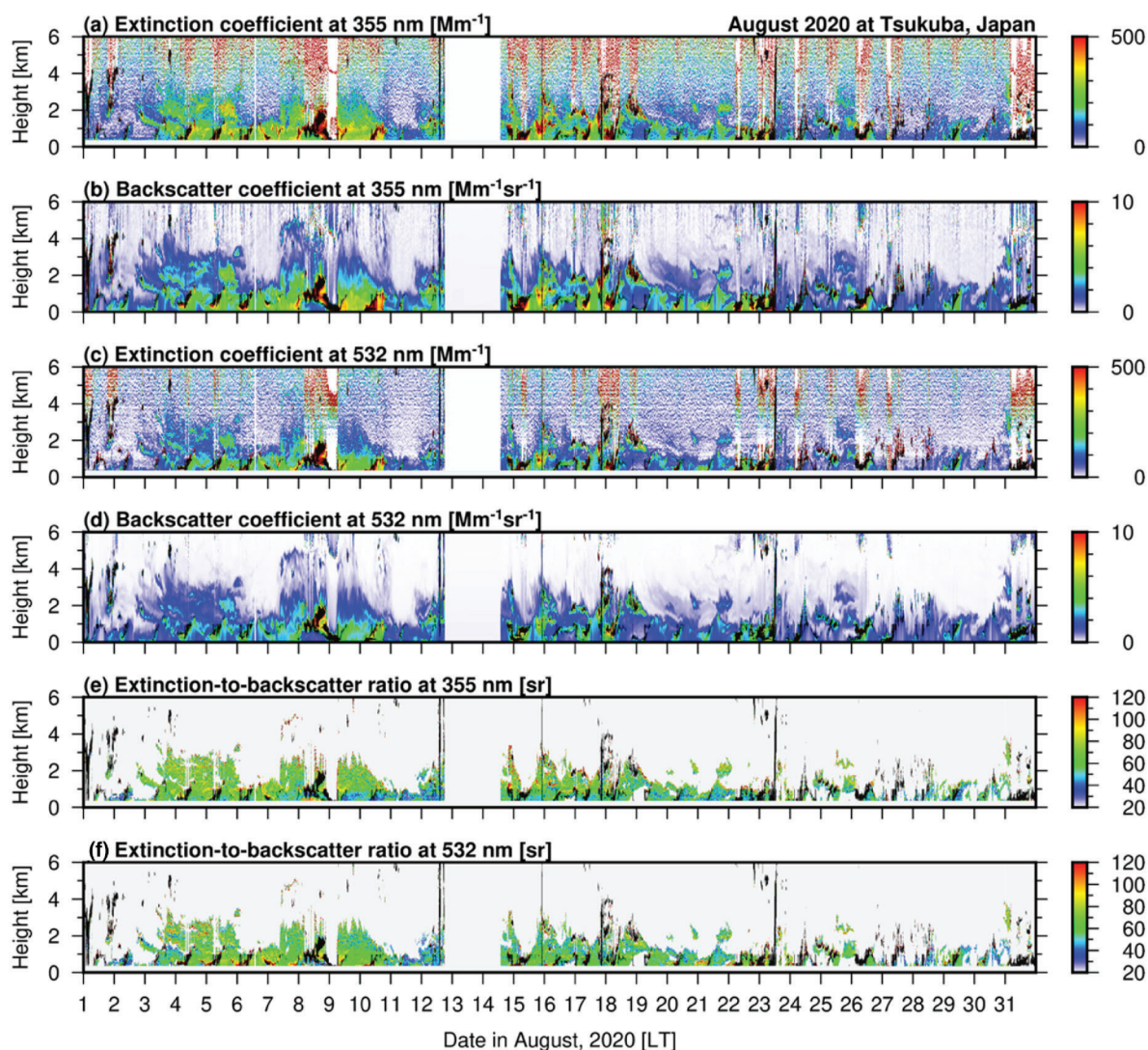


図 1：2 波長高スペクトル分解ライダーで測定された大気エアロゾルの消散係数、後方散乱係数、ライダー比の時間高度断面図

【研究成果】

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

非線形性及び分散性を考慮した水の波の相互干渉に対する地形の影響に関する研究

研究代表者 鹿児島大学学術研究院理工学域 柿沼太郎

研究の目的

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

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

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

研究の具体的方法

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

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

主要な成果

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

次に、複数の気圧波によって生成される水の波の1次元伝播の数値解析を行なった²⁾。その結果、階段地形上及び斜面上の、それぞれに特有の水の波の生成・増幅過程が得られた。すなわち、階段地形の水深変化部上で、気圧波が、自由波として伝播している既存の津波に追いつくと、Proudman共鳴によって生成された、気圧波に追従する拘束波が、既存の津波に重合して津波高さが増加し、その後、増幅された津波が浅い水域を伝播した。これに対し、水平床上で、気圧波が、自由波として伝播する既存の津波に追いつく場合には、拘束波が、既存の津波に重合している間は、津波高さが増加したが、気圧波が既存の津波を追い越した後に、津波高さは、重合前の元の値に戻った。また、斜面上を自由波として伝播している既存の津波も、気圧波に

追い越されることによって増幅される可能性のあることがわかった。更に、下り勾配の斜面上を正の気圧偏差の気圧波列が通過する際、水の波の増幅過程において、うなりが発生した。そして、自由波として伝播する津波の峰の増幅が抑制された。逆に、自由波として伝播する津波の谷の振幅は、増加した。

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

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

研究成果報告

- (1) 柿沼太郎・楠原 嘉: 河川津波の3次元数値解析, 第69回海岸工学講演会, 2022. (招待講演)
- (2) Kakinuma, T.: Tsunamis generated and amplified by atmospheric pressure waves due to an eruption over seabed topography, *Geosciences*, 12(6), 232, 17 pages, 2022. doi: 10.3390/geosciences12060232.
- (3) 辻 英一: 東シナ海の大陸斜面における順圧－傾圧エネルギー転換の数値解析, 九州大学応用力学研究所共同利用研究「微細規模から惑星規模にかけての海洋力学過程と規模間相互作用の研究」研究集会, 2022.
- (4) Kakinuma, T.: A numerical study on distant tsunami propagation considering the strong nonlinearity and strong dispersion of waves, or the plate elasticity and mantle fluidity of Earth, *Fluids*, 7(5), 150, 17 pages, 2022. doi: 10.3390/fluids7050150.

参考文献

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

組 織

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

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

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

1. 研究の目的

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

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

本研究では、研究対象地域における地上降雨量データを収集し、アジアモンスーン降雨データベースを作成し、各現業機関の了承を得て、他の研究にも使用できるようデータベースをレポジトリサイトに公開することを目指し、さらに季節サイクルなどの長期トレンド解析を試行する。本研究で開発するデータベースは、APHRODITE(Yatagai et al., 2012)より長い期間(APHRO_V1101 は 57 年間)のデータとなり、より長期の解析が可能となる。さらに、衛星観測データ(TRMM 等)や既存の雨量プロダクト(APHRODITE 等)を用いて、作成したアジアモンスーン降雨データベースの検証を実施しつつ、季節進行が先行研究の結果と類似しているかどうかの確認を行う。また、本研究の研究目的の達成に十分な精度を持っているか、検討することを目的とした。昨年度に引き続き COVID-19 の影響を受けて研究対象地域におけるデータ収集や特に重要である各現業機関のデータ公開に向けた了承を得るための交渉が大幅に遅れている。そのため、本報告では、既に入手した雨量データと衛星観測データ TRMM との検証結果と、研究領域は異なるが解析手法開発を先に進めるために実施した日本での高解像度雨量データセット開発や長期トレンドに関する解析結果が最終的に論文として採択されたので、その中でメガラヤ高地における降水データの検証と日本の公開どうぞ雨量データセット開発について報告する。

2. メガラヤ高地における降水データの検証

世界有数の多雨地域であるインドとバングラデシュの国境に位置するメガラヤ高地において得られた雨量データを検証するため、観測された豪雨発生時における TRMM PR(熱帯降雨観測衛星搭載の降雨レーダー)とのマッチング比較を実施した。その中で、インド北東部の豪雨地点チェラブンジにおいて 2022 年 6 月 17 日 03UTC までの 24 時間に過去 122 年の中で 3 番目に多い雨量 972mm を観測したとインド気象局が発表した。この図 1 はインド気象局チェラブンジ観測所から西に約 1km 程度離れた場所に設置した Vaisala 社製の自動気象観測装置 WXT520 を用いて観測した 2022 年 6 月の日雨量の時系列である。この地域は準 2 週間周期の季節内変動による降水変動が卓越しており、11-20 日にかけて日雨量 100mm 以上の降水が継続しているが、その中でも 14-16 日の 3 日間の降水量が突出して多く、3 日間で 2500mm 程度降っている。下流のバングラデシュ Sylhet では広域にわたって鉄砲水による被害が生じた。今後はこの大雨をもたらした降水システムや気象場の

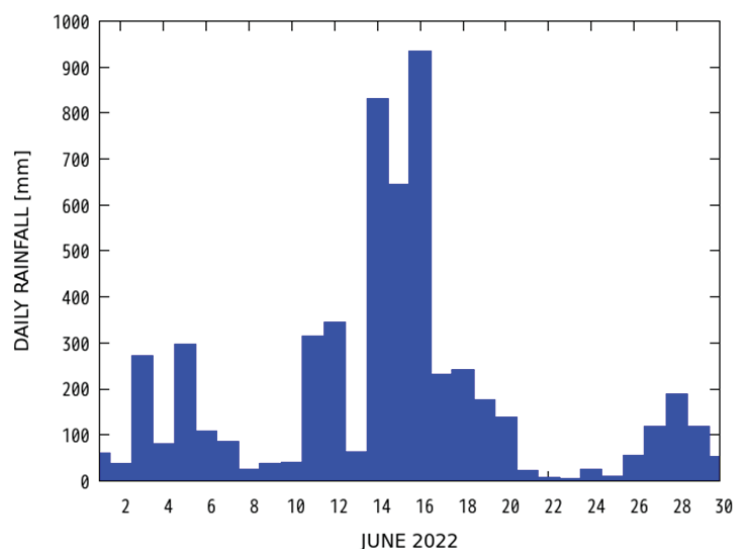


図 1：チェラブンジ近郊(インド気象局観測点より西へ約 1km)での 2022 年 6 月の日雨量時系列。

図 1 はインド気象局チェラブンジ観測所から西に約 1km 程度離れた場所に設置した Vaisala 社製の自動気象観測装置 WXT520 を用いて観測した 2022 年 6 月の日雨量の時系列である。この地域は準 2 週間周期の季節内変動による降水変動が卓越しており、11-20 日にかけて日雨量 100mm 以上の降水が継続しているが、その中でも 14-16 日の 3 日間の降水量が突出して多く、3 日間で 2500mm 程度降っている。下流のバングラデシュ Sylhet では広域にわたって鉄砲水による被害が生じた。今後はこの大雨をもたらした降水システムや気象場の

解析を行う予定である。

3. 日本での高解像度雨量データセット開発

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

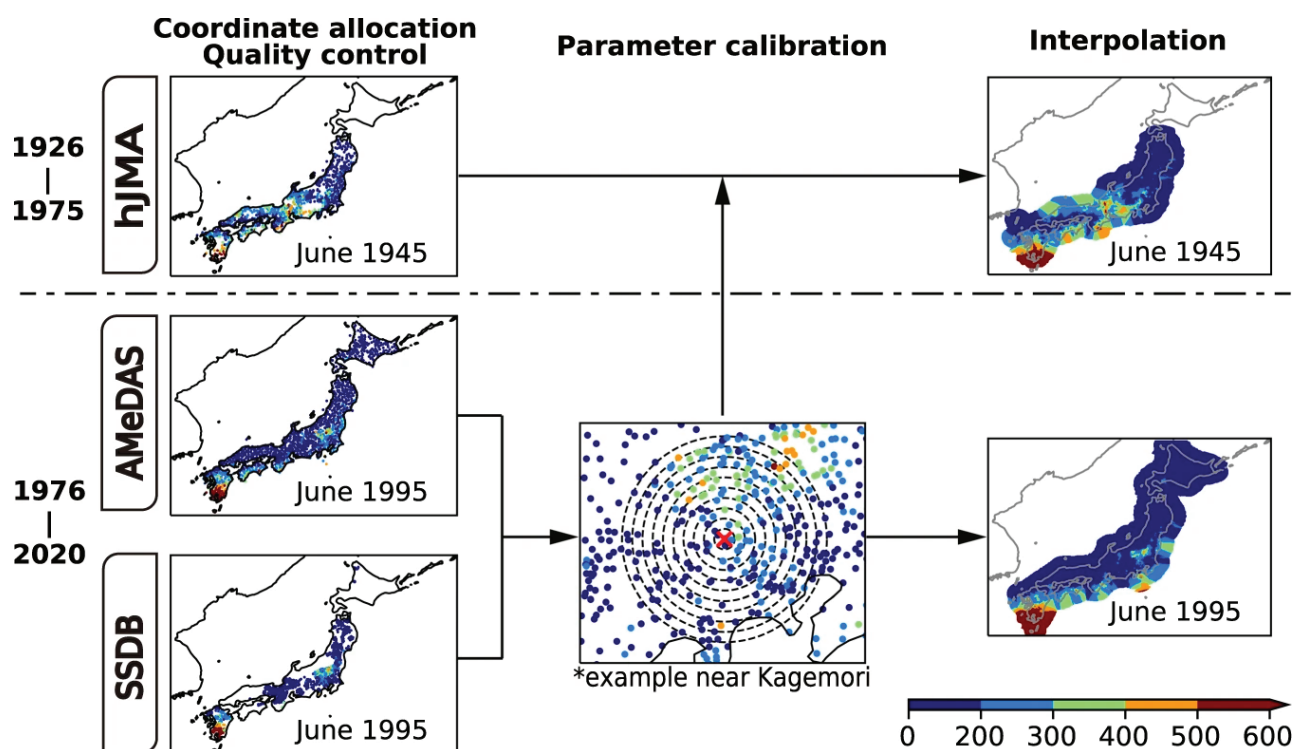


図 2：本研究におけるデータ作成手法のフローチャート。

4. まとめ

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

5. 研究組織

研究代表者	木口 雅司	東京大学 未来ビジョン研究センター 特任教授
所内世話人	江口 菜穂	九州大学 応用力学研究所 准教授
研究協力者	村田 文絵	高知大学 理工学部 准教授
研究協力者	林 泰一	京都大学 東南アジア地域研究研究所 連携教授

謝辞

本研究は、九州大学応用力学研究所の共同利用研究の助成の他に、JSPS 科研費 JP26220202、JP21K14252、JP21H05002、文部科学省統合的気候モデル高度化研究プログラム JPMX D0717935457、2017 年度住友財団環境研究助成「茶園観測データレスキューと将来予測による 19-21 世紀アジアモンスーンの降雨変化」、(独)環境再生保全機構の環境研究総合推進費(S-14)、中国建設弘済会技術開発支援事業によって実施された。

モンゴル・エルデネト鉱山における尾鉱沈殿池由来ホワイトダストの拡散動態解析

金沢大学 環日本海域環境研究センター 松木篤

【はじめに】

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

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

【方法】

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

【結果と考察】

ひまわり 8 号の Dust RGB 画像解析に基づいて、尾鉱沈殿池から発生する人為ダストの時空間的な分布を検出することに成功し、従来の予測よりも影響が広範囲に及んでいる実態が明らかになった。図 2 に、典型的なホワイトダスト発生時の Dust RGB 画像を示す。ちょうど尾鉱沈殿池に対応する地点から南東方向に帯状に広がるダスト・プリューム (マゼンタ) の発生が確認できる。従来の研究では、黄砂のようなメソ～総観スケール規模の自然現象を対象とした研究が中心であったが、この結果は、高度 36,000km にある静止気象衛星が、鉱山のようなポイント汚染源からの人為ダストのホットスポット検出、ならびにその拡散輸送実態の追跡にも有効であることを示している。

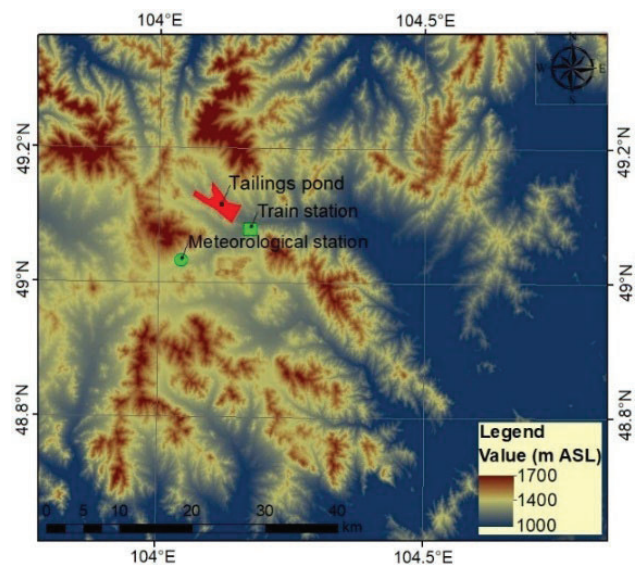


図 1. 尾鉱沈殿池 (赤) とセンサの設置地点 (緑). Train station には PM2.5 に加え粉塵センサを設置.

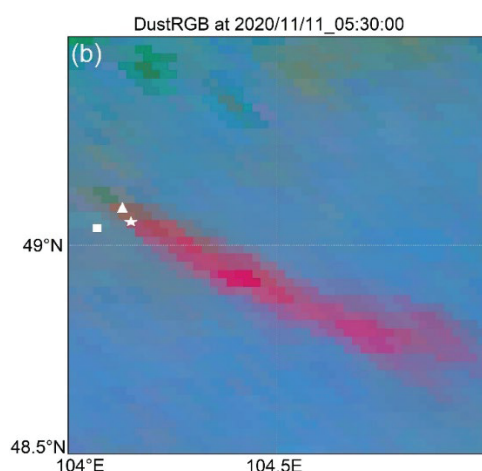


図2. ダスト発生時の Dust RGB 画像（時間は UTC）。マーカーは尾鉱沈殿池(△), および地上センサが設置された地点 Train station (☆) と Meteorological station (□) の位置を示す。

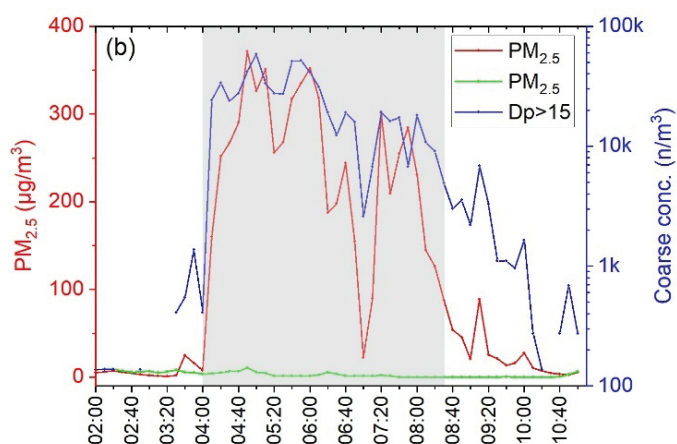


図3. エルデネット市内に設置した小型センサによる粗大粒子個数濃度（青），および PM2.5 質量濃度（赤，黄緑）測定値の時間変化。

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

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

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

【研究組織】

研究代表者：松木 篤、所内世話人：弓本 桂也

研究協力者：鶴野 伊津志、Chultem Batbold (D3)、Sonomdagva Ch. (NMU)

夏季の宗谷暖流のジェット構造の維持機構に関する理論的研究

筑波大学生命環境系 唐木達郎

目的: 冷たく低塩分なオホーツク海に面した北海道北東沿岸海域では、宗谷暖流と呼ばれる沿岸境界流が温かく高塩分な黒潮起源の海水を運んでいます。宗谷暖流は夏季に最盛期を迎え、宗谷岬から知床半島まで約 250 km の距離の間、秒速 1m を越す非常に速い表層ジェット流構造を維持します。宗谷暖流によって性質の異なるオホーツク海の海水と黒潮系海水が隣り合い、北海道北東沿岸海域に顕著な海洋前線帯が生まれると、これまでは考えられてきました。一般的に沿岸境界流は外洋水との境界に前線帯とジェット流帯を併せ持つものです。ジェット流は前線のもとらす傾圧性により海底に近いほど遅くなります。そのため沿岸境界流は海底摩擦の影響をあまり受けずに長い距離を流れることができます。しかし宗谷暖流の前線ジェット流帯は流域幅の中間に位置し、オホーツク海の外洋水と黒潮系海水の境界には生まれません。両海水は水温と塩分によって決まる海水密度において差がないため、水塊境界に傾圧性が生じないのです。また、一般的な沿岸境界流の前線は海底斜面から海面まで鉛直的に分布しますが、宗谷暖流の前線の上端は垂表層に位置し、夏季の季節躍層に接続します。なぜ宗谷暖流は、一般的な沿岸境界流とは異なる特徴を持った前線ジェット流帯を持つのでしょうか。この謎を明らかにすることが我々の目的です。

我々はこれまでに数値モデルを使い、宗谷暖流域の季節躍層が海底斜面上の鉛直混合によって斜面下方に傾き、そして前線帯の形成に至ることを明らかにしました。宗谷暖流はその上流域に該当する宗谷岬沖において、季節躍層に特徴づけられる傾圧性の高い沿岸流でした。上流域の宗谷暖流はその傾圧性ゆえ、表層と同様に海底でも流れが速く、海底摩擦の影響を強く受けます。それに伴って海底で鉛直混合が活発になり、季節躍層が上下に良くかき混ざることによって海水密度も鉛直に一樣となります。この混合過程によって宗谷暖流下流域の前線帯は生まれたのです。興味深いことに宗谷暖流は、上流域で海底摩擦を受けて傾圧流から傾圧流へと流れ構造を変え、下流域ではむしろ海底摩擦の影響を受けづらい構造になるのです。そのため宗谷暖流はその表層ジェット流構造を宗谷岬から知床岬まで維持できることが分かってきました。本研究課題において我々は、宗谷暖流の流下方向の傾圧-傾圧変遷過程を説明する理論を構築し、この不思議な現象の一般化を試みました。

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

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

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

研究成果報告: なし

研究組織: 唐木達郎(筑波大学)、三寺史夫(北海道大学)、木田新一郎