九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

[24]全国共同利用研究成果報告

https://doi.org/10.15017/4763148

出版情報：全国共同利用研究成果報告. 24, 2021-03. Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University
バージョン：
権利関係：

KYUSHU UNIVERSITY

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測定された水位・差圧データを使用して，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評価を行った．

・序論

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

・実験方法および実験結果

実験・解析は，吹送距離は5m～35mの複数地点において，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年度の風波水槽改造により得られた最高風速の変化の程度，および，摩擦速度の値を示す．特に，摩擦速度は，2018，2019年度には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，今年度初めて評価された．また，海上風速に換算した場合に風速23m/s（最大1300回転）から37m/s（最大1700回転）に増速することに成功したことが分かる．図1に，吹送距離33mにおける一様風速と摩擦速度の関係を示す．図より，過去の他の水槽における測定値（*Takagaki et al.*, 2012）と概ね一致するものの，測定誤差が大きいこと，特に一様風速が10m/s以下では，あまり良い一致は見られないことが分かる．これは，現在の運動量収支法においては，水位と差圧の2つの独立した測定値を使用しているためと考えられる．今後は，測定精度を向上させる必要がある．

・成果報告（論文、学会発表リスト等）

1. 合田総一郎, 高垣直尚, 鈴木直弥, 松田景吾, 小森悟, Yuliya Troitskaya, 強烈な砕波を伴う気液界面における運動量輸送量の測定手法の構築, 日本機械学会 2020 年度年次大会，オンライン, 2020 年 9 月 13 日-16 日.

2. 合田総一郎, 高垣直尚, 鈴木直弥, 松田景吾, 小森悟, Yuliya Troitskaya, 風波水槽での高風速時の砕波を伴う大気・海洋間運動量輸送の評価, 日本海洋理工学会　2020 年度秋季大会, オンライン, 2020 年 11 月 19 日.
3. 佐々木燦汰, 高垣直尚, 鈴木直弥, 強風時の大気・海洋間運動量輸送に及ぼす浅瀬の影響, 日本海洋理工学会　2020 年度秋季大会, オンライン, 2020 年 11 月 19 日.
4. 佐々木燦汰, 高垣直尚, 鈴木直弥, 高風速域での砕波を伴う大気・海洋間運動量輸送量の測定手法の構築, 波浪研究会, オンライン, 2021 年 3 月 1 日.
5. 三浦徹馬, 高垣直尚, 高風速下における水面を通しての運動量輸送量の測定, 日本機械学会 関西学生会 2021 年度学生員卒業研究発表講演会, オンライン, 2021 年 3 月 16 日.

・研究組織

研究代表者：高垣直尚

研究協力者：鈴木直弥

研究協力者：大西天真

研究協力者：合田総一郎

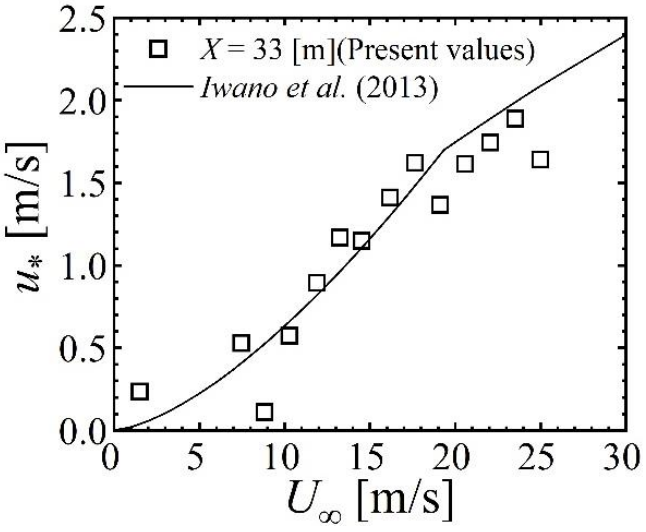
研究協力者：三浦徹馬

研究協力者：佐々木燦汰

Table 1: Wind velocity. Values of U_{10} were estimated using model (*Takagaki et al.*, 2012).

	N [rpm]	F [m]	U_∞ [m/s]	U_{10} [m/s]	u^* [m/s]
Takagaki et al. (2017)	1300	6.5	14.0	22.8	-
RIAM Report (2019)	1700	6.5	22.2	36.8	-
Present Study	1600	33	24	37.6	1.9

Fig. 1: Relationship between freestream wind speed U_∞ and friction velocity u^* at x = 33 m.



若狭湾における定置網漁業の急潮対策に関する研究

福井県立大学　海洋生物資源学部　兼田淳史

【研究の目的】

若狭湾では急潮と呼ばれる突発的な強流がしばしば発生し、定置網漁場で甚大な被害を及ぼすことがある。急潮被害の低減を目指し、福井県と京都府は流れや水温を計測できる観測体制を構築し、九州大学は日本海沿岸海域海況予報モデル（DREAMS_C）を用いて 1 週間先の海の流れの予報を web 上で公開している。本研究では、取得した観測データや予報モデルのシミュレーション結果を利用して、2020 年度の急潮について分析するとともに、急潮の防災対策に関する新たな知見を得ることを目的として実施した。

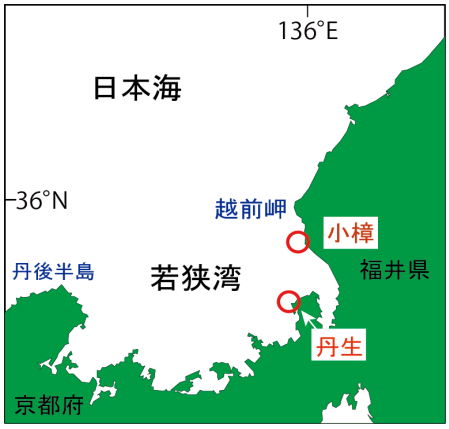


図 1 若狭湾および測点．2020 年に発生した急潮の例として、小樟と丹生の観測データを示す。

【観測およびデータ解析】

福井県水産試験場、福井県立大学、京都府海洋センターは、若狭湾（図 1）の定置網近傍で流れや水温を計測している。2020 年度においても、それぞれの測点で電磁流速計や ADCP（超音波多層流向流速計）を用いて流れを計測するとともに、複数個の水温センサーを全測点で設置した。また、急潮発生時の流れの時間変化は、九州大学応用力学研究所が開発した DREAMS_C を用いて分析を進めた。

【結果および考察】

2020 年度の急潮の発生状況を分析した例として、小樟（ここのぎ）と丹生（図 1 参照）で発生した急潮についてそれぞれ紹介する。

2020 年 8 月 25 日頃、若狭湾湾口に近い小樟で急潮が発生した。図 2 には小樟で観測した流れの時系列を示している。この図から、小樟では通常は湾口方向へ向かう北－北西方向の流れが卓越しているが 8 月 25 日頃には一時的に流向が変化し、南東方向に 50cm/s を超える強流を伴った急潮が発生したことがわかる。いままでの研究で若狭湾の湾口東部の沿岸域では渦の接近により急潮が発生することが明らかにされているので（Kaneda et al., 2018, JO）、高解像度シミュレーションモデルの計算結果を利用して、渦による急潮の可能性について検証した。

図 3 には 2020 年 8 月 20 日の流れのシミュレーション結果を示しており、小樟沖では時計回りの大きな渦が発生していたことが確認できる。つまり、この急潮は渦の接近によって発生したことが確認できた。高解像度モデルは 1 週間先までの予報を公開していることから、シミュレーション結果の「渦の動き」に着目することにより、急潮の防災対策を取ることが効果的であると考えられた。

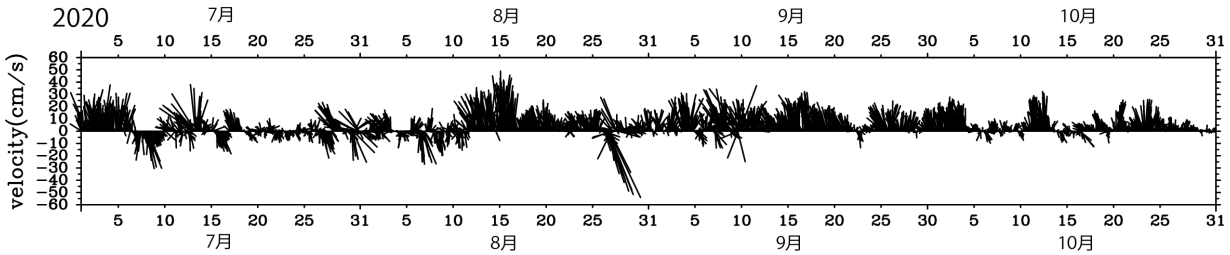


図 2：小樟の海面下 10m の流れの時系列．8 月 25 日頃に急潮が発生したことがわかる。

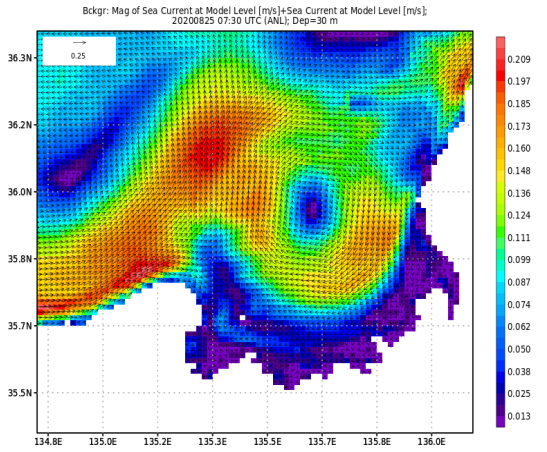


図 3：高解像度シミュレーションモデルの計算結果（2020 年 8 月 25 日）

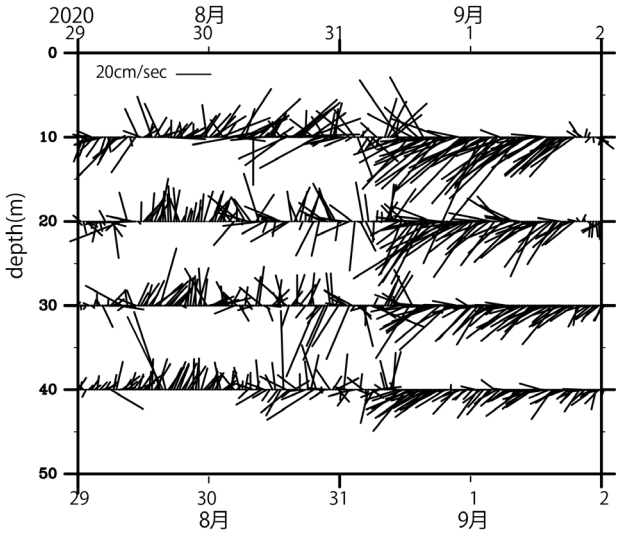


図 4：漁具被害が発生した 2020 年 8 月 30 日頃の漁場の多層の流れ（8 月 29 日－9 月 1

また、2020 年 8 月 30 日には敦賀半島の先端付近に位置する丹生定置で漁具被害が発生した。定置網の道網の先端が南から北へ流され、ロープが切断されたのである。漁場の近傍では ADCP（超音波多層流向流速計）や波高も計測できるリアルタイム海洋観測ブイを設置していたことから、被害発生時の定置網漁場の海況について詳しく調べることにした。

被害発生時の波高のデータをみたところ波高は低く、被害を引き起こした要因とは考え難かった。次に ADCP が計測した流れのデータを調べたところ、図 4 が示すように 8 月 30 日は底層で北－北東へ向かう流れが発生しており、この流れが道網を北方向へ引っ張ったと推察された。また、8 月 30 日後半から 31 日には上層では北西方向へ、下層は逆方向へ向かう流れが卓越し、9 月 1 日からは全層で南西方向の強い流れが発生していた。つまり、被害発生時は、流向および流速が時々刻々と変化する非常に複雑な変動をしていたことが明らかになった。

この被害が発生したとき、大型の台風 9 号と 10 号が日本に接近しつつあった。台風は若狭湾から遠く離れた九州西方を北上したものの、敦賀のアメダスデータは一時的に強風が風向を変えながら吹いたことを記録し、強い流れは台風の通過に伴う風が引き起こしたものと推察された。

近年、グローバルスケールの環境の変化により、台風は大型化し、強い勢力を維持したまま日本付近を通過することが増えてきた。強い勢力をもつ大型あるいは超大型の台風が日本に到達した場合、その影響は広範囲にわたることから、若狭湾から遠く離れた海域を通過するときでも警戒を怠らないことが重要であると考えられた。

【関連の成果発表（論文発表、学会発表）】

(1) 丹後半島沿岸の定置網における急潮被害と流速の鉛直構造との関係，水産海洋研究，261-271，2020
船越裕紀，上野陽一郎

(2)「福井県沿岸域における海況情報システムの活用」，兼田淳史ほか，日本海洋学会 2020 年度秋季大会，2019 年 10 月．

【研究組織】

【研究代表者】福井県立大学海洋生物資源学部　兼田　淳史
【所内世話人】九州大学応用力学研究所　千手　智晴
【研究協力者】九州大学応用力学研究所　広瀬　直毅
京都府農林水産技術センター　船越　裕紀
福井県水産試験場・漁場環境研究グループ　岩崎　俊祐

やませによる陸奥湾の強い底入り潮発生に関する解析

弘前大学　理工学研究科　島田照久

目的

2017 年夏に陸奥湾西湾でホタテ籠が強く揺さぶられてホタテ貝がへい死する被害が起きた。陸奥湾では夏季にやませによって陸奥湾口底層から津軽暖流中層水が流入する底入り潮が発生する。強い底入り潮は，7 月中旬から 8 月下旬にかけてやませ吹き続けたことが起因となっていると考えられる。しかしながら，やませの陸奥湾循環流への影響が不明なため，どのような要因で強い底入り潮が発生したか解明されていない。また強い底入り潮が湾内のどの領域まで影響を及ぼすのかも解明されていない。本研究では湾内の物理応答や湾内の水深ごとの水温を調べた。

観測と解析方法

青森県水産総合研究所は平舘の観測ブイで水温・塩分・流速を，青森・東湾の観測ブイで水温・塩分を 1 時間おきに測定している。定点観測の他，試験船「なつどまり」で月 1 回，11 箇所（2017 年は 8 箇所）の水温・塩分を測定している。本研究では，水産総合研究所提供の 2017 年の観測データと青森海上保安部の龍飛崎風速データを用い，7 月下旬から 8 月下旬の水温・流速を分析した。

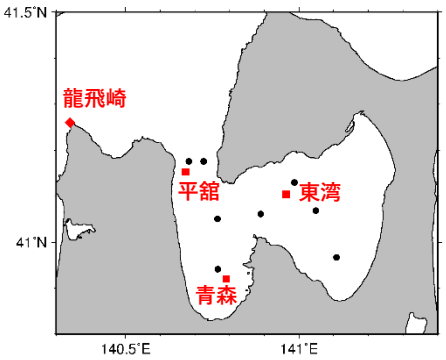


図 1　陸奥湾観測地点

結果と考察

図 2 は 2017 年 7 月 25 日－8 月 31 日の平舘の水深 4m，15m，20m，25m，30m，40m の流速変化と龍飛崎の東西風を示している。やませ期（7 月 27 日－8 月 21 日）の水深 4－15m は北上流，水深 30－40m は南下流，つまり表層は湾から流出し，底層は湾へ流入しており，表層と底層の流速の差は最大で約 0.7m/s である。水深 20m－25m の中層は北上流と南下流が混在しており，西風期と同様の海況となっている。やませ期の陸奥湾は表層，中層，底層と異なる海況になっていたと考えられる。

やませが吹き始めて 12 日後に平舘の水深 1－15m が，17 日後に東湾の水深 1－15m が混合層となり，青森の水深 1－15m は強風の時のみ混合層となっている（図 3）。湾口と湾内の上層ではやませの持続で鉛直混合が起こり，湾奥の表層ではやませの強さで鉛直混合が起こると推測される。やませ期は青森の水深 44m，東湾の水深 48m の水温は約 15℃前後

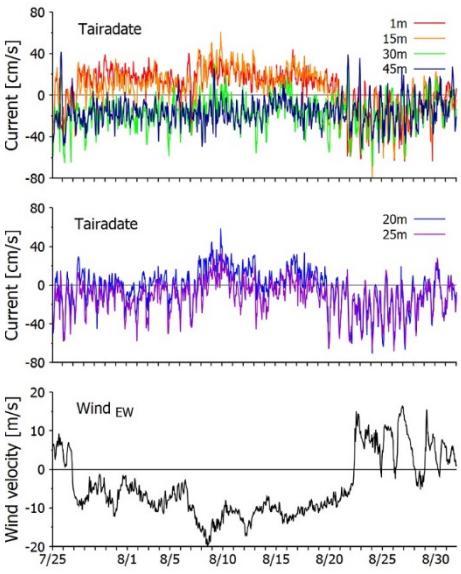


図 2　平舘観測地点における水深 4m，15m,30m,40m（上段），水深 20m,25m（中段）の流速変動と龍飛崎観測地点における東西風風速変動（下段）.

で保たれているが，西風になると徐々に水温が上昇している

図 4 は定線観測が行われた 8 月 1 日の水深 5m，10m，20m，30m，40m の水温分布図である。水深 5m は北上流であり，湾口から湾中央域にかけて水温が低いことから，表層では湾中央域からの流出が多いと考えられる。湾南部沿岸域は水深 5m では高温となっているが，水深 10－40m は低温となっている。沿岸湧昇域の幅はロスビーの内部変形半径程度なので，(1.1)式から湾南部の湧昇域を求めた。

$$\lambda_l = \frac{C_l}{f} \qquad (1.1)$$

$$\left(f = 2\omega \sin\varphi ,\ C_l = \sqrt{\varepsilon g \frac{h_1 h_2}{h}},\ \varepsilon = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2} \right)$$

湾南部沿岸域の内部変形半径は約 11.9km であり，水深 30m では 16.5－17℃，水深 20m では 19℃，水深 10m では 21℃の等温線とほぼ一致した。陸奥湾ではやませにより湾南部沿岸域で水深 10m 付近まで湧昇が発生し，表層が高温でも中層から底層にかけては湾全域で低温に保たれていることが示唆される。

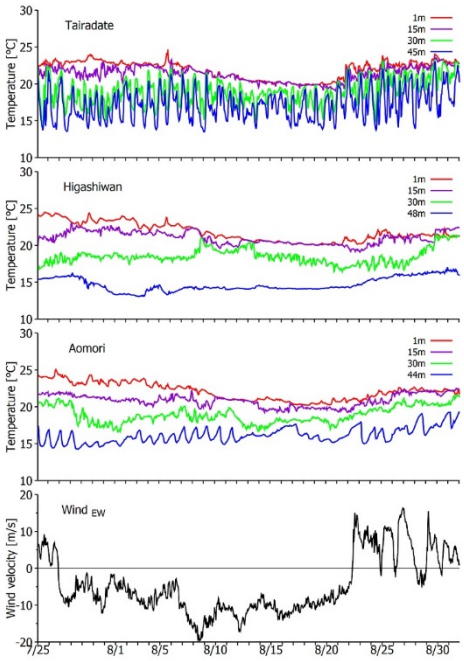


図 3　平舘(上段)，東湾(中段上)，青森(中段下）観測地点の水温変動と龍飛崎観測地点における東西風風速変動(下段).

夏季陸奥湾では，やませによりエスチャリー循環が発達することで底入り潮が強まり，西湾・東湾の南部沿岸域まで底入り潮が流入し，沿岸域の湧昇によって中層から底層の湾内全域を低温に保っていると推測される。表層の湾奥は湾中央域に比べて流出が少なく高温になりやすいが，底入り潮により底層まで高温にならないと考えられる。今後は沿岸海洋モデルで底入り潮による陸奥湾循環流への影響を解明していく。

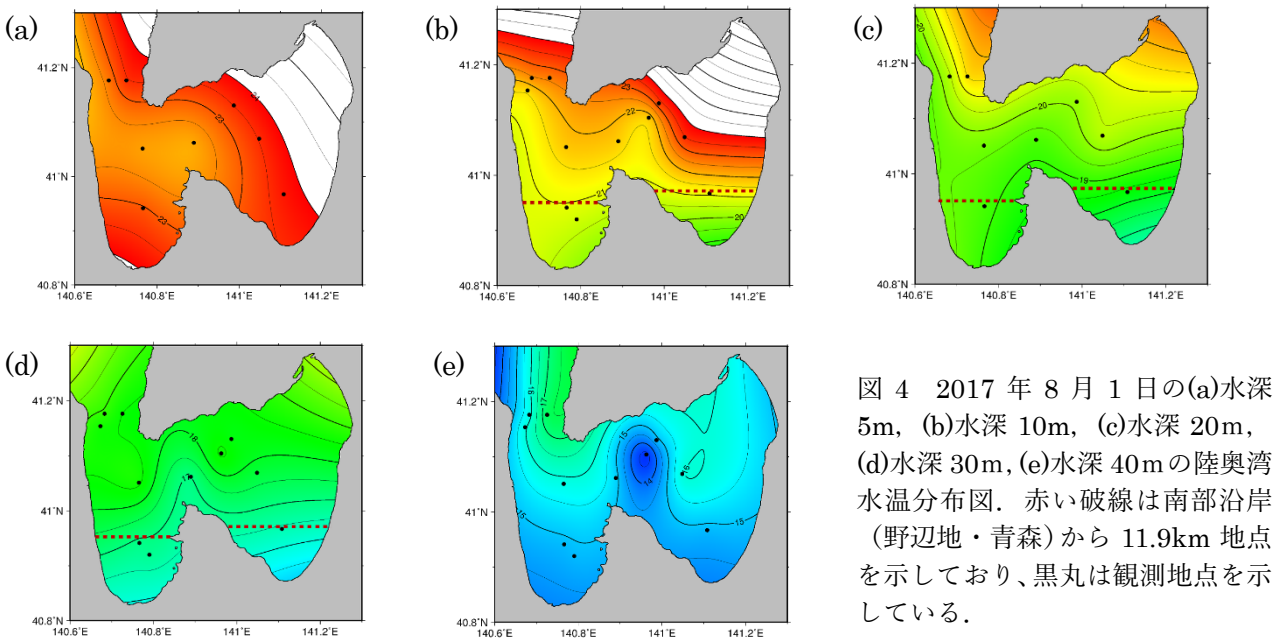


図 4　2017 年 8 月 1 日の(a)水深 5m，(b)水深 10m，(c)水深 20m，(d)水深 30m，(e)水深 40m の陸奥湾水温分布図．赤い破線は南部沿岸（野辺地・青森）から 11.9km 地点を示しており、黒丸は観測地点を示している．

研究組織

代表者　島田 照久　弘前大学 理工学研究科・准教授
協力者　磯辺 篤彦　九州大学 応用力学研究所・教授
　　藤嵜 里美　弘前大学 理工学研究科・技術職員

能登半島周辺海域における流況と漁況の関係性
～日本海における海況と石川県ズワイガニ資源量の関係性～

石川県水産総合センター　川畑　達

はじめに

石川県の主要な漁業の一つに「底びき網漁業」がある. この漁業においてズワイガニは漁獲金額の約 35%を占めており, 最も重要な魚種となっている. しかし, 近年, 石川県では雌のズワイガニ(メスガニ)漁獲量の減少が著しく, 漁業者の不安を招いている. このような漁獲量の増減の原因の一つとしてズワイガニが孵化してから着底するまでの浮遊期の死亡率が関わっていると考えられる. 過去に水産研究・教育機構は資源変動要因分析調査を行い, 幼生の浮遊時の流況が資源加入量に与える影響について検証した. ただし, この調査では隠岐の資源加入量を推測しており, 石川県沖の資源加入量と海況の関係は明らかではない. 本調査では浮遊期の水温環境が石川県の資源動向に関係するかどうかを明らかにするため, 浮遊期の水温と県内主要港のメスガニ漁獲量との関係を調べた.

材料と方法

石川県水産総合センターの漁獲統計システムから2002～2019年の主要港(橋立, 金沢, 輪島, 珠洲)を対象として, メスガニの日別漁獲量が 5 箱以上のデータを抽出した. それらのデータを用いて各漁期年(11 月～翌年 1 月)別・各主要港別の CPUE(隻日数当たり漁獲量)を求めた.

メスガニが漁獲加入するのは約 9 歳である. 一方, ズワイガニの産卵期は 2～3 月で浮遊期は約 3 カ月であることから, 4 月には多くの当歳個体が浮遊期にあると考えられる. そこで, 九州大学応用力学研究所の海況数値モデルをベースに開発された JADE2 の各格子点について, 3 月 20 日から 4 月 10 日の水深 200m の平均水温を求め, 9 年後の県内主要港の CPUE との相関を調べた. さらに, 相関の高い海域の平均水温と水産研究・教育機構が公表している日本海系群 A 海域のズワイガニ親魚資源密度指数を説明変数, 主要港のメスガニの 9 年後の CPUE を目的変数とした重回帰分析を行った.

結果と考察

本調査の結果, 橋立の CPUE については山陰沖の水温との間に正相関, 大和堆の水温との間に負相関が, 金沢の CPUE については山陰沖と珠洲沖の水温との間に正相関が, 輪島の CPUE については山陰沖の水温との間に負相関が, 珠洲の CPUE については珠洲沖の水温との間に正の相関がみられた. 橋立, 金沢, 輪島の CPUE と山陰沖の水温が相関する理由として, 山陰沖の隠岐堆付近には数年おきに冷水塊が発生しており, この冷水塊が発生すると隠岐沖で発生した稚ガニが橋立, 金沢よりも輪島に着底しやすい流れができるのではないかと考えられる. その他の海域との相関の原因については, 今後調べていく必要がある.

以上の関係性を用いて, 重回帰分析により各主要港の CPUE を推定した. 橋立では山陰沖と大和堆の水温を, 金沢では山陰沖と珠洲沖の水温を, 輪島では山陰沖の水温を, 珠洲では珠洲沖の水温を説明変数とし, さらに全ての主要港についてズワイガニ親魚資源密度指数を説明変数に加えて重回帰分析を行った. その結果, 重回帰式から求めた推定値は実際の CPUE の動向を概ね再現しており, 浮遊期の水温や流況が石川県沖の資源動向に影響していることが強く示唆されたいた.

この重回帰式から将来の CPUE 動向を予測すると, 橋立では 2024 年まで増加し, 2026 年に減少, 金沢では 2021 年まで横ばいで, 2022~2024 年に減少し, 2024 年から増加, 輪島では 2020 年以降横ばい, 珠

洲では2023年以降変動は大きいものの増加すると考えられた．今後，橋立や金沢の近年の予測が過大評価になった要因を調べるなど，予測精度の向上に努めたい．

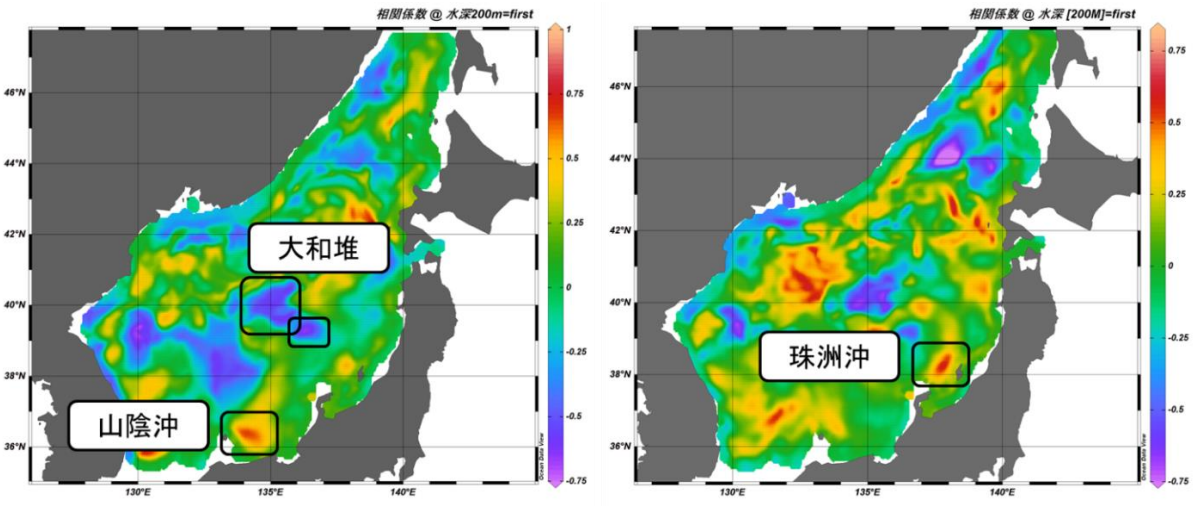


図 1. メスガニ CPUE と 9 年前の 3 月 20 日～4 月 10 日の 200m 平均水温の相関係数マップ
（左図：橋立 CPUE との相関，右図：珠洲 CPUE との相関）：相関係数の高い海域を四角で囲んだ．

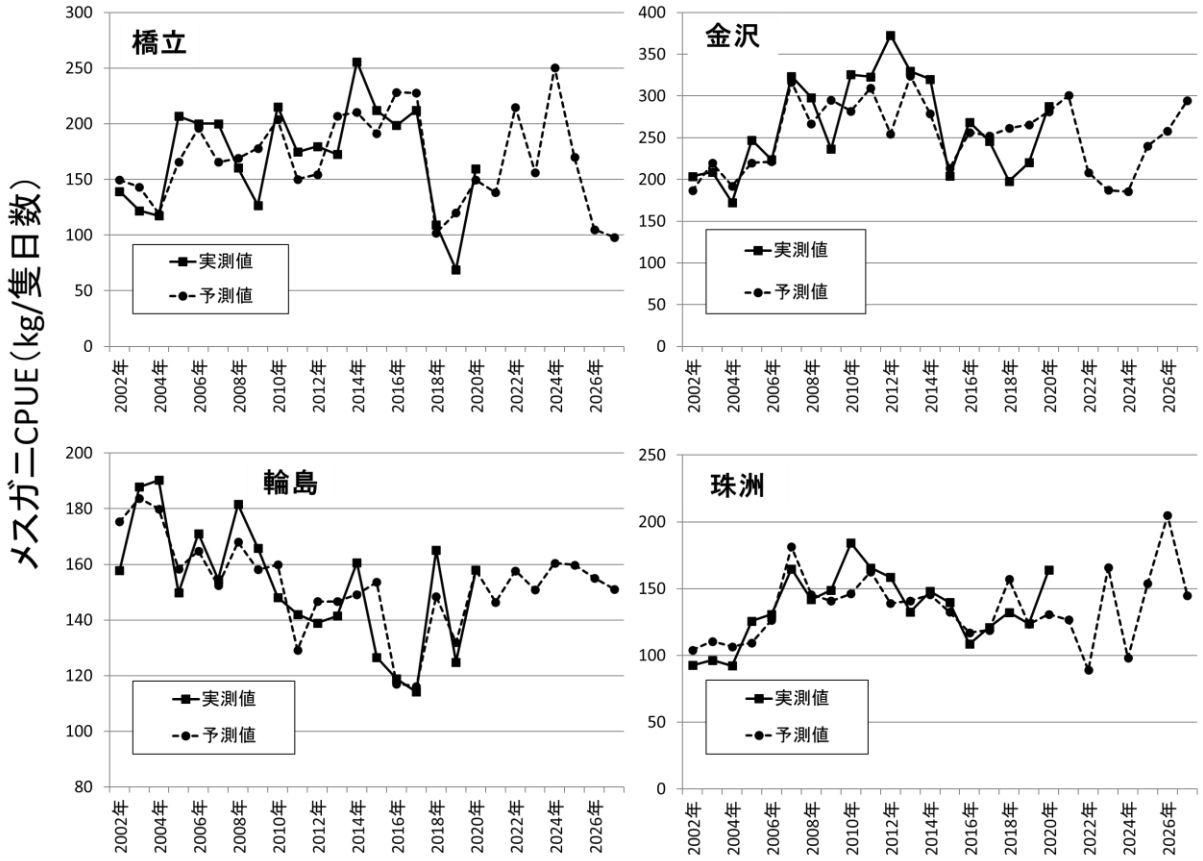


図 2. 各主要港の漁期年毎の CPUE の実測値と重回帰分析による推定値の比較．

海底資源探査用グライダー型海中ビークルの開発

九州大学大学院工学研究院　山口　悟

1. 研究の目的

近年，日本近海の海底資源の開発が注目を集め，海底資源の賦存量や賦存場所を把握するための様々な調査方法が提案されている。一方で，資源探査にかかるコストが課題となっており，従来の方式とは異なる効率的な探査機材の開発が望まれている。本研究では，OBEM（Ocean Bottom Electromagnetometer）を用いた調査方法に着目し，グライダー型水中ビークルに OBEM を搭載し，自律的に観測・移動を実施するための観測機材の開発を試みた。本装置の実用化により OBEM 計測において現在問題となっている船舶による投入・回収・移動のための作業時間およびコストの増大が解消され，OBEM による広範囲，長時間の連続調査が効率的に実施可能になると考えられる。

本年度の研究では重合格子法を用いた CFD 解析により滑空する機体の周りの非定常流れの解析を行った。また，グライダー型水中ビークルの滑空運動の安定性，滑空中の姿勢を変化させる制御性能について調査した。さらに，ビークルの自律化に関連する外界認識方法の調査として，単眼カメラを搭載した ROV を用いた水槽試験を行い，取得したデータを ORB-SLAM で解析して自己位置推定性能を評価した。

2. グライダー型海中ビークルの概要

開発中のグライダー型海中ビークルは，機体上部に装着された翼により滑空することで目的の海底計測点に移動着底し OBEM による計測を実施する。その後，適当な高度まで浮上し，再び次の調査地点へ滑空により移動する。OBEM による計測を行うため，本機体はセンサー用電極を装着した十字形のアームを有しているが，滑空中の流体抵抗を減少させるためアームを覆うように翼面を形成する。翼面下には前後に 2 つの耐圧容器を配置し，前方容器には水中重量調節装置，後方容器には運動制御装置（重心移動装置），各種センサー，機体制御用コンピュータを搭載する。Fig. 1 に機体の内部構造を示す。

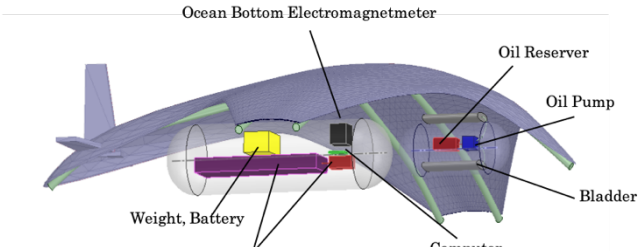


Fig.1 Construction of the vehicle

3. 数値計算による過渡運動の調査

数値流体計算に OpenFOAM の overInterDyMFoam ソルバを使用し，ビークルの過渡運動について調査した。基礎方程式は非圧縮性粘性流体を対象とした RANS 方程式と連続の式である。有限体積法により離散化し，PIMPLE 法により計算を行う。乱流モデルには SST k-omega model を用いた。計算に用いた格子と得られた結果を Fig. 2 に示す。左図のように，青で示す計算領域全体の構造格子に，赤で示す機体を内包する非構造格子を重ね合わせている。さらに，機体近傍では格子の細分化を施し，重合格子法を用いることで滑空する機体周りの流体運動の解析を可能とした。重合格子法では格子領域を複数重ね合わせて構成される格子を用いて計算を行う。物体の移動は物体を内包する重合領域ごと行われ，重合領域間の境界面で適切に流体の情報のやり取りを行うことで整合性のとれた流れの解析を行うことができる。また，機体に関する情報を記述する設定ファイルを上書きしソルバに再度読み込ませることにより計算中に機体情報を変更する解析が可能である。ここでは，機体の重心位置の前後方向位置を変更し計算に反映させるプログラムを作成し重心位置制御を含めた CFD 解析を可能とした。制御法として

は PID 制御を採用しゲインを適切に設定することで重心位置の操作によりピッチ角を制御できる。Fig. 2 の右図に，機体重心位置を制御した場合の機体ピッチ角の計算結果を示している。

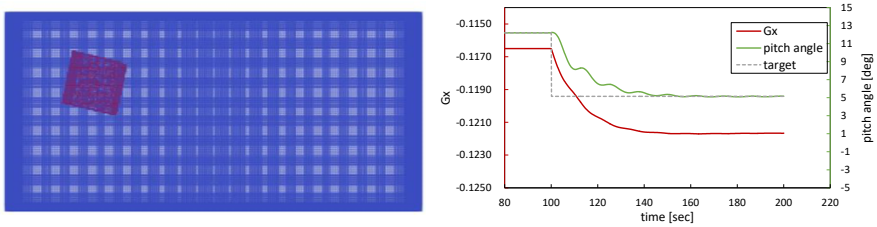


Fig.2 Calculated pitching angle with motion control by weight shift

4. 水槽試験に基づく自己位置推定とマッピング手法の調査

応用力学研究所の深海機器力学実験水槽においてビデオカメラを搭載した ROV を用いて水中での映像を取得し，水底に設置した三角コーンの周りを旋回する実験と水槽壁面を撮影しながら上下に移動する実験を実施した。用いた ROV は水中ライトを搭載し暗所でもある程度の明るさで撮影が可能である。実験結果の解析には Visual SLAM アルゴリズムの一種である ORB-SLAM を用いた。陸上での ORB-SLAM の適用例は多く存在する一方で，水中での適用例は少ない。

三角コーンの間を旋回する実験の映像を用いた解析では自己位置推定とマッピングに失敗した。すなわち，特徴となると想定していた三角コーンと壁面が ORB 特徴量として検出されなかった。これは，遠方に位置する壁面に ROV の水中ライトの光が届かず光量が不足していたこ，水底が一様なコンクリート製であったためコーナーの検出がうまく行えなかったことが原因と考えられる。壁面を撮影する実験では部分的に自己位置推定とマッピングの解析に成功した。本条件では，対象物とカメラの位置が近く水中ライトの光量が十分であったこと，壁面の継目，汚れ等によりコーナーの検出が容易であったためである考えられる。Fig. 3 に実験の様子と解析により生成されたマップと自機の航跡の一例を示す。

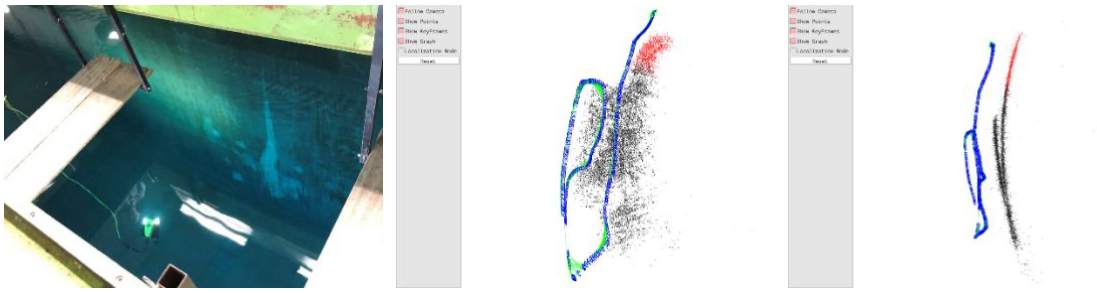


Fig. 3 Experiment for localization and mapping of an ROV

5. まとめ

重合格子法を用いた CFD 解析により滑空運動をするグライダー型水中ビークルの過渡運動を調査した。計算では，重心位置を適切に設定することで定常滑空状態に至るまでの過渡運動を計算することができた。また，適切な制御系により安定したピッチ角制御が可能であることを計算により確認した。さらに，外界認識手法の調査として，水中における ORB-SLAM の有効性を水槽試験結果により評価した。

以上の検討により，重合格子法と ORB-SLAM がグライダー型水中ビークルに適用可能であることが確認された。

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

これまで瀬戸内海・豊後水道における潮汐混合過程の解明を目的とし、応用力学研究所との共同利用研究によって乱流観測を実施し，その中で伊予灘のサンドウェーブによる乱流混合の強化過程に注目してきた。2020 年度は海峡部周辺の潮汐フロントに特化した観測を実施する予定であったが、観測実施直前におけるコロナウイルス感染拡大傾向のため、航海を断念せざるを得ない状況となった。本年度はこれまで実施した観測データをとりまとめ統合的な解析を行うことで、伊予灘において夏季に形成される潮汐フロントと乱流混合およびサンドウェーブ間の関係を調べた。

研究内容

愛媛大学沿岸環境科学研究センター研究船「いさな」を用い、2012 年から 2019 年までの夏季を中心として伊予灘の 4 断面（図1a,b）において実施した計 530 キャストの乱流微細構造プロファイルデータから、乱流運動エネルギー散逸率 ε を計算し、Mellor-Yamada Level-2.0 スキームによるフラックスリチャードソン数を基に乱流浮力フラックス B を見積もった。B の鉛直・測点平均値 $\langle B \rangle$ を、夏季伊予灘の平均海面熱フラックス（Tsutsumi and Guo 2016）を基に計算した海面浮力フラックス Bs と比較することで、Simpson and Hunter (1974) と同様の水柱の混合・成層化レジームについて、乱流混合の観測に基づいたより直接的な評価を行った。加えて、この解析結果を衛星による海面水温観測データ（MODIS SST）から検出した SST フロントと比較した。

結果

伊予灘南西部では図1c-e に示されるように水平波長が数百メートルから 1 キロメートル、高さが最大 10 メートルを超えるようなサンドウェーブが存在している。個々の乱流観測からは、Ic、Is 断面中の巨大なサンドウェーブ上（測点 Ic6ii-Ic7i, Is6i-Is7i）における乱流運動エネルギー散逸率の高まりが毎回計測され、そこでは常に活発な鉛直混合が生じている様子が捉えられた（図 2）。サンドウェーブ域の北東部（Ic1-Ic6, Is5i-Is6）や断面 In、Sd では海底の起伏は穏やかで、乱流も比較的弱かった。サンドウェーブ上では強い乱流によって水温が鉛直的に混合され北東部との間にフロント構造を形成していた（図 2）。MODIS SST の解析からもサンドウェーブが顕著な測点 Ic7 や Is7 周辺で水温が低下し、その北東部にフロントが形成される傾向が認められた（図 f）。乱流観測データの統合的な解析からは、サンドウェーブ上では非サンドウェーブ域に比べてエネルギー散逸および乱流浮力フラックスが 10-100 倍であることが示され、この違いがサンドウェーブ上では $\langle B \rangle > Bs$ の混合レジーム、非サンドウェーブ域では $\langle B \rangle < Bs$ の成層化レジームとなる要因となっていた（図 1g-j）。この $\langle B \rangle$ の空間パターンは、従来の浮力フラックスの見積もりである海底地形による抵抗を考慮せず流速の 3 乗を基にした値では説明できず（図 1i,j 黒線）、サンドウェーブが伊予灘のフロント構造を生じる大きな要因になっていることが示された。

成果発表

Tsutsumi, E., X. Guo, Y. Yoshie, T. Endoh, T. Matsuno and I. Itoh (2021), Tidal sandwaves promote oceanic vertical mixing and frontogenesis. 3 月上旬に英文査読誌に投稿予定。

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）、堤 英輔（東京大学大気海洋研究所、研究協力者）

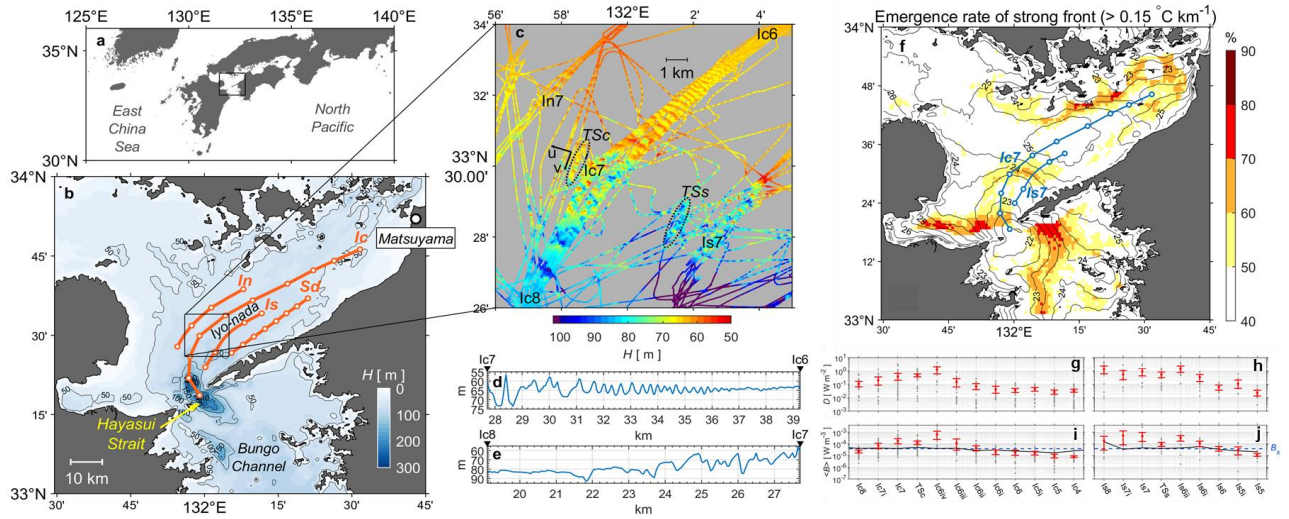


図 1 伊予灘における観測点と海底地形、水温フロント構造。(a) 伊予灘の位置 (b) 平均的な海底地形と乱流観測を実施した断面 (c) ADCP のボトムトラック計測から得た水深分布 (d) 測点 Ic6 から Ic7 および(e) 測点 Ic7 から Ic8 における水深分布の計測例 (f) 2012-2019 年夏季における MODIS SST から計算された平均水温（等値線）と 0.15 ℃/km を超える水温勾配の出現頻度分布（シェード）。(g,h) Ic, Is 断面における鉛直積分エネルギー散逸率。灰点は個々の計測値を示し、赤点と線はそれぞれ平均値と 95%信頼区間を示す。(i,j) Ic, Is 断面における鉛直平均乱流浮力フラックス。灰点と赤線・点は図 g,h と同様で黒線と青破線はそれぞれ Simpson & Hunter (1974) の方法による浮力フラックスの見積もりと夏季の平均海面浮力フラックスを示す。

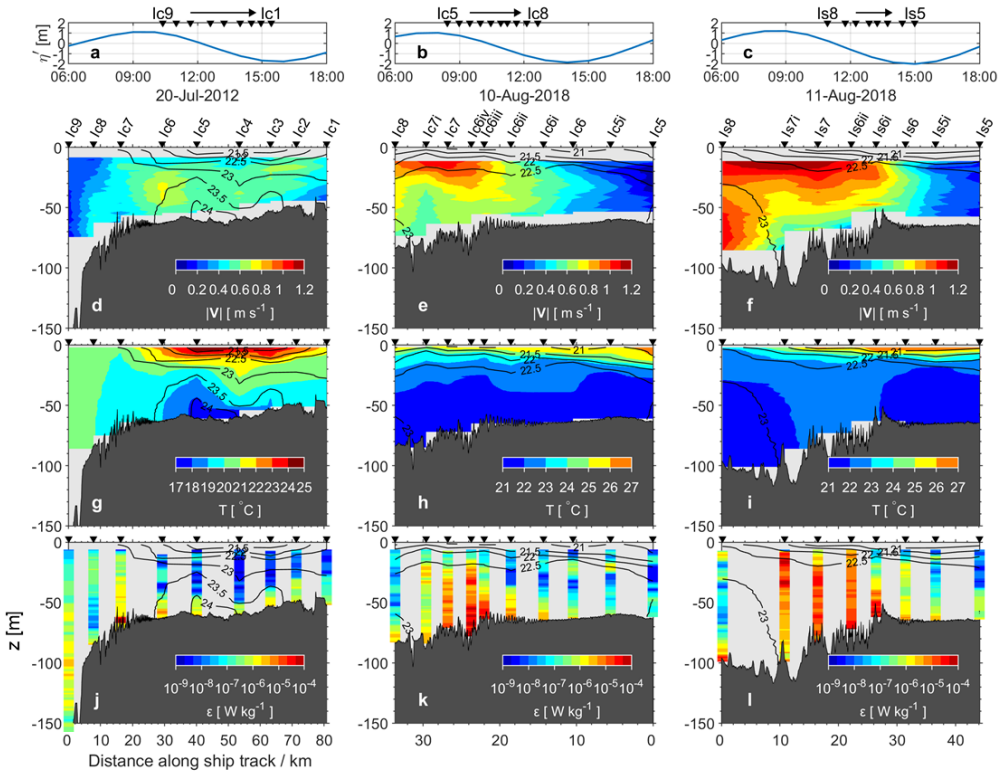


図 2 大潮期における観測結果例: (a,d,g,j) 2012 年 7 月 20 日における Ic 断面 (b,e,h,k) 2018 年 8 月 10 日における Ic 断面 (c,f,i,j) 2018 年 8 月 11 日における Is 断面における (d-f) 流速の絶対値 (g-i) 水温 (j-l) 乱流運動エネルギー散逸率の水平-鉛直分布。各図における等値線は海水密度 (σ_t)を示し、灰色のシェードは海底地形を表す。図 a-c は松山験潮所における潮位 (青線) と各観測点における乱流計測時刻を示す (▼印)。

沿岸波浪と 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

平成 28 年度に実施された文部科学省国家課題対応型研究開発推進事業宇宙航空科学技術推進委託費では，沿岸波浪と GNSS 反射波の関連性を調査するための基礎的な観測を実施し，検証のための波浪ブイの観測精度や沿岸や外洋の波浪の統計的な性質の抽出の信頼性の検討を行った．これまでに実施した，GNSS レシーバを用いた観測結果を踏まえ，波浪が GNSS 反射波に与える影響についての反射波信号と波浪の状況の比較検討を行う．また，海面直下の乱流観測を実施するための試験観測を行い，GNSS 観測による波浪の影響評価の拡張の可能性を検討する．

研究の実施体制

本研究は以下の体制で実施した．（年齢は 2020 年 4 月 1 日付）
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

手法と結果の概要

波浪の状況は，それによる海面の状態変化が GNSS 反射信号の経路に影響する一方で，その影響を評価することができれば，海面表層の波成乱流の評価につながる可能性がある．このことから，従来取り組んできたうねりと風波の分離観測の解析に加え，波浪と海表面乱流の同時観測データの解析を行った．和歌山県田辺湾における試験観測（2016 年）や外洋域（紀伊半島南方）における観測（2018 年）に加え，今年度は 2019 年 10 月 19 日に豊後水道において長崎大学練習船「長崎丸」に乗船して観測を実施したデータを解析した．豊後水道における観測は，強い北風によって急速に発達した比較的高い波高の状態での観測データの取得に成功した．一方で，持続した観測をすることができず，荒天時の観測手順に改善の余地が見受けられた．

波浪と海面付近の乱流の同時観測は，Nortec 社製の慣性センサー付き精密 3 次元流速計(Vector)を本研究の経費で購入・作成した浮体システムに装着した Vector ブイと，応用力学研究所の共同利用機器である GPS 波浪ブイをロープで連結して実施した（写真１）．Vector の姿勢変化の影響を受けた観測流速は，Edson et al. (1998)による船上での渦相関観測手法を応用して，以下の式に従って地球座標系における真流速値を回復した．

$$\boldsymbol{V}_{true} = \boldsymbol{T}\boldsymbol{V}_{obs} + \boldsymbol{\Omega} \times \boldsymbol{T}(\boldsymbol{M} - \boldsymbol{S}) + \boldsymbol{V}_{mot}$$

ここで，V_{true} は真流速，V_{obs} は観測された流速，V_{mot} は回転による見かけ上の接線流速，T は姿勢変換行列，$\boldsymbol{\Omega}$は Vector の角速度，$\boldsymbol{M}$-$\boldsymbol{S}$は IMU を起点とする流速観測点の位置ベクトルである．この式に Vector 付属の IMU の出力である姿勢変換マトリックスを適用して真流速を得る．本研究でこれまでに実施した観測と解析によって，比較的静穏な環境ではこの手法によって妥当な流速変換値を得られることを確認している．

長崎丸における観測は 2019 年 10 月 18 日－20 日に実施され，本観測は 19 日 14：42 から 16：00 にかけて実施した．Vector ブイと GPS 波浪ブイは約 10m のロープで係留していたが，高波高のために両ブイの動きが互いに干渉し，15：51 に波浪ブイが転覆するなど，観測の中断があった．その後も回収と転覆が数度あったため，16：00 に観測の中止を決定した．そのため，有効に取得されたデータは 20 分毎に取りまとめた最初の 3 データだけである．

写真 1：長崎丸観測時の Vector ブイ(左側浮き輪状)と GPS 波浪ブイ(右側ドーム状)の同時観測

図 1 はその際の 2 次元波浪スペクトルを示す．波浪の状態は 1 時間の間ほぼ変化がなかった．次いで，同時間帯の Vector 観測を実施した結果を示す．昨年までの研究によって，海面直下の流速スペクトルの形状には，定性的に 2 つの特徴があることがわかってきた．1 つは，波浪の周期付近におけるエネルギー密度の極大であり，これは海面変動に伴う非回転流速変動に伴うものであると考えられる．この周波数よりも高周波数側では急激なエネルギー減少が見られ，おおよそ 1Hz から 10Hz の範囲では Kolgoromov の-5/3 乗則に沿った形状となる．10Hz 以上の範囲では流速観測精度(最大値の 1%程度)の制限により，ホワイトノイズ状になる．図 2 に示した流速スペクトルにはその特徴が表れている．示した 3 つデータは連続的に取得したものであり，風速はいずれも 12m/s を超えている．期間内の風速変化と風波の有義波高変化は必ずしも一致しない（表 1）．これに対応した水平流速成分のスペクトル（図 2）は，統計的に有意なレベルではないが乱流領域のスペクトル密度の大きさが有義波高（または風波の有義波高）に対応して小さくなっており，海面風応力による乱流エネルギーの供給と区別できる可能性が示唆される．しかし，観測ケースの蓄積は不十分であり，時間的に連続な観測結果を増やしていくことが次年度以降の課題である．

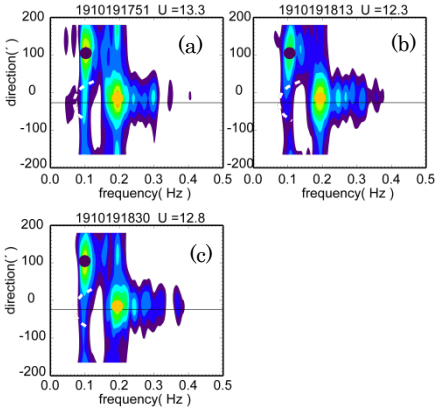


図1：長崎丸観測時の 2 次元波浪スペクトル．15:42 からそれぞれ 20 分間のデータに基づいて計算した．黒丸はうねり，橙丸は風波のピークを表す

表 1　観測時の波浪状況

時刻	風速 (m/s)	有義波高	有義波高（風波）	有義波高（うねり）
14:42	13.3	1.5 m	1.6 m	1.2 m
15:02	12.3	1.4 m	1.4 m	0.9 m
15:22	12.8	1.3 m	1.3 m	1.1 m

このような，波浪と海面直下の乱流強度変化の関係を GNSS の反射波によって観測される海面状態変化と対応させることが可能であるかどうかについて調査した．海上風と波浪の関係に着目すると，Mean Sea Surface (MSS)との対応関係が重要であるといわれている．Chen et al. (2016, JGR-Ocean, doi:10.1002/2016JC011661)は，外洋における波浪ブイの観測から，うねりの影響は風波の MSS に正のバイアスを与えると指摘している．しかし，この根拠となる現場観測は 1 次元波浪スペクトルのみを根拠としており，風波とうねりの分離に問題があった．2 次元スペクトルに基づいて分離した，全波浪，風波成分，うねり成分のそれぞれの MSS と海上風速の関係を図 4 に示す．長崎丸では 3 個の波浪データしか得られていないため，参考のために，これまで解析した白鳳丸航海(KH-14-1)における波浪データも示した．風速と MSS は正相関の関係にあるが，ばらつきは大きい．これは過去の研究でも指摘されているが，うねりと風波を 2 次元スペクトルに基づいて分離すると，うねり成分の MSS は非常に小さく，全波浪の MSS と風波成分の MSS がほとんど一致している．両者の差はほぼうねり成分の MSS で説明でき（図非表示）．この性質は両観測で共通している．長崎丸観測における MSS は KH-14-1 の観測よりも小さいことがわかるが，これが急激に発達しつつある風波の性質を反映したものなのか，うねりの強弱によるバイアス成分によるものなのかについては不明である．今後は，波齢や個別の海況によって関係が優位に変化するのかどうかについて検討する必要がある．

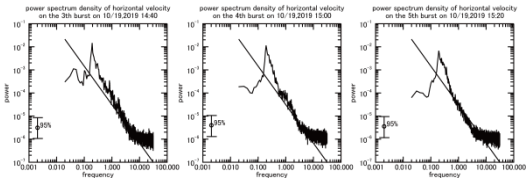


図 2：海面下水平流速スペクトル（左から 14:42，15:02，15:22 からの観測）

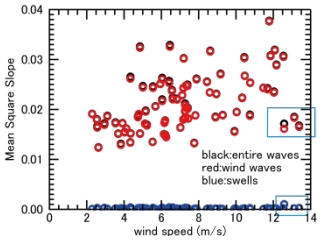


図 3：風速と MSS（黒点：全波浪，赤点：風波，青点：うねり）の関係．図中の青線で囲った 3 点が長崎丸観測のデータを示す．その他の点は KH-14-1 で得られた結果．

本研究の成果を含む研究発表

今年度に関しては 0 件

ハイブリッド式自律型海中ロボットの高度知能化に関する研究

大阪府立大学・大学院工学研究科 有馬 正和

□研究目的

本研究の目的は、海洋環境生態系のモニタリングを行うためのハイブリッド式自律型海中ロボット（HAUV : Hybrid-type Autonomous Underwater Vehicle ） KAUBE-1500 の高度知能化を図ることである。この機体は、小型高圧海水ポンプを用いた浮力調整装置と重心移動装置、4 基の水中スラスターを装備し、水中グライダーとしての推進性能と通常の AUV としての運動性能を持ち合わせている。また、浮力調整装置と重心移動装置を適切に制御することによって、鉛直姿勢での潜入および浮上を実現することができる。

Fig.1　ハイブリッド式自律型海中ロボット KAUBE-1500

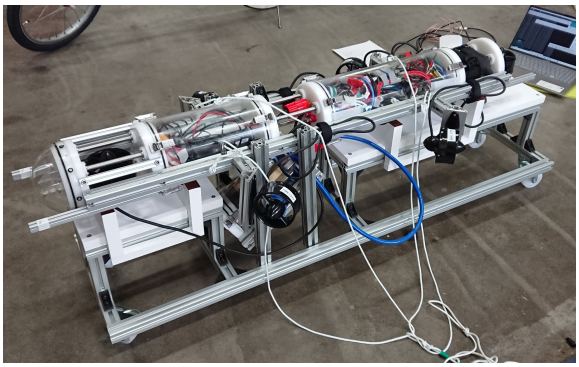


Fig.2　小型 AUV

グライディングから水中（海底）での水平移動への遷移および鉛直姿勢への円滑な運動を実現するためには高度な自律性能が求められるので、その自律制御システムを確立するためには、深海水槽における多岐に亘る基礎データの収集・解析が必要不可欠である。研究代表者らの所属する大阪府立大学の船舶試験水槽（長さ×幅×深さ : 70m×3m×1.5m）は、海中ロボットの性能評価を行うには幅と水深が不十分であり、九州大学・応用力学研究所の深海機器力学実験水槽（長さ×幅×深さ : 65m×5m×7m）を使用させていただくことが本研究の進展に最も有効であると判断した。貴研究所・海洋大気力学部門・海洋流体工学分野は、海中ビークルの運動制御に関する研究において極めて優れた実績があり、中村昌彦准教授との技術交流や情報交換によって自律型海中ロボットに係る研究の飛躍的な進展が図れると期待した。平成 30 年度には、KAUBE-1500 を遠隔操縦（ROV モード）によって制御を行い、2019 年度には自律制御（AUV モード）を行って、その潜航性能評価のための貴重なデータを取得することができたので、2020 年度は汎用化された ROS（Robot Operating System）プログラミングによる高度自律制御方式による潜航試験を行い、最大潜航深度 1,500m の海底調査のための自律型海中ロボットの実用化を目指した。

実海域で用いるAUVの試験は、実験施設や母船を使用できる機会が限定的であるため、自律型海中ロボットの自律性能の向上を目指して、小型の水槽でも比較的容易に実験ができる小型AUVの設計・開発を進めている。本研究では、Fig.2に示す小型AUVの潜航性能を明らかにするための性能試験を実施する。

□研究の成果

本研究では、九州大学応用力学研究所の深海機器力学実験水槽においてハイブリッド式自律型海中ロボットKAUBE-1500の水槽試験を実施し、その潜航性能を明らかにすることを予定していた。しかしながら、2020年度初めより新型コロナウイルス感染症による緊急事態宣言のため研究活動が大幅に制限されることになった。そのため、KAUBE-1500の制御システムの改良を進めることができず、小型AUVを用いた制御系の確認を行うこととした。小型AUVの仕様をTable 1に、潜航試験の様子をFig.3に示す。水深7mでの耐圧性能を確認するとともに、深度計をはじめとするセンサーの校正を行い、PID制御による深度・姿勢制御の潜航試験を行った。また、DVL（ドップラー式流速計）の校正を行い、簡易SLAM（自己位置推定・環境地図作成）の実現可能性を明らかにした。さらに、小型AUVのアクリル製耐圧容器の内側に貼付した4つの圧電素子でピンガーの音響信号を受信し、到達時間差（TDOA：Time Difference of Arrival）から音源方向の推定を試みた結果、若干の誤差があるものの信号処理を行うことで実用範囲になることを明らかにした。

Table 1　Specifications of small AUV.

Length	1.3 m
Breadth (wing span)	0.52 m
Height (including upper rudder)	0.15 m
Diameter of fuselage	0.15 m
Mass	16.95 kg
Displacement	16 ℓ

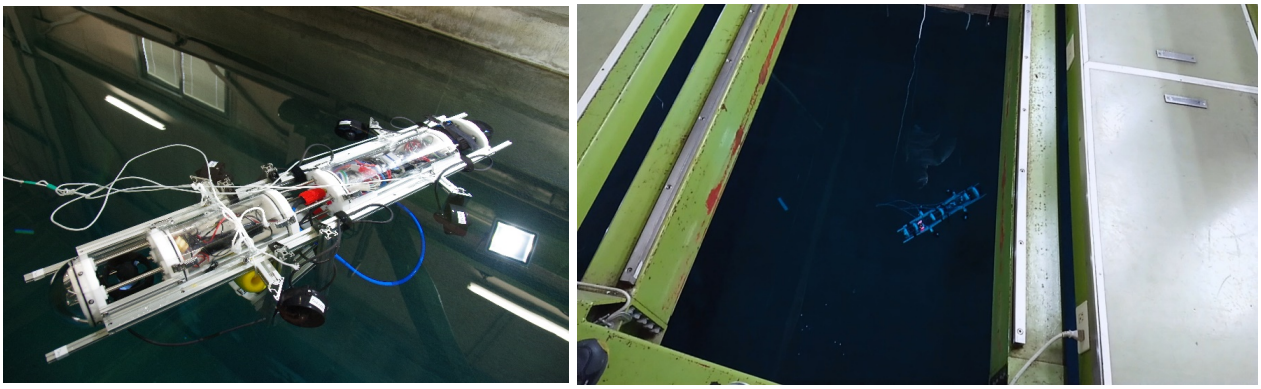


Fig.4　小型AUVの潜航試験の様子

□研究組織

氏　名	所　　属	職 名	役割・担当分野
有馬 正和	大阪府立大学・ 大学院工学研究科	教授	代表者・総括、実験計画
宮澤 佳奈	大阪府立大学大学院	修士 2 年生	小型 AUV および DVL の性能試験
竹川 源太郎	大阪府立大学大学院	修士 1 年生	小型 AUV の制御性能評価
伊藤 蒼馬	大阪府立大学大学院	修士 1 年生	水中音響観測実験
中村 昌彦	九州大学・応用力学研究所	准教授	所内世話人

□研究成果の報告について

- 宮澤 佳奈：非線形モデル予測制御を用いた自律型海中ロボットの制御に関する研究、　大阪府立大学大学院修士論文、2021.02

- 佐々木 敬涼：自律型海中ロボットの障害物回避手法と簡易型SLAMの開発に関する研究、大阪府立大学大学院修士論文、2021.02

- 宮澤 佳奈, 有馬 正和, 谷口 友基, 梅田 隼, 藤原 敏文：非線形モデル予測制御による自律型海中ロボットの潜航シミュレーション、日本船舶海洋工学会論文集（投稿中）

以上

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 180 度位相が異なるが，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，黒潮直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で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から統合的に調べる必要があるという考えから、本研究ではエネルギー遷移から乱流散逸へと至る仕組みに関して、黒潮と急峻な地形間の相互作用で生じる乱流混合過程に注目し、現場観測と数値実験によりその詳細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」KG2015 航海（2020 年 11 月 15–24 日）において、トカラ海峡の黒潮流軸付近に位置する海山（平瀬）上で生じる流れと地形の相互作用を明らかにするため、自由落下曳航式乱流計による乱流強度と成層構造、およびかごしま丸搭載の音響ドップラー流速計と計量魚探装置による流れと音響散乱強度の計測を実施した。黒潮の平均的な流軸に沿って平瀬を北西－南東方向に縦断する断面において、トカラ海峡で卓越する半日周潮の潮時に合わせた観測（12 時間の間に 4 回の繰り返し断面観測）を 11 月 16 日と 20 日に行った。また、観測結果の解釈のために、MITgcm (Marshall et al. 1997) を用いた数値実験を実施した。東経 125–134 度、北緯 27.5–32.5 度を計算領域とし、海洋データ同化モデル DREAMS (DR_M, Hirose et al. 2013) から 2020 年 11 月 16–30 日の平均的な海面高度、水温・塩分、流速を初期条件と開境界における緩和条件として与え、開境界から主要 4 分潮の順圧潮汐 (Matsumoto et al. 2000) を入力した。平瀬周辺の地形と流動を高精度に再現するために、東経 129.9–130.3 度、北緯 29.9–30.3 度、海面から 420 m 深までの範囲で格子幅を水平 100 m、鉛直 5 m とし、そこから開境界および底境界に向かって水平約 2 km、鉛直 170 m に格子幅を徐々に拡張した。数値モデルの粘性・拡散に関しては、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)のスキームを採用し、水平粘性・拡散係数は 1 m^2 s^{-1} で一定とした。

結果　11 月 16 日には黒潮が平瀬周辺を東向きに流れており黒潮と観測断面の向きが一致しなかったが、20 日には黒潮は南東向きに偏向し、概ね断面方向に流れていた。11 月 20 日は 8、11、14、17 時から断面観測を開始し、それぞれ満潮前、満潮後、干潮前、干潮後に対応していた（図 1a）。断面における流れには黒潮が支配的であったが、潮時に伴う変化も見られた（図 1b–i）。例えば 1 回目の断面観測時には、表層における南東向き流と 200–300 m 深における北西向き流が強く傾圧性が強かったが（図 1b,f）、約 6 時間後の 3 回目の断面観測時には、この傾向は弱まっていた（図 1d,h）。この変化は半日周期の順圧潮汐流では説明できず、内部潮汐によるものだと推測される。また、11 時からの断面観測時には、平瀬下流（x = 6–8 km）の表層 10–80 m で流れが周囲よりも弱まるとともに、等密度面が下方に下がる内部跳水様の構造が見られた（図 1g）。乱流運動エネルギー散逸率は、平瀬の下流側の水深 100 m 以深を中心に 10^{-6} W kg^{-1} を超える値が 1 潮時を通じて観測され（図 1 j–m）、鉛直・断面平均した値では 1, 3, 4 回目がそれぞれ 1.0×10^{-6}, 1.1×10^{-6}, 1.2×10^{-6} W kg^{-1} と同程度であり、2 回目が 0.6×10^{-6} W kg^{-1} であった。音響散乱強度には、平瀬の頂上と下流側に Kelvin-Helmholtz 様の不安定構造が潮時を通じて認められた（図 1 n–q）。以上のように、観測からは絶えず不安定が生じている様子とそれに伴って大きな乱流エネルギー散逸が生じている様子が捉えられた。

数値モデルで計算された 11 月 20 日における平瀬上の流れには、黒潮が現実よりも東偏し流速も大きいといった点で課題が残ったが（図 2）、潮位変動の再現に関しては良好であった。黒潮と成層の条件が異なるため観測とモデル間の比較には注意を要するが、黒潮の流軸に沿う方向の断面で見ると 11 時頃に内部跳水様の構造が見られる点では一致していた。数値モデルで計算された乱流運動エネルギー散逸率は、モデルはシア不安定を解像できないため観測よりも小さい傾向であったが、平瀬下流側の密度躍層（～24 σ_θ）で対流不安定によってエネルギー散逸が強化される点は、観測と一致する傾向が見られた。

研究組織

中村 啓彦 (鹿児島大学水産学部, 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), 堤 英輔 (東京大学大気海洋研究所, 研究協力者), 小針 統 (鹿児島大学水産学部, 研究協力者), 仁科 文子 (鹿児島大学水産学部, 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 (東京海洋大学, 研究協力者)

謝辞　DREAMS による計算結果を提供頂いた九州大学応用研究所の広瀬直毅教授に御礼申し上げます。

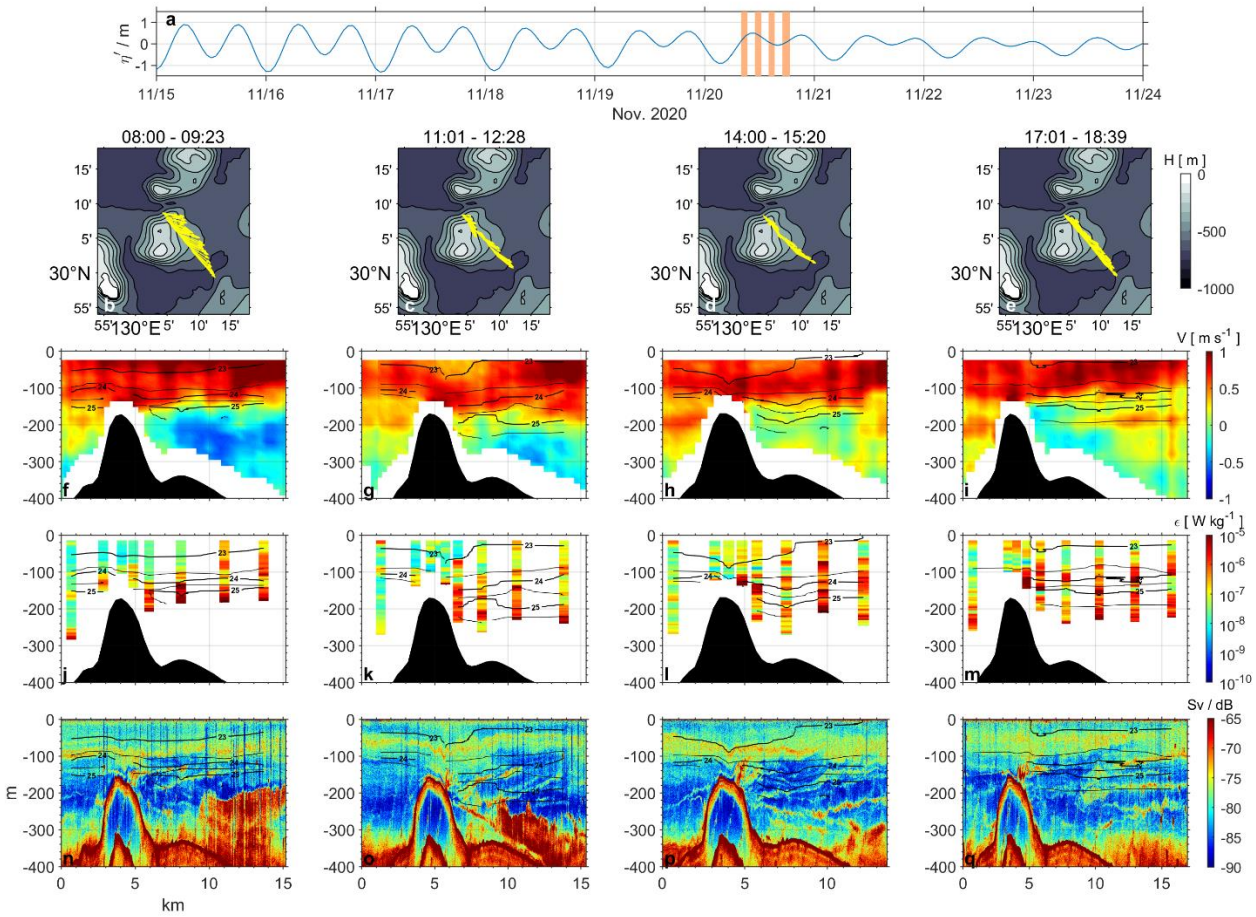


図 1　11 月 20 日にトカラ海峡の平瀬上で実施した自由落下曳航式乱流計を用いた繰り返し観測結果。(a) 種子島験潮所における潮位（青線）と観測時刻（橙）。(b–e) 海底地形と観測断面における表層流速ベクトル、(f–i) 5 分毎に平均した流速の断面に沿う方向成分、(j–m) 乱流運動エネルギー散逸率、(n–j) 120-kHz 計量魚探装置による音響散乱強度。図 f–q 中の横軸は船の航跡に沿った距離を示し、等値線は海水密度 (σ_θ) を示す。

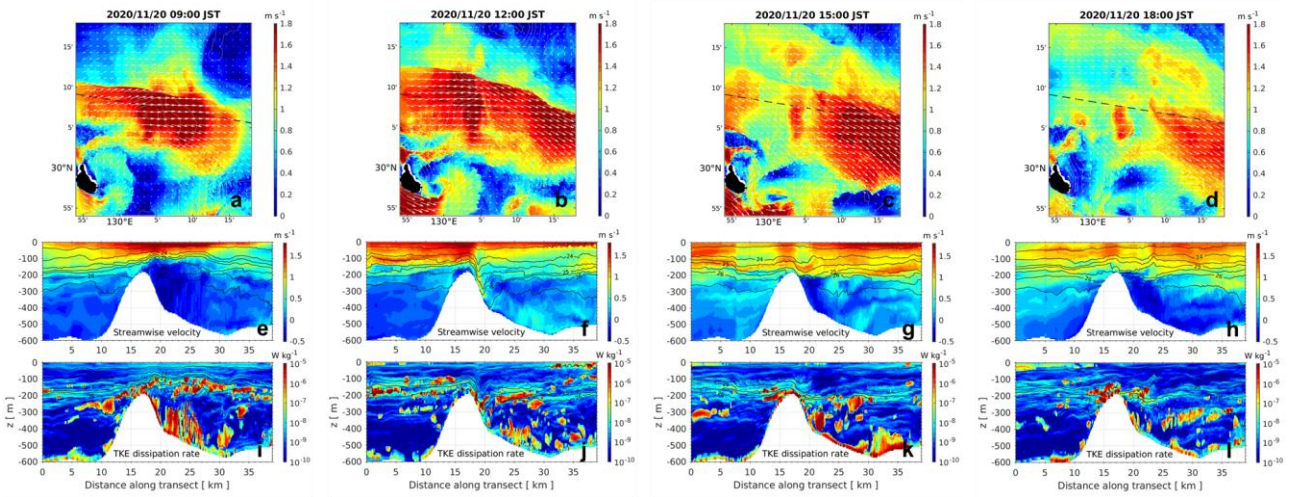


図 2 数値モデルによる平瀬上の流れと乱流運動エネルギー散逸率の 2020 年 11 月 20 日 (a,e,h) 9 時、(b,f,j) 12 時、(c,g,k) 15 時、(d,h,l) 18 時における計算結果。(a–d) 海面流速の水平分布、(e–h) 断面に沿う方向の流速の鉛直-水平断面分布、(i–l) 乱流運動エネルギー散逸率の断面分布。断面の位置は図 a–d 中の破線で示される。

令和３年３月２６日

プレスリリース

国立研究開発法人 水産研究・教育機構
国立大学法人 九州大学
国立大学法人 東京大学
国立大学法人 愛媛大学
国立大学法人 鹿児島大学
国立大学法人 東京海洋大学

トカラ海峡の岩礁で生じる強力な混合と黒潮の肥沃化
～世界最大級の乱流混合・栄養塩供給のメカニズムを捉えた～

最新の計測技術を駆使した調査により，急峻な地形（岩礁）の背後で黒潮内部に生じる強力な乱流の発達過程や，それに伴う栄養塩の表層への鉛直輸送の観測に成功しました。この肥沃効果は驚くほど大きく，黒潮の豊かな生態系の根幹を支えていると考えられます。

黒潮の豊かな生態系の維持に不可欠である下層から光合成可能な表層への栄養塩供給機構を解明するため，水産研究・教育機構，九州大学，東京大学，愛媛大学，鹿児島大学および東京海洋大学の共同研究チームは，鹿児島県南方沖のトカラ海峡を黒潮が通過する際，急峻な地形により攪拌されることで，どれだけの量の硝酸塩（植物プランクトンの成長に必要な栄養塩の一つ）が光合成可能な表層へと輸送されているかを，最新の計測技術を駆使して調べました。その結果，黒潮がトカラ列島の岩礁にぶつかったときに生じる強力な乱流と湧昇効果の詳細を捉えることにより，乱流による下層から表層への硝酸塩の鉛直輸送量を正確に計測することに成功しました。計測された硝酸塩の表層への鉛直輸送量は，年間最大で１平方キロメートル当たり約 2 万トン（黒潮流域の約 3 千トンの魚類生産を支える値）[補足 1-2]と，これまで世界の海で報告された輸送量の中でも最大規模のものです[補足 3]。この結果は，黒潮の流路上に存在する島や岩礁・海山などの急峻な地形により引き起こされる乱流混合や湧昇による表層への栄養塩の供給が，黒潮の豊かな生態系の維持に重要な役割を果たしている可能性を示しています。

この研究成果は，2021 年 3 月 25 日午前 9 時（米国東部夏時間、日本時間 25 日 22 時）に米国地球物理学連合速報誌 Geophysical Research Letters にオンライン掲載されました。

本研究は JSPS 科研費 JP15H05818，JP15H05821，JP18H04914，JP16H01590，JP18H04920 の助成を受けたものです。

2021年3月27日	【新聞】南日本新聞

新聞　　第3種郵便物認可

トカラ海峡の岩礁

黒潮ぶつかり 栄養分が浮上

鹿大チーム 強力な「乱流」確認

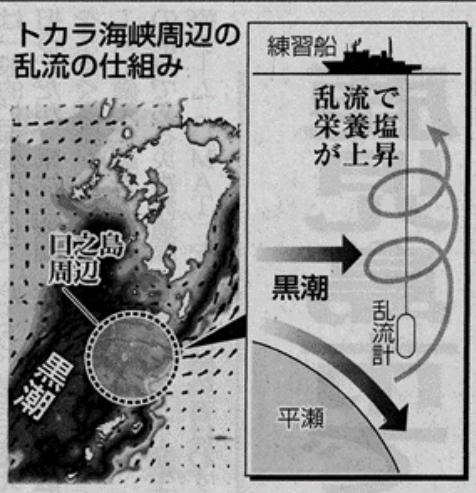
日本近海や太平洋を流れる暖流「黒潮」の研究を続けている鹿児島大学などの共同チームは26日、十島村口之島沖のトカラ海峡の岩礁など急峻な地形に黒潮がぶつかり、世界最大級の豊富な栄養分を海面近くに上昇させる強力な「乱流」の発生を確認したと発表した。論文は米国地球物理学連合速報誌「ジオフィジカル・リサーチ・レターズ」の電子版に掲載された。

鹿大、九州大、水産研究・教育機構などの共同チームは2016年から、鹿大練習船「かごしま丸」の海洋観測で口之島の北東15キロにある岩礁「平瀬」周辺を調査。黒潮は深さ150メートル付近で岩礁などにぶつかって海中に高さ約60メートルに及ぶ波を作り、砕ける際に局所的にかき混ぜられながら上昇する強い乱流を発生させていた。

乱流計や硝酸塩の濃度計で計測したところ、光合成する植物プランクトンを増殖させる「栄養塩」の量は年間最大1平方キロメートル当たり約2万トンで、世界最大規模だった。黒潮流域で取れる約3千トンの魚類生産を支える値となっている。

鹿大水産学部の中村啓彦教授(56)＝海洋物理学＝は「浅くて岩礁が多いトカラ海峡は黒潮の豊かな生態系の維持に重要な役割を果たしている。乱流の詳しい発生の仕組みと魚類生産につながる食物連鎖を解明したい」と話した。

黒潮はかつて、栄養分が乏しく「海の砂漠」とされてきた。共同チームは、アジなどが集まる謎「黒潮パラドックス」の解明に向けて調査。増殖する植物プランクトンを動物プランクトンがすぐに食べる「目に見えない食物連鎖」の仕組みを明らかにし、黒潮が餌の宝庫と証明している。（永井貴士）



対馬海峡から日本海南西海域にかけての海洋環境モニタリング

長崎大学　滝川哲太郎

1. 目的

対馬海峡東水道を通過した対馬暖流沿岸分枝は山口県見島周辺を通過している。2012 年 8 月下旬から、沿岸の青海島と沖合の見島の間の水位差（青海島－見島）を観測している（Takikawa et al., 2017）。令和 2 年度の報告（A-18）では、この水位差と船舶観測で得られた流速データを用いて、青海島－見島間を通過する海水の流量の見積もりについて説明した。

今回、水位計の内部電池の消耗により、時系列観測データが途切れることになった。この状況を報告するとともに、これまでの青海島－見島間通過流量データをまとめる。

2. 観測・データ解析

青海島通と見島宇津に水圧式の小型水位計（Rugged TROLL100, In-Situ 社）を 2012 年 8 月下旬から設置し，10 分間隔で 2 測点の水位を観測している（**図 1**）。2020 年 9 月に、現地でデータ収集を行ったところ、水位計の内部電池を消耗しており、途中で観測を終了していた。青海島と見島の水位計は、それぞれ 2019 年 12 月上旬と 11 月上旬までデータを記録しており、約 7 年半、連続稼働していた（**表 1**）。この水位計の電池は交換できないため、同一機種の水位計を再設置し、2020 年 9 月から観測を再開した。

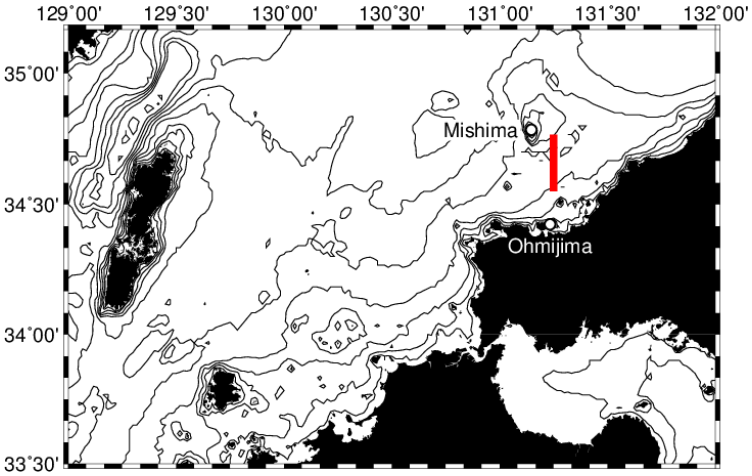


図 1. 青海島（Ohmijima）と見島（Mishima）の位置（〇）。縦線は ADCP 定線で、流量を見積もった範囲を示す（北緯 34 度 33 分～34 度 46 分）。等値線は 20 m 間隔の水深を表す。

令和 2 年度報告（A-18）と同様に、水位差 $\Delta\eta$ から青海島－見島間通過流量 T を見積もった。ただし、船舶 ADCP データの期間（2012 年 10 月～2019 年 10 月）を追加し、推定式を修正した。

$$T = 0.0365\Delta\eta - 0.479 \qquad \cdots(1)$$

旬ごとの流量を**表 2** に示す。

表 1. 各測点の水位計（Rugged TROLL100）のシリアル番号（S/N）、製造年月、観測開始・終了年月。

観測点	S/N	製造年月	観測開始	観測終了
見島	304352	2012 年 1 月	2012 年 8 月	2019 年 11 月
青海島	304367			2019 年 12 月

研究組織

長崎大学 大学院 水産・環境科学総合研究科　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）
福岡県 水産海洋技術センター　林田宜之（研究協力者）
山口県 水産研究センター　渡辺俊輝，廣畑二郎（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）

表 2. 青海島－見島間通過流量（Sv, 1 Sv = 10^6 m^3 s^{-1}）。東向きを正とする。

		2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
1 月	上旬		0.026	0.045	0.081	0.071	0.096	0.210	0.077
	中旬		-0.025	0.041	0.062	0.043	0.100	0.206	0.070
	下旬		0.001	0.031	0.046	0.022	0.119	0.176	0.049
2 月	上旬		0.029	0.060	0.027	0.045	0.098	0.193	0.063
	中旬		0.003	-0.129	0.074	0.055	0.088	0.136	0.044
	下旬		0.020	0.048	0.040	-0.002	0.083	0.145	0.041
3 月	上旬		0.061	0.043	0.058	0.026	0.149	0.099	0.049
	中旬		0.033	0.081	0.095	0.037	-0.003	0.050	0.108
	下旬		0.050	0.116	0.091	0.061	-0.039	0.198	0.111
4 月	上旬		0.062	0.118	0.024	0.091	0.022	0.220	0.088
	中旬		0.091	0.058	0.105	0.119	-0.009	0.168	0.065
	下旬		0.067	0.103	0.113	0.138	0.051	0.187	0.076
5 月	上旬		0.072	0.109	0.113	0.146	0.122	0.177	0.084
	中旬		0.066	0.123	0.104	0.167	0.167	0.144	0.089
	下旬		0.085	0.139	0.131	0.172	0.162	0.206	0.143
6 月	上旬		0.097	0.142	0.028	0.093	0.192	0.181	0.114
	中旬		0.181	0.144	0.037	0.141	0.173	0.167	0.079
	下旬		0.147	0.150	0.050	0.169	0.202	0.220	0.071
7 月	上旬		0.160	0.140	0.059	0.142	0.330	0.164	0.086
	中旬		0.219	0.179	0.048	0.202	0.458	0.215	0.100
	下旬		0.385	0.144	0.118	0.092	0.365	0.213	0.141
8 月	上旬		0.499	0.100	0.229	0.069	0.171	0.134	0.092
	中旬		0.331	0.151	0.163	0.094	0.231	0.054	0.103
	下旬		0.073	0.183	0.171	0.067	0.315	0.091	0.214
9 月	上旬	-0.013	-0.091	0.062	0.106	0.137	0.204	0.113	0.165
	中旬	-0.031	-0.079	0.026	0.047	0.060	0.147	0.088	-0.067
	下旬	-0.024	0.017	0.085	-0.054	0.055	0.290	0.107	0.099
10 月	上旬	0.052	0.127	-0.062	0.013	0.145	0.252	0.052	0.196
	中旬	0.020	0.078	-0.027	0.017	0.109	0.222	0.045	0.050
	下旬	0.062	0.107	0.106	-0.042	0.116	0.221	0.083	0.125
11 月	上旬	-0.007	0.177	0.097	-0.007	0.125	0.220	0.000	
	中旬	0.042	0.103	0.057	0.008	0.084	0.188	0.008	
	下旬	0.032	0.109	0.029	0.037	0.083	0.222	0.021	
12 月	上旬	0.069	0.132	0.115	0.085	0.100	0.185	0.013	
	中旬	-0.003	0.096	0.078	0.062	0.055	0.172	0.080	
	下旬	0.036	0.093	0.101	0.034	0.079	0.207	0.081	

2020 AO-11

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　環境科学研究所　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 年を境に減少傾向に転じている．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という問題点がある．この点に対して，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）が有用である．本共同利用研究では，東アジアスケール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．2019 年 12 月末に中国武漢を発端とした新型コロナウイルスの蔓延によって人間活動は大きく制限されることとなり，大気汚染物質排出量も大きく変化したことが考えられた．継続 3 年目となる今年度は，TROPOMI センサーによる高解像度データをもとに 2020 年の NO_x 排出量変化の初期解析を実施し，中国のロックダウン時の越境大気汚染の変化を数値モデルにより示した．

2. 手法

Sentinel-5P 衛星に搭載された TROPOMI センサーによる NO_2 カラム量（大気柱総量）を用いた．Level 2 の swath データを 0.06°×0.06°の格子点データに変換し解析に用いた．

コロナ禍の越境大気汚染の変化を解析するため，大気化学輸送モデル CMAQ による数値シミュレーションを実施した．人為起源排出量データはボトムアップ法による HTAP version 2.2 をベースに，2017 年の発生源区分別の中国の推計値を適用したものを用いた．さらに，中国の地上観測値の報告結果などをもとに，NO_x および SO_x 排出量が 1 月 23 日から開始された中国でのロックダウン時に半減したと仮定する感度実験を合わせて実施した．

3. 結果と考察

TROPOMI の高解像度データをもとに，九州北部や関西・関東地方を対象に 2019 年と 2020 年の NO_2 カラム量を比較し，その変化を解析した．わが国では 2020 年 4 月 7 日に 7 都府県に，4 月 16 日に全国に緊急事態宣言が発出され，これは 5 月 14 日に 39 県で，25 日に全国で解除となったが，この間 NO_2 カラム量は 2019 年に比較して 2-3 割程度低下していたことがわかった．また，このような NO_2 カラム量の低下は 3 月 2 日から実施された小中高の一斉休校時にも見出された．人間活動の変化とそれに伴う排出量推移を推計することが今後の課題であり，解析を継続する．

わが国の遠隔域（長崎県五島，島根県隠岐，新潟県巻，宮城県篦岳）におけるエアロゾル化学成分連続自動分析装置（ACSA）による地上観測結果は，2020 年 1-3 月に $PM_{2.5}$ やその構成成分である硫酸塩（SO_4^{2-}）と硝酸塩（NO_3^-）の大幅な濃度低下を示した．上述したわが国の排出量変化のほか，中国のロックダウンの影響を受けた越境大気汚染の変化も考えられる．この点を明らかにするために CMAQ を用いて中国のロックダウンに伴う排出量変化を考慮しない（気象場の変化のみを考慮）場合と排出量変化を仮定した数値実験を実施した（図 1）．SO_4^{2-}濃度の低下には中国のロックダウン時の排出量減少の影響が大きかった．一方，NO_3^-濃度の低下には，五島では中国の排出量減少の影響もあったものの，2020 年の気象場の変化が大きく影響していたことが示された．2020 年冬季は記録的な暖冬であり，NO_3^-が粒子化しにくい状況であったことが要因と推察された．

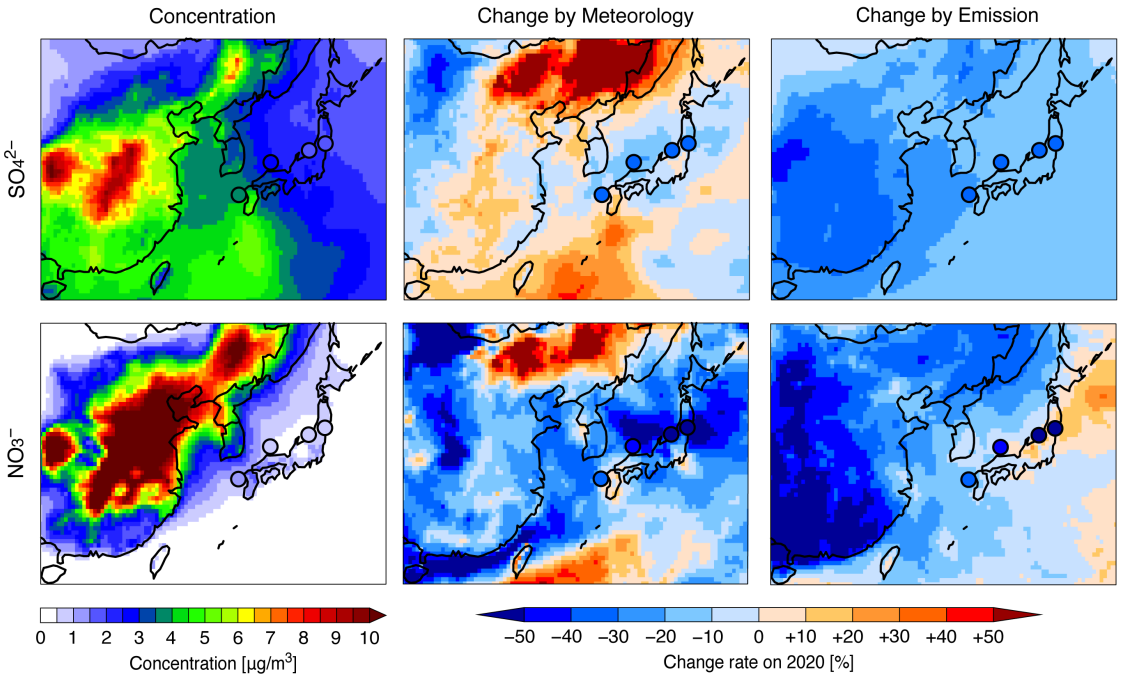


図 1．2020 年 2-3 月平均の（上）硫酸塩（SO_4^{2-}）および（下）硝酸塩（NO_3^-）の（左）濃度，（中央）気象場の変化による濃度変化，（右）排出量の変化による濃度変化（板橋ら，2020 より一部を抜粋し引用）．

4. まとめ

TROPOMI 衛星観測データをもとに 2020 年の NO_2 カラム量の変化を解析し，また，数値モデルにより中国のロックダウン時の越境大気汚染の変化を示した．中国のロックダウン時の排出量変化や，特に緊急事態宣言下のわが国の排出量変化を逆推計手法で高度化する必要があるとともに，これらに伴う大気環境変化を引き続き解明する必要がある．

・参考文献

板橋，王，弓本，鵜野 (2020), 大気環境学会誌, https://doi.org/10.11298/taiki.55.239

係留系観測による豊後水道の底入り潮発生時の力学バランスの見積もり

愛媛大学沿岸環境科学研究センター　森本昭彦

1. 目的

九州と四国の間に位置する豊後水道では、夏季を中心に陸棚斜面付近の冷水が水道内に突発的に進入する「底入り潮」と呼ばれる現象が発生する。豊後水道へ流入する大きな河川がないことから、基礎生産に必要な栄養塩は底入り潮により水道内へ供給されていると考えられている。底入り潮の報告は 1990 年代からあり、小潮期に発生する傾向があることや、底入り潮の発生後に植物プランクトンが増殖することなどの論文はあるものの、底入り潮の発生メカニズムに関する論文はなく、現在も発生メカニズムは分かっていない。

底入り潮の発生メカニズムが分からない主な原因は、底入り潮が発生する豊後水道陸棚縁および水道内部での流速観測がほとんど行われたことがなく、底入り潮発生時の流速の時空間変化が分かっていないためである。本研究では、豊後水道南部の陸棚縁、水道中央部、豊後水道東岸の湾内の海底上に ADCP、水位計、水温塩分計を係留し、同時に海洋レーダや人工衛星データにより黒潮や渦の変動を把握することで底入り潮の発生過程を観測する。さらに、底入り潮の発生時を狙い、係留点を通る断面上における密度分布観測を 7 日間連続で実施し、底入り潮発生時の運動方程式の各項を直接見積もることで底入り潮の力学バランスを明らかにすることを目的とする。

2. 観測・データ処理

豊後水道中央部と豊後水道東岸の湾内の海底上に海底設置式超音波多層計と水温塩分計を 6 月 16 日～9 月 15 日の三ヵ月間係留した(図1)。流速は海底から鉛直方向に 4m 毎の流向・流速を 15 分間隔で測定した。同時に水温塩分計により海底上 1m の水温と塩分を 15 分間隔で測定した。得られた流速、水温、塩分データから潮流による変動を取り除くためタイドキラーフィルターを施した。なお、新型コロナウイルスの感染拡大に伴い大型の係留系を設置する予定の船の運航が中止となったため、豊後水道南部の陸棚縁への機器の係留はできなかった。

底入り潮発生時の水塊構造の変化を把握するため、底入り潮が発生する確率の高い7, 8月の大潮～小潮となる時期に計 12 回の断面観測を実施した(図1)。

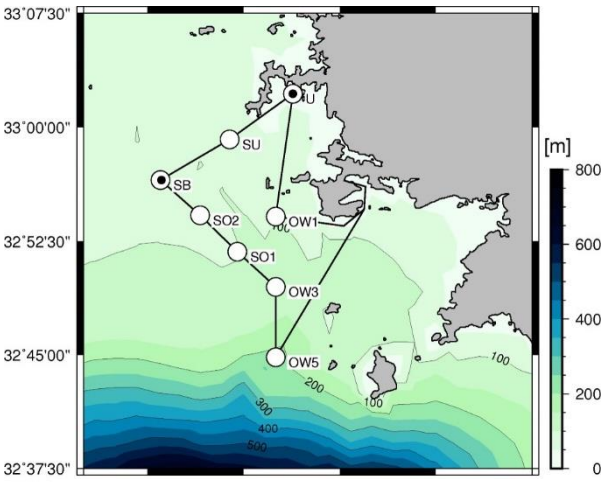


図 1.海底設置式超音波多層流速計係留位置(黒丸)と断面観測点(白丸)

3. 結果と考察

測点 SB における南北流の鉛直分布の時系列と、測点 SB の海底上 1m における水温の時系列を図2に示す。7 月中旬と 8 月中旬に 30～80m において比較的強い北向きの流れがみられるが、底層においては底入り潮と思われる北向きの流れは観測されなかった。また、水温の時系列を見ても、底入り潮と思われる急激な水温低下は見られていない。この係留系の結果と豊後水道東岸に設置されている多層水温計のデータから、2020 年は底入り潮が全く発生しなかったことが分かった。豊後水道底層の水温観測は 1995 年以来継続されているが、底入り潮が発生しなかった年はこれまでなかった。底入り潮の発生メカニズムはわかっていないものの、底入り潮の強度と豊後水道への黒潮の離接岸には高い相関があることが知られている。そこで、2020 年の黒潮流軸位置を調べた。2020 年の春から秋まで、黒潮は足摺岬から南へ約 120 ㎞の位置を流れ、これまでになく長期間離岸流路をとっていた。また、愛媛県が毎月行っている CTD 観測結果を解析したところ、2020 年の豊後水道全域の水温は 4 月～9 月まで全層において約 2℃平年値より低い状態であったことが分かった。豊後水道の 1

年間の海面熱収支は負になることが既往の研究で示されていることから、黒潮の長期的な離岸に伴い、黒潮からの水平的な熱輸送量が減少したことにより 2020 年の水温が低く推移したと考えられる。

2020 年は 1995 年以降で初めて底入り潮が非発生の年となった。底入り潮は黒潮の接岸に伴う海底境界層でのエクマン輸送による低水温水塊の豊後水道の輸送や、足摺岬沖のバンプでの湧昇による擾乱が地形性ロスビー波として西進することで発生すると示唆されている。つまり、底入り潮の発生に黒潮が関わっていることが示唆されてきたが、黒潮の変動と底入り潮の発生を明確に示したデータは今のところない。しかし、今回の観測結果は、底入り潮の発生において黒潮の豊後水道への接岸が必要条件であることを示していると考えられる。実際、研究協力者の前谷が行った数値モデルの出力の解析結果からは、黒潮が高知県の柏島沖で陸棚斜面を横切ることによって供給された低温水塊が、豊後水道沖の反時計回りの循環流により移流され、黒潮系暖水の豊後水道表層への貫入による南北の圧力勾配力の減少によって冷水が豊後水道へ進入し底入り潮が発生することが示されている。このことからも底入り潮の発生において、黒潮がある程度豊後水道に接岸することが必要条件となっていることが分かる。

本研究では、底入り潮発生時の流速や密度構造の変化を観測により捉え、そのデータから運動方程式の各項の時間変化を調べることで底入り潮の発生メカニズムを明らかにすることを目指した。しかしながら、新型コロナの影響により予定の係留観測ができなかったことと、底入り潮そのものが発生しなかったため目的を達成することができなかった。しかしながら、数値モデル解析をかなり進めることができ、数値モデル内での発生メカニズムについて調べることができた。今後は、今回と同様な観測を実施することで実際の底入り潮の発生メカニズムを明らかにしていく予定である。

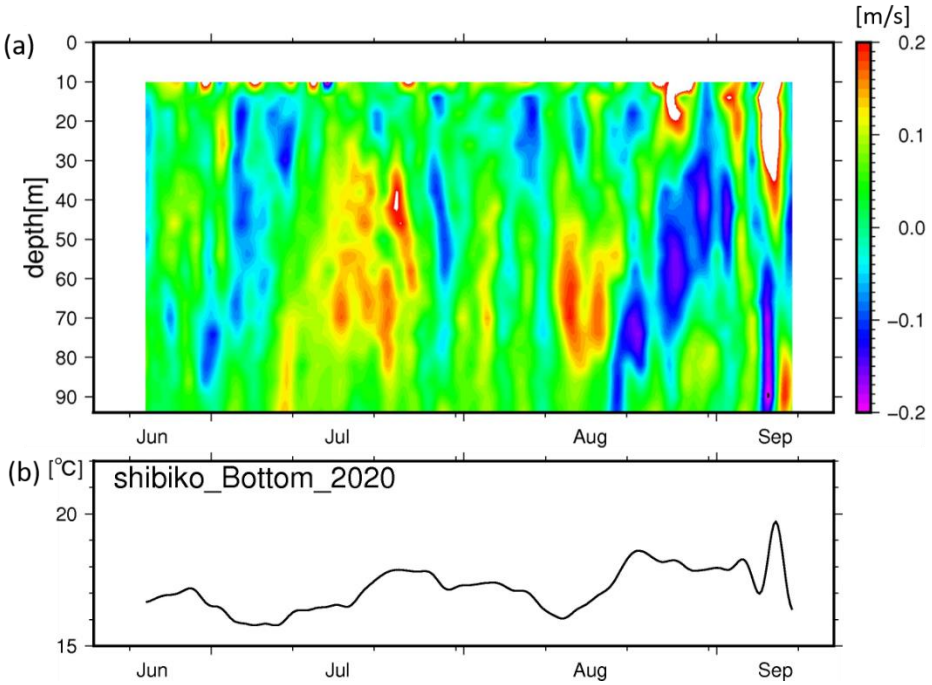


図 2. 測点 SB における(a)南北流速鉛直分布の時系列と(b)海底上 1m における水温の時系列

4. 研究組織

愛媛大学沿岸環境科学研究センター　森本昭彦（研究代表者）
愛媛大学大学院理工学研究科　前谷佳奈（研究協力者）
九州大学応用力学研究所　市川香　（所内世話人）

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

本課題では、河川海洋相互作用を検証することが可能な、河口域周辺の流れ場と物質循環を忠実に再現できる数値モデルの構築を目指す。豪雨に伴う河川流出は、陸域環境の変化を引き起こす洪水・濁流増加に加えて、沿岸域の海洋環境を激変させる。山岳地域や平地を伴う陸域から干潮水域を経て海洋に至る領域では、水の流れのレジームが劇的に変化するため、これまでの数値モデルでは、それぞれの流況に特化したモデルが別々に適用されてきた。そのため、特に河口付近のような河川海洋接合部は、モデルにおける擾乱の伝搬方向の解析可能範囲の違いにより、十分な解析ができない領域となっていた。この問題に対して、これまで等密度面モデルを提案し(Kida & Yamashiki, 2015)、河川と海洋をシームレスに接続した九州地方を中心とした河川・海洋モデリングへの応用を進めてきた。さらにモデルに土地利用モジュールを導入し、土地利用変化による透水係数や粗度、貯留量などについてパラメータを導入し、水文モデルへの発展的構築を行った。

豪雨時は懸濁物質が陸面からが河川・沿岸域を通じて海洋に流出するのに伴い、栄養塩そして農薬や汚染物質などが流出し、海洋環境が大きく変化することが知られている。このような複合現象を再現するため、流況モデルに懸濁物質流出モジュールを融合し、海底堆積物や低次生態系の応答を検証できるモデルを開発する必要性がある。そこで粒子追跡モデルを用いた沿岸域の海洋循環と懸濁粒子の結合モデル開発するため、河川海洋一体型モデルと沿岸域における粒子追跡手法の導入方法に関する議論を進め、両モデルの特徴を組み込んだ数値モデルのプロトタイプモデルの構築を目指す。

2. 解析手法

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を構築・検証する。

(1)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比較を基に、陸面課程が異なる数値モデルを構築することで、集中豪雨・台風時に起きた洪水イベントの再現性の依存性を検証する。灌漑水路・ダム等の影響も検証するため、豪雨時に観測されている一級河川の流量データの収集を行う。

(2)懸濁粒子流出過程の再現に向け、2020 年夏季の屋久島で起きた豪雨に着目する。急斜面をもつ島から流出する河川水の空間分布と、現地にて実施した観測データとを比較する。

3. 解析結果

(1) 2015 年 9 月 4 日～8 日に起きた豪雨による流出イベントを再現し、陸面課程の効果を検証した。まず感度実験の数を増やすため、モデル領域を九州北部に絞った数値モデルを再構築した。出力結果は国交省の観測データとの比較が可能な一級河川の嘉瀬川・六角川・筑後川にて、主にピーク流量・ピーク時間を検証した。

陸面課程において降雨は土壌に到達する前に樹木等によって遮断される。そこで降雨が起きていた領域が主に森林であったことから、一律 60%の雨水が土壌へと到達すると仮定して数値実験を行った。その結果、嘉瀬川・六角川ではピーク流量は観測の 50-150%の値が再現できたが、ピーク時間は半日ほど遅れていた。遅れの要因を検証したところ、数値モデルで考慮にされていた灌漑水路に河川水の多くが

蓄えられているためだと明らかになった。そこで（現実的にはとても細い）灌漑水路は無視した地形を用いたところ、ピーク時間の遅れは改善された。筑後川では、観測にある降雨直後の流量ピークが再現されず、降雨から 1.5 日後に観測と比べて 2 倍ほどの流量ピークが再現された。降雨直後のピークは強い雨が降った支流の一つの川幅が広すぎたために流れが遅くなっていたためであることが明らかになり、また 1.5 日後の流量ピークは上流域の土壌浸透の効果を強めることで改善された。陸面課程のさらなる改善が必要なことが明らかになった。

(2)2020 年夏季に発生した屋久島の河川水流出イベントを再現し、沿岸域での拡散過程を検証した（図 1）。放射状に存在する河川群を通じて河川水の流出が起きていることが確認でき、特に島の南東部の河川から勢いよく流出し、より沖合まで拡散していた。これはおそらく斜面が急なことで流れが急になり、海水との混合が活発化し、河川水としての流量が大きくなったためだと推測される。現地で観測した豪雨後の塩分の低下も、定性的には似た傾向を示している。今後、より詳細な比較検証が必要である。

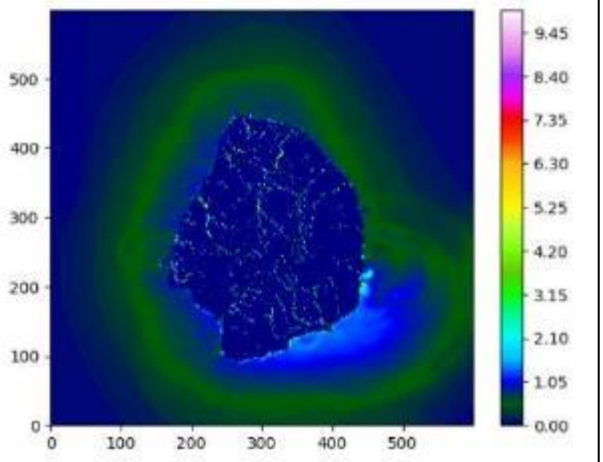


図 1 ：2020 年夏季の屋久島の河川水流出イベントの再現。色は淡水層の厚みを示している。島の囲むように淡水プリュームが形成されている様子がわかる。

4. 考察

河川海洋一体型モデルで再現された流出イベントはピーク時間が観測より遅れる傾向が確認されたが、河川の流路幅・最大水深を改善することによって現実的に近いかたちで再現できるようになった。また 100m ほどの解像度では灌漑水路などの現実にはより細い流路を含めるとピーク時間が遅れる効果があるため、自然河川部分のみを考慮することで河川海洋一体型モデルは山地から海域までをシームレスに再現することができることがわかった。実装した陸面過程を用いた感度実験からは、ピーク流量に加えて初期の流量が増加する際の時系列が土壌過程のパラメタリゼーションに感度が高いことを示していた。今後、屋久島において行った観測も活用した比較検証が必要である。

5. 研究成果

学会発表

日本地球惑星科学連合大会（オンライン）, 2019,「九州の領域河川海洋一体型モデルの開発」, 木田 新一郎、堤 隆浩、山敷 庸亮、黒木 龍介

6. 研究組織

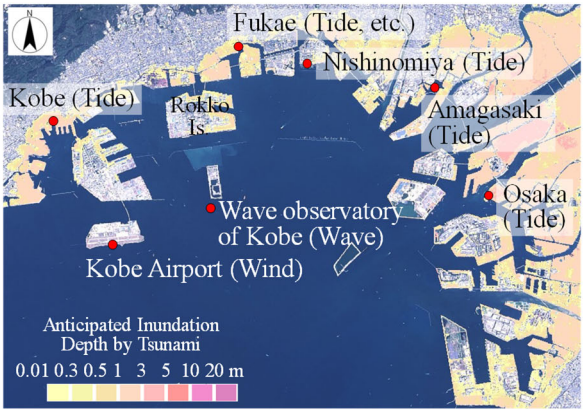
代表者	京都大学総合生存学館	教授	山敷庸亮
協力者	東京大学大気海洋研究所	助教	松村義正
協力者	東京大学大気海洋研究所	特任研究員	干場康博
世話人	九州大学・応用力学研究所	准教授	木田新一郎

高潮・洪水時の海洋環境変動

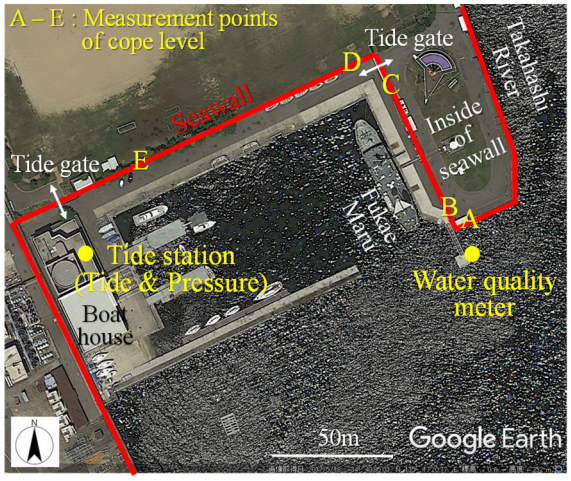
神戸大学 内海域環境教育研究センター　林　美鶴

1. はじめに

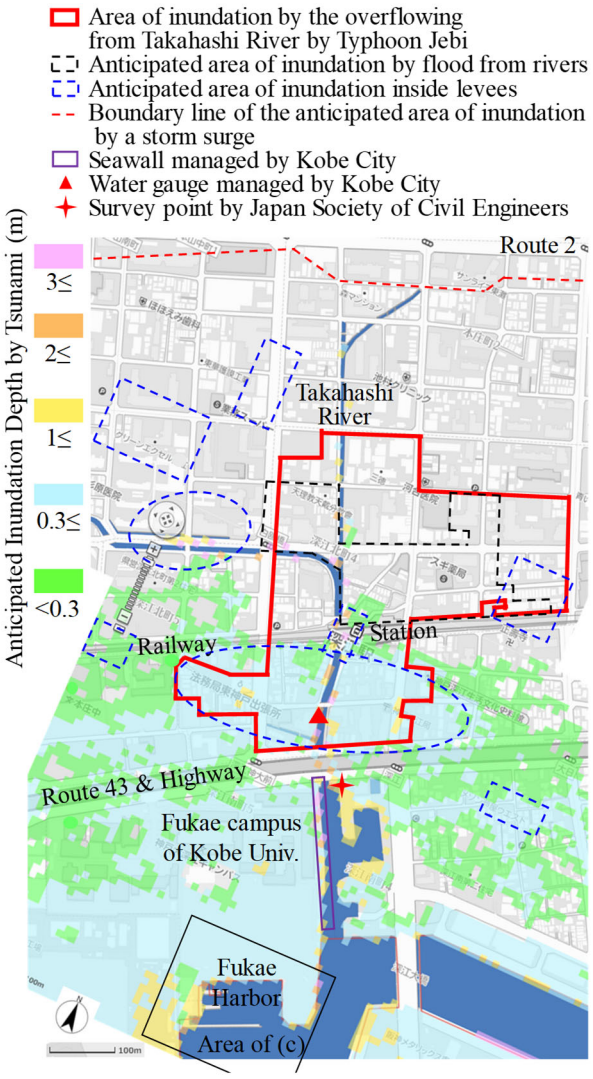
2018 年 9 月 4 日 14 時ごろに台風 21 号（T1821, Jebi）が神戸市西部に上陸し、第二室戸台風（1961 年 9 月 16 日）を越える過去最高潮位をもたらした。図 1(a)に示す大阪湾奥に位置する神戸大学深江キャンパス内にある図 1 (b)の港（以降、深江港）でも防潮堤外の建物が浸水した。14 時 16 分に最高潮位 305 cmを記録し、天文潮位からの偏差は 258 cmだった。この水位は防潮堤よりも低く、越流はしなかったが、高波と防波堤への打ち上げにより越波した。まあ、キャンパス横の高橋川を海水が遡上、氾濫し、図 1 (c)に示す赤枠の域が浸水した。深江港入口である高橋川河口の海底上 50 c m には総合水質計が設置されている。



(a) Fukae and other tide stations, and the wind and the wave observatories in the inner part of Osaka Bay. Color on the land indicates the anticipated inundation depth by the greatest tsunami.



(c) Seawall, survey points and so on around Fukae harbor.



(b) Area of inundation of Takahashi River basin and Fukae Harbor, and level measurement positions.

図 1　観測場所(a)(b)と高橋川流域の浸水域

2. ハザードマップとの比較

高潮以前に、神戸市は高潮ハザードマップを公表していなかった。図 1(c)の色は津波ハザードマ

ップ（最大級の津波による浸水想定区域）を示している。また、黒の点線は河川洪水による浸水想定区域、青の点線は内水氾濫による浸水想定区域で、今回の高潮による浸水域の南部は内水氾濫や津波による浸水域に、南部は河川洪水の浸水域と一致している。災害ごとに予測が異なるものの浸水源は全て高橋川なので、特定の災害のハザードマップだけでなく、類似災害も参照し、リスク管理する事が望ましい。

今回の高潮は、南海トラフ地震による津波の予測値を下回っている。一方で、神戸市が高潮後の 2019 年 9 月に公表した高潮による浸水域の範囲は、図 2（c)の赤の点線より南側である。「想定される最大の高潮は、防潮堤などの施設では防げない」と説明している。2018 年の年間最大予測潮位は 9 月 11 日で、高潮時よりも 54 ㎝高い。今回の高潮時の深江港の防潮堤の余剰高さは 46 ㎝であったため、年間最大潮位時に高潮が発生した場合、越流した可能性がある。天文潮位が大きくなる時期は夏季で、温暖化に伴い台風は強化される。台風による高潮は、現在の津波対策では防げない可能性がある。

3. 高潮発生時の水質変化

図 2 は上から、水位、水温、塩分、密度、pH、濁度、酸化還元電位、酸素飽和度、懸濁物質濃度、溶存物質濃度の高潮発生日の時間変動である。14 時前から急激に水位が上昇しており、これと共に濁度と懸濁物濃度の変動が大きくなったが、顕著な濃度変化は見られない。他の項目は、最高潮位からの潮位低下時に変動が見られた。16 時ごろに、水温が極大となり、塩分と密度が極小となると共に、溶存物質濃度が極小となり、pH と酸素飽和度が極大となった。酸化還元電位は、還元的な状態から、極めて酸化的な環境に変化した。これらの事から、水位上昇に伴い海水が流入して海底付近の高濁度層が擾乱を受け、その後の水位低下に伴って河川水が流入し、酸素が供給されて酸化的な環境に変化したと推定される。一方で、pH が海水寄りのアルカリ性に変化したことは説明できないため、検討が必要である。

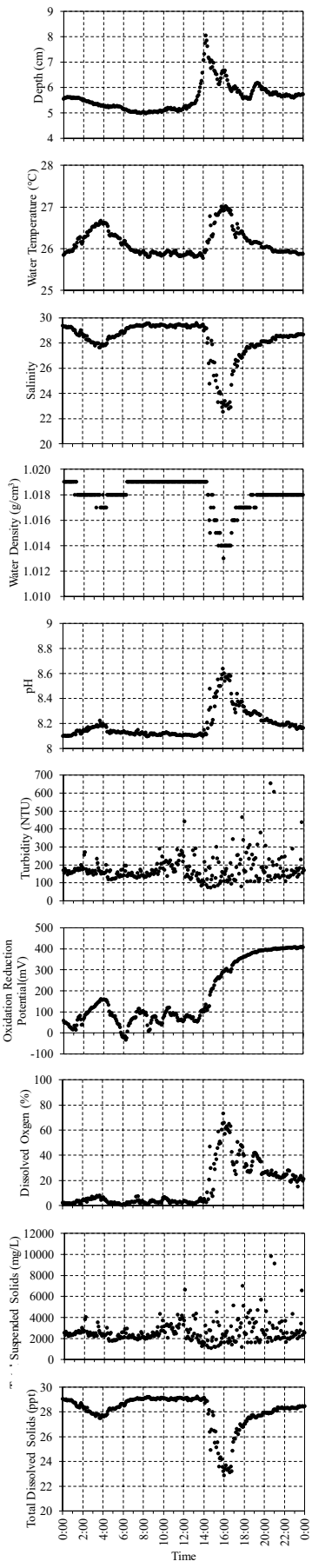


図 2　高潮発生日の水質データ

5. 成果公表

・M. HAYASHI *et al*., Storm Surge Disaster Caused by Typhoon Jebi, T1821, at Fukae Harbor in Japan, Transactions of Navigation Vol.6 No. 1, 2021(in press)

・林美鶴、他、神戸大学で発生した台風 Jebi(T1821)による高潮の実測値に基づく解析」JpgU-AGU Joint Meeting 2020

・林美鶴、他、阪神港神戸区深江における台風 Jebi(T1821)による高潮の実測、2020 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
作野裕司	広島大学	准教授
磯辺篤彦	九州大学	教授

雲粒子ゾンデを用いた過冷却の水雲の解消過程の解明

防衛大学校　地球海洋学科　岩崎杉紀

目的

本研究の目的は、雲粒の半径が 50μm 以上で個数密度が 10^{-4} m^{-3} 以下の薄い絹雲が過冷却の水雲を解消している過程を、雲粒子ゾンデ CPS、ライダ、気象レーダを用いた観測で解明することである。本報告書では、この絹雲を Large-and-Sparse particle Clouds (LSC)と呼ぶ。LSC は、衛星搭載ライダ CALIOP では観測しづらく、衛星搭載雲レーダ CloudSat では有意に観測できるため、ライダとレーダは観測にあった方が良い。なお、地上ライダの方が衛星ライダより感度は 1 桁以上良いため、地上ライダでは LSC は観測可能と思われる。

2021 年 3 月 1 日から 13 日、10 分毎に三次元ボリュームスキャンをしている紋別市のドップラレーダ、mss 社製の可搬型ライダ CL-1 と明星電気社製の雲ゾンデ CPS を用いた LSC 同時観測を北海道の湧別町で行う予定である。2018 年 3 月の観測までは北海道陸別町の名古屋大学太陽地球環境研究所で CPS 観測を行った。しかし、陸別町では常時稼働しているライダもあり観測施設は充実しているものの、比較的内陸のため CPS の落下予想地域が陸地に予想されることが多い、三次元ボリュームスキャンをしている気象レーダが付近にない、といった問題点があった。一方、湧別町はドップラレーダから南東に 35km 離れており、ボリュームスキャンで湧別町の上空の降水や降雪の観測に適している。また、過去の風速データから推測すると、湧別町はオホーツク海に隣接しているため、ゾンデが陸地に落下する可能性は低かった。2020 年 3 月 9 日から 14 日、湧別町で初めて CPS とシーロメータ（出力の弱いライダ）試験観測を行い、観測場の問題点を洗い出した。また、ゾンデの放球に初めて水素ガスを用いたので、その使用方法の確認も行った。

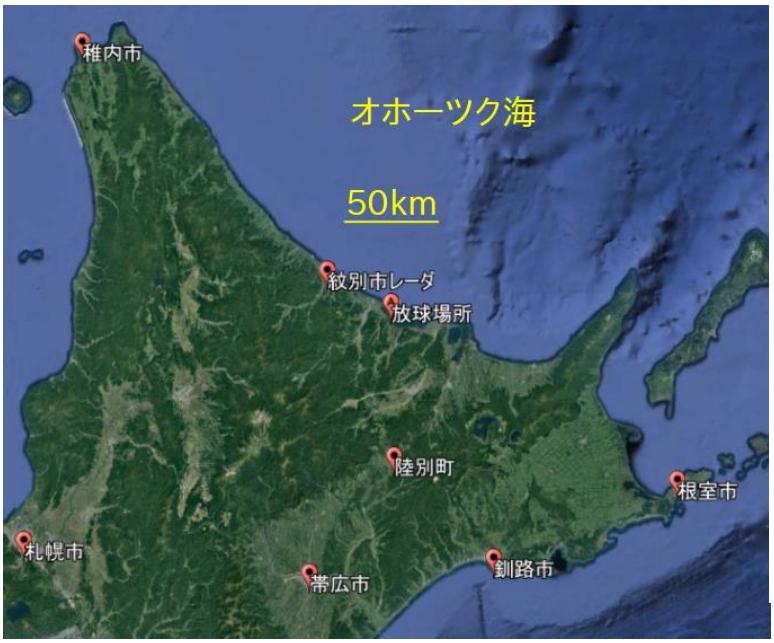


図 1　観測場所の位置関係。ライダ CL-1 観測と CPS 放球場所（湧別町）、紋別市のレーダはオホーツク沿岸にある。2018 年 3 月まで CPS 観測を行っていた陸別町は内陸にある。紋別市の北西 30-40km にあるオホーツク海沿岸の雄武町でも紋別市のレーダのボリュームスキャンで対流圏の測定に適している。しかし、そこでゾンデを放球すると、稚内の北にあるサハリンに落下する可能性が高くなった。Google Earth Pro 利用。

試験観測の結果

3 月 11 日に通常のゾンデである明星電気社製の RS11G を放球し、電波が周囲の建物に遮蔽されること

がなく受信できることを確認した。これは、ゾンデの受信アンテナの設置場所は地上しかなく、背の高い 2 階建ての建物越しにゾンデから出される電波を受信するため行った。電源はその建物からとり、50 m コードリールで建物から可能な限り離した場所にゾンデ受信機を置き、さらに信号ロスが目立たない 15 m のアンテナケーブルを使用し、建物から 65m 離した。ゾンデの上昇速度はおおむね 3 m/s で、上空 20 km で放球場所から北東に距離 170km でゾンデの信号が途絶えた。用いたブラウンアンテナは、カタログ値では距離 100km まで受信ができるとなっていたので、予想以上に信号が取得できたといえる。

風船の充填ガスは水素を用いた。通常、研究用のゾンデで用いられるガスはヘリウムであり、水素は静電気の除去が確実にできる施設の整った気象台でしか放球に使わない。しかし、この数年はヘリウムの需要と供給のバランスが崩れ、産業や医療用に優先的に販売されるため、ヘリウムは手に入れにくい。ガスを気球に入れている間、水素検出器（テスト―社製 316-2）を用いて水素の漏れ具合を調べ結果、ガスをどのように入れても水素が継続的に漏れることが分かった。漏れる箇所は、風船の口管付近と思われたが特定はできなかった。水素は 4%以上で爆発する可能性があるが、最も濃度が高くなっていた気球の下半分のごく近傍でも 2%程度だった。ただし、水素ガスをためないため上に屋根がない野外でガス充填をすること、静電気対策を行うことが必要であることが分かった。静電気対策は、静電靴を履き、静電気除去バンドを手首に巻いて行った。また、サンハトヤ社製の静電気探知機 EG-1 で周囲に静電気が帯電していないことを確認しながらガスの充填を行った。なお、CPS も含め各種ゾンデを制作する明星電気の水素ガス利用の手引きも静電シートをガスボンベの下に敷く（今回行ったガスボンベを地面に直置きすることと同じ）以外はほぼ同じである。

3 月 12 日の夜に CPS ゾンデを放球した（図 2）。高度 5.8km と 8.7km 付近に未飽和ではあるが周囲より高い相対湿度の層があり、それに対応して雲粒が計測されていた。ただし、CPS の測器の特性上、低速で上昇させた方が感度が良いのだが、上昇速度が 1.3m/s と遅かったため、二項検定によるノイズ処理を行えなかった。CPS の感度・風向風速と CPS 上昇速度・アンテナゲインを考慮してガスを充てんする必要がある。

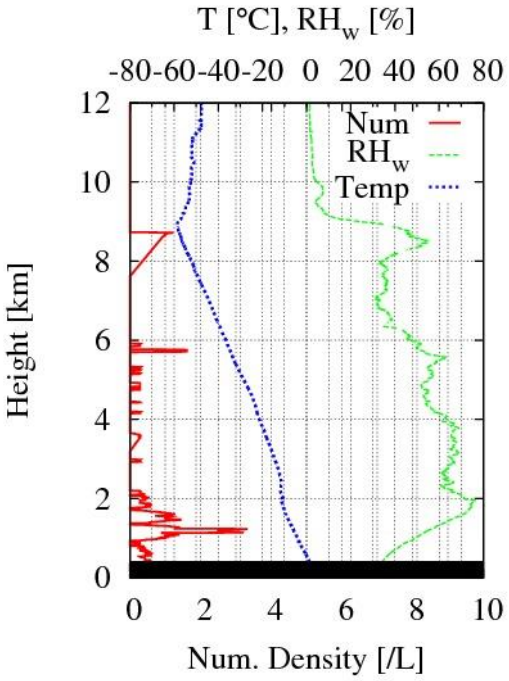


図 2　3 月 12 日に放球した CPS データの雲粒の個数密度、水に対する相対湿度、気温の鉛直分布。

成果報告

Iwasaki and Yamaguchi, Morphology and microphysics of cloud particle of Jumping Cirrus clouds measured by Himawari-8, American Geophysical Union Fall meeting, December 12, Online.

謝辞

本研究の一部は九州大学応用力学研究所の共同利用研究の助成を受けたものです。湧別町レイクパレスの安孫子氏には観測全般のサポートをして頂きました。湧別町役場・商工観光課の藪係長には地元の方や漁業関係者に観測の説明をして頂きました。サロマ湖養殖漁業協同組合の阪口耕一研究指導部長には観測場所の相談や各漁協の方々に観測の説明をして頂きました。紋別市役所・観光交流推進室の岩本勉之博士には紋別市が運用するドップラレーダの説明やデータ提供をして頂きました。

高度な氷晶モデルに基づくライダ／レーダ解析技術の改良

気象研究所 気象観測研究部 石元裕史

・要旨および目的

大気物理研究室が主体となって開発している多重散乱型地上観測システム及び衛星搭載ライダ／レーダ解析に関して、放射伝達計算による物理モデル検証等の技術支援を行う。また気象研究所で開発した氷晶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・ライダ複合解析技術を開発する。

・研究方法

ライダ／レーダ多重散乱については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。氷晶散乱特性については、粒子形状や大気中での配向の設定、散乱計算手法などについて打合せ等で検討し、散乱特性計算はその一部を気象研側が実施する。計算結果をデータベースとして大気物理研究室側で開発した解析アルゴリズムに組み込む。

・研究結果

昨年度に引き続き，氷晶モデルによるライダ単散乱特性について，六角柱や六角板・ドロクスタル形状の氷晶に加えて，[4]によるボロノイ型不規則形状粒子モデルの大規模散乱計算を実施した。ボロノイ形状粒子による 3 次元ランダム配向後方散乱特性を開発した改良型幾何光学近似法（Geometrical Optics-Integral Equation: GOIE）[2,3]を用いて計算しデータベース化した。また,新たに 2 次元配向を考慮したボロノイ型粒子の散乱特性を加えることによりデータベースの拡張を行った。得られた結果から粒子形状と観測量との関係を解析し,ライダ比と偏光解消度の情報が粒子形状と配向の抽出に有益である事などを新たに示し，国際学会誌で発表した[1]。

これら得られた成果は,日欧共同衛星 EarthCARE に搭載予定の高分解スペクトルライダや地上設置型多視野角多重散乱ライダなどを対象とした氷晶粒子の散乱特性解析研究に資することが期待できる。

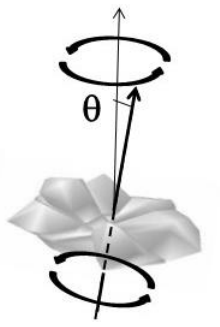


図. ボロノイ型不規則形状粒子の 2 次元配向の様子。長軸が水平方向になるような安定姿勢から、
確率分布に従って Q だけ傾ける。

z

・成果報告

査読付き論文

[1] Okamoto, H., K. Sato, A. Borovoi, H. Ishimoto, K. Masuda, A. Konoshonkin, and N. Kustova, 2020: Wavelength dependence of ice cloud backscatter properties for space-borne polarization lidar applications. Optics Express, 28, 29178.

学会発表（主著）

発表なし

参考文献

[2] Masuda, K., Ishimoto H., Y. Mano, 2012: Efficient method of computing a geometric optics integral for light scattering by nonspherical particles. Papers in Meteorology and Geophysics Vol. 63, 15–19.

[3] Masuda, K., and H. Ishimoto, 2017: Backscatter ratios for nonspherical ice crystals in cirrus clouds calculated by geometrical-optics-integral-equation method. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 190, 60-68.

[4] Ishimoto, H., K. Masuda, Y. Mano, N. Orikasa, A. Uchiyama, 2012: Irregularly shaped ice aggregates in optical modeling of convectively generated ice clouds, Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 113, 632-643.

・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

浅海域用水中グライダーの動作試験と運用に関する研究

長崎大学・水産学部　　森井　康宏

1．はじめに

環境変化の予測、環境保全に関する研究のためには、深い海域だけでなく沿岸の水深 50m 以浅の超浅海域の海洋データも必要である。従来の手法としては係留ブイや観測船による観測が考えられるが多点観測に時間がかかりコストも非常に高い。そこで、浅海域で使用可能な水中グライダーを開発し、観測コストの低減を図りたい。水中ビークルの開発には模型による水槽試験のみならず実機を使用した水槽試験や実海域試験が不可欠であり、開発を行うビークルの運動性能や制御性能に関する試験を共同で実施する。

本年度は、ラダー付き垂直尾翼やスラスターが取り付けられた円盤型水中グライダー実機を使用して深海機器力学実験水槽において滑空中の針路保持試験、浮上中の船首方位変更制御試験、実海域における動作試験を実施した。

2．円盤型水中グライダー実機の概要

円盤型水中グライダー実機の外観・構造を Fig.1 に示す。

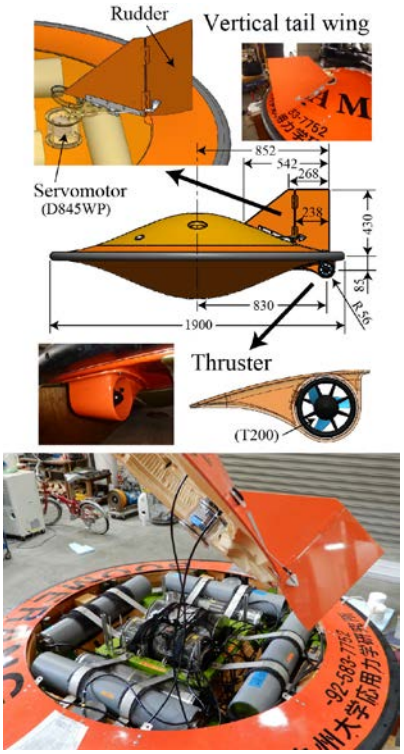


Fig. 1　円盤型水中グライダー実機の外観・構造

3．円盤型水中グライダー実機の水槽における滑空中方位維持制御試験

Fig.2 に水槽中を滑空するビークルを示す。Fig.3 は外乱を与えて針路保持制御を行った場合の水槽試験結果である。滑空中は縦方向の運動と横方向の運動の連成が強いため、多入力多出力系の制御方法が有利であり、LQ 制御が採用されている。外乱としては、水深が 2 m を超えた後にパルス状の力でビークルに取り付けられた安全索を引き、パルス状の回頭モーメントを加えている。LQ コントローラは外乱を抑制し、ビークルは制御を開始した時の針路を維持していることがわかる。計算結果は実験結果によく一致し、シミュレータは実験結果をよく再現できることが確認された。

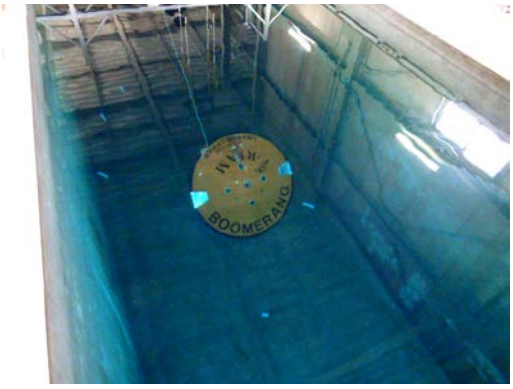


Fig. 2　水槽で滑空する円盤型水中グライダー実機

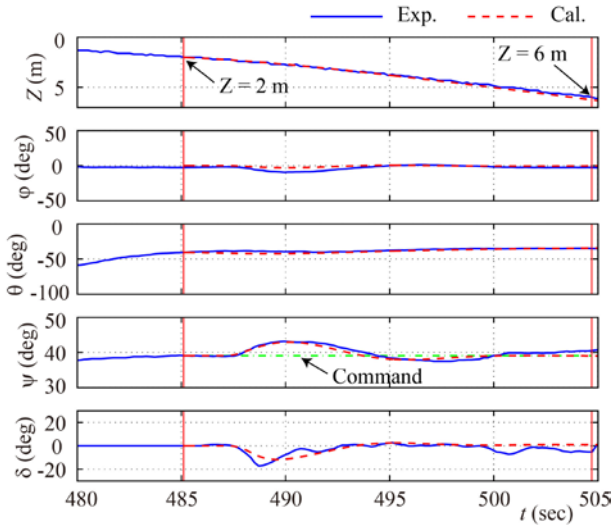


Fig. 3　円盤型水中グライダー実機の方位維持制御

４. 浮上中の円盤型水中グライダー実機の水槽における船首方位制御試験

船首方位制御試験結果を Fig.4 に示す。水面浮上時の船首方位制御はビークルの回転とそれ以外の運動の連成が小さいため、簡易な PID 制御が採用されている。回転を始めた直後に推力が飽和しているが、制限いっぱいの推力を使用して 90 度・180 度の回転に成功している。オーバーシュートが若干大きいのは、波浪に対するスラスターの応答を小さくするために微分ゲインを小さく設定しているためである。計算結果は実験結果とよく一致している。

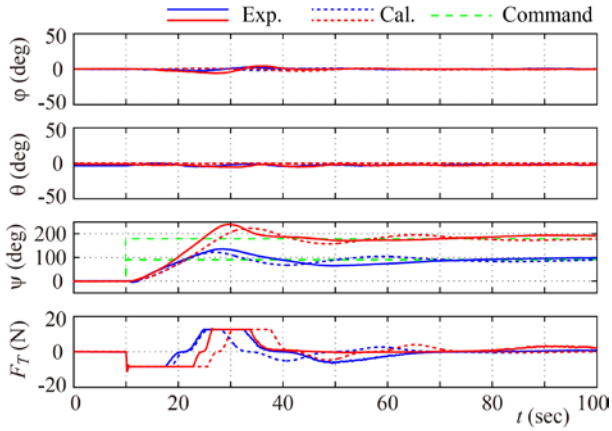


Fig. 4　円盤型水中グライダー実機の船首方位制御

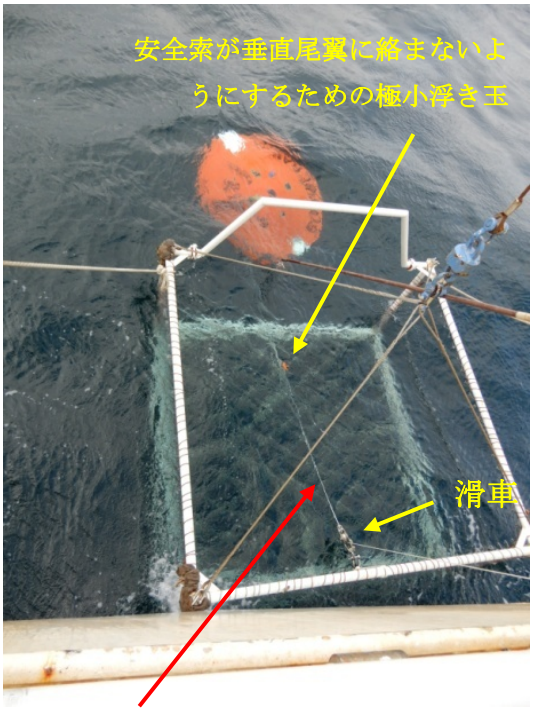
５．実海域における動作試験

実海域試験が 2020 年 12 月 21 日、長崎新漁港沖（Fig. 5）において実施された。

Fig. 5　動作試験実施海域

本試験において、船尾に吊り下げられたケージ内に安全索と滑車を使用してビークルを取り込み回収する方法が考案され、うまくビークルを回収できることが実証された（Fig. 6）。

Fig.7 に実海面上でビークルを 90 度回転させた時の試験結果を示す。ビークルは設定最大推力で回頭しようとしたが、90 度に達していない。安全索の影響が大きかったと考えられる。今後の課題としたい。なお、ビークル管制プログラムのバグのため、潜航滑空中の方位維持制御試験は実施することができなかった。



ビークルに取り付けられた安全索

Fig. 6　考案されたビークル回収方法

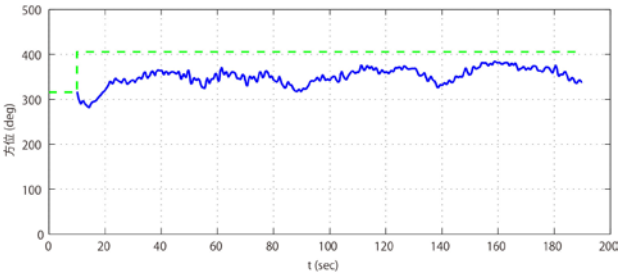


Fig. 7　実海域における船首方位制御試験結果

6. 研究組織

・研究代表者
森井康宏（長崎大学水産学部）
・研究協力者
山脇信博（長崎大学水産学部）
清水健一（長崎大学水産学部）
木下宰（長崎大学水産学部）
内田淳（長崎大学水産学部）
八木光晴（長崎大学水産学部）
青島隆（長崎大学水産学部）
合澤格（長崎大学水産学部）
眞角聡（長崎大学水産学部）
保科草太（長崎大学水産学部）
中村昌彦｛所内世話人｝、野田　穣士朗
（九州大学応用力学研究所）

海洋モデルを用いた、河川流量の変化が富山湾の海洋構造に及ぼす影響のシミュレーション

富山県農林水産総合技術センター水産研究所　小塚　晃

1. 目的

富山湾では、定置網漁業を主体とした沿岸漁業が盛んである。漁獲物は秋から冬にかけて日本海を南下する際に富山湾に来遊する魚種が多く、漁獲量は魚群の来遊状況と滞留時間による影響を受けると考えられる。魚群が来遊し湾内に滞留する理由として、能登半島が南下経路を物理的に遮断するだけでなく、避寒目的で南下する生物にとっては水温等の海洋環境も影響すると考えている。

富山県農林水産総合技術センター水産研究所では富山湾とその周辺海域の海洋観測を毎月実施し、冬季の湾奥部では、湾口部に比べて約 0.5℃程度温かい暖水域が形成されることがわかった。この原因として湾奥部は河川水の影響で海面冷却が遅れるためと考え、海洋同化モデル DREAMS_M において河川の有無のモデル実験を行い、湾口部と湾奥部において水温差が再現されることを示した。本研究では、富山湾奥の暖水域の出現に河川水以外の要因として、風の有無が影響することを検証す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 を作成し、富山湾内を水平解像度 500m、鉛直方向に水深 1～1092m（61 層）とし詳細に計算した。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 つの一級河川（小矢部川、庄川、神通川、常願寺川、黒部川）に対して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 ㎞程度掘り込み、実際の河口での水の混合を再現した。風は今回の実験では、図 1 の領域においてのみ変化させた。

2017 年 9 月1日～12 月 31 日の期間に対して、河川水の有無、風の有無を組み合わせ、4 パターンの設定で計算を行い、湾奥部の 1 地点（北緯 36.867 度、東経 137.083 度）における水温鉛直分布の時間変化を調べた。

3. 結果および考察

能登半島沖の石川県舳倉島と富山湾奥部に位置する伏木における平均風速をみると、年間を通して舳倉島は伏木よりも風が強く、冬季では平均風速が 8m/s を超え、夏季に 5m/s 前後となった（図 2)。伏木では、年間を通して平均風速が 5m/s 以下であった。舳倉島の風速にみられる顕著な季節変動は、冬季に卓越する北西季節風の影響を表している。一方、伏木において明確な季節変動が見られないのは、能登半島や富山県西部の山脈により冬季の北西季節風が遮られ、風が弱まることが考えられる。これらのことから、DREAMS_K の計算領域である富山湾内の海上において、能登半島沖に比べて弱い風が吹くと推測される。

河川がある場合における、風がないモデルとあるモデルの湾奥部における鉛直水温の差をみると、水深 80m より浅い表層部において、水温差が大きかった（図 3)。10 月の水深 20m 付近において、2℃以

上の正偏差がみられた。これは 2017 年 10 月に上陸した台風 21 号による風の影響を示していると考えられる。11 月の水深 10m 以浅の表層付近にみられる大きな負偏差は、風がないために温度の低い河川水が混合せずに成層している影響と考えられる。10 月から 12 月の期間を通して、60m 以浅では偏差が 0℃以上であることが多く、富山湾内の比較的弱い風によっても海洋が冷却されていることがわかった。

次に、河川がないとした場合における、風がないモデルとあるモデルの湾奥部における鉛直水温の差をみると、100m 以浅において正偏差と負偏差が同程度みられ、12 月後半には負偏差であった。(図 4)。図 3 と図 4 を比べると、図 4 では水温差 0℃の等値部分が縦縞上に同日に現れている。これは、表層に河川水がないことにより、風による海面冷却と鉛直混合が直ちに数十 m の水深まで影響するためと考えられる。

冬季の富山湾奥部に暖水域が形成される過程において、河川の有無だけでなく、風により鉛直混合が進行することで、暖水域の水温が変化することが明らかとなった。今後、富山湾奥部における水温に与える影響について、河川水量と富山湾内の風の強さとの関係も検討したい。

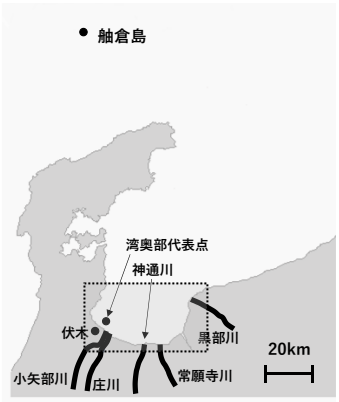


図 1. 計算領域と河川等の位置図

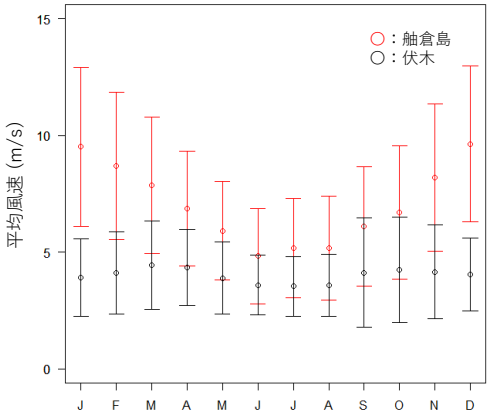


図 2. 舳倉島と伏木の風の季節変動

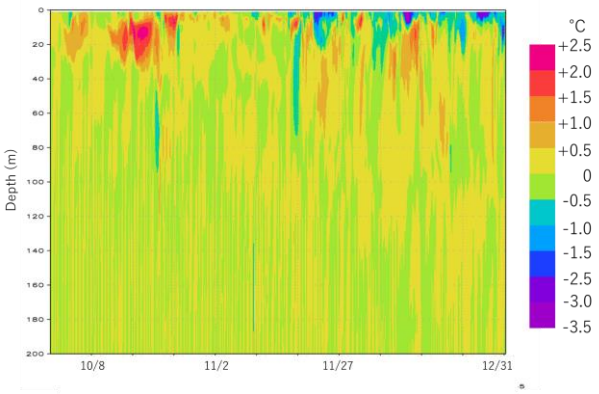


図 3. 河川がある場合における風の有無による水温差

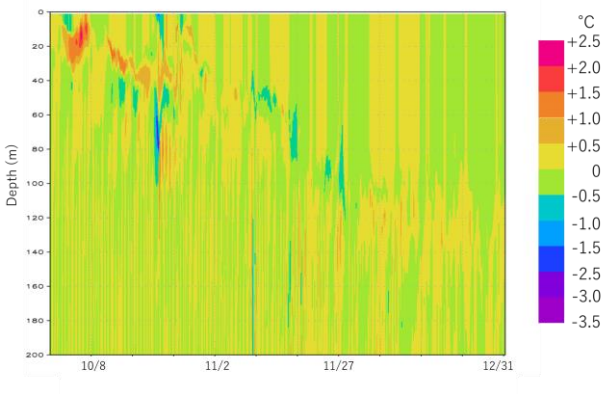


図 4. 河川がない場合における風の有無による水温差

4. 発表等実績.

なし

5. 研究組織

研究代表者	富山県農林水産総合技術センター水産研究所	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

九州北部地方におけるエアロゾルの光学的特性の長期変動

富山大学学術研究部理学系　青木 一真

要旨

時空間変動が大きい特徴をもつ大気エアロゾル粒子は、大気環境の悪化のみならず、喘息疾患や心疾患をはじめ健康影響など多義にわたり我々の生活に影響を及ぼしている。九州北部地方は、大陸から越境する汚染物質、黄砂粒子、森林火災などの影響を受けやすい場所と知られている。2003年から九州大学応用力学研究所の屋上にて、大気中に浮遊するエアロゾル粒子の気候影響を研究するため、太陽放射観測を行っている。エアロゾルの気候影響解明はもちろん、数値モデルや衛星観測の精度向上など利用している。本研究は、九州北部地方のエアロゾルの光学的特性の長期変動について研究を進めてきた。しかしながら、2020年度はCOVID-19の影響により、研究遂行に支障があったこともあり、COVID-19の大気への影響を含め、エアロゾルの光学的特性の変動について示す。

１．はじめに

九州北部地方の大気中に浮遊するエアロゾル粒子の長期変動は、中国の排出量の変化も影響し、近年わずかながら減少傾向にある。本研究の背景は、1996年から長崎大学おいて、2003 年からは九州大学応用力学研究所おいて、太陽光と周辺光の放射輝度を観測するスカイラジオメーターを使った自動測定を行い、エアロゾル光学的特性の解析を行っている。これらの長期観測データと地球観測衛星や数値モデルとの比較を行い、地球の気候問題の解決に向けて、エアロゾルの光学的特性の精度向上につなげてきた。本研究の目的は、長期的に観測されてきた観測データをもとに、衛星観測や数値モデルも含め、再解析を行い、九州北部地方の大気中に浮遊するエアロゾル粒子の光学的特性の長期変動について研究をすすめる。また、気象衛星「ひまわり8号」や２０１７年１２月に打ち上げられた「しきさい（GCOM-C/JAXA）」から、今まで以上に精度の良い結果が得られてきているので、時間・空間分解能の高いデータにより、数値モデル（SPRINTARSなど）などの精度向上につなげ、地球の気候影響の解明につながればと考える。2020年度は、COVID-19の影響により、私たちの生活様式も激変し、大気にどのような影響が見られたかも調査する。

２．観測・解析概要

エアロゾルの光学的特性の観測は、九州大学応用力学研究所（気候変動科学分野所有）や長崎大学環境科学部に設置しているスカイラジオメーターにて、今まで通り継続して行う。スカイラジオメーターは、太陽直達光と周辺光の放射輝度を自動測定出来る機器で、観測から得られたデータより、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）・体積粒径分布等を解析することが出来る。また、地上と衛星観測データを地上検証として用いてSPRINTARS を改良し、精度向上を目指す。本研究で得られるデータは、気候変動科学分野で開発されているSPRINTARSなどによる次世代モデルの開発と応用の検証を行う。

３．結果及び、考察

Fig.1は、2019年1月から2020年12月までの九州大学応用力学研究所（福岡県春日市）における0.5μmのエアロゾルの光学的厚さ(AOT(0.5))とオングストローム指数（Alpha）の月平均値を示したものである。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、2019年と同じような季節傾向が見られた。COVID-19の影響による中国国内の経済活動の停止により、特に、2020

年2～3月のエアロゾルの光学的厚さの減少が確認され、前年と比べて月平均値で３割程度低いかったことが確認された。他の月でも低い値を示しているが、大陸からの越境汚染の減少のみならず、日本国内の経済活動などの影響によるものも含まれていると考えられる。また、前年に比べて７月のエアロゾルの光学的厚さが低かった。「令和２年７月豪雨」の影響で観測出来なかった日が多かったこともあるが、日本全体で日照時間がかなり低かった点もあげられ、日射量が少なかったことから二次生成粒子にも影響を及ぼしていたと考えられる。他の日本の観測地点では月平均値でも増加の影響が見られていた８月の西之島の噴煙の影響であるが、本観測の月平均値の結果を見る限り、大きな影響が見られず、短期的な影響であったと考えられる。本年度は、COVID-19の影響による移動制限により、観測機器のメンテナンスや研究に大きな支障が出たが、今までと変わらずの精度保証のある結果を示していきたい。今後も観測を継続し、モデルや数値モデルとの相違点を検証しながら、さらに気候影響の解明につなげていきたい。

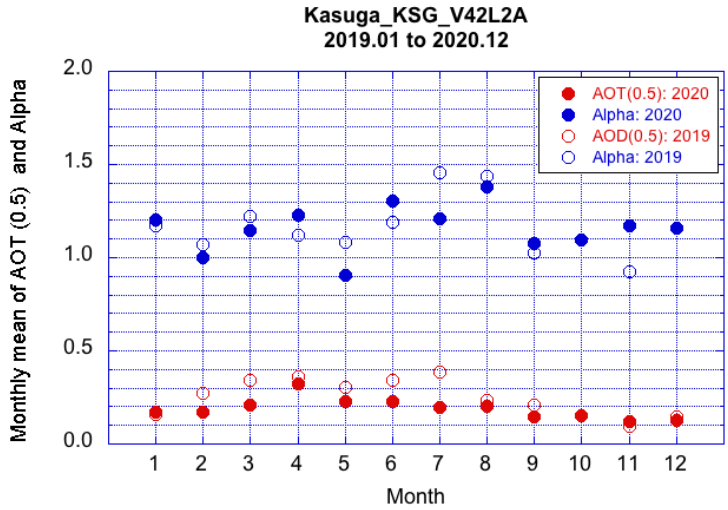


Fig. 1　2019年1月から2020年12月までの九州大学応用力学研究所（福岡県春日市）における0.5μmのエアロゾルの光学的厚さ(AOT(0.5))とオングストローム指数（Alpha）の月平均値

４．研究成果

Nakajima, T., Aoki, K., et. al., https://doi.org/10.5194/amt-13-4195-2020.

Momoi, M., Aoki, K., et al., https://doi.org/10.5194/amt-13-2635-2020, 2020.

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）

佐藤 真樹　　（富山大学大学院理工学教育部）

洋上や海中を航走するビークルに働く流体力解析および運動制御に関する研究

国立研究開発法人海洋研究開発機構
研究プラットフォーム運用開発部門
技術開発部
百留　忠洋

研究目的：

自律型無人潜水機の普及や多種多様化にともない、さまざまな観測・行動形態が求められるようになってきた。本件では、水中光無線通信を用いることで水中ロボットによる他装置との無線大容量通信が可能となる。このため、高輝度半導体レーザーを用いた全周囲型の光送信モジュールを実現することを目標としている。

※新型コロナウィルス感染拡大を受けて

本年度も引き続き、2020 年 11 月に行った実海域での試験結果を踏まえ、装置の改良等を施し 2021 年 1 月に水中通信試験を行うように準備を進めていたが、2020 年 11 月頃より新型コロナウィルスの全国的な感染の再拡大および、それに伴う 1 都 3 県の緊急事態宣言を受け、当機構の緊急事態宣言下の出張中止/延期の指示により、試験を中止せざるを得なくなった。

代わりに実験データ等を各研究者で共有および分散解析に振り替え、ストレージ等を拡充し情報記録後に配布し、各自作業を実施した。

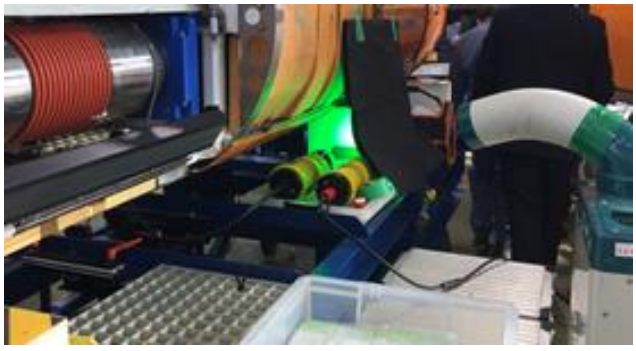


図 1　実験を予定していた光通信装置

2020 AO-21

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）となって市街に運ばれ、同市の大気質を著しく低下させるという悪循環が生じている（図１）。ホワイトダストには様々な重金属が「有害産業廃棄物」と同等レベルの高濃度で含まれていると考えられ、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。

図１．ホワイトダスト発生時の尾鉱沈殿池の様子（2020 年 11 月 11 日撮影）

【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）を設置し、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 号の画像解析からは、すでに幾つかのダストイベントの発生を捉えることに成功した（図２）。これまでにも、ダストの広域拡散を監視する目的で衛星コンポジット画像（Dust RGB）が応用されてきたが、従来は主に黄砂現象のように小さくても数 10km スケールかそれ以上の大規模な砂塵嵐を検出した事例に限られてきた。一方、本研究が対象としたのはより局所的なポイント発生源であり、そのようなホットスポットの検出に同手法が適用された事例は我々の把握している限り未だない。特に、2020

年 11 月 11 日のケースでは、DustRGB による人為的なスポットダストの発生のタイミングなども地上の直接観測データと一致しており、今後さらにイベントの抽出の事例を増やすことで、その輸送の全体像（下流への影響）の系統的な把握が可能になるものと期待される。

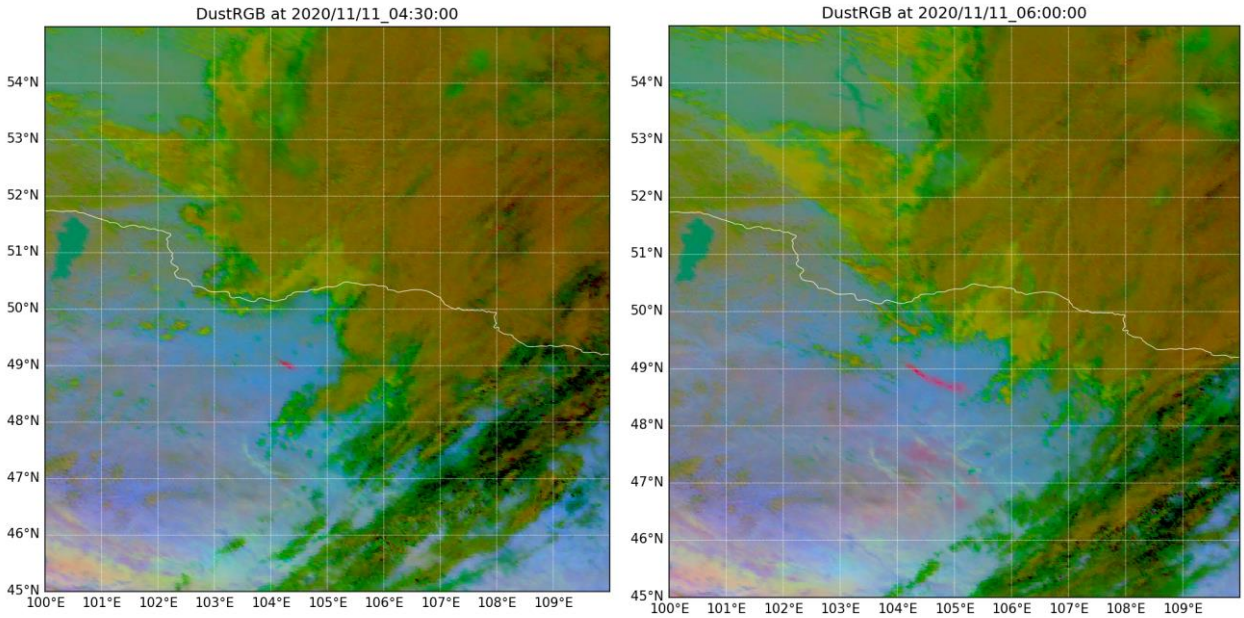


図２． ロシアとの国境付近に位置するエルデネト市（N49°1'38", E104°2'40）から南東方向に帯状に広がるダスト・プリュームの発生が確認できる（時間は UTC）.

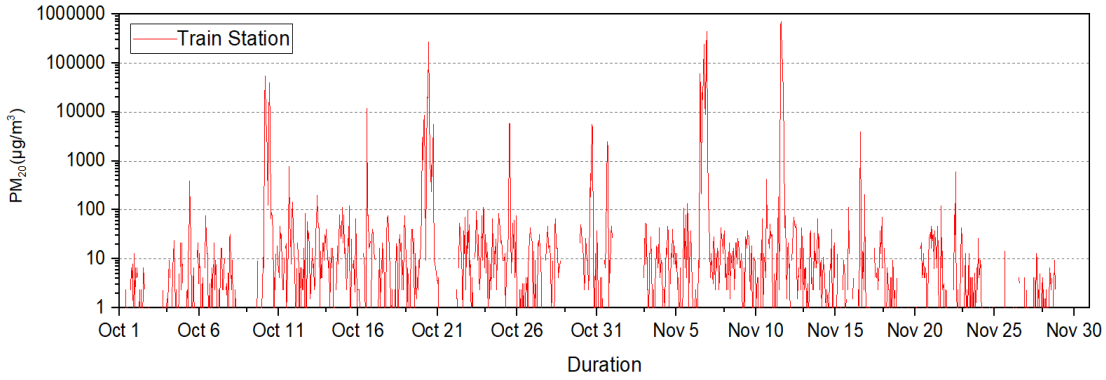


図３． エルデネト市内に設置した粉塵センサ（PS2）による粗大粒子の濃度時間変化（2020 年 10 月～11 月）. 図２の衛星によるダスト・プリューム検出時と地上における濃度の顕著な上昇に時間的な対応が見られる。

【研究組織】

研究代表者 松木 篤

研究協力者 鵜野 伊津志、Chultem Batbold (D1)、Sonomdagva Ch. (NMU)、兼保直樹（産総研）

所内世話人 弓本 桂也

衛星データを用いたダストエアロゾル量と雲相の関係の地理分布

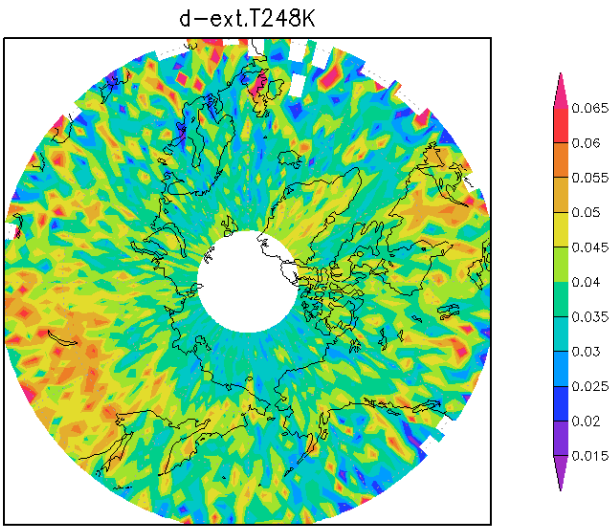
長崎大学大学院水産・環境科学総合研究科　河本和明
九州大学　応用力学研究所　岡本創

[要旨]
雲物理の視点で、ダスト粒子は永く有効な氷晶核として認識されてきた。これまでエアロゾルタイプとしてダストに注目し、人工衛星 CALIPSO に搭載されたライダである CALIOP から推定された3年間のダスト消散係数と雲相データを用いて、北半球中高緯度においてダスト消散係数と雲相の関係を調査してきた。その結果、雲相は温度のみでなくダスト消散係数にも依存すること、特に 250K 前後ではダスト消散係数の影響がより低い温度やより高い温度の場合に比べて大きいことが確認された。さらに地理分布を比較したところ、ダスト消散係数が高い領域では概ね氷晶割合も高いという傾向が見られた。

[目的]
雲は降水・降雪を通して水循環に関係し、また太陽放射の反射や地球放射の吸収・射出など放射過程によって気候に大きく影響している。特に雲の熱力学的相（以後は雲相と呼ぶ）は、例えば光学的厚さや単一散乱アルベド、射出率などの放射特性に寄与することが知られている。エアロゾルは雲粒形成時の核となるが、中でもダストは有効な氷晶核とみなされている。これまでの研究で、氷相割合は第一義的には温度の関数である（特に 230K 程度の低温域と 270K 程度の高温域ではほぼ温度のみに依存する）が、250K 程度の中位の温度域ではダスト消散係数にも依存し、ダスト消散係数が大きいほうが氷相割合も高いことがわかった。本研究はその知見を踏まえ、消散係数をダスト量の指標と考え、氷相割合との地理的分布の対応を調べることを目的とする。

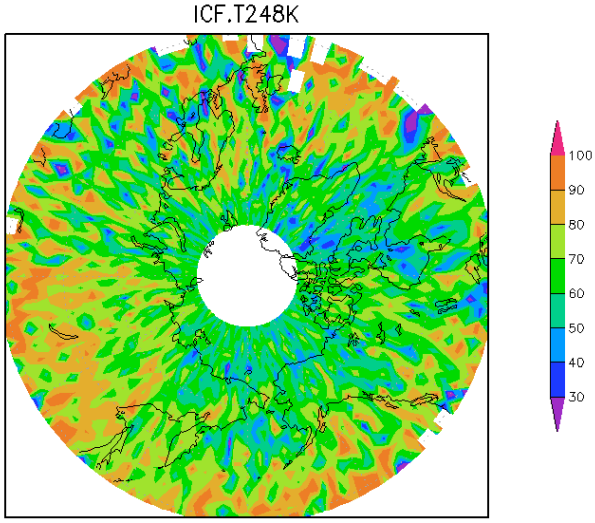
[方法]
人工衛星 CALIPSO に搭載されたライダである CALIOP から推定されたダスト消散係数と雲相のデータを用いて地理的な比較を行った。このダスト消散係数と雲相を推定するアルゴリズムは、九州大学応用力学研究所の岡本創教授が中心となって構築されたものである。対象期間は 2006 年 12 月から 2009 年 11 月までの計 3 年とした。これらのデータは JAXA が運営している EarthCARE 研究 A-Train プロダクトモニタのサイト(https://www.eorc.jaxa.jp/EARTHCARE/research_product/ecare_monitor.html)からダウンロードした。

[結果と考察]
本研究では、雪氷の放射効果が高いと考えられる北半球の北緯45度以上の中高緯度を対象地域とした。図1は 248K 近傍でのダスト消散係数の地理分布、図2は 248K 近傍での氷晶割合の地理分布を示している。ダスト消散係数の高い領域では氷晶割合が高く、また逆も成立しており、地理的な一致が概ね得られた。他方、233K 近傍の温度が低い場合や 269K 近傍の温度が高い場合は、ほぼ温度によって雲相が決まるため地理的な整合性は認められないことを確認した（本稿には掲載していない）。前年度までに得られた結果の通り、250K 程度の中程度の温度では、ダスト消散係数の氷晶割合への影響が大きい（ダスト消散係数が大きいほど、凍結確率が高い）ことが地理的にも示された。
今後は氷晶数濃度や氷晶粒径などの微物理特性との関連性に興味が持たれる。



Dust extinction coefficient

図1　248K 近傍でのダスト消散係数の地理分布



Ice Cloud Fraction

図2　248K 近傍での氷晶割合の地理分布

・成果報告

論文リスト

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
Geophysical Research Letters, *46*, e2020GL088030. https://doi.org/ 10.1029/2020GL088030

渡利晃久、河本和明
能動型衛星プロダクトを用いた北半球中高緯度におけるダストエアロゾル量と雲の熱力学的相の関係
日本リモートセンシング学会誌、Vol.40 No.3(2020)

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 relate to global warming

We organized the international WESTPAC meeting and a joint cruise in 2020, and discussed how to explore the direction of future international collaborative research.

1. The 4th workshop of WESTPAC WG06

Due to the COVID-19 pandemic the 4th workshop of WESTPAC WG06, which had been planned to be held in Vladivostok in summer, had to be changed to an on-line workshop in autumn. The workshop was held with thirty experts from eight countries (Pic.1), on 6 and 7 October, hosted by Jing Zhang, PI of WG06 “A framework for cooperative studies in the Western Pacific Marginal Seas: Energy and materials exchange between land and open ocean”. In subgroup meetings, reports with viewpoints of international cooperative research were given on activities since the previous workshop in June 2019, along with reports of some major results of the joint cruises. Moreover, activities of other active programs/organizations in the region, such as PICES/AP-CREAMS and CSK-2, were presented. And so was information of UN-DOS. In the latter part of the workshop, participants had a discussion to propose a new project in WESTPAC as an extension of this working group, related to the UN-DECADE for Ocean Sciences (UNDOS). Jing Zhang explained the importance of contributing to the UNDOS, detailing goals at the end of the decade. Finally, a proposal was made for a new scientific project, “Health of AMS (Asian Marginal Seas) – linking ocean and land” (tentative)’ a succession of WG06, and it was decided to officially submit it.

After various discussions and three months preparation, a new WESTPAC program entailed “Healthy, Productive and Sustainable Asian Marginal Seas: Understanding changes in the marine environment in response to global climate change” was submitted to WESPACT office on 15 February.

Photo 1: Participants of the online workshop held on 6 and 7 October, 2020

2. Nagasaki maru NN55 joint cruise

Nagasaki-maru NN55 Cruise was conducted in July, 2020 for researching the anoxic water masses 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 the deterioration of the marine environment and accompanying changes in the related ecosystems, it is urgent to clarify the dynamics and formation mechanisms of hypoxic water. Based on this research background, samples of seawater, sediment, pore water, and isotope were collected from the shelf edge of the ECS in order to achieve the tasks of the ongoing Grant-in-Aid for Scientific Research (B) "Assessment of the effects of global warming and stratification on undernutrition, hypoxia, and ecosystems in the outer continental shelf of the East China Sea".

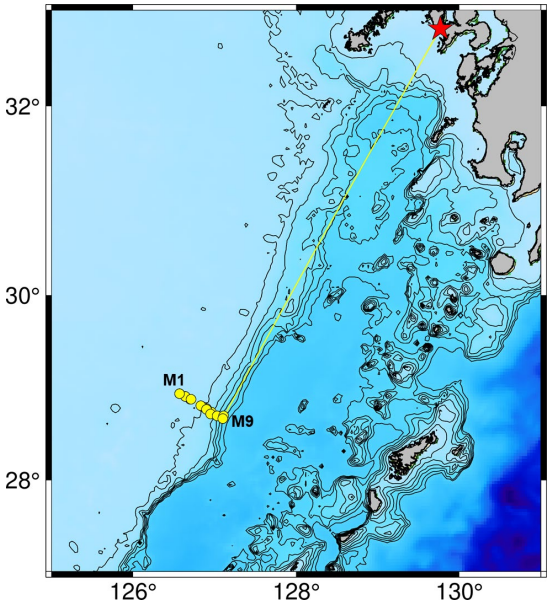


Figure 1: Cruise track on the NN55 cruise

3. Observations on the stratification in the East China Sea

During the NN55 cruise, the same level of low dissolved oxygen was observed near the seabed as that observed on the cruise in 2019 (NN33 cruise). High turbidity was observed over all the vicinity of the seafloor (Fig.2). By combining the results of the chemical analyses and physical observation data, it is expected that we will be able to clarify the origins of water masses and to quantitatively evaluate the changes in vertical transport of oxygen and various nutrients associated with changes in stratification structure.

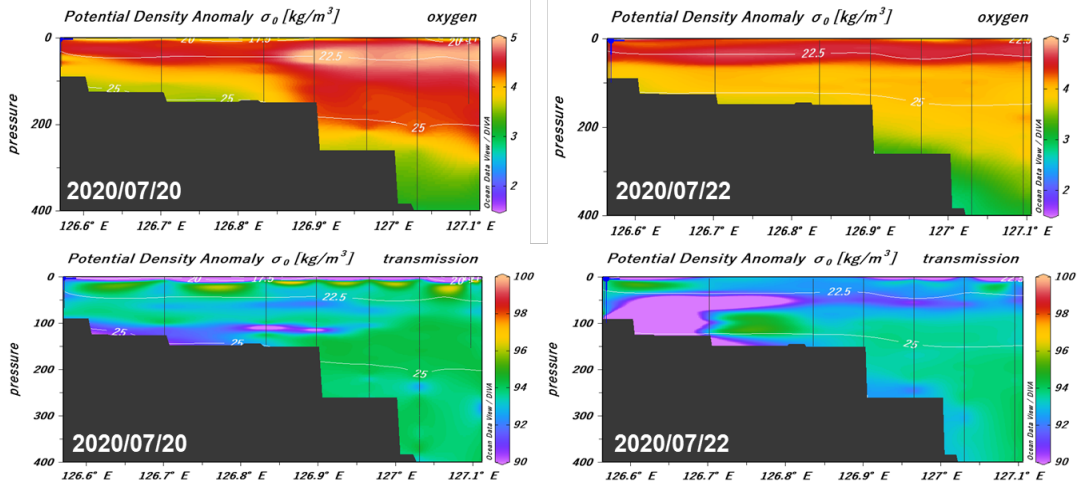


Figure 2. Section views of dissolved oxygen and transmission at the M-line

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　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、熱や河川水、物質の輸送を通じて海洋環境の形成・維持に深く関わる。特に密度躍層周辺において乱流が鉛直混合を生じる点は、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たり、底層へ酸素を供給し貧酸素水塊の消長を促したりと海洋環境に果たす役割が大きいが、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、応用力学研究所の海洋乱流計測グループが東シナ海と有明海において過去 10 年以上にわたって実施してきた乱流微細構造計測データを用いた解析を行う。

研究内容

有明海中央部の定点において 2011 年 5 月 24–26 日（小潮期）の約 48 時間と 6 月 7–9 日（大潮期）の約 38 時間の間に乱流計 TurboMAP-5 （JFE Advantech）による計測から得られた約 700 キャストの微細構造プロファイルデータを用い、乱流運動エネルギーの生成率に対する乱流浮力フラックスの割合を示す混合効率について調べた。TurboMAP 搭載の乱流シアセンサーで得られた乱流速度勾配から乱流運動エネルギー散逸率（ε）を計算するとともに、高速応答水温センサー（FP07）で計測された乱流水温勾配から温度分散の散逸率（χ_T）を求め、Osborn (1980) による散逸法と Osborn and Cox (1972) による水温拡散係数モデルから導かれる Mixing efficiency Γ に関する式、$\Gamma \equiv R_f/(1-R_f) = (1/2)(\chi_T/\varepsilon)N^2/\left(\partial\overline{T}/\partial z\right)^2$ に基づいて Γ とフラックスリチャードソン数 R_f を見積った。ここで N と $\partial\overline{T}/\partial z$ はそれぞれ背景の浮力振動数と水温鉛直勾配であり、TurboMAP 搭載の CTD センサー計測データから求めることができる。よく知られているように FP07 は高周波数域の分解能が十分でなく、有明海のような強い乱流が生じる環境では水温スペクトルの粘性対流-粘性拡散領域を解像することができない。このため、この高周波数域のセンサーの周波数応答の補正と理論スペクトルのフィッティングが行われてきたが、近年では水温スペクトルの慣性対流領域を利用して χ_T を見積る方法が提案されている（Bluteau et al. 2017）。具体的には、水温勾配の理論スペクトル $\psi(k) = C_T \chi_T \varepsilon^{-1/3} k^{1/3}$ （k は鉛直波数）に Obukhov-Corrsin 定数 $C_T (= 0.4)$ とシアセンサーから見積られた ε を与え、計測された水温勾配スペクトルの慣性対流領域に理論スペクトルをフィッティングすることで χ_T が見積られる。本研究では、1024 点（～1.2 m）毎に 2048 点を取り、Welch 法によって水温勾配スペクトル密度を計算し、Single-pole 型の伝達関数で補正したものに対し、慣性対流領域の上限波数を $k = 0.04\ (\varepsilon\nu^{-3})^{1/4}$ （ν は分子動粘性係数）として波数領域で理論スペクトルのフィッティングを行い、χ_T を見積った。その結果から Γ と R_f を計算し、乱流のアクティビティの指標である浮力レイノルズ数 $Re_b = \varepsilon/(\nu N^2)$ との比較を行った。

結果と考察

図 1a-h に乱流の定点観測結果を示す。観測時の成層構造は水温・塩分ともに安定で、両者は線形的な関係であった。有明海では強い潮流のために海底境界層内で強い乱流が準定常的に生じる（$Re_b \geq 100$, $\varepsilon \geq 10^{-7}$ W kg^{-1}）。このような高 Re_b 数の流れでは、温度勾配スペクトルに $k^{1/3}$ の傾きを持つ慣性対流領域が存在することが明確に認められる（図 2）。一方密度躍層では、シア不安定や内部波の砕波によって間欠的に強い乱流が生じ、温度分散の散逸率の高い値が見られるが、Re_b は概して小さい。Re_b が $O(1–10)$ であるような極めて弱い乱流の層では、慣性対流領域の解像が限定的であるため、粘性対流～粘性拡散領域の理論スペクトルの 1 つである Kraichnan スペクトルを使用したフィッティングも併用した（図 2）。その結果、観測と Kraichnan スペクトル間の一致が見られたものの、見積られる χ_T の値はスペクトル補正法に大きく依存しており、低 Re_b 流れにおける χ_T の見積もりには課題が残った。Re_b が 100 を超えるような流れでは、スペクトル補正法にほとんど依存しない慣性対流領域によって χ_T が求められ、図 1i,j に示すような Re_b に対する Γ と R_f の関係性が得られた。これによると Γ と R_f は大きなばらつきを持つものの、$10^2 < Re_b < 10^4$ では Osborn (1980) が示した Γ と R_f の観測に基づく上限値 0.2 と 0.17 に平均的には近い値を取った。 $Re_b > 10^4$ では両者は減少する傾向を示した。このような Re_b 依存性は Monismith et al. (2018) でも示されており、エスチュアリーのシア不安定乱流を対象とした乱流フラックスの直接観測から導かれた関係性と一致する点で興味深い結果である。ただし R_f の Re_b 依存性は海域や条件によって異なることが言われており、より普遍的な関係の解明のために、今後他の時期・場所における観測結果に解析を広げる予定である。

研究組織

堤　英輔（東京大学大気海洋研究所、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）

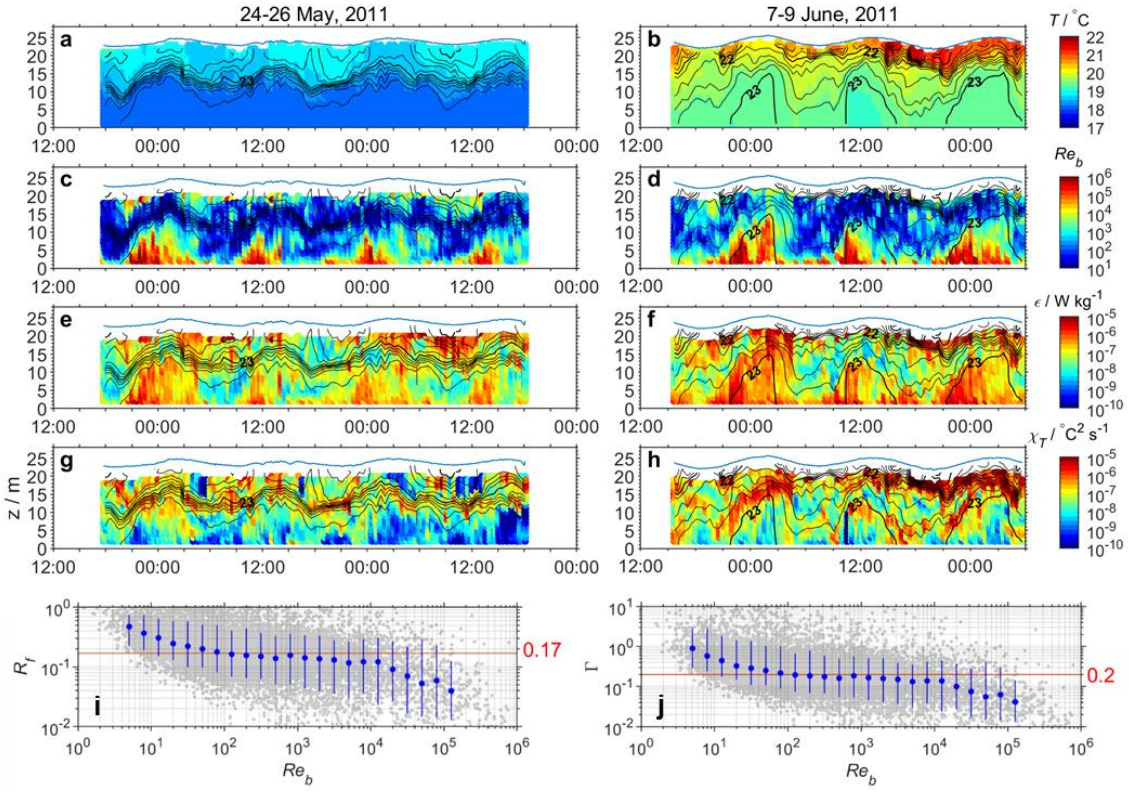


図1　2011 年 5 月 24–26 日と 6 月 7–9 日における水温（a,b）、浮力レイノルズ数 Re_b（c,d）、乱流エネルギー散逸率（e,f）、温度勾配分散の散逸率（g,h）。青線は海面、黒線は海水密度（σ_t）を示す。（i） Flux Richardson 数と（j）Mixing efficiency の浮力レイノルズ数 Re_b 依存性。灰点は個々のデータ、青点と青線は $\log_{10}0.2$ 間隔の Re_b のビンで求めた 10–90 %区間と平均値を示す。

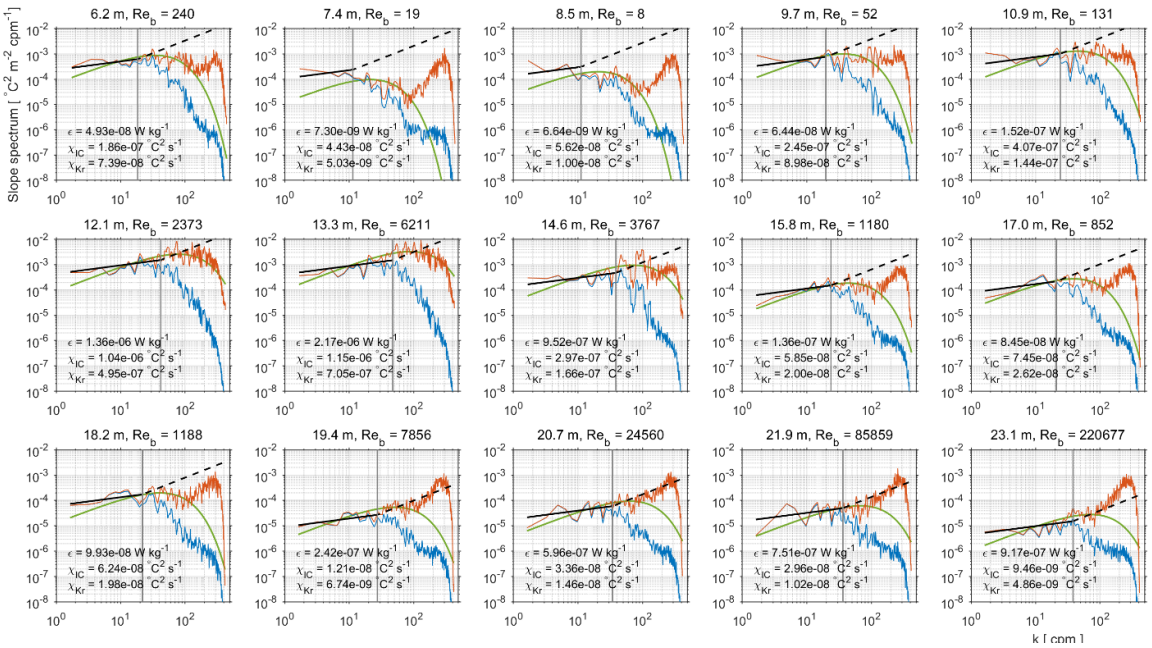


図 2　6 月 8 日 0:03 のキャストにおける温度勾配スペクトルの計算例。青線と赤線はそれぞれ水温センサー周波数応答補正前と後のスペクトル、黒実線は慣性小領域における理論スペクトルのフィット、破線は~k^1 の勾配、緑線は Kraichnan スペクトルフィット、灰色の縦線は慣性小領域の上限を与える波数 $k = 0.04\ (\varepsilon\nu^{-3})^{1/4}$ を示す。また各図の上部に海面からの深度と Re_b の値を示す。

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

沿岸域の表層海流の面的な観測手法として短波(HF)レーダーが知られているが、観測時の有義波高や有義波周期、また航行する漁船等の船舶の存在等の環境条件によってデータの品質が変動し、データの活用に際して障害となる場合がある。一方で、昨今では GPS センサを始め、IoT 社会の台頭を可能にする廉価なセンサが多く共有されている。

表層ドリフターの位置情報から海流を推定するのは古典的ではあるが、前述の社会背景を踏まえた安価な測器の利用により、観測数が増えることでより多くの海洋情報が得られる可能性がある。そこで、本研究では複数の表層ドリフターによる同時観測によって、特定海域の流れのパターンを把握する手法を検討する事を目的とする

2 実験方法

2.1 漂流浮体の製作

GNSS による位置測位を行うセンサは小型で、手のひらにおさまるサイズの機器が一般向けに販売されている。小型のマイコンボード等を用いたデータロガーも同程度のサイズに収まる。この様な機器を格納するに適したドリフターの漂流浮体は、風の影響を最小化するために没水部分がなるべく大きくなる構造を持つべきである。また、防水性も重要である。そこで、円筒形で下部が VPC パイプ(内径 13mm,外径 18mm)に適合し、上部がポリタンク キャップ に適合する漂流浮体 MZ を FDM 方式(熱溶解積層方式)の 3D プリンタを用いて製作した(Fig.1)。なお、FDM 方式の 3D プリンタでは構造上浸水することが知られているため、表面にラッカースプレー、防水塗料を塗布することで、防水性を保つこととした。

Fig. 1 製作した漂流浮体 MZ（左）と浮体内に梱包する GPS ロガーの選択肢(右)

2.2 相模湾江ノ島沖における実験

多点観測の最も単純な例として、上述した漂流浮体 MZ を 100m 毎、40 点、総計 4km に渡り一直線に展開して計測を実施した(Fig.2)。比較のために、展開後に付近を曳航型 ADCP(1200kHz)により測定し比較のためのデータを得た。なお、曳航観測には九州大学所有の ADCP(RDI 1200kHz) を利用した。

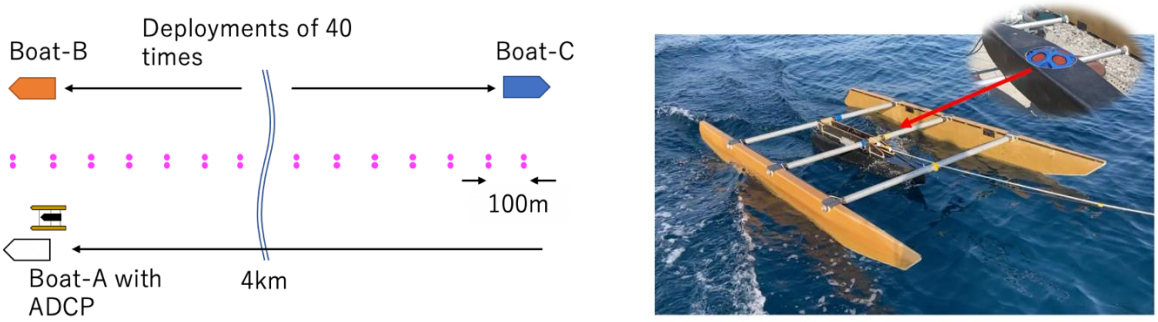


Fig. 2　漂流浮体 MZ の 100m 毎 4km,にわたる多点展開と比較に利用した曳航型 ADCP(1200kHz)

3　実験結果

2.2 相模湾江ノ島沖における実験により得られた結果を Fig.3 に示す。流速、流向共に漂流浮体 MZ と ADCP により取得したデータは 0m 地点から 4000m 地点に向かって流速は小さくなり、流行は-45 度から 0 度付近へと変化する傾向が確認できた。

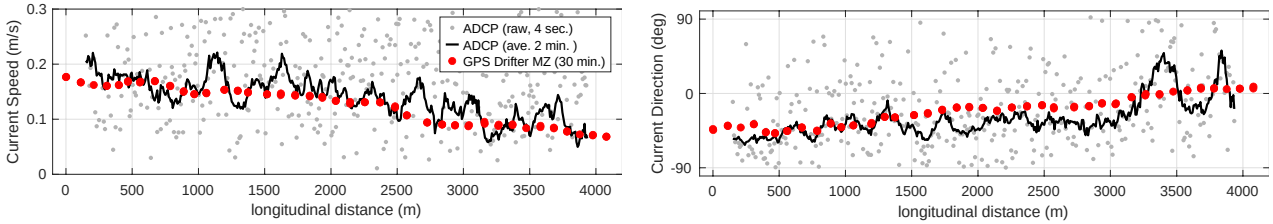


Fig. 3 測線上の漂流浮体 MZ と曳航型 ADCP(1200kHz)に基づく表層流速

4　考察

実験結果では ADCP の測定結果がドリフター観測の結果に比べて小さなスケールでの変動が確認できたが、これは計測ノイズあるいは計測時間が GPS ドリフターに比べて短いために高周波の成分が除去できていないことを示している。しかしながら、浮体の軌跡を確認したところ、ドリフターの軌跡はほぼ直線であり、後者の可能性は低いことが示された。そのため、高周波成分は物理的に意味のある信号ではなく、除去すれば漂流浮体に基づく推測と良好な一致となると考えられる。

一方、漂流浮体としての機能としては、形状が棒であるために、特定深度の流速を測っていない。これについては、抵抗が大きくなる板等を特定深さに付与し、計測対象を限定する様な試みも今後必要と考えられる。

5　成果報告

論文発表等は実施していない。

非線形表面波・内部波の地形上における伝播並びに相互干渉の数値解析

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的研究を行ない，ソリトン共鳴に伴い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ステムの生成や，生成されたステムの挙動に関して調べた．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，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及ぼすのかに関しては，不明な点が多い．そこで，今年度は，大振幅波を含む表面波，または，内部波が伝播する場合を対象として，地形が非線形波の伝播及び相互干渉に与える影響を数値解析に基づき調べた．

研究の具体的方法

具体的には，2 次元伝播する表面波，または，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) 変分法に基づき導出された波動方程式系を基礎方程式系とする数値モデルの計算精度の検討を行ない，数値解析手法の改良を行なった．

(2) 様々な地形上を伝播する表面波，または，内部波の強非線形性及び強分散性を考慮して，波の挙動や，相互干渉の数値解析を実施し，特に，振幅増加及びステムの生成に関して，メカニズムを考察した．

(3) 内部波の伝播・相互干渉に対する critical level の影響を調べた．

主要な成果

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，表面孤立波と内部孤立波の共存場の数値解を得た．ここで，定常波に対する非線形方程式系を Newton-Raphson 法により解いた．その結果，表面波モードの孤立波の相対位相速度は，表面孤立波と内部孤立波の共存場において，内部波が共存しない場合よりも低減することがわかった．また，内部波モードの孤立波の相対位相速度も，表面孤立波と内部孤立波の共存場では，表面波がない場合よりも低減した．一方，表面孤立波と内部孤立波の共存場における内部波モードの内部孤立波の界面位置は，表面波が共存しない場合の critical level を超える可能性のあることがわかった．更に，内部波モードの表面孤立波と内部孤立波の波高比は，線形浅水波解より低く，内部波モードの内部孤立波の相対波高が増加するにつれて，その差が大きくなった．

また，実地形に対して 3 次元数値モデルを適用し，実現象を対象として，東シナ海の内部波エネルギーのモデリング解析を行なった．

研究成果報告

Kakinuma, T. and Ochi, N.: Tsunami-height reduction using a very large floating structure, Mathematics for Industry, Vol. 34, pp. 193-202, 2020 年 8 月.

Kakinuma, T. and Yamashita, K.: A numerical solution for the coexisting field of surface and internal solitary waves, Global J. Res. Eng. E, Vol. 20, Issue 3, pp. 1-11, 2020 年 9 月.

辻　英一・広瀬直毅: 東シナ海の内部波エネルギーのモデリング解析, 九州大学応用力学研究所共同利用研究会「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」, 2020 年 12 月.

辻　英一・広瀬直毅: 数値モデリングによる東シナ海の内部波エネルギーの解析, 2020 年度九州沖縄地区合同シンポジウム「南西諸島近海における大気・海洋・生態系」, 2020 年 12 月.

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　海洋土木工学プログラム）
研究協力者　中山恵介（北見工業大学工学部　社会環境工学科）
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）

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：東京大学生産技術研究所　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., submitted to JMSJ)。

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た。APHRODITE(Yatagai et al., 2012)より長い期間のデータとなり、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い、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。しかし、今年度は 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全く進まなかった。そのため、既に収集してあるバングラデシュの長期データを用いた解析を推進した。

近年の人口増加と経済発展が著しいバングラデシュは、モンスーン変動による影響が顕著であり、脆弱性も高い。Endo et al. (2015) は、1950～2008 年のバングラデシュにおける日降水量を用いて降水強度や降水継続期間の変化についても解析し、降水強度の弱い雨の増加や降水日数の増加を示した。しかし、気候変動の影響を議論するには、さらに解析期間を延ばす必要がある。そこで、デジタル化されていないバングラデシュを含む旧英領インドの日降水量のデータレスキューを実施し、1891～2016 年のデータを用いた降水特性の変化を明らかにした。

２．データと手法

対象領域は、現在のバングラデシュの領土とし、現在の観測地点と連結可能な 23 地点のデータを用いた。1950～1970 年代は独立戦争等で欠測が見られるので、データの均質性を 4 つの統計テスト(Wijngaar et al., 2003) を実施し、最終的に 15 地点(図 2 の△印の地点)を以降の解析に用いた。Endo et al. (2015) に倣い、年降水量(PRCPTOT)、日降水強度(SDII)、年間最大日降水量(RX1day)、年間最大 5 日間降水量(RX5day)、日降水量 95 パーセンタイル値(R95%)、日降水量 99 パーセンタイル値(R99%)、連続無降水日数(CDD)、連続降水日数(CWD)、日降水量 10mm 以上の日数(R10mm)、日降水量 20 ㎜以上の日数(R20mm)、日降水量 50 ㎜以上の日数(R50mm)、日降水量 1～3 ㎜の日数(R03mm)、年間降水日数(WDAY)の 13 個の指標について計算した。トレンド解析では Mann-Kendall テストを用いて評価した。(図 1)

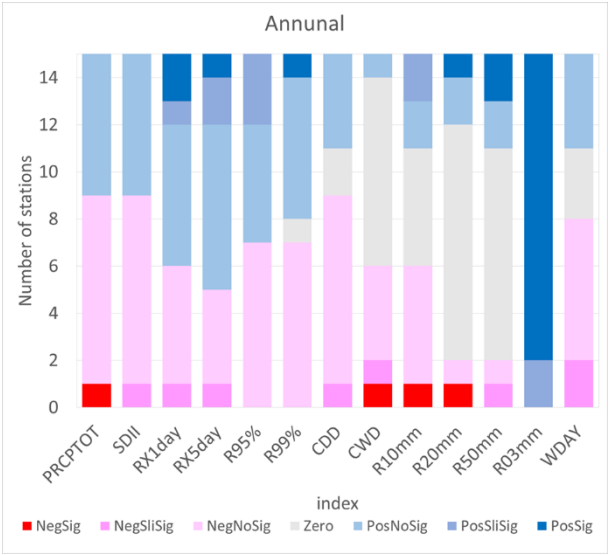


図 1: バングラデシュにおける 126 年間の降水特性に関する 13 指標の結果。縦軸は地点数、寒色系が増加、暖色系が減少を示す。

3．結果

Endo et al. (2015)と比較すると、弱雨の日数の増加等は本研究でも見られるが、それ以外の指標においては必ずしも一致していない。また強雨は有意なトレンドは見られなかったが、空間分布(図 2)をみると中央部で増加し、北部と南部で減少傾向が見られることから、モンスーントラフの位置に関連する可能性がある。また、季節ごとにトレンドが異なり(図 3)、特に総降水量(PRCRTOT)がプレモンスーン(ポストモンスーン)期に減少(増加)する一方、プレモンスーン期と夏季モンスーン期に弱い雨が増加している。今後は総観場や季節水位の変化を詳細に解析する必要がある。

4．まとめ

本研究ではデータレスキュー活動を通じた 126 年間のバングラデシュにおける降水特性を解析した。今後は、20 世紀再解析データを用いてその要因について明らかにしつつ、論文投稿の予定である。

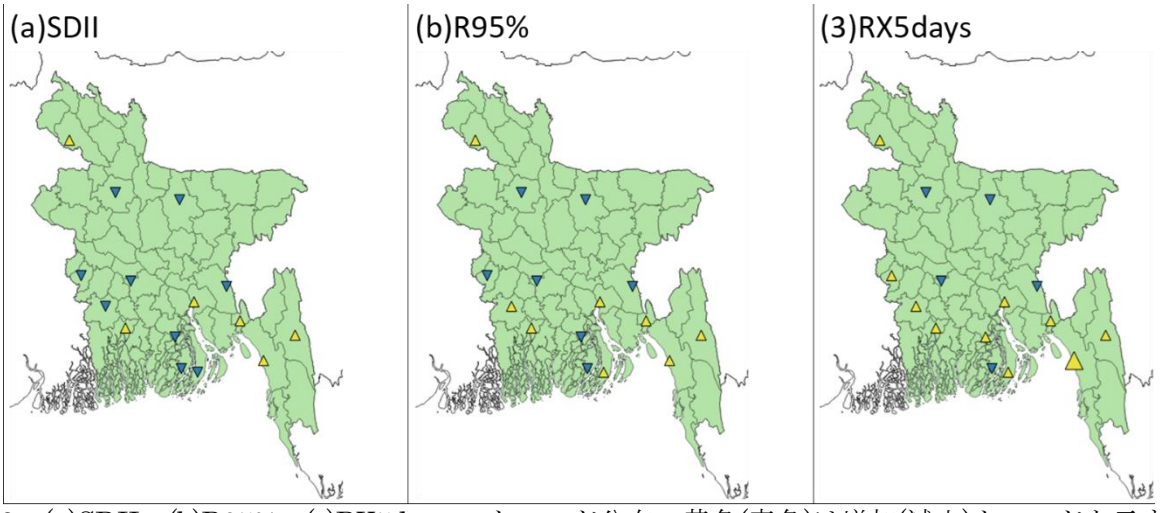


図 2：(a)SDII、(b)R95%、(c)RX5days のトレンド分布。黄色(青色)は増加(減少)トレンドを示す。大きいマークは有意水準 5%で有意差があり、小さいマークは有意差がない。

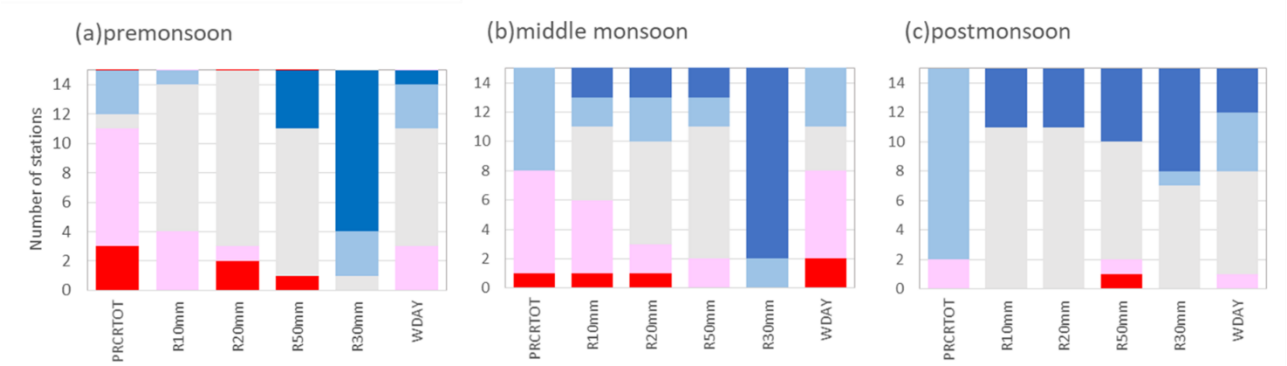


図 3：主要な指標(PRCRTOT、R10mm、R20mm、R50mm、R03mm、WDAY)の(a)プレモンスーン(3～5 月)、(b)夏季モンスーン(6～9 月)、(c)ポストモンスーン(10～11 月)におけるトレンド。縦軸は地点数、寒色系が増加、暖色系が減少を示す。

5．研究組織

研究代表者	木口 雅司	東京大学生産技術研究所 特任准教授
研究協力者	江口 菜穂	九州大学応用力学研究所 助教
研究協力者	村田 文絵	高知大学理工学部 講師
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、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)によって実施された。

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

国立環境研究所環境計測研究センター　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。エアロゾルからの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 では走査型マイケルソン干渉計を高分解能分光素子として用いる。今年度は、改良型ライダーの運用に向けて、波長 532 nm に対する HSRL システムの開発を進めた。波長 532 nm の HSRL では、ヨウ素吸収フィルターを使ってミー散乱をブロックし、レイリー散乱の一部を透過させるため、Nd:YAG レーザーの第二高調波の波長(532 nm)をヨウ素の吸収線の中心に合わせる。レーザーの波長は周囲の気温によって変化することから、常に吸収線の中心と合うように制御する必要がある。これまで国立環境研究所で開発されてきた HSRL では、ノンストップで発振する送信レーザー光の一部を使って波長をモニターし、フィードバックして制御するシステムであった。しかし、応力研ライダーを始めとする東アジアにおけるライダー観測ネットワークでは、レーザーフラッシュランプの消耗を抑えるため、5 分観測・10 分停止の観測スケジュールで運用している。そのため、上記 HSRL システムのままでは、１０分間の停止期間中はレーザー波長の制御ができない。そこで本研究では、送信レーザーの種光源として連続発振するシーダーレーザーを利用した波長制御システムを開発した。図 1 に示すように、シーダーレーザー（波長 1064 nm）光の一部から第二高調波を発生させ、音響光学素子で波長を±0.25 pm だけシフトさせてからヨウ素フィルターを通し、透過光強度をモニターする。この時、0 次回折光（波長シフト無し）と±1 次回折光（波長シフトあり）の光強度を測定する。レーザー波長をスキャンすることでヨウ素の吸収スペクトルを測定し、0 次回折光強度から吸収線の中心波長を決定する。また、吸収線の中心波長における+1 次回折光と–1 次回折光の強度比をリファレンスとして、強度比が一定になるようにレーザー波長を制御する。

【結果】

図 2 に波長制御の例を示す。図 2 (a)は事前に測定した吸収スペクトル信号（実線）と当時の信号値（点）を示している。横軸はシーダーレーザーのヒーター温度で、レーザー波長に相当する。吸収スペクトル信号から、吸収線の中心におけるヒーター温度(ここでは中心温度とする)はこの時 65.76℃であった。周囲の気温が変化することでレーザー波長が変化し、吸収スペクトル信号が横軸方向にシフトするが、ヒーター温度を制御することで、常に吸収線の中心にレーザー波長が来るようにした。具体的には、信号 P+（+0.25 pm シフト光）と P–（–0.25 pm シフト光）の比を用いる（図 2 (b)）。吸収

線の中心波長（縦点線）における P+/P–比をリファレンス（横点線）として、P+/P–比が一定の閾値の範囲内に収まるようにヒーター温度を制御した。図 2 の例では、1 日のうちで約 0.25 pm の波長分だけヒーターの中心温度が変化しているが（図 2 (c)）、レーザー波長は吸収線の中心から約±10 MHz (±0.01 pm)の範囲内で制御出来ていることがわかった（図 2 (d)）。これは、ヨウ素吸収線のスペクトル幅（約 2 GHz）と比べて極めて小さい変動幅である。

【今後の展望】

今年度末から来年度にかけて上記システムを応力研ライダーに導入し、532 nm HSRL によるエアロゾルの連続データを取得する。また、波長 355 nm HSRL についても試験的な測定を実施し、その結果を論文として発表している（Jin et al., 2020）が、装置の改良や信号処理の高速化など、改善の余地がある。来年度以降の応力研での運用に向けて開発を進める。

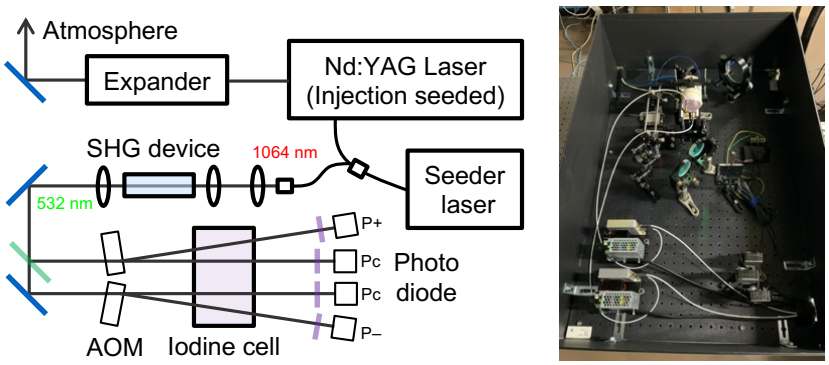


図 1 ：シーダーレーザーを用いた波長制御システムのブロック図(左)と写真(右)

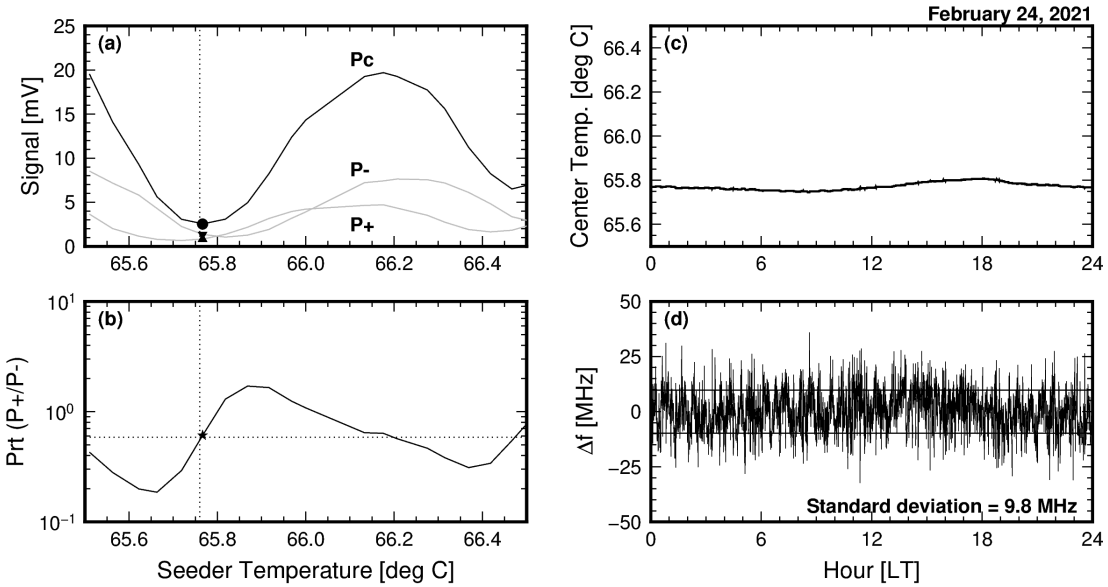


図 2 ：波長制御の例（詳細は本文を参照）

【研究成果】

Y. Jin, T. Nishizawa, N. Sugimoto, S. Ishii, M. Aoki, K. Sato and H. Okamoto, Opt. Express, 28(16), pp. 23209–23222, doi:10.1364/OE.390987, 2020.（その他論文 1 件、学会発表 1 件）

EXPERIMENT ON SELF-EXCITED VIBRATION OF A FREE-HANGING PIPE FOR OTEC COLD WATER PIPE APPLICATION

Ristiyanto Adiputra, Kyushu University

I. ABSTRACT

The experiment is intended to validate the developed analytical model for free hanging riser conveying fluid for Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC). Experiment was conducted on 14th-25th December 2020. The results of the experiments are in a video data capturing the motion of the bottom-end of the pipe while aspirating water. The data is analyzed using Open CV. The data is corrected by Hi-passing method and anti-aliasing so that a clearer power spectrum can be obtained. Comparing with the experimental results, some values predicted by analytical equation are close to the analysis results, but there are also some values which are far from the prediction. This is because the amplitude of vibration is as small as about 1 mm, so accurate frequency of vibration cannot be easily determined. For more accurate and reliable comparison, the experiment environment will be upgraded in the future.

II. INTRODUCTION

Demand for renewable energy has been increasing along with environmental problems in recent years, and the momentum for utilizing OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion), which is one of them, is also increasing. Currently, Adiputra et al. were considering the construction of a 100 MW OTEC plant. Here, a ship-shaped power plant with a conversion oil tanker ship was adopted. It was calculated that a flow rate of 225 m^3/s is required for stable power plant operation. From this, it was obtained that the deep sea water intake pipe has an optimum intake speed of 3 m/s at an inner diameter of 12 m. The deep sea water intake pipe has possibility of self-excited vibration affected by the internal flow due to water intake. The possibility that self-excited vibration occurs when fluid is sucked in a free hanging pipe has been studied so far, but vibration experiments targeting OTEC deep sea water intake pipes have not been actually conducted. Thus, it is necessary to confirm whether the theory occurs as an actual phenomenon. The purpose of this study is to confirm the actual phenomenon of self-excited vibration by experimenting with the intake pipe and compare it with the analysis result.

III. EXPERIMENTAL INVERSIGATION

A medium-scale experiments were conducted using deep water tanks at Kyushu University facility. The tank is equipped with a tow train, and a pipe can be lowered from the hole in the center. To pump the water, two pumps are used. One is a submersible pump for fresh water Pondy (SM-625) with pump diameter of 25 mm and max head of 10 m. The maximum discharge rate is 100 L/min. Second pump is submersible pump (SL-102) with discharge rate: 40L/min, 70L/min. The total heads are 5.5m and 2.6m respectively. Two types of pipes with different thicknesses for sucking up water are prepared.

The experiment was carried out on pipe 1 and pipe 2 at three flow velocities. In each experiment, the behavior of the lower end of the pipe was measured with two sets of cameras. The original videos are taken by GoPro hero5(camera1), and GoPro hero8(camera2) with 30Hz frame rate and 4K resolution. Yellow marker that has 22x22mm is attached at bottom of the pipe. The measurement was performed by extracting the behavior of a yellow vinyl tape.

The data is analyzed as data with Open CV and capturing the movement of the position of the center of gravity of that area. In addition, since the vibration is basically small and only coarse data can be obtained with the normal power spectrum, it is corrected so that a clearer power spectrum can be obtained. The details of the analysis procedure are as follow

Step 1: OpenCV motion tracking. The OpenCV library captures a time history of image coordinate system of center of a yellow region from the video during steady state of the pumping system.

Step 2: FFT analysis. Firstly, a FFT analysis with Numpy library for Python is carried out for the captured time history data without a pre-processing. The time history is a digital signal, thus it includes noises and a slow-drift motion is remarkable.

Step 3: improved FFT analysis. The around 0.05-0.1Hz is considered vibration due to internal flow, however 0.01Hz slow-drift phenomena is not clarified. In this experiment, we firstly aim to take 0.1Hz, thus 0.01Hz signal is filtering at first. Then, an anti-aliasing is also carried out to smoothen the signal. This improved signal is re-analyzed with corrected FFT. The vibration frequency is picked at the maximum point of the spectrum. By repeating this procedure, the motion frequency of the pipe vibration can be obtained for all of experiment cases.

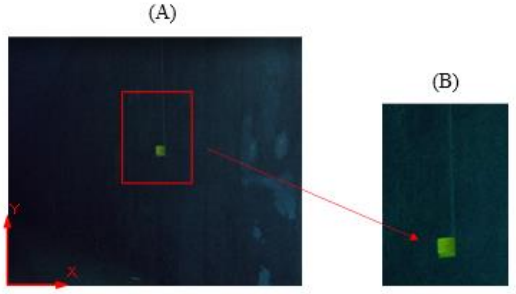


Fig. 1 OpenCV motion tracking. A) Original video; B) OpenCV python data.

IV. ANALYTICAL INVERSIGATION

The motion equation of the pipe is analytically predicted as equation 1 and solved via Galerkin method to find the eigenfrequencies

$$EI\left[1+\left(\bar{\alpha}+\frac{\bar{\mu}^*}{\Omega}\right)\frac{\partial}{\partial t}\right]\frac{\partial^4 w}{\partial x^4}+(M+m-M_a)g\frac{\partial w}{\partial x}-2MU\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial t}+\{[1-(3/2-\alpha)(1+\bar{\gamma})]MU-(M+m-M_a)g(L-x)\}\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+c\frac{\partial w}{\partial t}+(M+m+M_a)\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}+MU\left(\frac{\partial w}{\partial t}-\alpha U(1-\psi)\frac{\partial w}{\partial x}\right)\delta(x-L)=0 \quad (1)$$

The result is shown in an Argand diagram plotting the real part and imaginary part of the natural frequencies perpendicularly. The obtained critical velocity for pipe 1 is about 7 m/s and for pipe 2 is about 6 m/s.

V. RESULT COMPARISON

Due to limitation of head loss and pump capacity, the obtained intake velocity of the experiment is less than the predicted critical velocity. Thus instead of comparing the critical velocity, the comparison will be focused on the motion frequency of the pipe. The results show that the frequencies tend to decrease by increasing the seawater intake. It is important to be noted that Hi-pass filtering and anti-aliasing are not suitable to analyze the real motion amplitude of the pipe as it will eliminate the extremely low-frequency amplitude. However, as the comparison here only focuses on the motion frequency, this developed method is acceptable. The pipe motion frequencies is plotted at the real frequency component vs intake velocity graph for pipe 1 and 2 at $\alpha = 0.8$ and $\gamma = 0.95$ as shown in Fig. 2 respectively

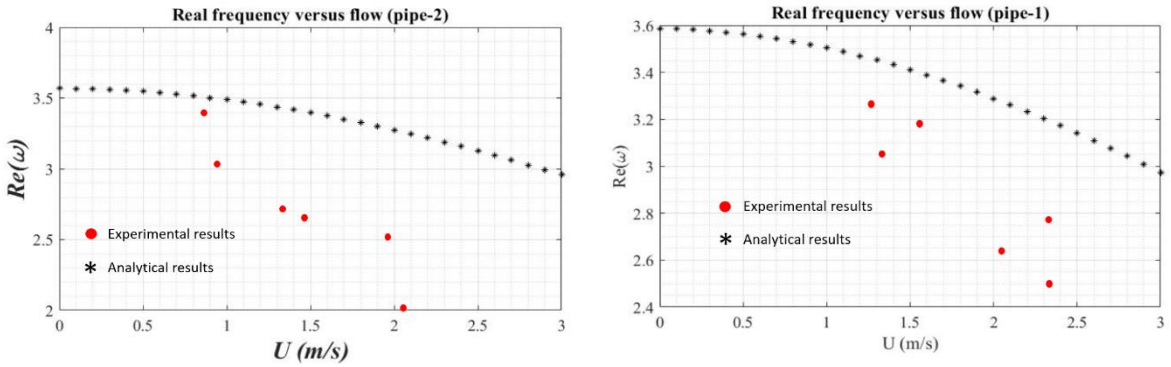


Fig. 2 OpenCV motion tracking. A) Original video; B) OpenCV python data.

VI. CONCLUSION AND FUTURE WORK

To investigate the effect of the seawater intake on the OTEC CWP, an analytical solution has been developed and solved semi-analytically using a Galerkin method. For comparison, an experiment has been conducted to validate the analytically predicted pipe motion frequency. As shown in Fig. 2, the developed analytical equation can be concluded to be sufficient to predict the pipe behavior with some extends.

Compared with the experimental results, some values are close to the analysis results, but there are also some values which are far from the prediction. This is because the amplitude of vibration is as small as about 1 mm, so accurate frequency of vibration cannot be easily determined. Additionally, the 4m pipe used here is a self-joint pipe from 2 pieces of 2m pipes which make the 4m pipe is not fully in straight condition.

For more accurate and reliable comparison, the experiment environment will be upgraded in the future to reach the predicted critical velocity. Intake velocity fluctuation is supposed to be more controlled. The 4m pipes are suggested to be made by a manufacturer to ensure the straightness of the pipe.