

令和 5 年 6 月 6 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19H01970

研究課題名(和文) 海底斜面域における混合層から密度躍層への物質輸送過程の解明

研究課題名(英文) Diapycnal transport from bottom boundary layers to interior waters over sloping topography

研究代表者

遠藤 貴洋 (Endoh, Takahiro)

九州大学・応用力学研究所・准教授

研究者番号：10422362

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：東シナ海陸棚斜面域で乱流微細構造観測を実施し、海底混合層内の乱流密度フラックスが、(1)船舶観測で得られた乱流運動エネルギー散逸率に乱流パラメタリゼーションを適用、もしくは、(2)係留観測で得られた乱流運動エネルギー生成率から計算した渦粘性係数を乱流ブランドル数で割ることで求めた渦拡散係数と、背景密度の鉛直勾配との積として見積もり可能であることを示した。また、三次元非静水圧モデル kinaco を用いて、海底斜面上の懸濁粒子の動態を陽にシミュレートし、tidal straining がもたらす乱流混合の非対称性により、海底から巻き上げられた粒子が粒径によらず浅い方へと移動していくことを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

陸棚斜面域の海底混合層上端を境として生じる、乱流運動がもたらす密度フラックスの収束・発散によって、深いところにある密度の大きい水塊が、海底混合層内を斜面沿いに陸棚上へと移動しながら密度躍層へと湧昇し、等密度面に沿って沖側へ戻るといった二次元的な輸送過程が生じ得る。本研究で得られた成果を端緒として、海底斜面と海底混合層との組み合わせによる二次元循環の存在が明らかになれば、陸棚斜面域にとどまらず、全球的な深層海洋大循環まで含めた、新しい物質循環研究の展開に大きく貢献するものと期待される。

研究成果の概要(英文)：Using microstructure data obtained over the continental shelf of the East China Sea, we verified that vertical turbulent flux of buoyancy in the bottom boundary layer (BBL) can be estimated as a product of background density gradient and vertical eddy diffusivity calculated from (1) the dissipation rate of turbulent kinetic energy (TKE) measured with a microstructure profiler deployed from a ship and/or (2) the production rate of TKE measured with an acoustic Doppler current profiler deployed on the seabed. By coupling an online particle tracking framework with a three-dimensional non-hydrostatic model, "kinaco", we demonstrated that the mixing asymmetry due to tidal straining generates the transport of sediment particles lifted from the seabed, which is directed towards the inner continental shelf regardless of the size of particles.

研究分野：海洋物理学

キーワード：乱流混合 海底斜面 Tidal straining 乱流微細構造観測 三次元非静水圧モデル

### 1. 研究開始当初の背景

外洋域の物質循環において、乱流混合が果たしている役割を議論する際に、海底混合層の存在が考慮されることはめったにない。これは、海底混合層が全水深と比較して非常に薄いことや、海底混合層内の水塊がほぼ一様であることから、そこでの乱流混合が物質輸送に及ぼす影響は無視できると考えられているためである。しかしながら、海底斜面が存在する場合には、海底混合層上端を境として生じる、乱流運動がもたらす密度フラックスの収束・発散によって、深いところにある密度の大きい水塊が、海底混合層内を斜面沿いに陸棚上へと移動しながら密度躍層へと湧昇し、等密度面に沿って沖側へ戻るといった二次元的な輸送過程が生じ得る。このような二次元循環の存在は、最近、理論的に提唱されたばかりで、現場観測では未だ実証されていない。

### 2. 研究の目的

本研究では、海底斜面上で、乱流運動がもたらす鉛直方向の密度フラックスの収束・発散によって駆動される二次元循環を実証するための第一段階として、東シナ海陸棚斜面域を対象に、乱流運動がもたらす鉛直方向の密度フラックス分布、ならびに、海底混合層内における斜面沿い方向の乱流混合過程を解明することを目的としている。

### 3. 研究の方法

本研究が目的としている、乱流運動がもたらす鉛直方向の密度フラックス分布、および、海底混合層内での斜面沿い方向の乱流混合過程を解明するために、乱流微細構造観測班と数値シミュレーション班からなる研究組織を構成した。対象海域は、時空間的に高密度な乱流微細構造の連続観測が可能で、かつ、海底混合層内での斜面沿い方向の乱流混合過程をもたらし得る、Tidal straining 現象 (Endoh et al. 2016) の存在が初めて明らかにされた東シナ海陸棚斜面域とした (図1)。

長崎大学水産学部練習船・長崎丸を利用して、2019年、2020年、2022年の7月に、乱流微細構造プロファイラー (TurboMAP) を用いて乱流運動エネルギー散逸率、水温・塩分、濁度を、5ビーム超音波ドップラー多層流向流速計 (ADCP) を用いてビーム方向流速を計測した。この5ビーム ADCP は本研究課題で新たに導入した測器で、鉛直解像度 0.5m・サンプリング周波数 6Hz でビーム方向流速の鉛直分布を計測することが可能である。この特長を活かして、海底に約5日間設置した5ビーム ADCP で計測したビーム方向流速から、乱流運動エネルギー生成率と潮汐流の鉛直シアを10分間隔で計算し、海底混合層内における渦粘性係数の時系列を得た。この5ビーム ADCP の近傍に60分間隔で TurboMAP を25時間繰り返し投入し、計測した乱流運動エネルギー散逸率と水温・塩分を潮汐流の鉛直シアと合わせることで、水深約10m~海底直上までの渦拡散係数の時系列を得た。さらに、5ビーム ADCP と TurboMAP の同時計測期間において、海底混合層内における乱流プランドル数 (渦粘性係数と渦拡散係数の比) を計算することで、数値シミュレーションから提案された乱流パラメタリゼーション (Wakata 2018) の有効性を検証した。

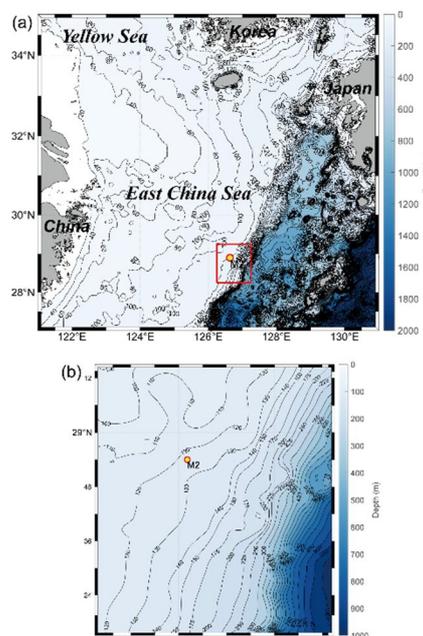


図1. 乱流微細構造観測を実施した海域。丸印の観測点 M2 に5ビーム ADCP を設置した。

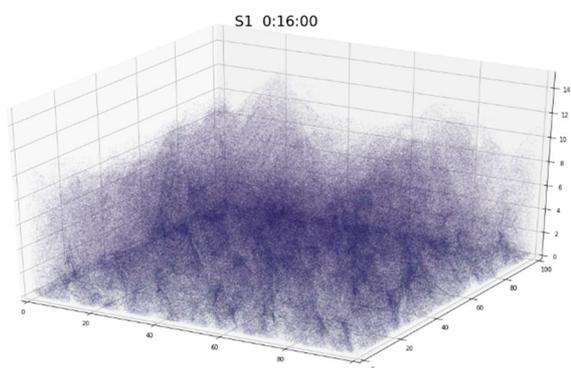


図2. 三次元非静水圧モデル kinaco で再現された、Tidal straining 現象に伴う粒子の巻き上がりの様子。

数値シミュレーションには、研究分担者が自ら開発した三次元非静水圧モデル kinaco (Matsumura and Hasumi 2008) を使用した。kinaco は動的に結合された粒子追跡パッケージにより、懸濁粒子の動態を陽にシミュレートすることが可能であるという、他の非静水圧モデルにはない特徴を有している。この特徴を最大限に生かし、潮汐流が斜面を駆け上る時に斜面下方の高密度水が乗り上げて成層が不安定化し、斜面を駆け下る時に斜面上方の低密度水が乗り上げて成層が安定化する Tidal straining 現象を再現して

(図2)、不安定・安定成層時で乱流混合の強さが異なることにより発生する、懸濁粒子の正味の輸送量を粒径別に計算した。こうして得られた粒径別輸送量と海底斜面勾配との関連を議論するとともに、等深線を横切る方向の乱流運動のみ考慮した二次元計算と、等深線に沿う方向の乱流運動も考慮した三次元計算とで結果の比較を行った。

#### 4. 研究成果

図3に、5ビーム ADCP で計測した乱流運動エネルギー生成率と潮汐流の鉛直シアアから求めた渦粘性係数と、TurboMAP で計測した乱流運動エネルギー散逸率に乱流パラメタリゼーション (Wakata 2018) を適用して計算した渦拡散係数の散布図を示す。渦粘性係数・渦拡散係数ともに、海底からの高さごとに時間平均しており、エラーバーは95%の信頼限界を示している。渦拡散係数のばらつきがやや大きいものの、両者がほぼ比例関係にあることが見てとれる。さらに、回帰係数の傾きから見積もられる乱流プラントル数(渦粘性係数と渦拡散係数の比)は0.68で、ラージ・エディー・シミュレーションの結果から提案された海底混合層内の値(0.67)とほぼ一致する。以上の結果より、海底混合層内の乱流運動がもたらす鉛直方向の密度フラックスは、

- (1) 船舶観測で得られた、乱流運動エネルギー散逸率、水温・塩分、潮汐流の鉛直シアアに乱流パラメタリゼーションを適用する

もしくは、

- (2) 係留観測で得られた、乱流運動エネルギー生成率と潮汐流の鉛直シアアから計算した渦粘性係数を乱流プラントル数(0.67)で割る

ことで求めた渦拡散係数と、背景密度の鉛直勾配との積として見積もり可能であることが示された。

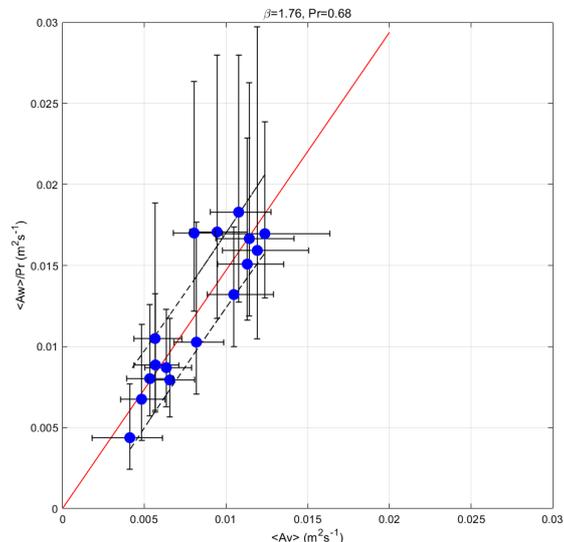


図3. 乱流微細構造観測で得られた、渦粘性係数と渦拡散係数の散布図。赤実線が回帰直線、黒点線が標準偏差を表す。

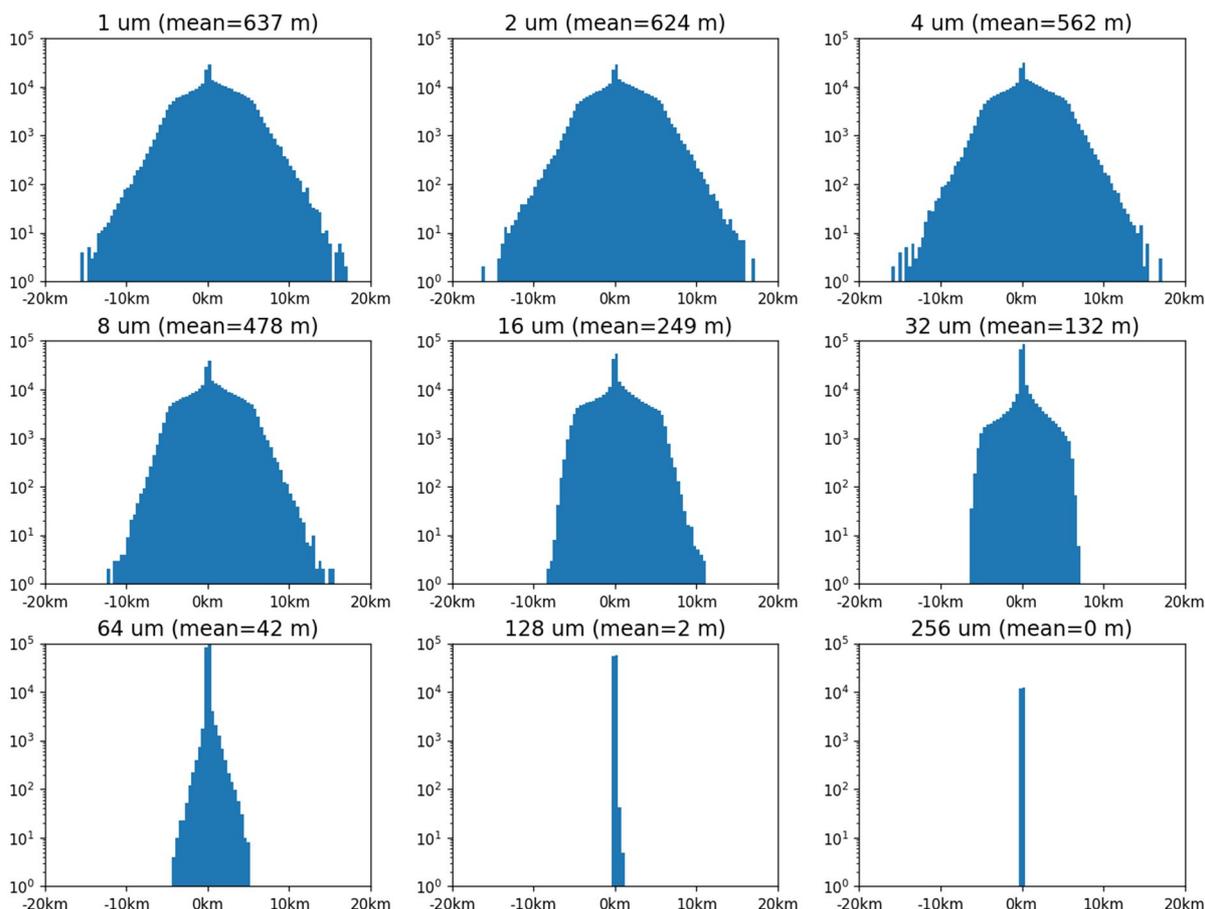


図4. 三次元計算による、粒子の斜面沿い方向移動距離の粒径別ヒストグラム。横軸の正(負)方向が斜面を駆け上る(下る)方向を示している。

次に、三次元非静水圧モデル kinaco を用いた、Tidal straining 現象の数値シミュレーション結果の一例について、粒子の斜面沿い方向移動距離の粒径別ヒストグラムを図 4 に示す。横軸の正(負)方向が斜面を駆け上る(下る)方向を示しているが、巻き上がり後すぐに沈降する粒径  $256\ \mu\text{m}$  の粒子を除いて、斜面を上る方向に移動する粒子数が多いことが見てとれる。この原因は、潮汐流が斜面を駆け上る時に、斜面下方の高密度水が乗り上げて成層が不安定化し、乱流混合が活発化して巻き上がる粒子数がより多くなるためである。すなわち、Tidal straining 現象によって海底から巻き上げられた粒子は、潮汐流によって海底斜面上を流されつつ、粒径によらず少しずつ浅い方へと移動していくことが明らかとなった。

これに対して、等深線を横切る方向の乱流運動のみを考慮した二次元計算の場合は、粒径の小さい ( $4\ \mu\text{m}$  以下) 粒子は斜面を上る方向に移動するが、粒径の大きな ( $8\ \mu\text{m}$  以上) 粒子は逆に斜面を下る方向に移動する(図 5)。二次元計算でも Tidal straining 現象自体は再現されるものの、潮汐流が等深線沿いに流れる時に乱流混合が抑制されてしまい、粒径の大きな粒子については巻き上がりよりも重力の影響が優勢となることが原因で、計算機資源の節約を目的とした、一見妥当と思われる仮定に対する警鐘とも言える結果が得られた。

S1

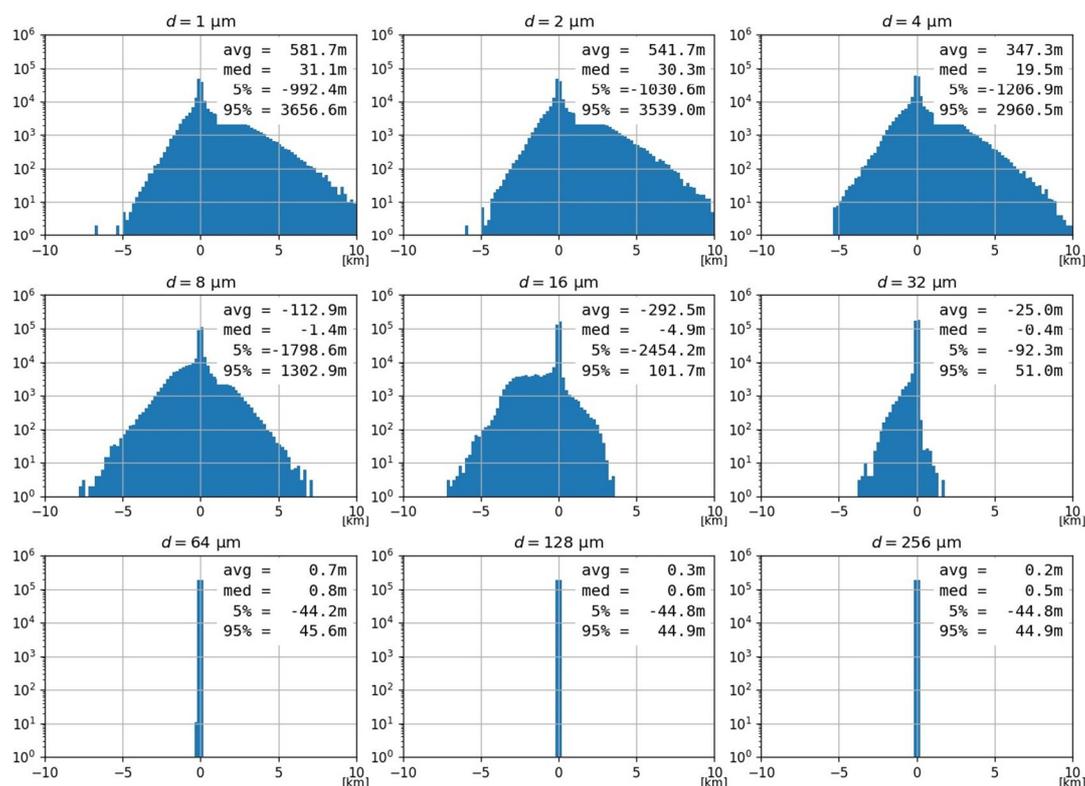


図 5. 二次元計算による、粒子の斜面沿い方向移動距離の粒径別ヒストグラム。横軸の正(負)方向が斜面を駆け上る(下る)方向を示している。

< 引用文献 >

Endoh, T., Y. Yoshikawa, T. Matsuno, Y. Wakata, K.-J. Lee, and L. Umlauf (2016), Observational evidence for tidal straining over a sloping continental shelf, *Continental Shelf Research*, 117, 12-19.

Matsumura, Y. and H. Hasumi (2008), A non-hydrostatic ocean model with a scalable multigrid Poisson solver, *Ocean Modelling*, 24(1), 15-28.

Wakata, Y. (2018), LES study of vertical eddy diffusivity estimation in bottom boundary layers, *Journal of Physical Oceanography*, 48(8), 1903-1920.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 3件）

|   |                               |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Chang, Ming-Huei, Yu-Hsin Cheng, Yu-Yu Yeh, Yiing Jang Yang, Sen Jan, Chih-Lun Liu, Takeshi Matsuno, Takahiro Endoh, Eisuke Tsutsumi, Jia-Lin Chen, and Xinyu Guo   | 4. 巻<br>52                    |
| 2. 論文標題<br>Internal Hydraulic Transition and Turbulent Mixing Observed in the Kuroshio over the I-Lan Ridge off Northeastern Taiwan   | 5. 発行年<br>2022年               |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Physical Oceanography  | 6. 最初と最後の頁<br>3179 ~ 3198     |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1175/jpo-d-21-0245.1   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)  | 国際共著<br>該当する                  |
| 1. 著者名<br>Endoh Takahiro, Tsutsumi Eisuke, Hong Chang-Su, Baek Gyu-Nam, Chang Ming-Huei, Yang Yiing Jang, Matsuno Takeshi, Lee Jae Hak  | 4. 巻<br>233                   |
| 2. 論文標題<br>Estimating propagation speed and direction, and vertical displacement of second-mode nonlinear internal waves from ADCP measurements                               | 5. 発行年<br>2022年               |
| 3. 雑誌名<br>Continental Shelf Research  | 6. 最初と最後の頁<br>104644 ~ 104644 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.csr.2021.104644   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)  | 国際共著<br>該当する                  |
| 1. 著者名<br>Mulia Iyan E., Tomoyuki Hirobe, Daisuke Inazu, Takahiro Endoh, Yoshihiro Niwa, Aditya Riadi Gusman, Hidee Tatehata, Takuji Waseda, and Toshiyuki Hibiya             | 4. 巻<br>10                    |
| 2. 論文標題<br>Advanced tsunami detection and forecasting by radar on unconventional airborne observing platforms   | 5. 発行年<br>2020年               |
| 3. 雑誌名<br>Scientific Reports  | 6. 最初と最後の頁<br>2412            |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1038/s41598-020-59239-1  | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)  | 国際共著<br>-                     |
| 1. 著者名<br>Hirobe, Tomoyuki, Yoshihiro Niwa, Takahiro Endoh, Iyan E. Mulia, Daisuke Inazu, Takero Yoshida, Hidee Tatehata, Akitsugu Nadai, Takuji Waseda, and Toshiyuki Hibiya | 4. 巻<br>75(6)                 |
| 2. 論文標題<br>Observation of sea surface height using airborne radar altimetry: a new approach for large offshore tsunami detection  | 5. 発行年<br>2019年               |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Oceanography   | 6. 最初と最後の頁<br>541-558         |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1007/s10872-019-00521-w  | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>-                     |

|   |                     |
|---|---------------------|
| 1. 著者名<br>遠藤 貴洋, Kirstin Schulz, 吉川 裕, 松野 健, 和方 吉信, 李 根涼, Lars Umlauf | 4. 巻<br>57(1)       |
| 2. 論文標題<br>海底斜面上のtidal straining と懸濁物質の輸送過程                           | 5. 発行年<br>2019年     |
| 3. 雑誌名<br>沿岸海洋研究  | 6. 最初と最後の頁<br>31-37 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし  | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難                                | 国際共著<br>該当する        |

〔学会発表〕 計8件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件)

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Fu, Yue, Takahiro Endoh, Eisuke Tsutsumi, Ryuichiro Inoue, Takeyoshi Nagai, Hirohiko Nakamura, and Ayako Nishina |
| 2. 発表標題<br>Moored ADCP measurements of the dissipation rate of turbulent kinetic energy in the Kuroshio                     |
| 3. 学会等名<br>JpGU-AGU Joint meeting (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2022年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>松村 義正, 干場 康博                         |
| 2. 発表標題<br>非静力学モデルとオンライン粒子追跡による分散混相流モデルの開発とその応用 |
| 3. 学会等名<br>日本海洋学会秋季大会 (招待講演)                    |
| 4. 発表年<br>2022年                                 |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Endoh Takahiro and Hirooka Takuya  |
| 2. 発表標題<br>Verifying the parameterization of vertical eddy viscosity and diffusivity in the bottom boundary layer |
| 3. 学会等名<br>JpGU-AGU Joint meeting (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>付 悦, 遠藤 貴洋, 堤 英輔, 井上 龍一郎, 長井 健容, 中村 啓彦, 仁科 文子, 小針 統 |
| 2. 発表標題<br>黒潮流軸における乱流運動エネルギー散逸率の長期時系列観測                        |
| 3. 学会等名<br>2021年度日本海洋学会秋季大会                                    |
| 4. 発表年<br>2021年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>松村 義正, 遠藤 貴洋   |
| 2. 発表標題<br>Modeling asymmetric sediment transport caused by slope induced tidal straining |
| 3. 学会等名<br>JpGU-AGU Joint meeting   |
| 4. 発表年<br>2020年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>廣岡 拓也, 遠藤 貴洋                 |
| 2. 発表標題<br>乱流微細構造観測に基づく海底近傍での鉛直渦拡散係数の推定 |
| 3. 学会等名<br>日本海洋学会秋季大会                   |
| 4. 発表年<br>2020年                         |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Endoh, Takahiro, Eisuke Tsutsumi, Chang-Su Hong, Gyu-Nam Baek, Ming-Huei Chang, Yiing Jang Yang, Takeshi Matsuno, and Jae Hak Lee |
| 2. 発表標題<br>Trapped core formed within second-mode nonlinear internal waves over the shelf break of the East China Sea                        |
| 3. 学会等名<br>American Geophysical Union 2020 Ocean Sciences Meeting (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2020年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>遠藤 貴洋, 堤 英輔, 松野 健, Chang-Su Hong, Gyu-Nam Baek, Jae, Hak Lee, Ming-Huei Chang, Yiing Jang Yang |
| 2. 発表標題<br>Trapped coreを持つ鉛直第二モードの非線形内部重力波の観測   |
| 3. 学会等名<br>2019年度日本海洋学会秋季大会   |
| 4. 発表年<br>2019年   |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

|                   | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                            | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)              | 備考 |
|-------------------|--|------------------------------------|----|
| 研究<br>分<br>担<br>者 | 松村 義正<br><br>(Matsumura Yoshimasa)<br><br>(70631399) | 東京大学・大気海洋研究所・助教<br><br><br>(12601) |    |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国  | 相手方研究機関                    |  |  |
|----------|----------------------------|--|--|
| その他の国・地域 | National Taiwan University |  |  |