

令和 5 年 6 月 17 日現在

機関番号：12614

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19H01965

研究課題名(和文) 二台同時自由落下曳航観測手法を用いたマルチスケール混合現象とその影響に関する研究

研究課題名(英文) Resolving multi-scale mixing processes and their impacts using a twin tow-yo microstructure profiling system

研究代表者

長井 健容 (NAGAI, TAKEYOSHI)

東京海洋大学・学術研究院・准教授

研究者番号：90452044

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,420,000円

研究成果の概要(和文)：自由落下曳航式乱流プロファイラー、Underway-VMP(UVMP)と紫外線を用いて植物プランクトンの増殖に必要な硝酸塩濃度の測定を現場でできる自由落下曳航式生物化学プロファイラーを開発し、観測手法を確立した。これらを用いた観測は、通常の100-1000倍の大きさの乱流が、100kmわたって発生していることを示し、この結果は、2021年にComm Earth & Environmentに出版された。これらを、2020年9月にトカラ海峡において再び用い、九州南方を流れる黒潮が、非常に大きな乱流と、栄養塩供給スポットであるという結果を得、現在観測結果を統合して投稿する論文を執筆中である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で確立された2台同時自由落下曳航観測手法は、海洋の乱流混合と硝酸塩濃度などの生物化学的要素を、サブメソスケール(0.1-10km)で解像することを可能とした。これによって、サブメソスケールの不安定現象が実際に乱流や栄養塩輸送をどの程度引き起こし得るのかを観測から直接的に明らかにすることができる。これは極めて新規性の高いデータの取得を可能とする。これらを用いたトカラ海峡を流れる黒潮での現場観測結果は、九州南方が黒潮やその下流である本州南岸を肥沃化する重要な海域であることを示す。これは何故貧栄養な黒潮に高い魚類生産が維持されているのかを解明する大きな手がかりを与え社会的な意義が極めて大きい。

研究成果の概要(英文)：A free-fall tow-yo turbulence profiler, Underway-VMP (UVMP), and a free-fall tow-yo biochemical profiler that can measure nitrate concentrations necessary for phytoplankton growth in the field using ultraviolet light have been developed and observation methods established. Observations using these profilers showed that turbulence 100-1000 times larger than typical thermocline values were seen over 100 km, and the results were published in Comm Earth & Environment in 2021. These observations were used again in the Tokara Strait in September 2020 and showed that the Kuroshio Current flowing south of Kyushu is a very large turbulence and nutrient hotspot.

研究分野：海洋物理

キーワード：黒潮 サブメソスケール 高解像度観測 自由落下曳航 乱流 栄養塩

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年の計算機能力や観測技術の向上によって、これまで明らかではなかったスケール間の相互作用が、海水や、海水に溶け込む栄養塩などのトレーサーの混合や、海盆スケールの風成循環のエネルギーやトレーサー濃度分布の分散の散逸に重要な役割を担うことが明らかとなりつつある。このスケール間の相互作用の中でも、サブメソスケールと呼ばれる数 100m から数 km の水平スケールで発生する現象とマイクロスケール(数 m から数 mm)の三次元乱流・微細混合現象との関わりについては、現在特に活発な研究が展開されている。

このサブメソスケールとマイクロスケール相互作用に関する現象には、(a) フロント上空で流れと同じ方向の風(ダウンフロント風)が吹く際に生じるサブメソスケールの対称不安定と、それに伴って強化される混合層フロントでの三次元乱流混合現象、(b) 黒潮などの海流が海山や陸棚斜面上を流れる際に発生するサブメソスケールの不安定現象、慣性対称不安定とそれに伴う三次元乱流混合現象をその例として挙げるができる。これらの現象の内、(a)のダウンフロント風は、フロントの重い側の海水を軽い側の上に運ぶエクマン輸送を発生させる。その際には、重たい海水が軽い海水の上にある重力不安定が発生する前に、Ertel の渦位の符号が反転し、対称不安定と呼ばれるサブメソスケールの不安定が発生することが知られている。この対称不安定によって、サブメソスケールの循環が引き起こされ、生成された符号の異なる渦位を元に戻す様に海水が混ぜられ、結果的に三次元の乱流が発生する。したがって、ダウンフロント風に伴う対称不安定はエネルギーの前方カスケードと海水の混合を促進する重要なプロセスである。また、(b)の海山上を流れる海流が発生させる慣性対称不安定も、傾斜する海底境界層によって渦位符号が流れの高気圧生渦度側で反転し、(a)と同様にその渦位の符号を元に戻すために不安定な流れが生じて乱流を発生させる現象である。

これに関しては、これまで数値モデル内のガルフストリーム等で現象が再現されるにとどまっておらず、発生する乱流エネルギー散逸率の見積もりも数値モデルの結果から導き出されたものしかない。一方研究代表者は、2017年11月と2018年6月にかごしま丸を用いて、トカラ海峡で自由落下曳航式乱流観測装置 Underway-VMP と船舶船底 ADCP を用いた観測によって、渦位符号反転に伴う強乱流を直接捉えることに成功した。しかしながら、この混合によって発生し得る黒潮亜表層の栄養塩の表層への供給については、栄養塩を同時に観測していなかったため不明である。従って、このマルチスケールで発生する混合現象に伴う、水温・塩分や栄養塩のフラックスが、メソ、サブメソスケールのフロントの何処で、どの程度発生するのかを正確に明らかにすることは急務である。

2. 研究の目的

しかしながら、このマルチスケールの過程によって生じる鉛直拡散が水塊変質や、栄養塩供給に及ぼす影響をより広範にわたって定量的に評価するには、現象スケールをカバーしつつ高解像度に観測を実施する必要がある。このような観測を、複数の観測機器を用いて実施することは、従来の船舶観測が各観測点で長時間を要するため、非常に困難である。一方、研究代表者は、これまで自由落下曳航式に水温・塩分や乱流・微細構造を高解像度且つ断面的に観測することに成功した。しかしながら、栄養塩の自由落下曳航式同時測定手法は現在まで存在しない。

そこで本研究では、(1)自由落下曳航式観測装置を二台体制で実施し、研究代表者が既に確立した水温・塩分と乱流運動エネルギー散逸率の断面観測に加え、栄養塩やクロロフィル、濁度、溶存酸素の面的な観測を同時に実施する手法を確立し、(2)サブメソスケールの流動とマイクロスケールの混合現象によって生じる、栄養塩フラックスを観測から定量すること、(3)観測で得られたサブメソスケールの現象を高解像度数値モデルを生態系モデルとともに用いて再現し、面的な観測で取得したデータを三次元モデルで補完して、より正確な水温・塩分や硝酸塩鉛直拡散フラックスを定量することを目的とする。

この観測手法が確立すれば、これまで点でしか得られなかった水温・塩分や栄養塩の拡散フラックスを三次元的に捉えることができる。これによって、しばしばフロントの時空間的構造に関連して発生することが予想される、マルチスケール過程によって生じる乱流混合現象とそれに伴うトレーサー鉛直拡散フラックスを定量的に把握することができ、前節にある学術的問いに答えることができる。これは、極めて新規性が高い。

3. 研究の方法

この研究目的を達成するために、本研究では以下の計画に沿って研究を遂行する。まず、生物化学的観測項目を測定することが可能なセンサーを自由落下曳航式に用いるための曳航体の作成を実施する。この曳航体を含めるセンサーは、全て既存のセンサーとし、まず既に曳航体として

改造が可能な、Rinko-Profiler(JFE アドバンテック)を用いる。Rinko-Profiler は、水温・塩分・圧力や、クロロフィル蛍光、濁度、溶存酸素の観測が可能であり、既に研究代表者が学内予算で購入した。この Rinko-Profiler を既存の Underway-CTD ウィンチで曳航するためのアダプターの購入と改造を JFE アドバンテックに依頼し実施する。JFE アドバンテックはこの改造を以前から実施している。この改造が完了したのち、この曳航体を試験的に曳航し Underway-Rinko 観測を実施し、曳航体が期待した断面観測を実施できるか試験する。この試験観測は、東京海洋大学青鷹丸の定期航海で実施する。試験観測では、二台の Underway-CTD ウィンチを船尾の両舷に設置する。設置には、観測船に合わせた治具を 2 つ製作する必要がある。研究代表者および分担者は、既に合計三台の Underway-CTD ウィンチを使用でき、様々な船舶でこの観測を実施しているため治具は各船舶に 1 式ずつ既存のものが存在する。二台のウィンチを使って乱流微細構造観測装置 VMP と Rinko-Profiler 二つの曳航体を同時に用いるためには、観測手法に工夫が必要である。両曳航体とも、自由落下曳航させ、センサー降下時にはロープをウィンチから繰り出し続ける。目的の水深に達すると、このロープを巻き取りながら曳航体を海面まで巻き上げる。このため、同時に二つの曳航体を投入すると、降下の途中や巻き上げの際に、2 本のロープが絡まる可能性が高い。従って、ロープが絡まることの無いよう、二台の曳航体の投入を交互に行う必要がある。実際の観測手法は現場で試行して最善の方法を模索する必要がある。

この Underway-VMP と Underway-Rinko の二台体制の観測が実現すれば、次は Rinko-Profiler に現場硝酸塩濃度センサー SUNA と電池を追加し、Underway-Rinko-SUNA を開発する。このためには、SUNA センサーと電池を Underway-Rinko の曳航体に追加し、且つ浮力とブラシなどで低速で安定して落下できるように曳航体を調整することが必要である。この SUNA を搭載した曳航体の作成は、JFE アドバンテックや他の業者と相談して設計と製作を実施する。SUNA センサーは、分担研究者の山崎教授や長谷川博士が保有している。ただし、現在山崎教授の SUNA センサーは故障しており、これを修理して且つバッテリーを準備する必要がある。この修理を初年度に Underway-Rinko-SUNA の開発費用の一部として計上し、実施する。Underway-Rinko-SUNA の開発が実現すれば、これと Underway-VMP とを同時に用いて観測を行うことによって、硝酸塩濃度の高解像度断面観測を乱流・微細構造観測と共に実施する。この観測から、硝酸塩の乱流や二重拡散対流に伴う鉛直拡散フラックスの定量を高解像度を実施することができ、サブメソスケールの流動が発生するフロントの何処で、どの程度の硝酸塩の拡散フラックスが発生しているか定量する。黒潮が海山上を流れる際の慣性-対称不安定に伴うフラックスは、トカラ海峡近海で、2016 年から毎年参加しているかごしま丸航海や、来年度申請中の新青丸航海、再来年度採択され参加予定の白鳳丸航海などが挙げられる。

数値実験は、研究代表者がこれまでに構築した北太平洋の渦許容物理生態系モデル(ROMS)中にネスティング計算領域を複数設け、現実的な海底地形や境界条件でマイクロスケール以外の現象を解像できる鉛直、水平解像度で計算を実施する。すでに、同様な計算は、他のプロジェクトで実施しており、本研究では観測した栄養塩の鉛直フラックスを補完する目的で実験と解析を実施する。黒潮が海山上を流れる場合の慣性-対称不安定については、トカラ海峡や沖縄トラフ海域についても、水平解像度 500m 程度のネスティング高解像度計算格子を、親グリッド中に埋め込み、親グリッドで計算された現実的な黒潮をネスティング計算格子に与え、その混合と栄養塩フラックスへの影響を定量する。

4. 研究成果

本課題で実施している二台同時準自由落下観測手法の開発において、2020 年度に自由落下曳航式乱流プロファイラー、Underway-VMP(UVMP)と自由落下曳航式生物化学プロファイラー Underway-Rinko を交互に実施する手法を確立した。これらのセンサーを用いて 2020 年 11 月にはかごしま丸でトカラ海峡における観測を実施し、海山周辺のデータを取得することができた。このデータと高解像度数値実験を用いて研究協力者である大学院生が現在論文を執筆している。また、UVMP をトカラ海峡を流れる黒潮に沿って投入した 2017 年の観測結果は、通常の 100-1000 倍の大きさの乱流が、100km わたって観測され、これがサブメソスケール不安定現象である慣性不安定に伴うものであることを明らかとした。この結果は、2021 年に Nature のオープンアクセスジャーナルである Communication Earth & Environment に出版された。また、2017 年には同様な観測を栄養塩の観測と同時に日向灘沖でも実施しており、この結果を再現する数値モデルの結果と合わせて、黒潮が種子島などに接近して流れる際には、日向灘沖での硝酸塩の拡散フラックスが増加することを明らかとし、これを 2022 年度に指導する大学院生が国際誌に出版した。2020 年度後半にはこの測器をさらに発展させて、自由落下曳航式生物化学プロファイラーに、紫外線を用いて植物プランクトンの増殖に必要な硝酸塩濃度の測定を現場でできる SUNA センサーを取り付けた新しい生物化学プロファイラー、SUANDAYODA を開発した。この UVMP と SUNADAYODA を、2020 年 9 月にトカラ海峡と黒潮の大蛇行海域において実施された白鳳丸航海で交互に用いて観測を行った。その結果、トカラ海峡の海山上を流れる黒潮に沿って、100-200km 程度著しく強い乱流層が続いて観測された。硝酸塩の断面観測結果から海山上流から下流に向かうにした

がって表層の硝酸塩濃度が増加する傾向があることがわかった（図1）。また、上流側では亜表層に明瞭に観測できた亜表層クロロフィル極大が、海山を越えると縦方向に攪拌され、そのさらに下流では亜表層極大のクロロフィル濃度が増加することがわかった。この観測結果は、九州南方を流れる黒潮が、非常に大きな乱流と、栄養塩供給スポットであることを示し、現在、複数の観測結果を統合して国際誌に投稿する論文を執筆中である。

一方黒潮大蛇行海域では、大蛇行の西側のフロントで硝酸塩濃度の舌状分布が見られること、大蛇行の中心寄りでは硝酸塩躍層が海面近くまで上昇していること、それらの2つの部分で比較的乱流が強く、また亜表層のクロロフィル濃度が増加していることがわかった。これらの結果は、黒潮大蛇行に何故海面クロロフィル濃度が高いのかを説明するメカニズムの一つであると考えられる。

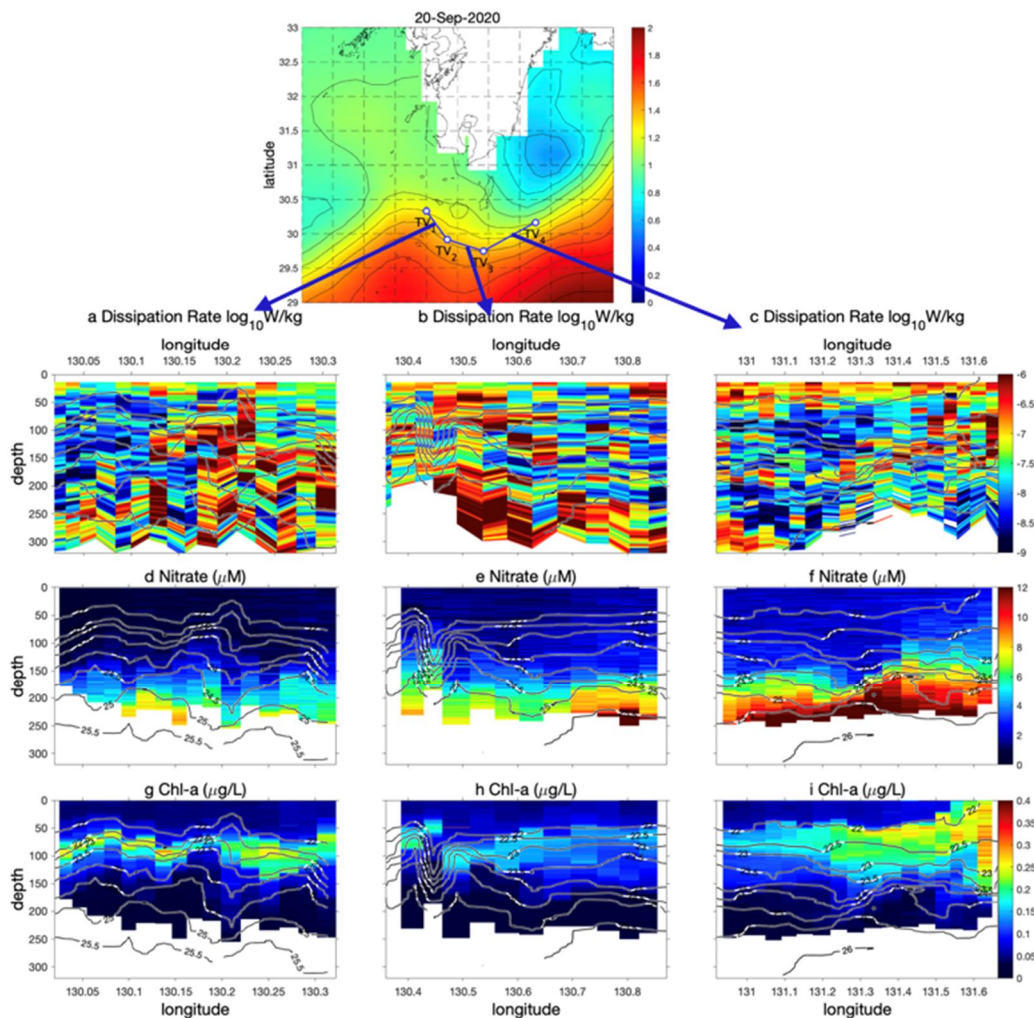


図1： 2020年9月にトカラ海峡で実施された(上地図)白鳳丸航海時の観測で取得した(上)乱流運動エネルギー散逸率、(中)硝酸塩濃度、(下)クロロフィルa濃度。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 17件/うち国際共著 5件/うちオープンアクセス 11件）

| | |
|--|-----------------------------|
| 1. 著者名 Nagai, T. and Hasegawa, D. and Tsutsumi, E. and Nakamura, H. and Nishina, A. and Endoh, T. and Senjyu, T. and Matsuno, T. and Inoue, R. and Tandon, A. | 4. 巻 2 |
| 2. 論文標題 The Kuroshio flowing over seamounts and associated submesoscale flows drive 100-km-wide 100-1000-fold enhancement of turbulence | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Commun Earth Environ | 6. 最初と最後の頁 170 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s43247-021-00230-7 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス 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 該当する |
| 1. 著者名 T. Nagai, G. M. Rosales Quintana, G. S. Duran Gomez, F. Hashihama, K. Komatsu | 4. 巻 77 |
| 2. 論文標題 Elevated turbulent and double-diffusive nutrient flux in the Kuroshio over the Izu Ridge and in the Kuroshio Extension | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 J. Oceanogr | 6. 最初と最後の頁 55-74 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10872-020-00582-2 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス 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 該当する |
| 1. 著者名 橋濱, 纈織, 近藤, 佐々木, 杉本, 高橋, 長井, 西岡, 林田, 平井 | 4. 巻 30 |
| 2. 論文標題 海洋学の10年展望2021: 中緯度 | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 海の研究 | 6. 最初と最後の頁 127-154 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5928/kaiyou.30.5_127 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス 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 - |
| 1. 著者名 Hasegawa, D. and Matsuno, T. and Tsutsumi, E. and Senjyu, T. and Endoh, T. and Tanaka, T. and Yoshie, N. and Nakamura, H. and Nishina, A. and Kobari, T. and Nagai, T. and Guo, X. | 4. 巻 48 |
| 2. 論文標題 How a Small Reef in the Kuroshio Cultivates the Ocean | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Geophysical Research Letters, | 6. 最初と最後の頁 e2020GL092063 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2020GL092063 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス 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 - |

| | |
|---|--------------------|
| 1. 著者名 Lizarbe Barreto, Daniel Andres and Chevarria Saravia, Ricardo and Nagai, Takeyoshi and Hirata, Takafumi | 4. 巻 8 |
| 2. 論文標題 Phytoplankton Increase Along the Kuroshio Due to the Large Meander | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Frontiers in Marine Science | 6. 最初と最後の頁 1010 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fmars.2021.677632 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス 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 該当する |

| | |
|---|---------------------|
| 1. 著者名 Duran Gomez Gloria Silvana, Nagai Takeyoshi, Yokawa Kotaro | 4. 巻 7 |
| 2. 論文標題 Mesoscale Warm-Core Eddies Drive Interannual Modulations of Swordfish Catch in the Kuroshio Extension System | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Frontiers in Marine Science | 6. 最初と最後の頁 na-na |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fmars.2020.00680 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス 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 該当する |

| | |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名 Kobari Toru, Honma Taiga, Hasegawa Daisuke, Yoshie Naoki, Tsutsumi Eisuke, Matsuno Takeshi, Nagai Takeyoshi, Kanayama Takeru, Karu Fukutaro, Suzuki Koji, Tanaka Takahiro, Guo Xinyu, Kume Gen, Nishina Ayako, Nakamura Hirohiko | 4. 巻 17 |
| 2. 論文標題 Phytoplankton growth and consumption by microzooplankton stimulated by turbulent nitrate flux suggest rapid trophic transfer in the oligotrophic Kuroshio | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Biogeosciences | 6. 最初と最後の頁 2441 ~ 2452 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5194/bg-17-2441-2020 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス 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 - |

| | |
|---|---------------------|
| 1. 著者名 Hasegawa D., Matsuno T., Tsutsumi E., Senjyu T., Endoh T., Tanaka T., Yoshie N., Nakamura H., Nishina A., Kobari T., Nagai T., Guo X. | 4. 巻 48 |
| 2. 論文標題 How a Small Reef in the Kuroshio Cultivates the Ocean | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Geophysical Research Letters | 6. 最初と最後の頁 na-na |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020GL092063 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス 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 - |

| | |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名 Nagai Takeyoshi, Rosales Quintana Gandy Maria, Duran Gomez Gloria Silvana, Hashihama Fuminori, Komatsu Kosei | 4. 巻 77 |
| 2. 論文標題 Elevated turbulent and double-diffusive nutrient flux in the Kuroshio over the Izu Ridge and in the Kuroshio Extension | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Oceanography | 6. 最初と最後の頁 55 ~ 74 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10872-020-00582-2 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス 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 該当する |

| | |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名 Nagai Takeyoshi, Clayton Sophie, Uchiyama Yusuke | 4. 巻 243 |
| 2. 論文標題 Multiscale Routes to Supply Nutrients Through the Kuroshio Nutrient Stream | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Kuroshio Current: Physical, Biogeochemical and Ecosystem Dynamics | 6. 最初と最後の頁 105 ~ 125 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/9781119428428.ch6 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス 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 - |

| | |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名 Nagai Takeyoshi, Otsuka Kazuyuki, Nakano Hiroshi | 4. 巻 243 |
| 2. 論文標題 The Research Advancements and Historical Episodes brought by the Kuroshio Flowing across Generations | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Kuroshio Current: Physical, Biogeochemical and Ecosystem Dynamics | 6. 最初と最後の頁 13 ~ 22 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/9781119428428.ch2 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス 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 - |

| | |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名 Tandon Amit, Nagai Takeyoshi | 4. 巻 na-na |
| 2. 論文標題 Mixing Associated with Submesoscale Processes | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Encyclopedia of Ocean Sciences, Third Edition | 6. 最初と最後の頁 567 ~ 577 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/B978-0-12-409548-9.10952-2 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス 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 - |

| | |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名 Nagai Takeyoshi, Duran Gloria Silvana, Otero Diego Andre, Mori Yasutaka, Yoshie Naoki, Ohgi Kazuki, Hasegawa Daisuke, Nishina Ayako, Kobari Toru | 4. 巻 46 |
| 2. 論文標題 How the Kuroshio Current Delivers Nutrients to Sunlit Layers on the Continental Shelves With Aid of Near Inertial Waves and Turbulence | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Geophysical Research Letters | 6. 最初と最後の頁 6726 ~ 6735 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2019GL082680 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス 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 - |

| | |
|--|---------------------|
| 1. 著者名 Roemmich Dean, Alford Matthew H., et al. | 4. 巻 6 |
| 2. 論文標題 On the Future of Argo: A Global, Full-Depth, Multi-Disciplinary Array | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Frontiers in Marine Science | 6. 最初と最後の頁 na-na |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fmars.2019.00439 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス 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 - |

| | |
|--|---------------------|
| 1. 著者名 Todd Robert E., Chavez Francisco P., Clayton Sophie, et al. | 4. 巻 6 |
| 2. 論文標題 Global Perspectives on Observing Ocean Boundary Current Systems | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Frontiers in Marine Science | 6. 最初と最後の頁 na-na |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fmars.2019.00423 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス 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 - |

| | |
|--|---------------------|
| 1. 著者名 長谷川大介, 田中雄大, 松野健, 千手智晴, 堤英輔, 中村啓彦, 仁科文子, 小針統, 吉江直樹, 郭新宇, 長井健容, 奥西武, 安田一郎 | 4. 巻 57 |
| 2. 論文標題 センサによる硝酸塩鉛直乱流拡散フラックスの計測 | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 沿岸海洋研究 | 6. 最初と最後の頁 59-64 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス 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 - |

| | |
|--|---------------------|
| 1. 著者名 長井健容 | 4. 巻 57 |
| 2. 論文標題 黒潮上流から続流の鉛直混合過程とその影響に関する考察 | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 沿岸海洋研究 | 6. 最初と最後の頁 43-58 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス 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 - |

〔学会発表〕 計13件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 13件)

| |
|---|
| 1. 発表者名 Nagai, T., G.S. Duran Gomez |
| 2. 発表標題 The Kuroshio nutrient stream: Where diapycnal mixing matters |
| 3. 学会等名 JpGU Annual Meeting 2021 (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Duran Gomez, G.S., Nagai, T. |
| 2. 発表標題 Elevated nutrient supply caused by the Kuroshio induced vertical mixing near the continental slope associated with submesoscale flows and near-inertial waves |
| 3. 学会等名 JpGU Annual Meeting 2021 (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Nagai, T., G.S. Duran Gomez, H. Saito, H. Ogawa, T. Kobari, N. Yoshie |
| 2. 発表標題 Revealing unseen subsurface physical biogeochemical reactions caused by submesoscale instability and associated turbulent mixing in the Kuroshio flowing over seamounts |
| 3. 学会等名 Ocean Sciences Meeting 2022 Virtual (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Duran Gomez, G.S., Nagai, T., T. Kobari, H. Nakamura, I. Bjorgvinsdottir |
| 2. 発表標題 Tracking turbulent mixing and its influence on productivity along the Kuroshio in the Tokara Strait |
| 3. 学会等名 Ocean Sciences Meeting 2022 Virtual (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 長井 健容、堤 英輔、長谷川 大介、中村 啓彦、仁科 文子、松野 健、千手 智晴 |
| 2. 発表標題 The long lasting strong turbulence along the Kuroshio flowing over seamounts in the Tokara Strait |
| 3. 学会等名 JpGU Annual Meeting 2020 (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Gloria Silvana Duran Gomez, Takeyoshi Nagai |
| 2. 発表標題 Elevated nutrient supply caused by the Kuroshio approaching to the continental shelf associated with submesoscale flows and near-inertial waves |
| 3. 学会等名 AGU Fall Meeting (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Takeyoshi Nagai, Gloria Silvana Duran Gomez, Toru Kobari, Naoki Yoshie |
| 2. 発表標題 Blending source of turbulence, upwelled nutrients and primary producers in the Kuroshio flowing through the Tokara Strait |
| 3. 学会等名 AGU Fall Meeting (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Takeyoshi Nagai, Gloria Silvana Duran Gomez, Diego Andre Otero Huaman, Yoshie Naoki, Kazuki Ohgi, Daisuke Hasegawa, Sophie Clayton, Yusuke Uchiyama |
| 2. 発表標題 How the Kuroshio enriches the southern coast of Japan and its downstream regions |
| 3. 学会等名 PICES Annual Meeting 2019, Victoria, Canada (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 鋤柄 千穂、井上 龍一郎、長井 健容、Andrea Fassbender、Yuichiro Takeshita、Stuart Bishop、岡 英太郎 |
| 2. 発表標題 Physical and biogeochemical processes from winter to spring in the south of the Kuroshio Extension |
| 3. 学会等名 JpGU Annual Meeting 2019 (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 長井 健容、Clayton Sophie、内山 雄介 |
| 2. 発表標題 Multiscale transport, stirring, and mixing processes to supply nutrients through the Kuroshio nutrient stream |
| 3. 学会等名 JpGU Annual Meeting 2019 (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 長井 健容、Duran Silvana、Otero Diego、森 泰貴、吉江 直樹、大城 一輝、長谷川 大介、仁科 文子、小針 統 |
| 2. 発表標題 日向灘沖の陸棚斜面近傍を流れる黒潮において、水平30km、鉛直200m規模で観測された著しく強い乱流混合 |
| 3. 学会等名 JpGU Annual Meeting 2019 (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Takeyoshi Nagai, Daisuke Hasegawa, Eisuke Tsutsumi, Hirohiko Nakamura, Tomoharu Senjyu, Takahiro Endoh, Takeshi Matsuno, Ryuichiro Inoue, Amit Tandon, Naoki Yoshie, Kazuki Ohgi, Ayako Nishina, Toru Kobari, Gloria Silvana Duran Gomez and Diego Andre Otero |
| 2. 発表標題 Nutrient Supply Caused by Submesoscale and Microscale Mixing Processes in the Upstream Kuroshio |
| 3. 学会等名 Ocean Science Meeting 2020, San Diego (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 長井 健容、長谷川 大介、堤 英輔、中村 啓彦、仁科 文子、千手 智晴、遠藤 貴洋、松野 健、井上 龍一郎、Amit Tandon |
| 2. 発表標題 Turbulent mixing and near-inertial internal waves induced by the Kuroshio over seamounts in the Tokara Strait |
| 3. 学会等名 JpGU Annual Meeting 2019 (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

〔図書〕 計2件

| | |
|--|-----------------|
| 1. 著者名 T. Nagai, G. S. Duran Gomez | 4. 発行年 2022年 |
| 2. 出版社 Springer Nature | 5. 総ページ数 442 |
| 3. 書名 The Kuroshio nutrient stream: Where diapycnal mixing matters, In Chemical Oceanography in frontal zones | |

| | |
|--|-----------------|
| 1. 著者名 Takeyoshi Nagai, Hiroaki Saito, Koji Suzuki, Motomitsu Takahashi | 4. 発行年 2019年 |
| 2. 出版社 AGU-Wiley | 5. 総ページ数 326 |
| 3. 書名 Kuroshio Current: Physical, Biogeochemical and Ecosystem Dynamics | |

〔産業財産権〕

〔その他〕

Turbulence in the Kuroshio
<https://doi.org/10.6084/m9.figshare.19777453.v1>
 Tokara Mixing
<https://doi.org/10.6084/m9.figshare.19618158.v5>
 DráGóN Blessings
<https://doi.org/10.6084/m9.figshare.19606999.v3>
 Phytoplankton Increase Due to the Large Meander
<https://doi.org/10.6084/m9.figshare.15164421.v1>
 長井健容のウェブサイト
www.takeyoshi.net
 長井健容のウェブサイト
www.takeyoshi.net

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------|---|--|----|
| 研究分担者 | 長谷川 大介 (Hasegawa Daisuke) (10624728) | 国立研究開発法人水産研究・教育機構・水産資源研究所(塩釜)・主任研究員 (82708) | |
| 研究分担者 | 井上 龍一郎 (Inoue Ryuichiro) (80624022) | 国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境部門(海洋観測研究センター)・主任研究員 (82706) | |
| 研究分担者 | 山崎 秀勝 (Yamazaki Hidekatsu) (80260537) | 東京海洋大学・学術研究院・教授 (12614) | |

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------|--|--|----|
| 研究協力者 | ドゥランゴメス グロリアシルバナ (Duran Gomez Gloria Silvana) | 東京海洋大学・海洋科学技術研究科・博士後期過程1年 (12614) | |

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 |
|---------|---------|
|---------|---------|