

様 式 C - 1 9、F - 1 9 - 1、Z - 1 9 （共通）

科学研究費助成事業

研究成果報告書



令和 元 年 5 月 2 2 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2015～2017

課題番号：15H02131

研究課題名（和文）南大洋における乱流ホットスポットの定量化とその深層海洋大循環モデルへの組み込み

研究課題名（英文）Quantification of mixing hotspots in the Southern Ocean for accurate modeling of the global overturning circulation

研究代表者

日比谷 紀之（HIBIYA, Toshiyuki）

東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・教授

研究者番号：80192714

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 32,500,000 円

研究成果の概要（和文）：深海乱流のグローバルな分布の把握は、深層海洋大循環像を高精度化する上で重要な役割を果たすと考えられている。本研究では、世界の大洋で唯一、風起源の乱流ホットスポットの存在が期待されている南極周極流域において乱流直接観測を実施し、海面から海底まで全水深にわたる乱流データを多数取得することに成功した。これらのデータの解析および数値実験により既存の乱流パラメタリゼーションの南大洋における有効性を検証した結果、周極流フロント域付近では、乱流混合を過大評価してしまう深度が相当数存在することが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

温和な地球環境の維持に重要な役割を果たしている深層海洋大循環に注目し、全球にわたる海水循環を本質的に駆動する「乱流」に着目し、深層海洋大循環の維持に不可欠となる乱流のエネルギー不足に関する未解決問題である“Missing Mixing”に挑んだ意欲的な研究である。観測対象海域である南大洋は、その過酷な環境ゆえに乱流観測は非常に困難であるが、南極周極流域で最新の深海乱流計VMP-Xを使用した深度4000メートル以上の深海底にまで及び乱流観測を実施し、世界初となる海面から海底直上までの乱流混合強度の鉛直プロファイルの取得に成功したことは特筆すべき成果といえる。

研究成果の概要（英文）：Global mapping of deep-ocean mixing is crucial for accurate modeling of the global overturning circulation. In this study, we conducted microstructure observations in the Southern Ocean with wind-induced mixing hotspots which cannot be expected to exist anywhere else in the world's oceans. We successfully obtained quite a few microstructure data from the sea surface down to the seabed using a newly developed microstructure profiler called VMP-X. Based on the results from these microstructure observations as well as accompanying numerical experiments, we next assessed the validity of the existing fine-scale parameterization of turbulent dissipation rates in the Southern Ocean. It has been shown that the existing fine-scale parameterizations tend to overestimate turbulent dissipation rates especially near the polar front of the Antarctic Circumpolar Current where mesoscale eddy activities are prominent.

研究分野：海洋物理学

キーワード：南大洋 乱流パラメタリゼーション 南極周極流 風下波 投棄式乱流計

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

北大西洋／南極海を起源とする深層水は全球を巡り、北太平洋・インド洋で表層に湧昇後、その形成域に戻ることで深層海洋大循環を形成している。その深層水の湧昇には、海表面からの熱を表層へと伝える乱流が本質的な役割を果たしているため、深層海洋大循環の強さやそのパターンの解明には、この深層乱流のグローバル分布の把握が必要不可欠となる。

深海乱流の主要なエネルギー源は、潮汐と大気擾乱と考えられている。しかし、大気擾乱による深海乱流は、代表者らのこれまでの研究(*Furuichi et al., 2008*)によれば、風により表層で励起された内部波エネルギーは、深海に達する前に深度 200 メートルまでの強い表層乱流によって約 90%が消散してしまい、1000 メートル以下の深海に供給されるのは、その 10%以下にすぎないことが判明している。

このため、深層海洋大循環をコントロールする深海乱流のほとんどは潮汐起源となるが、その強度は毎秒 2000 万トン程度沈み込んでいると推察される深層水を表層まで引き上げるのに必要とされる値の半分程度にすぎない。

2. 研究の目的

上述した深海乱流のエネルギー源の不足(“Missing Mixing”)を補う有力候補の一つとして、南大洋の乱流ホットスポットの存在が注目されている。南大洋では、偏西風に励起された南極周極流が海底まで達するように流れ、海底凹凸地形との相互作用により風下波を励起している。この風下波が鉛直上方への伝播し、様々な非線形相互干渉を通じて碎波することで、海底から鉛直上方に顕著な乱流ホットスポットを形成していると推察される。本研究では、南大洋周極流域で乱流直接観測を行うことで乱流強度を把握するとともに、これらのデータの解析や数値実験を通じて、既存のパラメタリゼーションの有効性を検証することを目的とした。

3. 研究の方法

南極周極流域で、最新の深海乱流計 VMP-X を使用した海面から海底直上までの乱流直接観測を行うとともに、吊下式流速計(LADCP)と電気伝導度・温度・水深計(CTD)を使用して、鉛直シアーストレインなどの各物理量を把握することで、地衡流および中規模渦が内部波場と共存している場合においても既存の乱流パラメタリゼーションの式が有効なのかどうかを検証する。また、もしその有効性に問題があるとすれば、その原因がどのような物理機構に基づくものなのかを、乱流観測時の状況に合わせた数値シミュレーションを行うことにより考察する。

4. 研究成果

2016 年 1-2 月の東京海洋大学練習船「海鷹丸」を使用したオーストラリア南方沖での深海乱流観測から得られた乱流散逸率とファインスケール物理量の詳細な解析を行った。その結果、乱流散逸率は全体的に小さく、特に、Southern Antarctic Circumpolar Current Front (SACCF) 以南の中・深層では深海乱流計の測定限界値程度に小さくなった。これに対応して、乱流拡散係数も Polar Front 以北の深層では 1.0 Munk 程度と大きくなる傾向があるものの、多くの場所では 0.1 Munk 程度と小さかった。また、ファインスケールの鉛直シアーストレイン比(R_{ω})は、多くの場所で GM レベル($R_{\omega}=3$)、あるいはそれ以上であり、特に SACCF 以南で非常に大きな値をとる傾向が確認された。

以上の観測結果は、背景内部波場のスペクトルが GM スペクトルと比べて低周波数側に著しく歪んでいることを示している。実際、この事実と整合的に、現在までに提案されている 4 種類(G89, W93, GHP, IH)の乱流パラメタリゼーションの式のうち、鉛直シアーストレインの情報のみを使用する G89 は乱流散逸率を過大評価、ストレインの情報のみを使用する W93 は過小評価してし

まうという傾向が確認された。これに対して、背景内部波場のスペクトルの周波数方向の歪みを考慮した GHP や IH は、G89 や W93 よりも精度よく乱流散逸率を予測することも確認できた。

2017 年 12-2018 年 1 月には、再度「海鷹丸」による南大洋航海に参加し、最新の投下式乱流計 VMP-X を用いて、南極周極流域での深度約 4000m の深海底にまで達する乱流観測を世界で初めて実施し、全水深にわたる貴重な乱流データを多数収集することに成功した。これと同時に、吊下式流速計 (LADCP) を電気伝導度・温度・水深計 (CTD) に取り付け、海底地形上での各物理量も把握することに成功した。

次に、現在までに南大洋で得られた乱流観測データと比較することで、既存の乱流パラメタリゼーションの南大洋における有効性を検証した。その結果、内部波場の周波数空間の歪みの影響を補正した Gregg-Henney-Polzin パラメタリゼーションや Ijichi-Hibiya パラメタリゼーションは比較的良い再現性を示すものの、周極流フロント域付近では、乱流混合を過大評価してしまう深度が相当数存在することが明らかになった。並行して行った数値実験によれば、表層からの近慣性内部波や海底からの風下内部波は、周極流フロント域で発生する中規模渦に捕捉され、乱流混合には直接関わらない比較的低波数の内部波エネルギーのレベルを上昇させるが、既存のパラメタリゼーションは、これを乱流混合に使用されるものとして算入するため、大きな誤差を生じさせてしまうことがわかった。この結果は、西岸境界流域など、強流に伴って発生する中規模渦が内部波と共存している海域で、安易に既存の乱流パラメタリゼーションを用いて乱流混合の定量化を行うことの危険性を示している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 21 件) 全て査読有

- ① Onuki Y., and T. Hibiya (2019), Parametric subharmonic instability in a narrow-band wave spectrum, *J. Fluid Mech.*, 865, 247-280, doi:10.1017/jfm.2019.44.
- ② Takahashi A., and T. Hibiya (2019), Assessment of finescale parameterizations of deep ocean mixing in the presence of geostrophic current shear: Results of microstructure measurements in the Antarctic Circumpolar Current region, *J. Geophys. Res.*, 124, doi:10.1029/2018JC014030.
- ③ Tatebe, H., Y. Tanaka, Y. Komuro, and H. Hasumi (2018), Impact of deep ocean mixing on the climatic mean state in the Southern Ocean, *Scientific Reports*, 8:14479, doi:10.1038/s41598-018-32768-6.
- ④ Yang, W., T. Hibiya, Y. Tanaka, L. Zhao, and H. Wei (2018), Modification of parametric subharmonic instability in the presence of background geostrophic currents, *Geophys. Res. Lett.*, 45, 12957-12962, doi:10.1029/2018GL080183.
- ⑤ Onuki, Y., and T. Hibiya (2018), Decay rates of internal tides estimated by an improved wave-wave interaction analysis, *J. Phys. Oceanogr.*, 48, 2689-2701, doi:10.1175/JPO-D-17-0278.1.
- ⑥ Ijichi, T., and T. Hibiya (2018), Observed variations in turbulent mixing efficiency in the deep ocean, *J. Phys. Oceanogr.*, 48, 1815-1830, doi:10.1175/JPO-D-17-0275.1.
- ⑦ Hibiya, T., T. Ijichi, and R. Robertson (2017), The impacts of ocean bottom roughness and tidal flow amplitude on abyssal mixing, *J. Geophys. Res.*, 122, 5645-5651, doi:10.1002/2016JC012564.
- ⑧ Ijichi, T., and T. Hibiya (2017), Eikonal calculations for energy transfer in the deep-ocean internal wave field near mixing hotspots, *J. Phys. Oceanogr.*, 47, 199-210, doi:10.1175/JPO-D-16-0093.1.
- ⑨ Kusahara, K., H. Hasumi, A. D. Fraser, S. Aoki, K. Shimada, G. D. Williams, R. Massom and T. Tamura (2017), Modeling ocean-cryosphere interactions off the Adelie and George V Land, East Antarctica, *Journal of Climate*, 30, 163-188, doi:10.1175/JCLI-D-15-0808.1
- ⑩ Obase, T., A. Abe-Ouchi, K. Kusahara, H. Hasumi and R. Ohgaito (2017), Responses of basal melting of Antarctic ice shelves to the climatic forcing of the Last Glacial Maximum and CO2 doubling, *Journal of Climate*, 30, 3473-3497, doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0908.1
- ⑪ Yokoyama, Y., J. B. Anderson, M. Yamane, L. M. Simkins, Y. Miyairi, T. Yamazaki, M. Koizumi, H. Suga, K. Kusahara, L. Prothro, H. Hasumi, J. R. Southon and N. Ohkouchi

- (2016), Widespread collapse of the Ross Ice Shelf during the late Holocene, *Proceedings of the National Academy of Science*, 113, 2354–2359, doi:10.1073/pnas.1516908113.
- ⑫ Hiraike, Y., Y. Tanaka and H. Hasumi (2016), Subduction of Pacific Antarctic Intermediate Water in an eddy resolving model, *J. Geophys. Res.*, 121, 133–147, doi:10.1002/2015JC010802.
- ⑬ Onuki, Y., and T. Hibiya (2015), Excitation mechanism of near-inertial waves in baroclinic tidal flow caused by parametric subharmonic instability, *Ocean Dyn.*, 65, 107–113, doi:10.1007/s10236-014-0789-3.
- ⑭ Furuichi, N., and T. Hibiya (2015), Assessment of the upper-ocean mixed layer parameterizations using a large eddy simulation model, *J. Geophys. Res.*, 120, 2350–2369, doi:10.1002/2014JC010665.
- ⑮ Ijichi, T., and T. Hibiya (2015), Frequency-based correction of finescale parameterization of turbulent dissipation in the deep ocean, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 32, 1526–1535, doi:10.1175/JTECH-D-15-0031.1.

〔学会発表〕（計 79 件）

- ① 建部洋晶, 田中祐希, 川崎高雄, 小室芳樹, 羽角博康: 気候モデルの典型系統的誤差と海洋微細過程との関連及びその含意, 日本地海洋学会 2018 年度秋季大会, 2018 年.
- ② 日比谷紀之: 深海アルゴフロートの全球展開による気候・生態系変動予測の高精度化, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 2018 年.
- ③ 伊地知敬, 日比谷紀之: 深海における乱流混合係数のパラメータ依存性, 2017 年度日本海洋学会秋季大会, 仙台, 2017 年.
- ④ 小堀笑理, 日比谷紀之: 深海底凹凸地形上に形成される乱流ホットスポットに関する理論的・観測的研究, 2017 年度日本海洋学会秋季大会, 2017 年.
- ⑤ 日比谷紀之: 深海乱流に関する理論的・観測的研究成果の紹介, 九州大学応用力学研究所附属大気海洋環境研究センター発足記念シンポジウム, 2017 年 (招待講演).
- ⑥ 大貫陽平, 日比谷紀之: 海洋内部領域での潮汐散逸に関わる非線形波動力学の研究, 2016 年度海洋乱流研究会, 2017 年.
- ⑦ 大貫陽平, 日比谷紀之: 統計流体力学に基づく潮汐混合パラメタリゼーションの試み, 2016 年度日本海洋学会秋季大会, 2016 年.
- ⑧ 日比谷紀之: 深海アルゴフロートの全球展開による気候・生態系変動予測の高精度化, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 2016 年 (招待講演).
- ⑨ 大貫陽平, 日比谷紀之: Parametric Subharmonic Instability の統一理論, 2016 年度日本海洋学会春季大会, 2016 年.
- ⑩ 高橋杏, 日比谷紀之, 田中祐希: 南大洋の深層における乱流散逸過程に関する数値実験, 2016 年度日本海洋学会春季大会, 2016 年.
- ⑪ 日比谷紀之: 深海アルゴフロートの全球展開による気候・生態系変動予測の高精度化, 大型研究提案事前発表会, 日本学術会議総合工学委員会フロンティア人工物分科会, 2016 年.
- ⑫ 日比谷紀之: 深海アルゴフロートの全球展開による気候・生態系変動予測の高精度化, 地球惑星科学分野大型研究計画ヒアリング, 日本学術会議地球惑星科学委員会 地球・惑星圏分科会, 2015 年.
- ⑬ 伊地知敬, 日比谷紀之: アイコナル計算による乱流パラメタリゼーションの有効性の検証, 2015 年度日本海洋学会秋季大会, 2015 年.
- ⑭ 日比谷紀之: 海洋深層の乱流混合過程の理論的・観測的研究, 地球流体力学セミナー, 北海道, 2015 年.
- ⑮ Hibiya, T.: Improvement of the parameterization of ocean mixing processes in the surface, deep, and bottom layers, 2nd International Symposium “Ocean Mixing Processes: Impact on Biogeochemistry, Climate and Ecosystem”, 2018.
- ⑯ Hibiya, T.: Global mapping of abyssal turbulence intensity using Deep Argo floats, The Sixth Argo Science Workshop (ASW-6) “The Argo Program in 2020 and beyond: Challenges and opportunities”, 2018 (Invited).
- ⑰ Hibiya, T., E. Kobori, and R. Robertson: Observational and numerical studies of the vertical structure of tidal mixing over abyssal rough bottom bathymetry, Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 15th Annual Meeting, 2018.
- ⑱ Onuki, Y., and T. Hibiya: Decay rates of internal tides estimated by an improved wave-wave interaction analysis, Japan Geoscience Union Meeting 2018, 2018.
- ⑲ Niwa, Y., and T. Hibiya: Generation of baroclinic tide energy in a global three-dimensional numerical model with different spatial grid resolutions, Japan Geoscience Union Meeting 2018, 2018.
- ⑳ Ijichi, T., and T. Hibiya: Observed variations in mixing efficiency in the deep ocean, Japan Geoscience Union Meeting 2018, 2018.

- ②1 Takahashi, A., and T. Hibiya: Assessment of finescale parameterizations of deep ocean mixing in the presence of geostrophic current shear : Results of microstructure measurements in the Antarctic Circumpolar Current region, Japan Geoscience Union Meeting 2018, 2018.
- ②2 Hibiya, T., E. Kobori, and R. Robertson: Observational and numerical studies of tidal mixing enhanced over abyssal rough bathymetry, Japan Geoscience Union Meeting 2018, 2018.
- ②3 Ijichi, T., and T. Hibiya: Observed variations in turbulent mixing efficiency in the deep ocean, 2018 Ocean Sciences Meeting, 2018.
- ②4 Onuki, Y. and T. Hibiya: Theoretical analysis of resonant interaction between internal tides and an internal wave continuum, 2018 Ocean Sciences Meeting, 2018.
- ②5 Takahashi, A., and T. Hibiya: Assessment of finescale parameterizations of deep ocean mixing in the presence of geostrophic current shear: Results of microstructure measurements in the Antarctic Circumpolar Current region, 2018 Ocean Sciences Meeting, 2018.
- ②6 Hibiya, T., T. Ijichi, and E. Kobori: The impacts of ocean bottom roughness and tidal flow amplitude on abyssal mixing, IAPSO-IAMAS-IAGA Joint Assembly, 2017.
- ②7 Nakano, H., Y. Kitade, K. Shimada, and T. Hibiya: Estimates of eddy diffusivities using fast response thermistors, Japan Geoscience Union-American Geophysical Union Joint Meeting 2017, 2017.
- ②8 Ijichi, T., and T. Hibiya: Evaluation of Mixing Coefficients in the Deep Ocean, Japan Geoscience Union-American Geophysical Union Joint Meeting 2017, 2017.
- ②9 Takahashi, A., and T. Hibiya: Assessment of the existing fine-scale parameterizations of deep ocean mixing in the Antarctic Circumpolar Current region, Japan Geoscience Union-American Geophysical Union Joint Meeting 2017, 2017.
- ③0 Hibiya, T., T. Ijichi, and R. Robertson: Revisiting fine-scale parameterizations for enhanced tidal mixing over a rough ocean bottom, Japan Geoscience Union-American Geophysical Union Joint Meeting 2017, 2017.
- ③1 Hibiya, T.: What we have learned about deep ocean mixing in the past 20 years, Munk Centennial May Symposium, 2017 (Invited).
- ③2 Hibiya, T.: Revisiting fine-scale parameterizations for enhanced tidal mixing over a rough ocean bottom, International Symposium "Ocean Mixing Processes: Impact on Biogeochemistry, Climate and Ecosystem", 2017.
- ③3 Takahashi, A., and T. Hibiya: Assessment of fine-scale parameterizations of deep ocean mixing in the presence of geostrophic current shear -From the results of microstructure measurements in the Antarctic Circumpolar Current region-, International Symposium "Ocean Mixing Processes: Impact on Biogeochemistry, Climate and Ecosystem", 2017.
- ③4 Ijichi, T., and T. Hibiya: Estimating mixing efficiency in the deep ocean through microstructure measurements, International Symposium "Ocean Mixing Processes: Impact on Biogeochemistry, Climate and Ecosystem", 2017.
- ③5 Niwa, Y., and T. Hibiya: Generation of baroclinic tide energy in a global three-dimensional numerical model with different spatial grid resolution, International Symposium "Ocean Mixing Processes: Impact on Biogeochemistry, Climate and Ecosystem", 2017.
- ③6 Hibiya, T., T. Ijichi, and R. Robertson: The impacts of ocean bottom roughness and tidal flow amplitude on abyssal mixing, The Third Xiamen Symposium on Marine Environmental Sciences (XMAS-III), 2017.
- ③7 Onuki Y., and T. Hibiya: Geography of the attenuation rates of baroclinic tidal energy estimated using wave-wave interaction theory, Japan Geoscience Union Meeting 2016, 2016.
- ③8 Ijichi, T., and T. Hibiya: Eikonal Simulations for Energy Transfer in the Deep-Ocean Internal Wave Field near Mixing Hotspots, Japan Geoscience Union Meeting 2016, 2016.
- ③9 Hibiya, T., T. Ijichi, R. Robertson: Numerical Study of the Impacts of Ocean Bottom Roughness and Tidal Flow Amplitude on Abyssal Mixing, Japan Geoscience Union Meeting 2016, 2016.
- ④0 Takahashi, A., T. Hibiya, and Y. Tanaka: Dissipation processes of internal waves generated by geostrophic flows impinging on bottom topography, Japan Geoscience Union Meeting 2016, 2016.
- ④1 Onuki, Y., and T. Hibiya: Estimates of the attenuation rates of baroclinic tidal energy caused by resonant interactions among internal waves based on the weak turbulence theory, 2016 Ocean Sciences Meeting, 2016.
- ④2 Ijichi, T., and T. Hibiya: Eikonal simulations for the energy transfer in the deep

- ocean internal wave field near mixing hotspots, 2016 Ocean Sciences Meeting, 2016.
- ④③ Hibiya, T., R. Robertson, and T. Takagi: Dynamical analysis of the enhanced turbulent mixing over a rough ocean bottom, 2016 Ocean Sciences Meeting, 2016.
- ④④ Onuki, Y., and T. Hibiya: Estimates of the attenuation rates of baroclinic tidal waves caused by resonant interactions with the background internal wave continuum, International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) 2015, 2015.
- ④⑤ Hibiya, T., and T. Takagi: Assessment of parameterization of enhanced turbulent mixing over rough topography in the abyssal ocean, International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) 2015, 2015.
- ④⑥ Ijichi, T., and T. Hibiya: Frequency-based correction of finescale parameterization of turbulent dissipation in the ocean interior, International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) 2015, 2015.

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

<http://www-aos.eps.s.u-tokyo.ac.jp/~hibiya-lab/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：北出 裕二郎

ローマ字氏名：(KITADE, Yujiro)

所属研究機関名：東京海洋大学

部局名：学術研究院

職名：教授

研究者番号（8 桁）：50281001

研究分担者氏名：羽角 博康

ローマ字氏名：(HASUMI, Hiroyasu)

所属研究機関名：東京大学

部局名：大気海洋研究所

職名：教授

研究者番号（8 桁）：40311641

研究分担者氏名：田中 祐希

ローマ字氏名：(TANAKA, Yuki)

所属研究機関名：東京大学

部局名：大学院理学系研究科

職名：助教

研究者番号（8 桁）：80632380

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。