

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 3 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24340109

研究課題名(和文) 超深海乱流の高精度パラメタリゼーションとその組み込みによる新たな深層循環像の提示

研究課題名(英文) Accurate parameterization of turbulent mixing processes in the abyssal ocean for embedding in next-generation global overturning circulation models

研究代表者

日比谷 紀之(Hibiya, Toshiyuki)

東京大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：80192714

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、深層海洋大循環モデルを構築する上で不可欠な情報でありながら、観測の困難さもあり、未解明なまま残されてきた海底地形の凹凸から上方に広がる乱流ホットスポットに注目し、その鉛直構造を理論的および観測的に調べた。特に、海底地形の凹凸から上方に伝播していく内部波と深海の平衡内部波場との非線形相互干渉に関するアイコナル・シミュレーションを通じて、超深海乱流強度が、海底地形の凹凸の卓越波数、海底地形の高さ、潮流の強さ、密度成層などの物理量とどのように関連しているのかを力学的に明らかにし、海底地形の凹凸上で実際に観測された乱流混合強度の鉛直分布を定性的に再現することができた。

研究成果の概要(英文)：An accurate representation of ocean mixing processes over rough bathymetry is essential in global circulation models. We perform a series of eikonal calculations for a wide range of parameters, namely, the amplitude (U_0) of tidal flow with semidiurnal frequency () and the horizontal wavenumber (k) of the bottom topography to see how upward propagating internal waves generated by tide-topography interactions donate their energy to dissipation through nonlinear interactions with the background internal waves. It has been shown that the resulting mixing hotspot becomes concentrated nearer the ocean bottom as k increases for $kU_0/\omega < 1$ independent of U_0 , whereas it extends vertically upward as U_0 increases for $kU_0/\omega > 1$ independent of k . An interpretation for these calculated results has been made in terms of the vertical group velocity and the life time for each of linear internal tides and quasi-steady lee waves emanating from the ocean bottom for $kU_0/\omega < 1$ and $kU_0/\omega > 1$, respectively.

研究分野：海洋物理学

キーワード：乱流混合 パラメタリゼーション 深層海洋大循環 内部波 非線形相互干渉 潮汐流 海底地形 超深海

1. 研究開始当初の背景

筆者らは、深海乱流計 VMP-5500 を用いて、密度躍層付近(深度~2000 m)を中心とした乱流拡散強度の観測を行ってきた。その結果、強い乱流拡散は、緯度 $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$ にあるハワイ海嶺や伊豆・小笠原海嶺など顕著な海山や海嶺上に乱流ホットスポットの形で存在していることが示され、空間的に一定の乱流拡散係数を用いている現在の気候予測モデルへの警鐘ともいべき事実が明らかにされた。

しかしながら、これら海洋内部領域の乱流ホットスポットを合計しても、大洋平均にすると、深層海洋大循環の維持に必要とされる $1.0 \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ の鉛直乱流拡散には到底及ばない。このことから、この乱流拡散強度の不足を補う候補として、深海底の凹凸地形から鉛直上方に形成される乱流ホットスポットの存在の重要性が注目されるようになってきた。

実際、深層海洋大循環の数値シミュレーションによれば、深海底近傍の強い乱流拡散は、深層海洋大循環の流量やパターンに大きな影響を与えることが示唆されており、そのグローバルな乱流拡散強度の定量的な把握は深層海洋大循環像の確立に向けて必要不可欠な課題として残されていた。

2. 研究の目的

本研究は、超高圧下における観測の困難さなどから未解明な空白域として長く残されてきた深海底の乱流ホットスポットの存在に注目した。具体的には、その鉛直構造を理論的かつ観測的に詳細に調べ、それを、深海底の凹凸地形の卓越波数、潮流の振幅などの各物理量と定量的に関連づけることで、高精度なパラメタリゼーションの定式化に繋げていくことを目的とした。

3. 研究の方法

深海底の凹凸地形上から発した約 2000 の内部波パケットが背景の内部波の場と非線形相互干渉させながら鉛直伝播していく様子を追跡した。その際、ドップラーシフトにより、各内部波パケットの鉛直波長が 10 m まで減少した時点でその内部波パケットは砕波するものとした。伝播途上、内部波パケットは、波動作用量 A_i を保存するので、砕波の時点での周波数 σ_i 、追跡時間 T_i から、そのエネルギー散逸量は $\epsilon_i = A_i \sigma_i / T_i$ と見積もられる。こうして、多数の内部波パケットの散逸までの伝播過程を追跡することで、海底凹凸上でのエネルギー散逸量とその鉛直減衰スケールを見積もることができる。

4. 研究成果

平成 25 年 10 月、および、平成 26 年 12 月に、東京海洋大学の練習船「神鷹丸」に乗船し、マルチビームによる詳細な海底地形データの存在する伊豆-小笠原海嶺近傍の海域において、海底地形の凹凸の程度が異なる数地点を選抜した上で、電磁流速計と密度計を取

り付けた超深海乱流計 VMP-5500 を海底近傍まで自由落下させた。得られた海底近傍における乱流散逸率の鉛直分布を、既存の乱流パラメタリゼーションによる深海底近傍の乱流散逸率の予報値と比較してみたところ、大きなずれが生じてしまうことが確認された。

そこで、海底から鉛直上方に広がる乱流ホットスポットの鉛直構造が、海底地形の凹凸の水平波数、潮流の強さなどの物理パラメータにどのように依存しているのかを、広いパラメータ範囲にわたるアイコナル実験を行うことによって詳細に調べた。

海底地形の凹凸上で発生する内部波は、2つの無次元パラメータ $Te = kU_0/\omega$ (k : 海底地形の波数、 U_0 : 潮流流の振幅)、 $N^* = N/\omega$ (N : 潮汐周波数、 ω : 浮力周波数) に依存して、それぞれ、内部潮汐波、準定常風下波、海底捕捉波に分類される(図 1 参照)。

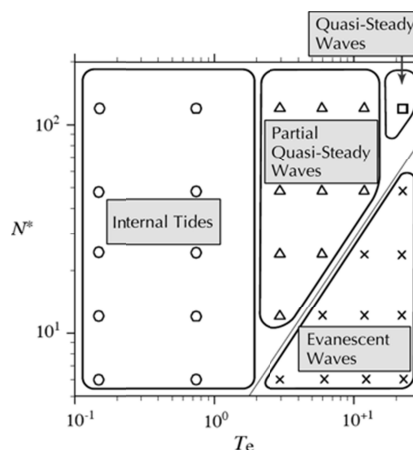


図 1: 深海底の凹凸を越える潮流により発生する内部波の無次元パラメータ Te および N^* による分類 (Mohri et al. 2010)

アイコナル実験を行った結果、深海底の凹凸地形上から発生した内部波パケットが背景の深海内部波場との相互作用を通じて散逸するのに要する時間は常に k に反比例するが、 $Te < 1$ の場合に発生する内部潮汐波の鉛直群速度は k に反比例、 $Te > 1$ の場合に発生する準定常風下波の場合は kU_0^2 に比例することがわかった。このため、深海底の凹凸地形上から発生した内部波パケットが散逸するまでの鉛直減衰スケールは、 $Te < 1$ の場合には k^2 に反比例するのに対し、 $Te > 1$ の場合には k に依存せず、 U_0^2 に比例することが明らかになった。いいかえれば、深海底の凹凸地形上に形成される乱流ホットスポットの鉛直構造は、 $Te < 1$ のうちは、潮流の振幅よりも、海底地形の水平波数(海底地形の粗さ)に支配され、海底地形が粗くなるとともに、海底に著しく押し付けられたような構造になる。一方、 $Te > 1$ になってくると、乱流ホットスポットの鉛直構造は、海底地形の水平波数(海底地形の粗さ)よりも、潮流の振幅に支配され、潮流の振幅の増加とともに、その鉛直スケールを増加させていく様子が明らかになった(図 2)。

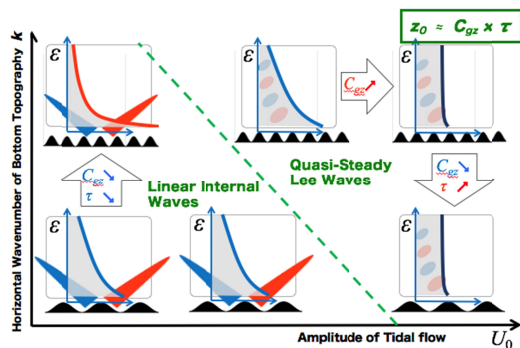


図 2: アイコナル実験の結果得られた深海底における乱流ホットスポット構造のパラメータ依存性

最後に、こうして理論的に得られた深海底の凹凸地形上の乱流ホットスポットの構造を平成 25 年 10 月、平成 26 年 12 月に行った乱流観測の結果と比較し、定性的によく一致を確認することができた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 12 件)すべて査読有

Ijichi, T., and T. Hibiya: Frequency-based correction of finescale parameterization of turbulent dissipation in the deep ocean, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 32, 1526-1535, doi:10.1175/JTECH-D-15-0031.1, 2015.

T. Hibiya, (他 4 名): Formation of the well mixed homogeneous layer in the bottom water of the Japan Sea, *Journal of Oceanography*, 71, 441-447, doi:10.1007/s10872-015-0303-7, 2015.

Onuki, Y., and T. Hibiya: Excitation mechanism of near-inertial waves in baroclinic tidal flow caused by parametric subharmonic instability, *Ocean Dynamics*, 65, 107-113, doi:10.1007/s10236-014-0789-3, 2015

T. Hibiya (他 4 名): Comparison of calculated energy flux of internal tides with microstructure measurements, *Tellus A*, 66, http://dx.doi.org/10.3402/tellusa.v66.23240, 2014.

Niwa, Y., and T. Hibiya: Generation of baroclinic tide energy in a global

three-dimensional numerical model with different spatial grid resolutions, *Ocean Modelling*, 80, 59-73, doi:10.1016/j.ocemod.2014.05.003, 2014

Nagai, T., and T. Hibiya: Effects of tidally induced eddies on sporadic Kuroshio-water intrusion (*kyucho*), *Journal of Oceanography*, 69, 369-377, doi:10.1007/s10872-013-0179-3, 2013.

Watanabe, M., and T. Hibiya: Assessment of mixed layer models embedded in an ocean general circulation model, *Journal of Oceanography*, 69, 329-338, doi:10.1007/s10872-013-0176-6, 2013.

日比谷紀之, (他 17 名): 海洋学の 10 年展望(1)-日本海洋学会将来構想委員会物理サブグループの議論から-, *海の研究*, 22, 191-218, 2013.

Hibiya, T., (他 2 名): Assessment of fine-scale parameterizations of turbulent dissipation rates near mixing hotspots in the deep ocean, *Geophys. Res. Lett.*, 39, doi:10.1029/2012GL054068, 2012.

Nagai, T., and T. Hibiya, Numerical simulation of tidally induced eddies in the Bungo Channel: A possible role for sporadic Kuroshio-water intrusion (*kyucho*), *J. Oceanogr.*, 68, 797-806, 2012.

T. Hibiya, (他 2 名), Assessment of turbulence closure models for resonant inertial response in the oceanic mixed layer using a large eddy simulation model, *J. Oceanogr.*, 68, 285-294, 2012.

Iwamae, N., and T. Hibiya, Numerical study of tide-induced mixing over rough bathymetry in the abyssal ocean, *J. Oceanogr.*, 68, 195-203, 2012.

[学会発表](計 34 件)

大貫 陽平, 日比谷 紀之: Parametric Subharmonic Instability の統一理論,

東京大学本郷キャンパス，東京都文京区，2016年3月16日．

日比谷 紀之，(他2名)：南大洋の深層における乱流散逸過程に関する数値実験，東京大学本郷キャンパス，東京都文京区，2016年3月16日．

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, The 2016 Ocean Sciences Meeting, Ernest N. Morial Convention Center, New Orleans, U.S.A., February 23, 2016.

Ijichi, T., and T. Hibiya : Eikonal simulations for the energy transfer in the deep ocean internal wave field near mixing hotspots, The 2016 Ocean Sciences Meeting, Ernest N. Morial Convention Center, New Orleans, U.S.A., February 22, 2016.

Hibiya, T., R. Robertson, and T. Takagi : Dynamical analysis of the enhanced turbulent mixing over a rough ocean bottom, The 2016 Ocean Sciences Meeting, Ernest N. Morial Convention Center, New Orleans, U.S.A., February 22, 2016.

伊地知 敬，日比谷 紀之：アイコーナル計算による乱流パタメタリゼーションの有効性の検証，日本海洋学会 2015年度秋季大会，愛媛大学城北キャンパス，愛媛県松山市，2015年9月28日．

Ijichi, T., and T. Hibiya : Frequency-based correction of fine scale parameterization of turbulent dissipation in the ocean interior, The 26th International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) General Assembly 2015, Prague Congress Centre, Czech Republic, June 30, 2015.

Hibiya, T., and T. Takagi : Assessment of parameterization of enhanced turbulent mixing over rough

topography in the abyssal ocean, The 26th International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) General Assembly 2015, Prague Congress Centre, Czech Republic, June 30, 2015.

Onuki, Y., and T. Hibiya : Estimates of the attenuation rates of baroclinic tidal waves caused by resonant interactions with the background internal wave continuum, The 26th International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) General Assembly 2015, Prague Congress Centre, Czech Republic, June 30, 2015.

日比谷 紀之，(他2名)：太平洋赤道域の熱帯不安定波から励起される内部波 - 高解像度 OGCM の結果から -，日本海洋学会 2015 年度春季大会，東京海洋大学品川キャンパス，東京都港区，2015年3月24日．

日比谷 紀之，(他2名)：船舶測位高度による巨大津波の計測の可能性と津波波源の逆解析，日本海洋学会 2015年度春季大会，東京海洋大学品川キャンパス，東京都港区，2015年3月24日．

横田 華奈子，日比谷 紀之：乱流ホットスポット域における海洋内部波スベクトル構造の歪みの評価，日本海洋学会 2015年度春季大会，東京海洋大学品川キャンパス，東京都港区，2015年3月24日．

大貫 陽平，日比谷 紀之：遠方伝播する傾圧潮汐波の波動間相互作用による散逸過程，日本海洋学会 2015年度春季大会，東京海洋大学品川キャンパス，東京都港区，2015年3月22日．

日比谷 紀之：VMP-5500を用いた深海乱流の観測的研究，日本海洋学会 2015年度春季大会シンポジウム「海洋乱流測定技術の変遷 過去・現在・将来」，東京海洋大学品川キャンパス，東京都港区，2015年3月21日．(招待講演)

日比谷 紀之, (他2名): 深層海洋大循環モデルにおける鉛直拡散係数の空間分布と海水年齢との関係, 日本海洋学会 2014年度秋季大会, 長崎大学文教キャンパス, 長崎県長崎市, 2014年9月16日.

石井 一, 日比谷 紀之: ジブラルタル海峡内で発生する内部波の伝播異方性に関する数値実験, 日本海洋学会 2014年度秋季大会, 長崎大学文教キャンパス, 長崎県長崎市, 2014年9月14日.

Onuki, Y., and T. Hibiya: Excitation mechanism of near-inertial currents in baroclinic tidal flow caused by parametric subharmonic instability, The 11th Annual Meeting of the Asia Oceania Geosciences Society, Royton Hotel, Sapporo, Hokkaido, July 28, 2014.

Hibiya, T., and T. Takagi: Assessment of parameterization of enhanced turbulent mixing over rough bottom bathymetry, The 11th Annual Meeting of the Asia Oceania Geosciences Society, Royton Hotel, Sapporo, Hokkaido, July 28, 2014.

日比谷紀之, (他7名): 高モード内部潮汐波の地震学的イメージング, 日本地震学会 2013年度秋季大会, 神奈川県民ホール、産業貿易センター, 神奈川県横浜市, 2013年10月8日

伊地知 敬, 日比谷 紀之: 海洋内部領域における新たな乱流パラメタリゼーションの提案, 2013年度日本海洋学会 秋季大会, 北海道大学, 北海道札幌市, 2013年9月20日.

21 日比谷 紀之, (他4名): 潮汐残差流渦が豊後水道における急潮現象に与える影響, 2013年度日本海洋学会 秋季大会, 北海道大学, 北海道札幌市, 2013年9月20日.

22 Niwa, Y., and T. Hibiya: Generation

of baroclinic tide energy in global three-dimensional numerical models with different spatial grid resolution, IAHS - IAPSO - IASPEI Joint Assembly, Gothenburg, Sweden, July 25, 2013.

23 Hibiya, T., (他2名): Assessment of fine-scale parameterizations of turbulent dissipation rates near mixing hotspots in the deep ocean, IAHS - IAPSO - IASPEI Joint Assembly, Gothenburg, Sweden, July 24, 2013.

24 Ijichi, T., and T. Hibiya: Assessment of Fine-Scale Parameterizations of Turbulent Dissipation Rates in the Deep Ocean Using a Multi-Scale Profiler, Asia Oceania Geosciences Society, Brisbane, Australia, June 26, 2013.

25 大貫 陽平, 日比谷 紀之: 内部潮汐流から近慣性流へエネルギーを輸送するPSIの発生機構に関する理論的研究, 2013年度日本海洋学会春季大会, 東京海洋大学 品川キャンパス, 東京都港区, 2013年3月24日.

26 丹羽 淑博, 日比谷 紀之: 全球数値シミュレーションから求められた内部潮汐波エネルギー転嫁率のグローバル分布の水平格子間隔依存性について, 2013年度日本海洋学会春季大会, 東京海洋大学 品川キャンパス, 東京都港区, 2013年3月24日.

27 伊地知 敬, 日比谷 紀之: 内部波スペクトルの周波数方向の歪みを考慮した乱流パラメタリゼーションの有効性の検証, 2013年度日本海洋学会春季大会, 東京海洋大学 品川キャンパス, 東京都港区, 2013年3月24日.

28 高木 智章, 日比谷 紀之: 海洋内部波場内での潮汐流と海底地形との相互作用による 内部波励起とそれに伴うエネルギー

一散逸の数値実験, 2013年度日本海洋学会春季大会, 東京海洋大学 品川キャンパス, 東京都港区, 2013年3月24日.

- 29 伊地知 敬, 日比谷 紀之: 我が国初のマルチスケールプロファイラーを利用した乱流パラメタリゼーションの有効性の検証, 2012年度日本海洋学会秋季大会, 東海大学, 静岡県静岡市, 2012年9月16日.

- 30 Toshiyuki Hibiya, (他4名): Application of the improved vertical mixing scheme to the modeling of the Japan Sea under traveling typhoons, 2012年度日本海洋学会秋季大会, 東海大学, 静岡県静岡市, 2012年9月15日.

- 31 永井 平, 日比谷 紀之: 豊後水道における急潮現象に関する数値的研究, 2012年度日本海洋学会秋季大会, 東海大学, 静岡県静岡市, 2012年9月14日.

- 32 Niwa Y. and T. Hibiya: Estimation of Baroclinic Tide Energy Available for Deep Ocean Mixing Based on Three-dimensional Global Numerical Simulations, Asia Oceania Geoscience Society (AOGS) - American Geophysical Union (AGU) (Western Pacific Geophysics Meeting (WPGM))Joint Assembly 2012, SUNTEC, Singapore, August 16, 2012.

- 33 Hibiya T. and N. Iwamae: Numerical Study of Tide-Induced Mixing Over Rough Bathymetry, Asia Oceania Geoscience Society (AOGS) - American Geophysical Union (AGU) (Western Pacific Geophysics Meeting (WPGM))Joint Assembly 2012, SUNTEC, Singapore, August 16, 2012.

- 34 Watanabe, M. and T. Hibiya: Assessment of Mixed Layer Models Embedded in an Ocean General Circulation Model, Asia Oceania

Geoscience Society (AOGS) - American Geophysical Union (AGU) (Western Pacific Geophysics Meeting (WPGM))Joint Assembly 2012, SUNTEC, Singapore, August 16, 2012.

〔図書〕(計 1 件)

日比谷 紀之: 「沿岸における内部波と密度流」, 沿岸海洋研究会 50周年記念 詳論沿岸海洋学, 日本海洋学会 沿岸海洋研究会 編, 第4章(pp.61-80), 恒星社厚生閣, 261pp., 2014.

〔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) 研究代表者

日比谷 紀之(HIBIYA, Toshiyuki)
東京大学・大学院理学系研究科・教授
研究者番号: 8 0 1 9 2 7 1 4