

令和 2 年 4 月 15 日

海外特別研究員最終報告書

独立行政法人日本学術振興会 理事長 殿

採用年度 平成 30 年度

受付番号 201860048

氏 名 伊地知 敬

(氏名は必ず自署すること)

海外特別研究員としての派遣期間を終了しましたので、下記のとおり報告いたします。

なお、下記及び別紙記載の内容については相違ありません。

記

1. 用務地（派遣先国名）用務地：ウッズホール（国名：米国）
2. 研究課題名（和文）※研究課題名は申請時のものと違わないように記載すること。
深海における乱流混合効率の定量化とそれを支配する物理機構の解明
3. 派遣期間：平成 30 年 4 月 1 日 ～ 令和 2 年 3 月 31 日
4. 受入機関名及び部局名
ウッズホール海洋研究所 海洋物理学部門
5. 所期の目的の遂行状況及び成果…書式任意 **書式任意（A4 判相当 3 ページ以上、英語で記入も可）**
(研究・調査実施状況及びその成果の発表・関係学会への参加状況等)
(注) 「6. 研究発表」以降については様式 10－別紙 1～4 に記入の上、併せて提出すること。

● 本研究の目的

成層乱流の大きな特徴として、乱流混合拡散が挙げられる。これは、安定成層した海洋内部領域内に、海洋深層大循環の湧昇域を形成するために、特に重要な物理過程であると考えられている。従来、海洋物理学では、乱流混合拡散強度 M は、比較的容易に推定できる乱流運動エネルギー散逸率 ε から見積もられている。その際、消費された全乱流エネルギーの内、混合拡散に使われた割合、すなわち、乱流混合効率 $M/(M + \varepsilon)$ は、主に、シア不安定による乱流発展の限られた室内実験の結果に基づき、定数 17%として扱われている。しかしながら、混合効率は乱流場の特性に応じて変化するはずのもので、海域ごとに様々な乱流駆動メカニズムをもつことで知られている海洋深層において、一律に 17%の混合効率を適用することができるのか、十分に分かっていない。

派遣先のウッズホール海洋研究所をはじめ北米の海洋研究機関では、独自の深海乱流計が世界に先駆けて開発され、今日に至るまで、世界大洋の様々な海域で大規模かつ集中的な深海乱流観測が展開され、様々な乱流ホットスポット域が同定されてきた。その際、混合効率推定のために必要な水温微細構造も、流速微細構造と同時に観測されていたのだが、より注意深い解析が必要なことから、ほとんどの場合、手付かずの状態に残されていた。

本研究の中心的な目的は、派遣先の米国ウッズホール海洋研究所が中心となってこれまでに集積した大量の深海乱流直接観測データを再解析することで、未だ手付かずの様々な深海乱流ホットスポット域における混合効率を見積もり、従来通りの定数として混合効率を扱うことができるのかを検証することであった。さらに、観測から見積もられた混合効率と様々な設定の直接数値計算で得られたものとを比較することで、実海域における混合効率の値を決定付ける物理メカニズムを解明することが最終目標であった。

● 本研究の実施状況

混合効率・係数の定義

混合効率 $M/(M + \varepsilon)$ は混合係数 $\Gamma = M/\varepsilon$ と等価であり、簡単のため、混合係数 Γ を混合効率の代

わりに用いて、議論を進める。なお、17%の混合効率は $\Gamma = 0.2$ に相当する。

まず、派遣先での St. Laurent 博士、Polzin 博士、Toole 博士との議論を通じて、混合効率には手法ごとにいくつかの紛らわしい定義があり、それぞれが物理的に異なることを明確にしてから、本研究のデータ解析を開始した。乱流直接数値計算では、個々の乱流イベントの時間発展に焦点が当てられ、“瞬間的”混合係数 $\Gamma_i(t) = M_i(t)/\varepsilon_i(t)$ がよく用いられる。ここで、下付き文字 i は時刻 t における限られた計算領域内での空間平均を表している。一方、深海乱流計による流速・水温微細構造の個々の鉛直プロファイルからは、“局所的かつ瞬間的”な乱流パッチごとの混合係数 $\Gamma_{\text{patch}}(\mathbf{x}, t) = M_{\text{patch}}(\mathbf{x}, t)/\varepsilon_{\text{patch}}(\mathbf{x}, t)$ が見積もられてきた。ここで、下付き文字の patch は、場所 $\mathbf{x}$ ・時刻 t における局所的で瞬間的な値を表している。さらに、大規模かつ集中的な乱流観測からは、多様な乱流イベントで満ちた時間・空間領域全体（バルク）での正味の乱流混合係数 $\Gamma_{\text{bulk}} = \langle M_{\text{patch}}(\mathbf{x}, t) \rangle / \langle \varepsilon_{\text{patch}}(\mathbf{x}, t) \rangle$ が見積もられる。ここで、ブラケットは間欠性の強い乱流イベントを含む時空間的に十分なアンサンブル平均を表している。

注目すべきは、乱流の統計的定常状態はバルクで見積もられた場合以外では、期待できないことである。最先端のスーパーコンピュータをもってしても、海洋大循環モデルでは、個々の乱流イベントを解像することができず、各数値グリッド内で平均した統計的に定常な乱流運動エネルギー散逸率や乱流混合拡散強度をモデル内で仮定しなくてはならない。したがって、海洋大循環モデルに対しては、 Γ_{bulk} の適用がより適切であると考えられる。しかしながら、このような手法・定義による混合効率・係数の物理的な違いは、近年においても混同されることが多く、乱流直接数値計算で得られた瞬間的な混合係数 Γ_i のパラメータ依存性が海洋大循環モデルに組み込まれる場合があるのが現状である。

我々は、時空間スケールに最も乖離のある Γ_{patch} と Γ_{bulk} を、深海乱流観測データから見積もり、それらを比較・対比することにした。データセットとして、同じ海域ながら異なる乱流駆動メカニズムに着目した Brazil Basin Tracer Release Experiment (BBTRE) と Dynamics of Mid-Ocean Ridge Experiment (DoMORE) で得られたものを使用した。1996・1997 年に実施された BBTRE では、ブラジル海盆東部の粗い海底地形上に、小スケール内部潮汐波の直接碎波によって形成された、世界でも有数の深海乱流ホットスポットが同定された。一方、2015 年に実施された DoMORE では、ブラジル海盆の東部断裂帯の谷の中にある大きな海堆に焦点が当てられ、海堆近傍での底層水のオーバーフローに伴う、著しい乱流の強化が観測された。これらの同じ海域内で背景成層状態が同様のデータセットを比較することで、乱流駆動メカニズムの違いによる混合係数の変化を調べることができた。

深海乱流観測データの再解析

混合係数推定のために必要な、乱流運動エネルギー散逸率 ε と水温分散の散逸率 χ を同時測定された流速・水温の微細構造プロファイルからそれぞれ見積もった。その際、BBTRE と DoMORE との間で解析方法の違いによるバイアスが生じないように、一貫した方法で注意深く ε と χ を見積もった。実は、この再解析を通じ、過去に解析済みの、特に、DoMORE での ε の見積もりに、乱流計の動揺の過剰補正によるバイアスが含まれていた可能性があることが分かった。

局所・瞬間的混合係数 Γ_{patch}

BBTRE/DoMORE データセットの再解析によって見積もられた Γ_{patch} は、1 オーダー程度の範囲で変化することが確認された。そして、その変化は、BBTRE/DoMORE とともに、Thorpe スケールと Ozmidov スケールとの比 L_T/L_O の変化とよく対応していた。ここで、Thorpe スケール L_T は密度逆転の鉛直スケールを、Ozmidov スケール L_O は鉛直密度成層の影響を受けず乱流の等方性が成り立つ最大スケールをそれぞれ意味している。実は、ここで確認された Γ_{patch} と L_T/L_O との間の正の関係は、本派遣開始前に解析した日本近海の観測データから確認されただけでなく (Ijichi and Hibiya 2018)、これまでの乱流直接数値実験で見られた Γ_i と L_T/L_O との関係、および、乱流混合長理論から導出される $\Gamma_{\text{patch}} \propto (L_T/L_O)^{4/3}$ とも整合的であった。これは、個々の乱流イベントに対して、この Γ_{patch} と L_T/L_O との関係が普遍的に成り立つことを示唆している。

一方、 Γ_{patch} と乱流強度の指標として用いられる浮力レイノルズ数 Re_b との間には、乱流直接数値計算から指摘されているような関係が明確に見られなかった。特に、サンプル数は少ないものの乱流強度が著しく強い $Re_b > 10^4$ では、BBTRE と DoMORE とで異なる Γ_{patch} 分布の特徴が見られた。BBTRE では、 Re_b が $O(10^4)$ から $O(10^6)$ まで増加するにつれて、 Γ_{patch} は $O(1)$ から $O(0.1)$ まで減少する傾向が見られた。そして、この $\Gamma_{\text{patch}} \sim O(0.1)$ となる強乱流パッチでは、Richardson 数が臨界値 $1/4$ を十分に下回っていて、シア不安定の発達に必要な条件が満たされていた。これは、BBTRE で注目された小スケール内部波の直接碎波がシア不安定の影響を強く受けていることを示唆している。その一方、DoMORE では、 Re_b が $O(10^4)$ から増加しても、 Γ_{patch} は $O(1)$ から変化する傾向が見られなかった。この $\Gamma_{\text{patch}} \sim O(1)$ の強乱流パッチでは、 $L_T/L_O > 1$ と、密度逆転の

鉛直スケールが相対的に大きいことから、より対流的な乱流の特徴があると言える。このことから、DoMORE では、オーバーフローが海堆近傍の密度擾乱を移流することで、密度逆転が形成され、そこから対流不安定が発生し、強くて効率的な乱流が駆動されたのではないかと推察される。

バルク混合係数 Γ_{bulk}

上記の $Re_b > 10^4$ における Γ_{patch} 分布の BBTRE/DoMORE 間での違いと同様な、データセット間での違いが、 Γ_{bulk} においても確認された。ここで、 Γ_{bulk} は各データセット全体で平均した $\langle \epsilon \rangle$ と $\langle \chi \rangle$ とから見積もられた。BBTRE では、従来用いられている混合係数 $0.2 \cdot$ 混合効率 17% と非常に近い、混合効率 20% に相当する $\Gamma_{\text{bulk}} \sim 0.24$ が深さにほとんど関係なく得られた。一方、DoMORE では、最大で、混合効率 45% に相当する $\Gamma_{\text{bulk}} \sim 0.82$ が、海堆の位置する深さ 3000-4000m の間で得られた。

このように Γ_{bulk} の特徴が $Re_b > 10^4$ における Γ_{patch} の特徴と整合的である一方で、 Γ_{patch} の全データセット平均 $\langle \Gamma_{\text{patch}} \rangle$ は、背景の成層強度が弱い、すなわち、深度が大きいほど、 Γ_{bulk} を過大評価する傾向が見られた。これは、背景の成層強度が弱いほど、 $Re_b < 10^4$ で $\Gamma_{\text{patch}} \sim O(1)$ の効率的だが穏やかな乱流イベントがより多く観測されたのだが、数少ない著しく強い乱流イベントがバルクの見積もりを支配してしまったということを意味していて、乱流の間欠性の特徴が現れている。この効率的だが穏やかな乱流は、完全に発達しきっていない若い乱流だと考えられるのだが、成層強度が弱くなると、各乱流イベントの発展時間が長くなり、乱流が十分に発達する前に次の乱流イベントが発生したために、結果的に、若い乱流がより多く観測されたのではないかと推察される。

● 本研究の成果・意義

上記の通り、本研究では、特に、海洋大循環モデルへの適用に適切なバルクの乱流混合効率、最近の乱流直接数値実験で指摘されているほどの変動はしないものの、乱流の駆動メカニズムに応じて異なり、従来のように全球で一定の値として扱われるべきではないという、乱流混合効率の普遍性・変動性についての新たな重要な知見を得ることができた。具体的には、

- ✓ 個々の穏やかな強さの乱流イベントしか現状で扱えない乱流直接数値実験では、バルクの見積もりに最も影響の大きい、著しく乱流強度が大きなイベントを扱うことが困難であり、乱流直接数値実験の結果を直接的に（特に深海において）海洋大循環モデルに組み込むことはできないこと、
- ✓ 強い乱流場が小スケール内部潮汐波のシア不安定による碎波で駆動された場合は、17% の乱流混合効率を従来通り適用できるが、強い乱流場がオーバーフローによって対流的に駆動された場合は、約 50% と大きな混合効率を適用すべきであること、

が分かり、所期の目的を十分に達成できたと考えている。オーバーフローによる乱流ホットスポットは、海域としては限定的ではあるが、海洋深層水・底層水の混合による水塊変性、ひいては、海洋深層大循環に非常に大きな役割を果たしていることが知られていて、本研究で指摘されたオーバーフロー域での従来よりも大きな混合効率は、深層循環の描像を変化しかねないインパクトを持っている。なお、以上の成果は、Ijichi et al. (2020) で国際誌に報告されている。また、本研究における乱流データの再解析の結果は、Thurnherr et al. (2020) でも使用され、今後もその他の研究に活用されることが十分に期待される。

● 関係学会への参加状況等

本派遣期間中、以下のように、様々な学会および研究機関で定期的に開催されるセミナーに参加し、自身の研究成果を発表し、多くの関連研究者と非常に有益な議論を行った。

学会発表

- The 2020 Ocean Sciences Meeting, San Diego, USA, February 17, 2020, Poster: How variable is mixing efficiency in the abyss?
- The 27th General Assembly of IUGG, Montreal, Canada, July 11, 2019, Talk: Revisiting the characteristics of mixing efficiency in the Brazil Basin.
- The 2019 JpGU meeting, Chiba, Japan, May 27, 2019, Talk: Revisiting the characteristics of mixing efficiency in the Brazil Basin.
- The 2018 Gordon Research Conference on Ocean Mixing, Andover, USA, June 3-8, 2018, Poster: Observed variations in mixing efficiency in the deep ocean.

セミナー発表

- University of Alaska Fairbanks, PO Seminar, Fairbanks, USA, August 29, 2019: How variable is mixing efficiency in the abyss? -Revisiting Brazil Basin microstructure datasets?
- Woods Hole Oceanographic Institution, PO Seminar, Woods Hole, USA, November 13, 2018: Observed variations in turbulent mixing efficiency in the deep ocean (as a part of “Meet the Postdocs Special Seminar”).
- Oregon State University, Physics of Oceans & Atmospheres Seminar, Corvallis, USA, October 30, 2018: Observed variations in turbulent mixing efficiency in the deep ocean.
- Scripps Institution of Oceanography, CASPO Seminar, San Diego, USA, October 24, 2018: Observed variations in turbulent mixing efficiency in the deep ocean.
- Stanford University, EFML Seminar, Stanford, USA, October 18, 2018: Observed variations in turbulent mixing efficiency in the deep ocean.
- University of Victoria, Victoria, TAO Seminar, Canada, October 11, 2018: Observed variations in turbulent mixing efficiency in the deep ocean.
- University of Washington, Seattle, PO lunch Seminar, USA, October 3, 2018: Observed variations in turbulent mixing efficiency in the deep ocean.

● 参考文献

- Ijichi, T., and T. Hibiya, 2018: Observed variations in turbulent mixing efficiency in the deep ocean. *Journal of Physical Oceanography*, American Meteorological Society, 48 (8), pp1815–pp1830, doi:[10.1175/JPO-D-17-0275.1](https://doi.org/10.1175/JPO-D-17-0275.1).
- Ijichi, T., L. St. Laurent, K. Polzin, and J. Toole, 2020: How variable is mixing efficiency in the abyss? *Geophysical Research Letters*, American Geophysical Union, 47, e2019GL086813, doi:[10.1029/2019GL086813](https://doi.org/10.1029/2019GL086813).
- Thurnherr, A., L. Clément, L. St. Laurent, R. Ferrari, and T. Ijichi, 2020: Transformation and upwelling of bottom water in fracture zone valleys. *Journal of Physical Oceanography*, American Meteorological Society, 50, pp715–pp726, doi:[10.1175/JPO-D-19-0021.1](https://doi.org/10.1175/JPO-D-19-0021.1).