

# 深海乱流のグローバルマッピングに向けたシームレス乱流パラメタリゼーションの構築

東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻 博士課程3年（現在、同専攻 特任研究員）  
伊地知 敬

## 研究背景と目的

長期の気候変動に大きな影響を及ぼすと考えられている深層海洋大循環は、深海におけるマイクロな乱流混合のグローバルな空間分布に強く依存する。したがって、深海乱流のグローバルな強度分布の解明は、深層海洋大循環を把握する上で重要な課題である。しかしながら、深さ数千メートルにも及ぶ深海乱流の直接観測には、特殊な精密機器を必要とする上に多大な労力と時間を要することから、そのグローバルな展開は不可能に近い。そのため、海盆規模における深海乱流の強度分布を把握するためには、汎用性の高い音響式流速計 (ADCP)、または、電気伝導度・水温・深度計 (CTD) などを用いて比較的容易に観測できるファインスケール (鉛直 10–100 メートルスケール) の水平流速の鉛直シア、または、密度の鉛直ストレインの情報に基づいて、1 メートル以下のスケールの乱流混合強度を推定する、いわゆる、パラメタリゼーションの手法が広く用いられている。

しかしながら、既存の鉛直シアの情報のみ (Gregg 1989)、または、鉛直ストレインの情報のみ (Wijesekera et al. 1993) を利用する乱流パラメタリゼーションは、深海における内部波スペクトルが Garrett–Munk (GM) モデル (Garrett and Munk 1975; 図 1a) と相似形を保っていることを前提としているため、その形状が GM と比べて歪んでいる場合には、正確な見積もりを出すことは期待できない。実際、強い乱流混合が観測される海域では、内部波スペクトルが GM から歪んでいることが知られている。例えば、伊豆・小笠原海嶺やハワイ海嶺の近海では内部波スペクトルが GM から低周波数側に歪んでいる一方で、ブラジル海盆では内部波スペクトルが高周波数側に歪んでいることが観測されている。

このような内部波スペクトルの周波数方向の歪みの情報を、ADCP/CTD などによる鉛直方向の観測から評価する唯一の方法が、ファインスケールの鉛直シアと鉛直ストレインとの比  $R_\omega$  というパラメータの導入である。海洋中の内部波の力学によると、低 (高) 周波数の内部波の情報は鉛直シア (鉛直ストレイン) により多く含まれている。したがって、深海における内部波スペクトルが GM から低 (高) 周波数側に歪んだ場合、 $R_\omega$  の値は GM の場合に厳密に求まる基準値 3 より大きく (小さく) なる (図 1)。

本研究では、この  $R_\omega$  を用いて、GM を基準とする既存の乱流パラメタリゼーションに、GM からの歪みの補正項を新たに組み込むことで、より汎用性に富んだシームレスな乱流パラメタリゼーションの構築を試みた。

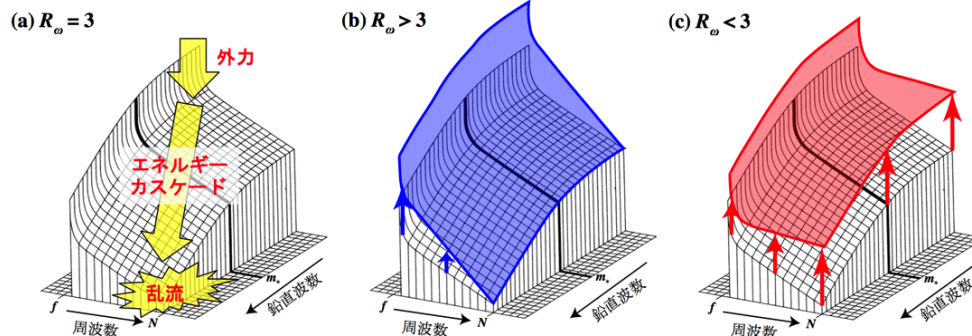


図 1. (a) 周波数と鉛直波数で定義された GM スペクトルの模式図 [Garrett and Munk, 1975, *J. Geophys. Res.*, **80**, 291–297 を改変]。外力から加えられたエネルギーが、内部波スペクトル空間内をカスケードダウンすることで、乱流が励起される。(b) 内部波スペクトルが GM から低周波数、または、(c) 高周波数に歪んだ場合の模式図。

## 理論的考察に基づく乱流パラメタリゼーションの再構築

既存の乱流パラメタリゼーションは、Henyey–Wright–Flatté (HWF) の理論モデル (Henyey et al. 1986) を基に定式化されている。そこで、まず、GM スペクトルを人工的に様々な形に歪ませた内部波スペクトルに対して HWF モデルから見積もられる乱流混合強度  $\epsilon_{\text{HWF}}$  と  $R_\omega$  との関係性を調べた (図 2 陰影部)。図 2 から、GM のように広帯域な周波数スペクトルをもつ  $R_\omega \sim O(1)$  の場合、スペクトルの具体的な形状が  $R_\omega$  の情報のみからでは一意に定まらないため、 $\epsilon_{\text{HWF}}$  にばらつきが見られる。この一方で、内部波スペクトルが低周波数側に著しく歪み、内部波の最低周波数である  $f$  (慣性周波数) に急激なピークを持つような  $R_\omega \sim O(10)$  の場合、 $\epsilon_{\text{HWF}}$  は、内部波場がほぼ単色の近慣性重力波に占められる場合のみ得られる解析解  $\epsilon_{\text{single}}$  (図 2 破線) に漸近する様子が見られる。

こうして得られた  $\epsilon_{\text{HWF}}$  の  $R_\omega$  依存性にフィットさせるように、本研究では、 $R_\omega \sim O(10)$  の場合の漸近解  $\epsilon_{\text{single}}$  と、 $R_\omega = 3$  (GM) の場合の基準値  $\epsilon_{\text{GM}}$  とを接続させることで、 $R_\omega$  による補正項を導入し (図 2 実線)、新たな乱流パラメタリゼーションの式  $\epsilon_{\text{new}}$  を提案した。

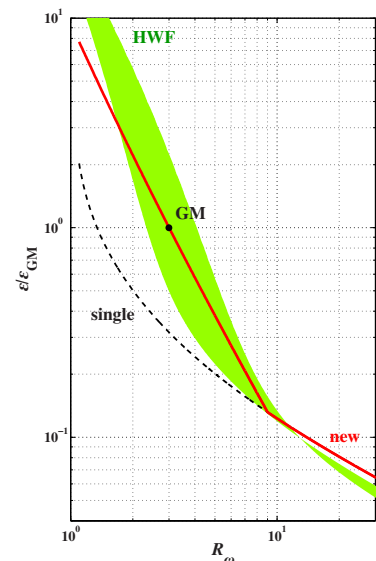


図 2.  $\epsilon_{\text{HWF}}$  (陰影部)、 $\epsilon_{\text{single}}$  (破線)、 $\epsilon_{\text{new}}$  (実線) の  $R_\omega$  依存性 [Ijichi and Hibiya, 2015 を改変]。©American Meteorological Society. Used with permission.

## アイコンナル計算による再構築した乱流パラメタリゼーションの有効性の検証

本研究で新たに提案した乱流パラメタリゼーションは、HWFモデルを忠実に反映しているものの、HWFモデル自体にも自明でない様々な仮定が課されている。Sun and Kunze (1999) は、GMモデルで規定される背景内部波場を対象に、より一般的な条件下で、ray-tracingに基づく数値計算、いわゆる、アイコンナル計算を実施し、乱流混合強度の密度成層に対する依存性を確かめた。しかしながら、 $R_\omega$  依存性を含め、その他のパラメータに対する依存性は、これまで検証されていない。そこで、GMモデルから様々に歪ませた内部波場を対象に、彼らと同様なアイコンナル計算を実施し、乱流混合強度の各パラメータに対する依存性を検証した。その結果、計算された乱流混合強度の各パラメータに対する依存性は、新たに提案した乱流パラメタリゼーションとどれも整合的であった。

## 乱流直接観測による再構築した乱流パラメタリゼーションの有効性の検証

深海における内部波スペクトルの形状が著しく歪んでいると推察される伊豆・小笠原海嶺近海を中心に、超深海乱流計に電磁流速計・CTDを搭載した「マルチスケール・プロファイラー」による観測を実施した。そして、観測された乱流混合強度の実測値  $\langle \epsilon_{\text{obs}} \rangle$  に対する内部波スペクトルの歪みの影響を調べた(図3)。その結果、 $\langle \epsilon_{\text{obs}} \rangle$  には明らかに強い  $R_\omega$  依存性があり、本研究で新たに提案した補正項(実線)によく従う様子が見てとれた。

また、乱流混合強度の鉛直プロファイルの例が図4に示されている。これより、既存の乱流パラメタリゼーション(青線)では、乱流混合強度の特に極大値を過大評価してしまう傾向があるのに対し、新たに提案したパラメタリゼーション(赤線)は、この極大値を含め、観測された乱流混合強度の鉛直構造をよく再現しており、その高い性能を確認することができた。

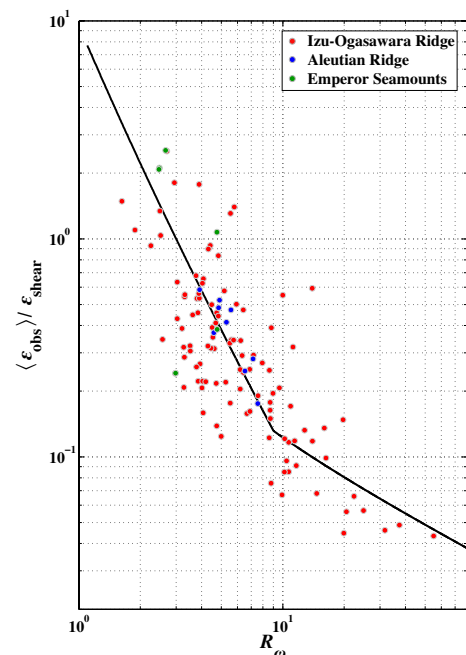


図3.  $\langle \epsilon_{\text{obs}} \rangle / \epsilon_{\text{shear}}$  の  $R_\omega$  依存性 [Ijichi and Hibiya, 2015 を改変]。ここで、 $\epsilon_{\text{shear}}$  は GM を基準とする鉛直シアールに基づくパラメタリゼーションを表している。実線は新たに提案した補正項に対応している。©American Meteorological Society. Used with permission.

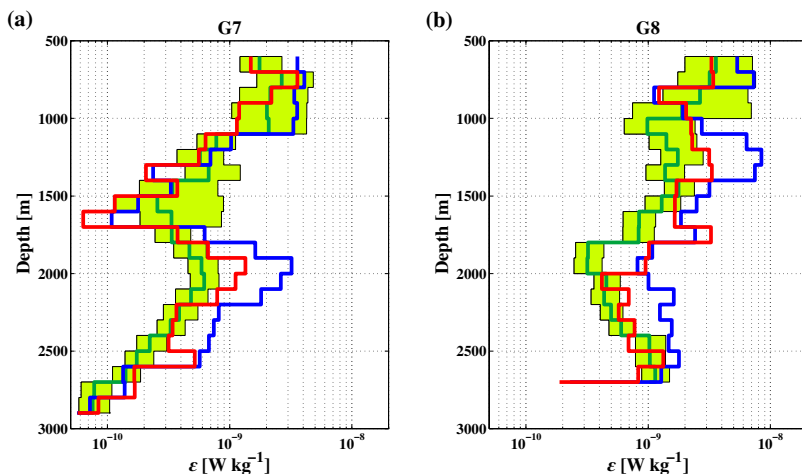


図4. 乱流混合強度の実測値(緑線)の鉛直プロファイルの例 [Ijichi and Hibiya, 2015 を改変]。また、既存の乱流パラメタリゼーション(青線)、および、本研究で再構築した乱流パラメタリゼーション(赤線)による予報値の例を同時に示している。©American Meteorological Society. Used with permission.

## 結論

以上の結果から、本研究で再構築された乱流パラメタリゼーションは、特に、深海における内部波スペクトルが低周波数側に著しく歪んだ場合に乱流混合強度の過大評価が生じてしまうという従来のパラメタリゼーションが抱えていた問題点を効果的に解消できており、これまでに様々な研究者によって開発されてきたパラメタリゼーションのうち、最も汎用性に富んだものであることを確認した。このパラメタリゼーションを利用することで、より正確な乱流混合強度のグローバル分布の作成がはじめて可能になるものと期待される。

なお、本研究の一部は、本助成の支援のもと、以下のように国際誌に掲載され、「最近1年間に最も読まれた論文トップ10」にランクインした。

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