

# 論文の内容の要旨

## 論文題目

### Frequency-Based Correction of Finescale Parameterization of Turbulent Dissipation and the Assessment of its Applicability to the Deep Ocean

(深海内部波場の周波数依存性を考慮した乱流パラ  
メタリゼーションの再構築とその有効性の検証)

氏名 伊地知 敬

#### 1. 序論

深海におけるミクロな乱流混合の正確な定量化は深層海洋大循環の解明に向けて重要な課題である。しかしながら、深さ数千メートルにも及ぶ乱流観測には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。したがって、深海における乱流散逸率の見積もりには、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) の流速鉛直シアーや鉛直ストレイン (等密度面の鉛直勾配) の情報を基にしたパラメタリゼーションの手法が広く用いられている。

その内でも、鉛直シアーの情報のみ (Gregg 1989)、もしくは、鉛直ストレインの情報のみ (Wijesekera et al. 1993) を利用する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; Cairns and Williams 1976) 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、正確な乱流散逸率の見積もりを出すことは期待できない。この一方で、鉛直シアーと鉛直ストレインの両方に基づく、いわゆる、Gregg–Henyey–Polzin (GHP) パラメタリゼーション (Polzin et al. 1995; Gregg et al. 2003) は、鉛直シアーと鉛直ストレインとの比  $R_\rho$  を用いることによって、深海における内部波スペクトルが周波数方向に歪んだ場合の影響を補正しており、現在、最も信頼性の高いパラメタリゼーションとされている。

本研究では、まず、著しく歪んだ深海内部波場における乱流観測を実際に行うことで、GHPパラメタリゼーションの有効性を検証した(2章)。その結果、GHPパラメタリゼーションにおける歪みの補正法にもまだ問題点が残っていることが示唆された。そこで、GHPパラメタリゼーションの定式化を詳細に再考察することで、乱流観測から示唆された問題点を理論的に特定し、それを解消するようにGHPパラメタリゼーションの式の修正を試みた(3章)。さらに、こうして再構築された乱流パラメタリゼーションの有効性を、ray-tracingに基づく数値計算、いわゆるアイコンアル計算(4章)、および、乱流観測(5章)によって検証した。

## 2. 乱流観測によるGHP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GMから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VMP-5500に電気伝導度・水温・深度計と電磁流速計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、乱流散逸率の実測値 $\langle \epsilon_{\text{obs}} \rangle$ とGHPパラメタリゼーションによる予報値 $\epsilon_{\text{GHP}}$ とを比較した。

まず、内部波スペクトルがGMからほとんど歪んでいない $R_\omega \sim 3$ の場合においても、GHPパラメタリゼーションが乱流散逸率を3倍ほど過大評価したことがわかった。これは、パラメタリゼーションの定数係数 $\epsilon_0$ を従来の $6.73 \times 10^{-10} \text{ W kg}^{-1}$ から $2.24 \times 10^{-10} \text{ W kg}^{-1}$ に修正すべきであることを示唆している。そこで、定数係数を修正したうえで、 $\epsilon_{\text{GHP}}/\langle \epsilon_{\text{obs}} \rangle$ と $R_\omega$ との関係を調べた。その結果、歪みの影響を考慮したGHPパラメタリゼーションでさえ、深海での内部波スペクトルの形状が低周波数側に著しく歪んだ $R_\omega > 9$ の場合には、乱流散逸率を2.4倍ほど過大評価してしまうことがわかった。

## 3. GHPパラメタリゼーションの問題点とその修正

GHPパラメタリゼーションによる乱流散逸率の過大評価の原因を探るため、その定式化を再考察した。GHPパラメタリゼーションは、Henye et al. (1986)による理論モデル(以下、HWFモデル)を基に定式化されている。本研究では、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散逸率 $\epsilon_{\text{HWF}}$ と $R_\omega$ との関係を調べた(図1ピンク色陰影部)。図1から、GMのように広帯域な周波数スペクトルをもつ $R_\omega \sim O(1)$ の内部波場では、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んだ $R_\omega \sim O(10)$ の内部波場は、ほぼ単色の近慣性重力波に支配されるため、 $\epsilon_{\text{HWF}}$ は内部波場が単色の場合にのみ限られる解析解 $\epsilon_{\text{single}}$ (図1黒色破線)に漸近する様子が見られる。

GHPパラメタリゼーションでは、この本来 $R_\omega \sim O(10)$ においてのみ成立する乱流散逸率の解析解 $\epsilon_{\text{single}}$ がすべての $R_\omega$ において成立するものと仮定して、内部波スペクトルの歪みの影響の補正を試みている。しかしながら、言うまでもなく、この「単色波近似」はGMのような広帯域な内部波スペクトル( $R_\omega \sim 3$ )に対して適用することはできない。実際、このままでは、内部波スペクトルがGMと相似形を保つ場合( $R_\omega = 3$ )に唯一得られる乱流散逸率の理論値 $\epsilon_{\text{GM}}$ (図1黒丸)と $\epsilon_{\text{single}}$ との間には、大きな乖離が生じてしまう。GHPパラメタリゼーションでは、この $R_\omega = 3$ における予報値と理論値との乖離を解消するように補正係数を求め、これをすべての $R_\omega$ における予報値に掛け合せている( $\epsilon_{\text{GHP}}$ : 図1青線)。この単純な補正操作によって、皮肉にも、GHPパラメタリゼーションによる予報値は、内部波場が近慣性重力波に支配される $R_\omega \sim O(10)$ においてHWFモデルから得られる解析解の約3倍に達してしまう。

以上の考察結果をもとに、本研究では、内部波スペクトルがGMと相似形を保つ $R_\omega = 3$ の場合には $\epsilon_{\text{GM}}$ と一致するように、また、低周波数側に著しく歪んだ $R_\omega \sim O(10)$ の場合には $\epsilon_{\text{single}}$ と等しくなるように、 $R_\omega$ による乱流散逸率の評価を $\epsilon_{\text{GHP}}$ から $\epsilon_{\text{mod}}$ へと修正した(図1赤線)。こうして再構築された乱流パラメタリゼーションは、GHPパラメタリゼーションと比べ、 $R_\omega < 9$ でより強い $R_\omega$ 依存性を示すことになる。

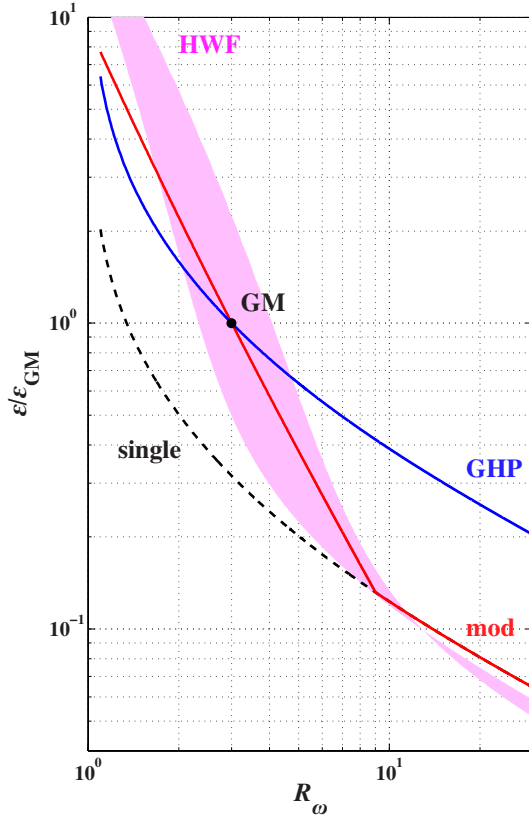


図 1. (ピンク)  $\varepsilon_{\text{HWF}}$ , (黒)  $\varepsilon_{\text{single}}$ , (青)  $\varepsilon_{\text{GHP}}$ , (赤)  $\varepsilon_{\text{mod}}$  の  $R_\omega$  依存性 [Ijichi, T., and T. Hibiya, 2015: Frequency-based correction of finescale parameterization of turbulent dissipation in the deep ocean. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **32**, 1526–1535, doi: 10.1175/JTECH-D-15-0031.1 を改変]。©American Meteorological Society. Used with permission.

#### 4. アイコナル計算による再構築された乱流パラメタリゼーションの有効性の検証

本研究で再構築された乱流パラメタリゼーションは、HWF モデルをより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アイコナル計算を実施し、乱流散逸率の成層に対する依存性を確かめた。しかしながら、 $R_\omega$  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。本研究では、GM モデルから様々な歪ませた内部波場を対象に、彼らと同様なアイコナル計算を実施し、乱流散逸率の各パラメータに対する依存性を検証した。その結果、計算された乱流散逸率の各パラメータに対する依存性は、本研究で再構築された乱流パラメタリゼーションとどれも整合的であった。

#### 5. 乱流観測による再構築された乱流パラメタリゼーションの有効性の検証

現在までに集積した乱流観測データ (2 章) を基に、乱流散逸率の実測値  $\langle \varepsilon_{\text{obs}} \rangle$  に対する内部波スペクトルの歪みの影響を調べた (図 2)。その結果、 $\langle \varepsilon_{\text{obs}} \rangle$  には、GHP パラメタリゼーションにおける歪みの補正項  $h_{\text{GHP}}(R_\omega)$  よりも、明らかに強い  $R_\omega$  依存性があることがわかった。そして、この強い  $R_\omega$  依存性は、本研究で新たに提案された補正項  $h_{\text{mod}}(R_\omega)$  によく従う様子が見てとれた。

また、乱流散逸率の鉛直プロファイルの例が図 3 に示されている。これより、GHP パラメタリゼーションは乱流散逸率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、再構築されたパラメタリゼーションは、この極大値を含め、観測された乱流散逸率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。

## 6. 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散逸率の過大評価が生じてしまうという従来の GHP 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。

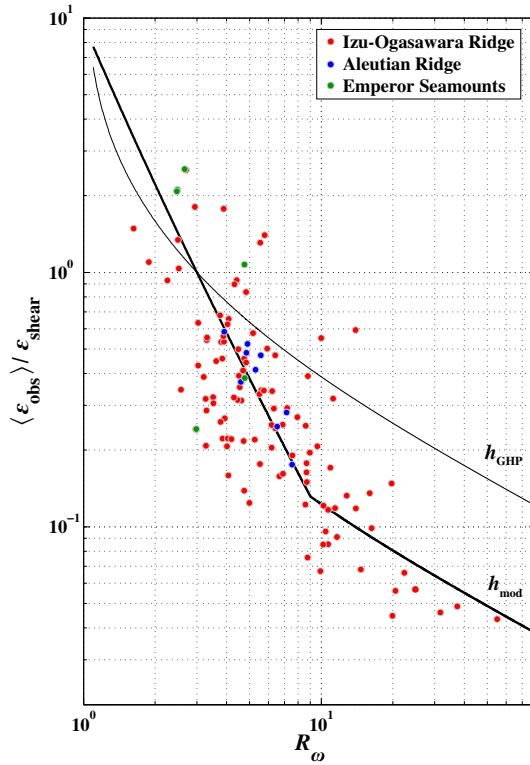


図 2.  $\langle \epsilon_{\text{obs}} \rangle / \epsilon_{\text{shear}}$  と  $R_o$  との散布図 [Ijichi, T., and T. Hibiya, 2015: Frequency-based correction of finescale parameterization of turbulent dissipation in the deep ocean. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **32**, 1526–1535, doi: 10.1175/JTECH-D-15-0031.1 を改変]。ここで、 $\epsilon_{\text{shear}}$  は歪みによる補正項を無視したシアーに基づく乱流パラメタリゼーションを表している。細実線は GHP パラメタリゼーションにおける歪みの補正項  $h_{\text{GHP}}$  を、太実線は本研究で再構築したパラメタリゼーションにおける歪みの補正項  $h_{\text{mod}}$  をそれぞれ表している。また、各プロットの色は観測海域を表している。©American Meteorological Society. Used with permission.

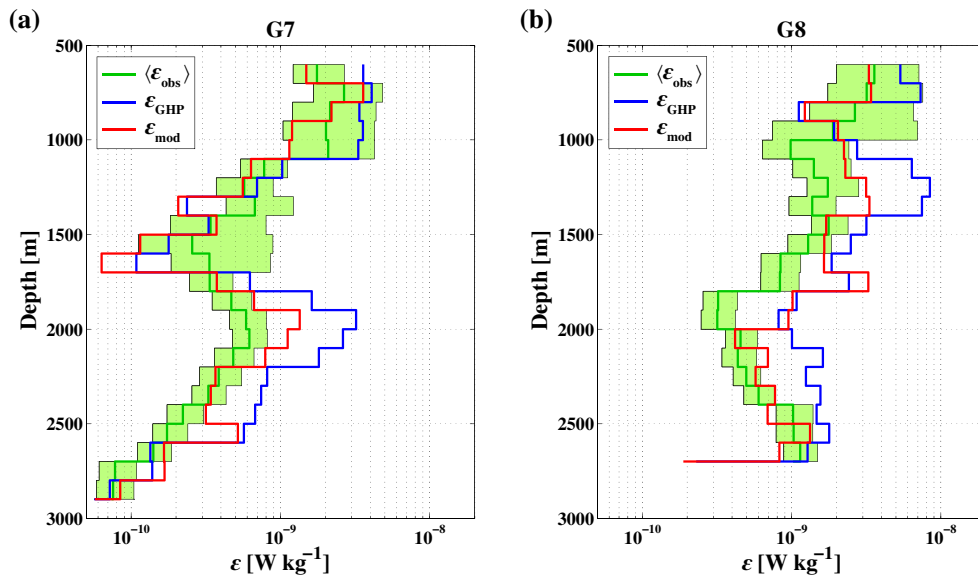


図 3. 伊豆-小笠原海域の 2 点 (G7, G8) で観測された乱流散逸率の鉛直プロファイルの例 [Ijichi, T., and T. Hibiya, 2015: Frequency-based correction of finescale parameterization of turbulent dissipation in the deep ocean. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **32**, 1526–1535, doi: 10.1175/JTECH-D-15-0031.1 を改変]。©American Meteorological Society. Used with permission.