

論文内容の要旨

論文題目 Numerical study for the revised parameterization of tide-induced abyssal mixing
(深海における潮汐混合のパラメタリゼーションの改良に向けた数値的研究)

氏名 岩前 伸幸

1 背景と目的

海洋の中・深層における鉛直乱流拡散は、深層海洋大循環のパターンや流量をもコントロールする重要な物理過程である。この鉛直乱流拡散に関して、海盆スケールの循環の力学から見積もられた値 (c.f. Munk, 1966) と海洋内部領域で実際に観測された値 (c.f. Gregg, 1989; Ledwell et al., 1993) との間に 1 オーダーもの開きがあることが、長年にわたって問題とされてきた。本研究が対象とする海底境界混合は深層海洋大循環を維持するために必要な鉛直拡散係数 $10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$ への不足分をまかなう、いわゆる missing mixing の有力な候補と考えられており、実際に、海底境界混合の存在を仮定することで子午面循環の流量が強化されたという先行研究もある (Endoh and Hibiya, 2007)。しかしながら、海底境界混合の物理的根拠に基づいた具体的なパラメタリゼーションは提案されておらず、現在もっともよく用いられているパラメタリゼーション (St. Laurent et al., 2002) は、一部の観測から得られた描像を他の海域にも適用するという甚だプリミティブなものである。

本研究では、深海における潮汐混合の強度と空間分布を対象として、それらが海底地形・成層などの外部パラメータにどのように依存しているのかを、高解像度数値モデルを用いた比較実験とアイコンナル・アプローチと呼ばれるレイ・トレーシングの方法を用いて調べた。

2 海底境界混合におけるファインスケール地形の影響に関する数値的研究

2.1 数値モデル

本研究では MITgcm (Marshall et al., 1997) を鉛直 2 次元、非静水圧の設定で用いた。グリッドサイズは海底地形の近くで水平 50m・鉛直 5m とし、背景場の成層として World Ocean Atlas 2001 の温度・塩分データから計算した大西洋中央海嶺付近の平均的な成層を用いた。初期状態として、Garrett-Munk スペクトルに基づいて振幅を決定した位相ランダムな線形内部重力波場 (Winters and D'Asaro, 1997) を仮定し、水平境界で振幅 2cm/s, M_2 周期の順圧潮流を課すことによって強制を与えた。

このような設定のモデルに、マルチビーム観測によって得られた高解像度 (~ 200m) のデータ (Kurt Polzin, 私信, 2008) を元に作成した、

- 水平 2km 以下の成分を取り除いた地形データ (コントロール実験)
- 水平 2km 以下の成分を含む生の地形データ (マルチビーム実験)

の 2 種類の地形を組み込んで実験を行い、その結果を比較した。

2.2 結果

海底地形の違いを反映して、マルチビーム実験では水平 2km 以下、特に水平 500m 以下のスケールの運動エネルギースペクトルがコントロール実験と比べて 10-100 倍強化されていた。計算結果からエネルギー消散率を見積もると図 1 のようになっており、マルチビーム実験では海底地形近傍のエネルギー消散率が著しく強化されている様子がわかる。

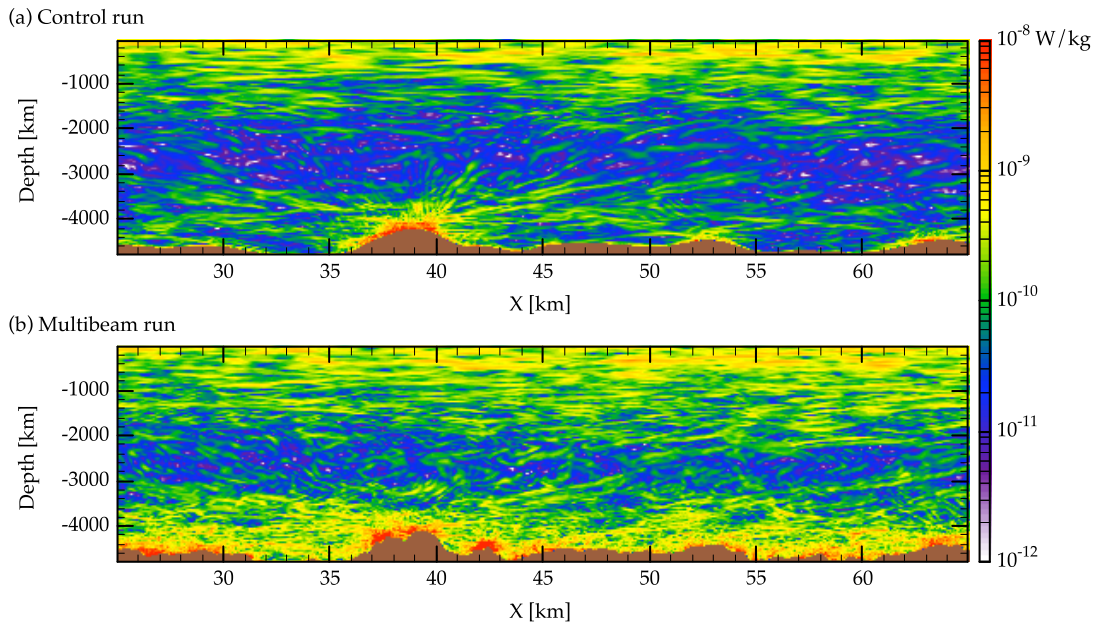


図 1 計算結果から見積もった (a) コントロール実験, (b) マルチビーム実験, におけるエネルギー消散率 ϵ 。計算開始から 20 潮汐周期後のスナップショットを示した。

深海での時間平均したエネルギー消散率を指数関数 $\epsilon = \epsilon_0 \exp(-z/\zeta)$ に最小自乗フィットし、その大きさ (ϵ_0) と鉛直スケール (ζ) を見積もった結果を図 2 に示す。ここで z は海底からの距離を表す。一部の例外的な場所を除いて、マルチビーム実験ではコントロール実験と比べてエネルギー消散率の値は 1 オーダー大きく、その鉛直スケールは半分以下となっていることがわかる。

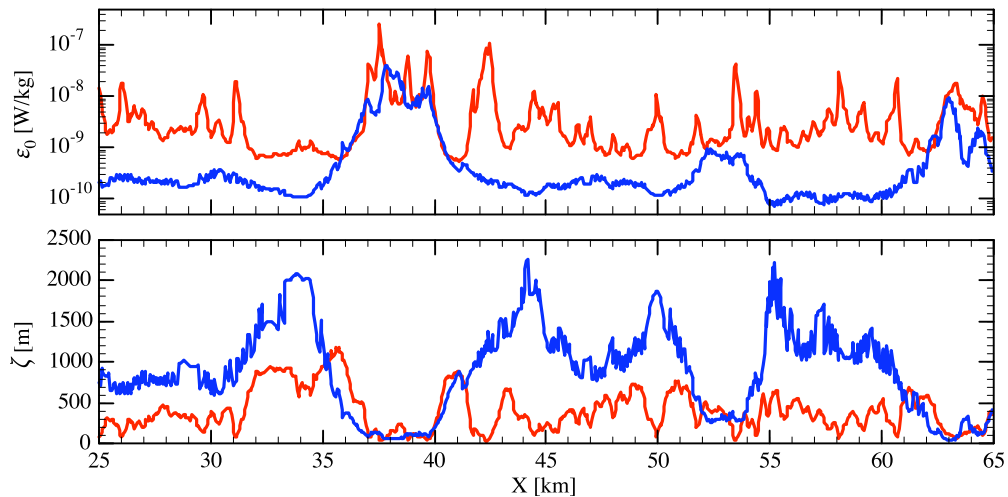


図 2 最小自乗法により見積もったエネルギー消散率の (a) 大きさと (b) 鉛直スケール。青、赤はそれぞれコントロール実験, マルチビーム実験の結果を表す。

また、海底地形によって励起される内部潮汐波エネルギーと深海における局所散逸係数 q を調べた結果、マルチビーム実験では、内部潮汐波エネルギーの生成が 1.5 倍大きい上に、深海での局所散逸係数は 2 倍以上大きく、深海において効率よくエネルギー消散が生じていることがわかった。

以上の結果により、海底境界混合域は、水平 2km 以下のスケールの海底地形によって強化された水平高波数のエネル

ギーが深海で効率的に消散することによって形成されていることが示唆される。また、既存のパラメタリゼーションでは定数として扱われてきたパラメータ (局所散逸係数やエネルギー消散率の鉛直スケール) が、実際には、海底地形の波数分布に依存して空間的に大きく変化することが示された。

3 アイコナル・アプローチを用いた海底境界混合のパラメータ依存性に関する研究

3.1 方法

次に、アイコナル・アプローチ (Henyey et al., 1986) の手法を用いて、海底から鉛直上方に伝播する内部潮汐波パケットが背景の内部重力波場との非線形相互作用を通じて碎波することで生じるエネルギー消散の鉛直分布を調べた。モデルでは、水深 2000m・浮力周期一定の鉛直 2 次元海洋を仮定し、GM76 モデルにより振幅を決定した位相ランダムな線形内部重力波場中を伝播する内部潮汐波パケットの軌跡を追跡する。パケットの位置 \mathbf{x} および波数 \mathbf{k} の時間変化は以下の方程式により記述される。

$$D_t \mathbf{x} = \partial_{\mathbf{k}} \sigma + \mathbf{u}_{BG}, \quad D_t \mathbf{k} = -\nabla_{\mathbf{u}_{BG}} \cdot \mathbf{k},$$

ただし、 σ はパケットの周波数、 \mathbf{u}_{BG} は背景場の流速を表す。伝播途上で鉛直波長が 5m 未満となったパケットは碎波したとする一方で、碎波する前にモデルの上端に達したパケットはその場のエネルギー消散には寄与しないとする。実験パラメータとして、パケットの初期水平波数 k_I 、背景場の浮力振動数 N 、緯度 ϕ を様々に変化させて実験を行った (各実験につき、100 個のテストパケットを投入し、結果は統計的に処理した)。

計算結果に対して、単位エネルギー密度当たりの内部潮汐波パケットが引き起こすエネルギー消散率

$$\epsilon^* \equiv \frac{1}{N_{\text{total}}} \sum_n^{N_{\text{break}}} \frac{1}{T_n} \cdot \frac{\sigma_n(T_n)}{\sigma_I}, \quad (1)$$

を用いて解析を行った。ただし、 T はパケットが碎波に至るまでの時間、 σ および σ_I はパケットの周波数とその初期値をそれぞれ表す。また、 N_{total} と N_{break} はそれぞれ投入したパケットの数と碎波したパケットの数を表す。

3.2 結果と考察

モデルから見積もった ϵ^* に対して、その大きさと鉛直スケールを見積もった結果を図 3 に示す。図に見られる、初期の水平波数 k_I ・浮力振動数 N に対する依存性は、

- パケットと背景場の非線形相互作用の強さ (水平波数が高い／浮力振動数が大きいほど強い)
- パケットの鉛直群速度 (水平波数が高い／浮力振動数が大きいほど遅い)

を考えることにより定性的に理解できる。また、これらの実験結果は次の実験式でよく表せることがわかった。

$$\epsilon_0^* = 10^{-6.1} \cdot \left(\frac{k_I}{k_c}\right)^{1.5}, \quad \zeta = 10^{5.2} \cdot \left(\frac{N}{N_0}\right)^{1.5} \cdot \left(\frac{k_I}{k_c}\right)^{-2.2}, \quad \text{for } k_I > k_c = 10^{-3.8} \cdot \left(\frac{N}{N_0}\right)^{-1.3}.$$

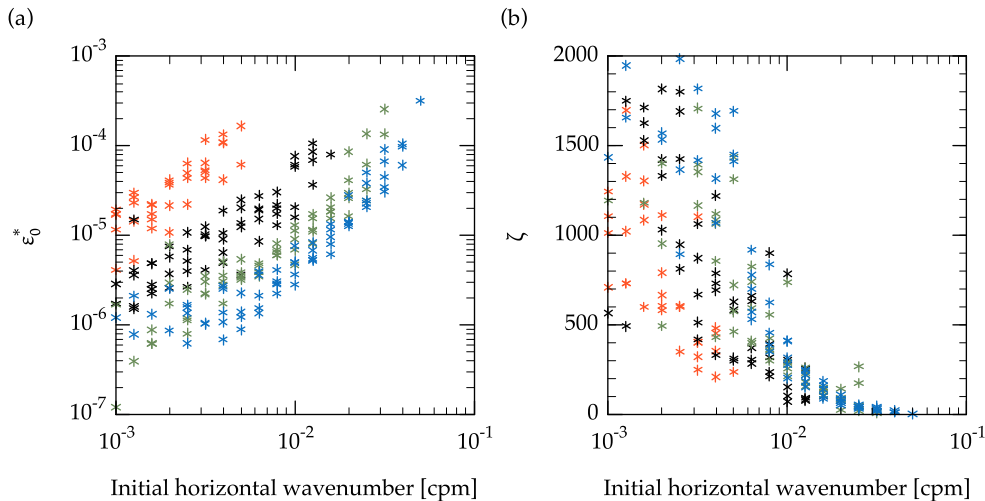


図 3 ϵ^* の (a) 大きさと (b) 鉛直スケール。色はそれぞれ異なる浮力周期に対する結果を表す (赤：20 分，黒：1 時間，緑：2 時間，青：3 時間)。

得られた実験式を現実の深層海洋の成層に適用し、海底境界混合の形成に寄与し得る臨界波長を求めた結果を図4に示す。臨界波長はほとんどの場所で400-600m程度、短い所では300m未満となっており、これよりも大きい水平波長を持つ内部潮汐波は背景場との非線形相互作用により碎波するよりも早く遠方に伝播し、局所的な混合には寄与しない。この結果から、海底境界混合の詳細なパラメタリゼーションには、水平高波数の内部潮汐波を励起し得るような、高解像度の海底地形の情報が必要であることが示唆される。

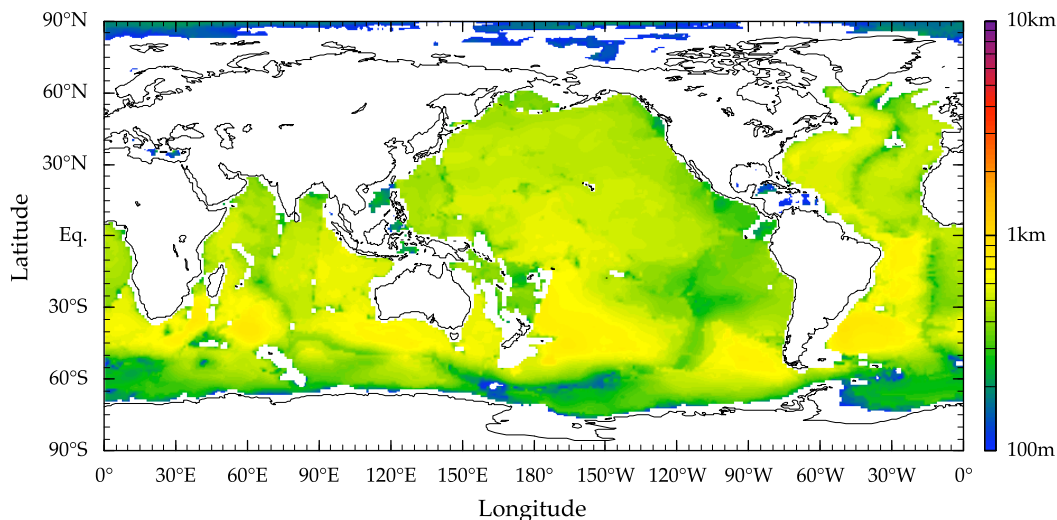


図4 World Ocean Atlas 2005 の温度・塩分データから見積もった深海 (3000m 以深) の成層に対し実験式を適用して見積もられた、海底境界混合に寄与し得る最大の波長。

4 まとめ

本研究では『深海における潮汐混合の強度と鉛直スケール』が海底地形などの外部パラメータにどのように依存するかを、2種類の数値実験により調べた。

高解像度の鉛直2次元モデルを用いた実験から、観測されている様な、値が大きく鉛直スケールの短いエネルギー消散率の鉛直分布を再現するためには水平1km以下のスケールの海底地形が重要であることがわかった。また、このような海底境界混合域の形成には、高波数の地形により励起された水平数100mスケールの内部波が海底地形の近傍で効率的にエネルギーを失うことが重要であることが示唆された。

そこで、アイコンナル・アプローチを用いた数値実験によって、海底から鉛直上方に伝播する内部潮汐波が背景の内部波場との非線形相互作用を通じて碎波することで形成される海底境界混合について調べた。その結果、プリミティブ方程式モデルにより示唆された高波数の内部波の重要性はアイコンナル・アプローチモデルによっても確認された。さらに、海底境界混合の強度と鉛直スケールについてより詳細なパラメータ依存性が明らかになり、それらを実験式としてまとめた。

従来用いられてきた海底境界混合のパラメタリゼーションでは、局所散逸係数やエネルギー消散率の鉛直スケールは、一部の観測から得られた値を全球代表値として用いてきた。しかし、本研究で示されたように、それらのパラメータは背景場の成層やエネルギー源である内部潮汐波の波数分布によって大きく異なるものであり、従来の方法は、そのような背景にあるプロセスを無視したものであったと言える。また、海盆規模の循環が混合強度の鉛直スケールなどに強く依存することを考えると、従来のパラメタリゼーションは、現実とは異なる循環を引き起こす危険性をはらんだものであったと言える。

本研究の結果から、より適切なパラメタリゼーションの可能性として、次のようなものが考えられる。潮流と海底地形の相互作用により励起される内部潮汐波は様々な波数を持つが、励起源付近の海底境界混合に寄与するのは図4に示した臨界波数よりも高い水平波数のものだけである。そのような内部潮汐波が境界混合を引き起こす効率やその鉛直スケールは成層と内部潮汐波の水平波数を用いて実験式で表すことができる。高波数の内部潮汐波のエネルギーを重みとしてそれらの情報を積分することで、海底境界混合の強度と空間分布を得ることができるものと期待される。