

— 総 説 —

海洋大循環モデルにおける鉛直混合パラメタリゼーションと太平洋深層循環に関する研究*

羽角 博康[†]

要 旨

海洋大循環モデルにおける鉛直混合の表現方法について、特に太平洋深層循環という観点に基づき、これまでの研究をレビューし、今後の方向性を議論する。深層における鉛直混合の主要因は内部潮汐であると考えられており、海底地形の起伏に伴う内部潮汐の励起と励起源近傍での散逸に焦点をあてた研究がこれまで多く行われてきた。今後は遠方伝播する内部潮汐の散逸過程を適切にパラメータ化することが大きな課題である。

キーワード：海洋大循環モデル、鉛直混合、太平洋深層循環、内部潮汐

1. はじめに

深層水の上昇、ひいては深層子午面循環流量が鉛直混合と結び付けて考えられるようになった端緒はおそらく、観測された溶存物質の鉛直分布を説明する文脈において、定常状態を仮定した海洋深層における溶存物質の移流拡散方程式のバランスが主に鉛直移流項と鉛直拡散項の間で成り立っていると考えられたことであろう（例えば、Wyrski, 1962）。この鉛直バランスを単純に考えると、大きな鉛直拡散係数は大きな鉛直移流と対応することになる。もちろん、鉛直バランスには溶存物質の分布（鉛直方向1階および2階微分）が意味を持ち、その分布は移流拡散過程の結果として決まっているものであるため、

そのように単純に考えて良いとは限らないし、具体的に上昇流量が鉛直拡散係数に対してどのような依存性を持つのかは、鉛直バランスからだけでは知ることができない。そうしたことは深層循環の全体像と同時に議論する必要があり、鉛直拡散を要素として含む海洋深層循環のモデル（必ずしも数値モデルでなくてもよい）を通して考える必要がある。

深層子午面循環流量の鉛直拡散係数に対する依存性を最初に明瞭な形で示したのはBryan (1987) である。単一海盆矩形海洋に対して同一の海面境界条件を与えて様々な値の鉛直拡散を適用した海洋大循環モデル実験により、彼は深層子午面循環の流量が鉛直拡散係数の1/3乗に比例するという結果を得た。また、地衡流平衡と鉛直移流拡散バランスに基づくスケージングから、その1/3乗依存性が得られることも示した。ただし、Marotzke (1997) は同様の海洋大循環モデルの結果から2/3乗依存性を得ている（詳細は割愛するが、子午面循環の流量をどのように定量化するか、およびスケージングを行う際にどのような仮定を置くかにより、モデル結果の解釈は違ってくる）。いずれにせよ、鉛直拡散係数が深層子

* 2016年8月3日受領；2016年12月7日受理
著作権：日本海洋学会, 2017

[†] 東京大学大気海洋研究所
〒277-8568 千葉県柏市柏の葉5-1-5
TEL: 04-7136-4407 FAX: 04-7136-4375
e-mail: hasumi@aori.u-tokyo.ac.jp

午面循環流量を大きくコントロールするパラメータであることは、海洋大循環モデルを用いた理想化実験を通して共通認識になっている。

では、現実の海洋においても鉛直拡散係数が深層子午面循環をコントロールする主要パラメータであるかという点、その答えは深層子午面循環のどのような側面を見るかによって異なる。北大西洋深層水の形成に伴う大西洋子午面循環については、鉛直拡散係数にも確かに依存するが、流量を強くコントロールする要素が他にも存在する。このため、たとえ鉛直拡散係数が非常に小さくても、顕著な循環が存在することが現実的な設定の海洋大循環モデル実験によって示されている (Hasumi and Suginohara, 1999a)。一方、太平洋子午面循環 (および南極底層水の形成に伴う大西洋子午面循環) については、同じく現実的な設定の海洋大循環モデル実験により、鉛直拡散係数に大きく依存するという結果に加えて、鉛直拡散係数が非常に小さい場合にはほとんど循環が存在しなくなるという結果が得られている (Tsujino *et al.*, 2000)。すなわち、太平洋深層循環の存在にはある程度大きな鉛直混合が不可欠であり、「海洋混合学」(安田, 2015) において太平洋に特に注目すべき所以である。

2. 観測に基づく鉛直混合の大循環モデルへの経験的組み込み

海洋深層における鉛直混合の大きさを、観測に基づいて鉛直渦拡散係数として最初に提示したのは Munk (1966) である。彼は、太平洋における各種トレーサーの鉛直分布に対して、鉛直一次元の移流拡散バランスを仮定することで、 $1.3 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ という値を得た。この時期には、ちょうど深層循環までを扱う海洋大循環モデルが実用化されるようになり (Bryan, 1969)、そこではこの値が全海洋で一様に適用された。ただし、当時の海洋大循環モデリング研究は、深層の温度場や循環の計算結果を観測結果と比較することによって、選択した鉛直拡散係数の適否を論じるような段階には達していなかった。一方、Bryan and Lewis (1979) が行った海洋大循環モデリングでは、Gregg (1977) が示した観測事実に基づき、温度躍層付近では顕著に小さい値 ($0.3 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) を与えている。実際、後の多くのモデリング研究が示すよう

に、Munk (1966) の値を一様に適用すると、得られる温度躍層は現実と比べて明らかに深すぎ、また鉛直温度勾配は明らかに小さくなってしまふ。

このように海洋大循環モデリングの初期段階では固定された鉛直渦拡散係数を与えるという方法が用いられていたが、鉛直混合をもたらす乱流が実際には海洋場に依存することは既に知られていた事実であった。Gargett (1984) は、乱流理論によると鉛直渦拡散が ϵ/N^2 (ϵ は乱流エネルギー散逸率、 N は浮力振動数) に比例することに基づき、 ϵ が N^p ($1.0 \leq p \leq 1.5$) に比例すると考えることで、鉛直渦拡散係数を a_0/N^q ($0.5 \leq q \leq 1.0$, a_0 は定数) と表して海洋大循環モデルに適用することを提唱した。Cummins *et al.* (1990) は $q=1$, $a_0=1.0 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ としてこれを適用し、一様な鉛直拡散係数を用いる場合との違いを論じている。

その一方で、鉛直混合の元となる乱流エネルギーの源として内部潮汐が重要であり、その大きさが水平的に大きな非一様性を持つことが、様々な観測によって示されるようになってきた (例えば、Polzin *et al.*, 1997)。Hasumi and Suginohara (1999b) は、順圧潮流の大きさが海底水深に依存することと、内部潮汐の発生が海底粗度に依存するという推定に基づき、海底粗度を海底水深で割った値がある閾値を超える領域でのみ特に大きな鉛直渦拡散係数 (海底から離れるにしたがって指数関数的に減少する) を与えるという簡単な方法でその影響を海洋大循環モデルに取り入れ、太平洋深層循環がその与え方に強く依存することを示した。

3. 潮汐混合の実態に即した鉛直混合過程の大循環モデルへの組み込み

Munk and Wunsch (1998) などによって内部潮汐が海洋深層における鉛直混合の主要なエネルギー源であることが認識されるようになり、それを適切な形で海洋大循環モデルに取り込む方法に関する研究が、2000 年以降に数多く行われてきた。それらに共通する手続きは、

- 1) 順圧潮汐から内部潮汐へのエネルギー変換率の水平分布 $E_f(x, y)$ [$\text{m}^2 \text{ s}^{-3}$] (x, y は水平座標) を得る、
- 2) 内部潮汐となったエネルギーのうち遠方伝播せず局所散逸される割合 q を決める、

3) 局所散逸されるエネルギーの鉛直方向の分配関数 $F(z)$ (z は鉛直座標) を決める, というものである。これらを用いると, 乱流エネルギー散逸率 $\varepsilon(x, y, z)$ [$\text{m}^2 \text{s}^{-3}$] は, $qE_f F$ と表され, Osborn (1980) が提唱した式により, 鉛直拡散係数は $\gamma\varepsilon/N^2$ と表される。ここで γ は $R_f/(1-R_f)$ (R_f はフラックスリチャードソン数) で定義されるパラメータであり, 乱流を生じる臨界状態では $R_f=0.15\sim 0.2$ であるという理論や観測に基づき, 0.2 程度の値が使われることが多い。ただし, 現象によっては, もっと小さな値が妥当であることも指摘されている (Osborn, 1980)。また, 内部潮汐のうち局所的に散逸されずに遠方伝播するものについては, 背景内部波場 (Garrett and Munk, 1975) を形成して全海洋一様に $0.1\times 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$ 程度の弱い鉛直拡散 (背景拡散) をもたらすと考える場合が多い。

順圧潮汐から内部潮汐へのエネルギー変換率の水平分布の見積もり方については様々な方法が存在する。Jayne and St. Laurent (2001) は, 順圧潮汐モデルから得られる潮流速度, 海底地形の空間変動を特徴づける水平波数と振幅, および成層安定度に依存する簡単なパラメトリゼーションを提唱した。Nycander (2005) は順圧潮汐モデルから得られる潮流速度を入力データとし, 高解像度海底地形データと線型内部波理論に基づいてエネルギー変換率の分布を求めた。一方, Niwa and Hibiya (2011) は高解像度 3 次元モデルを用いた直接計算によってエネルギー変換率を求めた。

内部潮汐が活発に励起される場所では大きな乱流エネルギーが観測される (例えば, Polzin *et al.*, 1997)。しかし, 低次モードの内部波は, 異なる波数間の非線型相互作用の影響を強く受けることなく遠方に伝播することが可能である。このため, その局所的に大きな乱流エネルギーは, 主に高次モードの内部波の散逸によるものと考えられる (St. Laurent and Garrett, 2002)。それを踏まえて St. Laurent *et al.* (2002) は, St. Laurent *et al.* (2001) によるブラジル海盆での観測に基づき, 内部潮汐となったエネルギーのうちで局所散逸されるエネルギーの割合を 0.3 とした。その後の研究においても, この程度の値が使われることが多い。しかし, 彼ら自身が指摘しているように, この値が常に妥当であるという根拠はない。特に, 潮汐周期が慣性周期より長い緯度において内部波

は伝播できないため, 順圧潮汐から内部潮汐に変換されたエネルギーの大部分は局所的に散逸すると考えられる (Tanaka *et al.*, 2010)。

局所散逸されるエネルギーの鉛直方向の分配関数については, 海底から上方に向かって減少する指数関数が例外なく適用されている。この関数形には特別な理論的根拠はなく, 様々な観測結果が概ねそれと整合的であることで正当化されているにすぎない。指数関数形における減衰の長さスケールは 500 ~ 1000 m が適用されることが多い。この減衰の長さスケールは, 海洋大循環モデルに適用する場合には, 深層子午面循環をコントロールするチューニングパラメータとしての性格を持つ (例えば, Simmons *et al.*, 2004; Jayne, 2009)。

こうして得られる鉛直混合を海洋大循環モデルに適用した例では, ほぼ共通して太平洋深層子午面循環の流量が現実比べて小さすぎるという結果が得られている (Fig. 1 の (a))。その理由としては, ここまでに紹介した一連の研究に共通して欠けている, 潮汐以外によって励起される内部波エネルギーに起因する混合, および局所散逸しない内部潮汐が考えられる。その内, 後者に関しては, Oka and Niwa (2013) が研究を進めている。彼らは Niwa and Hibiya (2011) の高解像度潮汐モデルの結果に基づき, 遠方から伝播してきた内部潮汐が各水平地点で散逸する量を, 潮汐モデルで直接計算された内部潮汐散逸量と上述の大循環モデルで採用されている方式による内部潮汐局所散逸量の差として推算し, その量を乱流エネルギー散逸率に鉛直一様に加えて海洋大循環モデルに適用した。これによって太平洋深層子午面循環は顕著に強化されるとともに (Fig. 1 の (b)), 北太平洋における深層水年齢の水平分布も改善された。この結果は, 遠方伝播する内部波を考慮に入れることの重要性を示している。ただし, 彼らが導入した推算方法の妥当性を検証する必要がある。

内部波の遠方伝播と散逸に関しては, 内部波の非線型相互作用に関わる過程, および海底や大陸縁といった境界における過程を適切に取り扱うことが重要な課題となる。鉛直混合には赤道に近づくにつれて急激に小さくなっていくという緯度依存性があることが, 観測によって示されている (Gregg *et al.*, 2003)。その原因としては, 遠方伝播する内部波が緯度 30 度付近で非線型共鳴

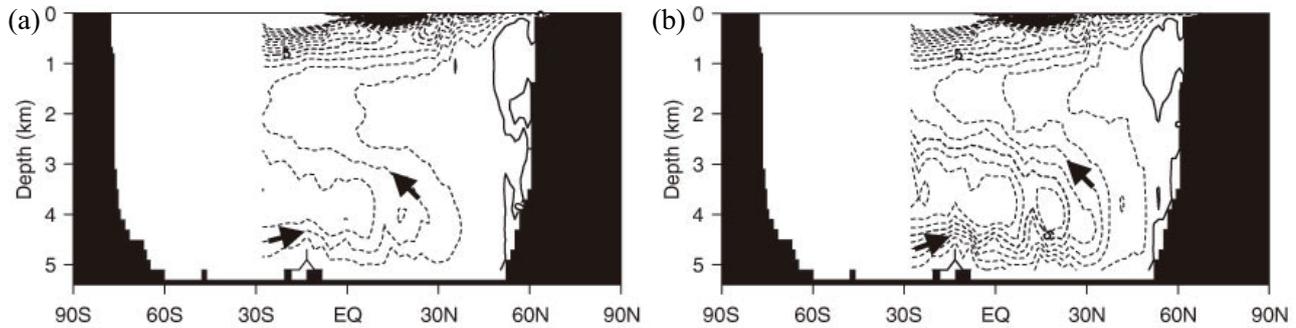


Fig. 1. Modeled Pacific overturning stream function under the vertical diffusivity distribution (a) estimated only from local dissipation of internal tides and (b) including the effect of dissipation of far-reaching internal tides. The contour interval is $10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. After Oka and Niwa (2013).

メカニズムのひとつであるパラメトリック サブハーモニック不安定 (PSI) によって散逸されることが挙げられている (MacKinnon and Winters, 2005)。しかし、PSI の具体的な働き方については、さらなる研究が必要とされているのが現状である。境界における過程に関して、遠方伝播する第1モード内部波のうち過半が大陸縁で散逸されるという見積もりを Kelly *et al.* (2013) は示している。しかし、より高次の内部波の振る舞いまでを含めて、その具体像を解明するためには、まだ多くの研究が必要とされる。今後の海洋大循環モデルを用いた深層循環研究においては、こうした過程に関する最新の観測的および理論的研究の成果を迅速かつ適切に取り込んでいくことが求められる。

4. 本格的なパラメタリゼーションに向けて

鉛直混合の原因が内部波であるならば、数値海洋モデルで鉛直混合を陽に計算するためには、海洋中の内部波場を陽に表現することが求められる。これは実空間3次元に加えて波数空間3次元での波動伝達方程式を解くことを意味し、それだけでも通常の海洋大循環モデルをはるかに凌駕する計算量が必要とされる。さらに、内部波散逸過程を陽に表現しようとするならば、鉛直解像度を通常の海洋大循環モデルよりも格段に高くする必要がある。したがって、現実的には海洋大循環モデルの中で鉛直混合を陽に計算することはほぼ不可能であり、何らかの形でパラメタリゼーションが必要である。

ところで、前節までに紹介した海洋大循環モデルにおいて鉛直混合 (鉛直拡散係数) を与える手続きについては、敢えてパラメタリゼーションという語を用いなかった。(サブグリッドスケール) パラメタリゼーションとは本来、モデルが表現する場の情報 (流速分布等) を用いて、それに対してモデルが表現できない小規模現象が与える影響を見積もるものである。上述した手続きでは、海洋大循環モデルで表現される現象とは全く関係なく鉛直拡散係数もしくは乱流エネルギー散逸率の分布を与え、いわば外部条件として海洋内部構造を規定しており、パラメタリゼーションと呼ぶ手続きにはあたらない。しかし、前節の最後で述べた遠方伝播する内部波の影響を適切に取り扱うためには、本来の意味でのパラメタリゼーションが必要である。すなわち、成層がコントロールする内部波伝播過程を陽に表現し、その内部波の場の状況に応じて内部波の散逸量を推定するような枠組みを用いる必要がある。

そうした内部波場を用いたパラメタリゼーションの方法として、最近 Olbers and Eden (2013) が IDEMIX というモデルを提唱した。このモデルでは、波数積分した内部波エネルギー密度を変数とし、WKB 近似のもとでの波活動度保存に基づいて、その空間伝播や消散を扱っている。Eden and Olbers (2014) はこのモデルを拡張し、波数積分して扱う背景内部波場とは独立に近慣性周期内部波と内部潮汐を扱い、それらについて非線型相互作用や境界での散乱による背景内部波場へのエネルギー変換をモデル化することで、遠方伝播する内部波によるエネ

ルギー散逸量を求める手法を提唱した。彼らの手法を現実的な海洋大循環モデリングに直接適用した例はまだ存在しない。しかし、彼らの手法は、前節の最後に述べた内部波の遠方伝播と散逸に関する最新の研究成果を取り込むのに適した枠組みであり、鉛直混合の適切なパラメタリゼーションとそれを通した太平洋深層循環の理解に向けての有望な手法であると筆者は考える。

References

- Bryan, F. (1987) : Parameter sensitivity of primitive equation ocean general circulation models. *J. Phys. Oceanogr.*, **17**, 970–985.
- Bryan, K. (1969) : Climate and ocean circulation. III. The ocean model. *Mon. Wea. Rev.*, **97**, 806–827.
- Bryan, K., and L. J. Lewis (1979) : Water mass model of the World Ocean. *J. Geophys. Res.*, **84**, 2503–2517.
- Cummins, P. F., G. Holloway, and E. Gargett (1990) : Sensitivity of the GFDL ocean general circulation model to a parameterization of vertical diffusion. *J. Phys. Oceanogr.*, **20**, 817–830.
- Eden, C., and D. Olbers (2014) : An energy compartment model for propagation, nonlinear interaction, and dissipation of internal gravity waves. *J. Phys. Oceanogr.*, **44**, 2093–2106.
- Gargett, A. E. (1984) : Vertical eddy diffusivity in the ocean interior. *J. Mar. Res.*, **42**, 359–393.
- Garrett, C., and W. Munk (1975) : Space-time scales of internal waves: A progress report. *J. Geophys. Res.*, **80**, 291–297.
- Gregg, M. C. (1977) : Variations in the intensity of small-scale mixing in the main thermocline. *J. Phys. Oceanogr.*, **7**, 436–454.
- Gregg, M. C., T. B. Sanford, and D. P. Winkel (2003) : Reduced mixing from the breaking of internal waves in equatorial waters. *Nature*, **422**, 513–515.
- Hasumi, H., and N. Sugimoto (1999a) : Atlantic deep circulation controlled by heating in the Southern Ocean. *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 1873–1876.
- Hasumi, H., and N. Sugimoto (1999b) : Effects of locally enhanced vertical diffusivity over rough bathymetry on the world ocean circulation. *J. Geophys. Res.*, **104**, 23367–23374.
- Jayne, S. R. (2009) : The impact of abyssal mixing parameterizations in an ocean general circulation model. *J. Phys. Oceanogr.*, **39**, 1756–1775.
- Jayne, S. R., and L. C. St. Laurent (2001) : Parameterizing tidal dissipation over rough topography. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 811–814.
- Kelly, S. M., N. L. Jones, J. D. Nash, and A. F. Waterhouse (2013) : The geography of semidiurnal mode-1 internal-tide energy loss. *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 4689–4693.
- MacKinnon, J. A., and K. B. Winters (2005) : Subtropical catastrophe: Significant loss of low-mode tidal energy at 28.9°. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L15605.
- Marotzke, J. (1997) : Boundary mixing and the dynamics of three-dimensional thermohaline circulation. *J. Phys. Oceanogr.*, **27**, 1713–1728.
- Munk, W. H. (1966) : Abyssal recipes. *Deep-Sea Res.*, **13**, 707–730.
- Munk, W. H., and C. Wunsch (1998) : Abyssal recipes II: Energetics of tidal and wind mixing. *Deep-Sea Res.*, **45**, 1977–2010.
- Niwa, Y., and T. Hibiya (2011) : Estimation of baroclinic tide energy available for deep ocean mixing based on three-dimensional global numerical simulations. *J. Oceanogr.*, **67**, 493–502.
- Nycander, J. (2005) : Generation of internal waves in the deep ocean by tides. *J. Geophys. Res.*, **110**, C10028.
- Oka, A., and Y. Niwa (2013) : Pacific deep circulation and ventilation controlled by tidal mixing away from the sea bottom. *Nat. Commun.*, **4**, 2419.
- Olbers, D., and C. Eden (2013) : A global model for the diapycnal diffusivity induced by internal gravity waves. *J. Phys. Oceanogr.*, **43**, 1759–1779.
- Osborn, T. R. (1980) : Estimates of the local rate of vertical diffusion from dissipation measurements. *J. Phys. Oceanogr.*, **10**, 83–89.
- Polzin, K. L., J. M. Toole, J. R. Ledwell, and R. W. Schmitt (1997) : Spatial variability of turbulent mixing in the abyssal ocean. *Science*, **276**, 93–96.
- Simmons, H. L., S. R. Jayne, L. C. St. Laurent, and A. J. Weaver (2004) : Tidally driven mixing in a numerical model of the ocean circulation. *Ocean Modelling*, **6**, 245–263.
- St. Laurent, L., and C. Garrett (2002) : The role of internal tides in mixing the deep ocean. *J. Phys. Oceanogr.*, **32**, 2882–2899.
- St. Laurent, L. C., H. L. Simmons, and S. R. Jayne (2002) : Estimating tidally driven mixing in the deep ocean. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 2106.
- St. Laurent, L. C., J. M. Toole, and R. W. Schmitt (2001) : Buoyancy forcing by turbulence above rough topography in the abyssal Brazil Basin. *J. Phys. Oceanogr.*, **31**, 3476–3495.
- Tanaka, Y., T. Hibiya, Y. Niwa, and N. Iwamae (2010) : Numerical study of K₁ internal tides in the Kuril straits. *J. Geophys. Res.*, **115**, C09016.
- Tsujino, H., H. Hasumi, and N. Sugimoto (2000) : Deep Pacific circulation controlled by vertical diffusivity at the lower thermocline depths. *J. Phys. Oceanogr.*, **30**, 2853–2865.
- Wyrski, K. (1962) : The oxygen minima in relation to ocean circulation. *Deep-Sea Res.*, **9**, 11–23.
- 安田一郎 (2015) : 新学術領域研究「海洋混合学の創設：物質循環・気候・生態系の維持と長周期変動の解明」. *JOS ニュースレター*, **5** (3), 2–3.

A review of studies on vertical mixing parameterization and Pacific deep circulation in ocean general circulation models

Hiroyasu Hasumi*

Abstract

The treatment of vertical mixing in ocean general circulation models is reviewed and its future direction discussed, especially concerning the reproducibility of the Pacific deep circulation. Internal tides are thought to be the principal source of mixing in the deep ocean, and there have been many studies focusing on generation of internal tides over rough bathymetry and their dissipation in the vicinity of generation. A great challenge currently is how to adequately parameterize the dissipation process of far-propagating internal tides.

Key words : ocean general circulation model, vertical mixing, Pacific deep circulation, internal tides

(Corresponding author's e-mail address : hasumi@aori.u-tokyo.ac.jp)

(Received 3 August 2016 ; accepted 7 December 2016)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2017)

* Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo
5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba, 277-8568, Japan.
Corresponding author : Hiroyasu Hasumi
TEL: +81471364407 FAX: +81471364375
e-mail: hasumi@aori.u-tokyo.ac.jp