

海洋鉛直混合パラメータの最適化による長期海洋環境再現

課題責任者

増田 周平

海洋研究開発機構 地球環境部門 海洋観測研究センター

著者

増田 周平*, 長船 哲史*

*海洋研究開発機構 地球環境部門 海洋観測研究センター

海盆規模の長期海洋環境再現から気候変動メカニズムを解明するため、歴史的な水温・塩分データ、海面高度データを用いて海洋の鉛直混合パラメータを変分法で最適化し、海洋環境再現データセットを作成した。得られた力学的整合性のとれたデータセットを用いて、太平洋北部外洋域における大循環の把握の一部として、深層昇温の再現性の向上を確認した。

キーワード：海洋，データ同化，海洋混合

1. はじめに

海盆スケールでの海洋環境の動態のメカニズムを解明するためには海洋観測に加え、データ統合技術の応用が有効である。2000年代に入り、データ同化技術を応用した全球を対象とした観測データの統合（長期海洋環境再現）が計算機科学の発達とともに可能となり、海洋環境変動と気候変動現象のリンクなどについてメカニズムの解明を目的とした研究が本格的に行われ始める（例えば Stammer et al., 2002[1]）。

海洋の鉛直混合は子午面循環をはじめとする海洋循環の動態に本質的な役割を担っていることが知られており、鉛直混合は海洋環境再現を精緻化するための重要な要素である（例えば Liu et al., 2012[2]）。

近年、鉛直混合の直接・間接観測が増加してきており、自動昇降型ブイへの乱流計搭載などを通して、さらに広範・高品質の観測機会を得ることが予期されることもあり、鉛直混合の直接観測を利用した全球規模の海洋環境再現が期待されている。

本研究では鉛直混合パラメータを最適化できる新しいデータ統合システムを開発し、得られた統合データセットの性質を検証する。

2. データ

用いた観測データセットは、UK-MET office により編集された EN4 データセットの水温・塩分データ ([Good et al., 2013[3])、および Reynolds、OISST の海面水温 (SST) データである。同化期間は 1957 年から 2014 年の 58 年間である。制御変数としては、モデルの初期値（水温・塩分・水平流速・海面高度）および外力（風応力・熱フラックス・淡水フラックス）に加え、潮汐混合パラメータ 6 個を用いた。これには、潮汐混合パラメータのアジョイント感度を計算する必要があり、関連するアジョイントのモデルの開発も行った。

3. グリーン関数法を用いたモデルチューニング

本研究では、四次元変分法データ同化システムのベースモデル (Osafune et al., 2015[4]) に対し、新たに潮

汐に伴う鉛直混合を表現する二つの鉛直拡散スキームを実装した。一つは、順圧潮汐流が地形を横切る際に生じる内部波が地形近傍で引き起こす混合（以下、Near Field Mixing）に対応する St. Laurent et al. (2002) [5] のスキームであり、主要 4 分潮の内部波へのエネルギー変換率 (E_g^i) の分布を使用し、以下のように鉛直拡散係数を計算する。

$$K_{NEAR} = \sum_{i=1}^4 \frac{\Gamma q E_g^i(x, y) H(z)}{\rho N^2} H(z) = \frac{e^{-(z_b - z)/h_{sti}}}{h_{sti}(1 - e^{-z_b/h_{sti}})}$$

$$q = \begin{cases} q_{sub} & \text{for subinertial} \\ q_{sup} & \text{for superinertial} \end{cases}$$

もう一つは、発生した内部波が遠方に伝播し、背景の内部波と相互作用することで引き起こされる混合（以下、Far Field Mixing）に対応する、Hibiya et al. (2006) [6] のスキームであり、潮汐流エネルギー分布 ($E_{internal}$) を用いて、以下のように拡散係数を計算する。

$$K_{FAR} = (F(\theta, \phi) + h_{bg}) * \frac{\phi}{20} \quad \text{for } 0 \leq \phi < 20$$

$$K_{FAR} = F(\theta, \phi) + h_{bg} \quad \text{for } 20 \leq \phi < 30$$

$$K_{FAR} = F(\theta, \phi) * \frac{35 - \phi}{5} + h_{bg} \quad \text{for } 30 \leq \phi < 35$$

$$K_{FAR} = h_{bg} \quad \text{for } 35 \leq \phi$$

$$F(\theta, \phi) = h_{ratio} * \log_{10}(E_{internal}(\theta, \phi)/0.1) \quad \text{for } E_{internal}(\theta, \phi) \geq 0.1 \text{ J m}^{-2}$$

$$F(\theta, \phi) = 0 \quad \text{for } E_{internal}(\theta, \phi) < 0.1 \text{ J m}^{-2}$$

鉛直拡散係数を、この二つの潮汐拡散スキームと表層混合層スキーム等の足しあわせとして表現する。

長期海洋環境再現実験では、ベースモデルの表現誤差を低減することが重要である。鉛直拡散以外にも、海洋環境再現に重要と考えられる地熱の効果を導入した。地熱のデータとしては、Devies (2013) [7] を用いた。

四次元変分法を用いたデータ統合実験に先立ち、モデルの初期推定場と観測の一致性を事前にある程度高

めておくためモデルパラメタの最適化を行った。制御変数としては、先行研究で用いられた物理パラメタのほか、潮汐鉛直拡散スキームに用いられる5つのパラメタ(制御変数の重複を避けるため Γ は0.2で一定とした)、および等密度面拡散スキームのテーパーに用いる係数を用いた。

4. 結果

最適化の結果を表1に示す。Far Field Mixingの低緯度における拡散を支配する h_{ratio} を除き、鉛直拡散を強化する方向に修正が行われていた。全球平均鉛直拡散係数のプロファイルは、表層混合層と底層を除くほとんどの深度で鉛直拡散を強化する方向に修正されていた(図1)。

潮汐鉛直拡散スキームのパラメタ修正による効果を、スキーム毎に分離して評価するため、一部のパラメタのみに最適値を用いた複数の比較実験を行った結果、太平洋深層における海洋環境はNear Field Mixingの影響を強く受けており、四次元変分法を用いたデータ統合実験においても、そのパラメタを制御することが効果的であることを示唆している。

グリーン関数法を用いた最適化の結果を用いて、強拘束の四次元変分法を用いたデータ統合実験を行った。図2に、深層昇温のパターンを示す。初期推定場(同化なし:FG)では、北太平洋の深層水温にはほとんど経年変化が見られなかった。一方で、データ統合結果(同化あり:ASSIM)では、西部海域を中心に観測(Kouketsu et al., 2010[8])と同程度の水温上昇が再現されていた。太平洋に限らず、全球的に観測との整合性が高い結果が得られており、深層の水温変動に関しては、旧来のシステムを用いたデータ統合実験の結果よりも再現性が向上していた。

このデータセットでは水温変化への寄与をモデルの方程式系に沿った形で診断できる(Masuda et al., 2010[9])。今後、その利点を生かしてメカニズムの解明を推進していく予定である。

また、双子実験の結果から鉛直拡散の与え方が深層における海洋環境再現にとって本質的に重要であり、逆に、深層における海洋環境のモニタリングすることで、鉛直混合を推定する上で有用な情報が得られる可能性があることがわかった(図省略)。今後の観測研究との連携強化も重要な要素である。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金「新学術領域研究(研究領域提案型)」領域番号4702、KAKENHI JP15H05817/H05819の支援を受けて行われました。

文献

- [1] Stammer, D., C. Wunsch, R. Giering, C. Eckert, P. Heimbach, J. Marotzke, A. Adcroft, C. N. Hill, and J. Marshall, „Global ocean circulation during 1992-1997, estimated from ocean observations and a general circulation model“, *J. Geophys. Res.*, **107**, C9, 3118, 2002.
- [2] Liu, C., A. Köhl, and D. Stammer, “Adjoint-based estimation of eddy-induced tracer mixing parameters in the global ocean”, *J. Phys. Oceanogr.*, **42**, 1186–1206, 2012.
- [3] Good, S. A., Martin, M. J., Rayner, N. A., “EN4: quality controlled ocean temperature and salinity profiles and monthly objective analyses with uncertainty estimates”, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **118**, 6704–6716, doi:10.1002/2013JC009067, 2013.
- [4] Osafune, S., Masuda, S., Sugiura, N., Doi, T., “Evaluation of the applicability of the Estimated Ocean State for Climate Research (ESTOC) dataset”, *Geophys. Res. Lett.* **42** (12), 4903–4911, doi:10.1002/2915GL064538, 2015.
- [5] St. Laurent, L., and C. Garrett, “The role of internal tides in mixing the deep ocean”, *J. Phys. Oceanogr.*, **32**, 2882–2899, 2002.
- [6] Hibiya, T., M. Nagasawa and Y. Niwa, “Global mapping of diapycnal diffusivity in the deep ocean based on the results of expendable current profiler (XCP) surveys”, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L03611, doi:10.1029/2005GL025218, 2006.
- [7] Davies, J. H., “Global map of solid Earth surface heat flow, Geochron”, *Geophys. Geosyst.*, **14**, 4608–4622, doi:10.1002/ggge.20271, 2013.
- [8] Kouketsu, S., T. Doi, T. Kawano, S. Masuda, N. Sugiura, T. Toyoda, H. Igarashi, Y. Kawai, K. Katsumata, H. Uchida, M. Fukasawa, and T. Awaji, “Deep ocean heat content changes estimated from observation and reanalysis product and their influence on sea level change”, *J. Geophys. Res.*, **116**, C03012, doi:10.1029/2010JC006464, 2011.
- [9] Masuda, S., T. Awaji, N. Sugiura, J. P. Matthews, T. Toyoda, Y. Kawai, T. Doi, S. Kouketsu, H. Igarashi, K. Katsumata, H. Uchida, T. Kawano, M. Fukasawa, “Simulated Rapid Warming of Abyssal North Pacific Waters”, *Science*, **329**, 319–322, DOI, 10.1126/science.1188703, 2010.

	CTL	perturb	sigma	OPT
h_stl	500	1000	500	986.8
qsub	1.0	0.8	0.2	1.046
qsup	0.3	0.5	0.2	0.4521
h_bg	0.2	0.4	0.2	0.2502
h_ratio	0.67	1.0	0.3	0.3827
ah	2E+06	3E+06	1E+06	2.512E+06
ah_iso	1E+07	1.5E+07	5E+06	1.038E+06
gm	1E+07	1.5E+07	5E+06	9.170E+06
fa_dc	1.0	2.0	1.0	1.219
fa_sf	1.0	2.0	1.0	0.2522
k_bbl	2.0	3.0	1.0	2.034
dm	1E-02	2E-03	1E-02	9.258E-03

表1 グリーン関数法による制御変数の修正情報。左から、制御変数名、コントロールケースにおける値、各パラメタに関する擾乱実験で用いた値、パラメタの誤差、最適化の結果を示す。使用した制御変数は、上から順に、Near Field Mixing スキームにおける鉛直スケールh、subinertial/superinertial 成分に関する局所散逸率 q_{sub} 、 q_{sup} 、水平・等密度面・層厚拡散、二重拡散およびソルトフィンガーのスキームに対するファクター、海底境界層における鉛直拡散、等密度面拡散スキームのテーパーに用いる係数に対応。

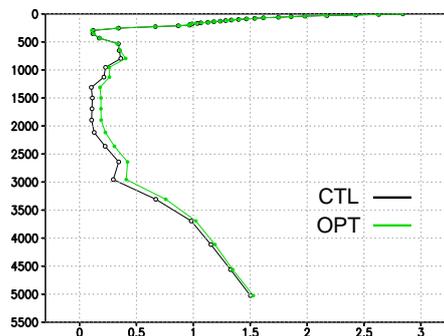


図1 全球平均鉛直拡散係数[cm²/s]の対数。モデルの上限値(1000cm²/s)に達している点を除いた平均値。

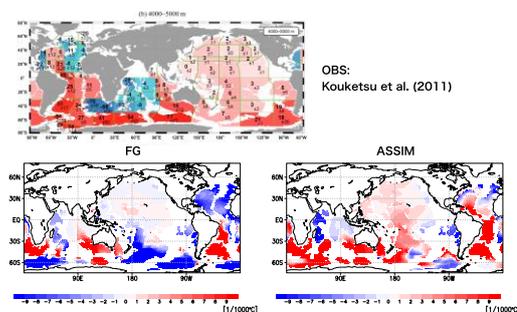


図2. 深層(4000-5000m)における水温の10年差1997年から2006年の平均値から、1985年から1994年の平均値を引いた差。

Ocean State Estimation by Optimizing Vertical Ocean Mixing Parameters

Project Representative

Shuhei Masuda

Global Ocean Observation Research Center, Research Institute for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Authors

Shuhei Masuda *, Satoshi Osafune*

* Global Ocean Observation Research Center, Research Institute for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

We developed a new ocean state estimation by variational optimization of vertical ocean mixing parameters using historical water temperature, salinity, and sea surface height data. The obtained dynamically-self consistent dataset is examined to confirm the improved reproducibility of bottom-water warming in the global ocean.

Keywords : ocean, data assimilation, ocean mixing

1. Introduction

In the 2000s, advances in computer science made it possible to apply data assimilation techniques to integrate global ocean observation data (i.e., global ocean state estimation), and this has led to the development of new technologies that enable us to understand the dynamics of the ocean climate and its changes (e.g., Stammer et al., 2002[1]).

Vertical mixing of the ocean is known to play an essential role in the dynamics of ocean circulation, including meridional overturning circulation, and thus is an important factor in refining ocean state estimation (e.g., Liu et al., 2012[2]).

In recent years, direct and indirect observations of vertical mixing have been increasing, and it is expected that more extensive and high-quality observation opportunities will be available through the installation of Argo-type buoys equipped with turbulence sensors. Such direct observation of vertical mixing is expected to be used to uncover ocean climate changes taking advantage of ocean data synthesis.

In this study, we developed a new ocean data synthesis system that can optimize the vertical mixing parameters and validated the properties of the obtained state estimation.

2. Data

The observational datasets used were water temperature and salinity data from the EN4 dataset compiled by the UK-MET office ([Good et al., 2013[3]) and sea surface temperature (SST) data from Reynolds and OISST. The assimilation period is 58 years, from 1957 to 2014. Six tidal mixing parameters were used as control variables, in addition to the initial conditions of the model (water temperature, salinity, horizontal current velocity, and sea surface height) and air-sea fluxes (heat, freshwater, and momentum). This required the calculation of the adjoint sensitivity of the tidal mixing parameters.

3. Model implementation

We implemented two new vertical diffusion schemes for the base model of the four-dimensional variational data assimilation system (Osafune et al., 2015[4]), which represent vertical mixing with tides (St. Laurent et al., 2002[5], Hibiya et al., 2006[6]).

It is important to reduce the representation error of the base model in the long-term data synthesis. In addition to vertical diffusion, we also introduced the effect of geothermal heating to our model. Geothermal data were used from Devies (2013) [7].

Prior to the data synthesis experiments using the four-dimensional variational method, model parameters were optimized in order to improve the agreement between the model's first guess field and observations. In addition to the physical parameters used in previous studies, the five parameters used in the vertical tidal diffusion scheme, horizontal diffusivity, and a coefficient used for the tapering function for isopycnal and thickness diffusion were used as control variables.

4. Result and Discussion

The results of the optimization using the Green's function method were applied to perform data synthesis experiments using a strong-constrain four-dimensional variational method. Figure 2 shows a pattern of bottom-water warming. In the first guess field (no assimilation; FG), the bottom-water warming shows little change over time. On the other hand, the data synthesis results (with assimilation; ASSIM) reproduced a similar degree of warming as observed one (Kouketsu et al., 2011[8]).

This dataset allows us to diagnose the contribution to water temperature changes in line with the model's system of equations (Masuda et al., 2010[9]). We will make use of this data set to further elucidate the mechanism.

Acknowledgement

Numerical calculations were performed on the Earth Simulator and DA system of JAMSTEC. This work was partly supported by a Grant-in-Aid for Scientific Research on Innovative Areas (MEXT KAKENHI-JP15H05817/JP15H05819).

References

- [1] Stammer, D., C. Wunsch, R. Giering, C. Eckert, P. Heimbach, J. Marotzke, A. Adcroft, C. N. Hill, and J. Marshall, „Global ocean circulation during 1992-1997, estimated from ocean observations and a general circulation model“, *J. Geophys. Res.*, **107**, C9, 3118, 2002.
- [2] Liu, C., A. Köhl, and D. Stammer, “Adjoint-based estimation of eddy-induced tracer mixing parameters in the global ocean”, *J. Phys. Oceanogr.*, **42**, 1186–1206, 2012.
- [3] Good, S. A., Martin, M. J., Rayner, N. A., “EN4: quality controlled ocean temperature and salinity profiles and monthly objective analyses with uncertainty estimates”, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **118**, 6704–6716, doi:10.1002/2013JC009067, 2013.
- [4] Osafune, S., Masuda, S., Sugiura, N., Doi, T., “Evaluation of the applicability of the Estimated Ocean State for Climate Research (ESTOC) dataset”, *Geophys. Res. Lett.* **42** (12), 4903–4911, doi:10.1002/2915GL064538, 2015.
- [5] St. Laurent, L., and C. Garrett, “The role of internal tides in mixing the deep ocean”, *J. Phys. Oceanogr.*, **32**, 2882–2899, 2002.
- [6] Hibiya, T., M. Nagasawa and Y. Niwa, “Global mapping of diapycnal diffusivity in the deep ocean based on the results of expendable current profiler (XCP) surveys”, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L03611, doi:10.1029/2005GL025218, 2006.
- [7] Davies, J. H., “Global map of solid Earth surface heat flow, *Geochem*”, *Geophys. Geosyst.*, **14**, 4608–4622, doi:10.1002/ggge.20271, 2013.
- [8] Kouketsu, S., T. Doi, T. Kawano, S. Masuda, N. Sugiura, T. Toyoda, H. Igarashi, Y. Kawai, K. Katsumata, H. Uchida, M. Fukasawa, and T. Awaji, “Deep ocean heat content changes estimated from observation and reanalysis product and their influence on sea level change”, *J. Geophys. Res.*, **116**, C03012, doi:10.1029/2010JC006464, 2011.
- [9] Masuda, S., T. Awaji, N. Sugiura, J. P. Matthews, T. Toyoda, Y. Kawai, T. Doi, S. Kouketsu, H. Igarashi, K. Katsumata, H. Uchida, T. Kawano, M. Fukasawa, “Simulated Rapid Warming of Abyssal North Pacific Waters”, *Science*, **329**, 319–322, DOI, 10.1126/science.1188703, 2010.

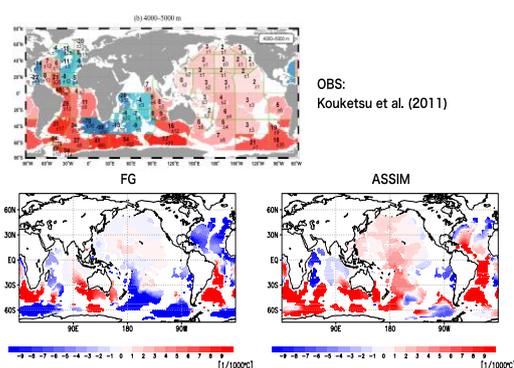


Figure 1. Bottom-water warming in 4000-5000m layer between two decades: 1997-2006 and 1985-1994. Three panels show observation (upper panel), model (lower left), and state estimation (lower right).