

# 海洋鉛直混合観測データを用いた全球海洋環境再現実験

課題責任者

増田 周平 海洋研究開発機構 地球環境観測研究開発センター

著者

増田 周平<sup>\*1</sup>, 長船 哲史<sup>\*1</sup>, 杉浦 望実<sup>\*1</sup>, 土居 知将<sup>\*1</sup>

\*1 海洋研究開発機構 地球環境観測研究開発センター

四次元変分法データ同化手法を応用し、近年増加しつつある鉛直混合観測データを活用して、これまでの水温、塩分等の海洋観測データに加え鉛直混合観測データにも整合するような海洋環境再現を可能とするシステムを構築する。鉛直混合観測は、限られた海域にしかないが、その情報は力学的に海洋循環に直結する為、きわめて有用である。この物理量を加えてデータ統合を行うことで、これまでの海洋循環像がどのようにリバイスされるかを明らかにする。このことにより、海洋の熱・物質輸送に関する理解を深めることができる。

キーワード：気候変動、海洋混合、データ同化

## 1. 背景と目的

乱流鉛直混合は大規模な海洋循環を制御する重要な物理過程の一つであり、熱や物質の輸送を通じて、物質循環・生態系を含む気候システムの維持・変動機構とも深く関わっている。したがって、鉛直混合の実態解明とその役割の評価は、海洋学における最重要課題の一つであると同時に、より広範な地球科学的観点からも大きな意義を持つ。このような背景で、観測・理論・数値シミュレーションなど、様々な手法を用いて活発な研究が進められているが、未解明な部分も多く残されている。本研究では、観測と数値モデル双方の優位性を活かすことが可能な四次元変分法データ同化手法を応用した先進的なデータ統合実験を通じて、鉛直混合が海洋循環・物質循環の維持に果たす役割を再評価すること目的とし、鉛直混合に関わる未知パラメータを最適化するシステムを構築する。これによって得られる生物化学変量まで含んだ全球全層の海洋観測データを統合したデータセットは、海洋環境変動研究、特に力学解析などを含む変動メカニズムの解明に有用であり、海洋立国日本として期待されている、観測機器・大型計算機をはじめとする先進のファシリティーを利用したユニークな海洋環境変動研究に資する。

## 2. データ統合のアプローチ

四次元変分法データ同化とは、数値モデルを用いて、観測データを力学的に時空間補間する高度なマッピング手法である。我々のグループでは、この手法を応用したデータ統合システムを用い、過去に得られた水温・塩分等の膨大な海洋観測データと整合的な長期海洋環境再現データセット (ESTOC) を作成し、その解析を通じて気候変動に関わる海洋変動のメカニズム解明に取り組んでいる。得られた統合データセットは、表層から深層まで、様々な時空間変動をよく再現していることが確かめられている。このように、深層まで含めた全層における全球

長期データ統合実験が可能な本システムは、世界的にも稀有である。本研究では、このシステムを基に、観測データを活用して拡散係数を最適化するというアプローチでデータの統合を実施する。この際、四次元変分法随伴法データ同化手法を応用することで、力学的に矛盾しない解析値を創生する。随伴方程式から得られる拡散係数に関する感度と実際の海洋混合観測を直接リンクさせる全球規模のデータ統合スキームはこれまでに例を見ない。

## 3. 主な成果

鉛直混合の主なエネルギー源は、風と潮汐である。まず、潮汐モデルから推定される現実的な潮汐エネルギー分布を元に、鉛直拡散係数を算出する複数のモデルコンポーネントを、データ統合システムで用いる数値モデルに組み込んだ (図1)。これにより、エネルギー論的に信頼性のより高いシミュレーション実験が可能となり、観測によって得られた乱流エネルギー散逸率を取り込む基盤を確立した。

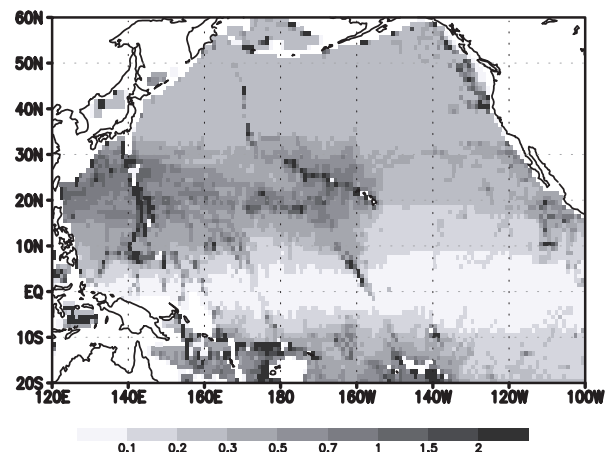


図1 新たな数値モデルにおける2500m深の鉛直拡散係数 ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )。潮汐エネルギー散逸を反映して、海底地形近傍で強い拡散が生じている。

次に、水温・塩分等の観測データに対する、鉛直拡散係数の感度を計算する随伴モデルを作成した。随伴モデルは、四次元変分法を用いたデータ統合システムの根幹を成すコンポーネントである。図2に、この随伴モデルを用いて計算された現実の水温塩分データに対する鉛直拡散係数の感度を示す。この図は、観測データから評価された、図1に対応する鉛直拡散係数の修正に関する情報をしめしており、この深度では、海底地形に起因するように見える組織的な感度がみてとれる。

この事は、潮汐混合スキームに用いられている未知パラメタを制御変数として最適化を行うという方針により、データ統合システムによる海洋環境場の再現性を向上しうる事を示唆している。図3は、各モデルパラメタの感

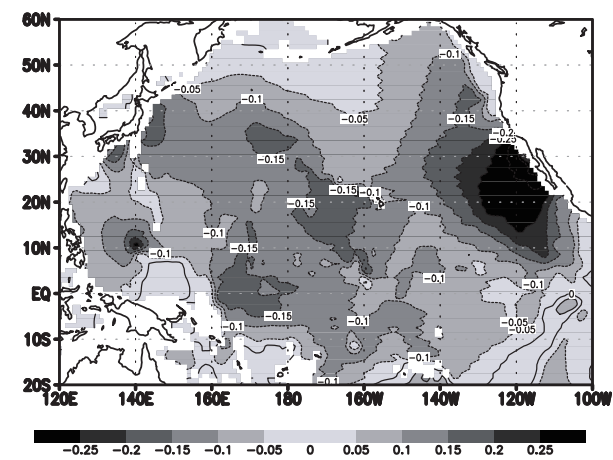


図2 歴史的な水温塩分データに関する2500m深の鉛直拡散係数 ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ) の感度。

度である。試験的に編集した現実の水温塩分データに対する結果であり、その解釈については注意が必要だが、データ統合システムの根幹をなす随伴モデルが完成し、実際の観測データを適応してパラメタ感度を得た事は大きな成果である。

#### 4. 統合データセットの作成

乱流エネルギー散逸率の観測項および潮汐混合スキームのパラメタの背景項をデータ統合に用いる評価関数をシステムに組み込み、共役勾配法等の最適化に用いるスキーム等の整備もほぼ完成している。現在、鉛直混合観測データのデータ処理を進めながら、統合データセットのプロトタイプを作成する計算の最終調整を実施している。

今後は、このシステムを用いたデータ統合実験を試験的に進めながら、最適化プロセスの精緻化を行うことで、乱流観測を含む全球海洋観測をベースとした鉛直拡散係数に関するパラメタの最適値を得る。このパラメタを用いた計算結果がすなわち統合データセットとなり、その解析を通して、これまでの海洋循環像がどのようにリバイスされるかを明らかにし、現実の海洋循環における鉛直混合の役割を再評価する予定である。

#### 5. 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、KAKENHI15H05817/H05819の支援を受けて行われました。

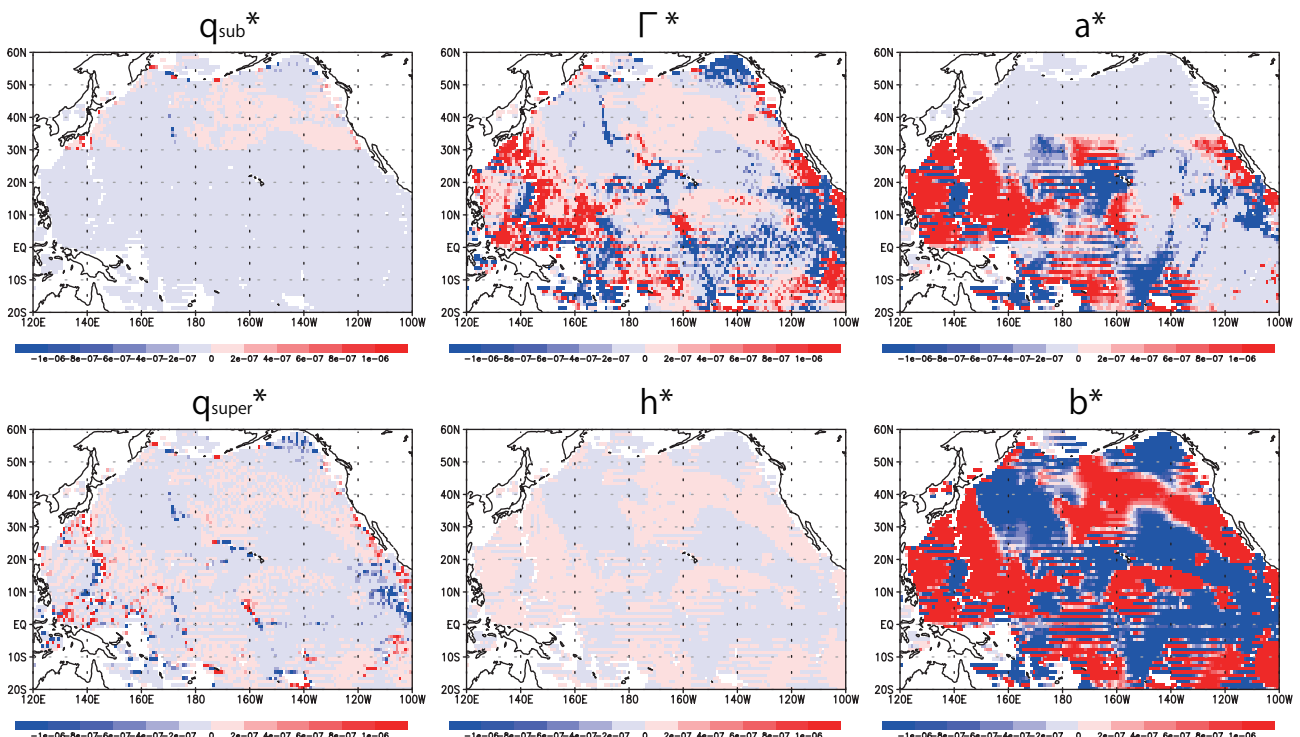


図3 水温塩分の歴史的観測データに関する2500m深の鉛直拡散係数の感度から計算された潮汐混合スキームに用いられている未知パラメタの感度。この情報を用いて統計的に最適化パラメタを評価する。

# Improved Global Ocean State Estimation by Using Ocean Mixing Observations

Project Representative

Shuhei Masuda      Research and Development Center for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Authors

Shuhei Masuda<sup>\*1</sup>, Satoshi Osafune<sup>\*1</sup>, Nozomi Sugiura<sup>\*1</sup> and Toshimasa Doi<sup>\*1</sup>

\*1 Research and Development Center for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

An oceanic data synthesis system which enables us to directly integrate ocean mixing observations was constructed. We applied a 4-dimensional variational data assimilation approach to do this. The data synthesis system is improved in representation of ocean mixing in conjunction with some sophisticated model and data synthesis schemes. We can successfully obtain an adjoint sensitivity of ocean mixing parameters to a realistic temperature and salinity observations. Ocean data synthesis experiments are now carrying out to generate an improved ocean state estimation.

**Keywords:** Climate Change, Ocean Mixing, Data Assimilation

## 1. Introduction

Ocean mixing is key dynamics which determine how oceanic gyres and circulations are formed; in particular meridional overturning circulations are. Recently, the number of direct and indirect observations for the ocean mixing is getting increasing. Within this background, an ocean state estimate with such new observations is focused on.

Here, we have constructed a new data synthesis system applying a 4D-VAR adjoint method, which can provide an improved state estimation to which recent ocean mixing information is incorporated.

## 2. Data Synthesis System

Estimated State of global Ocean for Climate Research (ESTOC) system is used as a basic platform ([1]Osafune et al., 2015, [2] Doi et al., 2015).

The used OGCM is version 3 of the Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL; NOAA, USA) Modular Ocean Model (MOM3) ([3] Pacanowski and Griffies, 2000). This is a quasi-global model covering the region between 75°S and 80°N. The horizontal resolution is 1° in both longitude and latitude and involves 45 levels.

The data synthesis method is based on 4D-Var. An adjoint approach is applied for physical parameters, a Green's function approach ([4] Menemenlis et al., 2005) biogeochemical ones.

## 3. Results

Figure 1 shows spatial distributions of adjoint sensitivity of model mixing parameters to a historical ocean temperature and salinity observations. The allover pattern of some sensitivity is seemingly related to bottom topography, which is largely consistent with previous studies. (e.g., [5] Liu et al., 2014).

This sensitivity is useful and essential model variable to integrate mixing observations since it clearly shows information to reduce cost values in the 4D-VAR data synthesis system.

## 4. Discussions

Our system can provide a prototype dataset, which is useful for dynamical analysis of global changes in conjunction with ocean circulations and gyres to re-access the estimation for oceanic heat and mass transports. It should contribute to better understanding of global changes.

## Acknowledgement

This work was supported by a Grant-in-Aid for Scientific Research on Innovative Areas “Frontier of Deep Ocean Research: Turbulent Upwelling Circulation Experiment” [No. 4702;KAKENHI15H05817/H05819].

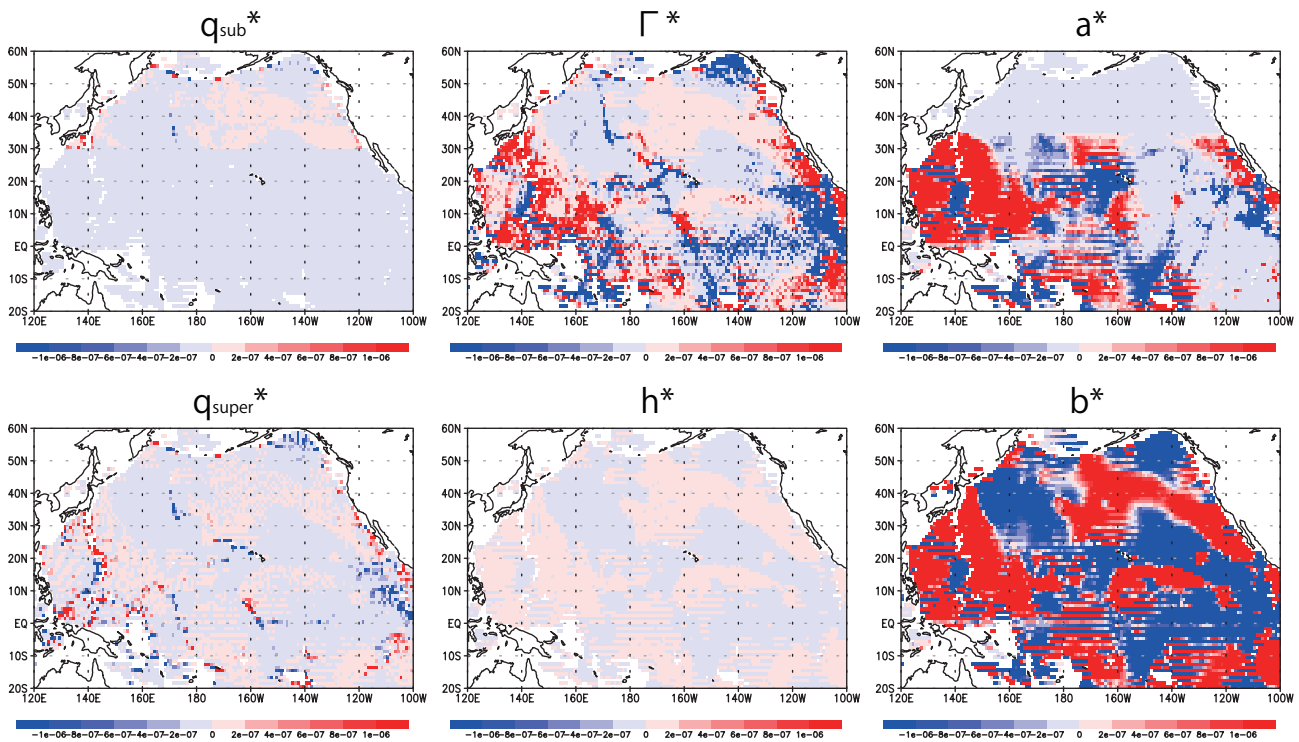


Fig. 1 Adjoint sensitivity of ocean mixing parameters calculated by our 4D-VAR system. Historical temperature and salinity data is applied to obtain this distributions.

## References

- [1] S. Osafune, S. Masuda, N. Sugiura, and T. Doi, "Evaluation of the applicability of the Estimated Ocean State for Climate Research (ESTOC) dataset", *Geophys. Res. Lett.*, 42, 12, pp4903-4911, 2015
- [2] T. Doi, S. Osafune, N. Sugiura, S. Kouketsu, A. Murata, S. Masuda, and T. Toyoda, "Multi-decadal change in the dissolved inorganic carbon in a long-term ocean state estimation", *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 7, 4, pp1885-1990, 2015.
- [3] R. Pacanowski, and S. Griffies, *Mom 3.0 Manual*, 680 pp, Geophys. Fluid Dyn. Lab., Princeton, NJ, 2003.
- [4] D. Menemenlis, I. Fukumori, and T. Lee, "Using Green's functions to calibrate an ocean general circulation model", *Monthly weather review*, 133, 5, pp1224-1240, 2005.
- [5] C. Liu, A. Köhl, and D. Stammer, "Interpreting layer thickness advection in terms of eddy-topography interaction", *Ocean Modell.*, 81, pp65-77, 2014