

## 長期海洋環境再現実験の精緻化への取り組み

課題責任者

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

著者

長船 哲史\*, 杉浦 望実\*, 土居 知将\*, 瀬瀬 慎也\*

\*海洋研究開発機構 地球環境部門 海洋観測研究センター

キーワード：海洋，データ同化，海洋環境再現，シグネチャ，溶存鉄

## 1. はじめに

海洋は、大量の熱や温室効果ガス等の物質を吸収・輸送することで、気候システムの長期的な変動において重要な役割を果たすと考えられる。このため、海洋環境変動の実態を把握し、その変動メカニズムを理解することは、重要な課題である。この目的のためには、離散的な観測データを、数値モデルの方程式に則って力学的に内挿する、海洋環境再現実験が有効な手法の一つである。本課題では、海洋大循環モデルに対し、強拘束の四次元変分法データ同化手法を応用した最適化を行うことで、熱・物質の保存性を満たした長期海洋環境再現実験を実施している。この取り組みにおいては、数値モデルが持つ表現力が重要な要素となる。本報告書では、(1) 表現誤差を持つモデルに対して、観測プロファイルのマクロな形状を崩さずにデータを同化することが可能な新たな手法の開発、および(2) 物質循環モデルの表現力向上に資する鉄輸送モデルの最適化に関する結果を報告する。本年は、この他にも、ベースとなる物理モデルの表現力向上を目的とした拡散スキームの更新なども進めている。

## 2. 鉛直プロファイルの直接比較による海洋データ同化

海洋データ同化においては、観測点での測定値に、モデル内の対応する点の計算値が合うように制御変数を調整するのが一般的である。モデルの表現誤差が極めて小さい場合には、この方法が有効であると考えられる。しかし、実際の海洋大循環モデルには大きな表現誤差が見られることが一般的であるため、プロファイルのマクロな

形状を崩すことなく観測値を導入する方法が求められる。本研究では MRI.COM ベースの海洋大循環モデルを用いて、プロファイルの直接比較によるデータ同化を行うためのシステムを構築し、試験的なデータ同化実験を行った。

コスト関数に関しては、モデルプロファイルのシグネチャ  $Sig(X_i)$  のメッシュ内平均と観測プロファイルのシグネチャ  $Sig(Y_j)$  のメッシュ内平均との距離  $dist$  をすべてのメッシュ  $\mathcal{M}$  に亘って足しあわせたものを観測コスト  $J_{obs}$  とした。

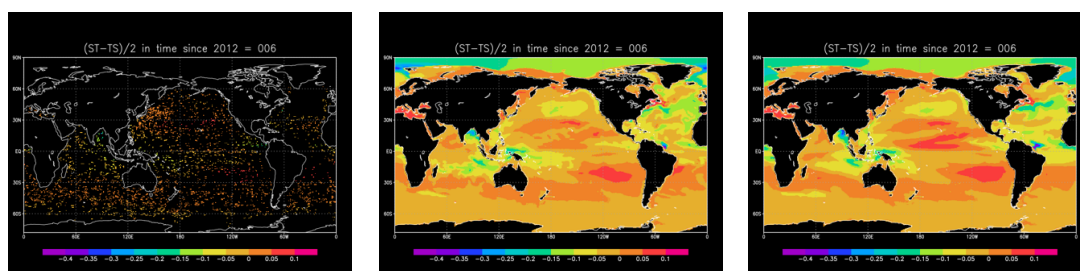
$$J_{obs}(u) = \frac{1}{2} \sum_{\mathcal{M}} dist^2 \left( \frac{1}{I_{\mathcal{M}}} \sum_{i=1}^{I_{\mathcal{M}}} Sig(X_i), \frac{1}{J_{\mathcal{M}}} \sum_{j=1}^{J_{\mathcal{M}}} Sig(Y_j) \right).$$

ここで、モデルプロファイル  $X_i$  は、制御変数  $u$  の関数になっていることに注意する。また、シグネチャは、経路  $X: [0,1] \rightarrow \mathbf{R}^d, t \mapsto X_t$  に対して、以下のように反復積分として定義される。

$$Sig(X) = 1 + \int_{0 < t_1 < 1} dX_{t_1} + \int_{0 < t_1 < t_2 < 1} dX_{t_1} \otimes dX_{t_2} + \dots$$

また、制御変数  $u$  としては、海洋の初期状態と大気フラックスとを用い、計算期間は 2012 年の一年間とした。4 次元変分法においては、降下法を用いて制御変数を調整することにより、コスト関数を最小化する。

計算結果の一例を図 1 に示す。シグネチャの水平分布を見ると、モデルプロファイル (右) が観測された Argo プロファイル (左) に近づいている (中央) ことが定量的に示された。また、海面高度等もある程度適切に修正され



(図 1) 塩分  $S$  と水温  $T$  に関する反復積分  $\int_{0 < t_1 < t_2 < 1} dS_{t_1} dT_{t_2} - dT_{t_1} dS_{t_2}$  の水平分布

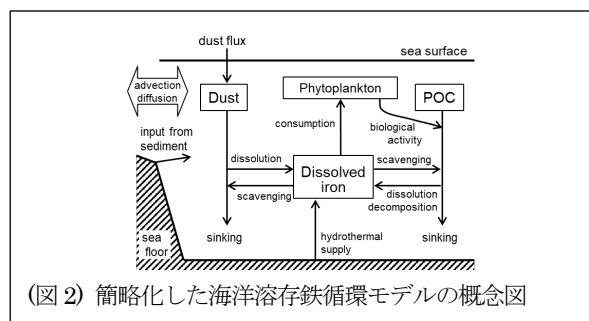
(2012 年 6 月; 左: 観測、中央: データ同化、右: シミュレーション)

ていることがわかった。このことにより、プロファイルの直接比較による変分法データ同化が機能することが示された。以上の結果については、国際ワークショップにおいて口頭発表を行った(Sugiura et al. 2022)[1]。

### 3. 溶存鉄の観測データを取り込んだ全球海洋溶存鉄分布の推定

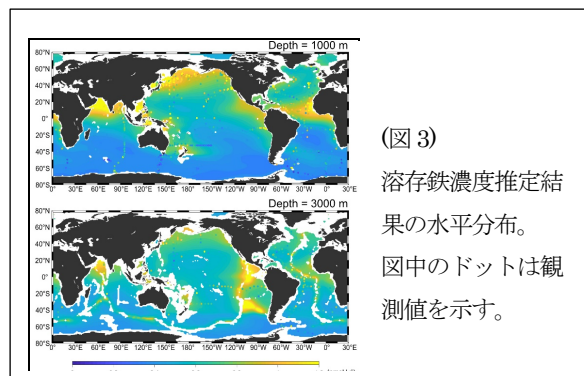
海洋溶存鉄の存在は、一次生産に重要な影響を及ぼしている。近年の海洋観測によって多くの海域で溶存鉄に関する情報が得られているが、海洋中の溶存鉄を正確に測定することが困難である理由から、濃度と循環を制御するプロセスの速度、ひいては世界の基礎生産量の決定要因としての溶存鉄の役割に関する知識はまだ限られている。近年まとめられた The GEOTRACES Intermediate Data Product 2021 (GEOTRACES Intermediate Data Product Group, 2021[2]) に収録されている海洋溶存鉄の観測データからは、限られた海域ではあるが海盆スケールでの鉛直断面分布が見られるようになってきた。しかし、世界の海洋には溶存鉄の観測がない海域も多く、全球の鉄分布の全体像を観測だけで把握することは困難であり、数値モデルを利用することが有効な手段の一つになる。我々は、観測と鉄循環の単純なモデルの両方を用いて海洋中の溶存鉄濃度の 3 次元格子状データセットを構築した。

本研究では、Moore and Braucher (2008) [3] および Tagliabue et al. (2017) [4] に基づき、海洋流動場の移流と拡散に対して海洋溶存鉄の供給源と吸収源を加えた簡略的な海洋鉄循環モデル(図 1)を構築し、全球海洋に適用した。海洋循環場には本課題で開発・運用している四次元変分法海洋データ統合システムから得られた長期海洋環境再現データセットの ESTOC を用いた。観測データとしては上述の The GEOTRACES Intermediate Data Product 2021 に加えて Nishioka et al. (2020) [5] を用い、観測データとモデルの統合は、グリーン関数法を応用した鉄循環過程のモデルパラメータの最適化により実現した。パラメータの最適化には全球海洋を大西洋、太平洋、インド洋、南大洋、北極海の五つの海盆に分割し、それぞれの海盆で最適値を探索した。



最適化したパラメータを用いてモデルを駆動することで、全球海洋の気候学的な溶存鉄分布を取得した。表層での鉄の分布は大気ダストの分布が反映された様子が見られる一方、深い場所の分布には堆積物や熱水プルームからの影響が強く反映されている様子 (Nishioka et al.,

2013 [6]; Vu & Sohrin, 2013 [7]) が表現されており、同化した溶存鉄濃度の観測値と矛盾しない 3 次元分布を再現することに成功した(図 3)。海盆毎の収支解析の結果、大西洋と太平洋では鉄の滞留時間に大きな違いが生じており、海洋内部での鉄の循環過程に特徴的な違いのあることが示唆された。



### 謝辞

本研究の一部は、JST、AIP 日独仏 AI 研究、JPMJCR20G5 および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)」、KAKENHI JP15H05817/H05819 の支援を受けて行われました。

### 文献

- [1] N. Sugiura, “Ocean data assimilation based on MMD between sets of profiles, Joint OS-Eval-TT and CP-TT workshop, (2022)
- [2] GEOTRACES Intermediate Data Product Group, The GEOTRACES Intermediate Data Product 2021 (IDP2021), NERC EDS British Oceanographic Data Centre NOC, (2021)
- [3] Moore, J. K., & Braucher, O., Sedimentary and mineral dust sources of dissolved iron to the world ocean, *Biogeosciences*, 5 (3), 631-656, (2008)
- [4] Tagliabue, A., Bowie, A. R., Boyd, P. W., Buck, K. N., Johnson, K. S., & Saito, M. A., The integral role of iron in ocean biogeochemistry, *Nature*, 543, 51-59, (2017)
- [5] Nishioka, J., Obata, H., Ogawa, H., Ono, K., Yamashita, Y., Lee, K. J., et al., Subpolar marginal seas fuel the North Pacific through the intermediate water at the termination of the global ocean circulation, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, (2020)
- [6] Nishioka, J., Obata, H., & Tsumune, D., Evidence of an extensive spread of hydrothermal dissolved iron in the Indian Ocean. *Earth and Planetary Science Letters*, 361, 26-33, (2013)
- [7] Vu, H. T. D., & Sohrin, Y., Diverse stoichiometry of dissolved trace metals in the Indian Ocean, *Scientific Reports*, 3, 1745, (2013)