

四次元変分法データ統合システムを用いた全球長期海洋環境の再現

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*, Derot Jonathan*, 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

気候システムの変動の理解には、大量の熱や物質を吸収・輸送する海洋循環の把握が重要である。離散的な観測データを有効に利用し、海洋変動の実態を把握し、そのメカニズムを理解するためには、データ同化による海洋環境再現実験が有効な手段である。特に海洋の熱・物質の長期的かつ巨大なリザーバーとしての機能の重要性を評価するためには、海洋内部における熱・物質が保存されることが求められる。そこで、本課題では、強拘束の四次元変分法を用いて、モデル初期値および大気外力等の時空間的境界条件および、モデルパラメータのみを最適化することで、モデル方程式に則ってデータを補間する力学内挿を採用している。この手法は、一方で、数値モデルが持つ表現力が再現性に対し比較的強い制限要因になる。この点も考慮して、海洋環境再現実験のさらなる精緻化を目的として、数値モデル、観測データ、同化手法の三つの視点から、システムの高度化を進めている。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の進捗、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高度化を通じて得られた科学的知見について報告する。本年は、この他にも、ベースモデルで表現が困難な陸域由来の水塊への影響を模した陸域境界フラックスを動的に推定する機能の実装も進めている。

2. シグネチャ法を応用した海洋データ同化

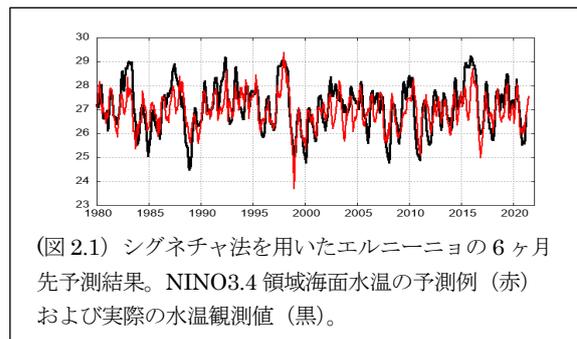
本研究では、海洋の大きな構造を捉えるために「シグネチャ法」を応用することに挑戦している。シグネチャは、経路データの構造を特徴づける変量であり、多次元経路 $X: [0,1] \rightarrow \mathbf{R}^d, t \mapsto X_t$ に対して、以下のように反復積分の直和として定義される。

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

この列は経路を完全に記述することができるが、適当な次数で打ち切ることによって経路のマクロな構造のみを抽出することもできる。また、反復積分は経路のサンプル集合の統計モーメントを表現しており、経路に対する非線形関数の基底を構成する。このような性質により、シグネチャは経路データに係る機械学習に極めて有用である

ことが知られており、近年、多くの応用例が見られるようになってきている。

本年度は、シグネチャ法の基本機能の確認として、エルニーニョ時系列の予測を行った結果（図 2.1）を、論文として出版した(Derot et al., 2024[1])。複数の気候指標の月平均時系列をシグネチャに変換することで、半年先のエルニーニョ水温を、予測誤差 0.59°C という統計モデルとしてはトップレベルの精度で予測することに成功した。

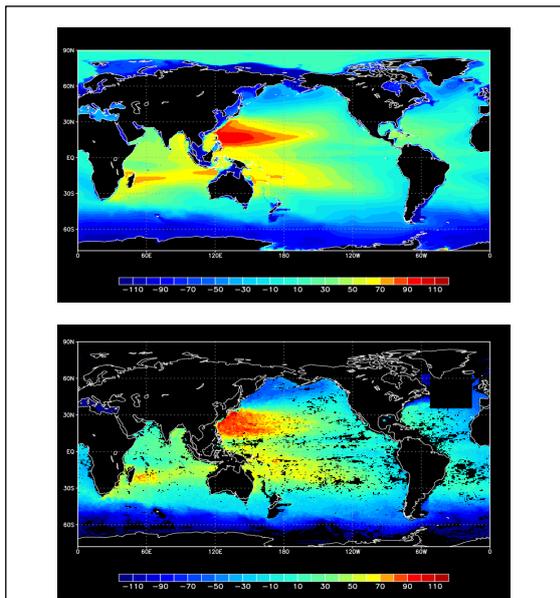


(図 2.1) シグネチャ法を用いたエルニーニョの 6 ヶ月先予測結果。NINO3.4 領域海面水温の予測例 (赤) および実際の水温観測値 (黒)。

さらに、シグネチャ法を観測演算子に適用した 4 次元変分法全球海洋データ同化システムを作成し、10 年間の同化ウィンドウで性能確認を行った。特に、熱容量や、温度塩分ダイアグラム上の面積やステリック高さなどは、シグネチャを構成する反復積分の一次結合で表現することができ、コスト関数において適切に観測への拘束がかかることが示された (図 2.2)。また、4 次元変分法の最適化反復計算が地球シミュレータ上で適切かつ効率的に動作することも併せて確認することができた。

3. 陸棚堆積物から供給された溶存鉄の拡がりの推定

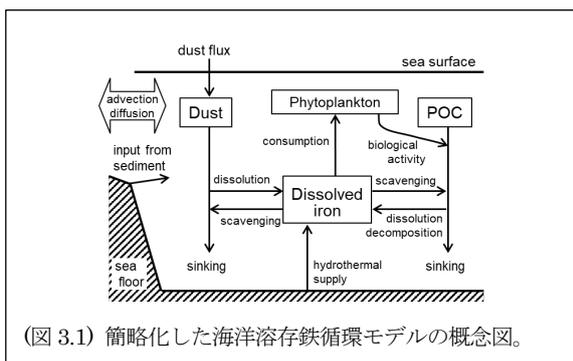
海洋溶存鉄の存在は、一次生産に重要な影響を及ぼしている。近年の海洋観測によって多くの海域で溶存鉄に関する情報が得られているが、海洋中の溶存鉄を正確に測定することが困難であったことから、濃度と循環を制御するプロセスの速度、ひいては世界の基礎生産量の決定要因としての溶存鉄の役割に関する知識はまだ限られている。近年まとめられた The GEOTRACES Intermediate Data Product 2021 (GEOTRACES Intermediate Data Product Group, 2021[2]) に収録されている海洋溶存鉄の観測データからは、限られた海域で



(図 2.2) データ同化 (左) と観測 (右) におけるステレリック高さ偏差の比較。いずれも、シグネチャの線形結合として診断量を算定した。

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する中で、陸棚堆積物から海洋中に供給される鉄が海洋溶存鉄の濃度分布に及ぼす影響を調べた。

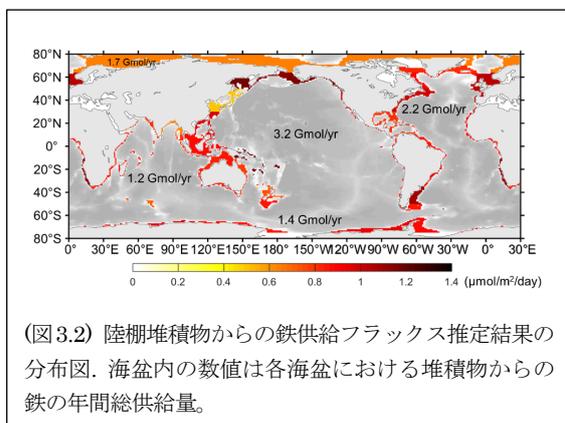
本研究で使用する数値モデルは、Moore and Braucher (2008) [3] および Tagliabue et al. (2017)[4] に基づき、海洋流動場の移流と拡散に対して海洋溶存鉄の供給源と吸収源を加えた簡略的な海洋鉄循環モデル(図 3.1)である。海洋循環場には本課題で開発・運用している四次元変分法海洋データ統合システムから得られた長期海洋環境再現データセットの ESTOC を用いた。観測データとしては上述の The GEOTRACES Intermediate Data Product 2021 に加えて Nishioka et al. (2020) [5] を用い、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。最適化を行うモデルパラメータの中の陸棚堆積物からの溶



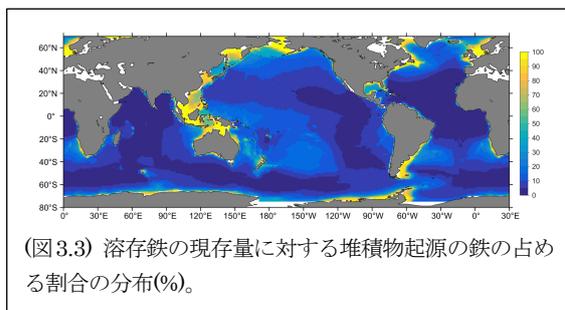
(図 3.1) 簡略化した海洋溶存鉄循環モデルの概念図。

存鉄フラックスについて、沿岸陸棚域をいくつかのセクションに区分してそれぞれのセクションからのフラックスを最適化することで、沿岸域からの鉄供給量の地域的な違いや海洋内部での拡がりについて推定した。

最適化したパラメータを用いてモデルを駆動して、全球海洋の気候学的な溶存鉄分布を再現するとともに、陸棚堆積物からの鉄供給量の地域的な違いや、溶存鉄濃度分布における陸棚起源の鉄の占める割合を推定した。太平洋ではオホーツク海やベーリング海沿岸、オーストラリア東部の島嶼部で高い供給フラックスが推定された他、南大西洋の南米側とアフリカ大陸側、北海沿岸にも比較的供給量の多い場所が現れた(図 3.2)。また、溶存鉄の現存量に対して、陸棚堆積物起源の鉄の現存量が占める割合の分布を推定した(図 3.3)。北側では高緯度帯、南側では亜熱帯ジャイア辺りに比較的高い割合で分布していることがわかる。今後は、推定結果の妥当性について検証していくことが課題である。



(図 3.2) 陸棚堆積物からの鉄供給フラックス推定結果の分布図。海盆内の数値は各海盆における堆積物からの鉄の年間総供給量。



(図 3.3) 溶存鉄の現存量に対する堆積物起源の鉄の占める割合の分布(%)。

謝辞

本研究の一部は、JST、AIP 日独仏 AI 研究、JPMJCR20G5 および JSPS 科研費 JP22H05207 (マクロ沿岸海洋学: 逆推定法を利用した太平洋大規模循環・変動と沿岸水の関わりの解明) の支援を受けて行われました。

文献

[1] Derot, J., Sugiura, N., Kim, S., & Kouketsu, S. (2024). Improved climate time series forecasts by machine learning and statistical models coupled with signature method: A case study with El Niño. *Ecological Informatics*, 79, 102437.

- [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)