

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*, 土居 知将*, 杉浦 望実*, 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，沿岸水塊形成

1. はじめに

海洋は、熱や物質の巨大なリザーバーとしての役割を果たしており、気候システムを安定化させる働きをしていると考えられる。例えば、温暖化に伴う熱の9割、人為起源二酸化炭素の3割を海洋が吸収していると見積もられている。このため、海洋変動の実態を把握し、そのメカニズムを理解することは、気候システムの変動を理解し、将来を予測する上で非常に重要である。

このような目的のため、本課題では、長期海洋環境再現実験に取り組んでいる(Estimated State of Ocean for Climate research: 以下、ESTOC)。これは、データ同化技術を応用し、海洋大循環モデル(以下、OGCM)を用いて離散的な観測データを統合する取り組みである。物理場の再現では、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な境界条件およびモデルパラメータのみを制御することで、モデル方程式に則ってデータを補間している。さらに、得られた物理場の上で物質循環モデルを走らせ、グリーン関数法を用いたパラメータの線形最適推定を行うことで、炭素循環の再現にも取り組んでいる。こうして得られる物理・物質循環のデータセットは、解析期間を通じてモデル方程式に従って時間発展し、海洋内部における熱・物質が保存されるという特徴を持つ。従って、海洋の長期的且つ巨大なリザーバーとしての機能の重要性を評価する上で、有利な手法と言える。しかしながら、この手法は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という問題点もある。本課題では、この手法の特徴を踏まえつつ、海洋環境再現実験をさらに精緻化することを目的として、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)横方向の拡散過程に着目した物理モデルの高度化を通じた海洋環境再現実験の精緻化への取り組みに関する初期解析結果および、(2)線形最適化を通じた沿岸域から外洋域への溶存物質フラックスの推定に関する途中経過について報告する。本年度は、この他にも、次世代海洋データ同化システムに対し、最も基本的な観測データの一つである海面水温データを同化するコンポーネントの実装を進めた他、シグネチャ法や物理法則情報付きニューラルネットワークを用いたデータ解析手法の開発等にも取り組んでいる。

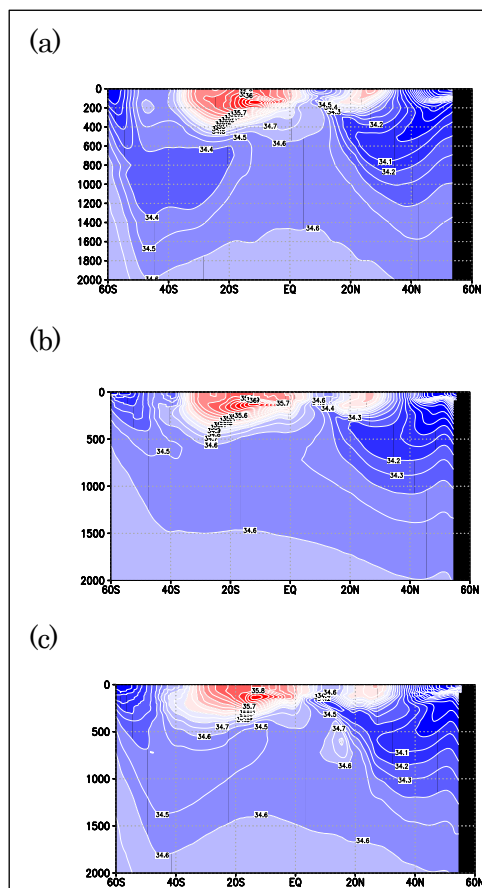
2. 横方向拡散の高度化による精緻化の試み

海洋が吸収した熱・物質がどのように海洋内部に保持されるのかを再現するには、移流・拡散を通じた海洋内部での輸送過程の再現が重要である。長期海洋環境再現では、長期間安定的にアジョイントモデルを走らせる必要があるため、現状では非線形性の弱い比較的解像度のモデルを用いられている。そのため、重要な輸送過程である中規模渦等を介した拡散過程を表現するのに、サブグリッドスケールのパラメタリゼーションを用いる必要がある。近年のいくつかの海洋環境再現実験により、四次元変分法を用いて各種渦拡散係数の三次元構造を制御することの有効性が確かめられており、特に層厚拡散を調整することの重要性が指摘されている(e.g. Liu et al., 2012; Forget et al., 2015)。一方で、層厚拡散については、理論・観測・数値実験等の様々な手法を用いた研究から、多くの知見が得られており、それらに基づいて複数の数値スキームが提案されている。同化システムのモデルにこうしたスキームを取り入れることは、層厚拡散に関するこれまでの知見を先見情報として用いることに相当しており、効率的に海洋環境再現実験を精緻化できる可能性がある。

本研究では、ESTOCのOGCMに対して、Eden and Greatbatch (2008)が提案した、傾圧不安定理論に基づいてモデルの予報変数から層厚拡散の三次元構造を推定するスキーム(以下、EGスキーム)を導入し、長期海洋環境再現実験を行った。EGスキーム導入以外にも、潮汐モデルから推定したエネルギー散逸率の分布に基づいて内部領域における鉛直拡散係数を計算するKawasaki et al. (2021)のスキームを導入するなど、いくつかの点でモデルを更新した。このモデルに対して、グリーン関数法を用いて物理パラメータ(EGスキームのパラメータを含む)を線形最適推定したのちに、四次元変分法を用いた長期海洋環境再現実験を行った。

ここでは、鉛直塩分極小で特徴づけられる中層水の再現性について比較した結果を紹介する(図 2.1)。観測からは、中層水が南北両半球の高緯度から低緯度中層に沈み込んでいる様子が捉えられている。同様の構造は海洋環境再現実験でもバージョンによらず再現されている。より詳しく見ると、全球一定値に層厚拡散を用いた旧バージョンと比べて、EGスキームを組み込んだ新バージョンでは南北両半球の中層水がより低塩になっており、観測

により近い構造を持っているのが分かる。必ずしもこの差が層厚拡散の取り扱いの違いの影響とは限らないものの、中層水形成において中規模渦が重要な役割を果たすと考えられることから、整合的な結果と言える。今後、より詳細な解析を行い、EG スキームを組み込んだモデルの有効性の検証を進める。



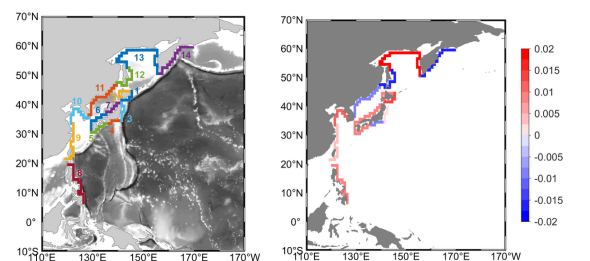
(図 2.1) 西経 160 度における 2005 年から 2008 年の平均塩分の南北断面図。(a) グリッド化した観測データ (MOAA-GPV)、ESTOC の (b) 半経験的な鉛直拡散スキームと全球一定値の層厚拡散係数を用いた旧バージョンおよび、(c) EG スキームを用いた新バージョン。

3. データ同化による沿岸からの溶存物質フラックスの推定

沿岸海洋には、陸域からの河川水や地下水、外洋からの海水を通じて様々な物質が供給されている。しかし、これら物質の外洋から沿岸への流入や沿岸から外洋への流出といった輸送の実態は把握されていない。沿岸－外洋間の時空間的に変動する輸送過程を理解するには、現場観測と数値モデルを組み合わせたアプローチが不可欠である。本研究では数値モデルと観測データを統合する同化手法を用いて、沿岸と外洋の間の物質輸送の定量的な推

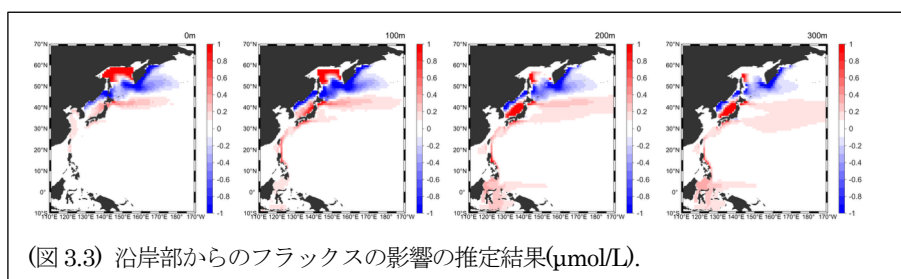
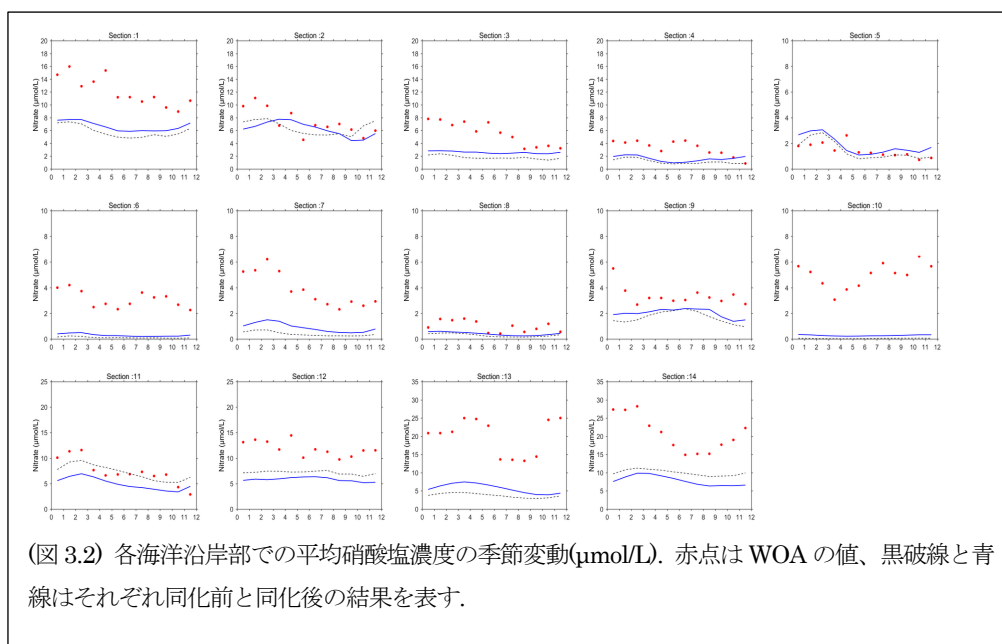
定の試みを行っている。ここでは栄養塩として数値モデルに組み込んでいる硝酸塩に着目し、データ同化手法を使った沿岸海域からのフラックスの推定を行った。

本研究で使用する数値モデルは、ESTOC の物理場の上で動く、NPZD 型の低次栄養段階生態系を組み込んだ全球海洋物質循環モデルである。生態系要素の栄養塩として導入した硝酸塩濃度に着目して、日本周辺海域での濃度分布の再現精度を向上させるために、同化手法を使って西部北太平洋沿岸部に付加する硝酸塩フラックスを推定した。観測値の同化にはグリーン関数法 (Menemenlis et al., 2005) を使い、生物地球科学のプロセスのパラメータを最適化するとともに、海洋沿岸部を 14 個のセクションに区切ったそれぞれからの硝酸塩フラックスを推定した。観測値には World Ocean Atlas の硝酸塩濃度データを利用した。



(図 3.1) 日本周辺沿岸部からのフラックス推定に用いた領域区分(左)と硝酸塩フラックスの推定結果(右)。

推定された海洋沿岸部からの硝酸塩フラックスの季節変動(図 3-2)を見ると、オホーツク海沿岸部のみは冬春夏にソース域で秋はシンク域となる結果になったが、その他の沿岸部ではソースとシンクが一年の中で入れ替わる結果にはならなかった。推定した沿岸フラックスを適用したモデル結果と WOA データを比較すると、全体としてモデル濃度は WOA より低い傾向だが、日本沿岸の太平洋側では比較的 WOA に近い濃度を得ることができた。一方で、同化前で WOA より低濃度の場所で同化後の濃度がさらに下がった場所もあり、物理場の影響を精査する必要が示唆された。沿岸フラックスの有無による差分解析からは、硝酸塩は日本沿岸およびフィリピンなど南部沿岸から供給され、黒潮続流に沿って分布が広がることが確認できる(図 3-3)。オホーツク海を除く日本海沿岸やカムチャツカ沿岸ではシンクとなるフラックスが推定されており、その影響は亜寒帯域にまで及んでいる。沿岸フラックスと濃度の季節変動が逆位相となる地点も見られ、沿岸域における水平移流の寄与を併せた検討が今後の課題である。



謝辞

本研究の一部は、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] Eden, C. & Greatbatch, R. J. (2008), Towards a mesoscale eddy closure. *Ocean Model.* 20 (3), 223-239.
- [2] Forget, G., Ferreira, D., Liang, X. (2015b), On the observability of turbulent transport rates by Argo: Supporting evidence from an inversion experiment. *Ocean Sci.* 11, 839-853.
- [3] Kawasaki, T., Hasumi, H., Tanaka, Y. (2021), Role of tide-induced vertical mixing in the deep Pacific Ocean circulation. *J. Oceanogr.* 77, 173-184.
- [4] Liu, C., Köhl, A., Stammer, D. (2012), Adjoint-based estimation of eddy-induced tracer mixing parameters in the global ocean. *J. Phys. Oceanogr.* 42, 1186-1206.
- [5] Menemenlis D, Fukumori I, Lee T (2005), Using Green's functions to calibrate an ocean general circulation model. *Mon Weather Rev* 133:1224-1240. <https://doi.org/10.1175/MWR2912.1>