

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*, 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，沿岸水塊形成

1. はじめに

膨大な熱や物質を吸収・輸送する海洋は、気候システムにおける熱や物質の巨大なリザーバーとしての役割を果たしている。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思われている。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、データ同化技術を応用し、海洋大循環モデルを用いて離散的な観測データを統合する、海洋環境再現実験に取り組んでいる。用いているデータ同化手法は、強拘束の四次元変分法であり、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。こうして得られるデータセットは、海洋内部における熱・物質が保存されることから、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、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)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有効性の検証結果（昨年度に初期解析結果を記載したが、本年度更なる解析を進め、国際誌に掲載された。）、および(2)ベースモデルで表現が困難な沿岸域における水塊形成の効果を側面からの外力として扱い、制御に用いる、という新しい機能を実装したシステムを用いて、双子実験を行なった結果について報告する。本年は、この他にも、次世代海洋データ同化システムの効率化に向けた海洋物理学的視点からの調査、BGCアルゴ溶存酸素データの同化によるインパクト評価に向けたシステム開発、沿岸域と外洋域との間の栄養塩フラックスの線形最適推定なども進めている。

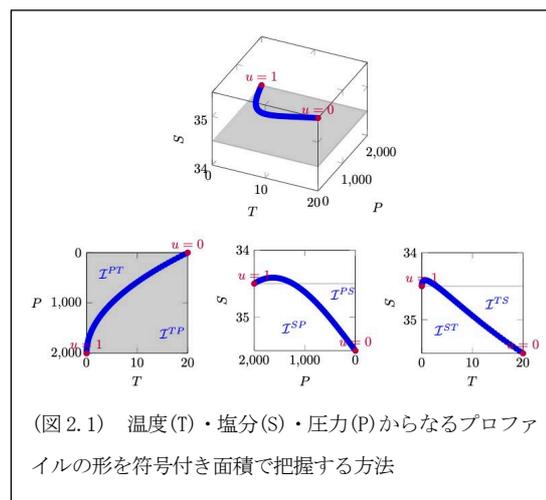
2. 観測プロファイルの特徴づける積分量に基づく海洋データ同化

アルゴプロファイルの効果的なデータ同化方法を検討

し、その成果を査読付き論文として出版した[1]。

従来のアルゴプロファイルのデータ同化においては、観測プロファイル各点の温度(T)、塩分(S)、圧力(P)を対応するモデルプロファイルの各点のそれらと比較していた。

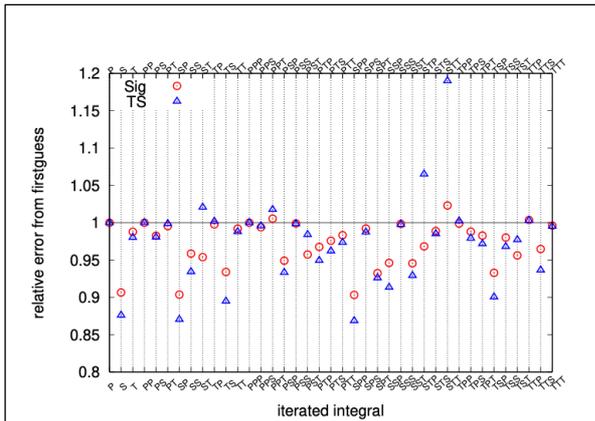
本研究においては、各観測プロファイルを温度、塩分、圧力を成分とする3次元の経路として捉え、それを種々の反復積分で表現した上で、モデルプロファイルの反復積分と比較する方法を開発した(図2.1に概念を示す)。これを数学用語を借りて「シグネチャ法」と呼ぶ。



(図 2.1) 温度(T)・塩分(S)・圧力(P)からなるプロファイルの形を符号付き面積で把握する方法

4次元変分法全球海洋データ同化システムにシグネチャ法に基づくコスト関数を実装したものを用いて、10年間の同化窓でデータ同化を実施し、従来法と結果を比較した。

図2.2に示すように、シグネチャ法を用いると各反復積分がバランスよく改善し、従来法のようにTS面上でのプロファイル形状が改悪するようなことは無くなった。TS面上での形状を代表する面積に関する誤差を水平分布(図3)で見ても、従来法において大きく悪化する領域(赤)がシグネチャ法では目立たなくなっていることがわかる。したがって、シグネチャ法を用いたデータ同化手法は、プロファイル形状を的確に捉えることで、物理場のバランスのとれた改善をもたらすことがわかった。また、本手法は種々の観測プロファイルから情報を効果的に引き出す手法として汎用性を持つ。



(図 2.2) データ同化による各反復積分の改善。データ同化前からの相対誤差をシグネチャ法(赤)と従来法(青)に関して示す。

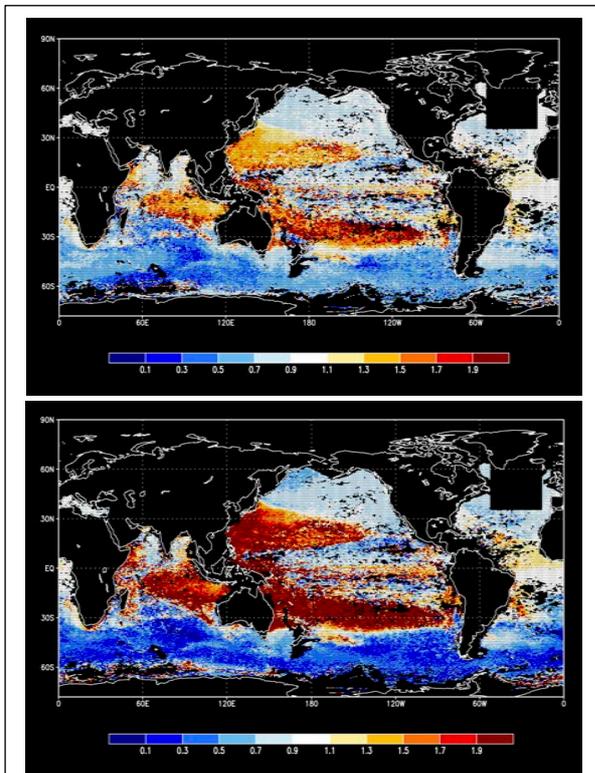


図 3 TS ダイアグラム上の面積 $(I^{ST} - I^{TS})/2$ に対する相対誤差の水平分布 (左: シグネチャ法, 右: 従来法)。青(赤)は、相対誤差が 1 より小さい(大きい)箇所。

3. 沿岸水塊形成の最適推定に向けて

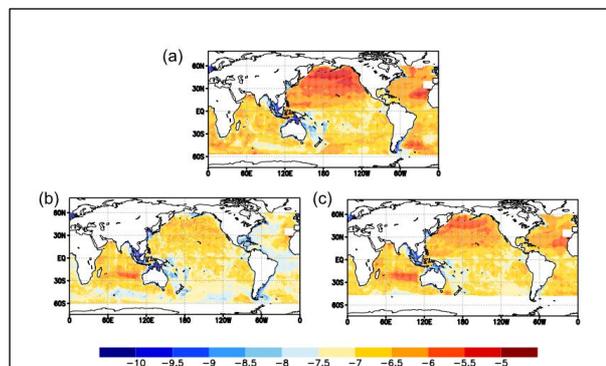
縁辺海や南極沿岸域等における水塊形成(以下、沿岸水塊形成と呼ぶ)は、外洋における海洋循環・水塊分布にも影響を与えており、海洋大循環モデルを用いて気候変動スケールでの海洋変動を再現する上で重要な要素の一つである。こうした沿岸水塊形成には、河川からの淡水流入や沿岸ポリニアにおける結氷過程に伴う高密度水形成、局所的な強い潮汐鉛直混合による変質など、空間スケ-

ールの小さなプロセスが重要な役割を果たす。

長期海洋環境再現実験では、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り、現状では、非線形性の弱い比較的解像度の低いモデルを用いる必要がある。そうしたモデルでは、沿岸水塊形成を正確に再現することは難しく、数値計算による誤差の要因となる。こうしたモデルの表現力に起因する誤差はシステムノイズと呼ばれ、データ同化における課題の一つとなっている。特に、保存的な同化手法を用いて長期変動を再現する際には、システムノイズの蓄積が再現性の大きな制限要因となる。そこで、ESTOC では、沿岸水塊形成と関連したシステムノイズを軽減するため、水塊形成域のみに、水温・塩分に関する亜表層フラックスを与えることで、沿岸水塊形成を擬似的に表現している。これは、外洋域から見れば、側面境界からの外力と見ることができる。このフラックスの推定には IAU 手法を応用しており、スピンアップ時に WOA の月平均気候値データにリストアすることで生じるフラックスの年平均気候値を用いてきた。但し、このフラックスには不確実性があることを考慮する必要がある。そこで、昨年度までに、アジョイントモデルを用いて観測とモデルの差に対する亜表層フラックスの感度を計算し、その情報に基づいて擬似的沿岸水塊形成を制御する仕組みを実装した。

本年度は、そのシステムを用いて双子実験を実施し、新機能の動作確認を行なった。双子実験では、フラックスが経年変化しないというシンプルな設定の元で、沿岸水塊形成効果のみが true run と異なる実験を初期推定場とし、true run の水温・塩分データを同化した。評価関数としては、true run との重み付き二乗誤差を用いた。計算期間は 60 年で、季節変動のみをもつ気候値外力により駆動した。初期値・大気外力等の通常の制御変数のみを用いた実験(noSFLUX) および、フラックスを制御変数に加えた実験(SFLUX)実施した。

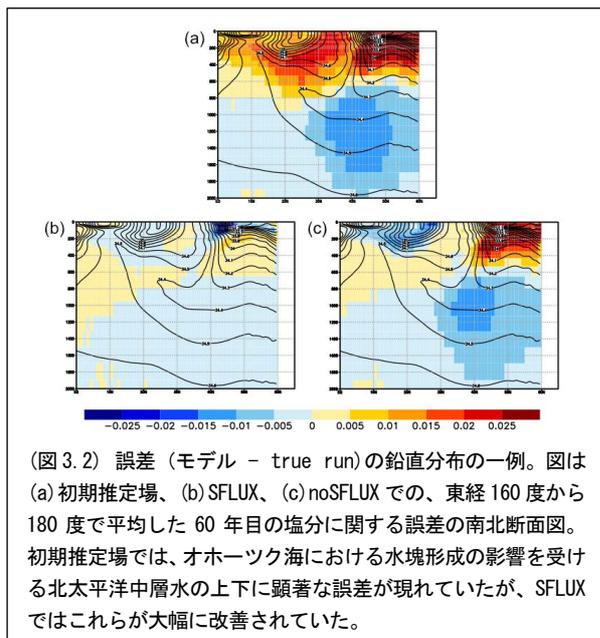
データ同化前の初期推定場では、疑似的水塊形成を加味するオホーツク海等の下流域において、誤差が大きい海域が広がっており、SFLUX・noSFLUX ともに誤差が減少していたが、SFLUX では noSFLUX と比べて効率的に誤差が減少していた(図 3.1)。



(図 3.1) 60 年目の塩分に関する評価関数の鉛直積分値を \log_{10} で表示。(a) 初期推定場、(b) SFLUX、(c) noSFLUX。

誤差の鉛直分布を比較したところ、初期推定場で見られた亜表層における誤差が、SFLUX で大幅に減少しており、新機能が正常に動作していることが確かめられた(図 3.2)。データ同化による全球平均海面高度の修正量の比較からは、沿岸水塊形成の誤差が、全球淡水収支の推定に対して無視できない影響を与える可能性が示唆された(非図示)。

この結果については、日本海洋学会秋季大会において口頭発表を行なった。



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] Sugiura, N., Kouketsu, S., and Osafune, S. (2024). Ocean data assimilation focusing on integral quantities characterizing observation profiles. *Front. Mar. Sci.*, 11.