

アンサンブルカルマンフィルタを用いた地表気圧・海面水温の同化実験

小山博司 (海洋研究開発機構)・石井正好 (気象研・気候)
建部洋晶・西村照幸 (海洋研究開発機構)・木本昌秀 (東大・大気海洋研)

1 はじめに

過去 100 年以上の長期にわたる全球大気の再現実験は、Compo et al. (2011) によって初めて行われた。そこでは大気大循環モデルにアンサンブル・カルマンフィルタ (Ensemble Kalman Filter: EnKF; Evensen 1994) を導入したデータ同化システムを用いて、1871 年から現在までの地表気圧観測値のみが同化され、全球大気の 3 次元的なデータセットが作成された。一方、Saha et al. (2010) は、大気海洋結合系でのデータ同化 (期間は 1978~2009 年) を実施した。従来の大気モデルのみのデータ同化に比べて、例えば熱帯西部太平洋での降水量と海面水温の関係などの再現性が現実的なものになることを示した。そこで、本研究では大気海洋結合系でのデータ同化システムを用いて、長期間の大気海洋場の再現へ向けた予備的な実験を実施した。長期の大気海洋データセットの作成が実現されれば、それは気候変動研究に大して有用なものとなるであろう。

2 データ同化システム

2.1 概要

これまで我々は大気海洋結合モデル MIROC を用いたアンサンブルデータ同化システムの開発を行ってきた (小山ら 2012)。これは EnKF を用いた大気海洋結合系でのデータ同化システムで、大気と海洋の両方の観測値の同化に対応している (図 1)。ここでは特に今回の研究に関連する箇所を中心に、本システムについて述べる。

2.2 MIROC

IPCC 第 4 次報告書 (AR4) 向けに用いられたバージョン (MIROC3m) を用いた。大気は水平解像度 T42、鉛直 44 層で、海洋は水平解像度 $1.4^{\circ} \times (0.5^{\circ} - 1.4^{\circ})$ 、鉛直 44 層である。

2.3 データ同化

導入した EnKF の手法は、局所アンサンブル変換カルマン・フィルタ (Local Ensemble Transform Kalman Filter: LETKF; Hunt et al. 2007, Miyoshi et al. 2007) である。誤差共分散行列の局所化の手法として、観測誤差を局所化する手法 (Hunt et al. 2007) を導入した。局所化の関数として Gaspari and Cohn (1999) で用いられた 5 次関数を使用した。また、誤差共分散の膨張には multiplicative inflation と呼ばれる手法を導入した。

以下のいずれかの方式で大気あるいは海洋の変数へ EnKF が適用される。

方式 1: 大気あるいは海洋のどちらか一方にのみ適用

方式 2: 大気と海洋のそれぞれに適用 (EnKF の計算は互いに独立して行われる)

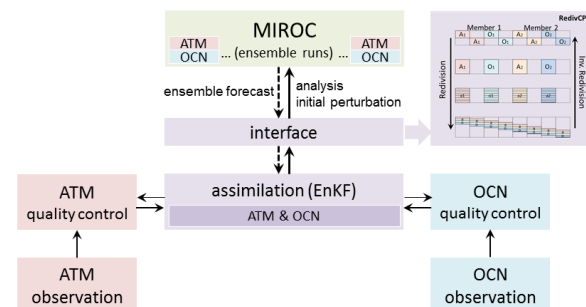


図 1: MIROC アンサンブルデータ同化システムの模式図

方式 3：大気と海洋に適用 (EnKF の計算は大気と海洋間の共分散も考慮することにより一括して行われる)

本システム独自の手法である方式 3 について詳細に記述する。同化の時刻になると、大気と海洋の変数を同一の解析用格子に座標変換し格子間隔を揃える。大気と海洋の変数間の共分散を計算し、その共分散に基づき大気の観測値から海洋の変数 (あるいは海洋の観測値から大気の変数) を修正する。実際の計算では局所化係数の値を調整し、観測によって修正されうる変数の鉛直方向の範囲を調整する。その局所化係数の具体的な値は、大気地表観測値の同化では、大気変数に対しては地表から $\sigma = 0.2$ まで 1、その上 $\sigma = 0.05$ にかけて 0 まで線形に減少させた値である。また、海洋変数に対しては表面から 300m まで 1、その下 1000m にかけて 0 まで線形に減少させた値である。一方、海洋表面の観測値の同化では、海洋変数に対しては、表面から 1500m まで 1、その下 3000m にかけて 0 まで線形に減少させた値である。また、大気変数に対しては $\sigma = 0.85$ まで 1、その上 $\sigma = 0.50$ にかけて 0 まで線形に減少させた値である。つまり、大気地表観測値は対流圏の大気に加えて表層の海洋を主に修正し、海洋表面の観測値は 1500m 以浅の海洋に加えて対流圏下層の大気を主に修正する。

海洋に対してのみ、EnKF で計算された初期値 (解析値と初期摂動) は、IAU (Incremental Analysis Update) 法を用いて徐々にモデルに入力される。これは場の急激な変化により海洋モデルの熱力学的な構造が崩れるのを防ぐためである (Deng et al. 2011)。

3 実験設定

3.1 観測値と検証用データ

大気観測値として ISPDv2 (International Surface Pressure Databank version 2) の地表気圧を、海洋観測値として COBE-SST (気象庁) の海面水温を使用した。積分期間は 2004 年 1 月～2010 年 12 月の 7 年間、アンサンブル数は 30、同化の時間間隔は大気海洋ともに 6 時間

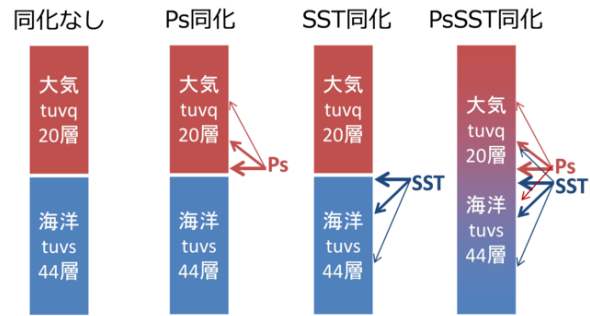


図 2: 実験の種類

である。検証用データとして、大気に対しては ERA-Interim 再解析データ (ECMWF) を、海洋に対しては ProjDv6.12 海洋客観解析データ (Ishii et al. 2003, 2006) を使用した。誤差はこれらのデータからの差で定義される。

3.2 実験の種類

図 2 で示す 4 種類の同化実験を行い比較した。一つ目は、大気海洋ともに同化をしない実験 (同化なし実験) である。二つ目は、地表気圧 (Ps) の観測値を用いて、大気の変数 (温度、風、比湿) を同化する実験 (Ps 同化実験) である。三つ目は、海面水温 (SST) の観測値を用いて、海洋の変数 (水温、流速、塩分) を同化する実験 (SST 同化実験) である。つまり二つ目と三つ目の実験には 2.3 節の方式 1 が使われる。四つ目は、地表気圧 (Ps) の観測値を用いて、大気変数に加えて海洋変数を同化し、海面水温 (SST) の観測値を用いて、海洋変数に加えて大気変数を同化する実験 (PsSST 同化実験) である。つまり 2.3 節の方式 3 が使われる。

4 結果

4.1 一点のみ観測を与えた場合

地表の観測値のみで対流圏内の大気場がどのように推定されるかの一例を示すために、観測値を一点のみ与えたときの結果を紹介する。まず、全ての観測点を用いた PsSST 同化実験を一年間実施したのち、観測を一点のみに削減し、1 同化サイクル (6 時間) の Ps 同化実験を実

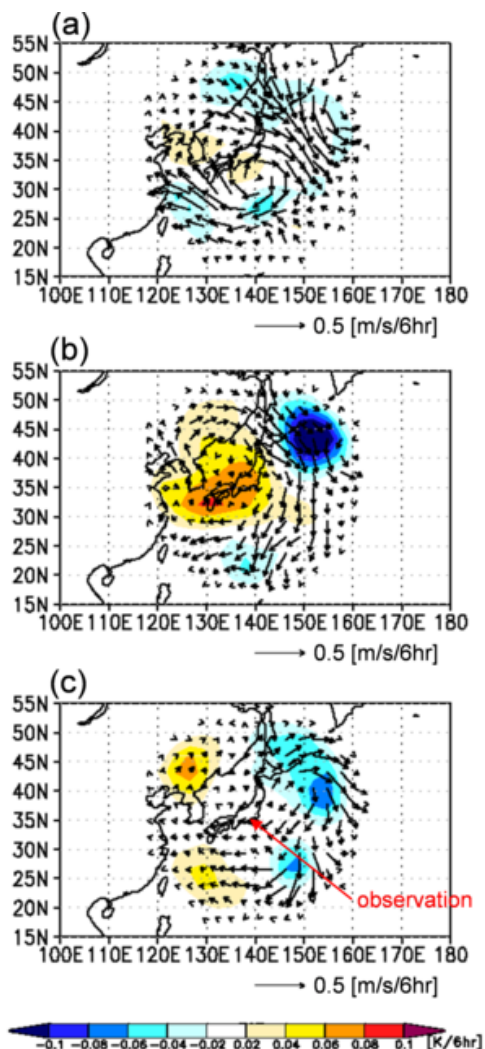


図 3: 一点 (35N,139E) の地表気圧の観測値を与えた Ps 同化実験の風 (ベクトル) および温度 (陰影) の解析インクリメント。(a) 上層 ($\sigma = 0.29$)、(b) 中層 ($\sigma = 0.5$)、(c) 表層 ($\sigma = 0.995$)。

施した。図 3 は、地表の観測点 (図 3c の矢印) にモデルより 1 [hPa] だけ高い地表気圧の観測値を与えた場合の解析インクリメント (モデル第一推定値からの修正量) である。風の解析インクリメントは、地表から対流圏上層まで観測点をほぼ中心とした時計回りの循環となっている。この観測点回りの高気圧性の循環は地衡風平衡の関係によって説明される。また、温度の解析インクリメントは高気圧性の循環の中心付近で高温、その周辺の北風域では低温、南風域では高温となる。こうした結果は、地衡風平衡の関係が良く成立する中高緯度における典型的な例であると考えられる。

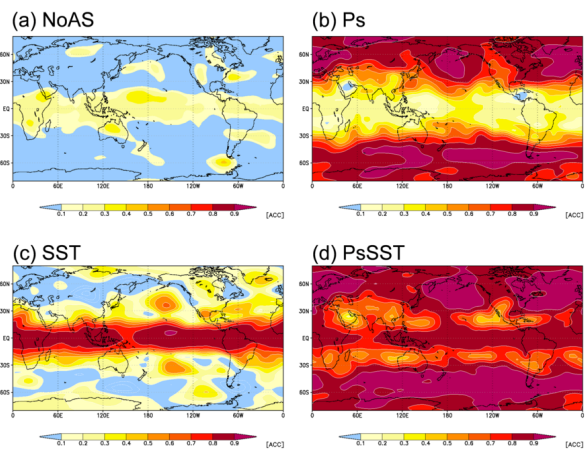


図 4: 500hPa の高度に対するアノマリー相関係数。(a) 同化なし実験、(b)Ps 同化実験、(c)SST 同化実験、(d)PsSST 同化実験での 2005~2010 年のアンサンブル平均月別値から計算されたもの。

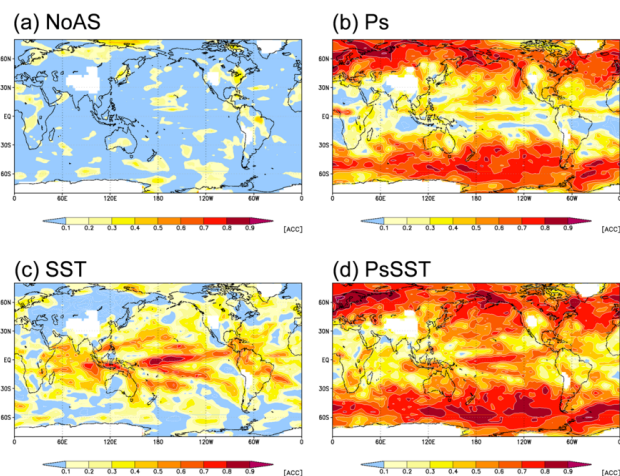


図 5: 図 4 と同様。ただし 850hPa の比湿に対してのもの。

4.2 全ての観測点を与えた場合

全ての観測点を用いて 3.2 節で述べた 4 種類の同化実験を行った。図 4 は各実験での 500hPa の高度のアノマリー相関係数である。Ps 同化実験と SST 同化実験では分布が大きく異なっていることが分かる。同化なし実験と比較すると、Ps 同化実験では中高緯度で同化による改善の効果が大きく、低緯度ではその効果が小さい。これは 4.1 節でのような地衡風平衡の関係に従った修正が、中高緯度ほど効果的であるためと考えられる。一方、SST 同化実験では逆に

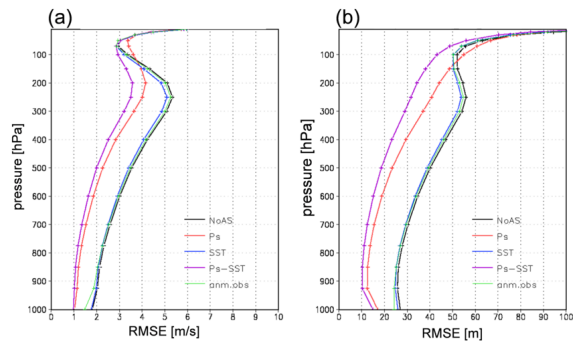


図 6: (a) 東西風および (b) 高度に対する北半球域 (20N-90N) の RMSE。縦軸は気圧で、同化なし実験 (黒実線)、Ps 同化実験 (赤実線)、SST 同化実験 (青実線)、Ps-SST 同化実験 (紫実線) 実験に対するもの。2005～2010 年のアンサンブル平均月別値から計算され、系統誤差を引いている。

低緯度での同化による改善の効果が大きく、中高緯度では海上で改善の効果は若干あるものの小さい。そして、PsSST 同化実験では、Ps 同化実験と SST 同化実験を併せたような同化による改善の効果がみられる。次に 850hPa の比湿のアノマリー相関係数を各実験間で比較すると、500hPa の高度の場合と同様な傾向が見られる。ただし 850hPa の比湿に対する改善の効果は 500hPa の高度のそれに比べて小さい。

図 6 は北半球域の系統誤差を引いた二乗平均平方根誤差 (RMSE) の鉛直依存性を示す。系統誤差は 2005～2010 年の各実験の解析値と ERA-Interim 観測値の気候値の差で定義された。東西風と高度ともに同化なし実験および SST 同化実験に比べて、地表気圧の観測値を同化した Ps 同化実験と PsSST 同化実験では地表から 200hPa 付近まで RMSE の値が減少している。

最後に、海洋の Nino3 インデックスを示す (図 7)。同化なし実験や Ps 同化実験での解析値 (青実線) は、観測の時系列 (黒実線) をほとんど追従できていない。これに対して、海面水温の観測値を同化した SST 同化実験や PsSST 同化実験での解析値は、観測の時系列を非常に良く追従していることが分かる。また、解析値のスプレッド (図 7 の陰影) は、SST 同化実験や PsSST 同化実験では非常に小さく、観測の時系列を捕捉しきれていない。この海洋変数の

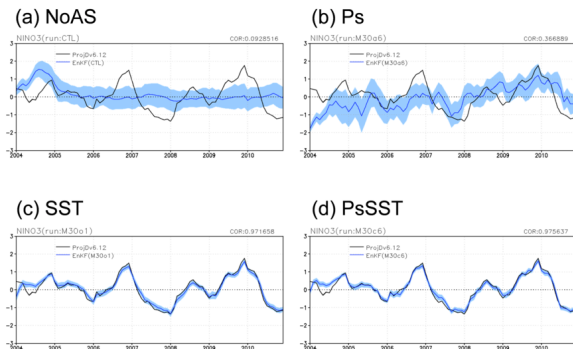


図 7: Nino3 (5N-5S, 150W-90W) インデックスの時系列。観測値 (黒実線)、解析値のアンサンブル平均 (青実線)、解析値のスプレッド (青陰影)。(a) 同化なし実験、(b)Ps 同化実験、(c)SST 同化実験、(d)PsSST 同化実験。

スプレッドが小さ過ぎることは現在の課題の一つであり、その対策を検討中である。

5 まとめ

MIROC アンサンブルデータ同化システムを用いて、大気海洋の長期再解析データの作成の実現へ向けた予備実験を開始した。その結果、地表気圧と海面水温の観測値のみの同化でも 7 年間は安定して動作し、特に中高緯度の大気の再現性が良いことが分かった。問題点もいくつか存在し、例えば大気では熱帯での地上風やウォーカー循環の再現性が悪く、海洋では低緯度の水温や塩分に局所的な系統誤差が生じる。今回の同化実験では地表気圧の観測値からモデルの地表気圧を直接的には修正していないが、現在それを直接的に修正した実験を実施中である。その結果、まだ積分期間が十分ではないものの、中高緯度と低緯度ともに今回よりも良好な結果が得られている。今後は、このように問題の対策を講じながら、より長期の実験を行ないその結果を検証する予定である。また、本システムを最新版の MIROC へ移植し、今回と同様に大気海洋の長期再解析実験を行うことに加えて、本システムを近未来予測および季節予測で活用したい。さらには、大気を同化することによる海水の層厚の再現性向上や海水の直接同化など、海水の予測研究に対しても本システムを応用する予定である。

6 謝辞

本研究は「気候変動リスク情報創生プログラム」として行われたもので、文部科学省のサポートを受けた。

参考文献

- Compo, G., and Coauthors, 2011: The twentieth century reanalysis project. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **137**, 1-28.
- Deng, Z., Y. Tang, and H.J. Freeland 2011: Evaluation of several model error schemes in the EnKF assimilation: Applied to Argo profiles in the Pacific Ocean. *J. Geophys. Res.*, **116**, C09027, doi:10.1029/2011JC006942.
- Evensen, G., 1994: Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics. *J. Geophys. Res.*, **99** (C5), 10143-10162.
- Gaspari, G., and S. E. Cohn, 1999: Construction of correlation functions in two and three dimensions. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **125**, 723-757.
- Hunt, B.R., E.J. Kostelich, and I. Szunyogh, 2007: Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: A local ensemble transform Kalman filter. *Physica D*, **230**, 112-123.
- Ishii, M., M. Kimoto, and M. Kachi, 2003: Historical ocean subsurface temperature analysis with error estimates. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 51-73.
- Ishii, M., M. Kimoto, K. Sakamoto, and S.I. Iwasaki, 2006: Steric sea level changes estimated from historical subsurface temperature and salinity analyses. *J. Oceanogr.*, **61**, 155-170.
- 小山博司, 石井正好, 建部洋晶, 西村照幸, 木本昌秀, 2012: 大気海洋結合モデル MIROC へのアンサンブル・カルマンフィルタの導入. 平成 23 年度「異常気象と長期変動」研究集会報告, 167-171.
- Miyoshi, T., S. Yamane, and T. Enomoto, 2007: Localizing the error covariance by physical distances within a local ensemble transform Kalman filter (LETKF). *SOLA*, **3**, 89-92, doi:10.2151/sola.2007-023.
- Saha, S., and Coauthors, 2010: The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **91**, 1015-1057.