

# 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

小山博司 (海洋研究開発機構)

石井正好 (気象研・気候／海洋研究開発機構)

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

これまで「21世紀気候変動予測革新プログラム」の近未来予測チームでは初期値化が特定の十年スケールの内部変動の予測に対して有効であることを示してきた (Motizuki et al. 2010 など)。より高度なデータ同化手法を導入することにより、こうした近未来予測の精度の向上、さらには季節予報や客観解析などでの応用が期待される。高度なデータ同化手法の一つとしてアンサンブル・カルマンフィルタ (Ensemble Kalman Filter: EnKF; Evensen 1994) がある。EnKFはデータ同化とアンサンブル予測を融合した手法で、アンサンブルの情報を生かした高度なデータ同化と解析誤差を反映した初期摂動の生成を同時に行う。現在、このEnKFを我々が近未来予測で用いている大気海洋結合モデル MIROCへ導入したアンサンブルデータ同化システムを開発しており、ここではその開発状況を紹介します。

## 2 MIROCアンサンブルデータ同化システム

### 2.1 概要

大気海洋結合モデル MIROCで気候変動予測を行うためのプラットフォームとして、MIROCへEnKFを導入したMIROCアンサンブルデータ同化システム (図1)の開発を行っている。表1はMIROCを用いた近未来予測実験においてこれまで使用されてきた手法と今回の手法を比較したものである。従来の手法の詳細については Tatebe et al. (2012) に記載されている。従来の手法との主な違いは、大気の同化が新たに導入されたことに加えて海洋の同化におい

て Ishii et al. (2003, 2006, 2009) の海洋客観解析で用いられた海洋の品質管理およびデータ選別の手法が導入されたことである。また、同化手法と初期摂動生成法がIAU (Incremental Analysis Update) 法およびタイムラグ (LAF) 法から EnKFに変更されている。

EnKFを用いた同化は以下の手順で行われる。ある複数の初期値から MIROCのアンサンブル予測を行う。同化の時刻になったとき、このアンサンブル予測値を用いて大気および海洋の観測値がEnKFによって同化される。求められた解析値と初期摂動を用いて次のアンサンブル予測が行われる。再び同化の時刻になると、アンサンブル予測値を用いて観測値が同化される。こうした同化・アンサンブル予測のサイクルを繰り返すことによって最適な解析値と初期摂動が生成される。次に MIROCおよびデータ同化手法の詳細について紹介する。

### 2.2 MIROC

今回使用された MIROCのバージョンはIPCC第4次報告書 (AR4) 向けに用いられた MIROC3m と呼ばれるものである。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) である。誤差共分散行列の局所化の手法としては、観測誤差を局所化する手法 (Miyoshi 2005) を導入し、局所化の関数としては Gaspari and Cohn (1999) で用いられた 5 次の関数を用いた。

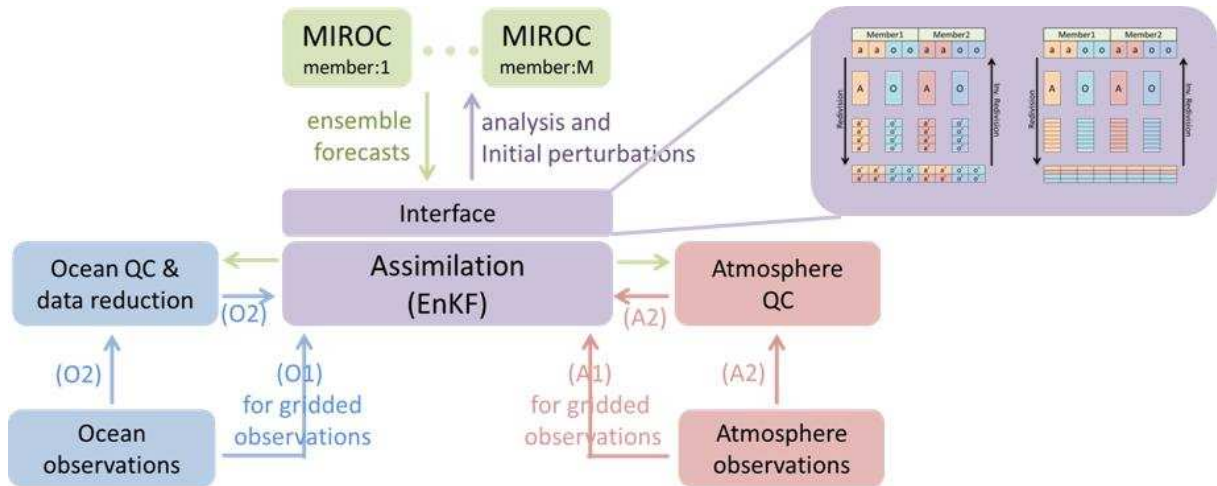


図 1: MIROC アンサンブル同化システムの概略図

項目	従来の手法	今回の手法
大気同化変数	なし	気温・風・比湿・地表気圧
海洋同化変数	水温・塩分	水温・塩分・流速
海洋観測値	客観解析値	客観解析値 または 鉛直プロファイル
同化手法	IAU 法	EnKF
初期摂動生成法	LAF 法 または IAU 法を応用したアンサンブル同化手法	

表 1: 従来の手法と今回の手法の比較。従来の手法では近未来予測の本番実験で使用されたもののみ記述。

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。現在のところ大気と海洋に対してそれぞれ独立の EnKF が適用されている。

海洋に関しては、格子点化された海洋観測値の直接的な同化 (図 1 の O1) に加えて海洋の鉛直プロファイルデータなどの現実の観測値の同化 (図 1 の O2) に対応している。現実の観測値の同化には Ishii et al. (2003, 2006, 2009) で使用された海洋品質管理 (Quality Control; QC) 処理およびデータ選別の手法が導入されている。また、EnKF で求められた初期値 (解析値と初期摂動) は IAU 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モデルの熱力学的な構造が崩れるのを防ぐためである。

一方、大気に関しては、現在のところ格子点化された大気観測値の同化に対応している (図 1 の A1)。そのため同一モデルの単一ランから

作成された仮想的な観測値や大気の客観解析データの直接的な同化が可能となっている。また、気象庁より提供して頂いた大気品質管理処理を本システムに導入中であり、これが完成すれば現実の大気の観測値を同化することが可能となる (図 1 の A2)。

本システムの特徴は、MIROC のアンサンブル予測値を EnKF に受け渡す際に領域の再分割が行われる点である。具体的には (3メンバーの例)、MIROC での元々の計算領域 (南北 2 分割) を解析に最適な計算領域 (南北 6 分割) に再分割する。再分割された領域を全 CPU へ MPI 通信により分配させる。各 CPU で EnKF の計算を並列して行う。計算後、全 CPU からデータを集め再分割された領域を MIROC の元々の計算領域に戻す。こうした処理により EnKF における並列計算の効率を高めている。また今後、導入予定の大気と海洋の変数を同一の EnKF で取り込む鉛直次元同化にも対応している。

### 3 試験的なラン

本システムの動作確認のためにいくつかの試験的なランを行った。ここではその結果の一部を紹介する。いずれの実験も同化間隔は1日毎、アンサンブルメンバー数は10である。

#### 3.1 仮想的な大気海洋観測値

ある MIROC の単一ラン (真値とする) にガウシアンノイズを加えて生成した大気と海洋の観測値を仮想的な観測値として同化を行った (図1のA1とO1を使用)。観測値と同化変数は共通で、大気的气温と風、海洋の水温と塩分

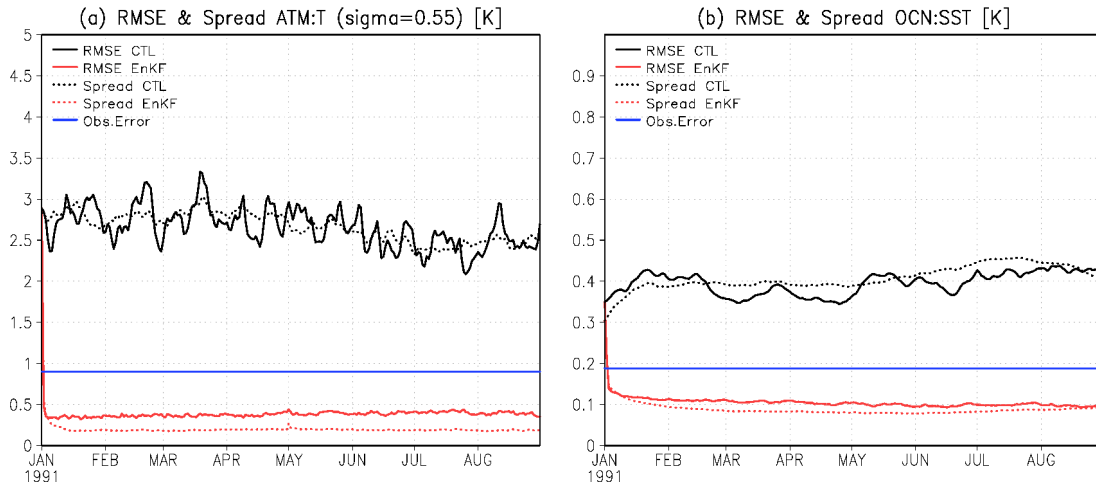


図 2: (a) 大気対流圏中層 ( $\sigma=0.55$ ) の気温および (b) 海洋表面水温に対するアンサンブル平均の RMSE とスプレッドの時系列。同化なしでの RMSE(黒実線)とスプレッド (黒点線)、EnKF 同化での RMSE(赤実線)とスプレッド (赤点線)、および観測誤差 (青実線)。

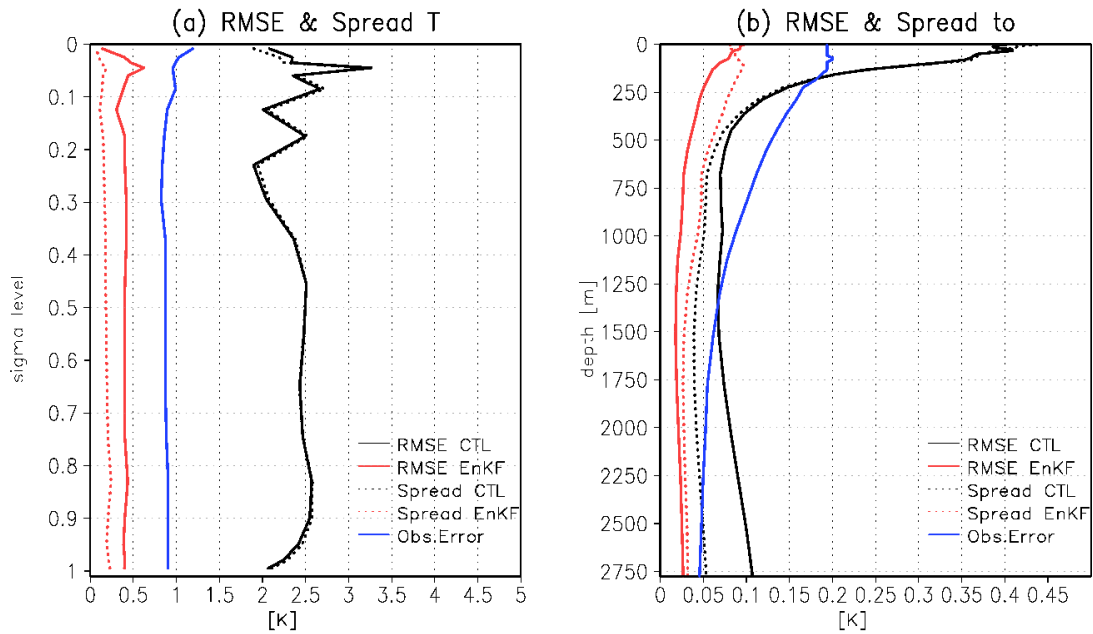


図 3: (a) 大気的气温および (b) 海洋の水温に対するアンサンブル平均の RMSE とスプレッドの鉛直分布。同化なしでの RMSE(黒実線)とスプレッド (黒点線)、EnKF 同化での RMSE(赤実線)とスプレッド (赤点線)、および観測誤差 (青実線)。開始から 6~8 か月目の日別値の平均。

である。大気では水平3格子毎で全層、海洋では水平9格子毎で0~3000mの観測値を同化した。積分期間は1月1日を初期値とする8か月間である。

図2は真値からの全球の二乗平均平方根誤差(RMSE)の時系列である。EnKFで同化した場合(赤実線)では、期間を通して大気と海洋とともに同化なし(黒実線)の場合に比べて明らかにRMSEが減少していて、与えた観測誤差(青実線)の値よりも小さくなっている。また、RMSEの鉛直分布(図3)では、大気と海洋の全層で観測誤差の値を下回っていることがわかる。スプレッドの値はRMSEに比べて大気では小さく海洋では大きい傾向となっているが、これは誤差共分散膨張で与える係数の値に依存する。

### 3.2 現実の海洋観測値

現実の海洋の観測値としてCOBE-SST(JMA)の客観解析値とGTSP( NOAA)の鉛直プロフィールデータを併用し、海洋品質管理およびデータ選別処理を通し(図1のO2)、EnKFで同化を行った。観測値と同化変数は共に、0~3000mの水温と塩分である。積分期間は1991年1月1日を初期値とする1年8か月である。

図4はCOBE-SSTからの差で定義した海面水温のRMSEの時系列である。EnKF同化でのRMSEは、同化なしでのバイアスを抜いたRMSEに比べて期間を通して小さくなっていることがわかる。一方で、観測点数が少ない深層では今回の積分期間では同化なしの場合に比べて明瞭な改善の傾向は確認されず、より長期間の積分を行い確認する必要がある。また、深層では誤差共分散膨張の係数の値が大きい場合にはスプレッドが増大し過ぎてしまう傾向がありスプレッドの値の調整が重要であると考えられる。現在は考慮されていないモデルバイアスを推定するような手法の導入もまた重要であろう。

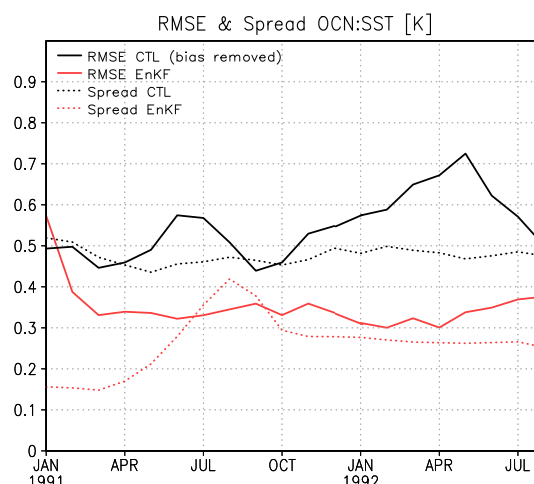


図4: 海面水温に対するアンサンブル平均のRMSEとスプレッドの時系列。同化なしでのバイアスを抜いたRMSE(黒実線)とスプレッド(黒点線)、EnKF同化でのRMSE(赤実線)とスプレッド(赤点線)。バイアスは1971~2000年のモデル(同化なし10メンバー)とCOBE-SST観測値の気候値の差で定義されている。RMSEの計算領域は60N-60S、0-360Eである。

## 4 まとめ

現在、大気海洋結合モデルMIROCへEnKFを導入したMIROCアンサンブルデータ同化システムの開発を行っている。これまでのところ、格子点化された大気と海洋の観測値の直接的な同化、および海洋品質管理・データ選別処理を通した現実の海洋観測値の同化が可能である。試験的なランの結果、大気海洋の仮想的な観測値の同化の場合では8か月間安定して期待通りに動作することがわかった。また、現実の海洋観測値の同化では海洋表層の同化は1年8か月間安定して動作することがわかった。深層についてはより長期間の実験を行い確認する必要がある。

今後は、引き続き大気品質管理処理を通した現実の大気観測値の同化の導入を進める予定である。また、100年間を見据えた長期間に渡って安定して動作する大気海洋データ同化システムの構築を目指したい。最新バージョンのMIROCへの導入や海氷の同化にも取り組む予定である。さらに、大気と海洋が出来るだけバランスした最適な状態になるような大気海洋結合系でのより効果的な同化手法を開発し

ていきたい。例えば、Koyama and Watanabe (2010)での予報変数とモデルパラメータを一つのEnKFに取り込んでモデルパラメータを推定する手法を応用した、大気と海洋の変数間の共分散を利用した手法を考案中である。

## 5 謝辞

大気の品質管理処理コードを提供して頂いた気象庁の皆様へ深く感謝いたします。本研究は「21世紀気候変動予測革新プログラム」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

- 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.
- Ishii, M., and M. Kimoto, 2009: Reevaluation of historical ocean heat content variations with time-varying XBT and MBT depth bias corrections. *J. Oceanogr.*, **65**, 287-299.

- Koyama, H., and M. Watanabe, 2010: Reducing forecast errors due to model imperfection using ensemble Kalman filtering. *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 3316-3332.
- Miyoshi, T., 2005: Ensemble Kalman filter experiments with a primitive-equation global model. Doctoral dissertation, University of Maryland, College Park, 197pp.
- Mochizuki, T., and co-authors, 2010: Pacific decadal oscillation hindcasts relevance to near-term climate prediction. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **107**, doi:10.1073/pnas.0906531107.
- Tatebe, H., and co-authors, 2012: Initialization of the climate model MIROC for decadal predictions by assimilating ocean hydrography. *J. Meteor. Soc. Japan*, in press.