

# AFES-LETKF 実験的再解析によるアジア・モンスーンの再現性

榎本 剛 (ESC), 山根省三 (千葉科学大/FRCGC), 三好建正 (気象庁数値予報)

## 1 はじめに

米国環境予測センター (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) と米国大気研究センター (National Center for Atmospheric Research, NCAR) による NCEP/NCAR 再解析 (Kalnay et al., 1996) を嚆矢として, 複数のグループによって作成された, それぞれに特長のある高品質の再解析データセットは, 気象学の研究, 特に気候変動研究の解析的研究には欠かせない存在である. モデルバイアスを含んでいる可能性があるにも関わらず, 再解析データが研究に好んで用いられるのは, 時空間的にほぼ均質な格子上で提供されるベストに近い推定値であり, 取り扱いが容易であるためだと考えられる.

当然のことながら, 現実をよく捉えていると思われる再解析データにも, 観測誤差及びモデルバイアスに起因する解析誤差が含まれている. 例えば, 南極の海面気圧は, 観測密度が高い日本付近の海面気圧よりも精度が劣ることは, まず間違いない. ところが, 既存の再解析データセットに用いられた変分法では, 解析誤差, とくに流れに依存した誤差を推定することは困難なので, どのデータセットでも解析誤差は変数として提供されていない. そのため既存の再解析データを使った研究では, 誤差の議論を十分にすることができない.

これに対し, アンサンブル・カルマンフィルタでは,  $N$  個の解析値 (メンバー) 間のばらつきも最適に解析する. それを表す量として, アンサンブル・スプレッド,

$$x_{\text{sprd}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N}} \quad (1)$$

が得られる. ここで,  $x$  は任意の変数,  $\bar{x}$  はアンサンブル平均を表す. アンサンブル・メンバーのばらつき方は, 流れに応じて変化する. 従って, アンサンブル・スプレッドに着目すれば, 擾乱に伴う誤差の構造を調べることができる.

本研究では, 北半球夏季モンスーンに着目して, アンサンブル・カルマンフィルタのひとつである, 局所アンサンブル変換カルマンフィルタ (LETKF) を用いて作成した再解析データセット (三好ら, 本要

旨集; Miyoshi et al., SOLA に投稿中) と NCEP/NCAR 再解析 (CDAS, Climate Data Assimilation System) とを比較する. まず, 季節平均場を比較して, ALERA の特徴について概観する. 次に, モンスーンの季節進行と季節内振動について取り上げる. 最後に, アンサンブル・スプレッドを用いた予測可能性研究の一例として, 西風バーストに伴うアンサンブル・スプレッドの振動について示す.

## 2 データ

ALERA (AFES-LETKF experimental reanalysis) は, LETKF を適用した大気大循環モデルを用い, 観測データを同化して作成した解析プロダクトである. 予報に用いたモデルは, AFES (Atmospheric General Circulation Model for Earth Simulator; Shingu et al., 2003; Ohfuchi et al., 2004) のバージョン 2.2 (Enomoto et al., 2006) である. AFES は, 東京大学気候システム研究センター (Center for Climate System Research, CCSR) と国立環境研究所が開発した (National Institute for Environmental Sciences, NIES) CCSR/NIES AGCM 5.4.02 (Numaguti et al., 1997) を参考にして, 地球シミュレータ用に最適化された大気大循環モデルである. 力学過程はプリミティブ方程式系を用い, 水平方向に球面調和関数で, 鉛直方向には差分で離散化している. 物理過程として格子点凝結, 積雲対流 (Emanuel スキーム; Emanuel, 1991; Emanuel and Živković-Rothman, 1999; Bony and Emanuel, 2001; Peng et al., 2005), 放射, 地表面過程, 鉛直拡散, 乾燥対流調節が含まれている.

データ同化は, 局所アンサンブル変換カルマンフィルタ (Hunt et al., 2006) のアルゴリズムに基づき, 地球シミュレータ用に最適化したコード (Miyoshi and Yamane, Mon. Wea. Rev. に投稿中) を用いて行なった. 観測データは, 気象庁が現業に用いているデータセットを利用した. ただし, 人工衛星による放射輝度データは利用しなかった. 同化実験の期間は, 2005 年 5 月 1 日 12 UTC (Temps Universel Coordonné, 世界協定時) から約 1 年半である. 同化方法の詳細は, 三好ら (本要旨集) に述べられている.

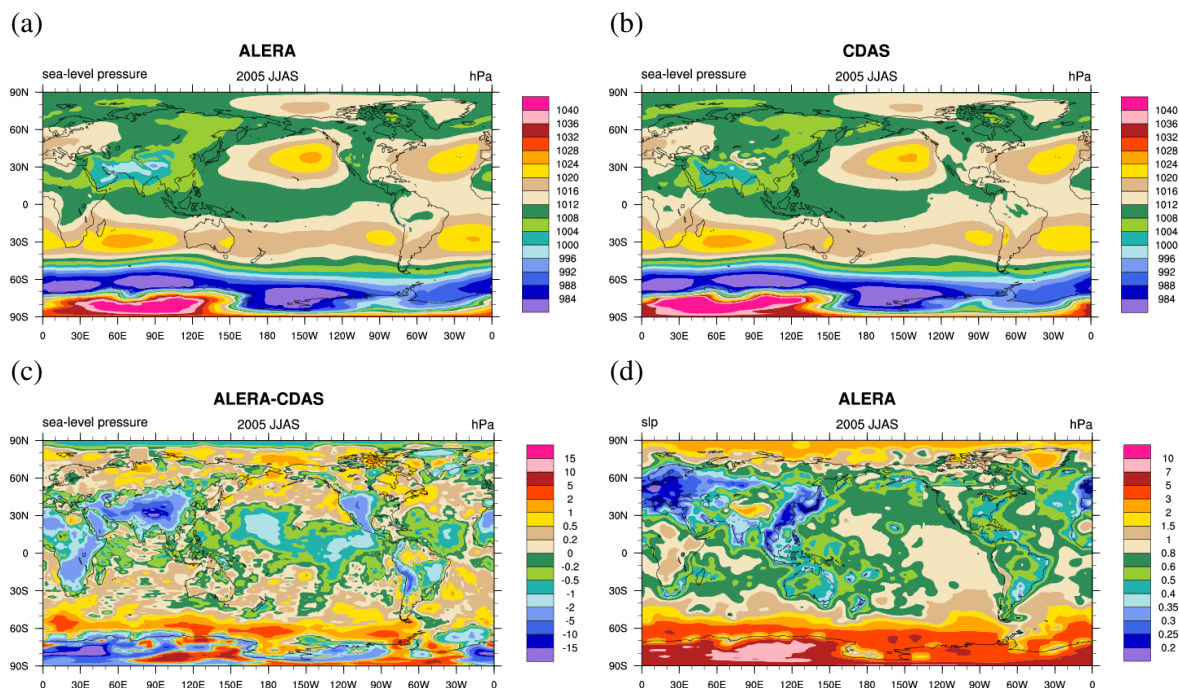


図 1: 4 か月 (6~9 月) 平均された (a) ALERA のアンサンブル平均, (b) CDAS の地表面気圧 (hPa). (c) ALERA と CDAS との差 (a-b, hPa). (d) ALERA のアンサンブル・スプレッド (hPa).

### 3 結果

ここでは、北半球夏季におけるアジア・モンスーンに着目して、NCEP/NCAR 再解析データ (CDAS) と比較しながら、ALERA の特徴を紹介する。

#### 3.1 季節平均場

図 1 に、北半球夏季 (6~9 月) における海面気圧の平均値を示す。北半球では、海洋上に高気圧が、大陸上に低気圧が発達するこの時期の特徴は、ALERA のアンサンブル平均値にも現れており、外挿の方法に依存する山岳上を除いて、CDAS との差 (図 1c) は非常に小さい。日付変更線よりやや東の西太平洋から東太平洋の亜熱帯、熱帯域で ALERA は 2 hPa 程度気圧が系統的に低い。これは CDAS と比較して対流が強めで低圧になっていることを示唆している。ハドレー循環を通じて、上層の東西風 (図省略) と亜熱帯高気圧がやや強くなっている。しかしながら、この程度の海面気圧の差は既存の再解析データセット間でも差が見られる程度なので、ALERA の海面気圧は CDAS に遜色ない精度であると言える。

アンサンブル・スプレッドは、観測密度とよく対応している。観測が密な陸上、特にヨーロッパや東アジアでスプレッドが小さい。極域、チベット高原などの高地、アフリカ大陸及び海上ではスプレッドが大きく、解析誤差が多く見積もられているこ

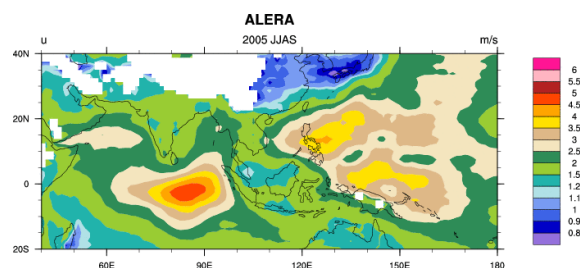


図 2: モンスーン域 (40°E-180°E, 20°S-40°N) における 850 hPa 面での東西風のアンサンブル・スプレッド ( $\text{m s}^{-1}$ ).

とを示唆している。このようにデータの誤差を示す情報が得られるのが、ALERA の特長である。

次にモンスーン域での下層 (850 hPa) における東西風のアンサンブル・スプレッドを図 2 に示す。東西風のアンサンブル・スプレッドは必ずしもソマリ・ジェットのような強風域で大きくなるのではない。また、対流が活発な領域のうち、ベンガル湾よりもフィリピン海でスプレッドが大きい。フィリピン海でのスプレッドは、熱帯低気圧の活動と関係しているようである。よりスプレッドが大きい領域が東インド洋ある。このピークは、季節を通じて大きいのではなく、西風バーストと対応した時間変化をする。この領域の時間発展については、第 3.4 節で調べることにする。

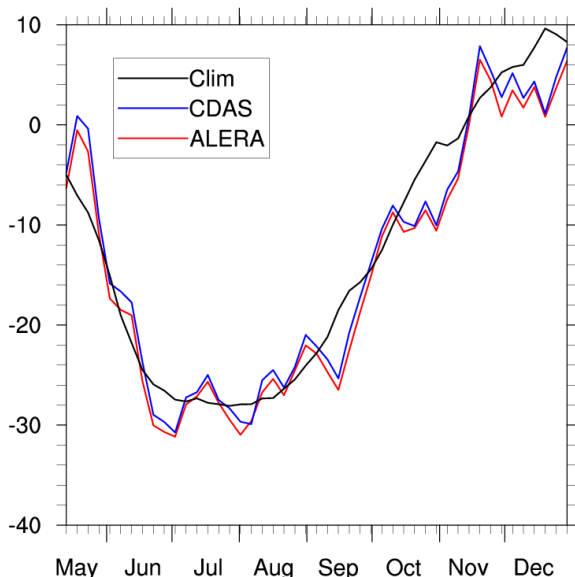


図 3: 青, 赤の実線は, CDAS 及び ALERA の 2005 年 5 月から 12 月までの Webster and Yang (1992) インデックス ( $\text{m s}^{-1}$ ). 半月平均データから作成. 黒の実線は, CDAS 気候値 (1968–1996 年) から作成した Webster-Yang インデックス.

### 3.2 モンスーンの季節進行

次にモンスーンの季節進行について調べる. モンスーンのインデックスとして様々なものが考案されているが, ここでは ALERA から最も簡単に計算できる Webster and Yang (1992) インデックス ( $40^{\circ}\text{E}$ – $110^{\circ}\text{E}$ ,  $0^{\circ}\text{N}$ – $20^{\circ}\text{N}$  の領域で平均された 200 hPa 面と 850 hPa 面との東西風の差) を用いた. 図 3 を見ると, 季節内振動を伴いながら, モンスーンの進行とともに鉛直シアーが強まる様子が ALERA でも CDAS 同様に再現されていることが分かる.

### 3.3 熱帯季節内振動

Madden-Julian Oscillation (MJO) として知られる, 熱帯季節内振動の再現性を調べるために, 200 hPa 面での速度ポテンシャルの Hovmöller 図を作成した (図 4). ALERA の気候値は存在しないので, ALERA あるいは CDAS の 5 日平均から CDAS の気候値を引いた偏差を示す. CDAS と比較して, ALERA の方が発散が強い傾向にあるが, 熱帯季節内振動も適切に再現されている. 他の多くの大気大循環モデル同様, AFES ではこの振動の再現性はあまり良くない. ALERA で現実的な MJO が再現されていることは, 観測データが適切に同化されていることを示している.

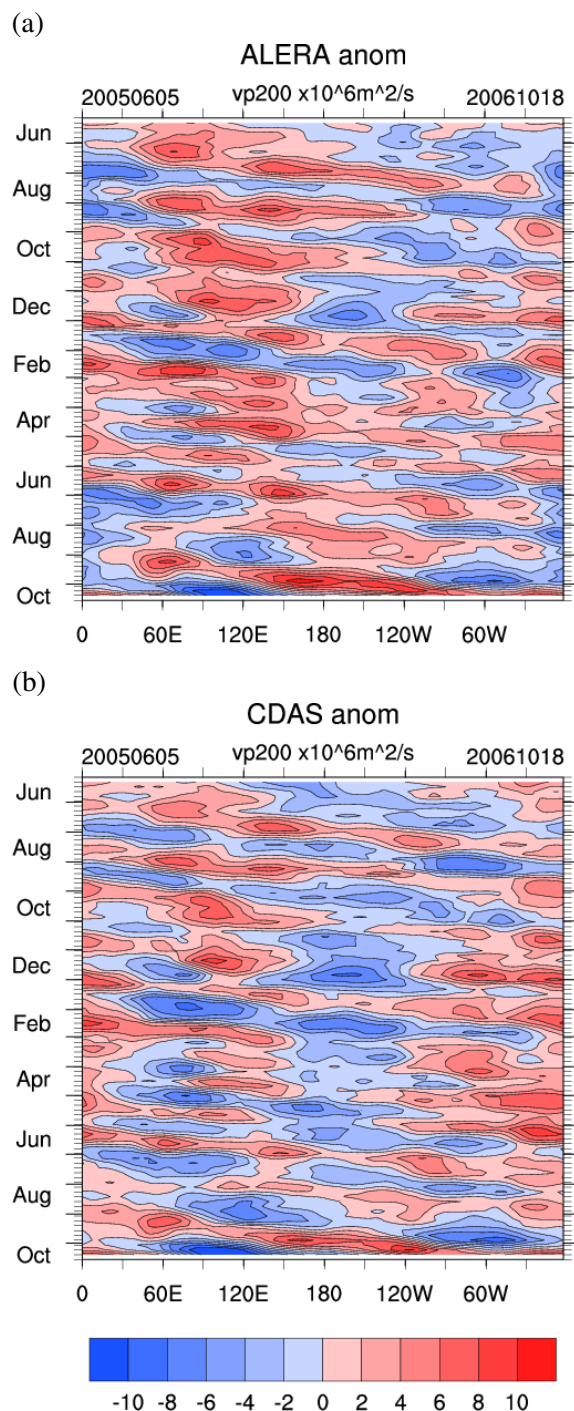


図 4: 赤道域 ( $5^{\circ}\text{S}$ – $5^{\circ}\text{N}$ ) で平均された 200 hPa 速度ポテンシャル ( $10^6 \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ) の経度-時間断面図 (Hovmöller 図).

### 3.4 西風バースト

前小節までは, ALERA のアンサンブル平均を CDAS と比較することにより, 北半球夏季モンスーン季節平均, 季節進行, 季節内振動の再現性の点で, ALERA が CDAS と遜色ないことを確認した. ここでは, アンサンブル・メンバー間のばらつきの大きさを示していると考えられる, アンサンブル・スプレッドに着目した解析の一例を示す. 図 5 は, 東

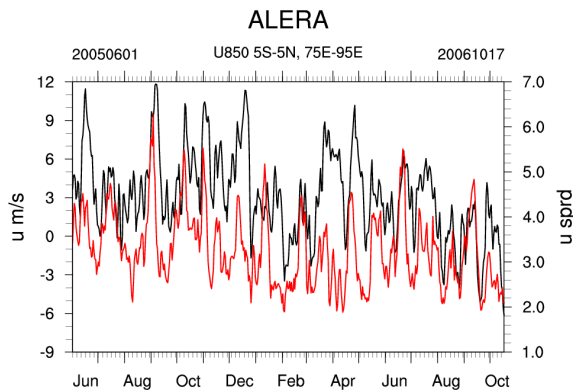


図 5: 東インド洋赤道域 (75°E–95°E, 5°S–5°N) で平均した 850 hPa 面上の東西風のアンサンブル平均 ( $\text{m s}^{-1}$ , 黒実線) 及びアンサンブル・スプレッド ( $\text{m s}^{-1}$ , 赤実線).

インド洋赤道域 (75°E–95°E, 5°S–5°N) で平均した対流圏下層 (850 hPa) における東西風 (黒実線) とスプレッド (赤実線) の時間変化を示している。季節内の時間スケールで西風が急に強化されている時期は、西風バーストが発生していることを示唆している。多くの場合、西風が強くなる時期にやや先行して、スプレッドが大きくなっている。ずらし相関を計算してみると、5 日前から 1 日後の間の相関が 0.4 を超えており、2 日前が 0.52 で最大である。これは、西風バーストに先行して対流活動が活発化することに対応していることを示すのかもしれない。対流活動には不確定性が大きく、メンバー間でばらつく可能性がある。

#### 4 まとめと今後の課題

並列計算機に適した局所アンサンブル変換カルマンフィルタを用いて、約 1 年半のデータセットを作成し、北半球夏季アジア・モンスーンの再現性について調査した。季節平均、季節進行、季節内振動は、既存の再解析と遜色のない精度で再現されていた。アンサンブル・メンバー間のばらつきに着目して、現象に伴う誤差の時間発展について調べた事例を示した。

既存の再解析を利用した変動の研究は、時間方向のばらつき (年々変動等) を調べるほかになかったが、ALERA を用いることにより、時間統計を取ることなく個々の現象に伴う、流れに即した誤差の構造とその特徴を調べることができる。誤差構造に着目した研究により、現象の新たな側面が明らかになることを期待している。

ここで示した西風バースト以外にも、熱帯低気圧の発生・発達、熱帯下部成層圏の準二年周期振

動、成層圏突然昇温等の現象に伴う誤差の事例解析を行なっている。さらに、梅雨前線上の小低気圧や冬季の爆弾低気圧等対象を広げて事例解析を進めたい。

#### 謝 辞

ALERA の計算は、独立行政法人海洋研究開発機構の支援により、地球シミュレータを用いて行なった。

#### 参考文献

- Bony, S. and K.A. Emanuel, 2001: A parameterization of the cloudiness associated with cumulus convection; evaluation using TOGA COARE data. *J. Atmos. Sci.*, **58**, 3158–3183.
- Emanuel, K.A., 1991: A scheme for representing cumulus convection in large-scale models. *J. Atmos. Sci.*, **48**, 2313–2335.
- Emanuel, K.A. and M. Živković-Rothman, 1999: Development and evaluation of a convection scheme for use in climate models. *J. Atmos. Sci.*, **56**, 1766–1782.
- Enomoto, T., A. Yoshida, N. Komori, and W. Ohfuchi, 2006: Description of AFES 2: improvements for high-resolution and coupled simulations. *In High Resolution Numerical Modelling of the Atmosphere and Ocean*. W. Ohfuchi and K. Hamilton (eds), Springer, New York, in press.
- Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, A. Leetmaa, B. Reynolds, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K. C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, R. Jenne, and D. Joseph, 1996: The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 437–471.
- Hunt, B. R., E. J. Kostelich, and I. Szunyogh, 2006: Efficient Data Assimilation for Spatiotemporal Chaos: a Local Ensemble Transform Kalman Filter. *Physica D*, accepted.
- Miyoshi, T. and S. Yamane, 2006: Local ensemble transform Kalman filtering with an AGCM at a T159/L48 resolution. *Mon. Wea. Rev.*, submitted.
- Miyoshi, T., S. Yamane, T. Enomoto: The AFES-LETKF experimental ensemble reanalysis: ALERA, SOLA, submitted.

- 三好建正, 山根省三, 榎本 剛: アンサンブル・カルマンフィルタによる実験的再解析. 平成 18 年度「異常気象の予測可能性と気候の変化・変動」研究集会報告, 京都大学防災研究所, 18K-01, 本要旨集.
- Numaguti, A., M. Takahashi, T. Nakajima, A. and Sumi, 1997: Description of CCSR/NIES/ Atmospheric General Circulation Model. *CGER's Supercomputer Monograph Report*, **3**, National Institute of Environmental Sciences, Tsukuba, Japan, 1–48.
- Ohfuchi, W., H. Nakamura, M.K. Yoshioka, T. Enomoto, K. Takaya, X. Peng, S. Yamane, T. Nishimura, Y. Kurihara, and K. Ninomiya, 2004: 10-km mesh meso-scale resolving simulations of the global atmosphere on the Earth Simulator: Preliminary outcomes of AFES (AGCM for the Earth Simulator). *J. Earth Simulator*, **1**, 8–34.
- Peng, M.S., J.A. Ridout, and T.F. Hogan, 2004) Recent modification of the Emanuel convective scheme in the Navy operational global atmospheric prediction system. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 1254–1268.
- Shingu, S., H. Fuchigami, M. Yamada, 2003: Vector parallel programming and performance of a spectral atmospheric model on the Earth Simulator. *In Realizing Teracomputing: Proceedings of the Tenth ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing in Meteorology*, W. Zwiefelhofer and N. Kreitz (eds.), World Scientific, 29–46.
- Webster, P. and S. Yang, 1992: Monsoon and ENSO: selectively interactive systems. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **118**, 877–926