

## [共同研究成果]

# 従来型観測のみを用いた日本域再解析システムの構築に向けた同化実験

岩井真<sup>1,2</sup> 岩崎俊樹<sup>1</sup> 斉藤和雄<sup>2</sup> 瀬古弘<sup>2</sup> 国井勝<sup>2</sup>

<sup>1</sup>東北大学大学院理学研究科 <sup>2</sup>気象研究所

温暖化に対する地域スケールの応答などを研究するために、局地循環や詳細な地形の影響などのメソスケール現象を対象とした、1958年以降の長期間均質で高精度な高解像度気象データセット作成を目指して、長期に渡り入手可能な測候所等での地上気象観測やラジオゾンデのデータのみを、気象庁非静力学モデルを用いた局所アンサンブル変換カルマンフィルタを利用して同化し、その有効性について検証を行った。同化を行った場合、一般に行われている力学的ダウンスケールに対して、大幅な改善が確認できた。これは、従来型観測のみを用いた長期領域再解析の実施の有効性を支持するものである。

## 1. はじめに

近代的な気象観測網が整備されたのは1960年頃である。それから、およそ55年が経過し、観測データに基づく地球温暖化の直接検証が可能となりつつある。過去数十年程度遡った長期間にわたり均質で高精度な三次元気象データを、最新の数値予報モデルやデータ同化システムを一貫して用いて作成する試み(再解析)が、NCEP/NCAR[1]を筆頭に、世界の主要な現業センターを中心にされて行われている。さらに、時間的均質性をより高めるには、数値予報モデルやデータ同化システムだけでなく、長期にわたり入手可能なゾンデや地上での直接観測(従来型観測)のみを同化することが有効であり、既にいくつか試みられている[2, 3]。しかしながら、こうした再解析は全球を対象にしたものが主で、最新のものでも数十km程度の水平格子間隔である。この程度の解像度では、詳細な地形の効果や局地循環、降水強度などを現実的に再現するには不十分である。

温暖化に対する地域スケールの応答について議論するために、3次元の高解像度のデータセットが望まれている。また、こうした長期間均質で且つ高解像度のデータは、局地循環や細かい地形の影響などのメソスケール現象を議論したり、洪水予測、積雪診断、農作物病害診断などのために気象データを高度利用したりするにも有用である。さらに、長期間均質なデータは、モデルや同化手法の開発における初期値・境界値や参照データともなりうる。

全球再解析のような低解像度データを高解像度化する手法として、力学的ダウンスケールがある。力学的ダウンスケールでは、低解像度データを高解像度領域モデルに与えて計算することで、対象領域において力学的整合性の取れた高解像度データを作成する。この時に、低解像度データを初期値や側面境界値として与えたり、さらに長期積分の際は spectral boundary coupling 法(SBC法[4])のような低波数成分を低解像度データに緩和させたりするのが一般的である。しかし、低解像度データのこのような強制だけでは、内部の場を制御するには必ずしも十分ではなく、力学的ダウンスケールの結果が境界値として与えた低解像度データよりも再現性が悪化することも多い。

そこで本研究では、単純な力学的ダウンスケールではなく、データ同化を取り入れた領域再解析の有効性を調査する。レーダーや衛星などの1980年以降に導入された観測データは、再解析の品質を大きく変化させる。これらの観測は詳細な解析を可能とするものではあるが、しばしばバイアスを含むため、データに不均一性を生じ経年変化のシグナルに影響する。このため、今回のデータ同化には従来型観測のみを用いることとし、時間的均質性が担保された長期高解像度領域再解析の実施可能性について評価する。

## 2. 実験設定

本研究では、同化スキームとして、予報モデルに気象庁非静力学モデル(NHM[5])を採用した4

次元局所アンサンブル変換カルマンフィルタ (LETKF [6]) である NHM-LETKF [7] を用いる。NHM-LETKF では、NHM によるアンサンブル予報 (初期条件に含まれる不確実性に対応する摂動を加えた多数のメンバーからなる予報) によって、第一推定値及びその流れに依存した予報誤差共分散を計算し、この予報誤差共分散と事前に設定した観測誤差共分散から求めた最適な重み (カルマンゲイン) に応じた修正を第一推定値に施す。観測していない物理量も含めて、アンサンブル予報による予報誤差共分散に基づいた修正が行われるので、力学的に整合した解析値を得られることが期待できる。また、LETKF では各格子点値を独立に解析するため、並列化効率が非常に高いという特徴がある [8]。

同化に用いた観測データは、品質管理済みの気象庁現業解析用観測データの中から、時間的均質性を重視した再解析である JRA-55C [3] を参考に、従来型観測である地上気圧、ゾンデ (気温、東西風、南北風、水蒸気量)、台風ボーガス (東西風、南北風) を採用した。同化ウィンドウは、解析時刻の前 6 時間とした。アンサンブルメンバー数は、不十分であるとサンプリングエラーの影響で、予報誤差共分散に偽のシグナルが含まれてしまう。偽のシグナルに基づいた解析を行えば精度が悪化してしまう。しかし、モデルの自由度は (予報変数)  $\times$  (格子数)  $\sim 10^7$  であり、サンプリングエラーを除去出来るだけアンサンブルメンバー数を大きくするのは、計算量が膨大となり現実的ではない。遠方の物理量間の相関が一般に小さいことを利用し、解析格子点からの物理的な距離に応じて観測による修正の効果を緩和させる局所化が、実用的なアンサンブルメンバー数で、サンプリングエラーの影響を抑えるためには、有効である [9]。本実験では、アンサンブルメンバー数を 10、局所化スケールを [7] に倣い、水平に 200 km、鉛直に  $0.2 \ln p$  (約 2km) と設定した。また、NHM の非線形性や初期値・境界値やモデルの不確実性の見積もり不足に伴う予報誤差共分散の過小評価を補うため、共分散膨張を行う必要がある。本実験では、共分散膨張係数を対象領域内で一律 1.5 とした。

アンサンブル予報を行う NHM の支配方程式は、完全圧縮非静力学方程式系を採用している。水平格子間隔は 25km として、日本を含む領域 (図 1) にとる。今後、図 1 の青枠内側領域を対象に水平格子間隔 5km でデータ同化を実施する予定であるが、本研究では、まず 25km で十分経験を積み同化システムの最適化を図る。鉛直層は、モデル上端 21801m までの 50 層で地形に沿うハイブリッド座標を用いる。初期値・側面境界値には JRA-55 [10] を与えた。初期値については、ランダムに選択した年の同月日時刻の場を与えることで、10 のアンサンブルメンバーを作成した。側面境界値には摂動を与えず、予報時刻に対応する場を与えた。湿潤過程は、氷相 (雲氷、雪、霰) を含むバルク法による雲物理過程 [11] に加え、本実験の水平解像度では十分解像できない積雲対流による効果を評価する Kain-Fritsch スキーム [12] を併用する。サブグリッドスケールの渦によるグリッドスケールへの影響を見積もる乱流過程では、ラージエディシミュレーションの結果を基にクロージャ定数を決めた、Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino level3 スキーム (MYNN3) [13] によって扱う。放射過程では、晴天放射過程と雲放射過程を考慮する。この雲放射過程で考慮する雲は、MYNN3 で求めたサブグリッドスケールの非均一性を利用した部分凝結スキーム [14] で評価する。地中温度は、土壌 4 層の熱拡散方程式によって、土壌水分は土壌 3 層の強制復元法によって予報する。地表面フラックスは [15] のスキームを用いて見積もる。対象期間は、2014 年 8 月 1 日 12 UTC から 9 月 1 日 00 UTC にとり、期間平均値を求める際は、初めの 5 日間をスピニングアップとして捨て、2014 年 8 月 6 日 12 UTC から 9 月 1 日 00 UTC の結果から求めた。

この NHM-LETKF による同化実験 (DA) に加え、同化を行わない 2 つの実験を行った。一方は、同化実験と同じ設定の NHM を用いた力学的ダウンスケール実験 (DS) で、他方は、側面境界としてみではなく、SBC 法により低波数成分も JRA-55 に緩和させた実験 (DS-SBC) である。検証データとしては、気象庁現業メソ解析 (MA) を用いる (領域は図 1 の青枠内)。MA は、従来型観測のみならず、衛星や地上のリモートセンシングによる最新の観測により得られたデータを 4 次元変分法により同化している [16]。

### 3. 結果

図2は、海面更正気圧についての、根平均二乗誤差(RMSE)の時系列を表したものである。DSはRMSEが期間を通して最も大きく、期間平均で3.1hPaであった。また、SBCを導入したDS-SBCでは、DSよりも境界値として用いたJRA-55の強制を強く受けるため比較的誤差が小さく、期間平均のRMSEは1.6hPa程度であった。DS及びDS-SBCの結果は、境界値として用いたJRA-55よりも誤差が大きくなっていた。一方、DAでは、実験開始時にあった誤差が、予報-解析サイクルにより軽減され、同化開始から3日程度経つと、RMSEが0.8hPa前後で安定して推移するようになった。そして、DSやDS-SBCよりも誤差は小さくなり、JRA-55と同程度となった。尚、6日から11日にかけてRMSEが大きくなっているが、これは台風11号が検証領域内に侵入し温帯低気圧化した時期に対応している。台風の位置ずれや強度不足を反映し誤差が大きくなった。図3は、500hPa面のジオポテンシャル高度についての、RMSEの時系列を表したものである。DSは、RMSEが期間を通して最も大きく、期間平均で40gpmであった。また、SBCを導入したDS-SBCでは、期間平均のRMSEが16gpm程度であった。DAは、海面更正気圧の場合と違いJRA-55と比較すると誤差が大きくなったものの、DSやDS-SBCよりは誤差が小さく、期間平均RMSEが14gpmであった。図4は、MAに対するジオポテンシャル高度のRMSEの期間平均の鉛直プロファイルを示している。DAは、全層でDSよりも誤差は小さく、DS-SBCに対しても、300hPa(高度約7km)までは誤差軽減が確認できた。

これらの結果から、NHM-LETKFによって安定して同化がなされていることが確認できた。そして、従来型観測しか同化していないが、一般的な力学的ダウンスケールに対し、地上から300hPa面程度までは改善することが示された。海面更正気圧の改善に対して、上空に行く程、ジオポテンシャル高度の改善が少ないのは、地上観測に対し、高層観測は空間的にも時間的にも疎らであることが一因である。また、SBCは、高度約7km以上の上空に作用させており、DS-SBCでは、JRA-55による強制の影響は上空の方が強い。このため、DAのDS-SBCに対する改善が上空で小さくなっているものと考えられる。さらに、中・上層のジオポテンシャル高度が、解析を行うことで第一推定値である6時間予報よりも誤差が大きくなっていた(図5)。これは、局所化や共分散膨張のために、地上気圧の同化に伴う地上付近の物理量の修正に対して、上空の物理量の修正が不十分になったからであると考えられる。NHMによる予報では、解析で力学的整合性が崩れたことで励起された重力波によって上層の修正が散逸される。そのため、第一推定値である6時間予報値が解析値よりもRMSEが小さくなったものと考えられる。鉛直局所化スケールを大きくすることで、上空の解析の力学的整合性と精度の向上が期待できる。ただし、局所化スケールを大きくすると、サンプリングエラーの影響を受けやすくなる。特に、本実験では、計算量を考慮し、アンサンブルメンバー数は10と、他のアンサンブルカルマンフィルタを用いた研究(例えば[7]では50メンバー)と比べても非常に少ないため、精度悪化につながる可能性がある。実際に鉛直局所化スケールのみを0.4lnp(約0.5km)に拵げた実験(DA\_0.4)を行うと、上空に気温修正が入り、地上気圧の修正の影響が下層に限定されるようになった(図6)。そして、解析による誤差拡大は抑えられたが、誤差の大きさ自体は目立った改善がなかった。今後は、鉛直方向の局所化スケールの調整を行うと同時に、リーズナブルなアンサンブルメンバー数についても調査する必要がある。

アンサンブルメンバー間のばらつき(アンサンブルスプレッド)は、データの場に依存した信頼度情報を与え、カルマンゲインを決める要素ともなる。図2、3の右図は、各々海面更正気圧と500hPa面ジオポテンシャル高度のアンサンブルスプレッドを示す。スプレッドの大きさは、概ねRMSEと同程度で推移している。台風のあった時期にRMSEが大きくなったのに対応して、スプレッドもピークを持つ。図7は、海面更正気圧のスプレッドの時間平均の分布を示している。渤海-日本海-オホーツク海にかけて誤差が大きくなっているがスプレッドの成長は十分ではない。一方、日本の南-東海上では、誤差もスプレッドも大きくなっている。この地域で誤差やスプレッドが大きくなるのは、観測が殆ど無いこととも整合する。ただし、スプレッドの大きさに関しては、この海域では過剰傾向にある。観測が疎らで、解析の際にスプレッドがほとんど小さくならないに

も関わらず、1.5 という大きめの共分散膨張係数を与え続けることが原因と考えられる。観測密度に応じた共分散膨張法(e.g. adaptive inflation 法[17])の導入について検討が必要である。また、本実験で、共分散膨張係数を大きめにとっている理由の一つは、本来存在するはずの境界の不確実性を考慮しないことを補うためである。領域モデルを用いた解析-予報サイクルにおいても側面境界摂動の重要性は大きい[18]ので、今後は境界摂動の影響も併せて検討が必要である。

#### 4. まとめ

従来型観測のみを用いた長期領域再解析実施の有効性を評価するために、2014年8月を対象にNHM-LETKFを用いた同化実験を行った。NHM-LETKFを用いて従来型観測だけを同化することで、一般的に行われてきた力学的ダウンスケールに比べて、対流圏における高精度な気象場の推定を行うことができた。これは、従来型観測のみを用いた長期領域再解析の実施の有効性を支持するものである。本実験で用いた領域再解析システムの改善に向けた検討課題として、計算コストを抑えることを念頭に置きながら、力学的整合性を保つことを目的とした鉛直局所化スケールの拡大、境界の不確実性を考慮するための側面境界摂動の与え方、日本の南-東海域の過剰なスプレッド軽減のための観測密度に応じた共分散膨張の与え方が挙げられる。また、水平格子間隔25kmでの再解析を構築後、水平格子間隔5kmでの再解析に取り組む予定である。

#### 謝辞

本研究は、東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータを利用することで実現することができた。本研究は、文部科学省のHPCI戦略プログラムの助成を受けたものである。

#### 参考文献

- [1] Kalnay, E., and co-authors: The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **77**, 437-471, 1996
- [2] Compo, G. P., and co-authors: The twentieth Century reanalysis project, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **137**, 1-28, 2011
- [3] Kobayashi, C., H. Endo, Y. Ota, S. Kobayashi, H. Onoda, Y. Harada, K. Onogi, H. Kamahori: Preliminary results of the JRA-55C, an atmospheric reanalysis assimilating conventional observations only., *SOLA*, **10**, 78-82, 2014
- [4] Yasunaga, K., H. Sasaki, Y. Wakazuki, T. Kato, C. Muroi, A. Hashimoto, S. Kanada, K. Kurihara, M. Yoshizaki, and Y. Sato: Performance of long-term integration of the Japan Meteorological Agency nonhydrostatic model using the spectral boundary coupling method. *Wea. Forecasting*, **20**, 1061-1072, 2005.
- [5] Saito, K., J. Ishida, K. Aranami, T. Hara, T. Segawa, M. Narita, and Y. Honda: Nonhydrostatic atmospheric models and operational development at JMA. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 271-304, 2007.
- [6] Hunt, B. R., E. J. Kostelich, and I. Szunyogh: Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: A local ensemble transform Kalman filter. *Physica D*, **230**, 112-126, 2007.
- [7] Kunii, M.: Mesoscale data assimilation for a local severe rainfall event with the NHM-LETKF system. *Wea. Forecasting*, **29**, 1093-1105, 2014.
- [8] Miyoshi, T., and S. Yamane: Local ensemble transform Kalman filtering with an AGCM at a T159/L48 resolution. *Mon. Wea. Rev.*, **135**, 3841-3861, 2007.
- [9] Kunii, M.: The 1000-Member Ensemble Kalman Filtering with the JMA Nonhydrostatic Mesoscale Model on the K Computer. *J. Meteor. Soc. Japan*, **92**, 623-633, 2014.
- [10] Kobayashi, S., Y. Ota, Y. Harada, A. Ebita, M. Moriya, H. Onoda, K. Onogi, H. Kama-

hori, C. Kobayashi, H. Endo, K. Miyaoka, and K. Takahashi: The JRA-55 Reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93**, 5-48, 2015.

[11] Ikawa, M., and K. Saito: Description of a non-hydrostatic model developed at the Forecast Research Department of the MRI. *MRI Tech. Rep.*, **28**, 238 pp, 1991.

[12] Kain, J. S., and J. M. Fritsch: A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization. *J. Atmos. Sci.*, **47**, 2784-2802, 1990.

[13] Nakanishi, M., and H. Niino: An improved mellor-yamada level 3 model with condensation physics: Its design and verification. *Bound.-Layer Meteor.*, **112**, 1-31, 2004.

[14] Sommeria, G., and J. W. Deardorff: Subgrid-scale condensation in models of nonprecipitating clouds. *J. Atmos. Sci.*, **34**, 344-355. , 1977

[15] Beljaars, A. C. M., and A. A. M. Holtslag: Flux parameterization over land surfaces for atmospheric models. *J. Appl. Meteor.*, **30**, 327-341, 1991.

[16] Honda, Y., M. Nishijima, K. Koizumi, Y. Ohta, K. Tamiya, T. Kawabata, and T. Tsuyuki: A pre-operational variation data assimilation system for a nonhydrostatic model at Japan Meteorological Agency: Formulation and preliminary results. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **131**, 3465-3475, 2005.

[17] Miyoshi, T.: The Gaussian approach to adaptive covariance inflation and its implementation with the local ensemble transform Kalman filter. *Mon. Wea. Rev.*, **139**, 1519-153, 20115.

[18] Saito, K., H. Seko, M. Kunii, and T. Miyoshi: Effect of lateral boundary perturbations on the breeding method and the local ensemble transform Kalman filter for mesoscale ensemble prediction. *Tellus*, **64A**, 1-23, 2012.

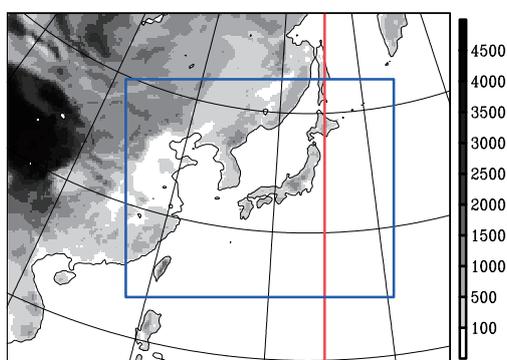


図1 計算領域。陰影がモデルでの標高。青枠内が MA による検証領域。

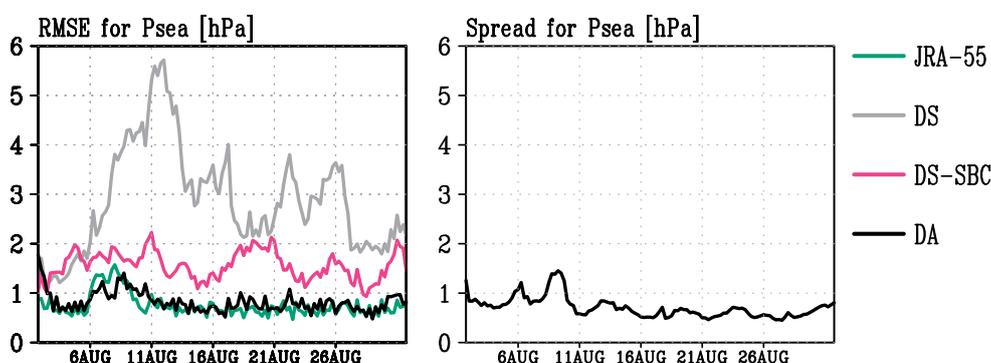


図2 海面更正気圧の MA に対する RMSE(左図)とスプレッド(右図)。黒が DA、灰色が DS、赤が DS-SBC、緑が JRA-55。

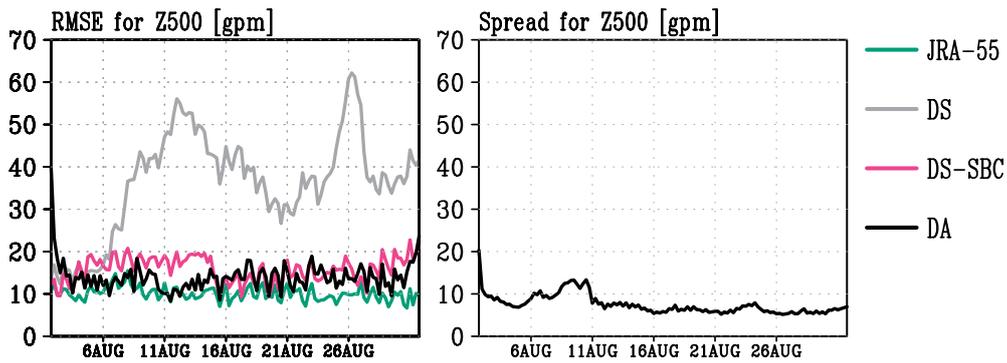


図3 500hPa 面ジオポテンシャル高度の MA に対する RMSE(左図)とスプレッド(右図)。黒が DA、灰色が DS、赤が DS-SBC, 緑が JRA-55。

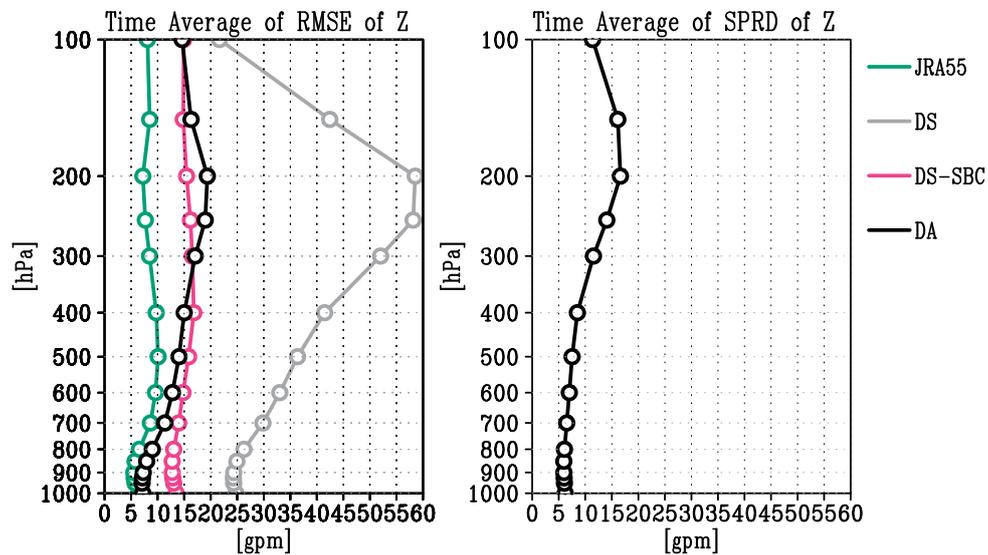


図4 ジオポテンシャル高度の MA に対する RMSE の 2014 年 8 月 6 日 12UTC から 9 月 1 日 00UTC の平均の鉛直プロファイル。黒が DA、灰色が DS、赤が DS-SBC, 緑が JRA-55。

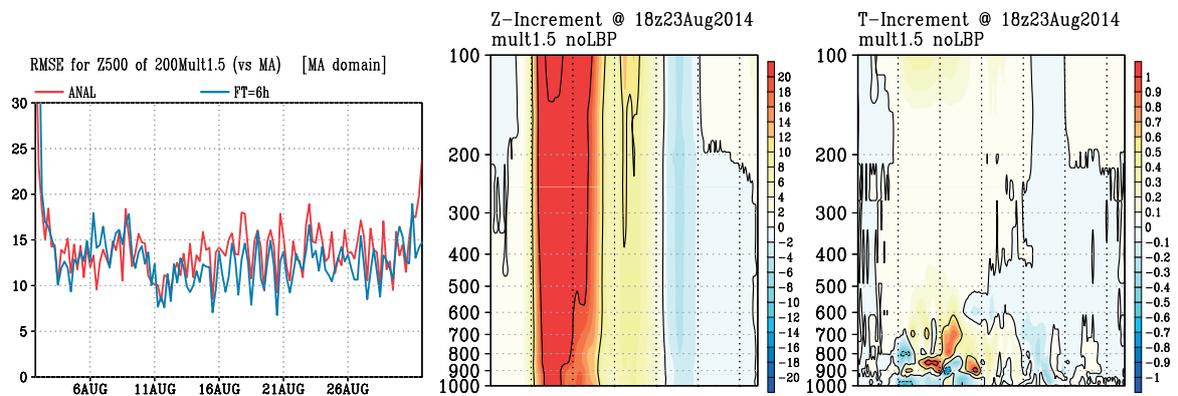


図5 DA のジオポテンシャル高度の MA に対する RMSE の時系列(左図; 赤線が解析、青線が 6 時間予報のアンサンブル平均)と、8 月 23 日 18 UTC における同化によるジオポテンシャル高度(中央図)と気温(右図)の修正量の南北断面(図 1 の赤線分)。

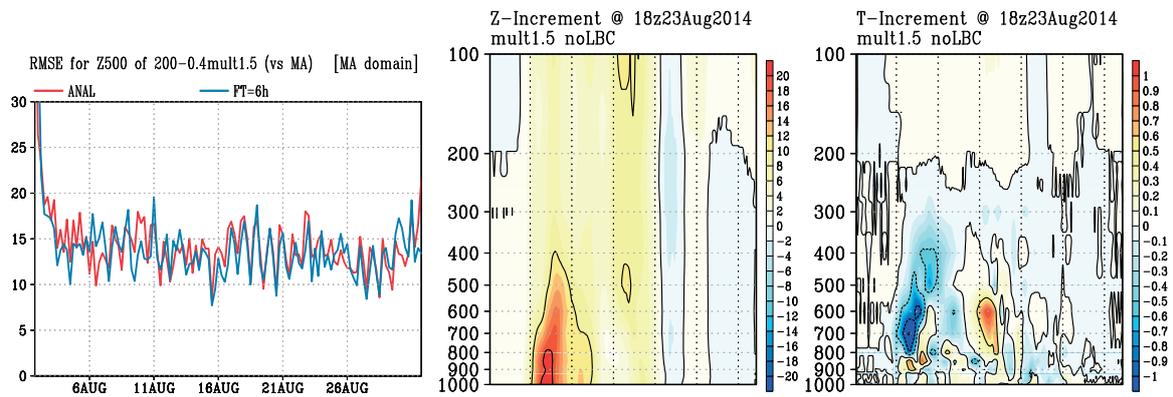


図6 DA\_0.4 のジオポテンシャル高度の MA に対する RMSE の時系列(左図;赤線が解析、青線が6時間予報のアンサンブル平均)と、8月23日18UTCにおける同化によるジオポテンシャル高度(中央図)と気温(右図)の修正量の南北断面(図1の赤線分)。

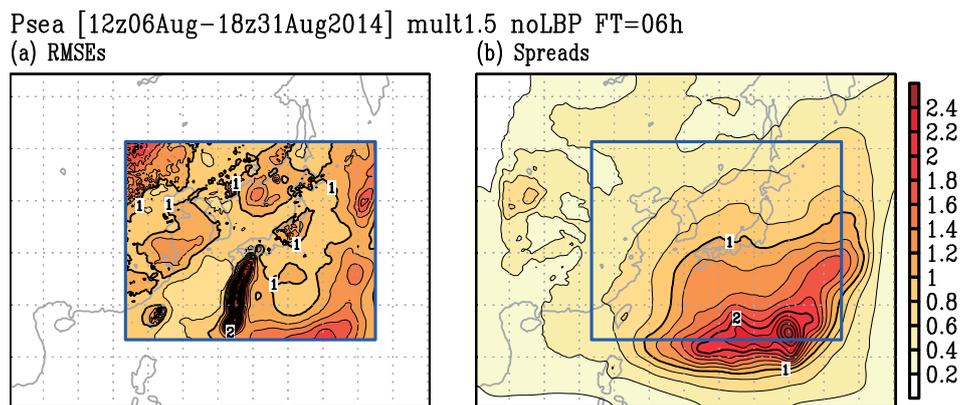


図7 DA の海面更正気圧の MA に対する 6 時間予報の RMSE(左図)とスプレッド(右図)の 2014 年 8 月 6 日 12UTC から 9 月 1 日 00UTC の平均。