

令和元年6月28日現在

機関番号：82109

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2017～2018

課題番号：17H07352

研究課題名（和文）背景誤差共分散のモデル空間直接局所化による遠隔・高密度観測データのLETKF同化

研究課題名（英文）Improving LETKF assimilation of remotely-sensed dense observations through direct model-space covariance localization

研究代表者

堀田 大介 (HOTTA, Daisuke)

気象庁気象研究所・気象観測研究部・主任研究官

研究者番号：60805365

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,270,000円

研究成果の概要（和文）：地上GNSS遅延量観測や衛星輝度温度などの大気の状態に関する非局所的リモートセンシング観測をアンサンブル・データ同化手法により同化するためには、観測の「位置」の概念に依存することなく背景誤差共分散を局所化する必要がある。本研究ではアンサンブル・データ同化手法の一種であるアンサンブル変換型の平方根フィルタに適用できるモデル空間直接局所化手法を提案し、地上GNSS観測の同化を模した鉛直1次元理想系でその有効性を実証した。また背景誤差の相関構造が局所的でない場合にもサンプリング誤差を除去できる手法として固有スペクトル局所化を提案して同じく鉛直1次元理想系でその有効性を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

アンサンブル・データ同化手法は従前の変分法同化手法と比べ、大気の流れとともに日々変化する背景誤差の変化を適切に取り扱える長所がある一方、地上GNSS遅延量観測や衛星輝度温度など非局所的な観測の同化のインパクトが変分法による場合より小さいことが知られていた。本研究の成果は、その原因の一部が背景誤差共分散のアドホックな局所化にあることを示唆する点で学術的に意義があり、また現実的な解決策を提案した点で実用上も有益である。本研究の理論的成果は、地上GNSS観測等の非局所的リモートセンシング観測からより多くの情報を取り出すアンサンブルデータ同化システムの開発を通じて気象予測の精度向上に貢献しうる。

研究成果の概要（英文）：Ensemble assimilation of remote-sensed non-local observations like ground-based GNSS phase delays or satellite radiances requires to localize background error covariance matrices without resorting to the concept of the "observed position." In this study, a model-space localization scheme is proposed that can be applied to ensemble-transform square root filter which is a variant of ensemble-based data assimilation schemes. The proposed scheme is implemented and tested on an idealized one-dimensional system which mimics assimilation of ground-based GNSS observations. A new Eigen-spectral localization scheme is also proposed which performs well in cases where the true background covariance does not assume localized structure. Its effectiveness is similarly verified on an idealized one-dimensional system.

研究分野：気象学

キーワード：データ同化 アンサンブル・カルマンフィルタ 共分散局所化 地上GNSS観測

# 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

限られた観測から物理法則と整合した大気の状態を推定するデータ同化は数値予報やシミュレーション研究をはじめ、気象学研究にとって不可欠な技術である。近年、リモートセンシング技術の進展により大量の観測が高頻度・高密度に得られるようになってきたが、リモートセンシングによる遠隔観測は電磁波と大気や降水粒子の相互作用を利用して大気の状態変数の空間的な積算値を計測するものがほとんどであり、従前のデータ同化手法では以下の理由により適切な利用が困難である。

現在、大気・海洋分野でデータ同化手法として広く利用されている局所アンサンブル変換カルマンフィルタ (LETKF) をはじめとする同時更新型の平方根フィルタでは、解析対象の格子点から地理的距離が遠い観測の誤差分散を膨張させることで間接的に背景誤差共分散を局所化しサンプリング・ノイズを抑制する手法 (R 局所化) が一般的に用いられる。R 局所化では各観測の地理的な位置が定義されることが前提となっており、観測演算子がモデル変数の積算値で定義されるような、「位置」の概念が正しく定義されない非局所的な観測に対しては適用できないため、非局所的な観測を適切に同化するためには観測位置の概念に依存しない局所化手法を開発する必要がある。

## 2. 研究の目的

本研究ではアンサンブル変換による平方根フィルタにおいて非局所的な観測の同化を可能とするために (1) 背景誤差共分散行列を直接モデル空間で局所化する手法 (B 局所化) を提案し、その有効性を検証することを目的とした。さらに、(2) 対流活発な大気における鉛直方向の誤差相関のように背景誤差が局在化されない場合にも適用できるように、背景誤差の気候学的な固有スペクトルを用いてスペクトル空間で局所化する手法を提案し、その有効性を調べることも目的とした。

## 3. 研究の方法

本研究では非局所的な観測の代表例として地上設置型 GNSS 受信機による水蒸気観測をアンサンブル変換による平方根フィルタで同化する状況を想定した理想実験を行い、理論的な考察を行った。

(1) まず B 局所化の R 局所化に対する優位性を調べるため、相対湿度を制御変数とした可降水量の同化を模した鉛直次元の理想化した系における一観測同化実験を複数の局所化手法を用いて行った。これにより従前の手法である R 局所化の限界を精査し、またそれが B 局所化によりどの程度解決されるかを検証した。

(2) 次に真の背景誤差が局在化した空間相関を持たない場合にも適用できうる手法として気候学的な固有スペクトルを用いたスペクトル局所化を考案し、1次元の理想系に実装し、局所化行列を距離の関数で与える B 局所化との違いを議論した。

## 4. 研究成果

### (1) B 局所化の R 局所化に対する優位性

相対湿度を制御変数とした可降水量の同化を模した鉛直次元の理想化した系における一観測同化実験の結果を図 1 に示す。  $n_z=80$  変数の 1 次元の状態変数  $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^{n_z}$  を考え、  $k=1$  層目を最下層、  $k=n_z$  層目をモデル大気上端とみなす。背景誤差共分散  $\mathbf{B}^{\text{true}}$  として  $e^{-1}$  幅  $D=20$  で距離に応じて減衰するガウス関数型の相関を設定し対角成分はすべて 1 とする (図 1a)。観測は 1 つだけ与えられるものとし、観測演算子は地上 GNSS 等から得られる可降水量を模し  $\mathbf{x}$  の重み付き総和  $H(\mathbf{x}) = \sum_k w_k x_k$  として定義する。ここで重み  $w_k$  は最下層から  $D=10$  格子離れるごとに  $e^{-1}$  倍に減衰するものとして  $w_k = \exp(-(k-1)/D)$  により定める (図 1b)。観測誤差分散は  $\mathbf{R}=1$  とする。

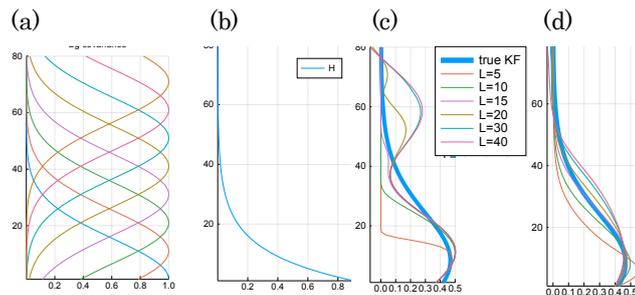


図 1: (a) 想定する真の背景誤差共分散行列 (各列を 10 格子おきに描画)。 (b) 観測演算子。 (c) R 局所化による解析インクリメント。 (d) B 局所化による解析インクリメント

上記の設定のもと、20 メンバーの背景値のアンサンブルと +4.0 の観測イノベーション (O-B) を与えた場合の解析インクリメントを、R 局所化と B 局所化で算出したものをそれぞれ図 1c と図 1d に示す。複数の線はそれぞれ異なる局所化スケール L での結果を表す。太線は真のカルマンフィルタで計算した参照値 (“正解”) である。R 局所化 (図 1c) では上層のノイズを抑えるために L を小さく選ばなければならないが、小さく選ぶと解析インクリメントが下層に張り付いたように浅くなってしまふ。また解析インクリメントが L の選択により敏感に変化しチューニングが困難である。一方 B 局所化 (図 1d) では L の選択にあまり左右されず真のカルマンフィルタによる “正解” に近い解析インクリメントが得られる。また L を大きくとつても上層にノイズを生じない。以上より、観測演算子が局所的でない

観測を同化する場合には **B** 局所化が **R** 局所化より適切な解析を与えることが確認できる。

## (2) 気候学的な固有スペクトルを用いたスペクトル局所化

現実大気の背景誤差共分散の構造を調べると、水平方向では距離が遠くなるほど総監が小さくなる局所化された構造を持つものの、鉛直方向では、例えば地表付近と対流圏界面が一定の相関を持つなど、あまりよく局在化されていない構造を持っている。よって図 1a に示したような局在化された誤差相関を鉛直方向に仮定することは必ずしも妥当でない。同様の傾向は海洋大循環モデルでも知られており、海洋の変分法同化では鉛直誤差相関を経験直交関数の張る空間で構成するなどの工夫がなされてきた。そこで、本研究ではアンサンブルから得られる背景誤差の標本共分散を、気候学的背景誤差共分散の固有モードの空間で対角化することにより局所化する新しい手法を考案し、1次元の理想的な系で試験した。

真の背景誤差共分散行列として図 2 左上に示すような距離の長い相関を持ち局在化されていない構造を考える。ここからランダムに 20 の摂動を生成し標本共分散を構成すると図 2 右上のようになり、至るところサンプリング・ノイズが乗ってしまう。**B** 局所化では対角線から遠い成分をノイズと見做すことでサンプリング・ノイズを取り除くが、この仮定が妥当でないため **B** 局所化では図 2 左下のようにノイズを取り除くことができない。一方、スペクトル局所化を用いると、距離（対角線からの遠さ）に依存することなく、真の背景誤差共分散行列の構造に関する先験的知識を用いてノイズを取り除くことができるため、図 2 右下のようにうまくノイズを取り除くことが可能となる。

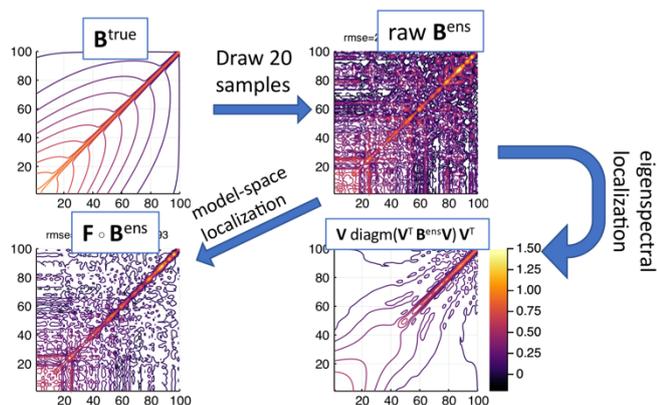


図 2: (左上) 想定する真の背景誤差共分散行列, (右上) ランダムに抽出した 20 メンバーの摂動から構成した標本共分散行列, (左下) 標本共分散行列に **B** 局所化を適用したものの, (右下) 同じくスペクトル局所化を適用したものの。

上記これらの研究成果は地上 GNSS 遅延量観測等の非局所観測をアンサンブル同化するためにどのような共分散局所化を用いるべきかについて有用な基礎的知見である。これらを生かし、今後、実データ・実モデルを用いた実験を行う予定である。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

1. **Hotta, D.**, E. Kalnay, Y. Ota and T. Miyoshi, 2017: EFSR: Ensemble Forecast Sensitivity to Observation Error Covariance. *Monthly Weather Review*, **145**, 5015–5031. doi:10.1175/MWR-D-17-0122.1. 査読有り
2. Lien, G.-Y., **Hotta, D.**, Kalnay, E., Miyoshi, T., and Chen, T.-C., 2018: Accelerating assimilation development for new observing systems using EFSO. *Nonlinear Processes in Geophysics*, **25**, 129–143, doi:10.5194/npg-25-129-2018. 査読有り
3. **Hotta, D** and M. Ujiie, 2018: A nestable, multigrid-friendly grid on a sphere for global spectral models based on Clenshaw-Curtis quadrature. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **144**, 1382–1397, doi:10.1002/qj.3282. 査読有り
4. H. Yamaguchi, **D.Hotta**, T. Kanehama, K. Ochi, Y. Ota, R. Sekiguchi, A. Shimpo, T. Yoshida, 2018: Introduction to JMA's new Global Ensemble Prediction System. *CAS/JSC WGNE Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling/WMO*, **48**, 6–13. 査読なし
5. H. Yonehara, R. Sekiguchi, T. Kanehama, K. Saitou, T. Kinami, A. Shimokobe, **D. Hotta**, R. Nagasawa, H. Sato, M. Ujiie, T. Kadowaki, S. Yabu, K. Yamada, M. Nakagawa, T. Tokuhira, 2018: Upgrade of JMA's operational global NWP system. *CAS/JSC WGNE Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling/WMO*, **48**, 6–15. 査読なし
6. **Hotta, D.**, and Y. Ota, 2019: Statistical generation of SST perturbations with spatio-temporally coherent growing patterns. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, doi:10.1002/qj.3518. (in press) 査読有り

[学会発表] (計 12 件)

1. EFSR: アンサンブル感度解析を用いた観測誤差共分散行列の推定手法, 第21回データ同化夏の学校, 2017年8月, 青森県むつ市
2. EFSR: Ensemble Forecast Sensitivity to Observation Error Covariance, 6th International Symposium on Data Assimilation(ISDA), 2018年3月, ドイツ, ミュンヘン
3. Toward improved LETKF assimilation of non-local and dense observation by direct covariance localization in model space, 6th International Symposium on Data Assimilation(ISDA), 2018年3月, ドイツ, ミュンヘン
4. Toward improved LETKF assimilation of non-local and dense observation by direct covariance localization in model space, 8th EnKF Data Assimilation Workshop, 2018年5月, カナダ, サンタデー
5. EFSR: Ensemble Forecast Sensitivity to Observation Error Covariance, 8th EnKF Data Assimilation Workshop, 2018年5月, カナダ, サンタデー
6. ネスト可能でマルチグリッド法の利用に適した 全球スペクトルモデル用の格子系の提案, 日本気象学会 2018年度春季大会, 2018年5月, 茨城県つくば市
7. Toward improved LETKF assimilation of non-local and dense observation by direct covariance localization in model space, JpGU meeting 2018, 2018年5月, 千葉県千葉市
8. A nestable, multigrid-friendly grid on a sphere for global spectral models based on Clenshaw-Curtis quadrature, JpGU meeting 2018, 2018年5月, 千葉県千葉市
9. EFSO and DFS diagnostics for JMA's global Data Assimilation system: their caveats and potential pitfalls, Workshop on Sensitivity Analysis and Data Assimilation in Meteorology and Oceanography, 2018年7月, ポルトガル, アヴェイロ
10. モデル空間局所化での事後アンサンブル生成方法についての考察, 第5回アンサンブルデータ同化摂動に関する研究会, 2018年8月, 北海道帯広市
11. A nestable, multigrid - friendly grid on a sphere for global spectral models based on Clenshaw-Curtis quadrature, The 5th International Workshop on Nonhydrostatic Models, 2018年11月, 東京都千代田区
12. Accounting for multi-scale vertical error correlation within ETKF through spectral-space covariance localization, 7th International Symposium on Data Assimilation (ISDA), 2019年1月, 兵庫県神戸市

〔図書〕 (計0件)

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計0件)
- 取得状況 (計0件)

〔その他〕

ホームページ等  
該当なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

該当なし

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名: 瀬古 弘

ローマ字氏名: SEKO, Hiromu

研究協力者氏名: 小司 禎教

ローマ字氏名: SHOJI, Yoshinori

研究協力者氏名: KALNAY, Eugenia

ローマ字氏名: KALNAY, Eugenia

研究協力者氏名: 太田 洋一郎

ローマ字氏名: OTA, Yoichiro

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。