

令和 2 年 6 月 5 日現在

機関番号：82109

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K17806

研究課題名(和文) 巨大アンサンブルデータ同化を基としたマルチスケールデータ同化手法の開発

研究課題名(英文) Development of a multi-scale data assimilation method based on huge ensemble data assimilation

研究代表者

近藤 圭一 (Kondo, Keiichi)

気象庁気象研究所・気象観測研究部・研究官

研究者番号：00735558

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、大アンサンブルのもつ情報を、一般的なアンサンブル数である数十程度で可能な限り保持するために、マルチスケールデータ同化手法をベースとし、粒子フィルタを組み込む手法を開発した。具体的には、マルチスケールのうち一番小さいスケールについて粒子フィルタを適用する。簡易的な大循環モデルであっても粒子フィルタの実装は困難であると言われてきたが、アンサンブルカルマンフィルタを組み合わせることで非常に安定して動作することが確認された。さらに、背景誤差分布が非正規であるほど粒子フィルタの効果が現れ、従来のアンサンブルカルマンフィルタより解析精度が大幅に高くなることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では粒子フィルタにマルチスケールデータ手法を応用することにより、安定に動作しつつ従来手法を上回る解析精度を実現する同化手法を確立することができた。従来、大気モデルは膨大な自由度を持ち、粒子フィルタを適用することは困難であると考えられてきたため、本研究で得られた成果は学術的に非常に意義が大きい。さらに非線形性が卓越するような領域(例えば低気圧等の擾乱のある領域)で粒子フィルタの効果により解析精度が大きく向上することを確認しており、将来的には大きな災害をもたらすとされる集中豪雨や台風等の顕著現象の予測に対する効果が期待される。

研究成果の概要(英文)：In this study, to improve forecasts of severe phenomena with the non-Gaussian PDF due to strong nonlinear systems like tropical storms or heavy rainfall, a multi-scale data assimilation method has been developed using an ensemble Kalman filter (EnKF) and a particle filter (PF). The particle filter is applied to the smallest scale on the multi-scale methods. The hybrid system with the EnKF and PF outperforms the traditional EnKF with the intermediate atmospheric general circulation model, especially, for the severe phenomena with the non-Gaussian distribution of background error.

研究分野：気象学

キーワード：気象予報 数値予報 データ同化 マルチスケール同化 アンサンブルカルマンフィルタ 粒子フィルタ 非正規性

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。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

気象予測の精度向上には、データ同化の高度化による数値モデル初期値の精緻化が重要である。初期値敏感性の強い大気モデルでは初期値となる解析値の精度に予測精度が大きく依存するため、データ同化の重要性は極めて高い。本研究で用いる Local ensemble transform Kalman filter (LETKF; Hunt et al., *Physica D*, 2007) は、大気の流れを考慮する高度なデータ同化手法であるアンサンブルカルマンフィルタ (EnKF; Evensen, *J. Geophys. Res.*, 1994) の 1 つであり、並列計算効率に優れる。LETKF は全球雲解像を目的の 1 つとした全球非静力学モデル Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model (NICAM; Satoh et al., *J. Comput. Phys.*, 2008) に適用された NICAM-LETKF (Kondo and Tanaka, SOLA, 2009; Terasaki and Miyoshi, SOLA, 2014) をはじめ様々なモデルに応用されている。大気モデルを用いた EnKF では、少ないアンサンブル数に起因するサンプリング誤差のため遠方の観測を同化することが難しい。そこで EnKF では局所化 (Houtekamer and Mitchell, *Mon. Wea. Rev.*, 2001) を導入し、観測の影響範囲を限定する。アンサンブル数を増やすほど局所化スケールを大きくできるため、より遠くの観測を有効活用できるようになるが、計算コストも大幅に増加するデメリットがある。

そこで、少ないアンサンブル数でより遠くの観測を同化する手法の一つとして Miyoshi and Kondo (SOLA, 2013)、Kondo et al. (SOLA, 2013) では、簡易的な大循環モデルを用いて、現象のスケールに応じたマルチスケールデータ同化手法を提案した。具体的には、低解像度高波数成分では小さな局所化を適用して近傍の小スケールの現象を詳細に捕捉する。低波数成分では平滑化された情報を用いてサンプリング誤差を低減することで、大きな局所化を適用し観測の影響範囲を広げる。これにより少ないメンバー数でも巨大アンサンブル数を用いた場合のように広範囲の観測を同化しつつ詳細な大気の構造を考慮可能となる。本研究では、このマルチスケールデータ同化手法を現実的な数値予測に耐えられる NICAM に適用し、観測データの有効活用による解析精度向上と顕著現象の予測精度向上を狙う。

2. 研究の目的

本研究の当初の目的は 2 つある。

- (1) 現実的な大気モデル NICAM に LETKF を適用した NICAM-LETKF システムにマルチスケールデータ同化手法を応用し、巨大アンサンブルが持つ詳細な誤差情報を現実的な数十程度のアンサンブル数で可能な限り再現する。それにより遠方の観測を有効活用し、計算コストを抑えた高精度なデータ同化システムを構築する。
- (2) 衛星観測データを同化する際に重要となる鉛直方向の誤差共分散構造が不明のため、現状では Gauss 関数もしくは衛星のチャンネル毎の重み関数を基にした鉛直局所化を適用している。ここで放射伝達モデルを 10240 メンバーNICAM-LETKF に適用することで、放射輝度温度の鉛直誤差共分散構造が明らかとなり、衛星観測データに最適な局所化関数を求めることが可能となる。

これらにより本研究はこれまでにないデータ同化の高度な発展及び数値予報の精度向上に新たな知見をもたらす、観測データの有効活用且つ顕著現象の予測可能性を高めるものと期待される。

平成 29 年 (2017 年) 12 月に研究代表者の所属機関が理化学研究所から気象研究所に変更となったため、研究計画の変更を行った。具体的には、上記 (1) について、NICAM によるマルチスケール同化手法に加えて、簡易大循環モデルを使用し、従来の LETKF とあらゆる分布に適用可能な粒子フィルタ (Particle filter; PF) を融合させた全く新しいマルチスケールデータ同化手法の研究開発に取り組む。研究アプローチは変更したが、観測データの有効活用による解析精度向上と顕著現象の予測精度向上を狙うという目的に変更はない。

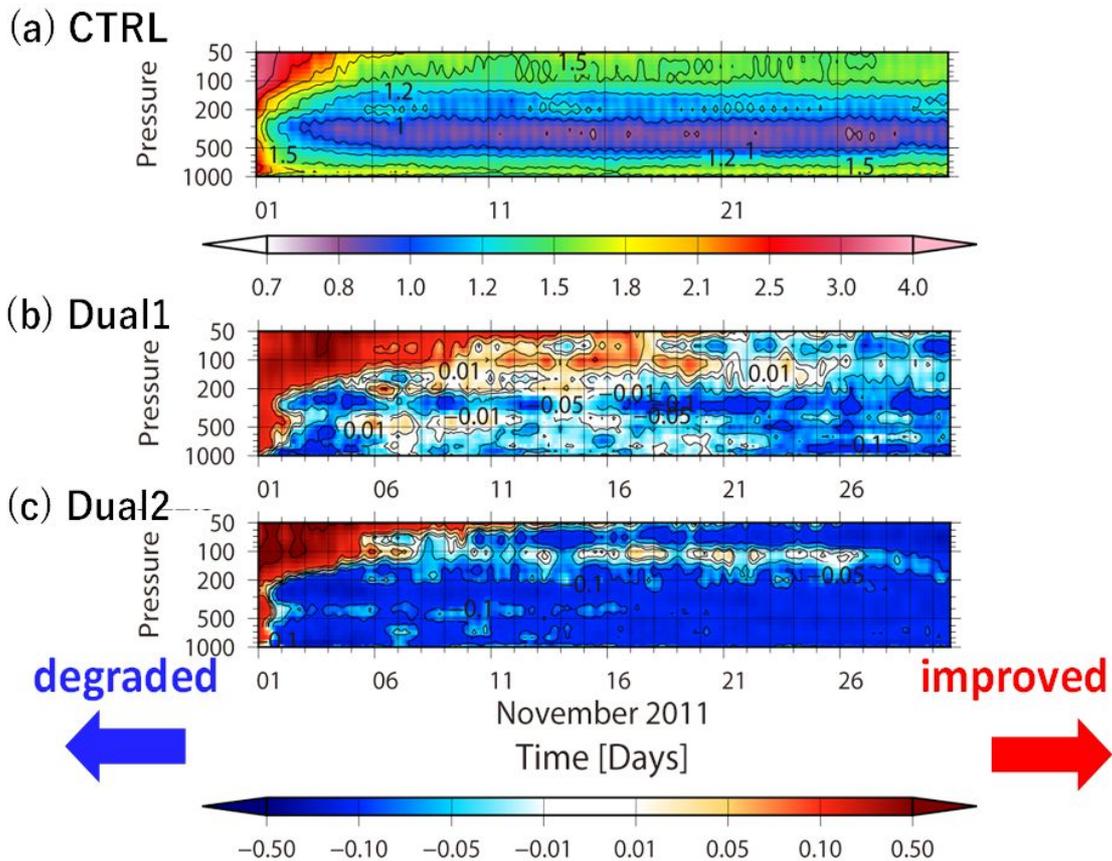
3. 研究の方法

- (1) アンサンブル数を 80 とし、NICAM-LETKF にマルチスケールデータ同化手法を適用し、解析精度を検証する。さらに、観測空間での予報誤差分布を評価し、ガウス分布と見なせる観測についてのみ LETKF を適用し、残りの観測については PF を適用する新たなハイブリッド同化手法を提案する。具体的には、観測を EnKF、PF それぞれで同化するものの 2 つに分割し、前者を EnKF で同化した後、後者を PF で同化する 2 段階のデータ同化を行う。
- (2) 衛星観測データの輝度温度の同化に必要な鉛直局所化関数については最適な関数が不明であるため、通常は Gauss 関数もしくは衛星のチャンネル毎の重み関数を用いて衛星観測データを同化している。そこで衛星観測データについて鉛直局所化の有無による影響を調査し、必要であれば鉛直局所化をなくして解析誤差の精度評価を行う。

4. 研究成果

- (1) モデル解像度 112 km、鉛直 40 層の NICAM-LETKF システムを用いた。アンサンブルメンバー数は 40 である。ゾンデ等の従来観測として米国国立環境予報センターで用いられている観測データ、及び衛星観測としてマイクロ波放射計データを用い、6 時間毎に同化した。CTRL 実験は従来通りの局所化 (局所化スケール 300km) Dual1 実験はマルチスケール局

所化（局所化スケール 300km+500km） Dual2 実験はマルチスケール局所化（局所化スケール 300km+800km）とした。その結果、Dual1 実験は、実験開始 3 週間程度は CTRL 実験よりも成層圏で解析誤差を低減できるが、3 週間以降は CTRL 実験より悪化する。さらに対流圏においては実験期間を通して CTRL 実験より解析誤差が大きい。また Dual2 実験については Dual1 実験よりも悪い結果となっている。以上より、現実大気にマルチスケール



データ同化手法を応用する際には、さらなる工夫が必要とされる。

LETKF と粒子フィルタを組み合わせたハイブリッド同化手法についての結果は以下の通りである。簡易全球大循環モデルは、解像度が T30/L7、水平解像度およそ 400 km で、アンサンブル数は 80 とした。観測データはモデルの出力結果から複数地点を抽出し、正規分布に基づく乱数を上乘せして 6 時間毎に同化する。観測変数は東西風、南北風、気温、比湿、地上気圧である。図 2 はハイブリッド手法を用いることで従来の LETKF からの解析誤差の改善率を示している。特に南太平洋から南極にかけて大幅な改善となっている。

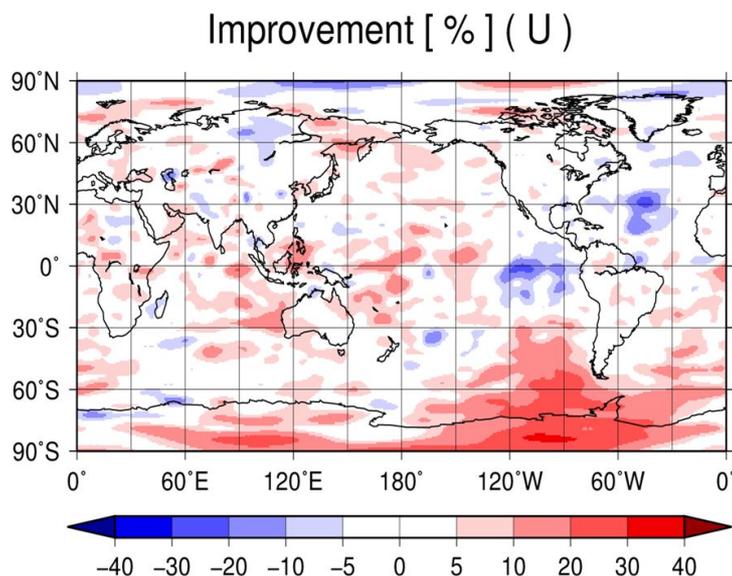


図 2 ハイブリッド同化手法による東西風の解析誤差の改善率（対 LETKF 解析値）。青色は悪化、赤色は改善を示す。

- (2) 解像度 112 km、鉛直 40 層の NICAM-LETKF システムを用いた。アンサンブル数は 20,40,80,160,320,640,1280 である。ゾンデ等の従来観測として米国国立環境予報センターで用いられている観測データ、及び衛星観測としてマイクロ波放射計データを用い、6 時間毎に同化した。CTRL 実験は全ての観測に鉛直局所化を適用、TEST1 実験は全ての観測に鉛直局所化を適用していない。TEST1 実験は 1280 メンバーを用いても CTRL 実験より解析精度は悪化した(図略)。そこで衛星観測にのみ鉛直局所化を適用しない TEST2 実験を追加で行った。その結果を図 3 に示す。TEST2 実験は 40 メンバーで CTRL 実験より解析精度が上がり、良好な結果を得た。鉛直積算量を観測する衛星観測は、誤差相関スケールが従来観測より長い為、鉛直局所化を適用しないことにより効果的に衛星観測を同化できたものと考えられる。

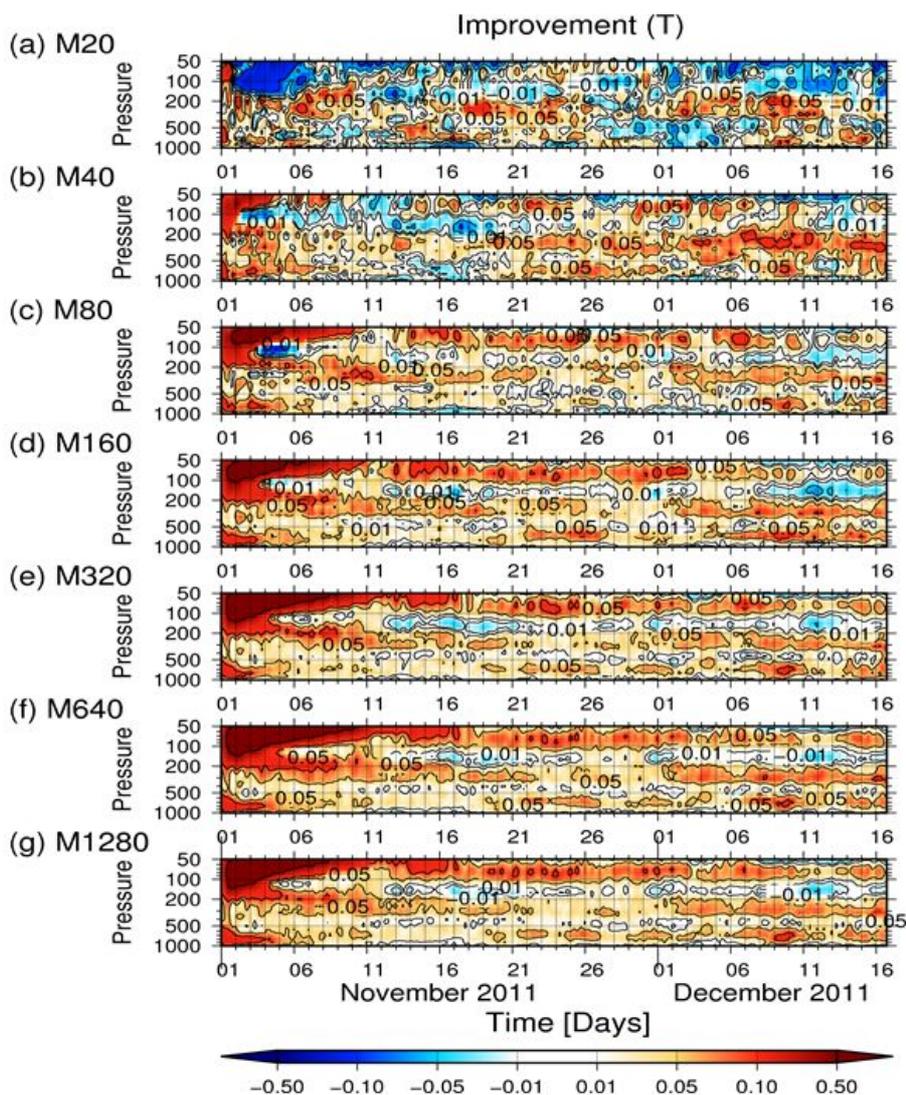


図 3 ハイブリッド同化手法による東西風の解析誤差の改善率 (対 LETKF 解析値)。アンサンブルサイズは 20, 40, 80, 160, 320, 640, 1280 である。青色は悪化、赤色は改善を示す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Kondo, K. and T. Miyoshi	4. 巻 26
2. 論文標題 Non-Gaussian statistics in global atmospheric dynamics: a study with a 10 ²⁴⁰ -member ensemble Kalman filter using an intermediate atmospheric general circulation model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nonlin. Processes Geophys.	6. 最初と最後の頁 211-225
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5194/npg-26-211-2019	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Hatfield Sam, Duben Peter, Chantry Matthew, Kondo Keiichi, Miyoshi Takemasa, Palmer Tim	4. 巻 10
2. 論文標題 Choosing the Optimal Numerical Precision for Data Assimilation in the Presence of Model Error	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Advances in Modeling Earth Systems	6. 最初と最後の頁 2177 ~ 2191
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2018MS001341	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Keiichi Kondo, Takemasa Miyoshi	4. 巻 144
2. 論文標題 Impact of Removing Covariance Localization in an Ensemble Kalman Filter: Experiments with 10 ²⁴⁰ Members Using an Intermediate AGCM	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Monthly Weather Review	6. 最初と最後の頁 4849, 4865
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1175/MWR-D-15-0388.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計26件（うち招待講演 1件/うち国際学会 17件）

1. 発表者名 近藤圭一
2. 発表標題 モデルが不完全な場合における背景誤差相関について
3. 学会等名 日本気象学会2019年度春季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 近藤圭一、三好建正
2. 発表標題 背景誤差の非ガウス分布を考慮したアンサンブル同化手法
3. 学会等名 日本気象学会2019年度秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kondo, K., T. Miyoshi
2. 発表標題 Non-Gaussian statistics in global atmospheric dynamics with a 10240-member ensemble Kalman filter experiment using an intermediate AGCM
3. 学会等名 米国地球物理学連合秋季大会 (AGU 2019 Fall meeting) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Miyoshi, S. Kotsuki, K. Kondo, R. Potthast
2. 発表標題 Local Particle Filter Implemented with Minor Modifications to the LETKF Code
3. 学会等名 米国地球物理学連合秋季大会 (AGU 2019 Fall meeting) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Miyoshi, S. Kotsuki, K. Kondo, R. Potthast
2. 発表標題 Local Particle Filter Implemented with Minor Modifications to the LETKF Code
3. 学会等名 米国気象学会年次会合 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Keiichi KONDO, Taichu Y. TANAKA, Tsuyoshi T. SEKIYAMA, Keiya YUMIMOTO, Takashi MAKI
2. 発表標題 Large ensemble based data assimilation with MASINGAR-mk2
3. 学会等名 エーロゾル予測のための国際協力 (ICAP) 第10回ワーキンググループ会合 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 近藤圭一、三好建正
2. 発表標題 誤差分布の非ガウス性を考慮したデータ同化手法
3. 学会等名 日本気象学会2018秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Keiichi KONDO, Taichu Y. TANAKA, Tsuyoshi T. SEKIYAMA, Keiya YUMIMOTO, Takashi MAKI
2. 発表標題 A large ensemble based data assimilation experiment with a global aerosol transport model
3. 学会等名 14th iCACGP Quadrennial Symposium/15th IGAC Science Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Keiichi KONDO, Taichu Y. TANAKA, Tsuyoshi T. SEKIYAMA, Keiya YUMIMOTO, Takashi MAKI
2. 発表標題 A large ensemble based data assimilation experiment with the coupled global atmosphere and aerosol transport models
3. 学会等名 2018 American Geophysical Union Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Keiichi Kondo, Koji Terasaki and Takemasa Miyoshi
2. 発表標題 Assimilating satellite radiances without vertical localization using the Local Ensemble Transform Kalman Filter with up to 1280 ensemble members
3. 学会等名 European Geosciences Union General Assembly 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Keiichi Kondo, Koji Terasaki and Takemasa Miyoshi
2. 発表標題 Assimilating satellite radiances without vertical localization using the Local Ensemble Transform Kalman Filter with up to 1280 ensemble members
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Keiichi Kondo and Takemasa Miyoshi
2. 発表標題 Multi-scale localization with NICAM-LETKF using real observations
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 近藤圭一、寺崎康児、三好建正
2. 発表標題 アンサンブルデータ同化における鉛直誤差相関の調査
3. 学会等名 日本気象学会春季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 近藤圭一、三好建正
2. 発表標題 NICAM-LETKFを用いたマルチスケールデータ同化
3. 学会等名 日本気象学会春季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Keiichi Kondo and Takemasa Miyoshi
2. 発表標題 Exploring localization for multiscale dynamics and satellite radiances: experiments with real observations using the global nonhydrostatic atmospheric model NICAM
3. 学会等名 WMO Symposium on Data Assimilation (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Keiichi Kondo and Takemasa Miyoshi
2. 発表標題 Non-Gaussianity in the atmospheric dynamics revealed with a 10240-member ensemble Kalman filter
3. 学会等名 WMO Symposium on Data Assimilation (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 近藤圭一、三好建正
2. 発表標題 NICAM-LETKFを用いたDual localization法の検証
3. 学会等名 日本気象学会秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 近藤圭一, 三好建正
2. 発表標題 10240メンバーのアンサンブルデータ同化実験に基づいた大気の非ガウス性の調査
3. 学会等名 日本気象学会2016年度春季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Keiichi Kondo, Takemasa Miyoshi
2. 発表標題 Non-Gaussian statistics and data assimilation in the global atmospheric dynamics with 10240-member ensemble Kalman filter
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2016 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Keiichi Kondo, Takemasa Miyoshi
2. 発表標題 Non-Gaussian statistics and data assimilation in the global atmospheric dynamics with 10240-member ensemble Kalman filter
3. 学会等名 The 7th EnKF Data Assimilation Workshop (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Keiichi Kondo, Takemasa Miyoshi
2. 発表標題 Non-Gaussian statistics and data assimilation in the global atmospheric dynamics with 10240-member ensemble Kalman filter
3. 学会等名 THE 5TH ANNUAL INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON DATA ASSIMILATION (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 近藤圭一, 三好建正
2. 発表標題 10240メンバーアンサンブルデータ同化 による局所化の解析誤差への影響
3. 学会等名 日本気象学会2016年度秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Keiichi Kondo, Koji Terasaki and Takemasa Miyoshi
2. 発表標題 Assimilating satellite radiances without vertical localization using the Local Ensemble Transform Kalman Filter with up to 1280 ensemble members
3. 学会等名 American Meteorological Society Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Keiichi Kondo, Koji Terasaki and Takemasa Miyoshi
2. 発表標題 Assimilating satellite radiances without vertical localization using the Local Ensemble Transform Kalman Filter with up to 1280 ensemble members
3. 学会等名 7th AICS international symposium (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Keiichi Kondo, Koji Terasaki and Takemasa Miyoshi
2. 発表標題 Assimilating satellite radiances without vertical localization using the Local Ensemble Transform Kalman Filter with up to 1280 ensemble members
3. 学会等名 RIKEN International Symposium on Data Assimilation (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 近藤圭一, 三好建正
2. 発表標題 大規模アンサンブルデータ同化実験に基づいた大気の非ガウス性とその影響
3. 学会等名 第6回 理研・京大合同データ同化研究会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	三好 建正 (Miyoshi Takemasa)	理化学研究所・計算科学研究センター・チームリーダー (82401)	
研究協力者	寺崎 康児 (Terasaki Koji)	理化学研究所・計算科学研究センター・研究員 (82401)	
研究協力者	今村 俊幸 (Imamura Toshiyuki)	理化学研究所・計算科学研究センター・研究員 (82401)	
研究協力者	眞木 貴史 (Maki Takashi)	気象庁気象研究所・全球大気海洋研究部・室長 (82109)	
研究協力者	関山 剛 (Sekiyama Tsuyoshi)	気象庁気象研究所・全球大気海洋研究部・主任研究官 (82109)	