

アンサンブル同化手法を用いた観測システムの最適化に関する研究

課題責任者

山崎 哲 海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門 アプリケーションラボ

著者

山崎 哲^{*1}, 野口 峻佑^{*2,3}, 福井 真^{*4,5}, 杉本 志織^{*3}

^{*1} 海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門 アプリケーションラボ, ^{*2} 九州大学 大学院理学研究院, ^{*3} 海洋研究開発機構 地球環境部門 環境変動予測研究センター, ^{*4} 気象庁 気象研究所, ^{*5} 東北大学 大学院理学研究科

キーワード: アンサンブルデータ同化システム, 全球アンサンブル大気再解析, アンサンブルダウンスケーリング, 成層圏突然昇温, JPCZ (日本海寒帯気団収束帯)

1. はじめに

海洋研究開発機構は、極域から熱帯まで世界各地で様々な観測を実施している。本課題は、アンサンブル手法に基づく先駆的なデータ同化システムを応用した観測システム実験を行うことにより、観測のインパクトを定量的に評価し、最適な観測システムの設計に役立てることを目的とする。我々は、独自で開発した全球大気アンサンブルデータ同化システム ALEDAS (AFES-LETKF data assimilation system) を有する。独自の同化システムを利用すれば、特定の観測データを同化する/しないという実験（観測システム実験、例えば[1]を参照）が可能になり、解析値の変化からその観測データの影響を定量的に評価することが可能になる。つまり、現象の発生メカニズムや予測可能性に関する知見に加えて、最適な観測システムを設計するための指針を得ることが可能となる。

本課題では ALEDAS を使ってアンサンブル実験的再解析を行っている（ALERA: AFES-LETKF experimental ensemble reanalysis）。アンサンブルメンバー数 63、成層圏解像の鉛直層数（トップ約 0.1 hPa）を有する ALEDAS を用いて、2009 年以降約 10 年程度の全球大気アンサンブル再解析データを作成している。アンサンブル再解析データは現業・研究レベルともに稀であり、長期プロダクトデータとしての価値が期待される。今回、アンサンブル再解析としての付加価値を見出すための、ALERA の解析アンサンブルスプレッドの利用研究[2]について紹介する。この研究において、成層圏突然昇温発生の数日前にスプレッドが先駆的に増幅することを発見した。成層圏循環のデータを含む ALERA を用いることで、そのメカニズムについての考察が可能となった。その詳細を 2 章に記述する。

さらに、本課題では、東北大学と気象研究所で開発された日本域領域再解析システム[3]の予報部分をベースにしたアンサンブルダウンスケーリングシステムを地球シミュレータに移植した。本アンサンブルダウンスケーリングシステムは気象庁非静力学モデル (JMA-NHM) を予報モデルとし、30 アンサンブルメンバーを有する。このアンサンブルダウンスケーリングシステムを使って、日本海寒帯気団収束帯 (JPCZ) とブロッキング現象との関係

についてのメカニズム研究を実施した。その研究[4]について、3 章で紹介する。

これらの研究開発を通じ、観測とシミュレーションとが融合した世界最先端の研究基盤を確立し、観測システム研究に関する世界的な「中核機関」となることを目指す。

2. 成層圏突然昇温に先行する解析スプレッドの増幅現象の発見[2]

昨年度までの当課題の開発で AMSU-A 放射輝度同化スキームを ALEDAS に実装した[5]。この新システムを使って、成層圏で重要な循環変動である成層圏突然昇温 (SSW) の再現性について調査を行った。

SSW とは、冬の極域成層圏極渦内で急激な昇温と西風の急減速あるいは反転を伴う現象である。SSW は成層圏と対流圏の大循環に大きな影響を与える可能性があることが知られている。

ALERA は、アンサンブル Kalman フィルターの LETKF で解析値を作成するため、解析（アンサンブル平均）場と解析摂動場の振幅であるアンサンブルスプレッドとが 6 時間毎に出力される。スプレッドは流れの不確実性の情報を反映しているので、ここから SSW の予測に役立つ知見を得られるかもしれない。そこで、ALERA で出力されるアンサンブルスプレッドについて、2 事例の SSW についてその振る舞いを調査した。2018 年 12 月に北半球で発生した SSW と、2019 年 8 月に南半球で発生した SSW について、それぞれ北半球 SSW と南半球 SSW と表記する。

図 1 は北半球 SSW と南半球 SSW についての、スプレッドの時系列を高度別に示したものである。まず、図から、高度 10 hPa において、SSW が発生（成層圏気温が昇温）する数日前にスプレッドが極大をとっている。これは、SSW に先行するスプレッドの先駆シグナルである。SSW の先駆シグナルの存在は先行研究で発見されていたが

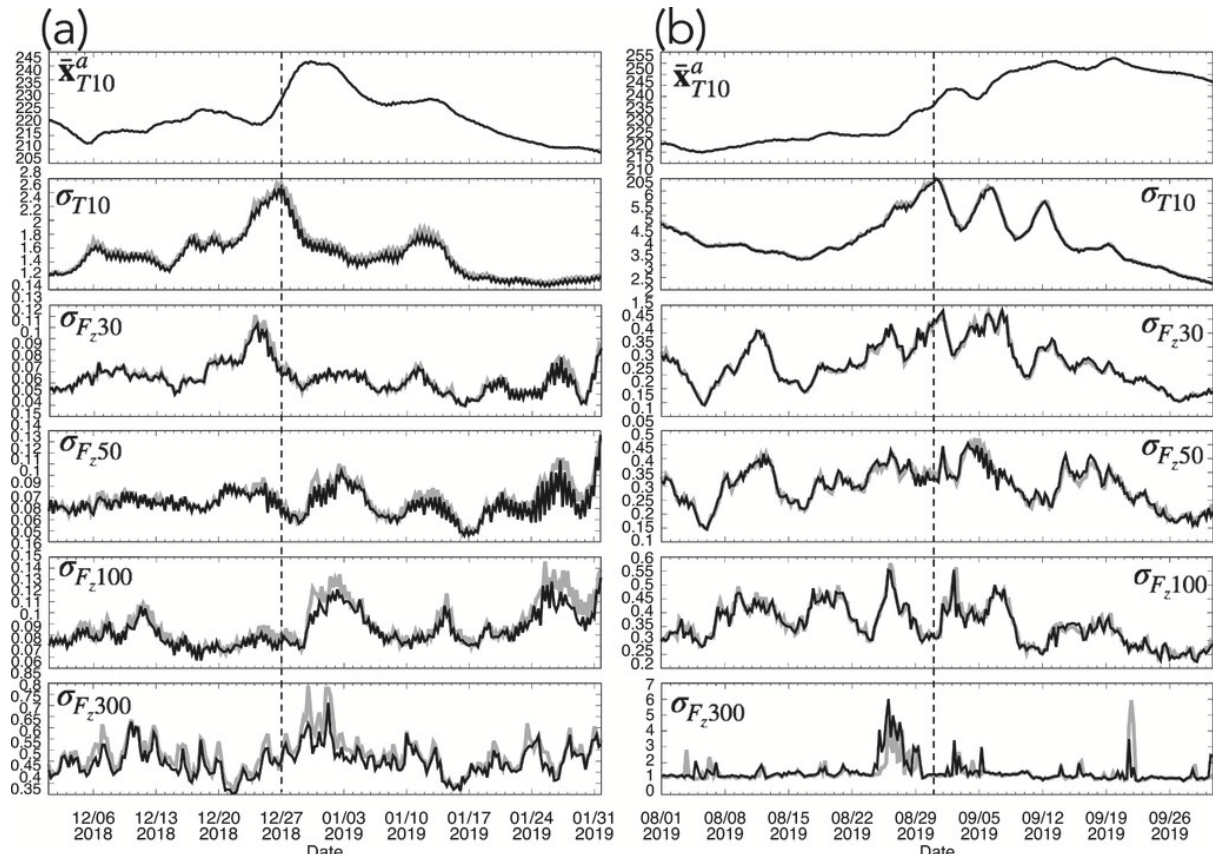


図 1: (a) 北半球 SSW と (b) 南半球 SSW 発生前後でのアンサンブルブレッドの時間変化. 最上段のパネルは (アンサンブル平均) 解析場での 10 hPa 気温の時間変化 (緯度 65 度より極側で領域平均), その下のパネルは上から順に 10 hPa での気温 (緯度 50 度より極側で領域平均), 30 hPa, 50 hPa, 100 hPa, 300 hPa での Eliassen-Palm フラックス (解析場の Eliassen-Palm フラックスが極大となる緯度帯で帯状平均) のアンサンブルブレッドの時間変化を示す (黒線が解析, 灰色線が第一推定値スプレッド). 図中の縦点線は北半球 SSW と南半球 SSW で先駆シグナルが出現した時刻を示す. [2] の Fig. 3 を転載.

(詳しくは[2]を参照), 今回, 最近発生した両半球での SSW で改めて発見できた.

さらに, この先駆シグナルは, 高度 100 hPa (下部成層圏) 以下にはなく, 成層圏内部にしか現れていなかった.

(解析場においては) SSW の生起時には対流圏からのプラネタリー波の上方伝播が必要とされることが知られているが, アンサンブルブレッドの先駆シグナルはそれと異なる振る舞いをしている.

ALERA の様々な出力データを使って, 北半球・南半球 SSW の先駆シグナルを詳細に調査した. その結果, これらのシグナルはアンサンブル摂動場に現れる成層圏内部での順圧不安定に起因することが示唆された. また, この先駆シグナルの出現にほぼ同期して観測による解析場の修正 (解析インクリメント) が行われていたことから, 先駆シグナルの存在はデータ同化システムにおいて, SSW の再現性を高くすることに資する可能性が示唆された.

この成果について, 2023 年 10 月 18 日付でプレスリリースを行った.

3. 東シベリアブロッキングが JPCZ の発現に与える影響[4]

JPCZ (日本海寒帯気団収束帯) とは, 冬季日本海において, 対流圏下層 (およそ 925 hPa) にできる水平 1000 km の風の収束帯で, 数日程度の間ほぼ同じ場所に停滞する. Japan-sea Polar airmass Convergence Zone の頭文字をとって JPCZ と呼ばれる. JPCZ は様々な雪氷災害を引き起こすことが知られている. 一例として, 2018 年 2 月の初旬に発生した JPCZ は, 福井での記録的な大雪を引き起こした.

JPCZ は, 冬季アジアモンスーンが一時的に強まり, シベリアから日本列島に向かう北西風が朝鮮半島の長白山脈 (白頭山) を迂回し, 日本海で合流することで発生・発達する.

ブロッキングは, 対流圏上層 (およそ 300 hPa) 中緯度偏西風帯でのジェット気流の大きな蛇行現象で, 1 週間程度停滞する. 水平スケール 5000 km に達する準惑星規模の現象である. 北半球では, 東シベリアの上空に頻発域の 1 つがあり, そこのブロッキングを東シベリアブロッキングと呼ぶ. このブロッキングは東アジア域への寒気の流出, つまり冬季アジアモンスーンを強化することが知られている.

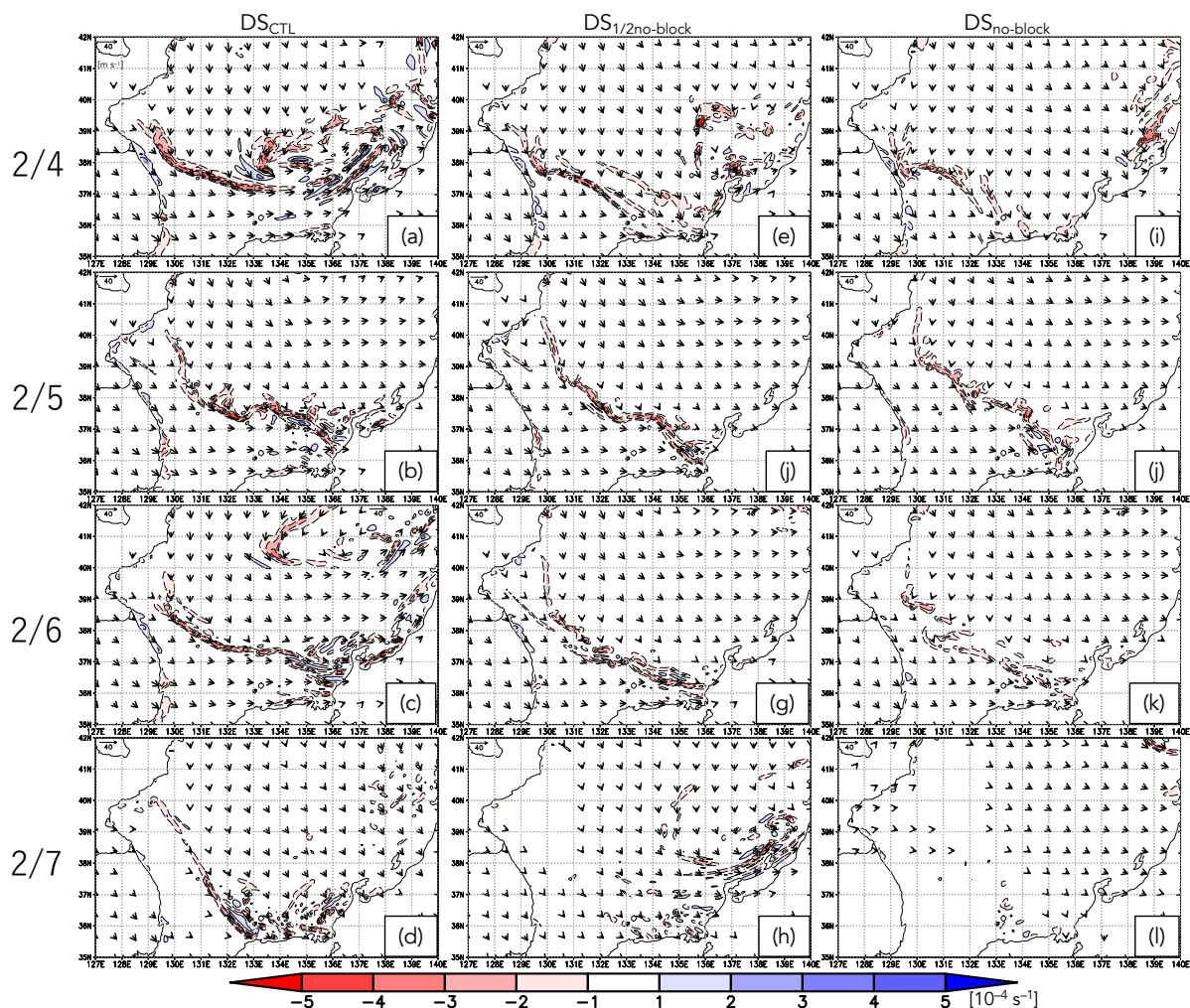


図 2: (a-d)DS 実験, (e-h)DS_{1/2no-block} 実験, (i-l)DS_{no-block} 実験での 925hPa 発散 (陰影, [10^{-4} s^{-1}]) と風 (矢印, [m s^{-1}]) の時系列. 上から順に 2018 年 2 月 4 日 00UTC, 2 月 5 日 00UTC, 2 月 6 日 00UTC, 2 月 7 日 00UTC でのスナップショット. アンサンブルメンバー 1 番の結果を示している. [4] の Fig. 3 一部を転載.

そこで、この研究では、スケールの大きく異なる JPCZ と東シベリアブロッキングとの関係を、JMA-NHM を使ったアンサンブル力学的ダウンスケーリングで調査した。2018 年 2 月初旬の JPCZ 事例について実験を行う。この事例では、2018 年 1 月下旬～2 月初頭にかけて、東シベリアブロッキングが発生していた。JPCZ は 2 月 4 日ごろに発生し、2 月 7 日くらいまで継続していた。

JMA-NHM は、25 km の外部ドメインに 5 km の内部ドメインがネストされている。外部ドメインは全球再解析データ (JRA-55, 6 時間毎)からの大気状態を受け取る。

アンサンブル数は 30 である。ダウンスケーリング実験の初期時刻は、2018 年 2 月 1 日とした。

上記の標準 (DS) 実験に対して、ブロッキングが JPCZ の発生に与える影響を評価するために、全球再解析データから東シベリアブロッキングを取り除く実験を行った。東シベリアブロッキングの発生の有無を数値化したブロッキングインデックスの時系列を作成し、その時系列に回帰した気象変数場を全球再解析データから取り除くことで、東シベリアブロッキングを除去したダウンスケール実験が可能となる。これを DS_{no-block} 実験とする。DS 実

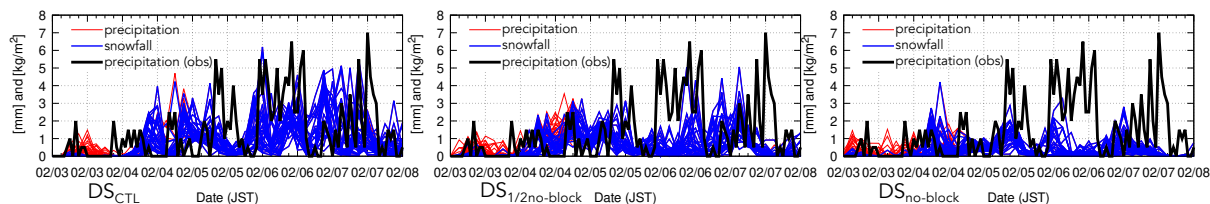


図 3: 2018 年 2 月 3 日～8 日の 福井気象台 (最近傍点) での 1 時間降水量[mm] (赤線はダウンスケール実験, 黒線は観測値)・降雪 (青線) 量[mm]の時系列. ダウンスケール実験は全アンサンブルメンバーの時系列を示している. (左)DS 実験, (中央)DS_{1/2no-block} 実験, (右列)DS_{no-block} 実験. [4] の Fig. 2 の一部を転載.

験と DS_{no-block} 実験の差からブロッキングの影響を定量化する。DS_{no-block} 実験でのブロッキングの振幅を半分にした DS_{1/2no-block} 実験を追加で行う。

ダウンスケーリング実験での JPCZ の再現性を評価する。図 2 は DS, DS_{no-block}, DS_{1/2no-block} 実験での 925 hPa 風と発散 (収束) 場の時系列を示す。DS 実験では JPCZ を良く再現できている。それに対して、DS_{no-block}・DS_{1/2no-block} 実験では JPCZ がかなり弱くなっている。このことから、東シベリアブロッキングは JPCZ の発生に大きな寄与をなす。

図 3 には、DS, DS_{no-block}, DS_{1/2no-block} 実験での福井気象台での降雪の時系列を示す。DS が福井市での降雪量に関してある程度再現できていた一方、DS_{no-block} と DS_{1/2no-block} 実験では、降雪量が DS 実験に比べて小さくなっている。特に JPCZ が福井市周辺に伸長していた 2 月 5 日～6 日に降雪量の減少が顕著となっていた。このことから、東シベリアブロッキングが JPCZ の発生とそれに伴う福井での降雪に影響を与えたことが明らかになった。

4. まとめ

ES4 で作成された全球大気アンサンブル再解析 ALERA を使って、成層圏突然昇温に先行するアンサンブルスプレッドの先駆シグナルについての調査を行った。2018 年と 2019 年に発生した両半球の 2 つの成層圏突然昇温イベントについて先駆シグナルを発見し、そのメカニズムを力学的に考察できた。

ES4 に移植されたアンサンブルダウンスケーリングシステムを使って、ブロッキングが JPCZ に与える影響について調査を行った。アンサンブルダウンスケーリング実験による時空間スケールを隔てた大気場への階層的シミュレーションによって、東シベリアブロッキングが JPCZ の発生やそれに伴う福井市での豪雪に与えた影響を統計的に評価することができた。

謝辞

AFES の ES4 での最適化、領域再解析システムおよび力学的ダウンスケーリングの ES4 への移植には地球情報科学技術センター (CEIST) 計算機システム技術運用グループの多大な支援を受けました。気象庁から JRA-55 の提供及び JMA-NHM の貸与を受けました。本研究は、科研費 JP20H01976・JP18K13617・JP19H05702 の支援を受けて実施されました。

文献

- [1] Sato, K., J. Inoue, A. Yamazaki, Y. Tomikawa, and K. Sato: “Reduced error and uncertainty in analysis and forecasting in the Southern Hemisphere through assimilation of PANSY radar observations from Syowa Station: a mid-latitude extreme cyclone case,” *Quart. J. Royal Meteor. Soc.*, **148**, 3115–3130, 2022 年 7 月, <https://doi.org/10.1002/qj.4347>.
- [2] Yamazaki, A., and S. Noguchi: “Precursory analysis ensemble spread signals that foreshadow stratospheric sudden

warmings,” *Mon. Wea. Rev.*, **151**, 3115–3130, 2023 年 12 月, <https://doi.org/10.1175/mwr-d-22-0169.1>.

[3] Fukui, S., T. Iwasaki, K. Saito, H. Seko, and M. Kunii: “A feasibility study on the high-resolution regional reanalysis over Japan assimilating only conventional observations as an alternative to the dynamical downscaling,” *J. Meteor. Soc. Japan*, **96**, 565–585, 2018 年 9 月, <https://doi.org/10.2151/jmsj.2018-056>.

[4] Yamazaki, A., S. Fukui, and S. Sugimoto: “The impacts of East Siberian blocking on the development of the JPCZ,” *SOLA*, **20**, 31–38, 2024 年 2 月, <https://doi.org/10.2151/sola.2024-005>.

[5] Yamazaki, A., K. Terasaki, T. Miyoshi, and S. Noguchi: “Estimation of AMSU-A radiance observation impacts in an LETKF-based atmospheric global data assimilation system: Comparison with EFSO and observing system experiments,” *Wea. Forecasting*, **38**, 953–970, 2023 年 6 月, <https://doi.org/10.1175/waf-d-22-0159.1>.