

両半球での2019年成層圏突然昇温のLETKF再解析システムでの再現性

山崎 哲¹, 野口峻佑².

1: アプリケーションラボ, 海洋研究開発機構

2: 環境変動予測研究センター, 海洋研究開発機構

要旨

実験的グローバルアンサンブル再解析 ALERA (AFES-LETKF experimental ensemble reanalysis) における, 成層圏突然昇温の再現性と解析スプレッドの振る舞いについて調査した. 成層圏を解像する鉛直層数を有する再解析システムを用いて2018年12月から2019年9月の間に両半球で発生した成層圏突然昇温イベントを対象とした. ALERAは, 他の再解析と比較して両半球でのイベントにおける気温の昇温のタイミングや西風弱体化あるいは東風形成のタイミングをよく再現できていた. さらに, 解析アンサンブルスプレッドがイベント発生の数日前に極大となるシグナルが見られた. このシグナルは成層圏上・中部でのみ顕著で, 下部成層圏や上部成層圏では見られなかった. 解析アンサンブル摂動場のジオポテンシャル高度場についての主成分分析によって, シグナルが成層圏で等価傾圧的な構造と, 解析アンサンブル平均場の分布に対して東西に90°位相がずれた構造を持っていることがわかった.

1 はじめに

AFES-LETKF 実験的アンサンブルグローバル再解析 (ALERA) は, 大気大循環モデル AFES と局所アンサンブル変換カルマンフィルター LETKF で構成されるデータ同化システムによって作成される. ALERA とそのデータ同化システムを使って, 特定の観測の予報へのインパクトを見積もる観測システム実験などを行ってきた (例えば, Yamazaki et al., 2021). ALERA は, これまで鉛直48層 (L48) のモデルトップが約3 hPa で, 成層圏を完全に解像できないシステムであった. また, これまででは従来型観測と衛星風のみを同化するシステムとなっていたため, 対流圏の循環に特化したようなシステムとなっていた. 今回, 我々は ALERA のシステムを鉛直56層 (L56) でモデルトップを約0.1 hPa まで変更し, 成層圏を解像できるモデルとした. さらに, Terasaki and Miyoshi (2017) で開発された LETKF での放射輝度同化スキームを実装し, AMSU-A 放射輝度観測を同化できるようにした. 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.

アンサンブル Kalman フィルターは予報初期摂動作成法の BGM 法や SV 法のように追加の作成法を必要とせずにアンサンブル摂動場を生成可能である. 生成される摂動がどのような特徴を持っているのかを知ることはその後の予報やデータ同化サイクルで更新される解析場の精度向上において重要である. Enomoto et al. (2010) (以後 E10) は, ALERA を使ったいくつかの大規模大気現象に関連する解析摂動場の振る舞いについて調査した. E10 では, その現象の一つとして, 2006年1月の北半球 SSW イベントについての解析スプレッドの時間変動を調べた. その結果, SSW の発生に伴って, 約5日前に突然昇温が発生した成層圏中部 (10 hPa) で気温の解析スプレッドが先駆的に増幅し, 昇温発生後に収まるという振る舞いを発見した. この解析スプレッドの増加は Eliassen-Palm (E-P) フラックスの場でも見られており, 気温のスプレッドの極大時刻において10 hPa 付近の北極域で E-P フラックスも極大となる分布を取ることが示されている. E10 は SSW などの流れ依存な解析場に際して解析摂動場がどのように応答するかを見出した画期的な研究である. しかしながら, E10 ではモデルトップが ~3 hPa の ALERA を使用しており, 上部成層圏を十分に解像できていなかったことと, 北半球の SSW 1 イベントに限った調査であった. また, 解析スプレッドにのみ注目した研究で, 実際のアンサンブル摂動場のパターンや, 10 hPa (中

部成層圏) よりも高高度での循環場の特徴, 10 hPa 以外での解析スプレッドの時間変動については詳細には調査されていない。

そこで本研究では, 上部成層圏を解像できる ALERA を使い, SSW の E10 と別の 2 事例について, E10 の追試を行った。

2 ALERA について

ALERA 作成に用いられる AFES は, 水平解像度が約 100 km (T119), 鉛直 56 層 (L56) でモデルトップが約 0.1 hPa である。対流スキームには Emanuel 型の積雲対流スキーム, 放射には MSTRN-X が使われている (詳細は Kodama et al., 2019)。海洋境界条件には Daily 1/4° OISST (Reynolds et al., 2007) が用いられる。さらに, 重力波パラメタリゼーションには, 地形性のものに加えて新たに非地形性の重力波スキーム (Scinocca, 2003; Orr et al., 2010; Baba, 2019) が実装されている。LETKF では, アンサンブルメンバー数は 63 に設定されている。観測の局所化は水平に 400 km, 鉛直に $0.4 \ln p$ を設定し, 共分散膨張には空間一様な 10% の乗法的膨張法を用いている。同化される観測は, PREPBUFR による従来型観測と衛星風に加えて, AMSU-A 放射輝度観測の 6~8 チャンネルを新たに同化している。AMSU-A の同化には Terasaki and Miyoshi (2017) で開発された放射輝度同化手法とオンラインバイアス補正法を実装している。

データ同化実験の解析期間は 2018 年 12 月 1 日から 2019 年 10 月 31 日までである。この期間中, 12 月後半から 1 月にかけて北半球で, 9 月の前半から数ヶ月間南半球で SSW が発生した。以下では前者を北半球 SSW, 後者を南半球 SSW と呼ぶ。北半球 SSW・南半球 SSW の再現性を図 1 に

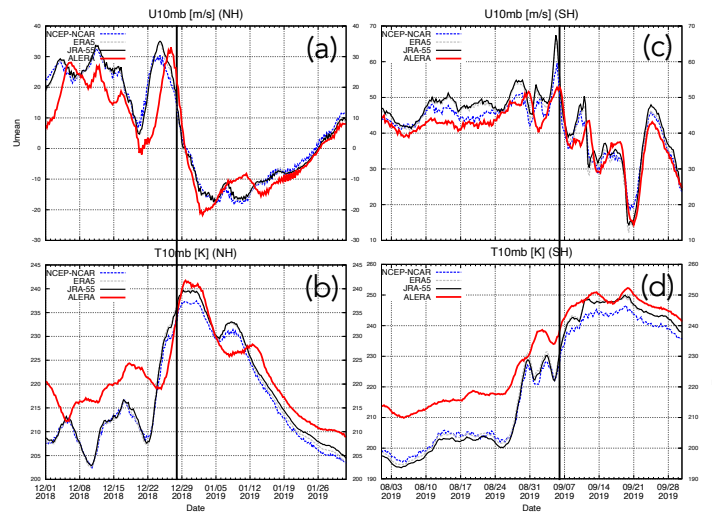


図 1: (a, b) 北半球 SSW, (c, d) 南半球 SSW の ALERA での再現性。緯度 65° より極側で平均された帯状平均 10 hPa (a, c) 東西風 [m s^{-1}], (b, d) 気温 [K] の時系列で, ALERA (赤線; 解析アンサンブル平均), ERA5 (灰点線, Hersbach et al., 2020), JRA-55 (黒線, Kobayashi et al., 2015), NCEP-NCAR (青点線, Kalnay et al., 1996) を示す。

示す。ALERA は, 他の全球再解析と同様に SSW 発生タイミングを良く再現できている。成層圏中部での東西風の時間変化は, 他の再解析とよく合っており, 北半球 SSW では東風形成, 南半球 SSW では西風の弱さを定量的によく捉えている。気温の時間変化は, 昇温のタイミングとそれ以降の時間変化をよく再現できている。ただし, ALERA では他の再解析に比べて昇温の発生前に成層圏で高温バイアスが持続している違いがある。この違いは, 極域で時空間的に一様であるため, 今回対象とするスプレッドや摂動 (つまり解析場からのずれ) の変動には影響を及ぼさないとみなして分析を進める。

3 解析摂動場の振る舞い

E10 で発見された解析スプレッドの増幅がどの高度での循環変動に起因するものなのかを調査するため、北半球 SSW・南半球 SSW について各高度での E-P フラックスが極大となる緯度帯をまず調べる。図 2 は上部対流圏 (300 hPa) から中部成層圏 (10 hPa) にかけての E-P フラック

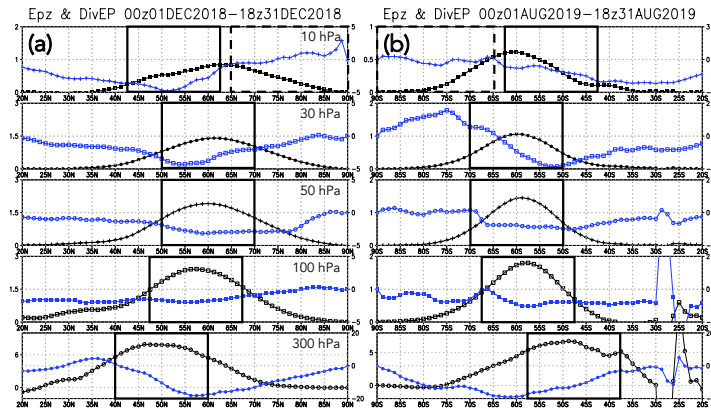


図 2: 300 hPa から 10 hPa (下から, 300, 100, 50, 30, 10 hPa) での上向き E-P フラックス [kg s^{-2}] (黒線) とフラックス発散 [$\text{m s}^{-2} \text{ day}^{-1}$] (青線) の解析場での分布. (a) 2018 年 12 月と (b) 2019 年 8 月平均値を示す. 黒枠は (a) 北半球 SSW と (b) 南半球 SSW それぞれについての各高度でのスプレッド及び 10 hPa での解析平均場気温の時系列を計算するための緯度帯を示している (図 3).

ス (MIM 形式, Iwasaki and Mochizuki, 2012) の解析場での分布を示す. 先行研究で示されるように, E-P フラックスは対流圏上部のストームトラック域を起源として, 成層圏の上部へ向かって極向きに伝播している. 30 hPa 以上ではフラックスの収束が大きくなっており, これは SSW と関係するプラネタリー波による西風減速作用と関係している. ここでは, 解析スプレッドの増幅がどの高度から始まっているのかを調査するため, 各高度での上向き E-P フラックスの卓越する緯度帯を 20° 間隔で定め, その緯度帯で平均した解析スプレッド場について時系列を見る. なお, 30 hPa 以上ではフラックスの収束も卓越してくるので, 上向き E-P フラックスとその収束の両方がピークとなっている間の緯度帯を選んだ.

図 3 は, 上部対流圏から中部成層圏での E-P フラックスの卓越する緯度帯 (図 2) での解析スプレッドの時間変動を示す. まず, 北半球 SSW 事例について見る. 図から, 10 hPa での気温の解析スプレッドの時系列に E10 で発見された先駆的シグナルが同様に発見された. このシグナルは, 12 月 25 日前後にピークをとっており, 2ヶ月間の時系列の中で顕著に大きくなっている. このピークは, 30 hPa の上向き E-P フラックスについての解析スプレッドについても見られるが, それ以下の高度では見られなくなる. 次に, 南半球 SSW 事例については, 10 hPa 気温及び 30 hPa 上向き E-P フラックスに関して, 8 月末の 2 週間程度について, 北半球 SSW 事例よりも緩やかな解析スプレッドのピークが見られる. 北半球 SSW 事例の場合と同様にこの緩やかなピークは下層に行くほど不明瞭になり, 下部成層圏と上部対流圏ではほとんど見られなくなる. このことから, E10 で発見された SSW に先行する解析スプレッドの先駆的増幅は両半球での SSW 事例にも同様に見出された.

最後に, この解析スプレッド場が最大となる時刻でのアンサンブル摂動場のパターンを分析するため, 解析摂動場について主成分 (EOF) 分析を適用した. EOF 分析は, 上部成層圏から下部対流圏までのいくつかの代表的な高さにおけるジオポテンシャル高度場について 20° より極側領域を対象としてなされた. まず, EOF 第一モードの寄与率についての時系列を見ると, 上部~中部成層圏において, 解析スプレッドの先駆的なピークとほぼ同じタイミングで寄与率が極大となることがわかった (図は省略). このピークとなるタイミングでの EOF 第一モードの寄与率は, 5 hPa

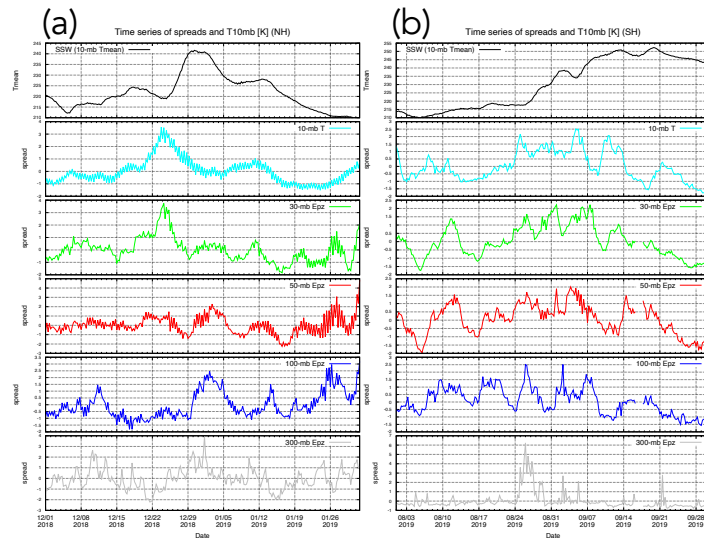


図 3: 300 hPa から 10 hPa (下から, 300, 100, 50, 30, 10 hPa) における, 図 2 で定義された緯度帯 (黒枠) で平均した解析スプレッドの時系列を示す. 最上部のパネルのみ図 2 の黒点線枠の緯度帯で平均された 10 hPa 帯状平均気温 [K] の ALERA 解析 (アンサンブル平均) 値の時系列を示す. 30 hPa 以下の高度は上向き E-P フラックス [kg s^{-2}], 10 hPa では帯状平均気温 [K] についての解析スプレッドを示している. 全ての解析スプレッドは時間平均について規格化されており, 振幅 1 が 1 標準偏差に相当する.

や 10 hPa では約 50% に及んだ. さらに, 先駆的ピークでの EOF 第一モードの最大振幅 (作用中心) 位置を, 5 hPa~100 hPa についてプロットしたものが図 4 となる. 図から, 北半球 SSW・南半球 SSW 事例ともに, EOF 第一モードの位相が極付近で等価順圧的になっており, その特徴は成層圏の上部ほど成立している. このプロットは, 先駆的スプレッド増幅の前時刻や, SSW が発生した後は順圧的でなくなっていた (図は省略). さらに, EOF 第一モードのパターンは, 解析アンサンブル平均場 (つまり, 「現実」場) での波数 1 の高度場パターンから位相が 90° ずれたパターンとなっている.

4 まとめと考察

AFES と LETKF で構成される全球大気データ同化システムが更新され, それによって作成される実験的アンサンブル ALERA はモデルトップが 0.1 hPa となり, 成層圏を解像できるようになった. さらに, Terasaki and Miyoshi (2017) で開発された AMSU-A 放射輝度観測の同化スキームを実装し, 1 年以上にわかってデータ同化システムを安定に積分できた. 2018 年 10 月からこの新システムでの積分を開始し 1 年以上蓄積した ALERA のデータを使って, 2018 年 12 月に北半球, 2019 年 9 月に南半球で発生した成層圏突然昇温 (SSW) イベントについて, ALERA での SSW の再現性を調査した. 特に, Enomoto et al. (2010) (E10) で発見された, SSW に数日先行する (10 hPa) 成層圏での解析スプレッドの先駆的な増幅シグナルが, 更新された ALERA でも見られるのかに注目し, 解析スプレッド場を中心に分析を行った.

結果, 両半球での SSW 事例が ALERA で再現できていることがわかった. 解析 (アンサンブル平均) 場について, 他の全球大気再解析と比べて, SSW 発生前に極域の成層圏気温に高温バイアスがあるものの, 昇温のタイミングや東西風の時間変動を上手く再現できていた. そして, 解析スプレッド場の時間変動を, 解析場の E-P フラックス分布を根拠にして, 上部対流圏から中部成層圏 (10 hPa) までの上向き E-P フラックスのピークの緯度帯について調査した. その結果,

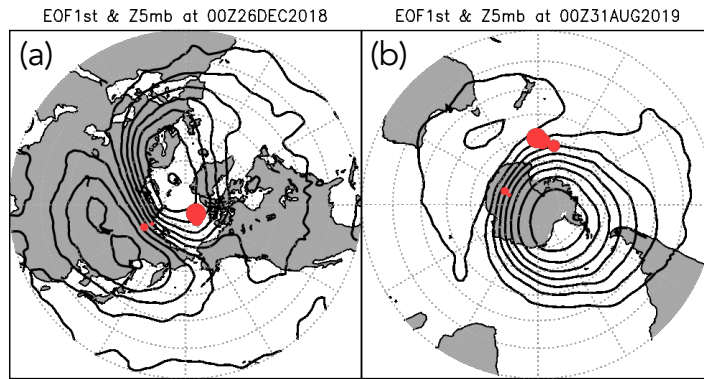


図 4: ジオポテンシャル高度場の解析摂動場についての EOF 第一モードの最大振幅 (作用中心) 位置 (赤丸印) と 5 hPa 解析アンサンブル平均場 (コンター) のスナップショット. 北半球 SSW は (a) 2018 年 12 月 26 日 00UTC, 南半球 SSW は (b) 2019 年 8 月 31 日 00UTC でのスナップショットを示す. 赤丸は大きい方から 5, 10, 30, 500, 100 hPa の摂動場についての EOF 第一モードの位置を示している.

E10 と同様な解析スプレッドの先駆的増幅シグナルが, 昇温の約 1 週間前~数日前に見られることが両半球 SSW 事例について見られることがわかった. このシグナルは, 上部~中部成層圏で見られ, 下部成層圏~上部対流圏では明瞭でなかった. さらに, 解析摂動 (スプレッド) 場について主成分 (EOF) 分析を行うと, スプレッドの増幅のタイミングで EOF 第一モードが卓越し, さらにそのパターンが成層圏で等価順圧的になっていること, さらに解析アンサンブル平均場から東西に位相が 90° ずれたパターンとなっていることがわかった.

今回得られた結果は, E10 で発見された解析スプレッドのシグナルが LETKF を使ったアンサンブルデータ同化システムで普遍的に見られることを支持する. この流れ依存な解析スプレッドの増幅によって, その後の SSW の生起に有利なアンサンブル摂動場を自発的に作成している可能性がある. さらに, EOF 分析で得られたこの解析摂動場のパターンは, Mukougawa et al. (2017) (M17) で見出された, SSW に伴う順圧不安定モードと類似している. M17 は, 気象庁気象研究所の全球大気大循環モデルを使って BGM 法によるアンサンブル予報実験を行い, 2007 年 3 月の北半球 SSW 事例でのアンサンブル予報場の時間発展のばらつきに成層圏内部での順圧不安定モードが寄与したことを示した. 今回の我々の結果は, 2018~2019 年に発生した SSW イベントについて, E10 で発見された解析スプレッドの先駆的な増幅が M17 で発見された SSW に伴う順圧不安定モードに関係があることを示唆する.

今後, 予測可能性やデータ同化システムの再現性向上の観点から, この解析スプレッドの先駆的増幅が成層圏循環の解析・予測の再現性向上に有利となるのか更に調査したい. Saito et al. (2011) では, 気象研究所の領域気象モデル (NHM) を使って, LETKF を含む様々なアンサンブル初期値作成法から得られたアンサンブル予報場や解析場の比較を行っている. 彼らの結果では, LETKF で作られた初期値からの予報は BGM 法のそれと似たスプレッド場のパターンを示すが, スプレッドの増幅がより遅い, といった類似点や相違点を分析している. LETKF では RTPP 法などの乗法的膨張法と異なる共分散膨張スキームを用いることで, より BGM 法に似た性質の摂動を与えることが可能である. 共分散膨張スキームを交換したり, そのパラメータをチューニングすることで, どういったアンサンブル摂動を与えるとより SSW の解析精度が向上するのかといった実験を行うことも今後の課題として挙げられる.

謝辞

ALERA の作成には, JAMSTEC の地球シミュレータを用いました. 本研究会で助言をいただいた参加者の皆様に感謝いたします.

参考文献

- Baba, Y., 2019: Spectral cumulus parameterization based on cloud-resolving model. *Clim. Dyn.*, **52**, 309–334.
- Enomoto, T., M. Hattori, T. Miyoshi, and S. Yamane, 2010: Precursory signals in analysis ensemble spread. *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L08 004, doi:10.1029/2010GL042723.
- Hersbach, H., et al., 2020: The ERA5 global reanalysis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **146**, 1999–2049, doi:10.1002/qj.3803.
- Iwasaki, T. and Y. Mochizuki, 2012: Mass-weighted isentropic zonal mean equatorward flow in the Northern Hemispheric winter. *SOLA*, **8**, 115–118, doi:10.2151/sola.2012-029.
- Kalnay, E., et al., 1996: The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**.
- Kobayashi, S., et al., 2015: The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93**, 5–48, doi:10.2151/jmsj.2015-001.
- Kodama, C., A. Kuwano-Yoshida, S. Watanabe, T. Doi, H. Kashimura, and T. Nasuno, 2019: JAMSTEC model intercomparison project (JMIP). *JAMSTEC Rep. Res. Dev.*, **28**, 5–34, doi:10.5918/jamstecr.28.5.
- Mukougawa, H., S. Noguchi, Y. Kuroda, R. Mizuta, and K. Kodera, 2017: Dynamics and predictability of downward - propagating stratospheric planetary waves observed in March 2007. *J. Atmos. Sci.*, **74**, 3533–3550, doi:10.1175/JAS-D-16-0330.1.
- Orr, A., P. Bechtold, J. Scinocca, M. Ern, and M. Janisková, 2010: Improved middle atmosphere climate and forecasts in the ECMWF model through a non-orographic gravity wave drag parameterization. *J. Climate*, **23**, 5905–5926.
- Reynolds, R. W., T. M. Smith, C. Liu, D. B. Chelton, K. S. Casey, and M. G. Schlax, 2007: Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature. *J. Climate*, **20**, 5473–5496, doi:10.1175/2007JCLI1824.1.
- Saito, K., M. Hara, M. Kunii, H. Seko, and M. Yamaguchi, 2011: Comparison of initial perturbation methods for the mesoscale ensemble prediction system of the Meteorological Research Institute for the WWRP Beijing 2008 Olympics Research and Development Project (B08RDP). *Tellus*, **63A**, 445–467, doi:10.1111/j.1600-0870.2010.00509.x.
- Scinocca, J. F., 2003: An accurate spectral nonorographic gravity wave drag parameterization for general circulation models. *J. Atmos. Sci.*, **60**, 667–682.
- Terasaki, K. and T. Miyoshi, 2017: Assimilating AMSU-A radiances with the NICAM-LETKF. *J. Meteor. Soc. Japan*, **95**, 433–466, doi:10.2151/jmsj.2017-028.

Yamazaki, A., T. Miyoshi, J. Inoue, T. Enomoto, and N. Komori, 2021: EFSO at different geographical locations verified with observing system experiments. *Wea. Forecasting*, **36**, 1219–1236.