

AMSU-A 放射輝度観測同化インパクトの推定：観測システム実験（OSE）と EFSO

*山崎哲（JAMSTEC）・寺崎康児（気象研究所）・三好建正（理研 R-CCS）・野口峻佑（九大・理）

1 はじめに

AFES-LETKF 実験的アンサンブル全球再解析（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。我々は、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いる。さらに、EFSO と呼ばれる、すべての観測の寄与を一度に診断する手法を実装している（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、Yamazaki and Noguchi (2023) では成層圏で重要な循環変動である成層圏突然昇温の再現性と、解析スプレッドの先駆的増幅現象について調査を行った。

今回は、同化が可能になった AMSU-A 放射輝度の観測インパクトについて、観測システム実験（OSE）と EFSO を比較し、観測インパクトが「蓄積」する状況で EFSO が適用可能なのかを調査した。また、OSE を通じて AMSU-A 放射輝度の観測インパクトを詳細に調査することで、ALERA のシステムに新たに実装された放射輝度同化スキームが正しく動作しているかを確認した。ここでの報告は (Yamazaki et al., 2023, 投稿中) に基づくものである。

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 (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、同化窓は 6 時間に設定されている。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。さらに Yamazaki et al. (2021) の EFSO の計算スキームが実装されている。EFSO の予報評価時間は 6 時間に設定している。同化される観測は、PREP-BUFR による従来型観測・航空機観測・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。

ALERA の精度は、JRA-55 (Kobayashi et al., 2015)、ERA5 (Hersbach et al., 2020)、NCEP-NCAR (Kalnay et al., 1996) 再解析との比較から、対流圏では NCEP-NCAR と同程度の精度を有していた。また、Yamazaki and Noguchi (2023) では、2018 年~2019 年に両半球で発生した成層圏突然昇温を再現できていたことが示されている。

ここでは、ALERA のシステムから AMSU-A 放射輝度観測だけを除いた OSE を行った。OSE は 2 つの期間についてなされ、2018 年 12 月 21 日から 2019 年 1 月 31 日 (NH-winter 実験) と、2019 年 8 月 23 日から 2019 年 10 月 3 日 (SH-

winter 実験) の2つの期間について ALERA (OSE に対して CTL 実験) と比較を行う。

3 蓄積観測インパクトの定義

EFSO と OSE で得られる AMSU-A 観測インパクトを比較するため、観測インパクトを以下のように定義する。まず、全観測による観測インパクトを「全観測インパクト」として以下で定義する (Yamazaki et al. 2021) :

$$\Delta E^2 \equiv (\mathbf{e}^f)^\top \mathbf{C} \mathbf{e}^f - (\mathbf{e}^g)^\top \mathbf{C} \mathbf{e}^g, \quad (1)$$

この \mathbf{e}^f と \mathbf{e}^g は誤差,

$$\mathbf{e}^f = \bar{\mathbf{x}}^f(t) - \bar{\mathbf{x}}^a(t), \quad \mathbf{e}^g = \bar{\mathbf{x}}^g(t) - \bar{\mathbf{x}}^a(t), \quad (2)$$

を示す。ここでの $\mathbf{x}(t)$ は時刻 t でのモデル格子点での全変数からなる状態ベクトルで、上付き文字 a, g, f はそれぞれ解析値, 6時間予報値 (第一推定値), 12時間予報値 (第一推定値からの6時間予報値) を示す。 $\bar{\mathbf{x}}(t)$ は $\mathbf{x}(t)$ のアンサンブル平均値, \mathbf{C} はノルムと全球平均を定義する行列である。本研究でのノルムは湿潤全エネルギーを用いている (Ehrendorfer et al., 1999)。全観測インパクト ΔE^2 は第一推定値からの予報誤差と解析値からの予報誤差の差であり、つまり全ての同化された観測のインパクトと同一となる。

式 (1) と (2) について、AMSU-A 観測を含む CTL と含まない OSE それぞれでの全観測インパクトを ΔE_{CTL}^2 と ΔE_{OSE}^2 と定義し、その差を取ることで AMSU-A の観測インパクト $I_{\text{AMSU-A}}$ を得る。

$$I_{\text{AMSU-A}} \equiv \Delta E_{\text{CTL}}^2 - \Delta E_{\text{OSE}}^2. \quad (3)$$

これに対して、EFSO によって推定される AMSU-A の観測インパクトを $e_{\text{AMSU-A}}$ と表記する。

$e_{\text{AMSU-A}}$ と $I_{\text{AMSU-A}}$ が対応するのは自明でない。それは、データ同化サイクルを通じて、AMSU-A の観測インパクトが蓄積するためである。EFSO の定式化において、ある観測 J に対する EFSO の推定は、データ同化サイクルを繰り返さずに、解析を行う際に一度だけ J のデータを除去 (OSE) した noncycling な状況を仮定し

ている。この状況では、CTL と OSE での $\bar{\mathbf{x}}^f(t)$ と $\bar{\mathbf{x}}^a(t)$ が共通なものとなっている。noncycling な状況においては、EFSO が J の観測インパクトを非常によく推定できることは示されている (例えば, Yamazaki et al., 2021)。しかし、今回の OSE では、ある観測種 J' を一定期間データ同化サイクルにおいて繰り返し除去する cycling な状況を想定する。この cycling な状況では、複数回のデータ同化 (解析予報) サイクルを通じて J' のインパクトが蓄積するため、CTL と OSE で $\bar{\mathbf{x}}^f(t)$ も $\bar{\mathbf{x}}^a(t)$ も異なるものとなる: こういった cycling な状況でえられる J' の観測インパクトを蓄積観測インパクトと呼ぶ。そのため、本研究では、EFSO が蓄積観測インパクトをどの程度、あるいはそれのどの部分を推定できるのかを調査する。ここでは、 J' が AMSU-A 観測に対応する。

4 結果

NH-winter と SH-winter 実験の期間で平均された AMSU-A の EFSO 値 ($e_{\text{AMSU-A}}$) と蓄積観測インパクト ($I_{\text{AMSU-A}}$) を表 1 に示す。どちらの実験でも $e_{\text{AMSU-A}}$ は正の値を取っており、AMSU-A 観測が予報改善に寄与し得ることを示している。一方で、 $I_{\text{AMSU-A}}$ は負の値を取っており、EFSO と逆符号になっている。このことは、式 (3) から、OSE の全観測インパクトが CTL のそれよりも大きい値を取ることを意味する。

表 1: NH-winter と SH-winter 実験についての $e_{\text{AMSU-A}}$ と $I_{\text{AMSU-A}}$. 期間平均された値で、1 回のデータ同化あたりの観測インパクトを示す。単位は $[\text{J kg}^{-1}]$.

実験	$e_{\text{AMSU-A}}$	$I_{\text{AMSU-A}}$
NH-winter	7.732×10^{-2}	-9.4×10^{-2}
SH-winter	8.474×10^{-2}	-1.36×10^{-1}

AMSU-A 観測の蓄積効果によって、EFSO に対して逆符号の観測インパクトが現れる理由を分析する。図 1 は $I_{\text{AMSU-A}}$ を構成する全観測インパクト ΔE_{CTL}^2 および ΔE_{OSE}^2 の実験期間での時系列を示す。図 1a,c から、同化サイクルを開始した直後を除く実験期間のほぼ全ての期間において ΔE_{CTL}^2 の方が ΔE_{OSE}^2 よりも小さくなっている。これが $I_{\text{AMSU-A}}$ が負値を取る理由

になっている。さらに、 ΔE_{CTL}^2 と ΔE_{OSE}^2 を構成する (式 (3))、予報誤差 e^f と e^g の時系列を図 1b,d に示す。図から、ほとんど全ての実験期間で、CTLの方がOSEよりも e^f と e^g の値が小さくなっている。このことは、CTLの方がOSEよりも (短時間) 予報の誤差が小さくなっていることを意味する。

時間程度の短時間で予報誤差がOSEよりも発達しにくいことを意味している。この場合、ある時刻での第一推定値と解析値の差、すなわちインクリメントがCTLの方が小さくなることを意味し、同化による予報モデルへのショックが小さくなっていることになる。つまり、CTLの方がOSEよりもデータ同化システムが安定になっている。この効果は、予報モデルの構成を変えずに、AMSU-A 観測を追加することで短時間予報の誤差が小さくなるということも意味し

Fig. 2

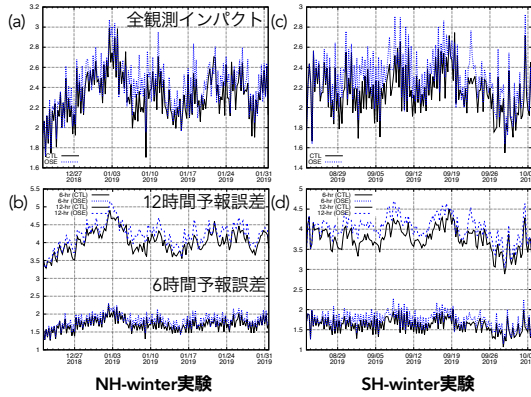


図 1: (a,b) NH-winter と (c,d) SH-winter 実験での (上段) ΔE_{CTL}^2 および ΔE_{OSE}^2 と (下段) e^f (太線) と e^g (細線) の時系列。黒線が CTL のもの、青破線が OSE のものを示す。単位は全て $[J \text{ kg}^{-1}]$ 。

AMSU-A 観測についての蓄積観測インパクトが負になる、つまり EFSO での推定に対して一見「改悪」的な観測インパクトを持つ理由は、AMSU-A 観測を同化する CTL の方が同化しない OSE よりも予報誤差が小さくなるためであった。このことは、AMSU-A 観測が蓄積の効果によって悪影響を及ぼすということだろうか？ そうではなく、負の I_{AMSU-A} はデータ同化サイクルの安定化させている。

図 2 は、AMSU-A 観測を同化する場合 (CTL) としない場合 (OSE) での予報・解析サイクルの時間発展についての概念図である。OSE では、AMSU-A 観測を除き始めてから (時刻 t_0)、解析値 (O) が CTL のそれ (C) とずれ始め、およそ 2 週間くらいで一定のずれに達する (図には示さない)。CTL の方が予報誤差が OSE よりも小さくなっているため、CTL の第一推定値 (C') は OSE のそれ (O') よりも解析値に近い値を取り続けることになる。このことは、AMSU-A 観測を含むことで CTL の同化サイクルが、6~12

Fig. 3

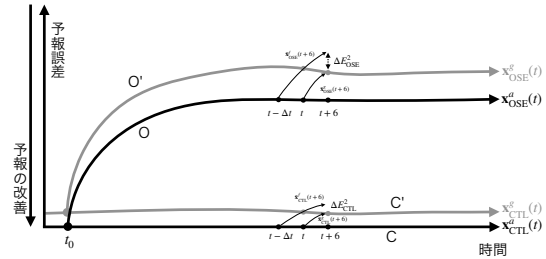


図 2: CTL と OSE での解析値と第一推定値の時系列の概念図。横軸を CTL の解析値 (C) の時系列として、縦軸をそれからの誤差 (ずれ) とする。OSE の解析値の時系列は O、 C' および O' はそれぞれ CTL と OSE の第一推定値 $x^b(t)$ の時系列を示す。CTL と OSE での時刻 t での $\bar{x}^f(t)$ と $\bar{x}^g(t)$ をそれぞれ C と O からの細矢印として示している。

AMSU-A 観測について、正の EFSO に対して負の蓄積観測インパクトが現れることは、AMSU-A 観測種の追加によるデータ同化システムの安定化に関係していることがわかった。特定の観測や観測種を繰り返し同化する cycling な状況では、その観測の蓄積効果によって EFSO での推定とは一見異なる観測インパクトが現れ、それは同化システムに良い影響を与えている。なお、今回の AMSU-A は EFSO で正の観測インパクトを持つ、つまり予報を改善し得る有益な観測であったが、EFSO が負の観測インパクトを示すような有害な観測に対してどうなるのかは別途調査する必要がある：ただし、その場合には正の蓄積観測インパクトが出現することが期待される。

5 蓄積観測インパクトの分布

$I_{\text{AMSU-A}}$ や $e_{\text{AMSU-A}}$ の定式化に含まれる C は鉛直積算・全球平均の操作を含んでいる。そのため、その操作を施す前の $I_{\text{AMSU-A}}$ や $e_{\text{AMSU-A}}$ についての空間分布を描くことができる。分布を比較することで、EFSO が $I_{\text{AMSU-A}}$ に有効かどうか調べる。

図3は $e_{\text{AMSU-A}}$ と $I_{\text{AMSU-A}}$ の高度緯度断面を示す。図から、 $e_{\text{AMSU-A}}$ は南半球中緯度の対流圏上層に正の観測インパクトの極大域をもつことがわかる。これと比較して負の $I_{\text{AMSU-A}}$ の分布は、 $e_{\text{AMSU-A}}$ と同じく南半球中緯度の対流圏上部に極大域をもっている。このことから、EFSO で推定される正の観測インパクトの分布から、負の $I_{\text{AMSU-A}}$ が現れやすい場所を推定することができる。さらに $e_{\text{AMSU-A}}$ に比べて $I_{\text{AMSU-A}}$ の分布は広域に及んでおり、特に南半球の冬季 (SH-winter 実験) では負の $I_{\text{AMSU-A}}$ が南半球の成層圏まで広がっていることがわかる。これは、cycling なデータ同化を通じて AMSU-A 観測のインパクトが力学的に伝播し、広域に及んでいることを示している。

なお、負の $I_{\text{AMSU-A}}$ の大きな領域では、CTL の解析値が OSE のそれよりも JRA-55 や ERA5 の解析値に近くなっていることもわかった (図には示さない)。

SH-winter 実験での成層圏に向かう $I_{\text{AMSU-A}}$ の力学的伝播の様子を図4に示す。2019年9月の初め (1~5日) に対流圏上部 (300 hPa) において南米大陸の西岸沖にブロッキング的なリッジが存在し、そのちょうど下流側で負の $I_{\text{AMSU-A}}$ が大きくなっている (図4a)。次に、負の $I_{\text{AMSU-A}}$ の成層圏への鉛直伝播を確認するため、60°S以南で領域平均した $I_{\text{AMSU-A}}$ の高度別の時系列を図4bに示す。対流圏上層で9月1~5日に負の $I_{\text{AMSU-A}}$ の極値が見られ、その負の極値が中部成層圏 (30 hPa) に向かって数日かけて上方伝播している様子が見られる。これは、冬季南極域での対流圏と成層圏の力学的な結合過程が負の $I_{\text{AMSU-A}}$ の伝播に関係しており、それによって AMSU-A 観測のインパクトが広域に及ぶ、すなわち蓄積していることがわかった。

6 まとめ

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。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、新システムでの長期積分を行なった。

AMSU-A 観測の EFSO での推定が、OSE で得られる実際の AMSU-A 観測インパクトを推定できるかを調査した。ここでの OSE は AMSU-A 観測だけのデータを同化しない状態で解析・予報サイクルを複数回繰り返す cycling な OSE を行った。cycling な OSE においては、AMSU-A 観測のインパクトが蓄積する。OSE 実験を 2018年12月下旬~2019年1月 (NH-winter) と 2019年8月下旬~10月上旬 (SH-winter) について行い、AMSU-A 観測を同化する実験と比較した。

その結果、EFSO と OSE での AMSU-A 観測インパクトは定量的に逆符号を持つことがわかった。これは、cycling なデータ同化を通じて、AMSU-A 観測のインパクトが解析値と短時間予報値とのずれ (誤差) を小さくするためであることがわかった：つまり、AMSU-A 観測インパクトの蓄積がデータ同化システムを安定化することがわかった。

最後に EFSO と OSE での AMSU-A 観測インパクトの分布を比較した。正の (予報を改善し得る) EFSO 値の領域は南半球中緯度の対流圏上部に分布することがわかった。それに対して OSE で得られる負の (システムを安定化する) 観測インパクト領域も同領域に現れ、さらに EFSO 値に比べて南半球中高緯度の広域に及ぶことがわかった。特に、SH-winter 実験では成層圏にまで負の観測インパクト領域が広がっていて、これには冬季中高緯度の対流圏・成層圏力学的結合過程が関与していることが示された。また、EFSO と cycling な OSE での AMSU-A 観測インパクトの比較から、総合して AMSU-A 放射輝度観測の同化スキームの実装に成功していることもわかった。

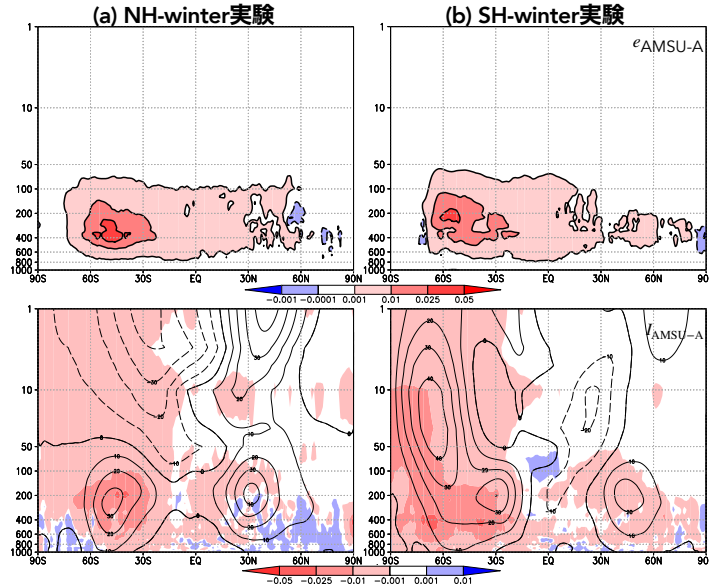


図 3: (a) NH-winter と (c) SH-winter 実験での (上段) $e_{\text{AMSU-A}}$ と (下段) $I_{\text{AMSU-A}}$ の期間平均された帯状平均高度緯度断面 [J kg^{-1}]. $I_{\text{AMSU-A}}$ についてのパネルのコンターは CTL 解析値の帯状平均東西風 [m s^{-1}] を示す.

謝辞

ALERA (<https://www.jamstec.go.jp/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.
- Ehrendorfer, M., R. M. Errico, and K. D. Raeder, 1999: Singular-vector perturbation growth in a primitive equation model with moist physics. *J. Atmos. Sci.*, **56**, 1627–1648.
- Hersbach, H., et al., 2020: The ERA5 global reanalysis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **146**, 1999–2049, doi:10.1002/qj.3803.
- Kalnay, E., et al., 1996: The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 437 – 472.
- 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.
- 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.
- 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.

Fig. 13

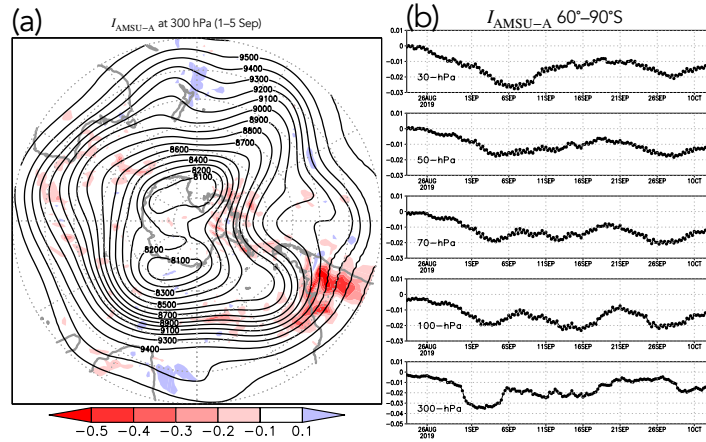


図 4: SH-winter 実験での (a) 2019 年 9 月 1 日~5 日平均の 300 hPa での $I_{\text{AMSU-A}}$ 分布 [J kg^{-1}] (陰影) と CTL 解析値のジオポテンシャル高度 [m] (コンター). (b) $60^{\circ}\text{S}\sim 90^{\circ}\text{S}$ 領域平均した 5 日移動平均 $I_{\text{AMSU-A}}$ 時系列 [J kg^{-1}] で, 下のパネルから 300, 100, 70, 50, 30 hPa での時系列を示している.

Wea. Forecasting, **36**, 1219–1236, doi:
10.1175/WAF-D-20-0152.1.

Yamazaki, A. and S. Noguchi, 2023: Precursor analysis ensemble spread signals that foreshadow stratospheric sudden warmings. *submitted to Monthly Weather Review*.

Yamazaki, A., K. Terasaki, T. Miyoshi, and S. Noguchi, 2023: Estimation of AMSU-A radiance observation impacts in an LETKF-based atmospheric global data assimilation system: Comparison with EFSO and observing system experiments. *submitted to Weather and Forecasting*.