

# 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

小守 信正

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\*<sup>1</sup>, 佐藤 和敏\*<sup>2</sup>

\*<sup>1</sup> 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, \*<sup>2</sup> 北見工業大学工学部

独自に開発しているアンサンブルデータ同化システムの開発を進めそれを利用して、特別観測がデータ同化結果やそれを初期値とした予報結果に与える影響を観測システム実験により調査している。(1) EFSO (Ensemble-based forecast sensitivity to observations)と呼ばれる、個々の観測が予報をどの程度改善し得るか、つまり観測インパクトを診断する新手法を、我々のデータ同化システムに実装することに成功した。複数の観測システム実験を行って見積もられた実際の観測インパクトと EFSO で診断された観測インパクトを比較し、EFSO が実際の観測インパクトを良く近似できることがわかった。(2) 我々のデータ同化システムを使って北極や南極での観測についての観測システム実験を複数回行ってきた知見から、北極・南極域での追加観測が、どのような過程で北半球・南半球中緯度の現象、特に温帯・熱帯低気圧の予測に影響を与えるのか、その観測インパクトの伝播について分析した。風によって移流するラグランジュ的な伝播だけでなく、準定常 Rossby 波を介した群速度的な伝播も可能であることがわかった。

キーワード：アンサンブルデータ同化、観測システム実験、EFSO、北極観測

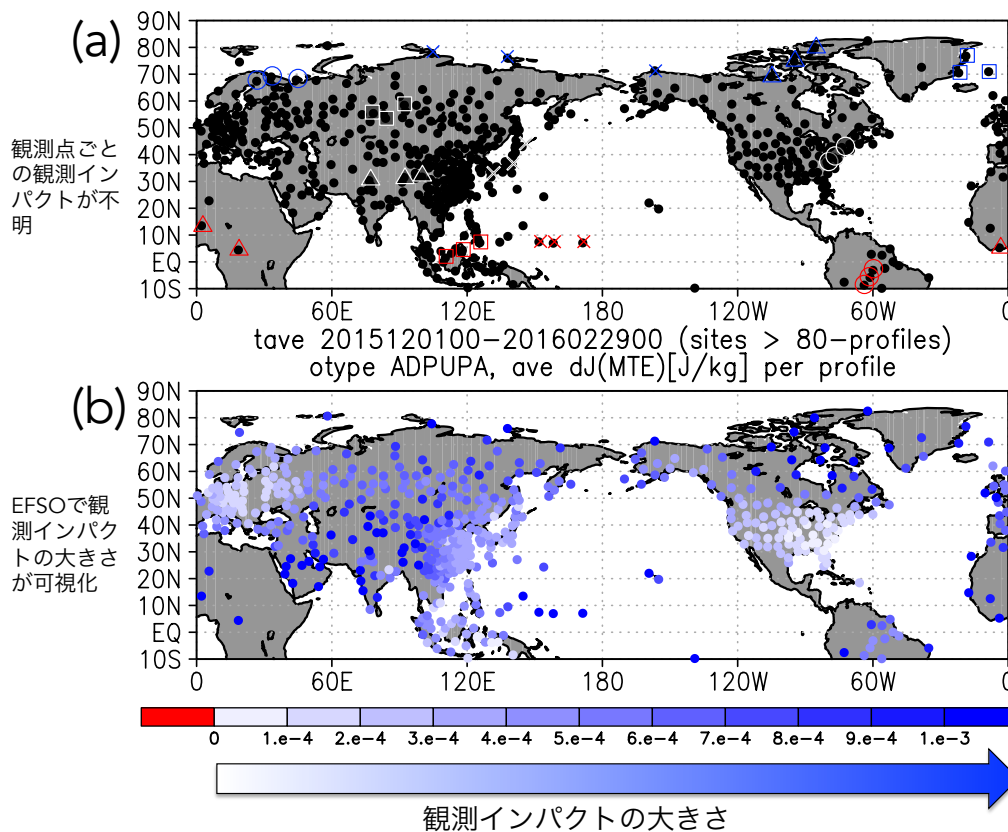


図 1 (a) 北半球のラジオゾンデ観測点の分布。ラジオゾンデ観測だけでも膨大な数の観測が展開されていることがわかる。図には、北極(青)・中緯度(白枠黒)・熱帯(赤)それぞれでの代表的な観測位置 12 つ(各 3 地点)が示されており、図 2 での実験の記号に対応している。(b) 個々のラジオゾンデ観測点の観測インパクトを EFSO で見積もったもの。観測インパクトが大きいほど(各ラジオゾンデ観測の点が青いほど)予測をより精度良くすることを意味する。

## 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

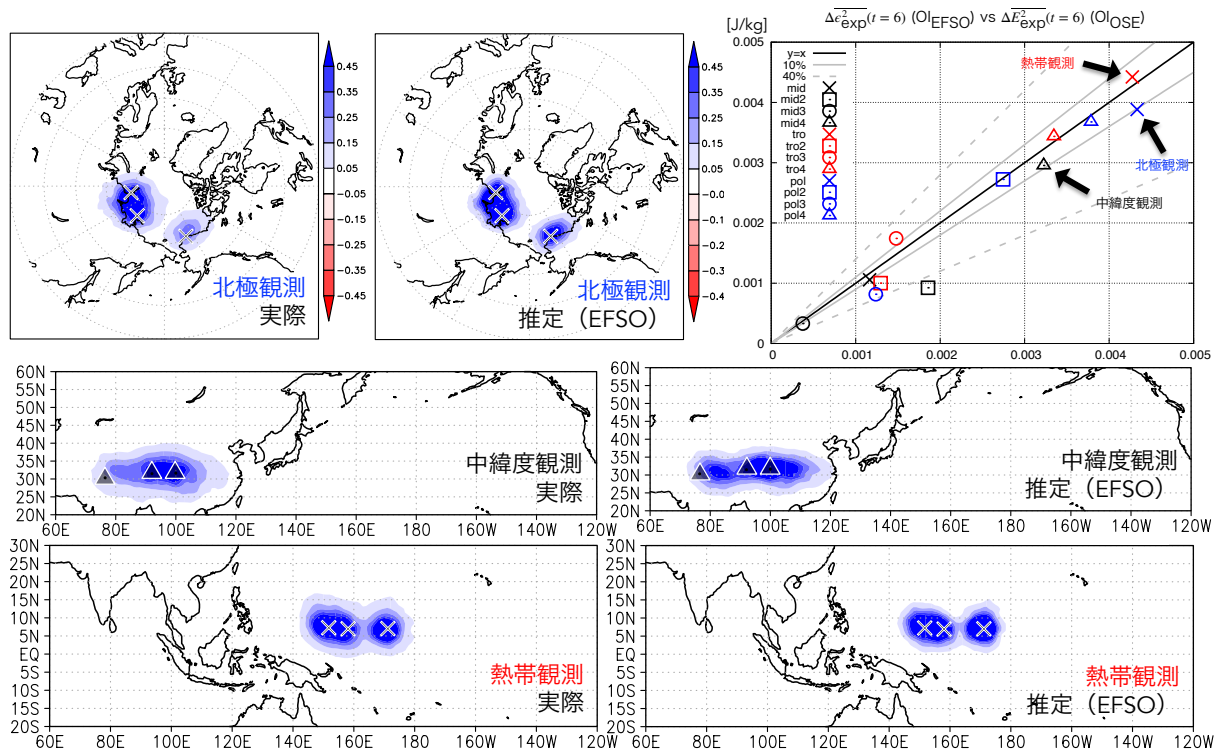


図2 EFSO で推定された観測インパクトと(観測システム実験で得られた)観測インパクトとの比較。右上の散布図は、図 1(a) に示される 12 位置の観測について示し、青印が北極域、黒が中緯度、赤が熱帯の観測地点を示す。散布図で、横軸が EFSO の推定値、縦軸が実際の観測インパクトを示しており、黒の  $y=x$  の線に近いほど EFSO と実際の観測インパクトが近いことを示している。左上・下のマップは、それぞれの緯度帯から 1 地点ずつ選んだ、EFSO と実際の観測インパクトの広がり示している。この分布を全球平均すると散布図の値が得られる。マップの印は実際の観測点を示している(図 1a 参照)。

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 を有する[1]。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)が可能になり、解析誤差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。また、大気海洋結合系へのデータ同化の適用は、それ自身がチャレンジングな課題である。

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. EFSO の実装 (Yamazaki et al. 2021 [2])

最近、アンサンブルデータ同化システムを使って個々の観測のインパクトを診断する手法 EFSO (Ensemble-based Forecast Sensitivity to Observations)が提案された。この手法は、個々の観測がその後の予報をどの程度改善・改悪するかを診断することができる、つまり、観測インパクトを診断できる。EFSO は診断手法であるので、観測システム実験 (OSE; observing system experiment) のためのデータ同化サイクルを実行せずに、全ての観測のインパクトを個別に推定することができる。EFSO やそ

れに類似する手法は多くの現業機関で実用化が進んでいる。我々は、EFSO 手法を ALEDAS システムに実装することに成功した。これにより、EFSO で推定される観測インパクトを ALEDAS で利用される全ての観測データについてモニターすることができるようになった。

EFSO で推定した北半球ラジオゾンデ観測インパクトのマップが図 1 に示される。通常、個々のラジオゾンデが持つ観測インパクトは OSE を行わない限り知ることができないが(図 1a)、EFSO 手法で全てのラジオゾンデの観測インパクトを一度に推定可能となる(図 1b)。図 1b では、より青色の観測はより大きな観測インパクトを持つことを示唆している。さらに、観測インパクトが、非自明な空間分布を持っていることがわかる：ラジオゾンデ観測密度の低いところほど大きく、高緯度ほど大きい傾向を持っている。

EFSO 診断を OSE の代わりに用いることができるかを調査するために、EFSO で推定される観測インパクトが、OSE で得られる実際の観測インパクトを近似できている比較を行った。OSE には、船舶などを使って行われる現実の観測キャンペーンを模した状況を作った。北半球の様々な緯度帯の場所でのラジオゾンデ観測について複数回の OSE を行った。計 12 回の OSE を行い、それぞれの OSE では近接する 3 点の通常ラジオゾンデ観測が全球観測から除去される。近接する 3 点の場所は、北極域から 4 箇所、中緯度帯から 4 箇所、熱帯から 4 箇所選ばれた。OSE は

2015/16年の12月～2月の時期について調査された。図2は、12 OSEで得られた様々な緯度帯の実際のラジオゾンデ観測インパクトとEFSOで推定された観測インパクトとの比較を示す。散布図から、ほぼ全てのOSEについてEFSOが実際の観測インパクトを良く近似していることがわかる。さらに、EFSOは観測インパクトの空間分布も診断することができ、その分布と実際の分布とを比較すると、振幅・パターンともに良く一致することが示された。

### 3. 高緯度から中緯度への誤差伝播 (Sato et al. 2020a, b [3], [4])

ラジオゾンデが再解析データや予報精度に与える影響の指標となる「特別観測あり」と「特別観測なし」の不確実性の差は、対流圏上層や成層圏下層で明瞭になり、上空のジェットにより風下側に伝播する。これまで北半球で北極海から中緯度へ伝播することを報告してきたが、南半球でも南極大陸内部に位置する日本の「ドームふじ」基地から南大洋へ伝播することがわかった[3]。また、これまで不確実性の差の伝播を示すためにトラジェクトリー解析を実施してきたが、不確実性の差は予報期間の波の活動度フラックス[5]と同じように伝播していることがわかった(図3, [4])。予報において初期(解析値)の誤差や観測インパクトがどのように伝播・増幅するのかは天気予報における重要な課題である(例えば, [2])。これらの研究では、観測インパクトがどのように伝播し得るのかを診断する方法について議論を行った。今後、さらに事例解析や統計解析を進めて、より一般的なメカニズムについて調査を進める予定である。

### 文献

- [1] Enomoto, T., T. Miyoshi, Q. Moteki, J. Inoue, M. Hattori, A. Kuwano-Yoshida, N. Komori, and S. Yamane: Observing-system research and ensemble data assimilation at JAMSTEC. In *Data Assimilation for Atmospheric, Oceanic and Hydrologic Applications (Vol. II)*, S. K. Park and L. Xu (ed.), chap. 21, pp. 509–526, Springer, February 2013, [https://doi.org/10.1007/978-3-642-35088-7\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-642-35088-7_21).
- [2] Yamazaki, A., T. Miyoshi, J. Inoue, T. Enomoto, and N. Komori: EFSO at different geographical locations verified with observing system experiments. *Wea. Forecasting*, **36**, 1219–1236, August 2021, <https://doi.org/10.1175/WAF-D-20-0152.1>.
- [3] Sato, K., J. Inoue, A. Yamazaki, N. Hirasawa, K. Sugiura, and K. Yamada: Antarctic radiosonde observations reduce uncertainties and errors in reanalyses and forecasts over the Southern Ocean: An extreme cyclone case. *Advances in Atmospheric Sciences*, **37**, 431–440, May 2020, <https://doi.org/10.1007/s00376-019-8231-x>.
- [4] Sato, K., J. Inoue, and A. Yamazaki: Performance of forecasts of hurricanes with and without upper-level troughs over the mid-latitudes. *Atmosphere*, **11**, 702, July 2020, <https://doi.org/10.3390/atmos11070702>.
- [5] Takaya, K. and H. Nakamura: A formulation of a phase-independent wave-activity flux for stationary and migratory

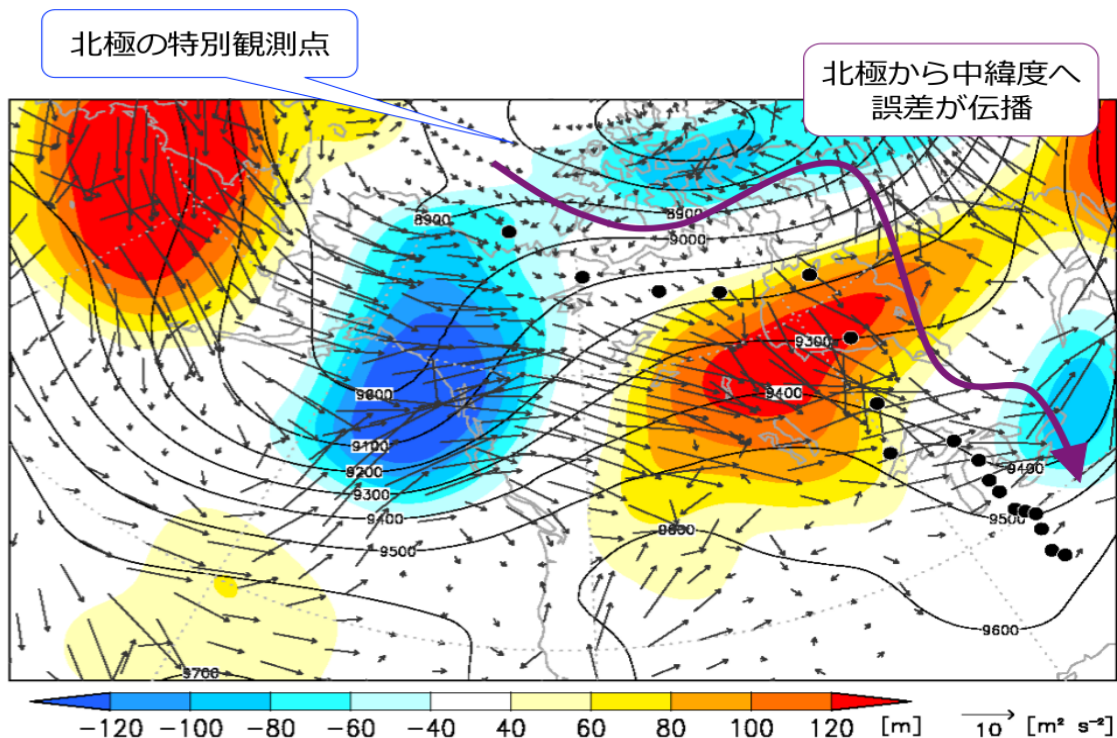


図3 予報期間前後に対する予報期間中の高度場(色:m)とRossby波活動度フラックス(色:m²s⁻², [5])。黒点は予報期間中の誤差伝播の様子。

quasigeostrophic eddies on a zonally varying basic flow. *J. Atmos. Sci.*, **58**, 608–627, March 2001.

# Observing System Research using Ensemble-based Data Assimilation Methods

Project Representative  
Nobumasa Komori

Application Laboratory, Research Institute for Value-Added-  
Information Generation, Japan Agency for Marine-Earth Science and  
Technology

Authors

Akira Yamazaki\*<sup>1</sup>, Kazutoshi Sato\*<sup>2</sup>

\*<sup>1</sup> Application Laboratory, Research Institute for Value-Added-Information Generation, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, \*<sup>2</sup> Faculty of Engineering, Kitami Institute of Technology

By using our own ensemble-based data assimilation system, we conducted observing system experiments to investigate the influence of additional observations on the accuracy of the analyses and forecasts: (1) We have successfully implemented the ensemble-based forecast sensitivity to observations (EFSO) technique in the data assimilation system. It was found that the EFSO technique can reasonably approximate actual observation impacts obtained by multiple observing system experiments. (2) Additional Arctic and Antarctic observations improved forecast skill of midlatitude extratropical and tropical cyclones via dynamical propagation of observation impacts. Quasi-stationary Rossby waves can transfer polar observation impacts toward midlatitudes as well as wind advections.

**Keywords** : Ensemble-based data assimilation, observing system experiment, EFSO, Arctic observations

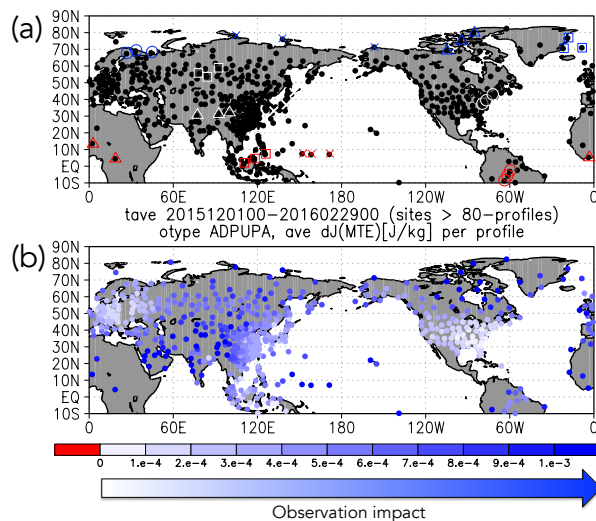
## 1. Introduction

We have developed the AFES-LETKF ensemble data assimilation system (ALEDAS) [1], which consists of AFES (atmospheric general circulation model for the Earth Simulator) as the forecast model and the LETKF (local ensemble transform Kalman filter) as the data assimilation scheme, and constructed the AFES-LETKF experimental ensemble reanalysis ver. 2 (ALERA2) from January 2008 to the near-present by assimilating observational data of the National Centers for Environmental Prediction (NCEP) global data assimilation system (PREPBUFR). Several observing system experiments are conducted by using the ALERA2 as the reference to investigate the influence of the specific observations.

## 2. Implementation of the EFSO technique (Yamazaki et al. 2021 [2])

A diagnostic technique called Ensemble-based Forecast Sensitivity to Observations (EFSO) which can quantify how much each observation has improved or degraded the forecast without data denial or observing system experiments. EFSO enables to estimate (diagnose) individual observation impacts *at once* at early short-range forecast times, which are typically 6–24 hours. Currently the EFSO technique has been used in many operational centers. We have successfully implemented the EFSO technique in ALEDAS.

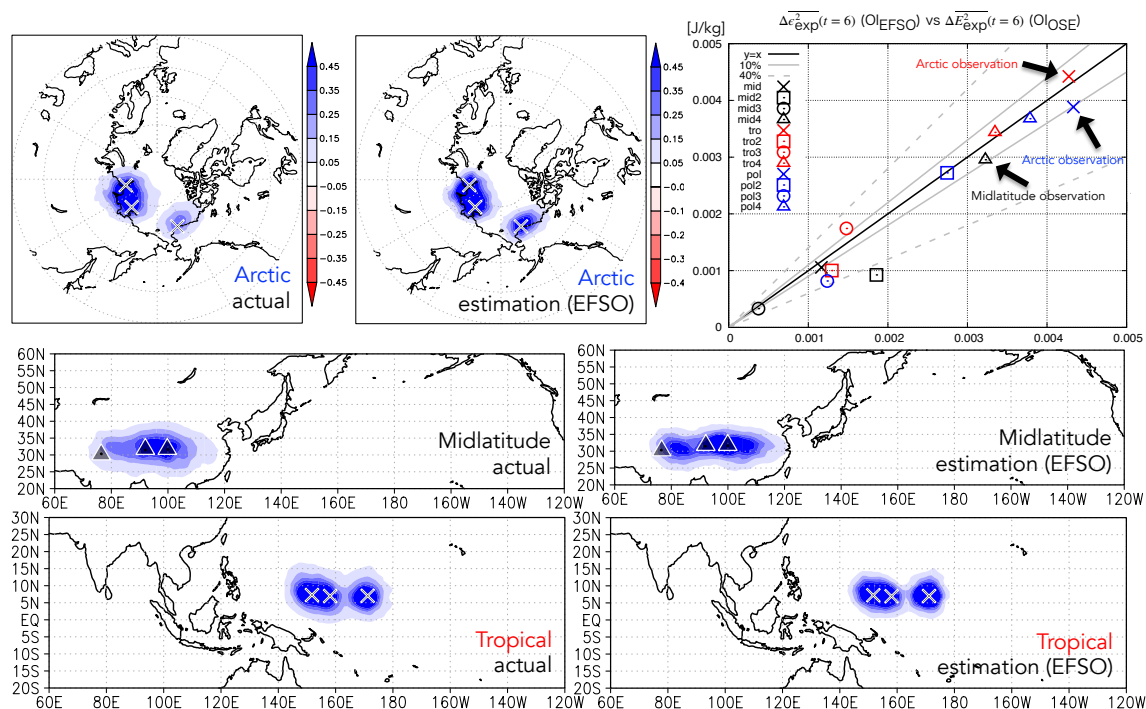
An EFSO map for routine radiosonde observations in the Northern Hemisphere is shown in Fig. 1. More bluish observations have larger EFSO values and indicate potentially more improve the subsequent forecasts. Therefore, the EFSO technique can diagnose the relative contributions by individual observations at once without any observing system experiments



**Figure 1: (a) Distribution of radiosonde observation points in the Northern Hemisphere. It shows that there are vast number of individual radiosonde observations. Figure additionally shows 12 specific observation points for the Arctic (blue), midlatitude (black with white outline), and tropical regions (red) (three each). These observations are used for experiments in Fig. 2. (b) The EFSO values of each radiosonde observation point estimated by EFSO. The larger EFSO values means more accurate forecast (radiosonde observation point is more bluish).**

(OSEs). In addition, it is found that the EFSO values are greater where the radiosonde observation density is lower. When comparing the EFSO values in the latitudinal direction, generally the values become larger at the higher latitudes.

To use the EFSO diagnosis as an alternative to OSE, it was examined whether EFSO reasonably approximates the impacts of a subset of observations from specific geographical locations.



**Figure 2:** Comparison of observation impact estimated by EFSO with that obtained by OSEs. The top right scatter plot shows observations at 12 points indicated in Fig 1(a), where the Arctic regions are blue, midlatitude regions are black, and tropical regions are red. On the scatter plot, the horizontal axis shows the EFSO estimates, and the vertical axis is the actual observation impact obtained by the OSEs. When the value is close to the black  $y=x$  line, it implies that the EFSO-estimated and the actual observation impacts are close (that is, EFSO accurately estimates the actual observation impacts). The maps on the top and bottom left show the map distributions of the EFSO-estimated and the actual observation impacts, respectively, at a point selected from each latitudinal band. When these distributions are averaged for the whole globe, the value of the scatter plot can be obtained.

The reference for these experiments was obtained from 12 data-denial experiments in each of which a subset of three radiosonde observations launched from a geographical location was excluded. The 12 locations were selected from three latitudinal bands comprising (i) four Arctic regions, (ii) four midlatitude regions in the Northern Hemisphere, and (iii) four tropical regions during the Northern Hemisphere winter of 2015/16. Figure 2 shows the comparison of the EFSO values with actual observation impacts obtained by the OSEs. The estimated EFSO-derived observation impacts well corresponded to the actual observation impacts obtained by the data denials (OSEs). Moreover, EFSO can approximate the distributions of the actual observation impacts as well as the amplitudes (values), which implies that EFSO can estimate how observation impacts propagate during short-range forecasts.

### 3. Flow-dependent error at upper levels from high latitude to midlatitude (Sato et al. 2020 [3], [4])

The difference between the ensemble spread of geopotential height in forecast with and without additional observation data is used as an indicator of incorporation of additional data. The relatively large differences, which are found at upper troposphere and lower stratosphere near observation points in highlatitude, traveled along the trough with the strong background wind and

reached the midlatitude. In addition, quasi-stationary Rossby waves would be indicator to examine large ensemble spread propagation because they can transfer large ensemble spread and errors in the upper troposphere.

### References

- [1] Enomoto, T., T. Miyoshi, Q. Moteki, J. Inoue, M. Hattori, A. Kuwano-Yoshida, N. Komori, and S. Yamane: Observing-system research and ensemble data assimilation at JAMSTEC. In *Data Assimilation for Atmospheric, Oceanic and Hydrologic Applications (Vol. II)*, S. K. Park and L. Xu (ed.), chap. 21, pp. 509–526, Springer, February 2013, [https://doi.org/10.1007/978-3-642-35088-7\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-642-35088-7_21).
- [2] Yamazaki, A., T. Miyoshi, J. Inoue, T. Enomoto, and N. Komori: EFSO at different geographical locations verified with observing system experiments. *Wea. Forecasting*, **36**, 1219–1236, August 2021, <https://doi.org/10.1175/WAF-D-20-0152.1>.
- [3] Sato, K., J. Inoue, A. Yamazaki, N. Hirasawa, K. Sugiura, and K. Yamada: Antarctic radiosonde observations reduce uncertainties and errors in reanalyses and forecasts over the Southern Ocean: An extreme cy-clone case. *Advances in Atmospheric Sciences*, **37**, 431–440, May 2020, <https://doi.org/10.1007/s00376-019-8231-x>.

- [4] Sato, K., J. Inoue, and A. Yamazaki: Performance of forecasts of hurricanes with and without upper-level troughs over the mid-latitudes. *Atmosphere*, **11**, 702, July 2020, <https://doi.org/10.3390/atmos11070702>.