

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 アプリケーションラボ

著者

小守 信正*1, 佐藤 和敏*2, 猪上 淳*3, 山崎 哲*1

*1 海洋研究開発機構 アプリケーションラボ

*2 北見工業大学 工学部

*3 国立極地研究所 国際北極環境研究センター

独自に開発したアンサンブルデータ同化システムを利用し、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た。(1)北極域の気象観測データの同化により台風の進路予報が向上すること、(2)南極海での船上気象観測データの同化により豪州の低気圧予報が改善されること、などを明らかにした。また、予報部分を大気大循環モデルから大気海洋結合モデルへ置き換えた新たなデータ同化システムを構築した。

キーワード：アンサンブルデータ同化、観測システム実験、南極海、低気圧

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。

観測データを大気または大気海洋結合モデルへ同化することにより、時間発展する解析誤差（不確実性）を推定可能な高精度の再解析データセットという「科学的に有益な統合情報」を構築する。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）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。

1.1 データ同化システム ALEDAS2 の概要

AFES-LETKF アンサンブルデータ同化システム Ver. 2 (ALEDAS2) [1] は、予報部分である地球シミュレータ用大気大循環モデル (AFES) と、データ同化部分である局所アンサンブル変換カルマンフィルタ (LETKF) からなる。解像度は水平 T119 (約 100 km)、鉛直 L48 (上端は約 3 hPa) である。アンサンブルメンバー数は 63、共分散の局所化スケールは水平 400 km、鉛直 $0.4 \ln p$ 、スプレッド膨張率は 0.1 (固定値) であり、米国環境予測センター (NCEP) が編纂した観測データ (PREPBUFR) を 6 時間毎に同化する。

1.2 再解析データセット ALERA2 の構築

ALEDAS2 を用いた実験的アンサンブル大気再解析データセット ALERA2 を 2008 年 1 月から構築し、準リアルタイムで計算を実施しており、研究コミュニティ向けに機構のサーバ (<http://www.jamstec.go.jp/alera/>) から順次公開している。

2. 観測システム実験の実施

ALERA2 を参照データとし、観測データの影響評価（観測システム実験）を行った。高緯度から中緯度への誤差伝播過程を提唱したこれらの成果は、両極域を対象として世界気象機関 (WMO) が主導する国際プロジェクト「極域予測年 (YOPP)」の活動において大きな貢献となる。

2.1 北極海のラジオゾンデ観測が熱帯低気圧の進路予報精度に与える影響

台風やハリケーンは、東アジアや北米などで大雨や強風をもたらす、気象災害を引き起こすことがある。これらの被害を軽減するためには、正確な進路予報が必要である。これまで、進路予報の向上のために台風の中心部分や予報進路上での気象観測強化などが行われてきたが、台風等の進路から離れた北極域における気象観測の効果については未解明であった。

そこで、2016 年夏季に北極海の船上や周辺で特別に実施された高層気象観測が、同年 8 月に日本へ上陸した台風 10 号と、同年 9 月に北大西洋で発達した熱帯低気圧イアン (Ian)、カール (Karl) の進路予報にどのように影響するのかを調べた。その結果、北極域の観測の強化で台風等の進路予報の精度が向上することがわかった。これは、北極域での観測を増やすことで、予報で使用する大気の初期データが改善され、台風等の進路に影響する数日後の上空の大気循環の予報精度が上がったためである。本成果は、北極域の気象観測が台風等の進路予報の精度を向

上させ、人口の集中する中緯度域での減災に役立つ可能性を示唆している。

(本節は [2], [PR1] を基にした。)

2.2 南極海のラジオゾンデ観測が南半球中緯度の低気圧の進路予報の精度に与える影響

南半球中緯度で発達する低気圧の進路予報精度の向上は、豪州やニュージーランドでの大雨による災害を軽減する上で重要な課題である。低気圧の進路予報の精度は、数値予報モデルや同化手法の性能向上だけでなく、観測データ量の増加による数値予報の初期場の改善により向上する。これまでの研究では、観測点の少ない北極海のラジオゾンデ観測が北半球の初期場の不確定性を減少させ、北半球中緯度の低気圧や熱帯低気圧の進路予報の精度を向上させることが明らかになっている。南半球では、観測点がほとんどない南極海で初期場の不確定性が大きく(図1)、南極海での観測が予報精度の向上に重要であると示唆されている。そこで、南極海のラジオゾンデ観測が南半球中緯度の低気圧の進路予報精度に与える影響を観測システム実験により調べた。

本研究では、2017年11月に南極海上で豪州の観測船「オーロラ・オーストラリス」で実施された特別ラジオゾンデ観測(図1赤点)を同化した再解析データ(OSE)と同化していない再解析データ(CTL)を作成し、それぞれを初期値とした予報実験を行った。「オーロラ・オーストラリス」のラジオゾンデ観測が中緯度の低気圧の進路予報精度に与える影響を調べるため、2017年12月3日にオーストラリアを通過した低気圧に着目し、2日予報の結果から進路予報の精度を比較した。本研究の結果から、予報精度を向上させていた南極海の観測について報告する。

特別観測ありの予報の場合(OSEf)では、特別観測なしの予報(CTLf)に比べて低気圧の位置に影響する上空の気圧の谷(トラフ)が予測できており、2日後の低気圧の位置が予報できていた(図2左)。一方のCTLfでは、

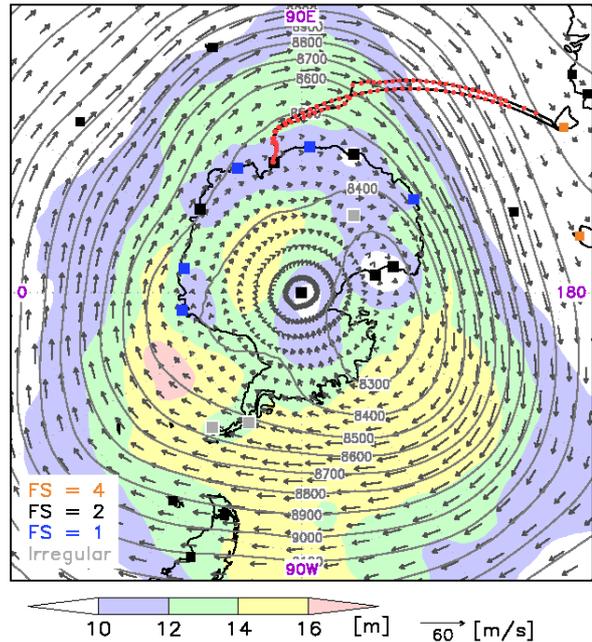


図1 豪州観測船「オーロラ・オーストラリス」の航路(黒線)と観測船の観測位置(赤点)。色は2017年11月の月平均アンサンブルブレッド(予報初期の不確定性)を、コンターと矢印は月平均300 hPa ジオポテンシャル高度[m]と風[m/s](ともにアンサンブル平均)を示す。

トラフの位置が実際より西側に位置しており、2日後の低気圧の位置もOSEfに比べて南側に位置していた(図2右)。予報された上空の大気循環場の比較から、2日予報でもトラフの位置に違いがあり、低気圧の経路に影響したと考えられる。これらの研究結果から、南極海のラジオゾンデ観測は、南半球中緯度の低気圧の進路予報精度を向上させていることがわかった。

(本節は [3], [PR2] を基にした。)

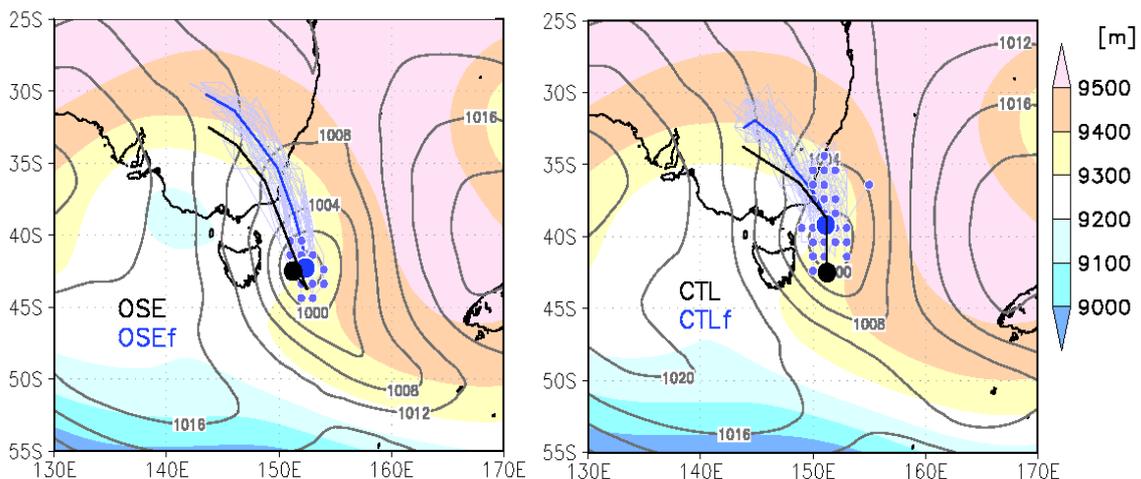


図2 「オーロラ・オーストラリス」での観測を同化した実験(OSEf, 左)と同化していない実験(CTLf, 右)における2日後の300 hPaの高度[m](色)と地上表面気圧[hPa](灰色コンター)の予報結果(63メンバー平均)。線は解析値(黒)・アンサンブル平均(太青)・各メンバー(細青)での低気圧の経路を、点は解析および予報における低気圧の中心位置(大きな点はアンサンブル平均場, 小さな点は各メンバー)を示す。

3. 新たなデータ同化システムの開発

再解析データの精度を向上させ、また、より高度な観測システム実験を可能とするため、従来型の観測に加えて衛星による放射輝度観測データを同化可能なシステムへの拡張など、新たなデータ同化システムに向けた開発・改良および機能拡張を段階的に進めている。

3.1 全球大気海洋結合モデルを用いたアンサンブル大気再解析システムの構築

大気大循環モデルに基づいたデータ同化システムの場合、海面水温や海水分布を全メンバーで共通の境界条件として与えると、海面付近のスプレッドが過小評価されてしまう。また、熱帯域における海面水温変動と降水量変動の位相関係など、大気海洋相互作用の影響も適切には反映できない。さらに、TRITON ブイなどの海洋観測ブイは、海洋内部だけでなく海上気象要素も観測するため、その有効性を評価するためには大気と海洋を同時に扱えるシステムが必要である。

そこで、ALEDAS2を拡張し、全球大気海洋結合モデルCFESへ大気観測データを同化し大気場のみを修正する新たなシステムCLELAS-Aを構築した。2008年8月1日から実施した2ヶ月間の実験的な再解析 (CLERA-A) では、多くの大気海洋結合モデルに見られる海面水温バイアスが存在するものの、対流圏下層の気温や比湿のスプレッドはALERA2よりも増大しており、上で述べたスプレッドの過小評価が軽減されていることがわかった。また、同じ観測データを同じ手法で同化しているにも関わらず、アンサンブルメンバーから評価した変数間の空間相関には、ALERA2では見られない熱帯太平洋全域に渡る大規模な構造がCLERA-Aには存在していた。これらの結果は、アンサンブルデータ同化システムを用いた大気再解析において、大気大循環モデルではなく大気海洋結合モデルを用いることの潜在的な重要性を示唆するものである。

(本節は [4] を基にした。)

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 Hydrological 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.

[2] Sato, K., J. Inoue, A. Yamazaki, J.-H. Kim, A. Makshtas, V. Kustov, M. Maturilli, and K. Dethloff: Impact on predictability of tropical and mid-latitude cyclones by extra Arctic observations. *Scientific Reports*, **8**, 12104, August 2018, <https://doi.org/10.1038/s41598-018-30594-4>.

[3] Sato, K., J. Inoue, S. Alexander, G. McFarquhar, and A. Yamazaki: Improved reanalysis and prediction of atmospheric fields over the Southern Ocean using campaign-based radiosonde observations. *Geophysical Research Letters*, **45**, 11,406–11,413, October 2018, <https://doi.org/10.1029/2018GL079037>.

[4] Komori, N., T. Enomoto, T. Miyoshi, A. Yamazaki, A. Kuwano-Yoshida, and B. Taguchi: Ensemble-based atmospheric reanalysis using a global coupled atmosphere-ocean GCM. *Monthly Weather Review*, **146**, 3311–3323, October 2018, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-17-0361.1>.

プレスリリース

[PR1] 国立極地研究所・北見工業大学・海洋研究開発機構：北極域の気象観測で台風の進路予報が向上、2018年8月30日, <https://www.nipr.ac.jp/info/notice/20180830.html>.

[PR2] 北見工業大学・国立極地研究所・海洋研究開発機構：南極海での船上気象観測で豪州の低気圧予報を改善～豪州の観測船と日本のデータ同化による南極予測可能性研究のさきがけ～, 2018年10月23日, <https://www.kitami-it.ac.jp/wp-content/uploads/2018/10/pressrelease20181023.pdf>.

Observing System Research using Ensemble-based Data Assimilation Methods

Project Representative

Nobumasa Komori Application Laboratory, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Authors

Nobumasa Komori*¹, Kazutoshi Sato*², Jun Inoue*³, and Akira Yamazaki*¹

*¹ Application Laboratory, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

*² Faculty of Engineering, Kitami Institute of Technology

*³ Arctic Environmental Research Center, National Institute of Polar Research

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) Additional Arctic radiosonde observations from the R/V *Mirai* improved forecast skill of the track of Tropical Storm Karl in the North Atlantic in September 2016. (2) Additional Antarctic radiosonde observations from the Australian R/V *Aurora Australis* improved forecast skill of the track of cyclone in the Southern Ocean in December 2017.

Keywords: Ensemble-based data assimilation, observing system experiment, Southern Ocean, cyclone

1. Introduction

We have developed the AFES–LETKF ensemble data assimilation system ver. 2 (ALEDAS2) [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 (PREP-BUFR). Several observing system experiments are conducted by using the ALERA2 as the reference to investigate the influence of the specific observations.

2. Impact on predictability of tropical and mid-latitude cyclones by extra Arctic observations

Recent research has demonstrated that additional winter radiosonde observations in Arctic regions enhance the predictability of mid-latitude weather extremes by reducing uncertainty in the flow of localised tropopause polar vortices. The impacts of additional Arctic observations during summer are usually confined to high latitudes and they are difficult to realize at mid-latitudes because of the limited scale of localised tropopause polar vortices. However, in certain climatic states, the jet stream can intrude remarkably into the mid-latitudes, even in summer; thus, additional Arctic observations might improve analysis validity and forecast skill for summer atmospheric circulations over the Northern Hemisphere. This study examined such cases that occurred in 2016 by focusing on the prediction of the intensity and track of tropical cyclones (TCs) over the North Atlantic and North Pacific, because TCs are representative of extreme weather in summer.

The predictabilities of three TCs were found influenced by additional Arctic observations. Comparisons with ensemble reanalysis data revealed that large errors propagate from the data-sparse Arctic into the mid-latitudes, together with high-potential-vorticity air. Ensemble forecast experiments with different reanalysis data confirmed that additional Arctic observations sometimes improve the initial conditions of upper-level troposphere circulations. (This section is based on [2].)

3. Improved reanalysis and prediction of atmospheric fields over the Southern Ocean using campaign-based radiosonde observations

This study investigated the impact of radiosonde observations from the Southern Ocean obtained by the Australian research vessel (R/V) *Aurora Australis* on the ALERA2 experimental ensemble reanalysis data set and ensemble forecast experiment. An observing system experiment (OSE) that included additional ship-launched radiosonde data captured the atmospheric structure over the Southern Ocean (Fig. 1). ALERA2 without additional radiosondes had positive temperature biases exceeding 7 °C in the upper troposphere when low-pressure cyclonic systems passed over the ship. The spread in the upper level was reduced by 15% in the OSE, which propagated downstream from the ship's position because of the sparse observing network over southern high latitudes. Comparison of two 63-member ensemble forecast experiments initialized by ALERA2 (CTLf) and the OSE (OSEf) revealed that prediction of midlatitude cyclone tracks was improved by the realistic representation of upper-level troughs in the OSE forecast (Fig. 2). This confirms that additional radiosondes over the Southern Ocean reduce uncertainty and error in midlatitude cyclone forecasts. (This section is based on [3].)

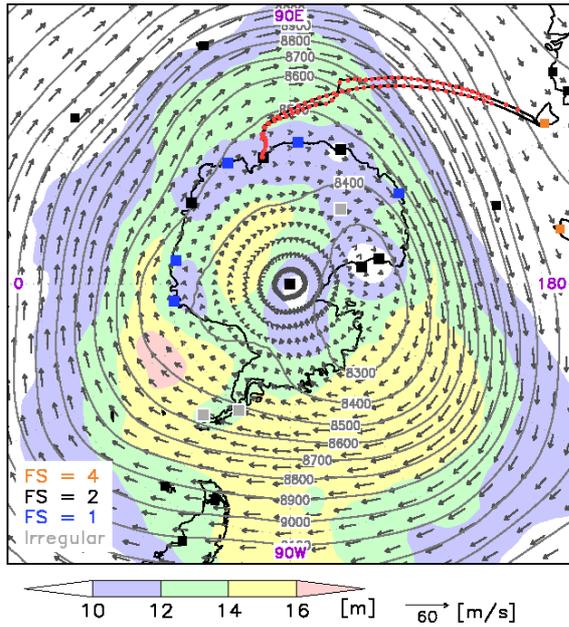


Figure 1: Monthly mean ensemble spread of geopotential height at 300 hPa (Z300) in CTL during November 2017. Contours and vectors show monthly mean Z300 and wind speed at 300 hPa in CTL. The squares and red dots show radiosonde points of land stations and the R/V *Aurora Australis*, respectively. The colors of squares indicate the frequency of daily radiosonde observations (“FS”). The black line shows the track of the R/V *Aurora Australis*.

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.
- [2] Sato, K., J. Inoue, A. Yamazaki, J.-H. Kim, A. Makshtas, V. Kustov, M. Maturilli, and K. Dethloff: Impact on predictability of tropical and mid-latitude cyclones by extra Arctic observations. *Scientific Reports*, **8**, 12104, August 2018, <https://doi.org/10.1038/s41598-018-30594-4>.
- [3] Sato, K., J. Inoue, S. Alexander, G. McFarquhar, and A. Yamazaki: Improved reanalysis and prediction of atmospheric fields over the Southern Ocean using campaign-based radiosonde observations. *Geophysical Research Letters*, **45**, 11,406–11,413, October 2018, <https://doi.org/10.1029/2018GL079037>.

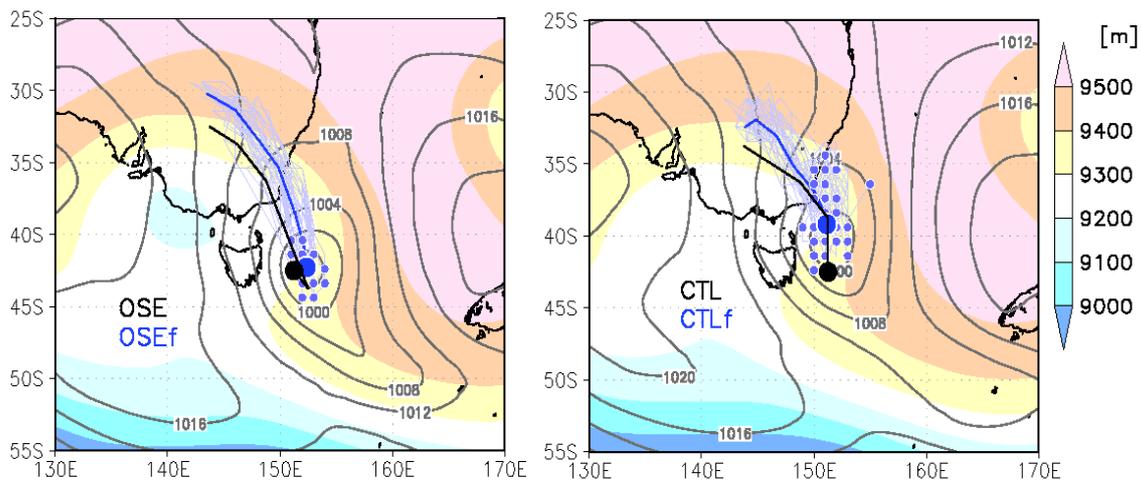


Figure 2: Z300 (shading: m) with sea-level pressure (contour: hPa) at 0000 UTC 3 December 2017 in (left) the OSEf and (right) CTLf. The blue thick and thin lines show track of cyclone from 1200 UTC 1 December 2017 through 0000 UTC 3 December 2017 for the ensemble mean and all ensemble members, respectively. The blue dots show location of the cyclone at 1200 UTC 3 December 2017 for the ensemble mean (large) and all ensemble members (small).