

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 海洋研究開発機構 アプリケーションラボ

山崎 哲 海洋研究開発機構 アプリケーションラボ

猪上 淳 国立極地研究所 国際北極環境研究センター

海洋研究開発機構 北極環境変動総合研究センター

服部 美紀 海洋研究開発機構 地球環境観測研究開発センター

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、国際協力に基づく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) 2012年8月の猛烈な北極低気圧の事例では、はるか上流側で実施されたドイツの砕氷観測船 *Polarstern* 号のラジオゾンデ観測データを同化することにより、この低気圧の形成・発達をより高精度に予報可能であることを示した。(2) 日本・ドイツ・カナダによる環北極海特別観測 (ARCROSE) では、北極海航路の障害となる強風や急激な海水の移流をより高精度に予測できることがわかった。また、海洋地球研究船「みらい」による高頻度高層気象観測を利用し、観測頻度が予報の精度に与える影響を定量的に評価した。(3) ベトナム–フィリピン集中観測 2010 (VPREX2010) では、ラジオゾンデ追加観測データを同化することにより、その後急激に発達してベトナムに豪雨をもたらすような初期段階の西進擾乱をより現実的に再現できることを示した。

キーワード：アンサンブルデータ同化, 観測システム実験, 北極低気圧, 北極海航路, ARCROSE, VPREX2010

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、それ自体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. 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 100km)、鉛直 L48 (上端は 3hPa)

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 400km、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。

3. 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、研究コミュニティ向けに機構のサーバから順次公開している。2014 年度末に地球シミュレータが更新されたこともあり、2015 年度は、改良したデータ同化システムを用いて 2015 年 1 月から計算を再開した。2015 年度末時点で 2016 年 1 月まで到達している。

4. 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。

4.1. ラジオゾンデ観測が夏季北極低気圧の予報に与える影響

北極海上での高層気象観測が、2012 年 8 月初旬に発達した猛烈な北極低気圧 (以下 AC12) の予報に与える影響を観測システム実験 (OSE) により調べた。

ALERA2 を標準実験 (CTL) とし、一方の OSE では、ドイツの砕氷観測船 *Polarstern* 号によりスピッツベルゲン島近傍で 7 月中旬から 8 月初旬にかけて取得されたラジオゾンデ観測データ (図 1) を使用せずに再解析データを作成した。両者を比較すると、その差 (誤差) が、特

対流圏上層の高度約 10km 付近に *Polarstern* 号の観測期間中に系統的に現れることがわかった。この高度は、地上付近に比べて観測数の少ない高度である。さらに極域は中緯度や熱帯域に比べて観測が少ない領域となるので、この極域での高層観測は、単一船の集中観測でも大きな影響を及ぼしたと考えられる。その上、誤差は偏西風の影響で観測域から東へ 1000km 程度下流にまでその影響が伝播し、形成段階の AC12 にも影響を与えていることがわかった。その結果 CTL の方が形成時の AC12 付近の大気場の再現性が高くなっていた。ただし、ここでの誤差は小さく、OSE でも AC12 の発達が発達して再現されていた。

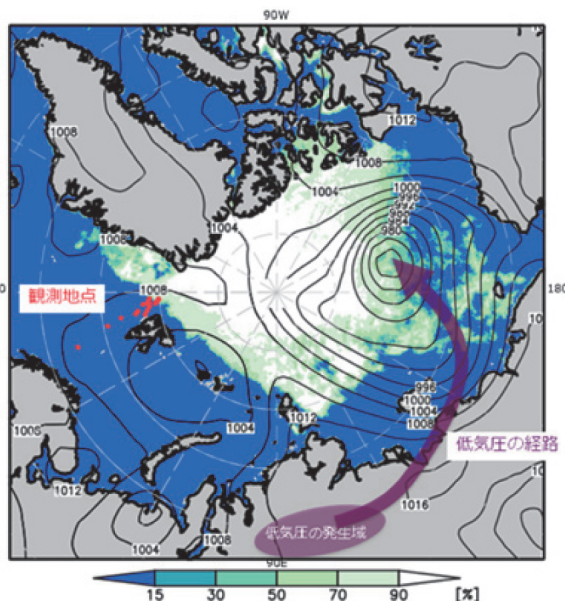


図1 2012年8月6日のAC12の海面気圧(hPa, コンター)と *Polarstern* 号の観測位置(赤点)。両者の位置が大きく離れていることがわかる。カラーは海水分布を示す。この海面気圧は最盛期のAC12を示しており、これはロシア中部で発生したAC12が北東に移動しながら発達したものである。

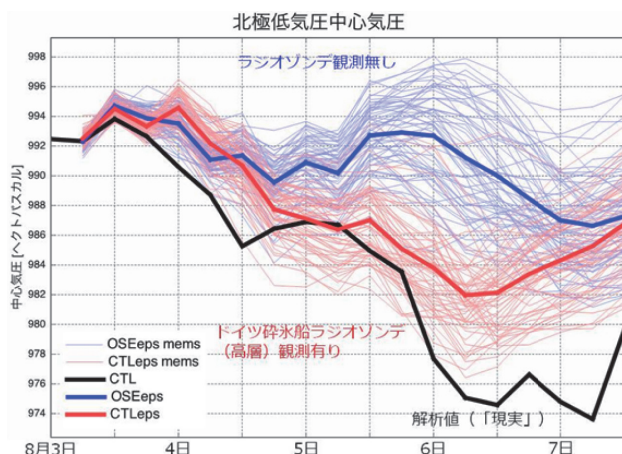


図2 *Polarstern* 号の観測を同化する実験(赤線)としない実験(青線)でのAC12形成・発達の予報結果。値はAC12中心気圧(hPa)の時系列を示している。細線は全アンサンブル予報の結果(確率値)を示し、太線は全アンサンブルの平均値(予報値)を示している。黒線は同化システムによって得られた解析値で、現実のAC12中心気圧の時間変化に対応している。

しかし、CTLとOSEの小さな誤差が、予報においては大きな精度差を生む可能性がある。そこで、これら二つの再解析データを初期条件としてアンサンブル予測を行った(図2)。すると、CTLではAC12の形成や中心気圧の下降が精度よく予測されたのに対し、OSEでは著しく弱くなることがわかった。

これらの結果から、AC12のはるか遠方で取得された *Polarstern* 号によるラジオゾンデ観測データの影響が、観測の少ない極域対流圏上層の再現性を向上させ、さらに上空の偏西風を通じて下流域に伝播したことが、AC12形成の予測にとって重要であったことが示唆された。

(本節は [2],[PR1] を基にした。)

4.2. 北極海上での特別観測による北極海航路の気象・海水予測の改善

地球温暖化に伴う北極海水域の減少と関係して、融氷期における「北極海航路」は魅力的なものとなりうる。しかしながら、航路上では北極低気圧などの大気擾乱が発生・通過するため、それによる強風・高波や海水の移流によって船舶の運航を困難なものにする恐れがある。安全な航海のためには気象と海水の正確な予報が望まれるが、現在の予報技術でもそこには大きな不確実性が存在している。その原因の一つが北極域で使用するべき気象観測データが著しく限られていることであり、それによって気象予報のための精度の良い初期値(解析値)を作れないことである。本研究課題のメンバーは北極域の観測に携わってきた研究者と大気・海洋モデルを開発する研究者を有し、さらに独自にデータ同化システムを開発・運用する経験を持っている。そこで、約1ヶ月に及ぶ環北極海特別観測(ARCROSE)を国際協力のもと企画・設計し、その観測が北極海航路の気象予測に与える影響についてALEDAS2を用い定量的に評価した。

本研究では、海洋地球研究船「みらい」によって北極海上での高層気象観測を実施するとともに、ドイツとカナダが環北極海に有する現業観測3点(ニーオルスン・ユーリカ・アラート)でも追加の高層気象観測を行い、これらの特別観測データを同化して再解析データを作成し、同化しない再解析データとの比較を行った。同化したデータとしていないデータを初期値として5日予報を行い、それぞれの気象予報場をCTLとOSEとして精度を比較した。2013年9月20日前後にロシア沿岸域に発生した高気圧とその縁辺部で数日間継続した強風事例に対し、9月15日を初期値として予報実験を行った。さらに、この高気圧事例の予報について、最大1日に8回行われた特別観測点での日観測頻度を変更した(同化する頻度を間引いた)初期値データを作成し、観測頻度が予測誤差に与える影響を調査した。

結果、OSEに対してCTLでは、高気圧の移動や強さをより高精度に予報できることがわかった。これにより、CTLでは北極海航路の障害となる強風をより高精度に予報できた。さらに、この特別観測の影響を含んだ表層風を用いて海水を初期値化することにより、北極海航

路上での急激な海水の移流を精度よく予測できることが明らかとなった。最後に観測頻度の影響については、観測頻度増加の影響は1日4回の観測で頭打ちとなり、8回では精度向上の効果が少ないことを示した(図3)。これらの結果は、観測コストを考慮した北極海航路のための最適な北極域観測システムのデザインに有益であり、ALEDAS2を用いた観測影響の定量的な評価によって実現したものである。

(本節は [3],[PR2] を基にした。)

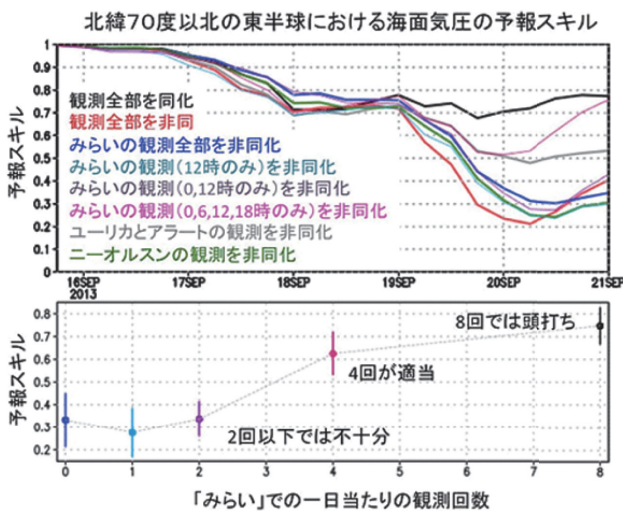


図3 (上) 各予報実験におけるロシア沿岸の高気圧の予報スキルの時間発展(値が高い方が予報精度が良い)。黒線がCTL、それ以外がOSEに対応する。観測データを取り除く(非同化)と予報スキルが低下する。(下)「みらい」のラジオゾンデ観測データの1日当たりの観測回数と予報スキルの関係。4回以上で予報スキルが飛躍的に向上する。

4.3. VPREX 期間中に南シナ海で発達した西進擾乱の解析に対するラジオゾンデ追加観測の影響

中部ベトナム海岸域の雨季は10月から11月にあたり、この時期は洪水をもたらすような非常に激しい降水がみられることが知られている。海洋研究開発機構とベトナム水文気象局およびフィリピン大気地球物理天文局は、このようなベトナム東岸に豪雨をもたらす西進擾乱の発生および発達に関わる周辺環境場の状況を捉えるため、ベトナム-フィリピン集中観測2010(VPREX2010)を実施してラジオゾンデ等による強化観測を行った。

本研究では、VPREX2010におけるラジオゾンデ追加観測の影響を、ALEDASを用いた観測システム実験により調べた結果を示す。2010年9月15日から10月15日の観測期間中、南シナ海で発達した西進擾乱が、ベトナム東海岸および海南島で豪雨を引き起こす事例が見られた。追加観測を行ったラジオゾンデの観測データを同化することにより、擾乱周辺の大気下層において、風速、気温、比湿の顕著な増加が見られた。また、南北風の解析誤差の指標となるアンサンブルスプレッドは、インドシナ半島からフィリピン海、西太平洋および日本の南にかけて、同化前に比べて5-25%の減少がみられた(図4)。さらに、追加観測によって擾乱周辺の風速はより強く解析される

ようになり、アンサンブルスプレッドが増大する結果が得られた。このことは、南シナ海において発達初期の段階にある擾乱は、追加観測のない状況ではよく解析されていないことを示している。つまり、南シナ海で急激に発達してベトナムに豪雨をもたらすような擾乱の解析を改善するには、ベトナムおよびフィリピンにおける継続的な強化観測が重要であることが示された。

(本節は [4] を基にした。)

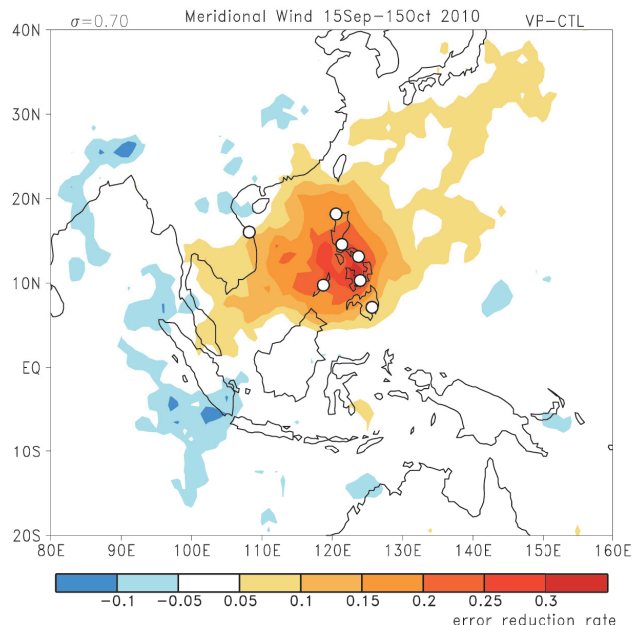


図4 2010年9月15日から10月15日で平均した0.7 σ 面における南北風の解析誤差軽減率。白丸は同化したラジオゾンデの観測点を示す。

5. 新たなシステム ALEDAS3 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、新たなデータ同化システム ALEDAS3 の開発を段階的に進めている。まず、多様な観測データに対応するため観測演算子を分離した。アンサンブルメンバー数の増強(63→255)により、サンプリング誤差が大きく減少し(図5)、海面付近のスプレッドの過小評価(予報精度の過大評価)も緩和された。さらに、観測データの情報をより効果的に抽出するためスプレッド膨張率を動的に変化させる手法(適応型膨張)も導入し、試験計算を実施している。今後、複数の観測データに対する予報の感度を同時に評価する診断手法(EFSO: Ensemble Forecast Sensitivity to Observation)の導入に取り組む予定である。

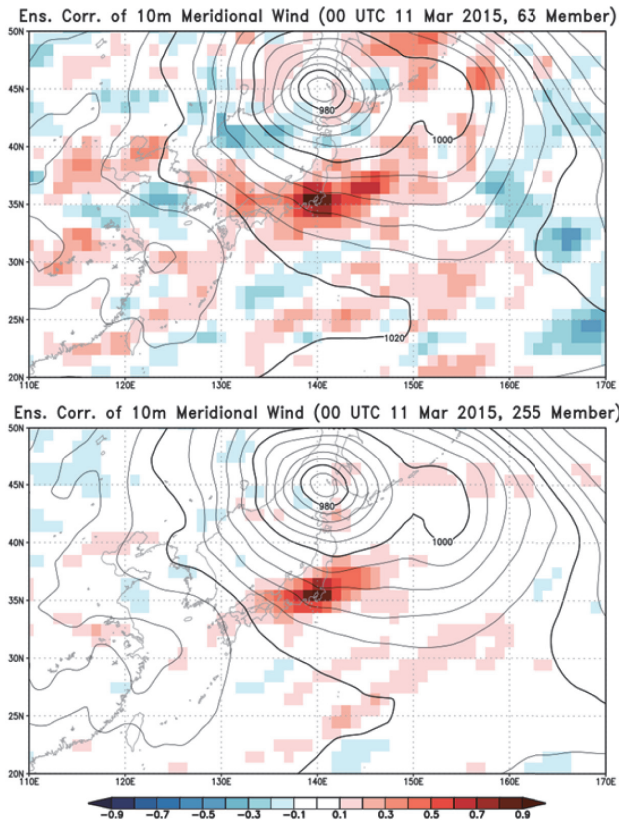


図5 ALERA2の2015年3月11日00 UTCにおける、10m南北風の空間相関(色)と海面気圧(等値線)。(上)63メンバー、(下)255メンバー。63メンバーで見られたサンプリング誤差に起因する非現実的な相関が255メンバーでは大幅に抑えられている。

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 & L. Xu (ed.), chap. 21, pp. 509-526, Springer, doi:10.1007/978-3-642-35088-7_21, February 2013.
- [2] Yamazaki, A., J. Inoue, K. Dethloff, M. Maturilli, and G. König-Langlo: Impact of radiosonde observations on forecasting summertime Arctic cyclone formation. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, **120** (8), 3249-3273, doi:10.1002/2014JD022925, April 2015.
- [3] Inoue, J., A. Yamazaki, J. Ono, K. Dethloff, M. Maturilli, R. Neuber, E. Patti, and H. Yamaguchi: Additional Arctic observations improve weather and sea-ice forecasts for the Northern Sea Route. *Sci. Rep.*, **5**, 16868, doi:10.1038/srep16868, November 2015.
- [4] Hattori, M., J. Matsumoto, S.-Y. Ogino, T. Enomoto, and T. Miyoshi: The impact of additional radiosonde observations on the analysis of disturbances in the South China Sea during VPRESX2010. *SOLA*, **12**, 75-79, doi:10.2151/sola.2016-018, March 2016.

プレスリリース

- [PR1] 海洋研究開発機構・国立極地研究所：北極域の観測で猛烈な北極低気圧を予測 — 北極海航路上の安全航行に向けた予報精度の向上 —, 2015年4月27日.
- [PR2] 国立極地研究所・海洋研究開発機構：観測コストを考慮した北極海上の最適観測頻度を実証 — 北極海航路の気象・海水予測の高精度化に貢献 —, 2015年11月20日.

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

Akira Yamazaki Application Laboratory, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Jun Inoue Arctic Environment Research Center, National Institute of Polar Research
Institute of Arctic Climate and Environment Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Miki Hattori Research and Development Center for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

By using our own ensemble-based data assimilation system, we conducted several observing system experiments to investigate the influence of additional observations conducted under the international collaborations on the accuracy of the analyses and forecasts. (1) For the case of the early-August 2012 Arctic cyclone (AC12), radiosonde observations acquired far from AC12 by the German icebreaker *Polarstern* significantly improved forecast of the formation of AC12. (2) The incorporation of additional observations under the ARCROSE project improved the initial analysis and enhances the skill of weather and sea-ice forecasts. (3) Assimilation of additional radiosonde observations during the VPRES2010 well captured westward-propagating disturbances in their early stage of development, which developed afterward to cause heavy rainfall over Vietnam.

Keywords: Ensemble-based data assimilation, observing system experiment, Arctic cyclone, Northern Sea Route, ARCROSE, VPRES2010

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 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. Impact of radiosonde observation on a summer-time Arctic cyclone formation forecast

Impact of Arctic radiosonde observations on forecast of the ‘strongest’ early-August 2012 Arctic cyclone (AC12) of all August was investigated through an observing system experiment (OSE). ALERA2 was used as the control experiment (CTL) which could reproduce development of AC12 and large-scale fields surrounding it. The OSE is the same reanalysis as the CTL except that radiosonde observations from the Germany icebreaker *Polarstern* that cruised near Svalbard during mid

July to early August 2012 are excluded.

Comparing the two reanalyses, the upper tropospheric circulations over the north of mid Eurasia were different just before AC12 forms; in the CTL, a tropopause polar vortex over there was stronger than that in the OSE. This indicates that the upper-level field in the OSE had less potential for baroclinic instability over the mid Eurasia.

Ensemble predictions were then conducted by using the two reanalyses as initial values when the polar vortex approached to the north of mid Eurasia. The prediction from the CTL could reproduce the formation of AC12, while that from the OSE could not well (Fig. 1). Therefore, observations being acquired far from AC12 affect the prediction of the cyclone via the upper tropospheric circulation in the atmospheric west wind drift.

(This section is based on [2] and [PR1].)

3. Optimized Arctic observations for improving weather forecast in the Northern Sea Route

During ice-free periods in the Arctic Ocean, the Northern Sea Route (NSR) could be an attractive shipping route. The decline in Arctic sea-ice extent, however, could be associated with an increase in the frequency of the causes of severe weather phenomena, and high wind-driven waves and the advection of sea ice could make ship navigation along the NSR difficult.

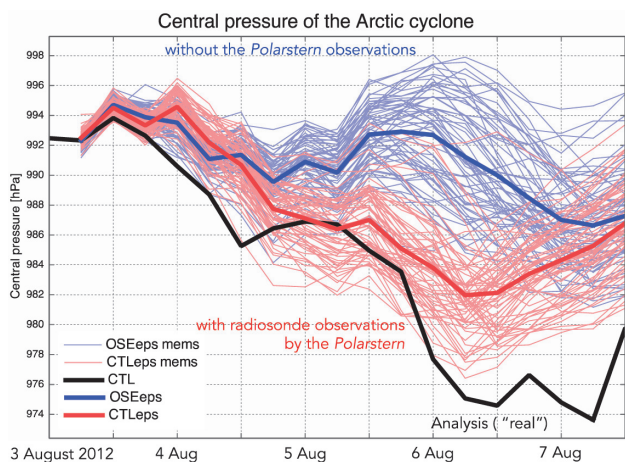


Fig. 1 Forecast results of AC12 formation and development in the experiments with (red) and without (blue) the *Polarstern* radiosonde observations. The values indicate time sequences of AC12 central pressure (hPa). The thin lines indicate the results of all ensemble predictions (probability values) while the thick lines mean of all ensembles. The black line is analyzed values obtained by the data assimilation system, corresponding to the real-time change of the AC12 central pressure.

Accurate forecasts of weather and sea ice are desirable for safe navigation, but large uncertainties exist in current forecasts, partly owing to the sparse observational network over the Arctic Ocean. Here, we show that the incorporation of additional (special) Arctic observations under the Arctic Research Collaboration for Radiosonde Observing System Experiment (ARCROSE) improves the initial analysis and enhances the skill of weather and sea-ice forecasts, the application of which has socioeconomic benefits.

To investigate the impact of these additional observations on the weather forecasts over the Arctic, we focused on a high-pressure system along the NSR on September 20, 2013 that caused strong coastal winds and rapid wind-driven sea-ice drift over the NSR. The forecast experiment using ALERA2 (CTL) assimilated routine global observations, which included all the additional observation data, and the other experiments using reanalyses that excluded some of the additional data (OSE) were conducted and compared to quantify the impact of the special observations.

It was found that the uncertainty in the forecasted wind fields associated with the high-pressure system was reduced in the CTL forecast experiment. Based on several sets of sensitivity tests (comparison of the OSEs), we found that four launches per day, once every six hours, is the most cost-effective observing frequency.

(This section is based on [3] and [PR2].)

4. The impact of additional radiosonde observations on the analysis of disturbances in the South China Sea during VPRESX2010

The central Vietnam coastal region experiences an annual rainy season from October to November and experiences heavy

rainfall frequently during the season. The Vietnam–Philippines Rainfall Experiment 2010 (VPRESX2010) observation campaign was conducted by the JAMSTEC, National Hydrometeorological Service of Vietnam (NHMS) and Philippine Atmospheric, Geophysical and Astronomical Service Administration (PAGASA) to focus on westward-propagating disturbances that affected the coastal region of Vietnam. Additional radiosonde observations were conducted in Vietnam and the Philippines to observe synoptic conditions related to the generation and development of westward-propagating disturbances.

In the present study, the impact of additional radiosonde observations during the VPRESX2010 was investigated by performing observing system experiments using the ALEDAS. During the experimental period from September 15 to October 15, 2010, a westward-propagating disturbance was developed in the South China Sea and caused heavy rainfall on the east coast of Vietnam and Hainan Island. By assimilating the additional radiosondes, significant increases in wind speed, temperature and specific humidity were detected in the lower troposphere around the disturbance. In addition, the analysis ensemble spread for meridional wind decreased by 5–25% across the Indochina Peninsula, Philippines Sea and western Pacific to the south of Japan (Fig. 2). Moreover, winds became stronger around the disturbance due to the additional observations, and the ensemble spread for wind speed became larger. The results show that the disturbance in an early stage of development was not well detected in the South China Sea without the use of additional radiosonde observations. Therefore, it is suggested that continuous and intensive radiosonde observations in Vietnam and the Philippines are essential for the improvement

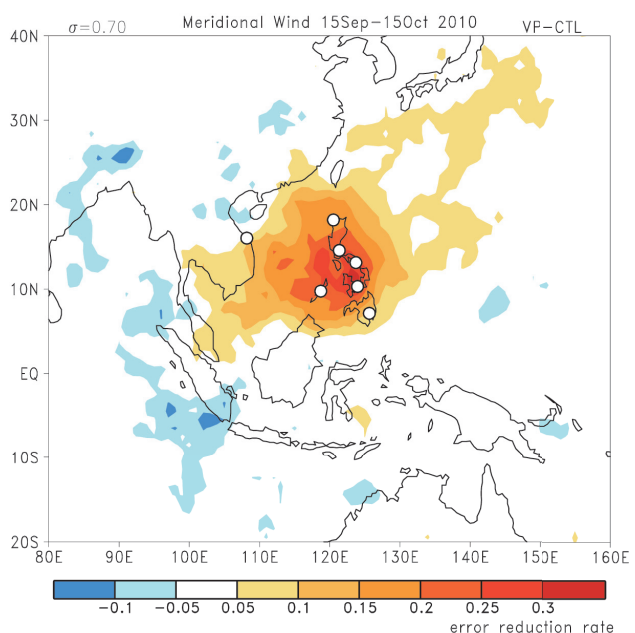


Fig. 2 Analysis error reduction rate of meridional wind for a σ -level of 0.70 averaged from September 15 to October 15, 2010. White dots indicate the stations of the assimilated radiosonde observations.

of the objective analysis of such disturbances.

(This section is based on [4].)

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 & L. Xu (ed.), chap. 21, pp. 509-526, Springer, doi:10.1007/978-3-642-35088-7_21, February 2013.
- [2] Yamazaki, A., J. Inoue, K. Dethloff, M. Maturilli, and G. König-Langlo: Impact of radiosonde observations on forecasting summertime Arctic cyclone formation. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, **120** (8), 3249-3273, doi:10.1002/2014JD022925, April 2015.
- [3] Inoue, J., A. Yamazaki, J. Ono, K. Dethloff, M. Maturilli, R. Neuber, E. Patti, and H. Yamaguchi: Additional Arctic observations improve weather and sea-ice forecasts for the Northern Sea Route. *Sci. Rep.*, **5**, 16868, doi:10.1038/srep16868, November 2015.
- [4] Hattori, M., J. Matsumoto, S.-Y. Ogino, T. Enomoto, and T. Miyoshi: The impact of additional radiosonde observations on the analysis of disturbances in the South China Sea during VPRES2010. *SOLA*, **12**, 75-79, doi:10.2151/sola.2016-018, March 2016.

Press Releases

- [PR1] JAMSTEC and NIPR: Forecasting extreme summertime Arctic cyclone with observations over Arctic Ocean— Toward more accurate prediction for safer Arctic sea cruise—, April 27, 2015.
- [PR2] NIPR and JAMSTEC: Optimized Arctic observations for improving weather forecast in the Northern Sea Route, November 20, 2015.

