

# 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

佐藤 和敏 北見工業大学 工学部

猪上 淳 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。海洋地球研究船「みらい」により北極海上で取得されたラジオゾンデ観測データを同化することにより、2016年9月に北大西洋を通過したハリケーン Karl の進路予報精度が向上することを明らかにした。

また、このシステムの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ることにより、新たなデータ同化システムを構築した。一方、このシステムのデータ同化部分を利用し、金星大気に対するデータ同化システムを世界で初めて開発した。

キーワード：アンサンブルデータ同化、観測システム実験、ハリケーン Karl、大気海洋結合モデル、金星大気

## 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。

### 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 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、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。複数の stream に分かれているものの、2017 年度末時点で 2018 年 1 月まで到達している。

## 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。

### 2.1 北極海のラジオゾンデ観測が夏の熱帯低気圧の進路予報の精度に与える影響

ハリケーンの子報精度の向上は、大雨や強風などの災害を軽減する上で重要な課題である。ハリケーンの子報の精度は、近年のモデルや同化手法の性能向上だけでなく、予報の初期場を改善する観測データ量の増加により向上している。これまでの研究では、ハリケーンの中心や周辺で実施されたドロップゾンデがハリケーンの子報予報精度の向上に重要であると指摘している。しかし、中緯度に到達したハリケーンの子報は、上空の大気循環の影響を受けることから、ハリケーンの上流に位置する観測が重要であることが示唆されていた。そこで、上空の大気循環場の予報精度を向上させている北極海のラジオゾンデ観測が中緯度に到達した熱帯低気圧の子報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、夏の北極海上で海洋地球研究船「みらい」

で2016年夏季から初秋に実施された追加観測（図1）を同化した再解析データ（CTL）と同化していない再解析データ（OSE）を作成し、それぞれを初期値とした予報実

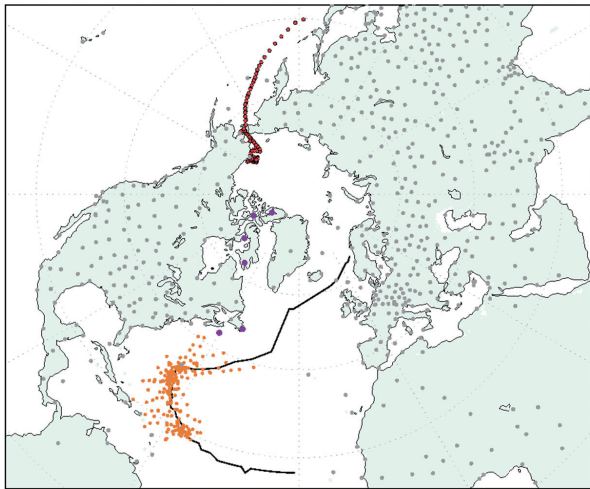


図1 海洋地球研究船「みらい」の観測位置（赤点）およびカナダや航空機により2016年9月に特別観測が実施された地点（紫：カナダ6観測点、橙：航空機 Global Hawk）。黒線はハリケーン Karl の経路を示している。

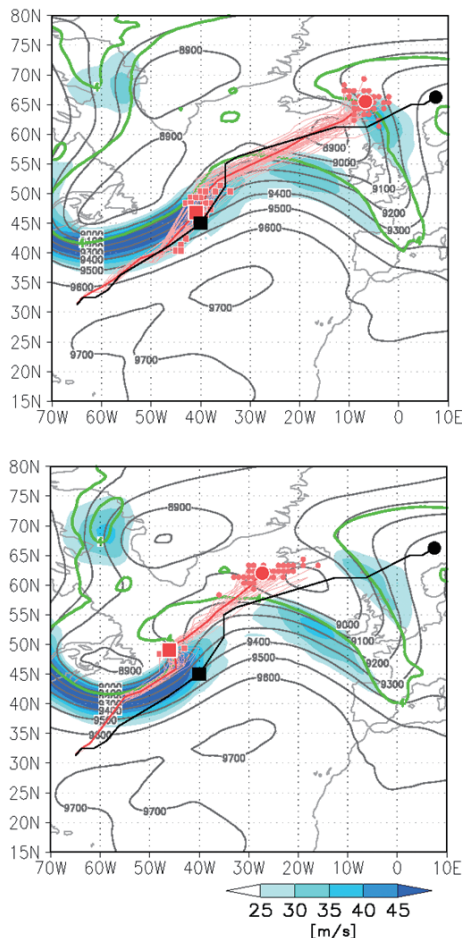


図2 「みらい」での追加観測を同化した実験（CTLf、上）と同化していない実験（OSEf、下）における、2.0日後の300 hPaの風速（色）、高度（黒コンター）と330 K高度の渦位（緑コンター）の予報結果（63メンバー平均）。線は、解析値（黒）、各アンサンブルメンバー（細赤線）、アンサンブル平均（太赤線）でのハリケーン Karl の経路。

験（CTLf、OSEf）を行なった。「みらい」のラジオゾンデ観測が中緯度に到達した熱帯低気圧の進路予報精度に与える影響を調べるため、2016年9月に大西洋を通過したハリケーン「Karl」に着目し、4.5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、航空機によりハリケーン周辺で投下されたドロップゾンデやカナダの6点の観測所での臨時ラジオゾンデ観測（通常は1日2回だが、臨時で1日2回の追加観測が行われた）も影響していることがわかったが、最も影響の大きかった北極海の観測について報告する。

CTLfでは、OSEfに比べKarlの東進が再現できており、4.5日後のKarlの位置が予報できていた（図2上）。一方のOSEfは、Karlの東進が再現できておらず、4.5日後もCTLfに比べ西側に位置していた（図2下）。予報された上空の大気循環場を比較すると、2日予報でもトラフの位置に違いがあり、これがKarlの進路に影響したと考えられる。これらの研究結果から、北極海のラジオゾンデ観測は冬だけでなく夏の極端現象の予報精度も向上させていることがわかった。

（本節は[2]を基にした。）

### 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、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。並行して、地球シミュレータ公募課題『AFESを用いた金星・火星大気の高解像度大循環シミュレーション』（課題代表者：林祥介・神戸大学教授）と共同で、惑星大気モデルへアンサンブルデータ同化を適用したシステムの構築も進めている。

#### 3.1 全球大気海洋結合モデルCFES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（図3）。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 [3] を基にした。)

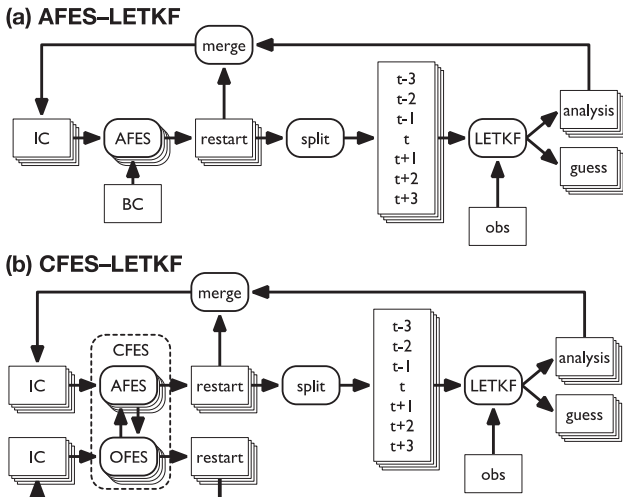


図3 (a) ALEDAS2 ([1] の図 21.2 を基に改変) および (b) CLEDAS-A のデータフローチャート。長方形は入出力データを、角丸長方形は処理を表す。CLEDAS-A では、予報モデルが AFES から CFES へ変更されているが、データ同化部分は ALEDAS2 のままである。

### 3.2 金星大気データ同化システム AFES-Venus-LETKF data assimilation system (VALEDAS) の開発

近年、データ同化は地球大気以外にも用いられるようになってきた。今回、初めて金星大気について AFES-LETKF をベースにしたデータ同化手法を適用することに成功した。

他の国内のグループが開発する簡易金星版大気大循環モデル (AFES-Venus) に我々のグループで地球大気用

に開発を進めてきた ALEDAS2 の LETKF データ同化部分を結合させ、AFES-Venus-LETKF データ同化システム (VALEDAS) を構築した。VALEDAS は、金星大気の観測データを時空間的に同化することが可能であり、過去の金星探査機による観測データを AFES-Venus に取り込むことが可能となった。これによって、これまで大気大循環モデルでの再現が困難あるいは不可能であった「大気スーパーローテーション」現象や、厚い雲層によって隠された未知の大気内部の運動の再現がデータ同化によって可能となることが期待され、それによりメカニズム解明や現象の理解が促進されることが期待される。

VALEDAS の有用性を示すため、数値シミュレーションで得られた疑似観測データと過去の金星探査機「Venus Express」の観測データを用いた同化実験を行った。設定として、モデルに太陽加熱の日変動を与えない設定で積分を行い、モデルでは再現できない熱潮汐波がデータ同化によって再現できるかを調査した。熱潮汐波を含む観測データとして、モデルに太陽加熱の日変動成分を含めた (熱潮汐波を励起できる) 理想化実験の出力結果を疑似観測、そして Venus Express 搭載の Venus Monitoring Camera (VMC) 観測から導出された「現実の」風速場を準備し、モデルへと同化することで、熱潮汐波の再現性のテスト実験を行った。その結果、観測を同化することでモデルでの熱潮汐波の再現が可能となることがわかった (図 4)。この新しいデータ同化システムを使えば、今後、金星探査機「あかつき」の観測データに適用することにより、金星の謎の解明が革新的に進むと期待される。

(本節は [4],[PR1] 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 Hydrologic Applications (Vol. II)*, S. K. Park & L. Xu (ed.), chap. 21, pp. 509–526, Springer,

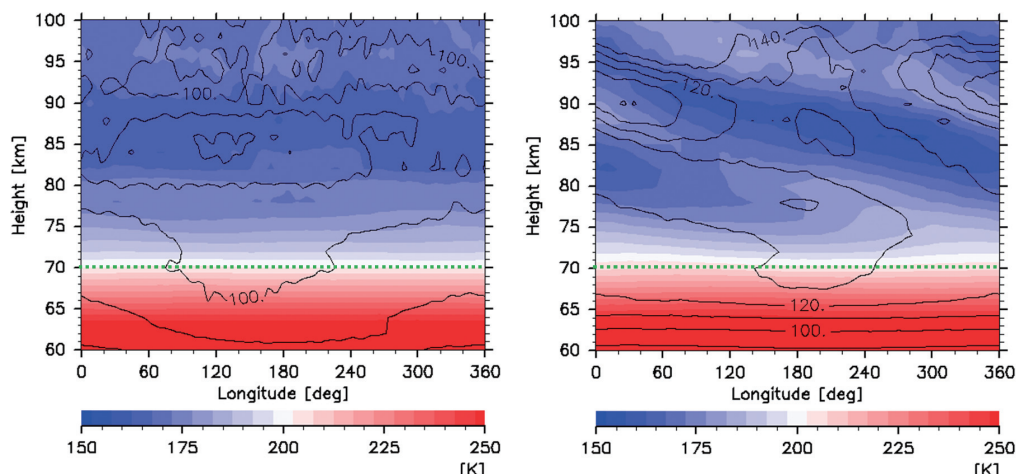


図4 東西風速 (等値線) と温度 (カラー) の経度高度断面図。左が同化なし、右が同化あり実験の結果。高度 70 km の風速データのみを同化することによって、金星大気全体で熱潮汐波が再現され、熱潮汐波に伴う温度の擾乱が上方へと伝播している。

doi:10.1007/978-3-642-35088-7\_21, February 2013.

- [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, doi:10.1038/s41598-018-30594-4, August 2018.
- [3] 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*, doi:10.1175/MWR-D-17-0361.1, accepted, August 2018.
- [4] Sugimoto, N., A. Yamazaki, T. Kouyama, H. Kashimura, T. Enomoto, and M. Takagi: Development of an ensemble Kalman filter data assimilation system for the Venusian atmosphere. *Scientific Reports*, 7, 9321, doi:10.1038/s41598-017-09461-1, August 2017.

#### プレスリリース

- [PR1] 慶應義塾大学・海洋研究開発機構・京都産業大学：金星の大気の流れを再現する仕組みの開発に世界で初めて成功—金星探査機「あかつき」観測データの革新的な利活用が可能に—, 2017年8月25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

Kazutoshi Sato      Kitami Institute of Technology

Jun Inoue      Arctic Environment 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. Additional Arctic radiosonde observations from the RV *Mirai* improved forecast skill of the track of Tropical Storm Karl in the North Atlantic in September 2016.

In addition, a new system has been constructed by replacing an atmospheric general circulation model in our existing system with a coupled atmosphere–ocean general circulation model. Moreover, we have developed a data assimilation system for the Venusian atmosphere for the first time, of which the data assimilation portion is based on our system in this project.

**Keywords:** Ensemble-based data assimilation, observing system experiment, Tropical Storm Karl, coupled atmosphere–ocean general circulation model, Venusian atmosphere

## 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. The impact of Arctic radiosonde observations on tropical cyclone over the mid latitude

The forecast skill of tropical cyclone (TC) tracks has improved substantially in recent decades because of the advance of both numerical weather prediction models and data assimilation techniques. However, initial fields for forecast is improved by dropsonde observations near TC, suggesting that observations over the Arctic, which has large uncertainty and error in reanalysis data, would have strong potential for improving TC forecasts in the extratropics. Here, using an observing system experiment (OSE), we investigate the impacts of additional Arctic radiosonde from ships during summer 2016.

In this study, we prepared two 63-member ensemble reanalysis data: CTL, which includes radiosonde observation

from ship, and OSE, which exclude this observation data, respectively. To assess the impact of the additional radiosonde observations at the RV *Mirai* on forecast skill, two sets of ensemble forecasts (CTLf and OSEf hereafter) were performed using these reanalyses as initial conditions. We investigated the forecast skills of Tropical Storm Karl in September 2016. We investigated the impact of dropsonde near typhoon by aircraft and radiosonde at Canada stations over the high and mid latitudes on forecast skills of Karl tracks; however, we focused on Arctic radiosonde observation in this report.

The CTLf captured eastward movement of the cyclone and the observed location of Karl. In contrast, in OSEf did not capture location of Karl (Fig. 1). According to prediction of atmospheric circulation at upper level, predicted winds in OSEf were weaker than in CTLf, owing to a failure to predict a southward protrusion of the trough over southern Greenland. This prevented eastward movement of the cyclone in OSEf. This study presents that both observation near Typhoon and additional Arctic observation are important for improving TC track forecast.

(This section is based on [2].)

## 3. Ensemble-based atmospheric reanalysis using a global coupled atmosphere–ocean GCM

Ensemble-based atmospheric data assimilation systems are sometimes afflicted with an underestimation of the ensemble spread near the surface caused by the use of identical boundary condition for all ensemble members and the lack of atmosphere–

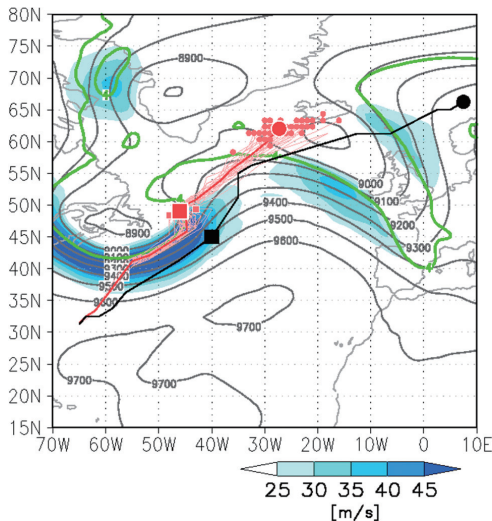


Fig. 1 Predicted 300-hPa wind speed (shading) and geopotential height (black contours) with potential vorticity on 330-K surface (green contour) at 0000 UTC 26 September 2016 in OSEf. Black and red lines show tracks of Karl from 0000 UTC 24 September through 1200 UTC 28 September in CTL and OSEf.

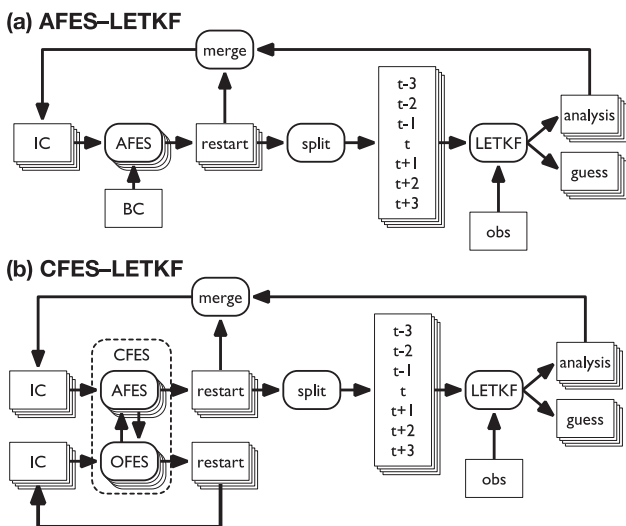


Fig. 2 The data flow charts of (a) ALERA2 (adapted from Fig. 21.2 of [1]) and (b) CLERA-A. Rectangles represent input/output data, and round rectangles represent processes.

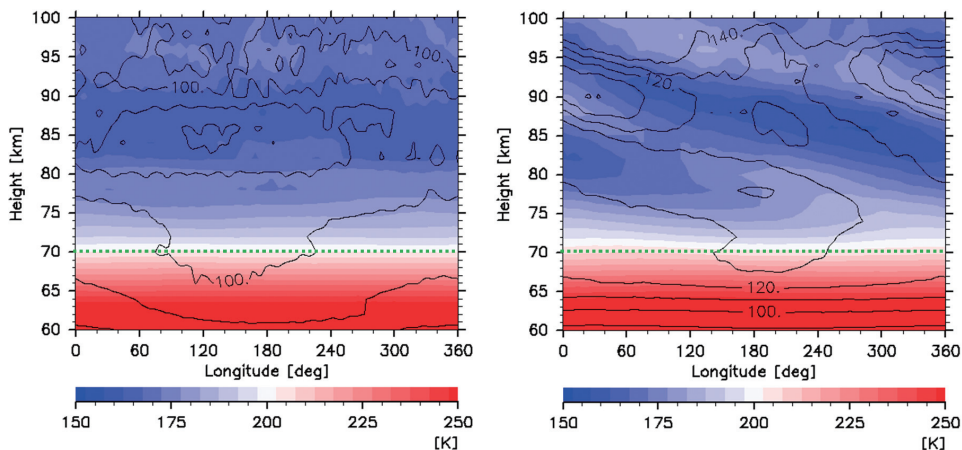


Fig. 3 Snapshots of height-longitude cross sections of temperature (color shades; K) and zonal wind (contour; m/s) for cases with (left) and without (right) assimilating the observations. Green dotted line indicates the level where the observations were assimilated.

ocean interaction. To enhance the capability of the LETKF with AFES, a new system has been developed by replacing AFES with the Coupled atmosphere–ocean GCM for the Earth Simulator (CFES). Two months of a retrospective analysis–forecast cycle with the coupled system (CLERA-A) from 1 August 2008 has been completed successfully, assimilating atmospheric observational data (the NCEP PREPBUFR archived at the UCAR) every 6 hours to update the atmospheric variables, whereas the oceanic variables are subject to no direct data assimilation. Although SST in CLERA-A suffers from the common biases among many coupled GCMs, the ensemble spreads of air temperature and specific humidity in the lower troposphere are larger in CLERA-A than in ALERA2. Therefore, the replacement of AFES with CFES successfully contributes to mitigate an underestimation of the ensemble spread near the surface. In addition, surface atmospheric variables over the tropical Pacific have the basin-wide horizontal correlation in ensemble space in CLERA-A but not in ALERA2. This suggests the potential benefits of using a coupled GCM rather than an atmospheric GCM even for atmospheric reanalysis with an ensemble-based data assimilation system.

(This section is based on [3].)

#### 4. Development of a data assimilation system for the Venusian atmosphere: AFES-Venus–LETKF data assimilation system (VALEDAS)

We have newly developed a data assimilation system for the Venusian atmosphere, which is composed of the LETKF and a Venusian Atmospheric GCM for the Earth Simulator (AFES-Venus). We call this system VALEDAS. To examine the validity of VALEDAS, two observational datasets were assimilated separately into the AFES-Venus in which the diurnal solar heating was excluded. The model itself cannot excite the thermal tide. If VALEDAS can reproduce the thermal tide, it can be said that the VALEDAS functions appropriately. One dataset was idealized (pseudo) observation created by the AFES-Venus run forced with solar heating that includes the

diurnal component. The other was based on observations made by the Venus Monitoring Camera (VMC) onboard the Venus Express. The VALEDAS rapidly reduced the errors between the analysis and forecasts. In addition, the VALEDAS successfully reproduced the thermal tide excited by the diurnal component of solar heating, even though the second datasets only included horizontal winds at a single altitude on the dayside with a long interval of approximately one Earth day.

(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] 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, doi:10.1038/s41598-018-30594-4, August 2018.
- [3] 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*, doi:10.1175/MWR-D-17-0361.1, accepted, August 2018.
- [4] Sugimoto, N., A. Yamazaki, T. Kouyama, H. Kashimura, T. Enomoto, and M. Takagi: Development of an ensemble Kalman filter data assimilation system for the Venusian atmosphere. *Scientific Reports*, 7, 9321, doi:10.1038/s41598-017-09461-1, August 2017.

