

大型大気レーダー国際共同観測データと高解像大気大循環モデルの融合による大気階層構造の解明

課題責任者

佐藤 薫 東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻

著者

渡辺 真吾^{*1}, 佐藤 薫^{*2}, 小新 大^{*1,2}, 野口 峻佑^{*1}

^{*1} 海洋研究開発機構 地球環境部門 環境変動予測研究センター, ^{*2} 東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻

本研究課題は、同名の CREST 課題（2016～2021 年度）のもとで日本が主導する南極大型大気レーダー（PANSY）を含む国際共同観測で得られた高品質かつ高解像の連続観測データと JAMSTEC で開発された高解像度全大気モデル JAGUAR によるシミュレーションデータとを組み合わせることによって、様々な規模の大気現象が織りなす大気階層構造と南北両半球結合の物理的解明を目指すものである。本年度は、JAMSTEC の DA システムに実装した JAGUAR-LETKF データ同化システム（水平解像度約 300 km、鉛直解像度 1 km、トップ約 150 km）を用いて作成した中解像解析値を、高解像度版 JAGUAR（水平解像度 20 km、鉛直解像度 300 m、トップ 150 km）の初期値作成に用いる手法を検討・確立し、国際共同観測期間である 2018 年 2 月に生じた極渦分裂型成層圏突然昇温イベントの高解像度再現実験を行い、その大規模場に関して中解像解析値を用いた検証を行った。

キーワード： 中層大気, 高解像度大気大循環モデル, データ同化, 大型大気レーダー

1. はじめに

本研究の主な対象は、高度約 10～110 km の「中層大気」（成層圏・中間圏・下部熱圏）と呼ばれる大気の大循環とそこに埋め込まれた数桁スケール（数百 m～数万 km）にわたる階層構造である。中層大気大循環は、地表付近を含む気候システムの季節内変動や年々変動に関わる主要要素の 1 つであり、その正確な把握とメカニズムの解明は長期気候予測に不可欠と認識されながらも不十分なのが現状である。

中層大気には、水平スケールの大きな（数千～4 万 km）「ロスビー波」と小さな（数千 km 以下）「重力波」という 2 種類の波が存在し階層構造をなしている。ロスビー波はコリオリ力の緯度変化に起因する波であり、重力波は浮力を復元力とする波である（相対論で登場する重力波と異なる）。中層大気大循環は主にこの 2 種類の波が対流圏から運動量を運び駆動すると考えられている。しかし、気候モデルでは重力波を解像できないため、その作用のみパラメータ化されて実装されている。そのため、重力波とロスビー波の運動量輸送は別々に議論されることが多く、階層構造全体を理解しようという研究はほとんど存在しなかった。中でも「中間圏」と「南極」は観測できる測器が少なく、高解像度に扱う大循環モデルも少ないため、研究が大きく遅れている。

課題責任者他による気球集中観測（Sato and Yoshiki, 2008 [1]）や世界最高レベルの重力波解像大気大循環モデル（GCM, KANTO/JAGUAR モデル）を用いた一連の研究（Watanabe et al. 2008 [2], Sato and Nomoto 2015 [3]他）によれば、成層圏のゆがんだロスビー波から重力波が放射される様子や、中間圏の重力波が不安定場を形成しロスビー波を発生させる様子など、ダイナミックに

相互作用する階層構造の存在が垣間見られている。また、国際衛星・モデル比較研究によれば、南極重力波の中層大気大循環における役割は極めて大きいと予想され、高解像観測による実態把握が強く求められている（Sato et al. 2009 [4]; Geller et al. 2013 [5]）。

本研究の目的は、課題責任者をリーダーに最近昭和基地に建設された重力波検出可能な世界初の南極大型大気レーダー（PANSY レーダー）による南極高解像度観測と、PANSY レーダーの設置により完成した全球大型大気レーダー観測網による国際協同観測を展開し、高解像 GCM 研究を進展させ、これを「データ同化」の手法も用いながら融合して、中層大気大循環の階層構造を 3 次的に丸ごと捉え、そこに埋め込まれているはずのダイナミックなメカニズムを定量的に理解することにある。

2. モデルと実験設定

本稿で JAGUAR と略称している GCM は、Japanese atmospheric general circulation model for upper atmosphere research であり、国内でそれぞれ独自に開発されてきた MIROC-AGCM と Kyushu-GCM という 2 つの GCM の hybrid として開発された（Watanabe and Miyahara 2009 [6]）。天気予報や対流圏・成層圏中心の気候研究に用いられる GCM との違いは、モデル上端を高高度（約 150km）にしており、中間圏・下部熱圏で重要となる物理過程として、非局所熱力学平衡条件での赤外放射過程や、分子熱伝導、分子拡散、化学加熱、イオンドラッグ等のパラメタリゼーションを含んでいることである。また、ロスビー波や重力波の鉛直伝播をできるだけ正確に表現するために鉛直解像度を極めて高くしていることも大きな特徴である。

本研究では、最初に、JAMSTEC の DA システムに実装さ

れた JAGUAR-LETKF データ同化システム (水平解像度約 300 km、鉛直解像度 1 km、トップ約 150 km) に、地上測器・気球・航空機等による通常観測データおよび成層圏・中間圏・下部熱圏の衛星観測データを同化することによって、モデル格子上的における水平風速・気温等の推定値「中解像解析値」を得る (Koshin et al. 2020 [7] を改良)。次に、それを用いて高解像度版 JAGUAR (水平解像度 20 km、鉛直解像度 300 m、トップ 150 km) の初期値を作成する。高解像度版 JAGUAR では、対流圏で生成され中間圏・下部熱圏まで上方伝播する重力波の大半を陽に解像できるため、重力波パラメタリゼーションを使用しない。このことも本研究の重要な特徴のひとつである。

本年度に行ったいくつかの試行の中で、中解像解析値によって高解像度版 JAGUAR の大規模場 (水平波長 2 千 km 以上) のみを拘束し、それよりも小規模な現象についてはモデル内部で大規模場と整合するように時間発展を解くような設定 (スペクトル・ナッジング手法) で 3 日間の初期値化実験を行う方法が、様々な時空間スケールを持った大気現象について、最も力学的に整合性が取れ、高解像度再現実験の開始直後にギャップや初期ショックが生じにくい初期値が得られることを見出した。

一方、中解像解析値に含まれない細かな地形等の影響を受けやすい対流圏大気および陸面モデルの初期値作成に際しては、最近利用が可能になった高解像度の再解析データである ERA5 を合わせて用いることにした。海面水温および海水密接度に関しては、水平解像度 0.25° の OISST 日別値を境界条件として与えた。温室効果ガス濃度等は観測値に近い年別値を境界条件として与えた。

以上のような初期値作成手法および境界条件を用いて、国際共同観測期間である 2018 年 2 月に生じた極渦分裂型成層圏突然昇温イベントの高解像度再現実験を行った。具体的には、2 月 4、6、8、10、12 日をそれぞれ初期値とした 5 回の 4 日間再現実験を行った。なお、同様の実験を他の年の国際共同観測期間に生じた成層圏突然昇温イベントについても行ったが、その結果については来年度以降に報告する予定である。

3. 帯状平均場の検証

結果の検証に際しては、まず東西平均場 (帯状平均場) の緯度-高度断面図に注目して、高解像度再現実験結果から中解像解析値を引いたものを誤差と定義した。図 1 は、2018 年 2 月 4 日から 2 月 15 日の帯状平均東西風の緯度-

高度断面図を数日おきに並べたものである。北半球の成層圏・中間圏 (高度 10-80 km) に注目すると、2/10 までは西風であったものが、2/12 には東風に変わっている。これがこの年に生じた成層圏突然昇温の経過である。

色で示した誤差は、概ね高度 50 km 以下では無視できるほど小さいことが分かる。すなわち、対流圏・成層圏では、いま注目している初期時刻から 1-4 日程度の再現実験期間においては、高解像度版 JAGUAR は初期値として与えられた大気状態からの帯状平均東西風の時間発展を概ね正確に予測できるスキルを持っていることが確認できた。

一方、赤道付近には、鉛直方向に東風と西風が積み重なった構造が見られるが、高度 50 km 以上では誤差が大きくなる傾向が見られる。このことは、1) 高解像度版 JAGUAR の予測スキルが不十分、2) 赤道域ではコリオリ力が小さいため衛星観測の気温データを同化しても中解像推定値の東西風を十分に拘束できない、のいずれかあるいは両方を反映していると考えられる。また、中・高緯度においては、概ね高度 70 km 以上に無視できない大きさの誤差が見られる。このことは、高解像度版 JAGUAR の中間圏・下部熱圏において、帯状平均東西風の形成・維持や時間発展にとって重要な何らかのプロセスの表現が不十分であることを示唆しており、来年度にかけて行う詳細解析によってモデル改善のヒントが得られることが期待される。そうした発見やモデル改善は、本課題で作成した中解像推定値を用いて初めて可能となるものである。

4. 極渦水平構造の検証と重力波の分布

引き続き、成層圏突然昇温に関する北半球極渦の時間発展について、平面図を用いて検証する。図 2 は、図 1 と同じ日付の極渦の外縁の位置を、高度 30、40、50 km に相当する等温位面上の修正渦位の 30 PVU ($1\text{PVU} \equiv 10^{-6} \text{ K m}^2 \text{ kg s}$) 等値線を用いて可視化したものである。いずれの日付・高度においても、高解像度再現実験結果は中解像解析値とよく一致していることが分かる。

以上の大規模場の検証結果を踏まえて、図 3 には、高解像度再現実験の極渦の外縁の位置と、高度 50 km における重力波水平風成分による運動エネルギー (GWKE50) の分布を合わせて示す。本研究では水平波長 2 千 km 未満の擾乱を重力波と定義した。

以下、両者の相互関係に注目しながら時間発展を調べる。

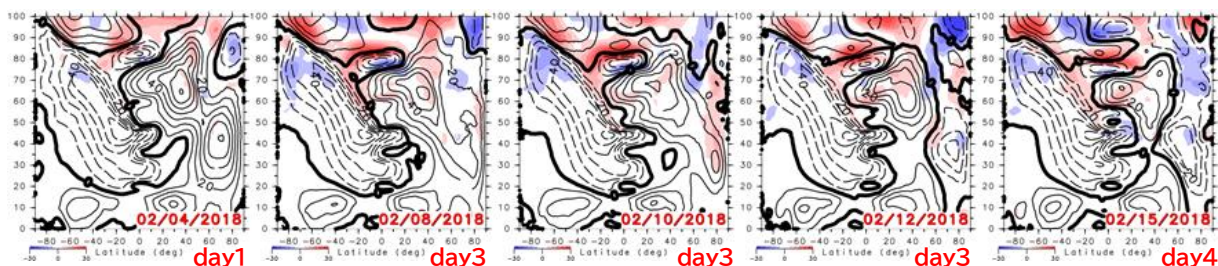


図 1: 帯状平均東西風 (等値線) および低解像推定値からの誤差 (色)。単位はともに ms^{-1} 。実線 (破線) の等値線は西風 (東風)、太実線は東西風速ゼロを表す。縦軸: ジオポテンシャル高度 (km)。横軸: 緯度。右端が北極。

2/4には、グリーンランド上空にはほぼ楕円形の極渦が位置しており、その縁に沿うようにカナダ北部-グリーンランド南端-北欧にかけてGWKE50のピークが分布している。

2/8には、高度30 kmでは北米-ユーラシアに極渦が引き延ばされた構造をしているが、高度40, 50 kmでは極渦が閉じた楕円形ではなくなっており、欧州方面に張り出した逆三角形の構造をしている。GWKE50のピークはその逆三角形の一部に位置している。

2/10には、カナダとユーラシアの2つに極渦が分裂しつつあり、GWKE50のピークはカナダ極渦の南縁部と、極渦が大きく変形して分裂しようとしているグリーンランド-北欧の高圧部に位置している。

2/12には、カナダ極渦とユーラシア極渦の2つに分裂し終わっているが、カナダ極渦は高度30~50 kmまでほぼ円筒型の順圧構造を示しているのに対して、ユーラシア極渦は高度30 kmにしか見られない背の低い構造をしている。このとき、GWKE50のピークはカナダ極渦の東縁に位置している。

2/15には、カナダ極渦が高度とともに西向きに大きく傾いた構造になっており、GWKE50はアリューシャン列島に中心をもつ高度50kmのカナダ極渦の北東縁にごく弱いピークを持つのみである。

論文投稿前のため本稿では図示しないが、3次元可視化ツールを用いた立体解析により、対流圏で発生し上方伝播する重力波が極渦を含む大規模な風によってフィルタリングされる様子が確認された。そうした性質は重力波に関する理論とも整合的であることから、図3に見られたGWKE50の時間変化は現実を反映したものであることが期待される。

来年度にかけて同様の解析を中間圏・下部熱圏まで拡張して国際共同観測で得られた大型大気レーダーの観測結果と照合するとともに、様々な重力波の性質に注目し

た解析を行い、その励起・伝播・散逸において重要なプロセスの特定を行う。

5. まとめと今後の課題

JAGUAR-LETKF データ同化システム（水平解像度約300 km、鉛直解像度1 km、トップ約150 km）を用いて作成した中解像度解析値を、高解像度版 JAGUAR（水平解像度20 km、鉛直解像度300 m、トップ150 km）の初期値作成に用いる手法を検討・確立し、国際共同観測期間である2018年2月に生じた極渦分裂型成層圏突然昇温イベントの高解像度再現実験を行うとともに、その結果に関して中解像度解析値を用いた検証を行った。

対流圏・成層圏では、初期時刻から1~4日程度の再現実験期間においては、高解像度版 JAGUAR は初期値として与えられた大気状態からの帯状平均東西風の時間発展を概ね正確に予測できるスキルを持っていることが確認できた。一方、中間圏・下部熱圏とくに高度70 km以上には無視できない大きさの誤差が見られ、モデルにおいて同領域の帯状平均東西風の形成・維持や時間発展にとって重要な何らかのプロセスの表現が不十分であることが示唆された（図1）。来年度にかけて行う詳細解析によってモデル改善のヒントを得ることが期待される。

成層圏突然昇温にともなう極渦の水平構造の時間発展に関して、高度30~50 kmにおける再現性が良好であることが確認できた（図2）。また、極渦の時間発展にともない、高度50 kmにおける重力波運動エネルギーの分布が変化の様子について記述した（図3）。来年度にかけて同様の解析を中間圏・下部熱圏まで拡張し、国際共同観測で得られた大型大気レーダーの観測結果と照合する。帯状平均東西風に見られた誤差がどの程度極渦の水平構造や重力波の水平分布に影響を及ぼすかについても調査し、モデル改善に結び付ける。

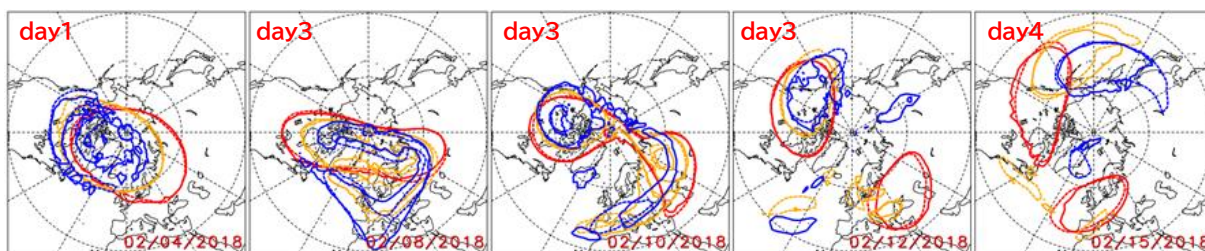


図2：極渦の縁の位置を、高度30（赤）、40（橙）、50（青）kmに相当する850、1300、1800 K等温面上の修正高度30 PVU等値線を用いて可視化したもの。実線：高解像度再現実験結果、点線：低解像度推定値。

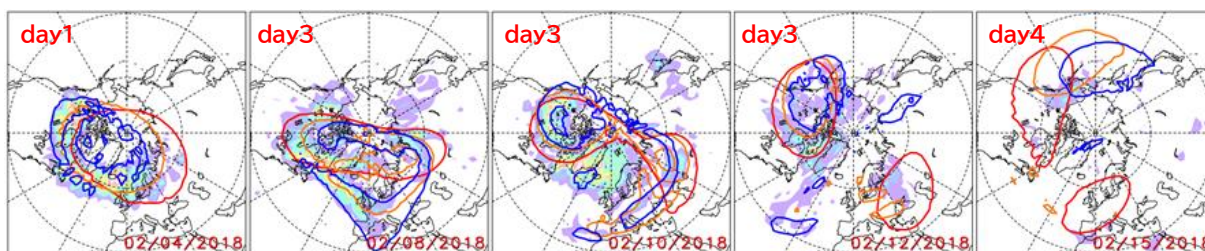


図3：高解像度再現実験の極渦の位置と、高度50 kmに相当する1800 K等温面上の重力波運動エネルギー（GWKE50）の分布。薄紫は100~150 m^2s^{-2} 、橙色は450~500 m^2s^{-2} に相当する。図中左肩のdayは、予報開始後何日目かを表す。

謝辞

本研究は科学技術振興機構の戦略的創造研究推進事業 CREST 「大型大気レーダー国際共同観測データと高解像大気大循環モデルの融合による大気階層構造の解明」 (JPMJCR1663) の支援を受けて実施された。計算には JAMSTEC の地球シミュレータおよび DA システムを用い、作図には GTOOL および地球流体電脳ライブラリを用いた。

文献

- [1] Sato, K. and M. Yoshiki (2008), Gravity wave generation around the polar vortex in the stratosphere revealed by 3-hourly radiosonde observations at Syowa Station. *J. Atmos. Sci.*, 65, 3719–3735, <https://doi.org/10.1175/2008JAS2539>
- [2] Watanabe, S., Y. Kawatani, Y. Tomikawa, K. Miyazaki, M. Takahashi, and K. Sato (2008), General aspects of a T213L256 middle atmosphere general circulation model. *J. Geophys. Res.*, 113, D12110, <https://doi.org/10.1029/2008JD010026>
- [3] Sato, K. and M. Nomoto (2015), Gravity wave-induced anomalous potential vorticity gradient generating planetary waves in the winter mesosphere, *J. Atmos. Sci.*, 72, 3609–3624. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-15-0046.1>
- [4] Sato, K., S. Watanabe, Y. Kawatani, Y. Tomikawa, K. Miyazaki, and M. Takahashi (2009), On the origins of mesospheric gravity waves. *Geophys. Res. Lett.*, 36, L19801, <https://doi.org/10.1029/2009GL039908>
- [5] Geller, M. A., M. J. Alexander, P. T. Love, J. Bacmeister, M. Ern, A. Hertzog, E. Manzini, P. Preusse, K. Sato, A. A. Scaife, and T. Zhou (2013), A comparison between gravity wave momentum fluxes in observations and climate models, *J. Climate*, 26, 6383–6405, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00545.1>
- [6] Watanabe, S., and S. Miyahara (2009), Quantification of the gravity wave forcing of the migrating diurnal tide in a gravity wave-resolving general circulation model, *J. Geophys. Res.*, 114, D07110, <https://doi.org/10.1029/2008JD011218>
- [7] Koshin, D., K. Sato, K. Miyazaki and S. Watanabe (2020), An ensemble Kalman filter data assimilation system for the whole neutral atmosphere, *Geosci. Model Dev.*, <https://doi.org/10.5194/gmd-13-3145-2020>

Elucidation of Hierarchical Structure of the Middle Atmosphere by Combining International Joint Observation Data from a Global Network of Atmospheric Radars and High-resolution General Circulation Models

Project Representative

Kaoru Sato Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science,
The University of Tokyo

Authors

Shingo Watanabe *¹, Kaoru Sato *², Dai Koshin *^{1,2}, Shunsuke Noguchi *¹

*¹Research Center for Environmental Modeling and Application, Research Institute for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, *² Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo

This project aims to physically elucidate the hierarchical structure of the atmosphere at various scales and the coupling between the northern and southern hemispheres of the atmosphere by combining high-quality, high-resolution continuous data obtained from the Japan-led international joint observation, which includes the Polar Atmospheric Radar (PANSY), and numerical simulations using the high-resolution whole atmosphere model, Japanese Atmospheric General circulation model for Upper Atmosphere Research, developed at JAMSTEC. In this year, we established an initialization methodology of the high-resolution model by using the medium-resolution atmospheric analysis data generated by a data assimilation system based on the medium resolution version of the model, and conducted high-resolution hindcast simulations of the polar vortex splitting type stratospheric sudden warming event that occurred in February 2018. The simulation results were verified against the medium-resolution atmospheric analysis data for the large-scale field.

Keywords : Middle Atmosphere, High-Resolution General Circulation Model, Data Assimilation, Atmospheric Radar Network

1. Introduction

The main focus of this study is the general circulation of middle atmosphere, which consists of the stratosphere, mesosphere, and lower thermosphere, and the hierarchical structure embedded in it, which spans several orders of magnitude (hundreds of meters to tens of thousands of kilometers). The general circulation of middle atmosphere is one of the major factors involved in intraseasonal and interannual variability of the climate system, including near-surface variability, and a precise understanding of its mechanisms is essential for long-range prediction of weather and climate systems, although it is not yet fully understood.

The present study aims to physically elucidate the hierarchical structure of the atmosphere at various scales and the coupling between the northern and southern hemispheres of the atmosphere by combining high-quality, high-resolution continuous data obtained from the Japan-led international joint observation, which includes the Polar Atmospheric Radar (PANSY), and simulations using a high-resolution whole atmosphere model.

2. Model and Experiments

The Japanese Atmospheric General circulation model for Upper Atmosphere Research, abbreviated as JAGUAR in this

report, was developed as a hybrid of two atmospheric general circulation models (GCMs), the MIROC-AGCM and the Kyushu-GCM, which have been independently developed in Japan (Watanabe and Miyahara 2009 [1]). In contrast to GCMs used for weather and climate studies, the top of the model is set at a high altitude (about 150 km), and the physical processes that are important in the mesosphere and lower thermosphere are parameterized, e.g., infrared radiation processes in non-local thermodynamic equilibrium, molecular conductivity, molecular diffusion, chemical heating, ion drag, and so on. Another important aspect of the model is that the vertical resolution is extremely high to represent the vertical propagation of Rossby and gravity waves as accurately as possible.

In this study, first, we use the JAGUAR-LETKF data assimilation system implemented in the DA system of JAMSTEC to generate a medium-resolution atmospheric analysis data (an estimate of the horizontal wind speed, temperature, etc., on the model grid with horizontal resolution of about 300 km, vertical resolution of 1 km, and top of 150 km). The data assimilation system assimilates the conventional observation data from ground-based instruments, balloons, aircraft, as well as the satellite observation data in the stratosphere, mesosphere, and lower thermosphere (improving on Koshin et al. 2020 [2]). We then use them to generate initial values for the

high-resolution version of model (20 km horizontal resolution, 300 m vertical resolution, and 150 km top). The high-resolution version of JAGUAR does not use gravity wave parameterization because most of the gravity waves generated in the troposphere and propagated upward to the mesosphere and lower thermosphere are explicitly resolved in the model. This is another important feature of the present study.

We performed high-resolution hindcast simulations of the polar vortex splitting type stratospheric sudden warming event that occurred in February 2018, an international joint observation period. Specifically, we conducted five 4-day hindcasts with initial values of 4, 6, 8, 10, and 12 February, respectively.

3. Verification of the Zonal Averages

When verifying the simulation results, we first focused on the latitude-altitude cross section of the zonal mean field, and defined the error as the result of high-resolution hindcast simulations minus the medium-resolution atmospheric analysis. Figure 1 shows the latitude-altitude cross-sections of the zonal mean eastward winds from 4 February to 15 February 2018, spanned every few days. If we focus on the northern hemisphere stratosphere and mesosphere (10-80 km altitude), we see that the wind was westerly until 2/10, but changed to easterly on 2/12. This is the development of the stratospheric sudden warming that occurred in this year.

The errors indicated by colors are negligible below 50 km altitude. This means that in the troposphere and stratosphere, the high-resolution version of JAGUAR has the skill to predict the time evolution of the zonal mean zonal wind for 1-4 days after the initialization.

On the other hand, there is a structure of easterly and westerly winds stacked vertically near the equator, where the errors tend to increase above 50 km altitude. This may reflect either or both 1) the inadequate forecasting skills of the high-resolution version of JAGUAR and 2) the inability to adequately constrain the zonal winds in the medium-resolution atmospheric analysis by assimilating the satellite-observed temperature data due to the low Coriolis force at the equator. In mid- and high-latitudes, non-negligible errors are generally found above 70 km altitude. This suggests that physical processes important for the formation and maintenance of zonal mean zonal wind and its temporal

evolution in the mesosphere and lower thermosphere of the high-resolution version of JAGUAR are inadequately represented. It is anticipated that detailed analyses over the next year will provide hints for model improvement. Such discoveries and model improvements can only be made using the medium-resolution atmospheric analysis generated in this study.

4. Concluding Remarks

In this year, we established the initialization methodology of the high-resolution version of JAGUAR by using the medium-resolution atmospheric analysis data generated by the JAGUAR-LETKF data assimilation system based on the medium resolution version of the model, and conducted the high-resolution hindcast simulations of the polar vortex splitting type stratospheric sudden warming event that occurred in February 2018. The simulation results were verified with the medium-resolution atmospheric analysis data for the large-scale field. The high-resolution JAGUAR successfully reproduced the large-scale field during the stratospheric sudden warming event below 50 km, while the necessity of model improvement was suggested above 70 km. Comparisons of the high-resolution GCM simulation data with the radar observation data are also planned over the next year.

Acknowledgement

This study was supported by the Japan Science and Technology Agency's CREST program (JPMJCR1663). The Earth Simulator and the DA system of JAMSTEC were used for the computations, and GTOOL and the GFD DENNOU Library were used for the figures.

References

- [1] Watanabe, S., and S. Miyahara (2009), Quantification of the gravity wave forcing of the migrating diurnal tide in a gravity wave-resolving general circulation model, *J. Geophys. Res.*, 114, D07110, <https://doi.org/10.1029/2008JD011218>
- [2] Koshin, D., K. Sato, K. Miyazaki and S. Watanabe (2020), An ensemble Kalman filter data assimilation system for the whole neutral atmosphere, *Geosci. Model Dev.*, <https://doi.org/10.5194/gmd-13-3145-2020>

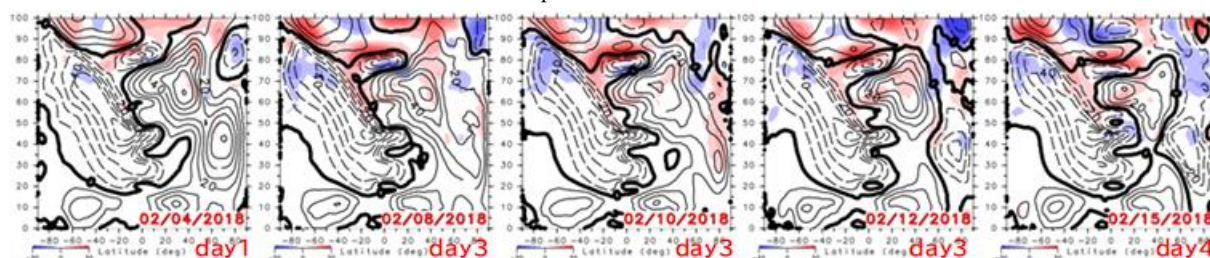


Figure 1: Zonal mean eastward winds (contours) and errors from low-resolution analysis (colors). The solid (dashed) contours represent the westerly (easterly) wind and the thick solid line represents zero wind speed. Vertical axis: Geopotential height (km). Horizontal axis: Latitude. The rightmost is the North Pole. The forecast day after initialization is shown at bottom right.