

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

奥井 晴香*¹, 佐藤 薫*¹, 渡辺 真吾*², 小新 大*¹, 野口 峻佑*³

*¹ 東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻, *² 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, *³ 九州大学 大学院理学研究院 地球惑星科学部門

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の水平スケール（数百 m~4 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 つである。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でありながらも、現状は不十分である。

中層大気では、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勾配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は異なる）。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している。しかし、多くの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、階層構造全体の理解には至っていない。中でも「中間圏」と「南極」は観測できる測器が少なく、中間圏全体を含み重力波を解像する大気大循環モデル（general circulation model, GCM）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]）やハイトップの重力波解像 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]; Okui et al. 2021 [4] 他）によれば、ロスビー波により歪められた成層圏ジェット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報告されている。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 [5]; Geller et al. 2013 [6]）。

本研究の目的は、以下の通りである。まず、「データ同化」の手法も導入しながら高解像 GCM 研究を進展させる。このモデルデータと、課題責任者をリーダーに昭和基地に建設された重力波を検出可能な世界初の南極大型大気

レーダー（PANSY レーダー）（Sato et al. 2014 [7]）による高解像度観測および 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共同観測データ（Sato et al. 2023, submitted [8]）と比較する。これにより、中層大気全体の階層構造とそこに埋め込まれた力学的メカニズムの 3 次元的・定量的理解を目指す。

2. モデルと実験設定

本課題で用いる Japanese Atmospheric General circulation model for Upper Atmosphere Research（JAGUAR）は、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 [9]）。天気予報や対流圏・成層圏をおもな対象とする気候研究で用いられる GCM に比べて高高度なモデル上端（約 150 km）に特徴がある。また、中間圏・下部熱圏で重要となる、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物理過程のパラメタリゼーションを含んでいる。さらに、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、極めて高い鉛直解像度（格子間隔 300 m）を持つ。

本研究で行う高解像度再現実験ではまず、JAMSTEC の DA システムに実装され、地球シミュレータへ移植された JAGUAR-Data Assimilation System（JAGUAR-DAS; 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・航空機等による全球の地上・高層気象観測データと、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風速・気温等の推定値「中解像再解析データ」を作成する（Koshin et al. 2020 [10], 2022 [11]）。次に、高解像度版 JAGUAR（水平解像度約 20 km、鉛直解像度 300 m、トップ 150 km）において、中解像再解析データによって水平波長 2000 km 以上の大規模場のみを拘束する方法（スペクトルナッジング）で 3 日間の初期値作成実験を実施する。その後、4 日間の予報実験を行う。この実験サイクルを初期日を 4 日毎にずらして繰り返すことで、時間的に繋がった高解像度再現実験出力データを作成する。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

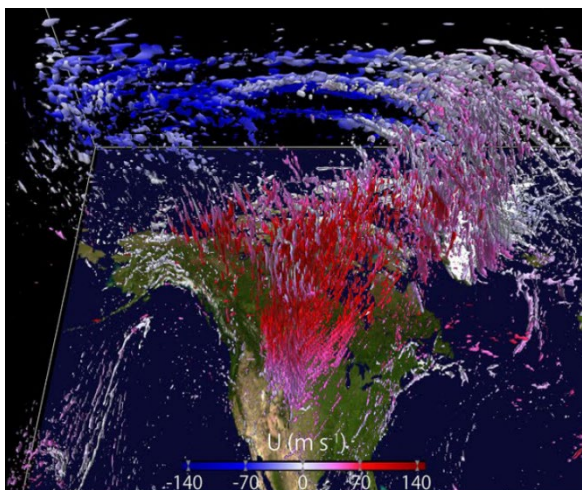


図1 高解像度版 JAGUAR が再現した 2018 年 2 月 11 日の Canadian sub-vortex 付近の重力波 (高さの指数関数で重みづけした水平風発散の等値面で図示)。色は背景場の東西風(Watanabe et al. 2022 [13])。

ゼーションを使用しない。このため、重力波パラメタリゼーションに用いられている理論の妥当性の確認にも用いることができる (Okui et al. 2022 [12])。

なお、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、高解像度の再解析データである ERA5 を併せて用いた。海面水温および海水氷密度に関しては水平解像度 0.25° の OISST 日別値を、温室効果ガス濃度等は観測値に近い年別値を、それぞれ境界条件として与えた。本課題では、以上の方法で高解像度再現実験を実施し、大気の階層構造の力学的理解に取り組んでいる。

3. 高解像度モデル内重力波の可視化および高解像度衛星観測との比較

本年度は、2018 年 2 月に発生した北半球成層圏突然昇温時の地表から高度約 100 km までの重力波について、3 次元可視化手法およびレイトレーシングにより、3 次元的な波の構造と伝播の様子の可視化を行った (Watanabe et al. 2022 [13]; 図1)。また、モデルによる重力波の再現性検証のため、NASA の Aqua 衛星搭載の Atmospheric InfraRed Sounder (AIRS) により観測された重力波との定量的比較を行った (Okui et al. submitted [14])。対象期間は 2019 年 1 月に発生した成層圏突然昇温の前後とした。以下ではこの内容について報告する。

AIRS は衛星から大気を見下ろす方向 (nadir 観測) に放射スペクトルを取得するため、鉛直分解能は比較的低い (7~20 km) 一方で、水平分解能は高い (13.5~41 km)。モデルと観測の比較の際には、モデルデータに AIRS の観測特性に合わせて鉛直方向にローパスフィルタを前もって適用することで、低い鉛直分解能の影響を再現した。次に、衛星軌道に直交する方向の気温データ (長さ約 1780 km) に 4 次関数をフィットし取り除くことで擾乱を取り出し、3 次元 Stockwell 変換を行って重力波の波長や振幅

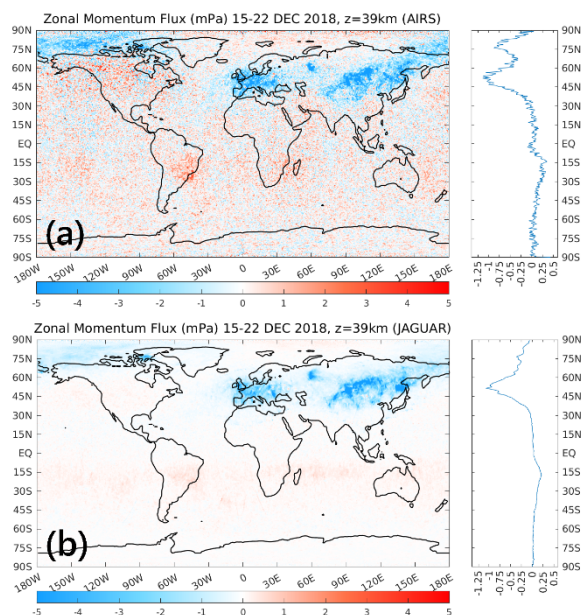


図2 (a)AIRS と (b) 高解像度版 JAGUAR による 2018 年 12 月 15~22 日の高度 39 km での重力波の東西方向運動量フラックス。右のパネルは東西平均値の緯度分布を示す。

を推定した (Hindley et al. 2019 [15])。

2018 年 12 月 15~22 日の期間に対して平均した、高度 39 km における成層圏重力波の東向き運動量の鉛直フラックスを図2に示す。このとき、北半球の中・高緯度では気候値に近い強さの極夜ジェットが存在しており (図示せず)、これに沿って負の運動量フラックスがみられる。特にヨーロッパやウラル山脈上空、ユーラシア大陸東部に極大を持ち、これらのピークの分布と大きさは AIRS の観測値とモデルデータの間で定量的にほぼ一致している。南半球低緯度では正の運動量フラックスがみられ、この分布も観測とモデルの間で整合的である。本結果は高解像度版 JAGUAR の重力波の再現性が概ね高いことを示しており、同モデルを用いた重力波研究の妥当性を支持する。

4. まとめと今後の課題

本年度は、中解像再解析データ JAGUAR-DAS (水平解像度約 300 km、鉛直解像度 1 km、トップ約 150 km) を初期値とする高解像度 JAGUAR (水平解像度約 20 km、鉛直解像度 300 m、トップ 150 km) 再現実験の実施と、再現実験結果を用いた中層大気重力波の 3 次元可視化および衛星観測との比較を行った。来年度にかけて複数年にわたる北半球冬季の中層大気の全球的力学変動のメカニズムやそこでのロスビー波・重力波の役割の解明に取り組む。

謝辞

本研究は日本学術振興会の科学研究費助成事業基盤研究 A「中層大気大循環及び波の階層構造の 3 次元的描像とその季節内変動~年々変動の解明」(JP22H00169) 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、作図には VAPOR software (version 2.6.0) および Matlab (R2022b) を用いた。

文献

- [1] Sato, K. and M. Yoshiki, “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, (2008).
- [2] Watanabe, S., Y. Kawatani, Y. Tomikawa, K. Miyazaki, M. Takahashi, and K. Sato, “General aspects of a T213L256 middle atmosphere general circulation model,” *J. Geophys. Res.*, **113**, D12110, (2008).
- [3] Sato, K. and M. Nomoto, “Gravity wave-induced anomalous potential vorticity gradient generating planetary waves in the winter mesosphere,” *J. Atmos. Sci.*, **72**, 3609-3624, (2015).
- [4] Okui, H., K. Sato, D. Koshin, and S. Watanabe, “Formation of a mesospheric inversion layer and the subsequent elevated stratopause associated with the major stratospheric sudden warming in 2018/19,” *J. Geophys. Res. Atmos.*, **126**, e2021JD034681, (2021).
- [5] Sato, K., S. Watanabe, Y. Kawatani, Y. Tomikawa, K. Miyazaki, and M. Takahashi, “On the origins of mesospheric gravity waves,” *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L19801, (2009).
- [6] 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, “A comparison between gravity wave momentum fluxes in observations and climate models,” *J. Climate*, **26**, 6383-6405, (2013).
- [7] Sato, K., M. Tsutsumi, T. Sato, T. Nakamura, A. Saito, Y. Tomikawa, K. Nishimura, M. Kohma, H. Yamagishi, and T. Yamanouchi, “Program of the Antarctic Syowa MST/IS radar (PANSY),” *J. Atmos. Sorr. Terr. Phys.*, **118**, 1364-6826, (2014).
- [8] Sato, K., Y. Tomikawa, M. Kohma, R. Yasui, D. Koshin, H. Okui, S. Watanabe, K. Miyazaki, M. Tsutsumi, D. Murphy, C. Meek, Y. Tian, M. Ern, G. Baumgarten, J. L. Chau, X. Chu, R. L. Collins, P. J. Espy, H. Hashiguchi, A. J. Kavanagh, R. Latteck, F. J. Lübken, M. Milla, S. Nozawa, Y. Ogawa, K. Shiokawa, M. J. Alexander, T. Nakamura, and W. E. Ward, “Interhemispheric Coupling Study by Observations and Modelling (ICSOM),” *J. Geophys. Res. Atmos.*, in press, (2023).
- [9] Watanabe, S., and S. Miyahara, “Quantification of the gravity wave forcing of the migrating diurnal tide in a gravity wave-resolving general circulation model,” *J. Geophys. Res.*, **114**, D07110, (2009).
- [10] Koshin, D., K. Sato, K. Miyazaki, and S. Watanabe, “An ensemble Kalman filter data assimilation system for the whole neutral atmosphere,” *Geosci. Model Dev.*, **13**, 3145-3177, (2020).
- [11] Koshin, D., K. Sato, M. Kohma, and S. Watanabe, “An update on the 4D-LETKF data assimilation system for the whole neutral atmosphere,” *Geosci. Model Dev.*, **5**, 2293-2307, (2022).
- [12] Okui, H., K. Sato, and S. Watanabe, “Contribution of gravity waves to universal vertical wavenumber ($\sim m^{-3}$) spectra revealed by a gravity-wave-permitting general circulation model,” *J. Geophys. Res. Atmos.*, **127**, e2021JD036222, (2022).
- [13] Watanabe, S., D. Koshin, S. Noguchi, and K. Sato, “Gravity wave morphology during the 2018 sudden stratospheric warming simulated by a whole neutral atmosphere general circulation model,” *J. Geophys. Res. Atmos.*, **127**, e2022JD036718, (2022).
- [14] Okui, H., C. J. Wright, N. P. Hindley, E. J. Lear, and K. Sato, “A Comparison of Stratospheric Gravity Waves in a High-Resolution General Circulation Model with 3-D Satellite Observations,” submitted to *J. Geophys. Res. Atmos.*, (May 2023).
- [15] Hindley, N. P., C. J. Wright, N. D. Smith, L. Hoffmann, L. A. Holt, M. J. Alexander, T. Moffat-Griffin, and N. J. Mitchell, “Gravity waves in the winter stratosphere over the Southern Ocean: high-resolution satellite observations and 3-D spectral analysis,” *Atmos. Chem. Phys.*, **19**, 15377-15414, (2019).

A study of Hierarchical Structure in 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

Haruka Okui*¹, Kaoru Sato*¹, Shingo Watanabe*², Dai Koshin*¹, Shunsuke Noguchi*³

*¹ Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo, *² Research Center for Environmental Modeling and Application, Research Institute for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology *³ Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Sciences, Kyushu University

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

1. Introduction

A focus of this study is general circulation of the middle atmosphere, consisting of the stratosphere, mesosphere, and lower thermosphere, and hierarchical structure embedded in it, which spans over a wide horizontal spectral range (tens of meters to tens of thousands of kilometers). Dynamics of the general circulation of the middle atmosphere is one of the key factors causing intraseasonal and interannual variabilities of the climate system, including that near the surface of the Earth. Thus, better understanding of this dynamics is essential for long-range prediction of weather and climate, although it is not yet fully reached.

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 continuous observation data with high-accuracy and high-resolution from the Japan-led international joint observation, which includes those from the PANSY radar (Sato et al. 2014 [1]), the largest atmospheric radar in the Antarctic, and simulations using a high-resolution whole neutral atmosphere model.

2. Model and Experiments

The Japanese Atmospheric General circulation model for Upper Atmosphere Research (JAGUAR) 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 [2]). In contrast to GCMs used for weather and climate studies, its model top is set at a very high altitude, which is about 150 km. Physical processes that are important in the mesosphere and lower thermosphere are parameterized, including infrared radiation processes in non-local thermodynamic equilibrium, molecular conductivity, molecular diffusion, chemical heating, and ion drag. Another important aspect of the model is quite high

vertical resolution so as to represent the vertical propagation of gravity waves accurately.

In this study, we used the JAGUAR-Data Assimilation System (JAGUAR-DAS) that was originally developed (Koshin et al. 2020 [3], 2022 [4]) and implemented in the DA system of JAMSTEC, which has been ported to the Earth Simulator, to generate medium-resolution atmospheric reanalysis data including three-dimensional winds, temperature, geopotential, etc., on the model grid with a horizontal resolution of ~300 km and a vertical resolution of 1 km. JAGUAR-DAS assimilates conventional observation data from ground-based instruments, balloons, and aircrafts, as well as satellite observation data in the stratosphere, mesosphere, and lower thermosphere. We use this reanalysis data for initial values for the high-resolution version of JAGUAR with a horizontal resolution of ~20 km and a vertical resolution of 300 m. In the initialization process, only large horizontal-scale (>2000 km) structure in the reanalysis data was used for spectral nudging in order to mitigate the impact of initialization on small-scale gravity waves. No gravity wave parameterization schemes are used in this model because most gravity waves including those propagating from the troposphere to the middle atmosphere are explicitly resolved in this model. For initialization of the troposphere, where the effects of fine-scale topography on the atmosphere may be more important, a high-resolution reanalysis dataset ERA5 was also used. Regarding the boundary conditions, daily OISST data with a horizontal resolution of 0.25° was used for the sea surface temperature and sea ice concentration. Other conditions such as greenhouse gases are given by annual observation data. Employing the methodology described above, we performed hindcast simulations over the boreal winters, namely December–January–February, from 2015/16 to 2020/21. These simulations contain the periods of the international joint observation and modeling campaign called Interhemispheric Coupling Study by Observations and Modeling (ICSOM) (Sato et al. 2023 [5]).

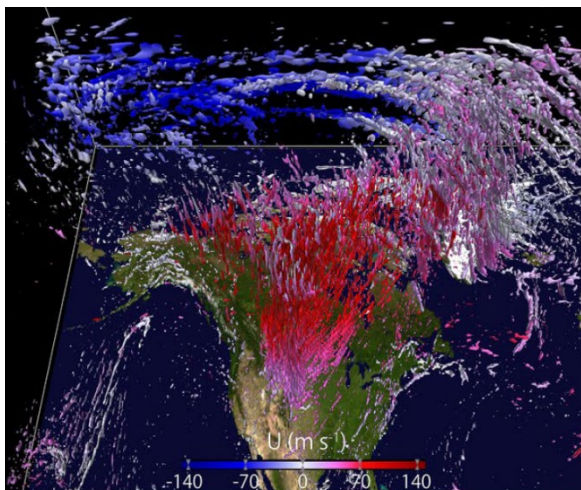


Figure 1 Gravity waves around the Canadian sub-vortex at 00:00UT on 11 February 2018. Isosurfaces which enclose large horizontal wind divergence weighted by an exponential of height are shown with colors depending on the background zonal winds (Watanabe et al. 2022 [8]).

Using outputs from the hindcast simulations with the high-resolution JAGUAR, we have particularly examined the behaviors and dynamical roles of gravity waves in the middle atmosphere (Okui et al. 2021 [6], 2022 [7]). This year, we visualized three-dimensional phase structure and ray paths of gravity waves simulated in the high-resolution JAGUAR from the surface to an altitude of ~ 100 km, shown in Figure 1 (Watanabe et al. 2022 [8]). We also conducted a comparison study on gravity waves in the JAGUAR with satellite observations to validate the model simulation (Okui et al. submitted [9]). The results are described below.

3. Comparison with Satellite Observations

To examine the reproducibility of gravity waves in the high-resolution JAGUAR, we compared the characteristics of model-simulated gravity waves with satellite observations. We used the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS), which is a nadir-sounding multi-spectral imager on board NASA's Aqua satellite. The temperature retrieval for AIRS has a quite high horizontal resolution of 13.5–41 km but a relatively low vertical resolution of 7–20 km in the stratosphere and lower mesosphere. Before the comparison with AIRS observations, a vertical low-pass filter, which is analogous to the AIRS observational filter, was applied to the model data. To separate gravity wave fluctuations from the background fields, temperature data was detrended using a fourth-order cross-track polynomial filter. The three-dimensional Stockwell transform was applied to these detrended perturbations to estimate amplitudes and wavelengths of dominant gravity waves. The comparison was conducted for 15–20 December 2018, when the winter polar vortex was as strong as its climatology, at an altitude of 39 km, which lies in the center of the usable height range of AIRS temperature retrieval.

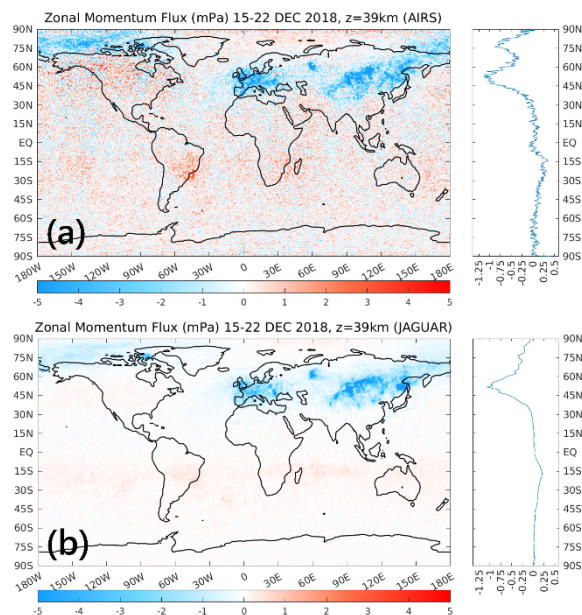


Figure 2 Vertical flux of zonal momentum associated with gravity waves at an altitude of 39 km during 15–22 December 2018 from (a) AIRS and (b) JAGUAR. The right panels show the latitudinal profile of the zonal mean values.

Horizontal maps of the vertical flux of zonal momentum associated with dominant waves for AIRS and JAGUAR are shown in Figs. 2a and 2b, respectively. The results from AIRS and JAGUAR basically accord well. In particular, strong negative momentum flux observed over Europe and Central and Eastern Eurasia are quantitatively consistent. Closer inspection shows that there is weakly positive momentum flux in the low-latitude region of the Southern Hemisphere, which is also observed in both results. This remarkably good agreement with AIRS observations supports the reliability of the high-resolution JAGUAR regarding behaviors of gravity waves in the middle atmosphere.

4. Concluding Remarks

We performed hindcast simulations for the boreal winters from 2014/15 to 2020/21 utilizing a gravity-wave-permitting high-top GCM, JAGUAR. Using the output data, three-dimensional morphology of gravity waves was clearly visualized. A comparison of gravity waves in the model with high-horizontal resolution satellite observations was also made. It was shown that JAGUAR provides a realistic picture regarding the behaviors of gravity waves in the middle atmosphere. Next year, climatological and quantitative studies on the roles of gravity waves and their interplay with larger-scale waves in the middle atmosphere will be conducted, which is a unique outcome from long-term high-resolution hindcasts.

Acknowledgement

This study was supported by JSPS KAKENHI Grant Number JP22H00169. The Earth Simulator and the DA system of JAMSTEC were used for the computations, and version 2.6.0 of the VAPOR software and R2022b version of the Matlab were used for the figures.

References

- [1] Sato, K., M. Tsutsumi, T. Sato, T. Nakamura, A. Saito, Y. Tomikawa, K. Nishimura, M. Kohma, H. Yamagishi, and T. Yamanouchi, "Program of the Antarctic Syowa MST/IS radar (PANSY)," *J. Atmos. Surr. Terr. Phys.*, **118**, 1364-6826, (2014).
- [2] Watanabe, S., & S. Miyahara, "Quantification of the gravity wave forcing of the migrating diurnal tide in a gravity wave-resolving general circulation model," *J. Geophys. Res.*, **114**, D07110, (2009).
- [3] Koshin, D., K. Sato, K. Miyazaki, & S. Watanabe, "An ensemble Kalman filter data assimilation system for the whole neutral atmosphere," *Geosci. Model Dev.*, **13**, 3145-3177, (2020).
- [4] Koshin, D., K. Sato, M. Kohma, & S. Watanabe, "An update on the 4D-LETKF data assimilation system for the whole neutral atmosphere," *Geosci. Model Dev.*, **5**, 2293-2307, (2021).
- [5] Sato, K., Y. Tomikawa, M. Kohma, R. Yasui, D. Koshin, H. Okui, S. Watanabe, K. Miyazaki, M. Tsutsumi, D. Murphy, C. Meek, Y. Tian, M. Ern, G. Baumgarten, J. L. Chau, X. Chu, R. L. Collins, P. J. Espy, H. Hashiguchi, A. J. Kavanagh, R. Latteck, F. J. Lübken, M. Milla, S. Nozawa, Y. Ogawa, K. Shiokawa, M. J. Alexander, T. Nakamura, and W. E. Ward, "Interhemispheric Coupling Study by Observations and Modelling (ICSOM)," *J. Geophys. Res. Atmos.*, in press, (2023).
- [6] Okui, H., K. Sato, D. Koshin, and S. Watanabe, "Formation of a mesospheric inversion layer and the subsequent elevated stratopause associated with the major stratospheric sudden warming in 2018/19," *J. Geophys. Res. Atmos.*, **126**, e2021JD034681, (2021).
- [7] Okui, H., K. Sato, and S. Watanabe, "Contribution of gravity waves to universal vertical wavenumber ($\sim m^{-3}$) spectra revealed by a gravity-wave-permitting general circulation model," *J. Geophys. Res. Atmos.*, **127**, e2021JD036222, (2022).
- [8] Watanabe, S., D. Koshin, S. Noguchi, and K. Sato, "Gravity wave morphology during the 2018 sudden stratospheric warming simulated by a whole neutral atmosphere general circulation model," *J. Geophys. Res. Atmos.*, **127**, e2022JD036718, (2022).
- [9] Okui, H., C. J. Wright, N. P. Hindley, E. J. Lear, and K. Sato, "A Comparison of Stratospheric Gravity Waves in a High-Resolution General Circulation Model with 3-D Satellite Observations," submitted to *J. Geophys. Res. Atmos.*, (May 2023).