

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

^{*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

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精度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により、国際共同観測期間である 2019 年 1 月に生じた成層圏突然昇温イベントの高解像度再現実験を行い、出力データを定量的かつ 3 次元的に解析した。その結果、成層圏突然昇温時の中層大気の力学変動におけるロスビー波と重力波の共働の重要性が示された。

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術スケール（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、ロスビー波によりゆがんだ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共同観測を展開し、高解像 GCM 研究を発展させ、これを「データ同化」の手法も導入しながら融合して、中層大気大循環の階層構造を 3 次元的に丸ごと捉え、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 150 km）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-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、モデル格子上における風速・気温等の推定値「中解像解析値」を得る (Koshin et al. 2020 [7], 2021 [8])。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。

高解像度版 JAGUAR における実験では、中解像解析値によって大規模場 (水平波長 2000 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設定 (スペクトル・ナッジング手法) で 3 日間の初期値作成実験を実施した。この方法によって、様々な時空間スケールの大気現象について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を生じにくい初期値を得ることができる。

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 を合わせて用いた。海面水温および海水密度に関しては、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 2019 年 1 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、2018 年 12 月 5 日～2019 年 1 月 14 日の 4 日おきの解析値をそれぞれ初期値とした 11 回の 4 日間再現実験を行った。昨年度までの成果で、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されている。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または極渦強化イベントや、2019 年に発生した南極における成層圏突然昇温イベントについても行ったが、その結果は来年度以降に報告する予定である。

3. 成層圏突然昇温に対する中層大気の応答とそのメカニズム

ここでは、上記の 2018 年 12 月～2019 年 1 月の再現実験出力値の解析結果をまとめた Okui et al. (submitted) [9] の内容について説明する。

成層圏突然昇温は、冬季極域成層圏の気温が数日で数十 K も上昇する現象である。成層圏突然昇温は強いロス

ビー波が伝播・砕波することで起こると考えられている。図 1 に本事例での極域気温の時間高度断面図を示す。本事例では、成層圏突然昇温に伴い温度極大である冬極域の成層圏界面は高度約 55 km から下降し、2019 年 1 月 1 日の大昇温発生後に消失した。消失以前の 2018 年 12 月 28 日頃、極域上部中間圏 (高度約 85 km) にもう 1 つの温度極大が現れていた。この構造は気温が上層ほど高い中間圏逆転層 (mesospheric inversion layer, MIL) を伴うものである。また、成層圏界面は、消失から 9 日後の 2019 年 1 月 10 日頃、高高度 (約 80 km) に再形成された。これは高高度成層圏界面 (elevated stratopause, ES) とよばれる。そこで、MIL および ES の形成機構について詳しく調べた。その結果の概要を図 2、図 3 に示す。

ロスビー波と重力波の両方に適用可能な波活動度フラックス (Kinoshita and Sato 2013 [10]; Sato et al. 2013 [11]) を用いた波束伝播、および変形オイラー平均方程式系を用いた帯状平均東西風に対する波動強制力の解析から、MIL 形成時には冬半球高緯度の上部中間圏・下部熱圏でロスビー波が負 (西向き) の強制を与えていたことがわかった。負の強制は高緯度側下方で下降流を駆動し、気温を上昇させる。よって、このロスビー波強制が MIL を形成したとみられる。ES 形成時には、高緯度上部中間圏・下部熱圏でロスビー波と重力波の両方が負の強制を与えていた。これら両者が ES 形成に寄与したとみられる。しかし、MIL および ES の形成時期には極域成層圏で東風が卓越しており、対流圏起源のロスビー波はこの領域に到達できない状況にあった。そこで、MIL および ES の形成過程に寄与したロスビー波の起源を調べた。

まず、MIL 形成の数日前には、中緯度の上部成層圏・中間圏に渦位の極大が現れていた。これは重力波強制に駆動された残差平均鉛直風の収束によって静的安定度が上昇することで生じたものと考えられる (図 2a, b)。渦位極大の高緯度側は渦位の南北勾配が負であり、力学場が順圧/傾圧不安定の必要条件を満たしている。すなわち、この力学的不安定は重力波強制によって生じたことを意味する。渦位極大の極側では、これに続き正のロスビー波強制が生じていた (図 2c)。これは、力学的不安定によるロスビー波の中層大気中での励起を示唆している。したがって、この中層大気中で力学的不安定により励起され

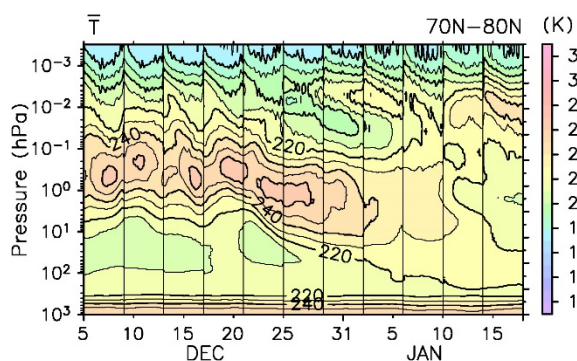


図 1: 高解像度版 JAGUAR の再現実験結果による、北緯 70～80° 平均・帯状平均気温の時間-高度断面図。縦線は各フーリエの境界を表す (Okui et al. submitted より抜粋)。

たロスビー波がさらに上方伝播し、上部中間圏・下部熱圏に負の強制を与えたと考えられる。

一方、ES 形成の数日前、極域成層圏の一部経度領域で対流圏からロスビー波が上方伝播しており、極域中層大気の広い高度範囲でロスビー波の碎波を示すジオポテンシャルハイトの 3 次元構造が見られた。帯状平均したロスビー波強制は大きく負であった (図 3a)。そして、渦位極大が北緯 60° の高度 60~80 km に現れた。その後、渦位極大の高緯度側には正のロスビー波強制が現れた (図 3b)。これらの事実は、対流圏起源ロスビー波の碎波により順圧/傾圧不安定な場が生じ、これを解消するようにロスビー波が 2 次的に発生したことを示す。この 2 次ロスビー波が、重力波とともに ES 形成に寄与したと考えられる。

次に、MIL および ES の 3 次元構造を調べた。両者とも、北極から中心がずれて東西波数 1 の構造を持った極渦の内側の地点でのみ明瞭に現れていた。波の伝播や波強制にも東西非対称性がみられた。MIL はロスビー波の上方伝播 (図 2d)、ES は負の重力波強制と類似の経度および高度構造を持っていた (図 3c)。したがって、これらの波がそれぞれの 3 次元構造を決定したと考えられる。

MIL は ES の構造に影響している可能性がある。上述のように、ES 形成には重力波とロスビー波両方の波強制が寄与しており、これらの波強制の発生する高度が ES の高

度を決めると考えられる。西向き運動量を持った重力波やロスビー波は西風中を伝播しやすい。突然昇温後には、極夜域の放射冷却により、温度風平衡を維持しつつ、徐々に極域の西風が回復する。この過程において、MIL の温度構造は西風の高さ構造に影響し、波の伝播と ES の構造に影響しうる。

来年度にかけて行う追加の事例解析により、上述の成層圏突然昇温に対する力学応答メカニズムの一般性・事例依存性を調べる予定である。また、長期の中解像解析値を活用した気候値からの偏差の調査によって、季節進行とは区別した全球的な力学変動の解明が期待される。ここで述べた発見や展望は、本課題で作成した中解像解析値および高解像度再現実験を用いて初めて可能となるものである。

5. まとめと今後の課題

国際共同観測期間である 2019 年 1 月に生じた成層圏突然昇温イベントについて、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) による高解像度再現実験を実施した。初期値作成には、データ同化システム JAGUAR-DAS (水平解像度約 300 km、鉛直解像度 1 km、トップ約 150 km) によって作成した中解像解析値を用いた。高解像度再現実験の結果に関して、大気波動の共働に注目して定量的・3 次元的な解析を行った。

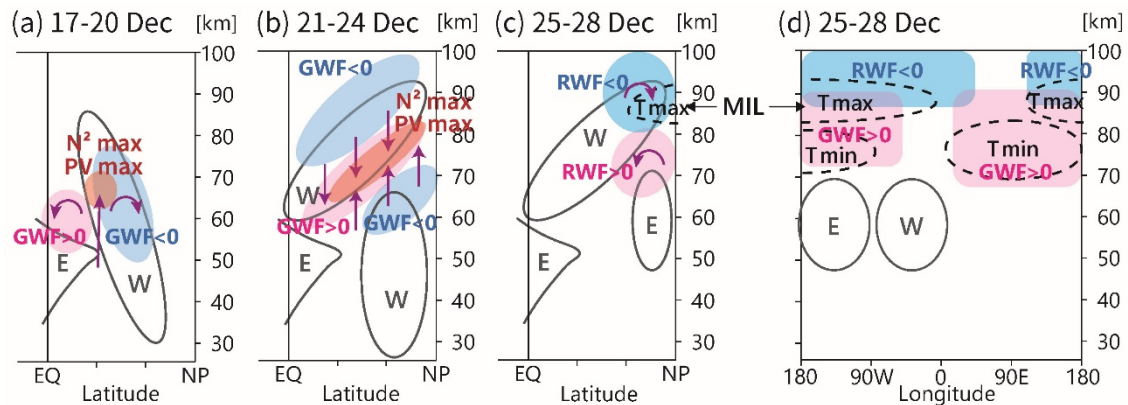


図 2: MIL の形成機構の (a-c) 緯度-高度断面と (d) 経度-高度断面における概略図。GWF、RWF はそれぞれ重力波とロスビー波の波強制。 N^2 は静的安定度。PV は渦位。 T は気温。W と E はそれぞれ西風と東風。紫の矢印は残差平均子午面循環を表す (Okui et al. submitted より引用し一部改変)。

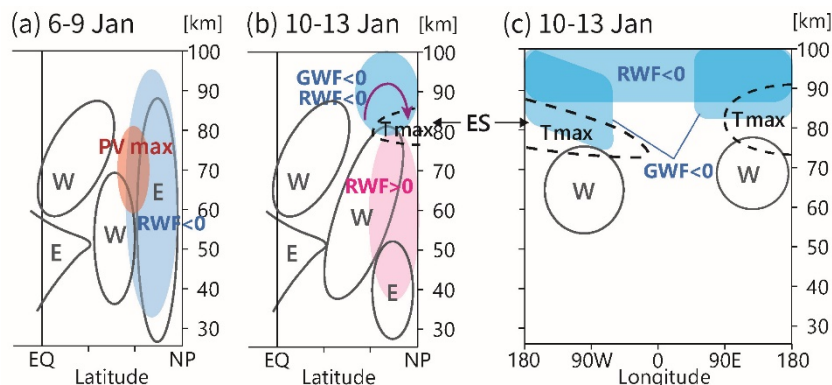


図 3: ES の形成機構の (a, b) 緯度-高度断面と (c) 経度-高度断面における概略図。記号の意味は図 1 と同様 (Okui et al. submitted より引用し一部改変)。

本事例では、突然昇温に伴い極域成層圏界面が下降・消失し、高高度で再形成される高高度成層圏界面 (elevated stratopause, ES) 現象が発生した。また、成層圏界面消失以前に高高度 (約 85 km) に中間圏逆転層 (mesospheric inversion layer, MIL) を伴う温度極大が生じていた。MIL の発生にはロスビー波、ES の発生にはロスビー波と重力波の両方の上部中間圏・下部熱圏における負の波強制が寄与していた。このとき、成層圏の東風の卓越のために下層大気からのロスビー波は上記領域に到達できない状態にあった。ロスビー波の起源を詳しく調べた結果、MIL 形成に寄与した波は重力波に起因する順圧/傾圧不安定、ES 形成に寄与した波はロスビー波に起因する順圧/傾圧不安定によって励起されたものと考えられる。これは中層大気におけるロスビー波と重力波の共働 (Sato and Nomoto 2015 [12]) の現実大気の現象における重要性を示す結果である。

来年度にかけて、本年度で得た結果をさらなる事例解析や長期中解像解析値を用いて検証するとともに、全球的な力学変動のメカニズム解明に取り組む。また、高解像度版 JAGUAR の重力波振幅を衛星観測結果と照合し、これをモデル改善に結び付ける。

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, "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>, 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, <https://doi.org/10.1029/2008JD010026>, 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, <https://doi.org/10.1175/JAS-D-15-0046.1>, 2015.

[4] 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, <https://doi.org/10.1029/2009GL039908>, 2009.

[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, "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>, 2013.

[6] 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, <https://doi.org/10.1029/2008JD011218>, 2009.

[7] 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, <https://doi.org/10.5194/gmd-13-3145-2020>, 2020.

[8] 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. Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/gmd-2020-381>, in review, 2021.

[9] 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," submitted to *J. Geophys. Res. Atmos.*

[10] Kinoshita, T., and K. Sato, "A formulation of unified three-dimensional wave activity flux of inertia-gravity waves and Rossby waves," *J. Atmos. Sci.*, 70, 1603–1615, <https://doi.org/10.1175/JAS-D-12-0138.1>, 2013.

[11] Sato, K., T. Kinoshita, and K. Okamoto, "A New Method to Estimate Three-Dimensional Residual-Mean Circulation in the Middle Atmosphere and Its Application to Gravity Wave-Resolving General Circulation Model Data," *J. Atmos. Sci.*, 70(12), 3756–3779, <https://doi.org/10.1175/JAS-D-12-0352.1>, 2013.

[12] 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, <https://doi.org/10.1175/JAS-D-15-0046.1>, 2015.

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

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

^{*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

This project aims to physically elucidate the hierarchical structure 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 an Antarctic Atmospheric Radar (PANSY), and numerical simulations using the high-resolution whole neutral atmosphere model, Japanese Atmospheric General circulation model for Upper Atmosphere Research, developed at JAMSTEC. In this year, we conducted high-resolution hindcast simulations of a stratospheric sudden warming event in January 2019 using the analysis data generated by a data assimilation system based on the medium-resolution version of the model as initial values. Quantitative and three-dimensional analysis of the model outputs revealed the crucial roles of the interplay of large- and small-scale waves in dynamical processes in the middle atmosphere.

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

1. Introduction

The 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. Thus, better understanding of the mechanisms is essential for long-range prediction of weather and climate systems, although it is not yet fully performed.

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 an Antarctic Atmospheric Radar (PANSY), 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 [1]). In contrast to GCMs used for weather and climate studies, the model top is set at a very high altitude (about 150 km). 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, and ion drag. Another important aspect of the model is that the vertical resolution is quite high to represent the vertical propagation of gravity waves as accurately as possible.

In this study, first, we use the JAGUAR-Data Assimilation System (JAGUAR-DAS) implemented in the DA system of JAMSTEC to generate medium-resolution atmospheric analysis data including three-dimensional winds, temperature, geopotential, etc., on the model grid with a horizontal resolution of about 300 km and a vertical resolution of 1 km. JAGUAR-DAS assimilates the conventional observation data from ground-based instruments, balloons, and aircraft, as well as the satellite observation data in the stratosphere, mesosphere, and lower thermosphere (Koshin et al. 2020 [2], 2021 [3]). We then use the analysis data for initial values for the high-resolution version of the model (i.e., 20 km and 300 km for horizontal and vertical resolutions, respectively). The high-resolution JAGUAR does not use gravity wave parameterization because most gravity waves generated in the troposphere and propagating upward to

the mesosphere and lower thermosphere are explicitly resolved in this model. This is another advantage of the present study.

We performed high-resolution hindcast simulations of the sudden stratospheric warming in January 2019, an international joint observation period. This event transitioned from a polar vortex displacement type to a split type. Specifically, reconstructions were conducted using initial values every four days from 4 December 2018 to 14 January 2019. The results of analysis of the outputs (Okui et al. submitted) are described below.

3. Middle Atmospheric Variations and Roles of Waves

After the onset of the major warming, the winter polar stratopause disappeared and reformed at a higher altitude, forming an elevated stratopause (ES). Prior to the disappearance of the stratopause, a marked temperature maximum appeared in the polar upper mesosphere. Such temperature structure is referred to as the mesospheric inversion layer (MIL). We examined the formation mechanisms of the ES and MIL (Fig. 1).

Based on the analysis using the transformed Eulerian mean equations and a three-dimensional theory of wave activity flux, it was shown that the MIL was caused by negative Rossby wave forcing in the upper mesosphere, which induces a downward flow in the polar region. The ES was caused by both Rossby wave and gravity wave forcing. However, Rossby waves originating from the troposphere cannot reach the forcing regions because the background wind is westward below, and hence hardly contribute to the MIL and ES formation.

Thus, we further examined the source of the Rossby waves. Before the MIL formation, convergence of gravity wave-driven circulation caused increase in static stability resulting in a potential vorticity peak in the midlatitudes (Fig. 1a and 1b). On

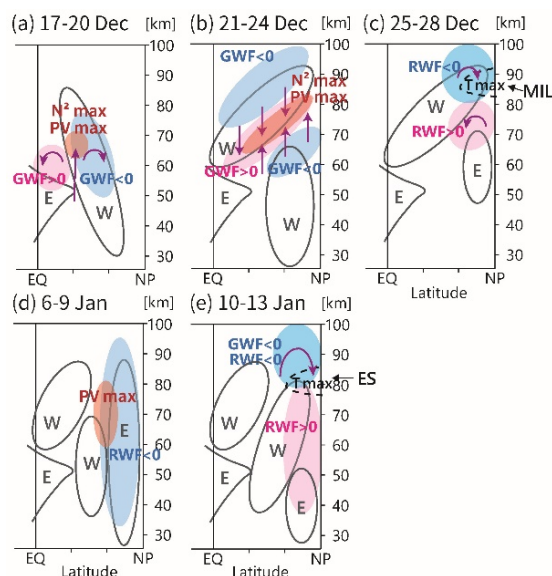


Figure 1 Schematics of the MIL and ES formation. RWF and GWF are Rossby wave and gravity wave forcing, respectively; PV is potential vorticity; N^2 is static stability; T is temperature; W (E) is westerly (easterly) wind. Purple arrows represent residual mean circulation (adapted from Okui et al. submitted).

the polar side of this peak, the necessary condition for barotropic and/or baroclinic instability, i.e., negative gradient of zonal mean potential vorticity, was fulfilled. In fact, positive Rossby wave forcing was observed afterwards in this unstable region (Fig. 1c). This fact suggests that the Rossby waves responsible for the MIL formation were excited by this instability. In contrast, before the ES formation, Rossby wave breaking induced unstable condition of the mean flow (Fig. 1d). It seems that this instability generated secondary Rossby waves which contributed to the ES (Fig. 1e).

4. Concluding Remarks

In this year, we conducted hindcast simulations of the stratospheric sudden warming in 2019 using the high-resolution version of JAGUAR initialized by the atmospheric analysis data with medium resolution produced by the JAGUAR-DAS. Three-dimensional time evolution of the event was analyzed using the high-resolution model outputs. The results showed the importance of the interplay between Rossby waves and gravity waves including wave generation in the middle atmosphere.

Additional high-resolution case studies and statistical analysis based on the long-period analysis data generated by the JAGUAR-DAS over the next year are planned for in-depth understanding of the middle atmosphere dynamics. Quantitative analysis including gravity wave forcing and these resulting discoveries can only be made by such high-resolution hindcast simulations performed in this study.

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, "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>, 2009.
- [2] 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, <https://doi.org/10.5194/gmd-13-3145-2020>, 2020.
- [3] 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. Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/gmd-2020-381>, in review, 2021.
- [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," submitted to *J. Geophys. Res. Atmos.*