

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*^{1,2}, 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 システムにて作成した中解像度再解析データ JAGUAR-DAS（水平解像度約 300 km、鉛直解像度 1 km、トップ約 150 km）を用いた高解像度版 JAGUAR（水平解像度 20 km、鉛直解像度 300 m、トップ 150 km）の初期値作成手法について、フリーラン中の大気重力波振幅のドリフトを抑える改良を行った。この手法を用いて、国際共同観測期間である 2015/16～2019/20 年の 12～1 月について高解像度再現実験を実施した。また、2018 年 12 月の再現実験出力データを用いて重力波のスペクトル解析を行い、レーダー等で観測される普遍鉛直波数スペクトルに対する重力波の寄与と、重力波の特徴の全球分布を示した。

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～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]、Okui et al. 2021 [4]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 [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。このモデルデータを、課題責任者をリーダーに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と比較する。これによって、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を目指す。

2. モデルと実験設定

本稿で JAGUAR と略称する 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 [7]）。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極めて高い鉛直解像度を持つことも大きな特徴の一つである。

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、モデル格子上的風速・気温等の推定値「中解像度再解析データ」を得る (Koshin et al. 2020 [8], 2022 [9])。次に、こ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、中解像度再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、中解像度再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 を併せて用いた。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。

本課題では、以上のような初期値作成手法および境界条件のもと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。本年度は、2018年12月の高解像度再現実験の出力データを用いて、重力波のスペクトル解析を行った。具体的には、2019年1月1日に発生した成層圏突然昇温[4]の影響の小さい2018年12月5~20日の期間における、4日おきの解析値をそれぞれ初期値とした4日間の再現実験4回を解析対象とした。

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東西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。しかし、本年度改めて詳細な調査を行ったところ、中間圏・下部熱圏における重力波の振幅が再現実験期間開始時に小さく、1~3日目にかけ増大することがわかった (図 1a)。そこで、初期化実験において用いる JAGUAR-DAS のデータを水平全波数 15 以下に絞ることで、このドリフトを抑える改良を行った

(図 1b)。これにより、各ラン同士の間圏・下部熱圏における重力波及び平均場の不連続性を軽減できる。この手法を用いて、国際共同観測期間である 2015/16~2019/20 年の 12~1 月の再現実験を新たに行った。これらの結果は、今後実施予定の 2012/13~2021/22 年北半球冬季の再現実験結果と併せて、成層圏突然昇温または極渦強化イベントと全球的な力学応答過程についての解析に用いる予定であり、その成果は来年度以降に報告する。

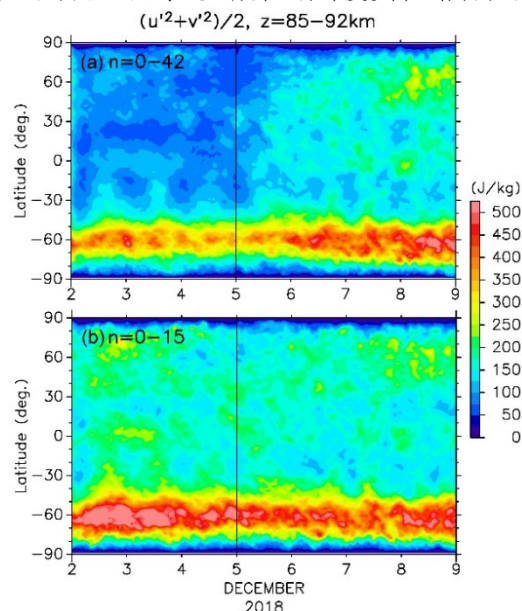


図 1 2018年12月5~9日(ナッジング期間12月2~4日)の高解像度再現実験における、高度 $z=85\sim 92$ kmでの (a) JAGUAR-DAS のすべての波数帯 (水平全波数 $n=0\sim 42$) をナッジングに用いた場合と (b) $n=0\sim 15$ 成分のみ用いた場合の重力波の水平風振幅の2乗の時間-緯度断面図。

3. 普遍鉛直波数スペクトルに対する重力波の寄与の検証

ここでは、上記の2018年12月5~20日の再現実験結果を用いた重力波スペクトルの解析結果をまとめた Okui et al. (in press) [10] の内容について説明する。

重力波は、時空間スケールの小さい大気波動であり、中層大気の力学的・熱的構造の決定において非常に重要な役割を担っている。1980年代以降、大型大気レーダーやライダー、ラジオゾンデを用いた観測により、気温・水平風揺らぎの鉛直波数 (m) スペクトルが m^{-3} に比例する普遍的な特徴を持つことが指摘されてきた。これに対し、Smith et al. (1987) [11] や Sato and Yamada (1994) [12] では、砕波する寸前の振幅を保持して伝播する重力波 (飽和重力波) がスペクトルを構成するという仮定のもと、普遍スペクトルの理論的説明が与えられた。しかし、観測されるスペクトルを構成する気温・水平風揺らぎが全て重力波であるかは確かめられていない。そこで、高解像度再現実験の結果を用いて、前述の仮定の妥当性を調べた。

モデル出力データでは、水平波数によって擾乱を定義し取り出すことができる。ここでは、重力波を水平全波数 21 以上の波と定義した。また、レーダーやラジオゾンデ

観測でスペクトルを推定する際の擾乱の取り出し方法を模倣し、1地点の鉛直プロファイルから線形成分を取り除いた成分を全擾乱成分と定義した。このうえで、重力波と全擾乱成分のスペクトルの比較を行った。図2a~cとd~fは、大型気レーダーMUレーダーの設置されている滋賀県信楽(35°N, 136°E)における、それぞれ下部成層圏の高度 $z=8\sim 14$ kmと中間圏の $z=68\sim 88$ kmの重力波と全擾乱成分の東西風・南北風・気温スペクトルである。全擾乱成分のスペクトルは飽和重力波の理論スペクトル(点線)とスペクトル密度の大きさも含め概ね一致し、 m^{-3} に近い傾きを持つ。これは、観測されるスペクトルと整合的である。重力波スペクトルは成層圏では約 $4 \times 10^{-4} m^{-1}$ 、上部中間圏では約 $2 \times 10^{-4} m^{-1}$ で折れ曲がり、これより低波数では全擾乱成分のスペクトルと一致していない。これは、全擾乱成分のスペクトルが m^{-3} に近い傾きを持つ波数帯であっても、低波数においては重力波以外の擾乱成分もスペクトルに顕著に寄与していることを示す。図2gは東西平均・緯度幅 $\pm 5^\circ$ 平均を取った成層圏の $z=18\sim 25$ kmでの南北風スペクトルである。ここでも、特に低緯度において、低波数帯での両スペクトルにはずれがみられる。低緯度において普遍スペクトルに寄与する重力波以外の擾乱成分の候補としては、赤道に捕捉される波などが考えられる。

さらに、中層大気重力波の特徴の全球分布を記述するため、重力波スペクトルの特性波数 m_{g*} 、傾きの逆符号 t 、 $m = m_{g*}$ でのスペクトル密度の指標 F_0 を、スペクトルを以下の式にフィッティングすることにより推定した。

$$P_{GW}(m) = F_0 (m/m_{g*}) / \{1 + (m/m_{g*})^{t+1}\} \quad (1)$$

図3に、重力波の南北風スペクトルについて推定し東西平均した3つのパラメータの緯度分布を示す。 m_{g*} は高高度ほど小さく、 F_0 は大きくなっている。これは、重力波が上方伝播するとき、大気密度の低下に伴い波の振幅が大きくなり、次第に低波数まで飽和するようになることと

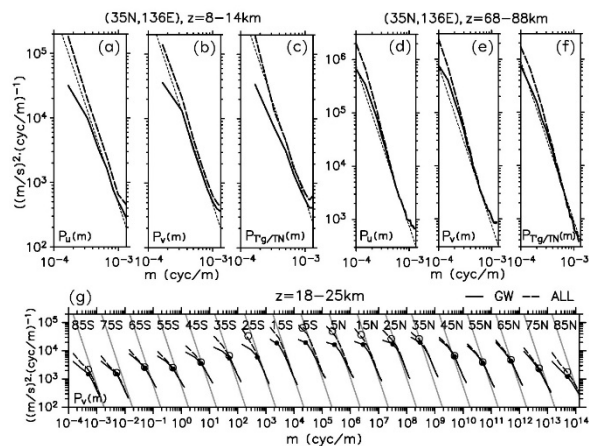


図2 信楽(35°N, 136°E)における(a-c)高度 $z=8\sim 14$ km、(d-f) $z=68\sim 88$ kmでの東西風・南北風・気温スペクトル。(g) $z=18\sim 25$ kmでの東西平均・緯度幅 $\pm 5^\circ$ 平均したスペクトル。破線が全擾乱成分、実線が重力波のスペクトル。点線は理論スペクトル[11]。

整合的である[11]。また、北半球中高緯度では、下部成層圏の18~33 kmから上部成層圏~下部中間圏にあたる高度45~60 kmにかけて、 t が約1.8から約3.0に増大している。水平分布を確認したところ、西風ジェットの特に強い領域で t の増大が顕著であることがわかった(図示せず)。

そこで、ジェット下部の西風シアが重力波スペクトルに与える影響を、以下の方法で評価した。WKB近似のもと、分散関係式から m の鉛直微分は

$$dm/dz = (m^2/N) \cdot (U - c) / |U - c| \cdot (dU/dz) \quad (2)$$

と表わされる。ここで、 N は浮力振動数、 $U = U(z)$ は重力波の水平波数ベクトルに平行な向きの背景風、 c は重力波の対地位相速度である。ここでは、 $U - c$ は東西平均東西風で近似して扱う。 $z=18\sim 33$ kmのスペクトルを初期値として(2)式を数値積分し、運動量フラックスの保存が成り立つようにしながら、 m の変化を考慮しつつ各 m でのスペクトル密度の鉛直変化を[11]の式に従って計算する。飽和重力波の理論スペクトル[11]を上回る点は、飽和したとみなして理論スペクトルの値を代入する。図4に結果を示す。50~60°Nの東西平均したモデル内のスペクトル(図4b)は、高高度ほど傾きが急になっている。シアによる m の鉛直変化を考慮しない計算結果(図4c)は、高波数側で飽和が起こり、飽和していない波数では傾きは一定である。一方、シアの効果を含めた計算結果(図4d)は、モデル内のスペクトルにみられる急峻化をよりよく再現している。すなわち、 m^{-3} に近い急な傾きをもつ

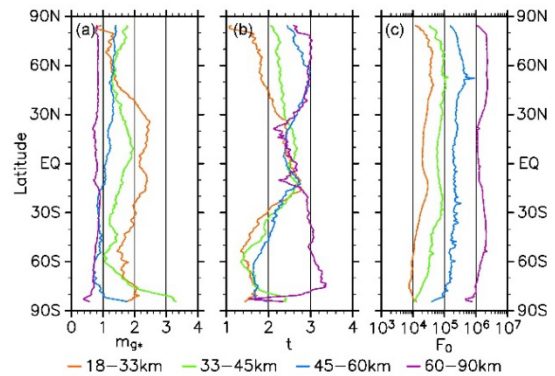


図3 重力波の南北風スペクトルの東西平均 m_{g*} 、 t 、 F_0 。

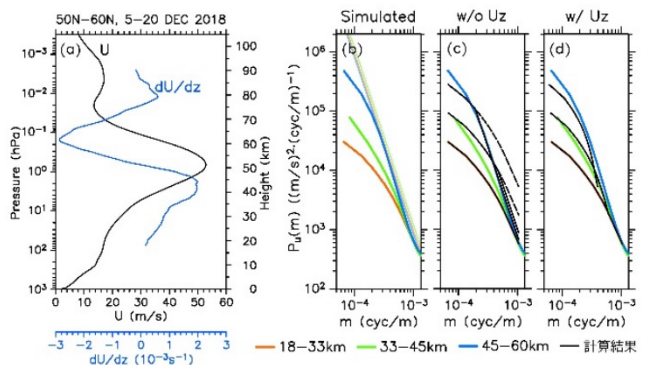


図4 50~60°Nの(a)東西平均東西風、(b)JAGUARモデル内のスペクトル、(c)シアの効果なしと(d)ありの計算結果。破線は理論スペクトルを上回る計算結果。

ベクトルは重力波の飽和だけでなくジェット下部の強い東西風の鉛直シアーによっても形成されることがわかる。興味深いことに、この場合、高波数で飽和が起こっていない。つまり、東西風の鉛直シアーは、 m の鉛直変化を介して波の飽和を抑制する効果がある。飽和の抑制は、重力波がその高度で運動量を背景場に与えることなく上方伝播することを意味する。以上の結果は、中層大気重力波の特徴の理解のみならず、気候モデルで用いられる普遍スペクトルに基づいたいくつかの非地形性重力波パラメタリゼーションスキームに対しても重要な示唆となりうる。

4. まとめと今後の課題

中解像度再解析データ 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) 再現実験結果を用いて、重力波のスペクトル解析を実施した。解析対象期間は国際共同観測期間である 2018 年 12 月 5~20 日とした。レーダーやラジオゾンデなどの鉛直高解像度の観測により指摘されていた、約 -3 乗の傾きを持つ普遍鉛直波数 (m) スペクトルについて、 m^{-3} に従う波数帯のうち低波数では重力波以外の擾乱成分も大きく寄与することを示した。また、重力波スペクトルの特徴を全球中層大気について記述した。この特徴のうち中層大気のジェット下部ではスペクトルの傾きが高さとともに大きくなることに注目し、重力波の飽和に加えジェット下部の鉛直シアーもスペクトルの急峻化をもたらすことを定量的に示した。また、鉛直シアーが重力波の飽和を抑制することを指摘した。これらの成果は、中層大気重力波の物理的理解はもとより、重力波パラメタリゼーション手法の発展にも資することが期待される。

本年度は、高解像度再現実験の初期化実験におけるナッジング手法の改良も行った。新しい手法では、4 日ごとのランの切り替え時にもより連続的な中間圏・下部熱圏の平均場・擾乱場を得られるため、これまで以上に詳細な時間発展が解析できると考えられる。この方法を用いて、来年度にかけて 10 年分の北半球冬季の再現実験を実施し、重力波のクライマトロジーの解析や、複数事例を対象とした全球的な力学変動過程の解明に取り組む。

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度大気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, (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] 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).

[8] 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).

[9] 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, 2021.

[10] 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).

[11] Smith, S. A., D. C. Fritts, and T. E. Vanzandt, “Evidence for a Saturated Spectrum of Atmospheric Gravity Waves,” *J. Atmos. Sci.*, **44**(10), 1404-1410, (1987).

[12] Sato, K., and M. Yamada, “Vertical structure of atmospheric gravity waves revealed by the wavelet analysis,” *J. Geophys. Res.*, **99**(D10), 20,623-20,631. (1994).

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, Shingo Watanabe*², Dai Koshin*^{1,2}, 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 (JAGUAR), developed at JAMSTEC. In this year, improvements were made to mitigate a model drift of the amplitudes of gravity waves in high-resolution hindcast simulations in which the reanalysis data generated by a data assimilation system, JAGUAR-DAS, was used as initial values. Using the updated method of the simulation, we conducted hindcasts in December and January from 2015/16–2019/20. Using outputs from hindcasts of December 2018, we conducted spectral analysis of gravity waves. The contribution of gravity waves to the commonly-observed universal vertical wavenumber spectra and global distribution of characteristics of gravity waves were estimated.

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 in the 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 its mechanisms is essential for long-range prediction of weather and climate systems, 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 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, which is 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, we used the JAGUAR-Data Assimilation System (JAGUAR-DAS) implemented in the DA system of JAMSTEC 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 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], 2022 [3]). We then use the reanalysis data for initial values for the high-resolution version of the model (i.e., 20 km and 300 m 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.

In this year, we improved the initialization method to mitigate an unrealistic increase in amplitudes of atmospheric gravity waves during a high-resolution hindcast simulation. Adopting this update, we performed hindcast simulations of December and January from 2015/16–2019/20, which are included in international joint observation periods. In addition, we conducted spectral analysis of gravity waves in December 2018. The results of this analysis (Okui et al. in press[4]) are described below.

3. Contribution of gravity waves to universal vertical wavenumber spectra

Radar, lidar, and radiosonde observations have revealed that vertical wavenumber (m) power spectra of horizontal wind and temperature fluctuations have common shape with a steep slope proportional to $\sim m^{-3}$. Several theoretical studies have explained this universality by assuming that these spectra are composed of saturated gravity waves. To confirm the validity of this assumption, spectral analysis was conducted based on outputs from high-resolution hindcasts from 5–20 December 2018 (Okui et al. 2021[5]). The m spectra of gravity waves, defined as fluctuations having higher total horizontal wavenumbers than 21, were compared with those of all model-simulated fluctuations, extracted from a single vertical profile by removing its linear trend. The extraction method of all fluctuations is an imitation of the methods used in observational studies mentioned above. Fig. 1 shows zonal-mean m spectra for a height region of 18–25 km of gravity waves and all fluctuations. Although the gravity wave spectra accord well with the all-fluctuation spectra at high m s, the difference between these two spectra is substantial at low m s even in the m^{-3} range of all-fluctuation spectra. This fact shows that disturbances other than gravity waves significantly contribute to the spectra in a low- m part of the steep slope.

Moreover, spatial variations of characteristics of gravity wave spectra were examined (not shown). It is inferred that not only wave saturation but also strong vertical shear below the middle atmosphere jets is responsible for the formation of the steep slopes of gravity wave spectra. In addition, strong shear prevents gravity wave saturation. As well as deepening our understanding of gravity waves, these findings may provide useful guidelines for improving gravity wave parameterizations in climate models.

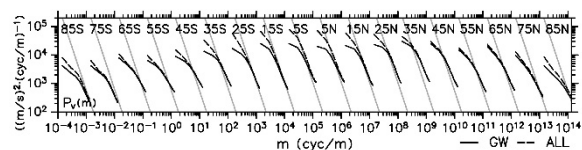


Fig. 1 Zonal-mean and $\pm 5^\circ$ latitude-mean meridional wind m spectra. Gray lines are theoretical spectra (Smith et al. 1987[6]).

4. Concluding Remarks

In this year, the initialization method of hindcast simulations performed with the high-resolution JAGUAR was updated to mitigate a model drift in the amplitudes of gravity waves in the

mesosphere and lower thermosphere. Using this updated method, hindcast simulations in December and January from 2015/16–2019/20 were performed. Moreover, spectral analysis of gravity waves was conducted by using outputs from hindcasts of December 2018. The results showed that commonly-observed universal vertical wavenumber (m) spectra, having a steep slope proportional to $\sim m^{-3}$, are mainly composed of gravity waves in their high m range, while disturbances other than gravity waves significantly contribute to the lowest m part of the m^{-3} range. Global distributions of characteristics of gravity waves were also described. It was shown that strong vertical shear below the middle atmosphere jets causes steepening of gravity wave spectra and preventing wave saturation. These findings may contribute to updates of some nonorographic gravity wave parameterization schemes.

High-resolution hindcast simulations in boreal winters from 2012/13–2021/22 are planned over the next year. By analyzing outputs from these simulations and combining them with long-term JAGUAR-DAS reanalysis data, climatological studies including gravity waves will be conducted quantitatively, which are unique outcomes of such high-resolution long-term hindcasts.

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., & 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).
- [2] 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).
- [3] 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).
- [4] Okui, H., K. Sato, & 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).
- [5] 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).
- [6] Smith, S. A., D. C. Fritts, & T. E. Vanzandt, "Evidence for a Saturated Spectrum of Atmospheric Gravity Waves," *J. Atmos. Sci.*, **44**(10), 1404–1410, (1987).