

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

佐藤 薫*¹, 渡辺 真吾*², 小新 大*³, 奥井 晴香*⁴

*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 アメリカ大気研究センター 高高度観測所, *⁴ バース大学 電子・電気工学専攻

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, 再解析データ

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)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ひとつである。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る。

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」という波が存在する。ロスビー波はコリオリ力の緯度勾配に起因する波、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)。中層大気では主にこの 2 種の波が対流圏から運動量運び大循環を駆動する。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。特に中間圏・下部熱圏領域は、観測できる測器や、中層大気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)が少ないため、研究が遅れている。

本研究課題では、まず中層大気をカバーする人工衛星の観測データを中解像度の GCM にデータ同化して全球の現実的な状態を再現した再解析データを作成する。そして、作成した長期間の再解析データを用いて中層大気特有の現象の解析を行う。また、このデータ同化解析値を初期値として高解像度 GCM を用いた重力波再現実験を行い、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定量的な理解を目指す。

2. 全中性大気を対象とする再解析データ

本研究グループでは、従来の GCM よりも上端が高く(高度約 150 km までカバー)中間圏・下部熱圏で重要となる物理過程を含み、地球シミュレータでの計算実績が豊富な GCM である JAGUAR (Japanese Atmospheric General circulation model for Upper Atmosphere Research; Watanabe and Miyahara, 2009)[1]をもとに、地上・高層気象観測データに加えて中層大気をカバーする複数の衛星観測データを 4 次元局所アンサンブルカルマンフィルタ(4D-LETKF)法に

より同化するシステム JAGUAR-Data Assimilation System (JAGUAR-DAS; Koshin et al., 2020[2]; Koshin et al., 2022[3])を開発、運用している。昨年度に引き続き、地上から下部熱圏までの全中性大気をカバーする再解析データの作成を実施した。現在は準リアルタイムで解析値を作成し続け、これまでに作成したデータと合わせると 2004 年 9 月から 2024 年までの 20 年にわたる長期間の再解析データセットが得られている。

この長期再解析データは JAGUAR-DAS Whole neutral Atmosphere Reanalysis (JAWARA; Koshin et al., 2025[4])と名付けた。Koshin et al. (2025)では、長期再解析データを作成するための設定の記述に加え、データ同化に用いた人工衛星の観測データおよび既存の中下部中間圏までを対象とする 3 種類の再解析データとの比較による精度検証を実施した。北半球では 1 年周期気温の季節変化に加えて、冬季に成層圏界面が急激に下降する成層圏突然昇温が発生し、その後高高度(約 80km)に再形成されることがある。これらの様子は JAWARA、衛星観測、各再解析でも似た結果が得られていた。東西風についても、中層大気では夏に東風、冬に西風という季節変化に加え、冬の突然昇温に伴い西風が弱化する様子が JAWARA、衛星観測、他の再解析共にとらえられていた。赤道域では中高緯度のような大きな季節変化は見られないが、半年周期の振動が確認された。特に、東西風については上部成層圏・下部中間圏で半年周期振動、成層圏では準 2 年周期振動というどちらも位相が徐々に下降してくる現象が JAWARA でも再現されており、その様子はほかの再解析データともよく似ていた。さらに、JAWARA ではほかの再解析データがカバーしていない中間圏でも別の半年周期振動がみられていた。南半球の変動は基本的には北半球と同様だが、冬の西風は北半球よりも強い。この特徴はどのデータセットでも見られた。

各季節で平均した気候値についても比較を行った。東西平均気温および東西風の構造は基本的によく似た典型的な構造を示していた。力学的な解析で重要となる残差平均循環、波活動フラックスについても同様に各季節の気候値を比較し、大まかな構造については JAWARA の結果はほかの再解析データと同等程度の性能であることを確認した。ほかの再解析データがカバーしていない上部

中間圏・下部熱圏についても、夏半球から冬半球へ向かう大規模な循環や、中層大気内部で発生する準二日波に伴う構造が捕らえられていた。また、従来のデータでは解析が難しい鉛直風の変動についても解析を行った。北極域では冬に下降流、夏に上昇流という1年周期の季節変化に加えて、冬季には突然昇温に伴い強い下降流が発生し、時間とともに下部熱圏から成層圏まで伝播して行く様子がとらえられた。

このJAWARAデータを用いて、地球大気の固有振動である「ノーマルモード」の中層大気中のふるまいに関する研究にも取り組んでいる。Sekido et al. (2024)[5]では東西波数1のRossby-gravityモード(RG1)とよばれる、周期約1.3日で赤道を境に反対称の構造を持つ成分に注目した解析を行った。その結果、RG1の振幅は成層圏・下部中間圏では冬半球の高緯度で大きく、上部中間圏では夏、冬の両半球で大きいという季節変化が得られた。RG1の振幅の大きい時期についての事例解析を行った結果、水平構造、鉛直構造ともに古典理論とおおむね一致していた。RG1以外のノーマルモードについても包括的な解析を進め、学会等で発表を行っている。

3. 高解像度予報実験

JAWARAデータを高解像度版のJAGUAR（水平解像度20 km、鉛直解像度300 m）の初期値として用い、重力波を含む現実大気の状態を再現する実験を行っている。JAWARAデータを用いて水平波長2000 km以上の大規模場のみを拘束する手法（スペクトルナッジング）により3日間の初期値作成後、4日間の予報実験を行った。初期日を4日ずつずらして実験サイクルを繰り返し、対象とする期間をカバーする高解像度再現実験データを出力した。

Okui et al. (2024)[6]では、成層圏突然昇温発生の初期段階に見られる成層圏と中間圏との力学的結合に関する解析を行った。冬の西風ジェットの変動変化（プレコンディショニング）によりロスビー波は収束しやすくなり、このロスビー波の砕波に伴う極向きの循環強化が極域での昇温につながる。JAWARAデータを用いてプレコンディショニング事例の統計解析を行った結果、成層圏の西風ジェット上方での重力波による西向き強制によりロスビー波の赤道向きの伝播が妨げられ極域に効率的に収束されることを示した。さらに、高解像度再現実験データで陽に表現される重力波による強制と比較したところ、JAWARAデータでは重力波強制が過小評価されていた。これは、重力波を解像していない中解像度のGCMでパラメータとして与えられている重力波の振る舞いについて、水平伝播や中層大気中での励起など、現在考慮されていない過程の重要性を示唆している。

高解像度の計算は対象とする期間を延長し、7年分の冬（12月～2月）および1年間（2022年）の高解像度再現実験データを作成している。このデータを用いた1年間の重力波の解析にも取り組んでいる。また、JAWARAデータを初期値とした超高解像度の領域モデル（水平解

像度約250 m、鉛直解像度は高度48 km以下で60 m、高度48 km以上で500 m）を用いて、南極昭和基地に設置された大型大気レーダーで観測された重力波活動が活発な時期の事例解析も行われている(Kohma et al., 2024)[7]。

4. まとめと展望

本課題では、地表から下部熱圏までを含む長期再解析データの作成を行った。作成した解析値は中層大気の現象の解析および、階層構造を解明するための高解像度再現実験データの初期値として用いられている。JAWARAデータは本年度から公開している(<https://jawara.nipr.ac.jp/>)。今後は、大型大気レーダーネットワークデータや高解像度衛星観測データとも比較しながら、中層大気重力波の発生・伝播・砕波および減衰のライフサイクルを気候学的に明らかにすることにも取り組む。

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次元の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。再解析データの作成に地球シミュレータを使用した。

文献

- [1] Shingo Watanabe and Saburo Miyahara, “Quantification of the gravity wave forcing of the migrating diurnal tide in a gravity wave-resolving general circulation model”, JGR Atmosphere 114D07110, (2009 Apr)
- [2] Dai Koshin, Kaoru Sato, Kazuyuki Miyazaki and Shingo Watanabe, “An ensemble Kalman filter data assimilation system for the whole neutral atmosphere”, Geoscientific Model Development 13(7), 3145–3177, (2020 Jul)
- [3] Dai Koshin, Kaoru Sato, Masashi Kohma and Shingo Watanabe, “An update on the 4D-LETKF data assimilation system for the whole neutral atmosphere”, Geoscientific Model Development 15(5), 2293–2307, (2022 Mar)
- [4] Koshin, D., Sato, K., Watanabe, S., & Miyazaki, K, “The JAGUAR-DAS whole neutral reanalysis: JAWARA”, Progress in Earth and Planetary Science 12(1), (2025 Jan)
- [5] Hiroto SEKIDO, Kaoru SATO, Haruka OKUI, Dai KOSHIN and Toshihiko HIROOKA, “A Study of Zonal Wavenumber 1 Rossby-Gravity Wave Using Long-Term Reanalysis Data for the Whole Neutral Atmosphere”, Journal of the Meteorological Society of Japan 102(5), 539–553, (2024)
- [6] H. Okui, D. Koshin, S. Watanabe and K. Sato, “Roles of Gravity Waves in Preconditioning of a Stratospheric Sudden Warming”, JGR Atmosphere 129(10), e2023JD039881, (2024 May)
- [7] M. Kohma, K. Sato, D. C. Fritts and T. S. Lund, “Numerical Simulation of Orographic Gravity Waves Observed Over Syowa Station: Wave Propagation and Breaking in the Troposphere and Lower Stratosphere”, JGR Atmosphere 129(3), e2023JD039425, (2024 Jan)