

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}, 小新 大^{*2}, 関戸 大登^{*1}, 渡辺 真吾^{*3}, 佐藤 薫^{*1}

^{*1} 東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻, ^{*2} アメリカ大気研究センター 高高度観測所, ^{*3} 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

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。

大気の基本波動には、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(gravity wave)」が存在する。ロスビー波はコリオリ力の緯度勾配に起因し、重力波は浮力を復元力とする。中層大気では主にこの 2 種の波が対流圏から運動量を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解明を目指す。

2. 全中性大気を対象とする再解析データ

本課題ではこれまでに、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]) を予報モデルに、地上・高層の気象観測データに加えて中層大気をカバーする複数の人工衛星観測データを 4 次元局所アンサンブル変換カ

ルマンフィルタ(4D-LETKF)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]) を開発した。このデータ同化システムを用いて作成した再解析データは JAGUAR-DAS Whole neutral Atmosphere Reanalysis (JAWARA; Koshin et al., 2025 [4]) と名付けた。現在は昨年度から引き続き準リアルタイムで解析値を作成しており、これまでに作成したデータと合わせると 2004 年 9 月から 2025 年までの 21 年にわたる長期間のデータセットが得られている。このデータは 2025 年 1 月からオンラインで公開しており (Sato and Koshin, 2025 [5]) 世界各国から 100 件を超える利用申請を受けている。

本年度は JAWARA データを用いて成層圏準 2 年周期振動(QBO)が赤道域中層大気の季節変動、特に半年周期振動へと及ぼす影響を調べた (Koshin and Sato, 2025 [6])。QBO に対する最も大きな応答として中間圏界面に存在する東風シアの強化が確認された。これについては QBO に伴う成層圏の東西風によりフィルタリングされて中間圏へと伝播する重力波の位相速度分布が変形され、その結果として上部中間圏における東西方向の波強制も変化するという解釈が成り立つ。またさらに上の下部熱圏でも QBO に伴う変動が見られていたが、これは中間圏の背景風速分布の違いに応じて大気潮汐の伝播しやすさが変わり、その結果として下部熱圏における潮汐の振幅の強さ、その砕波により引き起こされる西向き強制の大きさも変化するという追加のメカニズムを考察した。これらの結果は先行研究で観測されていた下部熱圏の QBO 応答とも整合的であった。

また、JAWARA データの高度 85 km 以上における東西風を独立な流星レーダーの観測データと比較したところ、年を通して東風がやや強い傾向がみられることが分かった。データ同化に用いている人工衛星の気温データだけではこの領域での拘束が不十分といえる。流星レーダーの東西風、南北風観測値も追加でデータ同化することでこのバイアスは軽減されと考えられるため、そのインパクトを調べるための実験にも取り組んでいる。

3. 全中性大気を対象とする高解像度再現実験

さらに本課題では、重力波を陽に扱う高解像度版

JAGUAR（水平解像度約 20 km 相当、鉛直解像度 300 m）の初期値として JAWARA データを使用し、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（Okui et al., 2025b [7]）。水平波長 2000 km 以上の大規模場を 3 日間かけて JAWARA データに拘束する手法（スペクトルナッジング）により初期値を作成し、その後 4 日間の予報実験を行う。4 日ごとに実験を繰り返し、これまでに北半球冬季 7 年分（2015/16～2021/22 年）と、2022 年通年の再現実験を実施した。

Okui et al. (2025b) [7] では、7 年の北半球冬季再現実験結果に基づき、冬極成層圏と夏極上部中間圏の気温が正相関を示す南北半球間結合のメカニズムが明らかにされた。これによれば、重力波のもたらす運動量（波強制）により生じる不安定が夏半球の惑星規模波の活動度を変え、その結果さらに夏極域の重力波強制を変調させ、半球間結合が起こる。さらに、全球の重力波の位相構造を調べられる同データの特徴を生かし、衛星観測とモデルデータ両方に適用可能な初の重力波検出畳み込みニューラルネットワーク（CNN）の開発を行った（Okui et al., 2025a [8]）。現在この CNN を用いた他の重力波解像 GCM と衛星観測の比較研究が進んでいる（Noble et al., 2026 [9]）。

4. JAWARA データを用いた大気ノーマルモード研究

中層大気、特に中間圏・下部熱圏の力学場の変動において重要な役割を担う惑星規模波動として、大気の自由振動（ノーマルモード）が注目されている。中層大気を網羅する長期再解析データである JAWARA データの特徴を生かし、中層大気において卓越するノーマルモードの力学特性を調べた。

Sekido and Sato (2025) [10] では、西向きに伝播する周期 1 日以上ノーマルモードのうち、スペクトル解析により有意なシグナルが得られた 4 種類のロスビー重力モードおよび 10 種類のロスビーモード成分を抽出し、それらの中層大気における季節変化を明らかにした。夏季の中間圏・下部熱圏において、ロスビー重力モードは夏至頃に 1 度、ロスビーモードは夏至の前後に 2 度振幅が増大する特徴的な季節変化を示す。夏至頃および夏至後においては、ほとんどのモードに共通して、夏半球中間圏の力学不安定により励起/増幅されることが示唆された。これに対して、夏至前においては、多くのロスビーモードが、大気下層で励起され夏半球中間圏・下部熱圏の高緯度の力学不安定により局所的に増幅される可能性がある。各モードの増幅時期はわずかに異なり、これはモード毎に位相速度が異なるためと考えられる。

現実的な鉛直気温分布のもとでは、従来よく知られたノーマルモード（Lamb モード）とは異なる鉛直構造をもつ Pekeris モードも存在することが理論的に知られており、近年になって初めて観測的に検出された（Watanabe et al., 2022 [11]）。しかしながら、これらのノーマルモード群の現実の中層大気における構造やふるまいの違いは調べられていなかった。Sekido and Sato (2026) [12] では、Pekeris・Lamb の 2 種類のノーマルモード群の分離解析を実施した。

解析対象としたモードのほとんどで、得られた鉛直構造は理論的に求められる Pekeris・Lamb モードの鉛直構造と整合的である。また、中間圏・下部熱圏においては、Pekeris モードの多くは、振幅が Lamb モードと同程度か、それより大きいこともわかった。

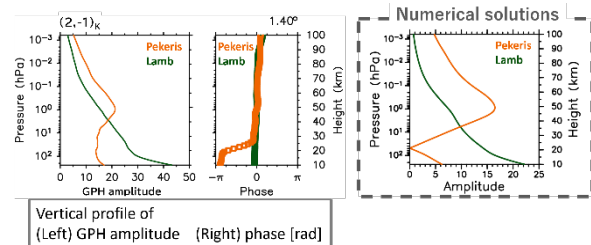


図 1 JAWARA データから抽出した東西波数 2 のケルビンモードの Pekeris モード成分（橙）と Lamb モード成分（緑）のジオポテンシャルハイト振幅と位相の鉛直分布。比較のため、理論的に得られる Pekeris・Lamb モードの鉛直振幅分布を右図に示す。

5. 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諸現象の解析および、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。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。

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] Sato, K. and Koshin, D., “JAGUAR Data Assimilation System Whole neutral Atmosphere Reanalysis (JAWARA)” [Dataset],

- National Institute of Polar Research, (2025 Jan)
- [6] Koshin, D. and Sato, K., “Influence of the Stratospheric Quasi-Biennial Oscillation on the Seasonal Variation in the Mesosphere and Lower Thermosphere Based on a Long-Term Reanalysis JAWARA”, *Journal of Atmospheric Science* 82, 2631–2645, (2025 Nov)
- [7] Okui, H., Sato, K., & Watanabe, S. “The mechanism of interhemispheric coupling revealed by a gravity wave-permitting general circulation model”, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 130, e2025JD043763. (2025 Jul)
- [8] Okui, H., Wright, C. J., Berthelemy, P. G., Hindley, N. P., Hoffmann, L., & Barnes, A. P. (2025). A convolutional neural network for the detection of gravity waves in satellite observations and numerical simulations. *Geophysical Research Letters*, 52, e2025GL115683. (2025 Jun)
- [9] Noble, P., Okui, H., Alexander, J., Ern, M., Hindley, N. P., Hoffmann, L., Holt, L., van Niekerk, A., Plougonven, R., Polichtchouk, I., Stephan, C. C., Bramberger, M., Corcos, M., Putnam, W., Kruse, C., & Wright, C. J. “Stratospheric gravity waves in three high-resolution models and AIRS satellite observations”, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 26, 7607–7630. (2026 May)
- [10] Sekido, H. & Sato, K., “Common excitation and/or amplification mechanisms of Rossby and Rossby-gravity normal modes revealed by long-term reanalysis data for the whole middle atmosphere”, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 130, e2025JD044325. (2025 Oct)
- [11] Watanabe, S., K. Hamilton, T. Sakazaki and M. Nakano, 2022: First detection of the Pekeris internal global atmospheric resonance: Evidence from the 2022 Tonga eruption and from global reanalysis data. *Journal of Atmospheric Science*, 79, 3027–3043, (2022 Nov)
- [12] Sekido, H. & Sato, K., “The characteristics of Pekeris modes revealed by long-term reanalysis data JAWARA covering the entire middle atmosphere”, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 131, e2025JD045099. (2026 Jan)