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\*1, 渡辺 真吾\*2, 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,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)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、現状は不十分である。 大気には、水平スケールの大きな(数千~4 万 km)「ロ

スピー波」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カの緯度勾配に起因 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 中間圏と南極は、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。

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)では、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、階層構造のダイナミックな相 互作用が報告された。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、観測デー タを同化しモデル格子上で風速・気温等を推定した再解 析データを、地表から下部熱圏までを含む中解像GCMを 用いて長期間作成し(Koshin et al. 2020 [7], 2022a [8])、これ を解析する(Koshin et al. 2022b [9] 他)。再解析データを初 期値に再現実験を実施し(Okui et al. 2021 [4]; Watanabe et al. 2022 [10])、その結果を観測とも比較して(Okui et al. 2023 [11])、高解像 GCM 研究を発展させる。そして、再解析 および再現実験データと、課題責任者の主導で昭和基地 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 [12])による高 解像度観測および同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を組 み合わせた中層大気研究を展開する(Sato et al. 2023 [13])。 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

本課題で用いた Japanese Atmospheric GCM 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 [14])。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る GCMに比べ、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む。さら に、高解像度版 JAGUAR は、ロスビー波や重力波の伝播 をできるだけ正確に表現するため、極めて高い鉛直解像 度を持つ(格子間隔 300 m)。

本研究ではまず、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し、モデル格子上 における風速・気温等の推定値「中解像再解析データ」 を作成した(Koshin et al. 2020 [7], 2022a [8])。次に、高解像 度版 JAGUAR(水平解像度約 20 km、鉛直解像度 300 m、 トップ約 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 実施した。その後、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、時間的に 繋がった「高解像度再現実験出力データ」を作成した。 高解像度版 JAGUAR 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は使用しない。よって、 重力波パラメタリゼーションに用いられる理論の妥当性 の確認にも用いることができる(Okui et al. 2022 [15])。

#### 3. 全中性大気を対象とする再解析データの作成

JAGUAR-DAS は昨年度に DA システムから地球シミュ レータへの移植作業を行い、今年度からは地球シミュ レータ上で解析値の作成を開始した。現在は準リアル タイムで解析値を作成し続けており、これまでに作成 したデータと合わせると 2004 年 9 月から 2023 年までの 19 年にわたる長期間の再解析データセットとなった。

この長期再解析データを用いた中層大気の季節内変動 に関する研究にも取り組んでいる。Koshin et al. (2022b) [9] では赤道域上部中間圏に見られる季節内振動について、 中高緯度の大気にもその変動が広がることを示し、ま た運動量収支の視点からそのメカニズムに関する知見 も得た。Koshin and Sato (2024) [16] では南半球冬季の成層 圏昇温を起点とする南北半球間結合(IHC、後述)につ いて解析を行い、水平解像度約 300kmの GCMを用いた Yasui et al. (2021) [17] の研究で示された北半球起点の IHC と同様のメカニズムが働くことを確認した。一方で、 北半球冬季とは異なる惑星波や平均風構造、その季節 変化のため、応答の強さや変動に違いが見られること も明らかとなった。

#### 4. 成層圏突然昇温前駆現象における重力波の役割

本年度は、長期再解析データと高解像度再現実験デー タを組み合わせ、成層圏突然昇温前後の中層大気の遠隔 結合のメカニズム解明を行った。まず、突然昇温発生の 初期段階にみられる冬半球成層圏と中間圏の力学的結合 に関する研究成果を報告する(Okui et al. 2024 [18])。

成層圏突然昇温は、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。大振幅の惑星規模ロスビー波が 極域上部成層圏で砕波し、極域に下降流を発生させるこ とで、断熱圧縮により昇温が発生する。突然昇温の発生 には、対流圏での活発な波活動に加え、冬の中層大気の 西風ジェットの構造変化が寄与することが先行研究で指 摘されている(Limpasuvan et al. 2004 [19]; Albers and Bimer 2014 [20] 他)。ジェットの構造変化はプレコンディショニ ングと呼ばれ、これによってロスビー波が極域上部成層 圏に収束しやすくなると考えられる。しかし、その全中 性大気における描像解明は、利用可能な長期データがな かったため未着手であった。本研究では、長期かつ全中 性大気を含む JAGUAR-DAS 再解析データを用いて、突然 昇温のプレコンディショニングの統計的特徴を、重力波 の役割にも着目し解析した。

プレコンディショニング発生時、成層圏では西風ジェ ットが極向き・下方へ移動する。一方で、中間圏では極 域で西風の減速が起こる。冬の成層圏・中間圏でのジェ ットの統計解析から、この変化は第2主成分の発達で表 せるジェットの典型的変動であることがわかった。この とき、成層圏ジェット上方の高緯度中間圏では、重力波 が西向きの強制を与える。これがジェット上部にロスビ ー波が伝播できない領域を形成し、ロスビー波の赤道向 きの伝播を妨げる。その結果、極域上部成層圏にロスビ ー波が効率的に収束することを突き止めた。高解像度再 現実験の重力波強制と比較したところ、重力波パラメタ リゼーションはジェット上部の波強制を特に高緯度で過 小評価(1/2 程度)していた。これは、水平伝播や中層大 気中での励起など、パラメタリゼーションで表現されな い重力波の振舞いの突然昇温における重要性を示唆する。

# 5.7年間の北半球冬季の高解像度再現実験による 南北半球間結合メカニズムの解明

次に、冬季極域成層圏と夏季極域上部中間圏の気温偏 差が正の相関を持つ「南北半球間結合」(inter-hemispheric coupling, IHC)のメカニズムを解析した。IHC は、2000年 代半ばに観測的に発見された。従来の IHC のメカニズム に関する研究では、重力波パラメタリゼーションを用い たGCMが使用されている。本研究では、重力波を解像可 能な高解像度版 JAGUAR による再現実験を 2015/16~ 2021/22 年の7年の北半球冬季(12~2月)を対象に行っ た。7年間の平均を気候値とみなし、重力波そのものを 解析可能なデータによる全中性大気の重力波の気候値と 偏差の解析を初めて行った。

冬季極域成層圏が大きく高温偏差となる成層圏突然昇 温や、低温偏差となる極渦強化事例に伴う IHC は、偏差 の絶対値が大きく現象を捉えやすい。上記実験期間には、 5回の突然昇温と2回の極渦強化事例が発生した。7事例 の詳しい解析の結果、少なくとも4事例に共通して以下 のIHCのメカニズムが明らかになった(図1)。なお、各 物理量の偏差の符号は冬極成層圏と夏極上部中間圏が高 温偏差となるIHCに対するもので、低温偏差のIHCでは 逆符号となる。1)まず、突然昇温に伴う循環偏差により、 赤道成層圏に低温偏差が現れる。低温偏差と温度風平衡 を保つように、夏半球低緯度(20°S)の高度 50~60 km に東風偏差が現れる。2)東風偏差により重力波のフィル タリングが変調され、20°S 付近、高度 60~70 km に重力 波強制の東向き(正)偏差が現れる。これは、下方の東 西風偏差によるフィルタリングと整合的である。3) 正の



図1 南北半球間結合のメカニズム。δは偏差。Tは気温、 GWFは重力波強制、PWFは惑星規模波強制(夏半球中間 圏ではおもに準2日波が寄与)。番号は本文と対応。

波強制は北向きに渦位を輸送するため、重力波強制の正 偏差の極側で負の渦位の緯度勾配が強まる。4)順圧・傾 圧不安定が発生し、準2日波が励起される。5)準2日波 の吸収・砕波に伴う負の波強制が40°~70°Sの高度85~ 95kmで強まる。6)負の波強制偏差の高緯度側下方にあた る60°S付近、高度80~90kmでは、下降流偏差による高 温偏差が生じる。7)温度風の関係を保って高温偏差の高 緯度側上方に西風偏差が現れる。8)西風偏差によるフィ ルタリングで、極域の高度90~100kmで重力波強制が負 偏差となる。9)重力波強制の負偏差に伴う極域の下降流 により、夏極上部中間圏が高温偏差となる。

Yasui et al. (2021) [17] では、2次発生重力波による負の波 強制が夏極の高温偏差形成に寄与することを示している。 しかし、1桁以上解像度の高い GCM を用いた本研究の結 果では、2次発生重力波の負の強制偏差は高緯度まで広 がっていなかった。これはより短波長の重力波が励起さ れ高緯度への伝播が抑えられたためと考えられる。また、 再解析データを調べたところ、パラメタリゼーションに よる中間圏での重力波の強制偏差は JAGUAR による再現 の 0.1~0.2 倍と大きく過小評価されることがわかった。

上記のメカニズムは 2 つの突然昇温(2017/18、2018/19) と 2 つの極渦強化事例(2019/20、2020/21)に共通するも のの、当てはまらない事例もあった。準 2 日波や重力波 の季節性、突然昇温の事例依存性、赤道成層圏準 2 年振 動などが、IHC のメカニズムに影響すると考えられる。 今後事例数を増やし、より詳細に調べる必要がある。

#### 6. 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 データ作成と高解像度再現実験を行い、中層大気の階層 構造とその力学的メカニズム解明に取り組んでいる。本 年度は、長期再解析データの作成、さらに成層圏突然昇 温前に発生するプレコンディショニングおよび南北半球 間結合のメカニズムを、特に重力波の役割に着目して解 析した。その結果、重力波と大規模波が次々と相互作用 し中層大気の遠隔結合をもたらす様子が明らかとなった。

長期再解析データを用いて、赤道域東西風の振動現象 や大気潮汐を中心に、中層大気の気候学的な特徴に関す る研究も進めている。また本研究で行った7年の北半球 冬季に亘る高解像度再現実験データは、中層大気重力波 の気候学的描像の解明にも役立つ。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。再解析データ作成にはJAMSTEC の地球シミュレータおよび DA システムを、高解像度再 現実験の実施には地球シミュレータを使用した。

## 文献

 Sato, K., & Yoshiki, M., "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).
Watanabe, S., Kawatani, Y., Tomikawa, Y., Miyazaki, K., Takahashi, M., & Sato, K., "General aspects of a T213L256 middle atmosphere general circulation model", *J. Geophys. Res.*, **113**(D12), D12110, (2008).

[3] Sato, K., & Nomoto, M., "Gravity wave-induced anomalous potential vorticity gradient generating planetary waves in the winter mesosphere", *J. Atmos. Sci.*, **72**(9), 3609–3624, (2015).

[4] Okui, H., Sato, K., Koshin, D., & Watanabe, S., "Formation of a mesospheric 3830 inversion layer and the subsequent elevated stratopause associated with the major stratospheric sudden warming in 2018/19", *J. Geophys. Res. Atmos.*, 126(18), e2021JD034681, (2021).

[5] Sato, K., Watanabe, S., Kawatani, Y., Tomikawa, Y., Miyazaki, K., & Takahashi, M., "On the origins of mesospheric gravity waves", *Geophys. Res. Lett.*, **36**(19), L19801, (2009).

[6] Geller, M. A., Alexander, M. J., Love, P. T., Bacmeister, J., Ern, M., Hertzog, A., et al., "A Comparison between Gravity Wave Momentum Fluxes in Observations and Climate Models", *J. Clim.*, **26**(17), 6383–6405, (2013).

[7] Koshin, D., Sato, K., Miyazaki, K., & Watanabe, S., "An ensemble Kalman filter data assimilation system for the whole neutral atmosphere", *Geosci. Model Dev.*, **13**, 3145–3177, (2020).

[8] Koshin, D., Sato, K., Kohma, M., & Watanabe, S., "An update on the 4D-LETKF data assimilation system for the whole neutral atmosphere", *Geosci. Model Dev.*, 15, 2293–2307, (2022a).

[9] Koshin, D., Kohma, M., & Sato, K., "Characteristics of the intraseasonal oscillation in the equatorial mesosphere and lower thermosphere region revealed by satellite observation and global analysis by the JAGUAR data assimilation system". *J. Geophys. Res. Atmos.*, **127**(16), e2022JD036816, (2022b).

[10] Watanabe, S., Koshin, D., Noguchi, S., & Sato, K., "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).

[11] Okui, H., Wright, C. J., Hindley, N. P., Lear, E. J., & Sato, K., "A comparison of stratospheric gravity waves in a high-resolution general circulation model with 3-D satellite observations", *J. Geophys. Res. Atmos.*, **128**, e2023JD038795, (2023).

[12] Sato, K., Tsutsumi, M., Sato, T., Nakamura, T., Saito, A., Tomikawa, Y., Nishimura, K., Kohma, M., Yamagishi, H., & Yamanouchi, T., "Program of the Antarctic Syowa MST/IS Radar (PANSY)", *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, **118**, PartA, 2–15, (2014).

[13] Sato, K., Tomikawa, Y., Kohma, M., Yasui, R., Koshin, D., Okui, H., et al., "Interhemispheric Coupling Study by Observations and Modelling (ICSOM): Concept, Campaigns, and Initial Results", *J. Geophys. Res. Atmos.*, **128**, e2022JD038249, (2023). [14] Watanabe, S., & Miyahara, S., "Quantification of the gravity wave forcing of the migrating diurnal tide in a gravity wave-resolving general circulation model", *J. Geophys. Res. Atmos.*, **114**, D07110, (2009).

[15] Okui, H., Sato, K., & Watanabe, S., "Contribution of gravity waves to universal vertical wavenumber ( $\neg m^{-3}$ ) spectra revealed by a gravity-wave-permitting general circulation model", *J. Geophys. Res. Atmos.*, **127**, e2021JD036222, (2022).

[16] Koshin, D., & Sato, K., "Characteristics and mechanism of interhemispheric coupling in austral winter revealed by long-term reanalysis data for the whole middle atmosphere", *J. Geophys. Res. Atmos.*, **129**, e2023JD039687, (2024).

[17] Yasui, R., Sato, K., & Miyoshi, Y., "Roles of Rossby waves, Rossby–gravity waves, and gravity waves generated in the middle atmosphere for interhemispheric coupling", *J. Atmos. Sci.*, **78**(12), 3867–3888, (2021).

[18] Okui, H., Koshin, D., Watanabe, S., & Sato, K., "Roles of Gravity Waves in Preconditioning of a Stratospheric Sudden Warming", *J. Geophys. Res. Atmos.*, **129**, e2023JD039881, (2024).

[19] Limpasuvan, V., Thompson, D. W. J., & Hartmann, D. L., "The life cycle of the northern hemisphere sudden stratospheric warmings", *J. Clim.*, **17**(13), 2584–2596, (2004).

[20] Albers, J. R., & Birner, T., "Vortex preconditioning due to planetary and gravity waves prior to sudden stratospheric warmings", *J. Atmos. Sci.*, **71**(11), 4028–4054, (2014).