

中層大気の季節内～季節スケール予測に関するシミュレーション研究

課題責任者

渡辺 真吾

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

著者

渡辺 真吾*¹

*¹ 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，赤道波，赤道成層圏準二年周期振動，オゾン相互作用

1. はじめに

本研究課題は、数週間から季節の時間スケールで生じる中層大気に特有の現象を大気大循環モデルを用いて再現・予測し、現象の生成から消滅に至る過程を理解するとともに、現象をどれくらい前もって予測し得るか、すなわち予測可能性を支配する要因の解明を目指す。

本年度は、前年度から参画してきた国際共同研究に加えて、新たに複数の国際共同研究に参画し、あるいは自ら立ち上げた。本稿の各項では、各々の研究テーマについて進捗を報告する。

2. 成層圏赤道準二年周期振動の ENSO 依存性

赤道成層圏において、約 2 年周期で東西風の位相が反転する振動現象、赤道成層圏準二年周期振動 (Quasi Biennial Oscillation: QBO) は、複数の経路・メカニズムを通じて地表付近の天候に影響を及ぼすことが知られている (Baldwin et al. 2001 [1]; Anstey et al. 2021 [2])。これまでに筆者らが参画してきた QBO に関する数値シミュレーションに関する国際共同研究から、QBO が季節スケールの予測可能性を持つことも明らかになってきており、季節予報モデルにおいて QBO の再現性が向上すれば、地上付近の季節予報も向上することが期待されている。

一方、赤道対流圏において最も重要な長周期変動であるエルニーニョ・南方振動 (ENSO) は、海面水温分布や対流活動域ならびにハドレー循環やウォーカー循環といった赤道対流圏の循環場の変調を通じて、QBO に変調をもたらす (Kawatani et al. 2019 [3])。こうしたプロセスの理解向上を目的としたマルチモデル比較実験に参画し、昨年度までに実験結果の提出を行った。

本年度は、1) 同実験プロジェクトのプロトコルと先行研究との比較について記した論文、2) QBO がテレコネクションを通じて中・高緯度大気に及ぼす影響に着目した論文、3) QBO が赤道域の上下結合を通じてマッデン・ジュリアン振動に及ぼす影響に着目した論文という、3 編の国際共著論文が投稿され、査読と改訂が進められている。これらのリファレンスと詳しい内容については論文出版後に報告する。

3. スーパー・プレッシャー気球による赤道下部成層圏観測結果の再現シミュレーション

2019 年 11 月～2 月にかけて、赤道上空 19 km 付近を主に西向きに数万キロメートルにわたって浮遊したスーパー・プレッシャー気球と、気球からリールダウン・リールアップさせた気温センサーにより、水平波長 2000 km 前後に対して 1km 未満の短い鉛直波長を持つような、赤道域では観測されることがない非常に扁平な大気波動が発見された (Bramberger et al. 2022 [4])。

この波の性質や起源を調べるために、世界最高の鉛直解像度 (50 m) に設定した大気大循環モデル JAGUAR を用いた再現シミュレーションを行った。米国 NorthWest Research Associates および欧州中期予報センター (ECMWF) との国際共同研究として、ECMWF モデルと JAGUAR とを用いたアンサンブル再予報実験を実施することにより、赤道下部成層圏の扁平な大気波動の予測可能性を初めて調査した。その結果、いずれのモデルも各々の標準的な鉛直解像度 (200–500 m) を用いた場合には表現できなかった非常に扁平な大気波動が、鉛直解像度を 50 m にすると、再現できる場合があることが分かった。この研究の途中経過は、比較解析を担当している共同研究者により、米国気象学会の中層大気会議や年会にて報告した。詳細については、論文出版後に報告する。

4. QBO を駆動する大気波動のモデル鉛直解像度依存性の調査

第 1 節で述べた QBO は、惑星規模の赤道波から水平波長数十 km の小規模重力波まで、様々な大気波動が駆動する現象である。「大気大循環モデルの鉛直解像度をどのように変えたら、それらの大気波動の性質や QBO の駆動力がどれくらい変わるのか？」という問いに、世界中の大気大循環モデルが各々の鉛直解像度を変えながらシミュレーションを行った結果を持ち寄って分析することにより、定量的な結論を得ることを目的とするプロジェクトに、JAGUAR を用いて参加した。

JAGUAR の設定として、2015/2016 年に生じた観測史上初の QBO 崩壊現象の季節スケール再現実験に成功した T213L500：水平解像度約 60 km、鉛直解像度 200 m を基準として、他の設定は同じで鉛直解像度だけを 500 m まで落としたバージョンを作成して比較実験を行った。JAGUAR の鉛直解像度を変えた場合に何が起こるかについては、以前に調査した経験があり、他のパラメーター調整をしないで鉛直解像度だけを落とすと、QBO の周期は基準

実験と比較にならないほど短くなり、振幅は過大評価傾向になってしまう。こうした既知のQBOの変化は、今回の研究目的である、赤道成層圏における大気波動の性質やQBOの駆動力のモデル鉛直解像度依存性を調査するうえでは障害となってしまいます。具体的に知りたいのは、「現実的な周期や振幅のQBOの中を伝播する大気波動の性質やQBOの駆動力が、鉛直解像度を変えることによってどれくらい変わるのか？」という問いに対する答えである。そのため、本プロジェクト研究では、大気の大擾乱成分、すなわち波動成分はモデルの力学で自由に振る舞わせる一方で、帯状平均した赤道成層圏の東西風だけは、観測値にナッジングする方式を採用した。

本年度は、以上の実験設定を用いて、2004年から2013年まで10年間の実験を行い、マルチモデル・データ解析の担当者にデータを提出した。解析結果については来年度以降に論文発表を行う計画である。

5. 成層圏オゾンと大気波動ならびに循環場の相互作用の探求

昨年度に、「モデルの対流圏循環の改善がQBOの改善に結びつくか？」調べた経験を通じて、成層圏オゾンと大気波動ならびにQBOとの相互作用について、化学過程を含む地球システムモデルMIROC-ES2Hを用いた国際共同研究プロジェクトへの参加を通じて調べることが、中層大気の前予測可能性についての包括的な理解のために必要との結論に至った。

世界気候計画(WCRP: Word Climate Research Program)の大気過程と気候への影響(APARC: Atmospheric Processes and their Role in Climate)において本年度に組織された準二年周期振動とオゾン化学の相互作用(QUOCA: Quasi-biennial oscillation and Ozone Chemistry interactions in the Atmosphere)のマルチモデル相互比較実験では、QBOとオゾン化学との相互作用の有無が、両者に対してどのような影響を及ぼすかを浮き彫りにすることを目指して、現在気候と将来気候の各々の条件にて、オゾン相互作用をオン・オフした実験を30年×3メンバーずつ行う。本年度は、これらの実験を実施し、マルチモデル・データ解析の担当者にデータを提出したほか、チューリッヒ工科大学の修士の研究生を受け入れて初期解析を行った。

詳細な解析結果については、来年度以降に論文発表を行う計画であるが、初期解析から、1) オゾン相互作用を無視した実験では複数回のQBO崩壊が生じたことから、オゾン相互作用は負のフィードバック作用を通じてQBOを安定化させる作用を持つ、2) 現在気候から二酸化炭素濃度を倍増させた将来気候実験では、赤道域の上昇流が強化される結果、QBOは消滅してしまう、という知見が得られた。

6. HAPSに影響を及ぼす成層圏乱気流のシミュレーション

本年度より、海外・国内の共同研究者とともに、成層圏

を飛行する高高度無人機(HAPS: High Altitude Platform Station)の安全を脅かす成層圏乱気流の発生プロセスの解明と予測につながる数値シミュレーションの取り組みを開始した。最初に、NASAの高高度有人観測機WB-57が2022年7-9月に日本周辺で観測した上部対流圏・成層圏の乱気流を対象に、東京大学先端科学研究所と情報基盤センターならびに気象庁が共同で開発した日本域領域メソ再解析データRRJ-ClimCOREを用いて、乱気流発生の背景となったメソスケール気象場の解析に取り組んだ。同データセットは、水平解像度5 km、下部成層圏の鉛直解像度500 m、出力時間隔1時間と、上部対流圏・下部成層圏の航空気象学の研究に必要な要件を兼ね備えている(Nakamura et al. 2022 [5])。

2022年8月末に発生したカテゴリー5のスーパー台風ヒンナムノーのアウトフロー上面の鉛直シア極大領域において観測された乱気流についてRRJ-ClimCOREとひまわり8号画像を用いて解析を行い、論文投稿を行った(Watanabe et al, submitted [6])。さらに、理化学研究所で開発されたSCALE-RMと呼ばれる領域気象モデルを地球シミュレータのVEノード向けに移植し、上部対流圏・下部成層圏で生じるkmスケールの乱流を再現するためのラージ・エディター・シミュレーションの設計を行った。

来年度にかけて、具体的な観測事例を対象としたメソスケール・シミュレーションやラージ・エディター・シミュレーションを行う計画である。上記の投稿論文の内容については、シミュレーションの結果ともども、来年度以降に報告する。

謝辞

本研究の実施には地球シミュレータならびにEAシステムを用いた。また、下記の研究費の支援を受けた。科学技術振興機構(JST)COI-NEXT(JPMJPF2013)、文部科学省・気候変動予測先端研究プログラム(SENTAN)助成番号JPMXD0722681344、日本学術振興会 科学研究費補助金: 科研費(JP22K18743, JP23K22574, JP22H01292)および環境省環境再生保全機構環境研究技術開発費(JPMEERF20242001)。

文献

- [1] Baldwin et al., "The Quasi-Biennial Oscillation", *Rev. Geophys.*, 39(2), 179-229, (2001).
- [2] Anstey et al., "Teleconnections of the Quasi-Biennial Oscillation in a multi-model ensemble of QBO-resolving models", *Quot. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 148(744), 1568-1592, (2021).
- [3] Kawatani et al., "ENSO Modulation of the QBO: Results from MIROC Models with and without Nonorographic Gravity Wave Parameterization", *J. Atmos. Sci.*, 76(12), 3893-3917, (2019).
- [4] Bramberger et al., "First Super-Pressure Balloon-Borne Fine-Vertical-Scale Profiles in the Upper TTL: Impacts of Atmospheric Waves on Cirrus

Clouds and the QBO”, *Geophys. Res. Lett.*, 49(5), e2021GL097596, (2022).

[5] Nakamura et al., “Toward High-Resolution Regional Atmospheric Reanalysis for Japan: An Overview of the ClimCORE Project”, 2022 IEEE International Conference on Big Data (Big Data), 6153-6158, (2022).

[6] Watanabe et al., “Origins of UTLS Turbulence: Insights from the RRJ-ClimCORE Mesoscale Reanalysis – The ACCLIP Flight Over the Super Typhoon Hinnamnor (2022)”, submitted.