

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を通じて、複数の共著論文を出版した。本稿の各項では、その中から抜粋した5編の論文成果について概要を紹介する。

2. CCM1-2022 モデルにおける最近の下部成層圏オゾントレンド：自然変動と輸送の役割

モントリオール議定書を受けてオゾン層破壊物質が削減されたにもかかわらず、南緯 60 度から北緯 60 度の間の下部成層圏オゾンは 1998 年以降減少し続けている。これまでの研究で、化学気候モデルは熱帯下部成層圏の上昇流の強化に対する応答として熱帯下部成層圏のオゾン減少トレンドを再現する一方で、北半球中緯度におけるオゾン減少を捉えられていないことが示されている。

本研究は、新しい化学気候モデルイニシアチブ 2022 (CCMI-2022) の 2 種類のシミュレーション（観測された海面水温 (SST) を使用した REF-D1 とシミュレートされた海洋を使用した REF-D2）を使用して、1998～2018 年の期間の下部成層圏オゾンの最近の傾向を再検証した。当センターからは、渡辺が最新の地球システムモデル MIROC-ES2H を用いて参加した。

化学気候モデルに観測された SST を与えた場合には、中緯度下層成層圏オゾンの最近の減少を捉えることができた。さらに、多重線形回帰分析により、北半球中緯度でシミュレートされたオゾン変動のモデル間のばらつきは外部強制（太陽活動 11 年周期変動、地球温暖化、オゾン層破壊物質）や主要な変動モード（エル・ニーニョ南方振動および赤道成層圏準二年周期振動）に対する異なる線形応答によって説明されるのではなく、大気の内部分動に起因することが示された^[1]。

3. 赤道成層圏準 2 年周期振動 (QBO) とエルニーニョ・南方振動 (ENSO) に関する実験 第 1 部：実験設計の概要と QBO の ENSO による変調

世界気候研究計画・大気過程と気候への役割 (APARC/WCRP) の赤道成層圏準 2 年周期振動イニシアチ

ブ (QBOi) は、エルニーニョ・南方振動現象 (ENSO) による QBO の変調を調査するための新たな実験を提案・実施した。本論文では、各モデルが共通で行う実験設定が詳述された。当センターからは、渡辺が第 5 次結合モデル相互比較プロジェクト (CMIP5) 版の地球システムモデル MIROC-ESM を用いて参加した。

同モデルを含む 9 つの気候モデルを用いて、ENSO による QBO の変調を分析した。主要な結論のひとつは、すべてのモデルにおいてラニーニャ期間中の QBO 周期がエルニーニョ期間に比べて長くなることであり、定性的な傾向は観測データと一致するが、定量的にはモデル間のバラつきが見られた。一方、ENSO が QBO 振幅に与える効果の符号は、モデル間で異なった。

モデル内の物理過程パラメタリゼーション等と紐づいて時間変化する重力波パラメタリゼーションのソース（可変ソース）を採用するモデルは、固定ソースを使用するモデルよりも、ENSO の位相に対する QBO 振幅の感度がより高い傾向が見出された。すべてのモデルは、エルニーニョ期間中、ラニーニャ期間に比べて熱帯成層圏の上昇流がより強くなることをシミュレートしており、これは ERA5 再解析と一致した。ENSO、大気内部重力波、QBO の相互作用についてのより詳しい調査とその理解は、将来のモデル改良に新しい指針を与えることが示唆された^[2]。

4. QBO とエルニーニョ・南方振動に関する実験：QBO の遠隔影響

WCRP/APARC QBOi は、QBO と中高緯度循環との間の遠隔影響に対して ENSO に関する赤道 SST 偏差がどのように影響するかを調べるためのマルチモデル感度実験結果の解析を実施した。当センターからは、渡辺が CMIP5 版の MIROC-ESM を用いて参加した。

端的に、参加した世界の 9 つの気候モデルの多くは、観測される QBO 遠隔影響を十分よく再現できておらず、したがって ENSO の QBO 遠隔影響への影響についても、再解析データ等に見られる関係性についてうまく再現できなかった。

一方、この研究は、QBO と ENSO の遠隔影響を、理想化された条件下でマルチモデル解析により初めて分離・評価し、気候モデルの限界と改善の方向性を明らかにした点において、学術的価値が認められる。QBO の理解とモデル表現の改善は、季節予測や長期予測の精度向上に直結

し、気象庁の予報業務や異常気象対策、農業・防災分野への応用が期待される^[3]。

5. フンガ・トンガ＝フンガ・ハアパイ火山影響モデル観測比較 (HTHH-MOC) プロジェクト：実験プロトコルとモデル記述

WCRP/APARC によるフンガ・トンガ＝フンガ・ハアパイ (HTHH) 火山噴火の科学レポート・プロジェクトについての記述論文。地球表層システム研究センターの関谷研究員と当センターの渡辺が化学気候モデル MIROC-CHASER を用いて参加した。

2022 年のフンガ火山噴火では、多量の水蒸気と中程度の二酸化硫黄が成層圏に放出され、気候系に明瞭な影響を及ぼした。本研究プロジェクトでは、最新の化学気候モデルを用いて、火山起源の水蒸気とエアロゾルの進化および大気力学・化学・気候への影響を観測と比較しつつ解析する。目的は、(1) 現行モデルの性能を観測と照合して評価し、(2) この特異な噴火後の地球大気応答と将来への影響を理解することにある。

観測 (気球・衛星 MLS など) との直接比較のために実験を設計し、実験 1 では 2022～2031 年の自由実験 (海面条件固定・海洋結合の 2 種) を行い、成層圏水蒸気・温度・オゾン化学・放射強制力などを評価する。実験 2 では 2022～2023 年の気象同化実験を実施し、エアロゾル処理の異なる 2 種 (2a: 内部生成型、2b: 与条件型) を設定して、水蒸気・オゾン・放射影響を観測と比較解析する^[4]。

6. フンガ火山噴火後の高層大気変動に関する観測データ及び 10 年規模予測との比較：複数モデルアンサンブルシミュレーションを用いた検討

WCRP/APARC による、HTHH 火山噴火の科学レポート・プロジェクトのうちの 1 編。地球表層システム研究センターの関谷研究員と当センターの渡辺が化学気候モデル MIROC-CHASER を用いて参加した。

HTHH 火山噴火後の成層圏の水蒸気、硫酸エアロゾル、気温、オゾンの時間発展について、10 年間のマルチモデル予測実験を行った結果を解析した。モデルは 2022～2024 年のそれらの変化を衛星観測と整合的に再現し、将来予測の信頼性が示された。

噴火に伴う成層圏水蒸気濃度の増加は 4～7 年持続し、これにより成層圏～中間圏で冷却と 7～10 年規模のオゾン減少が生じることが予測された。HTHH 火山噴火によって注入された亜硫酸ガスと水蒸気によって、それぞれ、下部成層圏が暖められ、上部成層圏が冷却されて、上下ダイポール型の温度偏差が生じたことが示された。これらの結果は、HTHH 火山噴火により成層圏に注入された水蒸気が長期間にわたって大気化学と力学を変調し得ることを示唆する^[5]。

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。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 (JP23K22574)。

文献

- [1] Benito-Barca, S., Abalos, M., Calvo, N., Garny, H., Birner, T., Abraham, N. L., ... Watanabe, S. et al., "Recent lower stratospheric ozone trends in CCM1-2022 models: Role of natural variability and transport", *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol.130, e2024JD042412, May 2025.
- [2] Kawatani, Y., Hamilton, K., Watanabe, S., Anstey, J. A., Richter, J. H., Butchart, N., Orbe, C., Osprey, S. M., Naoe, H., Elsbury, D., Chen, C.-C., García-Serrano, J., Glanville, A., Kerzenmacher, T., Lott, F., Palmerio, F. M., Park, M., Serva, F., Taguchi, M., Versick, S., and Yoshioda, K., "QB0i El Niño Southern Oscillation experiments Part I: Overview of experiment design and ENSO modulation of the QB0", *Weather Clim. Dynam.*, vol.6, pp.1045-1073, July 2025.
- [3] Naoe, H., Garcia-Franco, J. L., Park, C.-H., Rodrigo, M., Palmeiro, F. M., Serva, F., Taguchi, M., Yoshida, K., Anstey, J. A., Garcia-Serrano, J., Son, S.-W., Kawatani, Y., Butchart, N., Hamilton, K., Chen, C.-C., Glanville, A., Kerzenmacher, T., Lott, F., Orbe, C., Osprey, S., Park, M., Richter, J. H., Versick, S., and Watanabe, S., "QB0i El Niño Southern Oscillation experiments: Teleconnections of the QB0", *Weather Clim. Dynam.*, vol.6, pp.1419-1442, November 2025.
- [4] Zhu, Y., Akiyoshi, H., Aquila, V., Asher, E., Bednarz, E. M., Bekki, S., Brühl, C., Butler, A. H., Case, P., Chabrillat, S., Chiodo, G., ..., Watanabe, S., Yamashita, Y., Yu, P., Yu, W., Zhang, J., and Zhuo, Z., "Hunga Tonga-Hunga Ha'apai Volcano Impact Model Observation Comparison (HTHH-MOC) project: experiment protocol and model descriptions", *Geosci. Model Dev.*, vol.18, pp.5487-5512 September 2025.
- [5] Zhuo, Z., Wang, X., Zhu, Y., Bednarz, E. M., Fleming, E., Colarco, P. R., Watanabe, S., Plummer, D., Stenchikov, G., Randel, W., Bourassa, A., Aquila, V., Sekiya, T., Schoeberl, M. R., Tilmes, S., Yu, W., Zhang, J., Kushner, P. J., and Pausata, F. S. R., "Comparing Multi-Model Ensemble Simulations with Observations and Decadal Projections of Upper Atmospheric Variations Following the Hunga Eruption", *Atmos. Chem. Phys.*, vol.25, pp.13161-13176, October 2025.