

成層圏突然昇温が熱帯対流活動へ及ぼす影響の部分拘束型アンサンブル実験による調査

課題責任者

野口 峻佑

九州大学 大学院理学研究院 地球惑星科学部門

著者

野口 峻佑^{*1,2}

^{*1}九州大学 大学院理学研究院 地球惑星科学部門, ^{*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: アンサンブル予報, ナudging, 成層圏突然昇温, プリユーワー・ドブソン循環, ハドレー循環

1. はじめに

本課題「成層圏対流圏結合と地球システム変動の予測可能性」では、社会的インパクトの大きな時間スケールでの成層圏から対流圏への下方影響過程が、どの程度予測可能であるのかを、数値実験によって明らかにすることを目標の1つとしている。

冬季に形成される成層圏周極渦の崩壊現象である成層圏突然昇温 (SSW) は、成層圏-対流圏結合系として最大規模の変動をもたらす極端イベントであり、その生起後の下方影響の再現は、季節内から季節 (S2S) スケールにおける対流圏・地表状態の予測可能性の向上に寄与するとされる。近年では、従来からの中高緯度における環状モードの偏向だけでなく、熱帯域の対流活動への影響を通じた過程も示唆されており、さらに関心を集めている。しかしながら、SSW の下方影響は、確率的であり、事例による個性も強いいため、我々はその影響の度合いを完全に把握できているとは言い難い。また、SSW 自体、強非線型な現象であるために、S2S スケールの成層圏予測における大きな不確実性の原因となる。このため、実際の SSW とその後の対流圏変動との詳細な紐付けを行うために、SSW 時の成層圏循環場をナudgingにより拘束したアンサンブル積分を実施し、それにより生じる対流圏・地表の循環偏差を特定・評価する試みが、近年活発となってきている (e.g., Hitchcock et al. 2022 [1])。

このような流行の中で現在進行している、SNAPSI (Stratospheric Nudging And Predictable Surface Impacts) と呼ばれる国際プロジェクト (相互比較実験) への対応も視野に入れ、本課題では、気象庁気象研究所のモデルによる成層圏循環ナudging実験を進めている。本稿では、この相互比較実験において中心的課題の1つとなる、SSW が熱帯対流活動へ及ぼす影響の調査結果について紹介する。この熱帯域の影響過程は、中高緯度域の過程と比べてシグナルが小さく、影響が出やすい領域がどこかも含め、その実態の解明が進んでいない。その一因としては、この過程が、積雲対流という、モデル内で陽的に表現できていない現象の変調に依っているということが挙げられる。しかしながら、これまでに、2019年8-9月の南半球SSWを対象事例として、気象研究所の大気大循環モデル (AGCM) による成層圏循環ナudging実験がなされており、SSWと反対側 (すなわち北半球側) の対流活動が強化されるという結果が得られている

(Noguchi et al. 2020 [2])。ここでは、SNAPSIよりも長期の成層圏からの下方影響過程の評価を狙って、この先例とは異なるモデル構成・実験仕様で行った実験においても、同様の応答が得られたことを報告する。

2. 実験設定

気象研究所の地球システムモデル (MRI-ESM2.0; Yukimoto et al. 2019 [3]) を、第6次結合モデル相互比較プロジェクト (CMIP6) 時と同様の設定で走らせた。このモデルは、大気、海洋、エアロゾル、化学のコンポーネントからなる。大気コンポーネント、すなわちAGCMは、水平 T_L159 (格子間隔 110 km 程度)、鉛直80層 (上端 0.01 hPa) の解像度であり、Tiedtke ベースの積雲対流パラメタリゼーションスキームを用いている。他の設定詳細は記述論文を参照されたい。

2019年6月上旬から2021年終わりまでの、約2年半の期間を対象とするアンサンブル積分を、2種類行った。通常の予測積分 (FREE ラン) と成層圏循環場を拘束した擬似予測積分 (NUDGE ラン) である。ここでは、積分開始から3か月程度の場合における2つのランの差異について記述する。これらの共通の初期値としては、CMIP6提出のHistorical ランから分岐させて、あらかじめ大気場を再解析へと長期間 (1979年以降、40年以上) 拘束したSpin-up ランを経て、海洋循環場などを可能な限り現実に近い状態へと馴染ませたものを用意した。また、アンサンブルについては、時間ずらし法により (初期の2019年6月1日から10日までの期間で予測開始タイミングを変えることにより)、40メンバーを用意している。

NUDGE ランの循環拘束は、再解析へのナudgingの際の修正項に対して、極域成層圏においてのみ荷重を持つ係数をかけることによって実現した。荷重は、緯度60度より極側かつ10 hPa 以上で1の値を持ち、そこから対流圏および赤道域において0となるように緩やかに遷移させている。これは、長期積分結果の評価にあたって問題となる、赤道域の準二年振動・半年振動による影響と極渦変動による影響との混同を、赤道域の拘束を廃止することによって、回避することを意図したものである。また同時に、成層圏を全緯度一様に拘束していた以前の設定よりも、熱帯域の対流応答の評価を厳粛に行えるものとなっている。

3. 結果

極域の SSW に伴う Brewer-Dobson 循環の急激な強化により、熱帯域では上昇流偏差が生じ、下部成層圏から上部対流圏にかけての温度は低下する。図 1 に示した温度時系列より、この挙動が NUDGE ランにおいてよく再現されており、SSW の生起を再現していない FREE ランとの大きな差異が、極渦変動の規定のみによって、生み出されていることを確認することができる。

この対流強化に好都合な環境において、実際に活発化するのはいくつの対流であるかが問題である。図 2 に示した対流活動指標の偏差の時間緯度断面図より、温度低下が顕著であった 9 月上旬から中旬において、熱帯域のやや北半球側で、対流活動が強化されていることがわかる。これは、この時期に北半球側（夏半球側）に存在している Hadley 循環の上昇流域で対流強化が起こる（新たに対流を立たせるといふよりは、既にある程度の高さと立っている対流をさらに強化する形で、成層圏の影響は現れる）という、先例で述べられた考えと整合的である。

このように、帯状平均としては、AGCM 単体で 8 月前半開始のアンサンブル予測を行った先例での結果と、今回の実験の結果は、（その 2 か月以上前から異なるモデル構成・拘束仕様で実施したものであるにも関わらず）概ね一致していた。しかしながら、更なる調査の結果、経度も含めた対流強化域の水平分布は、若干異なってしまうこともわかった。これには、今回の実験では若干アンサンブル数が限られノイズを抑えきれていないことに加えて、ESM により予測された海面水温 (SST) 分布と実際の SST 分布とで小さくない差異が生じてしまっていることが、関係していると考えられる。SNAPSI に参加している予測システムの多くは大気海洋結合モデルであるため、SST の差異による応答特性の差異を指摘し、注意を喚起しておくことは、その結果の解釈において重要である。

4. おわりに

以上のように、先例と同様の対流応答が、異なるモデル構成・拘束仕様のアンサンブル実験においても得られ、

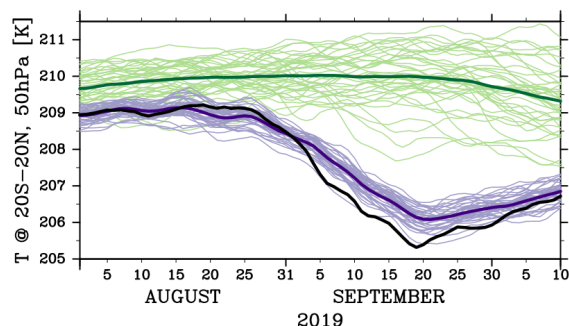


図 1: SSW に伴う熱帯域下部成層圏温度の時間発展の様子。緯度 20 度以内で領域平均した 50 hPa 温度について、NUDGE/FREE ランの結果および循環拘束に用いた再解析を、紫/緑線および黒線で示す。各ランのアンサンブル平均を各色の太線で示す。

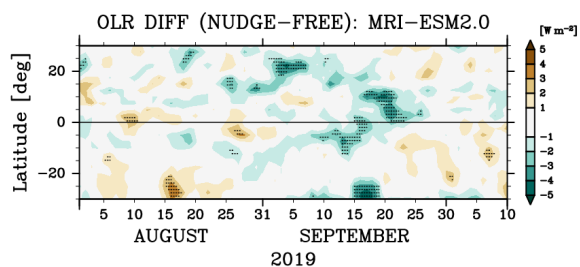


図 2: SSW に伴う熱帯域の対流活動変動の様子。外向き長波放射 (OLR) の帯状平均について、NUDGE ランの FREE ランからのアンサンブル平均偏差を示した時間緯度断面。なお、OLR は低い値ほど、対流が活発であることを表す。統計的に有意な (Welch の t -検定で 90% 以上と判定される) 偏差については、粒状模様を掛けて示す。

この事例における結果の頑健性を確認することができた。MRI-ESM の水平解像度・積雲対流スキームは、先例と同じであるため、少なくともこの設定においては、結果の再現性はそれなりに高いと言える。しかしながら、先例における積雲対流スキーム変更実験などで示されている通り、この過程はモデル設定に応じて、様々な応答詳細を示す。今後、これらの差異が生じる理由を、例えば、各システムにおける対流圏基本場の特徴や、採用している積雲対流スキームの設計に基づきながら、解き明かしていく必要がある。

また、熱帯域の対流応答のみならず、そこからの派生影響、従来からの中高緯度域の循環場変化も含めた、包括的な影響評価実験・解析を展開していく予定である。

謝辞

本研究の遂行にあたり、科学研究費助成事業 JP19K14798, JP21H01156, JP22K18743 の支援を受けた。作図には、地球流体電脳ライブラリを用いた。

文献

- [1] Hitchcock, P., Butler, A., Charlton-Perez, A., Garfinkel, et al., "Stratospheric Nudging And Predictable Surface Impacts (SNAPSI): a protocol for investigating the role of stratospheric polar vortex disturbances in subseasonal to seasonal forecasts", *Geosci. Model Dev.*, **15**, 5073-5092, 2022.
- [2] Noguchi, S., Kuroda, Y., Kodera, K., and Watanabe, S., "Robust enhancement of tropical convective activity by the 2019 Antarctic sudden stratospheric warming", *Geophys. Res. Lett.*, **47**, e2020GL088743, 2020.
- [3] Yukimoto, S., Kawai, H., Koshiro, T., et al., "The Meteorological Research Institute Earth System Model version 2.0, MRI-ESM2.0: Description and basic evaluation of the physical component", *J. Meteor. Soc. Jpn.*, **97**(5), 931-965, 2019.