

1 はじめに

1980年代以降顕著となったフロン等オゾン破壊物質による南極域での大規模なオゾン層破壊（いわゆるオゾンホール）は、南半球中高緯度の春季・夏季における地上気候に大きな影響を及ぼしていることが、観測研究や化学気候モデル等を用いた数値モデル研究により明らかになっている

[WMO/UNEP オゾン層破壊の科学アセスメント：2018]。オゾン層破壊による成層圏極渦の寒冷化とその崩壊の遅れは、成層圏-対流圏力学結合を介して対流圏西風ジェット of 極向きのシフトを引き起こすと共に、降雨域や海洋循環にも影響を及ぼしていると考えられている。一方、北極域成層圏オゾンの長期変化による地上気候への影響が現在ロバストに現れているかどうかは、近年の研究においても一致した見解は得られていない[Calvo et al., 2015; Ivy et al., 2017; Harari et al., 2019 など]。

Son et al. [2013]は、数十年スケールよりも短い季節内から季節 (S2S) スケールでオゾンが南半球の天候/気候に及ぼす影響を、オゾン衛星観測と長期再解析データ等を用いて調査した。彼らは、南極域における9月のオゾン層 (破壊) の年々変動と10月の極域の地上気圧偏差には統計的に有意な強い相関があり、その気圧偏差はオーストラリアの天候/気候にも影響を及ぼしていることを明らかにした。これは、成層圏オゾンが南半球中高緯度春季の予測可能性のソースの一つとなる可能性があることを示唆する。しかし、こうしたS2Sスケールで対流

圏気象場に及ぼす影響について着目した研究例は少なく、現在でも多くの点が未解明のままである。近年の季節予測システムの向上を鑑みると、成層圏オゾンが予測可能性の有効なソースであるのかどうかは、その精度向上を図る上でも明らかにすべき重要な研究課題である。

こうした背景を踏まえ、本研究では全球気候モデルを用いた数値実験 (ハインドキャスト実験) によって、北半球の成層圏オゾンがS2Sスケールで対流圏循環や気温場に有意な影響を及ぼしているのか調査した。今回は、北半球で生じた成層圏突然昇温 (SSW) に伴う大規模オゾン変動がもたらす対流圏力学場への影響を調査対象とした。

2 モデル実験

2003/4年及び2008/9年の北半球冬期に起こったSSW事例を対象に、気象研究所で開発した最新の全球気候モデルMRI-ESM2.0 [Yukimoto et al., 2019]を用いてアンサンブルハインドキャスト実験を行った。MRI-ESM2.0は、地表面から中層大気までの詳細なオゾン化学過程とその放射-力学過程との相互作用を考慮できるモデルである。本研究では、成層圏オゾン変動による放射-力学影響を定量的に評価するため、表1に示す3種類のハインドキャスト実験を行った。

表1. ハインドキャスト実験概要

Experiment	Ozone setting
ChemON	Interactive
ChemRA	Prescribed MERRA2 reanalysis anomaly (+ model climatology)
ChemOFF	Prescribed model climatology

ChemON 実験では、オゾンも含む大気化学過程を気象場とともにインタラクティブに予測した。一方 ChemOFF (基準) 実験では、大気化学過程を計算せずにモデル気候値 (月平均) をオゾン濃度の境界値として大気モデルに与えた。ChemRA 実験でも大気化学過程は計算せずに、MERRA-2 オゾン再解析データ [Wargan et al., 2017] から求めた濃度偏差 (日平均) にモデル気候値を加えたオゾン境界値を作成し、それを大気モデルに与えた。ChemON (または ChemRA) と ChemOFF 実験間の差をとることで、予測された (または観測された) オゾン偏差が対流圏循環や気温に及ぼす影響を定量的に評価することができる。これら3つの実験におけるオゾン濃度の気候値は一致していることに注意されたい。

アンサンブル予測手法としては、Time-Lagged Average Forecast (LAF) 法を用いた。SSW 発生日の10日前から3時間毎に初期時刻をずらした個々のメンバーによる再予報を計80メンバー実施した。大気場の初期値として JRA55 [Kobayashi et al., 2015] を用いた。また大気化学場の初期値 (ChemON 実験) は、JRA55 でナッジングし

た MRI-ESM2.0 による歴史実験結果を用いた。なおオゾン初期値については、歴史実験から求めた濃度偏差にモデル気候値を加えて作成した。

3 結果

図1に示すように、どの実験においても、初期時刻が最も古い8メンバー (緑線) 以外のメンバー (赤線) は、SSW の発生とその後の成層圏極渦の回復を概ねよく再現している。そのため、これ以降の解析では、SSW を再現した72メンバーのみを用いた。また、SSW 発生の予測に関しては実験間での系統的な差は見られなかった。

図2右上に、ChemRA 実験における、SSW 発生後30日間平均したオゾン濃度の偏差 (つまり ChemOFF 実験との差) を示す。SSW に伴うブリューワードブソン循環の強化により、低緯度域から極域への物質輸送が強まり極域成層圏ではオゾン濃度が増加し正偏差、一方中緯度では減少し負偏差になっている。また下部成層圏 (LS) では中緯度からの負偏差が、LS での子午面輸送の経路に沿って高緯度 (~北緯 70°) まで侵入している。ChemON 実験 (図2左上) で予測されたオゾン偏差場は、再解析 (ChemRA 実験) で見られるようし

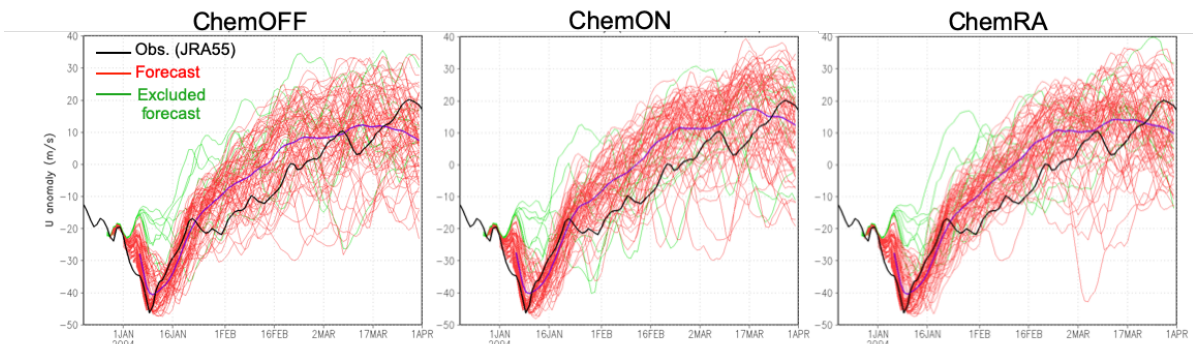


図1. ChemOFF (左図), ChemON (中図), ChemRA (右図) 各実験における、2003/4成層圏突然昇温時の帯状平均東西風偏差時系列 (高度10hPa, 北緯60°)。黒線はJRA-55再解析値。赤線と緑線は、それぞれの実験における各アンサンブルメンバーの結果を示し、そのうち緑線は以降の解析に使用しなかったメンバー。紫線は、赤線で示されたメンバーのアンサンブル平均。

た特徴を良く再現している。図2下段で示されている短波放射加熱率 (SWHR) の差の分布は、両実験共に概ねこのオゾン偏差場と太陽

放射照度によって決まっていることが分かる。このような成層圏オゾン(加熱)偏差は、数ヶ月間持続した(図略)。なお極夜域では、

オゾン濃度の正偏差は大きい、太陽放射が到達しないため短波加熱とその偏差はない。

図3に、両実験における下部対流圏(高度700 hPa)気温への影響を示す。2004年の1月下旬(予報開始後約20日後)から2月末にかけて、北半球中緯度(約北緯25°~北緯50°)の対流圏下層において気温が~0.5 Kほど高くなる傾向にあり、統計的に有意な気温差となる日が間欠的に存在している。一方、高緯度域(北緯60°~北緯90°)においては、有意な気温応答のシグナルは2月中旬まで見られないが、2月下旬においては有意な低温が間欠的に見られる。これら対流圏下層における気温応答の特徴は、ChemONとChemRAの両実験で共通に見られる。図4上段(左図と中図)で、2004年2月平均の带状平均気温の緯度-高度断面を示す。ChemONとChemRA共に、下部成層圏の低中緯度域では有意に低温になっている一方、図3で見られた対

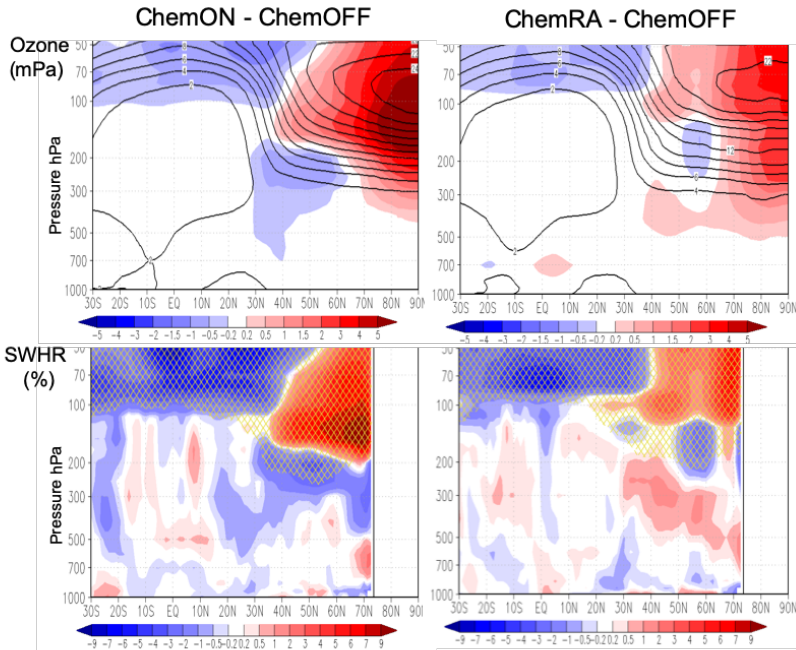


図2. 带状平均オゾン濃度(上図)及び短波放射加熱率(下図)の緯度-高度断面(SSW発生後30日平均)。カラーシェイドはChemOFF実験とのアンサンブル平均値の差を示す。左図はChemON実験、右図はChemRA実験との差。コンター(上図のみ)は、それぞれの実験のアンサンブル平均値、ハッチ(下図のみ)は95%で統計的に有意な差を示す。

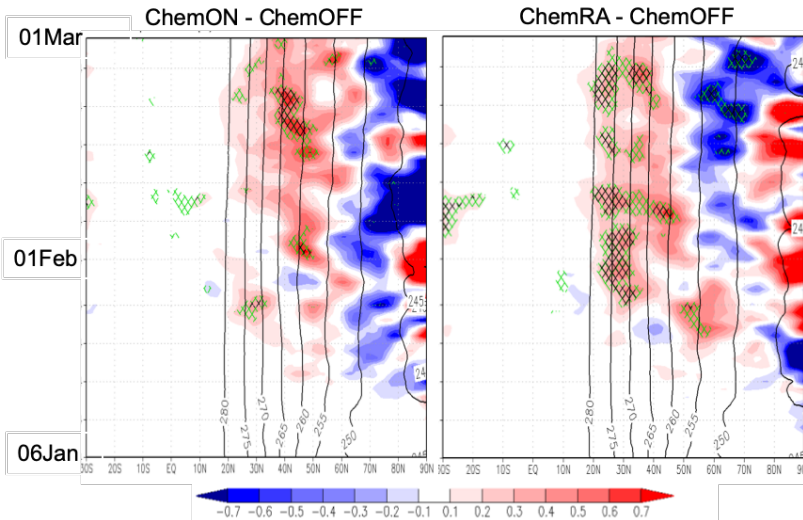


図3. 高度700hPaにおける带状平均気温緯度-時間断面(2004年1月6日から2004年3月1日)。カラーシェイドは、ChemOFF実験とのアンサンブル平均値の差を示す。左図はChemON実験、右図はChemRA実験との差。ハッチは90% (緑)、95% (黒)で統計的に有意な差。コンターはアンサンブル平均値。

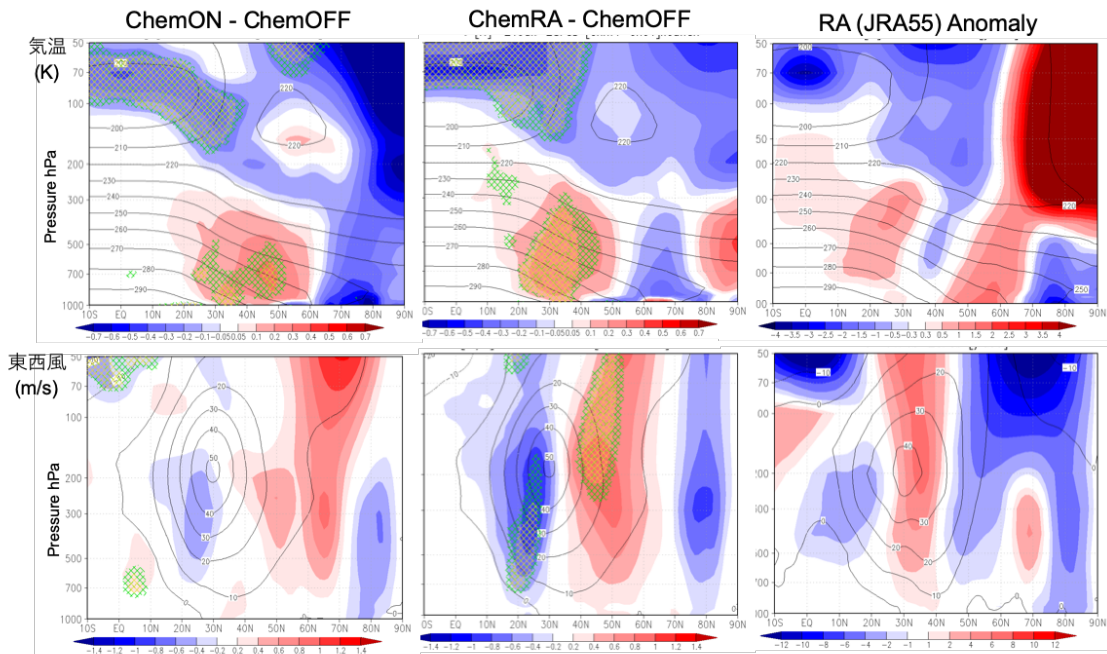


図4. 気温(上段)と東西風(下段)の帯状平均緯度-時間断面(2004年2月平均)。カラーシェイドは、ChemOFF実験とのアンサンブル平均値の差を示す。左図はChemON実験、右図はChemRA実験との差。ハッチは90% (緑)、95% (黄)で統計的に有意な差。コンターはアンサンブル平均値。

流圏中緯度域での高温傾向はほぼ対流圏全体の高度域に広がっていることが分かる。この対流圏中緯度域での高温化がそこでの南北気温傾度を緩めることで、亜熱帯ジェットの極向きシフトをもたらしていることも図4下段(左図と中図)から分かる。これら気温や東西風の応答は、その大きさや統計的な有意性に違いはあるものの、ChemONとChemRAの両実験において共通に見られている。図4右を見ると、JRA55再解析における東西風偏差も亜熱帯ジェットが極向きにシフトしており、ChemON/ChemRA実験における応答と同傾向にある。これは、成層圏オゾン変動による対流圏力学場への影響が観測された東西風や気温の偏差場に(正に)寄与していた可能性があることを示している。

このような成層圏オゾン変動に対する対流圏力学場の応答をもたらす影響メカニズムの解明については今後の課題となっている。

その一つとして考えられるのは、下部成層圏付近のオゾン加熱偏差によって生じる渦位偏差が中緯度の対流圏/成層圏で高気圧性/低気圧性循環を強め、対流圏/成層圏での高

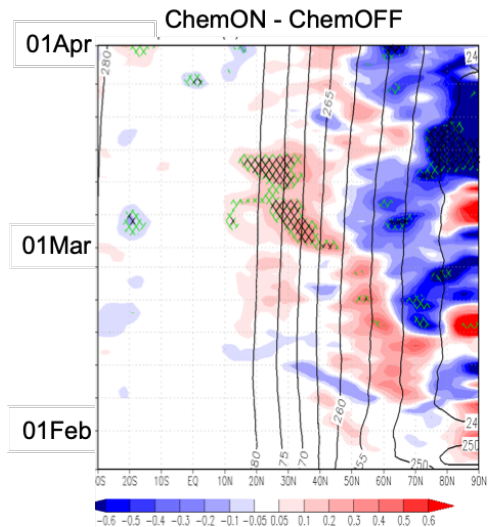


図5. 図3と同様。ChemOFF実験とのアンサンブル平均値の差を示す。ただし2008/9年冬季のSSW事例(2009年1月20日から2009年4月1日の期間)。

温/低温化をもたらすことが挙げられる。

図 5 では 2008/9 年冬期の SSW 事例における対流圏下層の気温応答を示している。この事例においても、ChemOFF 実験と比べて ChemON 実験では、2003/4 年 SSW 事例と同様、対流圏中緯度で高温傾向となっている。また高緯度域においても、2003/4 年の SSW 事例と同様に 2 月下旬頃から統計的に有意な低温傾向が現れている。

4 結論

オゾン（化学）の取り扱いを変えた全球モデルを用いてアンサンブルハインドキャスト実験を実施し、SSW 発生後生じた大規模なオゾン（加熱）分布の偏差によって、対流圏循環や気温場に有意な影響が S2S スケールで現れるか調査を行った。オゾンを気象場とインタラクティブに予測した実験及び観測された（再解析）オゾン偏差を与えた実験どちらにおいても、オゾン気候値を与えた実験と比較して、予測開始後数日後から継続的に対流圏中緯度は高温傾向となり、亜熱帯ジェットは極向きにシフトした。また、このような対流圏循環や気温への影響は、観測された偏差場に（正の）寄与をもたらしていた。このような今回行った数値実験結果から、北半球（冬期）においても成層圏オゾンは予測可能性の一つのソースとして有効であることが示唆された。

参考文献

- Calvo, N., L. M. Polvani, and S. Solomon (2015), On the surface impact of Arctic stratospheric ozone extremes, *Environ. Res. Lett.*, 10, 094003.
- Harari, O. et al. (2019), Influence of Arctic stratospheric ozone on surface climate in CCMi models, *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 9253-9268.
- Ivy, D. J., S. Solomon, Calvo, N., and Thompson, D. W. (2017), Observed connections of Arctic stratospheric ozone extremes to Northern Hemisphere surface climate, *Environ. Res. Lett.*, 12, 024004.
- Kobayashi, S. et al. (2015), The JRA-55 Reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, 93, 5–48.
- Son, S.-W., A. Purich, H. H. Hendon, B.-M. Kim, and L. M. Polvani (2013), Improved seasonal forecast using ozone hole variability?, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 6231–6235.
- Wargan, G. Labow, S. Frith, S. Pawson, and G. Partyka (2017), Evaluation of the ozone fields in NASA's MERRA-2 reanalysis. *J. Climate*, 30, 2961–2988.
- World Meteorological Organization: Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2018 (2018), Executive Summary, Global Ozone Research and Monitoring Project Rep. No. 58.
- Yukimoto, S. et al. (2019), The Meteorological Research Institute Earth System Model version 2.0, MRI-ESM2.0: Description and basic evaluation of the physical component. *J. Meteor. Soc. Japan*, 97, [doi:10.2151/jmsj.2019-051](https://doi.org/10.2151/jmsj.2019-051).