

# 成層圏オゾンが季節内から季節スケールで対流圏循環に及ぼす影響について

出牛真（気象研究所）

## 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春季の大規模なオゾン層破壊（いわゆるオゾンホール）は、20世紀終盤以降の南半球夏季における気候変動の主要要因となっていることが多数の観測研究や数値モデル研究により明らかになっている（e.g. WMO, 2018）。南極オゾンホールにより成層圏極渦が強化されると、成層圏-対流圏力学結合を通して対流圏夏季の南半球環状モード（SAM）の極性が正に強まり、これと連動して南半球の対流圏ジェットが極向きにシフトする（e.g. Previdi and Polvani, 2014）。このようなSAMの長期変化によって、南半球夏季の地上気温や降水も半球規模で長期変化していることが明らかにされている（e.g. Thompson et al., 2011; Kang et al., 2011）。近年の観測データや再解析データからは、2000年頃以降のオゾンホールの縮小傾向と同期して夏季のSAM指数（南半球対流圏ジェット）の正トレンド（極向シフト）も停止し、僅かに逆向きになっていることが示されている（Banerjee et al., 2020）。

数十年スケールの長期変化だけでなく、季節内から季節（S2S）スケールのオゾン変動と対流圏の気候/天候との関係について着目した研究も、近年幾つかなされている。南半球では、南極域春季オゾン層の年々変動と中高緯度域における夏季地上気圧・気温偏差の間に統計的に有意なラグ相関があることが、衛星観測と再解析データから明らかにされている（Son et al., 2013; Bandoro et al., 2014; Gillet et al., 2019）。また北半球では、北極域春季（3月）のオゾン層の年々変動とヨーロッパ、ユーラシ

ア、北米における4、5月の地上気温偏差の間にも有意なラグ相関があることも示されている（Ivy et al., 2017; Stone et al., 2019）。これらの結果は、南/北半球における春季高緯度域の成層圏オゾン変動の情報が、統計的な季節予測を行う上では有益なものとなり得ることを示している。しかし、これらの統計的なラグ相関関係からだけでは、オゾン層変動が1~2ヶ月後の地上気圧や気温偏差の（一つの）要因となっているのか、その因果関係を明らかにすることは出来ない。

そこで本研究では、全球気候モデルを用いた数値実験によって、春季高緯度域のオゾン層変動がS2Sスケールで夏季の対流圏循環場に有意な影響を及ぼすのか調査を行った。このような調査は、季節予測技術の向上を図る上で明らかにすべき重要な研究課題となっている。

## 2 モデル実験

本研究では、2019年9月に南半球で発生した成層圏突然昇温（SSW）事例について調査を行った。SSWに伴う大規模オゾン変動が放射過程を介して対流圏循環場へ及ぼす影響を調査するため、気象研究所で開発した地球システムモデル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気候モデルである。オゾン濃度変動（偏差）が及ぼす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
Cntl (ChemOFF)	Prescribed monthly ozone model climatology
ChemON	Prognostic ozone (interactive chemistry)
ChemRA	Prescribed daily reanalysis ozone anomaly (+ monthly ozone model climatology)

Cntl (基準) 実験と ChemRA 実験では、オゾン は予測せずに濃度境界値を大気モデルに与えた。Cntl では月平均モデル気候値を境界値として与え、ChemRA ではモデル気候値にオゾン偏差場を加えたものを境界値とした。具体的には、MERRA-2 オゾン再解析(Wargan et al., 2017) から求めた日平均偏差を月平均モデル気候値に加えた値を、ChemRA の境界値とした。一方 ChemON では、オゾン化学-放射-力学過程をインタラクティブに結合しながらモデル内でオゾン濃度を予測した。ChemON (あるいは ChemRA) と Cntl 間の差をとることで、モデルで予測された (あるいは観測された) オゾン濃度偏差が対流圏循環場等に及ぼす影響を定量的に抽出した。なお上記3実験ではオゾン濃度気候値が一致するため、実験間の差をとるとオゾン偏差による影響のみが抽出されることに注意されたい。

アンサンブル予測手法としては、ラグ平均予報法 (Time-Lagged Average Forecast; LAF) を用いた。SSW による昇温ピーク日の10日前から初期時刻を3時間毎にずらしたハインドキャスト実験を計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、ChemON 実験における化学場の初期値には、JRA55 で大気ナudgingをかけた MRI-ESM2.0 による歴史実験結果を用いた。

### 3 結果

今回実施した実験では、ハインドキャストの予測開始日を SSW の発生日と十分近くにしたため、

全アンサンブルメンバーが SSW の発生 (による南極域の昇温) を予測した。ChemON (図1) だけでなく Cntl や ChemRA も SSW の発生を全メンバーが予測し、この点においては実験間で系統的な差は見られなかった (図省略)。また観測された SSW 後の南極成層圏気温の時間発展を、モデルは良く予測出来ており系統的なずれは小さい (図1)。

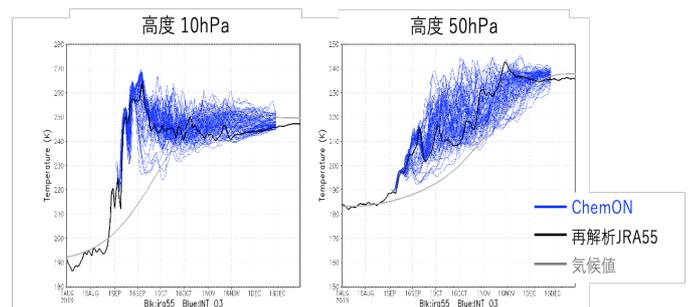


図1. 2019年8月~12月の南極(90-80S)成層圏気温の時系列図。黒線はJRA-55再解析値 (灰色線はJRA-55から求めた気候値)。青線はChemON実験における各アンサンブルメンバーの結果。

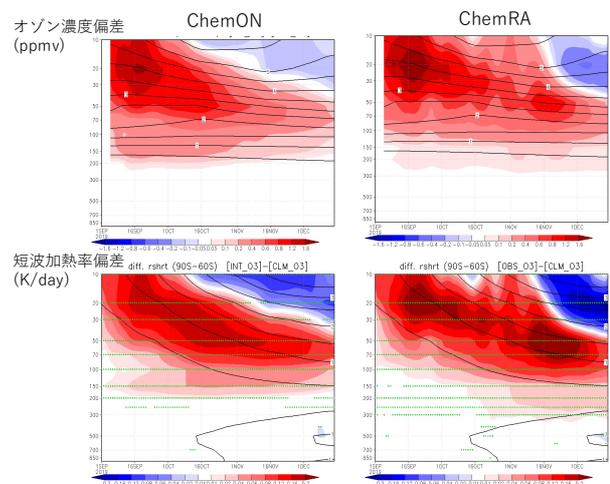


図2. 南極域 (90-60S) オゾン濃度 (上図) 及び短波加熱率 (下図) 偏差の時間-高度断面図。左図はChemON実験、右図はChemRA実験のアンサンブル平均値。ただしChemRAのオゾン濃度偏差は、同一の境界値を全アンサンブルメンバーに与えた値。期間は2019年9月1日から12月15日。

図2上段に、ChemON/ChemRA で予測した/与えた南極域オゾン濃度偏差の時間-高度断面を示す。オゾン再解析データ (ChemRA; 右上図) によると、SSW の発生により9月初旬から中旬にかけて中部成層圏を中心にしてオゾン濃度が大幅に増加し、その後このオゾン正偏差は徐々に下降しながら成層圏で数ヶ月間持続した。ChemON で予測されたオゾン (左上図) は、この再解析で見られたオ

ゾン濃度の時間変動を定量的に良く予測している。また ChemON と ChemRA 共に、オゾン濃度が正偏差となっている領域において短波放射加熱率の正偏差が生じている (図 2 下段)。成層圏での短波放射加熱率の大きさは概ねオゾン濃度と太陽放射照度によって決まっている。

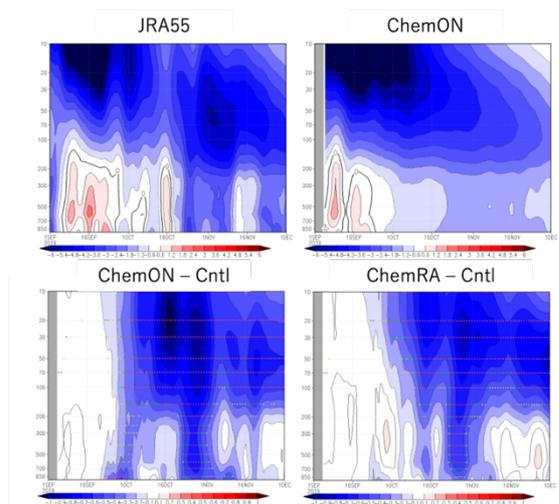


図3. (上図) 南半球環状モード (SAM) 指数偏差の時間-高度断面図。期間は2019年9月1日から12月10日。左図がJRA55、右図がChemON実験のアンサンブル平均値。(下図) 上図と同様。ただしSAM指数の実験間の差を示す。左図がChemON実験とCntl実験の差。右図がChemRA実験とCntl実験の差。

図 3 に SAM 指数偏差の時間-高度断面を示す。再解析データ (左上図) が示すとおり、SSW 後は成層圏 SAM 指数の負偏差 (弱い極渦) が持続するとともに、10 月半ば以降にはその偏差が対流圏まで下降し (変動はありながらも) 概ね 12 月まで持続している。ChemON のアンサンブル平均 (右上図) は、上記のような観測された SAM の変動を、成層圏だけでなく対流圏でも概ね良く予測している。オゾン濃度 (加熱) 偏差が SAM の変動に及ぼす影響を抽出するため、ChemON (または ChemRA) と Cntl の SAM 指数アンサンブル平均値の差をとった (図 3 下段)。ChemON と ChemRA 共に、成層圏では 10 月以降 Cntl より持続的に強い SAM 指数の負偏差 (より弱い極渦) を予測している。また 10 月下旬から 11 月初旬にかけて、SAM 指数負偏差の対流圏への下

降を有意により強く予測している。この期間の ChemON の対流圏 SAM 指数は Cntl より  $-0.5$  程度差があり、再解析が示す SAM 指数に近づく。つまり、オゾンをインタラクティブに予測した (あるいはオゾン再解析を境界値として与えた) 実験では、この時期の対流圏 SAM の変動をより良く予測出来たことを示している。なお ChemRA よりも ChemON のほうが、若干強くこの期間の対流圏 SAM 指数の負偏差を予測している。

図 4 に、10 月下旬から 11 月初旬の期間で平均した帯状平均東西風 (左図)、質量流線関数 (中図)、E-P フラックス収束 (右図) の緯度-高度断面を示す。質量流線関数及び E-P フラックス収束の解析には、等温位面上の質量重み付き平均法 (Iwasaki, 1992; Tanaka et al., 2004) を用いた。再解析の東西風偏差 (左上図) が示すとおり、この期間は対流圏 SAM の極性が負になっていることと連動して対流圏ジェットが低緯度向きにシフトし、高緯度 (70-50S) では  $3\sim 9$  m/s の東風偏差、中緯度 (40-20S) では  $3\sim 6$  m/s の西風偏差となっている。オゾンをインタラクティブに予測すると (図 4 下段)、この東西風偏差パターンを強化するように働き、高緯度で東風偏差を強め ( $0.5\sim 1.5$  m/s) て、中緯度で西風偏差を強め ( $0.2\sim 1.0$  m/s) ている (左下図)。また上部対流圏中高緯度 (60-40S) において E-P フラックス

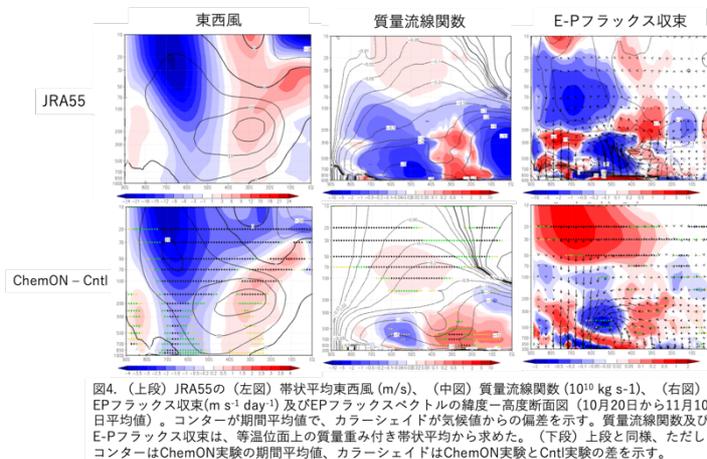


図4. (上段) JRA55の (左図) 帯状平均東西風 (m/s)、(中図) 質量流線関数 ( $10^{10}$  kg s $^{-1}$ )、(右図) EPフラックス収束 ( $m s^{-1} day^{-1}$ ) 及びEPフラックスベクトルの緯度-高度断面図 (10月20日から11月10日平均値)。コンターが期間平均値で、カラーシェイドが気候値からの偏差を示す。質量流線関数及びE-Pフラックス収束は、等温位面上の質量重み付き帯状平均から求めた。(下段) 上段と同様、ただしコンターはChemON実験の期間平均値、カラーシェイドはChemON実験とCntl実験の差を示す。

収束が強まる(右下図)ことで対流圏中緯度において反時計回りの残差子午面循環が強化され(中下図)ている。この循環の強化は、SAMの負の極性を強めるように働き、オゾンが及ぼすSAMへの影響に対して正の力学フィードバックが生じていることがわかる。

#### 4 結論

SSWに伴う成層圏オゾン変動が、放射過程を介してS2Sスケールで対流圏循環に及ぼす影響を、気象研究所の地球システムモデルを用いて調査した。2019年南半球SSW事例について行ったアンサンブルハインドキャスト実験の結果は、以下のとおりであった。(1)SSW後の成層圏オゾンの大規模変動を数ヶ月間程度十分な精度で予測出来た。(2)化学-放射-力学結合をインタラクティブにしてオゾン进行を予測することで、SAM偏差の対流圏への下方伝播をより強く(良く)予測した。これらの結果は、成層圏オゾンが季節予測可能性のソースとなり得ることを示唆している。今回は1事例の調査のみであったため、今後は北半球における事例など更に調査を積み重ねていく必要がある。

#### 参考文献

- Banerjee, A., J.C. Fyfe, L.M. Polvani, D. Waugh, and K.-L. Chang (2020), A pause in Southern Hemisphere circulation trends due to the Montreal Protocol. *Nature*, 579(7800), 544–548, doi:10.1038/s41586-020-2120-4.
- Bandoro, J., S. Solomon, A. Donohoe, D.W. Thompson, and B.D. Santer (2014), Influences of the Antarctic ozone hole on Southern Hemispheric summer climate change, *J. Clim.*, 27 (16), 6245–6264. doi:10.1175/JCLI-D-13-00698.1
- Gillett, Z. E. et al. (2019), Evaluating the Relationship between Interannual Variations in the Antarctic Ozone Hole and Southern Hemisphere Surface Climate in Chemistry–Climate Models, *Journal of Climate*, 32(11), 3131–3151. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0273.1>
- 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. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa57a4>
- Iwasaki, T. (1992), General circulation diagnosis in the pressure-isentrope hybrid vertical coordinate. *J. Meteor. Soc. Japan*, 70, 673–687.
- Kang, S. M., Polvani, L. M., Fyfe, J. C., and Sigmond, M. (2011), Impact of polar ozone depletion on subtropical precipitation, *Science*, 332, 951–954. <https://doi.org/10.1126/science.1202131>
- Kobayashi, S. et al. (2015), The JRA-55 Reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, 93, 5–48.
- Previdi, M. and Polvani, L.M. (2014), Climate system response to stratospheric ozone depletion and recovery. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 140: 2401–2419. <https://doi.org/10.1002/qj.2330>
- 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.
- Stone, K. A., Solomon, S., Kinnison, D. E., Baggett, C. F., and Barnes, E. A. (2019), Prediction of Northern Hemisphere regional surface temperatures using stratospheric ozone

information. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, 5922–5933.  
<https://doi.org/10.1029/2018JD029626>.

Tanaka, D., T. Iwasaki, S. Uno, M. Ujiie, and K. Miyazaki (2004), Eliassen–Palm flux diagnosis based on isentropic representation. *J. Atmos. Sci.*, 61, 2370–2383.

Thompson, D. W. J., Solomon, S., Kushner, P. J., England, M. H., Grise, K. M., and Karoly, D. J. (2011), Signatures of the Antarctic ozone hole in Southern Hemisphere surface climate change. *Nature Geosci* 4, 741–749.  
<https://doi.org/10.1038/ngeo1296>

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/jmsi.2019-051](https://doi.org/10.2151/jmsi.2019-051).