



多様な時空間スケールでの気象学・気候学・大気科学 / 中緯度域の海洋変動と大気・生物地球化学への影響

大アンサンブル実験による 海表面条件の南極渦や 波伝播への影響の解析

山下陽介¹⁾
秋吉英治¹⁾
井上誠²⁾

**Analysis of the role of sea-surface conditions
in the Antarctic polar vortex and associated
wave forcing using a large-member ensemble
simulation**

**Yousuke Yamashita, Hideharu Akiyoshi,
Makoto Inoue**

1) 国立環境研究所
2) 秋田県立大学

南極域の成層圏では、通常、冬季に現れる極渦という低気圧の中で普段は大規模なオゾン層破壊が起こり春季のオゾンホール出現につながる。稀に成層圏突然昇温が発生し、南極渦が弱まってオゾン層破壊にも影響することがある。そのような年の海面水温を与えた実験を行い、気候値的な海面水温を与えた実験と比較した結果を紹介する。

1. はじめに

冬季の極域は一日中太陽光が当たらない極夜となっているため、極域成層圏が低温となり極周辺に強い西風で特徴付けられる極渦という低気圧が現れる。このように極渦は放射の南北差の影響を受けて形成されるため、平均的な極渦は秋季から冬季にかけて強くなり、冬季から春季にかけて弱くなる時間変化をしている(図1 青太線)。対流圏では惑星スケールの波活動(惑星波)があり、こうした惑星波が対流圏から成層圏に伝播してきて極渦を不安定にすることにより、極域の気温が数日の間に数十度も上がる成層圏突然昇温(sudden stratospheric warmings: SSW)が引き起こされることがある。それによって極渦が壊れ、極域が低気圧ではなく高気圧になってしまうこともある。北半球では、こうした大規模なSSW(大昇温)が2回の冬に1回くらいの割合で発生する(e.g. Labitzke 1977; Naujokat 1981; Shiotani *et al.* 1993; Butler *et al.* 2017)。なお世界気象機関(World Meteorological Organization: WMO)の定義では、極の10 hPa高度(上空約30 km)の気温が緯度60度の気温よりも高くなる場合に小昇温、さらに10 hPa高度の西風が緯度60度で東風に変わる場合に大昇温とされる。

一方、南半球では、北半球のように惑星波の成因となる大規模な起伏や大陸と海洋のコントラストが少ないため、惑星波の強度が弱く極渦が比較的安定している。極渦を境に内外の物質の移動が抑制されるため、冬季の間に極渦の中で塩素化合物や臭素化合物が塩素分子や臭素分子などに変換され、弱い太陽光の下で塩素原子や臭素原子に分解されることで、毎年春季のオゾンホール出現に

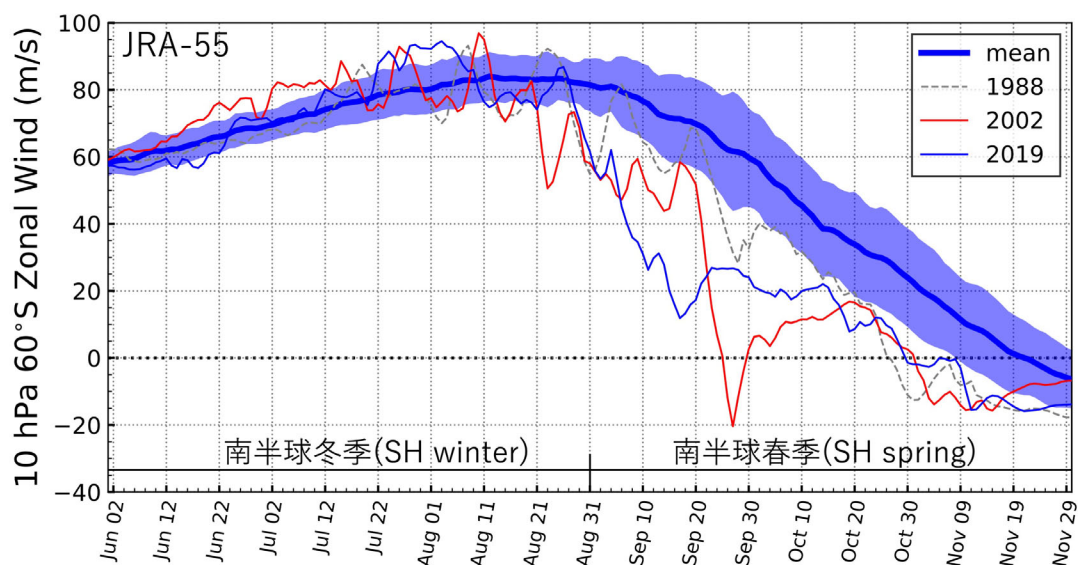


図1 JRA-55から作成した南極渦強度の指標となる南緯60度、10 hPa高度の東西風の時間変化(単位は m s^{-1})。太い青線が1979~2021年平均で、陰影が年々変動の幅(1 σ)。灰色破線は1988年、赤細線は2002年、青細線は2019年の値を表す。Yamashita *et al.* (2023) のFig. 1を再掲(改)。

つながる。南半球冬季の終わりから春季にかけては、通常、ゆっくりと極渦強度が低下するが、稀に大きく極渦強度が低下する年がある(図1細線)。これまでの観測によると、そのような年として1988年、2002年、2019年が見つかっており、それぞれ、1988年に小昇温、2002年に大昇温、2019年に小昇温が発生していた(Hirota *et al.* 1990; Hio and Yoden 2005; Hu 2020; Shen *et al.* 2020)。またこれらの年では、SSWの発生後に継続して極渦が平均よりも弱いまま推移し、夏極の東風が変わる最終昇温が例外的に早かった。衛星観測があり南半球成層圏データの信頼性が高くなった1979年以降で最終昇温が早かった3例は、これら1988年の10月27日、2019年の10月30日、2002年の11月1日である(図1)。

大昇温が起こった2002年には9月下旬に、小昇温が起こった2019年には8月末に南極域成層圏の気温が上昇し極渦強度が低下し始めており、その時期には対流圏から成層圏に伝播する惑星波が卓越していた(図2)。なお、2002年には東西波数2、

2019年には波数1の惑星波の寄与が大きく、兩年とも亜熱帯太平洋の対流活動により励起された波が成層圏に伝播していたことが観測結果から解析されている(Shen *et al.* 2020; Lim *et al.* 2021; Nishii and Nakamura 2004)。Shen *et al.* (2020)は、2019年のSSWイベント時には対流圏で見られた南極大陸周辺のロスビー波(circumpolar Rossby waves)が成層圏に伝播してきたことを解析しており、その波はオーストラリア東側の亜熱帯太平洋の対流活動により励起されていたことを議論している。

このように、海洋上の対流活動が成層圏に伝播する波を大きく増大させることが、これら2002年、2019年の観測から示唆されている。そこで、こうしたSSWの発生した年の海表面温度(Sea Surface Temperature: SST)を大気の下境界条件として与えた実験を行うことで、海洋の南極渦やオゾン層への影響を調べようと考えた。

本稿では、Yamashita *et al.* (2023)を元に、2章で実験設定、3章で解析結果、4章で全体のまとめと議論、今後の課題を、おわりにとして記載した。

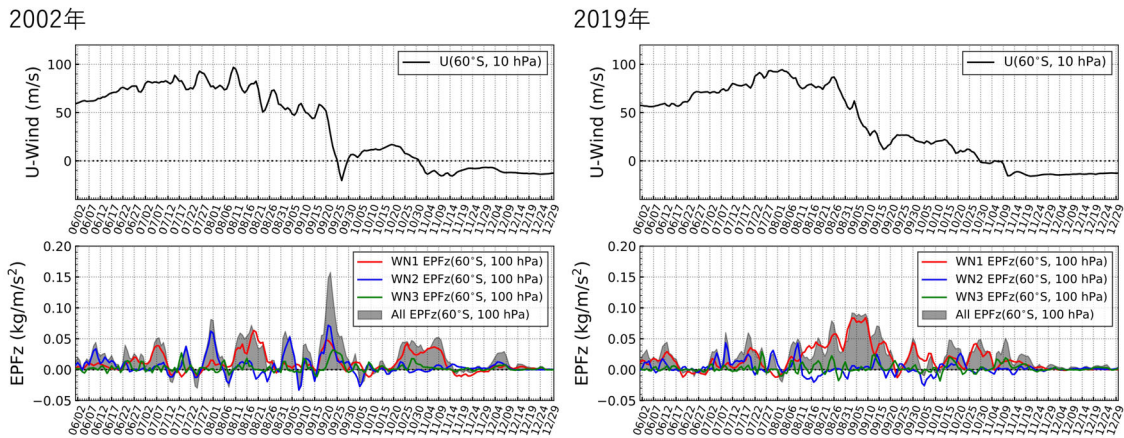


図2 JRA-55 から作成した (左) 2002 年, (右) 2019 年の南緯 60 度, 10 hPa 高度の東西風の時間変化, および, 対流圏から成層圏への波伝播の指標となる南緯 60 度, 100 hPa 高度の EP フラックス鉛直成分 (赤: 東西波数 1 成分, 青: 波数 2 成分, 緑: 波数 3 成分, 灰色の陰影: 全波数成分, 単位は $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}$).

Experiments	SST, Sea ice	Atmospheric nudging	Solar flux	GHG, ODS
CNTL	1991–2020 mean	No	1960–2000 mean	2000
E2002	2002	No	1960–2000 mean	2000
E2019	2019	No	1960–2000 mean	2000
E2019Trop	2019	Troposphere	1960–2000 mean	2000

表1 実験設定, Yamashita *et al.* (2023) の Table 1 を再掲.

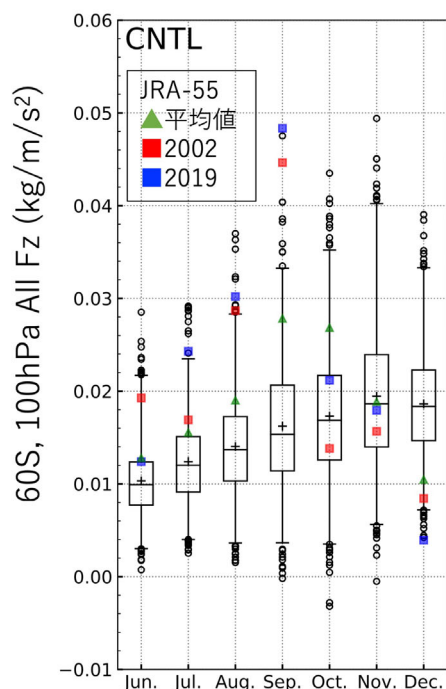
2. 実験設定

オゾン層への影響を調べるためには, 大気の流れや放射などを表現する気候モデルの計算に加えて, オゾンに関連した大気微量成分の化学反応や輸送などの計算が必須となるため, 国立環境研究所で開発されてきた MIROC3.2 化学気候モデル (chemistry-climate model: CCM) (Akiyoshi *et al.* 2016) を用いることにした. このモデルは水平解像度 T42 (約 300 km), 鉛直 34 層でモデルの上端は 80 km (約 0.01 hPa) である.

南極渦は安定しているため, SSW のような稀に起こる現象に対して海洋の影響を検出するためには, 多くのアンサンブル実験が必要となる. 全ての年を調べるには膨大な計算時間が必要なため, 極渦強度の低下が特に大きかった 2002 年と 2019 年に絞って, それぞれの年の SST や Sea ice を与えた 1000 年分の大アンサンブル実験を行った

(表 1). 下部境界条件として与えた SST や Sea ice は, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) の月平均 optimum interpolation (OI) SST v.2 (Reynolds *et al.* 2002) を用いた. 以降, 2002 年のものを与えた実験を「E2002」, 2019 年のものを与えた実験を「E2019」と表記する. なお 1988 年については, 極渦強度の低下が他の 2 年よりも小さいため除外した. 標準実験 (以降「CNTL」と表記) として, SST を 1991–2020 年の 30 年間の各月平均値に設定した実験を行った. なお全ての実験に共通して, 大気中の温室効果ガス (greenhouse gases: GHGs) 濃度とオゾン破壊物質 (ozone-depleting substances: ODSs) の地表濃度を 2000 年の平均値に固定し, 太陽フラックスは 1960–2000 年平均値を用いた. 海洋条件以外は全て同じなので, CNTL からの差が海洋の影響によるものと考えられることができる. 実験は 1010 年間行い, 最初の 10 年分はスピニアップとして除外し, 残り 1000 年分

波伝播の指標となる60S, 100 hPaのEPフラックス鉛直成分



極渦強度の指標となる60S, 10hPa東西風

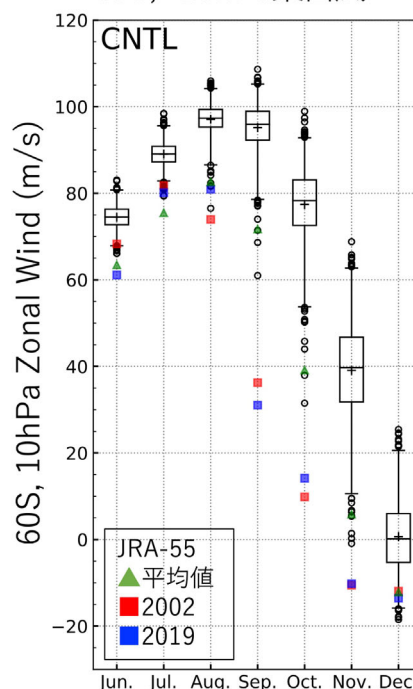


図3 CNTLから作成した(左)南緯60度, 100 hPa高度のEPフラックス鉛直成分, および, (右)南緯60度, 10 hPa高度の東西風の箱ひげ図. 平均値は+, 中央値は横線, 箱は25~75%, ひげの範囲は1~99%, 外れ値は丸で表示. JRA-55の平均値(1979~2021年)を緑三角, 2002年の値を赤四角, 2019年の値を青四角で重ねた. Yamashita *et al.* (2023) のFig. 2a, Fig. 3を再掲(改).

のアンサンブルを用いた.

海洋に起因しない対流圏の大気条件の影響を調べるため, 対流圏の1000~300 hPaまで Japanese 55-year Reanalysis (JRA-55; Kobayashi *et al.* 2015)の東西風, 南北風をナッジングした実験 (E2019Trop) も行った.

なお, 本研究に用いたモデルデータは, 国立環境研究所の地球環境データベースで公開している (Yamashita *et al.* 2022; <https://doi.org/10.17595/20221215.001>).

3. 解析結果

海洋の条件が対流圏から成層圏に伝播する波にどのように影響しているか調べるため, 対流圏か

ら成層圏への波伝播の指標となる南緯60度, 100 hPa高度におけるEPフラックス (Andrews *et al.* 1987)の鉛直成分 (Fz)を解析した. EPフラックスの導出には, モデルで出力した3次元の日平均東西風, 南北風, 鉛直p速度, 気温データを用いており, 数日程度の短い変動も含まれるが, 導出されたFzを月平均することで, 短期間に変化する波伝播の平均的な特徴も捉えるようにしている. 図3(左)には, CNTLの月平均したFzから作成した6~12月までの箱ひげ図を示す. JRA-55の平均値, 2002年, 2019年の値をマークで重ねた. CNTLの平均値(黒+)はJRA-55の平均値(緑三角)に比べて6~10月まで小さく, モデルのFzには負のバイアス(過小評価)がある. 8~9月に

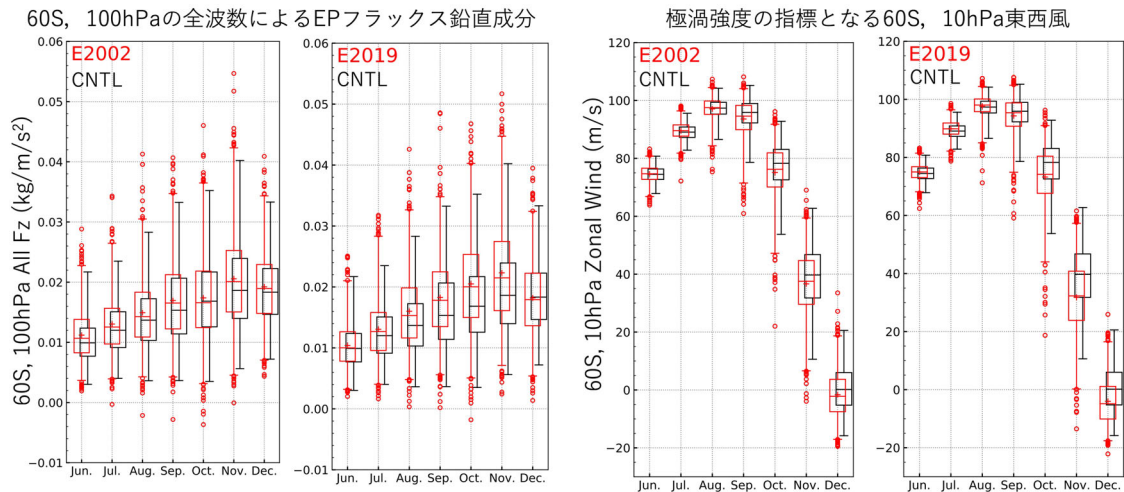


図4 図3と同様。ただしE2002, E2019年の箱ひげ図(赤)。CNTLを黒で重ねた。Yamashita *et al.* (2023) のFig. 2a, Fig. 3を再掲(改)。

は、JRA-55の2002年(赤四角)、2019年(青四角)のFzの値は、平均値(緑三角)に比べてはるかに ($\geq 0.01 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-2}$) 大きく、両年のSSWイベントに伴う成層圏への波伝播の増大に対応している。

図3(右)には、南極渦の強度を表す南緯60度、100 hPa高度における東西風の箱ひげ図を示す。極渦強度は8~9月に最大となり、12月にかけて弱まっている。JRA-55の平均値(緑三角)と比較すると、CNTLには期間を通じて極渦が強いバイアスがあり、また9月以降の極渦の弱化時期が遅くなっている。2002年や2019年には、SSWイベントを反映し、JRA-55の9~10月の極渦強度(それぞれ赤四角と青四角)は、平均値(緑三角)よりもはるかに ($\geq 20 \text{ m s}^{-1}$) 小さい。

図4には、2002年と2019年の海洋条件を与えた実験結果を赤色で示している。E2002では、CNTLに比べて6~12月のFzの箱やひげの上端が高い値にシフトしており、対流圏の波がより成層圏に伝播していることがわかる。E2019では7~11月に箱やひげの上方シフトが大きい。これらの結果は、2002年や2019年の海洋現象が成層圏

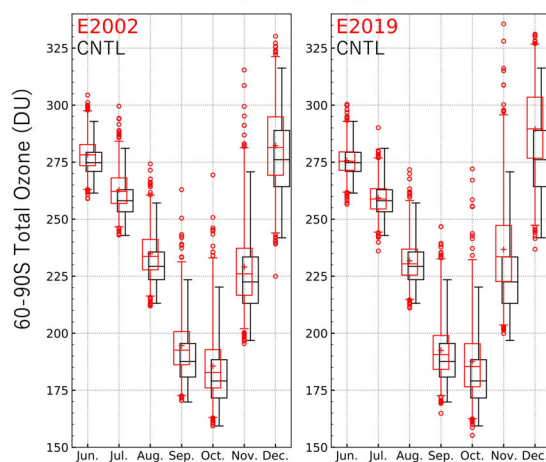


図5 図4と同様。ただし、南極域(南緯60~90度)のオゾン全量。Yamashita *et al.* (2023) のFig. 4を再掲(改)。

への波伝播を促進したことを示唆しており、2019年の方がより顕著である。また極渦強度(西風の強さ)を見ると、E2002では、9~12月にCNTLよりも箱やひげの下端が低い側に大きく広がっており、大きく極渦強度が低下する側に分布関数の

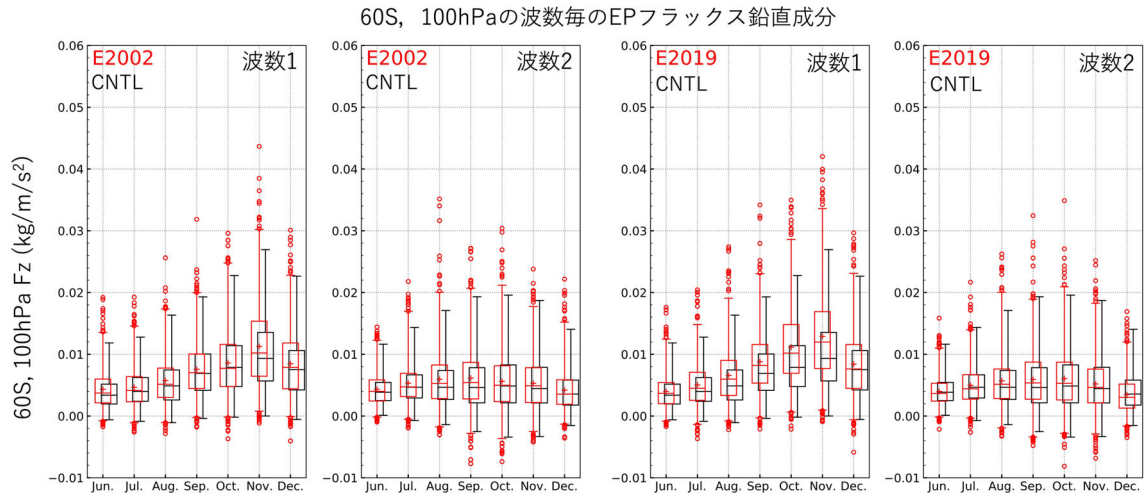


図6 図4と同様。ただし(左) E2002, (右) E2019年の波数1と波数2のFzの箱ひげ図(赤)。CNTLを黒で重ねた。Yamashita *et al.* (2023) のFig. 2b, Fig. 2cを再掲(改)。

裾が伸びていることがわかる。E2019も同様に9～12月に極渦強度が弱い側にシフトしており、シフトの大きさはE2002よりもE2019の方が大きい。

SSWにより南極付近の気温が上昇し極渦が弱化する、オゾン破壊を促進する極成層圏雲(polar stratospheric clouds : PSC)の形成が進まない。また、極域へのオゾン輸送も強化されるため、南極オゾン量が増大しやすい。図5には、南極域オゾン全量の箱ひげ図を示す。CNTLに対してE2002では、期間を通して箱やひげの上端の上方シフトが見られており、E2019では、10～12月の上方シフトがE2002よりも大きい。このように、2002年、2019年の海表面条件を与えることで、気候値的な条件よりも対流圏から成層圏への波伝播が促進され、極渦が弱化して極域オゾンが増加するようになったことがわかる。なお、対流圏の気象場をナッジしたE2019TropはE2019と大きくは異なるため(図略)、海洋条件の違いが大きく寄与していたと考えられる。

SSWには極渦が成層圏中緯度の高気圧に取って代わられる変化をする偏移型(波数1型)、極渦が東西波数2に分裂する分裂型(波数2型)の2

種類があり、それぞれ東西波数1と2の惑星波が対流圏から成層圏に伝播してくることで生じる。図6(左)には、E2002から作成した東西波数1と2のFzの箱ひげ図を、図6(右)にはE2019から作成したものを示す。E2002の波数1成分では、11月にCNTLに対して箱やヒゲの上端が高い値にシフトしているものの、総じてCNTLとの違いは小さい。一方、E2002の波数2成分では、8～9月に箱の上端の上方シフトが、6～10月にひげの上端の上方シフトが大きい。加えて、上位10アンサンブルメンバーに対応する赤丸は、8月に大きく上方に広がっている。これらの結果は、2002年の海表面条件が波数2の惑星波の成層圏への伝播を促進したことを示唆しており、2002年のSSWが波数2型であった観測事実と整合的である。

E2019の波数1成分では、7～12月にかけてCNTLに対して箱やひげの上端の上方シフトが見られており、この年の海表面条件が波数1の成層圏への伝播を促進したことを示唆している。なお、E2019の波数2成分では、CNTLとの違いは小さい。これらの結果は、2019年のSSWが波数1型であった観測事実と整合的である。

10 hPaのジオポテンシャル高度

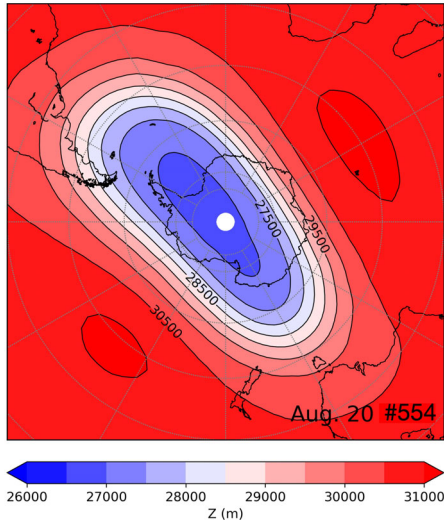


図7 E2002で8月のFzが最も大きかったアンサンブルメンバー(#554)における8月20日の10 hPaジオポテンシャル高度 (m).

4. おわりに

本研究では、海洋の南極渦やオゾン層への影響を調べるため、南半球で異例となるSSWが発生した年の海表面条件を与えた1000年分の大アンサンブル実験を行った。気候値的なSSTを与えた実験に対して、2002年の海表面条件を与えた実験では、成層圏に伝播する東西波数2の波が、2019年実験では波数1の波が標準実験よりも顕著に増大しており、2002年のSSWが波数2型であり、2019年のSSWが波数1型であった観測事実と整合的であった。また成層圏への波伝播の増大に伴い、標準実験よりも南極渦が弱化し南極域オゾン全量が低下していた。このように、大アンサンブル実験を行うことで、2002年、2019年の海表面条件によって成層圏の南極渦やオゾン層に、稀ではあるが大きな変動が起こり得ることを示すことができた。

2002年のSSWイベント時には、観測では9月下旬に南緯60度、10 hPa高度で東風が変わっていた(大昇温、図1)。E2002ではCNTLよりも波数2

の惑星波の成層圏への伝播が増大し極渦が弱化していたものの、東風に至るようなアンサンブルメンバーまではなかった。E2002で最も8月のFzが大きかったアンサンブルメンバーの10 hPaのジオポテンシャル高度を見ると、波数2が卓越していた日の極渦が楕円形に伸びており(図7)、観測されていた9月末の極渦分裂には至らなかったが、極渦が波数2増大の影響を受けて大きく伸張した状態までは再現できていたことがわかる。このように、2002年のSSWを完全には再現できなかった。1つの理由としては、このモデルには冬から春にかけて極域に低温バイアスがあり極渦が強くなりすぎているため(図3)、SSWの発生を抑制してしまっていることが挙げられる。他の理由としては、必ずしも対流圏からの波のフラックスの強化を必要としない原因として、2002年のSSWにはself-tuned resonant process(Plumb 1981; Esler and Scott 2005; Matthewman and Esler 2011)が寄与して大昇温に至ったものの、そのプロセスをモデルで再現できていないためということが挙げられる。E2019とCNTLとの差がE2002とCNTLとの差よりも大きい理由として、2002年にself-tuned resonanceが起こったと考えても矛盾はない。

2019年の8月から9月には、赤道10 hPa高度付近は東風で、こうした10 hPaの成層圏準2年周期振動(quasi-biennial oscillation: QBO)東風相の場合に南極渦が弱化しやすい(Anstey and Shepherd 2014; Yamashita *et al.* 2018)。Shen *et al.* (2020)では、2019年のSSWはQBOによって直接引き起こされたものではないが、QBOはSSW発生後の極渦をさらに弱化させた可能性があることを議論している。今回の実験ではQBOを含まない設定を用いているが、将来的にはQBOの影響も調べたい。

謝辞:本研究は、JSPS 科研費JP18KK0289, JP20K12155, JP20H01977の助成を受けた。大アンサンブル実験は、NIESのスーパーコンピュータSX-AURORA TSUBASAで行われた。作図にはpythonのmatplotlibを、データの処理にはgtool3.5

を用いた。本研究で用いた OI SST V2 データは、<https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.noaa.oisst.v2.html> からダウンロード可能である。JRA-55 客観解析データは気象庁で提供されているもので、https://jra.kishou.go.jp/JRA-55/index_ja.html よりダウンロード可能である。

参考文献

- [1] Akiyoshi, H., T. Nakamura, T. Miyasaka, M. Shiotani, and M. Suzuki, 2016: A nudged chemistry-climate model simulation of chemical constituent distribution at northern high-latitude stratosphere observed by SMILES and MLS during the 2009/2010 stratospheric sudden warming. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 121, 1361-1380. <https://doi.org/10.1002/2015JD023334>
- [2] Andrews, D. G., J. R. Holton, and C. B. Leovy, 1987: *Middle Atmosphere Dynamics*, International Geophysics Series 40, Academic Press, Orlando, 489 pp.
- [3] Anstey, J. A., and T. G. Shepherd, 2014: High-latitude influence of the quasi-biennial oscillation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 140, 1-21. <https://doi.org/10.1002/qj.2132>
- [4] Butler, A. H., J. P. Sjöberg, D. J. Seidel, and K. H. Rosenlof, 2017: A sudden stratospheric warming compendium. *Earth Syst. Sci. Data*, 9, 63-76. <https://doi.org/10.5194/essd-9-63-2017>
- [5] Esler, J. G., and R. K. Scott, 2005: The excitation of transient Rossby waves on the stratospheric polar vortex and the barotropic sudden warming. *J. Atmos. Sci.*, 62, 3661-3682. <https://doi.org/10.1175/JAS3557.1>
- [6] Hio, Y., and S. Yoden, 2005: Interannual variations of the seasonal March in the southern hemisphere stratosphere for 1979-2002 and characterization of the unprecedented year 2002. *J. Atmos. Sci.*, 62, 567-580. <https://doi.org/10.1175/JAS-3333.1>
- [7] Hirota, I., K. Kuboi, and M. Shiotani, 1990: Midwinter warmings in the southern hemisphere stratosphere in 1988. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 116, 929-941. <https://doi.org/10.1002/qj.49711649407>
- [8] Hu, Y., 2020: The very unusual polar stratosphere in 2019-2020. *Sci. Bull.*, 65, 1775-1777. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2020.07.011>
- [9] Kobayashi, S., Y. Ota, Y. Harada, A. Ebata, M. Moriya, H. Onoda, K. Onogi, H. Kamahori, C. Kobayashi, H. Endo, K. Miyaoka, and K. Takahashi, 2015: The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, 93, 5-48. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2015-001>
- [10] Labitzke, K., 1977: Interannual variability of the winter stratosphere in the northern hemisphere. *Mon. Wea. Rev.*, 105, 762-770. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1977\)105<0762:IVOTWS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1977)105<0762:IVOTWS>2.0.CO;2)
- [11] Lim, E.-P., H. H. Hendon, A. H. Butler, D. W. J. Thompson, Z. D. Lawrence, A. A. Scaife, T. G. Shepherd, I. Polichtchouk, H. Nakamura, C. Kobayashi, R. Comer, L. Coy, A. Dowdy, R. D. Garreaud, P. A. Newman, and G. Wang, 2021: The 2019 Southern Hemisphere stratospheric polar vortex weakening and its impacts. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 102, E1150-E1171. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-20-0112.1>
- [12] Matthewman, N. J., and J. G. Esler, 2011: Stratospheric sudden warmings as self-tuning resonances. Part I: Vortex splitting events. *J. Atmos. Sci.*, 68, 2481-2504. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-11-07.1>
- [13] Naujokat, B., 1981: Long-term variations in the stratosphere of the Northern Hemisphere during the last two sunspot cycles. *J. Geophys. Res.*, 86, 9811-9816. <https://doi.org/10.1029/JC086iC10p09811>
- [14] Nishii, K., and H. Nakamura, 2004: Tropospheric influence on the diminished Antarctic ozone hole in September 2002. *Geophys. Res. Lett.*, 31, L16103. <https://doi.org/10.1029/2004GL019532>
- [15] Plumb, R. A., 1981: Instability of the distorted polar night vortex: A theory of stratospheric warmings. *J. Atmos. Sci.*, 38, 2514-2531. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1981\)038<2514:IOTDPN>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1981)038<2514:IOTDPN>2.0.CO;2)
- [16] Reynolds, R. W., N. A. Rayner, T. M. Smith, D. C. Stokes, and W. Wang, 2002: An improved in situ and satellite SST analysis for climate. *J. Climate*, 15, 1609-1625. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<1609:AIISAS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<1609:AIISAS>2.0.CO;2)
- [17] Shen, X., L. Wang, and S. Osprey, 2020: Tropospheric forcing of the 2019 Antarctic sudden stratospheric warming. *Geophys. Res. Lett.*, 47, e2020GL089343. <https://doi.org/10.1029/2020GL089343>
- [18] Shiotani, M., N. Shimoda, and I. Hirota, 1993: Interannual variability of the stratospheric circulation in the southern hemisphere. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 119, 531-546. <https://doi.org/10.1002/qj.49711951110>
- [19] Yamashita, Y., H. Naoe, M. Inoue, and M. Takahashi, 2018: Response of the southern hemisphere atmosphere to the stratospheric equatorial quasi-biennial oscillation (QBO) from winter to early summer. *J. Meteor. Soc. Japan*, 96, 587-600. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2018-057>
- [20] Yamashita, Y., H. Akiyoshi, and M. Inoue, 2022: 1000-member ensemble simulation output from NIES Chemistry-Climate Models for investigating Southern Hemisphere Stratospheric response to the sea surface temperature. ver.1.1.0, Earth System Division, NIES. <https://doi.org/10.17595/20221215.001>
- [21] Yamashita, Y., H. Akiyoshi, and M. Inoue, 2023: The role of sea-surface conditions in Southern-Hemisphere polar vortex strength and associated wave forcing revealed by a multi-member ensemble simulation with the chemistry-climate model. *SOLA*, 19B, 9-15. <https://doi.org/10.2151/sola.19B-002>

