

南半球中高緯度における海洋変動と成層圏循環の予測可能性

課題責任者

滝川 雅之

海洋研究開発機構 地球環境部門 北極環境変動総合研究センター

著者

山下 陽介*¹

*¹ 国立環境研究所 地球環境研究センター

本研究課題では、国立環境研究所で開発された大気海洋結合版の化学気候モデル(chemistry-climate model:CCM)を用いて、南半球の極渦強度を大きく変える成層圏突然昇温の前駆現象と突然昇温が引き起こす地表付近の気候影響を成層圏・対流圏・海洋を包括的に扱う視点から理解することを目的としている。本年度は大気海洋結合を行ったCCMによる大規模アンサンブル実験(1000アンサンブル実験)を行った。比較のため、大気モデルに突然昇温が観測された年の海表面温度(Sea Surface Temperature:SST)を与えた比較実験やSSTを気候値に固定した実験も行った。突然昇温が観測された2002年、および2019年のSSTを与えた実験では、気候値に固定した実験や大気海洋結合を行った実験に対して、突然昇温の頻度が大きく増加していた。

キーワード：南極渦、成層圏突然昇温、大気海洋結合モデル、化学気候モデル、大規模アンサンブル実験

1. はじめに

本研究の主な対象は、高度約10~50kmに存在する成層圏における大気循環と惑星規模の大気波動であり、それらが地表付近の気候に及ぼす影響、および、海洋等の現象が果たしている役割の解明も含む。

冬季の成層圏には極周辺の強い西風で特徴付けられる極渦という低気圧が存在しており、その強度は海表面温度(Sea Surface Temperature:SST)や対流圏の大気現象の影響を受けて変化し、また極渦の強弱が対流圏や海洋循環にも影響を及ぼしうると考えられている。そのため、大気・海洋変動の予測可能性を高める上で、極渦強度の変化要因を探り、それが地表付近の気候にどう影響しうるのが成層圏・対流圏・海洋を包括的に扱う視点から理解することが重要である。

通常、成層圏の極渦は秋季から冬季にかけて強くなり、冬季から夏季にかけて弱くなるような、ゆっくりとした時間変化をしている(図1)。北半球では成層圏が数日の間に数十度も高温になることがあり、成層圏突然昇温と呼ばれている。極渦が壊れて東風になるケースは大昇温と呼ばれ、2回の冬のうち1回くらい起こる(例えばLabitzke 1977[4])。南半球の極渦は安定しているため、東風になるような突然昇温は起こらないとされてきたが、定説を覆すような現象が2002年に初めて観測された(図1細点線)。2019年には東風にまでは至らないものの、2002年よりも早い時期に突然昇温が起こり極渦が弱化した(図1細実線)。いずれのケースでも対流圏中緯度でブロッキング現象が起こり、成層圏に波が伝播して突然昇温に至っている。突然昇温はその後、中緯度の対流圏循環や海洋循環の変化も引き起こすことが指摘されており(Son et al. 2010[6]; Schimanke et al. 2011[7]; Thompson et al. 2011[8]; Waugh et al. 2013[9])、オーストラリア等の極端降水と関係することもある(Kang et al. 2013[3])。

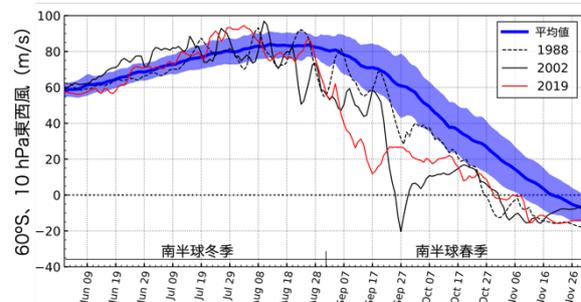


図1：南極渦強度に相当する60°S、10 hPaにおける帯状平均東西風の時間変化(単位はm/s)。青線は1979~2019年平均で、陰影は1σの年々変動の範囲を、黒破線は1988年、黒実線は2002年、赤線は2019年の値を表す。JRA-55客観解析で作成

Yamashita et al. (2018) [11]では、客観解析データを使い南極渦強度が年毎に異なる理由を様々な外部変動との相関解析から調べた。その結果、赤道成層圏に存在する準2年周期振動(quasi-biennial oscillation:QBO)や近年のオゾンホール面積の変化の他に、大気海洋相互作用の1つであるエルニーニョ・南方振動(El Niño-Southern Oscillation:ENSO)が有意に関係することが分かった。また中緯度の水温前線が大気の波を変えることで南極渦に影響することを解析しており(山下・秋吉, 2012, 日本気象学会)、これら海洋の現象が南極渦変動の前駆現象になりうると考えた。

本研究の目的は、南半球における突然昇温の前駆現象と突然昇温が引き起こす大気海洋の現象を探ることである。南極渦強度を再現するためには南極オゾンホールを再現できる必要があるため、大気海洋結合版の化学気候モデル(chemistry-climate model:CCM)を使用する。南半球では珍しい突然昇温を調べるため、大アンサンブル実験(1000アンサンブル実験)を行う。突然昇温の要因

となりうる水温前線やENSO等、海洋の外力がどのように影響するか調べるため、海洋変動を含まない大気版の化学気候モデルを使用した大アンサンブル実験も行い結果を比較する。

2. モデルと実験設定

本研究では、国立環境研究所で開発された大気海洋結合版のCCM(Akiyoshi et al. 2009[1];2016[2];Yamashita et al. 2017[10])を用いた。元になった大気海洋結合モデルMIROC5.0は、国連気候変動に関する政府間パネル(Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC)報告書等の実験に用いられてきた信頼性が高いモデルで、CCM相互比較プロジェクト(Morgenstern et al. 2017[5])でオゾンホールや南極渦の再現性が高いことが確認されている。実験に用いた解像度は、水平T42(約300 km)、鉛直34層でモデルの上端は中間圏界面付近の高度約80 kmである。

突然昇温の要因となる前駆現象を探るため、2000年条件に固定した大アンサンブル実験(1000アンサンブル実験)を行った。ここでは、1010年の連続実験を行い最初の10年を除いたものを1000アンサンブルとしている。温室効果ガス(greenhouse gas: GHG)やオゾン破壊物質(ozone-depleting substance: ODS)等は、2000年の値に固定した。次のように海洋の条件を変えた4種類の大アンサンブル実験を行った。①標準実験では、大気モデルのみのCCMで2000年頃のSSTを10年平均して与えた(以降CNTLと記述)。②大気海洋結合版のCCMでは、海洋変動は海洋大循環モデルでシミュレーションされる(以降CGCM)。突然昇温の要因が特定の年の海洋現象に依存している可能性を考慮し、③突然昇温が観測された2002年のSST(2002SST)、および、④2019年のSSTを与えた実験

(2019SST)も行った。

3. 南極渦と成層圏突然昇温

南極渦強度の時間変化を客観解析と比較するため、大アンサンブル実験による1000年間の結果を描いたものを4種類の実験に付いて並べた(図2)。南極渦が秋季から冬季にかけて強くなり冬季から夏季にかけて弱くなる季節変化は再現されているものの、冬季の最大値が大きく夏季にかけての季節変化が遅いバイアスが存在する。CNTLやCGCMでは秋季から冬季にかけての年々変動が客観解析よりも小さい。2002SSTや2019SSTでは年々変動の変動幅が客観解析に近づき、夏季にかけての季節変化がCNTLやCGCMより早まることから、年々変動に伴う何らかのプロセスの表現が不十分であることが示唆される。2002SSTや2019SSTで現れる変動を解析することで、今後のモデル改善のヒントが得られることが期待される。

CNTLやCGCMでは10月まで60°S、10 hPa東西風の最小値が0 m/sを上回っており、大昇温の基準を満たすことはなかった。一方で、2002SSTや2019SSTでは8月以降の最低値が他の実験よりも大きく低下し、0 m/s以下になることもあった。2002SST、2019SSTともに、10月までに大昇温の基準を満たすことが1000年間のうち3例あり、特定の年の海洋現象に依存して発生頻度が増加していたことが示唆される。なお小昇温に関しても、CNTL、CGCMよりも2002SST、2019SSTで基準を満たす日が大幅に増加しており、8月や9月の早い時期に発生するようになった(表1)。また、11月末までに60°S、10 hPa東西風が冬極の西風から夏極の東風に変わり10日以上戻らない最終昇温は、CNTLで13回、CGCMで11回、2002SSTで80回、2019SSTで79回であり、突然昇温の発生頻度が季節変化のバイアスとも関わることが示唆される。

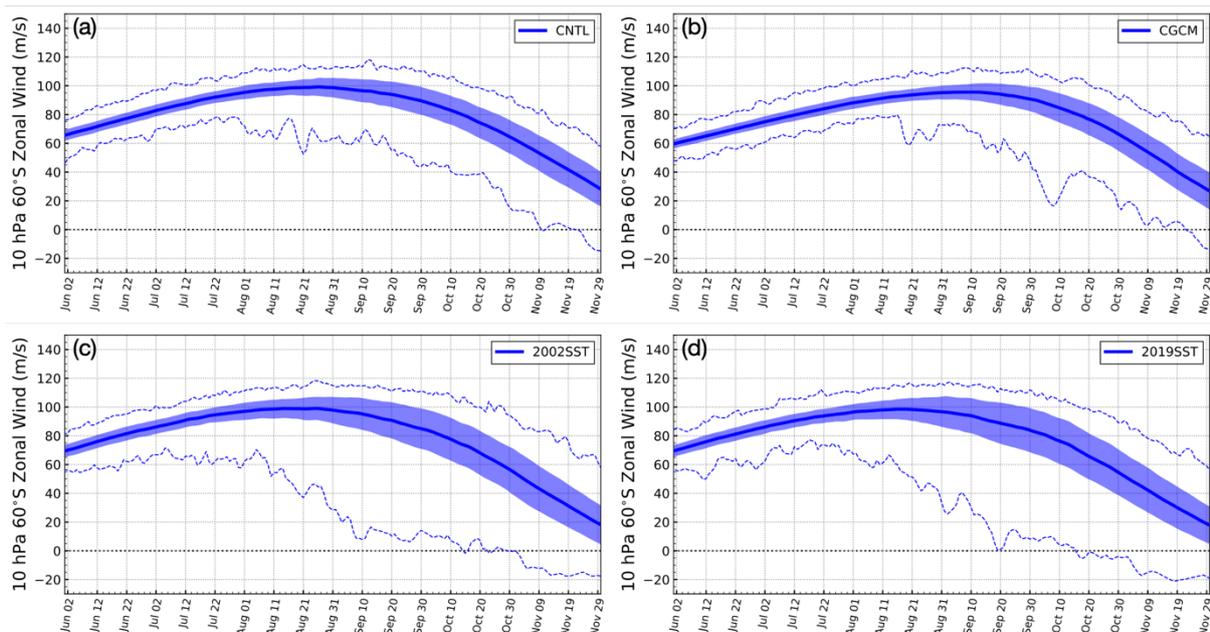
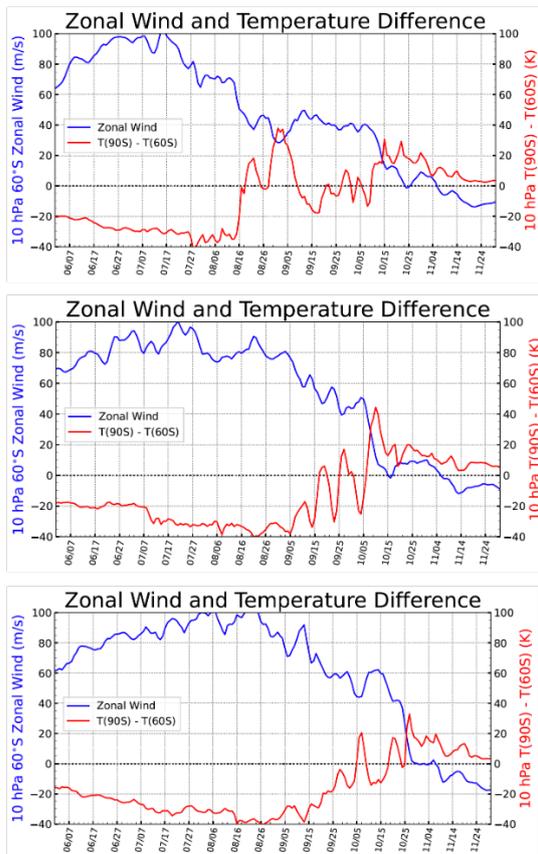


図2: 図1と同様。但し、大アンサンブル実験による1000年間の平均値(青太線)と 1σ の年々変動の範囲(陰影)に1000年間の最小値と最大値を青点線で重ねた。(a)CNTL、(b)CGCM、(c)2002SST、(d)2019SSTの結果。

(a) 2002SST



(b) 2019SST

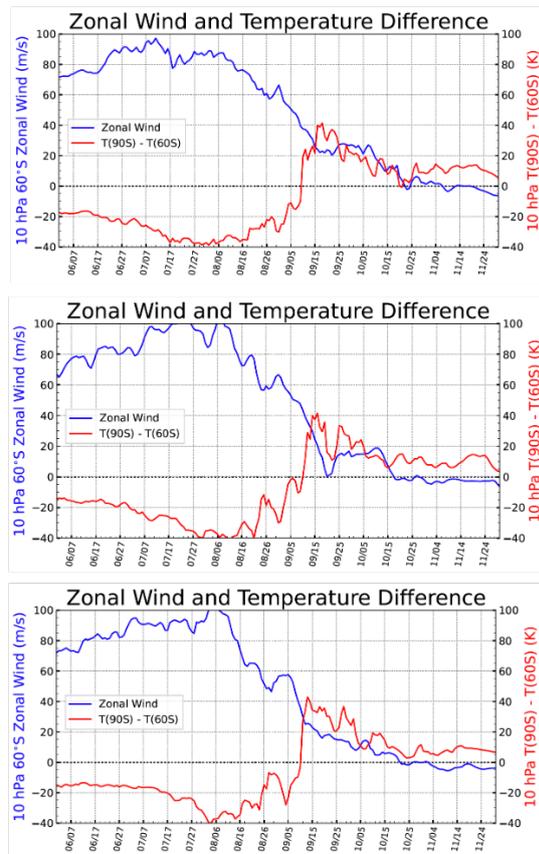


図3：(a) 2002SST、(b) 2019SST で大昇温の基準を満たした3例について、60°S、10 hPaにおける帯状平均東西風（青線）と90°Sと60°Sの気温差（赤線）の時間変化を示した。

図3は2002SSTと2019SSTで10月までに大昇温の基準を満たしたそれぞれ3例の60°S、10 hPa 東西風、および南極と60°Sの気温差を示す。極渦の西風は7~8月頃をピークとして徐々に弱まる。8~9月頃には南極の気温が60°Sより高くなる小昇温イベントがしばしば発生し、極渦強度は大きく低下することがわかる。またいずれのケースでも、10月に60°Sで東風となり大昇温の基準を満たす。3例同士の比較であるため、2002SSTと2019SSTの間での系統的な違いはわからないものの、表1では2019SSTの方が9~10月に小昇温の基準を満たす日が多く、早い時期から極渦が乱されていたと考えられる。今後の詳細な解析により、2002年よりも2019年で極渦強度の低下し始める時期が早かった(図1)要因についてヒントが得られるかもしれない。

4. まとめと今後の課題

CCMによる大規模アンサンブル実験(1000アンサンブル実験)を行い、成層圏突然昇温の発生頻度等を解析した。毎年同じSSTを与え大気の外力を固定した場合、2002年や2019年に見られたような激しい極渦変動や突然昇温は起こらなかった。このため、突然昇温は大気の内変動による「偶然」では発生しないと考えられる。大気海洋結合を行ったCCMでは、海洋の年々変動が海洋大循環モデル

でシミュレーションされるが、この実験においても突然昇温の発生頻度は変わらないため、年々変動に伴う外力の変動では説明できていない。これに対して、突然昇温が観測された2002年、および2019年のSSTを与えた実験では、それぞれ1000例のうち3例で大昇温が発生し、小昇温に伴う激しい極渦変動の発生頻度の増加や東西風が冬極の西風から夏極の東風が変わる時期の早まりもみられていた。

以上のことから、特定の年の海洋現象に依存して突然昇温の発生頻度が増加したことが示唆される。今後は2002年、および2019年の実験結果の解析から、突然昇温の前駆現象や突然昇温が引き起こす地表付近の気候影響についても解析を進めたい。

表1：実験毎のSST設定と小昇温の基準を満たした日数

実験名	SST	1000年間で小昇温の基準を満たした日数			
		Jul.	Aug.	Sep.	Oct.
CNTL	10年平均値	0	0	1	891
CGCM	海洋モデル	0	0	0	542
2002SST	2002年週毎	0	10	262	3999
2019SST	2019年週毎	0	10	385	4638

謝辞

本研究は日本学術振興会(Japan Society for the Promotion of Science : JSPS) 科研費 JP 20K12155の助

成を受けて行われた。計算には JAMSTEC の地球シミュレータを用いた。作図には matplotlib を用いた。

文献

- [1] Akiyoshi, H., L.B. Zhou, Y. Yamashita, K. Sakamoto, M. Yoshiki, T. Nagashima, M. Takahashi, J. Kurokawa, M. Takigawa, T. Imamura (2009), A CCM simulation of the breakup of the Antarctic polar vortex in the years 1980–2004 under the CCMVal scenarios, *J. Geophys. Res.*, 114, D03103, doi:10.1029/2007JD009261.
- [2] 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, doi:10.1002/2015JD023334.
- [3] Kang, S. M., L. M. Polvani, J. C. Fyfe, S.-W. Son, M. Sigmond, and G. J. P. Correa (2013), Modeling evidence that ozone depletion has impacted extreme precipitation in the austral summer, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 4054–4059, doi:10.1002/grl.50769.
- [4] Labitzke, K., 1977: Interannual variability of the winter stratosphere in the Northern Hemisphere. *Mon. Wea. Rev.*, 105, 762–770.
- [5] Morgenstern, O., M. et al. (2017), Review of the global models used within phase 1 of the Chemistry-Climate Model Initiative (CCMI), *Geosci. Model Dev.*, 10, 639–671, doi:10.5194/gmd-10-639-2017.
- [6] Son, S.-W., et al. (2010), Impact of stratospheric ozone on Southern Hemisphere circulation change: A multimodel assessment, *J. Geophys. Res.*, 115, D00M07, doi:10.1029/2010JD014271.
- [7] Schimanke, S., J. Körper, T. Spanghel, and U. Cubasch (2011), Multi-decadal variability of sudden stratospheric warmings in an AOGCM, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L01801, doi:10.1029/2010GL045756.
- [8] Thompson, D. W. J., S. Solomon, P. J. Kushner, M. H. England, K. M. Grise, and D. J. Karoly (2011), Signatures of the Antarctic ozone hole in Southern Hemisphere surface climate change, *Nature Geoscience*, 4, 741–749 doi:10.1038/ngeo1296.
- [9] Waugh, D. W., F. Primeau, T. DeVries, M. Holzer et al. (2013), *Science*, 339(6119), 568–570, doi:10.1126/science.1225411.
- [10] Yamashita, Y., M. Takigawa, K. Ishijima, H. Akiyoshi, C. Kodama, H. Yashiro, M. Satoh (2017): Resolution dependency of numerically simulated stratosphere-to-troposphere transport associated with mid-latitude closed cyclones in early spring

around Japan, *SOLA*, 13, 186–191, doi:10.2151/sola.2017-034.

- [11] Yamashita, Y., H. Naoe, M. Inoue, M. Takahashi (2018), Response of the Southern Hemisphere atmosphere during winter and spring to the stratospheric equatorial quasi-biennial oscillation (QBO), *J. Meteor. Soc. Japan*, 96(12), 587–600, doi:10.2151/jmsj.2018-057.

Predictability of Ocean Variability and Stratospheric Circulation in the Southern Hemisphere Mid- and High-Latitudes

Project Representative

Masayuki Takigawa

Institute of Arctic Climate and Environment Research, Research
Institute for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science
and Technology

Author

Yousuke Yamashita*¹

*¹ National Institute for Environmental Studies

This project aims to understand the precursors of sudden stratospheric warmings, which significantly changes the intensity of the Antarctic polar vortex, and the surface climate impact of sudden stratospheric warmings under the comprehensive perspective of stratosphere, troposphere, and ocean using the coupled ocean-atmosphere chemistry-climate model (CCM). In this year, a large ensemble experiment (1000 ensemble experiments) was performed with the coupled ocean-atmosphere CCM. The atmosphere CCM experiments were also performed with the fixed climatological SST, and the SSTs in 2002, 2019, in which the sudden stratospheric warming were observed. The experiments with the 2002 and 2019 SST conditions, a frequency of sudden stratospheric warming was significantly increased.

Keywords : Antarctic polar vortex, sudden stratospheric warmings, coupled ocean-atmosphere model, chemistry-climate model, a large ensemble experiment

1. Introduction

The focus of this study is the general circulation and planetary waves in the stratosphere, as well as their impact on surface climate and the interactions with ocean. The intensity of the polar vortex in the Southern Hemisphere (SH) is related to the Sea Surface Temperature (SST) and atmospheric phenomena in the troposphere, and it is thought to be influenced on troposphere and ocean circulation.

The polar vortex's strength increases from winter to summer and decreases from summer to winter. In the Northern Hemisphere, a complete reversal of the upper stratospheric westerlies occurs 6 times per decade in association with sudden stratospheric warming (e.g., Labitzke 1977 [3]). In the SH, such dramatic change of the stratospheric jet had not occurred due to the stable polar vortex. The exceptions are major warming in 2002 and minor warming in 2019.

Yamashita et al. (2018) [5] analyzed the factors important for the variation of zonal wind of the SH polar vortex and suggested the importance of El Niño-Southern Oscillation (ENSO) as well as quasi-biennial oscillation (QBO) and recent ozone hole changes. This implies that the ocean phenomena are related to the variation of SH polar vortex.

The purpose of this study is to investigate the precursors of sudden stratospheric warmings, and the ocean-atmosphere impact of sudden stratospheric warmings. The coupled ocean-atmosphere chemistry-climate model (CCM) was used, and a large ensemble experiment (1000 ensemble experiments) was performed. The atmosphere CCM experiments were also performed with the prescribed SST.

2. Model and Experiments

The CCM used in this study has been developed in National Institute for Environmental Studies (Akiyoshi et al. 2009[1]; 2016[2]; Yamashita et al. 2017[4]). The horizontal resolution is T42 and 34 vertical layers with the upper boundary located at approximately 80 km. The experiments were performed with the 2000 conditions for greenhouse gas (GHG) and ozone-depleting substance (ODS), and a large ensemble experiment (1000 ensemble experiment) was performed.

The following conditions were used in four different types of experiments. ① The control experiments of atmosphere CCM with fixed climatological SST around 2000 (hereafter CNTL). ② coupled ocean-atmosphere CCM (CGCM). The experiments with the ③ 2002 (2002SST) and ④ 2019 SST conditions (2019SST).

3. Results

The intensity of the SH polar vortex increases from winter to summer and decreases from summer to winter, in agreement with the observation. In the winter, the maximum westerly wind is much stronger than observed. In CNTL and CGCM, the year-to-year variability of the SH polar vortex is smaller than observation. In 2002SST and 2019SST, the year-to-year variability is consistent with the observation.

The lowest value of zonal wind intensity in CNTL and CGCM is greater than 0 m/s (Fig. 1), with no major warmings. In contrast, the lowest value of zonal wind is less than CNTL and CGCM, reaching less than 0 m/s. The conditions for major warmings were met in three cases out of 1000 years for 2002SST and 2019SST, indicating that the frequency of the event is related to oceanic phenomena in particular years.

The minor warmings are also increased and occurs in August and September for 2002SST and 2019SST. A frequency of final warmings is 13 times in CNTL, 11 times in CGCM, 80 times in 2002SST, and 79 times in 2019SST, indicating the relationships between the frequency of sudden stratospheric warmings and the seasonal change of polar vortex.

4. Concluding Remarks

In this year, a large ensemble experiment (1000 ensemble experiment) was performed, and the results of sudden stratospheric warmings were analyzed. A frequency of sudden stratospheric warming was much smaller than observation in CNTL and CGCM. In contrast, a frequency of sudden stratospheric warming was significantly increased with the 2002 and 2019 SST conditions.

These results suggest that the frequency of occurrence of sudden warming increased depending on the oceanographic phenomena in particular years. The future analysis of the 2002 and 2019 experiments will be helping to understand the precursors of sudden warming and its impacts on the surface climate.

Acknowledgement

This work was supported by JSPS KAKENHI Grant Number JP 20K12155. The Earth Simulator of JAMSTEC were used for the calculations. The matplotlib was used for drawing figures.

References

[1] Akiyoshi, H., L.B. Zhou, Y. Yamashita, K. Sakamoto, M.Yoshiki, T. Nagashima, M. Takahashi, J. Kurokawa, M. Takigawa, T. Imamura (2009), A CCM simulation of the

breakup of the Antarctic polar vortex in the years 1980-2004 under the CCMVal scenarios, *J. Geophys. Res.*, 114, D03103, doi:10.1029/2007JD009261.

[2] 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, doi:10.1002/2015JD023334.

[3] Labitzke, K., 1977: Interannual variability of the winter stratosphere in the Northern Hemisphere. *Mon. Wea. Rev.*, 105, 762–770.

[4] Yamashita, Y., M. Takigawa, K. Ishijima, H. Akiyoshi, C. Kodama, H. Yashiro, M. Satoh (2017): Resolution dependency of numerically simulated stratosphere-to-troposphere transport associated with mid-latitude closed cyclones in early spring around Japan, *SOLA*, 13, 186–191, doi:10.2151/sola.2017-034.

[5] Yamashita, Y., H. Naoe, M. Inoue, M. Takahashi (2018), Response of the Southern Hemisphere atmosphere during winter and spring to the stratospheric equatorial quasi-biennial oscillation (QBO), *J. Meteor. Soc. Japan*, 96(12), 587–600, doi:10.2151/jmsj.2018-057.

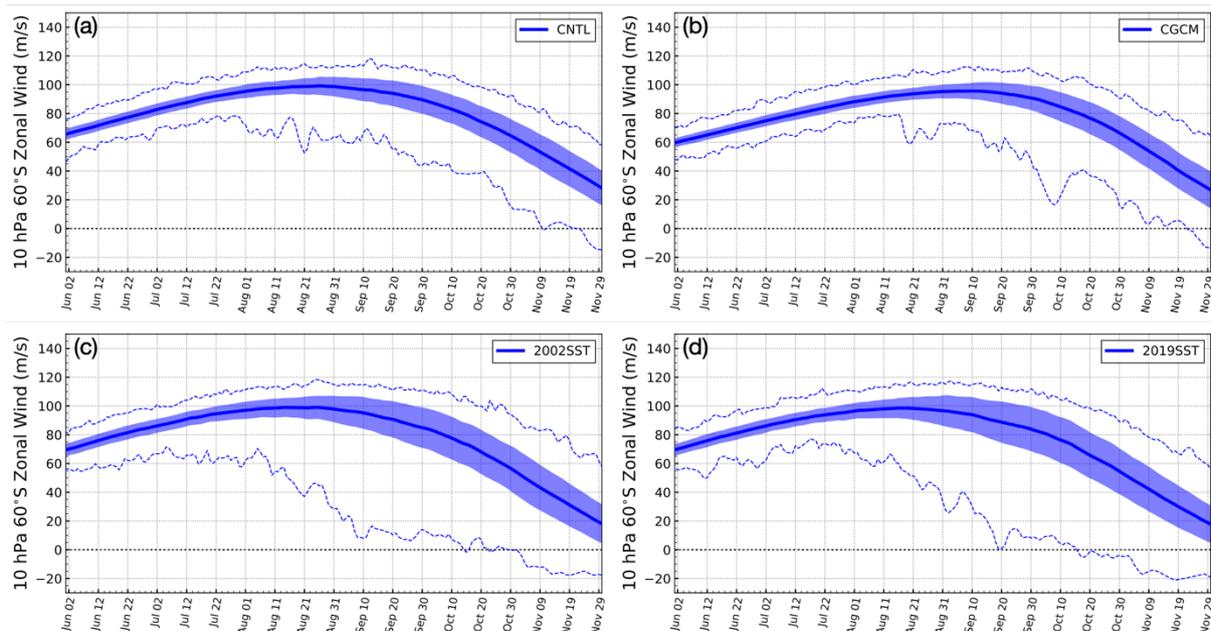


Figure 1: The mean zonal wind at 60°S, 10 hPa for the 1000 ensemble experiments (thick line) with 1σ of year-to-year variability (shading) and maximum and minimum (broken lines). (a) CNTL, (b) CGCM, (c) 2002SST, and (d) 2019SST.