

2017-18 年寒冬と 2019-20 年暖冬の AGCM による再現実験

課題責任者

中村 尚 東京大学 先端科学技術研究センター

著者

西井 和晃*¹, 田口 文明*², 小坂 優*³, 中村 尚*³*¹ 三重大学 大学院生物資源学研究科, *² 東京大学 先端科学技術研究センター, *³ 富山大学 都市デザイン学部

2017-18 年の冬は西日本を中心に寒波に見舞われた。一方、2019-20 年の冬は統計開始以降最も暖かい冬となった。本研究は、大気大循環モデル (AGCM) のアンサンブル実験に基づき、観測された海面水温偏差は 2017-18 年の寒冬を説明できない一方、2019-20 年の暖冬に寄与していた可能性を示した。2017-18 年冬季においては、日本付近で観測された上層での低気圧性偏差と下層での低温偏差は、AGCM 実験では再現できなかった。これは、ユーラシア大陸上の亜熱帯ジェット中を伝播する波の位相が、現実大気と AGCM とで異なっていたことが直接的な要因である。この波の位相の違いは、観測された波が海面水温偏差によって励起されたものでなかった可能性が高いこと示唆された。一方で、2019-20 年冬季においては、AGCM は日本付近で観測された高気圧性偏差と高温偏差を再現した。亜熱帯ジェット上の波の位相、及び熱帯での対流活動についても AGCM はよく再現性していた。さらに中高緯度の海面水温偏差は、両者の冬とも日本付近で高温偏差をもたらし、特に 2019-20 年の暖冬においては、その寄与は熱帯海面水温偏差と同等であったことが示唆された。

キーワード：暖冬，寒冬，中緯度海洋，大気大循環モデル

1. はじめに

2017-18 年の冬は西日本を中心に全国的に気温が低くなり、日本海側を中心に積雪が平年値を上回った[1]。ラニーニャ現象に伴う海洋大陸付近の積雲対流活動の活発化が、この寒冬の一つの要因として指摘されている。実際、この冬の熱帯太平洋東部では海面水温 (SST) の低温偏差が確認でき、ラニーニャ現象と整合的である (図 1 上)。また中緯度北大西洋でも SST の高温偏差が確認されている。一方、2019-20 年の冬は 1898 年の統計開始以降最も暖かい冬となった[2]。地球温暖化に加え、海洋大陸上での不活発な対流活動と正の北極振動による日本付近への寒気流入の弱化がこの暖冬の要因とされている。

さらに、同時期に発生していた強い正のインド洋ダイポール現象が亜熱帯ジェット上の波を励起し、この波によって日本付近の暖冬を引き起こしたことが指摘されている[3]。実際、熱帯インド洋西部に SST の高温偏差が確認できる (図 1 下)。一方で、日本付近や北太平洋東部にも高温偏差が存在しており、大気循環への影響の可能性が考えられる。

本研究の目的は、大気大循環モデル (AGCM) 実験に基づき、これら寒冬と暖冬への、熱帯と中高緯度それぞれの SST 偏差の寄与を評価することである。

2. 数値実験

本研究では海洋研究開発機構で開発された大気大循環モデル AFES を用いた。水平解像度は T119 (約 100 km)、鉛直 56 層である。海面水温と海水密度データは日別の OISST v2 を用いた。全球に観測された海面水温を与えた Global Ocean, Global Atmosphere (GOGA) 実験、熱帯 (緯度 25.5 度以下) のみに観測された海面水温を与え、中高緯度に気候値を与えた Tropical Ocean, Global Atmosphere (TOGA) 実験、中高緯度のみに観測された SST を与えた Midlatitude Ocean, Global Atmosphere (MOGA) 実験、全球で気候平均の海面水温を与えた気候値 (CLM) 実験、の計 4 つの実験を行った。海氷はすべての実験で気候値を与えた。実験期間は 2017(2019) 年 9 月から 2018(2020) 年 3 月であり、それぞれで 50 メンバーのアンサンブル実験を行った。温室効果気体の濃度は全ての実験で一定である。GOGA 実験と CLM 実験とのアンサンブル平均の差が、全球 SST 偏差への大気応答と考えられる。同様に、TOGA 実験 (MOGA 実験) と CLM 実験との差が熱帯 (中

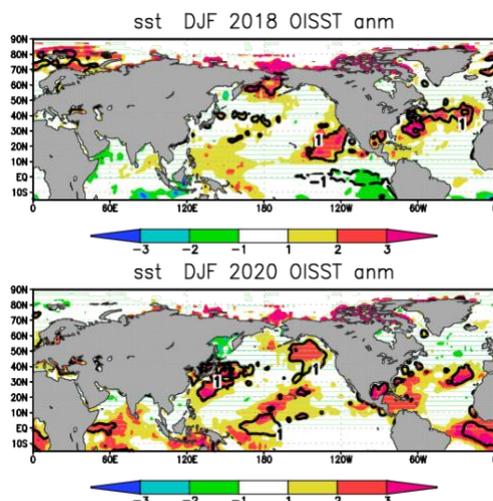


図 1 冬季 (DJF) 平均海面水温偏差 (K: 等値線) と規格化偏差 (色). (上) 2017-18 冬, (下) 2019-20 冬.

高緯度) SST 偏差への大気応答と考えられる。実験結果の解析は冬季 (12, 1, 2 月) 平均について行い, 検証のため JRA-55 再解析データ [4] を用いた。再解析の気候平均場は 1982-83 年~2012-13 年冬の平均を取るにより求めた。

3. 2017-18 年の寒冬

2017-18 年冬季には, 再解析での熱帯上部での速度ポテンシャルは海洋大陸上で負偏差を示し, ここで対流活動が活発であったことを示す (図 1)。これは海洋大陸付近での SST 高温偏差への応答と考えられる。一方, 同領域での AGCM での応答はやや異なり, 負偏差が海洋大陸東部に局在化すると同時に, インド洋東部で正偏差 (つまり対流活動の抑制) を示す。これは熱帯インド洋南東部での負の海面水温偏差 (図 1 下) への応答と考えられる。

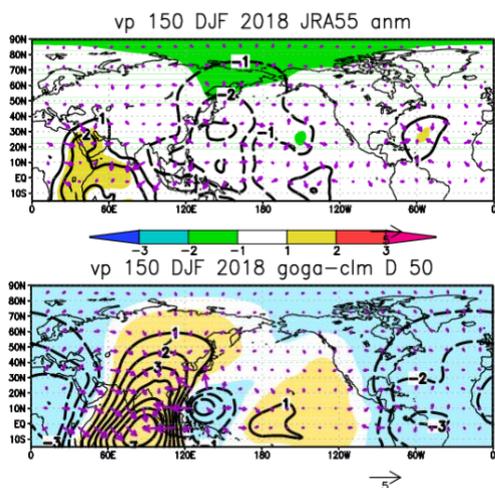


図 2 2017-18 冬季平均 150 hPa 気圧面での速度ポテンシャル。(上) 再解析での偏差 ($10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 等値線), 規格化偏差 (色)。紫矢印は発散風偏差。(下) 全球海面水温偏差への応答。黄 (水) 色は 5% 有意な正 (負) の応答を示す。

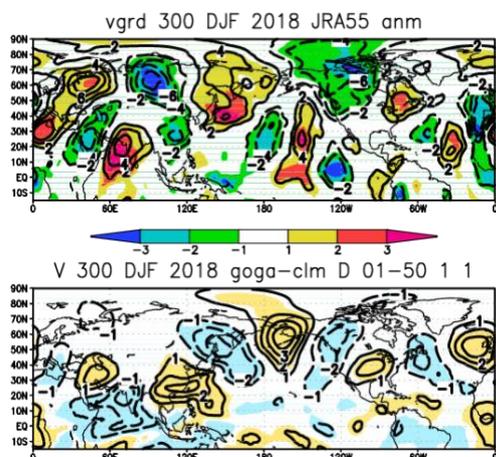


図 3 図 2 と同様。ただし 300 hPa 南北風 (ms^{-1})。

対流圏上部において, ユーラシア大陸南部から日本付近にかけての南北風偏差の正負の列が, 再解析偏差と AGCM 応答の両者に存在し (図 3), 亜熱帯ジェット上を伝播する波の存在を示唆する。しかし, 両者の位相は一致しない。この位相のずれを反映して, 日本上空の 500hPa 高度場は, 再解析では低気圧性偏差を示す一方, AGCM 応答では高気圧性応答を示す (図 4)。これらの高度場偏差/応答に整合的に, 下層では前者では低温偏差, 後者では高温偏差を伴っており (図略), AGCM は観測された低温偏差を再現できなかった。また再解析で見られる高緯度ユーラシア上にある亜寒帯ジェット上の波列は AGCM の応答では見られない。亜熱帯ジェットと亜寒帯ジェット上をそれぞれ伝わる波が AGCM 中で再現されなかったことが, 日本付近での低温偏差が再現されなかった一要因と考えられる。

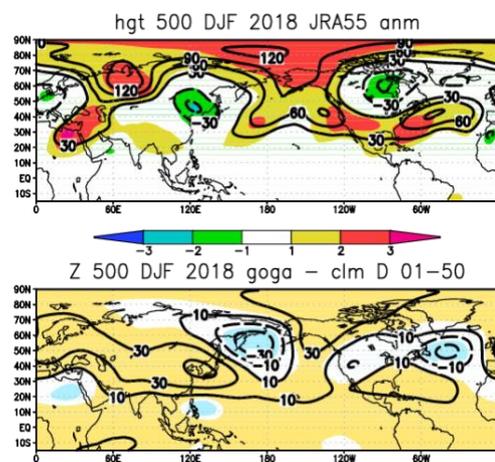


図 4 図 2 と同様。ただし 500 hPa 高度場 (m)。

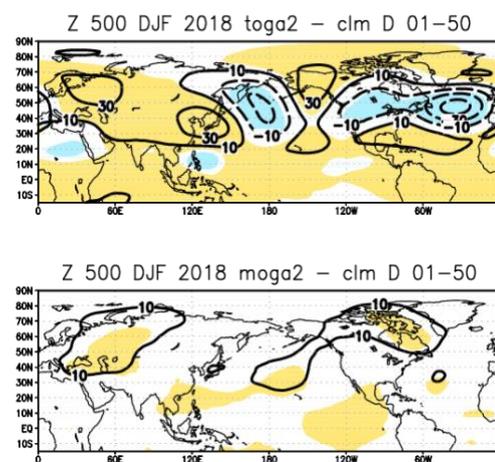


図 5 図 4 と同様。ただし (上) 熱帯 SST 偏差への応答。(下) 中高緯度 SST 偏差への応答。

熱帯 SST 偏差のみに対する高度場応答 (図 5 上) は、振幅がやや小さいものの全球 SST 偏差に対する応答 (図 4 下) とほぼ同じパターンであり、日本付近での高音応答も示している。一方、中高緯度 SST 偏差のみに対する高度場応答 (図 5 下) は、日本付近での高気圧性応答は小さいながら高温偏差を伴う (図略)。表 1 に示した日本付近で領域平均した 850 hPa 気温偏差と応答とを比較すると、全球 SST への応答は約 1.4K であり、そのうち 3 分の 2 を熱帯 SST、3 分の 1 を中高緯度 SST 偏差が寄与していることが示唆される。ただしいずれも再解析での低温偏差を説明しない。

表 1 日本付近 (北緯 30 度~45 度, 東経 130 度~145 度) で平均した 850 hPa 気温偏差/応答 (K)。*は 5% で有意な応答を絵示す。

単位 : °C	2017-18 冬	2019-20 冬
JRA-55 偏差	-1.37	2.06
全球 SST への 応答	1.41*	1.51*
熱帯 SST への 応答	1.01*	0.86*
中高緯度 SST への応答	0.54*	0.83*

4. 2019-20 年の暖冬

2019-20 年冬季には、熱帯の海洋大陸西部と日付変更線付近で、速度ポテンシャルの正と負の偏差がそれぞれ存在していた (図 6 上)。やや位置がずれるものの、これらの偏差は全球 SST 偏差への AGCM 応答でも再現されていた (図 6 下)。インド洋西部では、再解析中で負偏差、つまり対流活動活発化を示している。AGCM 応答では大きな応答は見られないが 150-hPa 気圧面より下で上昇流応答が確認できる (図略)。これらを反映し、ユーラシア大陸南部から日本付近にかけての南北風の正負の偏差、つまり亜熱帯ジェット上の波の位相も、再解析偏差と AGCM 応答とはほぼ一致していた (図 7)。さらに、これと整合的に、再解析中で見られた日本付近での高気圧性偏差と高温偏差も AGCM 応答は再現していた (図 8)。

この高度場応答とほぼ同様なパターンが、熱帯 SST 偏差への応答でも、振幅がやや小さいものの、得られている (図 9 上)。また、中高緯度 SST 偏差へは、北太平洋を覆う高気圧性の高度場応答を示す (図 9 下)。こうした高度場応答に伴い、日本付近では高温応答を示す (表 1)。特に熱帯と中高緯度 SST 偏差それぞれの日本付近での気温応答への寄与がほぼ同等であることに注意されたい。

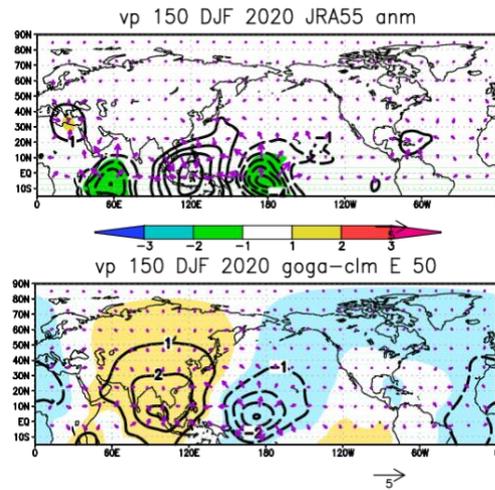


図 6 図 2 と同様。ただし 2019-20 年冬季。

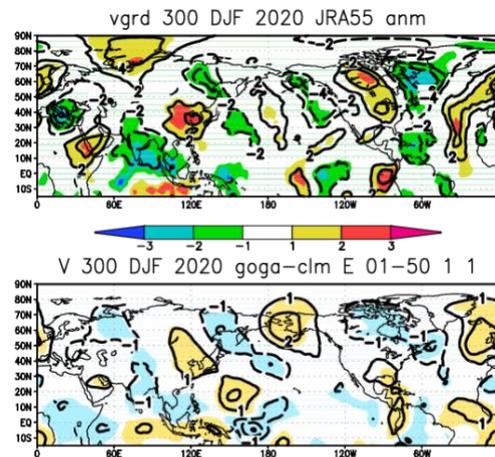


図 7 図 3 と同様。ただし 2019-20 年冬季。

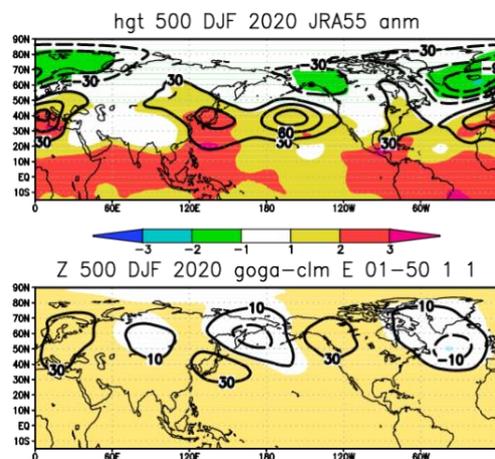


図 8 図 4 と同様。ただし 2019-20 年冬季。

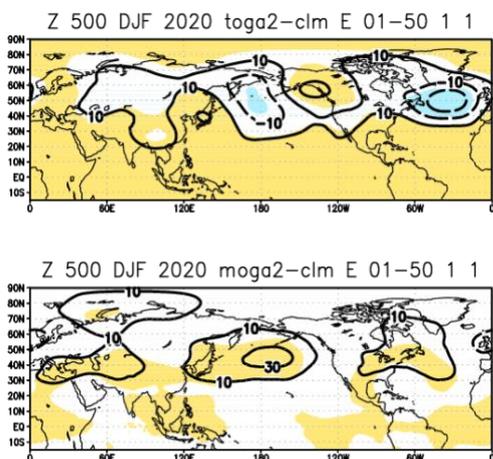


図9 図5と同様。ただし2019-20年冬季。

4. まとめと議論

我々の AGCM 実験では、2017-18 年の日本付近での寒冬は再現できなかった。この直接の要因として、観測された亜熱帯ジェット上の波が AGCM 中で再現できなかったことがまず挙げられる。さらに、この亜熱帯ジェット上の波が再現できなかった理由として、(1)AGCM が熱帯での対流活動偏差を再現できず、対流活動が励起する波の位相も再現できなかった可能性と、(2)亜熱帯ジェット上の波が、観測された熱帯対流活動偏差によって励起されていない波であった可能性、のどちらかが考えられる。熱帯対流活動と波を議論するため、線形傾圧モデル実験[5]を行なった。強制として、再解析データから得られた冬季平均非断熱加熱偏差を熱帯のみに与えた。

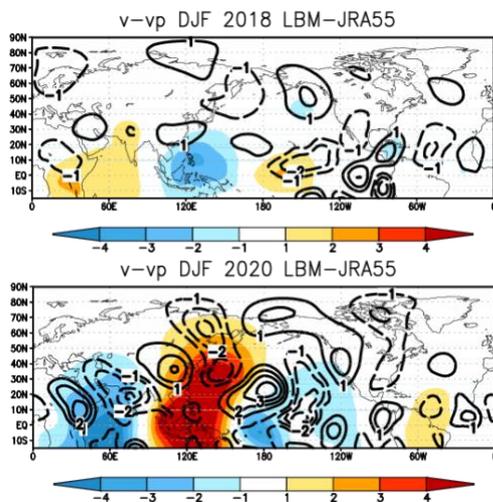


図10 熱帯の非断熱加熱偏差への線形応答。等値線は σ 面0.29での南北風 (ms^{-1})、色は σ 面0.17での速度ポテンシャル ($10^6 \text{m}^2 \text{s}^{-1}$)。 (上)2017-18年冬季、 (下)2019-20年冬季。

2017-18年冬季の熱帯の非断熱加熱偏差への速度ポテ

ンシャル応答は、熱帯で再解析での偏差とほぼ同様な分布を示す(図2上)。亜熱帯ジェット上の南北風偏差は比較的弱いものの東西方向に正負が並び、波の構造を示す。しかし、中国南東部で正、日本の北東で負を示すなど、波の位相は再解析のものより、AGCM中の応答に近い。このことは、観測された熱帯の対流活動偏差は、AGCM中の熱帯対流活動偏差が励起する波と、ほぼ同じ位相の波を励起しうることを示しており、これは熱帯の対流活動偏差は、観測された亜熱帯ジェット上の波を励起しないことを示唆している。よってこの波は SST 偏差以外の要因で励起された可能性が高い。

2019-20年の冬に関しては、観測された熱帯対流活動と亜熱帯ジェット上の波の両者を AGCM がある程度再現している。また、線形傾圧モデルでも亜熱帯ジェット上の波を再現できていることから、熱帯の SST 偏差が、日本付近の暖冬にある程度寄与していたと考えられる。

一方、中高緯度での SST 偏差のみを与えた実験では、どちらの冬も日本付近の高温偏差をもたらしていた。特に、2019-20年の冬では熱帯 SST 偏差による寄与と同等であった。このことは、中高緯度 SST 偏差の重要性を示すものである。しかしその具体的なメカニズムは不明であり、今後の課題である。

謝辞

本研究は地球シミュレータ公募課題「中緯度大気海洋結合変動が季節予測可能性に与える影響」の一環として行われた。

文献

- [1] 異常気象分析検討会, <https://www.jma.go.jp/jma/press/1803/05b/h30fuyuyotenkou20180305.html>, (2020年7月閲覧)
- [2] 異常気象分析検討会, <https://www.jma.go.jp/jma/press/2004/14b/kentoukai20200414.html>, (2020年7月閲覧)
- [3] T., Doi, S. Behera, K., and T. Yamagata, "Wintertime impacts of the 2019 super IOD on East Asia", *Geophysical Research Letters*, 47, e2020GL089456. 2020. (2020年9月)
- [4] S. Kobayashi, Y. Ota, Y. Harada, A. Ebata, M. Moriya, H. Onoda, K. Onogi, H. Kamahori, C. Kobayashi, H. Endo, K. Miyaoka, and K. Takahashi, "The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics", *J. Meteor. Soc. Japan*, 93, 5-48, 2015. (2015年3月)
- [5] M. Watanabe, and M. Kimoto, "Atmosphere-ocean thermal coupling in the North Atlantic: A positive feedback", *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 126, 3343-3369, 2000. (2000年10月)

AGCM Simulations of 2017-18 and 2019-20 Winters

Project Representative

Hisashi Nakamura

Research Center for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo

Authors

Kazuaki Nishii*¹, Bunmei Taguchi*², Yu Kosaka*³, Hisashi Nakamura*³

*¹Graduate School of Bioresources, Mie University, *²Faculty of Sustainable Design, Toyama University, *³Research Center for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo

The 2017-18 winter in Japan was colder than normal, while the 2019-20 winter in Japan was the warmest since records began in 1898. We performed AGCM ensemble simulations to examine effects of sea surface temperature (SST) on these winter time climate situations around Japan. Our AGCM is unable to simulate observed wave train along the subtropical jet over Eurasia in the 2017-18 winter, a likely cause of the failure in simulating observed cyclonic height anomaly and cool anomaly over Japan in response to the observed SST anomalies. In contrast, our AGCM is able to simulate observed wave train along the subtropical jet in the 2019-20 winter, possibly having led to the successful simulation of observed anticyclonic height anomaly and warm anomaly over Japan. These results suggest that the observed sea surface temperature anomaly was not likely to contribute to the cold winter in 2017-18, while contributed to the warm winter in 2019-20.

Keywords : Warm winter, Cold winter, Extratropical ocean, Atmospheric general circulation

1. Introduction

The 2017-18 winter in Japan was colder than normal in association with enhanced East Asian winter monsoon [1]. It is pointed out that enhanced convection in the tropics over the Maritime continent due to the La Niña event led to the enhanced winter monsoon. In contrast, the 2019-20 winter in Japan was the warmest since records began in 1898 [2]. In addition to the anthropogenic global warming, inactive convection over the Maritime continent and the negative phase of the Arctic Oscillation are thought as the causes of the warm winter. A recent study [3] suggests the positive phase of the Indian dipole mode triggered a wave train along the subtropical jet over Eurasia, which led to the warming over Japan. The aim of this study is to investigate the contributions of the SST anomalies to those anomalous winters in Japan.

2. Numerical experiments

We used an atmospheric general circulation model (AGCM) AFES (AGCM For Earth Simulator) that is configured at horizontal resolution T119 (about 100km). We performed two kinds of AGCM experiments forced with different lower-boundary conditions as follows. In the Global Ocean-Global Atmosphere (GOGA) experiment, we prescribed observed daily SSTs over the global ocean. In the climatological (CLM) experiment, the climatological SSTs are prescribed entirely over the global ocean. Each of the two experiments has 50 ensemble members integrated from September 1, 2017 (2019) through March 31, 2018 (2020). The ensemble-mean differences between the GOGA and CLM experiments are considered as responses to the SST anomalies. The Japanese 55-year Reanalysis (JRA-55) dataset is used to verify the model results.

3. The cold 2017-18 winter

The upper-tropospheric velocity potential shows a negative anomaly over the Maritime continent in the reanalysis (Fig. 1), which suggests active convection there in this winter. This may be due to a positive SST anomaly around the Maritime continent. In the GOGA experiment, the region of enhanced convection is limited in the east of the Maritime continent and convection is suppressed in the eastern Indian Ocean. This suppression may be due to a cold SST anomaly in the eastern tropical Indian Ocean.

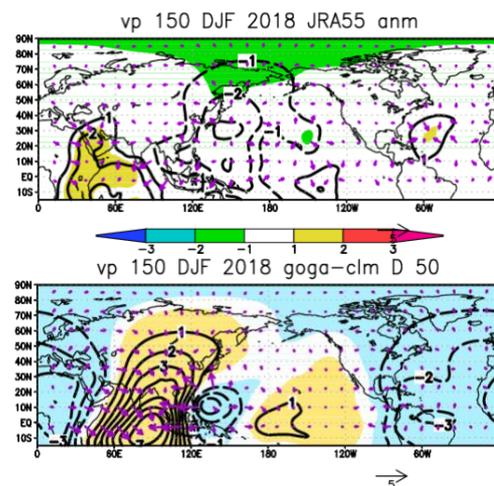


Fig. 1. Upper panel: anomalies (contour: $10^6 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$) and normalized anomalies (shade) of 150-hPa velocity potential in 2017-18 winter in the reanalysis. Purple arrows are for divergent wind anomalies (ms^{-1}). Lower panel: responses of 150-hPa velocity potential (contour: $10^6 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$). Yellow and blue shading are for positively and negatively significant anomalies at the 5 % level. Purple arrows are for divergent wind responses (ms^{-1}).

In the reanalysis, positive and negative anomalies of upper-tropospheric meridional wind form a zonal sequence over the southern Eurasian continent and Japan (Fig. 2), which hints at a wave train propagating along the subtropical jet. This wave train might force a cyclonic height anomaly over the East Asia, which enhanced the winter monsoon over the East Asia and led to the cold winter in Japan. In the GOGA experiment, the meridional wind responses also show a wavy pattern along the subtropical jet. However, the phase of the wave train is different from that in the reanalysis and might lead to an anticyclonic height response over Japan. This anticyclonic response accompanies warm anomaly over Japan. Thus, the responses to the global SST anomalies in our AGCM are not consistent with the observed anomalies.

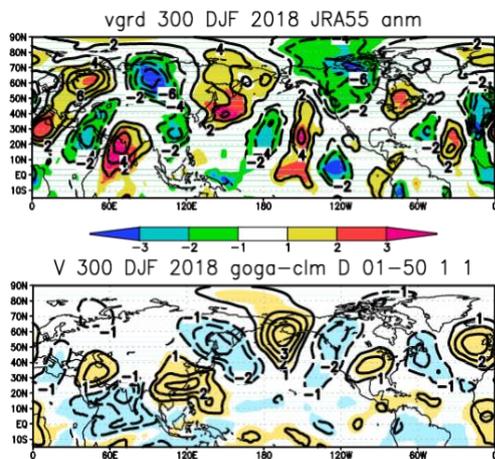


Fig. 2. As in Fig. 1, but for 300-hPa meridional wind (ms^{-1}).

4. The warm 2019-20 winter

The velocity potential anomalies in the tropics are positive over the tropical Maritime continent and negative in the central tropical Pacific in the reanalysis (Fig. 3). These anomalies are consistent with the responses in the AGCM although the positions are slightly different.

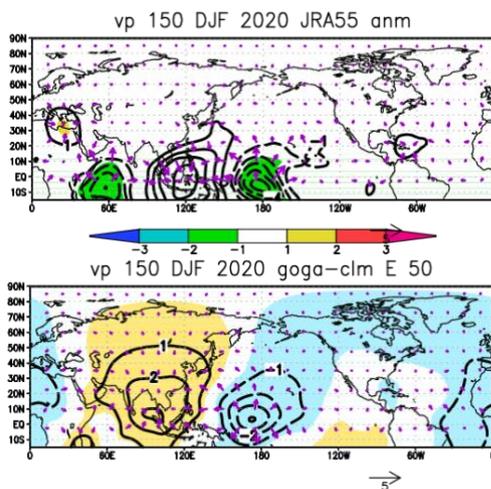


Fig. 3. As in Fig. 1, but for 2019-20 winter.

The response of meridional wind anomalies over Eurasia and Japan in the AGCM are also consistent with the anomalies in the reanalysis (Fig. 4). The height and temperature responses are positive over Japan, which are also consistent with the reanalysis. These suggest that the anomalous tropical convection forced by tropical SST anomalies triggered the wave train along the subtropical jet and warm anomalies over Japan in the 2019/20 winter.

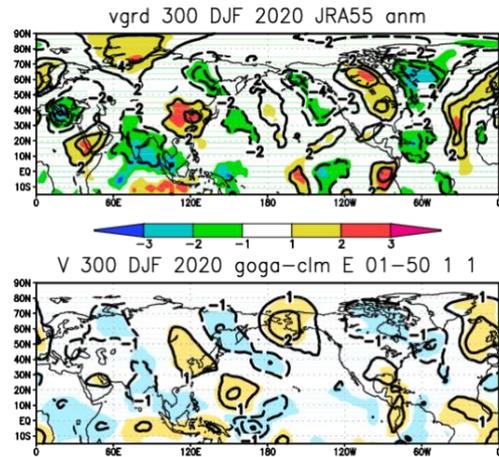


Fig. 4. As in Fig. 2, but for 2019-20 winter.

5. Conclusions

Our AGCM experiments suggest that SST anomalies in the tropics contributed to the warm winter in Japan in the 2019-20 by triggering a wave train along the subtropical jet, while the cold winter in Japan in the 2017-18 may not be forced by SST anomalies. Our results suggests that the wave train along the subtropical jet in the 2017-18 winter may not be forced by SST anomalies.

Acknowledgement

This work was conducted as a part of Earth Simulator Proposed Research Project, entitled “Impacts of extratropical coupled ocean-atmosphere variability on seasonal predictability”

References

- [1] the Advisory Panel on Extreme Climate Events of JMA(in Japanese), <https://www.jma.go.jp/jma/press/1803/05b/h30fuyunotenkou20180305.html>
- [2] the Advisory Panel on Extreme Climate Events of JMA (in Japanese), <https://www.jma.go.jp/jma/press/2004/14b/kentoukai20200414.html>
- [3] T., Doi, S. Behera, K., and T. Yamagata, “Wintertime impacts of the 2019 super IOD on East Asia”, *Geophysical Research Letters*, 47, e2020GL089456. 2020. (September 2020)