

地球環境変動予測に向けた北極域の変動とその全球的影響の解明

課題責任者

小室 芳樹 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

小室 芳樹*¹, 西井 和晃*², 中村 哲*³, 小野 純*¹, 田口 文明*⁴, 中村 尚*⁵*¹ 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, *² 三重大学 大学院生物資源学研究所, *³ 北海道大学地球環境科学研究所, *⁴ 富山大学 都市デザイン学部, *⁵ 東京大学 先端科学技術研究センター

北極域と中緯度域・全球の双方における気候変動のメカニズム解明と予測精度の改善を目的とし、昨年度までに引き続き地球シミュレータを用いて研究を行った。2018年冬季の北極海海氷減少が北半球中緯度の気候に与えた影響を大気モデルアンサンブル実験で調査し、冬季を通じての有意な影響は抽出できなかったものの、3月に Warm-Arctic Cold-Eurasia (WACE) パターン類似した応答の存在を示唆した。大気モデルを用いて赤道成層圏準2年周期振動(QBO)が北半球極渦活動に与える影響を調べた研究では、QBOが東風位相の時に対流圏経路で成層圏の極渦を弱める経路が存在することを示し、定量的にも観測に匹敵する応答を示した。また、気候モデルを用いて北極海海氷厚の初期値化が海氷面積の予測可能性に与える影響を調べた研究では、4月の海氷厚分布が融解期の海氷密接度誤差を介して9月の海氷面積の予測可能性に影響を与えること、特に太平洋側北極海海氷厚初期値化が有効であることを示した。

キーワード：北極海海氷、気候モデル、WACE パターン、成層圏準2年周期振動、海氷厚初期値化

1. はじめに

我々の課題では、北極域で近年生じている環境の急激な変化とその影響を把握するために、気候系の幅広い構成要素を対象とした学際的な気候研究を行っている。本稿では本年度の成果の中から、2018年冬季の特徴的な海氷変動の影響を論じた研究、および昨年度以前から継続して行っている気候系のメカニズムに関する研究2件を取り上げ、その概要を述べる。

2. 2018年冬季の北半球の気候と北極海海氷減少

2018年冬季は、日本付近に強い寒気がしばしば流れ込み、特に西日本を中心に寒冬となった[1]。この寒波の原因として、ラニーニャ現象に伴う海洋大陸付近での対流活動の活発化に伴う亜熱帯ジェット気流の南下などとともに、バレンツ・カラ海海氷減少による亜寒帯ジェット気流の南下が指摘されている[1]。一方、この冬は、北極海のベーリング海峡の北にあたる領域において顕著な海氷減少が観測されており、この減少が東アジアでの寒波の原因であるとも主張されている[2]。

本研究では、2018年冬季に観測された北極海海氷変動が、北半球の気候場に与える影響について調査するために、大気大循環モデルを用いたアンサンブル実験を行った。

本研究では大気大循環モデル AFES を用いた。水平解像度は約 100 km である。海面水温と海氷密接度データは日別の OISST v2 を用いた。4種類の境界条件を与えた実験をそれぞれ行った。(A)観測された海面水温と海氷を与える実験、(B)海面水温は観測値を与える一方、海氷は気候値を与える実験、(C)海面水温は気候値を与える一方、

海氷は観測値を与える実験、(D)気候値の海面水温と海氷を与える実験、の4種類である。実験期間は2017年9月1日から2018年3月31日までであり、それぞれの実験で100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。気候平均場として1983年から2013年の平均を用いた。

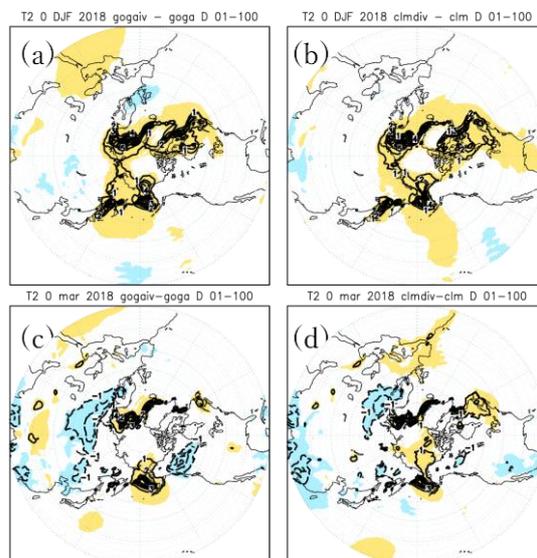


図1 2018年に観測された海氷偏差に対する地上気温の応答。(a)実験AとBの差から求めた冬季(12, 1, 2月)平均の応答。(b)実験CとDの差から求めた冬季平均の応答。(c)実験AとBの差から求めた3月の応答。(d)実験CとDの差から求めた3月の応答。黄色と青色は5%で有意な偏差を表す。

2017年12月から2018年2月まで3ヶ月平均、および100アンサンブルメンバー平均した海水への地上気温応答を、実験AとBとの差、および実験CとDとの差をそれぞれ求めることにより求めた(図1a,b)。前者は観測された海面水温による影響を含む大気循環場を背景とする応答、後者は気候平均の海面水温による影響を含む大気循環場を背景とする応答と解釈できる。どちらも、海水減少が観測されているバレンツ・カラ海、ベーリング海海峡、オホーツク海、カナダ多島海周辺で特に正偏差が大きい。中緯度においては有意な気温偏差は限られ、図1(a)では地中海周辺に、図1(b)では北米東部に正偏差が見られるのみである。我々の実験では観測された東アジア付近での低温偏差を再現できなかった。一方、3月のみのアンサンブル平均応答では、バレンツ・カラ海の高温偏差とユーラシア大陸上で低温偏差が確認される(図1c,d)。この偏差パターンは、海水減少への応答とされる Warm-Arctic Cold Eurasia (WACE) [3]を想起させる。さらに、図1(c)の方が、図1(d)より低温偏差の領域が広範囲に渡るとは、観測された海面水温による影響を含む大気循環場を背景とするほうが、海水に対する応答が大きなことを示唆する。またユーラシア大陸南部や北米西部にも低温偏差がみられる。ただし2018年3月にはこうした気温偏差は観測されておらず、現実大気では、海面水温偏差に対する大気応答や大気の内変動が卓越していたと考えられる。

3. 成層圏 QBO が北半球極渦活動に及ぼす影響の対流圏経路

赤道成層圏準2年周期振動(Quasi Biennial Oscillation, QBO)が東風位相のときには極渦が弱く、西風位相のときに強い傾向にある(以下HT関係と表記)[4]。このHT関係は、成層圏過程によると考えられているが、対流圏を通

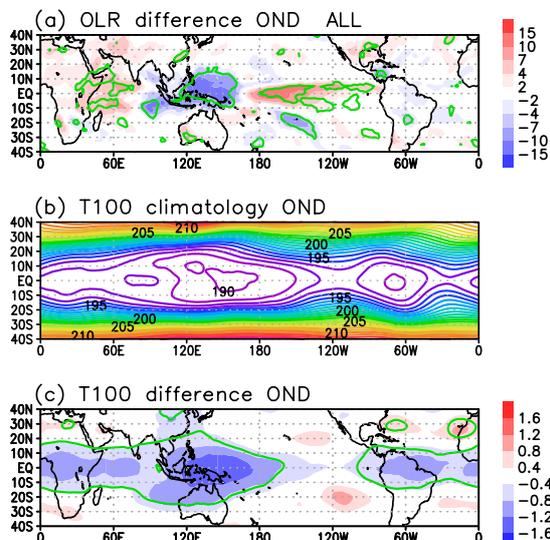


図2 (a) QBO 東風位相時と QBO 西風位相時の外向き赤外放射(OLR)の差の合成図(ENSO 年も含む)。10,11,12月の平均。有意水準95%の値に緑線。(b) 100hPa 気温の10,11,12月の平均の気候値。(c) aと同様だが、100hPa 気温の合成図。

した過程があるのではないかとこの仮説を提示した[5]。QBOが東風位相の時には、対流圏界面の気温が低い。このため、熱帯西太平洋で対流活動が活発になる。この対流がロスビー波を励起して中高緯度対流圏に伝播する。伝播した波は気候場の波と同位相で惑星波を強める。対流圏で強まった惑星波が成層圏へ伝播し極渦を弱めるという過程である。

本研究では、この仮説を立証するため、再解析データ分析、線形傾圧モデル実験、大気大循環モデル実験を組み合わせた一連の解析を行った。1979-2016年のERA-interim再解析データおよびOLRを使用した。QBOの位相は50-hPaの赤道域の冬(DJF)の帯状平均東西風から決定した。QBOが東風位相と西風位相の差(以下、QBOシグナル)の合成図解析を行った。気象庁の定義によるEl NinoとLa Ninaを除外した解析も行い、共通の特徴を抽出した。

数値実験には線形傾圧モデル(LBM)[6]および大気大循環モデルAFES4.1-T79L56を使用した。気候値のSSTや海水を用いた60年間の基準実験に対して、熱帯西太平洋域(150E,5N)を中心に正の対流加熱を与えた実験(CONV1)及びさらにインド洋域(70E,5N)を中心に負の対流加熱を与えた実験(CONV2)を60年行い、基準実験との差を見た。

QBOの位相で極渦に差がでるのは11月から1月である。極渦の偏差が生成される時期として10,11,12月のOLRの差を図2(a)に示す。熱帯西太平洋域でOLRが負、即ち、E-QBOのときに対流活動が活発になる。インド洋では不活発になる。これらはENSO年を除外しても見られる特

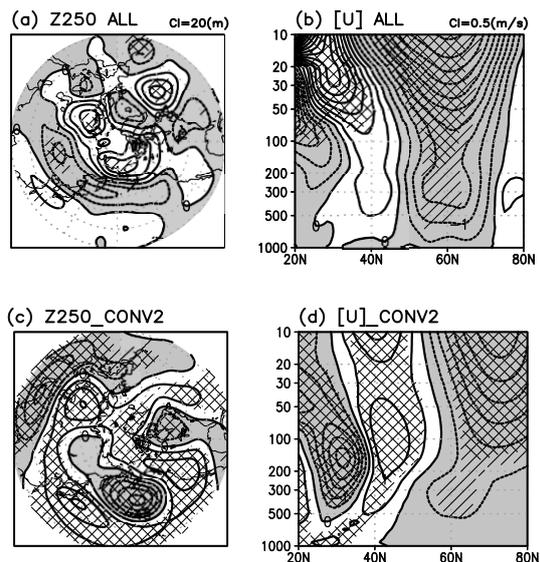


図3 ERA interim 再解析データを用いた11月の(a)250 hPa高度および(b)帯状平均東西風のQBOシグナル(東風位相時 - 西風位相時)。大気大循環モデル実験による熱帯西太平洋に正の対流加熱、インド洋に負の対流加熱(CONV2実験)を与えたときの11月の(c)250 hPa高度応答および(d)帯状平均東西風。高度場および東西風の等値線間隔はそれぞれ20mと0.5m/s。負の領域に影。90,95%で有意な値に斜線及び二重斜線。

徴である。一方、中東部赤道太平洋での対流不活発域は ENSO 年を除外すると現れない。

11 月の気候場について熱帯西太平洋域の対流加熱による大気の影響を LBM で求めると、気候値の波成分と似ており、気候値の惑星波を強めることを意味する(図省略)。一方、インド洋での加熱は気候場の波を弱める傾向にある。しかし、LBM で再現された線形応答は観測される QBO シグナル(図 3 a, b) と比較すると 1 桁小さい。

そこで非線形過程も含む AGCM 実験を行った。OLR の QBO シグナルを模した対流加熱を熱帯に与えて応答を見た。11 月の CONV2 の応答は北太平洋域で負の高度偏差で気候値のトラフを強め、極渦は弱くなる(図 3 c, d)。偏差の大きさも観測される QBO シグナルとほぼ同じ大きさとなった。CONV1 もほぼ同様であった。また、対流圏から成層圏へ伝わる波活動度および極渦の強さを月ごとに見ると、11 月は観測と匹敵する応答であるが 12 月はかなり弱かった(図 4)。

QBO 東風位相の時に対流圏界面の気温が低く熱帯西太平洋で対流が活発になり、その加熱影響が中緯度へ伝播し気候場の惑星波を強化し成層圏の極渦を弱めることが、AGCM 実験で示された。定量的にも観測に匹敵する応答を示した。このとき中緯度における非線形的な相互作用プロセス(波-平均流相互作用や、波-波相互作用)により波活動が増幅され、成層圏へ伝搬できる大きな振幅を持つと考えられる。対流圏過程は 11 月に重要な寄与があり、12 月以降も多少寄与する。真冬は従来の成層圏過程が HT 関係を作ると考えられる。

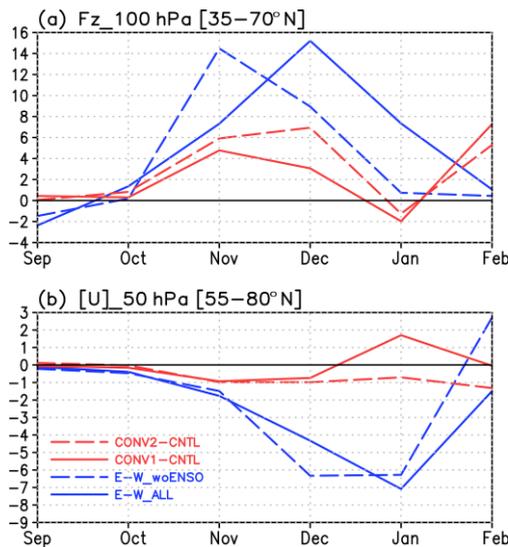


図4 (a) 100hPa 鉛直上向き波活動度 (35-70N 平均) および (b) 極渦 (50 hPa に於ける 55-80N 平均した退場平均東西風) の QBO シグナル (東風位相時 - 西風位相時)。青線。実線は全年、破線は ENSO 除外年。赤線は AGCM 実験の結果。実線は熱帯西太平洋に正の対流加熱を加えたときの偏差(CONV1)。破線はさらにインド洋に負の対流加熱を加えたときの偏差(CONV2)。横軸は月。縦軸の単位は m/s。

4. 春の海氷厚が夏の海氷面積の予測可能性に与える影響

1970 年代後半から始まった衛星観測は、北極海の全ての月の海氷面積に減少傾向が現れていることを示している。特に 9 月は、10 年あたり約 13% の割合で海氷面積が減少している。海氷減少の影響は北極域にとどまらず、中緯度域の気候変化や北極海航路を利用した経済活動にまで波及しており、季節から経年スケールの海氷予測に対する要請が急増している。北極海の海氷面積の潜在的予測可能性は 1~2 年程度と示唆されている。一方、気候モデルを用いて過去に観測された海氷面積を予測した場合、その精度は数ヶ月程度である[7]。したがって、海氷の予測精度には改善の余地が残されており、その鍵となる物理量は海氷変動のメモリと考えられている海氷厚や垂表層水温である。本研究では海氷厚に着目し、海氷面積の予測精度に与える影響を調べたので、その結果について報告する。

本研究では、気候モデル MIROC5.2 [8]を使用した。大気は水平解像度約 300 km で鉛直 40 層、海洋は水平解像度約 1 度で鉛直 63 層、海氷はマルチカテゴリモデルである[9]。実験設定は、北極域の予測可能性に関する国際プロジェクト APPOSITE [10]のプロトコルに従い、まず 2000 年条件に固定したコントロール実験 (1000 年間) を実施した。次にコントロール実験をリファレンスとして、海氷厚の初期値ありとなしのアンサンブル予測実験を実施した。初期値ありの実験では海氷厚の初期値はコントロール実験の値を使用し、初期値なしの実験では海氷厚の初期値はコントロール実験の気候値に置き換えた。両実験では、事例数は 10、アンサンブル数は 8、予測開始は 4 月 1 日とした。両実験で得られた各物理量の差を比較することで、海氷厚の初期値化の影響を評価した。

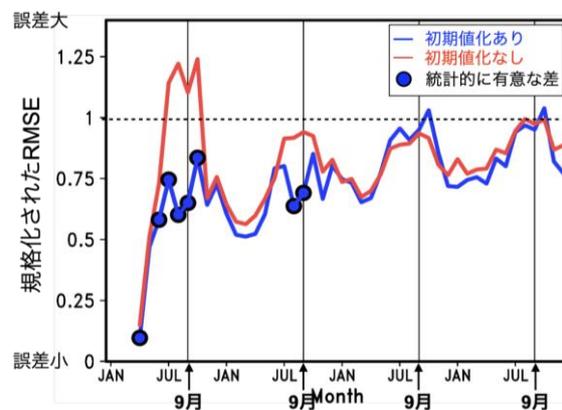


図5 海氷厚の初期値あり(青線)となし(赤線)の実験から得られた海氷面積の予測誤差の時系列。横軸は 4 月からの予測期間 (3 年 9 ヶ月)、縦軸はコントロール実験の標準偏差で規格化した RMSE である。青丸は二つの実験結果の差が統計的に有意であることを示している。水平方向の実線は予測可能性有無の境界を、垂直方向の実線は 9 月を示している。

海氷厚の初期値化ありの実験は、二年目の夏の海氷面積も予測可能であることを示す(図5の青線)。一方、海氷厚を初期値化しない場合、海氷面積の誤差が6月から10月にかけて大きくなり、9月の海氷面積を予測できないことがわかる(図5の赤線)。この大きな誤差は、7月から9月にかけての太平洋側北極海における海氷誤差に起因していることが示唆された(図6左)。そこで太平洋側北極海における4月の海氷厚初期値化が9月の海氷面積の予測に影響を与えているのかを調べるために、太平洋側北極海のみ初期値化する実験を行なった結果、海氷密度の誤差は太平洋側北極海で有意に減少し(図6右)、9月の海氷面積は予測可能になることがわかった(図略)。本研究の結果は、太平洋側北極海のみ海氷厚初期値化が夏の海氷面積の予測に効果的であることを示唆するものである[11]。

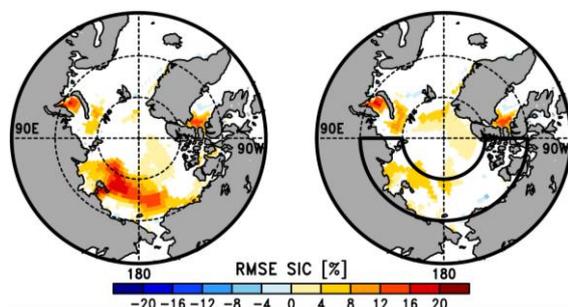


図6 4月の海氷厚を(左)初期値化しない実験と(右)太平洋側北極海(太線枠)のみ初期値化する実験の予測1年目9月(リードタイム6ヶ月)の海氷密度誤差(%)の空間分布。色は誤差が有意に大きい場所を示す。

謝辞

本研究は北極域研究推進プロジェクト(ArCS) JPMXD1300000000の一環として実施されたものです。本研究の一部は、Belmont Forum、及びWNI気象文化創造センターより研究助成を得ました。

文献

- [1] 気象庁, “平成30年冬の天候の特徴とその要因について～異常気象分析検討会の分析結果の概要～”, <https://www.jma.go.jp/jma/press/1803/05b/h30fuyunotenkou20180305.html> (2020年8月17日確認).
- [2] Y. Tachibana, K. K. Komatsu, K.K., V. A. Alexeev, et al. “Warm hole in Pacific Arctic sea ice cover forced mid-latitude Northern Hemisphere cooling during winter 2017–18”, *Sci. Rep.* 9, 5567, 2019.
- [3] M.Mori, M. Watanabe, H. Shioyama, J. Inoue, M. Kimoto, “Robust Arctic sea-ice influence on the frequent Eurasian cold winters in past decades”, *Nature Geoscience*, 7, 869–873, 2014.
- [4] Holton, J. R. and H. -C. Tan, “The influence of the equatorial quasi-biennial oscillation on the global circulation at 50 mb”, *Journal of the Atmospheric Science*, 37, 2200–2208, (October

1980).

[5] Yamazaki, K., T. Nakamura, J. Ukita, and K. Hoshi, “A tropospheric pathway of the stratospheric quasi-biennial oscillation (QBO) impact on the boreal winter polar vortex”, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20, 5111–5127, (April 2020).

[6] Watanabe, M. and M. Kimoto, “Tropical-extratropical connection in the atmosphere-ocean variability”, *Geophysical Research Letters*, 26, 2247–2250, (August 1999).

[7] Ono, J., H. Tatebe, Y. Komuro, M.I. Nodzu, and M. Ishii “Mechanisms influencing seasonal to inter-annual prediction skill of sea ice extent in the Arctic Ocean in MIROC”, *The Cryosphere*, 12, 675–683, (February 2018).

[8] Tatebe, H., Y. Tanaka, Y. Komuro, and H. Hasumi “Impact of deep ocean mixing on the climate mean state in the Southern Ocean” *Scientific Reports*, 8, 14479, doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-32768-6>, (September 2018).

[9] Komuro, Y., T. Suzuki, T.T. Sakamoto, H. Hasumi, M. Ishii, M. Watanabe, T. Nozawa, T. Yokohata, T. Nishimura, K. Ogochi, S. Emori, and M. Kimoto “Sea-ice in twentieth-century simulations by new MIROC coupled models: a comparison between models with high resolution and with ice thickness distribution”, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 90A, 213–232, doi:10.2151/jmsj.2012-A11, (June 2012).

[10] Day, J.J., S. Tietsche, M. Collins, H.F. Goessling, V. Guemas, A. Guillory, W.J. Hurlin, M. Ishii, S.P.E. Keeley, D. Matei, R. Msadek, M. Sigmond, H. Tatebe, and Ed Hawkins “The Arctic predictability and prediction on seasonal-to-interannual timescales (APPOSITE) data set version 1”, *Geoscientific Model Development*, 9, 2255–2270, doi: 10.5194/gmd-9-2255-2016, (June 2016).

[11] Ono, J., Y. Komuro, and H. Tatebe “Impact of sea-ice thickness initialized in April on Arctic sea-ice extent predictability with the MIROC climate model”, *Annals of Glaciology*, 1–9, doi:10.1017/aog.2020.13, (April 2020).

Understanding the Arctic Climate Change and Its Global Impact for Climate Change Projection

Project Representative

Yoshiki Komuro Institute for Arctic Climate and Environmental Research, Research Institute for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Authors

Yoshiki Komuro^{*1}, Kazuaki Nishii^{*2}, Tetsu Nakamura^{*3}, Jun Ono^{*1}, Bunmei Taguchi^{*4}, Hisashi Nakamura^{*5}

*1 Institute for Arctic Climate and Environmental Research, Research Institute for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

*2 Graduate School of Bioresources, Mie University

*3 Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University

*4 Faculty of Sustainable Design, University of Toyama

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

We have been performing several studies to understand the mechanism of climate variability in the Arctic and mid-latitudes. Firstly, the potential effects of abnormal low Arctic sea-ice condition in the 2018 winter on the northern mid-latitudes climate have been assessed through a set of ensemble experiments of a general circulation model (AGCM). It is suggested that the sea ice decline in March has the potential to induce the WACE pattern, which includes a cold anomaly over the Eurasian continent. Secondly, the quasi-biennial oscillation (QBO) impacts on the winter Northern Hemisphere stratospheric polar vortex have been investigated using AGCM. Our research shows a pathway to weaken the stratospheric polar vortex via tropospheric processes, which is active in the easterly phase of the QBO. Thirdly, we have studied the effect of spring sea-ice thickness initialization on summer sea-ice extent predictability by using an atmosphere-ice-ocean coupled model. We indicate that Arctic sea-ice thickness initialization in April, particularly in the Pacific sector, has a large impact on the prediction of sea-ice concentration in September.

Keywords: Arctic sea ice, Climate model, WACE pattern, Quasi Biennial Oscillation, Sea-ice thickness initialization

1. Introduction

Our research group has been performing interdisciplinary climate studies focusing not only on the Arctic but also on more extensive areas to understand a drastic change in the recent Arctic and its impact. This article presents a study on the effects of a significant sea-ice loss in the Arctic Ocean in the 2018 winter. Two other research activities on the mechanism of the climate system are also presented.

2. Northern Hemisphere Climate and Arctic sea ice reduction in 2018 winter

Japan experienced frequent cold air outbreaks in 2018 winter. Japan Meteorological Agency attributed these to the La Nina event as well as sea ice reduction in the Barents Kara sea [1], while another study [2] claimed that sea ice reduction to the north of Bering Strait caused the cold winter. The aim of this study is to investigate potential impact of the sea ice condition to the wintertime climate in the 2018 winter through a set of ensemble experiments of a general circulation model (AGCM).

We used an AGCM by the name of AFES (AGCM For Earth

Simulator) configured at horizontal resolution T119 (about 100km). We performed four kinds of AGCM experiments forced with different lower-boundary conditions as follows. In experiment A, we prescribed observed daily SSTs and sea ice. In B, we prescribed observed daily SSTs and climatological sea ice. In C, we prescribed climatological SSTs and observed daily sea ice. In D, we prescribed climatological SSTs and sea ice. Each of the four experiments has 100 ensemble members integrated from September 1st, 2017 through March 31st, 2018.

Ensemble-mean and winter-mean (DJF) responses of surface air temperatures (SATs) are calculated by two ways. One is by taking difference between Exps. A and B, while the other is between Exps. C and D. In both responses, warm responses are observed around the Barents Kara sea, Bering Strait, the Sea of Okhotsk, and Canadian Arctic Archipelago where sea ice declined has been observed. However, our experiment failed to explain the cold winter around Japan in this winter. In March, cold responses are observed over Eurasian continent in association with warm anomalies over the Barents Kara sea, whose pattern is similar to the Warm-Arctic Cold Eurasia (WACE) pattern [3]. Our

experiment suggests that the sea ice decline in the March has potential to induce the WACE pattern, although such pattern is not observed presumably because atmospheric anomalies due to SST anomalies and atmospheric internal variability might be large in the real atmosphere.

3. A tropospheric pathway of the stratospheric QBO

The quasi-biennial oscillation (QBO) is quasiperiodic oscillation of the tropical zonal wind in the stratosphere. When the tropical lower stratospheric wind is easterly (westerly), the winter Northern Hemisphere (NH) stratospheric polar vortex tends to be weak (strong). This relation is known as the Holton–Tan relationship [4]. Several mechanisms for this relationship have been proposed, especially linking the tropics with high latitudes through stratospheric pathway. Although QBO impacts on the troposphere have been extensively discussed, a tropospheric pathway of the Holton–Tan relationship has not been explored previously. In a published paper [5], we propose a tropospheric pathway of the QBO impact, which may partly account for the Holton–Tan relationship in early winter, especially in the November–December period.

The study is based on analyses of observational data using ERA-interim reanalysis and NOAA OLR data. The phase of the QBO was defined using the winter (DJF)-averaged zonal-mean zonal wind at 50hPa averaged over 5° S to 5° N. The winters were classified as WQBO or EQBO winters when the absolute values exceeded 3 m s⁻¹.

Results from a linear baroclinic model (LBM) [6] and atmospheric general circulation model (AGCM) simulations are also used. In both models, anomalous convective heating was placed over the western tropical Pacific centered at 5°N-150°E and the Indian Ocean centered at 5°N-70° E.

As a result of the study, we summarized the mechanism as follows: the easterly phase of the QBO is accompanied with colder temperature in the tropical tropopause layer, which enhances convective activity over the tropical western Pacific and suppresses it over the Indian Ocean (Figure 1), thus enhancing the Walker circulation. This convection anomaly generates a Rossby wave train, propagating into the midlatitude troposphere (Figure 2), which constructively interferes with the climatological stationary waves, especially in wavenumber 1, resulting in enhanced upward propagation of the planetary wave

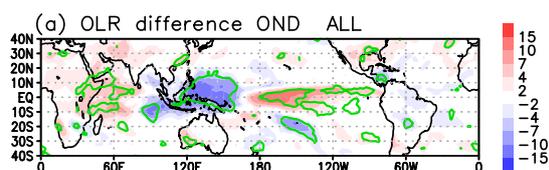


Figure 1. October–November–December (OND) mean OLR differences between easterly QBO and westerly QBO winters, using NOAA OLR data. Green lines denote the statistically significant value at the 95% confidence level.

and a weakened polar vortex.

4. Effect of spring sea ice thickness on the predictability of summer sea ice extent

The Arctic sea-ice cover has decreased in all months since satellite observations began in the late 1970s. The decline in Arctic sea ice influences the climate system not only in the Arctic region but also in the midlatitudes and economic activity via the Northern Sea Route. Therefore, there is a need for accurate seasonal-to-interannual sea-ice forecasts. The key variables for improving predictive skill are sea-ice thickness (SIT) and subsurface water temperatures, which are thought to be a memory for sea-ice variability. Hence, the initialization of these physical quantities is very important for seasonal-to-interannual sea-ice forecasts.

In this study, based on the perfect model experiments following APPOSITE [7] using the climate model MIROC5.2 [8], we investigated the effect and process of the initial SIT in April on the predictability of the sea ice extent (SIE) in September. Due to the persistence of SIT initialized in April, the September SIE was predictable until the second year (blue line in Figure 3), and the results were consistent with previous studies. On the other hand, the large errors in experiments without initialization (red line in Figure 3) can be attributed to the errors in sea ice concentration and thickness in the Pacific sector from July to September, which is caused by the imperfect initialization of

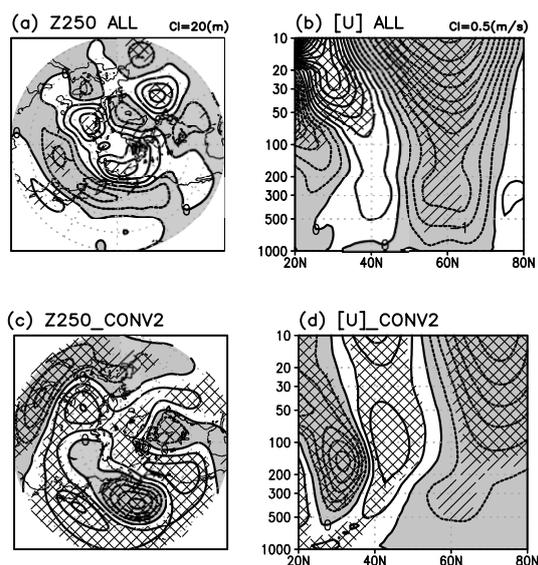


Figure 2. QBO signals (difference between easterly- and westerly-QBO years) of November (a) geopotential height at 250 hPa and (b) zonal mean zonal wind, using ERA interim reanalysis data. AGCM-simulated responses of November (c) geopotential height at 250 hPa and (d) zonal mean zonal wind to the given convective heating. Negative values are shaded and the values statistically significant at 90 % and 95 % level are hatched and double-hatched. Consistent results were obtained between observational and simulation results.

thickness in April (not shown). To confirm whether the April sea ice fields in the Pacific sector determine the September SIE or not, experiments in which the April SIT only in the Pacific sector is initialized were conducted. The differences in the September sea ice concentration and thickness errors between initialization with and without quite decrease in the Pacific sector. Therefore, this study suggests that initialization of the April SIT in the Pacific sector contributes to the skillful prediction of the September SIE [9].

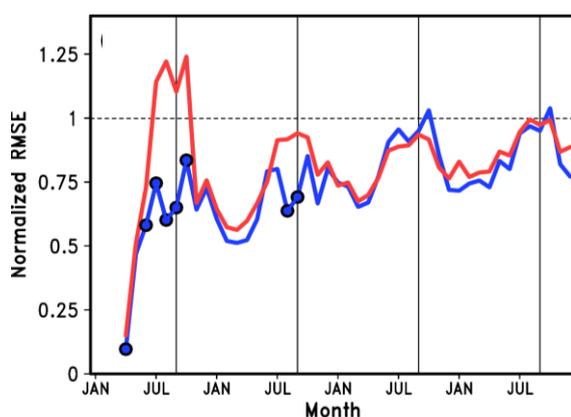


Figure 3. Time series of the normalized RMSE of sea-ice extent in experiments with (blue) and without (red) initialization of sea ice thickness on 1 April. Dots indicate where differences are significant at the 5% levels based on a one-sided F test.

Acknowledgement

This research was a part of the Arctic Challenge for Sustainability (ArCS) Project (Program Grant Number JPMXD130000000). A part of this research has been supported by the Japan Science and Technology Agency (Belmont Forum InterDec Project) and the WNI WxBunka Foundation (Japan) (grant no. PK6J1911).

References

- [1] Japan Meteorological Agency, <https://www.jma.go.jp/jma/press/1803/05b/h30fuyunotenkou20180305.html> (Confirmed in 17th August 2020).
- [2] Y. Tachibana, K. K. Komatsu, K.K., V. A. Alexeev, et al. “Warm hole in Pacific Arctic sea ice cover forced mid-latitude Northern Hemisphere cooling during winter 2017–18”, *Sci. Rep.* 9, 5567, 2019.
- [3] M.Mori, M. Watanabe, H. Shiogama, J. Inoue, M. Kimoto, “Robust Arctic sea-ice influence on the frequent Eurasian cold winters in past decades”, *Nature Geoscience*, 7,869-873, 2014.
- [4] Holton, J. R. and H. -C. Tan, “The influence of the equatorial quasi-biennial oscillation on the global circulation at 50 mb”, *Journal of the Atmospheric Science*, 37, 2200–2208, (October 1980).
- [5] Yamazaki, K., T. Nakamura, J. Ukita, and K. Hoshi, “A tropospheric pathway of the stratospheric quasi-biennial oscillation (QBO) impact on the boreal winter polar vortex”,

Atmospheric Chemistry and Physics, 20, 5111–5127, (April 2020).

[6] Watanabe, M. and M. Kimoto, “Tropical-extratropical connection in the atmosphere-ocean variability”, *Geophysical Research Letters*, 26, 2247–2250, (August 1999).

[7] Day, J.J., S. Tietsche, M. Collins, H.F. Goessling, V. Guemas, A. Guillory, W.J. Hurlin, M. Ishii, S.P.E. Keeley, D. Matei, R. Msadek, M. Sigmond, H. Tatebe, and Ed Hawkins “The Arctic predictability and prediction on seasonal-to-interannual timescales (APPOSITE) data set version 1”, *Geoscientific Model Development*, 9, 2255–2270, doi: 10.5194/gmd-9-2255-2016, (June 2016) .

[8] Tatebe, H., Y. Tanaka, Y. Komuro, and H. Hasumi “Impact of deep ocean mixing on the climate mean state in the Southern Ocean” *Scientific Reports*, 8, 14479, doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-32768-6>, (September 2018).

[9] Ono, J., Y. Komuro, and H. Tatebe “Impact of sea-ice thickness initialized in April on Arctic sea-ice extent predictability with the MIROC climate model”, *Annals of Glaciology*, 1–9, doi:10.1017/aog.2020.13, (April 2020).