

急変する北極気候システム及びその全球的な影響の総合的説明

課題責任者

小室 芳樹 海洋研究開発機構 北極環境変動総合研究センター

著者

小室 芳樹^{*1}, 中村 哲^{*2}, 大石 龍太^{*2}, 高田久美子^{*2}, 吉森 正和^{*3}

*1 海洋研究開発機構 北極環境変動総合研究センター

*2 国立極地研究所 国際北極環境研究センター

*3 北海道大学 大学院地球環境科学研究院

北極域の急速な変化とその変化が全球気候にもたらす影響を科学的に理解しより高精度に予測するために、地球シミュレータを用いて気候モデルの開発とモデルによる気候学的研究を行った。気候モデル MIROC の開発では、融雪水が形成する季節性の湿地の効果を簡易湿地モデルとして新たに取り入れた。これにより、これまで中高緯度陸上で見られた夏季高温バイアスを改善した。MIROC を用いた気候学的研究では、大気熱輸送の北極温暖化への寄与を感度実験により調べた。低緯度のみで CO₂ 濃度を高めた実験でも北極温暖化増幅が見られた。この増幅は低中緯度から北極域への潜熱輸送、およびその結果としての放射フィードバックがもたらしていることを示唆した。北極域の変動の全球気候への影響に関しては、成層圏全層を解像する設定の大気モデル AFES を用いた実験により、最近の北極域の海水減少が中緯度の大陸域に寒冬をもたらすことを示した。さらに、成層圏の変動を人為的に抑制した感度実験を行い、この遠隔影響過程において成層圏 - 対流圏結合、特に極渦とプラネタリー波の相互作用およびその結果としての下部成層圏の東西風変化が重要であることを示した。

キーワード：北極, 気候モデル, 簡易湿地スキーム, 北極温暖化増幅, 成層圏 - 対流圏結合

1. はじめに

北極域は急激な変化に直面している。北極域の気温が全球の気温より急激に上昇する北極温暖化増幅（たとえば、[1]）は代表的な現象であり、夏の海水急減やグリーンランド氷床の融解などとともに注目されている。加えて近年では、北極域の海水減少が日本を含むユーラシアの寒冬を引き起こすといった北極域の変化を原因とする域外への遠隔影響が指摘されるようになり [2][3][4]、社会的な興味や要請もより高まっている。

このような北極域を中心とする全球的な変化を理解し、将来起きうる変化を精度よく予測して社会の意思決定等に資するためには、北極を含む全球の気候系を扱う数値モデル、いわゆる気候モデルの開発と活用が欠かせない。本稿では、地球シミュレータを用いて我々が取り組んでいる、気候モデル MIROC を中心とするモデル開発とそれを用いた気候学的研究から、本年度の代表的な成果を示す。

2. 簡易湿地スキーム導入による全球気候モデルの改良

現行の全球気候モデル MIROC に残る問題点の一つに、中高緯度陸上の高温バイアスが夏に特に大きいことが挙げられる（図1）。一方で、現行の MIROC では融雪水が季節性の湿地などとして一定期間地表面に滞留する効果が考慮されておらず、河川に流出してしまうため、春から夏の陸面からの蒸発量が過小評価されている。そこで、MIROC の陸面に簡易湿地スキームを導入して、その効果が大気に及ぼす影響を調べた。簡易湿地モデルでは融雪時に表面流出の一定割合をためておく"タンク"を追加し、

"タンク"に貯留された水を降水などとともに陸面に入る水に、地形に応じた時定数で加えている。

簡易湿地スキームの導入によって表層土壌水分が年間を通じて増加するが、特に夏の土壌水分が大きく増加し、潜熱も増加して、地上気温が最大 3°C 低下した（図2）。その結果、夏の高温バイアスの一部が低減された。また、他

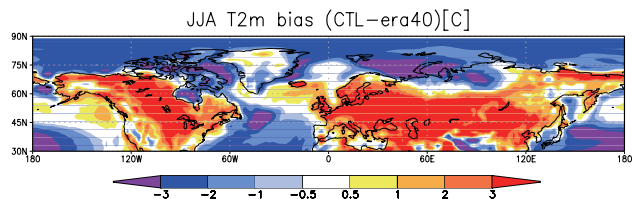


図1 簡易湿地モデル導入前の全球再解析データ (ERA40) に対する夏季 (6-8月平均) の気温バイアス。

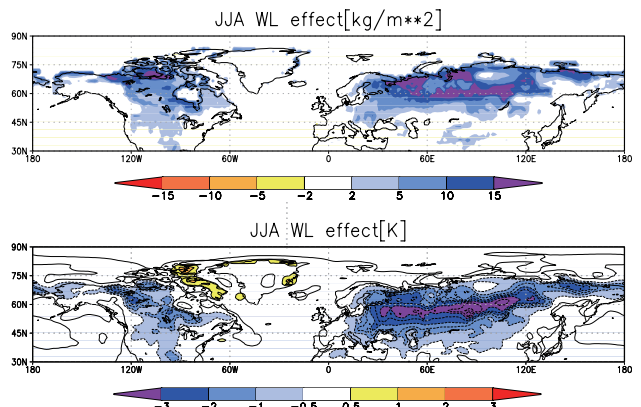


図2 簡易湿地スキームの導入による夏季の表層土壌水分の変化 (上図) と地上気温の変化 (下図)。

の季節での影響は小さく、特に他のバイアスの悪化はほとんど見られなかった（図省略）。

3. 北極温暖化における大気熱輸送の役割

地球温暖化実験において、全球平均と北極域平均の地上気温変化にはモデル間で良い相関がある。このことは、地球全体が温暖化する中で、北極域とそれ以外の地域が大気や海洋を通じて密接に熱交換していることを示唆する。そこで、本研究では、大気熱輸送の北極温暖化への寄与を調べた。具体的には、大気海洋結合モデル MIROC を用いて、低緯度と中高緯度に別々に放射強制を与え、熱輸送の変化とそれがもたらすフィードバック効果によってどのように北極域の温暖化（増幅）が決まるのかを考察した。

産業革命前のコントロール実験と、CO₂ 倍増実験、異なる緯度分布を持つ CO₂ 増加実験 EXTRP と TRP（図3）、計4つの実験を行った。すべての実験は、コントロール実験の安定した気候状態から積分を始めた。それぞれの積分期間は100年である。

図4に、100年積分の最後の20年を平均した地上気温変化の緯度分布を、コントロール実験からの差で示す。中高緯度に正の放射強制を与えた場合（EXTRP）は当然であるが、低緯度にのみ正の放射強制を与えた場合（TRP）にも、北極温暖化増幅が見られる。大気熱輸送の変化を乾燥静的エネルギーと潜熱に分けて、北緯60度でのコン

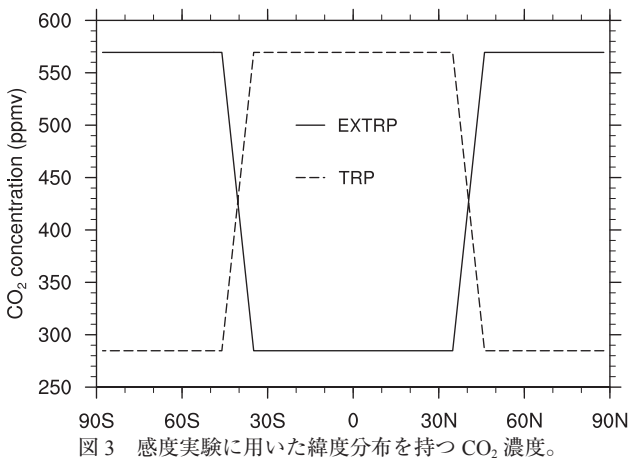


図3 感度実験に用いた緯度分布を持つ CO₂ 濃度。

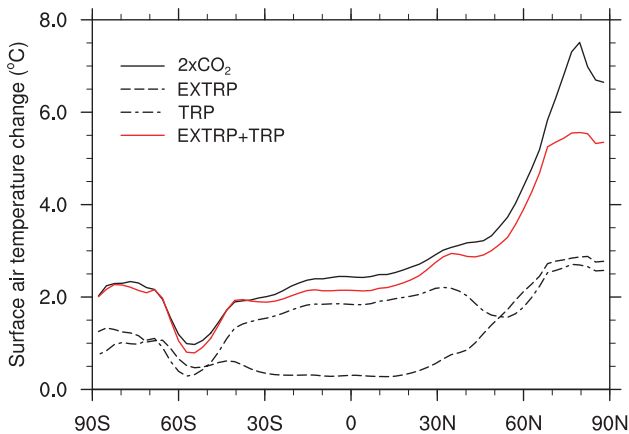


図4 地上気温変化の東西平均した緯度分布。（コントロール実験からの差）。

トロール実験からの差を見たところ（図5）、全ての実験で、乾燥静的エネルギーの輸送は減少していた。低緯度のみ正の放射強制を与えた TRP 実験においても減少していることは、この実験における北極温暖化増幅が乾燥静的エネルギーの輸送ではなく、潜熱の輸送によってもたらされていることを示唆する（ただし、海洋の熱輸送の効果についても調べる必要がある）。一方で、潜熱輸送の増加量は、乾燥静的エネルギー輸送の減少量よりも小さかった。このことから、過渡応答において、潜熱輸送が凝結熱による温度上昇だけでなく、水蒸気や雲の温室効果といった放射フィードバックを引き起こすことによって、北極域の大きな温度上昇を引き起こすという仮説が立てられる。この仮説の検証には、もちろん、さらなる解析が必要である。

4. 北極域の海水減少が中緯度に及ぼす影響と対流圏-成層圏結合

北極域の変動が中低緯度域にもたらす影響の把握と理解は、現在の北極研究における主要な課題の一つである。本研究 [4][5] では、近年の北極域の海水減少と中緯度の気候、特に北極振動（Arctic Oscillation: AO）との間の関連を調べた。観測データの解析からは、晩秋の海水減少が冬季に負の AO をもたらすことが明らかになった。そこで、

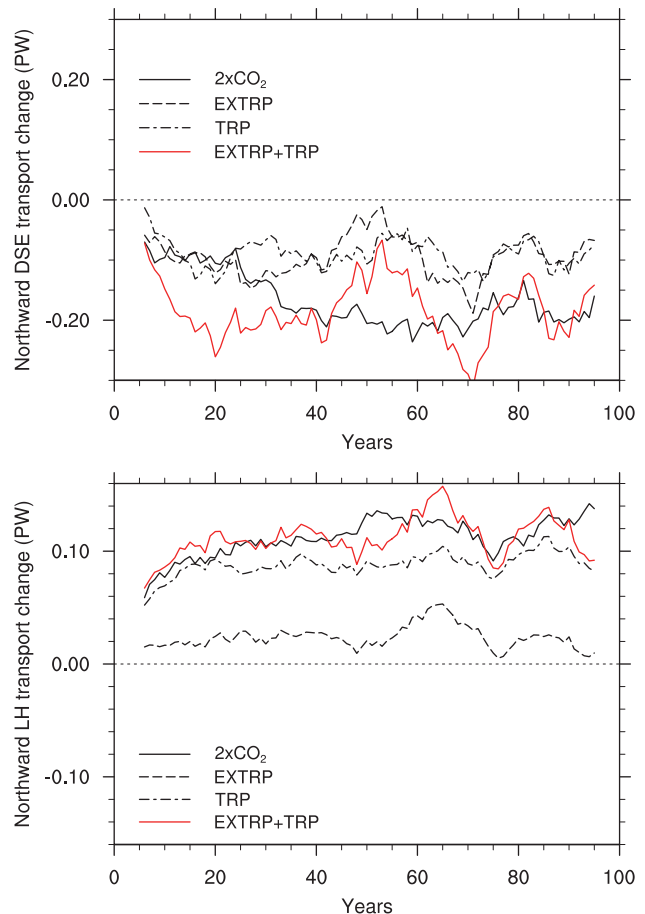


図5 60°Nにおける東西積分した、（上図）乾燥静的エネルギー輸送の変化（下図）潜熱輸送の変化。いずれもコントロール実験からの差を11年移動平均して示す。横軸は年。2つの図の縦軸と範囲は異なることに注意。

成層圏全層を解像する大気大循環モデル (AFES version 4.1) を用いて観測された海水減少に対する大気の応答を調べた。シミュレーション結果は、最近の北極域の海水減少が中緯度の大陸域に寒い冬をもたらすことを示した。これは負の AO に似たパターンであり、AO 指数が大きな負となる頻度が倍以上に増加した。この負の AO に伴って北極から中緯度への寒気移流が増加する。バレンツ海の海水減少が定常ロスビー波を励起しこの循環偏差をつくる。子午面循環偏差は中緯度を冷やし高緯度を暖める正のフィードバック効果をもつ。この子午面循環フィードバックによる北極域温暖化効果は海水減少による海表面からの直接の熱フラックスによる北極域温暖化の 60% に相当する。

この AFES モデルの結果はまた成層圏・対流圏結合を通して対流圏の AO に影響する点において、成層圏が決定的に重要であることを示唆する。最近の他の研究も成層圏の役割を示唆しているが、まだその正確な役割についてははっきりしていない。そこで、成層圏の変動をフルに計算する標準実験 FREE に対して、高度 10hPa・30hPa より上で変動を抑制し成層圏における波-平均流相互作用を人工的に弱める追加実験 RS10・RS30 を行い、結果を比較した (図 6)。FREE では成層圏の極渦弱体化と対流圏の偏差が結合し、負の AO シグナルが顕著に見られたが、成層圏変動を抑制した RS10、RS30 の両ケースではそのようなシグナルは見られず、対流圏の AO 応答は非常に弱くなることが示された。この結果は海水が中緯度に与える影響において成層圏、特に、極渦とプラネタリー波の相互作用およびその結果の下部成層圏の東西風変化が決定的に重要であることを確認するものである。また中緯度の気象や気候の季節内から 10 年規模の時間スケールでの予測精度を向上させるためには北極域の境界条件と成層圏過程の現実的な表現が必須であることを意味している。

謝辞

本課題の研究は、文部科学省の補助金により実施された GRENE 北極気候変動研究事業の一環として行われました。

文献

- [1] MC Serreze, AP. Barrett, JC. Stroeve, DN. Kindig, and MM. Holland, “The emergence of surface-based Arctic amplification,” *Cryosphere*, vol.3, pp. 11-19, 2009.
- [2] M. Honda, J. Inoue, and S. Yamane, “Influence of low Arctic sea-ice minima on anomalously cold Eurasian winters,” *Geophys. Res. Lett.*, vol. 36, L08707, doi:10.1029/2008GL037079, 2009.
- [3] M. Mori, M. Watanabe, H. Shigeo, J. Inoue, and M. Kimoto, “Robust Arctic sea-ice influence on the frequent Eurasian cold winters in past decades,” *Nat. Geosci.*, vol. 7, pp. 869-873, doi:10.1038/ngeo2277, 2014.
- [4] T. Nakamura, K. Yamazaki, K. Iwamoto, M. Honda, Y. Miyoshi, Y. Ogawa, and J. Ukita, “A negative phase shift of the winter AO/NAO due to the recent Arctic sea-ice reduction in late autumn,” *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 120, pp. 3209-3227, doi:10.1002/2014JD022848, 2015.
- [5] T. Nakamura, K. Yamazaki, K. Iwamoto, M. Honda, Y. Miyoshi, Y. Ogawa, Y. Tomikawa, and J. Ukita, “The stratospheric pathway for Arctic impacts on mid-latitude climate,” *Geophys. Res. Lett.*, vol. 43, pp. 3494-3501, doi:10.1002/2016GL068330, 2016.

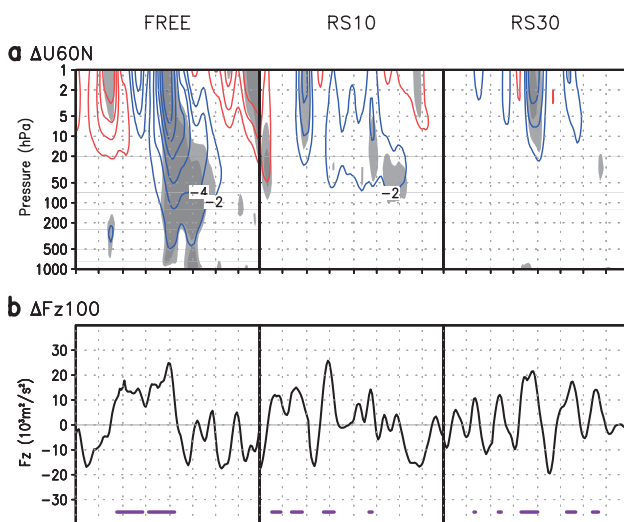


図 6 海水減少に対する (a) 北緯 60 度東西平均東西風 (b) 300hPa 高度場の応答のシミュレーション結果。それぞれ左より FREE、RS10、RS30 の結果。等値線は偏差の振幅、濃・淡の陰影は統計的有意水準 99・95% を示す。

Rapid Change of the Arctic Climate System and its Global Influences

Project Representative

Yoshiki Komuro

Institute for Arctic Climate and Environmental Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Authors

Yoshiki Komuro^{*1}, Tetsu Nakamura^{*2}, Ryota O'ishi^{*2}, Kumiko Takata^{*2} and Masakazu Yoshimori^{*3}

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

*2 Arctic Environment Research Center, National Institute of Polar Research

*3 Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University

We have developed climate models and performed climate studies for better understanding and more reliable projection of the rapidly changing Arctic. Regarding model development, a simple wetland scheme representing seasonal wetland has been introduced into a climate model MIROC. This scheme mitigated a summer warm bias found in northern hemisphere land. As for climate studies, the role of meridional energy transport in the Arctic warming is investigated. The Arctic warming amplification occurred in the experiment with only positive tropical radiative (CO_2) forcing. Further analysis suggested that the atmospheric latent heat transport played an essential role in creating the Arctic warming amplification. It is hypothesized that the latent heat transport leads to the Arctic warming with the greenhouse effect of water vapor and clouds enhanced by the moisture transport. We also performed numerical simulation by using a high-top atmospheric general circulation model AFES and showed the recent Arctic sea-ice reduction resulted in cold winters in mid-latitude continental regions. A crucial role of the stratosphere in the sea-ice impacts on the mid-latitudes was shown with additional experiments in which the stratospheric wave-mean interaction was artificially weakened.

Keywords: Arctic, Climate model, Simple wetland scheme, Arctic amplification, Stratosphere-troposphere coupling

1. Introduction

The Arctic is changing rapidly. Arctic amplification (e.g., [1]) as well as summer sea-ice decline and melting of the Greenland Ice sheet show that the climate change in the Arctic is faster and more severe than in most of the rest of the world. In addition, recent studies have pointed out that the changes in the Arctic have impacts on the climate outside of the Arctic, for instance, more frequent cold winters in the Eurasian mid-latitudes [2-4]. Numerical modeling is key to understand these processes and to project possible changes in the future climate. In this article, we will show some results on numerical model development and climate studies by using the Earth Simulator.

2. Improvement of MIROC by employing a simple wetland scheme

The Atmosphere Ocean General Circulation Model MIROC has a large summer warm bias in northern hemisphere land. On the other hand, in MIROC, summer evaporation from land is underestimated since snow melt water immediately runoff and does not stay on land such as seasonal wetland. In the present study we introduced a simple wetland scheme into the land surface module of MIROC and investigated the influence upon atmosphere and climate. The simple wetland scheme assumes

an isolated water pool which stores a specific fraction of snow melt water in melting season. This stored water is added to land water input with a delay of a specific timescale which depends on steepness of a land grid. By introducing this simple wetland scheme, soil water increases throughout all seasons. Especially in summer, the increase of soil water is the largest and the increased evaporation causes 3 °C cooling of land surface atmosphere temperature which partly reduces the summer warm bias (Fig. 1). In other seasons, temperature bias does not show a

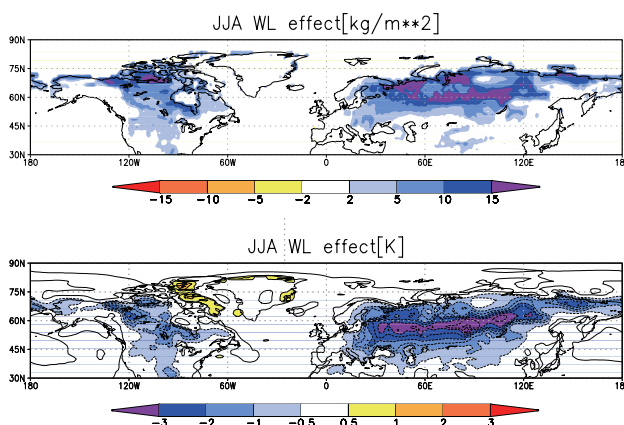


Fig. 1 Changes in summer soil water (top panel) and surface air temperature (bottom panel) due to the simple wetland scheme.

change for the worse.

3. Role of atmospheric heat transport in the Arctic warming

A relatively high correlation exists between global and Arctic mean surface air temperature changes in atmosphere-ocean general circulation model (AOGCM) simulations. This correlation indicates a close link of the Arctic to the rest of the world through energy exchanges. In this study, the role of meridional energy transport in the Arctic warming is investigated. The goal of this study is to understand how the Arctic warming is determined by the change in meridional energy transport and various feedback processes caused by the transport.

Various processes are evaluated by applying radiative forcing to low (case TRP) and mid-high latitudes (case EXTRP), separately, in an AOGCM, MIROC.

The Arctic warming amplification occurred in the experiment with only positive tropical radiative (CO_2) forcing (Fig. 2, case TRP). At 60 °N, the poleward transport of atmospheric dry-static energy decreased. This result suggests that the atmospheric latent heat transport plays an essential role in creating the Arctic warming amplification although the role of ocean heat transport must also be examined carefully. On the other hand, the amount of increase in latent heat transport is smaller than the amount of decrease in dry static energy transport. It is, therefore, hypothesized that the latent heat transport leads to the Arctic warming through not only release of the condensational heating but also with the greenhouse effect of water vapor and clouds enhanced by the moisture transport. Further analysis is required to verify this hypothesis, however.

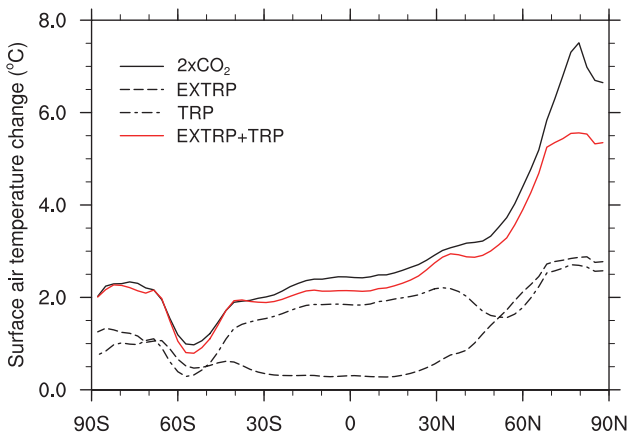


Fig. 2 Differences in zonally-averaged surface air temperature from the control experiment.

4. Impacts of Arctic sea-ice decline on the climate in mid-latitudes and role of stratosphere-troposphere coupling

This study [4,5] examines the possible linkage between the recent Arctic sea-ice decline and the winter climate in mid-latitudes, especially, the Arctic Oscillation (AO). Observational analyses reveal that a reduced sea-ice area in late autumn leads to more negative phase of the AO in winter. A high-top atmospheric general circulation model (AGCM for Earth Simulator, AFES version 4.1) is used to simulate the atmospheric response to observed sea-ice anomalies. The results from the simulation reveal that the recent Arctic sea-ice reduction results in cold winters in mid-latitude continental regions, which are linked to an anomalous circulation pattern similar to the negative phase of AO with an increased frequency of large negative AO events by a factor of over two. Associated with this negative AO phase, cold air advection from the Arctic to the mid-latitude increases. We found that the stationary Rossby wave response to the sea-ice reduction in the Barents Sea region induces this anomalous circulation. We also found a positive feedback mechanism resulting from the anomalous meridional circulation that cools the mid-latitudes and warms the Arctic. This feedback adds an extra heating to the Arctic air column equivalent to about 60% of the direct surface heat release from the sea-ice reduction.

The results from this high-top model experiment also suggest a crucial role of the stratosphere in affecting the tropospheric AO in winter through stratosphere-troposphere coupling. Although other recent studies also suggest the stratospheric role, the exact role remains elusive. With additional experiments in which the stratospheric wave-mean interaction is artificially weakened,

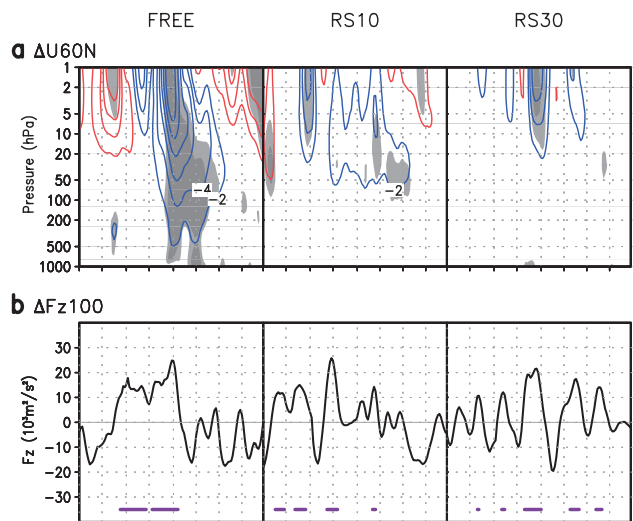


Fig. 3 Simulated responses of (a) zonal mean zonal wind at 60 N and (b) geopotential height at 300 hPa to Arctic sea ice loss. Contours indicate anomalies. Light and heavy shadings indicate statistical significance over 95 and 99%, respectively. While in FREE the mode simulates full wave-mean flow interaction, in RS10 and RS30 variations are suppressed above 10 and 30 hPa, respectively.

it is clearly shown that the tropospheric AO response caused by the Arctic sea-ice reduction largely disappears (Fig. 3). The results confirm a crucial role of the stratosphere in the sea-ice impacts on the mid-latitudes, particularly by interaction between the stratospheric polar vortex and planetary-scale waves and by resultant change in the zonal wind in the lower stratosphere. They also imply that realistic representation of both Arctic surface boundary conditions and stratospheric processes are critical for improving predictions of weather and climate in the mid-latitudes across sub-seasonal to decadal time scales.

Acknowledgement

This project was supported by the GRENE Arctic Climate Change Research Project conducted by the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology of the Japanese Government.

References

- [1] M. C. Serreze, A. P. Barrett, J. C. Stroeve, D. N. Kindig, and M. M. Holland, "The emergence of surface-based Arctic amplification," *Cryosphere*, vol.3, pp. 11-19, 2009.
- [2] M. Honda, J. Inoue, and S. Yamane, "Influence of low Arctic sea-ice minima on anomalously cold Eurasian winters," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 36, L08707, doi:10.1029/2008GL037079, 2009.
- [3] M. Mori, M. Watanabe, H. Shigeo, J. Inoue, and M. Kimoto, "Robust Arctic sea-ice influence on the frequent Eurasian cold winters in past decades," *Nat. Geosci.*, vol. 7, pp. 869-873, doi:10.1038/ngeo2277, 2014.
- [4] T. Nakamura, K. Yamazaki, K. Iwamoto, M. Honda, Y. Miyoshi, Y. Ogawa, and J. Ukita, "A negative phase shift of the winter AO/NAO due to the recent Arctic sea-ice reduction in late autumn," *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 120, pp. 3209-3227, doi:10.1002/2014JD022848, 2015.
- [5] T. Nakamura, K. Yamazaki, K. Iwamoto, M. Honda, Y. Miyoshi, Y. Ogawa, Y. Tomikawa, and J. Ukita, "The stratospheric pathway for Arctic impacts on mid-latitude climate," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 43, pp. 3494-3501, doi:10.1002/2016GL068330, 2016.