

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 北極環境変動総合研究センター

著者

小室 芳樹^{*1}, 中村 尚^{*2}, 西井 和晃^{*3}, 小坂 優^{*2}, 中村 哲^{*4}, 高野 雄紀^{*5},
芳村 圭^{*5}

*1 海洋研究開発機構 北極環境変動総合研究センター, *2 東京大学 先端科学技術研究センター, *3 三重大学 大学院生物資源学研究科, *4 北海道大学 大学院地球環境科学研究院, *5 東京大学 大気海洋研究所

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、地球シミュレータを用いて気候学的研究ならびに新奇的モデルの開発を行った。4通りの海面水温と海水分布を与えた大気大循環モデル実験により、北極海の海水減少が冬季ユーラシア大陸上の寒冷化傾向をもたらす可能性を見いだした。一方、観測された海面水温の長期変化傾向はこれを打ち消すように働く可能性も見いだした。また、気候モデルに与える海水分布を現在気候状態から全消滅する極端な状態まで段階的に変化させる実験を行い気候変動に与える影響を評価した。いずれのケースでも冬季気候場は北極振動の負位相となり、極域温暖化および中緯度の厳冬をもたらすが、成層圏応答と対流圏へのフィードバックに違いが見られた。さらに、水安定同位体スキームを組み込んだ全球雲解像モデル NICAM の開発を行い、14km 解像度全球計算で現実的な水同位体の時空間分布を再現する結果を得た。

キーワード：北極, 気候モデル, 海水減少, 極域-中緯度域相互作用, 水安定同位体スキーム

1. はじめに

近年、北極域では急激な環境の変化が生じている。変動の影響は極域にとどまらず、中低緯度帯との相互作用・成層圏過程の変化・海洋内部の応答などを介して遠方へ及ぶことが理解されつつある。このような全球に及び得る急激な気候変動のメカニズムを解明し予測精度を改善するには、北極域に軸足を置きつつも日本周辺を含む全球を視野に入れ、大気表層や海水のみに限定されない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が必要である。

我々の課題では、気候系の幅広い過程を対象とする要素モデルとそれらを組み上げた気候モデルの開発、及びそれらのモデルを用いた気候学的研究を行っている、本稿では、本年度の成果から代表的な3件についてその概要を述べる。

2. シベリア気温の低温化傾向と海水減少

近年観測されている冬季シベリアの寒冷化傾向について、この原因が北極海の海水減少にあると主張する先行研究がある一方、自然変動の現れにすぎないと主張する研究もあり、議論となっている。本研究では以下のような大気大循環モデル実験を行い、これらの主張の再検討を行う。実験に用いたのは AFES 中解像度版 (T119;100km 相当、鉛直 56 層) で、その下方境界条件として衛星観測に基づく OISST の海面水温・海水データを 1982 年から 32 年分与えた。海面水温には上昇トレンド、海水には減少トレンドが含まれる。参照実験 (A) では全球に観測の海面水温と海水を与えた。対照実験として、海面水温に

観測値 (年々変動あり)、海水に気候値 (年々変動なし) をそれぞれ与える実験 (B)、海面水温に気候値、海水に観測値をそれぞれ与える実験 (C)、海面水温、海水ともに気候値を与える実験 (D) の計 4 種類を行なった。各実験のアンサンブルメンバー数は 20 で、放射強制力は現在気候の値で一定とした。

冬季シベリア気温の指標として、北緯 40-60 度、東経 60-120 度の領域で平均した 12 ~ 2 月 (DJF) 平均の地表 2m 気温を用いたところ、1982/83 年から 2012/13 年の間で寒冷化トレンドを示したメンバー数は実験 A で 4、実験 B で 2、実験 C で 13、実験 D で 9 であった。この結果から、観測された海面水温変化が冬季シベリア気温の上昇トレンドをもたらすよう働くのに対し、観測された海水減少は弱いながらも気温低下トレンドをもたらす可能性が示唆される。さらに、実験 A では前者の影響が勝り、冬季シベリア気温の上昇がもたらされた可能性も示唆される。実際、2003/04 ~ 2012/13 平均と 1982/83 ~ 1992/93 平均との差においては (図 1)、実験 A, B ではともにシベリア上で昇温傾向が明瞭なのに対し、実験 C ではシベリア上で有意な気温低下トレンドが確認できる。

3. 極端な北極海水減少 (Blue Arctic Ocean) に対する大気応答

近年の地球温暖化に伴い、北極域では他地域よりも大きな昇温傾向を示しており (極域増幅、Polar amplification)、それに伴い特に北極海の海水は急速に減少している事が報告されている。北極海の海水減少は北極近辺のローカルな大気応答のみならず、大気の波動活動を通して北極

振動の負位相傾向をもたらし事 [1]、特に惑星波の強化に伴う成層圏循環の変化が主要な役割を果たす可能性が高いことがわかってきた [2]。一方で、海水－北極振動の関係は非線形であり [3]、将来予測された海水分布に対する大気応答では海面からの熱フラックスの水平分布の違いにより、成層圏応答およびそれに続く対流圏での北極振動は現在気候での応答とは逆になるという研究もある [4]。

本研究 [5] では、そのような応答の不確実性の要因を相対的に最小化し、海水後退に対する大気応答の本質を見極めるため、AFESを用いた理想化実験を行った。本研究で用いた AFES4.1 (解像度 T79L56、上端高度 60km) は 20 世紀以降に観測された北極海水減少に対する成層圏応答およびそれに伴う負の北極振動的応答を高い精度で再

現することに成功 [6] したモデルである。理想化実験では、北極海の海水が現在気候状態から全消滅する極端気候状態 (Blue Arctic Ocean) まで段階的に減少する境界条件を与えた (図 2a)。海水分布の変遷に対する大気応答はすべてのケースでいわゆる負の北極振動パターンとなり (図 2b)、付随して中緯度域、特に東シベリアから極東域で地表付近に寒冷偏差が見られた (図 2c)。これらの応答は最近の研究結果と整合するが、ケースごとの違いを詳細に見ていくことで、以下のような 2 つの支配的な物理的プロセスがあることがわかった。

- The stratospheric pathway: 北極海大西洋側の海水減少に伴う惑星波構造の強化に起因する成層圏の極渦弱化とその下方影響により対流圏で負の北極振動的パターン

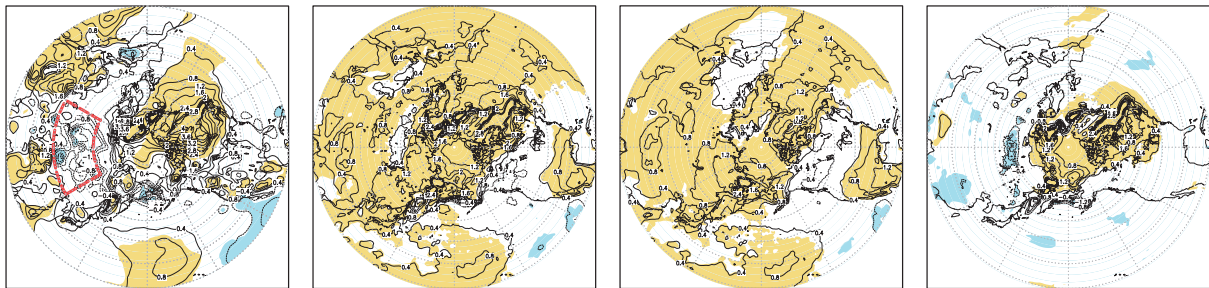


図 1 DJF 平均 2m 気温の 2003/04 ~ 2012/13 平均と 1982/83 ~ 1992/93 平均との差。左から JRA-55 再解析データ、実験 A、実験 B、実験 C。色は差が 95% で有意な差を示す。

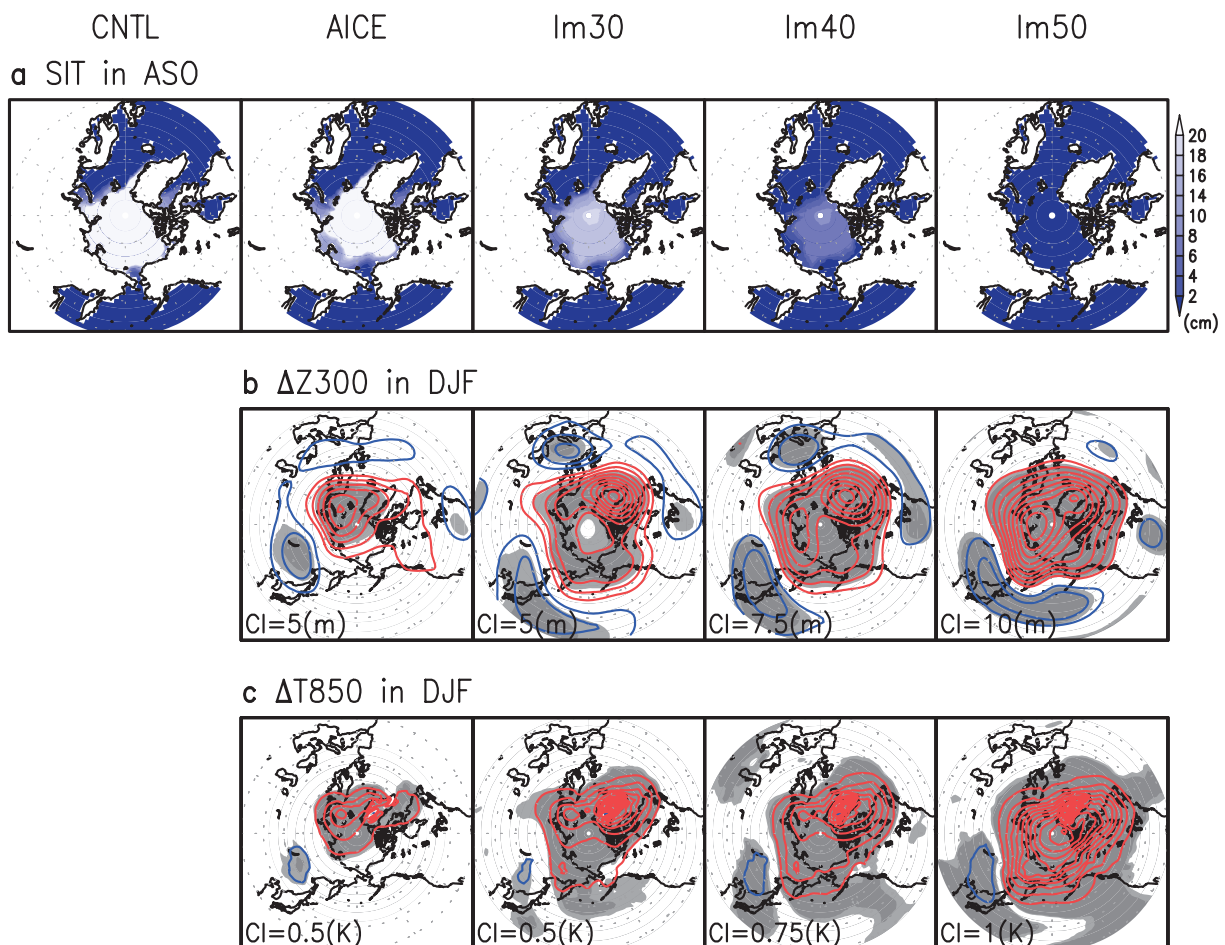


図 2 (a) 境界条件として用いた秋季 (8-10 月平均) 海水分布。(b) 冬季 (12-2 月平均) の 300 hPa 面におけるジオポテンシャル偏差。(c) 850hPa 面における冬季気温偏差。

が生じるプロセス。

- The tropospheric pathway: 北極海水後退による北極海全体での昇温に伴う惑星波変動が引き起こす極向き渦熱輸送強化とエディフィードバックにより負の北極振動が生じるプロセス。

どのプロセスにおいても結果として生じる負の北極振動的なパターンは子午面上での二次循環を伴い、北極への大気熱輸送を強化するとともに、北極から中緯度帯への寒気の吹き出しを強める。さらにその度合いは現在気候状態よりも海水全消滅する極端気候状態のほうが強いことがわかった。これらの大気応答は北極海水の減少が極域増幅をさらに強めること示唆する。

4. NICAM-isotope の開発

水の安定同位体 (HDO , H_2^{18}O) は相変化の履歴を積分情報として持つ観測可能なトレーサであり、例えば氷床コアの水同位体比からの気候復元 [e.g. 7] に用いられている。現在気候においても、水同位体から水の起源や過去の降水の履歴に関する情報を抽出できる。

水同位体は様々な AGCM への組み込まれており [e.g. IsoGSM; 8], ある程度観測を再現している。一方で限定された領域に対して雲解像モデル実験も行なわれている [9]。しかしこれまで全球規模の水循環について雲微物理に基づく研究は手付かずのままであった。そこで全球雲解像モデル NICAM[10] のバルク雲微物理スキーム NSW6[11] への水安定同位体の組み込みを行った (図 3)。NICAM-isotope は熱帯から極域までの水循環のさらなる理解に繋がると期待される。

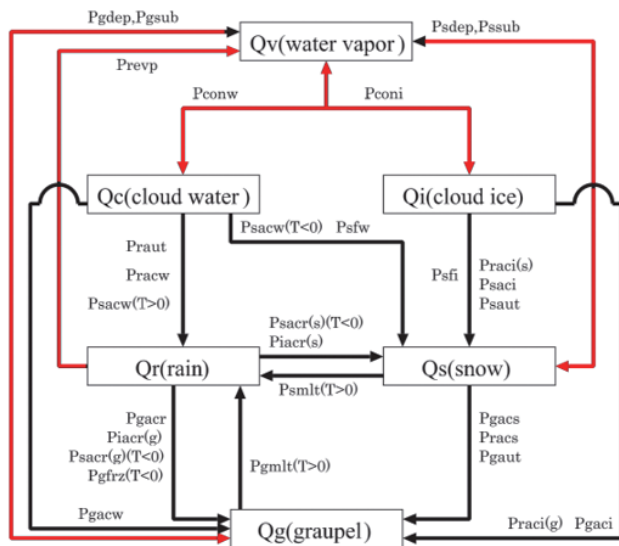


Fig. 1. Conversion diagram for the six-class microphysical scheme.

図 3 雲微物理スキームの変換ダイアグラム [11] に同位体分別の有無を加筆した図。赤線は相変化に伴い同位体分別を生じる過程。黒線は同位体分別を生じない過程。

現在力学場をナッジングして全球 14km 解像度での同位体計算を ES 上で行っている。計算の完了している 2013 年 2 月の月平均降水同位体比 (図 4) は、地上観測で得られる結果とも整合的であった。今後は積分期間を増やし観測データとの比較検証を進める予定である。

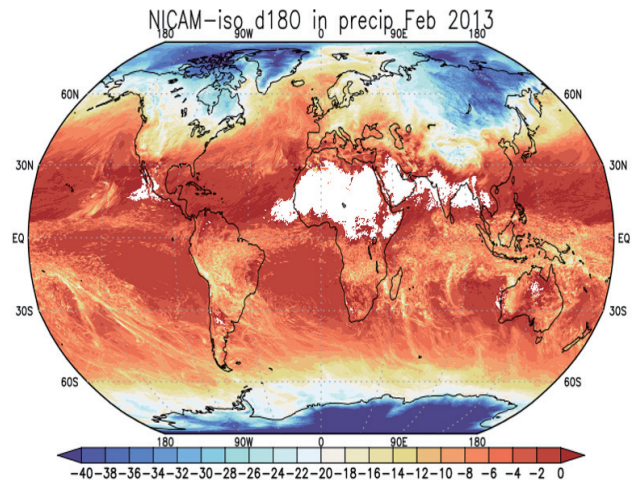


図 4 NICAM-isotope を用いてシミュレートされた 2013 年 2 月の月平均降水同位体比。

謝辞

本課題の研究は、文部科学省の補助事業として実施されている北極域研究推進プロジェクト (ArCS) の一環として行われました。

文献

- [1] Nakamura, T., K. Yamazaki, K. Iwamoto, M. Honda, Y. Miyoshi, Y. Ogawa, and J. Ukita, 2015: A negative phase shift of the winter AO/NAO due to the recent Arctic sea-ice reduction in late autumn, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120, 3209–3227, doi:10.1002/2014JD022848.
- [2] Nakamura, T., K. Yamazaki, K. Iwamoto, M. Honda, Y. Miyoshi, Y. Ogawa, Y. Tomikawa, and J. Ukita, 2016: The stratospheric pathway for Arctic impacts on midlatitude climate, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 3494–3501, doi:10.1002/2016GL068330.
- [3] Petoukhov, V., and V. A. Semenov, 2010: A link between reduced Barents-Kara Sea ice and cold winter extremes over northern continents, *J. Geophys. Res.*, 115, D21111, doi:10.1029/2009JD013568.
- [4] Sun, L., C. Deser, and R. A. Tomas, 2015: Mechanisms of stratospheric and tropospheric circulation response to projected Arctic sea ice loss, *J. Clim.*, 28, 7824–7845.
- [5] Nakamura, T., K. Yamazaki, M. Honda, J. Ukita, R. Jaiser, D. Handorf, and K. Dethloff, 2016: On the atmospheric response experiment to a Blue Arctic Ocean, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 10394–10402, doi:10.1002/2016GL070526.
- [6] Jaiser, R., T. Nakamura, D. Handorf, K. Dethloff, J. Ukita, and K. Yamazaki, 2016: Atmospheric autumn and winter response to Arctic sea ice changes in reanalysis data and model simulations, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 121, 7564–

- 7577, doi:10.1002/2015JD024679.
- [7] Dansgaard W., S.J. Johnsen, H.B. Clausen, D. Dahl-Jensen, N.S. Gundestrup, C.U. Hammer, C.S. Hvidberg, J.P. Steffensen, A.E. Sveinbjornsdottir, J. Jouzel and G.C. Bond, 1993: Evidence for general instability of past climate from a 250kyr ice-core record, *Nature*, 264, 218-220.
- [8] Yoshimura, K., M. Kanamitsu, D. Noone, and T. Oki, 2008: Historical isotope simulation using Reanalysis atmospheric data, *J. Geophys. Res.*, 113, D19108, doi:10.1029/2008JD010074.
- [9] Blossey, P. N., Z. Kuang, and D. M. Romps, 2010: Isotopic composition of water in the tropical tropopause layer in cloud-resolving simulations of an idealized tropical circulation, *J. Geophys. Res.*, 115, D24309, doi:10.1029/2010JD014554.
- [10] Satoh, M., Tomita, H., Yashiro, H., Miura, H., Kodama, C., Seiki, T., Noda, A. T., Yamada, Y., Goto, D., Sawada, M., Miyoshi, T., Niwa, Y., Hara, M., Ohno, T., Iga, S., Arakawa, T., Inoue, T., and Kubokawa, H., The Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model: Description and Development. *Progress in Earth and Planetary Science*, 1, 18. doi:10.1186/s40645-014-0018-1, 2014.
- [11] Tomita, H., New microphysical schemes with five and six categories by diagnostic generation of cloud ice. *J. Meteor. Soc. Japan*, 86A, 121-142, 2008.

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

Project Representative

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

Authors

Yoshiki Komuro^{*1}, Hisashi Nakamura^{*2}, Kazuaki Nishii^{*3}, Yu Kosaka^{*2}, Tetsu Nakamura^{*4}, Yuki Takano^{*5} and Kei Yoshimura^{*5}

*1 Institute for Arctic Climate and Environment Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, *2 Research Center for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo, *3 Graduate School of Bioresources, Mie University, *4 Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University, *5 Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

By using the Earth Simulator, we have performed climate studies and developed novel numerical models in order to understand mechanism of climate variability in the Arctic and mid-latitudes. Firstly, 4 sensitivity experiments with different combinations of sea surface temperature and sea-ice distribution have been conducted. Results show sea-ice decline in the Arctic Ocean can cause cooling trend over the Eurasian continent, whereas observed sea surface temperature change leads to the warming trend there. Secondly, an impact of sea-ice distribution in the Arctic Ocean has been evaluated by changing the Arctic sea ice stepwise from the present-day range to an ice-free range. In all the cases, the tropospheric response exhibited a negative Arctic Oscillation (AO)-like pattern, which leads to warming in the Arctic region and cold winters in mid-latitudes. On the other hand, troposphere response and stratosphere-troposphere coupling process are different among the cases. Thirdly, we incorporated stable water isotopes into a global cloud-resolving model, NICAM, to develop NICAM-isotope. A globally 14km resolution NICAM-isotope run shows consistent results with the global in-situ observation dataset for precipitation isotope.

Keywords: Arctic, Climate model, Sea-ice decline, Interaction between the Arctic and mid-latitudes, stable water isotope scheme

1. Introduction

The Arctic climate is changing rapidly. The impact is not limited in the Arctic region but spread globally via interaction processes between the Arctic and mid-latitudes, stratosphere-troposphere coupling processes, and oceanic response. In order to understand such a change that can have an impact on the global climate, interdisciplinary climate studies focusing on not only the Arctic but also wider areas are needed.

By using the Earth Simulator, our research group develops various kind of process models and schemes as well as a coupled climate model, and performs climate studies by using these models. In this article, we will present 3 main topics from our research activities in this fiscal year.

2. Cooling trend over wintertime Siberia and sea ice reduction

In recent decades, a cooling trend has been observed over wintertime Siberia. Some studies attribute this trend to the Arctic sea ice reduction, while some others argue that it is just a manifestation of internal variability of the atmosphere. In this study, we re-assess the contribution from the sea ice reduction to the long-term trend observed in surface temperatures

over wintertime Siberia through a set of AGCM ensemble experiments. Global fields of sea-surface temperature (SST) and sea ice based on satellite measurements available from 1982 through 2013 were utilized for the lower boundary condition for the AGCM, and four different combinations of climatologically-fixed and interannually varying SST and ice were prescribed as follows. Out of the 20 ensemble members, only 4 members simulate a cooling trend over Siberia in an experiment in which observational SST and sea ice are prescribed (experiment A), and the corresponding cooling trend was simulated by only 2 members in an experiment where only SST varies as observed with the sea ice fixed to the climatology (experiment B). By contrast, 13 out of the 20 members simulate a cooling trend in another experiment where SST is fixed to its climatology while sea ice varies as observed (experiment C). Those results suggest that observed SST change leads to the warming trend of wintertime Siberian, while the observed sea ice change can contribute to the cooling trend (Fig. 1).

3. On the atmospheric response experiment to a Blue Arctic Ocean

We examined atmospheric responses to a reduction in Arctic

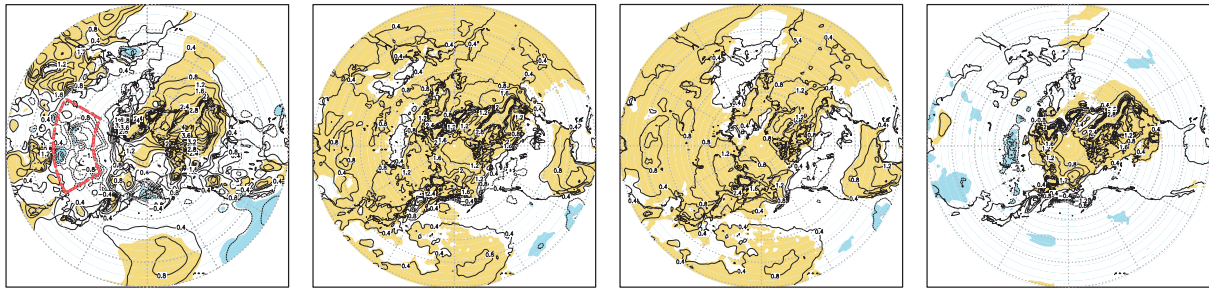


Fig. 1 Difference in DJF-mean 2 m temperature between 2003/04-2012/13 mean and 1982/83-1992/93 mean. From left to right: JRA-55 reanalysis, experiment A, experiment B, and experiment C. Shade indicates the difference is significant at the 95% confidence level.

sea ice via idealized simulations using AGCM for Earth Simulator (AFES) version 4.1, which had successfully captured the negative AO-like responses to a reduction in sea ice [1-3]. In the simulation [4], Arctic sea ice was prescribed stepwise from the present-day range to an ice-free range. In all cases, the tropospheric response exhibited a negative Arctic Oscillation (AO)-like pattern (Fig. 2). Our analysis revealed that there are two processes that control the association between Arctic sea ice changes and the polarity of the winter AO, which are described below.

- The stratosphere-troposphere coupling process followed by a negative AO-like pattern is dominated by an intensified climatological planetary-scale wave structure

(the stratospheric pathway). This is mainly due to the intensification of the lower stratospheric Siberian trough associated with a reduction in Arctic sea ice on the Atlantic side of the Arctic Ocean.

- The tropospheric process is controlled by the eddy heat flux due to a planetary-scale wave response in the troposphere (the tropospheric pathway). Increased meandering of the tropospheric jet stream, corresponding to the response of the stationary Rossby wave to Arctic sea ice reduction, is related to a negative AO-like pattern. The associated eddy momentum flux response is consistent with the conventional understanding of AO dynamics.

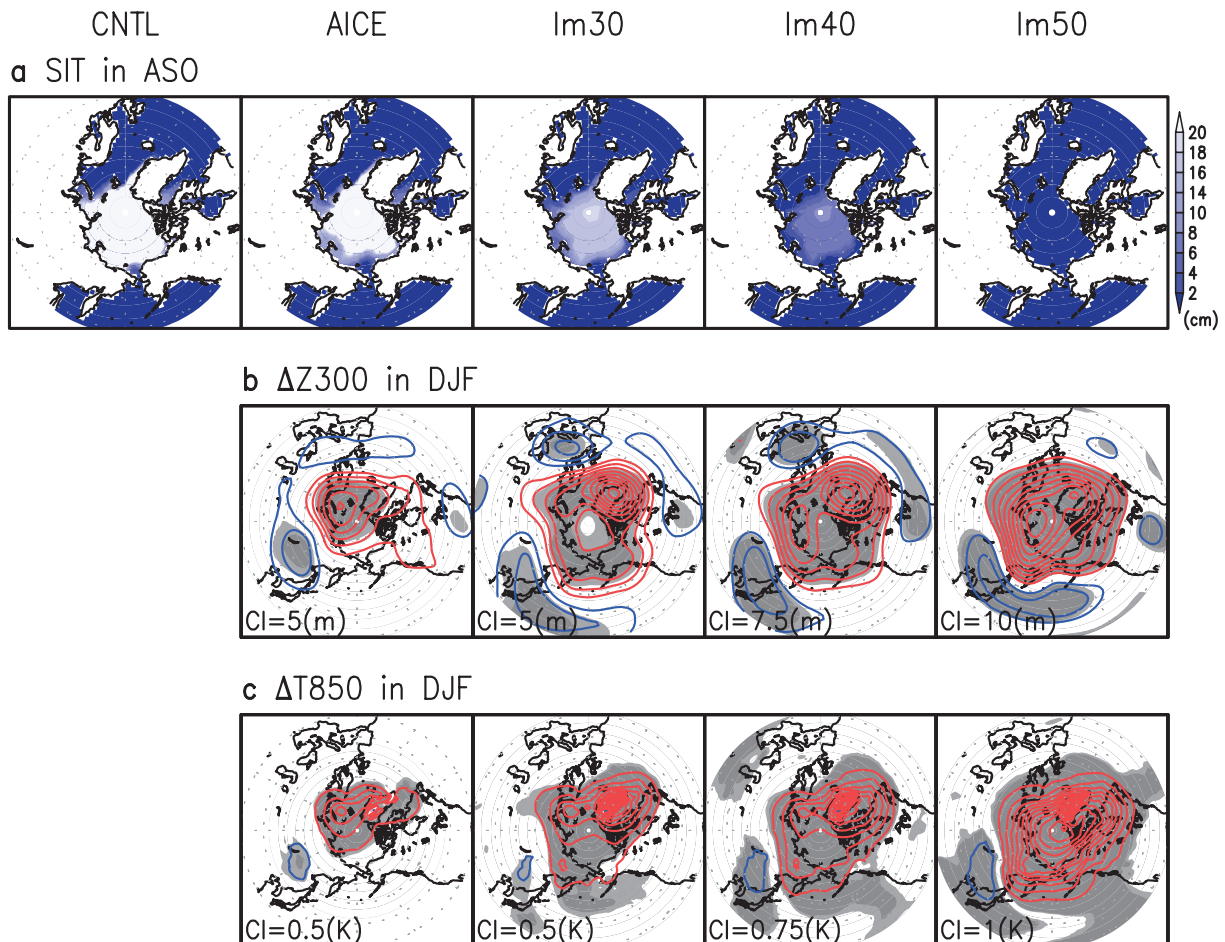


Fig. 2 (a) Autumn (ASO average) sea ice distribution used as boundary condition of respective experiment. (b) Winter (DJF average) geopotential height anomaly at 300 hPa. (c) Winter temperature anomaly at 850 hPa.

The resultant negative AO-like response is accompanied by secondary circulation in the meridional plane and increased atmospheric heat transport into the Arctic, leading to the acceleration of the Arctic amplification.

4. Development of NICAM-isotope

Because their concentration is sensitive to phase changes of water during circulation, stable oxygen and hydrogen isotopes in water (H_2^{18}O and HDO) have been used as paleoclimate proxies [5]. In present climate, too, by using isotopic information in precipitation and vapor, one can investigate atmospheric vapor transport and origin.

Stable water isotopes have been incorporated into AGCMs [e.g., IsoGSM; 6], and the large scale spatial variability has been reproduced by those global models. On the other hand, there are a few cloud-resolving limited-area models with isotopes, too [7]. However, there is no global hydrological study based on state-of-the-art cloud microphysical processes. Here, we incorporated stable water isotopes into the single moment 6-class cloud microphysics scheme, NSW6 [8] in the global cloud-resolving model, NICAM [9] to develop NICAM-isotope. With NICAM-isotope, we expect to further understand the detailed atmospheric hydrological processes from tropics to poles.

We are conducting a globally 14km resolution NICAM-isotope run with ES. The preliminary result for February 2013 (Fig. 3) seems consistent with the global in-situ observation dataset for precipitation isotope. We plan to extend the simulation period and make more comprehensive validation with observations.

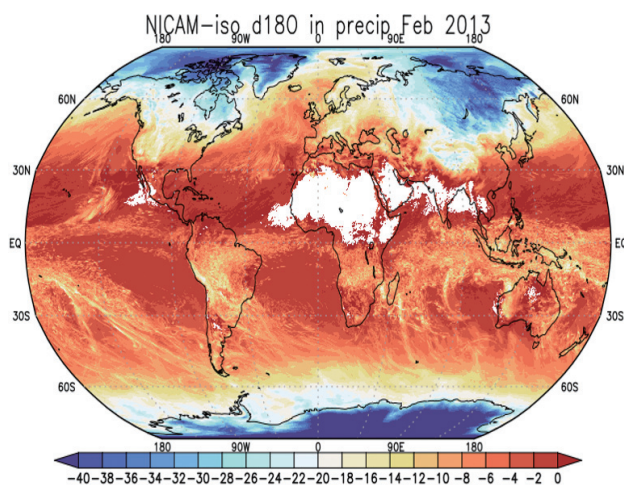


Fig. 3 Monthly mean stable water isotopic ratio in Feb. 2013 simulated by NICAM-isotope.

Acknowledgement

This project was supported by the Arctic Challenge for Sustainability (ArCS) Project, conducted by the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology of the Japanese Government.

References

- [1] Nakamura, T., K. Yamazaki, K. Iwamoto, M. Honda, Y. Miyoshi, Y. Ogawa, and J. Ukita, 2015: A negative phase shift of the winter AO/NAO due to the recent Arctic sea-ice reduction in late autumn, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120, 3209–3227, doi:10.1002/2014JD022848.
- [2] Nakamura, T., K. Yamazaki, K. Iwamoto, M. Honda, Y. Miyoshi, Y. Ogawa, Y. Tomikawa, and J. Ukita, 2016: The stratospheric pathway for Arctic impacts on midlatitude climate, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 3494–3501, doi:10.1002/2016GL068330.
- [3] Jaiser, R., T. Nakamura, D. Handorf, K. Dethloff, J. Ukita, and K. Yamazaki, 2016: Atmospheric autumn and winter response to Arctic sea ice changes in reanalysis data and model simulations, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 121, 7564–7577, doi:10.1002/2015JD024679.
- [4] Nakamura, T., K. Yamazaki, M. Honda, J. Ukita, R. Jaiser, D. Handorf, and K. Dethloff, 2016: On the atmospheric response experiment to a Blue Arctic Ocean, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 10394–10402, doi:10.1002/2016GL070526.
- [5] Dansgaard W., S.J. Johnsen, H.B. Clausen, D. Dahl-Jensen, N.S. Gundestrup, C.U. Hammer, C.S. Hvidberg, J.P. Steffensen, A.E. Sveinbjornsdottir, J. Jouzel, and G.C. Bond, 1993: Evidence for general instability of past climate from a 250kyr ice-core record, *Nature*, 264, 218–220.
- [6] Yoshimura, K., M. Kanamitsu, D. Noone, and T. Oki, 2008: Historical isotope simulation using Reanalysis atmospheric data, *J. Geophys. Res.*, 113, D19108, doi:10.1029/2008JD010074.
- [7] Blossey, P. N., Z. Kuang, and D. M. Romps, 2010: Isotopic composition of water in the tropical tropopause layer in cloud-resolving simulations of an idealized tropical circulation, *J. Geophys. Res.*, 115, D24309, doi:10.1029/2010JD014554.
- [8] Tomita, H., New microphysical schemes with five and six categories by diagnostic generation of cloud ice. *J. Meteor. Soc. Japan*, 86A, 121–142, 2008.
- [9] Satoh, M., Tomita, H., Yashiro, H., Miura, H., Kodama, C., Seiki, T., Noda, A. T., Yamada, Y., Goto, D., Sawada, M., Miyoshi, T., Niwa, Y., Hara, M., Ohno, T., Iga, S., Arakawa, T., Inoue, T., and Kubokawa, H., The Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model: Description and Development. *Progress in Earth and Planetary Science*, 1, 18. doi:10.1186/s40645-014-0018-1, 2014.

