

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 海洋研究開発機構 北極環境変動総合研究センター

中村 尚 東京大学 先端科学技術研究センター

西井 和晃 三重大学 大学院生物資源学研究所

小坂 優 東京大学 先端科学技術研究センター

中村 哲 北海道大学 大学院地球環境科学研究院

齋藤 冬樹 海洋研究開発機構 北極環境変動総合研究センター

大石 龍太 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、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。数値モデルを用いた気候学的研究では、観測された海面水温を熱帯のみに与える一方で海水分布を気候値で固定した大気大循環モデル実験により、熱帯海面水温の長期変化傾向が、海水減少を伴わなくとも冬季北極域の気温上昇傾向をもたらしうることを示した。また、海水密接度のデータセット間の差異を念頭に置き、複数の海水密接度データと少氷多氷年の定義の組み合わせを変えた36通りの海水分布を境界条件とした気候モデル実験を実施して、海水データの不確実性が北極温暖化・中緯度寒冷化の再現性に及ぼす影響を明らかにした。新奇的モデルの開発及びそれを用いた実験では、グリーンランド氷床の質量収支計算を高精度化するために高度な積雪モデルを組み込むと共に、グリーンランド氷床に関するモデルの相互比較プロジェクト CMIP6/ISMIP6/initMIP に参加した。

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、氷床モデル

1. はじめに

近年、北極域では海水の急減に象徴される環境の急激な変化が生じている。変動の影響は北極域の表層にとどまらず、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全球に及ぶことが理解されつつある。このような急激な変化とその影響を把握し対応策を講じるには、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。

我々の課題では昨年度までに引き続き、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. 冬季北極圏およびユーラシア大陸の気温の長期変化傾向

近年の北極海水の減少に伴って、北極海上の気温が上昇傾向にある。対照的に、冬季シベリアでは寒冷化傾向が近年観測されているが、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。一方で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。海面水温には上昇傾向、海水には減少傾向が含まれる。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、海面水温に気候値（年々変動なし）、海水に観測値（年々変動あり）をそれぞれ与える実験(B)、熱帯の海面水温に観測値、それ以外で気候値を与え、海水には気候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。外部境界条件が経年変化をしない実験Dにおいても長期変化傾向が存在するため、これをAFES特有のドリフトとみなし、実験A,B,Cの長期変化の解析ではこのドリフト分を差し引いた2003/04～2012/13平均と1982/83～1992/93平均との差を長期傾向とみなした。JRA-55再解析データ[1]を参照データとして用いた。

実験結果を参照データと共に図1に示す。再解析データでは、北極海上の気温上昇、ユーラシア大陸中央部の気温低下傾向と、それらのシグナルの中間付近に気圧上昇傾向が見られる。標準実験(実験A)では気圧上昇傾向の位置が若干東にずれるものの、北極とユーラシア上では再解析で見られた気温変化傾向をおおよそ再現している。この傾向は海面水温を気候値に固定し海水を減少させた実験(実験B)でもおおよそ再現されており、上記の傾向が海水減少による可能性を示唆する。一方、海水と中高緯度海面水温を気候値に固定した実験Cにおいても、

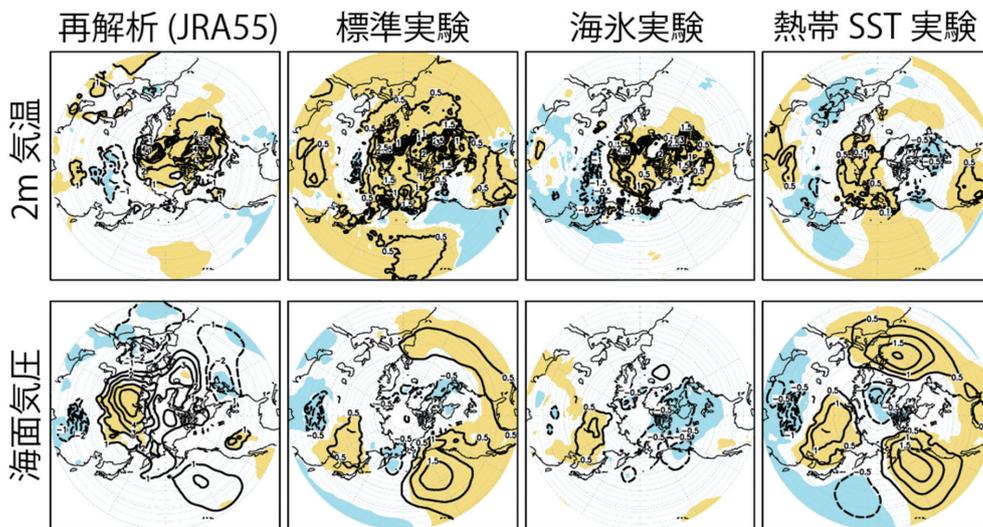


図1 冬季 (DJF) 平均気温 (上段; °C) と海面気圧 (下段; hPa) の長期変化。左から JRA-55 再解析データ、実験 A、実験 B、実験 C。モデル結果はドリフトを除去。色は差が 95% で有意な差を示す。

北極海上の気温上昇傾向とやや位置がずれるものの、ユーラシア大陸上の気温低下傾向、気圧上昇傾向が見られた。図には示さないが対流圏上層の 500hPa 高度場において、ユーラシア大陸北部に高気圧性傾向が観測されているが、この傾向と整合的なシグナルが実験 A,B,C にも見られている。以上の結果は近年観測されている冬季北極圏およびユーラシア大陸の気温の長期変化は、海水変化のみならず、熱帯の海面水温変化も寄与している可能性を示唆している。

3. 異なる海水データセットによる北極温暖化の推定誤差評価

近年の北極温暖化と中緯度の厳冬傾向について北極海水域後退の影響が示唆 [2,3] されるが、海水後退に対する気候応答をシミュレートした研究ではモデル間の不確実性が大きく、その要因について未だ詳しくわかっていない [e.g., 4]。シミュレーションの境界条件として用いられる海水データは代表的なものがいくつかあるが、衛星観測を元にした最近のデータであっても、リトリーバルアルゴリズムやデータ補正の方法によってデータセット間の差異が大きいことが報告される [5,6]。本研究では気候モデルの境界条件として使用される海水密度データセットの不確実性に着目し、大気応答への誤差の伝搬を評価する。日・欧・米の機関で作成された 6 種類の海水データセット (COBE-SSTv2、HadISST、Merged Had/OISST、NASA/BS、NASA/NT、OSISAF) と 3 種類の多 / 少氷年の選別方法から 36 通りの海水境界条件を作成した。この境界条件を AFES4.1 (T79L56) に与え、それぞれ 100 メンバーの積分を行い、総計 3,600 メンバーの大規模アンサンブル実験により、海水減少に伴う北極温暖化と中緯度寒冷化の推定誤差の定量的評価を行った。

はじめに少氷時と多氷時それぞれ 1,800 サンプル平均の差を、データセット間誤差を考慮しない大気応答として評価する。冬季平均対流圏高度場偏差は北極で高気圧、中緯度域で低気圧偏差という、負の北極振動パターン

を示す。地上気温は北極で高温、中緯度で低温偏差となる。このモデルでは先行研究で指摘される北極海水後退による北極温暖化加速と中緯度の寒冷化がよく再現できていることが確認できた。次に大気応答の海水データセット間誤差を定量化するための指標として、極冠高度偏差 (Polar Cap Height, PCH) を用いた。PCH スコアに回帰した高度場は極で高気圧、中緯度で低気圧偏差のパターンとなり、北極温暖化、中緯度寒冷化の良い指標であることがわかる (図 2a)。少氷時と多氷時それぞれ 1,800 サンプルの PCH スコアの頻度分布から内部変動が支配的であるものの、少氷時には多氷時に比べて、PCH が正偏差側へシフトしている様子がわかる (図 2b)。36 種類の境界条件ごとに 100 サンプル平均した PCH スコアは、ほぼすべてのケースで多氷時に負偏差、少氷時に正偏差となり、少氷と多氷の差 (Δ) として、正偏差となることがわかる (図 2c)。しかしながら、 Δ のケース間の差異を見ると、最小で 0.05 σ 、最大で 0.40 σ となり、海水データセット誤差に起因する大気応答の不確実性は大気内部変動の標

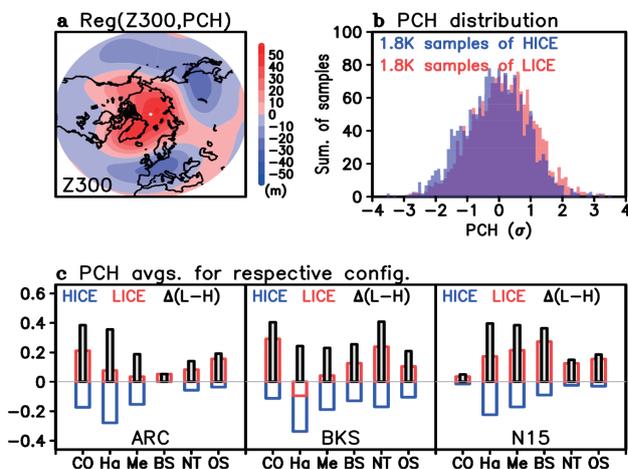


図2 a, PCH スコアに回帰した Z300 高度場偏差。b, PCH スコアの確率密度関数。c, 海水データセット・定義ごとに 100 メンバー平均した PCH スコア、およびその少氷-多氷偏差 (黒)。

準偏差の40%ほどもあることを意味する。別の視点では、全ケース平均した Δ が約0.20 σ であることから、平均的な応答に対してデータセット誤差に起因する応答誤差が $\pm 100\%$ と大きな値であることがわかる。

次にこのような大気応答の違いがどの海域の海水データ誤差に起因するのか明らかにする。多氷と少氷の境界条件それぞれ18ケースの100メンバー平均した大気応答のクロスサンプリングを行い、現在気候で起こり得た324ケースの海水分布変化に対する大気応答を評価する。全324ケース中北極温暖化がより強いケースでは、北大西洋を波源としユーラシア北部へ伝わる波構造の偏差が顕著であり、北大西洋域の海水データ誤差が大気応答の原因となっていることを示唆する。北極海の大西洋側の海水減少が顕著なケースでは、地表面の南北温度勾配弱화에伴い、擾乱活動が弱まることから、上空のジェットを維持できなくなり、偏西風の蛇行が強まる。偏西風の蛇行はユーラシア大陸の北極海沿岸を東に伝わり、東西波数1-2の惑星波変調として、気候学的な惑星波活動を強める。このことが子午面内の二次循環を強めるほか、成層圏との結合を通して対流圏での負の北極振動的応答を生じる[2,3]。

以上の結果から、海水データセット間誤差が北極温暖化とそれに付随する中緯度寒冷化のシミュレーション結果に顕著な影響を与えることがわかり、その大きさは大気内部変動の標準誤差の40%ほどであることがわかった。

4. グリーンランド氷床モデル開発

グリーンランド氷床に関するモデルの相互比較プロジェクトCMIP6/ISMIP6/initMIPに、本課題で開発する氷床モデルIcIESを用いて17グループ35モデルの一員として参加した。この比較プロジェクトは、氷床-気候結合モデルを用いたISMIP6の温暖化実験の予備的な実験に相当し、モデルに与える温暖化シナリオにできるだけ同一のものを与えることで、氷床モデル間の不確定性、その中でも特に初期値手法に起因する応答の違いに着目して相互比較を行うものである。仮想的な温暖化シナリオの元で算出されたグリーンランド氷床の今後100年間の温暖化に反応した体積変動は、海水準に換算して75mmから290mmとモデル間で大きなばらつきが見られた。比較モデルの解析から初期値手法の違いがそのばらつきに大きな影響を与えることが明らかとなった[7]。従って、精度よい氷床変動再現には、氷床の初期値化、すなわち現在氷床分布の再現が非常に重要であり、加えてグリーンランド上の質量収支のシナリオを精度よく再現することが同様に重要であると考えられる。目下進行中の氷床気候結合モデル開発にとって重要な指針となる。

グリーンランド氷床の質量収支計算には夏の氷床融解量の推定精度が重要である。既存の経験式に基づく推定は簡易ではあるが精度に限界があるため、物理プロセスベースの融解量推定を行い高精度化を図る目的で、積雪モデルSMAPの主要部分である積雪密度予報スキームを大気大循環モデルMIROCの陸面サブモデルMATSIROに

組み込んだ。初期的な挙動と問題点の確認を行い、既存のMATSIRO積雪スキームとの整合性を議論した。

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] Kobayashi, S., Y. Ota, Y. Arada, 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, doi:10.2151/jmsj.2015-001, 2015.
- [2] Nakamura, T., K. Yamazaki, K. Iwamoto, M. Honda, Y. Miyoshi, Y. Ogawa, Y. Tomikawa, and J. Ukita, "The stratospheric pathway for Arctic impacts on midlatitude climate," *Geophys. Res. Lett.*, 43, 3494-3501, doi:10.1002/2016GL068330, 2016.
- [3] Nakamura, T., K. Yamazaki, M. Honda, J. Ukita, R. Jaiser, D. Handorf, and K. Dethloff, "On the atmospheric response experiment to a Blue Arctic Ocean," *Geophys. Res. Lett.*, 43, 10,394-10,402, doi:10.1002/2016GL070526, 2016.
- [4] Barnes, E. A., and Screen, J. A., "The impact of Arctic warming on the midlatitude jetstream: Can it? Has it? Will it?" *WIREs Clim. Change*, 6, 277-286, doi:10.1002/wcc.337, 2015.
- [5] Ivanova, N., Pedersen, L. T., Tonboe, R. T., Kern, S., Heygster, G., Lavergne, T., Sørensen, A., Saldo, R., Dybkjær, G., Brucker, L., and Shokr, M., "Inter-comparison and evaluation of sea ice algorithms: towards further identification of challenges and optimal approach using passive microwave observations," *The Cryosphere*, 9, 1797-1817, doi:10.5194/tc-9-1797-2015, 2015.
- [6] Comiso, J. C., W. N. Meier, and R. Gersten, "Variability and trends in the Arctic Sea ice cover: Results from different techniques," *J. Geophys. Res. Oceans*, 122, 6883-6900, doi:10.1002/2017JC012768, 2017.
- [7] Goelzer, H., Nowicki, S., Edwards, T., Beckley, M., Abe-Ouchi, A., Aschwanden, A., Calov, R., Gagliardini, O., Gillet-Chaulet, F., Gollledge, N. R., Gregory, J., Greve, R., Humbert, A., Huybrechts, P., Kennedy, J. H., Larour, E., Lipscomb, W. H., Le clec'h, S., Lee, V., Morlighem, M., Pattyn, F., Payne, A. J., Rodehacke, C., Rückamp, M., Saito, F., Schlegel, N., Seroussi, H., Shepherd, A., Sun, S., van de Wal, R., and Ziemann, F. A., "Design and results of the ice sheet model initialisation experiments initMIP-Greenland: an ISMIP6 intercomparison," *The Cryosphere*, 12, 1433-1460, doi:10.5194/tc-12-1433-2018, 2018.

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

Project Representative

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

Authors

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

Hisashi Nakamura Research Center for Advanced Science and Technology, University of Tokyo

Kazuaki Nishii Graduate School of Bioresources, Mie University

Yu Kosaka Research Center for Advanced Science and Technology, University of Tokyo

Tetsu Nakamura Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University

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

Ryota O'oishi Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

By using the Earth Simulator, we have performed several studies in order to understand the mechanism of climate variability in the Arctic and mid-latitudes. Regarding climate studies, we re-assess the contribution from the sea ice reduction to the long-term trend observed in surface temperatures over wintertime Siberia. A set of AGCM ensemble experiments suggests that both sea ice changes and tropical SST changes contribute to wintertime long-term trends over the Arctic and Eurasia. We also evaluate the impact of sea ice boundary condition on simulated winter climate responses by using 6 different sea-ice datasets. A large ensemble simulation suggests uncertainties in various AGCM sea-ice impact experiments may actually be a consequence of small yet significant differences in the sea-ice forcing field. As for the development of novel numerical models, we participated in an international ice-sheet model intercomparison project initMIP with our ice-sheet model. Based on the knowledge we have learned from the project, we are now implementing more sophisticated surface mass balance scheme to the ice-sheet model.

Keywords: Arctic, Climate model, Sea-ice decline, Interaction between the Arctic and mid-latitudes, ice-sheet model

1. Introduction

The Arctic environment undergoes a drastic change as symbolized by the rapid decrease in sea ice. Recent studies have shown that its impact is not limited in the Arctic region itself but spread globally via interaction processes between the Arctic and mid-latitudes, stratosphere-troposphere coupling processes, and processes through the ocean. In order to understand such a far-reaching change and take measures against its social and economic impact, interdisciplinary climate studies focusing not only on the Arctic but also on wider areas are needed.

Continuing from last year, 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 three main topics from our research activities in this fiscal year.

2. Long-term trends of temperatures over the Arctic and Eurasia continent

In recent decades, a warming trend over the Arctic is observed in association with the sea ice loss. At the same time,

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. Interannually varying SST and sea ice are prescribed in the experiment A, while climatologically-fixed SST and interannually varying sea ice are prescribed in the experiment B. In the experiment C, the tropical SST is interannually varying, while the extratropical SST is climatologically fixed. Climatologically-fixed SST and sea ice are prescribed in the experiment D.

In wintertime, a warming trend is observed over the Arctic while a cooling trend is observed over the central Eurasia in the experiment A, which are consistent with the observation. Although the location is slightly to the eastward of what is

observed in reanalysis data, an increasing sea level pressure (SLP) trend is observed over Eurasia. Those long-term trends of surface air temperatures and SLP are also observed in experiment B, which suggests those observed trends are forced by sea ice changes. It is interesting to note that such trends are also observed in experiment C. The upper tropospheric height field shows anticyclonic trends over the Northern Eurasia, which is also observed in experiments A, B, C. Those results suggest that both sea ice changes and tropical SST changes contribute to wintertime long term trends over the Arctic and Eurasia.

3. A comparison of the Arctic sea ice-climate impacts based on multiple sea ice concentration datasets

Impacts of Arctic warming on mid-latitude climate and weather have recently been intensively studied. Simulated winter atmospheric circulation responses to the Arctic sea ice loss significantly differ among model studies, which makes difficult to understand observed Arctic relations to mid-latitude weather and climate and a future climatic role of the Arctic [e.g., 1]. Validation studies of the sea ice concentration (SIC) dataset have reported that errors among the datasets are large due to, for example, different algorithm used for retrieval of the satellite data [2,3]. Then, differences in SIC datasets arise as a possible source for the simulated uncertainties in the model studies.

In this study we aim at evaluating an extent to which sea ice impacts on simulated winter climate responses arise from difference in sea ice boundary conditions using 6 SIC datasets and 3 pairs of high and low sea ice definitions. Hereafter a combination of a dataset and a definition of high/low sea ice condition is referred to as sea ice configuration. Through a large ensemble simulation of atmospheric response to the Arctic sea ice loss from 3600 members consisting of 100-year integration for each individual sea ice configuration, we found the following aspect of the recent Arctic climate change.

The results from large ensemble size simulations using multiple sea ice configurations provide strong evidence for the negative AO-like pattern as a fundamental response to the Arctic sea ice loss and for an active role of the stratosphere leading to this AO-like response, consistent with the previous reports [e.g., 4]. Nonetheless, inter-configuration variations fluctuating around this basic response are surprisingly large even within the cases where the definitions of high and low sea-ice conditions are fixed and only differences in sea-ice datasets are allowed to enter. We identified a systematic relationship between the strength of the negative AO-like response with sea ice variations in the northern North Atlantic. Analysis indicates that this relationship is to an extent explained by a process in which synoptic-scale eddy activity over the North Atlantic, modulated by sea ice anomalies around Greenland, results in variant intensity of AO-like response through eddy feedback processes.

The most immediate implication of our results is that part

of what has been interpreted as uncertainties in various AGCM sea-ice impact experiments may actually be a consequence of small yet significant differences in the sea-ice forcing field. Further, our results hint at the importance of eddy feedback processes over the northern North Atlantic, which acts to modulate the background flow in the down stream region including the Barents/Kara Seas and Eurasia. The results presented here are from simulations on a single model. Taking into account differences in model characteristics, it is clear that we need more exploration by multi-model comparisons with controlled SIC and SST experiments.

4. Development of Greenland ice-sheet model

An international ice-sheet model intercomparison project initMIP is held under CMIP6/ISMIP6 design, which focus on the uncertainties in variation of ice-sheet models, in particular on the initialization methods. The result shows that relatively large dispersion of Greenland ice-sheet response to a warming scenario for 100 years, ranges from 75mm to 290mm of volume changes in terms of global sea-level equivalent. It is concluded that the dominant factor for this dispersion is the initialization method [5]. Thus, it is important to simulate well the present-day ice-sheet for precise projection, as well as to simulate well the surface mass balance, which we are developing to replace the current method with more sophisticated method such as MATSIRO.

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] Barnes, E. A., and Screen, J. A., “The impact of Arctic warming on the midlatitude jetstream: Can it? Has it? Will it?” *WIREs Clim. Change*, 6, 277–286, doi:10.1002/wcc.337, 2015.
- [2] Ivanova, N., Pedersen, L. T., Tonboe, R. T., Kern, S., Heygster, G., Lavergne, T., Sørensen, A., Saldo, R., Dybkjær, G., Brucker, L., and Shokr, M., “Inter-comparison and evaluation of sea ice algorithms: towards further identification of challenges and optimal approach using passive microwave observations,” *The Cryosphere*, 9, 1797-1817, doi:10.5194/tc-9-1797-2015, 2015.
- [3] Comiso, J. C., W. N. Meier, and R. Gersten, “Variability and trends in the Arctic Sea ice cover: Results from different techniques,” *J. Geophys. Res. Oceans*, 122, 6883–6900, doi:10.1002/2017JC012768, 2017.
- [4] Nakamura, T., K. Yamazaki, K. Iwamoto, M. Honda, Y. Miyoshi, Y. Ogawa, Y. Tomikawa, and J. Ukita, “The stratospheric pathway for Arctic impacts on

midlatitude climate,” *Geophys. Res. Lett.*, 43, 3494–3501, doi:10.1002/2016GL068330, 2016.

- [5] Goelzer, H., Nowicki, S., Edwards, T., Beckley, M., Abe-Ouchi, A., Aschwanden, A., Calov, R., Gagliardini, O., Gillet-Chaulet, F., Golledge, N. R., Gregory, J., Greve, R., Humbert, A., Huybrechts, P., Kennedy, J. H., Larour, E., Lipscomb, W. H., Le clec'h, S., Lee, V., Morlighem, M., Pattyn, F., Payne, A. J., Rodehacke, C., Rückamp, M., Saito, F., Schlegel, N., Seroussi, H., Shepherd, A., Sun, S., van de Wal, R., and Ziemen, F. A., “Design and results of the ice sheet model initialisation experiments initMIP-Greenland: an ISMIP6 intercomparison,” *The Cryosphere*, 12, 1433-1460, doi:10.5194/tc-12-1433-2018, 2018.