

## 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

中村 哲\*1, 大石 龍太\*2, 高野 雄記\*2, 齋藤 冬樹\*3, 久保川 陽呂鎮\*2

\*1 北海道大学地球環境科学研究所, \*2 東京大学大気海洋研究所, \*3 海洋研究開発機構

要旨

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、大気大循環モデルに温暖化による海氷減少を模した境界条件を与える実験で陸域のメモリ効果を評価した。その結果、海氷減少が気候へ与える影響とほぼ同等の影響を陸面過程が持つことがわかり、それにより北極温暖化がさらに加速される可能性が示唆された。新規的モデルの開発及びそれを用いた実験では、氷床結合 GCM 開発の一段階として氷床の表面質量収支を GCM の出力から診断する推定手法の比較検証を行った。また、水同位体スキームを組み込んだ全球非静力学モデル NICAM で雲解像実験の実施と解析を行い、降水特性やその周囲との相互作用の再現性が高緯度域での大気水循環過程の解明に資する可能性を示した。

キーワード：北極海氷減少、陸面過程、氷床結合 GCM、大気水循環

## 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、数値モデルを用いた気候学的研究および新規的モデルの開発と実験に関する本年度の成果から代表的な3件を取り上げ、その概要を述べる。

## 2. 北極温暖化に伴うユーラシア陸面過程の気候メモリ効果

北極域は、ここ数十年でもっとも温暖化が進んだ地域である。特に北極海の海氷減少は、アイスアルベドフィードバックを通した北極圏の昇温による生態系や気候状態への影響のみならず、日本を含む中緯度域での寒波の増大といった遠隔影響も示唆される。このような北極の温暖化と中緯度の寒冷化の関係については、過去数十年の観測結果では、強い相関関係があることがわかっているが、気候シミュレーションによる再現性には大きな不確実性があり、気候変化の予測精度向上の大きな妨げとなっている。そのような不確実性をもたらす要因として、大気循環よりもゆっくりと変動する、海洋や陸域、さらに成層圏との相互作用があるのではないかと推測される[1][2]。中緯度陸域では積雪や土壌温度、土壌水分などが、大気状態の変化を記憶するメモリ効果があることは知られているが、北極温暖化に伴う気候変化において、陸域の役割はこれまでほとんど確かめられていない。

本研究では、陸面モデル MATSIRO を搭載した大気大循環モデル AFES4.1 T79L56 を用いて、温暖化による海氷減少時の大気状態を再現する気候シミュレーションを行い、その中から陸域のメモリ効果を評価する手法を開発した。観測データを元にした多氷・少氷状態を境界条件として

与え、再現される気候状態を持続させた実験（海氷+陸域の変化に対する応答）と、毎年夏に気候状態をリセットした実験（海氷の変化のみに対する応答）をそれぞれ100年分のシミュレーションを行った（図1）。両者を比較することにより、陸域に記憶された変化、及びそれに伴う気候状態の変化を見積もった。

海氷減少時の気候変化を再現した実験（Total）では、いわゆる負の北極振動パターンが現れ、これは最近数十年で観測された変化をよく再現する。この応答を、海氷のみに対する応答（Sea ice）と、陸域のメモリ効果による応答

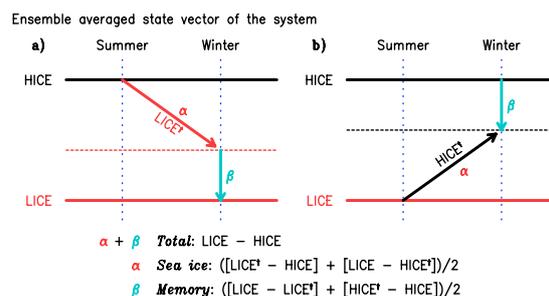


図1 アンサンブル平均場の状態ベクトルの季節推移。多氷と少氷の境界条件を与え、連続した100年の実験で得られた気候状態（HICE、LICE）、および、夏に海氷の境界条件を(a)少氷、(b)多氷へと変えた1年積分の100メンバーを平均した気候状態（LICE<sup>†</sup>、HICE<sup>†</sup>）を示す。

LICE-HICEで評価される全応答（Total）は、海氷減少と陸面過程の変化に伴う気候状態の変化であるのに対し、LICE<sup>†</sup>-HICEとLICE-HICE<sup>†</sup>の平均で評価される応答（Sea ice）は海氷減少のみに対する気候状態の変化と仮定すると、その残差（Memory）は陸面に記憶された偏差に対する気候状態の変化と評価できる。

(Memory) とに分離したところ、両者はほぼ対等に、負の北極振動的なシーソーパターンを作り出していた(図2)。

このような変化を生じる要因を調べた。変形オイラー平均場における大気波動のエネルギー伝搬の変化を見ると、それぞれ海水減少が顕著な北極域、及びメモリ効果が生じる中緯度域の地表付近の波源から、北緯 60 度付近の対流圏上層へ波動が伝搬し、極前線ジェットを蛇行させる波強制を生じていた。つまり、海水減少による北極海北大西洋域の昇温偏差と、陸面過程のメモリ効果によるユーラシア大陸に記憶された寒冷偏差が、ともに気候学的な惑星波を強化することがその実態である。

メモリ効果は、春と秋は積雪偏差、夏は土壌温度に偏差が伝搬し、寒冷偏差が持続する事により生じる。このようなサイクルが毎年蓄積されることで、メモリ効果は、海水減少だけで説明される中緯度の寒冷化を 85%増幅することがわかった。同時に生じる大気循環は、北極への熱輸送効果を持ち、メモリ効果がない場合に対して北極の温暖化が、20%強化されていることもわかった[3]。

本研究では、海水減少が気候へ与える影響とほぼ同等の影響を陸面過程が持つことがわかり、それにより北極温暖化がさらに加速される可能性を示唆する。一方、夏季ユーラシア大陸では、近年、凍土層の顕著な融解が観測されており、北極圏の陸域環境が大きく変化した際に、メモリ効果がどのように働くのかについては今後検証が必要である。

### 3. 氷床結合 GCM の開発

温暖化の将来予測において海面上昇が示唆されているが、その上昇幅には不確実性がある。温暖化に伴う氷床の融解量推定の精度向上によってこの不確実性が低減され

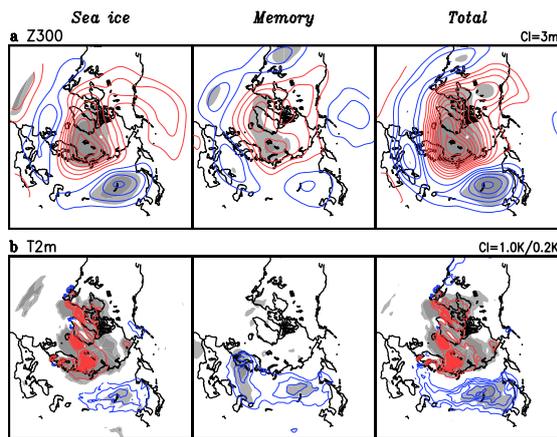


図2 気候モデルで再現された、北極海の海水が減少した時の、冬季(12~2月)の対流圏上層の気圧(上段)と、地上気温(下段)の変化。赤が気圧上昇・高温、青が気圧低下・低温となる変化を示す。灰色のハッチは統計的有意水準95%以上の領域を示す。左から右へ、海水減少に対する応答、陸域のメモリ効果による応答、両者の足し合わせとなる全応答を示す。

ることが期待されており、気候システムにおける氷床のふるまいの理解が重要な課題となっている。Ice Sheet Model Intercomparison Project for CMIP6 (ISMIP6)[4]は数値モデルを用いた気候-氷床相互作用研究の枠組みを策定しており、本研究グループもその一環として氷床結合 GCM の開発を行っている。氷床モデルの入力となる表面質量収支を GCM 結果から求めるのが結合モデル開発の初期段階であるが、一般に GCM 大気の解像度は数十~数百 km 程度であり、数 km~十 km 程度の氷床モデルの解像度とは異なっているため、このギャップを埋めるための手法が必要となる。本研究ではまず GCM と氷床モデル間の解像度変換を行う枠組みを整備した。本研究ではグリーンランドを対象として2つの手法による融解量推定を行い、その結果を比較した。一つ目は、既存研究で多数の採用実績がある Positive Degree-Days (PDD)[5]と呼ばれる経験式に基づく手法である。今回新たに GCM 陸面モデルとして採用されている Minimal Advanced Treatment of Surface Interaction and Run-Off (MATSIRO)[6]を氷床モデルの解像度で実行することで、熱・水収支に基づく融解量の推定を行った(図3)。共通の入力値として ERA-Interim[7]を用いた。

### 4. 同位体全球雲解像モデルの開発

高緯度域を含む大気水循環過程を、特に陸域との相互作用に着目して解明するには、水の安定同位体の持つ情報が有用であると考えられる。全球非静力学モデル NICAM (Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model)[8][9]の雲微物理過程へ水の安定同位体を組み込むことで、様々な時空間スケールでの水蒸気や降水の安定同位体比の変化を再現できるようになった。本研究では、同位体を

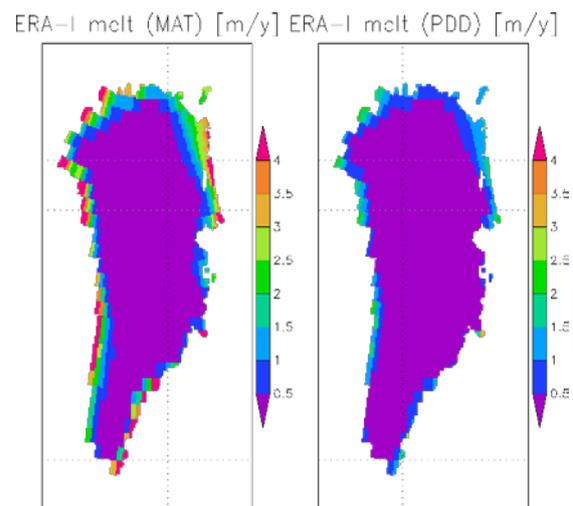


図3 0.75 度格子の ERA-Interim 変数を入力として推定した 10 km 格子でのグリーンランド年間融解量。使用した推定方法は、陸面モデル MATSIRO(左)と経験式 PDD(右)。

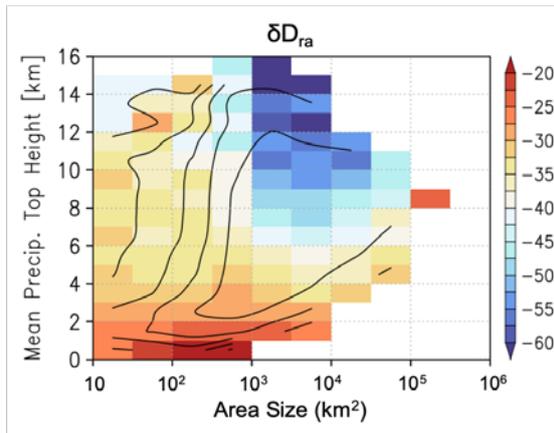


図4 δDra の雨域面積と降水頂高度への依存性

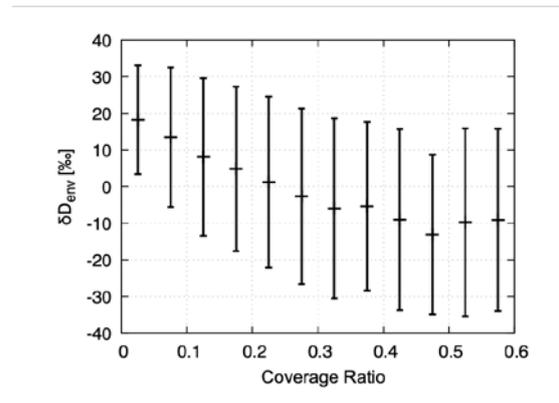


図5 雨域カバー率と δDenv の関係

組み込んだ NICAM を用いて全球雲解像実験を行うことで、雨域の降水同位体比が、雨域の降水特性や、大きな空間スケールの水蒸気同位体比にどのように影響されるかを評価した。

同位体 NICAM を用いて、水平解像度 3.5 km の全球雲解像実験を行った。この実験結果を用いて、4 連結の降水領域を雨域と定義した。雨域の降水同位体比 (δD) を、雨域周辺の下層水蒸気同位体比による寄与 (δDenv) と、降水システム自身がもたらす寄与 (δDra) に分けた。降水特性および他の雨域に覆われる面積の割合 (雨域カバー率) が、δDra と δDenv のそれぞれに与える影響を調べた。

図4に示されるように、雨域の面積が 300 km<sup>2</sup> 未満の場合は降水の同位体比 δDra の降水頂高度にあまり依存性しない一方で、面積が 1000 km<sup>2</sup> 以上の場合、降水頂高度とともに同位体比は減少する。図5に示されるように、雨域カバー率が高くなるほど δDenv は低くなる。この結果は、水同位体の観測データに基づいた解析結果とも整合的である。

上記の結果より、雨域平均降水 δDp は卓越する降水特性を用いて次のように解釈できる(図6)。高い降水 δDp は面積の小さい孤立した雨域からもたらされる一方、低い降水 δDp は面積が大きく組織化した雨域からもたらされ

る。最も低い降水 δDp は、組織化した雨域が周囲に複数存在する場合に生じる。このような降水特性とその周囲との相互作用を再現できる同位体 NICAM は、高緯度域での大気水循環過程の解明にも資すると期待される。

謝辞

本研究は、文部科学省北極域研究推進プロジェクト「ArCS:Arctic Challenge for Sustainability Project」、及び科学技術振興機構「ベルモント・フォーラム CRA InterDec」の一環として行われ、また JSPS 科研費 18K0373508 の助成を受けたものです。

文献

[1] Deser, C., L. Sun, R. A. Tomas, and J. Screen, “Does ocean coupling matter for the northern extratropical response to projected Arctic sea ice loss?”, *Geophysical Research Letters*, 43, 2149–2157, (March 2016)

[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 mid-latitude climate”, *Geophysical Research Letters*, 43, 3494–3501, (April 2016)

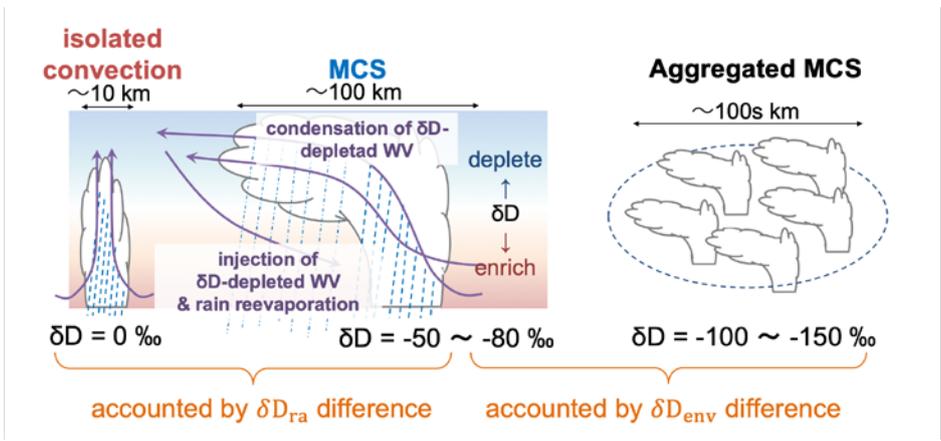


図6 雨域の降水同位体比の概念図

- [3] Nakamura, T., K. Yamazaki, T. Sato, and J. Ukita, "Memory effects of Eurasian land processes cause enhanced cooling in response to sea ice loss", *Nature Communications*, 10, 5111, (November 2019).
- [4] Nowicki, S. M. J. and others, "Ice Sheet Model Intercomparison Project (ISMIP6) contribution to CMIP6", *Geosci. Model Dev.*, 9, 4521-4545, doi:10.5194/gmd-9-4521-2016, (December 2016).
- [5] Reeh, N., "Parameterization of melt rate and surface temperature on the Greenland lee Sheet", *Polarforschung*, 59(3), 113-128, 1991.
- [6] Takata, K., S. Emori and T. Watanabe, "Development of the minimal advanced treatments of surface interaction and runoff", *Global and Planetary Change*, 38, 209-222, (July 2003).
- [7] Dee, D.P. and others, "The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system", *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 137: 553 – 597. DOI:10.1002/qj.828, (April 2011).
- [8] M. Satoh et al., "The Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model: description and development.", *Prog. in Earth and Planet. Sci.*, vol.1, no.18, October 2014.
- [9] H. Tomita, "New Microphysical Schemes with Five and Six Categories by Diagnostic Generation of Cloud Ice", *J. Meteorol. Soc. Japan*, vol.86A, pp. 121-142, April 2008.

# 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

Tetsu Nakamura\*<sup>1</sup>, Ryota O'oishi\*<sup>2</sup>, Yuki Takano\*<sup>2</sup>, Fuyuki Saito\*<sup>3</sup>, Hiroyasu Kubokawa\*<sup>2</sup>

\*<sup>1</sup>Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University

\*<sup>2</sup>Atmosphere and Ocean Research Institute, the University of Tokyo

\*<sup>3</sup>Institute for Arctic Climate and Environmental Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

## Abstract

We have been performing several studies in order to understand the mechanism of climate variability in the Arctic and mid-latitudes. Regarding climate studies, we assess the memory effects of land processes by conducting AGCM experiments with boundary conditions mimicking the Arctic sea-ice retreat. The contribution of the land memory effect is shown to be similar in magnitude to the direct effect of sea-ice loss. This result suggests the land memory has the potential to accelerate the warming of the Arctic. As for the development of novel numerical models, we compare methods of surface mass balance estimation of the ice shelf from outputs of AGCM. Also, we performed cloud-resolving experiments by using isotope-enabled global non-hydrostatic model NICAM. The result suggests that the interaction between the precipitation organization of the rainfall area and the large-scale isotope ratio of ambient water vapor is well reproduced, which can contribute to the understanding of atmospheric water circulation processes at high latitudes.

**Keywords:** Arctic amplification, Land surface process, Ice sheet model coupled GCM, Atmospheric water circulation

## 1. Introduction

Our research group has been performing interdisciplinary climate studies focusing not only on the Arctic but also on more extensive areas in order to understand a drastic change in the recent Arctic and its impact. In this article, we will present three main topics from our research activities on climate studies and the development of novel numerical models in this fiscal year.

## 2. Climate memory effect of Eurasian land process associated with the Arctic warming

Amplified Arctic warming and its relevance to mid-latitude cooling in winter have been intensively studied. Observational evidence has shown strong connections between decreasing sea ice and cooling over the Siberian/East Asian regions. However, the robustness of such connections remains a matter of discussion because modeling studies have shown divergent and controversial results.

In a published paper [1], we report a set of general circulation model experiments using an atmospheric general circulation model AFES4.1 T79L56 with a land process model MATSIRO. The experiments are specifically designed to extract memory effects of land processes that can amplify sea ice-climate impacts (Figure 1).

The results show that sea ice-induced cooling anomalies over the Eurasian continent are memorized in the snow amount and soil temperature fields, and they reemerge in the following winters to enhance negative Arctic Oscillation-like anomalies. The contribution from this memory effect is similar in magnitude to the direct effect of sea ice loss. The results emphasize the essential role of land processes in

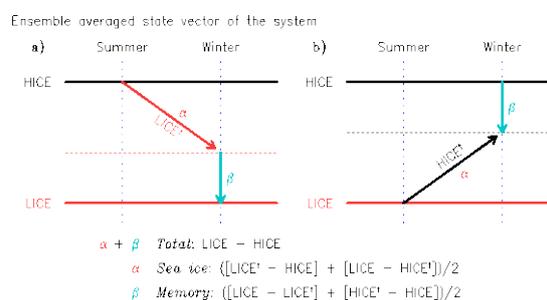


Figure 1. Ensemble averaged state vectors of the climate system. Schematic diagram shows equilibrium climate states with high and low sea ice boundary conditions (HICE and LICE) and transient states for abrupt change of sea ice condition, being (a) high to low (LICE<sup>†</sup>) and (b) low to high (HICE<sup>†</sup>). We assume transient state as direct effect of the sea ice variations, and thus residual of total effect minus sea ice effect can be the memory effect that persist previous multi years.

understanding and evaluating the Arctic–mid-latitude climate linkage.

### 3. Development of ISM coupled GCM

In the future global warming projection, uncertainty in sea level rise depends on the accuracy of Greenland melt estimation. We are participating the Ice Sheet Model Intercomparison Project for CMIP6 (ISMIP6) [2] and developing an Ice Sheet Model coupled GCM (ISM-GCM). Surface mass balance (SMB) of the ice sheet is calculated from GCM output and passed to ISM as input, though there is a discrepancy of horizontal resolution between GCM (~100km) and ISM (~10km). We developed a conversion method from GCM resolution to ISM resolution and examined the SMB estimation by two different methods. One is Positive Degree-Days (PDD) [3] which is based on empirical relationship between summer temperature and melt. The other is a Minimal Advanced Treatment of Surface Interaction and Run-Off (MATSIRO) [4] which is a land surface energy balance model employed in GCM land submodel. We compared SMBs by these two methods by using ERA-Interim [5] as common input (Figure 2).

### 4. Development of isotope-enabled global cloud resolving model

We conducted a global cloud resolving simulation using isotope-enabled global non-hydrostatic model NICAM (Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model) [6][7], and evaluated how the isotope ratio of precipitation in the rainfall area is affected by the rainfall characteristics of the rainfall area and the large-scale isotope ratio of ambient water vapor. A global cloud resolving simulation with 3.5 km horizontal resolution was performed. Using this simulation results, the 4-connected precipitation region was defined as “rainfall area”. Precipitation isotope ratio in rainfall area ( $\delta D_p$ ) is divided into

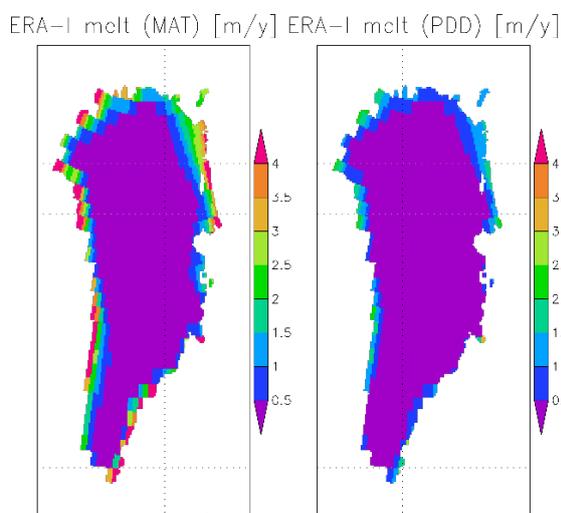


Figure 2. SMB estimation at a resolution of 10 km by using MATSIRO (left panel) and PDD method (right panel). Note that ERA-Interim as input data for both the cases.

contribution from depletion in isotope ratio of lower tropospheric water vapor around the rainfall region ( $\delta D_{env}$ ) and contribution of precipitation system itself ( $\delta D_{ra}$ ). We investigate the effect of precipitation characteristics and that of ratio of area covered by other rainfall areas (coverage ratio) on  $\delta D_{ra}$  and  $\delta D_{env}$ , respectively.

As shown in Fig. 3, if the horizontal dimension of rainfall area is less than 300 km<sup>2</sup>,  $\delta D_{ra}$  does not depend much on the precipitation top height of rainfall area, whereas if the horizontal dimension is more than 1000 km<sup>2</sup>,  $\delta D_{ra}$  decreases with the precipitation top height. As shown in Fig. 4,  $\delta D_{env}$  decreases as coverage ratio increases. This result is consistent with the results of analysis based on observational water isotope data.

From the above results, precipitation isotope ratio in rainfall area  $\delta D_p$  can be interpreted as follows. While high  $\delta D_p$  correspond to small isolated convections, low  $\delta D_p$  correspond to large organized convective systems. In addition, it is pointed out that aggregations of organized convective systems are necessary for generating very low  $\delta D_p$ . This shows that the interaction between the precipitation characteristics (organization) of the rainfall area itself and the large-scale isotope ratio of ambient water vapor can be reproduced by the isotope-enabled NICAM, which is expected to contribute to

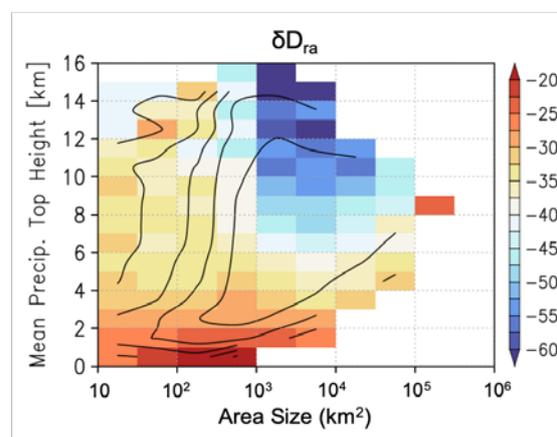


Figure 3. Dependency of  $\delta D_{ra}$  on horizontal dimension of rainfall area and precipitation top height.

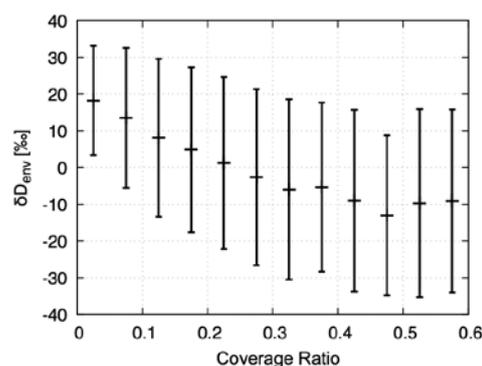


Figure 4. Relationship between coverage ratio and  $D_{env}$ .

the understanding of atmospheric water circulation processes at high latitudes.

### **Acknowledgement**

This study is supported by JSPS KAKENHI (18K0373508), the Arctic Challenge for Sustainability project (ArCS), and the InterDec project of Belmont Forum.

### **References**

- [1] Nakamura, T., K. Yamazaki, T. Sato, and J. Ukita, “Memory effects of Eurasian land processes cause enhanced cooling in response to sea ice loss”, *Nature Communications*, 10, 5111 (November 2019).
- [2] Nowicki, S. M. J. and others, “Ice Sheet Model Intercomparison Project (ISMIP6) contribution to CMIP6”, *Geosci. Model Dev.*, 9, 4521-4545, doi:10.5194/gmd-9-4521-2016, (December 2016).
- [3] Reeh, N., “Parameterization of melt rate and surface temperature on the Greenland ice Sheet”, *Polarforschung*, 59(3), 113-128, 1991.
- [4] Takata, K., S. Emori and T. Watanabe, “Development of the minimal advanced treatments of surface interaction and runoff”, *Global and Planetary Change*, 38, 209-222, (July 2003).
- [5] Dee, D.P. and others, “The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system”, *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 137: 553 – 597. DOI:10.1002/qj.828, (April 2011).
- [6] M. Satoh et al., “The Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model: description and development.”, *Prog. in Earth and Planet. Sci.*, vol.1, no.18, October 2014.
- [7] H. Tomita, “New Microphysical Schemes with Five and Six Categories by Diagnostic Generation of Cloud Ice”, *J. Meteorol. Soc. Japan*, vol.86A, pp. 121-142, April 2008.