

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 8 日現在

機関番号：82706

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K12830

研究課題名(和文) 海水の初期値化と気候モデルによる北極域変動の予測可能性

研究課題名(英文) Sea ice initialization and predictability of the Arctic environment with climate model

研究代表者

小野 純 (ONO, Jun)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境部門(北極環境変動総合研究センター)・特任研究員

研究者番号：20451411

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、気候モデルと観測データに基づいた初期値化システムを用いて、季節から経年スケールで変動する北極海の海水予測可能性とそのメカニズムを調べた。北極海の冬季海水面積は、北大西洋からバレンツ海に流入する海洋熱量偏差をソースとして約1年前から予測可能であり、夏季海水面積は海水の熱的持続性をソースとして数ヶ月前から予測可能であることを示した。また、温暖化トレンドがなくても北極海の海水面積は2007年や2012年に観測された減少量に匹敵する大激減が起こり得ることを示した。さらに、春の海水厚偏差の持続性が夏の海水予測の精度に重要であり、太平洋側北極海の海水がソースになっていることを初めて示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、観測データと数値モデルを用いて、夏と冬の北極海の海水面積の予測可能性を評価し、予測を可能にするメカニズムを明らかにした。これらの科学的知見を気候モデルに反映させることにより、季節から経年スケールの海水予測の精度向上が期待される。また、北極海の海水減少は、北極域から中緯度域の気象・気候だけでなく、北極海の生態系や航路にも影響を与えるため、科学のみならず社会経済の分野においても関心の高いテーマとなっている。したがって、本研究の成果は、学術的にも社会的にも意義のある研究成果である。

研究成果の概要(英文)：This study investigated the Arctic sea-ice predictability with a seasonal-to-interannual time scale, using a single climate model (MIROC) with an initialization system. We showed that winter sea ice extent could be predicted about one year in advance and summer sea ice extent several months in advance. The key factors were ocean heat content anomalies from the North Atlantic and thermal persistence of sea ice for winter and summer, respectively. We also showed that even in the absence of a warming trend, the Arctic sea ice extent drastically reduces, comparable to the observed extreme reduction in 2007 and 2012. Furthermore, the persistence of sea ice thickness in spring in the Pacific Arctic Ocean is vital for the accuracy of sea-ice forecast in summer.

研究分野：海洋物理学

キーワード：海水 北極海 気候モデル 予測可能性 海水厚

1. 研究開始当初の背景

(1) 地球温暖化に代表される地球規模での気候変化の兆候は、北極域において顕著に現れている。特に、北極海では夏季の海水面積が急速に減少し(10年間で約14%の減少)、夏に限りロシア側の北東航路とカナダ側の北西航路の利用が可能となり、社会的にも関心を集めている。また、北極海に存在する「海氷」は、北極海航路の利用、北極域の生態系・人間活動に影響を与えるだけでなく、中緯度域の気候変化・変動を誘起する要因にもなっている。したがって、大気と海洋の影響を受けて時々刻々と変化する「海氷」の状態を可能な限り正確に再現・予測することは、気候変動のみならず北極海航路の安全利用という観点から必要性の高い学術的研究課題である。

(2) 数日という短い時間スケールで変動する海水分布の予測は、北極海航路を利用する船舶の安全航行に極めて重要な情報である。研究代表者はグリーン・ネットワーク・オブ・エクセレンス事業の北極気候変動分野「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解明」プロジェクトのもと、大気再解析データを海水海洋結合モデルに与えて北極海航路上における海水分布を再現した(文献、)。さらに、大気予測データを与えた予測実験により、モデルの境界条件としてラジオゾンデ観測データを同化した気象条件(特に風向・風速)を与えることが海水分布の予測精度を高める上で最も重要であることを定量的に示し(文献)、今後の極域観測はどのように最適化されるべきかを国内外に向けて発信した。一方、数十日・数ヶ月以上の中・長期予報や数年から地球温暖化スケールまでの気候変動予測となると、その精度は極端に悪くなることが知られている。本研究課題のターゲットである北極域に関して、改良の余地が残されている。季節から経年スケールで変動する北極環境を再現・予測し、背後に潜む物理過程までを理解するには数値モデルが唯一の手法であり、観測データと統合的な初期・境界条件を与えることが必須である。これを可能にするのは、気候モデルとデータ同化による初期値化システムを組み合わせた手法である。

2. 研究の目的

本研究課題は、全球の大気海洋結合過程を表現できる気候モデル MIROC とこれまで有効活用されていない極域の観測データを融合した初期値化システムを開発・改良し、気候変動の鍵を握る北極環境の予測可能性とその予測を可能にする物理過程を解明することで、北極域から中緯度域の季節から経年スケールの気候変動予測に役立つ情報を提供する。

3. 研究の方法

観測データ・全球大気海洋結合気候モデル・データ同化を融合し、「海氷」を初期値化した気候モデルによる北極環境の再現・予測精度向上に資する研究を行うため、(1)極域観測データの整備と気候モデルのバイアス検証・評価、(2)データ同化による初期値化システムの開発・改良、(3)初期値化・予測実験による北極環境の予測可能性の三つの研究課題に取り組んだ。同化手法には簡略化された IAU (Incremental Analysis Update) を適用し、初期値化システムによる事後予測実験の結果から、北極環境の再現・予測精度に対する極域観測データの有効性を検証した。また、理想化された実験設定で海氷厚初期値化のインパクトを評価した。

4. 研究成果

はじめに、極域観測データの整備と気候モデルのバイアス評価を実施した。海氷については、衛星観測・船舶・潜水艦・再解析データ等を収集・整備し、既存の数値実験データと比較した。冬季の海水密接度は大西洋側北極海で高密接度バイアス、夏季は北極海ロシア沿岸域で高・低密接度バイアスであることを確認した。また、海氷厚については全体的に厚くなっている傾向が見られた。本研究では、主に3つの研究成果を創出した。

(1) 冬と夏の海水予測に重要なメカニズム

観測に基づいた再解析データ(気温、東西風、南北風、水温、塩分、海水密接度)によって初期値化した気候モデル MIROC5(文献)を用いて、季節から経年スケールで変動する北極海における海水面積の予測可能性を評価し、予測スキルのソースとなる物理過程について調べた。冬季の海水面積は11ヶ月前から予測可能であり、気候モデルによる1月開始の事後予測は観測された12月の海水面積の経年変化をよく捉えている(図1a)。これは先行する3月に北大西洋を起源とする亜表層水がバレンツ海に流入し、冬の鉛直混合に伴って海面に現れるという物理過程(reemergence)が寄与していることが示唆された(図1b)。また、夏季の海水面積は2-5ヶ月前から予測可能であり、北極海の太平洋セクターにおける海水状態の熱的慣性(persistence)によると示唆された。

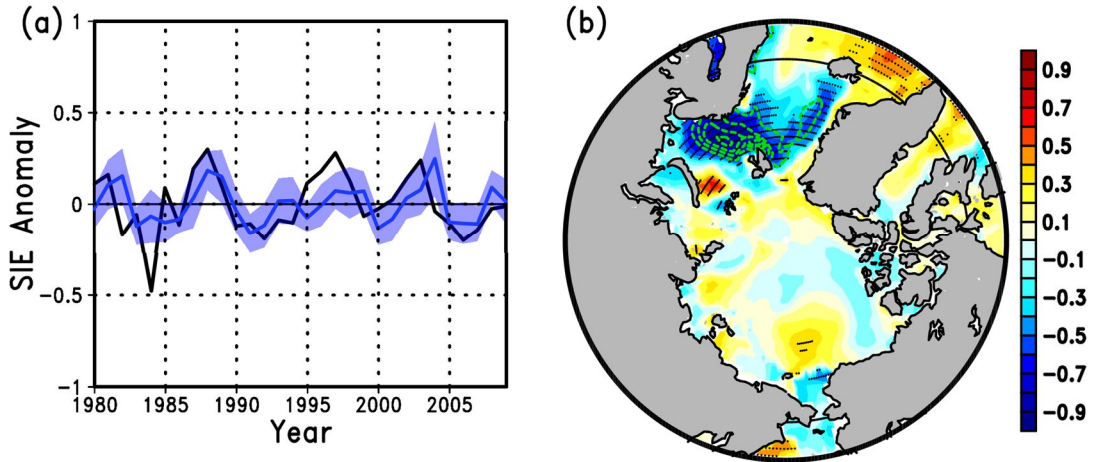


図 1 : (a) 1980 年から 2009 年までの 12 月の北極海の海水面積偏差 (百万 km^2 、黒線 : 観測、青線 : 気候モデルによる 1 月開始の事後予測、青陰影 : アンサンブルスプレッド) の時系列。(b) 12 月の海水面積偏差に伴う先行する 3 月の海洋熱量偏差の空間分布 (色 : 相関係数、緑線 : 回帰係数)。

以上の研究成果は、国内外での学会・研究集会で発表 (口頭とポスター) し、査読付き論文として The Cryosphere (文献) に発表した。

(2) 極端な海水減少の予測可能性

季節から経年スケールの北極環境の予測可能性に関する国際プロジェクト APPOSITE の一環として、気候モデル MIROC5.2 (文献) を用いて、内部変動に伴う海水大激減のメカニズムと予測可能性を調べた。

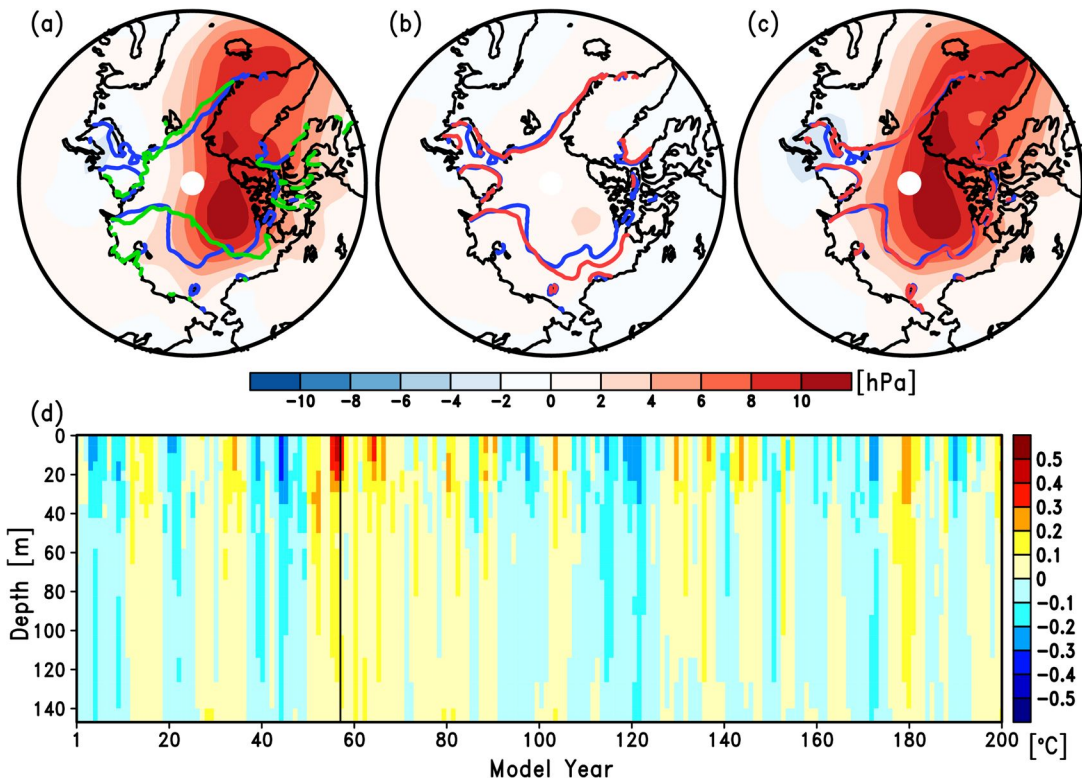


図 2 : (a) コントロール実験、(b) 4 月開始の予測実験、(c) 7 月開始の予測実験から得られた、夏 (6 月から 8 月平均) の海面気圧偏差の空間分布 (hPa)。曲線は 9 月の氷縁位置 (青線 : コントロール実験、赤線 : 4 月および 7 月開始の予測実験、緑線 : 2007 年の観測) を示す。(d) 北極海内部で平均された水温の鉛直分布の時系列 (、200 年間)。

2000 年の条件で固定した長期積分 (コントロール実験) の結果から、北極海の海水面積は急激に減少 (200 年間で 3 回) し、その大きさは現実で起こっている 2007 年に匹敵することが示された (図 2a)。この原因の一つは夏の北極海上に形成される海面気圧偏差のダイポール構造に伴う風であるが、より重要なのは海水を冲向きに動かすような風系が形成されていることである。このような夏の大気循環偏差に加えて、春の海水厚負偏差と大西洋・太平洋からの熱輸送偏差に伴う北極海内部の温暖な状態 (図 2d) が海水大激減のプレコンディショニングとして

作用していることが示唆された。また、アンサンブル予測実験から、このような9月の海氷大激減イベントは7月から予測可能であるが、4月からは海面気圧と氷縁に沿う海氷の誤差が大きいため予測できないことが示された(図2b, c)。一方、本研究では、海面気圧偏差のダイポール構造がどのようなメカニズムで形成されるのかについては明らかにできなかった。今後は、気候モデルおよび海氷海洋結合モデルによる実験・解析を通して、北極域外部の各種変動および海氷厚が海氷を含む北極環境変動の予測可能性に与える影響を調べ、中長期気候変動の予測精度向上につながる新たな知見が必要である。

以上の研究成果は、国内外での学会・研究集会で発表(口頭2回、ポスター1回)し、査読付き論文として *Journal of Climate* (文献) に発表した。

(3) 夏季の海氷面積予測に対する春季の海氷厚初期値化の役割

本研究では、気候モデル MIROC5.2 を用いたパーフェクトモデル実験に基づいて、4月の海氷厚の初期値化が9月の海氷面積の予測可能性に与える影響とプロセスを調べた。4月に初期値化された海氷厚の持続性によって9月の海氷面積は2年目まで予測可能であり、先行研究と整合する結果が得られた(図3a)。さらに本研究では、4月の海氷厚に誤差があると融解期の海氷密度誤差が大きくなるため(図3b)9月の海氷面積を予測できないこと、太平洋セクターの4月の海氷厚初期値化が誤差を減らすことにより(図3c)9月の海氷面積予測に効果的であることを初めて示した。

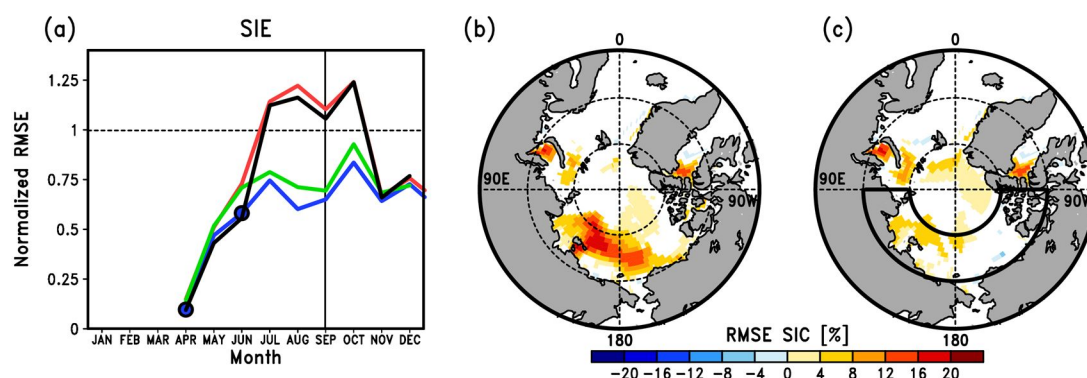


図3 (a) 北極海氷面積の予測性能(黒:北極海全域の海氷厚を初期値化しない実験、赤:太平洋セクター(図3cの黒線枠)の海氷厚だけを初期値化しない実験、青:北極海全域の海氷厚を初期値化する実験、緑:太平洋セクターの海氷厚だけを初期値化する実験)。4月の海氷厚を(b)初期値化しない場合と(c)太平洋セクター(太線枠)のみ初期値化する場合の予測1年目9月(リードタイム6ヶ月)の海氷密度誤差(%)の空間分布。色は誤差が有意に大きい場所を示す。

以上の研究成果は、国内外での学会・研究集会で発表(口頭2回、ポスター1回)し、査読付き論文として *Annals of Glaciology* (文献) に発表した。

引用文献

Ono, J., J. Inoue, A. Yamazaki, K. Dethloff, H. Yamaguchi (2016), The impact of radiosonde data on forecasting sea-ice distribution along the Northern Sea Route during an extremely developed cyclone, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 8, 292-303, doi:10.1002/2015MS000552.

Inoue, J., A. Yamazaki, J. Ono, K. Dethloff, M. Maturilli, R. Neuber, P. Edwards, and H. Yamaguchi (2015), Additional Arctic observations improve weather and sea-ice forecasts for the Northern Sea Route, *Scientific Reports*, 5, 16868; doi:10.1038/srep16868.

De Silva L. W. A., H. Yamaguchi, and J. Ono (2015), Ice-ocean coupled computation for sea ice prediction to support ice navigation in the Arctic Sea Routes, *Polar Research*, 34, 25008.

Watanabe, M., Susuki, T., Oishi, R., Komuro, Y., Watanabe, S., Emori, S., Takemura, T., Chikira, M., Ogura, T., Sekiguchi, M., Takata, K., Yamazaki, D., Yokohata, T., Nozawa, T., Hasumi, H., Tatebe, H., Kimoto, M. 2010. Improved climate simulation

by MIROC5: mean states, variability, and climate sensitivity. *J. Climate*, 23, 6312-6335, doi:10.1175/2010JCLI3679.1

Ono, J., Tatebe, H., Komuro, Y., Nodzu, M.I., Ishii, M. 2018. Mechanisms influencing seasonal to inter-annual prediction skill of sea ice extent in the Arctic Ocean in MIROC. *The Cryosphere*, 12, 675-683, doi:10.5194/tc-12-675-2018

Tatebe, H., Tanaka, Y., Komuro, Y., Hasumi, H. 2018. Impact of deep ocean mixing on the climatic mean state in the Southern Ocean. *Sci. Rep.*, 8, 14479, <https://doi.org/10.1038/s41598-018-32768-6>.

Ono, J., Tatebe, H., Komuro, Y. 2019. Mechanisms for and predictability of a drastic reduction in the Arctic sea ice: APPOSITE data with climate model MIROC. *J. Climate*, 32, 1361-1380, doi:10.1175/JCLI-D-18-0195.1

Ono, J., Komuro, Y., and Tatebe, H.: Impact of sea ice thickness initialized in April on Arctic sea ice extent predictability with the MIROC climate model, *Annals of Glaciology* 1-9, <https://doi.org/10.1017/aog.2020.13>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Jun Ono, Yoshiki Komuro and Hiroaki Tatebe	4. 巻 61
2. 論文標題 Impact of sea-ice thickness initialized in April on Arctic sea-ice extent predictability with the MIROC climate model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Annals of Glaciology	6. 最初と最後の頁 1,9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1017/aog.2020.13	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Ono, J., Tatebe, H., and Komuro, Y.	4. 巻 32
2. 論文標題 Mechanisms for and predictability of a drastic reduction in the Arctic sea ice: APPOSITE data with climate model MIROC	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Climate	6. 最初と最後の頁 1361-1380
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1175/JCLI-D-18-0195.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Ono, J., Komuro, Y., and Tatebe, H	4. 巻 34
2. 論文標題 Impact of sea ice thickness on the predictability of the Arctic environmental variability	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 34th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans	6. 最初と最後の頁 88-89
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ono, J., Tatebe, H., Komuro, Y., Nodzu, I. M., Ishii, M.	4. 巻 12
2. 論文標題 Mechanisms influencing seasonal-to-interannual prediction skill of sea ice extent in the Arctic Ocean in MIROC	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Cryosphere	6. 最初と最後の頁 675-683
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5194/tc-12-675-2018	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

[学会発表] 計13件(うち招待講演 0件/うち国際学会 9件)

1. 発表者名 Jun Ono, Yoshiki Komuro and Hiroaki Tatebe
2. 発表標題 Impact of sea ice thickness on the predictability of the Arctic sea ice based on the APPOSITE data with climate model MIROC
3. 学会等名 International Glaciological Society Sea Ice Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小野純、小室芳樹、建部洋晶
2. 発表標題 海氷厚が海氷面積の予測可能性に与える影響
3. 学会等名 日本海洋学会秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jun Ono, Yoshiki Komuro and Hiroaki Tatebe
2. 発表標題 Changes in the Arctic ice and ocean states in the current and future climate
3. 学会等名 The 35th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Jun Ono, Yoshiki Komuro and Hiroaki Tatebe
2. 発表標題 Impact of Atlantic and Pacific Oceans on changes in the Arctic ice and ocean states under current and future climate
3. 学会等名 ISAR-6 / Sixth International Symposium on Arctic Research (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ono, J., Tatebe, H., and Komuro, Y.
2. 発表標題 Predictability of a drastic reduction in the Arctic sea ice
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会 (JpGU2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ono, J., Komuro, Y., and Tatebe, H.
2. 発表標題 Impact of sea ice thickness on the predictability of the Arctic environmental variability
3. 学会等名 The 34th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小野純、小室芳樹、建部洋晶
2. 発表標題 海氷厚の初期値が海氷面積予測に与える影響
3. 学会等名 北海道大学低温科学研究所共同利用研究集会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ono, J., Tatebe, H., and Komuro, Y.
2. 発表標題 Mechanisms for and predictability of a drastic reduction in the Arctic sea ice,
3. 学会等名 Forum for Arctic Modeling & Observational Synthesis (FAMOS) 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ono, J., Tatebe, H., Komuro, Y.
2. 発表標題 Predictability of the Arctic sea-ice extent by climate model MIROC
3. 学会等名 Arctic Science Summit Week 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小野 純、建部洋晶、小室芳樹
2. 発表標題 北極海の季節から数年スケールで変動する海氷の予測可能性
3. 学会等名 日本海洋学会2017年度秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Ono, J., Tatebe, H., Komuro, Y.
2. 発表標題 Predictability of a drastic reduction in the Arctic sea ice with climate model MIROC
3. 学会等名 The Eight Symposimu on Polar Science (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Ono, J., Tatebe, H., Komuro, Y.
2. 発表標題 Mechanisms influencing seasonal-to-interannual prediction skill of sea ice extent in the Arctic Ocean in MIROC
3. 学会等名 Forum for Arctic Modeling & Observational Synthesis 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Ono, J., Tatebe, H., Komuro, Y.
2. 発表標題 Predictability of Arctic sea ice in a climate model MIROC: toward skillfull seasonal forecasts
3. 学会等名 The 33rd International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関