

令和 2 年 5 月 15 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H01157

研究課題名(和文) ポリニヤを起点とする熱塩/物質循環

研究課題名(英文) Thermohaline and material circulation originating from coastal polynyas

研究代表者

大島 慶一郎 (OHSHIMA, Keiichiro)

北海道大学・低温科学研究所・教授

研究者番号：30185251

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,200,000円

研究成果の概要(和文)：南極、北極、オホーツクの沿岸ポリニヤでの係留系データの詳細な解析から、大気からの冷却が強い場合、最大水深100mに及ぶ海中でのフラジルアイス生成が起こることが示され、沿岸ポリニヤでは今まで考えられた以上に大きな海水生産を生むことが示唆された。また、流れが強い場合は、海底堆積物が巻き上がって海水内に鉄等の栄養物質が取り込まれることを実測から明確にし、その物質循環における重要性を提示した。これら係留データを検証データに用い、衛星マイクロ波によるフラジルアイス検知・薄氷厚アルゴリズムを開発し、全球の沿岸ポリニヤの海水生産量を高精度に見積もり、中深層水変動との関係解明に資するデータを作成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球気候を決める海洋の中深層循環は、極域・海水域の沿岸ポリニヤという薄氷域での重い水の沈み込みが起点となる。この重い水は、高海水生産に伴う高塩分水排出により生成されるが、その過程の詳細は実測が乏しくよくわかっていない。本研究は、係留系と衛星の観測から、沿岸ポリニヤでは、フラジルアイスという海中での海水生成が高海水生産システムを生んでいること、フラジルアスを介して鉄などの栄養分が輸送され、物質循環・生物生産の起点になっていることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In the Antarctic, Arctic, and Okhotsk coastal polynyas, underwater frazil ice formation occurs down to a depth of ~100m under strong cooling, revealed by the detailed analysis of mooring data. This active underwater frazil ice formation results in much higher ice production than previously thought. In such polynyas, winter mixing often reaches to the ocean bottom. Thus, the bottom sediments dispersed by the strong bottom current can be brought up to near the surface and finally incorporated into sea ice (suspension freezing). This process is a possible mechanism of iron supply to sea ice, which melts in spring and causes phytoplankton bloom. We have developed a new algorithm of satellite passive microwave for detection of frazil ice and estimation of thin ice thickness, using the mooring data as validation data. This provides better estimation of sea ice production for global coastal polynyas, linked with deep/intermediate water formation.

研究分野：海洋物理学

キーワード：海水生成 沿岸ポリニヤ フラジルアイス 気候変動 南極底層水 マイクロ波放射計 物質循環 鉄

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

世界の海洋の深層まで及び最も大きな循環は、極域の海から重い水が沈み込みそれが徐々に湧き上がる、という密度差による(熱塩)循環である。中深層水の元となる重い水は、沿岸ポリニヤという薄氷域での高海水生産により生成され、それが沈み込むことで地球規模の熱や塩(淡水)を輸送することになる(図1左側参照)。代表者らは人工衛星データを駆使して高海水生産域である沿岸ポリニヤを検知し、海水生産量を見積もるという手法を開発した。その手法を用いて世界に先駆けて海水生産量のマッピングを行い、昭和基地東方ケープダンレー沖に異常に海水生産量が多い海域を見つけ、未知(第4)の南極底層水生成域の発見に繋げた(Ohshima et al. 2013)。ポリニヤでの高海水生成に伴う重い水の潜り込みは、鉄などの生物生産に必要な物質の循環の起点にもなりうる(図1右側)。鉄の供給はこのような中深層を介する他に海水そのものからも供給され、それが氷縁域のブルーミングという最大規模の生物基礎生産をもたらしている可能性がある(図1右側)。しかし、ポリニヤ域では冬季の観測は困難であり、現場データがほとんど得られておらず、ポリニヤでの高海水生産過程や物質循環過程の実態はよくわかっていない。衛星マイクロ波放射計によるポリニヤの検知も十分な現場検証データがないことが最大の問題であった。

2. 研究の目的

海洋の熱塩/物質循環は、沿岸ポリニヤでの高海水生成が起点となって生成される中深層水の沈み込みにより駆動される(図1)。当グループが発見した底層水形成域・ケープダンレーポリニヤを主ターゲットに、高海水生産が生ずるシステム、それに伴う高密度水形成過程等を実測から明らかにする。これらを検証データとして、衛星による海水生産量の見積もりを改良して全球に適用し、高海水生成システムを全球の視点で評価する。これらから、中深層水の変動の理解を深め、中深層(熱塩)循環の将来予測に資する。さらに、高海水生成に伴って鉄等の物質が海水や中深層水に取り込まれる過程を実測から明らかにし、その物質循環へ果たす役割を評価する。

3. 研究の方法

(1) 当グループが南極、北極、オホーツクの沿岸ポリニヤで蓄積してきた、他では得られていない高精度の係留系による海洋・海水データに対し、今まで使われていなかった超音波流速プロファイラー(ADCP)の後方散乱強度データの解析等、独自の手法で解析することで、海中内部のフラジルアイスや堆積物の巻き上がりの動態を詳細に分析する。

(2) 北極チュクチ海ポリニヤと、南極ケープダンレーポリニヤ及びポリニヤ起源の底層水の通り道において、ADCP や時系列採水器等を装備した係留系の観測を行い、沿岸ポリニヤを起点とする物質循環過程の解明に資するデータを取得する。

(3) 上記の係留系データを検証データに用いて、フラジルアイスを検知し、高精度で薄氷厚を推定する衛星マイクロ波放射計のアルゴリズムを開発し、沿岸ポリニヤでの海水生産量を高精度でグローバルに見積もり、中深層水の変動との関係解明に資する。

(4) 高密度水、中深層水の分析に関しては、アザラシによるバイオリギング観測(Nakanowatari et al. 2017)やオホーツク海に投下してきたフロート観測によるデータ等を用い、沿岸ポリニヤでの海水生産との関係を解析する。

4. 研究成果

(1) 北極、南極、オホーツクのポリニヤ内での係留系による ADCP の散乱強度データの解析から、大気からの冷却が強い場合、最大水深 100m に及び海中でのフラジルアイス生成が起こることが示され、フラジルアイス生成による効率的な海水生産過程が沿岸ポリニヤで共通して起こりうる現象であることが示された。その典型的な例として、図2に南極ケープダンレーポリニヤでの

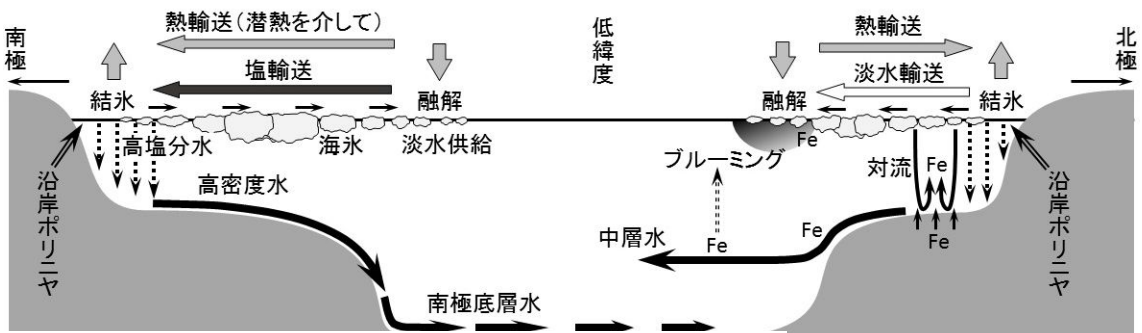


図1: 沿岸ポリニヤを起点とした 中深層/物質循環と熱塩の輸送

冬季の時系列を示す。強風イベント時(図 2a)には ADCP の散乱強度(図 2c)が全層にわたって大きくなっている。これは海中深くフラジリアイスが発生していることを示す。図 2b には、後述する衛星アルゴリズムによる係留点付近でのフラジリアイス出現率及び海水生産量を示すが、散乱強度と極めてよい対応を示すことがわかる(相関係数で約 0.8)。図 2d には、係留系の水温・塩分を示すが、水温は冬期間、ポテンシャル過冷却となっており、フラジリアイスの発生を支持するものである。高海水生産により塩分が冬期間に大きく上昇しており、底層水の起源水が生成されていることも直接観測から示された。オホーツク海サハリンポリニヤでも、強風かつ強い流れがあるときに、海底まで及ぶ全層でのフラジリアイス生成が示されており、この効率的な海水生産過程により、ポリニヤ内での海水生産の半分以上はフラジリアイス生成によるものであることがデータから示唆された(Ito, et al. 2020)。

(2) 北極チャクチ海ポリニヤにおいて蓄積された ADCP と濁度計のデータの解析からは、海中でのフラジリアイス生成と海底堆積物の巻き上がりが同時に起こり、それによって海水内に鉄等の堆積物を取り込まれる過程(suspension freezing)が頻繁に起こることが強く示唆された(Ito, et al. 2019)。海水内に取り込まれた鉄が海水融解時に放出されることで春季ブルームを誘起されると考えられ(Kanna et al. 2018; Evans and Nishioka 2018)、沿岸ポリニヤは物質循環・生物生産の起点となりうることが示唆された(図 1 右側)。

(3) プロジェクト期間内の観測としては、北極海の沿岸ポリニヤに 3 系、南極ケーブダンレーポリニヤ及びポリニヤ起源の底層水の通り道で 5 系の係留系観測を行い、計 6 系の回収に成功した。係留系には時系列採水器の他、濁度計や pH 計等も装備されていることから、ポリニヤを起点とする物質循環の研究に資する長期連続係留データを取得できた。

(4) 衛星マイクロ波放射計から、フラジリアイス等の海水タイプを識別し薄氷厚の推定を格段に高精度化するアルゴリズムを開発し(Nakata et al. 2019)、今までの薄氷厚アルゴリズムは氷厚を過大評価し海水生産量を過少評価していることを示した。さらに、当グループによる係留系データを用いて、このアルゴリズムを検証し、アルゴリズムの有効性と全球汎用のアルゴリズムになりうることを示した(Kashiwase et al. 2019)。これにより全球の海水生産量を同一のアルゴリズム・精度で推定することが可能となる。この他、トゥーリア大学と共同して、衛星赤外線放射計 MODIS データによる海水生産量の見積もりとの比較を北極海で行い、マイクロ波によるものと概ね一致することを示し、データの信頼性を高めた(Preusser et al. 2019)。

(5) オホーツク海においては、蓄積された計 30 個のフロート等による温度・塩分・溶存酸素データを中心に解析を行い、北西陸棚ポリニヤからの高密度陸棚水が千島海盆内で他の水塊と混合してオホーツク海中層水になる過程などを明らかにした(Mensah et al. 2019)。さらに、オホーツク海及びその下流域である親潮域の中層水に対して、その季節変動や 18.6 年の潮汐周期変動を抽出し、それを取り除いたポリニヤ変動を起源とする中層水の変動(海水生成減少により低温の高密度水が減少していること)を明らかにした。

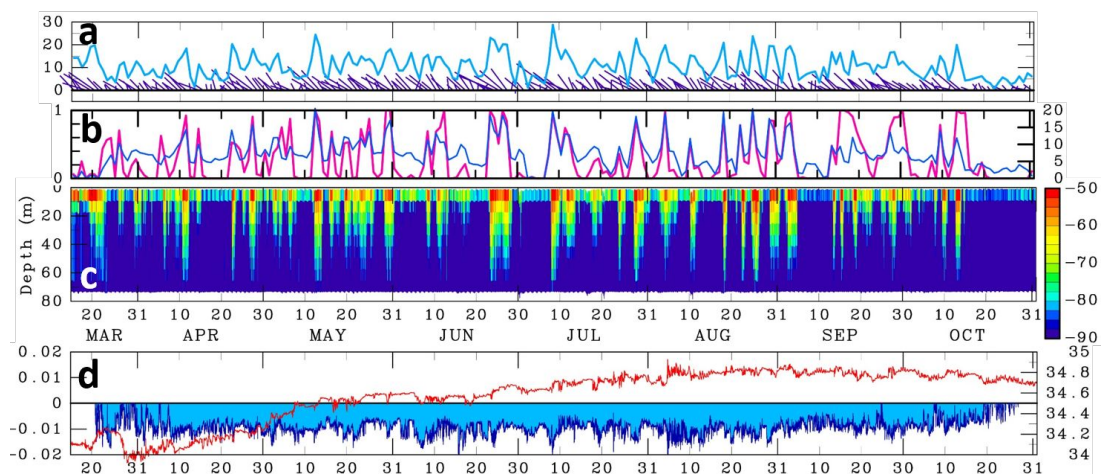


図 2: 南極ケーブダンレーポリニヤでの冬季(3-10月)における、係留系・衛星・大気データによる海水・海洋場の時系列。(a) 風速(青:m/s)と風速ベクトル(紫), (b) 衛星マイクロ波放射計データによるフラジリアイス出現率(ピンク, スケール左)と海水生産量(紺, スケール右: cm/日), (c) ADCP の散乱強度, 暖色系ほど強度が大きく、フラジリアイスの出現を示す (d) 係留系による水深 128m での塩分(赤, スケール右)とポテンシャル過冷却度(青シェード, スケール左: °K)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計35件（うち査読付論文 27件 / うち国際共著 16件 / うちオープンアクセス 13件）

1. 著者名 Ito M., Fukamachi Y., Ohshima K. I., Shirasawa K.	4. 巻 196
2. 論文標題 Observational evidence of supercooling and frazil ice formation throughout the water column in a coastal polynya in the Sea of Okhotsk	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Continental Shelf Research	6. 最初と最後の頁 104072 ~ 104072
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.csr.2020.104072	査読の有無 有
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 Kashiwase H., Ohshima K. I., Fukamachi Y., Nihashi S., Tamura T.	4. 巻 36
2. 論文標題 Evaluation of AMSR-E Thin Ice Thickness Algorithm from a Mooring-Based Observation: How Can the Satellite Observe a Sea Ice Field with Nonuniform Thickness Distribution?	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Atmospheric and Oceanic Technology	6. 最初と最後の頁 1623 ~ 1641
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1175/JTECH-D-18-0218.1	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 Ito M., Ohshima K. I., Fukamachi Y., Hirano D., Mahoney A. R., Jones J., Takatsuka T. Eicken H.	4. 巻 124
2. 論文標題 Favorable Conditions for Suspension Freezing in an Arctic Coastal Polynya	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research	6. 最初と最後の頁 8701 ~ 8719
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2019JC015536	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 該当する
1. 著者名 Nakata K., Ohshima K. I., Nihashi S.	4. 巻 57
2. 論文標題 Estimation of Thin-Ice Thickness and Discrimination of Ice Type From AMSR-E Passive Microwave Data	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 263 ~ 276
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TGRS.2018.2853590	査読の有無 有
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 Preusser A., Ohshima K. I., Iwamoto K., Willmes S., Heinemann G.	4. 巻 124
2. 論文標題 Retrieval of Wintertime Sea Ice Production in Arctic Polynyas Using Thermal Infrared and Passive Microwave Remote Sensing Data	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research	6. 最初と最後の頁 5503 ~ 5528
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2019JC014976	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 該当する

1. 著者名 Mensah V., Ohshima K. I., Nakanowatari T., Riser S.	4. 巻 144
2. 論文標題 Seasonal changes of water mass, circulation and dynamic response in the Kuril Basin of the Sea of Okhotsk	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Deep-Sea Research Part I	6. 最初と最後の頁 115 ~ 131
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.dsr.2019.01.012	査読の有無 有
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 該当する

1. 著者名 Fraser A. D., Ohshima K. I., Nihashi S., Massom R. A., Tamura T., Nakata K., Williams G. D., Carpentier S., Willmes S.	4. 巻 233
2. 論文標題 Landfast ice controls on sea-ice production in the Cape Darnley Polynya: A case study	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Remote Sensing of Environment	6. 最初と最後の頁 111315 ~ 111315
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.rse.2019.111315	査読の有無 有
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 該当する

1. 著者名 Kanna N., Sibano Y., Toyota T., Nishioka J.	4. 巻 206
2. 論文標題 Winter iron supply processes fueling spring phytoplankton growth in a sub-polar marginal sea, the Sea of Okhotsk: Importance of sea ice and the East Sakhalin Current	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Marine Chemistry	6. 最初と最後の頁 109 ~ 120
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.marchem.2018.08.006	査読の有無 有
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 Evans L. K., Nishioka J.	4. 巻 17
2. 論文標題 Quantitative analysis of Fe, Mn and Cd from sea ice and seawater in the Chukchi Sea, Arctic Ocean	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Polar Science	6. 最初と最後の頁 50 ~ 58
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.polar.2018.07.002	査読の有無 有
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 Hirano D., Fukamachi Y., Ohshima K. I., Watanabe E., Mahoney A. R., Eicken H., Itoh M., Simizu D., Iwamoto K., Jones J., Takatsuka T., Kikuchi T., Tamura T.	4. 巻 123
2. 論文標題 Winter water formation in coastal polynyas of the eastern Chukchi Shelf: Pacific and Atlantic influences	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research	6. 最初と最後の頁 5688 ~ 5705
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2017JC013307	査読の有無 有
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 該当する

1. 著者名 Silvano A., Rintoul S. R., Pena-Molino B., Hobbs W. R., van Wijk E., Aoki S., Tamura T., Williams G. D.	4. 巻 4
2. 論文標題 Freshening by glacial meltwater enhances melting of ice shelves and reduces formation of Antarctic Bottom Water	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 9467
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/sciadv.aap9467	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 該当する

1. 著者名 大島慶一郎	4. 巻 27
2. 論文標題 2015年度日本海洋学会賞受賞記念論文「海水域の変動とその海洋循環に与える影響に関する研究」	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 海の研究	6. 最初と最後の頁 75 ~ 96
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5928/kaiyou.27.2_75	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 Nakanowatari T., Ohshima K. I., Mensah V., Mitani Y., Hattori K., Kobayashi M., Roquet F., Sakurai Y., Mitsudera H., Wakatsuchi M.	4. 巻 13
2. 論文標題 Hydrographic observations by instrumented marine mammals in the Sea of Okhotsk	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Polar Science	6. 最初と最後の頁 56 ~ 65
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.polar.2017.06.001	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 該当する

1. 著者名 Nihashi S., Ohshima K. I., Saitoh S.	4. 巻 127
2. 論文標題 Sea-ice production in the northern Japan Sea	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Deep-Sea Research I	6. 最初と最後の頁 65 ~ 76
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.dsr.2017.08.003	査読の有無 有
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 Nihashi S., Ohshima K. I., Tamura T.	4. 巻 10
2. 論文標題 Sea-Ice Production in Antarctic Coastal Polynyas Estimated From AMSR2 Data and Its Validation Using AMSR-E and SSM/I-SSMIS Data	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 3912 ~ 3922
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/JSTARS.2017.2731995	査読の有無 有
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 Fukamachi Y., Simizu D., Ohshima K. I., Eicken H., Mahoney A. R., Iwamoto K., Moriya E., Nihashi S.	4. 巻 63
2. 論文標題 Sea-ice thickness in the coastal northeastern Chukchi Sea from moored ice-profiling sonar	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Glaciology	6. 最初と最後の頁 888 ~ 898
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jog.2017.56	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 該当する

〔学会発表〕 計89件（うち招待講演 9件 / うち国際学会 51件）

1. 発表者名 大島慶一郎
2. 発表標題 海氷の気候変動における役割：北極海 vs. 南極海
3. 学会等名 日本気象学会2017年度秋季大会（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Ohshima K. I.
2. 発表標題 Effects of High Albedo and Brine Rejection of Sea Ice on the Arctic Ocean and its Recent Change
3. 学会等名 Keynote speech on Fifth International Symposium on Arctic Research (ISAR-5)（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ohshima K. I., Ito M., Nihashi S., Fukamachi Y., Nakata K., Simizu D.
2. 発表標題 High ice production in antarctic coastal polynyas and its possible linkage to material cycle and biological productivity
3. 学会等名 The 2018 Ocean Sciences Meeting（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 勝又勝郎, 大島慶一郎, 青木茂, 川合美千代 他	4. 発行年 2018年
2. 出版社 北海道大学低温科学研究所	5. 総ページ数 288
3. 書名 巨大リザーバ：南大洋・南極氷床, 低温科学76巻	

〔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
研究分担者	深町 康 (FUKAMACHI Yasushi) (20250508)	北海道大学・北極域研究センター・教授 (10101)	
研究分担者	平野 大輔 (HIRANO Daisuke) (30790977)	北海道大学・低温科学研究所・助教 (10101)	
研究分担者	二橋 創平 (NIHASHI Sohey) (50396321)	苫小牧工業高等専門学校・創造工学科・教授 (50102)	
研究分担者	青木 茂 (AOKI Shigeru) (80281583)	北海道大学・低温科学研究所・准教授 (10101)	
研究分担者	西岡 純 (NISHIOKA Jun) (90371533)	北海道大学・低温科学研究所・准教授 (10101)	
研究協力者	メンサ ビガン (MENSAH Vigan)		
研究協力者	ブルーサー アンドレアス (PREUSSER Andreas)		
研究協力者	アレクサンダー フレーザー (ALEXANDER Fraser)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	伊藤 優人 (ITO Masato)		
研究協力者	中田 和輝 (NAKATA Kazuki)		
研究協力者	柏瀬 陽彦 (KASHIWASE Haruhiko)		
研究協力者	漢那 直也 (KANNA Naoya)		
研究協力者	中野渡 拓也 (NAKANOWATARI Takuya)		
連携研究者	渡辺 豊 (WATANABE Yutaka) (90333640)	北海道大学・地球環境科学研究院・准教授 (10101)	
連携研究者	平譚 亨 (HIRAWAKE Toru) (70311165)	北海道大学・水産科学研究院・准教授 (10101)	
連携研究者	田村 岳史 (TAMURA Takeshi) (40451413)	国立極地研究所・研究教育系・助教 (62611)	

6. 研究組織(つづき)

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	豊田 威信 (TOYOTA Takenobu) (80312411)	北海道大学・低温科学研究所・助教 (10101)	
連携研究者	高橋 晃周 (TAKAHASHI Akinori) (40413918)	国立極地研究所・研究教育系・准教授 (62611)	
連携研究者	真壁 竜介 (MAKABE Ryusuke) (40469599)	国立極地研究所・研究教育系・助教 (62611)	