

(別紙様式10)

2020年度 北極域研究共同推進拠点 共同研究等報告書

【申請区分】: 共同推進研究

【研究課題名】: 渦相関法による北極海氷上での CO₂フラックス測定のための機器設計 Part 2

【研究期間】:2020 年度～2021 年度

【共同研究員】

共同研究員	氏名	所属・職名	専門分野	区分
研究代表者 (拠点内) (注 2)	野村大樹	北海道大学北方生物圏フ ィールド科学センター	生物地球化学	
研究分担者 (拠点外) (注 2)	伊川浩樹	農研機構農業環境変動研 究センター・主任研究員	気象学	A
研究協力者 (注 2) (注 3)	近藤文義	海上保安大学校・准教授	気象学	
	小野圭介	農研機構農業環境変動研 究センター・上級研究員	気象学	
	Brent Else	カルガリー大学・准教授	生物地球化学	
	能城太一	北海道大学水産学部・学 部 3 年生	生物地球化学	

(注 2) 拠点内外については、募集要項別添の北極域研究共同推進拠点を形成する3研究施設の研究者リストをご覧ください。

(注 3) 計画申請書に含まれていなかった方でも結果的に本共同研究に参画された方(招へい者等)が居られれば、研究協力者として記述して下さい。

【研究の内容】

(1) 概要を 400 字以内(文字のみ)で記載してください。

大気との CO₂フラックスの計測手法の一つである渦相関(EC)法は、長期的・広域データの取得に優れており、これまで森林などの陸域で広く使われている手法である。しかしながら、海氷域においては、CO₂フラックスが陸域に対して微量であることより、正確な計測が困難となっている。そこで、EC法による氷上での CO₂フラックス測定のための機器設計を 2019 年度より実施してきた。2019 年度は微量の CO₂フラックスを計測する上で障害となるサンプル空気に含まれる水分を取り除くこと(除湿)を検討した。そこで次のステップとして 2020 年度は、除湿システムを限られた電源環境での観測を可能にするためのシステム一式を組み上げた。そして、2021 年 2 月末から 3 月初めにサロマ湖氷上でのテスト観測を実施した。将来的に本システムは 2022 年 5 月の北極氷上(カナダ・ケンブリッジベイ)で使用する予定である。

(2) 図表や写真も交えて、研究の内容や成果等を 2000 字程度でまとめてください。
(期末評価のための報告書には記載の必要はありません。本来の報告書には記載ください。)

高緯度海域に分布する海氷は、地球規模の気候変動を制御する要因として大きな役割を担っている。従来、海氷は、物質循環の観点において大気と海洋間の障壁として認識されてきた。しかし、実際、海氷表面では、結氷による濃縮効果によって CO₂ が高濃度化し、大気に対して CO₂ の放出源になること、また一方で、海氷内部に生息する藻類の高い生産性によって、大気からの CO₂ の吸収源になることが明らかになりつつある (Delille et al., 2014, *J. Geophys. Res. Oceans*; Nomura et al., 2018, *Biogeosci.*)。特に北極海は、近年の多年氷から一年氷へのシフトによって、海氷に含まれるブライン量は増加し、大気との気体透過性が大きくなることから、今後、海氷—大気間での気体交換過程はより重要になると考えられる。

大気との CO₂ フラックスの計測手法の一つである EC 法は、長期的・広域データの取得に優れており、これまで森林などの陸域で広く使われている手法である。しかしながら、海氷域においては、CO₂ フラックスが陸域に対して微量であることより、正確な計測が困難となっている (Butterworth and Else, 2018, *Atmos. Meas. Tech.*)。微量の CO₂ フラックスを計測する上で障害となるのがサンプル空気に含まれる水蒸気による水蒸気干渉である。この影響を避けるためには、サンプル空気に含まれる水分を取り除く(除湿する)必要がある。前述の通り、2019 年度本共同推進研究においては除湿システムの確立を試みた。そこで次の段階として極域の海氷上のような電源を確保することが難しい状況において電源容量を維持が可能となるシステムを構築する。低温環境下においては、バッテリー能力の低下が激しく、長時間利用することが困難である。そこで、本研究では、従来の EC 法のシステムに、新たに設計した除湿管を組み込み、サンプル流量の調整、ポンプの選定、長期的な電源確保のための発電機と給油システムの開発を行うことを目的とした。そして、実際の海氷域(サロマ湖)において試験運転を実施した。

【サンプル流量と除湿方法の検討】

2020 年 2 月に農研機構農業環境変動研究センター気象観測サイトで実施した様々な除湿システム、サンプル空気流量における除湿効率とその安定性・持続性、除湿によるシグナルの減衰の有無を再評価した。除湿剤であるドライアライトを除湿管に充填した実験では、除湿は十分になされ(水蒸気密度がゼロに近い)、除湿効率は高いが、測定開始後約 4 時間で水蒸気密度は増加し、除湿がなされていない状況となった。一方、除湿剤である過塩素酸マグネシウムを除湿管に充填した除湿実験では、約 19 時間高い除湿効率が持続された。また、パーマピュアドライヤーを使用した除湿実験では、サンプル空気流量によって除湿効率は変化した。例えば、サンプル空気流量が 13 L min⁻¹時は、除湿なし時の水蒸気密度と差はなく、除湿がなされていない。一方、バルブを調整し流量を 13 L min⁻¹から 9 L min⁻¹および 5 L min⁻¹に下げた際は、水蒸気密度は減少した。これはバルブを調整する(閉める)ことによりバルブよりも下流側が更に減圧状態となりパーマピュアドライヤー内での圧力勾配により効率良く水蒸気が除去されたためと考えられる。また、サンプル空気流量が 9 L min⁻¹において比較的高い除湿効率とその安定性・持続性が確認された。以上をまとめると、除湿剤は過塩素酸マグネシウムが除湿効率および持続性で優れていた。また、パーマピュアドライヤーは、比較的良好な除湿効率を保ち、優れた安定性が維持されることがわかった。実際の海氷域では観測サイトまでの往来が天候などに左右されるためドライアライトや過塩素酸マグネシウムなどの除湿剤は、毎日の交換などが困難と考えられる。一方、パーマピュアドライヤーは、膜を通して圧力勾配により除湿する

ためメンテナンスフリーであるため、比較的高い除湿効率とその安定性・持続性が確認されたサンプル空気流量 9 L min^{-1} を最適なサンプル流量とし、パーマピュアドライヤーを除湿システムとして採用することにした。

【ポンプおよび電源の検討】

パーマピュアドライヤー内のサンプル空気流量が 9 L min^{-1} を維持するためのポンプや電源供給システムの検討を行った。本システムにおいて主な電力消費は、パーマピュアドライヤーや二酸化炭素分析装置にサンプル空気を送り込むために使用するポンプの性能に依存する。パーマピュアドライヤーによって除湿する際、管内での圧力勾配を維持するためには、圧力性能に優れたポンプが必要となる。そこで、ダイアフラム型ドライ真空ポンプ (DAU-20, ULVAC 社製) を採用した。ただ、本ポンプは圧力性能については優れているが、比較的電力を消費する (80 W) という欠点がある。そのため、低温環境において性能が落ちるバッテリーの利用は不向きであるため、本システムにおいては発電機 (EU18i, 本田技研工業製) を採用することにした。また、バッテリーは航空機での輸送などが困難であるという欠点があるが、ガソリンを使用する発電機は、海氷域などの遠隔地においても入手が容易 (スノーモービルなど日常生活で使用するので) であるという利点がある。ただし、発電機本体の燃料タンク容量は 3.6 L (時間にすると 3 から 8 時間ほど) と少なく、観測サイトまでの頻繁な往来が難しい場合、観測を維持することが不可能となる。そのため、30 L ガソリン携行缶と発電機を接続し、圧力差による吸引の原理を利用した給油システムを組み上げた。

【サロマ湖でのテスト観測】

2021 年 2 月から 3 月に北海道オホーツク海沿岸サロマ湖においてこれまで設計などを検討してきた EC 法システムのテスト観測を実施した。サロマ湖東岸のサイト (東沿岸から約 2 km、水深約 12 m) ($44^{\circ}07'08''\text{N}$, $143^{\circ}56'56''\text{E}$) (図 1) で実施した。

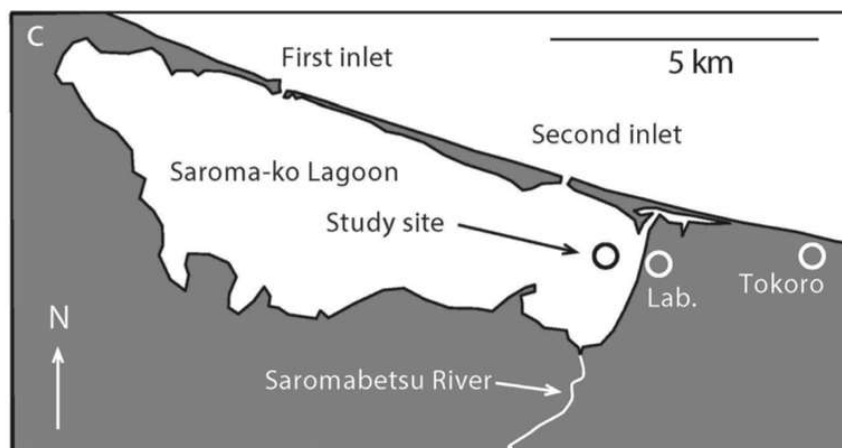


図 1. サロマ湖の地図。サロマ湖内の丸印は予定の観測サイト (St. Main)。

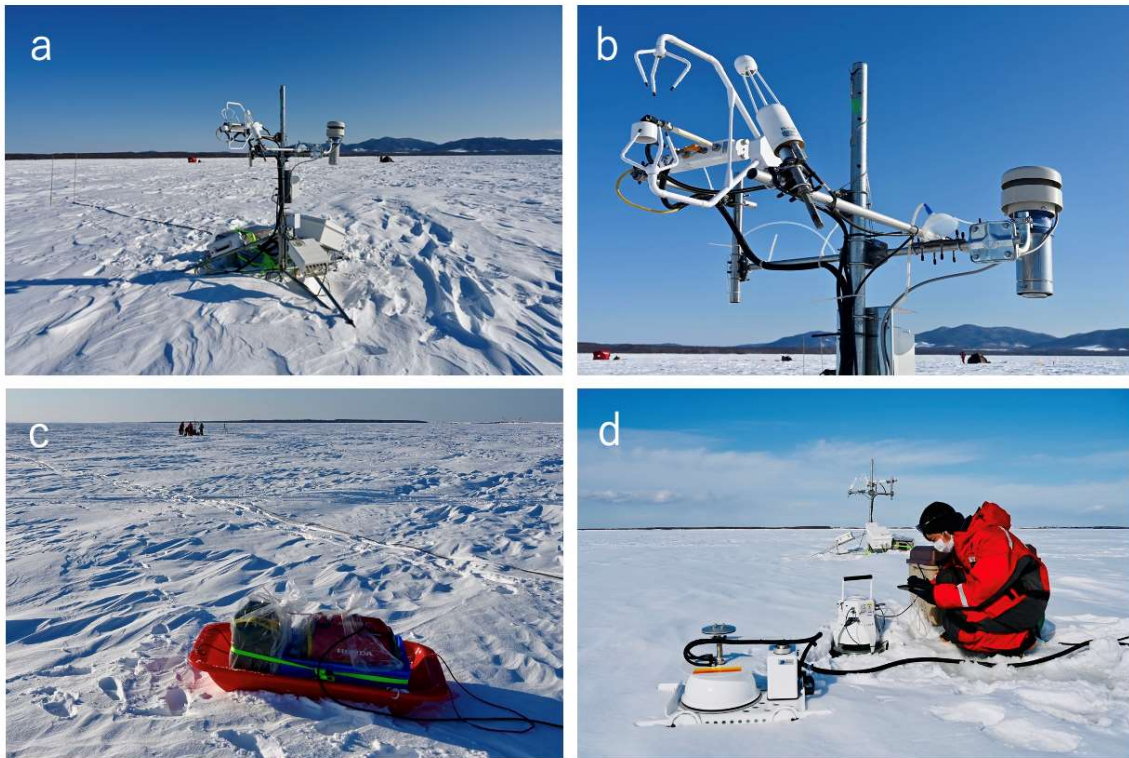


図2. (a)サロマ湖氷上に設置したEC法システムおよび(b)上部各種センサー部分の拡大写真。(c) EC法システムに電源供給するための発電機および燃料タンク一式。EC法システムから約150 m風下に位置しており各々はコードリールで繋げた。(d)チャンバー法とEC法の比較実験の様子。EC法システムの10 m風下にLi-COR社製のチャンバーシステム2台を設置した(全ての写真は2021年2月から3月に野村が撮影した)

EC法システムをサロマ湖氷上(氷厚約50 cm、海氷上積雪約10 cm)に設置した(図2a)。本サイトでは、EC法観測以外に海氷採取や海洋観測なども実施し、海氷や海氷中の二酸化炭素濃度を測定し、海氷および海洋—大気間でのCO₂フラックスの決定要因を今後明らかにする予定である。また、海氷採取や海洋観測は、人の影響や海氷表面の攪乱がEC法測定に影響を与えないよう風向きなどを考慮しサイトを設定した(図3)。観測期間(2月27日から3月9日)の前半には、パーマピュアドライヤーの脱着を繰り返し除湿効率とその安定性・持続性、除湿によるシグナルの減衰の有無を評価するためのデータを取得した。また、後半は、本EC法システムの耐久性の確認のために、観測を一週間以上維持した。観測終了後間も無いためデータ整理ができていないため図などで示す段階に至っていないが、観測期間中、観測機器の故障などはなく、正常なデータを取得することができた。観測期間中、10 m s⁻¹を越える風速や、マイナス20度近い気温など厳しい状況下においてもデータを取得することができた。ただし、強風時には海氷上の積雪がドリフトし、海氷上の設置物付近に吹き溜まるため発電機が雪で埋まり一時的に発電機が停止することがあった。対処法としてその上に発電機や燃料タンクを乗せてドリフトした雪がその端の反りで上に舞い上がらないようにするなどの

工夫をしたところ(図 2c)、雪で埋まることは無くなった。また、今回試みた給油システムは 30 L のガソリンで約 2 日間連続運転が可能であることを確認した。さらに、ガソリン携行缶を交換することによって 1 週間以上の連続運転が可能であることも確認できた。風向きによっては、発電機の排気が EC システムの設置された位置に流れ込み、空気サンプルが汚染されるため計測ができない場合があるが、その上に発電機やガソリン携行缶をおくことによってそりごと楽に移動が可能となるため風向きによる汚染を避けることが可能となった。

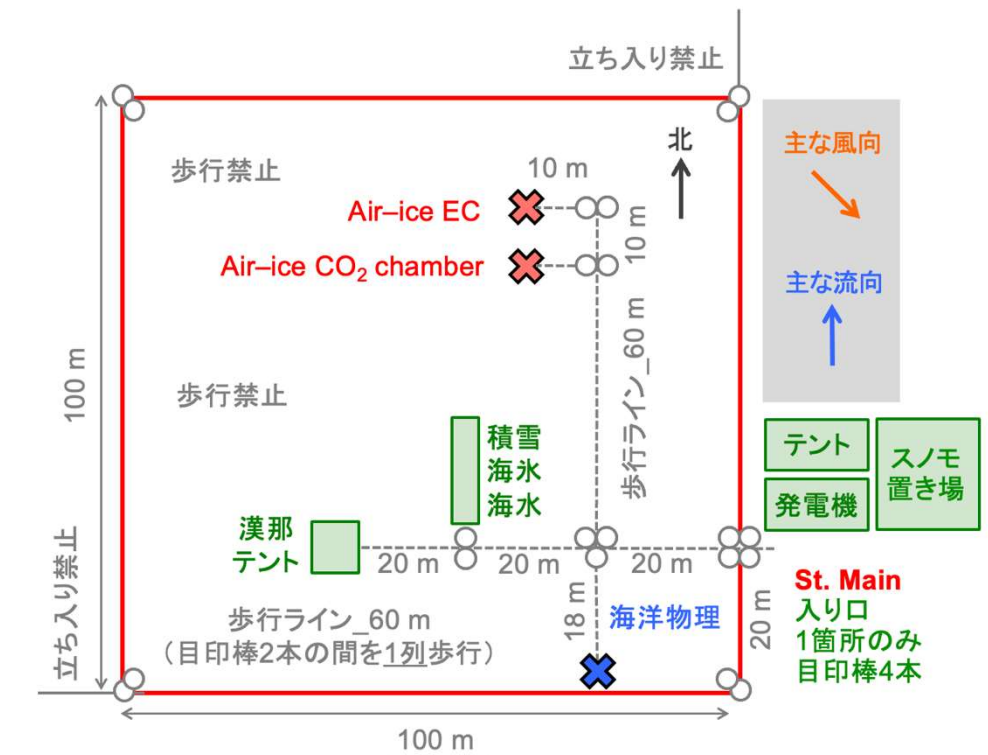


図 3. 観測サイトでの観測機器およびサンプル採取場所の配置図(配置は通路(点線)に対して風上(大気、雪、海氷観測)、上流(海洋観測)を考慮し配置した。

【まとめ】

本観測において 2019 年より設計してきた EC 法システムを海氷現場に持ち込み厳しい条件下(風速 10 m 以上、気温マイナス 20 度ほど)においても運転が可能であることを確認した。また、サンプル空気の除湿の有無が算出される CO₂ フラックス値に与える影響の評価するためのデータを取得することができた。現在、今回取得したデータの解析を進めている。2022 年 5 月にカナダのケンブリッジベイで実施する予定の海氷—大気間の CO₂ フラックスに関する相互比較実験において、本研究で組み上げた EC 法のシステムを持ち込む予定である。そして、研究協力者の Else が所有するタワーシステム(本研究で使用した EC 法システムよりも大型のもの)(多数の電動ポンプを使用した乾燥空気循環による除湿法)や研究代表者が所有する CO₂ フラックスチャンバーによって得られた結果と比較する。これらの比較実験は、手法による海氷—大気間の CO₂ フラックスの差異の評価、最適な手法、仕様の選定に繋がり、結果として大気—海氷—海洋間での炭素循環予測の高精度化に貢献する。

(3) 本共同研究に関する活動・実績等を下表に記入してください。

①研究打合せ、学会参加・集会(注4)、調査等

(注4) 研究代表者、共同研究分担者、研究協力者、招へい者によるもの

日程(月日)	日数 (日)	活動内容	場所	研究代表者、共同研究分担者、研究協力者、招へい者の参加者名・部署	参加者数 (人)
記入例 2020.11.25	2	研究打合せ	東京	北大太郎、北方次郎、北野三郎	3
2020.08.24	1	学会参加 (BEPSII/ECV-Ice)	Online	Brent Else	1
2020.11.30	1	研究打合せ	Online	野村大樹、伊川浩樹	2
2021.1.13	1	研究打合せ	Online	野村大樹、伊川浩樹	2
2021.02.22	1	観測打合せ	Online	野村大樹、伊川浩樹、近藤文義、小野圭介	4
2021.02.26	14	調査	サロマ湖	野村大樹、伊川浩樹、近藤文義、能城太一	4
2021.03.02	1	観測結果報告会	Online	野村大樹、伊川浩樹、近藤文義、小野圭介、能城太一	5

②研究論文

研究代表者並びに、研究分担者あるいは研究協力者が著者の関連論文がありましたら可能な限り記載ください。

論文が複数ある場合は、そのフォーマットとして論文1の分をコピーして記載してください。

項目	記入要項	回答
(1)著者名(共著者名含む)、発行年、論文タイトル、掲載誌名、巻・号、ページ数、DOI、出版年月日	Fransson A, Chierici M, Nomura D, Granskog M.A, Kristiansen S, Martma T, Nehrke G. Influence of glacial water and carbonate minerals on wintertime sea-ice biogeochemistry and CO2 system in an Arctic fjord in Svalbard. <i>Annals of Glaciology</i> , 1-21. https://doi.org/10.1017/aog.2020.52 , 2020.8.13.	
(1)著者名(共著者名含む)、発行年、論文タイトル、掲載誌名、巻・号、ページ数、DOI、出版年月日	Kanna N, Sugiyama S, Fukamachi Y, Nomura D, Nishioka J. Iron supplied by subglacial discharge into a fjord near the front of a marine-terminating glacier in northwestern Greenland. <i>Global Biogeochemical Cycles</i> , 34, e2020GB006567. https://doi.org/10.1029/2020GB006567 , 2020.9.13.	
(1)著者名(共著者名含む)、発行年、論文タイトル、掲載	Miller L, Fripiat F, Moreau S, Nomura D, Stefels J, Steiner N, Tedesco L, Vancoppenolle M. Implications of sea ice management for Arctic	

誌名、巻・号、ページ数、DOI、出版年月日	biogeochemistry, Eos, 101, https://doi.org/10.1029/2020EO149927 , 2020.9.30.
(1)著者名(共著者名含む)、発行年、論文タイトル、掲載誌名、巻・号、ページ数、DOI、出版年月日	Lannuzel D, Tedesco L, van Leeuwe M, Campbell K, Flores H, Delille B, Miller L, Stefels J, Assmy P, Bowman J, Brown K, Castellani G, Chierici M, Crabeck O, Damm E, Else B, Fransson A, Fripiat F, Geilfus N.-X, Jones E, Kaartokallio H, Kotovitch M, Meiners K, Moreau S, Nomura D, Peeken I, Rintala J.-M, Steiner N, Tison J.-L, Vancoppenolle M, Van der Linden F, Vichi M, and Wongpan P. The future of Arctic sea-ice biogeochemistry and ice-associated ecosystems. Nature Climate Change, https://doi.org/10.1038/s41558-020-00940-4 , 2020.10.27.
(1)著者名(共著者名含む)、発行年、論文タイトル、掲載誌名、巻・号、ページ数、DOI、出版年月日	Sugiyama S, Kanna N, Sakakibara D, Ando T, Asaji I, Kondo K, Wang Y, Fujishi Y, Fukumoto S, Podolskiy E, Fukamachi Y, Takahashi M, Matoba S, Iizuka Y, Greve R, Furuya M, Tateyama K, Watanabe T, Yamasaki S, Yamaguchi A, Nishizawa B, Matsuno K, Nomura D, Sakuragi Y, Matsumura Y, Ohashi Y, Aoki T, Niwano M, Hayashi N, Minowa M, Jouvét G, van Dongen E, Bauder A, Funk M, Bjørk A. A, Oshima T. Rapidly changing glaciers, ocean and coastal environments, and their impact on human society in the Qaanaaq region, northwestern Greenland. Polar Science, https://doi.org/10.1016/j.polar.2020.100632 , 2020.12.28.

③研究書等著書

著書名・著者名	出版年月	出版社名
該当なし		

④特許等出願

特許、実用新案、商標	
該当なし	

⑤研究発表(資料添付も可)

発表年月日	発表者名(共著者を含む)	発表タイトル	発表学会等名称	発表地	招待講演(○)
2020.08.24	野村大樹(北海道大学北方生物圏フィールド科学センター)、伊川浩樹(農研機構)	Eddy covariance (EC) drying air comparison for	Online Joint BEPSII/ECV-Ice general meeting	Online	

	農業環境変動研究センター、近藤文義(海上保安大学校)、小野圭介(農研機構農業環境変動研究センター)、○Brent Else (カルガリー大学)(発表者)	air-sea ice CO2 flux measurement in Tsukuba, Japan			

⑥国際シンポジウム等(資料添付も可)

参加をした主な国際シンポジウム等		
開催時期(年月)	国際シンポジウム等名称	招待講演/議長の有無
2020.08.24	Online Joint BEPSII/ECV-Ice general meeting	無
2020.12.03	11th Symposium on Polar Science	無

⑦本共同研究に関し実施(主催、共催、後援等)したシンポジウム・集会(注6)等(資料添付も可)

(注6) 研究代表者、共同研究分担者、研究協力者、招へい者以外を含む参加募集によるもの

開催日	実施地 (国、県、市など)	形態 (注7)	シンポジウム・集会等名称	目的及び概要	対象者 (注7)	参加人数 (海外(注8))
該当なし						

(注7)

形態:シンポジウム、セミナー、公開講座、ワークショップ、その他

対象:一般、地域、学生、研究者

(注8) 海外機関に所属するもの

⑧本拠点共同研究に係る成果が科学研究費などの外部資金の応募(予定を含む)やプロジェクトに発展した例があればご記入ください。

・プロジェクト名 ・代表者・関係者(所属) ・関係研究者 ・予定の場合は、(予定)と記載してください	・プロジェクトの主な財源 ・金額	プロジェクト期間	・プロジェクト概要 (目的・期待効果、規模、参加国等) ・これまでの本共同研究との関連性 (300字程度)
該当なし			

⑨研究成果が一般社会産業界などに還元(応用)された事例や新しい研究分野の開拓や教育活動に反映された事例(資料添付も可)

該当なし

⑩その他国際研究協力活動事例

事業名	概要	受入人数	派遣人数
MOSAiC	北極海長期漂流観測	2(国内)	1

⑪学会賞等受賞、アウトリーチ、取材、その他

年月日	所在・出典・新聞名等	受賞者・関係者(所属)	研究課題名・賞名・内容等
該当なし			

記事コピー等を添付してください。

⑫コロナ禍の影響と対策

本共同研究へのコロナ禍の影響と対策(改善・代替策、計画変更、工夫等)、助成金執行率(%)について記述してください。

影響の事象	対策の有無と内容 (計画変更・中止、改善・代替策、工夫等)
該当なし	