

令和 2 年 6 月 17 日現在

機関番号：62611

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K07579

研究課題名(和文) 個別沈降粒子のDNA解析による海水下生態系と物質循環のドライバー解明

研究課題名(英文) Identification of drivers for vertical fluxes by using DNA techniques in seasonal ice zone

研究代表者

真壁 竜介 (Makabe, Ryosuke)

国立極地研究所・研究教育系・助教

研究者番号：40469599

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は南極海生態系のブラックボックスである海水融解期の生態系動態と物質循環機構把握というゴールに向かって、観測・分析手法を確立すること、および確立した手法を用いて物質循環のキープロセスを抽出することであった。漂流系の消失によって計画に大幅な変更は生じたものの、沈降粒子の固定液として中性ルゴール液の有用性を確認できたことで、南極海を含む多くの海域で取り込まれる炭素循環研究の新たな可能性を示すことができた。また、観測結果からこれまでに沿岸域でしか報告のなかった動物プランクトン糞粒様渦鞭毛虫が炭素隔離、または垂表層・中層生態系において重要である可能性が示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

南大洋は炭素の吸収海域として考えられているが、広大なエリアを占める季節海水域の炭素収支の見積もりは不確実性が高い。この一因として海水の存在や文明圏からのアクセスの困難さのために、生物ポンプを駆動するプロセスが理解されていないことが挙げられる。本研究では手法確立、新たな炭素循環プロセスの発見に加えて、最終年度に海水融解期の漂流系観測手法をほぼ確立できた。今後の研究によって本手法が国際的に広く利用されることで、季節海水域物質循環の理解は飛躍的に進む。結果として、IPCC等で予測される将来の気候変動の精度向上を通して人類・社会の今後に大きく貢献することが期待される。

研究成果の概要(英文)：For understanding the mechanisms of ecosystem dynamics and material cycling in the seasonal ice zone, this study is aimed to establish observational and analytical methods, and then, to reveal the key processes of the material cycling by using the methods. Although the trouble during drifter experiment changed our plan, we found that neutral Lugol' solution is an useful preservative for fixing sediment trap samples, which can be applied for similar studies in world ocean. We also found that fecal pellet like dinoflagellates were dominant (up to 30% of sinking carbon flux) in the export fluxes after sea ice melting season. This means a finding of new carbon pathway, which can contribute carbon sequestration or mesopelagic food web, in the seasonal ice zone in the Southern Ocean.

研究分野：生物海洋学

キーワード：南大洋 季節海水域 表層生態系 沈降粒子 動物プランクトン糞粒

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

南極海の最大の特徴は海氷の存在である。冬季の最大海氷分布面積は約 2,000 万 km² に達するが、夏季にはそのほとんどが融解するため、海氷分布面積は約 200~400 万 km² にまで減少する。夏季の海氷縁辺域(Marginal Ice Zone)では、海氷融解により海洋表層の塩分が低下し、成層構造が発達するため、植物プランクトンの大増殖、すなわち氷縁ブルームが起こる(Sullivan et al, 1988)。ここで生成される一次生産有機物が食物連鎖の出発点となり、南極海の豊富な生物資源を支えていると考えられている。一方で融解期の海氷下は、南極海における主要動物プランクトン分類群および魚類が初期生活史をおくる場と予想されており、それらと植物プランクトン群集の初期遷移や海氷の融解とともに放出される様々な物質(生物を含む)との相互作用は氷縁ブルームの構造を決定する不可欠な情報となる。このような重要性から、氷縁ブルームに関する生態学的な研究が精力的になされてきたが、そのほとんどは海氷が融解しブルームが生じている場所での観測であり、その構造を決定する初期段階、すなわち海氷下生態系的事象に関する理解は進んでいない。例えば氷縁ブルームを起こす植物プランクトンはハプト藻の一種と多数の珪藻類が知られているが、どのような過程を経た場合にどの種ブルームを引き起こすのかは明白でない。このような海氷下で生じる融解期の生態系動態や放出された海水中生物群集の行方を明らかにするためには、海氷融解期の海氷縁辺域における観測が必要となるが、こうした研究例は極めて少ない(Garison, 1991)。海氷縁辺域の Sea Ice Biota に関する研究を確実に進めるためには、砕氷・耐氷構造を持つ船舶による観測が必要となるが、そうした船舶を利用するには多大な経費が必要である。この原因として海氷融解期は海氷上で観測が可能な定着氷域や船舶での観測が容易な開放水面域に比べて観測手法が確立していないことがあげられる。この空白期間(ブラックボックス、図1)の知見を得るため、茂木正人(東京海洋大学・准教授)を代表とする研究グループは、南極観測事業・一般研究観測(以下、茂木らの計画とする)において実施する生態系観測の一環として耐氷性能を有する漂流系を作成し(図2左)、平成28年度の南極航海で初めてのテストを実施予定である。この系にはセディメントトラップが取り付けられ、沈降粒子の時系列観測を実施する。茂木らの計画はこの漂流系と投入・回収時の船上観測を実施して行う従来の漂流系実験手法を海氷域に応用する部分が特色であり、言い換えれば、「これまでに開放水面域で実施されてきた生態系・物質循環の総合研究を(ドライバーの解像度はそのままに)、海氷が存在する環境で実施する」ということになる。

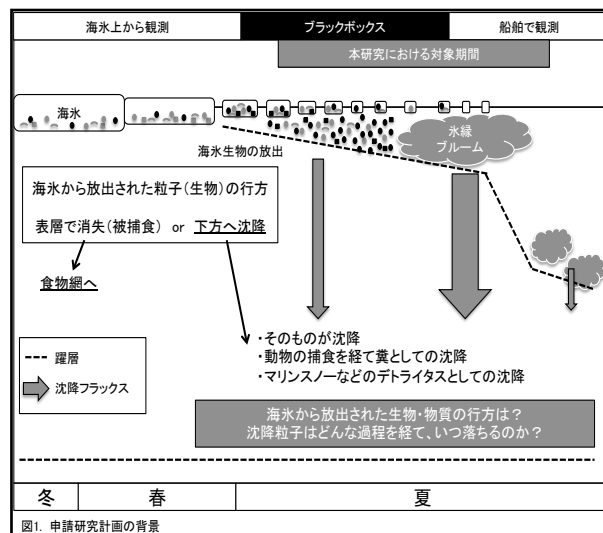


図1. 申請研究計画の背景

沈降粒子として下方へ輸送される粒子は珪藻をはじめとする植物プランクトンを除くとそのほとんどが糞や分解を経た不定形のデトライタス様物質であり、顕微鏡による分析ではその起源を知ることは困難である。このことは生物学的な背景を持って沈降粒子を研究する多くの科学者が抱えてきた課題である。研究代表者は、これまでにセディメントトラップを使用した研究に従事し、特に北極域の海氷下における動物プランクトン動態を明らかにするための方法論を確立してきた(Makabe et al., 2016)。また、この過程で沈降粒子の分析にも携わり、海外の共同研究者らとともに北極海生態系を通して起こる物質循環についての論文を公表しながら、不定形有機物粒子の同定手法確立の必要性を強く感じるに至っている。DNA解析はこのような有機物の中身を同定できる可能性がある手法であるが、計画・方法に記載したように従来のホルマリン固定試料に用いることは基本的に難しく、試料分析のプライオリティーが炭素分析にあることからトラップ試料には導入されてこなかった。また、DNA解析の生態学への応用は主に種の多様性の視点で実施されてきており、物質循環視点の研究者はその導入に消極的である。このような背景の中、研究代表者と研究分担者(黒沢)は南極観測における共同研究の中で生態学およびDNA解析による生物多様性というそれぞれの背景を持って議論を重ね、形態学的に分類・定量した個別の沈降粒子についてDNA解析を導入することで、粒子の実態(起源や中身)を種レベルで把握するという本応募研究の着想に至った。

2. 研究の目的

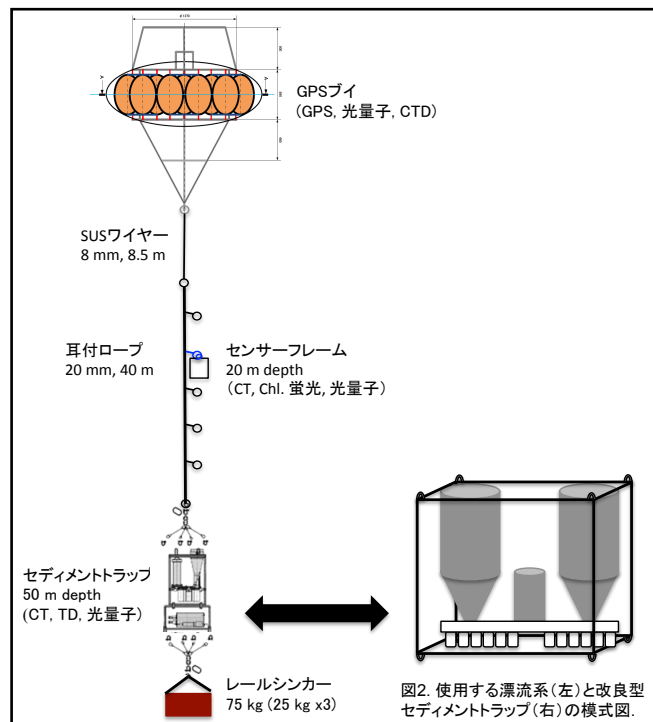
沈降粒子試料中で優占する複数タイプの糞粒や不定形粒子をその形態から分類・ソートし、それらを個別にDNA解析することで、生物ポンプを駆動するドライバーの時間変動とともに海氷から放出された生物群集がどのような過程を経てどこへ行くのか?といった海氷生物群集の行方が種レベルで推定する。特に動物プランクトンおよび魚類の糞粒を顕微鏡観察により形態学的に排糞者を査定した上でDNA解析を実施することは、南極圏における生態系研究において新規の試みである。得られたデータの解析から海氷下で生じた食物網(生物間の関わり)の内、生物ポンプを駆動する部分を明らかにする。

3. 研究の方法

平成 29 年度

時系列セディメントトラップの改良

平成 23 年度に開放水面域で実施された漂流系実験では 2 タイプの時系列セディメントトラップを使用しており、一つは円柱型採集部と 7 つのサンプルカップを有する表層タイプ、もう一つは円錐形の採集部 2 つの下にそれぞれ 13 のサンプルカップを有する深層タイプであった。この結果、表層タイプの 7 x 1 サンプルでは春-夏の生態系変動を十分に捉える時間分解能を有していなかった。また、シングルトラップでは沈降フラックスの定量を目的としたホルマリン固定が優先されるが、ホルマリン固定は DNA の断片化が著しく起こることから、本計画の目的である不定形有機物粒子の起源推定は困難である。一方、円錐形の深層タイプトラップを表層で使用することは沈降粒子の著しい過小評価を招くことが分かった。このことから、本研究で目的とする海氷融解期における生態系動態解明のために使用するセディメントトラップは上記 2 タイプのハイブリッド仕様であることが望まれる。そこで、国立極地研究所保有の深層タイプの採集部を円柱形に改良する(図 2)。改良によって 2 種の固定液を使用し、表層環境で長時間解像度(それぞれ 13 時系列試料)の採集が可能となり本計画に必要な仕様を満たす。



DNA 解析方法の検討

平成 28 年度に実施される漂流系実験において採集される沈降粒子試料の一部を用いて顕微鏡観察を実施し、粒子のタイプ組成を把握する。ただし、この実験で得られる試料はホルマリンで固定されており DNA 解析には適さない。したがって平成 28 年度航海(代表者が乗船)中の海氷縁近傍海域において表層ポンプを用いた懸濁粒子濃縮を行い、これをルゴール液で固定することで DNA 抽出-18S rRNA 遺伝子の PCR 増幅-シーケンスまでの手法を確認・選定するための検討に供する。特に PCR 増幅に関して、真核生物を網羅的に検出するプライマーと原生生物を特異的に検出するプライマーの両方を試用し、次年度以降の本格的実験における DNA 解析プロトコルを確立する。

平成 30 年度

漂流系の仕様と投入・回収

南極観測事業・一般研究観測(代表: 茂木正人, 以下茂木らの計画とする)において平成 28 年度の試験観測に使用する漂流系と本応募研究において改良するセディメントトラップの完成イメージを図に示した(図 2)。GPS ブイ、センサーフレームおよび時系列セディメントトラップといった構成となっており、GPS ブイのフレームには氷の衝撃を逃がす構造でフロートが取り付けられている。茂木らの計画では平成 28 年度の試験観測の後、29 年度に問題点の修正を経て 30 年度に本観測を実施することになっている。

漂流系の投入は 12 月上旬に「しらせ」で、回収は約 1 ヶ月後に「海鷹丸」で行う。投入点は 12 月上旬に海氷密接度が 50% 以上であること、かつ 1 月中旬に完全に開放水面となっていることが条件であり、これらを考慮して「しらせ」航路近傍の東経 110 度、南緯 63.5 度に投入する。方が一、漂流系が「海鷹丸」で回収できない氷海域に流れた場合には「しらせ」の帰路において回収する。回収は GPS の情報をイリジウム経由で送信し、これを船舶で受信することで位置を把握して行う。

本応募研究の観測は平成 30 年度に投入する茂木らの漂流系に作製した表層型時系列ツインセディメントトラップを取り付け、2 つの時系列沈降粒子試料のうち一方をホルマリンで、もう一方をルゴール液で固定することで実施する。これによって茂木らの観測に影響を与えることなく DNA 解析に適した沈降粒子の時系列試料を取得できる。

周辺海中の海氷群集、プランクトンおよび懸濁粒子の DNA 分析サンプルの取得

漂流系の投入・回収時において以下の観測を実施し、海氷、懸濁粒子の DNA 解析を行い、セディメントトラップで得られた沈降粒子の結果との比較を行う。

漂流系投入時: 「しらせ」にて

- ・海氷の採取

- ・水柱の各層から 1-2 L の採水を行い Whatmann GF/F フィルターでろ過して冷凍保存
漂流系回収時に「海鷹丸」にて
- ・水柱の各層から「しらせ」での観測同様に懸濁粒子のフィルターサンプルを取得

平成 31 年度（令和元年度）

沈降粒子試料の顕微鏡分析

得られた沈降粒子試料からスイマーを同定・ピックアップし、残った粒子試料を 2 分割する。分割したものの一方は、そのままの状態での DNA 解析に供する。もう一方は沈降粒子のうち大型のマリンスノー、動物プランクトンおよび魚類の糞粒をソートし、個別の DNA 解析に供する。粒子のソートはその形態とサイズによって実施する。特に、糞粒は魚類、オキアミ、カイアシ類の少なくとも 3 タイプに分けることが可能である。

DNA 解析

海氷、プランクトンおよび懸濁粒子、沈降粒子試料の DNA 解析を研究分担者（創価大、黒沢）とともに実施する。特に沈降粒子試料については研究代表者による顕微鏡観察とソートの後に粒子タイプ別に DNA 解析を以下の要領で実施する。

- 1) 各試料から環境 DNA 抽出キットを用いてメタゲノム DNA を抽出・精製する。
- 2) 得られたメタゲノム DNA を鋳型として、真核生物の 18S rRNA 遺伝子を PCR 法により増幅する。平成 29 年度の DNA 解析方法の検討結果によっては、原生生物の 18S rRNA 遺伝子の特異的に検出するプライマーも併用する。
- 3) 次世代シーケンシング法 (Illumina 社 MiSeq システム) により PCR 産物の塩基配列を決定

4. 研究成果

①漂流系を用いた海氷融解期の観測手法確立

平成 30 年度の南極航海において、耐氷型 GPS ブイから吊下した系に本研究で平成 29 年度に改良したツイントラップを装着して漂流観測を実施したが、海氷の衝撃で GPS ブイフレームが破損し、吊下した機材を消失してしまった。このために本研究期間中に海氷融解期の観測データを得ることは困難となった。一方、他の研究プロジェクトと共同で耐氷型 GPS ブイの改良を進め、令和 1 年度（最終年度）に観測をすることができた。改良にあたっては破損した理由を検討し、フレーム自体の強度を上げると共に、破損しても吊下機材が脱落しない構造を目指した。漂流系は 12 月上旬にしらせで海氷密度 90% を超える海域に投入し、2 月中旬に回収することができ、全ての機材に損傷がなかったことから、海氷域での漂流系観測手法はおおよそ確立できたものと考えられる。回収したセンサーおよびトラップも正常に動作しており、今後の分析により（令和 2 年度からの基盤研究 B（代表：真壁）で実施予定）、海氷融解期の生態系動態についての新知見が期待される。

②DNA および安定同位体比分析が可能な固定液

上述したツイントラップは従来のホルマリン固定と DNA 分析が可能なルゴール固定を併用するための導入であったが、漂流機材の亡失によって当初計画の変更を余儀なくされた。そこで、ルゴール固定が元素分析に与える影響を評価することにより、通常のトラップで全ての分析が可能かどうかの検討をすることとした。実験には南極航海の訓練航海で得られた動物プランクトンネット試料を用い、発育段階を揃えて 3 種のカイアシ類を使用し、ホルマリン固定、5% および 10% 中性ルゴール固定を元素分析に広く用いられているディープフリーザーによる保存と比較することで実施した。測定項目は炭素、窒素および両者の安定同位体比に加えて 18SrRNA 遺伝子とした。図 3 はカイアシ類の炭素安定同位体比に与える固定法の影響を見た結果であるが、分析した 3 種とも半年間の保存期間でも中性ルゴールと凍結試料の間に有意差は認められなかった。また、DNA 分析においても中性ルゴール試料ではターゲットとした領域が正常に増幅されていたことが分かった (Sano et al., submitted)。これらの結果を根拠として、上述した令和 1 年度の漂流系観測ではトラップの固定液として中性ルゴールを採用する判断に至った。もともとホルマリン固定では繊毛虫をはじめとする脆弱な生物を破壊してしまうことや観察時の人体への影響など、様々な問題点があるが、ルゴール液ではこれらの問題もほとんど生じないため、極域生態系以外の観測においても有用な汎用性の高い手法が確立できたと言える。

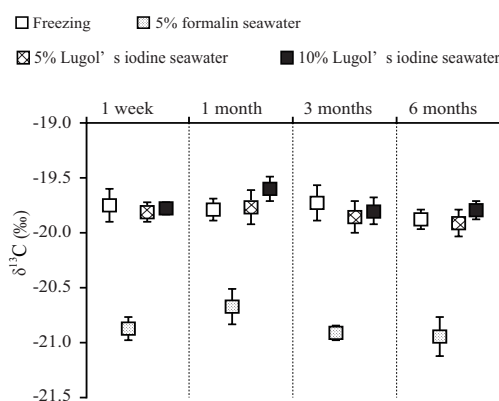


図 2. カイアシ類 *Euchaeta rimana* の炭素安定同位体比に対する固定法の影響。

③糞粒様渦鞭毛虫が沈降粒子中で優占する

先行して実施した海氷融解直後の漂流系観測、および平成 30 年度に実施した海氷融解後 1 ヶ月が経過した海域での漂流系観測において得られた沈降粒子試料中では動物プランクトン糞粒に

似た形状、サイズの粒子が多数出現した。これらを詳細に観察した結果、その多くが比較的大型の核を有する渦鞭毛虫であることが分かった (図 4)。これらは細胞内に大量の珪藻を含んで沈降しており、動物プランクトン糞粒として一般的な円柱状のタイプに匹敵する割合に達することが確認された。図 5 は沈降粒子に見られた円柱状、および回転楕円体 (球形を含む) 糞粒と糞粒様渦鞭毛虫の体積を割合で示したものである。このなかで、回転楕円体の糞粒は大きさ、形状ともに渦鞭毛虫のそれと類似しており、この糞粒が渦鞭毛虫が排泄したものである場合は、沈降粒子中で卓越することになる。同様の渦鞭毛虫の報告は南極沿岸域の海氷中および直下の水柱中でのみ報告されている (Buck et al., 1990, Mar. Ecol. Prog. Ser., 60, 75-84)。よってこれらの起源は海氷である可能性が高いが、本研究では海氷融解から 1 ヶ月以上経過した環境でも沈降粒子中に多数見つかることから、その貢献は比較的長い期間生じると考えられる。これらの試料の一部は核を切り出し、18SrRNA 配列を決定することで、*Gyrodinium* 属であることが分かった。

以上のことから本研究において見出された渦鞭毛虫は季節海氷域生態系の物質循環・食物網において重要な働きを担っていることは想像に難くない。一方、本研究で使用したトラップの設置深度は 60 m であり、表層水柱から移出されていることは確かであるが、これらがそのまま中・深層に沈降するのか？ 亜表層で捕食されるのか？ が不明である。いずれにしても生態学的に重要な生物群ではあるが、そのいずれかによって炭素循環における役割は大きく異なる。より下層にもトラップを設置すること、水柱中の密度を把握すること、および亜表層から表層への回帰を把握することが本群集の動態解明に向けて必要である。

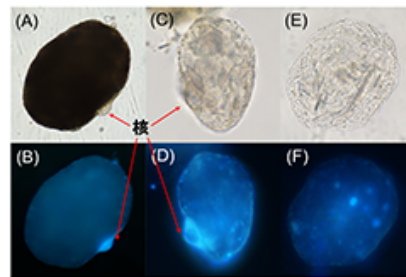


図 4. (A), (C) 渦鞭毛虫, (B), (D) DAPI染色した渦鞭毛虫, (E) 糞粒, (F) DAPI染色した糞粒. いずれの粒子も長径約200 μm . 細胞内には多量の珪藻が認められる.

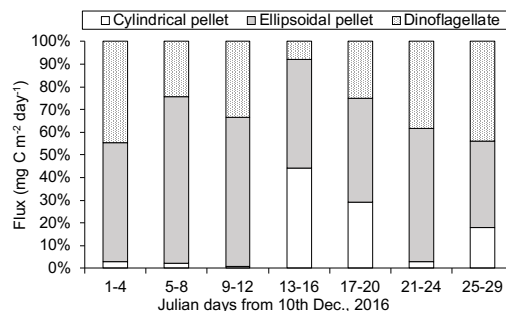


図 5. 沈降粒子中の円柱型糞粒、丸型糞粒、渦鞭毛虫の炭素含量比. 炭素換算式は糞粒のものを渦鞭毛虫にも適応した.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計18件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 10件）

1. 発表者名 Makabe R., Moteki M., Mizobata K., Takao S., Shimada K., Miyazaki N., Takahashi, K., Odate T.
2. 発表標題 Food web in the marginal ice zone: material flow from sea ice through to myctophid fish
3. 学会等名 12th SCAR Symposium on Antarctic Biology (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高橋啓伍, 真壁竜介, 高尾信太郎, 宮崎奈穂, 茂木正人
2. 発表標題 夏季の南極海における季節海水から水柱への微細藻類放出
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 長谷川拓海, 真壁竜介, 高尾信太郎, 茂木正人, 小達恒夫
2. 発表標題 東南極海水縁域における浮氷中および周辺水柱中の動物群集組成
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 影沢歩友子, 高尾信太郎, 溝端浩平, 真壁竜介, 茂木正人
2. 発表標題 南大洋における亜表層クロロフィル極大形成時の植物プランクトン群集動態
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 前田哲志, 高尾信太郎, 真壁竜介, 溝端浩平, 茂木正人
2. 発表標題 夏季南大洋季節海水域における植物プランクトンの空間分布
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 大久保優里, 松野孝平, 真壁竜介, 茂木正人, 小達恒夫
2. 発表標題 南大洋インド洋区における小型カイアシ類の群集組成および鉛直分布
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 Takahashi K., Makabe R., Takao S., Miyazaki N., Moteki M., Odate T
2. 発表標題 Release of microalgae from annual sea ice into the water column during the austral summer off Vincennes Bay (Indian sector, Southern Ocean)
3. 学会等名 8th Symposium on Polar Science (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hasegawa T., Makabe R., Takao S., Moteki M., Odate T.
2. 発表標題 Variability of sea ice fauna in the sea ice floes and water column in the Antarctic seasonal ice zone
3. 学会等名 8th Symposium on Polar Science (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Makabe R., Takao S., Mizobata K., Moteki M., Odate T.
2. 発表標題 Drifter experiment to observe the pelagic ecosystem and material flow during sea ice melting season
3. 学会等名 8th Symposium on Polar Science (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kagesawa A., Takao S., Mizobata K., Makabe R., Moteki M., Odate T.
2. 発表標題 Biogeochemical cycling in the subsurface chlorophyll maximum off Wilkes Land, East Antarctica, during the austral summer
3. 学会等名 Marine Ecosystem Assessment for the Southern Ocean (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hasegawa T., Makabe R., Takao S., Moteki M., Odate T.
2. 発表標題 Ice-associated copepods in sea ice floes and the water column in the Antarctic seasonal ice zone in summer
3. 学会等名 Marine Ecosystem Assessment for the Southern Ocean (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takahashi K., Makabe R., Takao S., Miyazaki N., Moteki M., Odate T.
2. 発表標題 Increased ice algae in the water column after melting of sea ice off Vincennes Bay, East Antarctica, during the austral summer
3. 学会等名 Marine Ecosystem Assessment for the Southern Ocean (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kurosawa N., Nakamura E., Takahashi K., Makabe R., Takao S., Odate T., Moteki M.
2. 発表標題 Diversity and community structure of protists in the floating sea ice of Southern Ocean revealed by 18S rDNA amplicon sequencing
3. 学会等名 Marine Ecosystem Assessment for the Southern Ocean (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kagesawa, A., S. Takao, R. Makabe, N. Kurosawa, M. Moteki, T. Odate
2. 発表標題 Temporal changes in export flux and physicochemical factors during sea ice melting season
3. 学会等名 The 10th Symposium on Polar Science (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Okano S., A. Kagesawa, S. Takao, R. Makabe, M. Moteki, T. Odate, N. Kurosawa
2. 発表標題 Eukaryotic community structure in sinking particles in the seasonal sea ice zone of the Southern Ocean
3. 学会等名 The 10th Symposium on Polar Science (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 影沢歩友子, 佐野雅美, 高尾信太郎, 真壁竜介, 溝端浩平, 黒沢則夫, 茂木正人, 小達恒夫
2. 発表標題 南大洋の季節海氷域における亜表層クロロフィル極大の時系列観測
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋啓伍, 真壁竜介, 高尾信太郎, 小達恒夫, 茂木正人
2. 発表標題 低塩の海水融解水がアイヌアルジーの生物量と組成に与える影響
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masayoshi Sano, Ryosuke Makabe, Ayu Yamamoto, Norio Kurosawa, Masato Moteki, Tsuneo Odate
2. 発表標題 Effects of lugol ' s fixtation on preservation of samples for carbon and nitrogen stable isotope and molecular analysis
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>茂木正人, 真壁竜介, 高尾信太郎, 南極海生態系研究の現状と展望-炭素循環と低次生産者の視点から, 低温科学, 76, 71-94, doi: 10.14943/lowtemsci.76.71, 2018. (査読なし)</p> <p>須藤齋, 加藤悠爾, 石野沙季, 服部圭司, 高橋啓吾, 真壁竜介, 南極環境変遷のさらなる理解に向けて-珪藻および黄金色化石研究の現状と課題-, 低温科学, 76, 95-120, doi: 10.14943/lowtemsci.76.95, 2018. (査読なし)</p>

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	黒沢 則夫 (Kurosawa Norio) (30234602)	創価大学・理工学部・教授 (32690)	

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	佐野 雅美 (Sano Masayoshi)	国立極地研究所・生物圏研究グループ・特任研究員	