

— 総 説 —

海洋学の10年展望2021：極域*

川合 美千代^{1**}・田村 岳史²・渡邊 英嗣³・西岡 純⁴・
野村 大樹⁵・真壁 竜介²・溝端 浩平¹・安中 さやか³

要 旨

今後10年に我が国が取り組むべき極域研究について、海洋学の視点から論じた。気候変化への極域の応答とフィードバックを明らかにするための重要課題として、両極共通の重要プロセスである中緯度からの海水輸送、海水を介した物質輸送と生物生産、沿岸域の熱輸送と物質循環の定量化に加えて、北極海では海水減少に関連する環境変化のメカニズム、春先の急激な季節変化、南大洋では東南極での大気-海洋-海水-氷床結合システムの理解を取り上げた。さらに、今後の極域研究の進展のため、自国の砕氷船、自律型無人潜水機の活用に加えて、研究用潜水艇、海底観測基地、沿岸観測タワーの建造と、オホーツク海とサロマ湖の海水域研究基盤としての利用、数値モデルの改良について提案した。

キーワード：北極海、南大洋、海水・氷床融解、陸-海相互作用、Polar morning

1. はじめに

本稿では、極域海洋として北極海と南大洋を取り扱うこととする。北極海の定義は様々であるが、バレンツ海

西部境界-フラム海峡-カナダ多島海北部境界-ベーリング海峡と陸で囲まれた部分を狭義の北極海として議論する機会が多い (Fig. 1a)。その他、カナダ多島海やバフィン湾、ハドソン湾、ベーリング海、GIN海 (グリーンランド海、アイスランド海、ノルウェー海) を含む場合もある。一方の南大洋には、南緯40°以南、南緯60°以南あるいは南極前線の南といった定義がある (Fig. 1b)。

極域海洋には氷がある。その氷とは海水であり、また、氷床から海に張り出した棚氷や、海に流れ出た氷山である。海水は、冬には両極海洋を広く覆うが、夏には融け、冬の面積に比べて南大洋では15%、北極海では40%程度に縮小する (極域環境監視モニター: <https://ads.nipr.ac.jp/vishop.ver1/ja/vishop-monitor.html>)。南大洋はほとんどが季節海水域で、海水も一年氷が多いのに対して、北極海は一年中海水に覆われた海域が広く存在し、多年氷が多い。海水の存在は、海面熱収支、風応力の海洋への伝達、大気-海洋間の物質交換、海洋中の光強度、生

* 2021年7月15日受領;2021年9月14日受理
著作権:日本海洋学会,2021年

1 東京海洋大学 学術研究院
〒108-8477 東京都港区港南4-5-7
2 情報・システム研究機構 国立極地研究所
〒190-8518 東京都立川市緑町10-3
3 海洋研究開発機構 地球環境部門
〒237-0061 神奈川県横須賀市夏島町2-15
4 北海道大学 低温科学研究所 環オホーツク観測研究センター
〒060-0819 北海道札幌市北区北19条西8丁目
5 北海道大学 北方生物圏フィールド科学センター
〒041-8611 北海道函館市港町3-1-1

** 連絡著者:川合美千代
e-mail:michiyo@kaiyodai.ac.jp

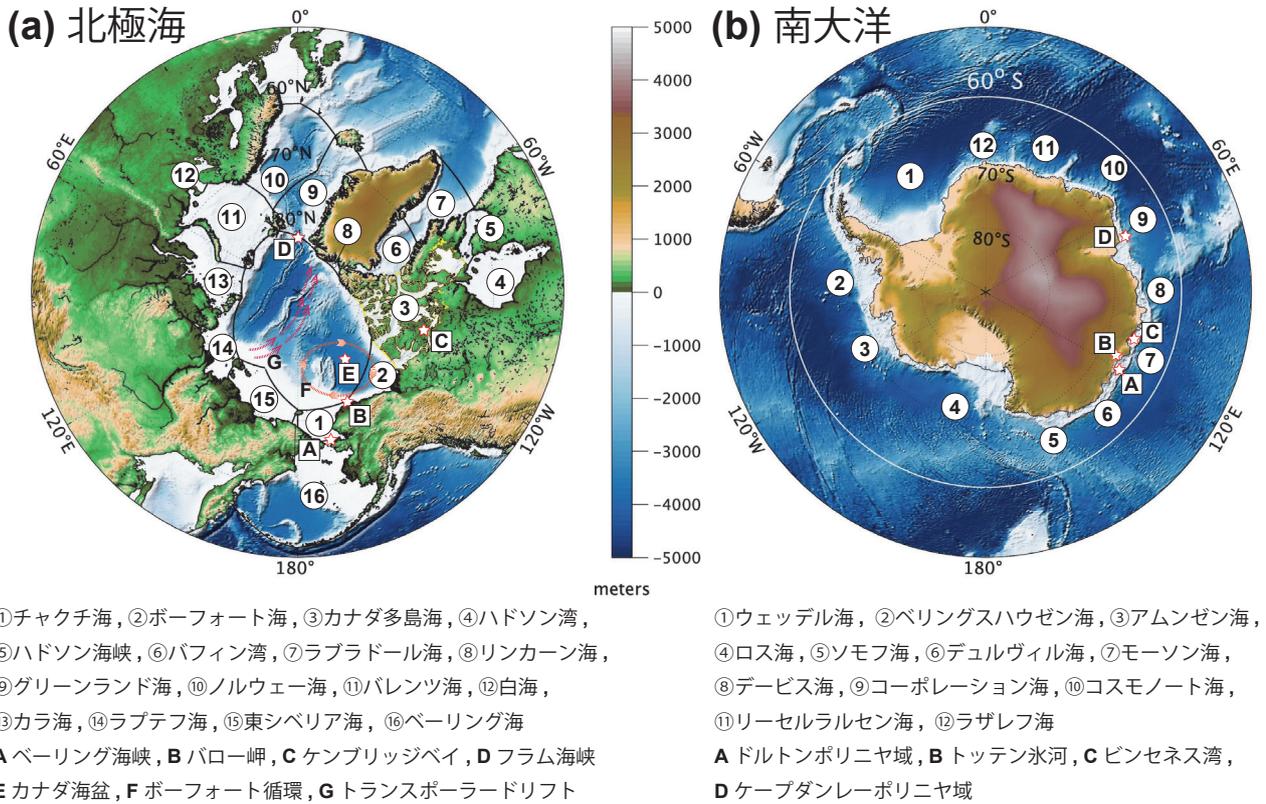


Fig. 1. Maps of (a) the Arctic Ocean and (b) the Southern Ocean.

物の生息域、海水が移動することによる鉄や堆積物・プランクトンなどの輸送など、海洋環境に様々な影響を及ぼす (Vancoppenolle *et al.*, 2013a)。また、海水形成時に生成される低温・高塩分・高密度な水は、中層水、深層水や底層水を形成し、全球規模の水循環や物質循環を駆動している (Ohshima *et al.*, 2016)。一方、陸上に雪が降り積もって形成された氷床は、北極海周辺ではグリーンランドにのみ存在している。グリーンランドから海に流出した氷山は主に大西洋側に流れ出るため、北極海内部で氷山を見かけることはあまりない。しかし南大洋では、南極氷床の末端が棚氷や氷山として沿岸に流出し、海洋循環や物質循環過程などを変化させる重要な要素となっている (Tamura *et al.*, 2012; Shadwick *et al.*, 2013)。

この極域特有の海水や氷床が、近年急速に減少しつつある。北極海の多くの海域はすでに多年氷域から季節氷域へと変貌した (Kwok, 2018)。グリーンランドや南

極の氷床融解の加速や巨大氷山の海洋流出が毎年のように報告されている (Shepherd *et al.*, 2018; 2020)。このため、極域海洋に対する社会的関心は高く、氷の融解により極域の海がどのように変化するか、また、その変化が全球の気候、水循環、物質循環、生物生産、そして人間活動にどのような影響を及ぼすのかを明らかにすることが求められている。これらの課題の解決には、物理-化学-生物は当然のこととして、海洋-海氷-大気、自然科学-人文・社会科学といった分野や領域、衛星観測-現場観測-モデル計算といった手法などを横断した連携研究が必須である。実際、過去 10 年の間、極域海洋学に関してはこのような連携を重視したプロジェクトや重点的観測が実施されるようになってきた (Table 1)。例えば、現在進行中の日本の北極域研究加速プロジェクト ArCS II では、自然科学-工学-人文・社会科学の多分野連携の中で海洋学研究が実施されている。南大洋と南極氷床に関する新学術領域研究 GRAntarctic では、氷床、古環

Table 1. List of major recent/ongoing projects relevant to polar oceanography.

プロジェクト名 (略称) と実施国	主な内容	情報
ArCS II, 日本	2020～2025年: 持続可能な北極を目指し, 環境変化把握, 気象気候予測, 人間社会影響評価などを推進する総合プロジェクト	https://www.nipr.ac.jp/arcs2/
GRAntarctic, 日本	2017～2022年: 新学術領域研究 多分野連携/融合研究により南極氷床—南大洋システムの理解と将来予測を目指す	http://grantarctic.jp/
SOCOM, 米国	2014年～: 約200台のBGCフロートを投入し, 南大洋の炭素循環と気候への影響解明を目指す	https://socom.princeton.edu/
MOSAic, ドイツ	2019～2020年: ドイツ砕氷船を用いた超長期北極海横断漂流観測プロジェクト	https://mosaic-expedition.org

境, 固体地球, 全球気候に関わる南極システムを総合的に理解するための重要分野の一つとして海洋学が位置付けられている。これらのプロジェクトの下, 前回の将来構想当時は手つかずであった南大洋の棚氷-海洋相互作用の観測(岡ら, 2013)が開始され, 神田ら(2013)でその必要性が述べられていた多数のセンサー投入による4次元の物質動態観測(例えば米国のSOCOM; Table 1; 平井ら, 2021, 本特集)や, 浜崎ら(2013)で議論されていた生物多様性に関する調査やモニタリングも実施されている。このような現状を踏まえて, 本稿では, 今後10年に日本が特に注力すべき研究テーマについて議論する。

2節では極域海洋研究の重要性と現在注目されている問題や課題を紹介し, 3節では筆者らが特に推し進めべきと考える研究について論じる。北極海と南大洋の両方で今後の極域海洋プロセス解明の鍵として挙げたのは, 中緯度からの海水, 熱, 物質の輸送メカニズム, 海水を介した物質輸送と生物生産, 沿岸プロセスの解明である。また, 日本が世界をリードできる分野として, 北極海では自国の砕氷船を活用した春先の集中観測, 南大洋では東南極における大気-海洋-海水-氷床結合システム解明のための多面的研究を取り上げる。4節では今後の極域研究発展のために必要な研究基盤を提案する。

2. 極域研究の重要性と現状

2.1. 北極海

近年の北極海の急速な海氷減少に伴い, 海洋内部では様々な変化が観測されている。水温や塩分の変化(Proshutinsky *et al.*, 2019; Polyakov *et al.*, 2020), 大気からのCO₂吸収量の増加(Yasunaka *et al.*, 2018), 海洋酸性化の進行(Zhang *et al.*, 2020), 一次生産量の増加(Lewis *et al.*, 2020), 有害有毒植物プランクトンの分布拡大(Natsuike *et al.*, 2017; Huntington *et al.*, 2020), 動物プランクトンの分布や組成の変化(Abe *et al.*, 2020; Ershova *et al.*, 2021), 魚類分布域北上(Eisner *et al.*, 2020)などである。さらに, 北極の海氷減少が中緯度に異常気象をもたらすことが指摘されており(Honda *et al.*, 2009; Inoue *et al.*, 2012), 海氷減少は北極海に限らず広く人間活動や生態系に影響を及ぼす可能性がある。

しかし, これらの変化の将来予測に関してはいまだ不確定性が大きい。海氷予測に関して, Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6)に代表される地球温暖化を想定した将来予測プロジェクトでは, 経済優先で最も温暖化が進行すると考えられるシナリオ

(SSP5-8.5)を想定した場合、21世紀半ばには夏季に海水が消失するという予測が出されている(Notz *et al.*, 2020)。ただし、各国の気候モデル間で予測結果のばらつきが大きい。また、境界条件を与える社会経済シナリオ自体にも多くの不確定要素を含むことを認識しておく必要がある(IPCC, 2019)。モデル間でばらつく原因のひとつとして、中緯度から流入してくる海水による熱輸送量の違いが、海水予測に大きく影響することが指摘されている(Docquier and Koenigk, 2021)。北極海には、比較的高温な大西洋起源水がフラム海峡とバレンツ海から流入し、150–900 m 深に広がる(Polyakov *et al.*, 2020)。大西洋起源水のもたらす熱は、大西洋側北極海だけでなく、太平洋側北極海沿岸域における海水生成抑制にも寄与する(Hirano *et al.*, 2018)。ベーリング海峡から流入する太平洋起源水は、夏季にチャクチ陸棚上で太陽放射加熱によって昇温した後(Tsukada *et al.*, 2018)、カナダ海盆の数十 m 深に貫入して亜表層水温極大を形成する(Timmerman *et al.*, 2018)。近年、大西洋起源水・太平洋起源水ともに、水温の上昇が観測されており、その熱が海盆域での海水生成を抑制している可能性がある(Timmerman *et al.*, 2018; Polyakov *et al.*, 2020)。しかし、これらの海水の北極海内部における輸送経路や海面への熱供給プロセスについてはまだ十分にわかっていない。亜表層や中層に運ばれた熱が海面に及ぼす影響を理解するためには海水減少に伴う海洋の移流・混合過程の変化について、海水-海洋間の多様な相互作用も含め包括的に明らかにしていく必要がある。

海洋物理場の理解は、化学・生物環境の将来予測においても重要である。特に、温暖化によって弱光と低水温による一次生産の制限が緩和された北極海では、栄養塩が移流、鉛直混合や渦によってどれだけ供給されるかが、一次生産の増減を決定する(Popova *et al.*, 2010)。また、海洋酸性化は淡水による希釈の影響を強く受けるため、河川水や海水融解水の行方によって左右される(Zhang *et al.*, 2020)。また近年、北極海の海水中の微量金属元素は海水に比べて高い濃度で蓄積されており、海水とともに移送されて海水融解時に直下の海洋に放出されていることも示されている(Evans and Nishioka, 2019; Bolt *et al.*, 2020)。海水減少と海洋循環の変化が、微量栄養物質である金属元素の循環にどのような影響を与えるのかと

いう点も明らかにすべきである。

また、海水の減少は大気-海洋間の温室効果気体の収支を変化させる。CO₂収支については、Yasunaka *et al.*(2018)によって北極海全域でのマッピングがなされた。これまでは、表層混合層の海水は大気に対してCO₂未飽和であったため、海水減少によって大気と接触する時間と面積が増加し、海洋へのCO₂吸収量が増加してきた。今後海水温の上昇が続けば、表層混合層のCO₂濃度が上昇し、吸収能の低下あるいは放出源へシフトする可能性がある。また、北極海から大気へのメタンの放出も重要である。温暖化による永久凍土融解に伴って大量のメタンが河川や海底から海洋に供給され、大気に放出される可能性がある(Shakhova *et al.*, 2010)。大気への放出においては、海水内での濃縮や細菌によるメタン生成も関連するが、CO₂に比べて観測例が少なく、広域のかつ定量的な見積もりはなされていない。現在進行している多年氷から一年氷へのシフトなど海水の質の変化が海水内部を通じた気体交換過程に与える影響を明らかにすることも課題である(Nomura *et al.*, 2018)。また、氷縁域、クラックやリード(氷が割れてできる溝や水路)内では、海水融解水や雪融け水により、海面から数 m 深までの間に強い成層が生じるため、船底から海水を吸い上げて観測するという従来の方法では、実際の大気-海洋間の気体交換を見積れない(Ahmed *et al.*, 2020a)。海水薄化によりクラックやリードが増加している北極海ではこの点に注意した観測が必要である。

近年、北極海の「亜寒帯化」(Borealization; 海域によっては Atlantification や Pacification と呼ばれる)が注目されている(Polyakov *et al.*, 2020)。北極海の海洋環境が亜寒帯のそれに近づくというものであり、大西洋起源水・太平洋起源水による温度上昇に加えて、大西洋側では高塩分化、太平洋側では低塩分化が観測されている(Proshutinsky *et al.*, 2019; Polyakov *et al.*, 2020)。亜寒帯化は、物理環境の変化だけでなく、植物プランクトンが増殖可能な期間の延長、秋季ブルームの発生、亜寒帯からの動物プランクトンや魚類の北上や優占種の交代などにも現れている(Fossheim *et al.*, 2015; Polyakov *et al.*, 2020)。特に、バレンツ海やチャクチ海など、大西洋水や太平洋水の入り口に近い海域で変化が大きい(Huntington *et al.*, 2020; Polyakov *et al.*, 2020)。しかし、生物

に関する長期のデータは少なく、また、観測時期のほとんどが夏季に限られている。今後の生態系の変化を理解して予測につなげるためには、モニタリングの継続と拡充、生態系モデルの精緻化が必要である (Huntington *et al.*, 2020)。

北極海環境変化は、人間活動との関わりも深い。例えば、魚類などの水産資源の分布域北上は、北極海内部に新たな漁場をもたらす (Eisner *et al.*, 2020; Huntington *et al.*, 2020)。このため、公海域での漁業資源を保全するための新たな国際的取り決めとして、2034年までを対象とした「中央北極海無規制公海漁業防止協定」が10の関係各国および機関の間で締結された。また、海氷減少により、大西洋と太平洋をつなぐ北極航路の利活用が進んでいる。ロシア沿岸の北東航路とカナダ多島海を通過する北西航路のうち、物流の大半は海氷が少ない北東航路の方を利用している。またロシアのヤマル半島で大規模な液化天然ガス基地が稼働していることもあり、エネルギー輸送の観点からも重要なルートとなっている。北極の海氷減少が中緯度に異常気象をもたらす可能性については、その影響の大きさやプロセスなどについて現在も盛んに議論されているが、一貫した結論には至っていない (Mori *et al.*, 2019; Overland, 2021)。逆に中緯度の人間活動による北極海への影響として、ブラックカーボン、人為起源窒素化合物、マイクロプラスチックなどの汚染物質の輸送がある。ブラックカーボンは積雪や海氷のアルベドの低下による融解促進材、人為起源窒素は海水海洋生態系への新たな窒素源としての働きが注目されている。北極海では高濃度のマイクロプラスチックが観測されており、その起源や行方、生物影響が問題となっている (Peeken *et al.*, 2018; 阿部ら, 2021; 平井ら, 2021, 本特集; Ross *et al.*, 2021)。これらは比較的新しい研究テーマで、早急な定量化と継続的監視が必要とされるが、分析手法の確立も同時に進める必要がある。

2.2. 南大洋

南大洋には、偏西風によって駆動されている全球最大の海流である南極周極流が存在し、三大洋と開放的に繋がっている。その中深層では、北大西洋深層水を起源とする周極深層水 (CDW: Circumpolar Deep Water) が極向きに湧昇することで、南極沿岸域に熱と塩を供給して

いる。南大洋では、主に沿岸域における局所的な海氷生産に起因して、南極底層水と呼ばれる全球海洋で最も重い水が生成される。全球の熱塩 (子午面) 循環はこの南極底層水の沈み込みを出発点として駆動されていると言える。南極底層水は全海水の30~40%を占める巨大な負の熱の貯蔵庫であり、その量や温度は全球気候を左右しうる潜在力を持つ (Johnson, 2008)。近年の観測からこの底層水の昇温・低塩分化・体積の減少が明らかになり、熱塩循環が弱まっている可能性が指摘されている (Purkey and Johnson, 2010; 2013)。さらに、南大洋は地球最大のCO₂貯蔵庫でもあり、氷期-間氷期サイクルにおけるCO₂変動は南大洋が決めてきたという説が有力である (Uemura *et al.*, 2018)。一方で、地球の水の約90%を占める南極氷床は、海水準で約60mに相当する淡水の貯蔵庫である (Fretwell *et al.*, 2013)。南極氷床は比較的安定であると考えられてきたが、近年になって縮小が相次いで報告され、膨大な熱容量を持つ海洋がこの氷床質量損失の鍵であると強く疑われている (Prichard *et al.*, 2012; Paolo *et al.*, 2015)。このように、熱・水・物質の貯蔵に関わる南大洋は、全球気候や海水準を決定づける重要な要素である。

南大洋は、南極氷床との間に強い相互作用を持つ。例えば、南極氷床の縮小がもたらす淡水は、海水の低塩分 (低密度) 化を招き、海洋の成層構造を安定化させる。これは南極底層水の生成を弱体化させて亜表層の水温上昇を招き、南極氷床末端部を底面から融解してさらなる氷床損失をもたらすと考えられている。また、IPCC 海洋・雪氷圏特別報告書 (IPCC, 2019) では、海洋の2,000m以深の水温上昇は南大洋において最も顕著であり、南極底層水の温暖化がこれに関係していると指摘されている。氷床損失の加速の影響は南極沿岸流により南極沿岸全域に及ぶため、底層水の変化の主要因となっている可能性が高い。さらに、熱塩循環は同時に物質循環を伴う。南大洋におけるCO₂や栄養塩等の循環は、全球気候や生態系の変動を支配する最重要因子の一つである。南大洋は海洋における人為起源CO₂吸収の約40%を担っており (Khatiwara *et al.*, 2009)、吸収された人為起源CO₂は南極中層水、亜南極モード水、南極底層水によって、南大洋から中・低緯度海域へと輸送される (Ito *et al.*, 2010)。また、これらの水塊とともに南大洋から輸送される栄養

塩が中・低緯度海域の一次生産を支えている (Sarmiento *et al.*, 2004)。低温でもともと大量の CO₂ を溶かしている南大洋は酸性化の影響が早期に深刻化する海でもあり、酸性化による炭素や栄養塩循環の変化の可能性も指摘されている (Petrou *et al.*, 2019)。

IPCC 第 5 次評価報告書 (IPCC, 2014) は、「20 世紀後半の温暖化が人為起源である可能性は極めて高い」と報告しつつ、南大洋と南極氷床において気候モデルによる再現と観測結果との差が大きいなど、理解の遅れを指摘してきた。西南極 (西経で表される南極大陸) では気温や南大洋深層水温の上昇が観測されているが、南大洋全体の海面水温や東南極 (東経で表される南極大陸) の気温は有意に温暖化しておらず、海水についても北極海のような減少傾向にはない。東南極大陸上では、氷床厚が増加している地域もある。生態系・物質循環モデルは植物プランクトン分布のような基本項目ですら南大洋では再現に成功していない。古環境の研究から、南極底層水や南極氷床には一度越えてしまうと容易には後戻りできない不可逆的臨界点が存在し、現在そこに向かって近づいている可能性があるとして指摘されているが、物理的アクセスの困難さに起因する観測とモデル研究の圧倒的不足により、その実態は未だ解明に至っていない。

現在、西南極の氷床縁辺部の融解が加速していて、西南極に基地を構える各国は精力的に現場観測を行って変動の様子をとらえつつある。一方、日本の研究コミュニティは、南極氷床質量全体の 90% 近くを占める東南極域を中心に観測研究を進め、様々な知見や新たな課題を明らかにしてきた (Ohshima *et al.*, 2013; Aoki *et al.*, 2020; Hirano *et al.*, 2020; Kiuchi *et al.*, 2021)。氷床の質量損失に関しては、海盆から沿岸域に流入する暖かい CDW による底面融解と氷床の不安定化が重要であるが、東南極においては、大陸斜面から海盆域にかけて定在する時計回りの循環が、CDW の氷床末端への輸送に寄与している (Mizobata *et al.*, 2020)。しかし、時計回り循環の形成要因や循環流量の変動要因は風応力では説明できておらず、今後さらなる研究が必要である。より岸側を西向きに流れる南極斜面流 (Antarctic Slope Current) は、暖かい CDW の大陸棚への流入を妨げるバリアの役割を果たしている。時計回り循環による暖水輸送が、沖合の CDW と沿岸の南極斜面流の変動性とどう関係している

のかは、海洋力学における重要な研究課題である。地球温暖化に伴って予測されている南半球の偏西風の強化 (IPCC, 2019) に対して東南極域の海洋循環がどのように応答するか、今後さらなる研究が必要である。また、CDW は沿岸域への栄養塩輸送においても重要であるため、一次生産との関連も注目される。一次生産に関しては、海水縁辺域で生じる植物プランクトンの大増殖 (氷縁ブルーム) が重要である。氷縁ブルームの成因は一般的には海水が消失することと、供給される淡水によって浅い表層混合層が形成され、植物プランクトンにとっての光環境が好転することと理解されている。しかし、実際には、これらの環境要因のみでは時空間的に不均一に生じる氷縁ブルームの発生を説明できないことが分かってきた。海水に含まれる沿岸堆積物またはダスト由来の鉄や海水中の植物が融解とともに水柱に供給されることも挙げられるが、その理解は定性的なものにとどまっている。また、海水由来の鉄が、近年南大洋沿岸域で発見された窒素固定の動態を左右する重要な因子である可能性も指摘されている (Shiozaki *et al.*, 2020)。

3. 今後 10 年に注力すべき研究テーマ

3.1. 北極海

3.1.1. 海水減少メカニズムとそれに伴う海洋環境変化の定量的解明

海水の運動は風による駆動力と内部応力 (氷盤同士の衝突時に働く抵抗力) に支配され、これらが変化すると北極海から大西洋側への海水流出量も大きく変動する (Spren *et al.*, 2020)。一般的に海水が薄くなると内部応力が低下するため、仮に風向・風速が一定であっても、海水の流動性が高まることになる (Spren *et al.*, 2011; Kwok *et al.*, 2013)。極端なケースとして内部応力が全く効かない状況 (フリードリフト) では、カナダ沿岸での氷板の積み重なりが少なくなり、その結果、将来、カナダ海盆では平坦な海水がボーフォート高気圧に伴う時計回りの風応力にそのまま応答する形で同心円状に分布するようになることも想定される。このような海水の脆弱化に伴って海水下の海流および海洋熱輸送も全体的に強化されるはずである。したがって大気-海水-海洋間の運動

量伝達効率が近年どのように変化してきたかを定量的に明らかにすることは、海水減少の力学的要因や海洋循環変動を理解する上で重要である。また数年やより短いスケールの海水減少を、地球温暖化による気温・海水温の上昇といった熱的な要因だけで説明することは十分ではなく、様々な相互作用も含めて明らかにする必要がある。代表的な海水-海洋アルベドフィードバックは夏季の海水融解を促進するが (Kashiwase *et al.*, 2017), マイクロ波による衛星観測から示されているように年間最小海水面積が単調減少になっていないことから(極域環境監視モニター: <https://ads.nipr.ac.jp/vishop.ver1/ja/vishop-monitor.html>), 複雑なシステムの中での各プロセスの相対的寄与を把握する必要がある。例えば、海水融解による海面への淡水供給と太陽放射加熱が成層を強化し、下層からの熱供給を妨げるのに対して (Peralta-Ferriz and Woodgate, 2015), 海水の脆弱化に伴う流動性の高まりは直下の鉛直乱流混合を介して数十 m 深からの上向き熱輸送を活発化させ、海水減少に寄与する正のフィードバックをもたらす (Kwok *et al.*, 2013)。現在の北極海は大陸から多くの河川水が流入していることや海水温が低いために塩分主導の密度成層で特徴づけられるが、温暖化によって海洋上部への蓄熱が進めば成層強度に対する水温の寄与も無視できなくなる可能性がある。そのような状況では海洋循環像も大きく変化することが想定されるため、数値モデルに仮想的な条件を与えて将来起こり得る海洋環境をシミュレーションしておくことが望ましい。

大気循環との関連では、海水縁の後退に伴って北大西洋からの低気圧の進路(ストームトラック)が北上し、カナダ海盆を時計回りに流れるポーフォート循環を弱化する可能性があることが指摘されている (Moore *et al.*, 2018a)。このことはカナダ海盆に蓄積された淡水 (Proshutinsky *et al.*, 2019) が北大西洋により多く流出し、1970年代に観測された Great Salinity Anomaly のように大西洋子午面循環を抑制するきっかけともなり得るため (Caesar *et al.*, 2021), この一連のプロセスを全球気候モデルで検証しておくことが望ましい。

3.1.2. 太平洋起源水の輸送とその海水生成および生物生産への影響

太平洋起源水は、北極海への熱、淡水、栄養塩、炭素

の供給源として重要であるが、近年の観測から、流量増加、水温上昇、塩分低下(特に冬季)が報告されている (Woodgate and Peralta-Ferriz, 2021)。これらの変化の要因の解明は今後の北極海の環境変化を理解する上で不可欠である。太平洋起源水のベーリング海峡通過流量は、海峡付近の南北風や海面高度の東西勾配だけでなく (Mizobata *et al.*, 2010), 東シベリア海やベーリング海北部の海面高度変動からも遠隔影響を受けることが指摘されている (Peralta-Ferriz and Woodgate, 2017; Mizobata, 2021)。ただし、流量変動のすべてを説明するには、年々変動と長期トレンドのそれぞれについて支配メカニズムを包括的に理解する必要がある。

太平洋起源水による熱供給は、北極海の海水減少に寄与するが、ベーリング海峡通過後にチャクチ陸棚縁からカナダ海盆中央部に至る正確な経路やその間の熱量変化、さらに海盆内の数十 m 深に流入した後の海面への熱供給メカニズムも併せて明らかにする必要がある。カナダ海盆中央部における海面への熱供給を同海域のエクマン湧昇流で説明することは難しく、乱流混合など鉛直熱輸送を示すデータを広範囲で連続的に取得できるかどうかは鍵となる。海水の脆弱化は海水設置型ブイによる漂流観測を困難にするため、その代替手法を考案・開発して晩秋~春季も含めた通年観測を継続し、海洋熱輸送プロセスのシームレスな理解と定量化を達成することが必要である。

太平洋起源水は、ベーリング海での湧昇でもたらされる豊富な栄養塩をチャクチ海に運び、高い一次生産を支持している。さらに、北極海中央部に栄養塩を輸送し、有光層上部で窒素栄養塩が枯渇した海盆域で、有光層下部における一次生産を支えている。海水減少に伴って弱光と低水温による制限が緩和された北極海では、一次生産における栄養塩供給の重要性が高まっている (Popova *et al.*, 2010)。地球温暖化を想定した将来予測実験でも栄養塩濃度変化の度合いによって一次生産量の増減トレンドがモデル間で分かれることが報告されている (Vancoppenolle *et al.*, 2013b)。つまり、太平洋起源水の経路や海盆域での鉛直混合の理解は、生物生産と物質循環の観点からも重要である。さらに、太平洋起源水は、チャクチ海での有機物分解と人為起源 CO₂ による酸性化の影響を受けて炭酸カルシウム(アラゴナイト)未飽和に達し (Ya-

mamoto-Kawai *et al.*, 2016), カナダ海盆や周辺の沿岸底層に生息する石灰化生物の好適生息域の縮小を引き起こしている (Mathis *et al.*, 2012; Yamamoto-Kawai *et al.*, 2013)。近年, チャクチ海では太平洋起源水の物理的性質の変化 (Woodgate and Peralta-Ferriz, 2021) に加えて, 生態系の亜寒帯化が観測されている (Huntington *et al.*, 2020)。これらの変化は, チャクチ海における有機物生成・分解速度, 脱窒速度などの変化をもたらす, 海盆域に運ばれる栄養塩濃度や濃度比, 炭酸カルシウム飽和度を変化させることで, 海盆域の生物にも影響を及ぼす可能性がある。加えて, 太平洋起源水の塩分低下すなわち密度低下は, 海盆内での太平洋起源水の存在深度を浅くするため, 一次生産者への栄養塩供給量やアラゴナイト未飽和水の沿岸湧昇頻度を高めると考えられる。すでにチャクチ海の物理環境や生態系の変化が観測されている今, 物理・生物プロセスのさらなる解明と同時に, 化学成分の長期係留観測 (センサー観測, 時系列採水), 過去のデータと近年のデータとの比較などを行い, ベーリング海峡から海盆域までの太平洋起源水による物質輸送の変化とその生物影響を解明することが急務である。

3.1.3. Polar morning 期のプロセスとその重要性

2021年1月, 日本初の砕氷機能を持つ北極域研究船の建造が発表された。2026年の竣工を目指している。航行可能な海水厚は1.2m程度と想定されており, 多年氷の少なくなった近年の北極海であれば, 9月から12月にかけて, 北極海のほとんどが航行可能域となる。また, 春先のベーリング海, チャクチ海や沿岸付近での観測も可能となる。本稿では, 4月から6月にかけての春季を“Polar morning”と名付け, この時期に起きるプロセスに特に注目する。この時期には, 長い極夜が終わり, 光が差し込み, 海水が緩むなどの環境変化が急激に進み, 物質循環や生物生産にも変化が起こる。すなわち, 冬季の間に海水の上に蓄積した大気由来物質が海水に一気に流入したり, 海水内部や海水下の海水及び海水上の積雪に蓄積したメタン, 揮発性有機ガス, 海洋由来エアロゾルなどが大気一気に放出されたりする (Vancoppenolle *et al.*, 2013a)。春先の大気中オゾンの消失をもたらすと考えられている臭素ガスの発生源は, 北極の積雪内での光化学反応に起因するという報告もある (Pratt *et al.*, 2013)。また, 中緯度域からのブラックカーボン輸送が

増加し, アルベド低下を介して海水融解に拍車をかける可能性も指摘されている (Bond *et al.*, 2013)。

Polar morning は, 一次生産の場所が海水の内部や底面から海洋中へと移行する時期である。例えばチャクチ海陸棚域では, 海水中クロロフィル濃度が5月から6月あたりに極大を示すことが係留系観測の結果より明らかになっている (Nishino *et al.*, 2016)。Polar morning は, 動物プランクトンが活発に植物プランクトンを摂餌し, 再生産を行う時期でもある (Soreide *et al.*, 2010)。このように, 4~6月の観測が重要なことは明らかでありながら, 海水の存在に阻まれ, 観測例がほとんどない。しかし, 海水融解が年々早まり, また, 砕氷船建造が決まったことで, 今後観測が実施可能となる。つまり, Polar morning の集中観測は, 北極海における物質循環の理解に向けて次に踏むべきステップである。また, 自国の砕氷船を用いることで, これまで困難であった分析機器の持ち込みやサンプル輸送が容易となるため, 日本の海洋学で培ってきた世界最先端の微量金属元素, 微量気体, 同位体比などの化学分析技術を駆使した研究を展開することができる (蒲生, 2014; 宗林, 2016)。これにより, 単にデータの空白時期を埋めるだけでなく, 物質循環の経路の解明や, プロセスの定量化が可能となる。具体的な観測研究項目としては, 海水上に蓄積した汚染物質, 人為起源物質, 栄養物質の海洋への流入と, これらに対する生物の応答, 海水融解期における温室効果気体の放出・吸収量の変化, 光強度変化にともなう海水内部および有光層内の光化学反応の変化, 海洋起源エアロゾルの大気への放出, 海水融解に対する植物プランクトン生理的順応メカニズム, アイスアルジーから外洋性プランクトンへの移行期における一次生産量ならびに動物プランクトンの摂餌および再生産の変化, 表層の環境の変化に伴う下層への炭素沈降除去量の変化などが挙げられる。さらに春先の低気圧通過に伴うイベント的な降雪や積雪プロセスの理解も光環境や熱収支にとって重要であり, いまだ不確実性が大きい再解析データの高精度化にも寄与する (Sato *et al.*, 2018; Graham *et al.*, 2019; Uotila *et al.*, 2019)。これらの観測により Polar morning 期の大気-海水-海洋間の熱や物質の動きを定量的に明らかにすることで, 気候や生態系に関する将来予測の不確実性の低減につながることを期待される。

3.1.4. 温暖化による陸-沿岸-海盆システムの変化

北極海において一次生産を支える栄養塩は、太平洋水や大西洋水を起源としており、下層から有光層への供給過程が生物生産を左右する。このため、これまでは陸棚-海盆間輸送 (Nishino *et al.*, 2013), 渦活動 (Watanabe *et al.*, 2014), 湧昇流 (Spall *et al.*, 2014) といった海洋内部のプロセスによる栄養塩供給が注目されてきた。しかし、温暖化により、河川水、海岸浸食、氷床、海底永久凍土からの有機物や栄養塩など、外部からの供給プロセスの重要性が高まっている。

北極海を取り囲む陸上では、積雪面積や積雪期間の減少、凍土の融解が進行し、河川水量の増加、流出タイミングの変化、河川水中の有機炭素や栄養塩濃度の増加、植生や淡水藻類種の変化、一次生産の増加など様々な変化が起きつつある (Wrona *et al.*, 2016; Lento *et al.*, 2019)。オビ、エニセイ、レナ、マッケンジーの4大河川の年間流量は1980年以降の30年間で14%増加したが、夏の流量が減り秋の流量が増えるといった、季節変動の変化も観測されている (Ahmed *et al.*, 2020b)。最新のモデル研究によって、高温な河川水による熱供給が北極海の海水減少や海水温および海上気温上昇に寄与していることも報告されている (Park *et al.*, 2020)。また、溶存有機炭素、鉄、ケイ素の海への供給量が大きく増加した河川もあれば、逆に、過去数十年にわたって有意な変化がみられない河川もある。この違いは、永久凍土がある流域では温暖化による流量や物質流出量の変化が大きいためであると考えられる (Chupakov *et al.*, 2020)。永久凍土には有機物と結合していた水銀が多く含まれるため (Schaefer *et al.*, 2020)、凍土の融解が沿岸域への水銀流入量増加をもたらし、沿岸の海洋生物や地域住民に影響を与える可能性も懸念されている (Zolkos *et al.*, 2020)。他にも、人間活動由来のポリ塩化ビフェニル (PCB) やマイクロプラスチックが河川水を経由して北極海に供給されていることも知られている (Carlsson *et al.*, 2018; Yakushev *et al.*, 2021)。

従来、陸起源栄養塩の一次生産への寄与は小さいとされてきたが、近年のシミュレーション結果から、河川水及び海岸浸食による物質供給が陸棚域での一次生産 (再生生産を含む) に対して無視できないことが示唆された (Terhaar *et al.*, 2021)。加えて、海水減少により植物プ

ランクトンが増殖可能な日数が増えたことで、沿岸域における栄養塩の要求量は大きく増加していると考えられる。すなわち、陸起源の栄養塩供給量の増加は、沿岸域での一次生産増加にそのままつながる可能性がある。有光層内での一次生産の増加は、海水中のCO₂濃度を下げることによって大気からのCO₂吸収や海洋酸性化抑制につながるが、同時に、生成・沈降した有機物の分解により、底層における酸性化を促進する。また、海岸浸食や海底凍土を起源とする有機炭素の増加は、沿岸域から大気へのCO₂放出量を増やす (あるいは吸収量を減らす) と同時に、沿岸域や、沿岸の底層水が流入する海盆亜表層の海洋酸性化を加速するだろう (Semiletov *et al.*, 2016)。

河川あるいは大陸棚を起源とする栄養塩の輸送は、海盆域における一次生産にとってより重要になりつつある。これまでは、厚い海水の下を流れてそのまま北極海の外に運ばれていた栄養塩が、水中光量の増加した北極海中央部で増えつつある Under ice bloom (海水下の水中での植物プランクトンブルーム) あるいは海水融解後の開放水面での一次生産を支えることが可能になったからである。また、この10年の間に GRENE や ArCS, GEO-TRACES など国内外の研究プロジェクトを通して北極海における微量金属元素の観測が大規模に実施された (Hio-ki *et al.*, 2014; Kondo *et al.*, 2016; Colombo *et al.*, 2020)。その結果、北極海表層への鉄の供給源は主に陸域河川や沿岸大陸棚堆積物にあること、トランスポーラードリフト (Fig. 1a, 赤矢印) などによる河川水や海水融解水などの輸送や陸棚水の流出を通じて、沿岸や陸棚から海盆域へ鉄のみならずマンガンや亜鉛、ニッケル、コバルト、カドミウムといった微量金属元素が輸送されていること、それらが北極海の広範囲にわたって一次生産へ寄与することなどが報告されている (Kondo *et al.*, 2016; Bundy *et al.*, 2020; Jensen *et al.*, 2020)。今後、海水の減少による淡水循環や陸棚水流出過程の変化が、海盆域の鉄制限を引き起こすことも示唆されている (Rijkenberg *et al.*, 2018)。海水による物質輸送も重要である。シベリア沿岸で形成された海水は、トランスポーラードリフトによって海盆域や大西洋まで運ばれるが (Fig. 1a)、近年、この経路の途中で海水融解が早まった。このため、沿岸域で海水に取り込まれた堆積物、メタン、プランクトンなどが、以前よりも沿岸に近い海域で海水中に放出さ

れるようになり、物質循環、一次生産、生物の多様性などを変化させるのではないかと指摘されている (Krumpen *et al.*, 2019)。今後、河川水や海水が直接あるいは間接的に関わる沿岸と海盆域を結ぶ物質移送プロセスの理解を深めていく必要がある。

以上のように、陸-大陸棚-海盆間の物質輸送の重要性が増す中、河川水から供給される主要な物質の流出量は近年のモニタリングにより明らかになってきた (Holmes *et al.*, 2021) が、海に供給された後の行方については定量的にはほとんど不明である。特にシベリア沿岸の広大な大陸棚では河川水の滞留時間が数年と長く、大陸棚上での変質の影響も大きいにも関わらず、河口域での塩析などによる物質除去を含めて諸過程の観測データ (特に季節変動の観測) が少ない。一方、シベリア河川水の流域には永久凍土が多く、温暖化の影響を大きく受けること、トランスポーラードリフトによって海盆域に直接物質が運ばれることなどを考えると、シベリア沿岸域での河川からごく沿岸、そして海盆にかけての物質循環の総合的かつ定量的理解は、今後の北極海研究において重要な課題である。そのためには従来の船舶観測に加えて、河口域やごく沿岸域での小型船舶、ドローン、ヘリコプターなどを利用した採水など、沿岸域に特化した観測の展開 (木田ら, 2021, 本特集) が必要である。また、沿岸域の環境変化は地域住民の生活に直接的影響を及ぼす。今後の北極海沿岸域の研究においては、科学者と地域住民との間の知識交換や協同観測などを積極的に進めることで、持続的観測を可能にし、沿岸域のリスク低減や生態系管理に資することも期待される (UN Ocean Decade-Arctic Action Plan; <https://www.oceandecade.dk/decade-actions/arctic-action-plan>)。

3.2. 南大洋

3.2.1 海洋循環を軸とした東南極の大気-海洋-海水-氷床結合システムの実態解明 ~海水準変動予測研究への貢献を見据えて~

南極氷床の質量収支に起因する海水準変動の予測のためには、南大洋と南極氷床に関して、観測とモデリングによって各プロセスを理解し、種々の相互作用の実態とメカニズムを明らかにする必要がある。南大洋と南極氷床が関わる全球環境変動メカニズムには、異なる時空間

スケールの様々な相互作用が関与している。過去数十年間に起こった全球規模の大きな気温変動に同期した大気 CO₂ 濃度の変動には、南極周辺の海洋が重要な役割を担っていたと考えられており (Sigman and Boyle, 2000)、南大洋の炭素循環変動における物理、化学、生物過程を明らかにすることは重要である。南大洋では過去 50 年間に CO₂ 吸収量や栄養塩濃度の変化が観測されており (Iida *et al.*, 2013; Gruber *et al.*, 2019)、海洋循環や海水変動との関連、豊富な動物資源を支える低次生産システムへのインパクトの解明が重要課題となっている。

このような状況を踏まえ、海面上昇に対する潜在的なインパクトが大きい東南極をターゲットとし、大気、海洋、氷床、固体地球、生態系の実態と変遷について、研究と観測を集中的に実施する必要がある。中でも特に重要なのが、氷床末端部にあたる棚氷の下に暖水が貫入して、氷床底面から融解が進むプロセス、すなわち氷床海洋相互作用である (Holland *et al.*, 2020)。その過程を現場で実証的に捉えるには、ハードルの高い棚氷下の海洋観測が必須となり、無人探査を含めた新技術の導入が不可欠となる。全体としては、沿岸・外洋境界域に位置する大気-海洋-海水-氷床システムに対して複合的な相互作用をもたらしている、大気・海洋・海水・物質循環・生態系の変動を明らかにする観測を時空間的に高解像度で実施する必要がある。また、数値モデルを用いて、棚氷融解加速を含めた温暖化感度実験等を進める必要もある。中でもこれまで遅れをとっている生態系・物質循環モデルの実用化は今後 10 年以内に達成すべき重要項目である。さらに、数千から数万年という長い時間スケールで変化する氷床・海洋システムを理解するため、南大洋で海底堆積物コア等を採取し、過去の変動の復元を高精度化する必要もある。具体的には、東南極氷床の代表的な流出域および周辺海域 (例: ピンセンネス湾〜トッテン氷河〜ドルトンポリニヤ域) をターゲット観測域として、外洋から陸棚域への CDW の流入、氷床底面での融解、融解水の流出、これらの物理過程に関連した物質循環や栄養塩供給、そして生態系への影響といった各プロセスを解明する。さらに衛星観測も合わせて、現在および過去数十年の氷床質量収支変動に対応する海洋・海水・生態系の変動を明らかにする。これらの観測の知見を取り入れた氷床海洋結合モデルによるシミュレーショ

ンに対して、海底堆積物コアやアイスコアのデータによる検証を加えることにより、大気-海洋-海水-氷床結合システムのより正確な理解を実現する事ができる。

海水準変動予測への貢献を見据えた東南極の大気-海洋-海水-氷床結合システムの実態解明は、人類の気候変動への対応策を考える際に不可欠な研究課題である。南極氷床の質量収支の変動に起因する海水準変動の予測を見据えて、東南極を第一のターゲットとすることで、この地域における日本の歴史的な取り組みを活かすことができる。これまで進めてきた現場観測とモデル研究の融合をさらに進展させ (Hirano *et al.*, 2020), 南極とその周辺における底層水・南極周極流・生態系・氷床・固体地球の実態と変動の素過程、およびそれらの相互作用を明らかにする必要がある (大島ら, 2018)。特に、海洋循環場の理解をベースとした、氷床海洋相互作用の解明、過去の南大洋と南極気候・氷床変動の復元、生物動態等の変動の解明が不可欠となる。これらを通して、南大洋と南極氷床が相互作用を通じて全球環境変動に果たす役割とそのメカニズムを解明する事ができる。また、IPCCを含む気候の将来予測や社会的影響など、多くの分野への波及効果も期待される。数値モデルによるシミュレーションと現場観測データとの融合、分野横断による現場観測や、無人探査技術の工学的発展など、学際的側面の意義も大きい。

大気-海洋-海水-氷床結合システムの実態解明には、海洋循環を軸とした南大洋の理解が必要であり、このためには長期の継続的な観測が不可欠である。特に東南極は観測が限られており、南極全体の研究において未解明部分が多い。日本の極域コミュニティが中心となって東南極における諸外国との連携を進めることで、長期的な東南極域のモニタリングに向けた国際的な研究協力体制やプラットフォームの構築が期待される。また、分野横断的なアプローチを行うため、「氷床海洋相互作用」などの新しい分野の発展や、南大洋における生態系・物質循環モデルの実用化が期待される。他の南極観測主要国に先行して分野融合研究を加速することで、南大洋・南極システムの理解と全球環境へのインパクトを含めた将来予測において世界をリードすることが期待される。

3.2.2. 南大洋の生態系と物質循環

2.2節に記したように、南大洋季節海水域における生物

生産の鍵である氷縁ブルームの、時空間的に不均一な発生メカニズムは不明である。この原因を明らかにするためには海水に含まれる物質 (アイスアルジーや鉄) と生成、流動、融解過程との関係把握が重要となる。例えば海水中におけるアイスアルジー量および溶存鉄濃度は非常にばらつきが大きく、それぞれ $3 \sim 10,100 \mu\text{g L}^{-1}$ (Arrigo, 2014), および $0.2 \sim 109 \text{ nmol L}^{-1}$ (Lannuzel *et al.*, 2016) と報告されている。このような海水中の生物と物質の不均一性には海水生成過程および海水中での生物活動が寄与していると考えられる。南極大陸縁辺、とりわけポリニヤで生成される海水には、植物プランクトンが海水中に比べて最大 80 倍程度の濃度で取り込まれている (Garrison *et al.*, 1989)。また、海水中には植物以外の生物や非生物有機物粒子も大量に含まれている (Schnack-Schiel *et al.*, 2001; Meiners *et al.*, 2004; Arrigo, 2014)。このような多様な生物と物質を含む海水は海流や風によって輸送され、その一部は Mizobata *et al.* (2020) で報告されたような時計回りの循環の西側で低緯度側へ張り出すことで、氷縁域の食物網の起点、および深層への炭素隔離に寄与していると予想されるが、東南極の外洋域では研究例がほとんどない。日本の南極観測が主に対象としている南大洋インド洋セクターにおいては、近年の気候変動に伴う海水の変化傾向は明らかではないが、今後予想される変動が生態系や物質循環にどのような変化をもたらすかを把握するために、海水を軸とした物質循環メカニズムの解明は喫緊の課題である。特に海水生成、流動、融解のプロセスにおいて、氷縁ブルーム発生の有無や規模に関わる生物や物質の変動要因を定量的に把握することが重要である。

南大洋では、夏から秋の長期にわたって亜表層クロロフィル極大 (SCM) が形成されることが認識されていたが、Baldry *et al.* (2020) によってようやく初のレビューがなされ、様々なタイプの SCM が存在していること、そしてその多くは亜熱帯海域に発生するものとは成因や構造が異なることが指摘された。しかし、SCM が食物網や物質循環に果たす役割についての知見は非常に少ない。これは、船舶によるスナップショット的観測では時間変化を捉えることが困難なためである。多数の BGC Argo フロートが展開され (平井ら, 2021, 本特集), データが蓄積されてきた今、様々なタイプの SCM について発生・

維持・消失過程を考慮したプロセス研究が求められる。

氷縁ブルームや SCM といった季節的な生産システムのなかで、ナンキョクオキアミやカイアシ類といった一次消費者は、アイスアルジーや植物プランクトンにより生産された有機物を高次捕食者に転送するとともに、排出する糞粒や鉛直移動を通して生物ポンプの効率を左右する重要な分類群である。ナンキョクオキアミが物質循環に果たす役割については Cavan *et al.* (2019) で詳細に記述されているが、他の分類群については体系的な理解に至っていない。食物網の構造解析は古くから行われている胃内容物観察や炭素・窒素の安定同位体比、脂肪酸分析により、スコシア海をはじめとする南極半島近傍で実施されてきた。このうち安定同位体比を用いた解析は、各生物群の食段階と餌の起源を推定する上で有用とされているが、これまでの報告では表層混合層の粒状有機物 (POM) を食物連鎖の出発点として議論が進む一方で、その炭素・窒素同位体比は一次消費者の値から推定される餌の値と大きく異なっている (Stowasser *et al.*, 2012; Jia *et al.*, 2016)。このことは食物網の出発点である餌粒子が、単純に海水中の POM や表層混合層の POM ではないことを意味している。SCM の POM や沈降粒子は表層混合層の POM と異なる炭素・窒素安定同位体比を示すことが知られており (Close and Henderson, 2020)、このような物質を起源とする食物網の存在を考慮した、正しい食物網構造とそれを介したエネルギーフローの理解が必要である。

南大洋における生態系・物質循環の理解が不足している背景の一つには、海水中の生物と物質に関する学際的研究プロジェクトが不足していたこと、関連研究が各国の基地周辺などの沿岸域を中心に行われてきたことが挙げられる。今後は海水と海洋にまたがる物理学、化学、生物学のより強い連携のもと、沿岸から外洋にわたる南大洋全体の生態系・物質循環を明らかにすることが求められる。

3.2.3. 沿岸域の物質循環の定量的理解

南極沿岸域、特にポリニヤ域では一次生産が活発である。早い季節から光の供給があること、融解水による成層が保たれること、氷床融解水を通じて陸からの鉄の供給があることなどがその要因としてあげられる。特に鉄は沿岸域でも南大洋外洋域においても一次生産の制限要

因であるため、温暖化にともなう陸からの鉄の供給量増加が一次生産を増加させる可能性がある。一方で、モデル計算によると、沿岸域の一次生産を支える鉄は主に堆積物 (~40%) と下層の CDW (~30%) が起源であると推定されている (Dinniman *et al.*, 2020)。CDW はケイ素、リン、窒素といった主要栄養塩濃度も高く、沿岸域の一次生産への栄養塩の供給源である。しかし、CDW 由来の栄養塩が、どのように有光層に運ばれるのか (湧昇、棚氷底面融解水によるブルーム、渦、冬季混合など)、その量は何によって決まるのか、といったプロセスの詳細は未解明である。また、南極半島やロス海に比べて、東南極沿岸の物質循環に関する定量的研究は少なく、南極周辺の沿岸域全体における栄養塩収支も不明である。

Moore *et al.* (2018b) の将来予測によると、温暖化に伴い、中深層の水が湧昇する南極発散域が南下し、また、風が強まることで、南大洋沿岸域での湧昇が強化される。沿岸域での湧昇強化は、CDW や堆積物からの栄養塩や鉄を有光層へもたらし、一次生産を増加させる。一方で、有機物粒子の沈降量を増やし、栄養塩や炭素の海洋下層や堆積物への除去を促進する。その結果、南大洋では一次生産と大気からの CO₂ 吸収量が増加するが、南大洋から中・低緯度海域に運ばれる栄養塩が減少するため、海洋全体の一次生産と CO₂ 吸収量は低下する。Moore *et al.* (2018b) のモデル計算によると、100 m 深における湧昇速度は東南極沿岸で特に高く、今世紀末に向けてさらに増加すると見積もられている。このことは、日本がターゲット海域としている東南極における生物過程・物質循環研究の重要性を支持している。さらに、南大洋から運ばれるケイ素・窒素栄養塩の濃度比が変化すると、中・低緯度における一次生産者の種類が変化し、その結果、海洋の CO₂ 収支が変化する可能性もある (Sarmiento *et al.*, 2004)。海水中の栄養塩の比は、有機物の生成や分解時に変化することが知られている。植物プランクトンによる栄養塩取り込み比は一次生産者の種類や鉄不足などのストレスの有無によって変化し、生成された有機物粒子の水柱内や堆積物中での再無機化速度も元素ごとに異なる (Arrigo *et al.*, 1999; Zakem and Levine, 2019)。また再無機化速度や堆積物-海水間の各成分の移動量は、水温や溶存酸素濃度に応じて変化する。沿岸域は、一次生産、再無機化、堆積と海水の間の

物質移動が活発であり、また、水温や溶存酸素の変化も大きい(木田ら, 2021, 本特集)。したがって、温暖化に伴い、沿岸域での栄養塩収支や濃度比は大きく変化する可能性がある。しかし、南大洋沿岸域における物質循環は未だ不透明である。この物質循環が温暖化によってどのように応答するのかを理解するためには、物理的物質輸送プロセスとともに、有機物の生成、堆積除去、栄養塩の再生・再利用といった生物活動を通じた化学物質の流れを定量化することが必要である。

4. 研究基盤の提案

観測基盤としての砕氷船の重要性と必要性は今後20~30年にわたって変わる事はないと考えられ、さらに自律型無人潜水機をはじめとする無人観測技術の推進とその多点展開が今後の極域海洋研究の柱となることは間違いない。一方で、秋~冬~春の海水域における観測の重要性が今後高まる事を考えると、砕氷船が海水域に閉じ込められてしまうリスクへの対策を考える必要がある。そこで、研究専用潜水艇の運用を提案したい。これは軍事運用ではないので、航海中のほとんどの期間を浮上航行で運用できる。海水域において、海水下における潜水状態での観測を実施でき、海水域を潜水で安全に突破して沿岸ポリニヤにおいて浮上して沿岸域の観測を行う事が可能となる。

さらに思い切った案として、海底観測基地を提案する。設置場所は南極底層水の気候変動に対する応答をモニタリング可能な海域、例えば日本が発見した海洋大循環の出発点の一つであるケープダンレーポリニヤ(Ohshima *et al.*, 2013)などが候補として挙げられる。また、アクセスが容易な疎氷域かつ水深100m前後といった、設置に関して技術面での難易度が比較的低い場所が候補となる。上記の砕氷船や潜水艇から補給を受けることで、通年で安定的かつ多岐にわたる海洋モニタリング観測が可能となる。自動装置による無人観測に加え、研究者が長期滞在して有人観測できることが望ましい。これにより、各季節における生物活動の日視観測、海水直下から海底までの物理・化学観測、現場での培養実験など、新しい極域海洋研究の発展が期待できる。また、極域での海底基地は、宇宙や深海といった極限環境で将来必要とされ

る無人観測設備やロボットの運用テストにも利用できるだろう。海底都市構想実現に向けての技術開発を目指す企業との共同開発や基地利用といった産学連携の発展も期待できる。

北極海では、オホーツクタワー (<https://o-tower.co.jp/>) のような観測施設を、シベリアのごく岸域に設置することが特に有益である。冬季の海水下も含めて、未解明かつ重要な陸-海洋境界域における通年観測が可能となる。シベリア沿岸における陸から海への水・熱・物質の供給量の変化の検出が可能となるほか、アメリカのパローヤカナダのケンブリッジベイの沿岸研究施設での観測との比較により、場所による温暖化応答の違いも明らかになるだろう。また、海水生成時における海底堆積物から海水への物質の取り込み過程の詳細な観測などにも役立つだろう。

もう一つ、別の観点からの提案もある。我が国が面する季節海水域のオホーツク海や北海道のオホーツク海沿岸に位置するサロマ湖のより効率的な利用である。オホーツク海は北半球で最大海水生産量の季節海水域であり(Ohshima *et al.*, 2016)、日本の研究者にとっても世界的に見ても最もアクセスし易い海水域である。オホーツク海には極域海洋で起こる海水の生成と融解、それに関わる海洋循環と物質循環プロセスが存在している(Ohshima and Martin, 2004; Nishioka *et al.*, 2014)。また、古くから海水に関わる物理学的な研究が進められ(Toyota *et al.*, 2004)、近年では生物学的、化学的な研究も展開されている(Kanna *et al.*, 2014; Ito *et al.*, 2017; Kishi *et al.*, 2021)。一方、サロマ湖においても長年海水の物理的特性から海水下生態系、物質循環過程に関するものなど多分野にわたった海水研究が実施されてきた(Nomura *et al.*, 2020)。また、極域観測のトレーニングや教育の場として次世代の研究者を育成するための拠点としての役割も果たしてきた。今後もオホーツク海やサロマ湖を海水域研究の拠点として利用することで、極域海洋の諸現象について詳細にまた効率よく理解を深めることが可能となる。また、これまで両極域で実施する現場観測は限られた季節に行われることが多く、季節を通じたプロセスの詳細を理解するには限界があった。そこで、アクセスし易いオホーツク海やサロマ湖において海水観測研究基盤を設け、季節を跨いだ観測を実施し、効率的にプロセ

スの詳細を観察し、極域に存在する普遍的な諸現象を説明していくことができれば、両極域に面していない我が国で世界と対等に極域研究を進めていくための重要な要素となる。また、厳冬期のオホーツク海は砕氷船の訓練航海や寒冷環境下における砕氷船観測の課題の抽出に最適の場所である。これまでと同様にオホーツク海やサラマ湖を利用して、極域に持ち込む前の新しい観測手法や測器の開発等のテスト観測を実施し、効率よく極域研究の進展を図るべきである。さらに、オホーツク海で今後も継続的に季節海水域の科学的知見を集めていくことは、地球規模で起きている海水減少が、極域や亜極域の海洋循環、物質循環や海洋生態系にどのように影響するのかを理解する点でも大きな意味を持つ。

最後に、研究基盤として重要な数値モデルについて述べる。現在の極域海洋モデルにおいて重要でありながら不確定性が大きいのは、積雪深、海水厚と海洋亜表層の熱輸送であり、これらに関する観測データ取得とそれに基づいた海水海洋結合モデルの改良の継続が必要である。特に熱伝導率やアルベドが大きく異なる積雪と海水をそれぞれ精度良く再現することが必須である。現状では降雪量や積雪深の観測値が著しく少ないために、再解析データであってもばらつきが大きい（Uotila *et al.*, 2019）、再現性の向上は3.1.3節に記載したような観測網と観測期間の拡充と合わせて進めるべきである。

数値モデルによる極域環境の予測精度向上のためには、「氷縁域」も重要なキーワードである。米国ではMarginal Ice Zone プロジェクトが立案され、北極海ポーフォート海南部の氷縁域を対象とした集中観測がキャンペーン的に実施された（Lee *et al.*, 2012）。重要な海水縁プロセスとしては海水-波浪相互作用が挙げられる（Williams *et al.*, 2013; Roach *et al.*, 2019）。波浪は氷盤崩壊を介して海水縁後退を促進する要素となっており、大気-海洋間の物質交換や表層混合層発達など多くの諸現象とも絡んでいるが、これまで現場観測が著しく不足していたために定量的な解析が困難であった。日本ではArCS/ArCS II プロジェクトの「みらい」北極航海において、レーダーや波浪ブイなどを駆使した海水と波浪の同時観測に着手した段階であり、この知見が蓄積することで波浪モデルが改良されて北極海航路の利活用に深く関わる海水予測精度の向上にも大きく貢献することが期

待される。

生態系・物質循環モデルに関しても改良の余地が多々あるが、このうちアイスアルジーについてはForum for Arctic Modeling and Observational Synthesis (FAMOS) の枠組みにおいて初のモデル間相互比較が実施され（Watanabe *et al.*, 2019）、将来予測や南極も含めた比較プロジェクトIce Algae Model Intercomparison Project Phase 2 (IAMIP2) に引き継がれている（Hayashida *et al.*, 2021）。こちらもMultidisciplinary drifting Observatory for the Study of Arctic Climate (MOSAiC; Table 1) やBiogeochemical Exchange Processes at Sea-Ice Interfaces (BEPsII) などに代表される観測活動と密に連携していくことが重要である。加えて、3.1.4節や3.2.2節で提案したような、海水を介した物質循環やプランクトンの輸送過程の定量的理解をもとにモデルの精度を高めていくことで、生態系・物質循環の理解や予測可能性が進展することが望まれる。

南極海においては、近年、棚氷と海洋循環の相互作用に着目したモデル開発が急速に進んでいる（Kusahara *et al.*, 2017）。また西南極で氷床の底面融解が駆動する海洋循環による鉄供給などの物質循環と生物生産プロセスを組み込んだ数値モデルが報告されている（Twelves *et al.*, 2021）。今後、日本が重点的ターゲット海域としている東南極において、3.2節で述べたような多分野連携観測によるプロセスの理解に基づいた氷床-海水-海洋システムの数値モデルの開発を行うことにより、物質循環と生態系変動の定量的な理解や東南極の独自性や重要性の解明につながることを期待される。

5. おわりに

極域は、気候変動によって大きく変化し、またその変化が全球海洋や気候に影響を及ぼす海域である。その重要性を背景に、近年様々な観測研究プロジェクトが推進され、新たな知見が多く得られてきた。それでもなお、極域の観測困難な環境ゆえに他の海域に比べてデータが圧倒的に不足しており、諸現象のプロセスの理解もモデル開発も不十分というのが現状である。このため、今後進められるべき緊急性の高い研究が数多く残されている。2節や3節で取り上げた研究課題の解決を目指した観測

の実施はもちろんのこと、各種データの充足と時空間的な分解能向上をモデル改良につなげることも必要である。そのためには、4節で提案した大型観測基盤以外にも、極域の環境に対応したセンサーや係留あるいは漂流観測装置の積極的な開発、改良、導入が望まれる。幸い我が国には、オホーツク海やサロマ湖など、新規手法や測器を実際に海氷域でテストするのに適した場所もある。このように、極域海洋では、新たな海洋観測技術開発やデータ空白域での観測などの挑戦が可能である。そしてその結果、未解明の事象や問題を発見し、全球規模の重要過程の解明につながる研究ブレイクスルーをもたらす可能性を秘めている。急速に変化しつつある極域の理解に努めることは我々に課せられた課題であるが、極域そのものが魅力ある海域であることも事実である。今後10年、海洋学を軸とした極域研究に新たな挑戦を試みる若手あるいは他分野の人材が多く現れることを期待する。

謝辞

本稿の作成にあたり、以下の方々（敬称略）と3名の匿名の査読者から貴重な助言をいただきました：池田元美、栗原晴子、近藤能子、豊田威信、林田博士、松野孝平、山崎開平。深く感謝申し上げます。

References

- 阿部紀恵・セイタ ロンパネン・豊島淳子・柴田明穂 (2021): 北極域の海洋プラスチック問題-国際法と海洋科学による共同研究の必要性. ArCSII 国際制度課題 ブリーフィングペーパー・シリーズ2, 8pp. https://www.research.kobe-u.ac.jp/gsecs-pcpc/pdf/ArCS2_Int'lLaw_BPS_02_J_FS_March_2021.pdf.
- Abe, Y., K. Matsuno, A. Fujiwara, and A. Yamaguchi (2020): Review of spatial and inter-annual changes in the zooplankton community structure in the western Arctic Ocean during summers of 2008-2017. *Prog. Oceanogr.*, **186**, 102391.
- Ahmed, M. M. M., B. G. T. Else, D. Capelle, L. A. Miller, and T. Papakyriakou (2020a): Underestimation of surface pCO₂ and air-sea CO₂ fluxes due to freshwater stratification in an Arctic shelf sea, Hudson Bay. *Elem. Sci. Anth.*, **8**, 084.
- Ahmed, R., T. Prowse, D. Yonas, B. Bonsal, and H. O'Neil (2020b): Recent trends in freshwater influx to the Arctic Ocean from major Arctic-draining rivers. *Water*, **12**, 1189, doi: 10.3390/w12041189.
- Aoki, S., K. Yamazaki, D. Hirano, K. Katsumata, K. Shimada, Y. Kitade, H. Sasaki, and H. Murase (2020): Reversal of freshening trend of Antarctic Bottom Water in the Australian-Antarctic Basin during 2010s. *Sci. Rep.*, **10**, 14415, doi: 10.1038/s41598-020-71290-6.
- Arrigo, K. R. *et al.* (1999): Phytoplankton community structure and the drawdown of nutrients and CO₂ in the Southern Ocean. *Science*, **283**, 365-367.
- Arrigo, K. R. (2014): Sea ice ecosystems. *Annu. Rev. Mar. Sci.*, **6**, 439-467.
- Baldry, K., P. G. Strutton, N. A. Hill, and P. W. Boyd (2020): Subsurface chlorophyll-*a* maxima in the Southern Ocean. *Front. Mar. Sci.*, **7**, 671, doi: 10.3389/fmars.2020.00671.
- Bolt, C., A. Aguilar-Islas, and R. Rember (2020): Particulate trace metals in Arctic snow, sea ice, and underlying surface waters during the 2015 US western Arctic GEOTRACES cruise GN01. *ACS Earth Space Chem.*, **4**, 2444-2460.
- Bond, T. C. *et al.* (2013): Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **118**, 5380-5552.
- Bundy, R., M., A. Tagliabue, N. J. Hawco, P. L. Morton, B. S. Twining, M. Hata, A. E. Noble, M. R. Cape, S. G. John, J. T. Cullen, and M. A. Saito (2020): Elevated sources of cobalt in the Arctic Ocean. *Biogeosciences*, **17**, 4745-4767.
- Caesar, L., G. D. McCarthy, D. J. R. Thornalley, and S. Rahmstorf (2021): Current Atlantic Meridional Overturning Circulation weakest in last millennium. *Nat. Geosci.*, **14**, 118-120.
- Carlsson, P., K. Breivik, E. Brorström-Lundén, I. Cousins, J. Christensen, J. O. Grimalt, C. Halsall, R. Kallenborn, K. Abass, G. Lammel, J. Munthe, M. MacLeod, J. O. Odland, J. Pawlak, A. Rautio, L.-O. Reiersen, M. Schlabach, I. Stemmler, S. Wilson, and H. Wöhrnschimmel (2018): Polychlorinated biphenyls (PCBs) as sentinels for the elucidation of Arctic environmental change processes: a comprehensive review combined with ArcRisk project results. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, **25**, 22499-22528.
- Cavan, E. L., A. Belcher, A. Atkinson, S. L. Hill, S. Kawaguchi, S. McCormack, B. Meyer, S. Nicol, L. Ratnarajah, K. Cchmidt, D. K. Steinberg, G. A. Tarling, and P. W. Boyd (2019): The importance of Antarctic Krill in biogeochemical cycles. *Nat. Commun.*, **10**, 4742, doi: 10.1038/s41467-019-12668-7.
- Chupakov, A. V., O. S. Pokrovsky, O. Y. Moreva, L. S. Shirokova, N. V. Neverova, A. A. Chupakova, E. I. Kotova, and T. Y. Vorobyeva (2020): High resolution multi-annual riverine fluxes of organic carbon, nutrient and trace element from the largest European Arctic river, Severnaya Dvina. *Chem. Geol.*, **538**, 119491.
- Close H. G., and L. C. Henderson (2020): Open-Ocean Minima in δ¹³C values of particulate organic carbon in the lower euphotic zone. *Front. Mar. Sci.*, **7**, 540165, doi: 10.3389/fmars.2020.540165.
- Colombo, M., S. L. Jackson, J. T. Cullen, and K. J. Orians (2020): Dissolved iron and manganese in the Canadian Arctic Ocean: On the biogeochemical processes controlling their distributions. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **277**, 150-174.
- Dinniman, M. S., P. St-Laurent, K. R. Arrigo, E. E. Hofmann, and G. L. van Dijken (2020): Analysis of iron sources in Antarctic continental shelf waters. *J. Geophys. Res. Oce.*, **125**, e2019JC015736.
- Docquier, D., and T. Koenigk (2021): Observation-based selection of climate models projects Arctic ice-free summers around 2035. *Comm. Earth Environ.*, **2**, 144, doi: 10.1038/s43247-021-00214-7.
- Eisner, L. B., Y. I. Zuenko, E. O. Basyuk, L. L. Britt, J. T. Duffy-Anderson, S. Kotwicki, C. Ladd, and W. Cheng (2020): Environmental impacts on walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*) distribution across the Bering

- Sea shelf. *Deep-Sea Res. Part II*, **181-182**, 104881.
- Ershova, E. A., K. N. Kosobokova, N. S. Banas, I. Ellingsen, B. Niehoff, N. Hildebrandt, and H. J. Hirche (2021): Sea ice decline drives biogeographical shifts of key Calanus species in the central Arctic Ocean. *Glob. Chang. Biol.*, **27**, 2128-2143, doi: 10.1111/gcb.15562.
- Evans, L. K., and J. Nishioka (2019): Accumulation processes of trace metals into Arctic sea ice: distribution of Fe, Mn and Cd associated with ice structure. *Mar. Chem.*, **209**, 36-47.
- Fosshem, M., R. Primicerio, E. Johannesen, R. B. Ingvaldsen, M. M. Aschan, and A. V. Dolgov (2015): Recent warming leads to a rapid borealization of fish communities in the Arctic. *Nat. Clim. Chang.*, **5**, 673-677.
- Fretwell, P. *et al.* (2013): Bedmap2: improved ice bed, surface and thickness datasets for Antarctica. *The Cryosphere*, **7**, 375-393.
- 蒲生俊敬 (2014) : 総論 : GEOTRACES 計画の進捗と新たな展開. 海洋の微量元素・同位体に関する GEOTRACES 観測研究, 月刊海洋, 号外 No.55, 5-11.
- Garrison, D. L., A. R. Close, and E. Reimnitz (1989): Algae concentrated by frazil ice: evidence from laboratory experiments and field measurements. *Antarctic Sci.*, **1**, 313-316.
- Graham, R. M. *et al.* (2019): Winter storms accelerate the demise of sea ice in the Atlantic sector of the Arctic Ocean. *Sci. Rep.*, **9**, 9222, doi: 10.1038/s41598-019-45574-5.
- Gruber, N., P. Landschützer, and N. S. Lovenduski (2019): The variable Southern Ocean carbon sink. *Annu. Rev. Mar. Sci.*, **11**, 159-186.
- 浜崎恒二・石坂丞二・齊藤宏明・杉崎宏哉・鈴木光次・高橋一生・千葉早苗 (2013): 海洋学の 10 年展望 (III) — 日本海洋学会将来構想委員会生物サブグループの議論から —. 海の研究, **22**, 253-272.
- Hayashida, H., M. Jin, N. S. Steiner, N. C. Swart, E. Watanabe, R. Fiedler, A. McC. Hogg, A. E. Kiss, R. J. Matear, and P. G. Strutton (2021): Ice Algae Model Intercomparison Project phase 2 (IAMIP2). *Geosci. Model Dev. Discuss.*, doi: 10.5194/gmd-2020-305.
- Hioki, N., K. Kuma, Y. Morita, R. Sasayama, A. Ooki, Y. Kondo, H. Obata, J. Nishioka, Y. Yamashita, S. Nishino, T. Kikuchi, and M. Aoyama (2014): Laterally spreading iron, humic-like dissolved organic matter and nutrients in cold, dense subsurface water of the Arctic Ocean. *Sci. Rep.*, **4**, 6775, doi: 10.1038/srep06775.
- 平井惇也・宮正樹・藤木徹一・吉田聡・乙坂重嘉・埴山秀樹・加古真一郎・片岡智哉・松岡大祐・日高弥子・杉山大祐・小嶋不二夫 (2021) : 海洋学の 10 年展望 : 新たな手法と問題. 海の研究, **30**, 227-253.
- Hirano, D., Y. Fukamachi, K. I. Ohshima, E. Watanabe, A. R. Mahoney, H. Eicken, M. Itoh, D. Simizu, K. Iwamoto, J. Jones, T. Takatsuka, T. Kikuchi, and T. Tamura (2018): Winter water formation in coastal polynyas of the eastern Chukchi Shelf: Pacific and Atlantic influences. *J. Geophys. Res. Océ.*, **123**, 5688-5705.
- Hirano, D., T. Tamura, K. Kusahara, K. I. Ohshima, K. W. Nicholls, S. Ushio, D. Shimizu, K. Ono, M. Fujii, Y. Nogi, and S. Aoki (2020): Strong ice-ocean interaction beneath Shirase Glacier Tongue in East Antarctica. *Nat. Commun.*, **11**, 4221, doi: 10.1038/s41467-020-17527-4.
- Holmes, R. M., J. W. McClelland, S. E. Tank, R. G. M. Spencer, and A. I. Shiklomanov (2021): Arctic Great Rivers Observatory. *Water Quality Dataset*, <https://www.arcticgreatrivers.org/data>
- Honda, M., J. Inoue, and S. Yamane (2009): Influence of low Arctic sea-ice minima on anomalously cold Eurasian winters. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L08707.
- Huntington, H. P., S. L. Danielson, F. K. Wiese, M. Baker, P. Boveng, J. J. Citta, A. De Robertis, D. M. S. Dickson, E. Farley, J. C. George, K. Iken, D. G. Kimmel, K. Kuletz, C. Ladd, R. Levine, L. Quakenbush, P. Stabeno, K. M. Stafford, D. Stockwell, and C. Wilson (2020): Evidence suggests potential transformation of the Pacific Arctic ecosystem is underway. *Nat. Clim. Chang.*, **10**, 342-348.
- IPCC (2014): Climate Change 2014: *Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by R. K. Pachauri and L. A. Meyer, IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- IPCC (2019): *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*, edited by H.-O. Pörtner *et al.*, in press.
- Iida, T., T. Odate, and M. Fukuchi (2013): Long-term trends of nutrients and apparent oxygen utilization south of the polar front in Southern Ocean intermediate water from 1965 to 2008. *PLoS One*, **8**, e71766.
- Inoue, J., M. E. Hori, and K. Takaya (2012): The role of Barents sea ice in the wintertime cyclone track and emergence of a Warm-Arctic Cold-Siberian anomaly. *J. Climate*, **25**, 2561-2568.
- Ito, M., K. I. Ohshima, Y. Fukamachi, G. Mizuta, Y. Kusumoto, and J. Nishioka (2017): Observations of frazil ice formation and upward sediment transport in the Sea of Okhotsk: A possible mechanism of iron supply to sea ice. *J. Geophys. Res. Océ.*, **122**, 788-802.
- Ito, T., M. Woloszyn, and M. Mazloff (2010): Anthropogenic carbon dioxide transport in the Southern Ocean driven by Ekman flow. *Nature*, **463**, 80-83.
- Jensen, L. T., P. Morton, B. S. Twining, M. I. Heller, M. Hatta, C. I. Measures, S. John, R. Zhang, P. Pinedo-Gonzalez, R. M. Sherrell, and J. N. Fitzsimmons (2020): A comparison of marine Fe and Mn cycling: U.S. GEOTRACES GN01 Western Arctic case study. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **288**, 138-160.
- Jia, Z., K. M. Swadling, K. M. Meiners, S. Kawaguchi, and P. Virtue (2016): The zooplankton food web under East Antarctic pack ice—A stable isotope study. *Deep-Sea Res. Part II*, **131**, 189-202.
- Johnson, G. C. (2008): Quantifying Antarctic Bottom Water and North Atlantic Deep Water volumes. *J. Geophys. Res. Océ.*, **113**, C05027, doi: 10.1029/2007JC004477.
- 神田稷太・石井雅男・小川浩史・小笠恒夫・小畑元・川合美千代・鈴木昌弘・本多牧生・山下洋平・渡邊豊 (2013): 海洋学の 10 年展望 (II) — 日本海洋学会将来構想委員会化学サブグループの議論から —. 海の研究, **22**, 219-251.
- Kanna, N., T. Toyota, and J. Nishioka (2014): Iron and macro-nutrient concentrations in sea ice and their impact on the nutritional status of surface waters in the southern Okhotsk Sea. *Prog. Oceanogr.*, **126**, 44-57.
- Kashiwase, H., K. I. Ohshima, S. Nishashi, and H. Eicken (2017): Evidence for ice-ocean albedo feedback in the Arctic Ocean shifting to a seasonal ice zone. *Sci. Rep.*, **7**, 8170, doi: 10.1038/s41598-017-08467-z.
- Khaliwala, S., F. Primeau, and T. Hall (2009): Reconstruction of the history of anthropogenic CO₂ concentrations in the ocean. *Nature*, **462**, 346-349.
- 木田新一郎・栗原晴子・大林由美子・川合美千代・近藤能子・西岡純 (2021) : 海洋学の 10 年展望 2021 : 沿岸域. 海の研究, **30**, 87-104.
- Kishi, S., K. I. Ohshima, J. Nishioka, N. Isshiki, S. Nishashi, and S. Riser (2021): The prominent spring bloom and its relation to sea ice melt in the Sea of Okhotsk, revealed by profiling floats. *Geophys. Res. Lett.*, **48**

- doi: 10.1029/2020GL091394.
- Kiuchi, M., D. Nomura, D. Hirano, T. Tamura, G. Hashida, S. Ushio, D. Shimizu, K. Ono, and S. Aoki (2021): The effect of basal melting of the Shirase Glacier Tongue on the CO₂ system in Lützow-Holm Bay, East Antarctica. *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, **126**, e2020JG005762, doi: 10.1029/2020JG005762.
- Kondo, Y., H. Obata, N. Hioki, A. Ooki, S. Nishino, T. Kikuchi, and K. Kuma (2016): Transport of trace metals (Mn, Fe, Ni, Zn and Cd) in the western Arctic Ocean (Chukchi Sea and Canada Basin) in late summer 2012. *Deep-Sea Res. Part I*, **116**, 236–252.
- Krumpen, T., H. J. Belter, A. Boetius, E. Damm, C. Haas, S. Hendricks, M. Nicolaus, E.-M. Nöthig, S. Paul, I. Peeken, R. Ricker, and R. Stein (2019): Arctic warming interrupts the Transpolar Drift and affects long-range transport of sea ice and ice-rafted matter. *Sci. Rep.*, **9**, 5459, doi.org/10.1038/s41598-019-41456-y.
- Kusahara, K., H. Hasumi, A. D. Fraser, S. Aoki, K. Shimada, G. D. Williams, R. A. Massom, and T. Tamura (2017): Modeling ocean-cryosphere interactions off Adélie and George V Land, East Antarctica. *J. Climate*, **30**, 163–188.
- Kwok, R., G. Spreen, and S. Pang (2013): Arctic sea ice circulation and drift speed: Decadal trends and ocean currents. *J. Geophys. Res. Océ.*, **118**, doi: 10.1002/jgrc.20191.
- Kwok, R. (2018): Arctic sea ice thickness, volume, and multiyear ice coverage: losses and coupled variability (1958–2018). *Environ. Res. Lett.*, **13**, 105005.
- Lannuzel, D., M. Vancoppenolle, P. van der Merwe, J. de Jong, K. M. Meiners, M. Grotti, J. Nishioka, and V. Schoemann (2016): Iron in sea ice: Review and new insights. *Elem. Sci. Anth.*, **4**, 000130, doi: 10.12952/journal.elementa.000130.
- Lee, C. M. *et al.* (2012): Marginal Ice Zone (MIZ) Program: Science and Experiment Plan. Technical Report, Applied Physics Laboratory, University of Washington, <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA566290.pdf>
- Lento, J. *et al.* (2019): *State of the Arctic Freshwater Biodiversity*. Conservation of Arctic Flora and Fauna International Secretariat, Akureyri, Iceland. ISBN 978-9935-431-77-6.
- Lewis, K. M., G. L. van Dijken, and K. R. Arrigo (2020): Changes in phytoplankton concentration now drive increased Arctic Ocean primary production. *Science*, **369**, 198–202.
- Mathis, J. T. *et al.* (2012): Storm-induced upwelling of high pCO₂ waters onto the continental shelf of the western Arctic Ocean and implications for carbonate mineral saturation states. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, doi: 10.1029/2012GL051574.
- Meiners, K., R. Brinkmeyer, M. A. Granskog, and A. Lindfors (2004): Abundance, size distribution and bacterial colonization of exopolymer particles in Antarctic sea ice (Bellingshausen Sea). *Aquat. Microb. Ecol.*, **35**, 283–296.
- Mizobata, K., K. Shimada, S. Saitoh, and J. Wang (2010): Estimation of heat flux through the eastern Bering Strait. *J. Oceanogr.*, **66**, 405–424.
- Mizobata, K., K. Shimada, S. Aoki, and Y. Kitade (2020): The cyclonic eddy train in the Indian Ocean sector of the Southern Ocean as revealed by satellite radar altimeters and in situ measurements. *J. Geophys. Res. Océ.*, **125**, e2019JC015994, doi: 10.1029/2019jc015994.
- Mizobata, K. (2021): Reconstruction of Bering Strait volume transport suggesting the contribution of Bering Sea continental shelf to the pressure head forcing. *Polar Sci.*, **27**, 100560.
- Moore, G. W. K., A. Schweiger, J. Zhang, and M. Steele (2018a): Collapse of the 2017 winter Beaufort High: A response to thinning sea ice? *Geophys. Res. Lett.*, **45**, 2860–2869.
- Moore, J. K., W. Fu, F. Primeau, G. L. Britten, K. Lindsay, M. Long, M., S. C. Doney, N. Mahowald, F. Hoffman, and J. T. Randerson (2018b): Sustained climate warming drives declining marine biological productivity. *Science*, **359**, 1139–1143.
- Mori, M., Y. Kosaka, M. Watanabe, H. Nakamura, and M. Kimoto (2019): A reconciled estimate of the influence of Arctic sea-ice loss on recent Eurasian cooling. *Nat. Clim. Chang.*, **9**, 123–129.
- Natsuike, M., K. Matsuno, T. Hirawake, A. Yamaguchi, S. Nishino and I. Imai (2017): Possible spreading of toxic *Alexandrium tamarense* blooms on the Chukchi Sea shelf with the inflow of Pacific summer water due to climatic warming. *Harmful Algae*, **61**, 80–86.
- Nishino, S., M. Itoh, W. J. Williams, and I. Semiletov (2013): Shoaling of the nutricline with an increase in near-freezing temperature water in the Makarov Basin. *J. Geophys. Res. Océ.*, **118**, 635–649.
- Nishino, S., T. Kikuchi, A. Fujiwara, T. Hirawake, and M. Aoyama (2016): Water mass characteristics and their temporal changes in a biological hotspot in the southern Chukchi Sea. *Biogeosciences*, **13**, 2563–2578.
- Nishioka, J., H. Mitsudera, I. Yasuda, H. Liu, T. Nakatsuka, and Y. N. Volkov (2014): Biogeochemical and physical processes in the Sea of Okhotsk and the linkage to the Pacific Ocean. *Prog. Oceanogr.*, **126**, 1–7.
- Nomura, D., M. A. Granskog, A. Fransson, M. Chierici, A. Silyakova, K. I. Ohshima, L. Cohen, B. Delille, S. R. Hudson, and G. S. Dieckmann (2018): CO₂ flux over young and snow-covered Arctic pack ice in winter and spring. *Biogeosciences*, **15**, 3331–3343.
- Nomura, D. *et al.* (2020): Saroma-ko Lagoon Observations for sea ice Physico-chemistry and Ecosystems 2019 (SLOPE2019). *Bull. Glaciol. Res.*, **38**, 1–12.
- Notz, D., and SIMIP Community (2020): Arctic sea ice in CMIP6. *Geophys. Res. Lett.*, **47**, e2019GL086749.
- Ohshima, K. I. and S. Martin (2004): Introduction to special section: oceanography of the Okhotsk Sea. *J. Geophys. Res. Océ.*, **109**, C09S01, doi: 10.1029/2004JC002604.
- Ohshima, K. I., Y. Fukamachi, G. D. Williams, S. Nihashi, F. Roquet, Y. Kitade, T. Tamura, D. Hirano, L. Herraiz-Borreguero, I. Field, M. Hindell, S. Aoki, and M. Wakatsuchi (2013): Antarctic Bottom Water production by intense sea-ice formation in the Cape Darnley Polynya. *Nat. Geosci.*, **6**, 235–240.
- Ohshima, K. I., S. Nihashi, and K. Iwamoto (2016): Global view of sea-ice production in polynyas and its linkage to dense/bottom water formation. *Geosci. Lett.*, **3**, doi: 10.1186/s40562-016-0045-4.
- 大島慶一郎・須藤齋・北川暁子 (2018): 巨大リザーバ: 南大洋・南極氷床, 低温科学, **76**. 北海道大学低温科学研究所, 284 pp.
- 岡英太郎・磯辺篤彦・市川香・升本順夫・須賀利雄・川合義美・大島慶一郎・島田浩二・羽角博康・見延庄士郎・早稲田卓爾・岩坂直人・河宮未知生・伊藤幸彦・久保田雅久・中野俊也・日比谷紀之・寄高博行 (2013): 海洋学の10年展望(1) — 日本海洋学会将来構想委員会物理サブグループの議論から —. 海の研究, **22**, 191–218.
- Ouyang, Z., D. Qi, L. Chen, T. Takahashi, W. Zhong, M. D. DeGrandpre, B. Chen, Z. Gao, S. Nishino, A. Murata, H. Sun, L. L. Robbins, M. Jin, and W.-J. Cai (2020): Sea-ice loss amplifies summertime decadal CO₂ increase in the western Arctic Ocean. *Nat. Clim. Chang.*, **10**, 678–684.

- Overland, J. E., T. J. Ballinger, J. Cohen, J. A. Francis, E. Hanna, R. Jaiser, B.-M. Kim, S.-J. Kim, J. Ukita, T. Vihma, M. Wang, and X. Zhang (2021): How do intermittency and simultaneous processes obfuscate the Arctic influence on midlatitude winter extreme weather events? *Environ. Res. Lett.*, **16**, 043002.
- Paolo, F. S., H. A. Fricker, and L. Padman (2015): Volume loss from Antarctic ice shelves is accelerating. *Science*, **348**, 327–331.
- Park, H., E. Watanabe, Y. Kim, I. Polyakov, K. Oshima, X. Zhang, J. S. Kimball, and D. Yang (2020): Increasing riverine heat influx triggers Arctic sea-ice decline and oceanic and atmospheric warming. *Sci. Adv.*, **6**, eabc4699, doi: 10.1126/sciadv.abc4699.
- Peeken, I., S. Primpke, B. Beyer, J. Gütermann, C. Katlein, T. Krumpfen, M. Bergmann, L. Hehemann, and G. Gerds (2018): Arctic sea ice is an important temporal sink and means of transport for microplastic. *Nat. Commun.*, **9**, 1505, doi: 10.1038/s41467-018-03825-5.
- Peralta-Ferriz, C., and R. A. Woodgate (2015): Seasonal and interannual variability of pan-Arctic surface mixed layer properties from 1979 to 2012 from hydrographic data, and the dominance of stratification for multiyear mixed layer depth shoaling. *Prog. Oceanogr.*, **134**, 19–53.
- Peralta-Ferriz, C., and R. A. Woodgate (2017): The dominant role of the East Siberian Sea in driving the oceanic flow through the Bering Strait—Conclusions from GRACE ocean mass satellite data and in situ mooring observations between 2002 and 2016. *Geophys. Res. Lett.*, **44**, 11472–11481.
- Petrou, K., K. G. Baker, D. A. Nielsen, A. M. Hancock, K. G. Schulz, and A. T. Davidson (2019): Acidification diminishes diatom silica production in the Southern Ocean. *Nat. Clim. Chang.*, **9**, 781–786.
- Polyakov, I. V., M. B. Alkire, B. A. Bluhm, K. A. Brown, E. C. Carmack, M. Chierici, S. L. Danielson, I. Ellingsen, E. A. Ershova, K. Gårdfeldt, R. B. Ingvaldsen, A. V. Pnyushkov, D. Slagstad and P. Wassmann (2020): Borealization of the Arctic Ocean in response to anomalous advection from sub-Arctic seas. *Front. Mar. Sci.*, **7**, 491, doi: 10.3389/fmars.2020.00491.
- Popova, E. E., A. Yool, A. C. Coward, Y. K. Aksenov, S. G. Alderson, B. A. de Cuevas, and T. R. Anderson (2010): Control of primary production in the Arctic by nutrients and light: insights from a high resolution ocean general circulation model. *Biogeosciences*, **7**, 3569–3691.
- Pratt, K. A., K. D. Custard, P. B. Shepson, T. A. Douglas, D. Pöhler, S. General, J. Zielcke, W. R. Simpson, U. Platt, D. J. Tanner, L. G. Huey, M. Carlsen, and B. H. Stirm (2013): Photochemical production of molecular bromine in Arctic surface snowpacks. *Nat. Geosci.*, **6**, 351–356.
- Pritchard, H., S. R. Ligtenberg, H. A. Fricker, D. G. Vaughan, M. R. van den Broeke, and L. Padman (2012): Antarctic ice-sheet loss driven by basal melting of ice shelves. *Nature*, **484**, 502–505.
- Proshutinsky, A., R. Krishfield, J. M. Toole, J. M., M.-L. Timmermans, W. Williams, S. Zimmermann, S. M. Yamamoto-Kawai, T. W. K. Armitage, D. Dukhovskoy, E. Golubeva, G. E. Manucharyan, G. Platov, E. Watanabe, T. Kikuchi, S. Nishino, M. Itoh, S.-H. Kang, K.-H. Cho, K. Tateyama, and J. Zhao (2019): Analysis of the Beaufort Gyre freshwater content in 2003–2018. *J. Geophys. Res. Oce.*, **124**, 9658–9689.
- Purkey, S. G., and G. C. Johnson (2010): Warming of global abyssal and deep Southern Ocean waters between the 1990s and 2000s: Contributions to global heat and sea level rise budgets. *J. Climate*, **23**, 6336–6351.
- Purkey, S. G., and G. C. Johnson (2013): Antarctic Bottom Water warming and freshening: Contributions to sea level rise, ocean freshwater budgets, and global heat gain. *J. Climate*, **26**, 6105–6122.
- Rijkenberg, M. J. A., H. A. Slagter, M. Rutgers van der Loeff, J. van Oijen, and L. J. A. Gerringa (2018): Dissolved Fe in the deep and upper Arctic Ocean with a focus on Fe limitation in the Nansen Basin. *Front. Mar. Sci.*, **5**, 88, doi: 10.3389/fmars.2018.00088.
- Roach, L. A., C. M. Bitz, C. Horvat, and S. M. Dean (2019): Advances in modeling interactions between sea ice and ocean surface waves. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, **11**, 4167–4181.
- Ross, P. S., S. Chastain, E. Vassilenko, A. Etemadifar, S. Zimmermann, S.-A. Quesnel, J. Eert, E. Solomon, S. Patankar, A. M. Posacka, and B. Williams (2021): Pervasive distribution of polyester fibres in the Arctic Ocean is driven by Atlantic input. *Nat. Commun.*, **12**, doi: 10.1038/s41467-020-20347-1.
- Sarmiento, J. L., N. Gruber, M. A. Brzezinski, and J. P. Dunne (2004): High-latitude controls of thermocline nutrients and low latitude biological productivity. *Nature*, **427**, 56–60.
- Sato, K., and J. Inoue (2018): Comparison of Arctic sea ice thickness and snow depth estimates from CFSR with in situ observations. *Clim. Dyn.*, **50**, 289–301.
- Schaefer, K., Y. Elshorbany, E. Jafarov, P. F. Schuster, R. G. Striegl, K. P. Wickland, and R. M. Sunderland (2020): Potential impacts of mercury released from thawing permafrost. *Nat. Commun.*, **11**, doi: 10.1038/s41467-020-18398-5.
- Schnack-Schiel, S. B., D. N. Thomas, C. Haas, G. S. Dieckmann, and R. Alheit (2001): The occurrence of the copepods *Stephos longipes* (Calanoida) and *Drescheriella glacialis* (Harpacticoida) in summer sea ice in the Weddell Sea, Antarctica. *Antarctic Sci.*, **13**, 150–157.
- Semiletov, I., I. Pipko, Ö. Gustafsson, L. G. Anderson, V. Sergienko, S. Pugach, O. Dudarev, A. Charkin, A. Gukov, L. Bröder, A. Andersson, E. Spivak, and N. Shakhova (2016): Acidification of East Siberian Arctic Shelf waters through addition of freshwater and terrestrial carbon. *Nat. Geosci.*, **9**, 361–365.
- Shadwick, E. H., S. Rintoul, B. Tilbrook, G. Williams, N. Young, J. Smith, H. Marchant, A. Fraser, and T. Tamura (2013): Glacier tongue calving reduced dense water formation and enhanced biological carbon uptake. *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 1–6.
- Shakhova, N., I. Semiletov, A. Salyuk, V. Yusupov, D. Kosmach, and O. Gustafsson (2010): Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Siberian Arctic shelf. *Science*, **327**, 1246–1250.
- Shepherd, A. et al. (2018): Mass balance of the Antarctic Ice Sheet from 1992 to 2017. *Nature*, **558**, 219–222.
- Shepherd, A. et al. (2020): Mass balance of the Greenland Ice Sheet from 1992 to 2018. *Nature*, **579**, 233–239.
- Shiozaki, T., A. Fujiwara, K. Inomura, Y. Hirose, F. Hashihama, and N. Harada (2020): Biological nitrogen fixation detected under Antarctic sea ice. *Nat. Geosci.*, **13**, 729–732.
- Sigman, D. M. and E. A. Boyle (2000): Glacial/interglacial variations in atmospheric carbon dioxide. *Nature*, **407**, 859–869.
- Spall, M. A., R. S. Pickart, E. T. Brugler, G. W. K. Moore, L. Thomas, and K. Arrigo (2014): Role of shelfbreak upwelling in the formation of a massive under-ice bloom in the Chukchi Sea. *Deep-Sea Res. Part II*, **105**, 17–29.
- Spreen, G., R. Kwok, and D. Menemenlis (2011): Trends in Arctic sea ice

- drift and role of wind forcing: 1992–2009. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, doi: 10.1029/2011GL048970.
- Spreen, G., L. de Steur, D. Divine, S. Gerland, E. Hansen, R. Kwok (2020): Arctic sea ice volume export through Fram Strait from 1992 to 2014. *J. Geophys. Res. Océ.*, **125**, e2019JC016039, doi: 10.1029/2019JC016039.
- Stowasser, G., A. Atkinson, R. A. R. McGill, R. A. Phillips, M. A. Collins, and D. W. Pond (2012): Food web dynamics in the Scotia Sea in summer: A stable isotope study. *Deep-Sea Res. Part II*, **59-60**, 208–221.
- Søreide, J. E., E. Leu, J. Berge, M. Graeve, and S. Falk-Petersen (2010): Timing of blooms, algal food quality and *Calanus glacialis* reproduction and growth in a changing Arctic. *Glob. Chang. Biol.*, **16**, 3154–3163.
- 宗林由樹 (2016): 微量元素の高精度分析法の開発と海洋化学への応用. 海の研究, **25**, 145–155.
- Tamura, T., G. D. Williams, A. D. Fraser, and K. I. Ohshima (2012): Potential regime shift in decreased sea ice production after the Mertz Glacier calving. *Nat. Commun.*, **3**, doi: 10.1038/ncomms1820.
- Terhaar, J., R. Lauerwald, P. Regnier, N. Gruber, and L. Bopp (2021): Around one third of current Arctic Ocean primary production sustained by rivers and coastal erosion. *Nat. Commun.*, **12**, doi: 10.1038/s41467-020-20470-z.
- Timmermans, M.-L., J. Toole, and R. Krishfield (2018): Warming of the interior Arctic Ocean linked to sea ice losses at the basin margins. *Sci. Adv.*, **4**, eaat6773.
- Toyota, T., T. Kawamura, K. I. Ohshima, H. Shimoda, and M. Wakatsuchi (2004): Thickness distribution, texture and stratigraphy, and a simple probabilistic model for dynamical thickening of sea ice in the southern Sea of Okhotsk. *J. Geophys. Res. Océ.*, **109**, C06001, doi: 10.1029/2003JC002090.
- Tsukada, Y., H. Ueno, N. Ohta, M. Itoh, E. Watanabe, T. Kikuchi, S. Nishino, and K. Mizobata (2018): Interannual variation in solar heating in the Chukchi Sea, Arctic Ocean. *Polar Sci.*, **17**, 33–39.
- Twelves, A. G., D. N. Goldberg, S. F. Henley, M. R. Mazloff, and D. C. Jones (2021): Self-shading and meltwater spreading control the transition from light to iron limitation in an Antarctic coastal polynya. *J. Geophys. Res. Océ.*, **126**, e2020JC016636.
- Uemura, R. *et al.* (2018): Asynchrony between Antarctic temperature and CO₂ associated with obliquity over the past 720,000 years. *Nat. Commun.*, **9**, doi: 10.1038/s41467-018-03328-3.
- Uotila, P. *et al.* (2019): An assessment of ten ocean reanalyses in the polar regions. *Clim. Dyn.*, **52**, 1613–1650.
- Vancoppenolle, M., K. M. Meiners, C. Michel, L. Bopp, F. Brabant, G. Carnat, B. Delille, D. Lannuzel, G. Madeca, S. Moreau, J. L. Tison, and P. van der Merwe (2013a): Role of sea ice in global biogeochemical cycles: emerging views and challenges. *Quat. Sci. Rev.*, **79**, 207–230.
- Vancoppenolle, M., L. Bopp, G. Madec, J. Dunne, T. Ilyina, P. R. Halloran, and N. Steiner (2013b): Future Arctic Ocean primary productivity from CMIP5 simulations: Uncertain outcome, but consistent mechanisms. *Global Biogeochem. Cycles*, **27**, 605–619.
- Watanabe, E., J. Onodera, N. Harada, M. C. Honda, K. Kimoto, T. Kikuchi, S. Nishino, K. Matsuno, A. Yamaguchi, A. Ishida, and M. J. Kishi (2014): Enhanced role of eddies in the Arctic marine biological pump. *Nat. Commun.*, **5**, doi: 10.1038/ncomms4950.
- Watanabe, E., M. Jin, H. Hayashida, J. Zhang, and N. Steiner (2019): Multi-model intercomparison of the pan-Arctic ice-algal productivity on seasonal, interannual, and decadal timescales. *J. Geophys. Res. Océ.*, **124**, 9053–9084.
- Williams, T. D., L. G. Bennetts, V. A. Squire, D. Dumont, and L. Bertino (2013): Wave-ice interactions in the marginal ice zone. Part I: Theoretical foundations. *Ocean Modell.*, **71**, 81–91.
- Woodgate, R. A., and C. Peralta-Ferriz (2021): Warming and freshening of the Pacific inflow to the Arctic from 1990–2019 implying dramatic shoaling in Pacific Winter Water ventilation of the Arctic water column. *Geophys. Res. Lett.*, **48**, e2021GL092528, doi: 10.1029/2021GL092528.
- Wrona, F. J., M. Johansson, J. M. Culp, A. Jenkins, J. Mård, I. H. Myers-Smith, T. Prowse, W. F. Vincent, and P. A. Wookey (2016): Transitions in Arctic ecosystems: Ecological implications of a changing hydrological regime. *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, **121**, 650–674.
- Yakushev, E., A. Gebruk, A. Osadchiev, S. Pakhomova, A. Lusher, A. Berezina, B. van Bavel, E. Vorozheikina, D. Chernykh, G. Kolbasova, I. Razgon, and I. Semiletov (2021): Microplastics distribution in the Eurasian Arctic is affected by Atlantic waters and Siberian rivers. *Commun. Earth Environ.*, **2**, 1–10.
- Yamamoto-Kawai, M., F. McLaughlin, and E. Carmack (2013): Ocean acidification in the three oceans surrounding northern North America. *J. Geophys. Res. Océ.*, **118**, 6274–6284.
- Yamamoto-Kawai, M., T. Mifune, T. Kikuchi, and S. Nishino (2016): Seasonal variation of CaCO₃ saturation state in bottom water of a biological hotspot in the Chukchi Sea, Arctic Ocean. *Biogeosciences*, **13**, 6155–6169.
- Yasunaka, S., E. Siswanto, A. Olsen, M. Hoppema, E. Watanabe, A. Fransson, M. Chierici, A. Murata, S. K. Lauvset, R. Wanninkhof, T. Takahashi, N. Kosugi, A. M. Omar, S. van Heuven, and J. T. Mathis (2018): Arctic Ocean CO₂ uptake: an improved multiyear estimate of the air-sea CO₂ flux incorporating chlorophyll *a* concentrations. *Biogeosciences*, **15**, 1643–1661.
- Zakem, E. J., and N. M. Levine (2019): Systematic variation in marine dissolved organic matter stoichiometry and remineralization ratios as a function of lability. *Global Biogeochem. Cycles*, **33**, 1389–1407.
- Zhang, Y., M. Yamamoto-Kawai, and W. J. Williams (2020): Two decades of ocean acidification in the surface waters of the Beaufort Gyre, Arctic Ocean: effects of sea ice melt and retreat from 1997–2016. *Geophys. Res. Lett.*, **47**, e60119.
- Zolkos, S., D. P. Krabbenhoft, A. Suslova, S. E. Tank, J. W. McClelland, R. G. M. Spencer, A. Shiklomanov, A. V. Zhulidov, T. Gurtovaya, N. Zimov, S. Zimov, E. A. Mutter, L. Kutny, E. Amos, and R. M. Holmes (2020): Mercury export from Arctic great rivers. *Environ. Sci. Technol.*, **54**, 4140–4148.

Decadal vision in oceanography 2021: Polar oceans

Michiyo Yamamoto-Kawai^{1*}, Takeshi Tamura², Eiji Watanabe³, Jun Nishioka⁴,
Daiki Nomura⁵, Ryusuke Makabe², Kohei Mizobata¹, and Sayaka Yasunaka³

Abstract

Future research challenges in polar oceanography for Japanese oceanographic community are discussed. For both the Arctic and Southern Oceans, the key issues identified are transport of heat and materials from lower latitude ocean regions, the role of sea ice in material transport and biological production, and processes in coastal areas. These topics must be understood quantitatively to better predict future changes in the polar regions. In addition, we propose a novel field campaign to observe ocean-sea ice-air fluxes in early spring, and a comprehensive study of ocean-sea ice-icesheet coupling for the Arctic Ocean and the Southern Ocean, respectively. For the future development of polar oceanography, we also propose new research infrastructures such as submersible research vessels, submarine observation bases, and coastal observation towers, as well as the use of the Sea of Okhotsk and Lake Saroma as a nearby model polar ocean.

Key words: Arctic Ocean, Southern Ocean, sea ice/icesheet, land-ocean interaction,
Polar morning

(Corresponding author's e-mail address: michiyo@kaiyodai.ac.jp)

(Received 15 July 2021; accepted 14 September 2021)

(doi: 10.5928/kaiyou.30.5_159)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2021)

1 Department of Ocean Science, Tokyo University of Marine Science and Technology, 4-5-7 Konan, Minato-ku, Tokyo 108-8477, Japan

2 National Institute of Polar Research, 10-3 Midoricho, Tachikawa, Tokyo 190-8518, Japan

3 Research Institute for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2-15 Natsushima-cho, Yokosuka, Kanagawa 237-0061, Japan

4 Pan-Okhotsk Research Center, Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, 19N8W, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido 060-0819, Japan

5 Field Science Center for Northern Biosphere, Hokkaido University, 3-1-1 Minato-cho, Hakodate, Hokkaido 041-8611, Japan

* Corresponding author: Michiyo Yamamoto-Kawai
e-mail: michiyo@kaiyodai.ac.jp