

氏 名 高橋 啓伍

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 2410 号

学位授与の日付 2023 年 3 月 24 日

学位授与の要件 複合科学研究科 極域科学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 南大洋インド洋区における氷縁ブルーム形成へのアイスアル
ジーの播種効果

論文審査委員 主 査 平譚 享
極域科学専攻 教授
真壁 竜介
極域科学専攻 助教
田村 岳史
極域科学専攻 准教授
高尾 信太郎
国立環境研究所 地球システム領域 主任研究員
黒沢 則夫
創価大学 大学院理工学研究科 教授

博士論文の要旨

氏名 高橋 啓伍

論文題目 南大洋インド洋区における氷縁ブルーム形成へのアイスアルジーの播種効果

南大洋における植物プランクトンによる基礎生産は、季節的に変化する海氷の消長と密接に関わっている。春から夏の海氷縁付近では植物プランクトンの大発生が見られ、これを氷縁ブルームと呼ぶ。氷縁ブルームの形成には、海氷融解による成層化（光環境の改善）、海氷からの鉄（栄養物質）の供給およびアイスアルジー（海氷中に生息する微細藻類）の放出が鍵となると考えられている。しかし南大洋の氷縁ブルームの分布は非一様であるため、光環境の改善のみでは氷縁ブルーム形成には至らない。したがって残り2つの鍵が重要となる。鉄の供給に関してはモデルや現場観測により海氷からのフラックスが推定されているものの、アイスアルジーの放出と氷縁ブルームとの関係については種組成を含めた総合的な理解に乏しい。アイスアルジーは海氷から放出された後、水中で氷縁ブルームを形成する「タネ」として増殖すること（播種）だけでなく、放出そのものが種組成の変化に繋がる可能性がある。近年、水中の基礎生産力と沈降フラックスが植物プランクトンの優占種によって異なることが報告されている。そのため、氷縁ブルームの形成だけでなく、その構成種を理解するには海氷からのアイスアルジー放出とその後の増殖に関する理解が欠かせない。

室内培養実験による先行研究結果から、海水環境に適応し氷縁ブルームの優占種となるアイスアルジーは一部の種に限られることが判明している。したがって、海氷から放出される種と量は、氷縁ブルームにおける播種効果を知るうえで重要な要素である。また、南大洋氷縁域において形成されるアイスアルジー群集と、それらが海氷融解とともに水中に放出されることで表層水中の植物プランクトン種組成や現存量に与える影響を明らかにすることは、氷縁ブルーム形成機構の理解につながる。しかし従来の海氷観測は、氷上でコア採取が可能な春季もしくは夏季の沿岸域に偏っており、これらの知見をもとにしてより沖合（海氷密接度が40%未満となるような海氷縁辺域）におけるアイスアルジーと氷縁ブルームの関係を推定してきた。そこで本研究では、夏季（12月から2月）のアイスアルジー観測が特に少ない南大洋インド洋区を対象として、生成期および融解期の海氷を採取し、氷縁ブルーム形成におけるアイスアルジーの播種の役割を明らかにすることを目的とした。

本研究では初めに、沿岸における海氷生成時および夏季融解直前のアイスアルジー群集種組成を調査した。2月末から3月の海氷生成期に、一年氷・多年氷（生成して1年以上経過した海氷）、薄氷（氷厚20 cm未満の生成して間もない海氷）、海水を採取して藻類群集種組成を比較したところ、海水試料は大部分の薄氷試料と同一のクラスターを形成し、海水から海氷に植物プランクトンを取込むことがアイスアルジーの初期群集に重要であることを確認した。また薄氷中のアイスアルジーは珪藻とナノ鞭毛藻などが混合した群集である一方、一年氷と多年氷中では珪藻*Fragilariopsis cylindrus*が単独で優占する群集であった。薄氷への種別の取込み量は、ナノ鞭毛藻と中心珪藻（*Chaetoceros* spp.）に比べ羽状珪藻（*F. cylindrus*、*F. curta*）が高かった（中央値で3.0倍以上）。以上の結果から、融解期にタネとなりうるアイスアルジーは*F. cylindrus*と考えられ、その形成において薄氷への選択的取込みと海氷の成長にともなう種遷移の重要性が明らかとなった。

融解直前の海氷中で一部の珪藻が優占するという結果を踏まえ、次に海水中への播種に寄与する種を特定するため、季節海氷域の植物プランクトン種組成の水平方向の変化とアイスアルジー種組成を比較した。2018年から2020年の各年1月における氷縁の海氷および南北に設定した観測点の海水試料について、海氷と海水間の種組成の類似度指数を算出した。アイスアルジー種組成はいずれの年も珪藻*F. cylindrus*が75%以上を占めていた。氷縁近傍の表層水中においても同種が優占し、かつ類似度指数が氷縁から離れるほど低下する傾向も3年間で共通していた。また、類似度指数は海氷後退からの経過日数および観測時の表層水温と負の相関を持ち、海氷融解から3週間以内であれば、海氷に対する植物プランクトンの種組成の類似度は0.69以上と高い値であった。*Fragilariopsis cylindrus*は海氷縁辺域の水柱環境（成層化がもたらす高い光量および低水温）に適応能力が高いため、海氷内で優占する本種が海氷融解に伴い放出されたことが、氷縁での高い類似度に寄与したと考えられる。よって本種が海氷融解による播種にとって最も重要な種であると結論された。

一部の珪藻（*F. cylindrus*）が海水中の播種を起こすことが示唆されたが、氷縁ブルーム形成においては、海氷からのアイスアルジーの放出および増殖（増加）と摂餌や沈降による死亡（消失）のバランスが重要である。過去の研究では培養実験に基づいてアイスアルジーが海水に近い環境に適応して増殖することが報告されているが、摂餌や沈降といった消失量を評価することが出来ず、潜在能力の評価に留まっている。また、現場観測によるアイスアルジーの放出量および消失量の実測も定着氷下での例に限られている。そこで可能な限り現場データに基づいて、放出されたアイスアルジー（*F. cylindrus*、*F. curta*、ナノ鞭毛藻）の純増加量（細胞分裂による増加量から摂餌や沈降によって水中から除去された量を引いたもの）を推定した。氷縁で採取した海氷と水温・塩分プロファイルおよび衛星データによる熱収支解析から、過去30日間のアイスアルジー放出量を推定した。観測時の植物プランクトン現存量（実測値）から、アイスアルジー放出量と海氷融解前の植物プランクトン現存量（既報文献から引用）を減じて、放出されたアイスアルジーの純増加量を計算した。氷縁の海水中で優占した3種（*F. cylindrus*、*F. curta*、ナノ鞭毛藻）は30日間に正の純増加量、つまり摂餌や沈降による消失を超える増殖が可能であることが示唆された。特に2016年における増加量は、定着氷下の先行研究と比較して少なくとも23.8倍高かった。この原因として流氷域の低い海氷密接度による光環境の違いが考えられる。

本研究の新規かつ主要な知見として、珪藻*F. cylindrus*が海氷生成期から水中への放出後まで一貫して重要な種であることが明らかとなった。これは春季のインド洋区海氷中種組成が*F. curta*で代表されるという先行研究とは対照的であるため、アイスアルジー種組成の季節性を考慮する重要性を打ち出すことができた。また、*F. cylindrus*はインド洋区だけでなく、南大洋全体に渡って夏季に優占する種であり、周極的に同種の播種があると示唆される。さらに、従来の研究で提唱されてきた水柱の成層化に伴う光環境の改善に加え、海氷融解（海氷後退から間もないことおよびアイスアルジーの高い放出量）が氷縁ブルームに大きく寄与していることを初めて定量的に表すことができた。本研究を通して海氷へのプランクトンの取り込み、夏季までのアイスアルジー群集遷移、放出後の水柱での増殖全ての過程で種ごとに特性が異なることが示された。このことは海氷の消長とともに生じる藻類の動態を種レベルで把握することが、南大洋の低次生産システムの理解に重要であることを裏付けている。

博士論文審査結果

Name in Full
氏名 高橋 啓伍

Title
論文題目 南大洋インド洋区における氷縁ブルーム形成へのアイスアルジーの播種効果

南大洋における植物プランクトンの基礎生産は、季節変化する海氷の消長と密接な関係があり、特に春から夏の海氷縁付近では「氷縁ブルーム」と呼ばれる植物プランクトンの大発生が起こる。氷縁ブルームの形成要因は、海氷融解によって成層化した水柱の表層に植物プランクトンが留まれること（光環境の改善）、海氷からの栄養物質（鉄）供給、および、アイスアルジー（海氷中に生息する微細藻類）の放出が考えられるが、アイスアルジーの放出と氷縁ブルームとの関係については未解明の点が多い。アイスアルジーは海氷から放出された後、氷縁ブルームを形成する「タネ」として増殖する（播種）と考えられているが、海氷中および播種後の種組成の変化や増殖の可能性については理解に乏しい。また過去のアイスアルジーに関する知見は春季や夏季沿岸域に偏っており、沖合で発生する氷縁ブルームとの関係を論ずるには不十分であった。

申請者は、夏季（12月から2月）の南大洋インド洋区を対象とし、これまで知見が少なかった海氷生成期および融解期の海氷と海水を採取し、アイスアルジーおよび植物プランクトンの種組成と海洋環境を調べることで、氷縁ブルーム形成におけるアイスアルジーの播種の役割を明らかにし、5章からなる博士論文にまとめた。

第1章は緒言であり、地球規模炭素循環における対象海域とした南大洋の役割という大きな視点から始まり、本研究の対象である氷縁ブルーム形成メカニズムやアイスアルジー播種との関係について先行研究を網羅した上で、本研究の目的と意義を述べている。

第2章では、海氷生成期と海氷融解期直前のアイスアルジー群集および海水中の植物プランクトン群集の種組成を調べ、海氷生成期のアイスアルジー種組成が海水中の種組成と類似しており、植物プランクトンが海氷中に取り込まれることで、アイスアルジーの初期群集を形成することを示した。また、取り込み時の群集には珪藻類とナノ鞭毛藻類が混合しているが、融解期直前の海氷中には珪藻 *Fragilariopsis cylindrus* が単独で優占していることを示し、融解期にタネとなりうるアイスアルジーは *F. cylindrus* と考えられ、その形成において海氷への選択的取り込みと海氷の成長にともなう種遷移が重要であると結論付けた。

第3章では、海氷から海水中への播種に寄与する種を特定するべく、海氷縁から沖合にかけての植物プランクトン種組成の変化とアイスアルジー種組成を比較し、アイスアルジーは珪藻 *F. cylindrus* が75%以上を占め、氷縁付近の植物プランクトン群集も同種が優占し、氷縁から離れるほどアイスアルジー群集種組成との類似度が低下することを明らかにした。また、海氷後退後3週間以内の低水温環境であれば、両群集は高い類似度を示すことを明らかにし、高い光量と低水温に対して高い適応能力を持つ *F. cylindrus* が播種に寄与する重要な種であると結論付けた。

第4章では、海水中に放出されたアイスアルジーが植物プランクトンとして増殖する可能性を調べるため、現場データと既報値および衛星データに基づく熱収支解析を用いて放出後の純増加量を推定し、氷縁海水中で優占した *F. cylindrus*、*F. curta*、およびナノ鞭毛藻の3種は摂餌や沈降による消失を超える増殖を行っていることを示唆した。

第5章は総合考察として、珪藻 *F. cylindrus* の重要性を示すとともに、第2章から4章までの知見と先行研究を比較して本研究の結果の周極的な一般性を示した。また、本研究は、海氷融解が氷縁ブルームに大きく寄与していることを初めて定量的に解明し、そのためには、群集組成を種レベルで把握することが極めて重要であったと結論付けている。

以上のように、申請者は南大洋の低次生産システムを理解するために重要な「氷縁ブルーム」の成因について、重要かつ興味深い知見を得ており、生物地球化学的研究に大きく貢献した。本論文の内容と関連する内容については、国内外で6件の口頭発表と2件のポスター発表を行うとともに、2章はすでに査読付き国際誌 (*Journal of Oceanography*) に公表されている。また、一部は査読付き国際誌に投稿中である。以上の理由から、提出された論文は博士の学位論文の内容として十分であると認められ、審査委員会は博士(理学)の学位を授与するに相応しいと全会一致で認めた。