

## 要旨

北極海はその表面が海氷に広く覆われるため、海洋生物はその特殊な環境に適応して棲息・活動し、海氷を基盤とする独特の生態系を築いてきた。しかし、近年の温暖化により海氷が急激に減少し、北極海氷生態系の基盤が失われつつある。ここでは、北極海が季節海水化することによる生態系と生物多様性の変化に焦点を当て、以下の 4 つの Questions を挙げ、長期的な研究の展望を述べる。

- Q1: 大気・陸域の物質は北極海の生態系・多様性に大きな影響を与えるのか？
- Q2: 北極海の生物は物質をどのように輸送・変質しているのか？
- Q3: 北極海食物連鎖と生態系変化・多様性はどうか関係しているか？
- Q4: 海洋酸性化と脱窒は北極海の生態系・多様性にどのような影響を及ぼすのか？

北極海の劇的な環境変化は、北極海の生物生産を変えると同時に、生物の消失と新たな生物の移入を引

き起こし、食物連鎖や競争関係を通じて物質の輸送や種の多様性に影響することが懸念される。一方で、種の多様性の変化が、生態系の生産力と分解に与える影響も大きい。そのため、北極海氷生態系を取り巻く環境と、生態系における各プロセスとメカニズムの定量的説明は、将来の北極海氷生態系と生物多様性への影響を評価する上で重要である。

しかし、これまでに明らかとなった事実の多くは、調査船が北極海を安全に航行できる夏季の開放水面域における結果が中心であるため、時空間的に断片的である。さらに、海氷生態系は物理、化学、生物過程が複雑に関与しているため、ほとんど解明されていない部分もある。そのため、砕氷船や係留系などを利用し、一年を通じた広域の多角的観測を行うとともに、プロセス実験や数値実験および他の分野と連携した学際的研究を実施することで、北極海の生態系と生物多様性への影響を明らかにすることが、長期的な課題である。

## まえがき

北極海に生息する海洋生物は、海氷、または海氷の周辺環境に適応し、海氷生態系と呼ばれる独特の生態系を作り出している。しかし、その特殊な生態系の基盤となる海氷の減少や海洋酸性化など、北極海はこれまで経験したことのない急激な環境変化に直面している。その変化は、北極海氷生態系を構成していた生物の消失と新規生物の移入を招き、北極における海洋生態系は大きく変化すると考えられる。また、それは同時に北極海における生物多様性が失われる(あるいは増加することでもある)。生物の多様性を保全することは、生態系を保全し、人類の生存を支える観点からも重要であるという考えから、1992年に生物多様性条約<sup>99</sup>が締結された。北極海においては、第一期(2000~2010年) Census of Marine Life (CoML) のプロジェクトである Arctic Ocean Diversity (ArcOD) によって生物多様性に関する数多くの知見が集積された。ArcOD は

7千以上の種を目録に記載し、無脊椎動物と魚類の生息域が北方へ拡大していることや、冷水種に対する暖水種の割合の増加を報告した。また、緯度 50~70 度の海域においては、生物多様性が増加することを予測している (CoML, 2010)。しかし、今後も継続すると考えられる海氷減少と海洋環境の変化に対して、北極生態系と生物多様性が今後どのように変化するのか、また、その変化の早さも不確実である (Conservation of Arctic Flora and Fauna (CAFF), 2013)。

ここでは、北極域における環境変化が北極の海洋生態系と生物多様性に与える影響を評価するために、今後必要とされる研究内容を記す。なお、CBD で生物多様性は、「生態系の多様性」、「種の多様性」、「遺伝子の多様性」の 3 つが定義 (テーマ 8 のボックス 2 参照) されているが、ここでは、主に「種の多様性」について記している。

<sup>99</sup> 生物多様性条約: Convention on Biological Diversity (CBD)

Q1: 陸域・大気からの物質は北極海の生態系・多様性に大きな影響を与えるのか？

a. 研究の重要性と現状

北極海には、全球河川から海洋に供給される溶存有機炭素の10%以上が流入しているが、そのほとんどが難分解性であり、北極生態系への影響は小さいと考えられていた。しかし、近年の研究により、バクテリアや光酸化によって分解されやすい易分解性の溶存有機炭素が多く流入していることが明らかになるなど、陸起源物質の流入による北極海の生態系、多様性への影響は、その重要性が改めて認識されている(例えば、McClelland et al., 2012)。光合成に必要な窒素やリンなどの溶存無機栄養塩は、河川からの直接の流入量は少ないが、陸起源有機物の分解に由来する栄養塩類による海洋の一次生産へ与える影響は無視できない。また、氷床の融解による鉄などの微量金属等の流入についても近年その重要性が指摘されている。したがって、陸域から輸送される物質は、海洋、特に生物多様性の高い沿岸域のバクテリアや植物プランクトンの生物量・多様性に影響を与える。さらに、これらを摂餌する動物プランクトンやより高次の生物にも影響を及ぼす可能性がある。また、沿岸部の海底にいったん沈降堆積した陸起源物質が、陸棚域から輸送された後、外洋の生物生産に利用されることも指摘されているが、関連する生

物・物理・化学過程の複雑さのため、定量的には明らかになっていない。

大気を経由した物質の輸送も、温暖化に伴ってその生態系への影響が変化するだろう。例えば、中・低緯度で放出される人為起源の汚染物質が、大気を通じて北極圏まで輸送されているが(AMAP, 2009)、海氷の有無は、これらの汚染物質の海洋生物への供給過程や海水中での光反応などの変質過程を変える可能性がある。大気由来の栄養塩の寄与も増加する可能性がある。微量栄養塩である鉄は、一般的に陸から離れると不足しがちであるが、大気を経由して、沿岸から離れた海洋表層へと供給されている。温暖化に伴う陸上の雪氷の消失による土壌面積の増加や嵐の増加などにより、鉄の供給が増加する可能性がある。

b. 今後の研究(図 35 参照)

陸および大気起源物質による海洋生態系への影響と、温暖化に伴うその影響の変化を予測する研究が早急に必要である。今後、永久凍土や氷床の融解などによる陸域からの有機物流入量の増加、大気由来物質流入量の増加、水温上昇による微生物活性の増加、海氷減少による光透過率の強化などが、海洋の低次生態系

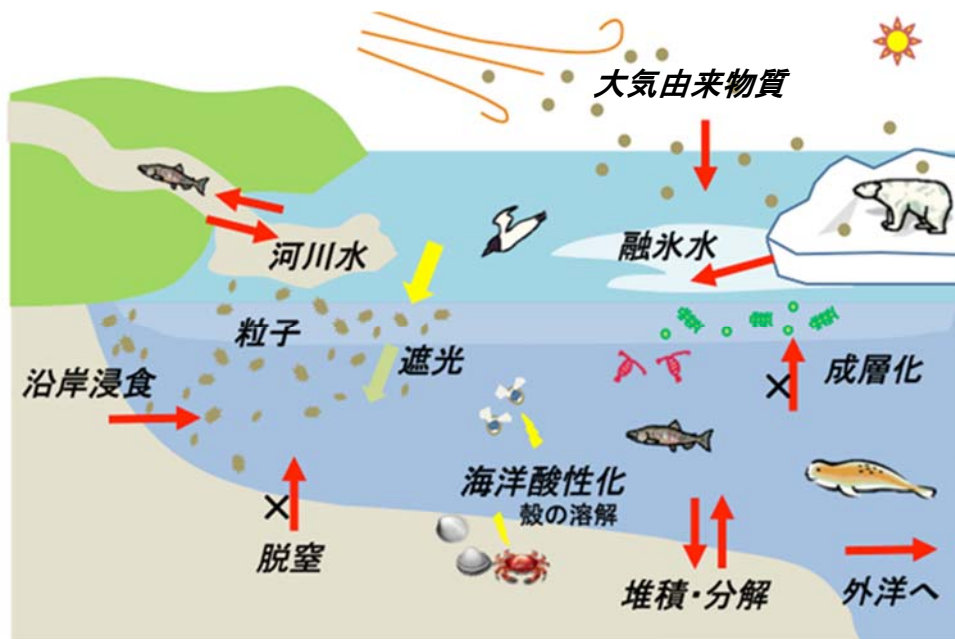


図 35 陸や大気からの物質流入と海洋内部での各種プロセスが生物に与える影響を表した模式図。温暖化により、河川や大気、沿岸浸食、氷河融解などによる、栄養物質や汚染物質の海洋への流入が増加する一方、海洋内部でも、海洋酸性化や成層化、堆積物中での窒素栄養塩除去(脱窒: Q4 参照)の促進などが起き、海洋生物に様々な直接・間接的影響を及ぼすと予想される。赤い矢印は、栄養物質や汚染物質の出入りをあらわす。

への陸起源の炭素や栄養塩などの供給量を増やす可能性がある。しかし同時に、陸起源有機物分解が増加することは海洋の酸性化を促進し、底生生物に負の影響を与える(テーマ3およびテーマ9、Q4参照)。一方、陸からの淡水流入量の増加は(テーマ4参照)、海洋表層の成層を強化し、表層の植物プランクトンへの栄養塩供給を制限することで、生物量の低下や種の変遷などを引き起こす可能性がある。さらに、沿岸域の海水を低密度化させるため、陸棚域から外洋への物質輸送の経路を変え、外洋での生物生産にも影響を及ぼす可能性がある。また、陸起源物質の流入量の増加により、海水中の光透過率が減少し、光合成を抑制するかもしれない。このように、陸・大気起源物質は海洋の生態系、多様性に多面的かつ重要な影響を与えるため、その解明には沿岸域の集中観測、外洋域を含む広域観測、培養および数値実験などの総合的な研究の展開が必要

である。

まず、河口域や沿岸侵食域、その他海域毎に生物の存在種や量を明らかにし、陸起源物質の量や質との関係を調べることで、全体的な影響の傾向を把握することが重要である。さらに、陸起源物質の分解による栄養塩の再生や酸性化を通じた生態系への影響を明らかにするには、影響の顕著な海域を特定し、その海域において物理・生物・化学の時系列観測を実施し、物質循環と生物種・量の季節変化をとらえることが必要である。

また、大気や陸を起源とする物質の添加実験により、微生物、植物プランクトンの応答を調べ、今後の予測につなげることも重要である。さらに、大気・陸起源物質の流入量や質の変化は遠隔地での変化に由来するため、これらによる生態系への影響を評価するには、海洋学、気象学、雪氷学、生態学等による学際的研究が必要である。

## Q2: 北極海の生物は物質をどのように輸送・変質しているのか？

### a. この研究の重要性と現状

生態系は海洋の物質を変換し輸送する役割を担っている。低次生物生産による物質は鉛直方向(下層)に輸送され、低次生物自身の移流や高次捕食者への転送により、水平方向に輸送されると考えられている。現状では、主に低次生物生産とその鉛直輸送の研究に限られた季節について行われているため、北極海の各海域における年間を通じた生物と物質輸送の関係に対する理解が未だ不十分である。また、動物プランクトンから魚類、鳥類への物質の輸送については、初夏に限定された知見である上、移動性の高い海棲哺乳類や海鳥のような高次捕食者が、物質輸送に果たす役割も良くわかっていない。種の多様性や生態系の多様性と物質輸送との関係については現状把握が部分的であるため、今後も進行すると見られる北極海の様々な環境変化に対して、これまでに育まれてきた生態系がどのように応答し、生物相と海洋物質循環との相互作用がどのように変化するのか、予測と見解はまだ定まっていない状況にある。

### (1) 低次生態系を介した物質輸送

北極海の水塊環境と低次生物の種多様性、物質循環との関係は、海氷の少ない夏の時期を中心に、特にチャクチ海、ボーフォート海の沿岸、アムンゼン湾、ラプテフ海などの陸棚域において知見が得られてきた(例え

ば、Bluhm et al., 2011; Wassmann, 2011)。水中に溶存する二酸化炭素と栄養塩は、多くが光合成によって有機物へ変換される。陸棚域では、植物プランクトンとアイスアルジーによって生産された多量の粒状有機物が動物プランクトンや底生動物などの低次消費者と、魚類、鳥類から海棲哺乳類まで至る高次消費者の活発な生産活動を支えている。この海域は有光層に供給された硝酸塩のほとんどが生物に取り込まれ輸送されるため、夏季は基本的に窒素制限の状況になりやすい(Tremblay and Gagnon, 2009)。高次消費者に消費されずに残った動植物プランクトンは、動物プランクトン自身の移動や、死骸や糞粒・凝集体の重力沈降として下層に輸送され、一部は堆積物に埋没する。北極海における微生物群集は、水柱や陸域から供給される有機物を分解して栄養塩を再生し、嫌気性環境では、脱窒を通じて物質循環の駆動に強く関与する。海盆域では、生物を介した物質鉛直輸送に次のような違いが見られる。シベリア河川水とともに供給された栄養塩によって珪藻類の生産が比較的高いアムンゼン・ナンセン海盆域では、海氷減少に伴い珪藻類群体の海底への沈降量が増加してきており、底生動物の重要な餌となっている(Boetius et al., 2013)。

一方、高気圧性のボーフォート循環の影響下にあるカナダ海盆では、ピコサイズの植物プランクトンを主体とした基礎生産がみられるが、珪藻類や円石藻類のよう

な粒状有機物の沈降バラストになる植物プランクトンとそれらを捕食する動物プランクトンが少ないため、海洋表層で生産された粒状有機物の大半が垂表層で分解され、深層へはほとんど輸送されていない (Honjo et al., 2010)。しかし、今後の海氷減少がカナダ海盆における生態系を介した物質輸送にどのように影響するのか、まだよく分かっていない。物質循環に関するこれまでの研究の多くは、植物プランクトンやアイスアルジー等の基礎生産者の働き(例えば、基礎生産量や栄養塩取り込み量等)に重点が置かれており、物質循環をコントロールする動物プランクトンの働きに関しては、知見が著しく不足している (Wassmann 1998)。

## (2) 魚類や鳥類による物質輸送

北極域では海鳥は海から繁殖地へと、羽毛、糞、卵や雛の死体などを通じて様々な物質を多量に運ぶことはわかっている (Michelutti et al., 2009)。しかし、魚類や鳥類による物質輸送への寄与についてはその詳細な過程ならびに定量的理解はまだ十分ではない。さらに、夏季間様々な海鳥が北極海を利用し、また、冬季間ポリニアにも多くの海鳥やカモ類が集まることが知られているが (Cooper et al., 2013)、この時期の海鳥の移動が物質循環にどういった役割を果たすのかよく分かっていない。

## b. 今後の研究

### (1) 低次生態系の物質循環における役割

基礎生産者の動態把握のほか、動物プランクトンの摂餌、排出や再生産等との関わりに着目したプロセス研究、さらには、Q3 に後述する表層-底層生態系 (pelagic-benthic coupling、ボックス6) のように3次元的なつながりも考慮することが重要である。そのために、植物の生産が高くなる春季やその準備期間となる冬季も含めて、砕氷観測船を用いたサンプリング、動物プランクトン船上飼育実験、セディメントトラップをはじめとする観測機器類の係留系実験等を組み合わせて、多角的に研究を遂行する必要がある。また、一度に広範囲を捉えることができる衛星観測や生態系モデルとの共同研究も進めていく必要がある。これまで、国内からは主に海洋研究開発機構の研究船「みらい」や北海道大学「おしよる丸」が太平洋側北極海の観測に貢献してきたが、これらの研究船は砕氷船ではないため観測できる北極海の海域や季節が限られている。これまでカナダの Institute of Ocean Sciences (IOS) など海外研究

機関との連携により砕氷船による海氷域での観測も行われてきたが、今後も IOS や Arctic Net など海外の研究組織と連携した観測を積極的に進めていく必要がある。

### (2) 微生物群集が駆動する物質循環機構

微生物群集が駆動する物質循環機構を明らかにするには、微生物諸変数の時空間変化の定量的な記述と、その要因の特定が重要である。近年の各国の精力的な研究の展開により、北極海における微生物諸変数が、多様な有機炭素供給源(基礎生産、淡水、堆積物)と物理環境(水塊分布、水温)を反映して時空間的に大規模に変化していることが明らかとなってきた (Uchimiya et al., 2011)。これらのことは、近年、北極海で急激に進行する海洋環境変化の影響が、微生物群集を介した物質循環へ鋭敏に波及する可能性を示唆している。これらを踏まえ、今後取り組むべき課題として、(1) 気候変化が微生物生態系に及ぼす影響の中・長期的な評価、およびその海域間差異の解明、(2) 今後さらに顕在化すると予想されるプロセスの微生物生態系への影響評価(例えば、海氷消失に伴う気象擾乱が、微生物生態系へ及ぼす影響の解明)、(3) 近年急速に技術革新が進む分子生物学的手法の導入による、時空間変動解析の多角化、が挙げられる。

### (3) サケ属魚類および海鳥を含む高次捕食者による海・陸域生態系への物質輸送

海鳥・海棲哺乳類の移動をバイオロギング手法で追跡し、羽根を交換する(換羽、換毛)ため一定期間とどまる海域やよく利用する海域を特定する。そのうえで換羽・換毛量や排泄物量の時空間変化を推定し、これらによる有機物供給量を推定する。さらに捕食量の空間変化を推定し、海鳥、海棲哺乳類が物質循環に果たす役割を考察する。

地球温暖化が促進されることにより、サケ属魚類の分布域が北極海へ拡大することが予測されている(例えば、Kaeriyama, 2008; Kaeriyama et al., 2014; Abdul-Aziz et al., 2011)。サケ属魚類が海洋起源の栄養塩(MDN)を陸域生態系へ大量に輸送することはよく知られている(例えば、Kaeriyama et al., 2012; Koshino et al., 2013)が、北極海の環境変化に伴うその周辺海域と陸域生態系へのこのようなサケ属魚類による MDN 輸送メカニズムの解明が待たれる(図 35)。

### Q3: 北極海の食物連鎖と生態系変化・多様性はどう関係しているか？

#### a. この研究の重要性と現状

温暖化・海氷減少により分布が北に拡大した動物が何種かいる。光環境の改善によって基礎生産は上昇傾向にある(Pabi et al., 2008)。海氷が減ると主たる食物連鎖が表層(生産)ー底層(消費)生態系から表層(生産)ー表層(消費)生態系(pelagic-pelagic coupling)へと変化すると予測がある(ボックス 6)。その結果として、生物の種多様性への影響も懸念される。その影響は海鳥による陸への物質輸送やシロクマへの影響を通じて陸上生態系にも及ぶだろう。

#### (1) 微生物・動物プランクトンの分布・種組成・生産

植物プランクトン、微生物の分布と種組成の季節・空間変化はこれらの種多様性ばかりでなく、消費者の種多様性にも影響するだろう。北極海では冬、春季の海氷下の生物生産も無視できないがその時期の調査は少なく、微生物の情報はさらに少ない。動物プランクトンの知見は大西洋側北極海で多く、太平洋側北極海では少ない。温帯性動物プランクトンが北極圏に分布を拡大し(Matsuno et al., 2011)、再生産しはじめたとする報告もある(Buchholz et al., 2012)が、これが動物プランクトン全体の種多様性にどう影響するかわかっていない。

#### (2) 低次から高次生物までを含むバイオロジカル・ホットスポットの形成

生物生産が高かつ高次捕食者群集へのエネルギー一ながりが特異的に高い場所(「バイオロジカル・ホットスポット」ボックス 7)がある。北極海ではその位置や動態は、その時空間スケールも含め明確には把握されていない。鯨類を含む温暖種の移入、表層(生産)ー底層(消費)生態系の維持に重要な生物ポンプ(海洋表層で植物プランクトンにより生産された有機物を底層生物や深層の生物に輸送する働き)の変化、大型魚類の生物量や分布の変化が、ホットスポットにおける食物連鎖など生態系の変化を介して、種多様性をどのように変化させるかは未知である。大気・河川輸送、油田開発による汚染(Mallory & Braune 2012)や輸送船が運ぶ移入種による影響も懸念される。

#### b. 今後の研究

温暖化・海氷減少が低次生産・食物連鎖を通してどう生物の種多様性に影響するか、バイオロジカル・ホットスポットに着目する必要があるだろう。生物の分布変化とプロセス研究を、海氷が存在する時期(冬季や春季)をふくめて実施し、より正確な現状把握、将来予想につなげる必要がある。

#### (1) 海洋構造変化と微生物・動物プランクトン群集および生産プロセス解明

海氷融解のタイミング、氷下および氷縁の植物プランクトンブルーム(群集が一斉に増殖、生産を起こすさま)と動物プランクトンによる捕食、動物プランクトンの再生産や発育のタイミングといったプロセス研究により、温暖化・海氷減少が微生物を含む低次生産構造・多様性に影響するメカニズムを解明する必要がある。

そのため、アイスアルジーをふくむ植物プランクトンの分布、組成、サイズ、優占種の変化をしらべ、テーマ 3 のアウトプットを利用し、海氷変化と植物プランクトン群集の関係を明らかにする。動物プランクトン多様性の変化や摂餌、再生産と発育タイミングの変化を、植物プランクトン生産、サイズ組成の季節、空間変化および太平洋産種の輸送から説明する。これらプランクトン群集の季節・空間変化と生物ポンプの担い手である生物起源沈降粒子の組成、形態、沈降フラックスの関係を明らかにする。過去の調査点を参考に、海氷下を含み、通年のサンプリングを砕氷船および係留系より実施する。

#### (2) バイオロジカル・ホットスポットと成立要因の理解

プランクトンから高次生物(魚類、鳥類、哺乳類)、ベントスも含め各栄養段階の分布と密度からバイオロジカル・ホットスポットを把握し、栄養塩供給量、生物生産量、消費量、食物連鎖長、種組成(種多様性)との関係を調べる。物理海洋環境を独立変数としたハビタットモデリングをおこなうとともに、食物網に関するデータをつかった生態系モデリングにより、ホットスポットの成立要因を解明する必要がある。重要な漁業資源となりうるサケ属魚類については、環境収容力、成長、個体群動態、摂餌栄養生態学をもとにした分布とその変化に関する研究を行う。これらにもとづき総合的にホットスポット成立メカニズムを理解する必要がある。



## ボックス 6

### 表層-底層生態系のカップリング

南東および北部ベーリング海における研究では、海氷の後退が遅い年には、春先に十分な太陽光の元で海氷縁において、光環境が良くなると同時に大型ケイ藻のブルームが起きる。大型動物プランクトンがこれを摂餌するが、水温が上がっていないのでその増殖は弱く、消費されなかった大型ケイ藻が沈降する。これが豊富な底棲生物類の生活を支え、さらにカレイやカジカなど大型捕食性魚類がこれらを捕食するという底層食物連鎖へのエネルギー流が大きくなる。一方、温暖で海氷の後退が早い年には、後退時にはまだ太陽光が弱くさらに冬の季節風によって表層がかき乱されるので、大型ケイ藻のブルームは起きない。季節が進んで海水温が上昇し成層化がはじまると、小型藻類のブルームが起きる。このとき水温は上昇しているので、これを食べる小型動物プランクトンの増殖が盛んになる。そのためケイ藻はほぼすべて食べ尽くされてしまう。増殖した小型動物プランクトンは、そのまま表層性の魚類に食べられる。このように、寒冷期に海氷が多いと表層での生産が底層の食物連鎖に流れ、温暖期に海氷が減少すると表層での生産が表層の食物連鎖に流れるだろうという仮説がある(Grebmeier et al., 2006 など、図 36)。

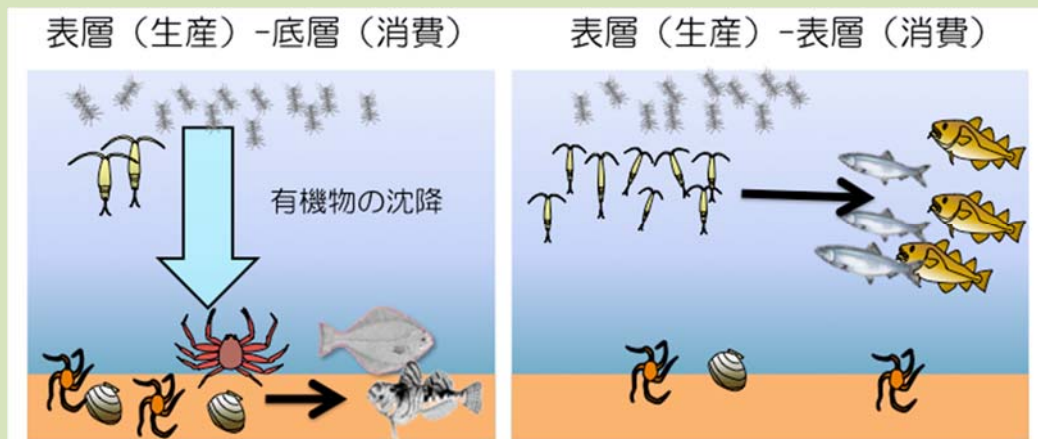


図 36 表層-底層生態系から表層-表層生態系への変化

## ボックス 7

### バイオロジカル・ホットスポット

バイオロジカル・ホットスポット (Biological hotspots) とは、周辺海域と比較して低次生物生産力が高く、底生生物も豊富で、多くの海鳥類や海棲哺乳類が生息、または、集結するのが目撃される海域のことを指す。上記の低次生物とは、極域海洋の基礎生産者である植物プランクトンやアイスアルジー、およびそれらを捕食してより高次の生物に対して物質を転送する等、重要な役割を担う動物プランクトンである。また、これら低次生物の生産力が、水柱中において高い結果、周辺海域と比較して一般的に底生生物も豊富である。これまでの研究結果より、北極圏海域のバフィン湾北部のノースウオータポリニア海域、アムンゼン湾のケーブバサーストポリニア海域等は、バイオロジカル・ホットスポットであるとされている。

そのため、ハビタットモデルをつかって、海洋環境将来予測にもとづく各種の分布変化予測、さらに、温暖化や輸送による温暖性種の移入、餌生物と大型鯨類の分布拡大によるボトムアップ、トップダウン効果、サケ属魚類の孵化放流事業、汚染の潜在的影響など種間関係を考慮した予測を行う。底棲生物(ベントス)、海鳥、海

棲哺乳類の分布を船によるサンプリング、目視観測で調べる。海鳥、海棲哺乳類については装着型小型機器によるトラッキングも併用する。餌分析(標本の目視・安定同位体比・脂肪酸組成など)から食物網を調べる。人為的影響監視の1つとして泥と生物の汚染物質測定を行う。

#### Q4: 成層化、脱窒、および海洋酸性化は北極海の生態系・多様性にどのような影響を及ぼすのか?

##### a. この研究の重要性と現状(図 35 参照)

全ての海洋生物の生産は、一部の海域を除くと表層の植物プランクトン生産に支えられていると言っても過言ではない。北極海においては、その生産を制限する要因として、光や温度に加え、窒素栄養塩の不足があげられる。温暖化と海水融解により、光と温度の条件は好転すると考えられるため、今後の北極海の生物生産にとって、窒素栄養塩の供給がより重要な因子となるだろう。窒素供給量を左右する過程として、大陸棚上で窒素栄養塩を除去する脱窒過程、混合による下層からの栄養塩供給過程が挙げられる。これらの過程の変化により、北極海の生態系・多様性が大きな影響を受ける可能性がある。

一方、人間活動により放出された二酸化炭素の一部が海洋に溶け込むことにより、海水の二酸化炭素濃度の増加、水素イオン濃度の上昇(狭義の酸性化)、炭酸カルシウム飽和度の低下が全球で進行している(Orr et al., 2005)。これらを総称して「海洋酸性化問題」として議論されている。海洋酸性化は、ほとんど全ての海洋生物の増殖や成長に何らかの影響を及ぼす可能性がある。しかし、北極海に棲む生物に対する、海洋酸性化の影響について十分な研究が行われておらず、喫緊の課題として認識されている(AMAP, 2013)。

##### (1) 成層化の影響

高い生物生産を支えている生物群は、湧昇や冬季の鉛直混合による深層からの栄養塩供給を十分に受けてきた植物プランクトンである。彼らは現在までの栄養豊かな海洋環境に適応した大型サイズの種(珪藻類)により構成され、長い間独特の生態系を維持してきたと言われている。温暖化と陸からの淡水や海水融解水による淡水化は、海洋の成層化を促進し、湧昇による深層から表層への栄養塩供給を妨げる物理・化学的な働きを

持つ。深層からの栄養塩供給を弱める成層化は表層に分布する植物プランクトンによる光合成(基礎生産)を低下させ、生態系を不安定にする生物学的な影響力を持つことになる。同時に、表層での基礎生産を担ってきた大型植物プランクトン(珪藻類)から、少ない栄養環境で増殖可能な小型の藻類(円石藻類、パルマ類等)に移るといった種の内入れ替わりを促すであろう。

また、温暖化による表層の成層化は、表層混合層の厚さを薄くするため、混合層内に分布する植物プランクトンに対して、これまで以上の強光ストレスがかかるかと推定できる。極域に分布する植物プランクトン光保護機構に関する知見は少ないが、成層化の生物的影響は、極域や亜寒帯海域でより顕著に現れるであろう。

##### (2) 脱窒の影響

窒素不足は、特に太平洋側の海域で顕著である。これは、ベーリング海からチャクチ海の大陸棚堆積物中で、硝酸塩や亜硝酸塩などの窒素栄養塩を不活性ガスに変える「脱窒」と呼ばれる微生物の代謝が活発におき、海洋から窒素を除去しているからである。これらの海域における脱窒は、全球海洋の窒素循環においても重要な役割を担っている。水温上昇や底層への有機物フラックスの増加などにより、脱窒により除去される窒素が増え、海洋の一次生産を制限する可能性がある。しかし、定量的知見やその影響に関する見解が不足している。

##### (3) 海洋酸性化の影響

海洋酸性化による炭酸カルシウム飽和度の低下は、炭酸カルシウムの殻や骨格を作りにくくするため、例えば植物プランクトンの円石藻類、動物プランクトンの浮遊性有孔虫、翼足類、貝類などへ負の影響を与えることが懸念されている。これらは北極海や亜寒帯域の生態

系においても重要な生物であり、捕食者であるより高次の生物、例えば魚類や鳥類や哺乳類などへの影響も危惧される。炭酸カルシウムを作らない生物についても、種によっては海洋酸性化が有利にも不利にも働くことなどが、室内実験や現場実験で明らかになってきたが、その知見のほとんどは低中緯度域での研究結果に基づいているため、北極生態系に対する海洋酸性化の影響は不明である。しかし、北極海はもともと酸性化を緩和する能力が低い海域であるため、酸性化の影響を受けやすい。その上、水温の上昇や水温上昇にともなう中・低緯度域の生物種の移入などの他のストレスが、酸性化と同時に進行することが予想される。

## b. 今後の研究

海洋の表層の動植物プランクトンの現存量と種組成の現状把握は、生態学的研究の常套手段であり、これまで多くの研究者により成果が発表されてきた。しかし、その多くは大型の珪藻類やカイアシ類に対するものであり、酸性化の影響が懸念される円石藻類や浮遊性有孔虫、翼足類に関しては知見の充実がはかられていない。将来の表層の成層化による下層からの栄養塩供給量の低下により植物プランクトンサイズが小型化するという予想のもとで、影響の深刻な海域において長期間にわたって監視観測することにより、円石藻類および粒子食性動物プランクトンの浮遊性有孔虫、翼足類の分布動態を十分把握することは、極域生物の多様性の特色を明らかにする上で意義がある。また、成層化によって表層混合層の厚さが薄くなることで、表層混合層内に分布する植物プランクトンが強光にさらされる時間が長くなると考えられる。このことは、これまで弱い光に適応して来た極域のプランクトンの強光ストレスが増大することに繋がると予想できる。そのため、植物プランクトンの生産に対する直接的な酸性化実験とともに、光保護機構の研究も必要となってくる。

チャクチ海やベーリング海における現在の脱窒量の見積もりはなされてきたが、シベリア側の広大な大陸棚での脱窒量は不明である。さらに、今後の北極海における温暖化、陸起源や海洋生物由来の有機物沈降量の増加により、脱窒を行う微生物がどのように応答するかについての定量的見解はまだない。例えば、微生物の種類によって、水温上昇に対する脱窒量変化は異なることが知られている。各海域に海底モニタリング・プラットフォームを設置し、有機物沈降量や水温変化、堆積

物の酸化還元状況、脱窒量、微生物のサンプリングなどを総合的に行い、季節変化や経年変化を明らかにすることができれば、今後の北極海の一次生産量変化の予測に大きく資することができるだろう。また、数値モデルに脱窒量の変化を加え、海洋の生態系や多様性に与える影響を評価することが必要である。

また、将来の酸性化が及ぼす海産生物への影響の実験研究は、これまで中低緯度の生物で進んでいるが、北極域の動植物プランクトン群集や高次生態系への影響の実験研究は極めて少なく、わずかに一部の海域や生物種、群集などに対して始まっているものの、ほとんどの生物種については実験室での予測実験すら行われていない。北極海には広大な大陸棚が存在し、底棲生物が生態系の中で重要な役割を果たしているため、動植物プランクトンに加え、貝類をはじめとする多様な底棲生物に海洋酸性化が与える影響を調べる必要がある。

そのためには、北極圏の多様な海域に生息する生物と酸性化の実態の調査、鍵種を用いた室内実験や現場における二酸化炭素の通気による酸性化シフト実験を行わなければならない。北極沿岸国と協力した国際プロジェクトを進めることが必須である。北極海の酸性化は世界の他の海に先んじて深刻な状態に達しているため、長期のモニタリングによって生態系や多様性の応答を明らかにすることで、今後の他の海域における酸性化の影響を予測するための貴重な情報を提供できるだろう。生態系予測モデルや、極域のプランクトンや生態系に関する日本の知識は、海洋酸性化に対する北極生態系および多様性の変化の評価研究に大きく貢献できると考えられる。



北極環境研究の長期構想  
(Long-term Plan for Arctic Environmental Research)

北極環境研究コンソーシアム  
(JCAR, Japan Consortium for Arctic Environmental Research)

2014年9月 発行  
2015年3月 改訂

連絡先: 北極環境研究コンソーシアム事務局  
〒190-8518 東京都立川市緑町 10-3  
国立極地研究所 内

E-mail: [jcar-office@nipr.ac.jp](mailto:jcar-office@nipr.ac.jp)

ホームページ <http://www.jcar.org/>

# 北極環境研究の長期構想

## 目次

巻頭言 .....	i
1章 報告書で目指すこと .....	2
2章 背景と内容 .....	3
3章 北極環境の現在までと近い将来に起こりうる変化 .....	4
4章 北極環境研究の歴史 .....	7
5章 「現在進行中の地球温暖化に伴う北極の急激な環境変化を解き明かす」研究テーマ .....	9
テーマ 1： 地球温暖化の北極域増幅 .....	9
Q1： 下層から上層の大気における水平・鉛直熱輸送は、北極温暖化増幅にどう影響するか？	10
Q2： 陸域積雪・凍土・植生・氷床の役割は重要か？ .....	12
Q3： 季節変動をもつ海洋の熱蓄積と海氷アルベドの役割はどの程度か？ .....	14
Q4： 雲とエアロゾルがもつ役割を定量化できるか？ .....	16
Q5： 北極温暖化増幅はなぜ起こっているのか？ その予測と不確実性はどれほどか？ 北極域における放射強制力とフィードバック・プロセスはどう変化するのか？ .....	17
テーマ 2： 海氷減少のメカニズムと影響 .....	19
Q1： 風のパターンや海氷の流動性の変化は海氷減少を促進するか？ .....	20
Q2： 海氷の熱的減少はどのように進むのか？ .....	21
Q3： 海氷減少が雲や低気圧に及ぼす影響は？ .....	23
Q4： 海氷減少が海洋内部に及ぼす影響は？ .....	23
10～20年後を見据えた戦略 .....	24
テーマ 3： 物質循環と生態系変化 .....	30
Q1： 大気中の温室効果気体やエアロゾルなどの濃度はどう変化するか？ .....	31
Q2： 陸域生態系にかかわる物質循環はどう変わるのか？ .....	34
Q3： 陸から海への物質輸送の定量的解明には何が必要か？ .....	36
Q4： 海洋生態系にかかわる物質循環はどう変わるのか？ .....	38
テーマ 4： 氷床・氷河、凍土、降積雪、水循環 .....	42
Q1： 氷床・氷河の変化は加速するか？ .....	42
Q2： 永久凍土の変化は気候変動とどう連鎖するのか？ .....	46
Q3： 北極域の降積雪はどう変化しているか？ .....	48
Q4： 環北極陸域の水文過程はどう変化するか？ .....	50
テーマ 5： 北極・全球相互作用 .....	53
Q1： <大気の影響について> 北極振動などの大気変動は強まるか弱まるか？ .....	54
Q2： <海洋の影響について> 大西洋・太平洋間の海水循環は強まるか？ 深層水形成は減るか？ 中緯度海洋大循環は変わるか？ .....	56

Q3 : <陸域の役割について> 植生と凍土の変化による炭素収支や物質循環への影響は？ 積雪と植生の変動による広域エネルギー水循環への影響は？ .....	58
Q4 : <超高層大気の役割について> 極域超高層大気が下層大気・超高層大気全球変動に 及ぼす影響は？ .....	60
Q5 : <多圏相互作用について> 超高層大気、大気、陸面積雪と植生、海洋のどれを經由 する影響が大きいのか？ .....	61
テーマ 6 : 古環境から探る北極環境の将来 .....	64
Q1 : 過去の北極温暖化増幅は現在とどれほど異なり、その要因は何か？ .....	66
Q2 : 過去のグリーンランド及び大陸の氷床はどう変動し、その要因は何か？ 気候変動 との関係と海面水位への寄与は？ .....	68
Q3 : 過去の北極海の環境はどのようなものであったか。とくに海氷と生物生産について .....	70
Q4 : 過去の北極陸域環境は現在とどれほど異なり、大気組成や気候とどう関係したのか？ ...	72
Q5 : 過去の北極において、数年～数百年スケールにおける自然変動の強度や時空間 パターンは現在と異なっていたか？そのメカニズムは何か？ .....	74
【ボックス 1】古環境プロキシや年代推定手法の開発と解釈 .....	76
テーマ 7 : 北極環境変化の社会への影響 .....	77
Q1 : 地球温暖化も含めた気候変動による影響は？ .....	78
Q2 : 地球温暖化に起因する陸域環境の変化による影響は？ .....	82
Q3 : 地球温暖化に起因する海洋環境の変化による影響 .....	83
Q4 : 太陽活動と北極超高層大気の影響 .....	85
Q5 : 北極圏人間社会の対応 .....	86
6 章 「生物多様性を中心とする環境変化を解き明かす」研究テーマ .....	89
テーマ 8 : 陸域生態系と生物多様性への影響 .....	89
Q1 : 人為的な要因で起こる環境変動は北極陸域生態系にどのような影響を及ぼすか？ .....	90
Q2 : 生物多様性はどのような影響を受けるか？ .....	93
【ボックス 2】生物多様性とは？ .....	93
【ボックス 3】学名の不一致問題 .....	94
Q3 : 北極陸域生態系の変化が動物や気候に与える影響はどうなるか？ .....	95
【ボックス 4】トナカイの生息変化 .....	95
【ボックス 5】水鳥のモニタリング .....	96
テーマ 9 : 海洋生態系と生物多様性への影響 .....	97
Q1 : 陸域・大気物質は北極海の生態系・多様性に大きな影響を与えるのか？ .....	98
Q2 : 北極海の生物は物質をどのように輸送・変質しているのか？ .....	99
Q3 : 北極海食物連鎖と生態系変化・多様性はどうか関係しているか？ .....	101
【ボックス 6】表層-底層生態系のカップリング .....	102
【ボックス 7】バイオロジカル・ホットスポット .....	102
Q4 : 成層化、脱窒、および海洋酸性化は北極海の生態系・多様性にどのような影響を 及ぼすのか？ .....	103
7 章 「北極環境研究の広範な重要課題」研究テーマ .....	105
テーマ 10 : ジオスペース環境 .....	105
Q1 : ジオスペースからの超高層大気や、より下層の大気への影響は？ .....	107

Q2: 超高層大気が下層・中層大気に与える影響は？	108
Q3: 下層・中層大気変動が超高層大気に与える影響は？	110
Q4: 超高層大気を通した極域から中低緯度へのエネルギー流入は？	112
テーマ 11: 表層環境変動と固体地球の相互作用	114
Q1: 現在活動する北極海海嶺熱水系と海洋環境との相互作用は？	115
Q2: 氷床変動に伴い固体地球はどのように変形してきたか？	117
Q3: 北極海が形成されていく過程で、大気-氷床-海洋の相互作用がどのように変化していったか？	119
Q4: 数千万年～数十億年といった時間スケールでの地球表層環境変動に北極海と周辺大陸の発達過程はどのように影響を与えたか？	121
テーマ 12: 永久凍土の成立と変遷過程の基本的理解	124
【ボックス 8】永久凍土の成立と変遷過程の基本的理解	127
Q1: 北極圏の永久凍土はどのような広がりと深さをもって存在しているのか？	128
Q2: 永久凍土を構成する物質はどのような分布を持ち、どの程度の不均一性があるか？	129
Q3: 永久凍土はどのような様態・規模で昇温・融解するのか？	130
Q4: 永久凍土-大気-積雪-植生サブシステムはいかなる構造と挙動の特性をもつのか？	133
8章 「環境研究のブレークスルーを可能にする手法の展開」 テーマ	136
テーマ A: 持続するシームレスなモニタリング	136
海洋圏モニタリング	137
雪氷圏モニタリング	140
【ボックス 9】氷河質量収支の観測	142
大気圏モニタリング	143
陸域圏モニタリング	145
テーマ B: 複合分野をつなぐ地球システムモデリング	148
Q1: 地球システムモデルについて開発課題は何か？	149
Q2: 大気モデルについての開発課題は何か？	153
Q3: 海洋・海氷モデルについての開発課題は何か？	154
Q4: 陸面・雪氷モデルについての開発課題は何か？	158
テーマ C: モニタリングとモデリングをつなぐデータ同化	160
北極圏におけるデータ同化研究の現状	161
【ボックス 10】データ同化技術の解説	162
データ同化を北極環境研究に展開する方針	164
北極圏データ同化研究の実現に向けた環境整備	169
9章 研究基盤の整備	173
砕氷観測船	173
衛星観測	175
航空機	177
海外の研究・観測拠点	178
データおよびサンプルのアーカイブシステム	181
人材育成	183
研究推進体制	185

	分野別研究機器等 .....	187
10 章	長期にわたる方向性と取り組み体制のまとめ.....	195
11 章	資料 .....	198
	引用文献.....	198
	執筆者等一覧.....	209