

The image is a vertical composition. The top half features a range of rugged mountains with significant snow cover under a clear blue sky with some light clouds. The bottom half shows a wide expanse of sea ice, with numerous small, irregular ice floes floating in dark blue water. The text "これからの北極" is centered in the upper half, overlaid on the mountain scene.

これからの北極

Contents

まえがき — 1

第 1 章

北極域で起きている変化と今後の予測 — 3

第 1 節 これまでの北極域の変化 — 5

第 2 節 今後の変化を予測する — 12

第 2 章

環境変化がもたらす多様なインパクト — 18

第 1 節 北極海航路へのインパクト — 19

第 2 節 資源開発へのインパクト — 27

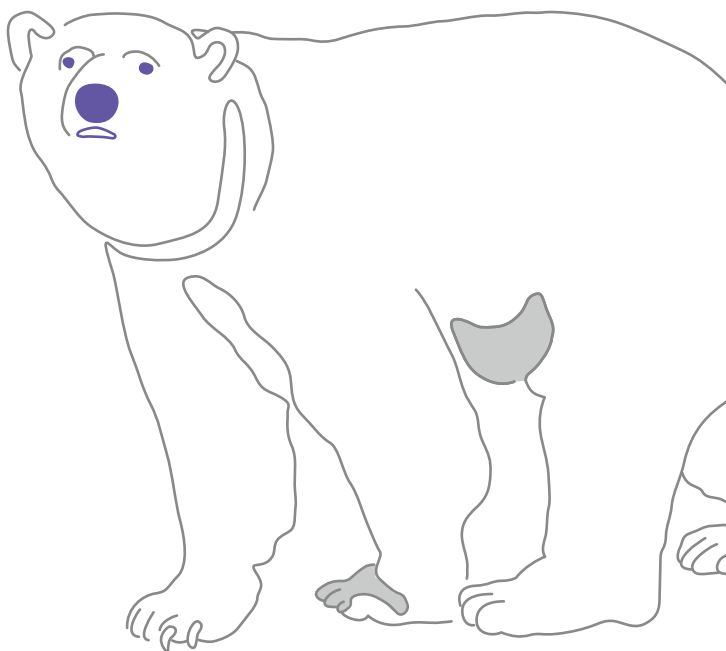
第 3 節 北極海の生態系・水産活動へのインパクト — 36

第 4 節 陸域の水・物質循環へのインパクト — 42

第 5 節 北極域の先住民と環境へのインパクト — 47

引用文献 — 54

あとがき — 56



2015年9月から始まったわが国の北極域研究推進プロジェクト（ArCS）は、「ステークホルダー（Stakeholder）に情報を提供する」ことを大きな課題としています。ステークホルダーを適切な日本語に訳すのは難しいのですが、科学研究の分野では、その研究と関わる多様な利害関係を有する相手を指すと考えています。そのなかには、税金でプロジェクトを支えている国民や、プロジェクトの成果を直接・間接に利用する人々も含まれます。あいまいにはなりますが、「社会」という言葉に近いかもしれません。しかし、ArCSプロジェクトが社会に情報を提供することは当たり前のようでいて難しいことです。実際、いくつかの北極研究事業では、社会への情報提供が不十分であることを指摘された経緯があります。

西欧の歴史をひもとくと、特に18世紀以降、近代科学の社会へのつながり方は漠然としたものになりました。それは現代でも変わっていないように思えます。人々の未来のための科学、ともっともな主張をしても、具体的に人々の未来にどのように貢献するのかと問われると、答えに窮してしまうことが多いのです。その大きな理由の1つとして、科学と社会の間にある、未来への向き合い方の大きな違いが挙げられると思います。政策決定に関与する立場にあらうとなかろうと、社会の人々は世の中のあるべき姿や、こうなっ
てほしいという希望を未来に投影します。それに対して科学は、観測したり調査した結果からさまざまな現象を見つけ、個々の現象の間にある因果関係を明らかにすることによって、個々の現象が今後どう変化していくのか、その道筋で未来を描こうとします。これが科学の大きな特徴です。

北極をターゲットとした研究がプロジェクトとして始まってから10年近くになろうとしています。その間に、観測や調査によって

北極で起きているさまざまな自然現象、社会現象が見つかってきています。それらの結果を網羅して示すことはプロジェクトにとって欠かせない責務です。しかし、それだけでは ArCS の大きな課題である「ステークホルダーに情報を提供する」ことの実現には結びつかないでしょう。地球温暖化は北極で特に顕著に現れており、それに伴って自然環境だけでなく、世界各国の政策や企業戦略、北極域に住む人々の生活などにも急激な変化が起きている。これらの変化が今後どうなっていくのか、その可能性を情報として示すことなしには、広く「社会」や人々が今後、北極とどう向き合っていくべきか判断するための拠り所を与えることはできないからです。

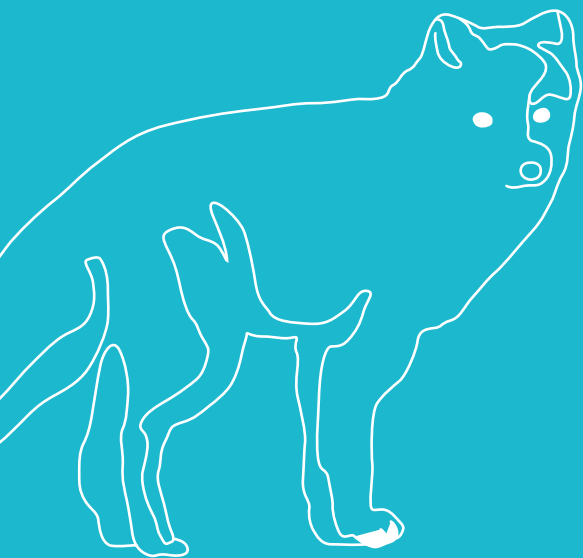
本書では、まず激しく変化してきた北極の自然環境の今後について科学的な予測を紹介し、それに伴う諸変化——北極航路と社会経済、陸上生態系と北極住民の生活、北極域海洋での生態系——をまとめています。未来について正確に述べることは現在の発達した科学でも、むしろ発達したからこそかもしれません、難しいことです。それでもなお、これから北極で起こると科学的に考えられることのなかには、読者の想像を超えたものや知っておくべきものがあることでしょう。

本書は科学・技術の論文集ではありません。専門的な図や表をできるだけ省き、読み物になるように心がけました。それは「ステークホルダーに情報を提供する」という ArCS の活動を象徴するいわば目次になることを意図したからです。さらに興味をもたれましたら、ArCS のウェブサイト (<https://arcs-pro.jp>) を訪ねてみてください。より詳細な研究「結果」をご覧になることができます。

ArCSプロジェクトディレクター 深澤理郎

第 1 章

北極域で起きている 変化と 今後の予測



「北極はもはや以前の北極ではなくなった」という言い方がいろいろなところでされるようになりました。元をたどると、近年の温暖化によって北極海の海水や高緯度地域の気象に生じている変化が「一時的な異常気象ではなく、今や new normal（新たな常態）となった」という表現を、科学者や科学ジャーナリストが使いはじめたことがきっかけのようです★¹。

残念ながら、これは決して極端な言い方ではありません。近年の北極域の年平均気温は、以前よりも数度高いまま推移しています。人工衛星による観測が可能になってからの過去 40 年間で平均すると、北極海の海水は毎秒約 9,000t (Schweiger et al., 2011)、グリーンランド氷床を含む陸上の氷は同時期に毎秒 14,000t (Box et al., 2018) の割合で融け続けています。このような急激な変化の影響は今や北極にとどまらず、さまざまな形で地球規模に波及するようになってきました。

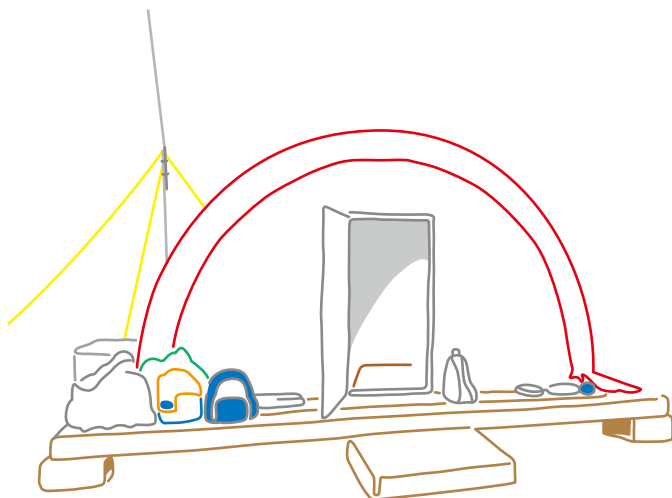
日本は 2011 年に北極域の調査研究を行う国家プロジェクトを開始しており、現在の北極域研究推進プロジェクト (ArCS) はその第 2 期にあたります。その活動は機関や研究者グループごとにばらばらのものではなく、200 名を超える大きなチームとして進められており、「北極域で起きている現象を把握・理解し、今後の変化を予測し、それを広く伝えていく」という共通の目標を掲げています。

まず第 1 章では、IPCC (国連・気候変動に関する政府間パネル) による報告書 (IPCC, 2013) や、北極評議会の北極圏監視評価プログラム作業部会が作成した雪氷圏変動に関する報告書 (AMAP, 2017) などを主な情報源とし、さらに最近発表された論文による新しい情報を加味して、近年の北極域でどんな変化が起きているのかを概観します。そして、10 年から数十年後、すなわち今世紀半ばにかけての北極域の気候・環境を予測しています。

注 → ★1 2017 年にイギリス BBC の記事の見出しにこの表現が使われたことで、広く使われるようになった。

第 1 節

これまでの北極域の変化





観測史上最小面積を記録した2012年9月16日の海水分布。黄線は1980年代の平均値を示す。
(提供：国立極地研究所・宇宙航空研究開発機構)

ユーラシア大陸と北アメリカ大陸に囲まれた北極海は、1年の大半を通してその表面を海氷に覆われています。そして、北極海と大西洋の間にある世界最大の島グリーンランドは厚さ約3kmの巨大な氷、グリーンランド氷床に覆われています。北極海の周りの陸上には凍結した地盤である永久凍土★²が分布し、北極海に近い地域はツンドラ★³植生に、より南方はシベリアのタイガ★⁴に代表される北方林に覆われています。本書では、北極海とその周辺域を合わせて「北極域」と呼ぶことにします。

北極域では特に2000年代以降、平均気温の上昇、海氷減少、氷河・氷床の融解、永久凍土の融解、極端な気象現象の増加などの変化が顕在化してきました。それらの変化をまず見ていきましょう。

- 注→★² 永久凍土：2年以上連続して0℃未満の状態を保つ土または岩。寒冷な高緯度や高山に分布し、最も厚いとされる東シベリア中央部で800m以上に及ぶ。多くの地域で地表面付近は夏季のみ融解し、活動層と呼ばれる。
- ★³ ツンドラ：低温で植物の成長可能期間が短いため、樹木が成長できない地域。特に永久凍土地帯では、地表に草本類、蘚類、地衣類などが生育する。
- ★⁴ タイガ：ロシア語でシベリア地方の針葉樹林の意。ユーラシア大陸、北アメリカ大陸の北部（亜寒帯）に発達する針葉樹林を指す。北方林（boreal forest）とほぼ同義で使われることが多い。

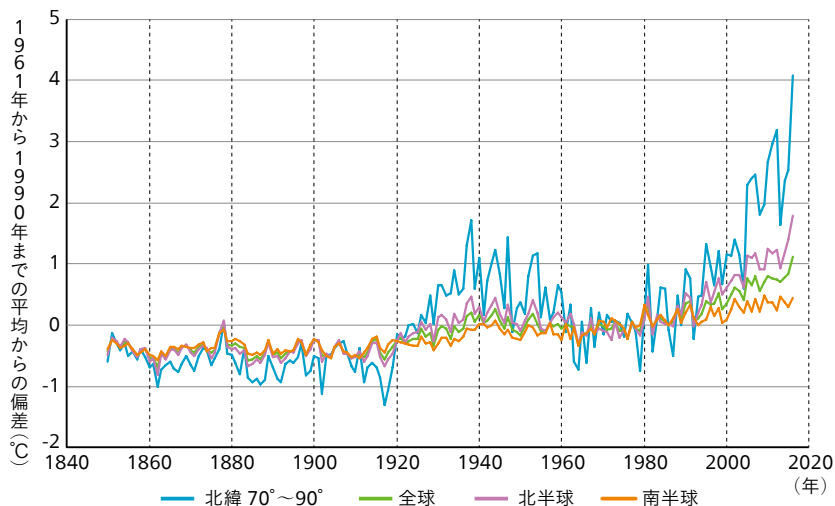
1 気温の上昇

気温上昇は、北極域に見られるほぼすべての変化のトリガーとなっています。IPCC による報告でも述べられているように、地球全体の気温は産業革命以後の人為活動によって約 1℃ 上昇したと推定されています。2015 年の第 21 回気候変動枠組条約締約国会議（COP21）^{★5}では、温暖化の抑制目標を 2℃にするか 1.5℃にするかが議論されましたが、実は北極域ではもっと顕著に気温が上昇しているのです。

図 1 は地球表面の年平均気温の変化をグラフにしたものですが、地球全体の平均気温（全球）や北半球の平均気温などと比べても、北極域（北緯 70°～90°）の平均気温の変化が目立って大きいことがわかります。年々の変動はありますが、北極域では基準にした 1961 年～1990 年までの 30 年間平均値から比べて 3℃もの気温上昇がすでに起きています。2010 年以降の北極域は 1900 年以降のどの時期よりも暖かく、過去 50 年間における他の地域の平均と比較しても 2 倍以上のペースで気温の上昇が続いているのです。

気温が 1 年間の平均で 3℃上がるということは、1 年間の季節変動の中ではさらに大きな温度上昇が起こりえることを意味しています。データからは冬季

図 1 全地球表面での年平均気温の変化



(Cowtan and Way, 2014 のデータセットをもとに作図)

注 → ★5 第 21 回気候変動枠組条約締約国会議（COP21）：2015 年にパリで開催され、「パリ協定」を採択。

の気温上昇がより顕著であることが明らかになっており、例えば 2016 年 10 月～12 月にかけての北極圏★6 の月平均気温はこれらの月のそれまでの平均気温より 6℃高いものでした。

このように北極域で地球全体の平均に比べて大きな温度変化が見られることを「温暖化増幅」と呼んでいます。温暖化増幅にはいくつかのメカニズムが複合的に作用しています。北極海の海水の減少に伴って海水面が広がり、太陽放射をよく吸収するようになったこと。その海に吸収された熱が秋から冬にかけて放出され、冬の気温を大きく引き上げること。さらに、気温の上昇により冬季に雲が増加し、地表付近を暖めることなどが考えられます。

北極域では、地球全体で起きている変化とは違う速さで気候の変化が起きていることに注意する必要があります。

2 北極海の海水の減少

北極海における海水の急激な減少は、北極域の急激な変化を象徴するものと言えるでしょう。北極海の海水は毎年夏の終わり、9 月ごろに面積が最小となり、冬にかけて再び拡大して春先に面積が最大となります。この 9 月ごろの最小面積の過去約 40 年の推移を示したのが図 2 です。この図を見ると、海水が特別な年に少なかったのではなく、長期的な減少傾向が続いていることが一目瞭然です。近年は年々の変動が大きめですが、2012 年には最小海水面積の最小値が更新されました。一方、春先の最大海水面積は、2016 年には記録的にもっとも小さくなりました。

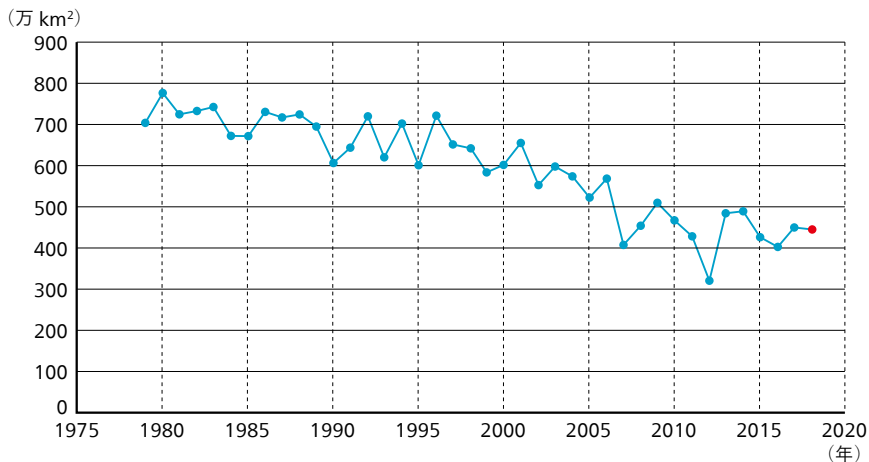
海水は、面積だけではなく厚さも減少し、質が変化してきています。北極海では、すべての海水が毎年融けて毎年凍っているわけではありません。一部の氷は夏を越えて何年も北極海に浮かんでいます。これは「多年氷★7」と呼ばれ、厚くて固く、容易には融解しません。その多年氷が急速に減少し、今や北極海のほとんどの海水は、秋と冬に成長し、春と夏には融解してなくなる「一年氷」になっています。北極海の中央部における海水の厚さは、1975 年～2012 年にかけて 65% 減少しました。このことは、海水が今後さらに融けやすくなることを意味します。

海水減少の原因としては、温暖化増幅による気温の上昇に加えて、海水温度

注 → ★6 北極圏：北緯 66° の北極線以北の地域のこと。

★7 多年氷：夏季を経ても融けずに残っている氷。一夏だけ経た二年氷と二夏以上経過した多年氷とに分ける場合もある。典型的には厚さ 2m ～ 4m に達する。

図2 北極海の最小海水面積の変化



(宇宙航空研究開発機構より提供を受け、北極域データアーカイブシステム (ADS) が公開)

詳細は左記の URL を参照 : <https://ads.nipr.ac.jp/vishop/#/extent>

の上昇、さらには海水の移動を決める風の向きや強さなど、複合的な要因が考えられます。現状では、数値モデルの予測値を上回る速さで海水減少が進行しており、まだ海水減少のプロセスの理解が不十分であることを示唆しています。

3 陸上の氷河・氷床の融解

陸上の氷の融解も加速しています。正確には、氷河や氷床がその質量を損失し、陸上にある氷の量が減少しています。減った分は海に流れ込み、その分が海水準（平均海面）上昇に寄与することになります。氷河・氷床の質量損失には大きく2つの要因があります。1つは、表面における涵養量（降雪量）と融解量のバランスがマイナスになっている（表面質量収支が負である）ことです。原因としては、主に夏の気温が高くなったことと、その結果生じた積雪の粒径の変化や雪氷表面の微生物の増加などによって、氷河・氷床の表面の反射率が下がったこと（黒っぽくなったこと）が考えられます。2つ目は、氷河が海に流れ込む末端部での融解量が近年になって増加していることが挙げられます。こちらは、海水温が上昇したことと、氷河の流動速度が速くなったことが原因として考えられます。

こうした変化が海水準変動に与えている影響を見ると、2000年以降の北

極域は毎年約 400Gt の氷を失っており、これは毎年 1mm 程度の海水準上昇をもたらします。このうちの約 70% がグリーンランド氷床の融解によるもので、これだけで毎秒約 12,000t の量になります。また、氷の融解速度は、2003 年～2008 年の期間における値と比べて 2011 年～2014 年ではおよそ 2 倍に加速しました。

4 永久凍土の融解

永久凍土は、北半球の陸地の約 5 分の 1 に分布しています。北極域の永久凍土層では、2007 年～2009 年の値と比較して 0.5℃ 以上地表面付近の地温が上昇し、ほとんどの地域で夏に融ける土壌層が深くなっています。この結果、永久凍土地域の都市やインフラでは、建物が歪んだり道路の凹凸がひどくなって通行できなくなったりという被害を生じています。また、地温の上昇に伴って従来は凍結して安定していた地盤で地すべり・土石流が発生し、山岳地域では落石が増えています。

最近の推定によると、北極域の土壌は世界の土壌炭素の約 50% を保持しており、この炭素量は空気中に存在する二酸化炭素の約 2 倍に相当します。氷を多く含む永久凍土では、夏季の地表面は湿地帯のような状態になり、強い温室効果をもつメタンガスの発生源となっていると考えられます。過去約 50 年間に永久凍土から直接放出された二酸化炭素・メタンの量はまだ比較的少ないと見積もられていますが、永久凍土の融解は今後それらの放出を急増させ、温室効果を大きくすることが予測されています。

また最近になって、永久凍土の変化に伴う新しい出来事が報告されました。2014 年にロシア・ヤマル半島で見つかった永久凍土クレーター（直径 37m、深さ 75m）は、その後の研究によって永久凍土中で発生・蓄積されたメタンガスの圧力が高まって爆発したものと結論づけられました（Buldozic et al., 2018）。同様のクレーターが周辺で 10 近く見つかっており、石油・ガス関連施設への影響が懸念されます。2016 年には、同じヤマル半島で融解した永久凍土から炭疽菌が発生し、多くの家畜に感染したほか犠牲者も 1 人出ました。また 2018 年には、永久凍土中に水銀が多く含まれているという論文が発表されており（Schuster, et al., 2018）、永久凍土の融解によるさまざまな影響が問題になっています。

5 極端気象の増加と中・低緯度への影響

北極域の気象・天候にも変化が起きています。最近の観測によれば、広範囲にわたって冬と夏の両方で非常に寒い期間が減少し、いくつかの地域（例えば秋と春におけるアラスカ北部とロシア北東部）では非常に暖かい期間が以前よりも増加しています。

一般に「極端気象」と呼ばれる、災害につながりかねないような気象現象も増えています。その多くは北極域ではこれまできわめてまれだった大雨のイベントです。海水に覆われない時期が長くなり、また南から暖かい空気が入りやすくなったことで、従来よりも大型の低気圧が北極域で発生するようになっていきます。また、気温の上昇は、これまで冬は常に雪が降っていた地域にも雨を降らせる機会を増やしました。冬の雨は大規模な雪崩を誘発しますし、雨のあとで地表面に氷が張り、家畜や野生動物が草を食べられなくなって大量死するなどの被害をもたらしています。

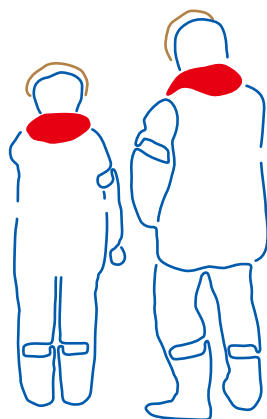
一方では、北極海の海水減少が、日本を含む東アジアや北アメリカ東岸における冬の豪雪をもたらしている、という関係が徐々に明らかになってきました。これは海水の減少によって「極渦」と呼ばれる北極上空の風の循環に変化が生じ、大きく蛇行することで北極の寒気が南側に張り出してくることが原因と考えられており、今活発に研究が進んでいるテーマです。遠く北極で起きている変化がアジアモンスーンも含めた中・低緯度の気象パターンに影響を与えていることは重要な点です。

6 まとめ

ここまで、北極域で進行中の変化をまとめてみました。変化のトリガーとなっているのは気温の上昇ですが、例えば海水減少が北極海の表面の反射率を下げてさらなる温暖化を生じさせるように、正のフィードバックをもたらすものもあります。1つの変化がさらに次の影響をもたらし、環境が複合的に変化しつつあるのが現在の北極域です。今後起こりうることを予測する際には、そのようなプロセスの間の関係を理解するとともに、未解明のプロセスがある可能性も心に留めておく必要があります。

第 2 節

今後の変化を予測する





グリーンランドでの観測風景（写真提供：国立極地研究所）

1 10年後の平均的な状況を知る

では、10年から数十年後、すなわち2030年ごろから今世紀半ばにかけての北極域の気象・環境はどのように変化しているのでしょうか。

実は、10年から数十年という時間で気候の将来予測を行うのは非常に難しく、精度の高い予測はほぼ不可能であるのが実情です。これは、北極域の温暖化とその影響による長期的な変化の大きさと、年々の変動の振幅が同程度であることによります。言い方を変えると、「年による違いと、長期的な変化が見分けにくい」ということになります。また、平均する期間が短すぎる問題もあります。地球の気候には振幅は小さめですが数十年程度の長周期の振動があり、10年程度の平均ではそのような振動の影響を受けてしまうため精度が低くなります。

本書では、最新の気候変動予測研究の結果を参照しつつ、例えば2030年になったときに2010年～2030年平均はどのようになっているか、というような考え方で、時間方向に平均した見方をしていきます。つまり、この節で述べる「10年後の北極」は、実際に10年後のある年の状況を予測するものではなく、「10年後の平均的な状況」ですし、上に述べたとおり精度にも限界がありますが、今後どんな準備が必要なのか、日本にはどう関係してくるかを考える材料になると考えています。

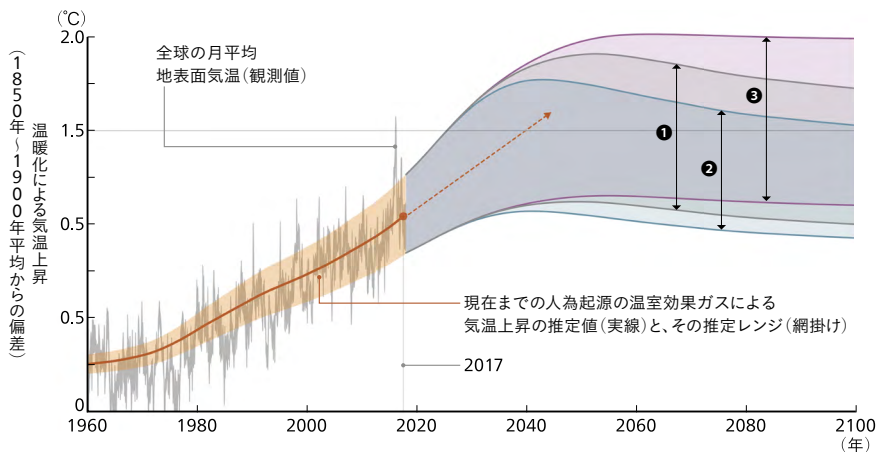
2 温暖化の進行はすぐには止められない

2018年10月に、IPCCは特別報告書『1.5℃の地球温暖化』★⁸を公開しました。この報告書は従来のIPCC報告書とは性格が異なり、「気温上昇を1.5℃に抑えるためにはどうすればよいか」というテーマで書かれたもので、今後の温室効果ガス排出量をどのように削減すると気温上昇がどうなるか、という分析が行われています。図3はその結果が要約されたグラフですが、ここで注目すべきは、今後の排出量をどのように削減するにせよ、今世紀の半ばくらいまでは気温の上昇が続いてしまうということです。実際に実施することは難しいレベルの、かなり大胆な排出量削減を仮定しても、2050年時点の地球全体の平均気温は1850年～1900年平均と比べて1.5℃～2℃高くなります。北極域では、温暖化増幅を考慮すると気温が3℃～4℃上がることを意味しています。これは以前の報告書（SWIPA2017など）でも指摘されていたことですが、仮に今すぐに温室効果ガスの排出を止めたとしても、気温の上昇が即座に止まるわけではないのです。これは北極域の環境を考えるうえでは重要な点です。

もちろん年々の変動があるため、比較的寒い年やさらに暑い年などもあるはずですが、平均的に見てこれだけの気温上昇が想定されます。今後数十年の北極域の変化ということでは、まずこの気温上昇が必ず起こることから考え始めなくてははいけません。

一方で、その先の今世紀の後半にどんな気温になるかは、これからの温室効果ガスの対策で大きく変わりうるというのが科学者の合意で、この特別報告書にもそのように書かれています。仮に対策があまりとられず、不幸にも気候モデルの予測どおりに地球全体の平均気温が3℃～4℃上がる状況になると、北

注→★⁸ プレスリリース：http://www.unic.or.jp/news_press/info/30738/、IPCC 報告書ページ：<https://www.ipcc.ch/sr15/>、政策決定者向け要約（仮訳）：http://www.env.go.jp/earth/ipcc/special_reports/sr1.5_spm.pdf



温暖化対策のパターンと、気温応答の推定レンジ(モデルによる予測値)

- ① 地球全体の正味の二酸化炭素排出が2055年にゼロとなり、二酸化炭素以外の要因による温室効果ガスが2030年以降抑制される場合
- ② より速い二酸化炭素削減(2044年に排出が正味ゼロ)を実施した場合の気温推定レンジ
- ③ 2030年以降も、二酸化炭素以外の温室効果の削減を実施しなかった場合の気温推定レンジ

図3 過去の地球の平均気温の変化(観測値)と温室効果対策を実施する場合の気温応答(モデルによる予測値)
(IPCC 特別報告書『1.5℃の地球温暖化』のSPM.1を基にArCSが改変)

極域では6℃～10℃くらいの気温上昇を覚悟しなければなりません。これまでにすでに起きている変化から考えると、そのような極端な温度上昇によって北極の環境は今と全く変わってしまうと考えられます。

3 海水と陸域の氷の融解が加速

以上の気温についての予測を踏まえて、その影響が北極域の雪氷や気象・海洋に与える影響を考えてみましょう。

まず考えるべきは海水の変化です。今世紀の半ばまでには、海水はほとんどが一年氷になり、現在見られる海水よりも薄く、面積は小さく、隙間が多くなって強度は低く、移動しやすくなります。海水の減少速度については、現在も数値モデルによる予測は現実の速さを再現できていません。このまま、図2で示した変化の傾向が続くとすると、多くの気候モデルによって予測されるよりも早い2030年代後半までに、夏の終わりの北極海からは、ほとんど海水がなくなる可能性が高いと考えられます。詳細な海水分布は特に年々の変動が

大きいため正確な予測は不可能ですが、遅くとも今世紀の後半には、北極海の海水は1年を通して存在するものではなく、季節的な現象となるのです。

この影響は大きく、広範囲に及ぶと考えられます。冬季にも大きな開放水面が現れ、海流などの物理的な環境や海の生態系が大きく変化します。また、反射率の低下と雲量の増加が北極海上の気温を上昇させ、大気・海洋間の水と熱の交換が大きくなることで降水量は増加傾向になるでしょう。このような大気の変化は北極海沿岸の陸上にも及び、さらには北極海航路の利用が容易になるほか、海洋生態系の変化が一部海域での漁業に影響するなど、人間活動にも大きな変化をもたらすことが予想されます。

先に述べたように、中・低緯度の気象への影響についてはまさに研究が進んでいる段階ですが、極渦の変調による寒波など、極端な気象状況がこれまでよりも多くもたらされる可能性が高いと考えられます。

一方、北極陸域の氷の融解も、気温の上昇によって加速すると考えられます。北極域にある小さな氷河の多くは、今世紀半ばまでに消滅する可能性が高く、グリーンランドの質量損失は加速すると考えられます。その結果、氷河・氷床から大量の融解水が海に流れ込み、栄養塩を含む物質が、海洋の物理的環境や生態系に大きな影響を与えると予想されます。

氷床以外の陸上ではどうでしょうか。気温の上昇により、雪ではなく雨が降る期間が増加し、大部分の地域で積雪が存在する期間は減少します。今世紀半ばまでに、地表面近くの永久凍土の面積は約35%減少すると予測されています。それに伴って現在、永久凍土地域で見られている変化がさらに広範囲に、より明確な形で現れることになり、建物や道路などインフラへのダメージが増加します。また、降水量が増加し、気温が上昇することで陸上植生に影響が現れるのはほぼ確実です。森林限界が北上し、ツンドラの地域が狭くなるでしょう。ただし、シベリアのタイガ林では、これまでに降水量の増加によって土壌環境が過度に湿潤になり、森林が枯死する現象が見られたことがあり、北極域の植生にとって好ましい変化となるかどうかは注意が必要です。

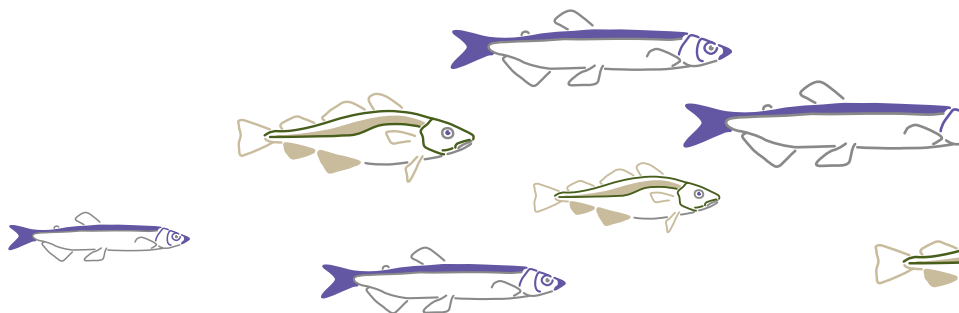
4 求められる人間社会の対応

これまで、地球の気候はその歴史の中で常に変動してきました。2万年ほど前には「氷期」と呼ばれる、地球表面の大部分が氷で覆われていた非常に

寒冷な時期がありましたし、さらに過去に遡れば、逆に温暖な時期もありました。例えば巨大な恐竜が生息した中生代の白亜紀は、二酸化炭素の濃度が1,500ppmにも達し、気温は現在よりも高く、南極や北極にも氷床が存在しなかったと考えられています。温暖な環境は地球が初めて経験するものではありません。

しかし、今問題となっているのは変化の速さです。過去の気候の変動と比べて、現在起きている変化は非常に速く、われわれの科学的知識は、何がいつ起こるのかを予測するには十分ではありません。そのようななかであって、北極域では400万人以上の人暮らししており、この変化の直撃を受けます。海水の上を犬橇で移動することが難しくなり、道路代わりに使っていた冬の凍結河川が利用できなくなるなど、新たな適応を迫られます。資源採掘や航路利用など、経済活動は拡大すると見られていますが、それが地域社会に、さらに世界経済にどう影響するかは未知数です。中・低緯度地域でも、新たな気象現象に対して対策が必要になるかもしれません。

数十年以内に年平均で3℃以上の気温上昇が避けられないものとして想定される状況の下、人間社会は急いで対応策を準備する必要があります。第2章で述べられますが、北極域の問題は科学以外の領域にまで拡大しており、今後はますます学際的に調査・研究を継続する必要があると思われます。



末吉哲雄

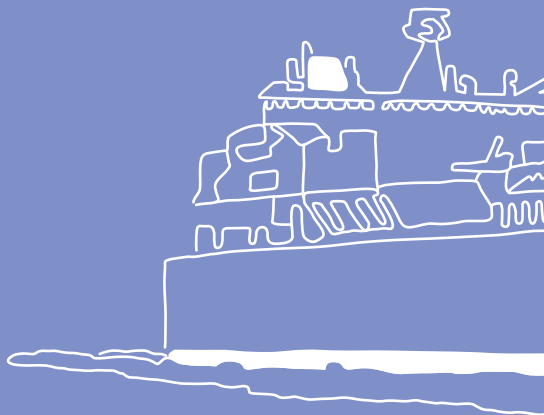
(国立極地研究所 特任准教授)

専門は雪氷学・古気候学。主に永久凍土の分布・厚さと気候との関係をテーマとした研究を行ってきた。ArCSプロジェクトのコーディネーターとして、成果発信を担当。

第 2 章

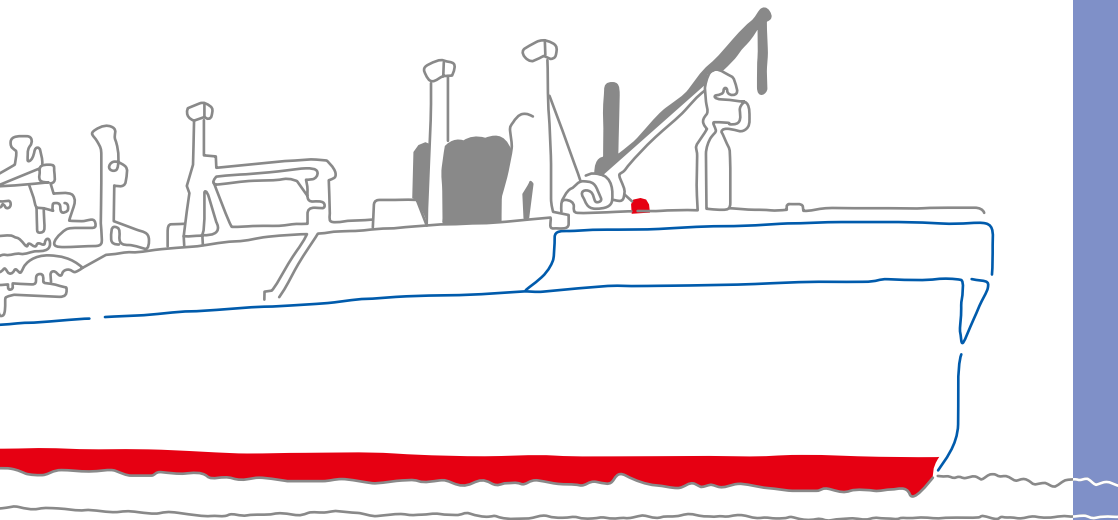
環境変化がもたらす 多様なインパクト

※ 第2章に掲載している写真は、
特に出典が明記されている場合を除き、
各節の執筆者が提供されたものです。



第 1 節

北極海航路への
インパクト





建造中の新型原子力砕氷船（ロシア）。

ロシアの北極域沿岸から積み出される天然資源輸送および北極海航路航行船の支援に就役する。

1 北極海航路のあゆみ

北極海を渡って大西洋と太平洋との間をつなぐ航路は総称して「北極航路」と呼ばれています。北極航路には、ロシア側沿岸を通る「北東航路」と、カナダ側多島海を通る「北西航路」があります。どちらの航路も、大航海時代以降の探検や調査を経て、北東航路は19世紀終わりにスウェーデンのアドルフ・ノルデンショルドによって、北西航路は20世紀初めにロアール・アムンセンが3年をかけて全容が明らかにされました。その後、北西航路はあまり使われることはありませんでしたが、北東航路は帝政ロシア時代・旧ソ連時代に国内輸送に利用され、しだいに戦略的な重要性を増していきました。1980年代

注→★1 「砕氷船」とは、氷を割るための頑強な船体と大きな推進力を有し、他の船の支援や氷海中での作業を行う船。氷海用貨物船の多くは、砕氷船の助けを借りて氷海を航行する能力をもち、「耐氷船」と呼ばれる。

には、旧ソ連が原子力砕氷船団^{★1}と氷海商船隊を整備し、北東航路のうち、ノヴァヤゼムリヤ島東岸からベーリング海峡までの区間の航路を通じて、北極海沿岸地域への国内輸送を強化しました。この航路はロシア名で「北極海航路」と呼ばれています。

米ソ冷戦時代、北極海航路は実質的には外国に閉ざされていましたが、1987年、旧ソ連のゴルバチョフ書記長が、北極海航路を国際商業航路として開放することを宣言しました。次いで1990年、旧ソ連は北極海航路の航行に関する規則（北極海航路法）を制定し、航行船舶に対する事前申請と許可取得の義務、原子力砕氷船の支援を受ける義務やその費用に関する規定などを示しました。しかし、事前申請は4ヵ月前に行わなければならない、原子力砕氷船支援料金は高額で算定方法が不透明であるなど、面倒な通航手続きが必要でした。加えて、氷海航行可能な貨物船が希少であること、氷海航行はまだ不確実性が高かったこと、利用期間は夏季のみに限定されるなどの問題から、北極海航路は、国際海運市場の関心を得ることはできませんでした。

2010年代になると、原油と燃料の価格が高騰し、海運業界は輸送コスト削減のために、低速運転などの対策を余儀なくされました。一方で、北極海の夏の海水が著しく減退するように

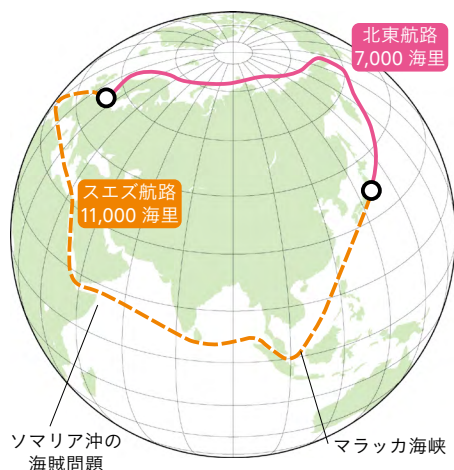
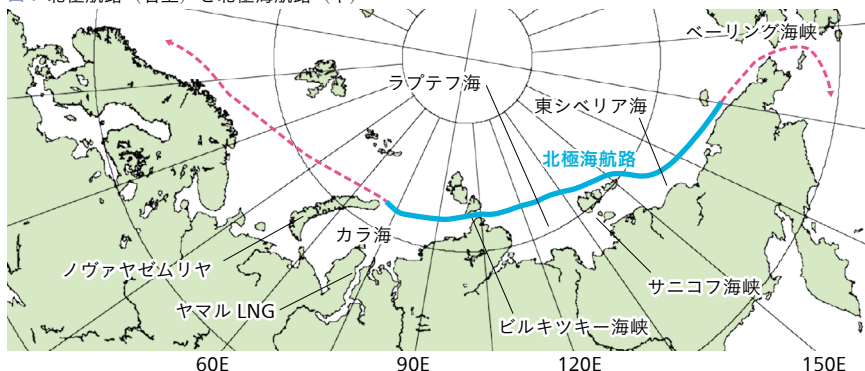


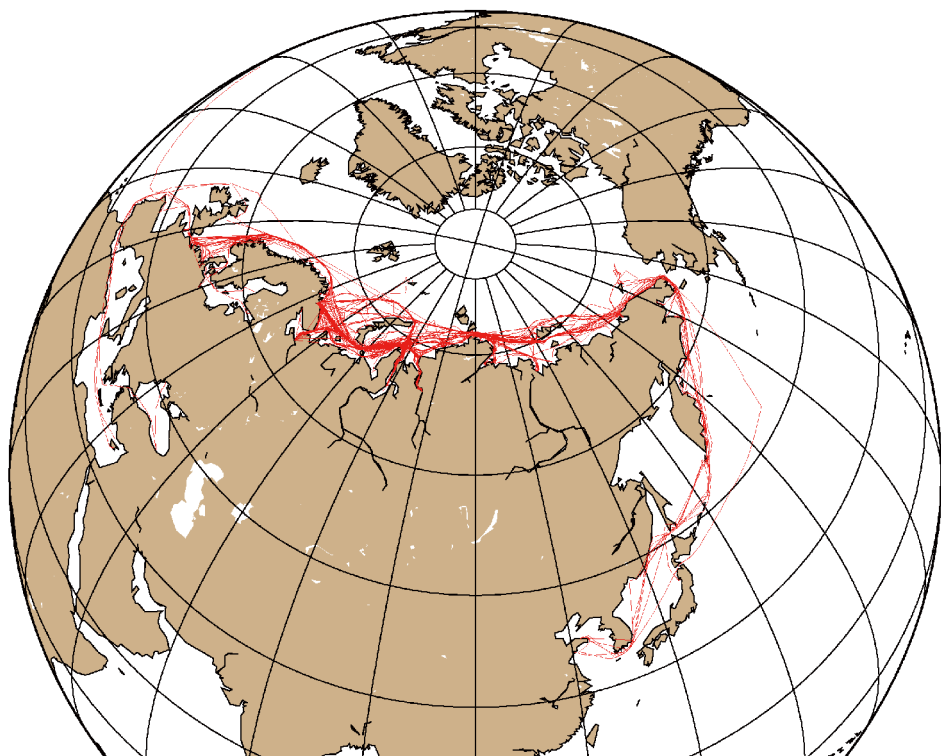
図1 北極航路（右上）と北極海航路（下）



なり、ヨーロッパ＝アジア間の輸送距離を短縮できる北極海航路に関心が集まってきました。おりしも、中国では鉄鉱石の需要が急増し、ヨーロッパ産鉄鉱石の需要が高まりました。こうした背景を受けて、2010年、ばら積船とタンカーによる北極海航路を通じたヨーロッパ＝中国間の試験貨物輸送が行われました。この成功を皮切りにして、北極海航路を通じたヨーロッパおよびロシア沿岸と東アジア間の資源貨物の輸送が始まり、2013年には71航海、貨物量136万tまで増大しました。しかし2014年、燃料価格の下落、アジアの資源需要低迷、海運市場低迷に加え、アメリカとヨーロッパの対ロシア経済制裁に対するロシアの反応を忌避して、北極海航路を横断する国際輸送は急速に減少しました。この低迷は2018年にも続いています。

その一方で、北極海航路の総貨物量は継続的に増大しており、2017年は過去最高の1,000万tを記録しました。これには、ロシアのペチョラ海・カラ海沿岸からの通年の原油輸送と、ヤマル LNG 基地建設に伴う貨物輸送の増大が背景にあります。また中国の船会社は、2013年に自社船での試験貨物輸送に成功して以来、ヨーロッパ＝アジア間の北極海航路横断輸送を毎年実施し、徐々にその回数を増やしています。貨物の内容は風力発電プラント、鉄鋼、

図2：5,000 載貨重量トン（DWT）以上の貨物船の航行軌跡（2017年1月～12月）



飼料などで、飼料は2017年・2018年には北海道まで輸送されました。ただし、年間の貨物量は20万t程度にとどまっています。

ヤマル LNG はロシア北極圏初の液化天然ガス (LNG) 基地で、2018 年から LNG の積み出しが開始されています。2019 年にはすべての生産トレインを稼働する計画で、これがフル稼働すると、現在の北極海航路の年間総貨物量を大きく上回る年間1,650万tのLNGがヨーロッパおよびアジア市場に輸送されます。さらに、ヤマル LNG のオビ湾対岸でも、年間2,000万t規模の新たなLNG計画が進められています。こうしてLNGをはじめとする石油・天然ガス資源が北極海航路貨物の大きな割合を占めるようになり、将来にわたってアジアおよびヨーロッパへの新たなエネルギー資源供給ルートが出現するものと予想されています。

2 北極海航路の特徴

北極海航路を使うと、ヨーロッパ＝東アジア間の海上距離を、スエズ運河＝マラッカ海峡を経由する一般的な経路に比べて、30%～40%短縮することができます。これによって船会社では燃料費と輸送時間が短縮され、運転経費の削減と温室効果ガス排出量の削減を行うことができます。荷主にとっても、輸送期間の短縮による事業効果を期待することができます。また、スエズ運河やマラッカ海峡は、事故や紛争が起ると利用できなくなるリスクがあり、近年はソマリア沖などで海賊の出没も増しています。北極海航路は、こうした障害発生時の代替路となることができます。さらに、地球の東西に離れているヨーロッパと東アジアの間の距離を短縮することによって、両地域の新たな経済関係を創出できる可能性も秘めています。

一方、氷海用の貨物船の建造コストは一般の船に比べて10%～40%程度高額となります。これに加えて、ロシアの原子力砕氷船支援料、氷海航行に対する船舶保険の割り増しなどのコスト増が生じます。また、北極海航路の区間には大型の貨物船が寄港できる港がなく、さらに通信環境も悪く、非常時に対応する管理体制が整っていません。そのうえ、夏季は白夜となりますが、11月には極夜が始まり、暗中の航海を強いられます。北極海航路のフィージビリティは、こうしたトレードオフの状況に対処しながら、海運市場と海運ネットワーク、天然資源などの市場環境によって決定されます。

3 安全な航行のためのルールの整備

国連の国際海事機関（IMO）では、氷海航行における海難事故や海洋汚染を防止するため、極域の氷海航行に関する規則として「極海コード」★²を定めています。また、これに従って国際船級協会連合は、航行する季節や海水の厳しさに応じた船舶の構造・装備を定めた極地氷海船階級「アイスクラス」（航行能力の高い順に PC1～PC7 の 7 段階がある）★³を定めています。

一方ロシア政府は 2013 年、航行申請と許可のプロセスを簡略化し、航行の 2 週間前までにインターネットで申請手続きができるようになりました。また、海水状況と砕氷船支援が必要かどうかの判断基準が整理され、従来はアイスクラス PC7 相当以上が常に求められていた規則が変わり、海水条件が緩和していれば、より階級の低い船でも航行が許されるようになりました。さらに、無氷や軽微な氷況では、砕氷船なしの単独航行も許可されるようになりました。

4 北極海航路の 海運利用を推し進める原動力

海水の減退は今後も続くと言想されています★⁴。それに伴って北極海航路の利用はどのように変化していくのでしょうか。段階的に見ていくと、

第 1 段階：夏季、航路区間の多年氷リスクがなくなる。

第 2 段階：通年で航路区間の多年氷がなくなる。

第 3 段階：北極海から多年氷がなくなる（夏は海水がなくなる）。

という変遷を経て、航路利用の可能性が拡大していきます。

北極海航路は西からカラ海、ラプテフ海、東シベリア海、チュクチ海の 4 海域に分けられ、海水の融解はおおむね 6 月にカラ海西部とラプテフ海東部で先行し、東シベリア海では融解が遅れます。そして 9 月を中心に 1 か月～

注 → ★² 船舶の安全、海洋汚染防止、海難事故発生時の対応などに関する国際条約や基準を定める国際海事機関（IMO）によって定められた、北極・南極海域を航行する船舶の安全に関する規則。海水など極海特有の危険性を考慮した船体構造、運航の安全、乗員の訓練、環境保護などに関する規則・基準が定められている。

★³ 各国の船級協会では PC7 よりも低いアイスクラスも定めており、多くの貨物船は PC7 よりも低い階級になる。

★⁴ 2018 年 10 月、IPCC は特別報告書『1.5℃の地球温暖化』において、「産業革命以前からの平均気温上昇が 2℃以上になると、10 年に 1 回程度、夏の北極海の海水がなくなる可能性が高い」と報告している。

1.5 ヶ月間はほぼ無氷となり、10 月には再び海水面積が急速に拡大し、11 月末には北極海航路のほとんどが海水に覆われます。耐氷貨物船を用いた一般的な商業運航の場合、現在の北極海航路の利用期間は 6 月下旬～11 月下旬のおよそ 5 ヶ月間になります。

航路区間のうち、カラ海とラプテフ海を分けるビルキツキー海峡と、ラプテフ海と東シベリア海を分けるサニコフ海峡は、夏でも海水が残ることが多く、また変形氷域や氷盤が密集した氷域^{★5}が現れて、航行障害が発生しやすい海域となっています。夏の商業運航時期である 6 月下旬～11 月下旬に、この海域から多年氷のリスクがなくなれば、砕氷船を必要とする頻度が大幅に縮小し、航行可能期間が拡大すると同時に、アイスクラスの低い船や、アイスクラスをもたない船の航行が増大すると期待されます。

通年で航路区間から多年氷がなくなると、砕氷船の支援があれば貨物船の通年航行が可能になってきます。現在は、多年氷のリスクの低いカラ海において、砕氷船支援の下での原油の通年輸送が行われています。これと同等の海水環境が、航路海域全体に広がるわけです。さらに、北極海から多年氷がなくなると、夏季に加え、冬季にも中央北極海を横断する「極点航路」の貨物船航行ができるようになります。この極点航路が実現すれば、ロシアの航行規則に縛られることがないので、新たな用途を生む可能性があります。

北極海航路を横断する現在の商業利用の多くは、ばら積貨物を主体としており、途中寄港せずに起終点（ヨーロッパ北部と日本および東アジア間）の港湾間を結ぶ形態となっています。海水が少なくなり砕氷船使用料を節約できるようになれば、距離短縮による燃料費や船の損料・傭船料、運転経費などが節約できるので、輸送コストはスエズ運河回り航路と遜色ないか有利となると見込まれています（大塚, 2017）。

北極海航路が定常的に利用され、その規模が大きくなると、国際海上輸送ネットワークにおけるプレゼンスが高まり、荷主が航路選択する自由度が高くなります。それに伴って、一部の港湾では海上物流戦略を転換していく可能性があります。中国政府は 2018 年に発表した『北極政策白書』の中で、北極政策が中国の「一帯一路」プロジェクトの一翼を担うことを示し、北極海航路の開発は国策として位置づけています。こうした中で、中国の船会社が進めている北極海航路の輸送サービスは今後も拡大されていくものと予想されており、航路利用の定常化を推し進める原動力になる可能性が強くなってきました。

注 → ★5 海水が山脈状や壁状に重なり合って変形を受けた氷の総称。

5 北極海航路の利用拡大に伴う課題

2010 年以來、北極海航路を通じた国際海上輸送の利用が進んでいます。今後 20 年ほどは、ヤマル半島周辺からの LNG 輸送も本格的に行われる見込みです。稼働を始めたヤマル LNG だけでも、今後は年間 160 往復以上の航海が行われることになります。また、今後海氷減退が進めば、中国が主導する貨物輸送も拡大し、北極海の海域を多くの貨物船が往来する時代がやってくる可能性が高くなりました。その頻度や輸送量は、他の国際的な幹線航路に比べればきわめて小規模ですが、一方で、人跡未踏であった北極海が商業利用の場となることによって海洋環境にどのような影響やリスクが生じるのかといった問題が浮かび上がってきました。

IMO は、極海域における船舶航行による海洋環境汚染や海難事故を防ぐために、「極海コード」を定めました。しかし、現実には起こりうるリスクや環境影響の多くはよくわかっていません。船舶からの排出ガス、バラスト水、廃棄物、海中騒音^{★6}、航走波^{★7}、船舶航行による生息場への影響、油等の流出事故など、それぞれの事象が環境に与えるインパクトとそのプロセスを定性的・定量的に解明する作業は、始まったばかりなのです^{★8}。

また、航路の海運利用における事故リスクおよび事業リスクの把握と低減対策も重要な課題です。衛星を使った海氷などの海象や気象情報の観測と、観測データと連携させた海氷・海象・気象予測は、船舶航行時の危険を低減するだけでなく、より効率的・合理的な航行を実現するための重要な情報となります。海氷や気象の短期予測は、航行中の船舶の危険回避や航路選択に不可欠な情報です。週単位・月単位の中期的な予測は、船の運航判断・運航計画を左右する情報となりますし、年単位あるいはもっと長期的な予測は事業を持続させるかどうかの可否の判断において求められる重要な情報となるものです。

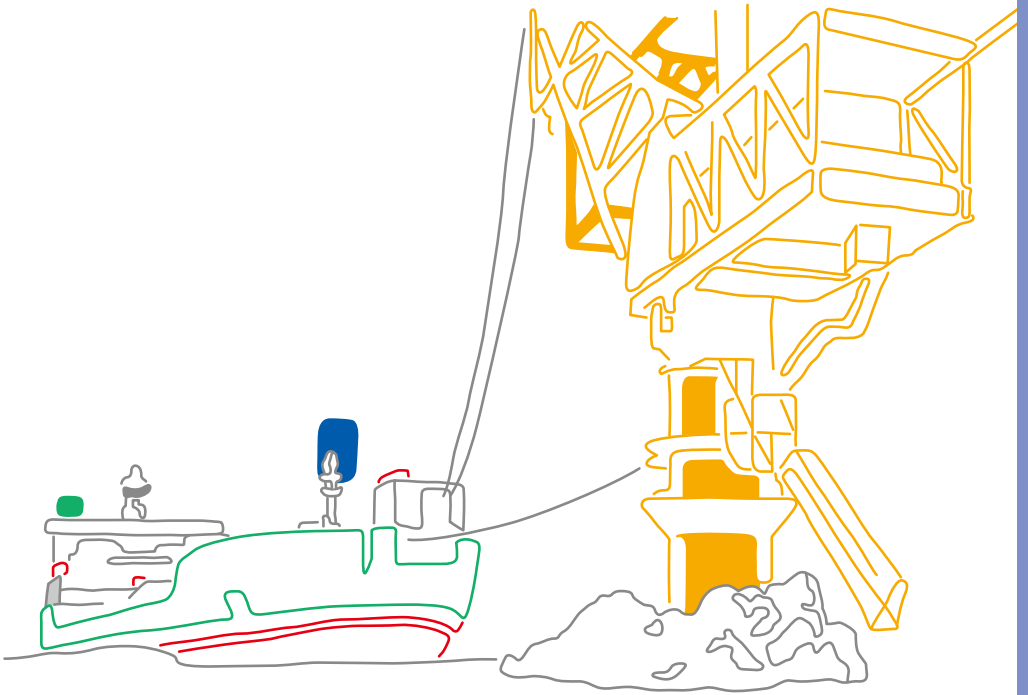
注 → ★6 船が航行する際には、船のエンジンやスクリューによる音が海中に伝わる。この海中騒音は、海中の生物に影響を及ぼす場合があると考えられている。

★7 船が進む際に、船首から後ろの水面に向かって末広がりに生じる波のことで、ウェーキとも呼ばれる。この波のために平らな氷盤が割れたり、水域の静穏性が乱れると、そこにすむ生物の環境に影響が出る場合があると考えられている。

★8 北極評議会では、エコシステムアプローチ、海洋保護区、海中騒音、油流出事故など広範な課題検討に取り組んでいる。

大塚夏彦（北海道大学 教授）

専門は海洋工学、海岸工学、海上物流。北日本港湾コンサルタント株式会社を経て現職。北極海航路の可能性および北極域の持続的な利用を目的とした課題に関する研究を進めている。



第 2 節

資源開発へのインパクト



ヤマル半島ノヴィ・ボルト油田の全景

1 北極海における石油・ガス田開発の現状

2008 年のアメリカ地質調査所の報告書によれば、北極圏には未発見の石油資源の 13%、天然ガスについては 30% が埋蔵されているようです。北極圏における資源開発は、流水の縮小などにより操業条件が整備され、炭化水素の搬出や作業用資機材の搬入が容易になったことから、この 10 年ほどの間に飛躍的に進んでいます。今後も地球温暖化が継続すると考えるならば、北極圏における資源開発は、さらに勢いを増していくと予測されます。このページでは、石油・ガスを中心にした資源開発が 10 年後にどう変わっていくかを考えていきます。現在、最も活発な開発が行われているのはロシアの陸域・沿岸海域なので、ロシアが中心になりますが、アラスカ、グリーンランド、ノルウェーの

状況にも触れます。

予測を行ううえで、気候変動の影響よりも大きく作用すると考えられる要因に、油価や対ロシア経済制裁があります。ロシアでは2014年以降、油価の下落と欧米からの制裁により、北極圏開発にブレーキがかかっています。現時点では長期的に高油価が継続するかどうか判断できず、油ガス田開発への積極的な投資は期待できそうにありません。今後10年の間は、大規模な油ガス田開発の投資が次々と決定されるというよりは、投資規模の比較的小さい探鉱と評価作業が粛々と進められるといった「薄日のさす」活動状況で推移するものと考えられます。

2 バレンツ海とカラ海を中心とした海洋油ガス田の開発

ロシアの北極圏で石油・ガスの探鉱・生産が行われている主要な地域を図1に示しました。スカンディナヴィア半島北方のバレンツ海には暖流のメキシコ湾流が流入し、南の沿岸部を除いて結氷がありません。そのため、生産が行われている油田のほかに、すでに発見されている未開発の巨大ガス田があります。バレンツ海の東のカラ海は冬季には結氷しますが、比較的薄く氷厚は2m以下です。この2つの海域は、操業条件に恵まれ、また陸域の油ガス田地帯から北に延びるところにあり、資源ポテンシャルが高いことから、今後も開発が進展するものと見込まれています。

バレンツ海のほぼ中央部に位置するシュトックマンガス田は、ソ連時代の1988年に発見された埋蔵量が世界第8位の超巨大ガス田でしたが、ソ連崩壊の混乱から長らく操業していませんでした。2007年に国有ガス会社のガスプロムとフランスのトタル、ノルウェーのスタトオイルハイドロ（当時）が参加して液化天然ガス（LNG）事業を検討しましたが、輸出先と想定されたアメリカでシェールガス革命^{★1}が起こり、ガスが供給過剰になったこと、LNG基地を置くムルマンスクまで565kmもの距離があり、技術的な問題が予想されたことから、2012年に開発が断念されました。今は休眠状態ですが、洋上LNG生産技術の導入により長距離という問題が解決できれば、10年後に開発の見通しが立つ可能性もあります。

注 → ★1 有機物を多く含む頁岩（シェール）を地層面に沿って掘削し、水圧破砕で割れ目をつくり、ガスを取り出す技術がアメリカで確立した。これにより、ガスの生産量が急増したことからシェールガス革命と呼ばれる。

バレンツ海南部のペチョラ海は冬季に結氷します。ここで、やはりソ連時代の1989年にガスプロムによりプリラズロムノエ油田が発見されましたが、生産が開始されたのは2013年になってからです。2016年には日量4.3万バレルを生産し、小規模ながら北極海での油田操業と環境保護の実績を積んでいます。この油田の約50km西方では、より規模の大きいドルギンスコエ油田が発見されており、今後の開発対象となるものと見られます。

2013年1月、チュクチ海からカラ海までの主要な海域に鉱区が設定されました。そのうち、カラ海北部の東プリノヴォゼメリスク（EPNZ）の3つの鉱区については国有石油会社のロスネフチが権益を取得しました（図1）。これにアメリカのエクソンモービルが33.3%の権益で参加し、2014年8月9日からEPNZ-1鉱区で試掘が開始されています。しかし同年9月12日、アメリカとEUはウクライナ問題の激化で経済制裁を強化し、欧米企業による北極海、大水深域、シェールの掘削技術等の対ロシア供与を禁止しました。エクソン

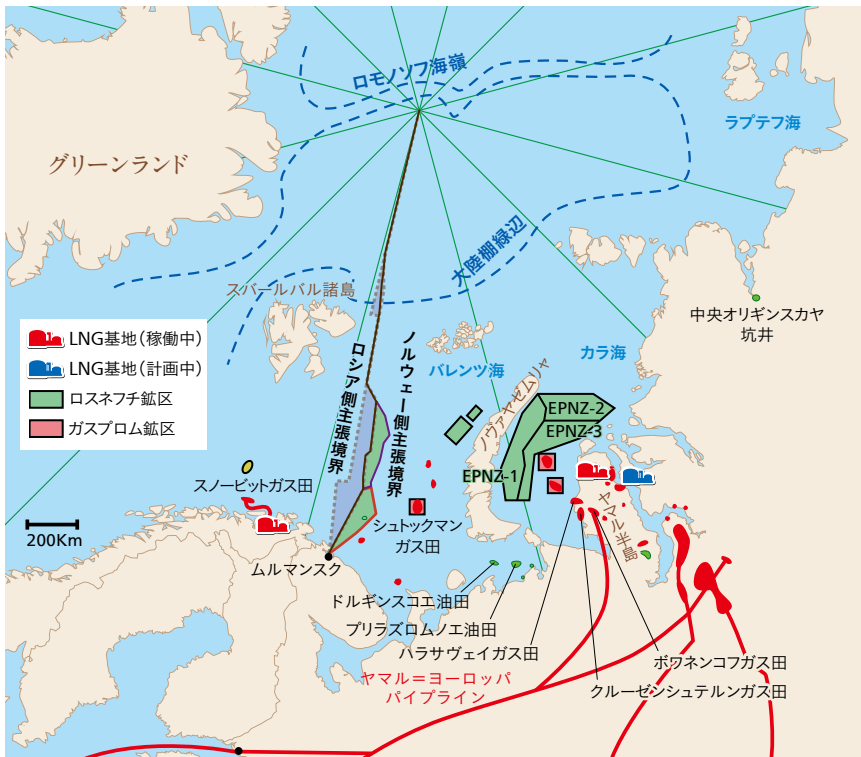


図1 ロシアとノルウェー北極圏における探採・生産の活動
(独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）資料を基に北極域研究推進プロジェクトが改変）

モービルは9月に撤退を表明し、作業も中断しましたが、9月27日になってロスネフチが巨大油田の発見を公表しました。これは撤退表明前に坑井の目的層まで到達していたということで、埋蔵量は10億バレルと予想され、「ポベダ（勝利）油田」と名付けられました。1本の坑井での発見量としてはきわめて大きなものです。しかし、ロシア側は十分な開発技術をもっていません。ノヴァク・エネルギー大臣は、北極圏では油価が1バレル当たり70ドル以上でないと採算が合わないと言っています。このように技術と油価の課題を抱えているため、開発着手は困難な状況にあります。10年後に、この油田が例えば中国が参加して開発をスタートさせるのかどうか予測しがたいのですが、現在、世界中の石油企業が注目している有望な油田となっています。

3 ヤマル半島における石油・ガス開発

ヤマル半島におけるガスの生産は、ガスプロムが開発したボワネンコフガス田（埋蔵量世界第7位：図2）から始められ、ヨーロッパ市場に至るヤマル＝ヨーロッパパイプラインが2012年に敷設されました。ガスプロムは2019年、その北北西にあるハラサヴェイガス田の本格開発に着手し、2023年には操業を開始すると発表しました（*Interfax*, 2018/7/13）。次いで、ボワネンコフガス田の西隣に位置するクルーゼンシュテルンガス田も開発の対象となる予定で、この一帯は2020年代半ばの主力ガス田地帯となるものと見られています。

一方、ロシア第2位の民間ガス会社ノヴァテクが進めてきたヤマル LNG プロジェクト（図2）は、2017年12月に第1トレインが稼働開始となり、LNGの第1船がヨーロッパ方面に向かいました（西ルート）。2018年には流水の融解を待って、7月に北極海航路（東ルート）を活用して、中国江蘇省如東にLNGが運ばれました。8月には第2トレインが生産開始となり、第4トレインが着工されています。第3トレインは2018年末に完成しており、2020年代には設計量の年間1,740万tで生産が行われる見込みとなっています。

2020年代には、ヤマル LNG に続く LNG プロジェクトが始動する予定です。第2弾となる Arctic LNG2 は、ヤマル半島からオビ湾を隔てて東側のギダン半島にあるサルマノフ（ウートレンニエ）ガス田をソースとしており、2022年～2023年の稼働開始を目指しています（*International Oil Daily*, 2018/10/26）。すでにフランスのトタルが10%の権益で参加を決めており、



図2 ヤマル半島における石油・ガス開発
(JOGMEC 資料を基に北極域研究推進プロジェクトが改変)

サウジアラビアのサウジアラムコも 30% の権益に当たる 50 億ドルを出資する意向を示しています (Interfax, 2018/10/23)。Arctic LNG2 の生産量は年間 1,980 万 t と予想されており、10 年後には中心的な LNG 事業になっているものと期待されています。

今後の輸送量増大を見据えて、北極圏内を航行する砕氷 LNG タンカーの

数を増やす計画も進んでいます。カムチャッカ半島とコラ半島には、砕氷 LNG タンカーから通常 LNG タンカーへと積み替える施設を建設する予定です。カムチャッカ半島の基地に関しては、2018 年 9 月、日本の国際協力銀行 (JBIC)、三井物産、丸紅がノヴァテクと協力協定を結んでいます。

上記の 2 つの北極圏 LNG プロジェクトと、サハリン 2、バルト海 LNG 等が実現すると、ロシアの LNG 生産量は 2030 年には年間 5,700 万 t ~ 7,000 万 t となる見込みで、世界の「LNG Big 4」の一角を占めることになると思われます。その大半が北極圏からの LNG になります。

さらに、Arctic LNG3 社も設立されています。同社はライセンスを保有するオビ湾の北極海への出口付近で大規模なガス田を発見し、ギダン半島内陸部にもガス田を保有しており、これらのガスをソースとして 3 番目の LNG 事業となる可能性があります (International Oil Daily, 2018/10/11)。

ヤマル半島には北北西－南南東方向に走る長大な背斜軸★²があり、それに沿って 7 つのガス田が並んでいます (図 2)。その南南東にあるノヴィ・ポルトでは、1983 年に深掘りによってガス層の下位に油層が発見されましたが、消費地へと石油を搬送するパイプラインを敷設することが経済的に困難で、長らく石油鉱床は手付かずとなっていました。ようやく 2014 年からノヴィ・ポルト油田の本格生産と砕氷船がエスコートする石油タンカーによる搬出が開始されました (Interfax, 2018/10/15)。2020 年代半ばには、隣接するヌルミンスコエガス田において油層までの掘削を行い、ノヴィ・ポルト油田まで石油パイプラインを敷設して、油田としての生産が行われる可能性が十分あります。それから順次、北北西方向に開発の手が延びていき、10 年後には、ヤマル半島南部が活発な石油地帯となると予測されます。

一方、ロスネフチは 2017 年 4 月からラプテフ海に面したタイミル半島東部のハタング湾で中央オリギンスカヤ第 1 坑井を掘削し、6 月には油層の存在を確認しました。ラプテフ海における最初の油田を発見したことになります。こうした新たな発見を受けて、北極海大陸棚は 2050 年までにロシアの石油総生産の 20% ~ 30% を占めるようになるという専門家の試算も出ています (Rosneft Press release, 2017/6/18)。

注 → ★² 地層が上面を凸とする形で変形したものを「背斜」と呼び、その凸がほぼ直線状に伸びている形態を背斜軸と称する。

4 アラスカ、グリーンランド、 ノルウェーにおける資源開発

アラスカでは1968年に、ノーススロープ（陸域）で、北アメリカ最大となるプルドーベイ油田（埋蔵量150億バレル）が発見されています。これは北極圏での油田開発では最も早く、1977年にはアラスカ横断パイプラインが建設され、搬出手段が確保されました。現在、その近隣域では多くの企業により試掘が展開されています。ここは陸域でアクセスが比較的容易であり、原油の搬出手段も整備されていることから、今後も安定的な操業が期待されます。

グリーンランドでは陸域に石油の滲み出しが見られ、石油の存在が期待されています。世界の主要石油会社によりグリーンランド大陸棚を共同調査する「カヌマス・プロジェクト」が組織されており、日本は1989年に参加しました。2013年には北東大陸棚が入札に付され、2鉱区にグリーンランド国営石油公社（12.5%）のほか、日本連合、シェブロン、ロイヤル・ダッチ・シェル（各29.2%）が加わりました。ただし、現状では技術的な検討作業のみで、試掘にまで至っておらず、10年後に活動が始まる兆候は見当たりません。



アラスカのパイプライン

ノルウェー沖のバレンツ海での最初の発見は、ハンメルフェストから140km 沖合いにあるスノービットガス田で、1984年のことです。2001年から開発に着手し、2006年からLNGの生産が開始されました。同ガス田の北方100kmの地点では、2011年～2014年にエクイノール（旧スタトオイル）が一連の油層を発見しました。2018年2月、エクイノールは浮遊生産貯蔵出荷設備を発注し、これが2022年に設置されて、その後生産開始となる予定です。バレンツ海でガス層ではなく油層の発見があったことは、今後の探鉱に弾みがつくだけでなく、ノルウェーの海洋開発関連企業に事業機会の拡大をもたらすと見られています。

5 石油・ガス資源がロシア経済を動かす

以上のように、ロシアの北極圏では石油・ガス開発が今後着実に進んでいくと見られます。これは、ロシアの石油・ガス開発のなかで、北極圏の比重が顕著に高まることを意味します。特にヤマル半島がロシアの石油・ガス生産の中心になること、またロシアが世界有数のLNG輸出大国になることは、蓋然性が高いと考えられます。ロシア経済にとって北極圏の重要性が著しく高まるのです。

ここでの予測は、現在の気象条件が今後も続き、北極海における開発・生産活動や北極海を通じた輸出入がより容易になることを前提としています。この前提条件が崩れると、北極海における資源開発が困難になるだけでなく、ロシア経済の発展にとっても、大きなネガティブ要因になると考えられます。

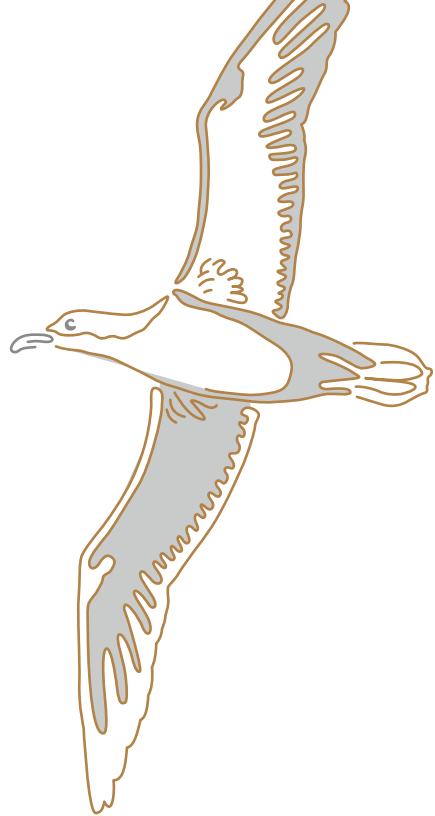
本村真澄

（石油天然ガス・金属鉱物資源機構 主席研究員）

専門はロシア・カスピ海諸国の石油・天然ガス開発と輸送問題、地球資源論。著書に、『石油大国ロシアの復活』（アジア経済研究所、2005年）、『化石エネルギーの真実』（石油通信社、2016年）など。

田畑伸一郎（北海道大学 教授）

専門はロシア経済。マクロ経済の数量分析、制度分析のほか、極東・極北経済の研究を行う。共編著に、『Russia's Far North: The Contested Energy Frontier, Routledge, 2018』など。



第 3 節

北極海の生態系・水産活動への インパクト



底曳きトロール網で採集した魚類・底生生物

北極海は冬季には海水に覆われますが、夏季には北極海中央部を除く海域で海水が融解し、海水面が現れます（季節海水域）。現時点では、北極海中央部の生態系についての知見はきわめて少なく、水産活動もほとんど行われていないため、ここでは主に季節海水域、特に日本が観測を行っている太平洋側北極海およびベーリング海の陸棚域における知見に基づいて環境変動の影響を紹介していきます。

1 北極海の生態系

北極海の環境変化が海洋生態系に与える影響を知るには、現在の環境と、海洋生態系の構造や食物連鎖に関する知見が必要になります。特に、海洋生態系

に多大な影響を与える海水との関係は重要です。海水とその上に積もった雪は、海中の植物プランクトンや海水の下面で増殖する藻類（アイスアルジー）の光合成に必要な光を大幅に減衰させます。そのため、海水に覆われている時期の光合成は著しく制限されますが、春になるとしだいに日照量が増し、弱い光に適応したアイスアルジーが増殖を始めます。

その後の海水後退期には十分な光が海中まで届くので、大型珪藻類を主とする植物プランクトンが活発に光合成を行い、海水縁では「氷縁ブルーム」と呼ばれる大增殖が起きます。一方、この時期の陸棚域は水温が低いので、動物プランクトンの増殖も植物プランクトンを採食する圧力も弱く、大增殖した植物プランクトンの多くは消費されずに海底に沈降します。これが底生生物（ベントス）の餌となり、さらにベントスを捕食する底生魚類や海棲哺乳類の餌となっています。これが、「漂泳系－底生系カップリング：Pelagic-Benthic coupling」と呼ばれる食物連鎖です（Grebmeier et al., 1988）。

温暖化により、早い時期に海水が後退するようになると、この食物連鎖が変化すると予想されています。海水後退時期の太陽光はまだ弱く、また強風によって海中の鉛直混合が引き起こされるため、珪藻類による氷縁ブルームは起きなくなります。その後、海面が温められ成層する（鉛直混合が収まる）と、植物プランクトンがブルームを起こします。このときの水温は現在よりも高くなるので、増殖する植物プランクトンの種類が変わり、小型化します。この時期は、小型植物プランクトンを捕食する小型の動物プランクトンの増殖時期と重なるため、植物プランクトンの多くは消費されてしまいます。その結果、海底に沈降する植物プランクトンの量は大幅に減少し、代わりに動物プランクトンに食べられ、漂泳性の魚類の餌となります。これが、「漂泳系－漂泳系カップリング：Pelagic-Pelagic coupling」と呼ばれる食物連鎖です（Hunt et al., 2011）。

2 植物プランクトンの変動とベントスへの影響

このように、海水は植物プランクトンの光合成による有機物生産（基礎生産）に多大な影響を与えています。現在では、基礎生産の分布は人工衛星を使って連続的かつ面的に観測することが可能で、観測ができる開水面のデータを見ると、近年の北極海では増加傾向を示しています（Pabi et al., 2008; Arrigo and van

Dijken, 2015)。これは、海水に覆われない海域が増加し、植物プランクトンが光合成を行う面積と時間が増加したことと (Pabi et al., 2008)、植物プランクトンの栄養源となるリンや窒素などの栄養塩の供給が増加したことが原因だと考えられています (Arrigo and van Dijken, 2015)。

一方で、栄養塩の供給は、今後、海水が減少することで減少していくのではないかと推測されます。北部ベーリング海から南部チュクチ海にかけての光合成を支えている栄養塩に富んだアナディール水は、ロシアのアナディール湾から輸送されます。アナディール湾では冬季に海水がつくられ、低温・高塩分の海水が海底に沈み込みます。その後のプロセスは本プロジェクトで調査中ですが、この沈み込みの過程で海水は高い栄養塩を含み、それが北部ベーリング海から南部チュクチ海に流れ込むと考えられます。

アナディール湾における海水形成と海水の沈み込みに重要な役割を果たしているのは、海水域にできる開水面「ポリニヤ^{★1}」で、その面積の年による違いが大変大きいことがわかっています (Ohshima et al., 2016)。今後の温暖化でこの湾での海水生成機能が失われると、栄養塩の供給が減り、北部ベーリング海から北極海への有機物の輸送 (Abe et al., accepted) も滞ることが懸念されます。また、この海域では、海水後退時期や海水温の変化による植物プランクトンのサイズの変化 (Fujiwara et al., 2016) や、秋季の海水成長が遅延することにより、温帯海域で見られる秋季ブルームも見られるようになってきました (Ardyna et al., 2014)。さらに、海水の中で生息するアイスアルジーや海水の下で起こる珪藻の大規模ブルーム (Under-ice bloom) (Arrigo et al., 2012) などの現象については、現時点ではまだ観測データが不足しており、それらも考慮しつつ今後の変化を予測していかなければなりません。

以上のような低次生産の変化は、実際に生態系の変化にも現れています。過去の研究結果によると、冬季にポリニヤが形成されるセントローレンス島南部の海域では、二枚貝が減少しています (Grebmeier et al., 2006)。本プロジェクトでも、植物プランクトンのサイズ分布を人工衛星で観測し、現場で取得されたベントス生物量との関係を調べました (Waga et al., in press)。その結果、ブルーム終了後に存在する植物プランクトンのサイズが大きいほど、その下に生息するベントス生物量も多く、その生息域が徐々に北上していることが明らかになりました。これは、漂流系ー底生系カップリングの生態系構造が北へシフ

注 → ★1 気象条件から考えると、より厚い海水が存在するであろう場所に、開水面と薄氷域がある程度の時間的持続性をもって維持される海域 (『低温環境の科学事典』より)。風や海流によってつくられる沿岸ポリニヤは、海水を生成する場となっている。

トしていることを示していると考えられます。

3 動物プランクトンの輸送と再生、 食物連鎖

太平洋側の北極海はベーリング海峡を境にしてベーリング海と接しています。海流は基本的にベーリング海側（太平洋側）から北極海方向へ流れており、近年その流量が増加しています（Woodgate et al., 2012）。それに伴って、太平洋側に生息している動物プランクトンが北極海へ侵入していることが明らかになりました（Matsuno et al., 2011）。しかし、秋季には海水が海を覆いはじめ、海水温も太平洋に比べるとかなり低いので、侵入した動物プランクトンが抱卵し孵化したとしても、その生存率はきわめて低く（Matsuno et al., 2015）、北極海での増殖と再生は現時点では観測されていません。

北極海での捕食者である魚類の胃内容物や海鳥の分布を調べると、生産者である植物プランクトンと捕食者をつなぎ、食物連鎖の「鍵」となっている動物プランクトンがわかります。海棲哺乳類や海鳥などの餌となっているホッキョクダラは主にヨコエビやカイアシ類を捕食していますが、年によっては、北部ベーリング海や南部チュクチ海でゼラチン質の動物プランクトンを多く摂餌していました（Nakano et al., 2016）。また、この海域で生物量が最も大きい海鳥であるハシボソミズナギドリは、秋季になるとオキアミが生息する場所に移動することがわかりました（Nishizawa et al., 2017）。この海域の食物連鎖は基本的には漂泳系ー底生系カップリングですが、北極海洋生態系にとって複数の動物プランクトングループを介した食物連鎖も重要かもしれません。その食物連鎖と環境変動との関係は現時点で不明ですが、これらの動物プランクトンが「鍵」となる生物である可能性もあるため、今後注意深くモニターしていく必要があります。

4 水産生物の移動と速度、水産業への影響

日本は、ベーリング海の水産資源、例えばスケトウダラやカニなどを大量に輸入しています。ベーリング海を含む北極域の環境変動は水産生物の生息域に変化をもたらす可能性があるため、日本の食卓事情や経済への影響も懸念され

ます。しかし、魚類や甲殻類などの海洋環境（特に水温）に対する反応にはタイムラグがあり、さらに餌生物との関係や種間の競争もあるため、環境の影響を予測することは簡単ではありません。

本プロジェクトでは、1993年～2016年の間にアメリカが底曳き網により収集した魚類と無脊椎動物のデータを用い、観測期間を温暖期と寒冷期に分けて海面水温と海水に対する分布の応答を調べました（Alabia et al., 2018）。その結果、多くの生物の生息域は環境変動とともに変化していましたが、海面水温および海水の変動との相関は見られませんでした。これは、環境変動による水産生物への影響はないということではなく、海面水温や海水の変化がタイムラグをもって間接的に生物の生息域に影響していることを示しています。さらに、環境変化の速度にいち早く応答した生物は、今後も適した環境で生存し続ける可能性があります。環境変動に遅れて応答した生物は将来の気候変動に対する脆弱性が高いことを示しているのです。この結果は、気候変動に対する水産生物の保護管理と持続的利用に向けた方策を決めるために必要な知見となります。

以上のように、北極海における環境変化に対する生物の応答は、その栄養段階（植物プランクトンから魚類まで）によって時間差があり、また受動的であったり能動的であったりと、さまざまです。各応答を確実にとらえて今後も監視し続けることが、将来の気候変動に対する海洋生態系へのインパクトを予測するうえで重要であると考えています。



平澤 享（北海道大学 准教授）

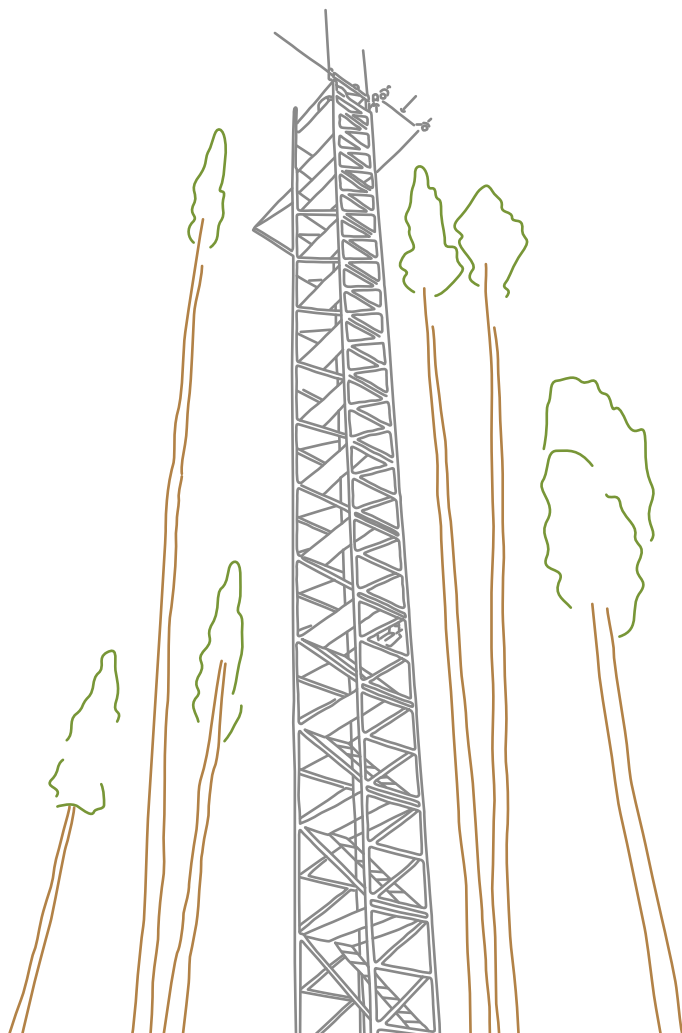
専門は海洋光学・衛星海洋学。衛星リモートセンシングを利用した地球環境変動に関する研究や、海洋生態学・生物地球化学的研究に役立つ衛星プロダクトの開発を行っている。

綿貫 豊（北海道大学 教授）

専門は資源生物学。海洋における海鳥の行動・生態を探ることにより、海洋環境変動と海洋生物の相互作用のメカニズム、漁業や海洋汚染などの人間による海洋生態系へのインパクトの理解を目指している。

第 4 節

陸域の水・物質循環への インパクト





極北シベリア・コリマ低地のアラゼヤ川流域で2007年夏に発生した河川洪水による住居流出と、流域内のサーモカルスト湖沼の湖沼水流出後の状況。(ロシア科学アカデミー・シベリア支部・永久凍土研究所の Semen Gotovtsev 氏提供。写真(左)は Sakai et al., 2016 の Fig. 7 と同じ)

1 海水縮小による水循環の変化が陸域に及ぼす影響

地球温暖化は地上の気温を上昇させるだけでなく、地球の水循環を変化させます。IPCC の第5次報告書 (AR5) (IPCC, 2013) は、北極海を取り囲む広大な陸域 (環北極陸域) で、今世紀末に降水量が有意に増加することを示しています。現に、ユーラシア大陸やアラスカ側の北極海の海水面積が縮小して大気循環場^{★1}が大きく変調し、環北極陸域の大気水循環と陸域水循環に影響が出ています (Hiyama et al., 2016)。

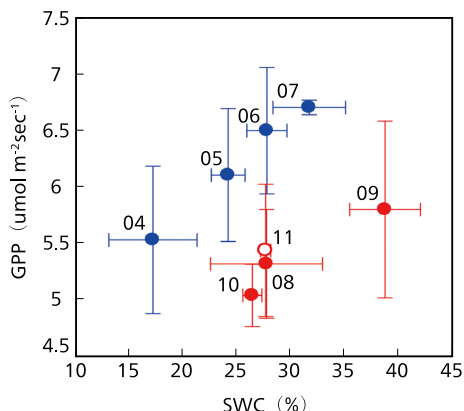
降水の源は大気中の水蒸気です。それは、海水が減少した北極海からの蒸発水や、陸域からの蒸発散 (ツンドラやタイガの、地表からの蒸発と植物からの蒸散を合わせたもの) によって大気へ供給されたものです。では、海水の縮小によって、北極海からの蒸発水がどの程度増加しているのか、また環北極陸域からの蒸発散はどのくらい大気水蒸気量の増加に寄与し、降水量を増加させているの



東シベリア・中央ヤクーティア (Central Yakutia) のユケチ (Yukechi) におけるサーモカルスト湖沼の拡大。左から、1993年、1998年、2003年、2008年。(Fedorov et al., 2014 の Fig. 4 と同じ)

注 → ★1 地球の大気の流れ方。大気循環の状態。

図1 東シベリア・ヤクーツク近郊のフラックス観測サイト（Spasskaya Pad サイト：カラマツ林）における夏季（6月～8月）の地表層（0cm～50cm）の土壤水分量（SWC）と、群落の総一次生産量（GPP）の関係。図中の数字は西暦、例えば 04 は 2004 年を、10 は 2010 年を示す。（檜山・藤原（2015）の図 1（b）を執筆・太田岳史）の図 1（b）を修正）



でしょうか。これらを調べた研究例はまだあまりありません。

環北極陸域には、レナ川（東シベリア）やマッケンジー川（北アメリカ）に代表される大河川が存在し、それらは北極海に淡水と栄養塩を供給しています。これらの河川流出の量と質は、永久凍土の存在割合と状態によって変わってきます。連続的永久凍土域^{★2}が流域面積の8割を占めるレナ川流域や、流域のほぼすべてが連続的永久凍土域であるコリマ川流域（極北シベリア）では、凍土が地下深くへの水の浸透を抑えているため、地下水の流出が起こりにくく、地表を流れる水が河川に流出しやすくなっています。一方、連続的永久凍土域が2割程度のマッケンジー川流域では、水が地下へ浸透しやすく、地下水が直接河川へ流出しています（Suzuki et al., 2018）。

そして忘れてならないことは、近年の温暖化は降水量の増加を引き起こし、東シベリアのタイガ帯でサーモカルスト（永久凍土域における地表層の荒廃）を加速させていることです（Fedorov et al., 2014）。降水量が増加すると、暖かい季節の、地温が0℃以上の地表層（活動層）内の土壤水分量が増加します。すると、地表層の地温が下がりにくくなります。この湿潤な地表層は水を貯留しやすいので、周囲よりも低い土地では湖沼を拡大させています。

その影響はタイガ林にも現れています。東シベリアでは2005年から2008年の4年間、連続して夏の降水量や冬の降雪量が平年よりも多く、活動層内の土壤水分量がかなり多くなりました。その結果、2007年以降、部分的にカラマツ林が立ち枯れを起こし、群落レベルの光合成能力が下がって二

注→★2 暖かい季節に地温が0℃以上になる土壤層（活動層）の下に、少なくとも2年以上、地温が0℃未満である土がある場合、その土を永久凍土と言う。連続的永久凍土域は、永久凍土が存在する面積の割合が90%以上の土地を意味する。

酸化炭素の吸収が低下しました (Ohta et al., 2014)。図 1 によれば、2004 年～2007 年（青色）と 2008 年～2011 年（赤色）で、土壌水分量に対する総一次生産量（GPP）の応答が異なっています。カラマツの立ち枯れは、この地域のサーモカルストの進行とも連動しています (Iijima et al., 2014)。

2 炭素循環の変化

図 1 に示した群落レベルの光合成能力の低下は、タイガ帯で降水量が多くなると永久凍土が荒廃し、その結果タイガ林に負の影響を与えて、物質循環、特に炭素循環の変化を引き起こすことを表しています。ただし、この研究結果は東シベリアのタイガの事例なので、環北極陸域の他のタイガやツンドラではどうなっているのかを知るには、研究事例の蓄積が必要です。

炭素循環が地球温暖化に及ぼす影響、特に気候へのフィードバック機構を明らかにするためには、二酸化炭素の収支だけでなく、メタンの放出と吸収（メタン収支）を調べる研究も必要です。図 2 は、アラスカ内陸部、フェアバンクス近郊のクロトウヒ林におけるメタン放出量と、活動層の深さ（融解深）・水位、気温、降水量の時系列変化を示したものです (Ueyama et al., 2014; Iwata et al., 2015)。この地域では 2014 年～2017 年にかけての降水量が平年より多かったため、活動層内の水位が高く、活動層が水で満たされることで嫌氣的な

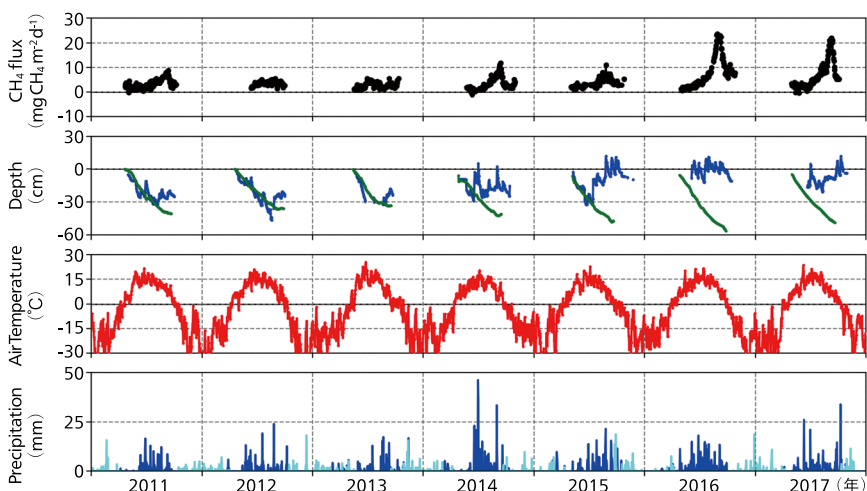


図 2 内陸アラスカのフェアバンクス近郊のフラックス観測サイト（Fairbanks サイト：クロトウヒ林）におけるメタンフラックス（黒点線）、融解深（緑線）、水位（青線）、日平均気温（赤線）、降水量（青い棒線）、降雪量（水色の棒線）の時系列変動。（植山雅仁博士（大阪府立大学）と岩田拓記博士（信州大学）が作成・提供）

土壌^{★3}となり、メタン放出量が多くなりました。気温の季節変化と年々変動に大きな差異がないことから、この地域では降水量、土壌水分量、そして地下水位が、メタンの放出を促す決定的な要素となることがわかります。

図1や図2に示したように、環北極陸域における降水量の増加は、タイガの二酸化炭素吸収能力を低下させるとともに、嫌氣的な地表環境が長く続く場合、メタンの生成と放出を促し、地球温暖化を加速させます。つまり、温暖化に対して正のフィードバックを引き起こすことになるのです。

3 「永久凍土－植生」共存系の将来

くりかえし強調しますが、環北極陸域には永久凍土が存在します。上述のように、連続的永久凍土域では水の浸透が抑えられることで活動層内の土壌水分が保たれ、「永久凍土－植生」共存系（檜山・藤原，2015）が成立しています。ところが、本プロジェクトでわれわれが明らかにしてきたように、環北極陸域のタイガ帯では、温暖化が水循環を加速させ、陸域を湿潤にすることで炭素循環を変化させています。その結果、さらに温暖化が加速されます。そして、「永久凍土－植生」共存系が脆弱になってしまうのです。

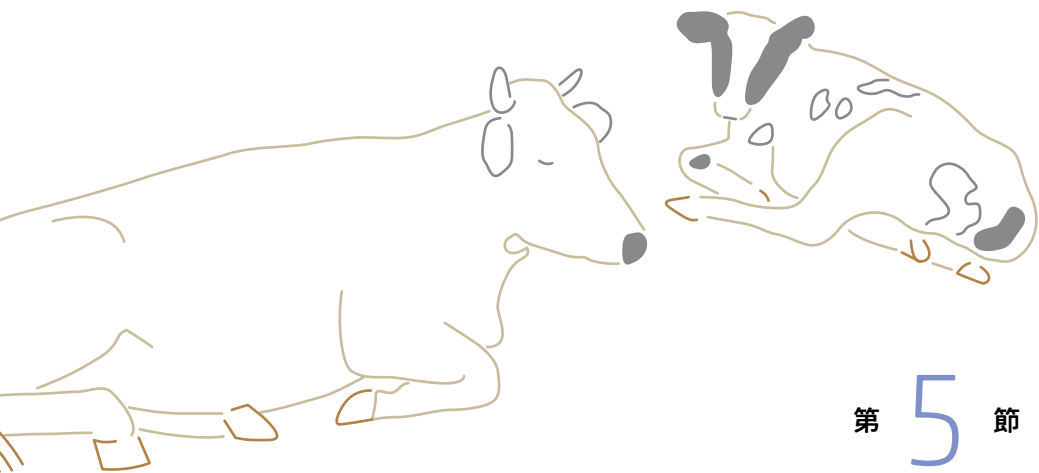
興味深いことに、ツンドラでは夏の気温上昇によって蒸発散量が増加し、乾燥化が進んで陸水貯留量が減少傾向にあります（Suzuki et al., 2018）。コリマ川低地のアラゼヤ川流域では2007年に気温が高く、降水量も多かったことからサーモカルスト湖沼の水が平坦なコリマ低地に流れ出し、越年洪水を引き起こしました（Sakai et al., 2016）。地下水の存在割合が高いこの地域の永久凍土の荒廃（地下水の融解）によって、サーモカルスト湖沼として貯留されてきた陸水が北極海に流出し、ツンドラでは乾燥化が一気に進行したと考えられます。

タイガとツンドラのこうした一連の現象の進行は、一時的なものなのでしょうか。今後、年々変動を伴いながら北極海水が長期的に縮小するにしたがって、環北極陸域の水・物質循環はどのように変動していくのでしょうか。これらの疑問に答えるためには継続的な調査研究が必要です。そして、研究成果を社会へ公開することがわれわれの責務だと考えています。

注→★3 酸素分子がほとんどない状態のこと。光合成が行われず有機物の蓄積の多い環境では、酸素分子が有機物の分解に使われて消費されてしまうため、土壌中の酸素分子がほとんどなくなる。そのような状態を「嫌氣的」と言う。

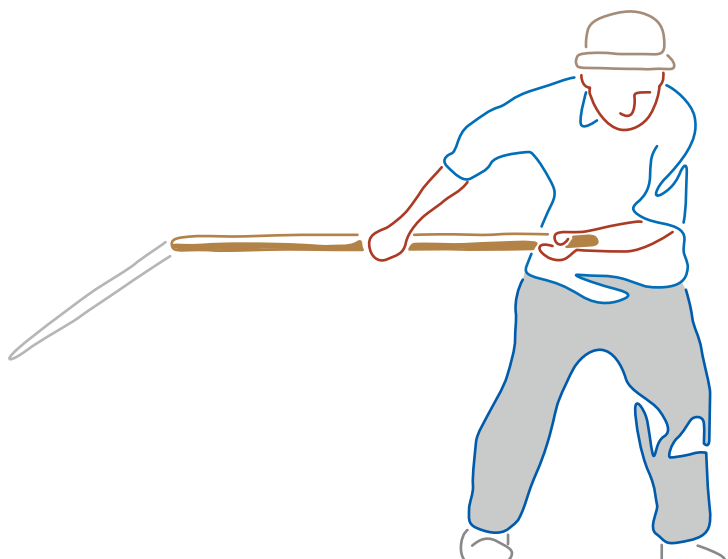
檜山哲哉（名古屋大学 教授）

専門は水文学、気候・気象学、地球環境学。主な著書に『シベリア：温暖化する極北の水環境と社会』（京都大学学術出版会，2015年）。



第 5 節

北極域の先住民と
環境へのインパクト





西シベリア先住民ネネツ人の祝祭におけるトナカイ橇競争

1 北極域における先住民社会の特徴

北極域社会を国家と先住民の関係で見ると、世界の他の地域とは異なった特徴があります。第二次世界大戦後、アジア・アフリカ地域は植民地支配を脱して独立国家となりましたが、北極域の先住民は政治的に独立した国家を形成していません。それに代わって、先住権を主張して行使するという、きわめて先駆的な権利を確立しているのです。北極域の国際機関である「北極評議会」は、北極周辺の8カ国と常時参加する先住民組織、これに日本、中国などのオブザーバー国が加わって構成されています。ここでは国際組織を形成する主体は国家という従来の考え方を大きく転換し、先住民組織が国際組織の構成主体となっているのです。なお、イヌイット・エスキモーの組織やサーミの組織など、国家横断的な先住民組織も存在します。

こうした先住民の政治的組織が必要な背景には、北極域の土地所有権や健康問題があります。ソ連崩壊後に本格化した西シベリアの石油・ガス開発が先住民社会へどのような影響を及ぼしているのかを分析したところ、負の影響が報告されています。地域意向の無視、パイプラインによる放牧地の分断、廃棄物による環境劣化、強制的移住などです。資源開発はロシア国家に多大な利益をもたらしています。とすれば、ロシア国民である先住民は公共の福祉のために我慢しなければならないのでしょうか。

現在の国際法に明記されている先住民という定義とその権利を行使することで、国家の論理を覆うことができる可能性があります。国家に準じる政治的主体としての先住民組織は、自らの状況を国内問題としてではなく、国際問題として周知させ、交渉することができます。これは国家を超えたところに存在する「人権をどう守るか」、その手立てが北極域に制度として存在していることを意味しています。そうした社会規範が制度化されるということは、翻って非先住民の人権保護にもつながってくるのです。

地球温暖化が進む中で、北極域の経済的開発が現実味を帯びてきており、日本政府や企業も注目しています。そこで理解されなければならないのは、北極域は国家同士の関係だけでなく、先住民の権利が制度化されている社会だということです。そうした社会における地球温暖化の影響について、具体的な例を紹介していきます。

2 地球規模の気候変動と レナ川中流域の環境

シベリアは北アメリカ極北地域と並んで、地球環境問題を考えるうえで重要な位置にあります。北極海と大気圏との間の相互作用によって、シベリアは北半球の「冷蔵庫」として気候システムを調整する機能を果たしているからです。観測の結果、北極域は過去数十年間の温度上昇が他の地域より2倍速く進んでいるのです。その結果、地球規模の大気の流れや海水の循環が変わり、極地の氷床や氷河が融け、温室効果ガスの増加が起きています。

そうした研究成果の1つとして、私自身が関わったシベリア・レナ川中流域の地域社会における地球温暖化の影響を紹介します。気候変動の影響はマクロな地球循環システムのなかで検知できるのですが、それがどのように作用する

かはミクロな視点で分析する必要があります。地球温暖化への適応策の構築という意味でも、人間社会で具体的にどのような影響があるのかを突き止めることは重要な課題なのです。

レナ川はバイカル湖西岸の山地を源として北東に流れ、北極海に注いでいます。長さは、日本列島よりも長い4,400kmに及びます。流域の東シベリアは、北半球の人が生活する場所としては最も寒冷な地域です。この地域の特徴は、永久凍土が南北にわたって広範囲に分布していることです。北アメリカや西シベリアにおける永久凍土が北極海沿岸の高緯度地帯だけに分布しているのに比べると際立っています。

近年における観測の結果、レナ川中流域では湿潤化が進んでおり、また夏季に融解する永久凍土の地表層が深くなっていることもわかってきました。レナ川中流域は降水量で見るとモンゴル並みに乾燥しています。森林の中ではダウリアカラマツが優勢で、乾燥に適応した陸域生態系が進化してきました。温暖化と湿潤化が進むと、この森林生態系は大きく変わることになるのです。

3 レナ川がつくる 巨大なインフラへの影響

レナ川中流域で暮らしているのはトルコ系の言語を母語とするサハ人、ツングース系のエヴェンキ人やエヴェン人などで、さらにロシア人も含めた多民族社会を形成しています。

地球温暖化に伴う長期的な生態系の変化に人間社会がどのように適応するかはまだわかりませんが、短期的な気象の変化は、地域の社会システムに影響を与えています。その1つが、レナ川が凍結してできる「冬道路」です。レナ川流域は、行政的にはロシア連邦サハ共和国に含まれます。共和国の全道路長2万2,000kmのうち、3分の2は冬道路となります。冬季はマイナス50℃以下まで下がるため、川幅が4km以上にもなる箇所を含めて全面凍結します。冬道路の氷は、厚い箇所では2mを超える場合もあり、土木工学的には1m以上の氷厚があればトラックを支えることができます。この冬道路は11月上旬から4月下旬の約6ヵ月間利用され、重要な交通システムとなっています。

サハ共和国の面積はインドの面積に匹敵しますが、人口はわずか100万人

ほどです。冬道路は自然を利用して古くから構築された伝統的インフラです。市場経済化が進んだ今日でも、比較的安価に維持管理できるので、コストパフォーマンスの点からも地域社会の物流を支える重要なインフラとなっています。

言うまでもなく、冬道路は夏には存在しません。IPCC（気候変動に関する政府間パネル）の第5次報告書（2013年）は、シベリアの温暖化について今後30年間に2℃、今世紀末までに4℃～6℃上昇すると予測しています。そうすると、冬道路の利用期間が短縮され、物流を寸断させることになります。仮に6℃上昇した場合、利用可能期間は現在の220日間から188日へと約1ヵ月も短くなります。

読者のみなさんは温暖化したら陸地の道路を拡張できるのではないかと思います。ところが、この地域の地面は永久凍土なのです。温度が上昇すると、夏季には永久凍土の融解深度が深まり、道路のでこぼこがひどくなります。これでは、道路を整備するのも難しいでしょう。都市から離れたレナ川流域は、現在でも物価の上昇が激しく、冬道路の利用が短縮されれば、物流システムがさらに悪くなることはあっても、改善される見込みは少ないと考えられます。



西シベリア先住民ネ Nets 人による冬の漁

4 永久凍土の融解がもたらす災害

永久凍土の融解深度が増すと、局所的には「オブラーギ」と呼ばれる流水による浸食作用を引き起こして災害をもたらします。この現象は、夏から初秋にかけての降雨後に発生します。気温上昇と降水量の増加によって湿潤化すると、土の中に蓄えられていた氷が融解し、陥没地形をつくると同時に、その近辺に小規模な湖沼群を形成します。それが降雨によって決壊し、オブラーギを

引き起こすのです。

ヤクーツクから川沿いに300kmほど上流にある村では、2007年6月、オブラーギによって、大規模な陥没が起きました。道路の寸断、家屋の崩壊、住民の転落、墓地の露出が発生し、深さ6m～10m、幅20m、長さ800～2,000mにも達する「小谷」が形成されたのです。

近年は、このような現象がレナ川流域だけでなく、森林と森林の間に広がる平坦地でも発生しています。最近の調査では、ソ連時代に森林伐採されて造設された畑や元滑走路の地表面付近の凍土の融解が2000年代から大々的に始まり、土壌崩落を起こしていることが明らかにされています。

レナ川の水環境の変化は、この地域に古くから暮らしてきたサハ人の牛馬牧畜に大きな影響を及ぼしています。冬季には全面凍結するレナ川は、5月初旬になると上流のバイカル湖近辺から融解が始まります。その流れは下流の凍結部分にぶつかり、川は流水で覆われます。湾曲部や川幅が狭い場所では、流水が詰まり、それが洪水となって氾濫する「アイスジャム洪水」が起こります。この洪水が川の氾濫原土壌に養分をもたらし、牧草の生育を促します。この牧草地を利用してきたサハ人にとって、アイスジャム洪水はむしろ恵みと認識されてきたのです。



西シベリア先住民ネツ人のトナカイ橇飾り競争

ところが、近年は巨大な規模の洪水が頻繁に起こるようになり、集落の浸水や家畜への被害が出るようになってきました。さらに、湿潤化によって春洪水の長期化や夏洪水が発生するようになりました。その結果、牧草の冠水が深刻になり、人々は洪水を災害と考えるようになってきたのです。

5 文化人類学・地域研究と自然科学が連携して温暖化対策を構築

以上、駆け足でレナ川中流域の地域社会における気候変動の影響を見てきました。これはシベリアのなかのローカルな現状分析ですが、北極域の人間社会がどのような形でその寒冷環境に適応した社会をつくり上げてきたのか、それが温暖化によって、社会制度や生産活動にどのような影響を受けるのかを理解する一助になればと願っています。

また、ここで取り上げたような情報を蓄積していくことで、シベリアそして北極域の気候変動の影響分析を総合化し、温暖化対策を構築することが可能となります。それは文化人類学・地域研究の知見と自然科学が連携することによって初めて実現する異分野融合的な探究でもあります。環境と社会の持続（サステナビリティ）を考えるうえでは、自然科学者が用いるモデルやシナリオなど多様な方法を駆使して導き出す知見が、地域社会の文脈でどのような社会現象となるのか、フィールドワークを踏まえて見極めることが重要になります。

さらに、そうした知見は単に学術論文とするだけでなく、現地の地域社会に向けて発信されなければなりません。とりわけ北極評議会における常時参加者である先住民組織に対し、積極的に科学的知見を提供していくことが、今まさに求められているのです。

高倉浩樹（東北大学 教授）

専門は社会人類学、環境人類学。最近の著作として *Global Warming and Human - Nature Dimension in Northern Eurasia*, Springer, 共編著、『総合人類学としてのヒト学』（放送大学・NHK 出版、編著）、ほか多数。最近は、考古学を含めた長期的視座に立つ人類進化と寒冷適応について関心をもっている。

注 → 本稿は、拙著「北極域に暮らす先住民と環境変動」『地理』62－7号（古今書院、2017年）を元に最近の調査結果を踏まえて書きあらためたものである。

第1章

北極域で起きている変化と今後の予測

第1節 これまでの北極域の変化

- IPCC, 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535pp.
- AMAP, 2017. *Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA) 2017*. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway. xiv + 269 pp.
- Schweiger, A., R. Lindsay, J. Zhang, M. Steele, H. Stern, Uncertainty in modeled arctic sea ice volume, *J. Geophys. Res.*, **116**, C00D06, 2011
- Box, et al., Global sea-level contribution from Arctic land ice: 1971–2017. *Environ. Res. Lett.* **13**, 125012, 2018
- Buldovics, et al., Cryovolcanism on the Earth: Origin of a Spectacular Crater in the Yamal Peninsula (Russia). *Scientific Reports*, **8**, 13534, 2018.
- Schuster, P.F., et al., Permafrost Stores a Globally Significant Amount of Mercury. *Geophys. Res. Lett.*, **45**, 1463–1471, 2018.

第2節 今後の変化を予測する

- IPCC, 2018: *Global warming of 1.5° C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5° C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* (in press) World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, (in press)

第2章

環境変化がもたらす多様なインパクト

第1節 北極海航路へのインパクト

- 大塚 夏彦, 大西 富士夫, 泉山 耕. 2017. 北極海航路による海上輸送の変遷と特徴. 土木学会論文 集 B3 (海洋 開発), 73 巻 2 号, p. 125-130. doi:10.2208/jscejoe.73.125

第3節 北極海の生態系・水産活動へのインパクト

- Grebmeier, J.M., Mcroy, C.P., Feder, H.M., 1988. Pelagic-Benthic Coupling on the Shelf of the Northern Bering and Chukchi Seas. 1. Food-Supply Source and Benthic Biomass. *Mar. Ecol. Ser.*, **48**, 57–67.
- Hunt, G.L., Coyle, K.O., Eisner, L.B., Farley, E. V., Heintz, R.A., Mueter, F., Napp, J.M., Overland, J.E., Ressler, P.H., Salo, S., Staben, P.J., 2011. Climate impacts on eastern Bering Sea foodwebs: a synthesis of new data and an assessment of the Oscillating Control Hypothesis. *ICES J. Mar. Sci.*, **68**, 1230–1243. doi:10.1093/icesjms/fsr036.
- Pabi, S., van Dijken, G.L., Arrigo, K.R., 2008. Primary production in the Arctic Ocean, 1998–2006. *J. Geophys. Res.* **113**, C08005. doi:10.1029/2007JC004578
- Arrigo, K.R., van Dijken, G.L., 2015. Continued increases in Arctic Ocean primary production. *Prog. Oceanogr.*, **136**, 60–70.
- Ohshima, K.I., Nishino, S., Iwamoto, K., 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.
- Hiroto Abe, Makoto Sampei, Toru Hirawake, Hisatomo Waga, Shigeto Nishino, Atsushi Ooki, Sediment-associated phytoplankton release from the seafloor in response to wind-induced barotropic currents in the Bering Strait, *Frontiers in Marine Science* (accepted)
- Fujiwara, A., Hirawake, T., Suzuki, K., Eisner, L., Imai, I., Nishino, S., Kikuchi, T., Saitoh, S.I., 2016. Influence of timing of sea ice retreat on phytoplankton size during marginal ice zone bloom period on the Chukchi and Bering shelves. *Biogeosciences*, **13**, 115–131. doi:10.5194/bg-13-115-2016.
- Ardyna, M., Babin, M., Gosselin, M., Devred, E., Rainville, L., Tremblay, J.-É., 2014. Recent Arctic Ocean sea ice loss triggers novel fall phytoplankton blooms. *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 6207–6212. doi:10.1002/2014GL061047.
- Arrigo, K.R., Perovich, D.K., Pickart, R.S., Brown, Z.W., van Dijken, G.L., Lowry, K.E., Mills, M.M., Palmer, M.A., Balch, W.M., Bahr, F., Bates, N.R., Benitez-Nelson, C., Bowler, B., Brownlee, E., Ehn, J.K., Frey, K.E., Garley, R., Laney, S.R., Lubelczyk, L., Mathis, J., Matsuoka, A., Mitchell, B.G., Moore, G.W.K., Ortega-Retuerta, E., Pal, S., Polashenski, C.M., Reynolds, R.A., Schieber, B., Sosik, H.M., Stephens, M., Swift, J.H., 2012. Massive Phytoplankton Blooms Under Arctic Sea Ice. *Science*, **336**, 1408. doi:10.1126/science.1215065.
- Grebmeier, J.M., Overland, J.E., Moore, S.E., Farley, E. V., Carmack, E.C., Cooper, L.W., Frey, K.E.,

- Helle, J.H., McLaughlin, F.A., McNutt, S.L., 2006. A major ecosystem shift in the northern Bering Sea. *Science*, **311**, 1461–1464.
- Waga, H., Hirawake, T., Fujiwara, A., Grebmeier, J. M., Saitoh, S.-I., 2018. Impact of spatiotemporal variability in phytoplankton size structure on benthic macrofaunal distribution in the Pacific Arctic. *Deep-Sea Res. II*, (in press). doi:10.1016/j.dsr2.2018.10.008.
 - Woodgate, R. a., Weingartner, T.J., Lindsay, R., 2012. Observed increases in Bering Strait oceanic fluxes from the Pacific to the Arctic from 2001 to 2011 and their impacts on the Arctic Ocean water column. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L24603. doi:10.1029/2012GL054092.
 - Matsuno, K., Yamaguchi, A., Hirawake, T., Imai, I., 2011. Year-to-year changes of the mesozooplankton community in the Chukchi Sea during summers of 1991, 1992 and 2007, 2008. *Polar Biol.*, **34**, 1349–1360. doi:10.1007/s00300-011-0988-z.
 - Matsuno, K., Yamaguchi, A., Hirawake, T., Nishino, S., Inoue, J., Kikuchi, T., 2015. Reproductive success of Pacific copepods in the Arctic Ocean and the possibility of changes in the Arctic ecosystem. *Polar Biol.*, **38**, 1075–1079. doi:10.1007/s00300-015-1658-3.
 - Nakano, T., Matsuno, K., Nishizawa, B., Iwahara, Y., Mitani, Y., Yamamoto, J., Sakurai, Y., Watanuki, Y., 2016. Diets and body condition of polar cod (*Boreogadus saida*) in the northern Bering Sea and Chukchi Sea. *Polar Biol.*, **39**, 1081–1086. doi:10.1007/s00300-015-1769-x.
 - Nishizawa, B., Matsuno, K., Labunski, E. A., Kuletz, K. J., Yamaguchi, A., Watanuki, Y., 2017. Seasonal distribution of short-tailed shearwaters and their prey in the Bering and Chukchi seas. *Biogeosciences*, **14**, 203–214. doi:10.5194/bg-14-203-2017.
 - Alabia, I.D., García Molinos, J., Saitoh, S.-I., Hirawake, T., Hirata, T., Mueter, F.J., 2018. Distribution shifts of marine taxa in the Pacific Arctic under contemporary climate changes. *Divers. Distrib.*, **24**, 1583–1597. doi:10.1111/ddi.12788.
 - Hiyama, T., Fujinami, H., Kanamori, H., Ishige, T., Oshima, K., 2016. Recent interdecadal changes in the interannual variability of precipitation and atmospheric circulation over northern Eurasia. *Environmental Research Letters*, **11**, 065001. doi:10.1088/1748-9326/11/6/065001.
 - Iijima, Y., Ohta, T., Kotani, A., Fedorov, A.N., Kodama, Y., Maximov, T.C., 2014. Sap flow changes in relation to permafrost degradation under increasing precipitation in an eastern Siberian larch forest. *Ecohydrology*, **7**, 177–187. doi:10.1002/eco.1366.
 - IPCC, 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535pp.
 - Iwata, H., Harazono, Y., Ueyama, M., Sakabe, A., Nagano, H., Kosugi, Y., Takahashi, K., Kim, Y., 2015. Methane exchange in a poorly-drained black spruce forest over permafrost observed using the eddy covariance technique. *Agricultural and Forest Meteorology*, **214–215**, 157–168. doi:10.1016/j.agrformet.2015.08.252.
 - Ohta, T., Kotani, A., Iijima, Y., Maximov, T.C., Ito, S., Hanamura, M., Kononov, A.V., Maximov, A.P., 2014. Effects of waterlogging on water and carbon dioxide fluxes and environmental variables in a Siberian larch forest, 1998–2011. *Agricultural and Forest Meteorology*, **188**, 64–75. doi:10.1016/j.agrformet.2013.12.012.
 - Sakai, T., Matsunaga, T., Maksyutov, S., Gotovtsev, S., Gagarin, L., Hiyama, T., Yamaguchi, Y., 2016. Climate-induced extreme hydrologic events in the Arctic. *Remote Sensing*, **8**, 971. doi:10.3390/rs8110971.
 - Suzuki, K., Matsuo, K., Yamazaki, D., Ichii, K., Iijima, Y., Papa, F., Yanagi, Y., Hiyama, T., 2018. Hydrological variability and changes in the Arctic circumpolar tundra and the three largest pan-Arctic river basins from 2002 to 2016. *Remote Sensing*, **10**, 402. doi:10.3390/rs10030402.
 - Ueyama, M., Iwata, H., Harazono, Y., 2014. Autumn warming reduces the CO₂ sink of a black spruce forest in interior Alaska based on a nine-year eddy covariance measurement. *Global Change Biology*, **20**, 1161–1173. doi:10.1111/gcb.12434.

第4節 陸域の水・物質循環へのインパクト

- Fedorov, A.N., Gavriliyev, P.P., Konstantinov, P.Y., Hiyama, T., Iijima, Y., Iwahana, G., 2014. Estimating the water balance of a thermokarst lake in the middle of the Lena River basin, eastern Siberia. *Ecohydrology*, **7**, 188–196. doi:10.1002/eco.1378.
- 檜山哲哉・藤原潤子（編），2015.『環境人間学と地域 シベリアー温暖化する極北の水環境と社会』。京都大学学術出版会。511pp. ISBN 978-4-87698-315-5.

たった1つの結論であっても、それを科学的な根拠を明示して求めるには、無数の研究課題が必要となるのが普通です。自然科学にせよ人文科学にせよ、いろいろな側面から観測や調査を行い、誤りのない結論にたどり着こうとするからです。それには長い時間が必要です。北極の場合には、2000年以降の自然環境の変化が急激で、政策決定者や企業経営者さらには社会の人々は、科学が結論を出す前であっても何らかの具体的な行動を起こそうとするのが現状ではないでしょうか。しかし北極海の海水が減少し、永久凍土が大規模に崩壊していくなかで、北極は世界の国々から新たな経済活動の場として注目されている一方で、脆弱な北極の自然環境が今後どのように変化していくか危ぶまれています。

近年の気候変動の下でも人類がその尊厳を維持していくことを念頭に、国連では2015年に自然環境の持続、社会経済の持続、社会の持続という3つの主題からなる「2030 Agenda」と、その実現の具体項目として17のゴールからなる「持続可能な開発目標（SDGs）」を議決しました。この達成のためには科学の力、未来を見通そうとする力がどうしても必要です。特に北極では、2030 Agendaの3つの主題が他のどの地域よりも密接に絡み合い、科学や技術が政策決定を含む社会の活動を力強く支え、たがいに明確に連携しあうことが望まれています。

こういった背景のなかにArCSというわが国のプロジェクトが存在しています。本書が読者のみなさんに新たな知識をわかりやすく提供し、それを通じて社会と科学の連携に、たとえ少しであっても貢献できることを願っています。

ArCSプロジェクトディレクター 深澤理郎

北極域研究推進プロジェクト

(ArCS: Arctic Challenge for Sustainability)とは

2015年9月から始まった文部科学省の補助事業です。
国立極地研究所、海洋研究開発機構、北海道大学の
3機関が中心となって、
急変する北極域の気候変動の解明と環境変化、
社会への影響を明らかにし、内外のステークホルダーが
持続可能な北極の利用等の諸課題について
適切な判断を可能とするための
精度の高い将来予測や環境影響評価等を行うことを
目的としています。

執筆者一覧(掲載順)

深澤理郎(国立極地研究所 特任教授/海洋研究開発機構 研究審議役)

末吉哲雄(国立極地研究所 特任准教授)

大塚夏彦(北海道大学 教授)

本村真澄(石油天然ガス・金属鉱物資源機構 主席研究員)

田畑伸一郎(北海道大学 教授)

平譚 享(北海道大学 准教授)

綿貴 豊(北海道大学 教授)

檜山哲哉(名古屋大学 教授)

高倉浩樹(東北大学 教授)

編集・発行—北極域研究推進プロジェクト事務局

〒190-8518

東京都立川市緑町10-3 国立極地研究所

発行日—2019年3月25日

制作協力—サイテック・コミュニケーションズ

デザイン—松田行正・日向麻梨子

イラストレーション—杉本聖士

