

## 北極圏の温暖化 —科学の取り組み・フィールドワーク・人—

榎本浩之

国立極地研究所 北極観測センター

北極圏では海水減少、氷河の融解などが顕著に起こり、温暖化が速く進行している。2012年には北極海の海水面積が観測史上最低となり、グリーンランド氷床の表面が全面融解した。また、海水が減った北極海では、航路の開通が期待され、試験航海が始まっている。気候の急変する北極圏でいろいろな懸念・期待が生まれている。日本の北極研究は新しい国家プロジェクトを開始した。北極温暖化のメカニズムや全球気候への影響、そして将来予測の精度向上を目指している。日本が誇る最新の機器や観測システム、大型コンピュータの将来予測の活動とともに、たくさんの研究者がフィールド観測に出かけている。北極に関する研究活動が始動する中で、2013年5月には北極評議会のオブザーバーメンバーに昇任された。急変する北極圏の気候と、新しく始まった研究活動、北極の国々との協力活動について紹介する。

### はじめに

北極探検・調査の歴史を振り返るとたくさんの取り組みがあった<sup>1)</sup>。北極点一番乗りとはならなかったものの科学調査としても優れていた活動として、フリチョフ・ナンセン計画やフラム号の航海は有名である<sup>2)</sup>。彼は周辺の大陸で得られた漂流物等の断片的な情報を集計し、優れた洞察力によって、北極海を貫く海流の存在とそこに閉じ込められることを想定した、北極点に到達する目的のために、環北極大陸の植生や河川の情報、大気のコールドなどを総合して、自らの漂流で仮説を実証していった卓越した科学アプローチがあった。時代は変わって、現在の自然科学は、最新の観測機器の投入し、観測ネットワークを構築し、スーパーコンピュータによる現在の状態の検証と将来の姿の推測を行なっている。しかしそれらは万能でなく、そこで得られた予測に対しても、エキスパートジャッジメントという研究者の判断をその上位に置き、計算機予測に経験ある研究者が行う不確定性の考慮といった注意が払われている(IPCC 例 え ば、<https://www.ipcc.unibe.ch/publications/supportingmaterial/ipcc-workshop-2004-may.pdf>)。

探検、調査、地球気候の将来像にかかわる舞台となった北極域は、近年、国際政治の交渉と産業

活動が進出する場になっている。本稿では、加速する北極域の気候変化、そこに取り組む最新の自然科学調査、北極域にすむ人々たちへの影響評価への取り組みについて紹介する。

### 北極域の範囲

対象とする北極とはどこまでで、どのような自然要素に注目されるかについては、様々なまとめ方がある。極夜や白夜が存在する、日照に関する範囲から、緯度的に北緯 66.5 度の北極サークルが境界としてよく使われる。年平均気温 10℃を境界とする見方もある。また、自然現象の空間的連続性から、凍土域に注目した北極研究の範囲、世界の大河川の多くが北極海につながるため、それら北極海につながる大河川の流域を研究対象としてみることもある(図1)。そのような地域の多くは、遠隔、寒冷などの条件により観測が難しいため、効果的な観測域を定め、良質で総合的な観測を行なうためのスーパーサイトとよばれる観測点を設置している。シベリア・ヤクーツク周辺や北極海沿岸、アラスカ・フェアバンクス周辺や北部のツンドラ域などに設置されている。日本が参加する長期の継続観測はスバル諸島において行われている。

## 急変する北極の環境

近年、北極の環境変動が急速に進んでいる。2012年夏季には、北極海の夏の水氷面積は衛星観測史上の最低記録を更新した（図2）。また、グリーンランド氷床表面の全域に融解域が広がった（図3）。永久凍土の融解やツンドラの地面からの温室効果ガスの放出などの調査が続けられている。

このような変化は北極域の温暖化の影響と考えられている。北極域の昇温は全球平均の昇温速度の2倍のペースである。極域に現れる大きな変化は、極域増幅（Polar Amplification）と呼ばれている。このような大きな変化は、アイスアルベードフィードバックが主原因と考えられているが、他にもさまざまなフィードバックのプロセスがある<sup>3)</sup>。温暖化による海水の融解と海水面の拡大による反射率低下が日射吸収によりさらに温度上昇につながるという正のフィードバックである。凍土域での昇温は凍土の融解や土壌中の生物活動による土壌分解を活発にし、温室効果気体の発生を進めるという予測もある<sup>4,5)</sup>。北極海の水氷の減少は、北極海の蒸発と水蒸気の増加、周辺の大陸上での降水の増加をもたらすという研究もある<sup>6,7)</sup>。積雪は冬季の地表面冷却を抑え、また融雪後の水分を増やすなど、土壌中の生物への影響も考えられている。このように北極域では大気、海洋、海水、陸域の積雪、水循環、生物など様々なシステムが複雑に関係している。その影響は海洋生態系にも及ぶ。

観測を続けわずかな変化を見つけようとする一方で、将来予測の努力も行われている。しかし、北極の変化はダイナミックである。研究者の予測はしばしば、自然の急変をとらえきれず、振り切られてしまうことがある。まだまだ、自然のほうが上手であり、未知のシステムが潜んでいる。

また北極における変化は、大気・海洋循環の変化や雪氷圏変化などを通して、全球的な気候システムにも大きな影響をもたらす可能性がある。北極の研究は北極という地域の研究の範囲を越え、地球全体の気候変動のメカニズム解明のためにも継続的な観測実施が唱えられている。日本への影響という観点からは、日本に寒気や降雪をもたらす気象の解析が進みつつある<sup>8-10)</sup>。また、海水減少に伴う北極航路の活用など経済活動の面からの関心も高まっている。

## いろいろな北極域

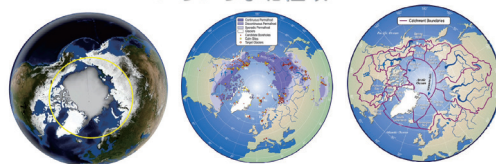


図1 いろいろな観点から見た北極域の例。

左：緯度で分けた北極域。北緯66.5度以北の世界。中央：永久凍土の分布から見た北極。シベリア、アラスカ、カナダに凍土域が広がる。右：河川の流れから見た北極圏。北極海には世界の大河の多くが流れ込んでいる。

## 北極海の水氷面積長期変動1978—2012

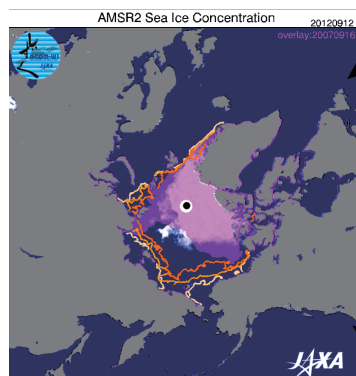
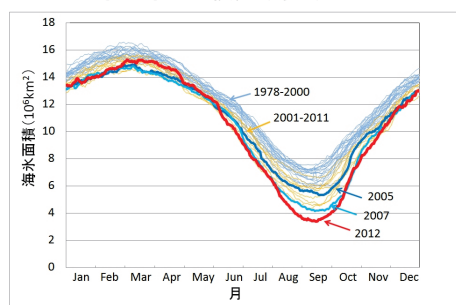


図2 北極域の水氷面積の長期変動。2012年には衛星観測史上最低を記録した（データ：NSIDC）。

下の図は前回の最低記録であった2007年（紫）と2012年の最低値の比較。周辺の線は1980、1990、2000年代の同時期の平均水氷分布である。1980年代に比べ夏季の水氷面積は半分以下になっている（データ：IARC / JAXA）。

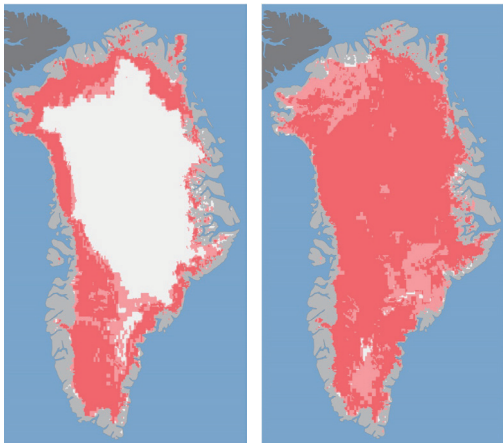


図3 グリーンランド氷床表面融解（赤色）。  
（左）2012年7月8日、（右）7月12日。  
(<http://www.nasa.gov/topics/earth/features/greenland-melt.html>)

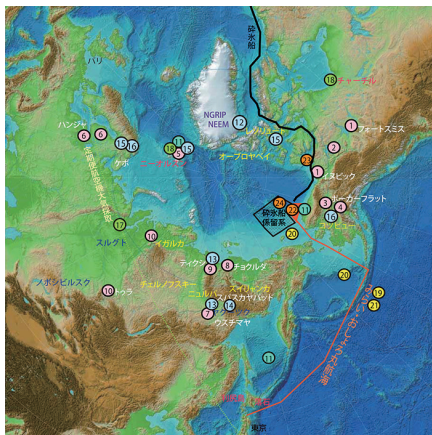


図5 北極気候変動観測域の分布。大気、海洋、陸域、氷河氷床などの観測が行われている（データ：北極環境研究コンソーシアム）。



図4 新しく始まった北極気候変動研究プロジェクト。  
35機関 300人の研究者が参加している。  
([http://www.nipr.ac.jp/grene/doc/grene\\_J2.pdf](http://www.nipr.ac.jp/grene/doc/grene_J2.pdf))

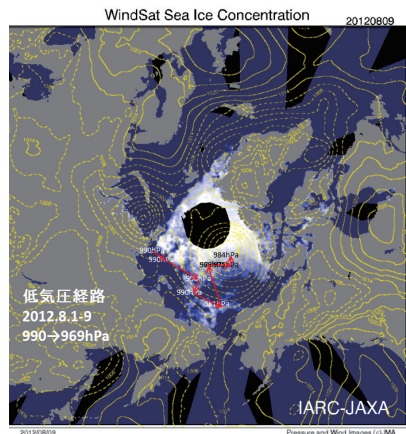
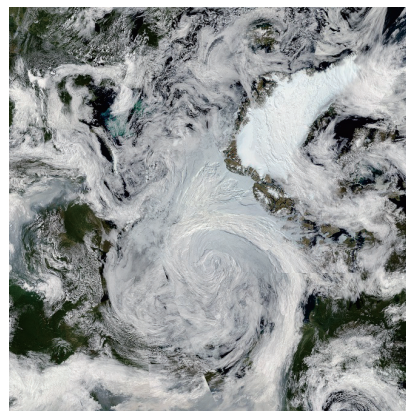


図6 2012年8月、台風並みに発達した低気圧が北極海の大半を覆った。（データ：NASA（雲画像）、IARC / JAXA（海氷分布）、気象庁（気圧））

## 新しい北極観測の取り組み

日本の研究者による北極環境研究の歴史は長い。1992年にはスバル諸島ニーオルスンに観測基地が設置され、20年以上の連続観測実績がある、1990年代後半からは海洋研究開発機構の観測船「みらい」が2、3年毎に北極観測を行なっている。また1999年からはアラスカ大学国際北極圏研究センター（IARC）を観測拠点とした活動も行われている。シベリアでの生態系の観測や温室効果気体観測も継続されている。これらの多くの日本の研究者の取り組みに対し、まとまった成果として日本の国際的評価が少なく、また日本の研究者同士の情報交換も限られていた。

これらを解消し、国内の多くの大学や研究所の研究者の力を巻き込むものとして、2011年に北極環境研究コンソーシアム（JCAR）が設立され、新たな文部科学省の北極研究プロジェクト「GRENE 気候変動研究事業、急変する北極気候システム及びその全球的な影響の総合的解明」（2011－2015年）が開始した（図4）。プロジェクト代表機関として国立極地研究所が名乗りを上げた。北極海での活動実績と観測船を持つ海洋研究開発機構が参画期間として参加。同機構はシベリアやアラスカでの陸域での観測活動の実績や、北極と地球全体の将来気候予測をおこなえるスーパーコンピューターをもつ。GRENE 北極気候変動研究事業では4つの戦略研究目標を掲げ、目標を達成するために7つの研究課題が公募で選ばれている。急変する北極の現状を捉え、複雑な北極の気候システムを解明し、全球的な影響を予測するためには、分野横断的かつ総合的な取り組みが不可欠であり、国内35機関からさまざまな分野の研究者約300人が参加、そして諸外国の研究機関と国際的な協力関係のもと、環北極総合観測を実施し、北極域全体の変化を把握しようとしている。北極域に展開する観測活動域の分布を図5に示す。

北極気候変動研究プロジェクトの4つの戦略研究目標

- ①北極域における温暖化増幅メカニズムの解明
- ②全球の気候変動及び将来予測における北極域の役割の解明
- ③北極域における環境変動が日本周辺の気象や

水産資源等に及ぼす影響の評価

- ④北極海航路の利用可能性評価につながる海水分布の将来予測

4つの戦略研究目標を実現する研究課題

1. 北極気候再現性検証および北極気候変動・変化のメカニズム解析に基づく全球気候モデルの高度化・精緻化
2. 環北極陸域システムの変動と気候への影響
3. 北極温暖化のメカニズムと全球気候への影響：大気プロセスの包括的研究
4. 地球温暖化における北極圏の積雪・氷河・氷床の役割
5. 北極域における温室効果気体の循環とその気候応答の解明
6. 北極海環境変動研究：海水減少と海洋生態系の変化
7. 北極海航路の利用可能性評価につながる海水分布の将来予測  
サブ課題

- 7-1. 北極航路利用のための海水予測および航行支援システムの構築
- 7-2. 北極海水海洋システムの基本構造と変動に関する観測モデリング融合研究
- 7-3. 北極海における海洋変動と急激な海水減少メカニズムの解明

## 北極の経済活動と環境保全

日本の北極気候変動研究プロジェクトが目指す北極域の気候変動のメカニズムや将来予測、地球規模の影響を研究する一方で、海洋生態系や漁業への影響、日本など極東アジアの気象、北極航路の利用可能性という生活や産業に関わる検討も行っている。

急速に変化する北極環境とともに、北極をめぐる経済、産業、生活が変わりつつある。海水が消えた海域には新たな航路が開通しつつあり、また、水で閉ざされていたときには難しかった資源探査や開発も可能になった。新たな産業の活動は、その土地の生活をえていく。沿岸設備の整備や漁業への期待もある一方で、水質変化、海難などへの不安もある。水が減ったといっても北極海である。2012年の海水減少のなかで、早期から開水面が現れた。シベリア沖を通る北東航路の障害と

なっていたセブリナヤゼムリア周辺の海水も早く消失した。社会でも北極航路をめぐる関心が急速に拡大した。しかし、一方でアラスカ周辺のチャクチ海では普段は海水が消え観測船の活動ができる7月になっても、まだ広域の海水が居座り船舶の活動の障害となっていた。これは冬季の海水の動きのためと言われている。かつて、北極海の海水は、厚く、開水面は少なく、移動の自由度の少ない、速度も遅い存在であった。

しかし、近年、薄く、破壊、消耗しやすくなった海水は、沿岸から離れたり沿岸に近づいたり、大きな移動性を持つようになり、どこに、いつ海水が現れるかということの不確実性も大きくなった。

2012年8月上旬に海面面積は急激に減少した、その時に現れていたのが巨大な低気圧である。北極海の海水の減少とそれに影響する海洋の変化はじわじわと海洋で考えられているが、大気ではもっと短期間に影響が現れることが多い。8月の低気圧の発生と発達などもその一例である(図6)。巨大低気圧や、移動しやすくなった海水、増える船舶航行に対する救難の仕組みも必要である。

## 北極に住む人々

北極圏に領土を持つ国は8か国あり、北極評議会(AC)を形成していろいろな取り組みが行われている。日本を含む6か国が2013年5月にオブザーバーとして追加参加を承認された。ACには永久参加団体として先住民団体が常任メンバーである。気候変動の進行とともに、いろいろな国の経済活動、政治交渉の場となっている北極は、一方でその土地に住む人々の土地でもある。

2007年国際極年(IPY)という国際極域研究活動が展開された。観測活動でベーリング海に面したアラスカのはずれの小さな村エモナックを訪れ、現地の協力を得て海水調査ブイの設置を行った(<http://www.ijis.iarc.uaf.edu/jp/research/070525highlights.htm>)。IPYでやって来たというと、村の人たちは、この村から世界の気候を考えるデータが出ていくことは誇りだと協力してくれた。結氷したベーリング海の沖に向かってスノーモービルを走らせる彼らの目には、遠くにある水面の存在、雪の下に隠れる薄い危険な海水を感じながら観測場所に誘導してくれる。電力や

ドリルのない場所で、彼らの船は非常な速さで海水に大きな穴をあけてくれた。衛星観測という最新の技術の検証も先住民の経験や技術に支えられる。彼らは、目の前のユーコン川やベーリング海で起きている結氷、魚の変化に不安を持っている。これは温暖化の影響なのか、これからどうなるのかといった質問が寄せられる。最新の科学調査から出てくる将来予測とは別に、そこに住む人たちの目が気候の変化を見ている。

2013年3月カナダ北極圏の重要な研究観測拠点レゾリュートを訪れた。航空機は、いくつかの小さな村の飛行場を経由していく。乗り換えるたびに飛行機は小さくなっていく。北極の変化する気候のなかで多くの人が生活している。カナダ政府は新たな観測拠点をケンプリッジベイに築こうとしているが、その北極研究はその研究対象は気候変化だけでなく、生活、健康、精神衛生などこの土地に住む人たちの暮らしに強くかかわっている。

北極評議会オブザーバー国となった日本には北極科学調査の貢献が期待されている。遠い日本から来て何を日本に持ち帰るのかだけでなく、何を現地に残せるという要請がある。今後の北極環境研究活動では、観測情報を持ち帰るだけでなく、現地に還元することがより求められている。

## 北極という国際社会

北極圏は南極と違い、国境があり、領土があり、人が住んでいる地域である。そこに領土を持たない日本がなぜ活動するのかの質問もあるが、領土がないからこそやりやすいこともある。北極国ならまず課題とすべき自国領土内の活動の優先がある。北極に領土を持たない日本であるからこそ、領土にとらわれず緊急性のある観測地域での活動に向かえる観測体制、調査の機動力を持って、地球環境システムとしての国際協力の場合としての北極研究に貢献できる。

多くの国の領土、経済的排他水域等で分割されている北極であるが、地球科学としては地球の気候変化にいち早く反応し、またその気候変化を生み出していくシステムを持つ大洋と大陸の世界と見ることができる。この北極に国境を越えた大気の流れ、海流があり、大陸規模での雪や氷や生態系の変化が起きている。

新北極気候変動研究プロジェクトでは大学や研究機関が連携し、世界最高水準の研究と人材育成を推進することを目指しており、研究に参加するポスドク研究員が30余名いる。また大学院学生も多い。近年のフィールド志向の研究者の減少が見受けられるが、若手フィールド観測者が増え、将来の活躍の展望を描ける研究環境がこの機会に増えることを、期待している。

各大陸、北極海で国際観測と若手トレーニングが行われる研究状況を期待しながら、日本も北極という国際社会に入って行こうとしている。かつて、ナンセンが卓抜した観察能力から漂流という自然の力を利用し、トランスポーターという新機軸で最適化された船フラムを使って大陸から北極海を汎北極的に取り組んでいった。そのような視点を持つような研究と研究者群が生まれることを期待している。

## 引用文献

- 1) Holland (2013) 北極探検と開発の歴史, クライブ ホランド (Clive Holland) 著, 太田昌秀 訳, 同時代社, 213p.
- 2) Nansen (1980) フラム号北極海横断記一北の果て, フリッチョフ ナンセン (Fridtjof Nansen) 著, 太田昌秀 訳, ニュートンプレス, 418p.
- 3) Yoshimori, M., YOKOHATA, T. and ABE-OUCHI, A. (2009) A Comparison of Climate Feedback Strength between CO2 Doubling and LGM Experiments, *Jour. of Climate*, Vol.22. p3374 – 3395
- 4) Ise, T., A.L. Dunn, S.C. Wofsy, P.R. Moorcroft. 2008. High sensitivity of peat decomposition to climate change through water-table feedback. *Nature Geoscience* 1, 763-766.
- 5) Mori, M., Ise, T., Kondo, M., Y. Kim, Enomoto, H. and Uchida, M. (2012): The effect of the feedback cycle between the soil organic carbon and the soil hydrologic and thermal dynamics, *Open Journal of Ecology*, Vol.2, No.2, p90-95. doi:10.4236/oje.2012.22011
- 6) Park, H., Walsh, J.E., Kim, Y., Nakai, T., Ohata, T. (2013): The role of declining Arctic sea ice in recent decreasing terrestrial Arctic snow depths, *Polar Science*, Vol. 7, Issue 2, p174-187.
- 7) Zhang, X., He., J., Zhang, J., Polyakov, I., Gerdes, R., Inoue, J. and Wu, P. (2013) Enhanced poleward moisture transport and amplified northern high-latitude wetting trend, *Nature Climate Change*, Vol. 3, p47-51. doi:10.1038/nclimate1631
- 8) Honda, M., Inoue, J. and Yaman, S. (2009): Influence of low Arctic sea-ice minima on anomalously cold Eurasian winters, *GRL*, VOL. 36, L08707, doi:10.1029/2008GL037079
- 9) Hori, M. E., Inoue, J. Kikuchi, T., Honda, M. and Tachibana, Y. (2011): Recurrence of Intraseasonal Cold Air Outbreak during the 2009/2010 Winter in Japan and its Ties to the Atmospheric Condition over the Barents-Kara Sea, *SOLA*, Vol. 7, p25-28. doi:10.2151/sola.2011-007
- 10) Inoue, J., Hori, E. M., and Takaya, K. (2012): The Role of Barents Sea Ice in the Wintertime Cyclone Track and Emergence of a Warm-Arctic Cold-Siberian Anomaly. *J. Climate*, 25, p2561-2568. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00449.1>

## Summary

### Arctic Warming

#### — Scientific approach, field work and people in the Arctic —

Hiroyuki Enomoto

Arctic Environment Research Center, National Institute of Polar Research

Arctic climate is experiencing rapid change with sea ice reduction, glacier and ice sheet melting. Sea ice area in the Arctic was recorded its minimum since the satellite observation started. Although accelerating climatic change was a strong concern, northern shipping route became real with reduce sea ice condition. Japanese scientist has started ne Arctic research project for Arctic climate research to investigate mechanisms of Arctic warming and future prediction. Many field scientists have start visiting Arctic region and brought back the field data to improve knowledge and future climate predictions. The Arctic countries are expecting Japanese contribution as a new member of Arctic Council observer country. We are investigating appropriate way to keep scientific activities and good relationships with Arctic countries and Arctic people.