

地球温暖化とグリーンランド

―北極圏氷河の融解

千葉大学大学院理学研究科教授 竹内 望



はじめに

解ける北極の水に世界の注目が集まっている。北極海を白く覆う海水は、今年2016年の夏、2012年に次ぐ観測史上第2位の最小面積を記録した。いままではほとんど解けることのなかったグリーンランドの氷河の頂上部も、2012年の夏に全面融解したことが大きく報道された。この北極の水の融解の原因の一つは、地球温暖化による気温上昇である。当初より地球温暖化が北極に与える影響は予想されていたが、今大きく注目されるのは、その予想を上回るペースで氷の融解が進んでいるためである。つまりそれは気温上昇以外にも、氷の融解を加速

させる未知のプロセスの存在を示唆している。北極の水の融解は、気温上昇を加速させる効果があるほか、海水準の上昇や北極海航路の開通など、我々の社会に直接的に大きな影響を及ぼす。予想を上回る速さで融解するその原因とは、一体何なのか。最新の研究成果と我々日本の研究グループが毎年夏に行っているグリーンランド氷床での現地調査を紹介しながら、北極の融解の現状と地球の気候システムの不思議に迫ってみたい。

北極とはどんなところか？

北極とは、一般に地球の自転軸の北端である北極点を中心とした周辺地域のことを指す。より正確に北極を定義すると

すれば、北緯66度33分以北の地域とすることができ、この領域は北極圏と呼ばれている(図1)。北緯66度33分とは、夏至に一日中太陽が沈むことのない場所の南限である。つまり北極圏とは、夏に白夜、冬に極夜が存在する地域である。北極は年間を通じて雪に閉ざされた極寒の世界と思われることも多いが、夏は日が沈まないため氷点を上回る暖かい日が続くこともあり、陸上では雪が解けて色とりどりの小さな花が咲き乱れ、北極とは思えない景色が広がるところもある。北極点は北極海上に位置するため、北極圏の中心部分は海である。北極圏の辺縁には、北極海を取り囲む北欧、シベリア、アラスカ、カナダ、グリーンランドなどの陸地が存在する。この陸に囲まれた海

という北極の地理条件は、海に囲まれた陸である南極とは対照的で、北極特有の気候条件を作りだす一つの要因となっている。とくにこの地理的条件であるがゆ

えに、地球温暖化のような気候変動に対し、同じ極域でも北極は南極よりも敏感に反応するのである。グリーンランドは、その北極海を取り



図1 北極域の地図（北極環境研究コンソーシアムより）
北極圏を定義する北緯66度33分を黒い輪で示した。また、本文中に出てくる主な地名を地図中に示した

囲む陸地の中でも、唯一厚い氷に覆われた特別な場所である。グリーンランドは面積217万km²の島で、日本の国土の約6倍に匹敵し、世界最大の島としても知られる。その面積の約8割は氷河と呼ばれる厚い氷で覆われている。その氷河の厚さは平均で1600m、最も厚い部分の頂上の標高は3216mにもなる。グリーンランドを和訳すれば緑の土地となるが、ほとんどが氷に覆われた現実の島の状態とは、その名前はかけ離れている。なぜこの島がグリーンランドと呼ばれるようになったのか、それについてはいくつかの説がある、一つは今からおおよそ千年前、北欧の海賊ヴァイキングがこの島を発見した当時、現在よりも草木が生い茂っていたという説である。別の説では、もともと氷の島、アイスランドという名前がついたが、現在その名がついているグリーンランドの東隣の島と名前が入れ替えられてしまったという。いずれにしても、実際のグリーンランドは名前とは相反する氷の島である。この島を覆う巨大な氷は、あとに説明する通り現在の地球環境の維持のために重要な役割を果たしている。それゆえ、今この氷に起こりつつある異変に世界中の研究者が注目しているのである。

我々日本の研究者グループも、2011年よりこのグリーンランドの氷の本格的な調査を行っている。氷河および気象の専門家が集まったグループが、学生を含めて毎年数名から10名ほどのチームになって、現地に長期間滞在し様々な調査を行っている。日本からグリーンランドに行くためにはまずデンマーク王国の首都、コペンハーゲンをめざす。グリーンランドは、デンマークの一部だからである。コペンハーゲンから真っ赤な機体が目立つグリーンランド航空という航空会社の飛行機で、4時間ほど大西洋を横断するとグリーンランドの玄関口のカンゲルスアークという街に到着する。大部分が氷におおわれているグリーンランドにも、いくつもの街または集落があり、多くの人が生活している。人口はグリーンランド全体でおよそ5・6万人。その多くは古くから広く北極周辺を生活の場としてきた、いわゆるエスキモーまたはイヌイットと呼ばれる人々である。かつて狩猟採集民族として生きてきた彼らの集落にも、現在はスーパーや病院もあり、電気や携帯電話、インターネットも通じる。我々日本のグリーンランドの調査隊が研究を行っているのは、グリーンランドの北西部の氷河でカナックという集落

から近い場所にある。カナックへは、週に1往復している定期便で行くことができる。我々がカナックに滞在するときは、現地の方に貸していただいた一軒家で共同生活をしている。食事は、スーパーで食料を買い出して自炊する。スーパーに並ぶ商品は、海水が解ける夏の間にはデンマーク本土からの補給船で年に2回だけ届けられる。時期によっては野菜等の食材が限られることもあるが、特に問題なく和洋食の普通の食事を作ることができる。時々現地の方に、地のものを差し入れていただくこともある。クジラやジャコウシの肉、キビアックと呼ばれる発酵させた海鳥など、ここでしか味わえないイヌイット伝統の貴重な食材を口にすることもできる。

グリーンランドに滞在して驚くことの一つは、厳しい環境の中に非常に多くの野生動物が生息していることである。海にはよく知られるシロクマやアザラシ、クジラなどの大型哺乳類の他、ウミスズメなどの鳥類、オヒョウやホッキョクイワナなどの魚類が生息している。陸には、トナカイやジャコウシなど、北極特有の大型動物が生息している。これらの大量の動物の存在は、イヌイットの人々が緑のない土地で長く生活を可能にしてき

たことを、我々に納得させる。野生の食料資源が豊富ということは、寒さ厳しい環境からは想像しにくい北極の意外な一面である。

グリーンランドには、素朴なイヌイットの集落とは対照的なもう一つの顔がある。米軍基地である。デンマークとアメリカとの間の冷戦期の取り決めにより、グリーンランドには米軍の空軍基地が存在する。先ほどのイヌイットの集落、カナックから南へ約130kmの所にはチュール空軍基地がある。冷戦期には1万人以上が滞在する大きな基地だったというが、現在は規模が縮小されて維持されている。冷戦期にはさらにそのチュール空軍基地から東へ200kmほど内陸に入った所に、氷河の中の秘密基地がつくられていた。キャンプセンチュリーと呼ばれたその基地は、氷の地下10mほどに、千人規模の軍人が滞在する基地だったそうである。対ソ連のために作られた軍事基地であったが、当時研究者も基地を訪れ、その時の調査はグリーンランドの氷の研究の進展に大きく貢献した。しかし動く氷河の中の基地の維持は難しく、わずか8年で閉鎖されたという。氷の中の秘密基地というと、スターウォーズのようなSFの世界を思い出すが、実際には現実の世界

がSFのモデルになったとのことである。

北極の水は本当に解けているのか？

北極の水が本当に解けているのか、またどれくらい解けているのか、実際に研究者が北極で調査してきた結果をみてみよう。北極の水といっても、実際にはいろいろな種類の水が存在する。海水が凍って海にできる海水、雪が何年も積もって氷に変化した陸上の氷河、さらに土壌中の水分が凍った永久凍土、河川や湖沼の水が凍った氷などがある。ここでは、特に目に見えて面積または体積が減少している海水と氷河についてみていきたい。氷が解けているといっても、実は海水も氷河も毎年夏には必ずその一部が解けており、これは異常なことではない。先ほど述べたように、北極といっても夏には気温が氷点を上回るため雪氷は解けるのである。しかし、冬になれば再び凍結するので、もし夏に解けた海水の分だけ新たに海水が凍結し、氷河も解けた分だけ新たに雪が降れば、1年を通して氷の量は変化しない。このような季節による融解と凍結による氷の変化を季節変動という。しかし今注目する北極の水の融解とはこの季節変動ではなく、長期的な年々

変動である。夏の融解量が冬の凍結量を上回ると年を越えて氷の量は減少する。数年から数十年のスケールで、氷の面積や質量はどのように変化しているか、そのことが地球規模の気候変動の関係を考える上で重要な意味をもつ。

北極の水は規模が大きいので、その量

の変化を測るのは、それほど簡単なことではない。ただでさえわずかな人しか住んでいないため、北極圏には気象や氷の観測所は限られた数しかない。また限られた場所での観測を行っても、氷の全体の変化を正確に見積もることは難しい。しかし1970年代に、人工衛星による地球

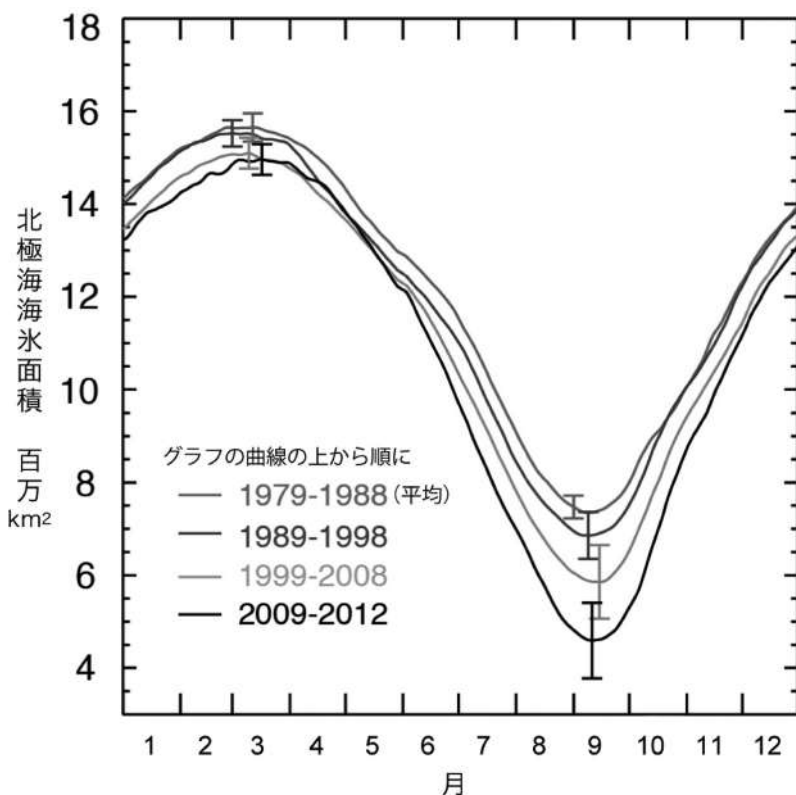


図2 北極海の水氷面積は季節変動 (IPCC Report AR5、2013より)
9月の最小面積は、1980年代から2010年代まで徐々に減少していることがわかる

観測が実用化した。現在、北極の水の全体的変化をみる手段の一つとして、人工衛星が用いられている。北極海の海水は、毎日地球観測衛星によって面積が観測されている。現在、その面積の変化はホームページでリアルタイムに誰でも見ることができる。海水面

積は、気温の下がる冬に増加し、夏に減少するという季節変動を示す(図2)。

面積が最大となるのは毎年2月中旬で、最小になるのは9月中旬である。衛星観測が始まった1978年からの面積変化の記録によると、例えば1980年代には冬の最大面積が1560万km²、夏の最小面積が723万km²という大きな季節変動をしていることがわかる。夏の最小面積に注目すると、1990年代の平均は655万km²、2000年代の平均が548万km²と着実に小さくなってきている。さらに2012年の夏に、観測史上の最小面積318万km²が記録された。これは、1980年代の半分以下という衝撃的な面積である。ちなみに今年2016年の最小面積は402万km²となり、2012年に次ぐ2番目の最小記録となった。

一方グリーンランドの水河は、数万年間の雪が積もってきた陸上の厚い氷の塊であり、海水が凍った海水とは違い毎年の面積の変化はそれほど大きくはない。水河の変化を見るときには、面積よりもその氷の厚さの変化、より正確に言えば氷の質量を観測しなくてはならない。海水のように人工衛星から単に面積をみるだけでは質量の変化はわからないので、同じ人工衛星でも全く別の方法を使って

観測する。巨大な氷の質量を観測する方法の一つは、重力観測衛星による地表面の質量分布の観測である。この衛星は、地表面の微妙な重力の変化を検知することにより、氷を含むあらゆる物の地表面の増減を観測することができる。ただし検出できる重力には限界があるので、あまり細かい変化をみることはできない。もう一つの方法は、衛星に搭載したレーザー高度計による地表面高度の観測である。衛星からレーザーを照射しその跳ね返りの時間を測定して、氷床表面の標高をセンチメートル単位で計算し、その年々変動を観測する。さらに衛星による空からの観測だけでなく、氷河上で人力による年間の融解量と積雪量の観測も行われている。以上のそれぞれ別々の方法による観測結果はほぼ矛盾なく、氷床が近年急激に減少していることを明らかにしている。夏の融解量から冬の積雪量を差し引いた年間の氷の収支は、2150億トンのマイナスとなっている(2002-2011年平均、IPCC)。つまり毎年2150億トンの氷が解けて海へと流出している。その量は、琵琶湖の水量275億トンの約8倍である。

このような氷の減少は、調査で現地を訪れると様々な場面で現実に起きている

こととして感じることができる。グリーンランドに生活するイヌイットの人たちは、冬の間、海水の上を犬ぞりを使って遠方まで狩りにでかけるが、最近はお秋の海の凍結の遅れ、または春の融解の早期化が顕著となり、狩りに出かける期間が短くなっているという。さらに犬ぞり旅行に出ても、真冬なのに氷がとけて海水面が部分的に現れていたり、海水が薄くなったりして海氷上の旅行が昔よりも難しくなっているという話を聞く。また、もともと氷河の下にあった地表面が氷の融解によって出現し、新たな鉱物資源が発見されることもある。そのため、近年グリーンランドには、デンマーク内外から企業による資源開発の波が押し寄せている。これも氷の減少がもたらした社会の変化である。

さらに北極の氷の減少は、現地だけでなく我々の日本を含む地球全体に大きな影響を及ぼすこともわかってきた。北極海の海水は、鍋のフタに例えることができる。フタがなくなると北極海に蓄えられていた熱および水蒸気は大気に伝わり、周辺の大気循環や降水量を大きく変える。2014年2月に関東を襲った大雪が記憶に新しいが、北極海の海水の減少がこのような日本を含む中緯度帯の厳冬や大

雪の原因になる可能性が指摘されている。さらに太陽光を跳ね返す役割がある白い海水のフタの減少は、日射熱の海水への吸収を許すため、北極海の水温を変えて植物プランクトンの成長に影響し、海の生態系も大きく変えうることもわかってきた。グリーンランドの氷河の存在は、世界の海洋をめぐる深層循環という大規模な海流の駆動力となっていることも知られている。グリーンランド沖の北大西洋で海水が深海に沈み込むことで始まるこの深層循環は、グリーンランドの融解が進むことで弱まることわかっており、そのことによって北欧や北米の寒冷化など、大規模な気候変動が引き起こされる可能性もある。さらに、グリーンランドの氷河の融解は、次に説明するように世界の海水面上昇の原因にもなる。このように北極の水は、地球環境の要といえるだろう。

氷河とは何か？

グリーンランドの8割を覆う巨大な氷河は、グリーンランド氷床と呼ばれる。ここでこの氷河または氷床とは何かをもう少し説明しておきたい。氷河とは、文字通り氷の川であるが、正確には重力に

よって動く雪と氷の塊と定義される。氷河は、海や河川、湖沼などの水がその場で凍った氷とは全く異なる。毎年降った雪が夏になっても解けずに何年も積もり続け、やがてその雪の自重による圧密で雪が氷へと変化し、さらにその氷が重力によってゆっくり変形しながら動いていくものを氷河と呼ぶ。氷河の中でも大陸を覆うような巨大な氷河を、氷床と呼ぶ。現在、地球上で氷床とよばれる氷河は、南極氷床とグリーンランド氷床の2つだけである。氷床よりも規模は小さくなるが、アンデスやヒマラヤなどの高山やアラスカやカナダなどの極域周辺にも氷河は多数分布している。

地球は水の惑星と言われるが、その水の97%は海洋に存在する。しかしあまり知られていないが、海洋に次いで水が存在する場所は、我々の身近にみる河川や湖沼ではなく、氷河である。その量は約2万8千兆トン、地球全体の水の量の2%に相当する。さらにその氷河の水の90%は南極氷床で、9%がグリーンランド氷床、のこりの1%がアラスカやヒマラヤを含めたその他の氷河である。氷河の解け水は、河川を経由して海へ流れ込む。海水は蒸発して、水蒸気となって陸上へ移動し、一部は雪として再び氷河に積も

り、また一部は雨として降って河川となり海へ帰る。このような地球をめぐる水の流れを水循環という。水循環は、人体という血液の循環と同じで、地球表面のさまざまな物質循環を担い、気象現象や地形の形成の原動力となり、生態系の維持にも欠かすことができない。地球スケールの水循環の中で氷河の機能は、人体の血液循環に例えれば、流れる血液の量を調整する肝臓に相当する。気候が温暖化すれば、氷河は解けて流れる水の量は増加し、反対に寒冷化すれば、氷河は拡大し流れる水の量は減る。肝機能の変化が我々の健康に重要な意味をもつと同じように、氷河は地球環境のシステムの中で重要な役割を担っているのである。

海へと流れこむ氷河の解け水は、広い世界の海の面積を考えると些細な量のように思えるかもしれない。しかしながら、南極やグリーンランドの氷床の大きさから計算してみると、その量は世界の海水面を押し上げるほど無視できない量であることがわかる。例えば、グリーンランド氷床の場合、氷床の面積180万km²に平均の厚さ1640mをかけると氷床の体積が求まり、それに氷の密度0.9g/cm³をかければ、氷床の水の量(質量)が2657兆トンと求まる。地球の海の

面積は、半径6400 kmの球の面積の7割とすれば、球の表面積の公式を使って3・6億km²と求まる。氷床がすべて解けて海に流れ込んだ時の海水面の上昇量は、求めた氷床の水の量を海の面積で割ればよいから、計算すると7・4 mとなる。7・4 mの海水面の上昇は、世界各地の島国および沿岸沿いの都市に多大な影響を与える。東京の場合、東京湾に面したベイエリアや荒川・江戸川沿いの低地帯は、すべて海に沈むことになる。さらに、南極氷床はグリーンランド氷床の約10倍の体積を持つことから、解けた場合の海面上昇量は、グリーンランド氷床の10倍、約74 mとなる。これだけ海水面が上昇すれば、世界の海岸沿いの都市はほぼ壊滅するだろう。しかしながら、南極はグリーンランドに比べ平均気温が低いため、多少地球が温暖化しても南極氷床はすぐに解ける心配はない。地球温暖化で最初に解けるのは、気温が比較的高い中にあるグリーンランド氷床なのである。現在の融解速度（年間質量減少量）は、南極氷床が1470億トン、グリーンランド氷床は2150億トンと見積もられており、実際にグリーンランドの方が融解量は大きい。これが氷河の中でもグリーンランド氷床の融解を注視しなくてはな

らない理由である。

なぜ北極の氷は予想以上に速く解けるのか？

北極の平均気温の上昇は、水を徐々に解かしていくことは間違いないが、現在観測されている海水や氷河の融解量は、10年前に計算された予測をすでに上回り、気温上昇だけでは説明がつかないほどに急速に増加していることがわかつている。そのことはつまり、気温以外に氷を解かす要因があるということである。その要因とはいったい何だろうか。

氷河の融解を加速する要因として、気温のほかには氷河表面の暗色化がある。普通氷河表面の雪や氷は、白に近い色をしている。白い色は太陽の光をほとんど日反射してしまいうため、氷河はもともと日が当たっても解けにくい性質を持っている。しかしながら、その表面にもし色がついたとすると、特に黒い色に変化したとすると、その分、氷河が日射熱を吸収し融解が速まることになる。ちょうど日差しが強い日に、黒い服を着ると白い服よりも暑くなるのと同じ原理である。したがって、気温に変化がなくても、氷河の色が黒くなれば、それだけ融解が進む

のである。実際にグリーンランドの氷河が最近黒っぽくなっている、つまり暗色化が進んでいることが明らかになってきている（図3）。衛星画像の解析によつて、グリーンランド氷床の西側に夏になると表面が黒くくすんでいる部分が広い範囲で現れることが発見され、その黒い部分は徐々に拡大し、2000年から2015年の15年間で、約7・5倍の面積にまで広がっていることがわかった。

では氷河の表面は、いったいなぜ黒くなってきているのだろうか。氷河表面が暗色化するのには、表面の雪や氷に不純物が混ざっているためである。雪や氷の中には、大気を介して飛ばされてくる微粒子が混ざることがよく知られている。例えば、日本では中国大陸から春に飛んできた黄砂のような鉱物粒子がある。日本の春先の高山の残雪が茶色く色づいているのは、この黄砂のためである。大陸の砂漠を起源とする小さな砂の粒子は、日本だけでなくるか北米大陸、そしてグリーンランドにまで飛ばされていくことも明らかになっている。したがって、このような遠距離または近距離の裸地に由来する鉱物粒子は、氷河を黒くする不純物の一つの候補である。さらに、大気中には、最近PM_{2.5}としてマスコミを

賑わすようになった、すす、またはブラックカーボン（BC）とも呼ばれる粒子も浮遊している。このBCは、石炭やガソリンを燃やしたときに発生する人為的なものや、森林火災で発生する自然由来のものがある。BCは、非常に光を吸収する濃い黒い色をしているため、雪氷中にならずかでも混ざると黒っぽくなる。しかしながら、実際のグリーンランドの氷河表面の雪氷を採取し分析してみると、その不純物は鉱物粒子でもBCでもないことがわかった。その物質は、一見泥のような黒い色をした物質である。よく見ると直径1ミリほどの黒い粒状のものが集まっていることがわかる（図3）。顕微鏡で詳しく観察した結果、この粒は微生物と有機物と鉱物粒子が集まったものであることがわかった。粒の表面は、細い糸状のシアノバクテリアという微生物に密に覆われ、内部には黒い有機物や鉱物粒子がつまっている（図3）。シアノバクテリアとは、植物と同じ光合成をして成長する微生物で、低温であるにもかかわらず氷河上でも繁殖できる特別な微生物であることがわかった。この粒構造は、北海道の天然記念物として有名なマリモによく似ている。シアノバクテリアは、緑から藍色をしているが、粒の内部に黒

い有機物や鉱物粒子がつまっているために、粒自体は黒く見える。この小さな黒い粒はクリオコナイトとよばれている。グリーンランド氷床の暗色化の原因は、このクリオコナイトが氷の表面で増加しているためなのである。つまりこれは、

グリーンランド氷床の融解加速が、目に見えないほどの小さな微生物によって引き起こされていることを意味する。微生物という、我々の生活の中では普段その存在すら意識することは少ないが、実は現在の地球環境システムの様々な場面

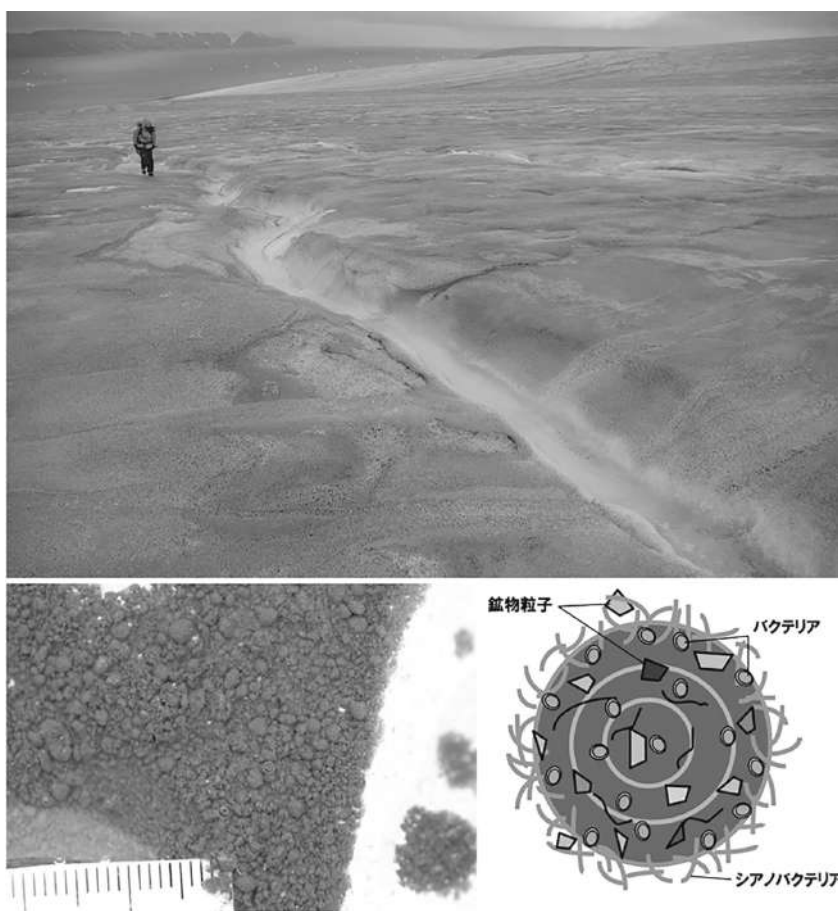


図3 暗色化したグリーンランドの氷河の表面（上）
氷河表面には黒い粒状の物質が氷を覆っていた（左下：クリオコナイト）。クリオコナイトの粒は、糸状のシアノバクテリアに覆われた構造を持っている。つまりクリオコナイトは氷河上の微生物活動によって生産された黒い物質であることがわかった

で重要な役割を持っていることが明らかになってきている。では今なぜグリーンランド上でクリオコナイトが増加しているのか、シアノバクテリアの繁殖が増えているのか、実はまだその理由ははっきりとわかっていない。ただ驚くべきことは、グリーンランド氷床の融解加速は、単に地球温暖化の気温上昇によるだけではなく、北極に存在する様々な生物によって構成される生態系の変化が関与していることである。地球環境のシステムには、まだ我々が知り得ない複雑な仕組みが存在することを示している。

地球温暖化と北極の将来

今年2016年11月、気候変動に関する国際的枠組みであるパリ協定が発効される見込みとなった。パリ協定は2015年12月にパリで開催された第21回気候変動枠組条約締約国会議(COP21)で締結された協定である。1997年に採択された京都議定書以来、18年ぶりに合意された温暖化防止のための国際ルールとなる。京都議定書と違って先進国だけでなく、すべての国に削減目標が課されることになったのが今回の大きな成果である。しかしながら、このパリ協定の目

標は産業革命前を基準に気温上昇を2℃に抑えること、つまり非常に厳しいといわれるこの協定の効力をもってしても現在からさらに1℃の上昇は避けられないことになる。世界平均よりも高い気温上昇が見込まれる北極では、さらに気温が上昇することになる。したがって、温暖化防止条約をもってしても、しばらくは海水面積の減少や氷河の融解を避けることはできそうもない。地球温暖化は、熱帯伝染病の北上、農作物の不作、降水量の変化や台風が発生頻度の変化など、様々な社会的影響が指摘されている。しかしながら、この中でも北極圏が震源となったインパクトは、最も確実でかつ社会への影響の大きいものと言えるだろう。

かつて東洋と西洋は、ユーラシア中央部の砂漠を貫く道、シルクロードで繋がれていた。7世紀の航海技術の発達によって、人と物の流れは砂漠のシルクロードからインド洋を経由する海のシルクロードに変わり、繁栄と衰退の世界地図も大きく塗り替えられた。海のシルクロードは、現代も石油タンカーが行き交うなど世界経済の要として重要な機能を担っている。21世紀、北極海の海水が解けることによって今まで閉ざされていた北極海

航路が開かれようとしている。これはつまり世界の物流が、海のシルクロードから北極のシルクロードへと再び大きく変わることを意味する。この物流の変化は、前回と同じように大きく世界地図を塗り替える可能性がある。地球温暖化を少しでも防ぐ行動をすることはもちろんであるが、現実の北極の変化をみこした社会の将来設計も必要だろう。そのためには、北極の現状把握とまだ人智が及ばぬ地球環境システムの理解への努力を続けていかなければならない。

(2016年7月7日・公開フォーラム)

講師略歴(たけうち のぞむ)

1972年生まれ。東京工業大学大学院生命理工学研究科修士。博士(理学)。アラスカ大学国際北極圏研究センター研究員、総合地球環境学研究所助教を経て、千葉大学大学院理学研究科教授。共著に『中央アジア文明と環境の歴史、第1巻』(臨川書店)、『地球環境学事典』(弘文堂)、『ヒマラヤと地球温暖化』(昭和堂)。