The Arctic tells its story

北極が物語る自らの歴史

Heather M. Stoll

北極は、地球の気候変動に特に敏感な場所の１つである。新たに掘削された堆積物コアによって、「温室」から「氷室」状態への長期にわたる移行で、北極域の果たした役割が明らかにされた。

Nature Vol.441(579-581)/1 June 2006

晴れわたった暑い日に白いTシャツを着ると涼しいように、極域を覆う雪と海氷は光を反射するため、地球が吸収する太陽光の総量を減少させる。氷量と積雪量は気温低下に応じて増えるので、気候変動を拡大させる。しかし、北極と南極は常に凍りついた不毛の地であったわけではない。過去5500万年くらいの間に、地球は大きく寒冷化し、温室気候から現在の氷室気候に変わった。*Nature* 6月1日号に掲載された3論文[2,3,4]の報告よると、北極での注目すべき科学プロジェクト[1]の結果から、長期寒冷化における北極の役割と、寒冷化前の温室気候振動期における北極の応答にかかわる詳細な状況が明らかになった。

氷が太陽光を反射し、低緯度域からの暖かく塩分を多く含んだ海流を効率的に受け入れることによって、北極が全地球的気候に影響を及ぼしているにもかかわらず、北極中央部から長期の地質学的記録が回収されていなかったため、気候遷移における北極の役割の問題は未解決であった。北極の気候進化に関するこれまでの知識は、数千キロメートル離れた場所のコアや露頭の研究から得られたものだった。しかし今回、砕氷船と掘削リグを組み合わせた巧妙な計画(図1)によって、確かな証拠を伴う知見を得ることについに成功した。北極掘削航海で、過去5500万年にわたる注目すべき気候記録が北極中央部から回収され、そこから引き出された推論が新しい論文[2,3,4]で報告された。

過去5500万年間の気候寒冷化は大気中のCO_2減少に原因があり、その結果、氷のない世界から、極度に凍結した南極とともに、グリーンランドや凍結した北極に巨大な氷床がある世界に遷移したと、長い間考えられてきた。それどころか、海草から得られた同位体マーカーを基に過去の大気中のCO_2濃度を再構築した結果[2]から、大気中CO_2が4500万～2500万年前に劇的に減少し、この時期が地球の大規模寒冷化の開始時期とかなりよく一致することが示されている(図2a,b参照)。しかし、南極においての氷河作用と海氷が現れ始めた時期は約4300万年前で、地球の寒冷化とCO_2の減少が始まった時期に一致するが、北極の気候変動は時期的にずれているようにみえる。北極の寒冷化とこれに伴う氷床・海氷の成長は、氷山に運ばれた小石が北大西洋の堆積物中に初めて出現する200万～300万年前まで、つまり南極より数千万年遅れたように思われる。

北極の氷河作用が南極よりも大きく遅れたのは、CO_2のような全地球的気候にかかわる要因によるのではなく、南半球の地域的な変化に応答して、南極氷床が成長し始めたからだと、古気候学によって示唆されている。南アメリカ大陸とオーストラリア大陸が南極から離れてゆっくりと移動していったため、暖かい海流が海岸線に沿ってはるばる南極まで流れなくなっ

©2006 NPG Nature Asia-Pacific

M.JAKOBSSON/IODP

図1：コアの寄与。ここに見られる北極掘削航海に共同で取り組んでいる3隻の船は、砕氷・海底掘削船 *Viar Viking* と砕氷船 *Oden* と *Sovetsky Soyuz* である。

たというのだ。しかし、最近のモデルでは、海流が絶たれるだけでは、氷床拡大が始まるほど十分に南極は寒冷化しなかっただろうと示唆されている[6]。

この謎は、Moran たち[2]が報告した新しい記録によって見事に解決した。この記録は、北極の氷がこれまで信じられていたよりも、ずっと早い時期に出現したことを示している。氷山によって北極海盆中央部に運ばれた小石が、南極周辺とほぼ同時期の4500万年前にはすでに出現している（図2c参照）。大量の砂と氷山が運んだ小石によって、1400万年前まで、海氷と氷山が北極の広範囲に存在していたことが裏づけられた。このように北極の氷期開始時期が早く、南極の氷期と同期していることは、大気中の CO_2 の変化が両半球での氷期の始まりをもたらした主たる要因であるという考えを支持する。

Moran たちの論文[2]は、大気中の CO_2 と温室－氷室遷移の密接な関係を明らかにしたが、北極コアのより古い堆積物から得られた結果は、温室世界における気候の仕組みに関する我々の知識にかなり意外なずれがあることをあらわにした。Sluijs たち[3]は、5500万年前の北極の海面水温が18℃程度だったと報告している。これはフランス、ブルターニュの海岸の海面水温に匹敵している（この地方では、我慢強い人はそれでも泳ぎに行くが）。最も重要なことだが、5500万年前の気候モデルでは、光を反射する氷床を除外し、大気中の CO_2 濃度を産業革命以前の約10倍の2000ppmまで増やしても、このような温かい海水をシミュレートするには至らない。明らかに、CO_2 だけが北極を極端に暖かくした要因ではない。気候シミュレーションのモデルから、何かが欠けているのだ。Sluijs たちは、この「何か」は別の温室効果要因、つまり北極域の成層圏下部にある凍った水蒸気雲であると考えている。大気中の温室効果ガスと同様に、このような氷の結晶は地球から宇宙へ放射されるエネルギーの一部を捕捉し、北極域の地表をより高い温度に保つのである。

Sluijs たち[3]は、5500万年前に起こった急激で猛烈な温暖化（暁新世/始新世境界温暖化極大期）に関する興味深い結果も報告している。この「暁新世超温室」は、深海の堆積物中にあるメタンから、あるいは北大西洋が開いた時期に起きた火山活動によって有機炭素が蒸発し、海洋と大気に大量の炭素が放出されたために生じたと信じられている。海洋・大気のどちらの場合も、大気中の過剰 CO_2 によって温室効果が強まり、熱帯の気温が4～5℃上昇した（文献7）。Sluijs たちは、北極の気温も18℃から23℃へと急上昇したことを示した（図2c）。各モデルはまたもや、北極の温暖化ついて気温の適切な絶対値を得ることができなかったが、CO_2 増加に起因する北極の温暖化の程度については一致している。

©2006 NPG Nature Asia-Pacific

氷期と間氷期の間を揺れ動く現世（完新世）を通してみられる、北極の気温が熱帯の気温と比べて少なくとも 2 倍は変化する状況と異なり、暁新世超温室期の北極の温暖化は熱帯・亜熱帯地方でみられる温暖化とほぼ同じである。逆説的いえば、この結果は海氷・氷床が極地域におけるより大きな温度変動の原因であるという、氷室気候に対する我々の知識の一面を裏づけるもので、氷のない温室気候では極地域は気候変動に対して他のあらゆる場所と同じように応答する。CO_2 の変化率と暁新世超温室期の温暖化は次世紀に予想されている温暖化と似ているかもしれないが、ある点では将来の温暖化は同じではなく、積雪量・海氷量の減少によって高緯度域では温暖化が顕著に拡大するであろうことをこの結果は再確認している。

最後に、Brinkhuis たち[4]は、北極におけるもう 1 つの重要なフィードバック、つまり熱輸送と塩分の関係の近い将来の作用を垣間見せた。今日では、塩分の多い海流は北極に流れ込む。そこで海水は熱を放出して、十分に密度が高くなり深海に沈み、北大西洋深層水になる。このような海流の強さと深層水形成におけるゆらぎは、過去数万年間のほとんどの急激な気候変動の発生か拡大に関与している。

Brinkhuis たちは、低緯度域で生まれた暖かく塩分の多い海流の北極への流入が遮断されていたようにみえる 4900 万年前の 80 万年間を明らかにした。塩分の多い海流が流入しないと、降雨が蒸発よりも局所的に多くなり、今日では塩分が 0.2%以下の水中でしか自然に成長しないアカウキクサ属の水生シダの群落を特徴とする淡水環境（図 2c 参照）ができる。この類まれな期間には、一時的に増えた淡水が北極からあふれ出ることすらあり、このシダの残骸をまわりの海盆に運んだ。

北極における淡水シダの支配期間は、塩水に戻った 4830 万年前に突然終わった。北極の塩分増加が、低緯度域からの暖かく塩分の多い海流の流入を示す、小さいが重大な影響をもたらす北極の水温上昇と対応していることが示されたのは重要である。より年代の新しい北極のコアから隠れていたものが現れたとき、その後の数千万年間、暖かい海流による輸送が発達し続けた仕組みと、このような変化が過去 2000 万年間にわたる全球温度の低下にかかわってきた仕組みが見つかるだろう。

総合すると、これらの論文[2,3,4]は、北極の気候進化に関するいくつかの謎を解いた。しかし、氷河作用の強度が約 1400 万年前に増大し、まだ約 300 万年前にさらに増した理由を明らかにする必要がある。どちらも大気中の CO_2 の減少と関連がなかったからだ。さらに、モデル化した CO_2 の影響は暁新世超温室の説明には十分でなく、別のいくつかの（おそらく温室効果）要因が必要であることを考慮に入れると、この別の要因の消滅も氷床の成長と地球の寒冷化に影響を与えていたのかもしれない。

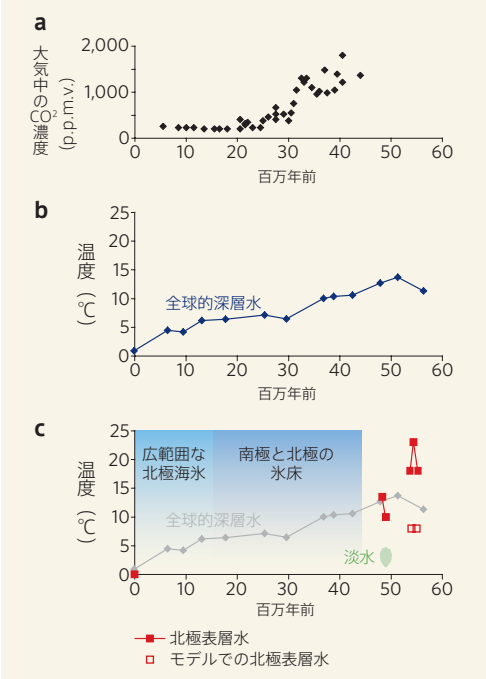

図 2：過去 5500 万年にわたる全球と北極の気候進化。
a,b, 大気中の CO_2 濃度（体積 ppm；文献 5）の減少は、深層水温度から推測される寒冷化と同時に起こっている[8]。 **c,** 今回報告された結果の概要[2,3,4]。北極の氷の発達[2]はこれまで考えられていたより早く起こり、南極の氷河作用と同期している。5500 万年前、暁新世 / 始新世境界温暖化極大期に北極の表面水温は、「突出」して 5℃上昇した。このイベントの前と間の温度は、モデルから予測される温度より少なくとも 10℃高い（文献 3）。最後に 4900 万年前、約 100 万年という短期間、北極は表層水が淡水という珍しい時期にあった[4]。低緯度域で生まれた暖かく塩分の多い海流が流入して表面水温が上がり、この期間は中断した。

このすべてで、気候モデルに関係するものに個別の難題がある。過去に極域の温暖化をもたらした過程を気候モデルに組み入れることができれば、将来の気候変動に対する予測にいっそう大きな自信をもてるようになるだろう。 ■

Heather M. Stoll
オビエド大学（スペイン）およびウイリアムズ大学（米）

1. http://www.ecord.org/exp/acex/302.html
2. Moran, K. *et al. Nature* **441**, 601–605 (2006).
3. Sluijs, A. *et al. Nature* **441**, 610–613 (2006).
4. Brinkhuis, H. *et al. Nature* **441**, 606–609 (2006).
5. Pagani, M. *et al. Science* **309**, 600–603 (2005).
6. Huber, M. & Nof, D. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* **231**, 9–28 (2006).
7. Zachos, J. C. *et al. Science* **302**, 1151–1154 (2003).
8. Lear, C. H. *et al. Science* **287**, 269–272 (2000).

©2006 NPG Nature Asia-Pacific