

Windows on the greenhouse

温室に窓を開ける

Ed Brook

南極の氷床コアから苦労して取り出されたデータは、地球の過去 80 万年分の気温と大気中の二酸化炭素およびメタンの濃度につき、これまでにない展望をもたらす。

Nature Vol.453 (291-292) / 15 May

古気候学者は探偵のような科学者である。彼らは、安定同位元素や微量元素の濃度、および、化石をはじめとする地質学的記録などの間接的な手がかりを用いて、自分たちが生まれるよりもはるかに昔の気候の変化を推測する。過去の環境条件に関する直接的な手がかりが得られることはめったにない。それゆえ、こうした手がかりが得られる場合には、ますます貴重なものとなる。Nature 2008 年 5 月 15 日号^{1,2}では、EPICA（南極における欧州合同氷床コア掘削計画）のメンバーが、これらの記録の中でおそらく最も価値のあるものについて報告している。それは、地球の極地から取り出された氷床コアの中に捕らえられ、保存されていた大気ガスから得られた、最新かつ最長の記録である。

極地の氷床コアからは、二酸化炭素やメタンなどの温室効果ガスのサイクルを長期的な視点から見ることができる。これに挑戦しているのは、比較的少人数の科学者からなる国際チームである。彼らは、氷床を徐々に掘り下げながら、より古い氷床コアを分析している。つい最近までは、南極大陸東部から得られたヴォストーク氷床コアが基準となっていた³。この氷床コアがもたらした 44 万年分のデータは、現代の気候変化に関する議論の主要な背景となった。

2005 年には EPICA の「ドーム C」から 65 万年分の記録が得られて^{4,5}、その基準は引き上げられた。これも南極大陸東部の掘削サイトであるが、はるかに古い氷を取り出すことができた。既に、この氷床コアからは 80 万年分の気温の変化が復元されている⁶。現在、長年にわたる慎重な作業と協力の結

果、ドーム C の記録から、過去 80 万年分の大気中の二酸化炭素（Lüthi *et al.* ,379 ページ）¹とメタン（Loulergue *et al.* ,383 ページ）²の歴史を完全に復元することに成功した。

どの時代の氷床コア記録を見ても、これらの温室効果ガスの濃度が今日のような値になったことはないという基本的な結論は揺らがなかった。メタンと二酸化炭素の濃度に共通する長期的な挙動（究極的には、地球の軌道のゆっくりした変化に起因するパターンに従っている）は、より古い記録の全体にわたって持続していた。メタンや二酸化炭素の濃度と復元された気温との著しく強い相関も確認できた（図 1）。

データはさらに、温室効果ガスと気候との緊密な関係も裏づけた。この関係は、地球システムのまだ部分的にしか解明されていないフィードバック機構によって保持されているものである。メタン濃度の変動は、熱帯地方と北半球の高緯度地方の湿地帯での気温と降水量の影響の変動に起因している可能性が高い。二酸化炭素濃度の変動は、ほぼ例外なく、海洋現象として観察される。これは、海洋が大きな炭素プールとなっているためである。この点については、海洋循環、生物生産性、二酸化炭素の溶解度およびそのほかの海洋化学的性質の変化が関与していると考えられているが、これらの機構が厳密にどのような割合で寄与しているかは不明である。

これらの長期記録^{1,2}を詳細に検討すると、興味深い特徴がみえてくる。最も顕著な特徴は、「のこぎりの歯」の形をした 10 万年のタイムスケールの変動である。去年報告されたように⁶、ドーム C の記録か

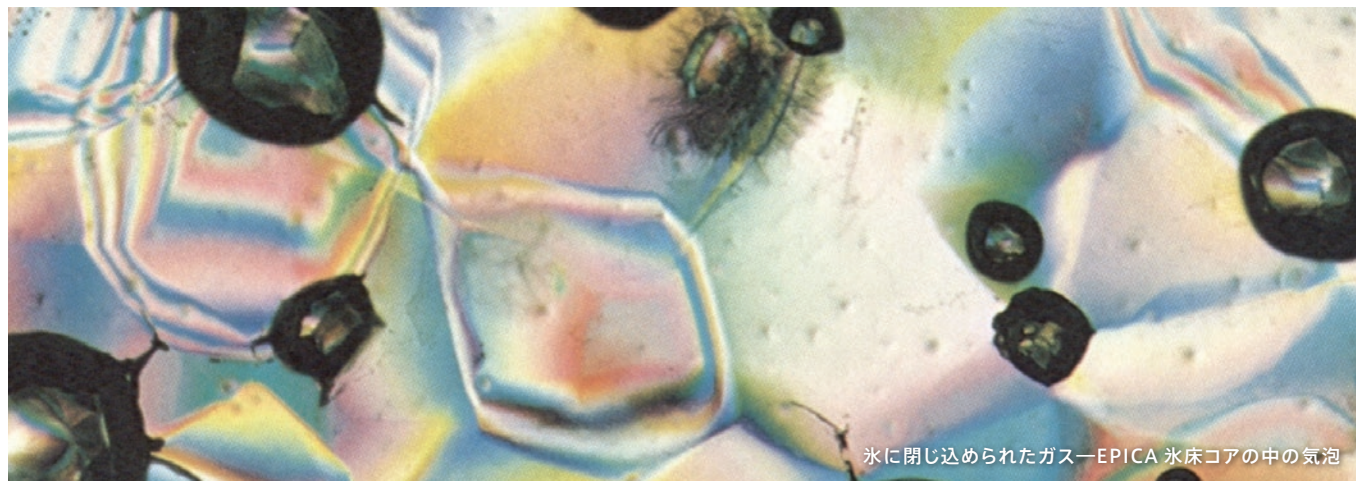
ら復元された10万年の気温サイクルの振幅は、約45万年前を境に大きく変化しているように見える(図1)。それ以降は、温暖な時期(間氷期)がより高温になったのに対して、寒冷な時期(氷期)の気温は記録の全体を通じて変わらなかった。二酸化炭素記録も、古い時代のサイクルの振幅が小さくなっており、全体として気温と同様のパターンになっている。この傾向はメタン記録にもみられるが、気温や二酸化炭素ほど強くない。最も古い間氷期サイクルのメタン濃度の最大値は比較的高く、45万年前以降の温暖な時期の濃度に近くなっている。

二酸化炭素の長期記録からは、最も古い2つの氷期-間氷期サイクルを通じてガス濃度が異常に低いことがわかる。Lüthiら¹は、二酸化炭素記録を全体としてとらえると、ガスの平均濃度には、より長い(1周期の長さが40万~50万年の)サイクルがあることを示唆していると推測する。実際、地球の軌道の離心率(完全な円からのずれ)は、41万3000年の周期で変動しているが、この機構や別の機構によりガス濃度の変動を説明できるかどうかを明らかにするためには、さらに古い氷床コアが掘り出されるのを待たなければならない。

長期記録からは、長いサイクルの中にある千年スケールの短いサイクルの気候変化に関する情報も得られる。グリーンランドの氷床コアから得られた過去11万年分のデータは、メタン濃度の変動が、北半球の中緯度~高緯度地方における気温の突然の

上昇および低下と非常に密接に関連していることを示唆している^{7,8}。現時点では、グリーンランドからはこれよりも古い記録は得られていない。そもそも、グリーンランドでは、20万年前よりも古い長期記録が見つかる可能性はない。グリーンランドは氷の堆積速度が速く、古い氷が氷床の端の方へと流れてしまうからである。しかし、グリーンランドの気温と大気中のメタン濃度との緊密な関係が11万年前以前にもあったとすれば、南半球のドームCにおけるメタン濃度の急激な上昇は、北半球の気温の急激な上昇の代わりになる。Loulergueら²は、自分たちのデータの中にこうした急激な上昇を74か所見つけており、この論理に従って、グリーンランドと北半球の気温の急激な上昇と低下は、少なくとも過去80万年間の気候システムの特徴になっていると結論づけている。

ここで再びグリーンランドの気温記録の代わりにメタン記録を使用すると、グリーンランドの気温が低かった時期には、1000年のタイムスケールで二酸化炭素濃度が上昇していたことが示唆される。このとき、南極大陸の気温は上昇していた⁹。このパターンは、海洋循環の変化が炭素循環と気候に及ぼす影響に起因していると考えられている¹⁰。Lüthiら¹は、75万~78万年前の氷に、こうした変動の例がみられることを示している。このこともまた、古気候記録の全体に1000年スケールのパターンが存在していることを示唆している。



氷に閉じ込められたガス—EPICA 氷床コアの中の気泡

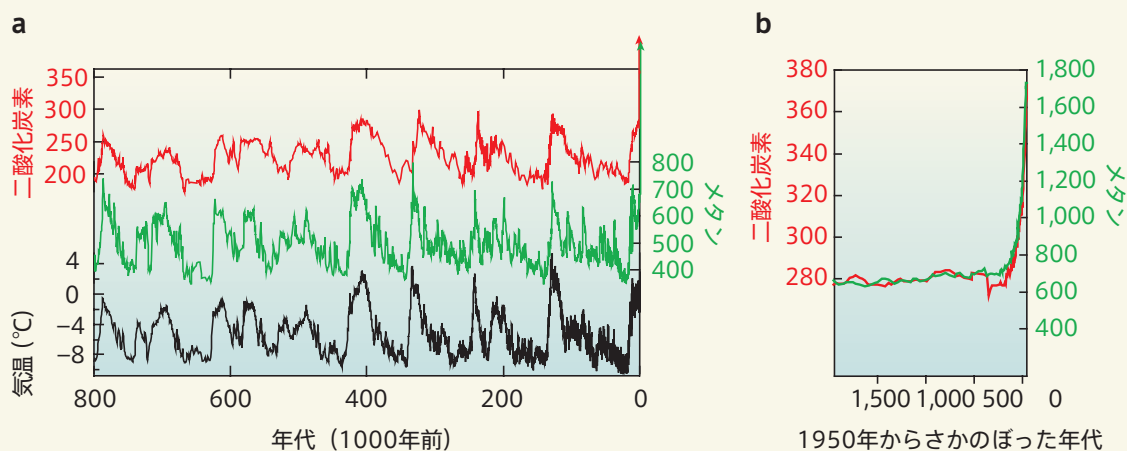


図1 長い歴史を振り返る。a. EPICAのドームC氷床コア^{1,2}から得られた大気中の二酸化炭素(赤;単位はppmすなわち100万分の1)およびメタン(緑;単位はppbすなわち10億分の1)の80万年分の記録と、氷の重水素-水素比に基づいて復元された気温(過去1000年間の平均気温を基準にした相対値)⁶は、以前から得られていた、より短い記録で観察されていた、温室効果ガス濃度と気候との緊密な関係を裏づけた。「のこぎりの歯」の形をした10万年のタイムスケールの変動は、約45万年前を境に変化する。45万年前以降の変動の振幅、特に、二酸化炭素と温度記録の変動の振幅は、それ以前に比べて大きくなっている。自然の温室効果ガスの変動と比較すると、今日の大気中の温室効果ガスの濃度は極めて異常である(今日の二酸化炭素濃度は380ppm、メタンは1800ppb程度である)。b. 二酸化炭素とメタンの濃度の過去2000年間の変動^{13,14}。

温室効果ガスの変動に関するこれらの新しい基準データ^{1,2}を見てみると、もっと長い記録からはどんなことがわかるのだろうかという疑問が出てくる。例えば、Lüthiら¹が推測した40万~50万年のサイクルは実在するのだろうか? また、現在、広く受け入れられている二酸化炭素とメタンの10万年のサイクルは、約90万年前以前には、海洋沈殿物に基づいて復元された気候¹¹との比較から予測される4万年のサイクルに取って代わられるのだろうか? 実際にそうしたシフトが起きていた場合、その原因は何なのだろうか? 90万年前に温室効果ガスの平均濃度が低下したことだろうか?この理論¹²は広く引用されているが、競合する多くの仮説¹¹の1つにすぎない。

IPICS(氷床科学における国際的パートナー)の傘下にある氷床コア研究者の国際コミュニティは、こうした疑問に取り組むために150万年分の連続した記録を確立することを当面の目標に掲げている。すでに適当な掘削サイトの検索が始まっているが、決定

には数年はかかりそうである。最適の掘削サイトが南極大陸東部であることは確実である。なかでも、降雪速度と気温が非常に低い、遠隔の高地領域の可能性が高い。こうした氷床コアの掘削に挑戦することは、温室で起きている出来事を観察するためのさらなる窓を開けることになる。■

Ed Brook、オレゴン州立大学地球科学科(米)

1. Lüthi, D. *et al. Nature* **453**, 379-382 (2008).
2. Loulergue, L. *et al. Nature* **453**, 383-386 (2008).
3. Petit, J. R. *et al. Nature* **399**, 429-436 (1999).
4. Spahni, R. *et al. Science* **310**, 1317-1321 (2005).
5. Siegenthaler, U. *et al. Science* **310**, 1313-1317 (2005).
6. Jouzel, J. *et al. Science* **317**, 793-796 (2007).
7. Severinghaus, J. P., Sowers, T., Brook, E. J., Alley, R. B. & Bender, M. L. *Nature* **391**, 141-146 (1998).
8. Huber, C. *Earth Planet. Sci. Lett.* **243**, 504-519 (2006).
9. Ahn, J. & Brook, E. J. *Geophys. Res. Lett.* **34**, L10703 (2007).
10. Schmittner, A., Brook, E. J. & Ahn, J. in *Ocean Circulation: Mechanisms and Impacts* (eds Schmittner, A., Chiang, J. C. H. & Hemming, S.) 315-334 (AGU, Washington DC, 2007).
11. Clark, P. U. *et al. Quat. Sci. Rev.* **25**, 3150-3184 (2006).
12. Berger, A., Li, X. S. & Loutre, M.-F. *Quat. Sci. Rev.* **18**, 1-11 (1999).
13. MacFarling Meure, C. *et al. Geophys. Res. Lett.* **33**, L14810 (2006).
14. www.cmdl.noaa.gov/infodata/ftpdata.html