

気候変化

Snakes tell a torrid tale

巨大なヘビが証言する猛暑

Matthew Huber

Nature Vol.457(669-671)/5 February 2009

コロンビアで巨大なヘビの化石が発見されたことは、それだけでも大ニュースであるが、過去に地球全体が温暖であった時期にも熱帯と他地域との温度差は小さくなっていなかったという大胆な推論も可能にする。

近年、将来の地球温暖化への不安が募ってきたことで、過去の気候を探る研究者が増えてきた。過去の温暖化が気候や生態系にもたらした変化を明らかにし、これを手がかりにして、将来の温暖化が及ぼす影響の大きさを予測するためである。地球には、今日よりかなり暖かい時期があったことがわかっている。その一例が、古第三紀の初期にあたる 6500 万年前から 4000 万年前にかけての時期である。この時代のワニの化石¹ やヤシの化石² は、北極地方を取り囲むように存在しており、ワイオミング州（米国）やシベリアのような内陸部でも見ついている。この事実と古気候の定量的記録を考えると、こうした地域の当時の気温は冬にも氷点下にはならず、年間平均気温はしばしば 15°C 以上あったことが示唆される¹⁻⁵。けれども、熱帯以外の地域がこれだけ暖かかったのなら、熱帯地方はどのくらい熱かかったのだろうか？ Headらは Nature 2009 年 2 月 5 日号 715 ページにて、一風変わった情報源から得られた、極めて興味深い手がかりについて報告している⁶。

熱帯における過去の気候変化の大きさを明らかにすることは、おそろしくむずかしい。20 年前には、地球全体が温暖化する時期には熱帯地方は寒冷化し、地球全体が寒冷化する時期には熱帯地方は温暖化すると考えられていた⁷。けれども 10 年前になると、過去 1 億 4500 万年の間にはさまざまな原因による「温室」効果のために気温が高くなっていた時期があったが⁸、そのときの熱帯の気温はせいぜい今よりわずかに高い程度であり、氷河時代にも今より 2 度ほど低い程度であったとする見解が通説になった。熱帯の気候の変化が小さくなる仕組みは謎である。高緯度地方に気候変化を引き起こす仕組みは、低緯度地域にもかなりの影響を及ぼすはずだ。古第三紀の初期に熱帯が今日より 2°C しか高温でな

かったとしたら、どうして両極地方が今日より 30°C 以上も高温になりうるのだろうか？

一方、気候モデル作成者たちは、熱帯以外の地方の気温を高くするためには、熱帯の気温が高く、温暖化の原因となる温室効果ガスの濃度も高い必要があると結論づけている。標準的な気候モデルと気象力学理論では、赤道から両極地方にかけての温度勾配を今日よりも大幅に小さくすることはできないからである⁹。もちろん、これらのモデルには重要な物理的過程が欠落している可能性もあるので、熱帯の気温を一定の範囲内に保つ「サーモスタット」の存在を核とする多くの仮説や新しい機構が提案されてきた^{10,11}。気候力学に新しいフィードバックを導入しようとするこれらの試みは多くの新しい道を見いだしたが、これまでのところ、どの道も行き止まりであった¹⁰。

熱帯のサーモスタットが存在するかどうかは、3 つの理由から非常に重要である。第一に、北緯 30° から南緯 30° までの「広義の熱帯」は地球の表面積の半分近くを占めており、地球全体の過去の平均気温の変動や、この変数が温室効果ガス濃度などの要因に対してどのくらい敏感であるかを決定するうえで、非常に大きな役割を果たしている。第二に、熱帯地方は地球の生物多様性の大きな部分を支えているだけでなく、その気候は高緯度地方に比べて安定しており、動植物群の安全な避難所になってきたと考えられている。第三に、地球の 대기 - 海洋循環は温度勾配によって駆動されており、熱帯の気温は全体の循環を支える要の役割を果たしている。

ここ数年、新しいプロキシ（古気候の指標）を利用した研究や、従来のプロキシを利用して保存状態のよい記録を測定する研究により¹²⁻¹⁴、熱帯の気温は以前の研究による推定値よりも高く、今日よりも 5 ~ 10°C は高かったと考えられる

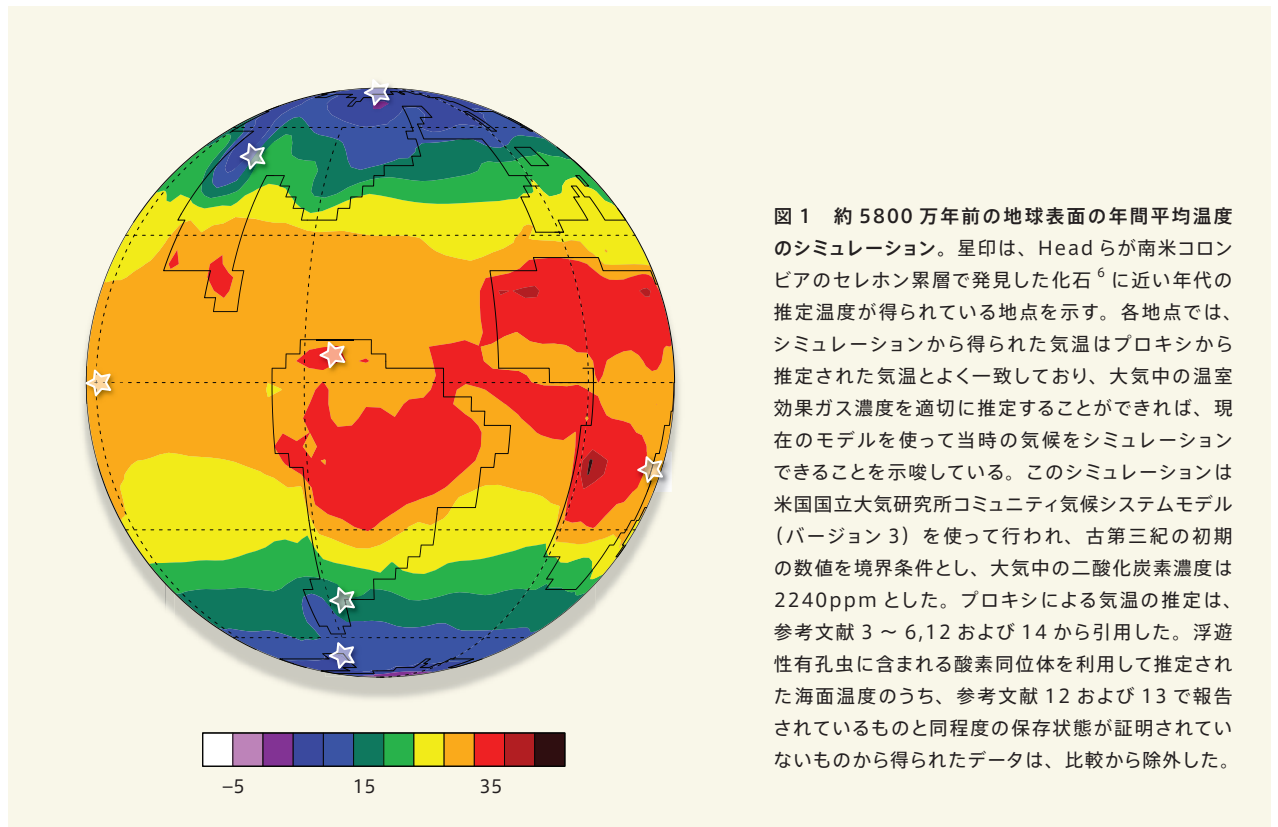


図1 約5800万年前の地球表面の年間平均温度のシミュレーション。星印は、Headらが南米コロンビアのセレホン累層で発見した化石⁶に近い年代の推定温度が得られている地点を示す。各地点では、シミュレーションから得られた気温はプロキシから推定された気温とよく一致しており、大気中の温室効果ガス濃度を適切に推定することができれば、現在のモデルを使って当時の気候をシミュレーションできることを示唆している。このシミュレーションは米国国立大気研究所コミュニティ気候システムモデル(バージョン3)を使って行われ、古第三紀の初期の数値を境界条件とし、大気中の二酸化炭素濃度は2240ppmとした。プロキシによる気温の推定は、参考文献3～6,12および14から引用した。浮遊性有孔虫に含まれる酸素同位体を利用して推定された海面温度のうち、参考文献12および13で報告されているものと同程度の保存状態が証明されていないものから得られたデータは、比較から除外した。

ようになってきた。以前の推定に系統的に低い値が出る傾向があったのかどうかについては、議論が続いている。一方で、熱帯の気候は変わっていないとする研究もある。これは、植物の葉の形を陸上の古気温のプロキシとするものであり、熱帯の気温が現代に近い値(24～26°C)であったとする説を裏づけている⁷。もちろん、この方法で推定された熱帯の気温も間違っている可能性がある。Headら⁶は、その可能性が高いことを示している。

Headらが南米コロンビアのセレホン累層から発見した6000万年から5800万年前の椎骨の化石は、8人の研究者により、これまでに発見されたヘビの中では最大の種であると推定された。このヘビの体長は13メートル、体重は1トン以上あったとみられているが、著者らの研究の最も興味深い点は、ヘビの大きさを年間平均気温の下限と関連づけたことにある。彼らがここで利用したのは、現存する生物の研究から経験的に知られている、気温と生物の体の大きさとの関係である。この推定法には、陸上に棲み、空気呼吸をする、大型の変温動物(外界の温度に応じて体温が変化する動物)の代謝についての生物物理学的な裏づけがある。基本的に、変温動物が生きていくためには代謝を最低限に保たなければ

ならない。そして、標準的な仮定に従ってこの代謝率が気温と比例すると考えるなら、大きな変温動物ほど温暖な環境で生きていたことになる。今日のヘビについては、この関係がよく当てはまっている。Headらは、今回発見された巨大なヘビは最低でも32～33°Cの気温を必要としたと推定している。これは、同じ累層から発見された植物群から推定される気温よりも6～8°Cも高く、今日の気温に比べて大幅に高い。

Headらによる気温の推定が正しいと仮定すると(これはかなり大胆な仮定である)、いくつかの重大な帰結が得られる。第一に、熱帯にはサーモスタットがないことになる。負のフィードバックが熱帯の温暖化を減速したり抑制したりする可能性はあるが、それは厳しい制限にはならず、サーモスタットの存在を予測する理論¹¹は妥当でないことになる。第二に、Headらがヘビの大きさから推定した古気温を高緯度のパタゴニアの古気温と比較すると、当時の温度勾配が現代の温度勾配とあまり違っていなかったことになり、気候モデルから得られた結果が裏づけられる。実際、当時の熱帯が今回の推定のとおり高温であったなら、現在の海洋-大気モデルの組み合わせにより当時の気温を再現できることになる⁶(図1)。

第三に、セレホン累層の動植物群は非常に高い順応性を持ち、今日のどの熱帯雨林よりも高温多湿であったと思われる環境で生きていたが、実際には限界に近い状態であった可能性がある。Headら⁶が指摘するように、6000万年前から5800万年前にかけての時期は、その後の時期よりも涼しく、もっと温暖だった古第三紀-始新世高温期(約5500万年前)には、陸上生物や海洋生物が暑さのために大量に死んでいた可能性がある¹⁴。最後に、複数のプロキシを利用するアプローチによる推定では^{6,12-14}、当時の地球の平均気温がこれまでの見積りに比べてはるかに高く、現代よりも少なくとも10°Cは高かったとされている。このことは、地球の平均気温が温室効果ガスの濃度に非常に影響されやすいか、温室効果ガスの濃度がその推定範囲の上限にあったことを意味している¹⁵。

これらの示唆は新しいタイプのプロキシを基礎にしている。Headらの知見はおそらくヘビを利用して古気温を測定する方法の最初の成果であり、慎重に評価する必要がある。体の大きさと気温との経験的な関係は、本当に一般化が可能で、正確なのだろうか？ これらの巨大なヘビの放熱能力には限界があり、Headらの外挿法に議論の余地を残している可能性はないだろうか？ わずか数個の椎骨からヘビの大き

さを正確に推定することが本当にできるのだろうか？ 温暖な時期はほかにもあったのに、同じように巨大なヘビが見つからないのはなぜなのだろうか？

今回の発見は、極端な温暖化に直面した熱帯生態系の順応性の高さを証明するものであるが、さらなる研究が必要であることは明らかだ。とはいえ当面は、温室効果により地球全体が温暖化している時期にも熱帯の気温はあまり上昇しない、と主張する人々の方に挙証責任があるだろう。 ■

Matthew Huber、パデュー大学(米)。

1. Markwick, P. J. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* **137**, 205-271 (1998).
2. Greenwood, D. R. & Wing, S. L. *Geology* **23**, 1044-1048 (1995).
3. Tripathi, A., Zachos, J., Marinovich, L. Jr & Bice, K. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* **170**, 101-113 (2001).
4. Wilf, P. *GSA Bull.* **112**, 292-307 (2000).
5. Poole, I., Cantrill, D. & Utescher, T. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* **222**, 95-121 (2005).
6. Head, J. J. et al. *Nature* **457**, 715-717 (2009).
7. Shackleton, N. & Boersma, A. J. *Geol. Soc.* **138**, 153-157 (1981).
8. Crowley, T. & Zachos, J. in *Warm Climates in Earth History* (eds Huber, B., MacLeod, K. & Wing, S.) 50-76 (Cambridge Univ. Press, 2000).
9. Huber, M. & Sloan, L. C. *Geophys. Res. Lett.* **28**, 3481-3484 (2001).
10. Pierrehumbert, R. T. J. *Atmos. Sci.* **52**, 1784-1806 (1995).
11. Lindzen, R. S., Chou, M. D. & Hou, A. Y. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **82**, 417-432 (2001).
12. Pearson, P. N. et al. *Geology* doi:10.1130/G23175A.1 (2007).
13. Norris, R. D., Bice, K. L., Magno, E. A. & Wilson, P. A. *Geology* **30**, 299-302 (2002).
14. Huber, M. *Science* **321**, 353-354 (2008).
15. Zachos, J. C., Dickens, G. R. & Zeebe, R. E. *Nature* **451**, 279-293 (2008).