

スノーボールアース：地球システムの安定性と変動性

Snowball Earth: stability and instability of the Earth system

田近 英一[1]

Eiichi Tajika[1]

[1] 東大・理・地惑

[1] Dept. Earth Planet. Sci., Univ. of Tokyo

<http://www-sys.eps.s.u-tokyo.ac.jp/~tajika/>

地球ではプレートテクトニクスが機能するために物質循環が活発であり、高い二酸化炭素供給率(固体地球から大気海洋系に供給される炭素フラックス)が維持されている。さらに、地球表面の30%を占める大陸の存在によって、岩石の化学的風化作用の役割が重要となり、風化反応速度の温度依存性に起因した大気二酸化炭素濃度の調節機構が存在するという性質を持つ。この結果、地球環境は地質学的スケールで見れば暴走的挙動が生じにくく、気候は安定に維持されてきたと考えられている。

ところが、この十数年間にわたる古地磁気学的な研究の進展によって、原生代における氷河堆積物には低緯度で形成されたものが存在することが確認されるようになった。このことは地球が全球凍結(スノーボールアース)に陥った可能性を強く示唆する。

スノーボールアース・イベントが生じた原因はいまだに不明である。しかし、原理的には二酸化炭素供給率の低下(Tajika, 2003)またはメタン大気の崩壊(Kasting, 2001; Schrag et al., 2002)のどちらかであろうと考えられる。前者は、ウィルソンサイクルにともなう火山活動度の一時的な低下・停滞で容易に実現され得るもので、スノーボールアース・イベントの原因として最も自然なものである。一方、後者は原生代初期のスノーボールアース・イベントと大気酸素濃度の急増イベントとの間に因果関係があるとする場合の可能性である。同様の考え方は、原生代後期のスノーボールアース・イベント直前の炭素同位体比の挙動も説明できるかも知れない。

いずれにせよ、こうした原因で地球が全球凍結してしまうということは、地球システムの安定性の問題としてきわめて興味深い。結論から言えば、全球凍結状態とはもともと地球の安定状態のひとつであり、あるきっかけによって気候システムが現在のような状態から全球凍結状態へと「相変化」した、と理解すべきものである。

原生代の三大氷河期はすべてスノーボールアース・イベントであった可能性がある。しかし、顕生代の氷河期はそのような状態には一度も陥らなかった。スノーボールアース・イベントは原生代特有の現象であったのだろうか？ 顕生代と原生代の氷河作用の違いが何に起因するのかはよく分からないが、少なくとも太陽進化にともなう原生代と顕生代の平均日射量の違いが原因ではないことが示される。むしろ、顕生代における陸上植物の出現は地表面の実効的な風化効率を増加させたため、それによって地球は全球凍結状態に陥りやすくなったとすら考えられる。実際、陸上植物が大繁栄した石炭紀後期に生じた Gondwana 氷河期は、スノーボールアースに陥る寸前の状態であった可能性が高いことが、炭素循環システムの解析から示される。それにもかかわらず顕生代においてスノーボールアースイベントが生じていない理由は、たんなる偶然にすぎないかも知れない。顕生代においても、原生代後期のように赤道を中心に超大陸が配置されるようなことが生じれば、全球凍結状態に陥る可能性は高いものと考えられる。

地球はその誕生以来、冷却し続けている。このまま冷却が続けば、マンツルのポテンシャル温度の低下によって、いずれは地表付近でマグマが発生できなくなるだろう。そのかなり以前に、プレート運動が低下もしくは停止する可能性も考えられる。もしそのような状況になれば、固体地球から大気海洋系への二酸化炭素供給率は著しく低下する。その結果、地球は全球凍結状態に陥ったままになることが予想される。一方、太陽光度の時間的増大によって海水がすべて蒸発した暴走温室状態に陥ることが地球環境の最終的な運命である。地球環境の運命として、暴走的寒冷化と暴走的高温化のどちらが先に生じるかという問題は、今後検討すべき重要な課題である。