

## 地球システム変動とスノーボール・アース現象

## Earth system dynamics and the snowball Earth phenomena

# 田近 英一[1]

# Eiichi Tajika[1]

[1] 東大・理・地惑

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

原生代における氷河時代はすべて全球凍結状態であったが、その後の顕生代における氷河時代は一度もそうならなかった。これは、原生代の太陽放射が低かったためである可能性が考えられる。そこで、この問題を南北1次元エネルギーバランスモデルと炭素循環モデルを結合させて検討した。

その結果、弱い太陽放射条件下では標準状態(温暖環境)と全球凍結状態における二酸化炭素濃度の差が小さくなるが、二酸化炭素レベルを規定する正味二酸化炭素供給率は現在条件と変わらないことが分かった。すなわち、原生代と顕生代の違いは太陽放射ではなく、炭素循環システムの挙動の違いに帰着される。

原生代(現在から25億年前~5億4千万年前)には三度の大きな氷河時代があったことが知られている。それらは、ヒューロニアン氷河期、スターチアン氷河期、マリノアン(またはヴァランガー)氷河期である。これまでの研究によれば、これら三度の氷河時代には低緯度域に大陸氷床が存在していたという証拠が確認されており、当時の地球表面はその大部分が凍結していたのではないかと考えられるようになってきた。これは、スノーボール・アース仮説と呼ばれている。もしこれが本当であるとすれば、地球環境は地球史を通じて必ずしも安定ではなく、何度か暴走的な挙動をしてきたということになる。

大変興味深いことに、原生代における三度の氷河時代はすべてスノーボール・アース状態であつたらしいにもかかわらず、その後の顕生代(5億4千万年前~現在)における数度の氷河時代においては、ただの一度もそのような極端状態に陥ることはなかった。これはいったいどのような理由によるものなのであろうか？

低緯度氷床の存在は、気候学的にみれば、全球凍結状態もしくはそれに非常に近い状態が実現されたことを示唆する。全球凍結状態とは、文字通り地球の表面が完全に凍結した状態であり、地球表面における熱収支からみれば非常に安定な状態である。理論的解析によれば、極から張り出した雪氷が緯度約30度に達すると、雪氷が持つ高いアルベドのために、気候システムは突然不安定な状態となり(大氷冠不安定)、地球全体が氷で覆われた状態に陥るものと考えられる。この挙動を支配している要因としては、太陽放射の低下または大気二酸化炭素濃度の低下が考えられる。この、気候システムが突然不安定になって全球凍結状態に落ち込む条件を、ここでは臨界条件と呼ぶことにする。すなわち、地球がスノーボール・アース状態に落ち込むためには、太陽放射または大気二酸化炭素濃度が臨界条件にまで低下する必要がある。

それでは、スノーボール・アースに関する原生代と顕生代の違いは、何に起因しているのであろうか？大きく異なる環境条件として真っ先に挙げることができるのは、太陽光度の違いであろう。恒星進化論によれば、主系列星はその進化過程で光度を増加させることが知られており、太陽もその例外ではない。典型的な太陽進化モデルによれば、原生代初期における太陽光度は現在の約83%程度、原生代後期では約94%程度である。このような低い太陽放射のために、原生代においては全球凍結状態に陥りやすかったという可能性は十分考えられる。そこで、この可能性について南北1次元エネルギーバランスモデルと炭素循環モデルを結合させて検討してみる。

そもそも、弱い太陽放射条件下においても、大気中の二酸化炭素濃度が高ければ、地球環境を温暖な状態に保つことはできる。たとえば、原生代初期の地球環境を現在のような温暖な状態に保つためには、大気中の二酸化炭素濃度は現在の100倍程度必要となる。これに対し、当時の地球を全球凍結状態に陥らせるためには、二酸化炭素濃度が現在の約50倍にまで低下することが必要である。すなわち、当時は大気中の二酸化炭素濃度が約半分になることによって、地球は全球凍結してしまう。この結果は、現在の太陽放射条件での結果(二酸化炭素濃度が1/10以下に低下する必要がある)と比べると、きわめて弱い条件であるように思われる。たとえば、大気中の二酸化炭素濃度は、少なくとも顕生代においては、現在レベル程度から現在の約20倍の範囲で変動してきたと推定されている。したがって、もし原生代における二酸化炭素濃度がこれと同じ振幅で変動していたならば、当時の地球は容易に全球凍結状態に陥ることになる。

ところが、二酸化炭素濃度の変動は炭素循環システムの変動によって支配されている。炭素循環モデルの解析によれば、二酸化炭素濃度を決めているのは、大気海洋系に対する正味二酸化炭素供給率(=脱ガス率+有機炭素風化率-有機炭素埋没率)であることが示される。そこで、臨界条件におけるこのフラックスの大きさを調べてみたところ、現在でも原生代初期でもほとんどかわらず、ほぼゼロであることが分かった。すなわち、地球が全球凍結状態に陥るためには、正味二酸化炭素供給率がゼロになることが条件であり、太陽放射の違いは見かけ上のものでしかないことになる。したがって、原生代と顕生代の違いは、地球における炭素循環の挙動の違いに帰着され

る．その本当の原因はまだよく分からないが，おそらくテクニクな条件の違いによるものではないかと推定される．