

原生代後期における雪玉地球現象と物理化学過程

Physical and geochemical processes in the snowball Earth during the Late Proterozoic

田近 英一[1]

Eiichi Tajika[1]

[1] 東大・理・地質

[1] Geological Institute, Univ. of Tokyo

原生代後期に生じたと考えられている雪玉地球現象について、南北1次元エネルギーバランス気候モデルと炭素循環モデルを結合させ、暴走的寒冷化段階、雪玉地球段階、雪氷融解段階、気候回復段階のそれぞれにおける支配的な物理化学プロセスとその特徴的時間スケールを推定した。その結果、雪玉地球段階が数百万年～数千万年オーダーと最も長い時間スケールを要することが分かった。また地殻熱流量を考慮すると、海洋は表層1000m程度が凍結するものの、深層水は凍らない。全球凍結状態がもし本当に実現されたとすれば、雪氷融解直後の高い二酸化炭素分圧を反映した炭酸塩堆積物の大規模溶解の証拠が見つかるはずであると、考えられる。

原生代後期には複数の大氷河期の存在が知られている。これらの氷河期においては、氷河性堆積物がさまざまな地域で発見されている上に、古地磁気学的研究からかなりの低緯度においても氷河性堆積物が形成されたということが示唆されるため、以前から多くの議論が行われてきた。

最近、ホフマンらはナミビアのオタビ地域の地質調査を行い、スターチアン紀(約7億年前頃)において2回の氷河期が不連続的に生じ、その時期には生命の光合成活動がほとんど完全に停止したことを示唆するような炭素同位体比の特異的な挙動を発見した。彼らは、この説明として、カーシュヴィンクが提唱した雪玉地球仮説が最も妥当であると考えた。すなわち、この時期には、地球表面のほとんどが氷で覆われていたというのである。雪玉地球仮説は、この時期の氷河性堆積物直上にみられるcap carbonateの説明にも都合が良いと考えられた。

雪玉地球は、気候学でいうところの全球凍結状態かまたはそれに非常に近い状態に対応しているものと考えられる。しかしながら、これまで全球凍結状態に関する理論的研究は少なく、全球凍結状態の詳細やそこへ陥る動的プロセスなどについては、ほとんど分かっていない。また、支配的なプロセスやその特徴的時間スケールについても、良く分かっていない。

本研究では全球凍結現象に関する種々の物理化学プロセスについて、気候モデルと炭素循環モデルを結合させて、この問題について調べる。昨年の合同大会では、0次元エネルギーバランス気候モデルと炭素循環モデルを用いた全球平均的な議論を行ったが、今回は南北1次元エネルギーバランス気候モデルを用いることで、緯度方向の熱輸送と温度分布を考慮したより現実的な議論を行う。また、昨年のモデルでは、現在の太陽放射条件における挙動を調べたが、今回は原生代後期の弱い太陽放射条件(現在の0.94倍程度)における挙動について調べる。講演では、さらに日射量の季節変化を考慮した場合の結果についても議論する予定である。

(1) 暴走的寒冷化段階：暴走的寒冷化の原因と考えられるのは、大気海洋系に対する二酸化炭素の正味供給率(火成活動に伴う二酸化炭素の脱ガス率及び有機物リザーバの縮小率)の低下による、大気二酸化炭素濃度の減少である。二酸化炭素の大気海洋系への正味の供給が完全に停止または著しく低下したとすれば、数十万年程度の時間スケールで二酸化炭素分圧が低下して地球環境は急激に寒冷化し、ついには全球凍結に陥ることが予測される。一方、海洋は表面から凍っていくが、潜熱の解放の影響で凍結速度は遅い。海底面からの地殻熱流量を考慮すると、海洋表層の約1000m程度が凍結した状態で熱的平衡状態に達するため、海洋深層水は凍結しない。

(2) 全球凍結段階：地球が全球凍結状態に陥ると、地表の風化過程や有機物の分解は事実上ほぼ完全に停止する。したがって、この場合、火成活動によって大気中に二酸化炭素が徐々に蓄積される。全球凍結状態から抜け出すために必要な二酸化炭素量を蓄積するには、現在の火成活動度の場合で200-300万年、数分の一の場合で1000万年程度かかると推定される。

(3) 雪氷融解段階：大気中の二酸化炭素分圧が臨界値(0.2気圧程度)に達すると、地表を覆う氷床は不安定になり、いったん赤道域で融解が生じると、そのまま極域まで一気に融解すると考えられる。このプロセスには日射量の季節変化が重要な役割を果たすので、厳密な議論はいまの段階ではできないが、予備的な結果によれば、海洋の融解はきわめて急速(1000年程度)である可能性がある。

(4) 気候回復段階：全球凍結状態から抜け出した直後の大気中には0.2気圧程度の二酸化炭素が存在するため、きわめて高温の環境が実現される。二酸化炭素分圧が高いため、海水は炭酸塩に関して著しく不飽和な状態となる。ところが、高温環境による激しい陸上風化のため、海水のアルカリ度が急上昇し、大気中の二酸化炭素は海洋に急速に吸収される。しかし、約1万年を経ると海水が炭酸塩に関して飽和になるため、海水中において通常の20-30倍の速度で大量の炭酸塩が沈澱する。気候は100万年程度かけて寒冷化以前の状態に回復する。