

地球環境の暴走的寒冷化と全球凍結現象における炭素循環の役割

Carbon cycle and runaway glaciation of the Earth

田近 英一 [1]

Eiichi Tajika [1]

[1] 東大・理・地質

[1] Geological Institute, Univ. of Tokyo

もしも大気海洋系に対する火成活動や有機物収支を通じた二酸化炭素の正味放出率が完全に停止もしくは著しく低下したとすれば、約10万年程度の時間スケールで地球環境は急激に寒冷化してついには全球凍結することがモデルから予測される。全球平均地表温度がゼロになる時間スケールは、地球史を通じて100万年程度である。全球凍結状態から抜け出すためには大気中に数分の一気圧相当の二酸化炭素が陸上火成活動によって蓄積することが必要であり、そのためには一千万年から一億年程度を要する。海洋氷解直後は高温環境が実現されるため、激しい風化によって数万～数十万年程度で急速に大気中の二酸化炭素濃度は低下する。

長期的な気候変動の主要因が大気中の二酸化炭素濃度の変動であることはほぼ間違いなく、それは炭素循環システムの変動に起因したものであると考えられる。地球の気候状態は大陸氷床の有無によって区別される。二酸化炭素の温室効果を考慮した南北1次元エネルギーバランス気候モデルの研究から、高い二酸化炭素濃度条件下では無氷床状態が、低い二酸化炭素濃度条件下では部分凍結状態が、実現可能性の高い気候状態であることが分かる(池田・田近、本大会で発表予定)。しかし、二酸化炭素濃度が非常に低い条件下においては、氷床が低緯度まで成長した段階で、突然、システムは不安定となり(大氷床不安定)、氷床が赤道まで張り出した"全球凍結状態"に陥ると予想される。この場合、地表面反射率が著しく高くなるため、二酸化炭素濃度が数分の一気圧程度まで上昇しない限り、全球凍結状態から抜け出すことができない。原生代の初期(2400-2200Ma)及び後期(820-550Ma)における氷河時代には、氷床が低緯度まで張り出していたらしい(雪玉地球仮説)。しかし、地球が完全に凍結した場合には海洋も凍結してしまうために、海生生物の大絶滅が起こるはずであり、雪玉地球はエネルギーバランスモデルから示唆される全球凍結状態とは必ずしも同一のものではない可能性がある。しかし、だとすれば低緯度まで氷床が張り出していたにもかかわらず大氷床不安定が起こらなかったことの物理的説明が困難である。本研究では、このパラドックスそのものを扱うのではなく、地球が暴走的に寒冷化していく過程において、そもそも大気海洋系の化学や物質循環がどの程度の時間スケールでどのように挙動するのかという問題に焦点を当て議論する。

地球の寒冷化が二酸化炭素濃度の低下によるものであるとすれば、炭素循環のシステム論的考察から、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)が低下したことがその原因であると考えられる。火成活動と有機物収支のどちらかが重要な役割を演じるかは場合によるが、ここでは両者を含めた正味の二酸化炭素供給率が著しく低下した場合について考える。海洋化学を考慮した簡単な炭素循環モデルとエネルギーバランス気候モデルを用いた予備的な結果によれば、もし現在、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、およそ10万年程度の時間スケールで二酸化炭素分圧が低下し、C3植物の光合成限界を下回ることによって生物の大量絶滅を引き起こすとともに、地球環境は急激に寒冷化し、ついには全球凍結することが予測される。全球平均気温がゼロになるまでにはおよそ100万年程度を要する。また、この時間スケールは、地球史を通じて変わらないことが分かる。一方、地球が全球凍結状態に陥った場合、地表の風化過程や有機物収支は事実上ほぼ完全に停止する。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。しかし、海洋全体が完全に凍結した場合、海底における火山活動によって放出される二酸化炭素が大気にまで放出されるかどうか不明である。さらに、もし寒冷化の原因が火成活動の低下によるものであった場合、大気における二酸化炭素の蓄積速度は通常と比べて非常に遅い。島弧や海洋島からの火山活動のみで大気中に二酸化炭素が供給されるとした場合、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数百万～一千万年、数分の一の場合で数千万～一億年もかかることになる。全球凍結状態から抜け出した直後の大気中には数分の一気圧程度の二酸化炭素が存在するため、きわめて高温環境が実現されるが、二酸化炭素は海洋が氷解する過程で速やかに海水中へ溶解する。しかしながら、この時に実現される高温～温暖環境下において地表は激しく風化され、海洋において大量の炭酸塩岩が沈澱する。この時間スケールは数万～数十万年である。

全球凍結状態直後の炭酸塩岩の形成は、原生代の氷河時代直後に堆積した"謎の"cap carbonateに対応する可能性がある。この炭酸塩岩の持つ同位体がマンツルの値に近いことも、上述の現象(もしくはそれに近い現象)が生じた可能性を示唆する。しかしながら、原生代において地球が完全な全球凍結状態に陥ったのかどうか、陥らなかったとしたら低緯度まで氷床が張り出していながらなぜ大氷床不安定が起こらなかったのか、そもそも地球が暴走的に寒冷化した場合、大気、海洋、陸上、雪氷圏および生物圏はどのように振る舞うのかといった問題は、

依然として未解決の重要課題である。