

温暖化進行が氷河期への非可逆的相転移をもたらすメカニズム

日大生産工 篠原正明
情報システム研究所 篠原健

1. はじめに

グリーンランドあるいは南極で蓄積された氷床の大気中成分分析により、過去約百万年にわたっては約10万年周期で、氷河期(継続期間 8~9 万年)と間氷期(継続期間 1~2 万年)が繰り返し発生していることが判明している。さらに、比較的温暖な間氷期から氷河期への移行さらに逆の移行の両者ともに移行期間は比較的短い(10年とも1年とも)と推測されている。また、これらの移行過程は始まったら止まらない非可逆的相転移であるとも言われている。

この非可逆的相転移が発生するメカニズムを説明するために、地球に太陽から加わるエネルギー(単位時間当たりのエネルギー収支)に注目した非線形連立方程式システムを考案し、海洋大循環停止にもとづく地表吸収エネルギーの性能低下特性と大気中の温室効果ガスにもとづく地表反射エネルギーの地表再加熱効果を考慮することにより、「複数の安定点」、「非可逆的相転移」、「ヒステリシス特性」などの非線形特性が発生しうることを示す。

2. 地球システムのエネルギー収支

温室効果ガスを含む大気層と陸と海からなる地表から構成される単純化した地球システムに、太陽からエネルギーが加わると考える。さらに単純化して、大気層での反射等はなく、太陽からのエネルギーは地表に到着し、地表面に加わったエネルギーの一部は(大気層を含まない)地球本体に吸収され、残りは大気中に反射されるとする。地球本体に吸収されたエネ

ルギは熱放射により地球本体の温度維持に費やされる(ステファン・ボルツマン則)。一方、大気中に反射されたエネルギーは大気中の温室効果ガスの影響によりその一部(比率)が再び地表に加わると考える。以上のエネルギー収支を以下に数式で表現する。

$$f_0 = f_f + f_r \quad (1)$$

$$f_a = F(f_0) \quad (2)$$

$$f_r = f_0 - f_a \quad (3)$$

f_0 (f_f): 地表に加わるエネルギーフロー(J/sec),
 f_a (f_a): 地表に吸収されるエネルギーフロー、
 f_r (f_r): 地表から反射されるエネルギーフロー、
 f_f (f_f): 太陽から大気層を含む地球システムに加わるエネルギーフロー、1次的に地球システムに加わるという意味で fresh という添え字を用いた。

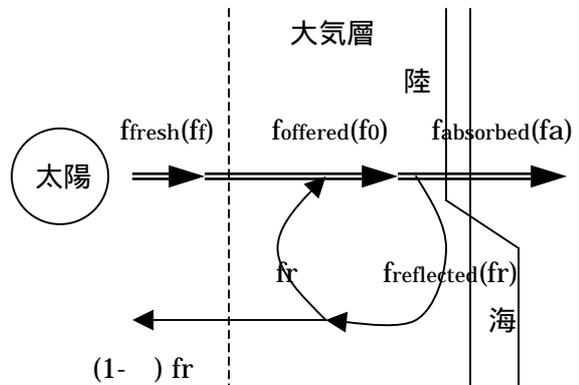


図1 単純化した太陽・地球システムのエネルギーフロー

ここで、(2)式は地表面に加わるエネルギー f_0 と吸収されるエネルギー f_a との関係式、すなわち、エネルギー吸収効率関数である。

Mathematical Model for explaining why Global Warming leads to irreversible transition to Glacial Period

Masaaki SHINOHARA and Ken SHINOHARA

3. エネルギーフロー収支の非線形連立方程式

非線形連立方程式(1)~(3)を整理すると、次式を得る。

$$f_a = F(f_0) \quad (4)$$

$$f_a = \frac{1}{\beta} f_f - \frac{1-\beta}{\beta} f_0 \quad (5)$$

(4)式は大気層を除く地球本体のエネルギー吸収効率を表す性能特性なので「性能曲線」、(5)式を「温室効果直線」と呼ぼう。すなわち、地球システムのエネルギーフローの均衡点は、(4)式の性能曲線と(5)式の温室効果直線の交点として求めることができる。

4. 大気層を除く地球本体の性能曲線 $F(x)$

地球表面がすべて鏡で反射率 $r=1$ ならば、 $f_a = (1-r)f_0 = 0$ となる。逆に、黒体で反射率 $r=0$ ならば、 $f_a = f_0$ となる。実際はこの2つの極端な場合の中間に位置するわけだが、さらに、反射率 r は地表の陸と海の構成比ならびに凍結度合に依存する。すなわち、一般化して $f_a = F(f_0)$ と単純なモデルを採用する。ここで、性能曲線 $y = F(x)$ がどのような形状を取りうるかを以下に考察する。

() f_0 が小さい状況では、地表にふりそそぐ総エネルギーが小さいため、地表は極寒かつ凍結しており、 $F(x)=0$ で近似できる。

() f_0 が極端に大きい状況では、地球本体の飽和吸収容量上限 c のため、 $F(x)=c$ で近似できる。

さて、()と()を前提とすれば、生産関数などでよく用いられる飽和形S字曲線(図2)が1つの候補である。しかし、温暖化進行にともなう海洋大循環熱ベルトコンベア停止の仮説を考慮するならば、温暖化進行(f_0 の増加)にともない、海洋大循環減少「高緯度寒冷・凍結化 凍結によるエネルギー反射増加・吸収減少 高緯度寒冷・凍結」の正フィードバックサイクルに突入し、 $y = F(x)$ は増加の後に減少する性能低下特性を持つと考えられる。

5. 地球システムのエネルギーフローの動作点

(例1)図2には性能曲線 $y = F(x)$ が飽和形S字曲線

を持つ場合の動作点を示す。この場合には、2つのパラメータ f_{fresh} と f_0 のすべての場合について、(f_0, f_a)の2次元面において、性能曲線と温室効果直線は唯一の交点(動作点)を持つ安点なシステムと言える。残念ながら、われわれの地球システムをとりまく環境系は、このような安定でかつ単純なシステムではなく、次の例2に示すような非線形複雑系の様相を呈すと考えられる。

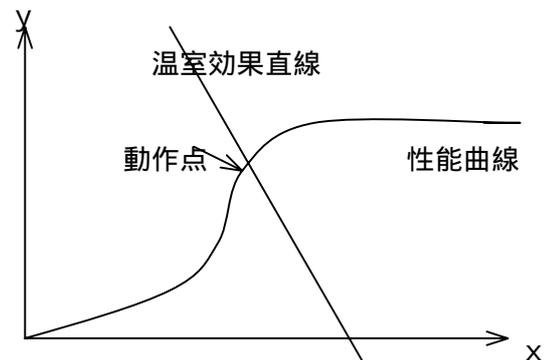


図2 性能特性が飽和S字の場合の動作点

(例2)図3には性能曲線 $y = F(x)$ が性能低下特性を持つ場合の動作点を示す。図中に示すように、P, Q, Rの3交点を持つ場合が存在する。P, Rは安定で、Qは不安定である。すなわち、所与の2つのパラメータ f_{fresh} と f_0 の下では、地球システムはPとRの2つの動作点を取りうる。2つの安定状態のうちの1つをとるため各状態を準定常状態(quasi-stationary state)とも言う。

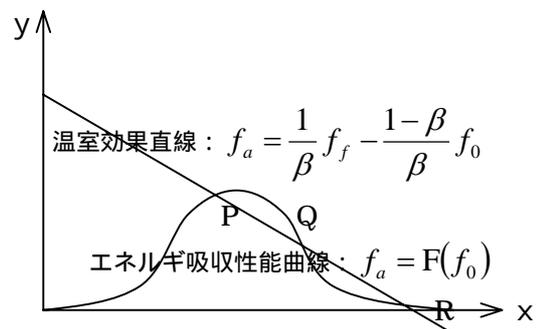


図3 性能特性が性能低下形の場合の動作点

6. ヒステリシス特性、非可逆的相転移、など

複数動作点を取りうる非線形システムにおいては、パラメータの連続変化にともなう系の動作点変化に関して、パラメータの往復変化に対して系状態の径路が

異なるヒステリシス特性(履歴特性)ならびに不連続的特性変化などの顕著な特性を持つことが知られている。すなわち、「複数動作点」、「ヒステリシス特性」、「不連続的特性変化」の3つの現象は表裏一体の同一現象である。

7. 数値例

我々の想定する簡略化された地球システムに関して、適当なエネルギー吸収性能特性 $y = F(x)$ ならびに温室効果係数を仮定することにより、5章、6章での議論の数値例を以下に示す。

(1) エネルギー吸収性能特性 $y = F(x)$

大気層を含まない地球本体(地表)にふりそそぐエネルギーフロー x と大気層を含まない地球本体(地表)に吸収されるエネルギーフロー y の関数形である。当然のことながら地域差もあるが、地表全域での平均的挙動を表す。また、海洋大循環の深層流のように時定数が1000年オーダーの効果もあるので注意を要する。

太陽からは大気層をも含む全地球システムに1秒当りに1平方メートルの面積上に約1400W(=1400J/秒)のエネルギーが降注しているが、大気圏での雑多な影響を考慮して $ffresh = 1000W$ 、 $y = F(x)$ として大幅に簡略した図4の折れ線特性を仮定する。

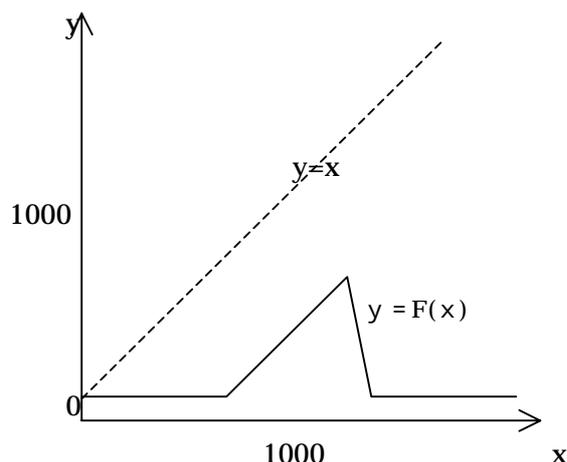


図4 エネルギー吸収性能特性 $y = F(x)$ の例

図4の $y = F(x)$ において、 $0 \leq x < 800$ では $y=0$ であるが、この程度のエネルギーフローでは地球は(例えば全球凍結などにより)全反射し、エネルギー吸収しない状

況を表わす。 $800 \leq x < 1300$ では y が x に関して比例定数1で線形増加しているが、凍結状態~雪だけ状態~温暖状態と地表面が加わるエネルギーを順調に吸収するプロセスを模擬した。すなわち、最高で地表に加わるエネルギーフローの約40%が吸収されるとした。大気圏での雑多な効果を見捨てた点を考えれば、全地球システムの吸収率の観測データ約0.7とオーダ的には矛盾しない。 $1300 \leq x < 1400$ では、 y が x に関して急激に性能低下し、 $1400 \leq x$ では $y=0$ となっているが、これは海洋大循環熱ベルトコンベア停止に端を発する正フィードバックの結果を表わす。本来ならば、 $1400 \leq x$ の適当なポイントで $y = F(x)$ は再上昇すると予想されるがその点は省略した。

(2) 温室効果直線と吸収性能曲線の交点としての動作点

$ffresh = 1000(W/m^2)$ とし、温室効果係数 $\alpha = 0.3$ 、 $\alpha = 0.4$ 、 $\alpha = 0.5$ の3つの場合の温室効果直線と、図4の吸収性能曲線 $y = F(x)$ の交点の作図を図5に示す。ここで、異なる温室効果直線群は $(x=ffresh, y=ffresh)$ を不動点(回転軸)とした直線群となる点に注意すること。

$\alpha = 0.3$ の場合には、温室効果直線と吸収性能曲線は、イ、ロ、ハの3つの交点を持つ。イとハは安定な動作点、ロは不安定な動作点である。イは温暖期(間氷期)の状態、ハは寒冷期(氷河期)の状態に対応する。ロの状態は一時的には存在しても定常的には存在し得ない不安定状態である。すなわち、2つの安定な動作点と1つの不安定な動作点が存在する。われわれの地球は現在、温暖期にあるが、全く同じパラメータ $ffresh$ 、 $y = F(x)$ の下で、別の安定状態が存在する。その意味で、準安定状態と呼ばれ、そのような系では、1つの準安定状態がある程度持続すると、他の準安定状態へと移行し、その状態がある程度持続した後に又、別の状態へと移行する。その移行状況は周期的であるようで、必ずしも周期的ではなく、カオス的と言うべきで、希少遷移をとまなうマルコフ連鎖の状態群間遷移頻度の関連からの研究がなされている。

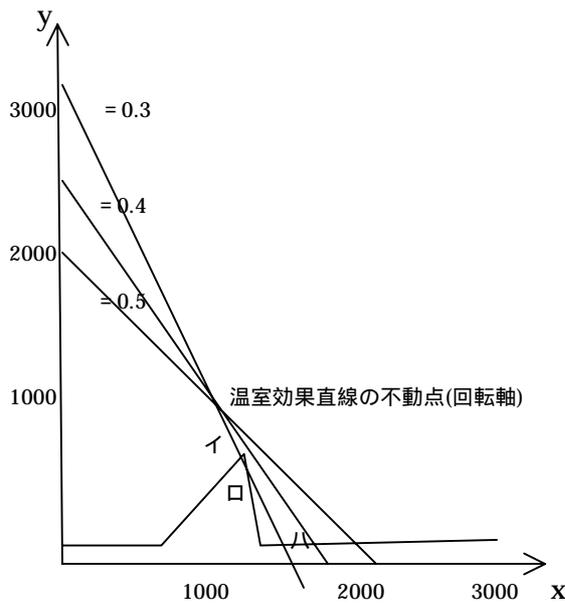


図5 温室効果直線と吸収性能曲線の交点

さて、 $\alpha = 0.3$ から $\alpha = 0.4$ へと温室効果係数を増加すると、イと口の交点が接近した後に消失し、 $\alpha = 0.4$ ではハに対応する1つの交点しか存在しなくなる。すなわち、温室効果が強まると($\alpha = 0.3$ から $\alpha = 0.4$ へと連続変化)、図6に示すように、系の状態が変化する(初期状態は温暖期にあるとする)。ここで、 $\alpha = 0.36$ 付近は不連続的な変化(点線)である。さらに、温室効果が強まると($\alpha = 0.4$ から $\alpha = 0.5$)、系の状態はと変化する。

次に、 $\alpha = 0.5$ から $\alpha = 0.4$ 、 $\alpha = 0.3$ とパラメータを減少する過程を考えると、系の状態は、

と移行する。とは移行しない！すなわち、温室効果増進過程と減退過程では、系状態のとりまは異なるヒステリシス性が観察できる。一度、寒冷期に突入した後では、温室効果係数を $\alpha = 0.5$ から $\alpha = 0.36$ 付近(点線)に減少しても、温暖期には戻らず、さらに $\alpha = 0.3$ 以下(この例では、 $\alpha = 0.28$ 付近、破線)に十分減少した時点で、

と不連続的な変化をともなった相転移が発生し、温暖期に復帰する。

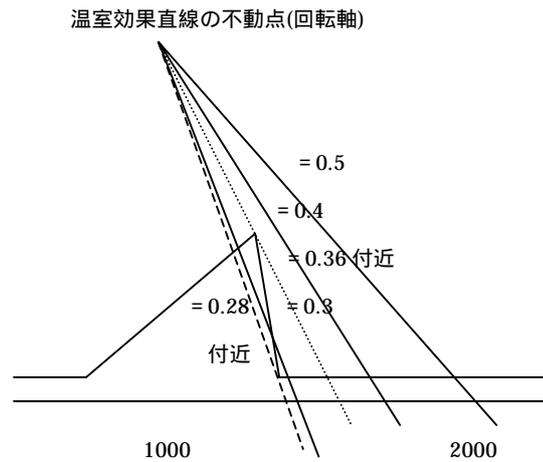


図6 不連続的な系状態変化とヒステリシス特性

8. おわりに

太陽からのエネルギーフローが地球システムにどのように反射・吸収されるかの挙動を簡単に説明した単純化モデルを提案し、地球システムのエネルギー収支のバランスに関して同一パラメータ下において複数の動作点が存在していることを図的に示した。多くの詳細な部分を簡略化したが、単純化モデルによりヒステリシス特性、不連続的特性変化などの現象を図的かつ視覚的に説明することができた。温室効果の1次効果のみならず、2次、3次、4次、...と再帰的效果を数理的な定式化で考慮できた点、ならびに、この定式化にもとづく図的解釈、が新しく、この点が Budyko ならびに Sellers のモデルとの相異点の1つでもある。

数値例において、全球凍結(図4で $y = 0$)を想定した極端な場合を検討したが、氷河期が必ずしも全球凍結となるわけではないので、比較的温暖な氷河期についての数値例も検討を要する。