

地球システムに対するエネルギーフロー平衡点解析についてのコメント

日大生産工 〇篠原正明
情報システム研究所 篠原健

1. はじめに

論文「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」(文献[2])において採用した分析手法「エネルギーフロー平衡点解析」について、数理モデル化での前提条件、現実とのギャップ度合い、改善点などを以下に箇条書きで述べる。

2. コメントなど

(2-1) 再試行サービスシステムの平衡点解析との一対一対応

第一次試行トラヒック流を f_{fresh} 、再呼確率を温暖化係数 β 、サービスシステムに総合的に加わるトラヒック流を f_{offered} 、サービスシステムのトラヒック完了特性をエネルギー吸収性能特性 $y = F(x)$ 、サービスシステムの完了トラヒック流を地表面での吸収エネルギーフロー f_{absorbed} 、サービスシステムの不完了トラヒック流を地表面での反射エネルギーフロー $f_{\text{reflected}}$ 、再試行トラヒック流を反射エネルギーフローの中で温室効果により再度地表に加わるフロー $\beta \cdot f_{\text{reflected}}$ 、等と対応させると、文献[1]の再呼を伴うサービスシステムの定式化と数理モデル化は全く同じである。

(2-2) 地球システムにおいて注目した部分、簡略化した部分

大気圏における雲による遮へい効果、吸収効果、等々は単純化のためモデル化対

象外とした。すなわち、太陽から降り注ぐエネルギーは大気層を無傷で通過し、地表に降り注ぐとした。その1部は大気圏外に放射されるが、その他は大気層にフローとして留まり、再度、地表に降り注ぐ(温室効果)とした。

温室効果という言葉からは、エネルギーが大気層内に留まるという待時式のニュアンスがあるが、反射エネルギーフローの1部が再度地表に加わるという再試行型即時式のモデルを採用した。

太陽から地球システムの外側に、約 1370 J/sec/m^2 のエネルギーフローが加わっている。また、約 30% のエネルギーフローは外側で反射している点を考慮すれば、概略で $1370 \times 0.7 = 959 \text{ J/sec/m}^2$ のエネルギーフローが大気層を含む地球システムに加わっている。我々のモデルでは、それが大気層を無傷で通過し、地表に加わるので、文献[2]の7章数値例では $f_{\text{fresh}} = 1000 \text{ W}$ とした。

(2-3) 惑星の多層モデル

地球の場合は外側から「大気層、地表層」の2層であるが、一般化すれば、「気層、液層、固体層」などと多層物質モデルが考えられる(図1)。地球ですら、地表層を不完全ながら、「液層(海)と固体層(陸)」と分離して考えることが出来る(図2)。

Comments on Energy Flow Balance Equation for Planet EARTH system

Masaaki SHINOHARA and Ken SHINOHARA

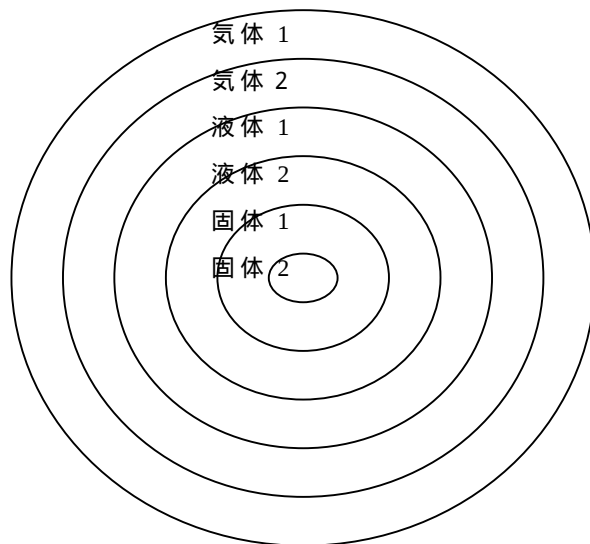


図 1 惑星の多層モデル

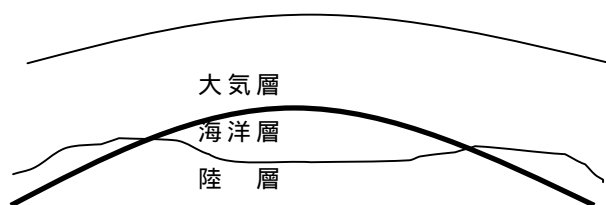


図 2 地球の 2・5 層モデル

又、このような多層モデルでは、注目層の直接上位層でエネルギーフローに関して温室効果が作用している可能性が指摘できる((2 - 11)ネスト構造の仮説を参照)。例えば、陸地の上に海洋が存在するとすれば、その海洋層は陸地層に対して、(表層流と深層流からなる海洋大循環という対流の形で)温室効果を持つことが予想される。すなわち、文献[2]の 5 章の例 2 の吸収特性で性能低下を仮定したが、性能低下よりも非線形性が強いヒステリシス特性が存在している可能性もある。

(2 - 4) 内因性 vs 外因性

地球の気候変化には内因性のものと、外因性のものが存在する。温室効果の増減変化は内因性の代表例である。この場合は β の値が変化し、温室効果直線は座標点 $x = y = f_{\text{fresh}}$ を軸として 回転移動 する。

一方、外因性の代表は、地球システム全

体に太陽から降り注ぐエネルギーフローの増減変化がある。この場合は f_{fresh} の値が変化し、温室効果直線は 平行移動 する。

(2 - 5) 不連続変化とヒステリシス特性

文献[2]の図 6 において、 $\rightarrow$ の不連続変化は、非可逆的相転移である。 $\beta = 0.36 - \varepsilon$ では の状態が動作点であるが、 $\beta = 0.36 + \varepsilon$ では の状態のみしか動作点が存在し得ないためである。

物理的解釈としては、温室効果の正フィードバック作用により地表に加わる実効的総エネルギーが増加すると共に、海洋大循環停止にもとづく正フィードバックの氷結面増加による吸収特性の劣化により、空中のエネルギーは増加しても地表に吸収されない状態へと遷移する と考えられる。

但し、温室効果の正フィードバックの時定数は 1 日オーダー、海洋大循環停止の正フィードバックの時定数は 1000 年オーダーであり、両者の時定数の差は大きすぎる。すなわち、温室効果の正フィードバック過程において、吸収特性の劣化が顕著に表れるとは考えにくい。従って、性能低下特性 $y = F(x)$ の頂上付近の低下特性しか、不連続的变化に影響を与えないため、海洋大循環停止の正フィードバックがわずかにでも発生していれば、それがトリガーとなって非可逆的相転移、不連続的变化が発生しうると予想する。

(2 - 6) 過去の氷河期と間氷期のくりかえし

過去約百万年にわたって、継続期間約 8 - 9 万年前後の氷河期と継続期間約 1 - 2 万年前後の間氷期が約 10 万年の周期でくりかえされている。氷河期を寒冷期、間氷期を温暖期と読み換えてもよい。各種時系列データの分析によれば、「約 10 万年の周期」と言われているが、その真実は、「氷河期という 1 つの準定常状態が 5 万年 ~ 9 万年程度の継続期間、間氷期というもう 1 つ

の準定常状態が 1 万年程度の継続期間で、一方から他方への状態遷移は周期的というよりは、突発的（カオス的）」である。

地球システムを状態遷移図で表現するならば、状態は氷河期グループと間氷期グループに分けられ、各グループ内での状態遷移は密であるが、グループ間での状態遷移は疎（sparse）あるいは希（rare）である。状態グループ間の遷移が突発的ならば、氷河期が 1 万年しか継続しない場合もありうるわけだが、その実現確率はほとんど零であり、グループ内のぼう大な状態間遷移の蓄積により、結果として氷河期の継続期間が 5 万年～9 万年、間氷期が 1.5 万年前後となっていると解釈できる。

さて、具体的な地球システムの挙動の意味付けとしては、以下の説明が考えられる。

『間氷期から氷河期に突入した直後の地球システムにおいては、「温室効果ガス濃度は大であるが地表エネルギー吸収効率は低」である。このような状態から、大気中の温室効果ガス濃度が（例えば、CO₂ の海氷面での吸収により）、7 - 8 万年かけてゆっくり減少し、その後、氷河期から間氷期への遷移が生じると、「温室効果ガス濃度は低い、地表エネルギー吸収率は改善された地球システム」へと移行する。温暖期に復帰した直後は、まだ温室効果ガス濃度が低く、（例えば、動物の呼吸作用などにより）それが十分増加するのに 1 万年の時間を必要とする。』

（2 - 7）人間システムとのアナロジ

地表と大気からなる地球システムと人体と衣服からなる人間システムとを類比してみよう。日本あたりの温帯に生活する人間を想定しよう。熱帯に生活する人間では、衣服が不要であり、アナロジが成立しない。全裸では、人間の肌の保温効果には限界があり、寒さのため風邪を引くだろうから、適当な衣服を身に着けている状態を想定す

る（衣服には保温効果があり、適切な衣服を着ければ極寒の地でも凍えずに生活できる）。その保温効果が増加（あるいは人間の発熱が増加）するとどうなるであろうか？その人間は発汗し、体温低下の努力を体が行う。その汗をそのままにしておくと、体が冷えてしまう。具体的なメカニズムは異なるが、地球温暖化が結果として地球寒冷化を引き起こす現象とマクロ的には類似している。人間の体に注目しても、皮膚脂肪層が内臓に対して保温効果を持つというネスト構造も類似している。

素朴な疑問として、熱帯に（永らく）住む人々の肌の色は濃く吸収効率は高く、逆に高緯度の人々の肌の色は薄く吸収効率は低い。熱帯は暑いので、吸収効率が低い薄い肌の色が適者生存ではないだろうか？熱帯で衣服を着けるという行為は、最高に暑い時間帯では考えられないことだから、熱帯で裸で生活するという前提では、肌が保温効果を持ち、黒体に近い肌の色となった。

一方、高緯度の地域では、衣服なしでは生活できないため、衣服が保温効果の役目を果たし、皮膚の保温効果が退化し、肌の色は薄いと考えられる。

（2 - 8）対策

地球温暖化がゆっくりと進行していくと、あるポイントから後戻りできない寒冷化が急激に進行し、地球が氷河期に突入するというメカニズムを説明したが、このような地球寒冷化状態を防ぐには、非可逆的相転移を発生させないことが重要である。そのためには、内因性の大きな要因である温室効果の低減が最優先課題である。温暖化防止対策については、多くが議論されているが、CO₂ 削減から CO₂ 固定化、自然エネルギーの利用、山火事対策から地表の緑化、もの作り中心から情報中心の効率的社会への移行、など枚挙にいとまがない。さて、不幸にも、人類の温暖化防止の努力にもか

かわらず、寒冷期への非可逆的移行が、突発的に発生してしまったらどうすればいいのだろう。CO₂ が海氷面に自然吸収されて、温室効果が十分に低減するまでには、5 万年～10 万年の時間経過を要する。積極的な対策として大気中の CO₂ 固定化を原子力エネルギーの利用などにより人為的に行うことにより、比較的短期間で寒冷期化から温暖期への不連続変化を達成できる。このような技術による地球システムのパラメータ制御は、直近 100 万年に繰り返し 10 回ほど生じた寒冷期ではなし得なかったことである。

外因性により地球温暖化が進行し、その結果として、地球が寒冷化してしまった場合には我々人類は何もできないのであろうか？文献〔2〕の図 5、図 6 において、外因性の中でも外部からのエネルギーフロー増加は、温室効果直線の平行移動に対応する。従って、不連続変化が発生した後でも、温室効果を低下することにより、温暖期への不連続変化を人為的に達成できると考える。

（2-9）氷河期から温暖期への移行

文献〔2〕の図 5、図 6 の $y = F(x)$ のエネルギーフロー吸収特性では、性能低下が発生した後に x の増加と共に $y = 0$ の平坦な特性を仮定したが、地表に加わるエネルギーが増加すれば、吸収率が完全に零はありえないので、性能低下後に、再度、 $y = F(x)$ は漸増する傾向を持つと考えられる。そのような状態の寒冷期へ移行するため、その後の温室効果低下では氷河期の寒冷化が進むと思われる。すなわち、寒冷期の地球寒冷化の結果として、地球温暖化への相転移が発生する。

（2-10）制御

山火事が発生すると CO₂ も増加し、温暖化も進行し、その結果として地表温度は上昇し、山火事もさらに発生する という正フィードバックは、過去の温暖期から寒冷期への非可逆的変化のトリガーになった

可能性はある。現在の地球では、化石燃料の消費により CO₂ 濃度は過去のデータと比較して、激増しているものの、山火事が発生しても、それを制御する技術を人類は持ち合わせており、山火事が全地球表面に拡大するという局面は回避されている。

我々人類が現在、温暖期の地球で生活している状態は、有史以来の高さまでに制御して高くした絶壁の上にいる人類でもある。情報システムでも機械システムでも、1 次的なあるいは局所的な制御を導入することにより過負荷時の性能向上は達成されるが、予期せぬ事態では破滅的なシステムダウンが生じてしまう。

（2-11）ネスト構造の仮説

惑星、人間システムあるいはより一般的に自然界に存在するシステムは多層構造を持っており、さらに、注目する層の上位層は注目層に対してエネルギー保存効果が存在する。自然界に存在する非人工物についてはこの関係が各層で成り立つようなネスト構造を持っていると考えられないであろうか？

3、おわりに

文献〔2〕の補足として、本論文では、再試行サービスシステムとの対応、モデル化で注目した部分、簡略化した部分、地球温暖化の対策、制御法、などについて議論した。現実データとのさらなる照合、数理モデルの発展、などは今後の課題である。

参考文献

- 〔1〕 篠原正明：再呼現象の解析とその制御、電子通信学会論文誌、J67 - B, No. 5, pp. 537 - 544 (1984.5) .
- 〔2〕 篠原正明、篠原健：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、第 39 回日本大学生産工学部・学術講演会・数理情報部会論文集(2006.12).