

地表システムのエネルギー収支と エントロピー代謝

——環境科学の基本的視座とそれをめぐる論争史——

河 宮 信 郎

1. 序 論

技術文明の極相として、「核の冬」——核戦争の大気汚染による寒冷化——と「炭酸ガスの夏」——温室効果の増大による過度の温暖化——という両極のカタストロフィがありうる。このような破局に至る以前に、恒常的に進む環境破壊そのものが人類の存亡にかかわる問題となっており、生物や人間を含む地表システムの定常性を正しく認識することは重大な課題である。

地表システムは熱平衡から遠く離れた非平衡系であり、其の非平衡性は地球史 45 億年の間維持されてきた。その非平衡性の根源が高温熱溜（熱源）としての太陽と低温熱溜（冷源）としての宇宙空間との間の非平衡性にあることは明らかである。

しかし、この自明な非平衡性は地球に限らず惑星一般のものであり、地球システム固有の非平衡性を論じるにはさらに立ち入った議論が必要である。最近、比較惑星学の立場から、生命体の生存可能領域 (Continuously Habitable Zone) に関する条件が明らかにされつつある。⁽¹⁾⁽²⁾ このCHZの理論は地表温度の議論にとどまり、地球のエントロピー代謝を扱っていない点で不十分さを残している（この点は別稿で論じる）。

地表システムにおいて、エネルギーは貫流し、物質は循環する（図1参照）。その基本構造をエントロピー代謝という視点から明らかにしたのが槌田敦で、彼は非平衡系としての地球を「開放定常系」と規定した。⁽³⁾

この熱学的視点からみると、生命体・生態圏・人間社会・地表システ

GEOSPHERE: THE EARTH SYSTEM
 BIOSPHERE: THE ECOSYSTEMS
 SOCIOSPHERE: THE SOCIAL SYSTEMS

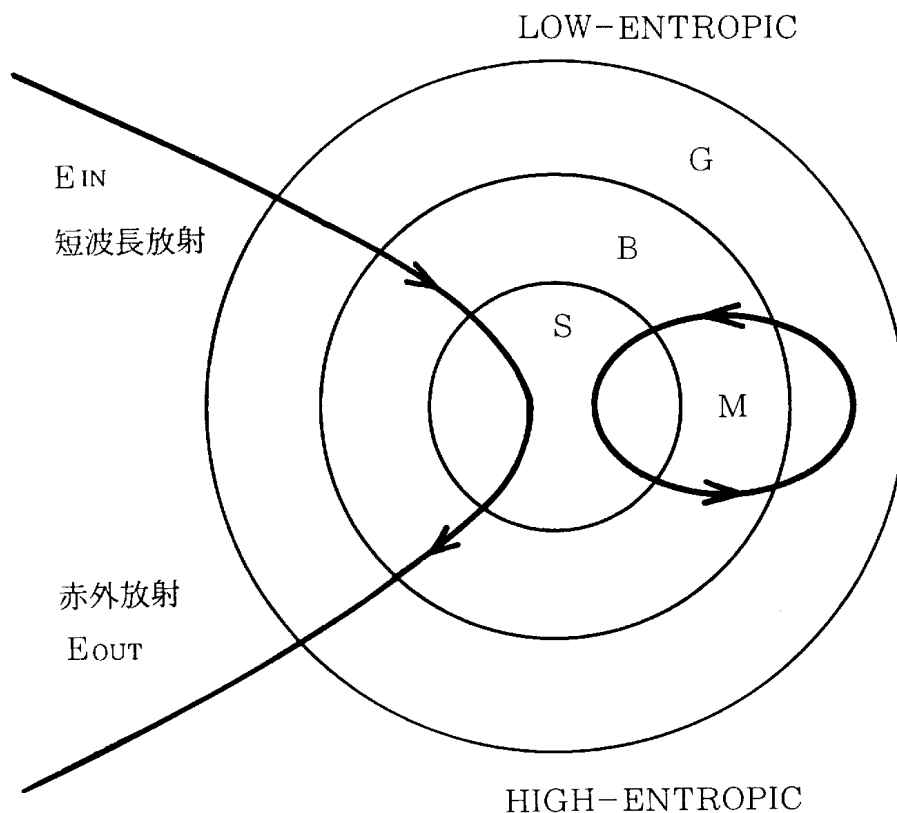


図1 地球のエネルギーフローと物質循環

ム（物理系）は、エントロピー代謝系の重層的なネットワークをなすものと考えてい。槌田理論の核心は、地表システム一般および光合成（生物的生産）における水循環の役割——放熱＝エントロピー廃棄という——を明らかにしたことである。

工業技術の実体は物質とエネルギーとの熱化学的変換であり、その原理や本質的な限界を熱学の立場から考察することができる。これはまた、「広義の経済学」すなわち経済システムとその基底にある生態系や環境との相互関係においてとらえなおす営為に対しても基礎的な視座を与える。⁽⁴⁾

熱学的なアプローチによって環境や社会の諸問題を考えるために、エントロピー学会が1983年に結成され、自然科学者・社会科学者・環境問題に携わる人々の交流の場として、順調な活動を続けている。

ところが、一部の物理研究者から槌田理論とくに水循環の意義や光合成

に関する議論に対して反論が出され、必ずしも結着したとはいえない状況である。これらの「反論」のなかには、もともとの榎田理論に対する誤解や用語法の違いに起因する論点も多い⁽⁵⁾が、そのような解釈も地球論における各様の視座を表すものとしては検討を要する。

さらに、榎田の理論にも若干未解決の問題が残されていた。たとえば、(1) 太陽光に含まれるエントロピーを正面から取り扱わなかったこと、(2) 重力場のなかでのエントロピー代謝の特殊性を明示的に扱わなかったことなどである。⁽⁶⁾⁽⁷⁾

本稿の目的は、地球と光合成をめぐる論争に関するこれまでのレビュー⁽⁵⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾を踏まえて、各論者の主張を分りやすく対照しつつ、地表圏と光合成におけるエントロピー代謝の正しい理解をもたらすことである。

2. 諸議論の物理的コンテキスト

物理研究者を中心に榎田理論の可否を巡る論争について、末梢的な応酬

脚注：

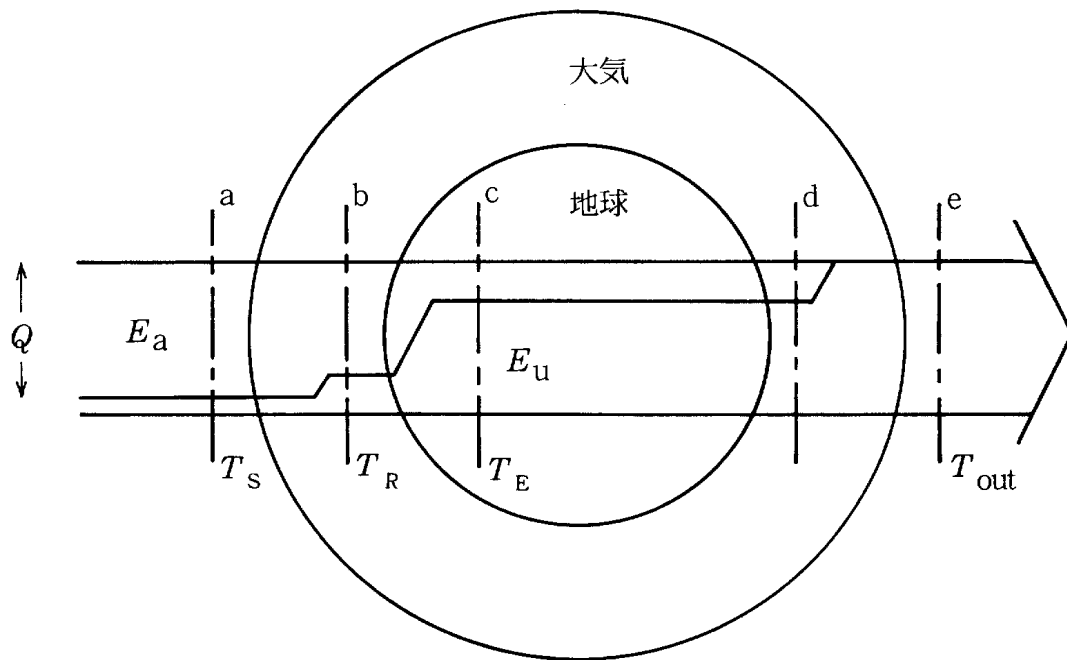
たとえば、榎田のいう「定常開放系」と安孫子のいう「非平衡閉鎖系」とはほぼ同義である。なぜなら、定常系は非平衡系の一種であって、対立する概念ではない。榎田は、エントロピーの入りのある系を「開放系」と規定しており、安孫子は物質の出入りのない系を「閉鎖系」と定義している。地球は、外界=宇宙とエントロピーのやりとりをしているが、物質のやりとりをしていない(隕石の落下などは例外とする)。すなわち、どちらの規定も正しく、相互にも矛盾しない。

ただし、化学熱学では、安孫子と同じ意味で「閉鎖系」の語を用いる。他方、榎田の定義は、〈システムの定常性を論じるときエントロピーの出入りが基本になる〉という認識にもとづいている。

相手が自分のとは異なる概念規定をとること自体を非難したり、相手の文脈を無視した論駁を振り回すのでは、論争が非生産的になるのは必然である。⁽⁹⁾ 本稿では、用語は当然ながら原著者の定義や意味づけを尊重する。こうして、議論の擦れ違いを抑え、見掛け上の反対論がじつは類似の議論だったり、その逆に見掛けでは似た議論がじつは対立していたりする点を明らかにする。当然ながら、論争で重要なのは、言辞上ではなく物理上の共通点と対立・相違点である。

を省き、基本的な論点を整理してみよう。そのためにまず、おおまかに地球のエネルギー流を扱う諸議論のコンテキストを明らかにする。

太陽光の入射から赤外線にいたる、放射エネルギーの温度の低下を、図2のような段階的なエネルギー散逸とみる。この過程におけるエクセルギー（有効エネルギー）からアネルギー（無効エネルギー）への変換に対応して、エントロピー生成があることはよく知られている。⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾



$$Q = E_a + E_u, \quad S = E_u / T_e$$

有効 E 無効 E

図2 大気・地表システムにおけるエネルギーの流れと散逸（エントロピー増大）

反射分は除外し、各界面での温度を $T_s \sim T_{out}$ 等で示した。

槌田の議論は、基本的に地球へのエントロピーの流入と廃棄を図のcとeの界面でみている。この扱いは、太陽光の低エントロピー性（図2のbの段階でのエントロピー）を全面的に否定するものではないが、太陽光の大部分が熱化するという事実を照らし、同図bの低エントロピー性を一般的に強調することは誤りだとする。この点を含めると地球のエントロピー代謝について、つぎの関係が成り立つ。入射するエネルギーをQとして、

$$Q/T_e - Q/T_{out} < 0 \tag{1}$$

この表式は地球のエントロピーがどんどん減ることを意味するものではなく、地上での物理的・生物的活動で生成するエントロピー S_{pro} (図2の d~e の変化) を相殺する機構があることを意味する。収支バランスの表式では

$$Q/T_E + S_{pro} = Q/T_{out} \quad (2)$$

槌田の理論をこの表式で考えよう。まず T_{out} は太陽定数と地球のアルベド(短波長反射率)とシュテファン・ボルツマン則によって決まる。それに対して、水循環を主とする対流は、赤外放射だけのときに比して熱輸送を円滑にし、その分だけ T_E を低下させる。それに応じて、 S_{pro} は大きくなり、地表活動によるエントロピー生成の余地も増える。これが、地表環境の自己更新性の基本になっている、ということになる。

大気圏に入射する光の大部分が、大気ないし地表に吸収され熱化すること、光合成過程においてさえ大部分の光は無駄に(生成エンタルピーに転化せずに)熱化すること、そこでのエントロピー廃棄が光合成に基本的に重要であること、などの指摘は槌田の寄与である。

ここで残された問題は、〔T1〕光合成に関しては、太陽光のエントロピー、つまり a ないし b の段階でのエントロピーを明示的に取り扱う必要があること、——光合成のためには少なくとも図2で b のレベルのエネルギーが必要で、c のレベルでは役に立たない、〔T2〕「エントロピー生成の余地」 S_{pro} は対流の過程そのものによって食いつぶされ、生物活動などの余地を残さないかもしれないこと、などであった。安孫子の批判も主にこれらにかかわる。⁽¹³⁾ なお、〔T3〕重力場のなかで非平衡性の条件も明示的には論じられていなかった。⁽⁶⁾⁽⁷⁾

〔注〕実際、これらの問題点は槌田理論を支持する人々が誤った議論をするもとになった。たとえば、〔T1〕に関連して、勝木は、光合成を論じる文脈で太陽光の温度を直達日射の有効温度(395 K)と評価した。⁽¹⁴⁾ この温度の放射は赤外線ですべて光合成には役立たない。ただし、彼は、具体的計算では太陽光のエントロピーを 0 と置いたので、実際以上に低いエントロピー(高温放射)とみなしたことになり、計算結果⁽¹⁴⁾には誤りがない(太陽光温

度評価の勝木自身による訂正については(6)参照)。「T2」に関して、室田は地球熱機関の効率を $1 - T_{\text{out}}/T_{\text{E}}$ と算定した。⁽¹⁵⁾ しかし、重力場や電場のもとでは熱平衡状態(エントロピー極大)で温度差や電位差が存在するのであり、逆にいうと温度差から直接にカルノー効率を計算することはできない。この点は、安孫子が対流による温度差の減少を直接に非平衡の減殺とみなしていること⁽¹⁶⁾と共通する問題点である。

安孫子は、基本的に可視光入射(図2のa)と赤外放射(図2e)の段階でエントロピーを比べる。すなわち、

$$Q/T_{\text{R}} - Q/T_{\text{out}} < 0 \quad (3)$$

これもまた正しい式であり、植田敦の式(3)ともなんら矛盾しない。ただし、安孫子によれば、この式は<太陽光が地球に「負のエントロピー」をもたらす>ことを表すというのである。⁽¹⁷⁾

ただ、 Q/T_{R} という正のエントロピーをもつ太陽光が「負のエントロピー」をもつ、ということは、数式的に表すと(参照温度を地表温度にとる場合)、

$$Q/T_{\text{R}} = Q/T_{\text{E}} + (Q/T_{\text{R}} - Q/T_{\text{E}})$$

の第2項が負だ、ということである。この極度の作為的な表現も、安孫子に固有の定義とみれば、たしかに成り立つ。とはいえ、この表式自体も、現実に Q/T_{E} のエントロピーが廃棄される条件があってはじめて意味をもつ。式(3)のように、地球全体の場合には、赤外放射が終わってはじめて実現される。つまり、このように「負エントロピー」は、エントロピー廃棄の機構を前提とした概念であるのに、それを明示せず、むしろ正のエントロピーを直接相殺しうるものであるかのような錯覚を生み出す。

さらに紛らわしいことに、一般的な定義におけるネグエントロピーは、 $Q/T_{\text{out}} - Q/T_{\text{R}}$ として、つまり安孫子の「負のエントロピー」に負符号をつけたものとして定義される。このような表現は、<エントロピーの流入分や生成分を廃棄する>という直接的な表現にあらゆる点で劣るといってよく、使用を避けるにこしたことはない。

杉本は、安孫子と同時に、入射する太陽光の低エントロピー性(図2b)

を強調するが(18), この低エントロピー性は大気・地表への吸収(図2のb~cの変化)で熱化するのであって, 論理上榎田への反論にはなっていない。それ以外の点では, 大気圏でのエントロピー収支としては図2のd~eの界面を考えており, したがって, 多くの点で榎田の議論を實際上踏襲している。彼は, 地球の熱収支に関して気象学的データを参照せず, また光合成のエネルギー収支に関しては生化学的データを参照せず, 榎田や勝木のもちいたデータや結果を単に復唱することで間に合わせているが, 彼の議論は新しい知見を提供するものでないためそれでこと足りるのである。

なお彼は, 赤外放射が水と同程度に有効なエントロピー輸送機構であることを強調し, あたかもこのことを河宮が否定したかのような「批判」をしているが,⁽¹⁸⁾ これは拙論が地表にある放射機関や光合成系について述べたこと⁽⁷⁾を地球の熱収支を論じていると誤解したものである。

残る問題点として, 水循環を地球に内在するエントロピー廃棄機構(のひとつ)と認めることが, あたかも地球を第二種永久機関とみなすこと,⁽¹³⁾あるいは地球の定常性を内因的に説明すること⁽⁸⁾だという誤解について, 触れておこう。

まず, これらの論者の出発点, (1)<地球のエントロピー廃棄量は, 対流(水循環を含む)の有無にかかわらず, 大気上層(図2 eの界面)の温度 T_{out} で一義的に決まる>, (2)<対流は地球系のエントロピーを増やしも減らしもしない>という認識は正しい。ところが, <これらの命題が榎田理論に対する反論になる>という彼らの判断は誤っている。

じつは, 水循環その他のエントロピー腐棄機構が機能しているからこそ, 地表システムのエントロピーが増減しないのである。逆にいうと, もし水循環がストップすれば, その分だけ地表温度は上がり, その間に吸収した熱量に応じて地表のエントロピーは増えるのである。

具体的には, 地表温度が ΔT だけ上がるとすると, 地表からのエントロピー廃棄量は, Q/T_E から $Q/(T_E + \Delta T)$ に減少し, 地表系のエントロピー

$$\int_T^{T+\Delta T} (C_E/T) dT$$

だけ増加する。ここで、 C_E は地表系の熱容量である。

ここで、地球のエネルギー・フローとエントロピー代謝に関する各論者の考えかたと、気象学的データとを対照しておこう。

まず、地球と大気を貫流するエネルギーの流れを図3に示す。ここで基本的に重要なことは、入力については(1)太陽放射の半分以下49%しか地球内部に到達しないこと、(2)大気からの再放射97%がその倍に達することである。出力については、蒸発と熱伝達(対流)30%と差し引きの赤外放射 $116 - 97 = 19\%$ とが地球への入射とバランスしていることである。

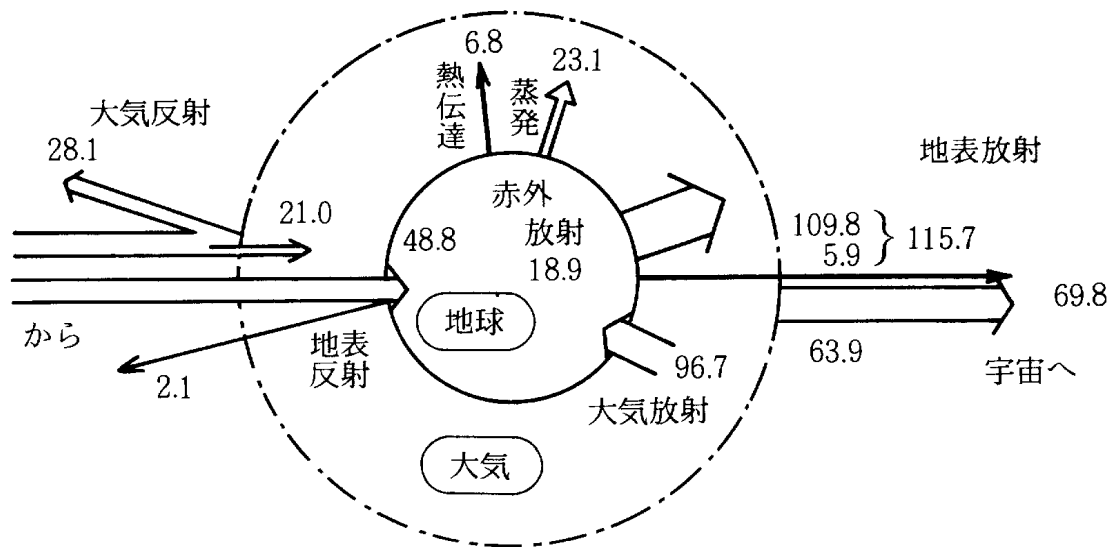


図3 地球と大気での太陽エネルギーの流れ

出所：太田時男編『自然界の熱エネルギー』
国文書院（1984）39頁の図に加筆。

ここで、安孫子のモデル⁽¹⁷⁾を図4に示すと、上記の一般的な結果とは両立しないことが明らかになる。すなわち、彼は、大気の温室効果による再放射を30% (図3の1/3以下) に取っているが、これでは地表温度が太陽放射100%に対応したもの、つまり地球の有効温度278 Kになってしまう。これはいかなる氷河期よりも低温で、全面凍結寸前の温度である。安

孫子がなんら典拠を示していないところを見ると、このモデルは実測値と無関係に勝手に想定したものと思われる——入射が100%になればよいと早合点したのであろうか?

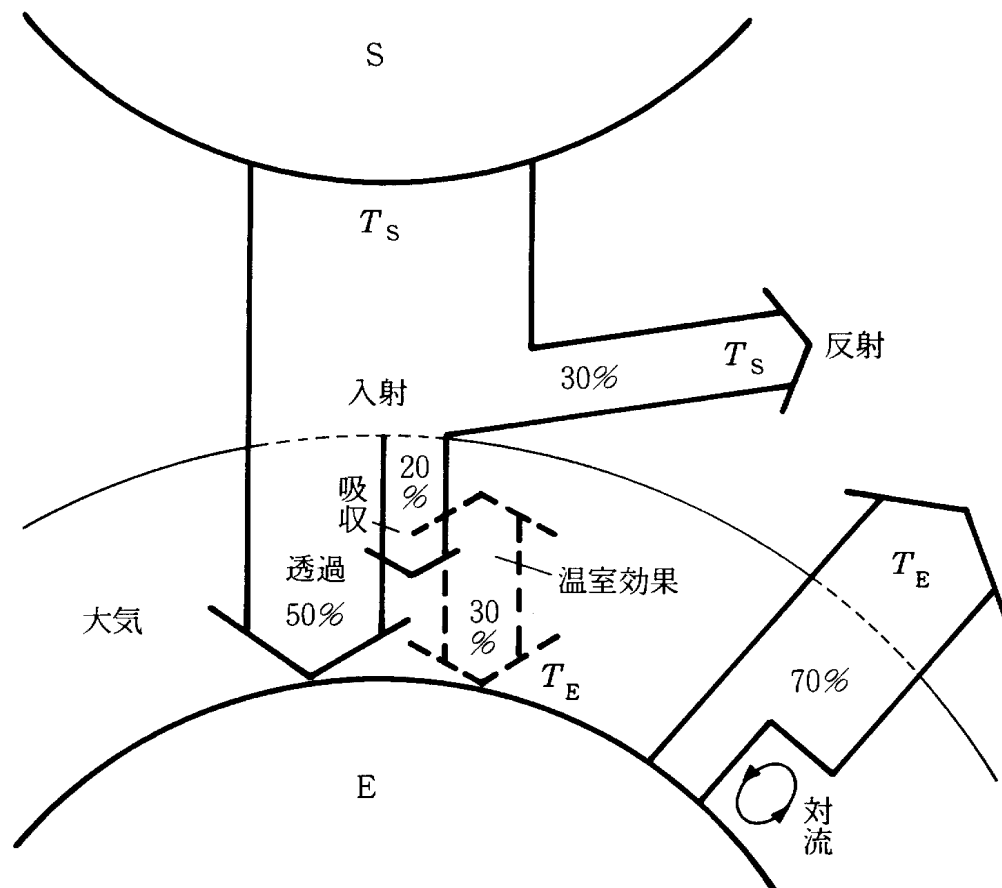


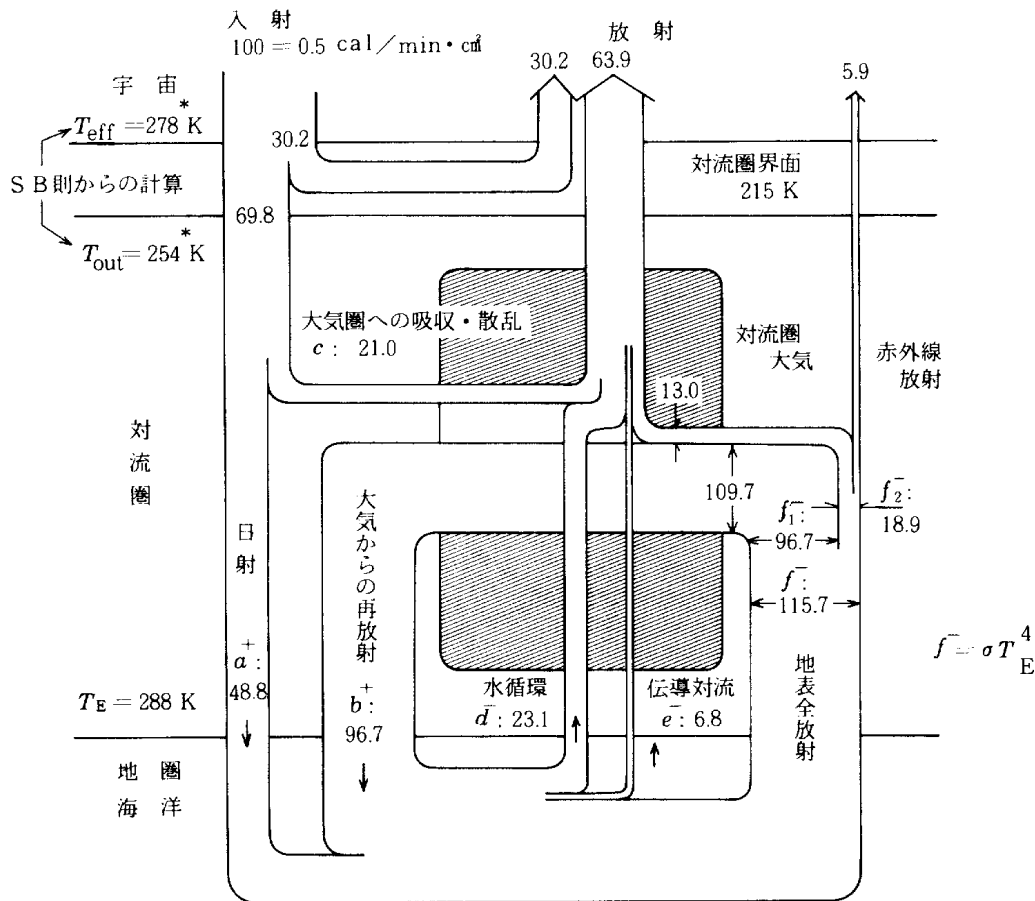
図4 入射太陽輻射と再放射地球輻射の内訳。入射太陽輻射エネルギーの50%が地表に到達し、これに温室効果の30%が重なって地表面は大気よりも高温となり対流が発生する。

出所：安孫子誠也「エントロピー低下機構としての光合成」、『科学』54（1984）285。

図3を整理して、フローチャートしたものを図5に示す。各界面での温度を記入してあるので、通過する熱量をこの温度で割るとエントロピー流量が得られる。ここで、シュテファン・ボルツマン則（SB則）からの計算値には、右肩に*をつけ、実測値はそのまま示した。図5の数値は槌田のとは別の出典からとったものであり、計算は独自に行ったが、これは槌田の結果⁽¹⁸⁾とよく対応している。

地球の温室効果に関して杉本は、その真因が、大気による散乱のため赤外線光子の拡散速度が小さくなり、地表温度のわりに放射冷却が効きにく

くなることだ、という。これによって、日射の 47% が地表に到達するとき地表温度が 290 K になる、としている。ここで彼は、槌田⁽¹⁸⁾あるいは河宮⁽⁷⁾の説明が誤っているか不完全なものであるかのように批判しているが、⁽¹⁹⁾はたしてそうか。



純入射=純放射： $a^+ = d^- + e^- + f^-$
 全入射=全放射： $a^+ + b^+ = d^- + e^- + f^-$
 上ツキの+は入力，-は出力を意味する。

図5 地球のエネルギー・フローと各層の温度

データ出所：『自然界の熱エネルギー』
 —その有効な利用法を考える—
 太田時男編著，渡部真一他著
 同文書院（1984）39。

図5において、地表の全エネルギー (E) の入力・出力バランスは
 純入射 + 再放射 = 水循環 + 伝導・対流 + 地表放射

$$a^+ + b^+ = d^- + e^- + f^- \quad (4)$$

樋田は、上式のうち、放射によるバランスの分 (115.7%)

$$a^+ + b^+ - (d^- + e^-) = f^- \quad (5)$$

に、SB則をあてはめて地表温度を算出している。⁽¹⁹⁾ すなわち、地球の有効温度 T_{eff} ($= 287 \text{ K}$) と地表温度 $T_E = 288 \text{ K}$ (15°C) を得た。具体的な算式は下記の通りである。

$$1.157 \sigma T_{\text{eff}}^4 = \sigma T_E^4 (=f^-) \quad (5')$$

他方、杉本のいう赤外放射の過程を数式的に表現すると、つぎのようになる。

$$\text{純入射 } a^+ = \text{減速された地表放射 } f^- / (1 + \tau) \quad (6)$$

$$\text{または, } 0.47 \sigma T_{\text{eff}}^4 = \varepsilon \sigma T_E^4 \quad (6')$$

ここで、 τ は赤外放射を減速する光学的厚さ、 ε は赤外放射率である。地表温度 290 K を得るためには、 $\varepsilon = 0.4$ つまり $\tau = 1.5$ 程度にとればよい。

ところで、この定式は水循環や対流を入れていないのに正しい地表温度を与えているが、なぜであろうか。じつは、上式は

$$\text{純入力: } a^+ = \text{純出力: } d^- + e^- + f2^- \quad (7)$$

というエネルギー収支に対する略式の (経験的な) 表現と考えてよいのである。

ただし、気象学でより一般的に用いられる経験式は、大気圏への全入射に対して、放射平衡を考えるものである。このとき、

$$a^+ + c = f^- / (1 + \tau) \quad (8)$$

$$\text{または, } 0.7 \times \sigma T_{\text{eff}}^4 = \varepsilon \sigma T_E^4 \quad (8')$$

とするもので、⁽²⁰⁾ この場合には ε を 0.6 程度に変えないと、正しい地表温度が得られない。これらの表式では ε は経験的なパラメーターで、地表温度から逆算したものである (図6参照)。反対に大気の実際の値から赤外線放射率 ε や大気的光学的厚み τ を決めると、かえって実測温度とあわなくなる。地表温度が過大に、上空温度は過小になり、温度勾配が大きくなり過ぎるのである。⁽²¹⁾

以上のことからわかるように、地表放射を論じる場合、赤外線光子の拡

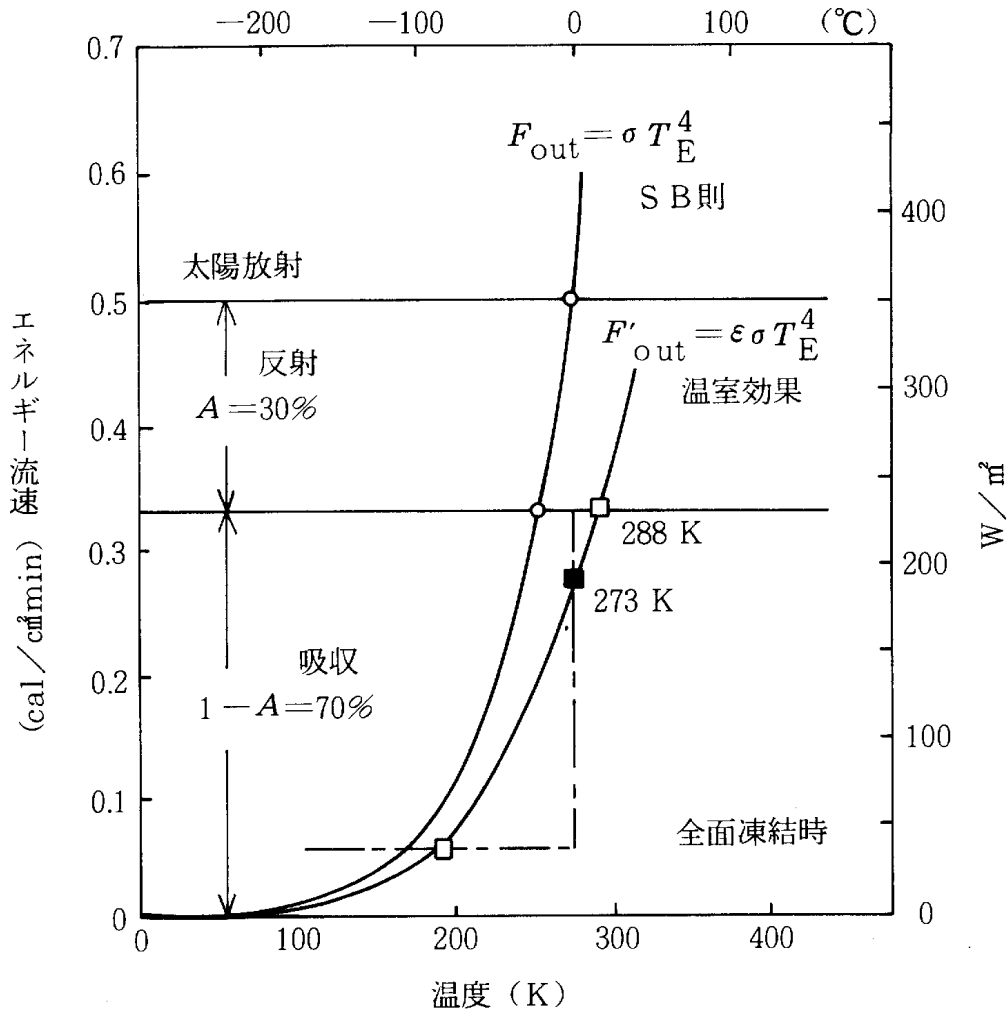


図6 放射平衡と地表温度の関係

散というモデルは実際の気象的なシステムを過度に単純化したもので、なんら正確な説明とはいえない。それは、当然ながら、榎田らの議論への反論になっておらず、むしろ補足的な解釈というべきである——赤外線光子の散乱をいくら正しく説明してもそれは一般的な解説にすぎない。杉本は、自論があたかも榎田らに対する反論ないし批判であるかのように見せ掛けているが、⁽¹⁹⁾ これは読者を惑わす不適切な表現といわなければならない。

たとえば、吉岡は、杉本・安孫子の解釈が標準理論（大気物理学）と整合するものとみて、榎田の理論と対照させようとした。⁽⁸⁾ が、地球のエネルギーフローと地表温度の扱いでは、むしろ榎田・杉本に対して安孫子のほうが特異であるという点を見逃している。ただし、こういう誤解が生じた一半の原因は、杉本の書き方にあると考えられる。

4. 光合成のエントロピー収支

光合成の研究は生物学・生化学のもっとも基本的なテーマのひとつであり、分子レベルで詳細な機作が研究されているが、⁽²²⁾ 第二法則との関連たとえば水蒸散とエントロピー廃棄との関係やエクセルギー効率などは知られていなかった。光合成をエントロピー代謝の視点から扱ったものとしては、槌田・室田、⁽²³⁾ 勝木、⁽¹²⁾ 河宮⁽⁷⁾のものがある。以下でそれらによって得られた知見を要約および補足し、光合成に関して生じた論争を整理する。まず、光合成におけるエネルギー変換を有効・無効エネルギーに分けて図7に示しておく。最適過程は光律速での実験に対応し、それにむだな熱化の過程が加わったものとして現実過程を考える。

4. 1 光合成の最適過程

まず、光合成の反応式を下記のように表す。光子のエネルギーを ε ($h\nu$) として、 $6\text{CO}_2 + 12\text{H}_2\text{O} + \varepsilon(h\nu) = \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2 + 6\text{H}_2\text{O} + \Delta Q$ (9) 酸素原子の個別性 (identity) を無視すれば、両辺から $6\text{H}_2\text{O}$ を落とすことができる。

エネルギー保存則の立場から、次式が成立する。

$$\varepsilon(h\nu) = \Delta H [\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6] + \Delta Q \quad (10)$$

ここで、 ΔQ は、グルコースの生成エントロピー ΔH として固定された以外のエネルギーを表す。

光合成は、十分な炭酸ガスや水などを十分に与え、光を律速因子したときに、もっとも高いエネルギー変換効率を得られる。実験的に得られる最高の条件では、 CO_2 1分子の還元・同化に8個の光子(波長7000 Å以下)があればよい。⁽²²⁾ 波長6800 Åの光子1モルのエネルギーは42 kcalであるから、グルコース1モルの生成に48モル・2036 kcalが必要である。

このエネルギー変換を、有効エネルギーと無効エネルギーとに分けて示すと図7のようになる(基準環境は25°C, 1気圧とする)。プランクの熱放射理論から光子の温度を1300 Kと見積もると、⁽²⁴⁾ $\varepsilon(h\nu)$ のうち、有効エネルギー $E_a = 1569$ kcal, 無効エネルギー $E_u = 467$ kcalとなる。他方、グル

コースの標準生成エネルギーは $\Delta G = 686 \text{ kcal}$ で、⁽²⁵⁾ 変換における無効エネルギーは $E_u = 1330 \text{ kcal}$ になる。

第1法則効率 は、よく知られているように、

$$\eta_1 = \Delta G / \epsilon (h\nu) = 33.7\% \tag{11}$$

この効率からみると、 CO_2 分子の還元に必要な8個の光子のうち $8\eta_1 = 2.6 \sim 3$ 個は、 ΔG ないし ΔH に相当する分として必要である。つまり、要求量子数 ϕ の下限は3ということになる。

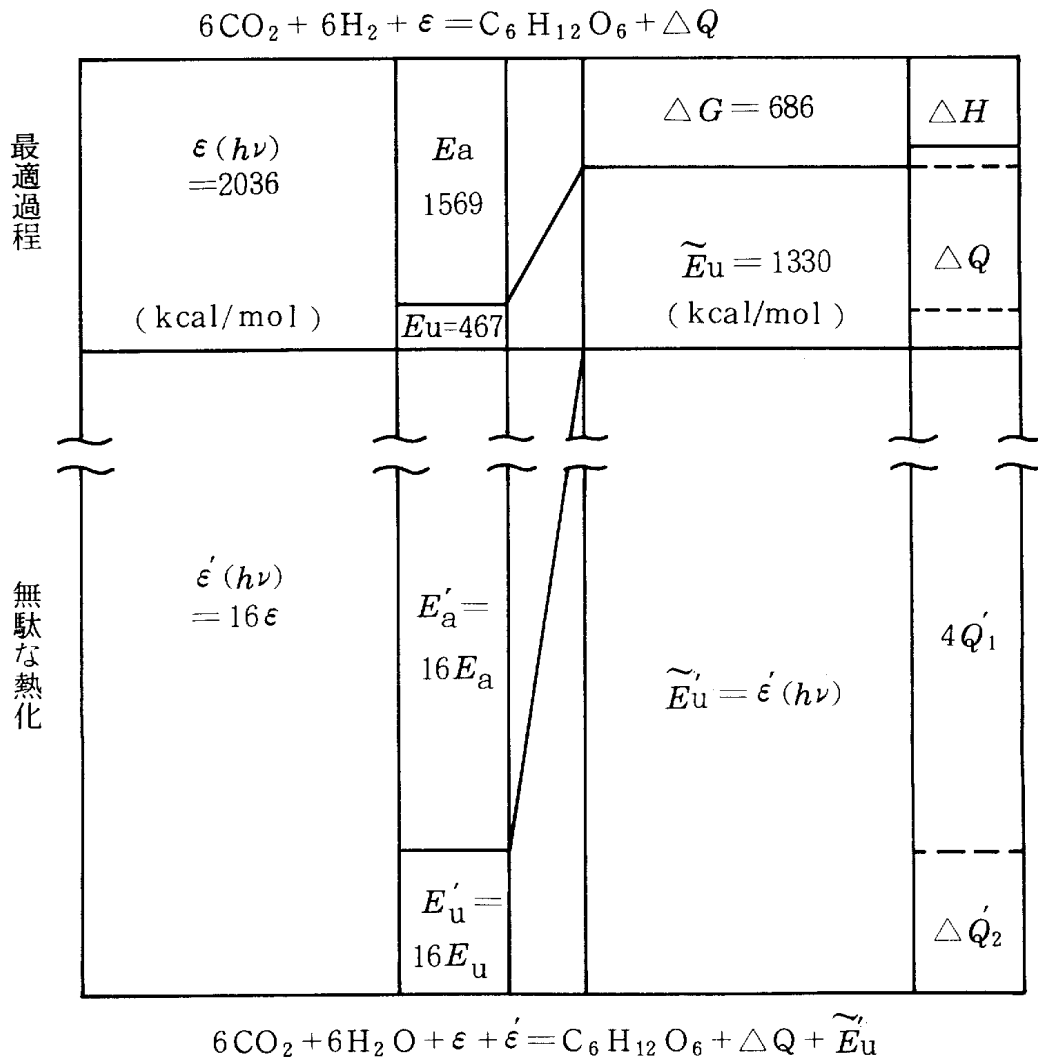


図7 光合成におけるエネルギー変換

しかし、第二法則効率の観点からすると、 ϕ は4以上でなければならないことが分かる。すなわち、第2法則効率は有効エネルギーの産出/投入の比であるから、

$$\eta_{II} = \Delta G / E_a = 43.7\% \tag{12}$$

このとき ϕ の下限は, $8\eta_{II} = 3.5 \sim 4$ となる。

なお, 光合成の第一段階における CO_2 分子の吸着は $65 \text{ kcal/mol} \cdot \text{グルコース}$ (分子あたり 3 eV) の程度のエネルギー散逸を伴うことが, 白鳥によって明らかにされている。⁽²⁶⁾ この有効エネルギー損失は, 式⁽¹⁾の分母 E_a から差し引くべきである——これは例えていえば必要経費の控除にあたる。しかし, これによる η_{II} の増加を加味しても, 要求光量子数は変わらない。

4. 2 光合成のエントロピー代謝をめぐる論争点

槌田らに対する反論として出された諸議論は, 現実の光合成のエントロピー代謝を扱うのではなく, 熱化学方程式あるいは実験的に得られる最適条件について論じるものである。したがって, ここで主要な論点を採り上げて検討しておこう。

安孫子が試みたこと⁽¹⁷⁾は, 太陽光が負エントロピー源になるというシュレーディンガーが一時的に採った表現⁽²⁷⁾に理屈をつける, ということである。なお, 「負エントロピー」という不適切さは, シュレーディンガー自身⁽²⁸⁾や杉田によって批判されている。⁽²⁹⁾⁽³⁰⁾

まず彼は, 物質のエントロピー S_M という概念をつぎのような形で導入する。⁽¹⁶⁾

$$S_M = -G/T \quad (13)$$

こうすると, 光合成でグルコースがギブスエネルギーを獲得する。この G の増加分は図8の ΔG で示される。安孫子の式によれば(定義によって), 光合成が物質エントロピーの低下 (S_M の減少) をもたらす。この命題は正しい(成立する)が, トートロジー(同語反復)にすぎない。

そこで, (a) 彼はこの G の増加分を, 光合成反応における励起分子の濃度増大——エントロピー減少——と結びつけようとした。⁽¹⁷⁾ しかし, この試みにおいて彼は, 励起中心の化学ポテンシャル μ に二重の定義——互いに矛盾する——を与えるという誤りに陥った。すなわち, 彼は μ という変数を (b) いったん化学ポテンシャルの増分として定義しておきながら, 後に

(c) その μ を化学ポテンシャルそのものとして利用した。

こういうことは、励起分子のエントロピー部分がゼロでない限り許されないが、実際はこのエントロピー部分が電子あたり1 eVもあり、⁽²⁶⁾ これこそ励起状態の化学ポテンシャルの主要項なのである。この安孫子の誤りは修正が効かない。なぜなら、(b)と(c)の一方を崩すと(a)の命題が崩れるからである。⁽⁶⁾

ところで、光合成のエントロピー廃棄がもっぱら顕熱(放射と熱伝達)による場合として、「生命球」の例があげられている。⁽¹³⁾ これはガラス球のなかに、水と金魚と藻類を密封したものでしばらくは生きているが、やがて「死のガラス球」になる。このような顕熱によるエントロピー廃棄が一時的ないし部分的に有効であることを否定する⁽⁷⁾のは誤りであるが、これを光合成の一般的な原理とするわけにはいかない(後論参照)。

杉本の光合成に対するコメント⁽¹⁹⁾は、ほとんど勝木の議論⁽¹²⁾を批判しているかにみえるが、じつは単位系を R (気体定数)/モルから、 k_B /分子に変えて、計算のしかたが複雑だと非難しつつ(たしかに簡略化は可能だが)、おおむねそれを復唱しているのである。自然条件下の光合成を扱わなかったのも、参照した勝木論文がそれを扱っていないからである。ネゲントロピー概念の有効性を弁じているが、それも勝木らの議論の批判にはならない。実際、彼のいうネゲントロピーは、図7で示した光子の有効エネルギー E_a を常温290 Kでわって、 $-$ をつけたものである。

なぜこういう面倒なことをするかというと、ネゲントロピー論では過程の終点で実現するエントロピー廃棄、つまり図7でいうと ε_U/T_E ——現実過程では $(E_U + E'_U)/T_E$ ——を〈予め実現されたもの〉として差し引いてしまうからである。(こういう観点が破綻する場合に関しては、次節を参照せよ。)

さらに彼は、赤外放射や空冷など各種の放熱機構を列挙して蒸散と同列においているが、じつは次節にみるように、むしろそれらの比較対照によって、水蒸散の特別な意義が明らかになるのである。

4. 3 光合成の現実過程

自然条件での光合成は、最適過程でのエネルギー変換に＜余分の光子エネルギー ε が吸収され、無駄に熱化する過程＞が付加されたものと考えればよいであろう。(図7の下半部)。現実の光合成では、効率が1%～3%程度である。 $\eta_1 = 2\%$ とすると、

$$\eta_1 = \Delta G / (\varepsilon + \varepsilon') = 0.02. \quad \varepsilon' = 15.8 \varepsilon \quad (14)$$

となる。図7からも明らかなように、光合成の結果 $E_u + E'_u$ の無効エネルギーが生じる。ただし、そのうち $E_u + E'_u$ はもともと光子に含まれていたもので、差の分だけが非可逆的なエントロピー生成によるものである。

この無効エネルギーは $(E_u + E'_u) / 290 \text{ K}$ のエントロピーを含み、これを廃棄することなしには光合成反応を継続できない。実際にエントロピー廃棄が反応を律速している端的な実験例を示そう。

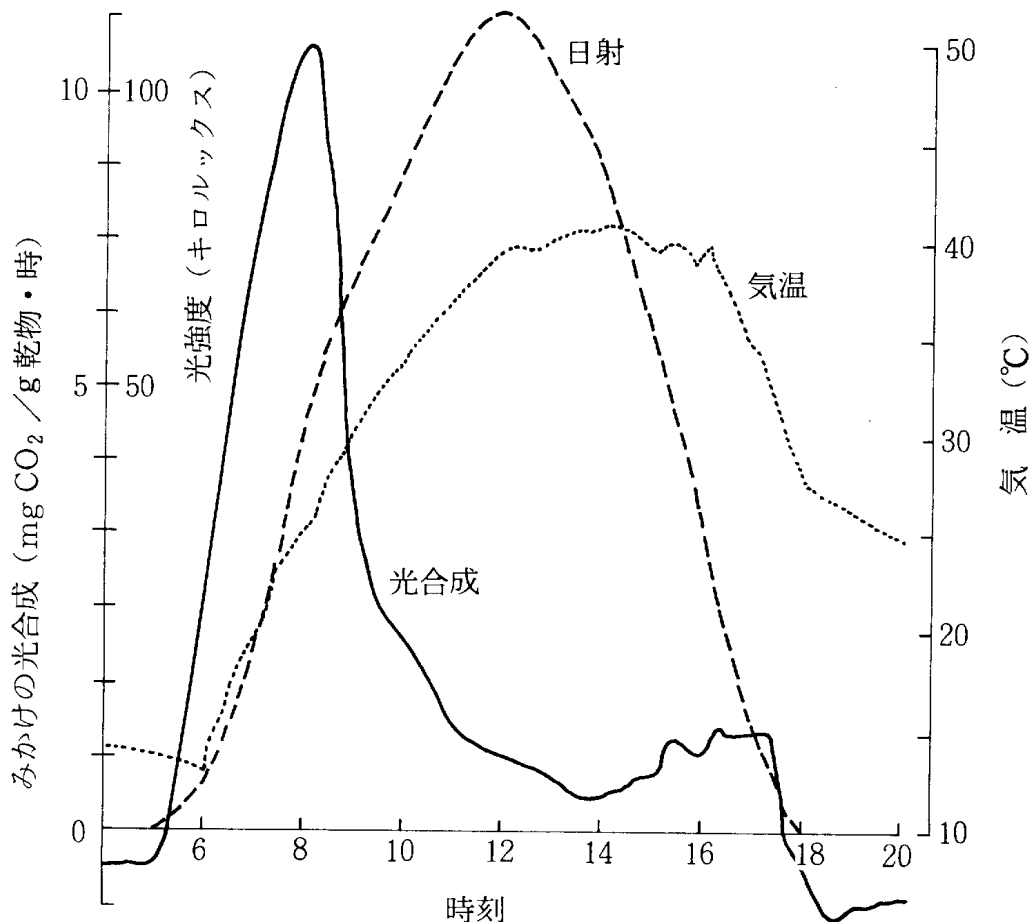


図8 砂漠地における光合成の日変化(ブドウ).
(Schulze ら, 1972より)

図8は、乾燥地における植物の光合成反応の活発さと日照強度との関係を表す。一見して明らかなように、日射が強くなると光合成反応は急速に低下する。⁽³¹⁾ 他方、光呼吸は活発化するから純生産はゼロないしマイナスになっていると考えてよい。こういうことから、太陽光が葉に直接「ネグエントロピー」を供給するという考えのおかしさが分かる。ここでも、太陽光はまさにエントロピーの源泉になっている。

一般に、光の強さと光合成生産との関係は、図9で示される。光がある程度以上強くなり、飽和点を過ぎると生産量は横ばいになる。他方、光呼吸は光量とともに増大するので、それに伴って生産物の消費も増大する。結局、飽和点を越えての光照射は植物にとって負担であり、さらに度を過ぎれば生存への脅威となる。このことは余分の太陽光照射が「負エントロピー」ではなく、エントロピー源になっていることを再確認させる。⁽³²⁾

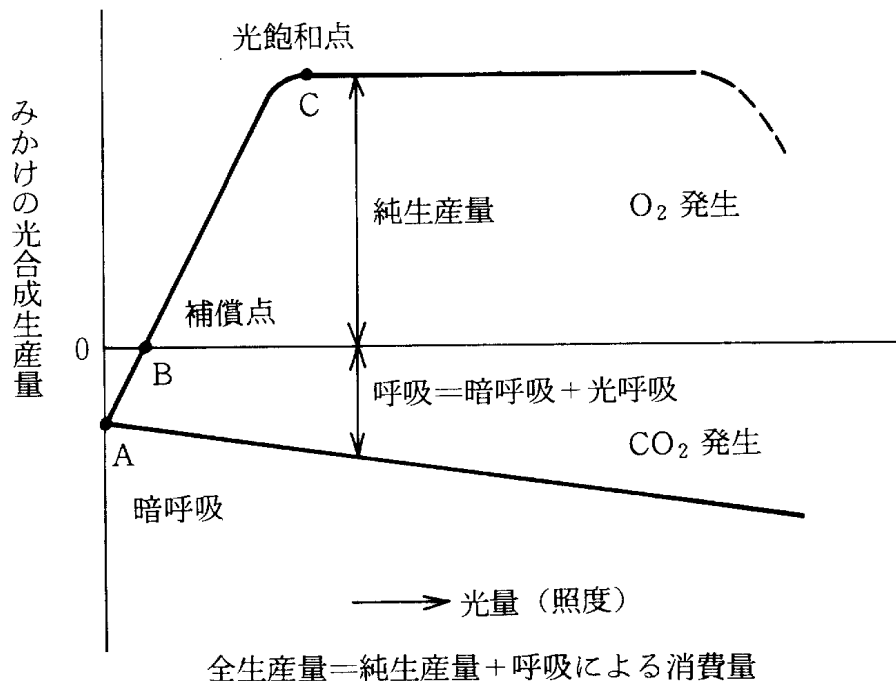


図9 光量と光合成の純生産

光飽和点Cを超える入射光は、光合成に対する負荷であり、過度になると重大な脅威になる。通常の生物学のテキストでは、光呼吸の部分および光の熱化による負荷が無視されている。

逆に、水蒸散が可能な場合には、エントロピー廃棄はスムーズに実現される。実際、水の蒸発潜熱 680 cal/g によって、廃熱 $E_u + E'_u = 34300$ kcal を移送するとき、49 kgの水が必要となる。グルコース 1 kgあたりに換算すると、272 kgとなる。これは、光合成における一般的な水蒸散量である 250 kgとほぼ符合している。つまり、水蒸散の基本的な役割がエントロピー代謝にある、と考えられる。

4. 4 光合成のエントロピー廃棄機構

ともかく、無効エネルギーの腐棄ないしエントロピー廃棄が円滑に行われることは、光合成に限らず、定常的ないし循環的なエネルギー変換の一般的な条件である。そこで、エントロピー廃棄の主要な機構を挙げ、それらが光合成にどういう作用をもつか順次検討してみよう。一般的な機構として考えられるものは、

- (a) 潜熱による冷却—————水蒸散 (葉の温度～環境温度)
- (b) 顕熱による冷却—————水冷却 (近接作用)
- (葉の温度 > 環境温度) ————空気冷却 (近接作用)
- 赤外放射 (遠達作用)

蒸散によるエントロピー廃棄が整合的に行われることはすでに述べた。ただ、水蒸散は他の機構と共存しうるのであり、陸上植物の熱廃棄は一般に水蒸散 80%，顕熱による冷却 20% 程度と考えられている。なお、この割合が対流における潜熱輸送と顕熱輸送の割合に一致しているのは面白い。

さて、顕熱による冷却について検討しよう。光合成に適した温度は $25 \pm 10^\circ\text{C}$ 程度であるので、許される温度上昇はせいぜい 10°C と考えてよい。

(i) 水冷却 水 1 g は 10°C の温度上昇で 10 cal の熱を吸収する。これは蒸発潜熱の約 70 分の 1 であるから、蒸散に使われる水の 70 倍程度の水を冷媒として利用できるならば、陸上植物と同量の日照を受けても光合成には支障がない。水中植物の場合は、水の光吸収能が空気の 1000 倍以上あるため、受光量が陸上植物の場合の数分の 1 以下になる。このため、水中

での光合成は光律速に近い状態で行われており、蒸散のように特別な（潜熱利用の）放熱機構を必要としない。ただし、水温が適当な温度範囲に保たれる条件として、蒸発・伝熱・放射などが必要であることはいうまでもない。

(ii) 空気冷却 空気の比熱は 0.3 cal/g である。したがって、水に比して、質量で 3.3 倍、体積で 3000 倍の量の空気が冷媒として利用できれば、理論的には水冷を代替できる。しかし実際には、風が強くなると光合成の生産量は低下する。⁽³¹⁾ 植物は、乾燥の危険を防ぐために、光合成を犠牲にして気孔を閉じるからである。強い日射を受ける葉を強い風で冷却することは、植物にとっては二重の危険を意味する。この点では、空冷で水冷を代替することはできない。

ただ、生産量を犠牲にすれば、一時的・部分的に空冷型の光合成を行うことは可能である。図8のところで述べたように、乾燥地の植物が朝の冷気を利用して、一時的に空冷型の光合成を行う——このとき水蒸散はゼロにはならないが、大幅に節約される。

(iii) 赤外線放射 直射光の有効温度は約 400 K である。葉の温度を 300 K とし、赤外線放射の届く範囲（光学的厚み 1 程度の上空を含む）の平均の温度を $(300 \pm 270) / 2 = 285 \text{ K}$ としよう。SB側 (T^4 側) を適用すると、赤外放射のフラックスは、 $\phi = 5.67 \times 10^{-12} \text{ watt cm}^{-2} \text{ K}^4$ として

$$\Phi_{\text{out}} = \sigma \times 300^4 - \sigma \times 285^4 = \sigma \times 0.15 \times 10^{10}$$

他方、直射光のエネルギーフラックスは、

$$\Phi_{\text{in}} = \sigma \times 400^8 \text{ の程度} = \sigma \times 2.56 \times 10^{10}$$

直射光でなければもうすこし小さくなるから、全入射の 10% ~ 20% 程度は赤外放射で捨てられるであろう。

以上の検討を通じて、植物の放熱機構として、空冷や赤外放射か蒸散あるいは水冷に比してどの程度に不利であるか——エントロピー輸送量が小さいか——明らかになった。この結果から、通常的光合成で前者が一時的あるいは副次的な機構に留まることは容易に理解できる。逆にいえば、空

冷や赤外放射に頼らなければならない場合、目的の光合成生産量が大幅に低下するという代償を伴う。

5. 結論：地表システムの非平衡性とはなにか

地球は、高温熱源を太陽・低温熱源を宇宙空間とする熱機関であることでよく知られている。しかし、両者の温度差にもとづく放射平衡（厳密には放射定常）や大気力学的エネルギーは地球に限らず惑星系の一般的特徴であり、地球生態系を支える熱学的な非平衡性の前提——必要条件——ではあっても十分条件ではない。この観点からみて、地球・熱機関はどのような非平衡性を生み出しており、その非平衡性はどのように生態系の存続を支えているのか、が問題となる。

通常の熱機関にしても、高温熱溜（熱源）と低温熱溜（冷源）があるだけでは仕事という環境と非平衡の（エントロピー 0 の）エネルギーを生み出すことはできない。シリンダーとピストン（タービン式ではケーシングとファンブレード）といった拘束系（容器と可動部）と作業物質（気体）が必要で、どちらが欠けても熱機関としての機能は果たせない。前者の役割は、温度差・圧力差・密度差といった要素を時間的ないし空間的に維持することである。後者つまり作業物質は、凝縮相（固体や液体）ではありえず、熱膨張率が特別大きい相つまり気体でなければならない。

ところが、地表システムは、通常の熱機関と異なり、拘束系を有しない。重力場による閉じ込めは存在するが、これは非平衡性を維持する機能はもっていない。もちろん、重力場があるときの熱平衡状態はないときのそれとは異なるが、重力場はそのなかの系が平衡に向かうのを妨げるものではない。

こう考えると、地表システムで水が相変態を伴いつつ循環することの重要性が明らかになる。水が地表のエントロピーを吸収して気化すると、乾燥大気よりモル重量が小さいために浮力をえる。他方、上空で放熱（エントロピー廃棄）して液相の水に戻ると、大気より重くなって地上に落下する。地表での蒸発・上空での凝結は、熱学的には必然的（エントロピー生

成的)な変化でありながら、同時に力学的ポテンシャル獲得の過程になっている。さらに、蒸気(を含む湿潤大気)の上昇は断熱的であり(エントロピー生成が小)、他方、水滴(氷滴)の落下は十分急速で乾燥大気中でも再蒸発せずに地上に環流する。

こうして、地表システムは日射(短波長放射)と不飽和大気と液相の水という三者が共存する光・熱・化学・機械的な非平衡系になっているのである(図12参照)。

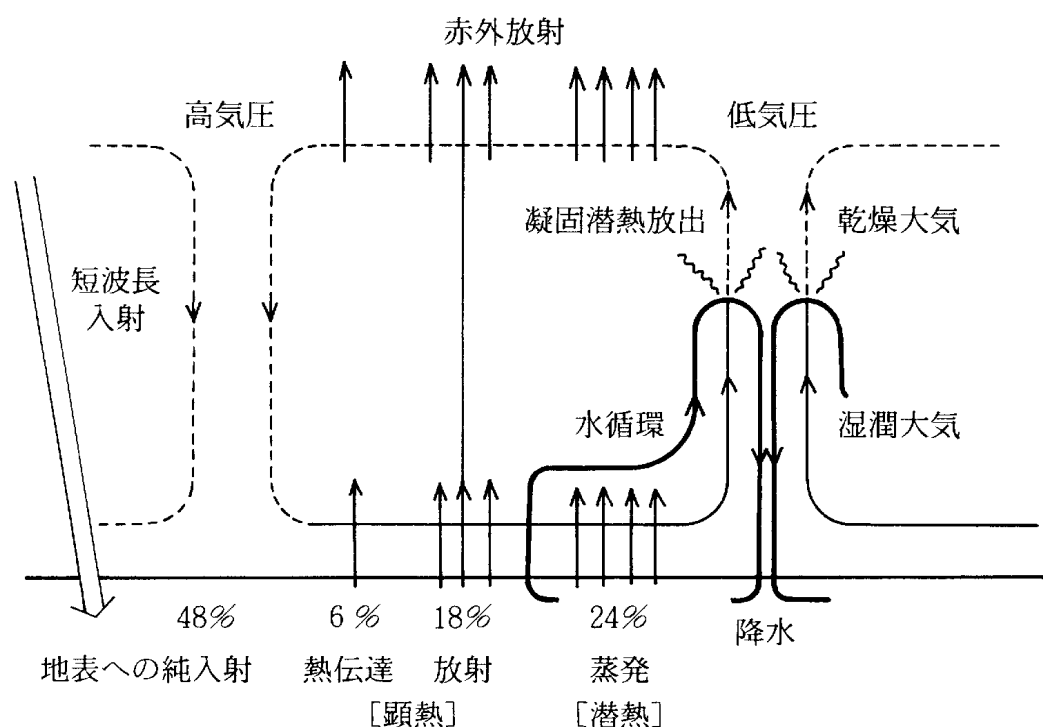


図12 地表システムの大気・水循環

これを通常の熱機関と対比すると以下のようなになるであろう。

	熱機関	地表システム
高温熱溜	熱源	太陽
低温熱溜	冷却媒体	宇宙空間
作業物質	気体	空気+水
閉じ込め系	容器+可動部	重力場

生態系を貫く物質循環（図13参照）を定常系とみるとき、槌田の定理〈定常系は定常系のなかでのみ（安定に）存在しうる〉に照らした母システムの定常系をどうみるか、が問われる。上述のような水・大気混合システムの循環こそこの母システムであり、地球環境を生命体の発生・発展の場たらしめた基本的なメカニズムなのである。

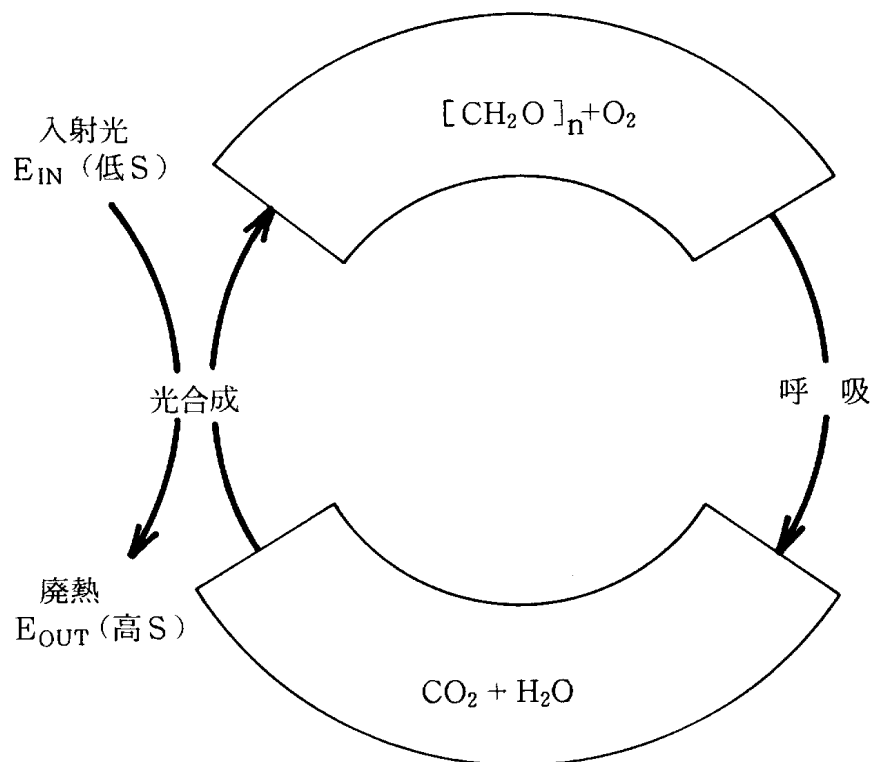


図13 生態系における物質循環の基幹

呼吸は、グルコースを炭酸ガスと水に分解する。これがエントロピー生成過程であることは明白である。他方、この逆反応もまたエントロピー生成過程である。これはエネルギー系におけるエントロピー

参考文献および注

- (1) 水谷 仁「生命が生まれる惑星の条件」, 『科学』54 (1984) 401.
- (2) 松井孝典『地球・宇宙・そして人間』徳間書店 (1987).
- (3) 槌田 敦「核融合の限界と資源物理学」, 『日本物理学会誌』31 (1976) 938.
- (4) 玉野井芳郎『エコノミーとエコロジー』, みすず書房 (1987).
- (5) 勝木 渥「エントロピー論争・私の見方」, 『エントロピー読本Ⅲ』 日本評論社 (1986年) 65.
- (6) 河宮信郎「太陽光の仕事能力と地球システムのエントロピー代謝」, 『中京大学教養論叢』25巻 (1984) 299.
- (7) 河宮信郎「太陽光の仕事能力と地球のエントロピー代謝」『科学』, 55 (1985) 223.
- (8) 吉岡 斉「科学史家からみたエントロピー学」, 『エントロピー読本Ⅲ』 日本評論社 (1986年) 55.
- (9) 赤沢五郎「『科学』・『反科学』・エントロピー論」, 『エントロピー読本Ⅳ』 日本評論社, 1987年, 31.
- (10) 河宮信郎「エントロピーと熱力学的使用価値」・『科学』52 (1982) 177.
- (11) 有効・無効エネルギーの概念については, 中山正敏「エントロピーの物理学」, 『金属』1987年6月号.
- (12) 勝木 渥「エントロピー的視点から見た地球と生物 (試論)」, 小野 周他編『エントロピー』朝倉書店 (1985) 77~102, とくに86~87.
- (13) 安孫子誠也「生態系物理学と技術」, 『エントロピー読本Ⅲ』 日本評論社 (1986) 193.
- (14) 勝木 渥「エントロピー的視点から見た地球生物」, 『エントロピー読本』, 日本評論社 (1984), 98.
- (15) T. Murota, "Heat Economy of the Water Planet Earth: An Entropic Analysis and The Water-Soil Matrics Therory", *Hitotsubashi Journal of Economics* 25 (1984) No. 2.
- (16) 安孫子誠也「水循環による廃棄物の拡散」, 『エントロピー読本Ⅱ』 日本評論社 (1985) 116.
- (17) 安孫子誠也「エントロピー低下機構としての光合成」, 『科学』54 (1984), 285.
- (18) 槌田 敦『資源物理学入門』日本放送出版協会 (1982) とくに8章.
- (19) 杉本大一郎「エントロピーと地球について」, 『科学』55 (1985) 285.
- (20) R. M. Goody & J. C. G. Walker: *Atmosphere*, Prentice-Hall (Engelwood Cliffs, New Jervey, U. S. A., 1972) ch. 3, 安田敏明・根本順吉訳『大気科学入門』共立出版 (1978) 57.

1987. 10 地表システムのエネルギー収支とエントロピー代謝(河宮) 139 (375)

- (21) S. Manabe & R. F. Strickler, Thermal equilibrium of the atmosphere with a convective adjustment”, *J. Atmos. Sci.* 21 (1964) 361.
- (22) 藤茂 宏『光合成』裳華房 (1973) 106.
- (23) A. Tsuchida & T. Murota, “Fundamentals in the Entropy Theory of Water Cycle, Ecocycle, and Human Economy”, Proc. of the symposium “Man’s Coevolution with the Biosphere in the Age of Advanced Technologies”, held by l’Institut de la Vie, York University, Toronto, Canada, on 21–25 Jan. 1985.
- (24) D. C. Spanner: *Introduction to Thermodynamics*, Academic Press (London, Mcmillan, 1964) 216.
- (25) 日本生化学会編『生化学データブック I』東京化学同人 (1979) 7.
- (26) 白鳥紀一「光合成の熱力学」, 『エントロピー読本Ⅲ』, 日本評論社, 1986年, 186.
- (27) E. Schrödinger: *What is Life? — The Physical Aspect of the Living Cell*, 1st ed. (Cambridge University Press, Cambridge, U. K., 1944) 72.
- (28) E. Schrödinger: *What is Life?* op. cit., the revised ed. (Cambridge University Press, Cambridge, U. K., 1944) 87.
- (29) 杉田元宜「負エントロピーについて」, 『科学』52 (1952) 95.
- (30) 槌田 敦『エコロジーとエントロピー』ダイヤモンド社 (1986) 52.
- (31) 玖村敦彦「緑色植物による太陽エネルギーの変換と利用」, 林健太郎他著『エネルギー』東京大学出版会 (1974) 111.
- (32) 勝木 渥「『太陽光ネゲントロピー源』論批判」, 『エントロピー学会誌』2号 (1984) 21, および『エントロピー読本Ⅱ』(1985) 118.