

太陽光の仕事能力と地球システムの エントロピー代謝

——環境科学のための基礎的考察——

河 宮 信 郎

科学的な環境理論の基礎として、地球システムと光合成過程とがいかなるエントロピー代謝機構をもっているのかを正しく認識しておくことが必要であろう。榎田敦は、地表システムを水循環を基本とする「開放定常系」* と規定し、そこでは太陽輻射が限定された役割しかもたないことを主張した。これに対するアンチテーゼとして、安孫子誠也は、太陽輻射の負エントロピーを駆動因とする「非平衡閉鎖系」* という規定を提唱した。

本稿では、両者を対照して、太陽光のエントロピー論的意味と重力場における熱学系の挙動を考察し、水循環の意義を再確認する。なお、本稿に寄せられた勝木渥の補足を付論として併載する。

1. はじめに

かってパリの生命研究所 (L'Institute de la Vie) が著名な物理学者と生物学者を集めてシンポジウムを開いた。それぞれに優れた報告が行われていたのに、生物学者と物理学者の話はどうしても噛みあわなかった、と出席した柳瀬陸男が回想している。⁽¹⁾ 彼の見解によれば、そうなった原因

* 榎田はエントロピーの出入りがあることをもって地球を「開放系」と定義し、安孫子は物質の出入りがないことをもって地球を「閉鎖系」と呼ぶ。現在の物理・化学者では安孫子の定義が支配的である。しかし、相対論的には、物質保存則とエネルギー保存則とは独立でなくなるため、榎田の定義の方が合理的である。

はおそらく、生命系の低エントロピー性・秩序形成能力が生物学者には当然のことにみえるのに、物理学者には物理化学系として特別例外的なものにみえるためであり、このようなすれ違いがこの種の会議ではしばしばくり返されている、という。⁽¹⁾ その後の非平衡熱力学の進歩も、このギャップを埋めるには決して十分なものとはいえないであろう。

エントロピー学会第1回シンポジウム（1983年11月23日）における榎田と勝木の講演は、生物学と物理学の間の架橋として重要かつ興味深いものであった。⁽²⁾⁽³⁾ しかし、そこにおいて、安孫子は太陽光をネグエントロピー源と規定し、〈太陽光が水圏を浄化する〉という、榎田とは対極的なアプローチを提示した。⁽⁴⁾ この論理を一層展開したものが『科学』5月号の安孫子論文で、⁽⁵⁾ 水圏のエントロピー廃棄機能を否定して、伝統的な太陽崇拜への復帰を意図したものといつてよい。

太陽輻射がなければ生命の存在はあり得ない。この単純な事実によって、素朴な直観のレベルでは人はみな太陽崇拜論者であろう。（しかし、これは温帯・亜寒帯性住人の偏見かもしれない。砂漠地帯や熱帯では、太陽はしばしば悪者として擬人化される。）

L. BOLTZMANN⁽⁶⁾ やE. SCHRÖDINGERもまたその例外ではなかった。SCHRÖDINGERは、生物が「負エントロピー」を食べて生きるものであり、食物としての負エントロピーを生産する植物は、その「最大の供給源を太陽の光に求めます」といつている。⁽⁷⁾ しかし同時に彼は、より「逆説らしくなくいうならば、物質代謝の本質は生物体が生きているときにどうしてもつくり出さざるを得ないエントロピーを全部うまい具合に外へ棄てるということにあります」といつ、⁽⁸⁾ 生命活動の熱学的意味を適確に表現しえつていた。

この認識を発展させたのが榎田・勝木であり、「逆説」的表現を純化したのが安孫子である。どちらが真の発展になっているであろうか。

本稿の構成は、以下の通りである。まず、榎田と安孫子の所論を同一の記法で表わして、その対立点を明らかにする。つぎに、太陽の有効温度とエントロピー含有量をプランクの輻射理論で扱い、輻射機関の概念を設

定する。さらに、重力場における熱学系の特性から、エントロピー廃棄に水循環が特別の重要性をもつことを明らかにする。この水循環=エントロピー代謝機構のサブシステムとして光合成が存在する。光合成の本質は、不完全輻射機関である。最後に、これらの議論の上になんて、森林の自己維持機能と砂漠の安定性をエントロピー論の視点から考察する。

2. 問題の構造 (Problematik)

樋田「資源物理学」の中心的命題は何であったか。それは、地表システムのエントロピー収支が次式の構造をもっているということである。⁽⁹⁾

$$S_E = \frac{Q_{in}}{T_E} + S_{act} - \frac{Q_{out}}{T_{out}} (=0) \quad (1)$$

ここで、 Q_{in} と Q_{out} は単位時間あたりの輻射エネルギーの流入量と流出量、 T_E は地表温度 (280K)、 T_{out} は上空温度 (255K) であり、 S_{act} は地表での一切の活動で生成するエントロピーで、 S_E はそれらの総和である。

これに挑戦した安孫子の論文⁽⁶⁾ の核心的主張は何であったか。二義的なエンタルピー項 (火山爆発や化石燃料消費等) を除いて、安孫子のモデルを簡約すると次式を得る。

$$S_E = \frac{Q_{in} - H_{ps}}{T_E} + \frac{H_{ps}}{T_R} + S_{act} - \frac{Q_{out}}{T_E} (=0) \quad (2)$$

ここで H_{ps} は光合成 (photosynthesis) によって形成されるエンタルピー (年間炭水化物1,500億トン / 6×10^{20} cal に相当)、 T_R は太陽輻射の有効温度である。(なお、安孫子は T_E が地域的に変化することを考慮しているから、これは平均の T_E を用いた近似的表現ということになる。)

第1項は、光合成で固定された部分を除く入射光が熱化すること、第2項は H_{ps} のエネルギーは高い有効温度 (低いエンタルピー) をもっていることを表わす。

式(2)は形式的に次のように書き換えられる。

$$S_E = \frac{Q_{in} - Q_{out}}{T_E} + H_{ps} \left(\frac{1}{T_R} - \frac{1}{T_E} \right) + S_{act} (=0) \quad (2')$$

第1項分子は、 H_{ps} が呼吸・酸化によって消費される場合にはゼロ、純生産 pH_{ps} ($p < 1$) があるときには pH_{ps} (> 0) となる。いずれにせよ負にはならない。樋田に対する安孫子の批判は、(a) $S_{act} (> 0)$ とバランスするのは、第2項 ($H > 0$, $T_R > T_E$ だから負値をとる) のみである、(b) 水循環によるエントロピー廃棄機構は存在しない、という点にある*。

安孫子論文の骨子は、式(2)の第2項(負値をとる)—— $(\partial S / \partial t)_{photo}$ に対応する——が太陽輻射のネグエントロピーの表われで、これを有効に利用するのが光合成(のみ)だという点にある。式(1)と(2')を対照すれば、両者の争点がどこにあるかは明快であろう。

最も重要な違いは、(1)・(2)右辺の最終項の分母が異なること ($T_E \neq T_{out}$) である。すなわち、安孫子論文は水サイクルによるエントロピー廃棄機構を始めから除外していたのであり、理論的分析の結果定否したことにはなっていない**。

さらに、光合成に有効に利用されたエネルギー流量 H_{ps} が高い有効温度をもつ(低いエントロピー入射を意味する)ことが明示されており、この点は意味がある。

なお注意すべきことに、 $Q_{in} \gg H_{ps}$ であるから、樋田理論では第一近似において H_{ps} を無視することが許される。したがって、たとえ(2')式の正当性が論証されたとしても、それが(1)式を否定したことにはならないのである。(安孫子がこの点を不問にしているのは、樋田理論の理解および自説の論理構造の対自化において不十分な点があったためではなからうか。)

対照のため、本稿の結論を掲げておこう。

$$S_E = \frac{Q_{in} - H_{ps}}{T_E} + \frac{H_{ps}}{T'_R} + S_{act} - \frac{Q_{out}}{T_{out}} \quad (=0) \quad (3)$$

第2項は、光合成に有効に利用された太陽光成分に含まれるエントロピーで、 $T'_R = (3/4)T_R$ である。こうなる理由は式(6)以下で述べる。

* 安孫子論文の記法では、 Q_{in} , $Q_{out} \rightarrow \dot{Q}_{in}$, \dot{Q}_{out} ; $H_{ps} \rightarrow (\partial H / \partial t)_{photo}$; $S_{act} \rightarrow (\partial S / \partial t)_{cons} + (\partial H / \partial t)_{meteo}$ (等) となる。

** 逆にいうと、樋田の式(1)で第1項と第3項の和 $Q(1/T_E - 1/T_{out})$ をつくり、「これは負エントロピーだ」と主張することが論理的には可能である。

式 (3)からも、 $H_{ps} (1/T'_R - 1/T_E)$ という負項を合成することができる。もし光合成過程が、エントロピー流入量 H_{ps}/T'_R 以上のエントロピー量 H_{ps}/T_E を捨てたのであれば、この負項は実体的意味をもつ。しかし $(-H_{ps}/T_E)$ は、光合成で捨てられたものではなく、熱化が防がれたため発生しなかったエントロピー量に対応している。ゆえにこの「負エントロピー項」は虚構にすぎないのである。

以上の対比から、(1)・(2)・(3)の熱機関モデルとしての共通性と相異点とが浮き彫りにされたであろう。基本的争点は、太陽光の有効温度 T_R ・仕事能力・エントロピーをいかに評価するか、そして环境温度 T_E だけで地球のエントロピー収支を考えることが許されるか否かということになる。

3. 太陽光の仕事能力と理想輻射機関の効率

太陽の仕事能力を論じるためには、その有効温度 T_R を求めなければならぬ。 T_R に関しては、安孫子と同じく、⁽⁵⁾ 生化学で通常用いられるものを採用する。波長 ν の輻射の有効温度 T_ν は

$$\frac{1}{T_\nu} = \frac{1}{T_s} - \frac{k}{h\nu} \ln \frac{\Omega}{4\pi} \quad (4)$$

で与えられる。この式は、Planck の熱輻射論から導かれる表式で、⁽¹⁰⁾ 光合成に携わる生化学者には常識とみてよい。⁽¹¹⁾

ここで T_s は太陽表面温度 5,770K、 Ω は太陽を見込む立体角 0.68×10^{-4} ステラジアン、 K はボルツマン定数 h はプランク定数である。この立体角補正の意味は、原典または安孫子論文⁽⁵⁾ の解説に委ねることにして、ここでは光量子束の有効温度を $T = h\nu/k$ とか T_s そのものにとることが許されない点について、簡単な注解を付しておこう。

図 1 において、太陽表面での輻射を A で表わすと、これが地球に到達するまでの間にエネルギー密度が低下して A' になる。A' は低温の輻射 B と同じエネルギー密度をもつのであるが、斜線部の波長に注目すれば高温の輻射 C と同じスペクトル強度をもつ。したがって A' のうちこの波長領域は有効温度 C をもつとみなすのである。

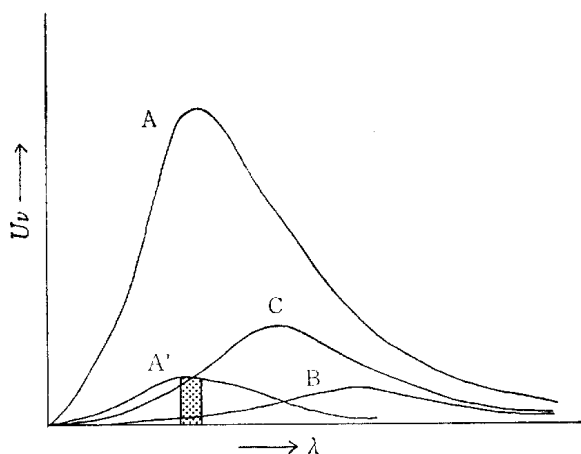


図1 太陽光のスペクトル分布と有効温度

したがって、有効温度は波長（領域）毎に決めなければならない。これは当然の結果というべきで、すべての波長が共通の有効温度をもつような特殊な輻射が黒体輻射なのである。⁽¹⁰⁾

式(4)の T_ν は、エネルギー密度の低下と相対的波長分布の不変性を考え合わせて決められる値であり、図2のような波長依存性を示す。なお、特

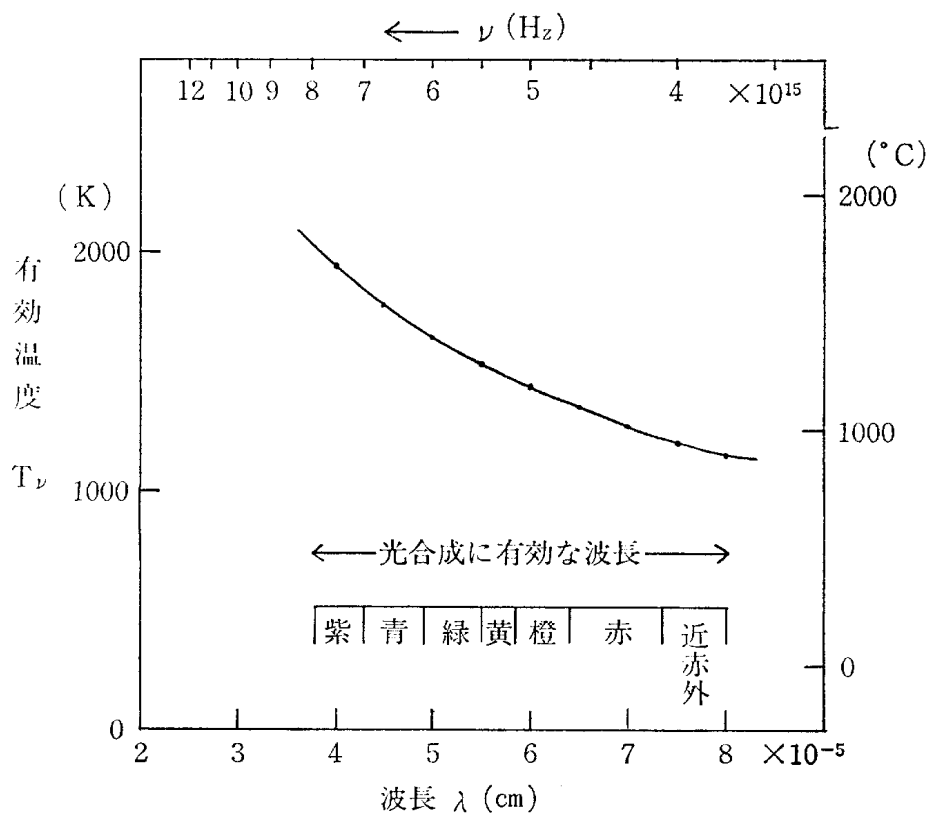


図2 太陽光スペクトルの波長と有効温度

別の集光装置を用いる場合には、この T_{ν} は立体角補正の項を通じて変化(増大)しうる。

光合成に有効な波長領域の T_{ν} をまとめて T_R と書くことにすると、これは T_S と T_E のほぼ相乗平均になっている。

では、このような T_R をもつ輻射 U からどれほどの仕事を取り出せる(輻射機関)であろうか。

それを知るためには、熱学的使用価値の概念を用いることができる。 U が常温熱になったときのエントロピー量は U/T_E であり、始めの S 含有量は $(4/3)(U/T_R)$ である。この差が利用可能な非平衡性 I (Irreversibility) であり⁽¹²⁾

$$I = \frac{U}{T_E} - \frac{4}{3} \frac{U}{T_R} = \frac{U}{T_E} \left(1 - \frac{4}{3} \frac{T_E}{T_R} \right) \quad (5)$$

これから仕事 W

$$W = IT_E = U \left(1 - \frac{4}{3} \frac{T_E}{T_R} \right) \quad (6)$$

を取り出すことができる。その効率 η_R は

$$\eta_R = \frac{W}{U} = 1 - \frac{4}{3} \frac{T_E}{T_R} \quad (7)$$

となり、熱機関の効率 $1 - T_E/T_R$ よりも少し低い。

係数 $4/3$ がかかる理由を略述しておこう。輻射 U から熱 $Q (=U)$ を取り出すとき、輻射圧に抗して系を等温的に圧縮しなければならない。このとき、所要の仕事量 $U/3$ が熱化され、 $\Delta S = (U/3)/T_R$ のエントロピーが生じる。さらに、熱量 $(4/3)U$ をカルノー機関で仕事に変え、投入仕事量 $U/3$ を差引くと

$$\frac{4}{3} U \left(1 - \frac{T_E}{T_R} \right) - \frac{U}{3} = U \left(1 - \frac{4}{3} \frac{T_E}{T_R} \right)$$

となり式(6)が再現される。式(3)における第2項に $4/3$ がかかるのもこの点を考慮したからである。

式(5)・(7)によって、理想的輻射機関の効率を求めると図3を得る。(なおこれは輻射光利用の一つの極限モデルであり、現実の光合成と直接対応

しない。両者の対照は水消費量の評価の項でなされる。)

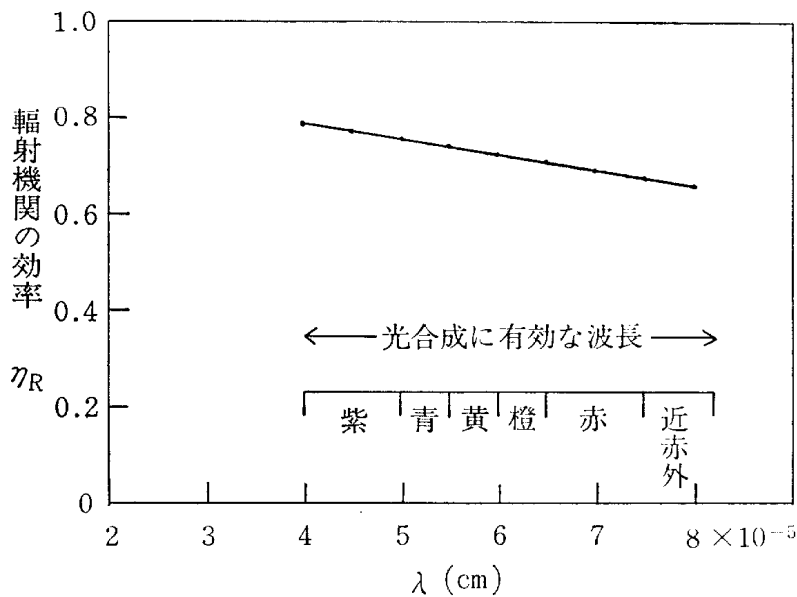


図3 太陽光の波長と理想輻射機関のエネルギー効率

ところで、式(5)・(6)の U/T には $4/3$ の係数がかからない。もしこれがかかっていれば、理想輻射機関はカルノー機関と効率上も等しくなる。そうするためには、輻射圧の仕事能力と有効利用しなければならないが、そればできない。実際、理想輻射機関においても、廃棄するエネルギーは熱の形態になる。なぜか。まず、機関が単位時間に受け入れる輻射量は、 $U_{in} = cT^4_R$ で、それに伴うエントロピー流入は次式となる ($T^4_R \gg T^4_E$ を考慮した)。

$$S_{in} = \frac{4}{3} cT^3_R \quad (8)$$

棄てられる輻射 U_{out} の温度が T_E より ΔT だけ高いとすると、

$$U_{out} = c(T_E + \Delta T)^4 - cT^4_E = cT^3_E \Delta T \quad (9)$$

したがってエントロピーの廃棄レートは

$$S_{out} = \alpha \frac{4}{3} cT^2_E \Delta T \ll \frac{4}{3} cT^3_R \quad (10)$$

つまり、速度論的にみると無効エネルギーを輻射のかたちで棄てることはできない。この点を無視したことは、安孫子の議論の基礎的な欠陥であ

る。

結局、実際に無効エネルギーを棄てるには、熱伝導（水中植物・光電池）や水蒸散（陸生植物）により、廃熱として棄てるほかない。

こうしてわれわれは輻射機関の作業物質と環境の問題に導かれる。適切な容器（機関本体）と適切な媒体（作業物質）が得られれば輻射機関が成立する。ここでの「適切さ」の核心は S 廃棄がスムーズに行われることである。そうでない場合、式(2)の第2項は第3項の非可逆的 S 生成によって相殺され、生命系存立の余地を残さない。このような視点から、まず地球システムを扱い、つぎにそのサブシステムとしての光合成系を考察する。

4. 無機的世界におけるエントロピー代謝

安孫子理論では、光合成開始以前の地表システムには、エントロピー低下の機構が存在しなかったことになる。⁽⁶⁾ つまりエントロピー収支 S_E は常に正で、地表系のエントロピー

$$S_E = \int S_E dt \quad (11)$$

は、一方的に増大していたことになる。このような世界では生命の誕生は不可能であり、無機的世界においても効果的なエントロピー代謝機構が存在したと考えられる。

ただ、これまでの榎田説では地球が受けとるエントロピーは光合成の成立の前後でとくに変化しなかったことになる。しかし、詳細にみると、光合成産物のエンタルピーに転化した部分は、常温熱に転化した部分と異なり、低エントロピーのままである太陽光のうち、と考えてよい。したがって光合成の成立によって地球のエントロピー収支はわずかながら改善されることになる。

地表システムの S 代謝を扱う場合、まず考えるべきことは、それが重力場の中にある熱学系だということである。⁽¹³⁾ そもそも、重力場のもとでは、熱学系は常識的・直観的な実験室規模のそれとは重要な相違を示す。すなわち、この系では熱平衡（エントロピー極大）状態において、温度差

・圧力差・濃度差等が生じる。しかもこのような不均質性は、一般には熱学的使用価値をもたないのである。それはなぜか。

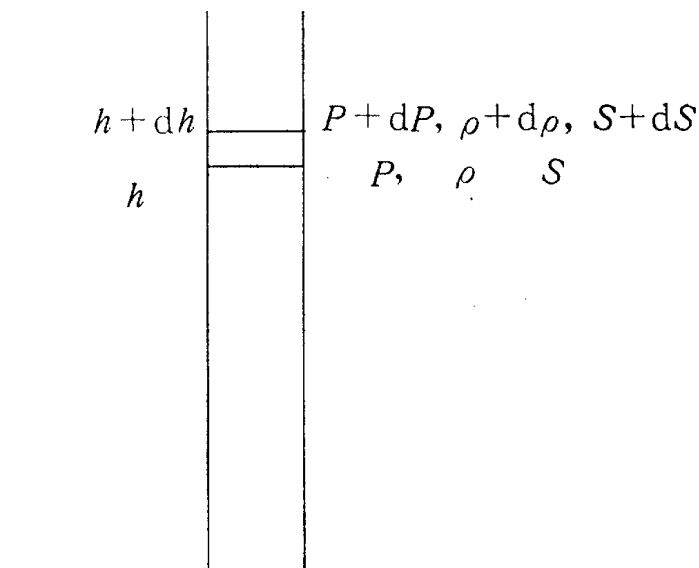


図4 大気柱の高さ h と圧力 p 密度 ρ エントロピー S

図4のように地上の鉛直な空気柱（単位断面積）を考え、高さ h において温度 T ・圧力 P ・密度 ρ 、高さ $h + dh$ における増分を各 dT ・ dP ・ $d\rho$ とする。ここで重力加速度を g とすると

$$dP = -\rho g dh \quad (12)$$

の関係が成立する。

一方、モル当りエントロピー S の変化は、 T と P の関数として

$$dS = \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_P dT + \left(\frac{\partial S}{\partial P} \right)_T dP \quad (13)$$

ここで、第1項は定圧モル比熱 C_P を用いて

$$\left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_P = \frac{C_P}{T} \quad (14)$$

と表わされる。理想気体の状態方程式 $PV = RT$ とマクスウェルの関係式を考慮して、第2項を書き換えると

$$\left(\frac{\partial S}{\partial P} \right)_T = - \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P = - \frac{V}{T} \quad (15)$$

式(14)・(15) を(13)に代入して, S 極大と置くと

$$dS = \frac{C_P}{T} dT - \frac{V}{T} dP = 0 \quad (16)$$

高さ h と圧力 P の関係, 式(12)を考慮すると次式を得る。

$$\frac{dT}{dh} = -V \frac{\rho g}{C_P} = -\frac{Mg}{C_P} = -\frac{g}{c_P} \quad (17)$$

ここで $M = \rho V$ は大気平均分子量で $c_P = C_P/M$ はグラム当りの定圧比熱である。乾燥大気に対し, $M = 29g$, $C_P = 0.24 \text{ cal/deg}$ を入れて, 断熱減率 dT/dh は

$$\begin{aligned} \frac{dT}{dh} &= -\frac{Mg}{C_P} = -0.98 \times 10^{-4} \text{ (deg/m)} \\ &\simeq -10^\circ \text{C/km} \end{aligned} \quad (17)'$$

湿気を含むときは, 水蒸気の M が $18g$ であるため大気 1 モルの M は小さくなり, $|dT/dh|$ も小さくなる。現実の大気では 1 km 当り -6°C である。この平均的大気に対する平均的湿潤断熱減率は, ほぼ大気のエントロピー極大に対応し,⁽¹³⁾ このもとで上空と地表との間の温度差は熱機関の高温・低温熱浴にはなり得ない。

たとえば, 有効温度の高い太陽輻射が地表に届いても, その仕事能力は, 地表での熱化, そこから大気高層に至る間の熱移動, その間におけるエントロピー生成によって空しく失われるのである。まさにこのことが, 砂漠の安定性や「金星効果」において実証されているのである。榎田が地球と金星との対比を強調してきたのは, 至当であった。⁽¹⁴⁾ この効果を式(1)の表現に対応づければ, S_{act} のうち一定部分は——その量的規定は未だ解明されていない——この種のエントロピー生成で占められ, その分だけ生命系の活動余地 (S 生成余地) は狭くなっている。

榎田による水循環と S 廃棄の記述は大綱において正しいとはいえ, 地表と上空の温度差が直接には熱機関の熱浴にはなり得ないことが明示されていないと思われる

では, ≪水循環によるエントロピー廃棄≫ という榎田の中心テーゼは,

いかに根拠づけられるべきであろうか。

ここで $dS=0$ の条件をはずして、大気の運動を考えてみよう。式(12)・(16)・(17)を考慮すると、エントロピーの高度変化は下記のようになる。

モル当りで

$$\frac{dS}{dh} = \frac{C_P}{T} \frac{dT}{dh} + \frac{Mg}{T} \quad (18)$$

グラム当りで

$$\frac{ds}{dh} = \frac{c_P}{T} \left(\frac{dT}{dh} + \frac{g}{c_P} \right) \quad (19)$$

となる。 ds/dh の正・負に応じて、当然気団の上昇・下降が生じる。⁽¹³⁾

水蒸気と乾燥大気の分子量が大きく異なるため、大気の湿度が変わると c_P は大きく変わり、 ds/dh を変動させる。輻射熱の吸収・廃棄に伴う水の変態は、 c_P を通じて ds/dh を大巾かつ急激に変える。この非平衡性によって駆動される気団の運動は十分急速であって、断熱的（等エントロピー的）に進行する。こうして、水循環がエントロピー代謝機能を保証する。実際、気団運動が断熱的でなければ、 dh の上昇毎に ds だけのエントロピー増大を生じ、金星効果へ逆もどりする。（ここでは dT/dh の変化を考えない。地球を黒体とみなし、 dT/dh が平衡値をとるという近似の段階で、なお S 代謝が可能であることを示したのである。）

こうして、地表と上空の温度差 $T_E - T_{out}$ は熱学的に利用可能なものとなり、ここにおいて水循環のエントロピー廃棄機能を再確認できる。このことは直ちに、 T_E と T_{out} を区別しない安孫子モデルが無効であることを示す。それは、水循環が S 廃棄機能をもたないことを論証したのではなく、前提にしていたのである。

しかしながら、〈太陽光が必ずしも低 \dot{S} でないがゆえに、水循環が基本的だ〉というこれまでの榎田の説明は結果論的には正しいが、より詳しくは〈太陽光が本来高温輻射（低 \dot{S} ）であるにもかかわらず、水循環が基本的だ〉というべきであろう。これに対して、安孫子の論理は、〈太陽光が高温輻射であるがゆえに、水圏のエントロピー代謝は第一義的でない〉という

ことになるが、これは無論誤りである。

水循環による S_{act} の廃棄こそ、無機的世界の定常性 ($S_E=0$) ないし進化 ($S_E<0$) を保証する基本的な機構であった。これなくしては光合成開始以前、つまり始生代の有機物分解型の従属栄養細菌や化学・独立栄養細菌の生命活動 (S 生成を伴う) は、地表系の S_E 生成を加速するだけに終り、たちまち終末を迎えたにちがいない。

[注] とくに始生代の生物進化、すなわち有機物分解型・従属栄養細菌から、化学合成型独立栄養細菌 (炭酸同化作用の成立)、光合成生物の発生にいたるプロセスをエントロピー代謝の観点から考察することは興味深い問題であろう。しかしこれは紙数を要するので別稿に譲りたい。

5. 現大気中の光合成におけるエントロピー代謝

陸生植物の光合成で炭水化物 (乾燥重量) 1 トンを生産するのに、350 トン (森林) から4500 トン (水稻) の水が必要である。⁽¹⁶⁾ 水中植物ももちろん、それに相応する規模でエントロピーを水圏に棄てている。

さきにみたように理想輻射機関といえども、常温熱 (それに伴うエントロピー) を廃棄するためには、水 (またはそれに相当するエントロピー吸収体) を必要とする。現実の光合成が大量の水を必要とすることは、定性的には容易に理解できる。詳しい議論をする前に、上記の水・原単位 (約500 トン) を簡単な考察で導出してみよう。

太陽光 U のうち、炭水化物の化学エネルギー (エンタルピー) として固定された部分を H_{ps} としよう。自然条件では、光合成の効率 η_{ps} は、1% ~ 3% 程度である。⁽¹⁷⁾

$$\eta_{ps} = \frac{H_{ps}}{U} \simeq 0.02 \quad (20)$$

利用されることなく廃棄される部分 $U - H_{ps}$ は

$$U - H_{ps} = \frac{1 - \eta_{ps}}{\eta_{ps}} H_{ps} \simeq 50 H_{ps} \quad (21)$$

この熱量を常温熱として棄てることは、エントロピーを棄てることであ

$$4S_{ps} = \frac{1-\eta_{ps}}{\eta_{ps}} \frac{H_{ps}}{T_E} \quad (22)$$

る。水1gの気化熱は $L_w=600\text{cal}$ であるから、その蒸散によって廃棄し得るエントロピー量は

$$\Delta S_w = \frac{L_w}{T_E} \quad (23)$$

である。水の所要量は、グルコース1gで $H_{ps}=3.8\text{Kcal}$ とすると

$$\frac{\Delta S_{ps}}{\Delta S_w} = \frac{-\eta_{ps}}{\eta_{ps}} \frac{H_{ps}}{L_w} \simeq 320 \quad (24)$$

となる。これで得られた320トンの水・原単位はほぼ現実の水所要量を再現している。

ここでは、入射光とともに流入するエントロピー $(4/3) (U/T_R)$ を無視し (T_R を無限大とみなし)、未利用部分が常温で熱化する際の生成した S を棄てることだけを考えた。すなわち、入力側のエントロピーを無視しているが、水消費の下限を見積るにはこれでよい。

このようにみると、光合成における水消費の大枠を決める因子は、エネルギー効率 η_{ps} であることがわかる。ところが η_{ps} は、自然条件では小さいが光律速 (水・ CO_2 を十分に供給し、弱い光をあてる) の場合には50%に近い値をとるという結果がある。¹⁷⁾ これは図3の理想効率に迫る驚異的な効率である。

光合成は、光化学系 I・II に大別される極めて複雑な反応段階から構成されている。いまそれ全体で30段階からなるとし、各段階でのエネルギー効率を90%としても、全体では、 $\eta_{ps} = (0.9)^{30} = 0.04$ (4%) となり、自然条件での効率に近い。それでは、実験的に、高い効率 ($\eta_{ps}=20\sim 50\%$) が得られることは何を意味するのであろうか。

この謎を解く鍵は、光律速の実験が (長期的) 定常過程ではないこと、したがってエントロピー的にいって、始状態への復帰が不完全であるような過程が許されていることのうちにある。実際、〈系が高 S 化してもかまわない〉という条件の下では、常温熱を仕事に換えることさえ可能である

(カルノー-機関の等温膨張過程をみよ)。

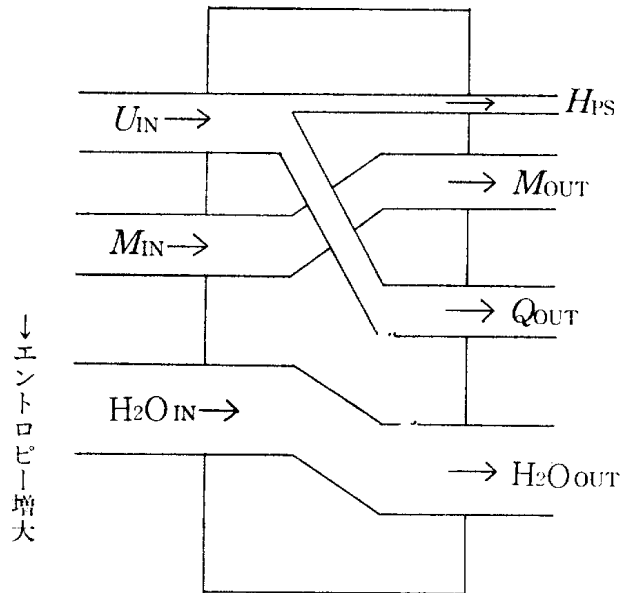


図5 光合成における物質・エネルギー収支

ここで、より具体的に光合成における物質・エネルギー変換を考えてみよう。図5のフローチャートに示されるように、まず太陽光 U_{in} は一部が炭水化物（呼吸による消費を除いた純生産）のエントルピー H_{ps} に転化し、他は廃熱として棄てられる。

つぎに、物質変換をみよう。化学方程式



にあらわれる諸物質のうち左辺を M_{in} 、右辺を M_{out} として示す。(ただし、勝木は両辺から $6\text{H}_2\text{O}$ を消去した式を用いている。これは反応機作を論じるには不適當な表現である。)

このほかに、化学方程式に記されないが、エントロピー廃棄に必要な水があり、これを H_2O_{in} 、 H_2O_{out} で表わす。以下においてこのような物質・エネルギー代謝のエントロピー収支をめぐる安孫子・榎田・勝木そして

筆者の見解を対比する。

安孫子は、(a)太陽光が高い有効温度 T_R もをつことから、直ちに(b)太陽光を仕事と等価のエネルギーとみなして、(c)それが常温熱に劣化 (S 生成) する [$U_{in}/T_R \rightarrow T_{out}/T_E$] とき物質系のエントロピーを減少させ (図5で $M_{in} \rightarrow M_{out}$) 得ると主張する。⁽⁴⁾ そこから、(d)水圏へのエントロピー廃棄 [$H_2O_{in} \rightarrow H_2O_{out}$] を光合成の必須条件ではないと彼は考える。

すでにみたように、(a)は(b)の十分条件にはならず (輻射機関の項参照)、(c)は(d)と矛盾する。なぜなら、たとえ(c)を認めたとしても、その結果生じる Q_{out}/T_E は主に水圏に棄てられるからである。したがって、(d)の考えは誤りとなる。実際、水中植物の光合成の場合、(23)に相当する $T_E \Delta S_{ps}$ の顕熱が伝導で水に移行する。水蒸発が行われなければ、水温が $\Delta T = T_E \Delta S_{ps}/C_w$ だけ上昇する。 C_w は熱を受けとった水全量の熱比熱である。

もとの温度に戻るには、結局(24)に相当する蒸発が必要となる。

結論として、安孫子の所論は整合性を欠いている。

他方、これまでの勝木は以下のような議論をしていた。⁽³⁾ (a')太陽光は地球に達した段階 (葉緑体に吸収される以前に) で、有効温度 $\sqrt{2} T_E$ ($\cong 390K$) になっており、(b')入射光の有効成分 ($U_{in} - Q_{out}$) が炭水化物のエンタルピー (H_{ps}) になる過程自体が低エントロピー化である。このほか、(c')物質系の S 減少 [$M_{in} \rightarrow M_{out}$] と Q_{out}/T_E の廃棄のために水が必要となる [$H_2O_{in} \rightarrow H_2O_{out}$]。この結果 (d')光合成の存立基盤が水圏への S 廃棄にほかならない、ということになる。

筆者の観点からすると、(a')は地球の有効温度を決めるには正しい評価であるが、輻射機関 (葉緑体もこの一種) の有効温度としては過少評価になる。なぜなら前者では、黒体近似において輻射平衡の温度を求めることが問題であり、後者では輻射スペクトルが黒体輻射より短波長 (高エネルギー) 側にずれていることが問題だからである。

したがって、(b')の $(U_{in} - Q_{out}) \rightarrow H_{ps}$ は、高温輻射から良質の化学エネルギーへの変換であり、とくに S 減少と呼ぶにあたらぬ。

(b') でそれ以外の部分および (c')・(d') はほぼ正しい。勝木は光合成の S 収支を試算する際、 S 流入として $U_{in} / \sqrt{2} T_E$ の項を計上していない。⁽⁹⁾ つまり計算上は、入射する太陽輻射を高温 ($T_R \rightarrow \infty$) とみなし、常温熱となった後の S [= Q_{out} / T_E] 廃棄だけを考えている。したがって彼の得た結果は、安孫子以上に太陽光を低 S とみたことになり、水所要量の下限の試算としては全く正しい。この点で、 T_R による太陽光のエントロピー評価は、榎田・勝木の理論を覆えすものではなく、補完するものだったのである。ただし、現在では勝木も太陽光の有効温度を本稿の T_R にとることに同意している。⁽¹⁸⁾

以上の議論で、本稿のテーマに関してはほぼ基本的な論点は尽くされたといえるが、以下で砂漠と森林の安定性をエントロピー代謝の観点からまとめよう。これは環境科学の基礎として有益な知見であろう。

6. 砂漠の安定性と森林の自己維持機能

これまでに述べた地球のエントロピー代謝機構と光合成過程のエントロピー論的取扱いから、砂漠の安定性と森林の自己維持機能を論じることができる。

まず、砂漠では、水循環によるエントロピー代謝機能が欠けており大気の状態は、ほぼ式(19)のエントロピー極大に対応する。しかし、これだけでは〈砂漠だから水がない〉、という同義反復になりかねない。実は砂漠の安定性は、〈砂漠であるがゆえに雨が降らない〉という再生産的構造をもっている。すなわち、砂漠は砂が白いため太陽光をよく反射し、他地域よりも太陽光の反射 (アルベド) が大きい。このため、砂漠上空の大気は同緯度の他地域より冷たい。したがって、ここでは下候気流と高気圧が支配的になり、雨が降らない。そして、下候気流がフェーン現象と同様の効果 (断熱圧縮) で地表の温度を上昇させ、日中の砂漠を灼熱 (エントロピー) 地獄に変えるのである。

結局、このような正フィードバックによって、砂漠は自己維持され、安定化する。実際、中近東やアフリカ北・西岸、南米西岸の砂漠は、沿岸に

あり、湿気を含んだ大気が近くにあっても雨が降らない。それは、このような湿潤大気が上昇気流にならないからである。

とくに、インドのモンスーン地帯に隣接するインド北西部とパキスタン——インダス文明の地——は、今日半砂漠であるが、夏期には湿潤な赤道西風がこの地にも訪れる。しかし、ここでは気団上昇が生じないため、水分は凝結しないのである。R. A. ブライソンはこの地を「擬似砂漠」と呼んだが、まさに適切な表現といわなければならない。⁽¹⁹⁾そして、この種の砂漠は自然史的な乾燥化 (désertisation) というよりもむしろ文明活動による森林破壊から生じた砂漠化 (désertification) というべきであろう。⁽²⁰⁾

他方、森林もまた固有の自己維持機能をもつ——ただし、その安定性は砂漠のそれよりもはるかに脆弱である。森林は、高い吸収率で縦深的に太陽放射のエネルギーを捕える。しかし、そのうち炭水化物のエンタルピーに移行する部分 (3%程度) を除くと、大部分が蒸散水の気化熱 (潜熱) になり、少部分が植物体の温度上昇 (顕熱) になる。

こうして、森林上では湿潤な暖気が発生し、式(19)の値が正になる。この結果上昇気流が生じるが、この気団運動はほぼ断熱膨張となり、大気上層に達するまでに急激な温度低下を生じる。こうして、凝結・降水が生じるのであるが、地球大気の大循環を無視した近似においては、この蒸発と降水は鉛直方向 (同一地域) での水循環となる。結局、森林が雨を呼ぶことになる。

なお、蒸散に用いられる水は、植物が地下から固有の物質輸送システム——主に浸透圧を利用した——によって葉の表面に運び上げたものであり、降水によって再補充される。この物質輸送に必要な力学的仕事も、光合成産物の化学エネルギーによって購われている。

植物のこの水輸送能力と気化能力を媒介にして始めて地下水が大気中に移行するのである。植物なしで毛細管現象だけによる場合には、地下水は前述のように連続的かつ急速に気圏に移行することはできない。また、植物の保水機能なしでは、降水は十分地下に滲みこまないうちに、海へ流出

してしまふ。この点を考えると、熱帯雨林帯が皆伐によって急速に荒蕪地ないし半砂漠に転化することは容易に理解できる。さらに、植生による保水機能が失われた土地は、植物を受けいれる表土層そのものが洗い流されてしまい、雨さえも環境破壊の原因になるのである。

結 論

以上、太陽光の仕事能力・輻射機関の効率とエントロピー廃棄・重力場における熱学系のふるまいおよび光合成におけるエントロピー廃棄の考察を通じて、地球システムのエントロピー廃棄において水循環が第一義的重要性をもっていることを、われわれは再確認することができた。

結局、太陽光が水圏を浄化するという安孫子の見解は倒錯しており、むしろ水循環が太陽光を浄化するというべきであろう。とはいえ、水循環の重要性は、太陽光が高温輻射でないことに起因するのではなく、高温輻射であるにもかかわらず仕事に転化し難いためにエントロピー廃棄が制限要因になることに起因している。

このことを端的に示すのは、地域的生態系を支配する最も基本的な要因が太陽ではなく水であるという事実である。⁽¹⁸⁾ それは、光合成が水循環のサブシステムであることの必然的な結果である。

そして、工業システムが、生態系に優るとも劣らず、水に依存していることも周知の事実である。水循環は地表系での活動全体（無機的自然・生態系・社会系）に対する最も重要なエントロピー代謝機構なのである。さらに、工業システムの物質的基礎をなす化石燃料・鉄鉱石・石灰石など堆積型鉱床をなす地下資源は、水循環およびその部分系としての生態活動の遺産なのである。

参考文献 『科学』1984・5・25

- 1) 柳瀬陸男「砂の上の文字」、『数理科学』1977年7月号：別冊『エントロピーと混沌』サイエンス社（1984）160.
- 2) 槌田敦「調和ある循環を維持するために」、『エントロピー読本』日本評論社

- (1984) 78.
- 3) 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.
 - 4) 安孫子誠也「水圏浄化にはたす太陽光の役割」, 『エントロピー読本』日本評論社 (1984) 93.
 - 5) 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.
 - 6) E. ブロード, 市井三郎・恒藤敏彦訳『ボルツマン』みすず書房 (1957) 106.
 - 7) E. シュレーディンガー, 岡小天・鎮目泰夫訳『生命とは何か』岩波新書 (1951) 130.
 - 8) E. シュレーディンガー『生命とは何か』125.
 - 9) 槌田敦『資源物理学入門』日本放送協会 (1982) 第8章.
 - 10) M. PLANCK, trans. by M. MASIUS: The Theory of Heat Radiation, Dover Publ. New York & London (1959) chapter IV.
 - 11) D. C. SPANNER: Introduction to Thermodynamics, Academic Press, London & New York (1964) 216ff.
 - 12) 河宮信郎「エントロピーと熱力学的使用価値」, 『科学』52 (1982) 177.
 - 13) 野崎弘『熱力学の理論と応用』総合科学出版 (1966) 137ff.
 - 14) 槌田敦『科学』54 (1984).
 - 16) J. ドルスト, 宮原信訳『文明の生命力』TBS ブリタニカ (1981) 150.
 - 17) 藤茂宏『光合成』裳華房 (1973) 106.
 - 18) 勝木から, 84年3月三輪浩 (信州大学) の教示により, 太陽光の有効温度評価に式(4)を用いるべきであることを了解した旨の連絡があった. [本稿付論の勝木稿参照].
 - 19) R. A. BRYSON: The Environmental Future (London, McMillan, 1977), J. ドルスト『文明の生命力』70による.
 - 20) J. ドルスト『文明の生命力』29.
 - 21) P. B. SEARS, 柳田為正訳『エコロジー入門』講談社 (1972) 136.
 - 22) 島津康男・岸保勘三郎・高野健三編著『自然の数理』筑摩書房 (1975) 240.

河宮論文へのつけたし

勝 木 渥

Atsushi KATSUKI

信州大学理学部物理学教室

河宮の論文は、水の循環を無視している安孫子理論,⁽¹⁾ 特に「地上物質のエントロピー低下機構」への批判としては適切なものである。しかし、安孫子理論は、水の循環を無視しているという点において誤っているだけでなく、光合成を考察するさいの物理的モデルとそれに関わる諸概念においても混乱をきわめている。「螢光に関するプランクの法則」と「光合成過程」の章に関する簡単な批判をおこなうことによって安孫子理論の基本的な混乱を明らかにし、河宮論文を補足したい。

光合成考察のための伏線として安孫子の持ち出した「螢光体」は、照射輻射光が何か特別に靈驗あらたかな効能をもつかの如くであり、そのおかげで「温度 T_R の輻射を受けながら温度 T_E に保たれて、螢光を発しながら放射平衡にある物体は一種の熱機関となっているのであり、高温 T から低温 T_R へ熱 Q が移行する過程で自由エネルギー $\mu_E \left(= \left(1 - \frac{T_E}{T_R} \right) Q \right)$ が生じている……」(p. 289 左段3-8行, 下線は勝木による) ののであるらしい。しかし、この「螢光体」の虚飾を剥ぎとってその正体をみれば、それは熱源 (温度 T_R) から熱量 Q を受け取って熱捨て場 (温度 T_E) に熱量 Q を捨てる、それ自体はつねに定常状態を保っている系、を想定したことになる。このような系は何も「螢光体」でなくてもよい。一端を火で熱し (温度 T_R)、他端を水で冷やしている (温度 T_E)、(側面からの熱の出入りはないとした、または長さを0とした極限での) 一本の金属棒 (熱伝導体) でもよい。

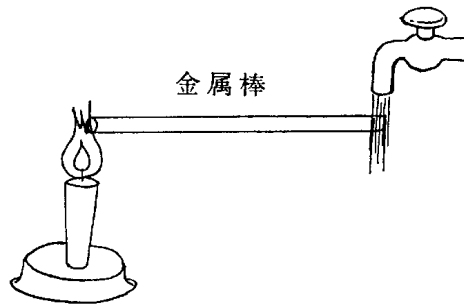


図1 安孫子流「輻射熱機関」の戯画

安孫子は輻射場なるもののエントロピー S_R の変化を

$$\Delta S_R = \left(\frac{1}{T_E} - \frac{1}{T_R} \right) Q$$

で与えているが(式15), ただし原式の $\partial S_R / \partial t$ を ΔS_R と書いておいた), 金属棒モデルでは熱源と熱捨て場とを一緒にした熱溜め全体の正味のエントロピー変化が上式であらわされる。そして, かれが物体表面に発生するとした自由エネルギー μ_R は, 実は熱源から流入するエントロピー Q/T_R を,

$$\frac{Q}{T_R} = \frac{Q}{T_E} + \left(\frac{Q}{T_R} - \frac{Q}{T_E} \right)$$

と分けて書いたのちに, 第2項が負であることから, これを自由エネルギー μ_R をつくり出した負のエントロピーであるとしたにすぎない。(この項に T_E をかけると $-\mu_R$ になる。) 安孫子が「螢光体」について語ったことは, そのまま金属棒についても成立つ。

安孫子の「螢光体」が一種の熱機関となっているのであれば, 焼け火箸もまた一種の熱機関でありえよう。

「光合成過程」の章における安孫子のモデルは, 次の熱機関と同等である: 温度 T_R の熱源から熱量 Q を受けとり, 温度 T_E の熱捨て場に熱量 $Q' + Q''$ を捨てることによって仕事 $W = Q - Q' - Q''$ を産み出す。ここで Q' は熱機関の不可逆性によるものであって $Q' = \phi Q$ ($0 \leq \phi \leq 1$), Q'' は熱機関が可逆だったとしても仕事 W を産み出すために廃熱とならねばならない部分で $Q'' = (Q - Q') T_E / T_R$, W が安孫子のいう反応中心が獲得した

自由エネルギーに相当する。

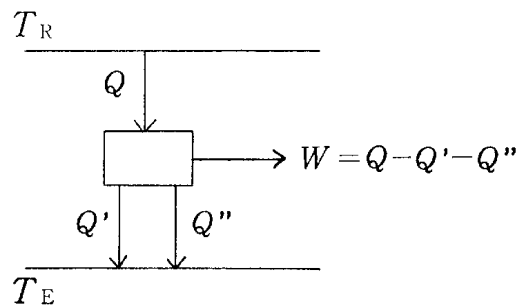


図2 光合成に關与する“熱機関”

安孫子の取扱いは、熱源から流入するエントロピーを

$$\frac{Q}{T_R} = \frac{Q'}{T_R} + \frac{Q-Q'}{T_R} = \frac{Q'}{T_E} + \left\{ -\left(\frac{1}{T_E} - \frac{1}{T_R} \right) Q' \right\} + \frac{Q-Q'}{T_R}$$

と分けた上で、移項して

$$\left(\frac{Q'}{T_E} - \frac{Q}{T_R} \right) + \left\{ -\left(\frac{1}{T_E} - \frac{1}{T_R} \right) Q' \right\} + \frac{Q-Q'}{T_R} = 0$$

と書きなおし、第1項を輻射場のエントロピー増大、第3項 ($=Q'/T_E$) を反応中心の獲得したエントロピーとし、第2項 (<0) を「 $\mu R'$ 」を作り出した負のエントロピーと呼ぶことに相当する。この「負のエントロピー」は $-\left(\frac{1}{T_E} - \frac{1}{T_R} \right) \phi Q$ であるから、 ϕ が大きいほどこの「ネゲントロピー」の大きさ (絶対値) は大きい、ということになっている。

他方、この熱機関モデルで考察すると、仕事 W (すなわち反応中心の獲得する自由エネルギー) は

$$W = Q - Q' - Q'' = (1 - \phi) \left(1 - \frac{T_E}{T_R} \right) Q$$

であって、 ϕ が小さいほど W は大きくなるはずである。* 可逆熱機関においては $\phi=0$ であるから、安孫子流の「ネゲントロピー」は0で、生み出される仕事は $W = \left(1 - \frac{T_E}{T_R} \right) Q$ である。仕事をまったく生み出さず熱伝導だけをする金属棒 (安孫子によればこれも一種の熱機関) では $\phi=1$ であ

るから安孫子流「ネゲントロピー」はむしろ大きく、その絶対値は $\left(\frac{1}{T_E} - \frac{1}{T_R}\right)Q$ である（他方 $W=0$ ）。その中間の熱機関では、生み出される仕事は $(1-\phi)$ に比例し、「ネゲントロピー」の大きさは ϕ に比例している。これはきわめて奇妙な結果である。そもそも安孫子は、太陽光の「ネゲントロピー」を太陽光の有用性をあらわす概念として導入したのではなかったか？ところが、生み出される有用な仕事 W が大きいほど「ネゲントロピー」の大きさは小さく、何ら有用な仕事 W が生み出されないときに「ネゲントロピー」の大きさは最も大きいという結果が得られた。これは、問題としている現象の本質を理解する上で、太陽光の「ネゲントロピー」性なる概念が役に立つどころか、まったく混乱を生むものでしかないことを示している。

* 安孫子は ϕ の領域を $\frac{1}{p_0} \leq \phi \leq 1$ に限り（原式(18)を見よ）、291頁の脚注で「反応中心が獲得した自由エネルギーは、…… $\phi=1/p_0$ と $\phi=1$ の両方で0となる……」と述べている。これは熱機関モデルにもとづく「 ϕ が小さいほど W は大きくなるはずだ」との勝木の結論と矛盾する。安孫子論文で $\phi=1/p_0$ とおいてみると $\mu=0$ が得られるが、これを同論文の(24)または(25)式に入れると $T_R=T_E$ がえられる。これは熱源の温度 T_R と熱捨て場の温度 T_E が等しいということであり、安孫子が議論の大前提として置いている $T_R>T_E$ と矛盾する。このことは、安孫子自身が自分のモデルについてよく理解していないことを、自ら告白したに等しい。⁽³⁾ それは安孫子が下敷きとした安孫子の文献8)で Ross が ϕ と μ とを互いに独立だと仮定して議論しているのをそのままなぞったためであろう。Ross 自身はこの仮定が成立するのは Boltzmann 統計にしたがう non-interacting excitations の場合だけだろう、とことわっているのに——。そして、安孫子が原式(30)の2行あとで「式(29)をみると、熱 Q' は高温 T_R から低温 T_E へ無駄に移行しているようにみえるが、式(30)をみればわかるように、それによって μ の大きさが保たれているのである」と述べている（安孫子の脚注はこの一節に対してつけられている）ことも、安孫子が自分自身のモデルをよく理解していないことを証明している。 Q' が存在するのは T_R と T_E の温度差があり、かつ熱機関が不可逆機関だからである。温度差がなかったり、可逆機関であったりすれば $Q'=0$ なのである。 W を有限にたもつには、 $(1-\phi) \neq 0$ および $T_R>T_E$ が必要だが、かれは $T_R>T_E$ の条件をわざわざ $Q' \neq 0$ であることが必要だと言う具合に表現しているのである。安孫子理論においては温度 T_R, T_E （したがって $T_R>T_E$ ）は所与の前提とされているのに。

安孫子は、輻射場と相互作用する励起可能な分子の集団をもち出すことによって、そのような系で、特別に輻射が「ネグントロピー」をもたらすかのように描きあげた。しかし、安孫子の持ち出した系は、大学教養課程の『物理学』の教科書中の「熱力学」程度の知識で理解可能な、ごくありふれた熱機関と同等なのである。この程度の「熱力学」の知識で安孫子の議論を検討してみると、結局かれのやったことは、熱源から流入するエントロピーをいくつかの項にわけ、そのときあらわれた負の項を「ネグントロピー」と呼んだにすぎない。流入するエントロピーをいくつかの項の和にわけるとき、そのわけ方の中に系の性質（たとえば系の不可逆性による廃熱がどれだけあるか等）が前もって反映されているのに、その系のことは除外して、そうやってわけることによってあらわれた負の項を輻射自体のもつ「ネグントロピー」であるかのように思いこんでいるのである。だから系から取出せる仕事小さいほど輻射の「ネグントロピー」の大きさが大きいという奇妙な結論が出てきてしまうのである。

光合成における太陽光の役割は、光合成の具体的なメカニズムを媒介とすることによって、有効波長領域の光が実効温度千数百度の熱源として機能しうることにある。そして、それ以上に特別な（プラスの）ことは何もない。

光合成の結果生成された炭水化物は、高エネルギー・低エントロピーの物質であって、すでにあった液体の水が（水蒸気への変化を前提として）低エネルギー・低エントロピー物質であることと好対照をなす。炭水化物を高エネルギーたらしめたのは太陽光のエネルギーだが、それを低エントロピーたらしめたのは水——水蒸気になって行った液体の水——である。そして、生物が炭水化物と水という熱的性質の相反した二つの拮抗する低エントロピー物質をもつことが、微妙なバランスのもとで生命活動が進行してゆくことを可能にしているにちがいない。⁽²⁾ 光合成の役割を論ずる場合、光合成によって作り出された炭水化物が高エネルギー・低エントロピー物質として、生物界でどのような役割を果すのかを論じ落してはならないと思うが、それについては（もし機会があれば）別の機会に論じたい。

文 献

- (1) 安孫子誠也『科学』54, 285—293 (1984).
- (2) 勝木 渥『発酵と工業』41 1031—1041 (1983); 『エントロピー読本』日本評論社 (1984) pp. 98-103.
- (3) 河宮による注釈:

文献(1)の式(8) $\mu = kT \ln p$ は、理想溶体とみなし得る希薄溶液に対して成立するもので、励起状態の分子濃度が p 倍になった場合の化学ポテンシャル変化に適用することは誤りである。なぜなら、この場合、基底状態と励起状態とではエンタルピーが違ふからである。励起状態は基底状態よりも 0.5eV 程度高いエネルギー状態にある。実際、常温では kT の値が 0.026eV の程度であり、エントロピー項は無視できる程小さい。要するに、系の非平衡性は、エントロピーが低下したことにはではなく、エンタルピーが高くなったことに帰着するのである。この式が違っているために、これ以降の議論が全体的に狂ってくる。たとえば、この式の μ と(14)式の μ を等値することはできない。