

物性若手夏の学校(1989) 講義 (1989.8.7.)

エントロピーの見地からの 統一的自然像への試み

一カルノー主義者による

信州大・理 勝木 渥

§ 1. 序論

1. エネルギー保存則を軸とする「エネルギーの見地からの統一的自然像」はすでによく確立されており、中等学校教育レベルにおいても教えられている。しかし、それだけでは「片手落ち」である。真に統一的自然像でありうるためには、エントロピーの見地からの補完が必要である。「エントロピーの見地からの統一的自然像」の軸となる概念は、不可逆過程におけるエントロピー増大則である。

エネルギー保存則は、物質の関与する自然現象において、変化前の或る状態が変化して別の状態になったとき、その変化の前後で変らぬままであるものが何かを示し、変化の前後の状態を等式で結びつける。(等式で結びつけるので、変化の方向は与えない。)

2. エントロピー増大の法則は、(エネルギー保存則とは対照的に) 自然現象において変化の起っていく方向を与えるもので、変化前の状態と変化後の状態とを不等号で結びつける。

エントロピーは、熱が自然に(他に何らの変化を残すことなく)低温の物体から高温の物体に移動することはないという日常的経験を、厳密な論理的思弁的考察を通して法則の域にまで高めた結果、把握されるにいたった概念である。それは大雑把には、

- i) 熱量 Q の(高温 T から低温 T' への)移動 (=エネルギーの拡散)に伴う、その量 S の変化が $\Delta S = Q/T' - Q/T$ であるような或る量であり、また
 - ii) 1モルの物質の拡散[体積 v から体積 V ($V > v$) への]に伴う、その量 S の変化が(理想気体の場合には) $\Delta S = R \log(V/v)$ であるような或る量である。
3. 現象それ自体としては全く別個の現象である i) と ii) が、エントロピー概念の導入により、エントロピー増大という1つのことの2つの側面となる。(ただし、たとえば水の気化の場合、気化の潜熱 L を吸収することによるエントロピーの増大が L/T 、水が気化して体積が増大することによる分が何か ΔS 、合わせてエントロピーの増大は $L/T + \Delta S$ であると、誤解しないでほしい。潜熱 L を吸収して水の状

態が変化して水蒸気になるが、その状態変化(明らかに体積は増大している)に伴うエントロピーの変化が、まさに L/T に等しいのである。)

「熱の伝播＝エネルギーの拡散」及び「物質の拡散」、これがエントロピー増大の本身である。エントロピー増大の本質は拡散にある(エントロピーの大家であると自認しているらしい人さえもがしばしば誤解するように「混合にある」のではない)。混合は、拡散を伴っている限りにおいてエントロピー増大に寄与するが、拡散を伴わなければエントロピー増大をもたらさない。

誤解の例：杉本大一郎は著書『エントロピー入門』(中央公論社、1985) 108 頁の「混合によるエントロピーの変化」に関する基礎的な解説部分で、次のような説明をしている——：壁をへだてた体積 V の箱のそれぞれに異なる種類の気体 1 と 2 が入っていて、その圧力・温度はたがいに等しいとする。このとき各気体のエントロピーを S_1 、 S_2 とすれば全エントロピーは $S_1 + S_2$ である。境目の壁を外せば両気体はついには一様に混ざってしまうが、このときの全エントロピー S' は $S_1 + S_2$ より大きい。一様に混ざってしまった気体を断熱的かつ準静的に圧縮してもとの体積 V にもどしてやってもエントロピーは S' のままであって、 $S_1 + S_2$ より大きい。「はじめの状態を二つ重ね合わせたただけなのに、エントロピーが高いのはなぜだろうか。それは一様に混ざるように重ね合わせたからである」(「」内、原文のまま)。

この杉本の説明は正しくない。“圧縮後の気体はそれぞれもとの体積 V に戻ったのだから、はじめの状態を二つ重ね合わせただけのものになった”のでないことは、理想気体の自由膨張は温度変化を伴わないが、断熱圧縮は温度上昇を伴うという初歩的な常識の持ち主には、自明である。体積は元に戻ったが、温度が上昇している。

『パリティ』誌連載の講座「エントロピー」の中で杉本は「エントロピーに関係したことでは混乱が後をたたないことに関連して、最近いろいろな経験をした」が「同時にわかったことは、熱力学という学問、とくにエントロピーに関係したことは、全部がよくわかるか、それともほとんどわからないかの、どちらかしかないことである」と断言している[第1回、『パリティ』1 No.4 (1986) p.62]。私は、無知や思慮不足や思索の怠惰や思い上がりによる初歩的基礎的事項に対するとんでもない思い違いと、思索への専念や偶然(にみえる必然)的な直観による高度の事象に対する卓説や卓見とが、一般に一個人のうちで現実にはしばしば共存しうると考えているが、「ことエントロピーに関するかぎり、その理解は全か無かである」との杉本命題をかりに受け入れて、これを杉本自身に適用してみたいとの誘惑を抑え切れない。杉本命題に基づく杉本の勝木観は「勝木＝無」であるらしいが(『科学』55 (1985) 541)、もし、上記の私の指摘がかりに妥当であったとすると、杉本命題を杉本自身に適用した結果はどのような結論をもたらすであろうか。

4. いくつかの問題をエントロピー増大則一本槍で論じてみる

(ア) 水蒸気は温度が下がると凝結する。これはエントロピー増大則に反する？ 否。

たしかに、水蒸気→液体の水のさい、水のエントロピーは減少する： $\Delta S < 0$ 。

しかし、このとき、潜熱 L が環境に放出される。環境の温度を T とすれば、このことによる環境のエントロピー増大は L/T である。 $L/T > |\Delta S|$ なら、つまり低温なら、水蒸気が凝結することによって、着目した系と環境とを含めた全系のエントロピーが増大する。もう少し議論を進めると、

(イ) 飽和蒸気圧と露点

水と水蒸気のエントロピー差は水蒸気圧 p が低いほど大きい。

水→水蒸気のさいのエントロピー増大を $\Delta S(p)$ とする。このさい、環境から潜熱 L を吸熱し、環境のエントロピーが L/T だけ減少する。

$\Delta S(p) = L/T$ であるような $p(T)$ が与えられた温度 T での飽和蒸気圧であり、

$L/T = \Delta S(p)$ であるような温度 T が、水蒸気の分圧が p である大気の露点である。飽和蒸気圧は温度が下がれば下がる。露点は蒸気圧が下がれば下がる。

〔付〕気化の潜熱と表面張力と分子の大きさ

豆腐を、縦・横・水平に包丁を入れて「賽の目」に切るように、 $1\text{ cm}^3 = 1\text{ g}$ の立方体の水に包丁を入れて「賽の目」に切ることを想像しよう。包丁を1回入れるごとに面が2枚できる。水分子の大きさが $1/n\text{ cm}$ 程度であるとする、分子をばらばらに切り分けるためには $3n$ 回包丁を入れる必要がある。すると面は $6n$ 枚でき、その全表面エネルギーは $6n\gamma$ (γ は表面張力) となる。これを気化熱 L に等しいと置いて、分子の大きさ $1/n$ が評価できる。水に対して、 $\gamma = 72$ (25°C), 59 (100°C) dyne/cm , $L = 583$ (25°C), 540 (100°C) cal/g を用いれば、 $1/n = 1.8$ (25°C), 1.6 (100°C) $\times 10^{-8}\text{ cm}$ が得られる。〔分子の大きさのこの見積り方は、ハンガリーの高校教師 Dr. TÓTH Eszter (トート・エスター) 女史による。〕

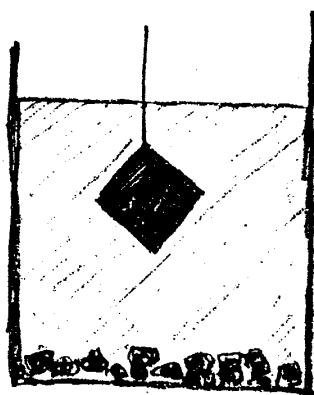
(ウ) トルートの規則 (Trouton's rule): 液体1モル当りの気化熱 L とその液体の沸点 T_B との間に実験的に関係 $L/T_B \sim 21\text{ cal/mol}\cdot\text{K}$ が成り立っている。このことは、液体の沸点におけるエントロピー増加 ΔS が、液体にほぼ共通して、 $21\text{ cal/mol}\cdot\text{K}$ であることを示唆する。なぜなら、この液体の蒸気が凝結するとき、凝結にともなうエントロピーの減少 $|\Delta S|$ と気化熱の受取りによる環境のエントロピー増加 L/T とが等しくなる温度が、沸点だからである。

(エ) 似たような現象に、溶液からの結晶の成長がある。

結晶になる前、溶質は溶液中の広い領域にわたって存在しており、それが結晶として狭い領域に集中・析出するのであるから、この部分にのみ着目すれば、エントロピーは減少している。他方、このさい溶媒は蒸発している。溶媒の蒸発＝液体から気体への状態変化にはエントロピー増大を伴う。溶質と溶媒の両方を考慮にあれば、エントロピー増大しているのである。(あるいは、飽和溶液から溶媒が蒸発すると、濃度が飽和の臨界濃度を上回り、溶質が析出する。——いずれにせよ、溶媒の蒸発なしには、溶液からの結晶成長は生じない。)

〔付〕講義後の討論

溶液からの結晶成長の実験を実際にしたことのあるらしい信州大学の学生が、図のような場合「小さな結晶粒がなくなって、大きなものが成長する」と勝木にコメントしたことを講義中に紹介し、その事実の真偽のほどは確かめていないが、もし事実だとすれば、大きなものの所に析出した量よりも、溶けて消失した小粒子の量の方が多くて、全体としてエントロピーが増大しているのだろう、と好い加減のことを勝木は述べた。講義後、この点について「一方が溶け、一方に析出するとすれば、溶液の濃度は飽和濃度以外にはありえないはずだ」とか「この場合も溶媒の蒸発は必要条件か」とかの疑問が出され、議論した。その結果「すべての結晶粒が集まって一つの大きな結晶になったとしても、そのエントロピーは(示量的な状態量であるから)変わらない。全表面積は減少するから、表面エネルギーが減少——つまり熱化する。このことによるエントロピーの増大がある。飽和溶液の中に幾つかの結晶が散在しているとき、溶媒の蒸発を伴うことなしに、それらが一つの大きな結晶になることは可能である。それは(一見エントロピー増大則に反するかの如くであるが、実は)エントロピー増大則にかなっている」という結論になった。



(オ) 系の自由エネルギー極小の状態とは、系と外界とが平衡状態にある場合の、

「系+外界」のエントロピー極大の状態である。

系の状態を表わす独立変数として T, V をとったときは、熱力学的特性関数として Helmholtz の自由エネルギー F を、独立変数を T, P にとったときは Gibbs の自由エネルギー G をとるのが“便利である”などとして、われわれは適当に(適切に)使い分けているが、その根拠を訊かれたとき、自分自身に納得の行く、質問者に対して説得力のある答えが出来るか？

熱力学第1法則により、系の得る熱量 dQ は $dQ = dU + p dV$ である。等積過程では $dQ = dU$ 。系と外界が熱平衡にあって、両者の温度が等しければ、系が熱 dQ を得る、つまり外界が $dQ = dU$ を失うことによる外界のエントロピーの減少が dU/T であって、反応は $dS - dU/T > 0$ の方向に進行する。両辺に $-T$ を乗ずれば、 $dU - TdS < 0$ 。 $dU - TdS$ は等温過程では dF ($F \equiv U - TS$) に等しい。つまり、反応は $dF < 0$ の方向に進行する。

等圧過程では $dQ = dU + p dV$ 。系と外界の温度が等しければ、系が dQ を得る、つまり外界が $dQ = dU + p dV$ を失うことによる外界のエントロピーの減少が $(dU + p dV)/T$ であって、反応は $dS - (dU + p dV)/T > 0$ の方向に進行する。両辺に $-T$ を乗ずれば、 $dU + p dV - TdS < 0$ 。 $dU + p dV - TdS$ は等温・等圧過程では dG ($G \equiv U + pV - TS$) に等しい。反応は $dG < 0$ の方向に進行する。

本来、系と外界とを合わせた全系のエントロピーを考えて、その増す方向に変化が起こると考えるべきであったことが、(外界を捨象して)系の状態量だけで論じうるようになったのは、系と外界との平衡(同温、あるいは同温・同圧)を前提としているからである。

(カ) Clausius の不等式 = $\{- (\text{熱源のエントロピー変化})\}$

エントロピー概念が導入される前提として Clausius の不等式 $\oint \frac{dQ}{T} < 0$ があるわけだが、これをエントロピー増大則の目で見ると、一見奇妙に思えたりする。それは、 dQ/T がエントロピーの微小変化で、それを積分したものはエントロピー変化のはずだから、エントロピー増大則によって、正になるはずだ、と思えたりもするからである。しかし、熱源と熱のやりとりをして状態が変化する、着目する系(作業物質)は、結局は循環過程で元に戻っているのだから、状態量たるエントロピーも元に戻っており、系のエントロピー変化は従って 0 である。 $\oint \frac{dQ}{T}$ は、実は熱源のエントロピー変化にマイナスを付けたものである。これが負になることは、エントロピー増大則にかなっている。朝永振一郎は『物理学とは何だろうか』の中で、これをエントロピーの発生と結び付けている。発生したエントロピーは(系=作業物質は元の状態にもどるのだから)、熱源が引き受けざるをえないのである。

(キ) 遺伝情報と誤写

ひとつづきの区別できる N 個の場所と、そこにしまうべき区別できない N 個の白玉

があるとし、それぞれの場所での白玉のエネルギーを0とする。白玉のうち、1個を黒玉に変えると、玉のしまい方は N 通りになるから、この場合のエントロピーを $k \ln N$ とする。ある場所での黒玉のエネルギーを $E (> 0)$ とすると、白玉が1つ黒玉に変わるためには、環境(温度 T)から熱 E をもらわなくてはならない。さて、このような系と環境とを含めて考えたとき、白玉が1つ黒玉に変わるとき、全体のエントロピーが増大するのは $k \ln N - E/T > 0$ 、すなわち $N > \exp(E/kT)$ のときである。つまり E が一定なら N が増せば“誤写”を生じ、 N を増しても“誤写”が生じないためには E が大きくなってはならない。生物の進化を遺伝子に盛り込まれる情報量の増大、したがって今の簡単なモデルでは N の増大、と考えることにすれば、 N が増しても“誤写”が生じないように、 E が大きくなって行く過程が進化である、といえないかと思ったのだが、遺伝情報を担うDNAは“進化の度合いの進んだ”生物でも、そうでない生物でも同じであって、 E も同じであると見なすべきであろうから、進化についての上のような解釈はいささか安直に過ぎたようだ。

5. エネルギーは系の状態変化にさいして(現象に関与するすべての物質を洩れなく考慮に入れるならば)つねに保存するものであって、変化の前後において状態が互いに如何なる関係にあるべきかを指定し、エントロピーは系の状態変化にさいして(現象に関与するすべての物質を洩れなく考慮に入れるならば)つねに増大するものであって、変化の方向を指定する。真に統一的な自然像は、この2つの根源的な概念に基づくことよってのみ確立されうる。エネルギーとエントロピーに代わって自由エネルギーやエクセルギーを現象理解の鍵としようとする立場も見受けられるが、それらはいずれもエネルギーとエントロピーとから誘導される概念であり、特定の個々の現象の理解のためには便利で有用なものたりうるが、統一的自然像形成のための根源的な概念ではありえない。またエントロピーは関係式 $S = k \log W$ によって熱力学と統計力学との仲立ちをしており、この点でも統一的自然像形成のための根源的な概念としての資格を(エネルギーとともに)備えている。

§ 2. 生物の問題

1. エントロピー的視点に立ち、エントロピー増大則にのっとって自然界を眺めるとき、直ぐ目に入る不思議な現象は、生物の示すさまざまな現象、一見エントロピー増大則に反するかのような現象である。いや、わざわざエントロピーを持ち出すまでもなく、「生きる」ことにともなう現象には奇妙なこと、答えるべきことが沢山ある。

例えば「呼吸」についても、われわれはそれを「きれいな空気を吸って、汚れた空気を吐く」ことだと考えている。しかし、吸うのは O_2 で、吐くのは CO_2 である。 C だけ余分にくっつけて吐いているのである。呼吸という行為は不経済な行為だろうか？ また、水を飲むことについても、飲むのは H_2O であり、出すのは、たとえば尿素を加えて $H_2O + CO(NH_2)_2$ である。これもまた、不経済な行為なのだろうか？ 一般に「生きる」ことはなにか、不可避免的に「不経済」なことなのだろうか？

人はなぜ、水を飲み・物を食べ・息をするのか？ なぜ、地球にだけ生命が存在して、月や火星や金星には生命が存在しないのか？ なにが、地球を他の星と区別しているのか？ 等々。

2. これらの疑問にこたえる鍵はエントロピー的視点に立つことにある。

Schrödinger はその著書の中で、「生物体は“負エントロピー”を食べて生きている」と述べた。これは生命の本質を理解する鍵がエントロピーにあることを示唆した、きわめて含蓄の深い言葉である。[岡・鮎 著『生命とは何か』(岩波新書, 1975, p.123)]。

Schrödinger とは別の立場から生命の特質を解明しようとした人に、生化学者江上不二夫がいる。江上はその著書の中で「生体内でおこる生化学反応はすべて生命の存在を特に前提としなくても起りうるものであり、この点からは、一言で生命の特質を描き出すものではなく、生命の存在と不存在とを区別するものではなく、生命を定義することはできない。したがって、われわれは生命とは何かへの観念的な規定を求めるのではなく、生命現象の化学的・物理的な地道な研究を通じて、および生物の存続を可能ならしめている生物の性質(生物の定義ではない)は何かを明らかにすることを通じて、生命の最も本質的な特性の理解へ到るべきである」という意味のことを主張している。[『生命を探る(第2版)』(岩波新書, 1980) 1, 2 章]。これは神秘主義に道を開かない卓見であるが、同時に、生命の本質を理解する鍵となる概念をつかみそこねていることからくる態度でもあるように、わたしには思える。鍵となる概念、それはエントロピーである。碩学江上の主張は、エントロピーの視点ぬきで、生命現象の化学的・物理的素過程の中に生命の存在なしにはありえない何か固有のものをみつけようとしても、実験手段・実験技術の高度化・精緻化をともなう研究の進展は、どのような素過程も生命の存在を特に前提としなくても生じうるとの結論をもたらすにちがいない、ということを用意するものである、と私は思う。

3. 生物の不思議

生物の示す特徴的な特徴——個体の維持・成長・増殖などの現象(少し恰好よく言えば「正常な特異的構造の積極的維持」)は、一見エントロピー増大則に反するように見える。これに対しては 2つの立場がありうる。すなわち、① 生物(生命)はエントロピー増大則があてはまらないような特別な物質だ、とする立場と、② 生物(生命)にもエントロピー増大則はあてはまる、とする立場である。② の立場に立つのが科学の立場である。

なぜなら、生物(生命)は極めて特殊な存在様式であるとはいえ、物質の一般的な存在様式のひとつであり、その特殊性は一般的なものの中の或る特別なものとしての特殊性であって、一般性の埒(らち)外に出るような、一般からの例外であるような、特殊性ではないからである。

すると、「では、何故エントロピー増大則にあてはまらないようにみえるのか」という問題が出てくる。Schrödinger は、それは、生物が“負のエントロピー”を食べるからだといった。これは、生命の本質を理解する鍵がエントロピーにあることを示唆した、本質を衝いた指摘であるが、しかし、この言葉自体は「なぜ生物はエントロピー増大則に反した存在であるかのようにみえるのか?」という疑問を答の形で表現したもので、疑問に対する本当の答にはなっていない。本当の答は、Schrödinger が「生物は“負のエントロピー”を食べる」という言葉で表現したことの实体を具体的

に説明することを通じてのみ、得られる。

4. 生物（生命）と環境

問題解決の鍵は「生物が、閉じた系ではなく、外界（環境）と熱や物質をやりとりする開放系だ」ということにある。エントロピー増大則は閉じた系について成立つものである、あるいは「ある現象に関与した物質を洩れなく考慮にいれば、変化の前と後の状態とでは、後の方がエントロピーが増大している」ということを意味している。着目した系以外の部分の状態変化を見落とすとき、（生物でなくても）エントロピーが減少したように見える例は、§ 1. 4. (7), (i), (v) を見よ。

「負のエントロピー」を食べる」とは、生物が外界（環境）から低エントロピー（状態）の物質を取り入れて、熱または高エントロピー（状態）の物質を外界（環境）に排出する、ということである。このようなエントロピー廃棄ができるような機構を生物は備えていなければならない。広く散在していた物質を摂取・吸収し、自分の体の所定の位置に付け加えて、生物が成長して行くとき、その部分に着目すれば、エントロピーは減少している。

このとき、これに付随する何らかの現象があって、そこでは何か低エントロピーの物質が高エントロピーの物質に変化し、

生物	→	生物(成長)	: エントロピー減少	
何か	→	何か	: エントロピー増大	
「何か」は何？				
低エントロピー物質	→	生物	→	高エントロピー物質
(環境)		(維持・成長)		(環境)

これら全体をひっくりめば、生物体部分でエントロピーが減少していても、全体ではエントロピーが増大する。上の枠内にそのことを図式的に描いた。（その「何か」が何であるかは、次の次の章 (§ 4) で論ずる。）

「環境」は単なる「外界」ではない。「環境」が「環境」であるための必要条件がある。生物は環境から低エントロピー物質を取り入れて、高エントロピー物質を排出するのであるから、生物が生きつづけていくことが出来るためには、環境自体が低エントロピー状態を保ちつづける必要がある。環境は生物に低エントロピー物質を取り込まれ、高エントロピー物質を排出されるのだから、環境自体が自分の環境に対してエントロピーを廃棄することが出来ないと高エントロピー状態になってしまい、生物に低エントロピー物質を供給出来なくなる。つまり環境が環境でありうるためには、環境の環境が必要である。同様に、環境の環境が環境の環境でありうるためには、環境の環境の環境が必要である。環境の環境の環境が環境の環境の環境でありうるためには、環境の環境の環境の環境が必要である（以下同様 ……）。このように、環境は「入れ子構造」になっており、エントロピー廃棄の機構は多重構造をなしている。このような構造をもった外界が環境なのである。

例えば、われわれの細胞は、環境としての血管（動脈）・血液から低エントロピー物質ならびに炭水化物を低エントロピー物質として機能させるのに必要な酸素を取り入れ、老廃物および二酸化炭素（いずれも高エントロピー物質）を血管（静脈）中に排出す

る。これら血液中の高エントロピー物質は、汗腺・肺・腎臓等において、血液から取り去られ、さらに汗・呼気・尿として体外に排出される。

地球上の生命にとって、{環境の環境の……環境} $\equiv \lim_{(N \rightarrow \infty)} \{環境の\}^N$ 環境 = 地表であり、地球にとっての環境は、Space (宇宙空間ないし惑星空間) である。Space は広大であるから、Space の環境は、あらわに考慮しなくても良い。

§ 3. 地球

1. 「生きている」星——地球

地球上に生命が存在しており、生命もまた地球の一部であるから、その意味で地球を「生きている」星と呼ぼう。「生きている」星の必要条件是、エントロピー廃棄機構を備えていることである。では、地球に備わっているエントロピー廃棄機構は、具体的にどのようなものか？ それは太陽と水循環である。

水循環によるエントロピー廃棄のメカニズムは植田によって指摘された。すなわち、水は地表で熱を吸収して水蒸気になり、上空に昇って、上空で熱を放出して水に戻る。地表の温度は $T_g \sim 300\text{K}$ とみなすことができ、上空の温度は $T_u \sim 250\text{K}$ であるから、熱 Q を地表で吸収し、上空で放出することにもなう廃棄エントロピー量は $-Q/T_g + Q/T_u$ であって、これは正である。このようにして、地球はエントロピーを宇宙に棄てている。

すると、次に出てくる問題は、なぜ、地表の温度は $T_g \sim 300\text{K}$ でありうるのか？なぜ、上空の温度は $T_u \sim 250\text{K}$ なのか？ ということである。

水循環の役割として、地表で Q/T_g のエントロピーを吸収して上空で Q/T_u のエントロピーを放出する、差引 $Q(T_g - T_u)/T_g T_u$ のエントロピーを棄てる、という具合に差引のエントロピー差を強調するよりは、水は地表での低温熱溜として機能しており、熱力学の思弁的推論過程における思弁的低温熱溜が ∞ の熱容量によって温度を一定に保つのに対し、現実の低温熱溜たる液体の水は、熱を受け取ったとき、水(の一部)が気化することによって温度を一定に保つ、この機構によって思弁的な低温熱溜が持つべき特性を現実を持つ、そして、水循環は低温熱溜の再生機構である、という具合に把握することが、カルノーのそもそもの「冷たさの重要性」の強調*とも大いに通じあうところがあって良いのではないか、という気もしないではない。

*「蒸気機関で動力が発生するのは、じっさいに熱素が消費されるためでなく、熱い物体から冷たい物体への熱素の移動……によるのである。……この原理は熱によって動かされるすべての機関に適用できる。この原理によれば、動力を得るためには、熱を作りだすだけでは不十分であって、冷たさをも供給しなくてはならない。冷たさなしには、熱は役に立たないのである。」(カルノー「火の動力……についての考察」『カルノー・熱機関の研究』広重徹訳・解説、みすず書房、p.43.)

2. 地球の状況

i) 太陽と地球の関係を、まず考えてみよう。

太陽の表面温度は $T_\odot \sim 5770\text{K}$ 、半径は $R_\odot = 6.96 \times 10^8 \text{m}$ であり、太陽—地球間の距離は $D = 1.5 \times 10^{11} \text{m} = 1 \text{天文単位}$ である。Stefan-Boltzmann の法則によって、温度 T の黒体から単位時間に単位面積を通して放出されるエネルギーは $U = \sigma T^4$ (あるいは、エネルギー密度が $U' = \sigma' T^4$) であるから、地球のところでの太陽輻射の温度 T_D を、そこでの太陽輻射の全エネルギー密度と等しい全エネルギー

ギー密度をもつ黒体放射の黒体温度に等しいとみなせば、 $T_D \sim 393\text{K}$ がえられる。なぜなら、 $(T_D/T_\odot)^4 = (R_\odot/D)^2$ だから。

ii) 地球の上空の温度を、次に求めてみよう。

地球は太陽放射のエネルギーをその直断面で受け取る。地球の半径を R とすれば、地球が単位時間に受け取るエネルギーは $\sigma T_D^4 \cdot \pi R^2$ である。地球から宇宙空間への放射は地球の全表面からなされる。その表面温度(=上空の温度)を T_U とすれば、地球が単位時間に放出するエネルギーは $\sigma T_U^4 \cdot 4\pi R^2$ である。吸収熱量=放射熱量とおき、 $T_D \sim 393\text{K}$ を用いれば、 $T_U \sim 278\text{K}$ を得る。

実は、地球は太陽放射中 r ($\sim 30\%$, r : 反射率・アルベド) だけは吸収せずに反射する。したがって、吸収熱量=放射熱量の式は

$$(1-r)\sigma T_D^4 \cdot \pi R^2 = \sigma T_U^4 \cdot 4\pi R^2$$

となり、 $r \sim 0.3$, $T_D \sim 393\text{K}$ を入れると、 $T_U \sim 254\text{K}$ が得られる。上空の温度が約 250K であることは、このようにして決まっているのである。

iii) おまけ：惑星の表面温度 T_n と内部熱源

太陽-惑星間の距離を n 天文単位、実効反射率を r とする。ii) と同様な議論により、 $T_n = T_D (1-r)^{1/4} / (2n)^{1/2}$ が得られる。当該惑星の観測された表面温度 T (観測値) が、 T (観測値) $> T_n$ ならば、惑星内部に熱源があると推定される。

iv) 大気存在と温室効果；地表の温度

地表は大気でおおわれている。大気は2つの主要な性質をもっている。その第1は太陽放射に対してはほとんど「透明」で、赤外放射に対しては「不透明」である、ということであり、その第2は水より分子量が大い、ということである。

第1の性質から「温室効果」、すなわち T_g (地表の温度) $> T_U$ (上空の温度) が出てくる。この温室効果の結果として、実際 $T_g \sim 15^\circ\text{C} = 288\text{K} > T_U \sim 254\text{K}$ となり、地表の温度(平均 $\sim 15^\circ\text{C}$) は、水が液体で存在できる温度でありうるのである。

(楽屋話) 私が、私の学部の地質学科のある同僚に、地球が「生きた星」でありうるための水循環の重要性を語ったとき、その同僚は、地球に最古の海ができてから四十数億年の間、地表で水が液体で存在しつづけたことが驚異的だ、と言った。それで私が、i), ii) の考察をして上空温度を見積もってみたのだが、こんな簡単な考察で、上空の温度 250K が出てきたので、いささか意外だった。天文学の初歩的な本を調べて、この算出法でよいことを確かめた。地表の温度が上空の温度より高くなるのは、温室効果によるが、温室効果を簡単なモデルで示すことができる。

[付] 「温室効果」の、ごく簡単な考察——1枚天井モデル, N 枚天井モデル

地表を G (Ground), 上空を U (Upper sky) とあらわすことにする。

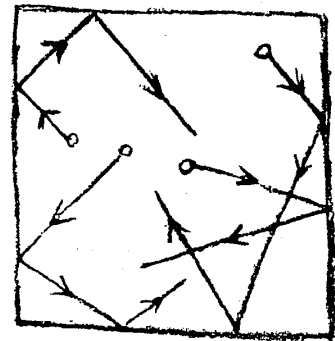
大気効果を、上空に張られた1枚の天井——太陽放射に対して(30%反射するほかは)完全に透明で、地表からの放射に対して完全に不透明な——で近似する。このとき、単位面積当り、 G が受けとる熱は $(1-r)\sigma T_D^4/4 + \sigma T_U^4$ であり、放出する熱は σT_g^4 であるから、 $(1-r)\sigma T_D^4/4 + \sigma T_U^4 = \sigma T_g^4$ が成立ち、また、 U が受けとる熱は σT_g^4 であり、放出する熱は $2\sigma T_U^4$ であるから、 $\sigma T_g^4 = 2\sigma T_U^4$ が成り立つ。これから $T_g = 2^{1/4} T_U$ が得られ、 $T_U \sim 254\text{K}$ より $T_g \sim 302\text{K}$ が得られる。この値は地表温度の平均値 $15^\circ\text{C} = 288\text{K}$ をやや上回るが、天井の性質を少し変える(太陽放射を若干吸収し、地表からの放射を若干透過させる)ことにより、地表温度の計算値を下げるができる。

(天井が太陽放射を割合 s だけ吸収し、地表からの放射を割合 t だけ透過させるとすれば、 $T_g = \{(2-s)/(1+t)\}^{1/4} \cdot \{(1-r)/4\}^{1/4} T_D$ が得られる。[] 内は ii) で算出した T_U に等しい。 $(2-s)/(1+t) = 1.653$ であれば、たとえば $s = 0.1$,

$t=0.15$ であれば、 $T_0=288\text{K}$ が得られる。) また、太陽輻射に対して完全に透明で、自分の直ぐ上と下の天井からの輻射に対して完全に不透明な天井を N 枚張り (一番上の天井は太陽輻射を r の割合だけ反射し、一番下の天井は地表からの輻射に対しても完全に不透明だとする)、1枚天井の場合と同様な考察をすれば、地表の温度は一番上の天井の温度の $2^{N/4}$ 倍になる。(外から見て、 i 枚目の天井に吸われる輻射のエネルギーが $(1-r)\sigma T_D^4/4 + \sigma T_{i-1}^4$ 、 i 枚目の天井から出てくる輻射のエネルギーが σT_i^4 であり、また $(1-r)\sigma T_D^4/4 = \sigma T_1^4$ であるから。) 金星の濃厚な大気存在による灼熱地獄は、このようなモデルで近似できよう。

第2の性質、空気の組成は $4\text{N}_2 + \text{O}_2$ であって、水より“分子量”が大きいことは、水蒸気が「浮力」によって上昇することを可能ならしめる。

水蒸気を大量に含む空気が風船の中に入っているわけではないのだから (湿った空気の比重が乾いた空気のそれに比べて小さいしろ)、「浮力」によって上昇するという表現は何か奇妙に聞こえるかも知れない。特に教養部の『物理学』の教科書の「気体分子運動論」のところで、容器の壁にぶつかる分子の運動として、図のような図を見なれていると――。



しかし、“空気分子”の平均自由行路は、下に示すとおり、 10^{-5}cm の order である――：

0°C 、1気圧の空気、 22.4L 中に 6×10^{23} 個の“空気分子”があるから、1分子当りの体積は $3.7 \times 10^{-20}\text{cm}^3$ 、 1cm^3 中の分子数は 2.7×10^{19} 個である。“空気分子”の体積を水分子のそれに等しいとみなし、かつ分子を球形だとみなせば、分子の半径は $4\pi r^3/3 = 18\text{cm}^3/6 \times 10^{23}$ より、 $r \sim 2 \times 10^{-8}\text{cm}$ と見積もられ、その断面積は $4\pi r^2 \sim 5 \times 10^{-15}\text{cm}^2$ と見積もられる。これに平均自由行路 λ をかけたものが、“空気分子”1個当りの体積に等しいと置いて、 $\lambda \sim 0.74 \times 10^{-5}\text{cm}$ が得られる。

他方、“空気分子”の速さは $Mv^2 = 3RT$ (M は分子量、 $M \sim 29$) より、 0°C で $v = 4.8 \times 10^4\text{cm/s}$ と求まる。衝突から衝突までの時間間隔 τ は $\tau \sim \lambda/v \sim 1.5 \times 10^{-10}$ 秒であり、 N 回の衝突に要する時間は $1.5 \times 10^{-10} N$ 秒である。 N 回の衝突での移動距離 L は $L \sim N^{1/2} \lambda$ である。

「気団」の大きさ(直径)を S とし、 $L \sim 0.1S$ になると「気団」の identity が失われるでしょう。すると「気団」が「気団」としての identity を保持しうる時間 t は「気団」の大きさの関数として、 $t = (S/10\lambda)^2 \tau$ で与えられる。 S に対する t の値を表にすると右のようになる。直径 100m 程度の「気団」

S	t
10 cm	2.7 s
1 m	270 s = 4.5 分
10 m	450 分 = 7.5 時間
100 m	750 時間 = 31.25 日
1000 m	3125 日 = 8.56 年

は1ヵ月程度保持されることになり、「気団」概念が成立ちうる。水蒸気を多く含んだ、密度の小さい「気団」は、周りの乾いた密度の大きい大気から、浮力を受けることができる。

なお、上昇気流の発生・発達は、次のような機構による：海水が太陽からの熱によって暖められて、気化する。その水蒸気を含んだ気団は周りの相対的に“乾いた”空気より“軽い”から上昇する。そのとき、断熱膨張によって温度が下がるが、そのさい水蒸気の凝縮をとまなうので、“湿った”気団の上昇による温度の低下は(“乾いた”空気の $1^\circ\text{C}/100\text{m}$ 、平均的大気の $0.6^\circ\text{C}/100\text{m}$ に対し) $0.5^\circ\text{C}/100\text{m}$ で、同じ高度の空気より高温で、したがって密度が小さいから依然として上昇をつづける。台風が海上で発達するのは、このためである。

大気を構成する窒素と酸素のうち、酸素の素性(すいせい)と役割はかなりはっきりしている。それは植物による光合成の産物であり、呼吸の対象である。エントロピー的見地からの呼吸の意義については、次章(§4)で論ずる。

窒素の役割は分かりにくい。一つだけはっきりしていることは、窒素循環におけ

る「窒素溜(ちっぞめ)」の役割を果たしている、ということである。大気の大部分を占める窒素がほとんど化学反応に関与しない、ということも、生命が“静かに”安定して存在しうるための大事な必要条件であるのかも知れない。

[大気の厚さ] 空気の分子を地表での速さ V で垂直に投げ上げたとして、それが重力に抗して到達しうる高さ H を大気の厚さとみなしてみる。エネルギー等分配則と放物体の運動の式 $(1/2)mV^2 = (3/2)kT_g$ と $(1/2)mV^2 = mgH$ より $H = 3kT_g/2mg = 3RT_g/2Mg$ がえられるが、 $T_g = 300K$, $R = 8.32 \times 10^7 \text{ erg/mol} \cdot K$, $M(\text{分子量}) = 29 \text{ g/mol}$ を用いて $H = 1.3 \times 10^6 \text{ cm} = 13 \text{ km}$ となる。

v) 水の循環によるエントロピー廃棄

今後簡単のため、 $T_g = 300K$, $T_u = 250K$ として、話を進める。

水は地表で熱 Q を受け取って水蒸気になる。このとき受け取るエントロピーは Q/T_g であり、これが気体状態の水と液体状態の水とのエントロピー差に等しい。

この水蒸気は、上空で宇宙空間に熱 Q を捨て、水になって戻ってくる。このとき捨てるエントロピーは Q/T_u である。差引き処理されるエントロピー量は $Q/T_u - Q/T_g (> 0)$ で、これは正である。ここで注目すべき大事なことは、

- ① 水循環(右図)が存在すること、
- ② 地表と上空とで温度差が存在すること、
- ③ 状態変化(液体の水 $\leftrightarrow$ 気体の水)が存在すること、従って、気化の潜熱が大事な役割を果たしていることである。このエントロピー廃棄が効率よく行なわれうるためには、地

気体の水 [上空]	
(上昇) $\uparrow$	$\downarrow$ (放熱)
(上昇) $\uparrow$	液体の水 [上空]
気体の水 [地表]	$\downarrow$ (落下)
(吸熱) $\uparrow$	$\downarrow$ (落下)
液体の水 [地表]	

表と上空(水蒸気が放熱して水にもどる所)との温度差が大きい方がよい。また、水の気化熱が大きいことは、水循環によるエントロピー廃棄を効率よいものとする。

vi) 地球の質量と水循環

地表で重力の加速度が $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ であり、地表の温度が $T_g \sim 300K$ であること、水の分子量が $M = 18 \text{ g/mol}$ であることから、地表での水蒸気分子の速さ v は、 $(1/2)mv^2 = (3/2)kT_g$ または $(1/2)Mv^2 = (3/2)RT_g$ より $v \sim 645 \text{ m/s}$ と求められるが、これは 第1宇宙速度 $7.9 \text{ km/s} [= (gR)^{1/2}]$, 第2宇宙速度 $11.2 \text{ km/s} [= (2gR)^{1/2}]$ に比べてずっと小さい。地球の質量は H_2O (水蒸気)を地球上に保持しうる程には、十分に重い(軽すぎない)のである。

他方、水蒸気はどのくらいの高さまで上昇できるであろうか? 上昇できる高さ h は $(1/2)mv^2 = mgh$ または $(1/2)Mv^2 = Mgh$ より $h \sim 21 \text{ km}$ と求められるが、これは大気の厚さ $H \sim 13 \text{ km}$ より大きい。水蒸気は大気の上層に充分達することができ、そこでの温度 T は、 $T = T_u$ であって、地表の温度 T_g より充分低いのである。すなわち、地球は H_2O (水蒸気)が充分な高みに到達することを妨げない程には、十分に軽い(重すぎない)のである。

水循環の見地から見るとき、地球の質量は、軽すぎも重すぎもしない、ちょうど良い質量なのである。

私は、地球からのエントロピー廃棄における水循環の意義を認識したとき、雨具の準備の煩わしさゆえに嫌いであった雨降りの日が、嫌いではなくなった。雨の日に「今日は天気が悪い」などという罰当りな言い方をしなくなった。雨の日は、理性的に嫌いではなくなっただけでなく、感性的にも嫌いではなくなった。理性的認識は感性をも陶冶する？

vii) 水の特性

循環によってエントロピー廃棄の役割を担っている物質たる水は次の特性を持つ。

- ① 気化の潜熱が大きい（質量の割に気化の潜熱が大きい）。この特性は、水によるエントロピー廃棄を効率よいものとする。一定量の熱を上空で放出させるために上空に運ばれなければならない質量が少なくて済むからである。

この特性によって、水はまた、生体の環境として、低温熱溜としても機能している。生体から熱を受け取ったとき、水は（温度が上がらずに）その一部が気化するが、そのことによって温度を一定に保つ。熱力学における思弁的な理想的な低温熱溜がもつべき特性を、水はこの機構によって、現実（生体に対して）持つのである。

- ② 氷が水に浮く（固態での密度が液態でのそれより小さい）。これは、液体の水が地表に大量に存在することを保証している。

氷が水よりも重かったとしよう。何かの拍子に地表温度が（局所的に）下がり、そこで水が凍ったとする。できた氷は底に沈み、のちに太陽からの熱で融かされることはないであろう。太陽熱は表面の水を蒸発させるが、底の氷は融かさない。（地熱の効果が無視できるとすれば）地球の長い歴史の中で、水の大部分は氷に変わり、冷たい氷の鉱脈を形成したであろう。現在のように大量の水が海洋として地表に存在することはなく、わずかに氷の鉱脈の表面だけが融けて、浅い水たまりが出来ているだけだったろう。氷が水に浮くから、何かの拍子で凍って氷になっても、水の表面に浮いた氷が太陽熱によって融けて、水にもどることができたのである。

- ③ 特異な誘電的性質をもつ。このことは、高分子化合物の分子構造の或る部分を疎水基や親水基たらしめ、蛋白質の高次構造形成の一要因たらしめて、活性をもった蛋白質の構造 —— 生命活動の主体 —— の形成を可能ならしめる。

- ④ 溶媒としての水はいろいろの物をよく溶かす。このことによって、水は生命活動の舞台 —— 水溶液 —— を提供する。

これらの諸特性はすべて同じ原因、すなわち、水分子の構造 —— $\text{H}-\text{O}-\text{H}$ が一直線ではなく、約 110度の角をなし、負電荷の分布の中心と正電荷の分布の中心とが一致せず、水分子は電気双極子になっていること —— と、水の分子間の結合力が水素結合によっていることと、から生じている。

viii) 「地球の天文学的・地球物理学的性質」と「水の特異な物性」の奇蹟的な和合

その上に生命が存在し、それが存在しつづけている星であるところの地球は、「生きている」星と呼ぶことが出来るであろう。地球を「生きている」星たらしめているものは、「地球の天文学的・地球物理学的性質」と「水の特異な物性」の奇蹟的な和合である。

§ 4. 生物と2種類の低エントロピー物質

1. 「生きる」ということを考えてみよう。

これは個体を低エントロピー状態に維持する、ということを含んでいるし、あるいは種々の材料から自分の体をつくりあげる、ということを含んでいる。

一例として、アミノ酸からの蛋白質の合成を考えてみよう。N(窒素)原子に着目すれば、初めばらばらのアミノ酸の中にあって広く散在していたN原子が、のちに蛋白質中のそれとして狭い領域内に凝集したのであるから、N原子系のエントロピーは、このとき減少する。(あるいは、この反応を表わす化学式の左辺と右辺のエントロピーを比較して、反応後のエントロピーが減少していることを確かめうる。) この現象も不可逆変化であることは確かだから、このエントロピー減少よりも大きなエントロピー増大の過程が、これと組みあわさって、別にどこかにあるはずである。なにか低エントロピーの物質が高エントロピーの物質に変化する過程が存在するはずである。生物が外界(環境)から低エントロピー物質を取り入れ、それを高エントロピー物質に変えた上で、体外に排出するという過程が、生体のエントロピー不増大ないし減少の過程と組み合わせられて存在しているはずである。

その、低エントロピー源として機能する物質は何であり、その過程はどのような過程であろうか?

2. 2種類の低エントロピー物質

低エントロピー源として機能する物質、それは、きれいな液体の水と炭水化物である。生物は、この2種類の低エントロピー物質を持っているのである。

きれいな液体の水が低エントロピー源として機能しうるのはなぜか。それは、液体の水がエントロピーのより高い気体の水(水蒸気)となって体外に排出されうることからであり、また、きれいな液体の水が生命現象の過程で生じた老廃物を溶解し、(混合)エントロピーの高い状態となって体外に排出されうることからである。

炭水化物が低エントロピー源として機能しうるのはなぜか。それは、もっとも典型的には、酸素と化合して発熱し、体外に放熱することからであり、物質としてもエントロピーの高い二酸化炭素となって体外に排出されるからである。

低エントロピー源としての炭水化物は、低エントロピー源としての水と比べると、対照的な一つの特徴をもつ。それは、水の低エントロピー状態(液体)から高エントロピー状態(水蒸気)への変化は吸熱をともなう物理的な状態変化であって、周囲から熱を奪う(したがって、液体の水は「低エネルギーの低エントロピー物質」である)のに対し、低エントロピー状態の炭水化物から高エントロピー状態の「熱」や二酸化炭素への変化は発熱をともなう化学変化(酸化)であって、周囲に熱を与える(したがって、炭水化物は「高エネルギーの低エントロピー物質」である)ということである。

生体内での生命現象が微妙なバランスを維持しながら進行することができるのは、生物が水と炭水化物という、熱的な見地からは正反対の型の、2種類の低エントロピー源を持っているからであろう。

低エントロピー状態から高エントロピー状態への変化の継続という面でも、水と炭水化物は対照的である。水が蒸発して水蒸気になるときは熱を奪うから、他に熱源がなければ、水の温度が下がって蒸発は起こりにくくなる。また、蒸気圧が増すから蒸発が起こりにくくなる。つまり、蒸発は蒸発を抑制するようにはたらく。水の気化は負のフィードバック機構をそなえている。他方、炭水化物の酸化は発熱をとめない、この発熱によって温度が上昇し、温度上昇の結果としてさらに酸化が促進される。炭水化物の酸化は正のフィードバック機構をそなえている。炭水化物の高エントロピー状態への変化がこのような正のフィードバック機構をもっていることが、炭水化物を低エントロピー源とする生体の急速な成長を可能にしているのであろう。また、このような機構をもつ炭水化物の酸化の暴走を防いでいるものは、水(の気化)による冷却である。

	きれいな液体の水	炭水化物
低エントロピー源として機能するのは：	高エントロピー状態* になって 排出されるから * 老廃物を溶かした汚れた水 気体の水	酸化によって 廃熱となって、およ び CO_2 (高エントロピー) になって、 排出されるから
熱的性質	水(吸熱)→水蒸気 低エネルギーの 低エントロピー源	炭水化物(酸化・発熱)→ CO_2 高エネルギーの 低エントロピー源
feedback 機構	negative feedback 気化は気化を妨げる	positive feedback 発熱→温度上昇→酸化促進→発熱 酸化発熱は酸化を促進する 急速な成長・繁殖が可能 暴走の可能性：歯止めは水の気化

生命現象と組み合わさって生じているエントロピーの増大過程は、炭水化物の酸化にともなう発熱とその熱による水の加熱(生体の側からみれば、水による冷却)——窮極的には水の気化によるエントロピーの増大、および生命現象の過程で生じた老廃物の水への溶解による(混合)エントロピーの増大である。このように、生体の低エントロピー状態の維持ないしエントロピーのより低い状態への移行(=成長)には、低エントロピー物質たる炭水化物の消費(酸化・発熱)がともなっている。このとき酸素を必要とする。酸素は空気中から(または水に溶けたものが)呼吸によって生物体内に取り込まれて必要な場所に運ばれるが、呼吸の意義・酸素の役割は炭水化物を低エントロピー源として機能せしめる点にある。微生物の中には生きてゆくのに酸素を必要としないものもあるが、それらも酸化とは別の機構によって、高エネルギー・低エントロピーの炭素化合物をそれよりも低エネルギー・高エントロピーの炭素化合物に変え

て、低エントロピー源として機能させることによって（および、そのさいの発熱を水の気化によって処理することによって）、生物自体のエントロピー増大を防いでいる。生物にとって酸素が必要であるか否かは、高エネルギー・低エントロピーの炭素化合物を低エントロピー源として機能させるさいに、酸素を必要とするか否かによっている。高エネルギーの低エントロピー源としての炭素化合物の役割は、酸素を必要とする生物においても、必要としない生物においても、基本的に同じである。そして、低エネルギーの低エントロピー源として機能するものは、すべての生物に共通して、きれいな液体の水である。

「生きていくのに必要な“エネルギー”とは？」江上不二夫は『生命を探る』の中で、恒温性動物によって“エタノールの化学的潜在エネルギーはいかに利用されるか”を論じている。（pp.92-93）。江上によれば、高等動物でのエネルギー消費の主なものは維持のエネルギー・筋肉運動・体温の維持の3つであるが、ハツカネズミでの実験結果にもとづいて江上は“アルコールの化学的潜在エネルギーは維持のエネルギーとして用いられていると考えねばならない”と結論している。この結論は、アルコールが高エネルギーの低エントロピー源として機能したということの、江上流の表現にほかならない。「維持のエネルギー」とは、高エネルギーの低エントロピー源の（エネルギー論的）表現なのである。

「人体からの放熱と太陽からの放熱の量的比較」“維持のエネルギー”の必要量がどれほど大きいかということは、人体からの放熱を太陽からの放熱と比べてみると分かる。人体と太陽の同一質量からの同一時間内の発熱（放熱）を比べてみると、人体の方が1万倍も多いのである。太陽の1分間当りの発熱量は太陽定数 $2 \text{ cal/min} \cdot \text{cm}^2$ に $4\pi D^2$ ($D=1$ 天文単位, $1.5 \times 10^8 \text{ km}$) をかけて、 $6 \times 10^{27} \text{ cal/min}$ と得られ、これを太陽の質量 $M_{\odot} = 2 \times 10^{30} \text{ kg}$ で割って $3 \times 10^{-3} \text{ cal/min} \cdot \text{kg}$ が得られる。他方、体重 60 kg の成人男子の1日当りの最低必要カロリー数は約 2400 kcal/day であるから、これを成人男子1日当りの発熱量に等しいと置けば、ほぼ $30 \text{ cal/min} \cdot \text{kg}$ となる。これを、生物がいかに効率よく発熱しているかを示すものと考えるのは、正しくない。むしろ、生物が生きていくために、いかに大量のエントロピーを熱として棄てなければならないか、“維持のエネルギー”がどれほど大量に必要であるか、を示すものと見るべきであろう。また、この結果を、太陽の発熱効率が生物と比較していかに悪いかを示すものだと見ることは可能であろう。太陽の質量の圧倒的部分は、太陽中心部で核融合反応を起こさせるために、クーロン反発力によって互いに逃散し合おうとする陽子を互いに接近させて閉じ込めておく巨大な重石（いふれば潰物石）の役割を果たしているだけであり、核融合反応には直接には関わっていないのである。

「マッチ売りの少女」既に述べたように、地球が「生きている星」でありうるのは、熱源としての太陽と循環する水の存在とによっているのであるが、水の重要性の認識が一般に欠けているので、水の重要性を強調するために「太陽は熱汚染源であり、砂漠はそれの証拠である」というような表現をすることがある。これは、水がなければ太陽は熱汚染源でしかないということを言っているのである。これに対して、砂漠が太陽の熱汚染の証拠なら、同じ流儀で「極地の氷や北国の大雪は“低エントロピー汚染”の証拠であり、“マッチ売りの少女”の凍死は“廃熱エントロピーの不足”による」といえるのではないかと、この疑問が生じよう。しかし、この疑問は、極地の氷や北国の大雪を問題にすると、暗黙理に極地あるいは北国に人間（の個体）をおき、その地点・その時点でのその個体の生存の成否・生活の難易をもって“低エントロピー汚染”の度合いを測ろうとしている点で、問題提起としては適切ではない。環境の問題は窮極的には人間の生活と結びつけなければ無意味だが、単純な短絡は本質の認識を妨げる。極地の氷や北国の大雪は、まずは大局的に地球全体のエントロピー廃棄の機構の中でどのような役割を演じているかを考察すべきで、その局地的・一時的環境における無防備の人間の生存の出来ないし生活の困難をもって「“低エントロピー汚染”の証明だ」との結論を下すべきではない。“マッチ売りの少女”が凍死したのは「低温」＝「廃熱エントロピーの不足」あるいは“環境の低エントロピー”のせいではないか、との疑問に対しては、“廃熱エントロピーの不足”のためではなくて、

体温の低下によってエントロピー廃棄の機構が正常に働かなくなるとエントロピー廃棄が出来なくなり、生命活動が持続できなくなったためである、と答えよう。生体のエントロピー廃棄機構における一つの重要な部分として、炭水化物の酸化がある。高エネルギーの低エントロピー物質である炭水化物は、その酸化の際に発熱し、発熱による温度上昇によってその酸化が促進される。炭水化物の酸化がスムーズに進行して、そのことによるエントロピー廃棄が順調に行なわれるためには、適当な体温が保たれる必要があり、また外界への放熱に伴う適温以下への体温低下を防ぐためにも炭水化物の酸化が進行する。注意すべきは、外界への放熱は生きていくために必要なことであって、それを死の原因とみなしてはならないということである。外界と体温との温度差が大きすぎて放熱が過度に進行しそうなとき、人は衣服や家屋によって放熱の速さを緩和し、体内での炭水化物の酸化の進行の度合いと調和させて、適度の体温を保持しようとする。“マッチ売りの少女”は、放熱を緩和する十分な衣服を持たず、体温を維持するために体内で酸化させるべき炭水化物の蓄積も不十分であった。凍死の原因はここに求められるべきであって、環境の低温に求められるべきではない。自然環境に適した衣食住の欠損に求められるべきであって、自然環境そのものに求められるべきではない。彼女の死は、本質的には餓死（凍死の形をとった餓死）であった。“低エントロピー汚染”とか“廃熱エントロピーの不足”とかいう言葉は、用語として適切でない。これは、生命の存続のためには環境がそれに適した温度をもつ必要があり、環境温度が低すぎると生物が生きて行けないことを、「低温」＝「低エントロピー」と考えて、このように表現したのであろうが、それは適切な表現ではない。エントロピー的視点に立つということは、何でもかんでも「エントロピー」という言葉を含んだ用語で置き換えて物事を解釈する、ということではない。常識的には周知の数多くの事象が、エントロピー的視点に立つことによって認識の深いレベルで相互に関連づけられ、そのことの結果として、今まで（エントロピー的視点に立たなかったために）見えていなかったものがはっきり見えてくるところに、エントロピー的視点に立つことの意味があるのである。低温のことを“環境の低エントロピー”とか“廃熱エントロピーの不足”とかと表現することとエントロピー的視点に立つこととは無縁である。

〔鳥の孵化〕 卵を孵化させるために、親鳥が卵を温める。だがそれは、卵を温める（＝卵に熱を与える・卵を加熱する）ためではない。加熱するのではなく、冷えすぎを防ぐのである。冷えすぎて炭水化物の酸化の進行が滞るのを防止するのである。適度の放熱は必要・不可欠である。鳥の中には抱卵中、適度の放熱を保つために、こまめに卵の上下をひっくり返すものもある。

〔＜＜ケイの凄春＞＞〕 『ケイの凄春』という劇画がある。第1巻の冒頭で、ヒーロー青年浪人武士 証判一郎（あか・けいいちろう）が、冬の朝、裸で寝ていた堆肥小屋の堆肥の中から起き出て、通りかかったうら若きヒロインの鼻をしかめさせて、デブューする。これは、作者が、暖かな布団にくるまって寝るような軟弱な青年ではない、堆肥の中で裸で寝るような質実剛健の蛭カラ青年を印象深く登場させたいと願ったからであろうが、この劇画作者がエントロピーのことを知らなかったのが、証判一郎には幸いであった。さもなくば、デブューの朝かれを迎えた者は、鼻をしかめた美女ではなく、堆肥小屋の中で死んでいた裸の青年を検死する役人であつたらう。堆肥の中に寝たのでは、体外への放熱ができないからである。

〔低温火傷と床ずれ〕 使いすてカイロの注意書には「低温火傷」について次のように書いてある。「低温やけどは、体温より高い温度の発熱体を長時間あてていると紅斑、水疱等の症状をおこす火傷のことです。なお、自覚症状をともしないで低温やけどになる場合もありますのでご注意ください。」低温火傷は長時間にわたって放熱が妨げられることによって生じる症状である。放熱障害は「体温より高い温度の発熱体」でなくても生じるのではあるまいか。長い間病床にあるとき、こまめに姿勢を変えないと、いつも布団に接している部分が「床ずれ」になることがある。「床ずれ」も（布団の温度は体温より低いとはいえ）充分の放熱を妨げられることから生ずる、一種の低温火傷ではあるまいか。すると、床ずれ予防には、こまめに姿勢を変えること、ないし床ずれになりそうな部分（なりかけた部分）を冷やすことが効果がありそうな気がするが……。ともかく、低温火傷と床ずれは、エントロピー性疾患とでもいうべきものである。

3. 低エントロピー物質の再生過程

低エネルギーの低エントロピー物質たる水の再生過程が水循環である。上空に昇った高エントロピー状態の水、すなわち水蒸気は、上空での宇宙空間への放熱によってエントロピーを廃棄して低エントロピー状態の水、すなわち液体または固体の水となり、ふたたび地表へ戻ってくる。水蒸気の上空への上昇は大気の浮力によっており、水の地表への帰還は重力＝地球の引力による。

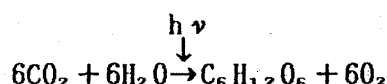
高エネルギーの低エントロピー物質たる炭水化物の再生過程が光合成である。光合成によって、炭水化物が変じて高エントロピーとなった二酸化炭素 CO_2 が、光と水の助けによって、ふたたび炭水化物にもどる。

実は、光合成も大きな水循環の中でのみ可能なのである。

§ 5. 光合成

1. 光合成の化学式

光合成に対する普通の理解はエネルギー的見地からのもので、葉緑体を触媒とし、空気中から取り入れたただ同然の二酸化炭素と、根から吸い上げたただ同然の水とから、太陽エネルギーを固定して価値ある炭水化物(ブドウ糖)作り出す(同時にできた酸素は空気中に放出する)過程が光合成である、反応の重要な点は太陽エネルギー(光エネルギー)を化学エネルギーとして炭水化物(ブドウ糖)中に固定することにある、と考えられている。そして、次のような化学反応式を書く。



価値の源泉はもっぱら太陽光にあったかのごとくであり、水はこの化学式に現われるものだけが役立ったかのごとくである。

だが、果たしてそうであろうか？ このような考え方はエネルギー的視点にのみ偏っていないだろうか？ エントロピー的視点から光合成を見たらどのように見えるだろうか？ まず大雑把な考察をするために炭素原子に着目してみる。光合成以前の炭素原子は、空気中にモル濃度比にして 0.03% の割合で存在する二酸化炭素中の炭素原子として、空間的に広い範囲にわたって散在していた。光合成後の炭素原子は生成した炭水化物中のそれとしてごく狭い領域に濃縮されている。炭素原子系のエントロピーは光合成によって減少したといえる。光合成もまた一つの不可逆過程である以上、光合成に関与した全物質を洩れなく考慮に入れるならば、全体のエントロピーは増大しているはずである。炭素系のエントロピーが減少したとすれば、どこかにその減少を補って余りあるものがあつたはずである。それはいったい何だったのだろうか？ 化学式に現われない水、すなわち、根から液体の水として吸われて気孔から気体の水(水蒸気)として蒸散した水が、その役割を担ったのである。その水は、自らは液体から気体に変わることによってエントロピーが増大し、かつ気孔から蒸散することによって、その増大したエントロピーを自らとともに植物体外に持ち去り、そのことによって植物体上に低エントロピー物質たる炭水化物を残したのである。(その役割を果

したのは、気化した水ではなく熱化した太陽光であるとする議論も成り立ちうるが、その議論に対する批判は、本節 4. iv) を見よ。)

2. 光合成におけるエントロピーの変化

上に述べたことは、光合成のさいのエントロピー変化を定量的に計算することによっても具体的に示すことができる。物理化学の分野では、いろいろの物質についての標準状態 (0℃・1気圧ではなく、25℃・1気圧) での熱力学的状態量のデータが集積されていて、われわれはそれを利用することができる。

考察のために必要なデータを下表に与える：

標準状態 (1気圧 25℃) での熱力学的性質

ΔH : 生成エンタルピー (kcal/mole)

S : エントロピー (cal/mole K)

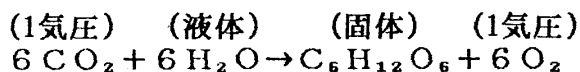
	ΔH	S
CO_2 (gas)	- 94.015	51.06 (= 25.70 R)
$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ α -D-Glucose (solid)	- 304.6	50.7 (= 25.5 R)
H_2O (liquid)	- 68.315	16.71 (= 8.410 R)
H_2O (gas)	- 57.796	45.10 (= 22.70 R)
O_2 (gas)	0	49.003 (= 24.66 R)

出典 : Ira N. Levine, Physical Chemistry

(McGraw-Hill, 1978) Appendix (p.816) の Table

エントロピー変化の計算は、次のようになされる。

光合成が、25℃・1気圧で行なわれたとする。その化学式は下の通りである。



このときのエントロピー変化は、化学式の右辺のエントロピーから、左辺のエントロピーを差し引いて、

$$\begin{aligned} \Delta S (\text{chemical}) &= \{S(\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6) + 6S(\text{O}_2)\} - \{6S(\text{CO}_2) + 6S(\text{liq. H}_2\text{O})\} \\ &= \{(25.5 + 6 \times 24.66) - (6 \times 25.70 + 6 \times 8.410)\} R = -31.2R \end{aligned}$$

となる。他方、大気中の CO_2 含有量はモル百分比にして 0.03%，すなわち分圧にして 0.0003気圧， O_2 含有量は 20.95%，分圧 0.21気圧であるから、これらを理想気体と考えれば、これらが1気圧でないことによるエントロピー変化への補正は

$$\begin{aligned} \Delta S (\text{gas}) &= -6R \{\ln p(\text{CO}_2)^{-1}\} + 6R \{\ln p(\text{O}_2)^{-1}\} \\ &= -6R \cdot \ln \frac{p(\text{O}_2)}{p(\text{CO}_2)} = -6R \cdot \ln \frac{0.21}{0.0003} = -39.3R \end{aligned}$$

となる。結局、光合成にともなうエントロピー変化 ΔS は

$$\Delta S = \Delta S (\text{chemical}) + \Delta S (\text{gas}) = -70.5R$$

であり、光合成にともなう系のエントロピーは減少する。

では、このとき外界のエントロピー変化はどうであったか？ 系は外界に熱を放出したか、それとも外界から熱を吸収したか？ それを見るには、系のエンタルピー変化を計算すればよい。化合物の生成エンタルピーは単体から当該化合物を生成するさいのエンタルピー変化として定義されている。したがって、定義により

$$\Delta H(\text{CO}_2) = H(\text{CO}_2) - \{H(\text{C}) + H(\text{O}_2)\} = -94.1 \text{ kcal/mol}$$

$$\Delta H(\text{liq. H}_2\text{O}) = H(\text{liq. H}_2\text{O}) - \{H(\text{O}_2)/2 + H(\text{H}_2)\} = -68.3 \text{ kcal/mol}$$

$$\Delta H(\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6) = H(\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6) - \{6H(\text{C}) + 6H(\text{H}_2) + 3H(\text{O}_2)\} = -304.6 \text{ kcal/mol}$$

であるから、光合成にともなう系のエンタルピー変化 ΔH は

$$\begin{aligned} \Delta H &= \{H(\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6) + 6H(\text{O}_2)\} - \{6H(\text{CO}_2) + 6H(\text{liq. H}_2\text{O})\} \\ &= \Delta H(\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6) - 6\Delta H(\text{CO}_2) - 6\Delta H(\text{liq. H}_2\text{O}) \\ &= -304.6 - 6 \times (-94.051) - 6 \times (-68.315) \text{ kcal/mol} \\ &= 670 \text{ kcal/mol} = 6.70 \times 10^5 \text{ cal/mol} \end{aligned}$$

であって、系は外界から、生成 $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ 1モル当り 670 kcal の熱を受け取る。したがって、温度 T の外界は光合成のさい $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ 1モル当り $670/T$ kcal だけエントロピーが減少することになる。これは光子系の、光が吸収されたことによる、エントロピーの減少である。 T は光合成に即していえば(可視光線部分の強度が地表でのそれと等しい黒体輻射の温度をとって)千数百度とみなすのがよい($T=1300\text{K}$ とおけば、「外界」のエントロピー減少は 生成 $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ 1モル当り 515 cal/K となる)。

以上のように、化学式に着目したかぎりでは、化学系もエントロピーが減少し、エンタルピー(「熱」)に着目すれば、「外界」もエントロピーが減少している。

しかし/したがって、化学式に現われない何かがエントロピーの増大を担っているはずである。それは何であろうか？

<答> それは水である。化学式には現われない、液体の水として根から吸収され、水蒸気として気孔から蒸散し去った水である。

3. 水の気化熱；水→水蒸気のエントロピー増大

水の気化熱を L とする。水蒸気の方が L/T だけエントロピーが高い。水の気化熱と飽和蒸気圧は、理科年表によれば、次の通りである。

水の気化熱と 飽和蒸気圧 [理科年表]		気化熱	飽和蒸気圧
	25℃	582.8 cal/g	3168.3 Pa (0.03127 気圧)
	100℃	539.8 cal/g	101325 Pa (1 気圧)

すなわち、25℃での水の気化熱は $582.8 \text{ cal/g} \times 18 \text{ g/mol} = 1.05 \times 10^4 \text{ cal/mol}$ であるから、これにともなうエントロピーの増大は

$\Delta S(\text{水} \rightarrow \text{水蒸気}) = 1.05 \times 10^4 \text{ cal/mol} \div 298 \text{ K} = 35.2 \text{ cal/mol K} = 17.7R$ ($\sim 18R$) である。(この約 $18R$ という値は、水の分子量を連想すれば、記憶しやすい。) 前述の「標準状態での熱力学的性質」のデーターによれば、 $S(\text{liq. H}_2\text{O}) = 8.410R$; $S(\text{gas H}_2\text{O}) = 22.70 R$ であるから、 $\Delta S(\text{liq.} \rightarrow \text{gas}) = (22.7 - 8.4)R = 14.3R$ となって、上記の $17.7R$ とは一致しない ???

心配ご無用．気化熱は飽和蒸気圧の下でのものであるから，それを補正すると

$R \cdot \ln(101325/3168.3) = R \cdot \ln 31.98 = 3.465R$ ， $14.3 + 3.4 = 17.7$ となって，当然のことながら一致する．

4. 光合成のさいに必要な，化学式にあらわれない水の量

i) 化学式におけるエントロピー低下の補償

上で見たように，光合成のモル化学式 $6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2$ 当りのエントロピー減少が $70.5R$ であるから，このエントロピー減少を補償するために蒸発すべき水の量は，最低 $70.5R/18R \sim 4$ ，ほぼ4モルとなる．高等学校の生物で教わる光合成の化学式は， $6\text{CO}_2 + 12\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$ である．これは右辺の 6O_2 がすべて左辺の水に由来することが確かめられているため，反応の実態に即したもののとして，採用されているのである．この式はエントロピー的見地からみても尤もな式である．それは， $6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2$ の左右両辺に付け加わった $6\text{H}_2\text{O}$ が，左辺では液体であり，右辺では気体であることによって，すなわち，この気化した $6\text{H}_2\text{O}$ ($> 4\text{H}_2\text{O}$) が化学式 $6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2$ におけるエントロピー低下を補償しているからである．

「金星改造論」批判] Carl Sagan (カル・セーガン) は著書 *The Cosmic Connection* 『宇宙との連帯』の「惑星を地球化する」という章で，金星の改造計画を提案している．金星大気は主として濃厚な二酸化炭素より成るが，金星大気中に含まれる水蒸気の水蒸気量も，凝縮させれば金星の地表全体を約30cmの深さで覆うだけの量があるから，金星大気中にある種の藻類を大量に投入し，それらが金星地表上に落下して黒焦げになるまでの間に，金星大気中で光合成を行なわせる．こういうことを何度も積み重ねて，二酸化炭素を炭素と酸素に変換し，金星大気の温室効果を弱め，金星地表を灼熱地獄でなくして，将来，金星表面での人類の活動を可能にしよう，という計画である．まことに壮大であるが，Sagan は，「光合成に必要な水は，水蒸気ではなくて液体の水である」ということを見落している．金星大気中に濃厚な二酸化炭素と水蒸気があっても，光合成はそれだけでは進行しない．

ii) 光合成のさいの生成エンタルピー

すでに見たように，光合成にともなう系のエンタルピー変化 ΔH は， $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ 1モル当り， $\Delta H = 6.70 \times 10^5 \text{ cal/mol} = 4.65 \times 10^{11} \text{ erg/molecule}$ である．光合成に使われる主たる光の波長は $\sim 680\text{nm}$ であるから，この波長をもつ光子のエネルギー ϵ は $\epsilon = hc/\lambda = h\nu = 2.9 \times 10^{-12} \text{ erg}$ である ($c = 3 \times 10^{10} \text{ cm/s}$ ， $h = 6.62 \times 10^{-27} \text{ erg.s}$ ， $\lambda = 6.8 \times 10^{-5} \text{ cm}$)．

$\Delta H/\epsilon = 4.65 \times 10^{11} \text{ erg/molecule} / 2.9 \times 10^{-12} \text{ erg} \sim 16/\text{molecule}$ ，すなわち， $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ 1分子を生成するのに，約16個分の光子に相当するエネルギーが必要である．

iii) 量子収量 (quantum yield)

他方，光合成に関して「量子収量」という概念がある．『生物学辞典』第3版 (岩波書店 1983) p.1055a 「光合成の量子収量」によれば，量子収量とは， CO_2 1分子を固定するのに必要な光子の数の逆数，あるいは光子1個が固定する CO_2 分子の数，であり，“現在 $0.1 \sim 0.125$ という数字が受入れられている”．この値を受け

入れれば、 CO_2 1分子を固定するのに必要な光子の数は 8~10個であり、したがって $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ 1分子を生成するのに必要な光子の数は、これに6をかけて、48~60個となる。さきに見たように、光合成によって固定されるエネルギーは光子 16個分のエネルギーであったから、16 と 48~60 との差、32~44個分の光子は、光合成の役には立ったが、結局は熱化してしまったことになる。

化学式($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ 1モル)当り、光子16個分に相当するエネルギーが $\sim 6.7 \times 10^5 \text{ cal}$ であるから、光子 32~44個分に相当するエネルギーは $\sim (13.4 \sim 18.4) \times 10^5 \text{ cal}$ となる。水の気化熱は $1.05 \times 10^4 \text{ cal/mol}$ であるから、光合成の役に立ちつつ結局は熱化してしまう光のエネルギーの処理に必要な水の量として、 $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ 1モル当り $(13.4 \sim 18.4) \times 10^5 \text{ cal} / 1.05 \times 10^4 \text{ cal/mol} = (128 \sim 175) \text{ mol}$ が得られる。

iv) 水の気化による放熱(エントロピー廃棄)の本質的重要性

前項で述べたように、光合成のさいに $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ 1分子当り 32~44個分の光子が熱化しているので「エントロピー低下を補償したのは、光合成の役には立ったが、結局は熱化した光のエントロピーの増大(1300 K のエネルギーが 300 K の熱になった)であって、水の気化ではない」と言いたくなるかも知れない。たしかに「エントロピー低下を補償したのは熱化した光だ」と言えないこともない。しかし、……

着目した系からのエネルギーの解放による熱量Qの発生にともなうエントロピー増大 Q/T は、現実には、具体的な、環境の状態変化(エントロピー増大)として具現される。光合成の場合、反応は葉の細胞の中でおこっており、光合成に関与する化学系にとって、環境とは本質的に液体の水である。実際、水の気化によらないで、光エネルギーが熱化した大量の熱を放熱しようとするれば、大量の熱の放熱のためには植物体の温度が上昇しなければならず、温度が上がりすぎて、光合成の機構が破壊されてしまう。水の蒸発は、植物体の温度を基本的に変化させることなしに、放熱量を加減できるのである。

したがって、水の気化が本質的な役割を果たしている、というのが正しい。

「エントロピー低下を補償したのは熱化した光だ」との見解の持主は、たとえば、杉本大一郎である[『科学』55 No.9 (1985) pp.541-550, 特に pp.545-546]。かれは光合成を火力発電になぞらえた上で「水は光合成という火力発電機を定常的に回転させるための冷却水の役割を果たしていることが分かる。電力というエネルギーの低エントロピー性をつくったのは、発電機をまわす燃料の石油であり、光合成では、太陽光線にあたる。ところが、勝木は“ブドウ糖の低エントロピー性をつくったのは太陽光線ではなくて、水である”という。しかし発電機は冷却水ではまわらない。」(下線は引用者・勝木による)と述べている。また別のところ[『パリティ』2 No.3 (1987) p.96]でも「(エントロピーを)捨てるのに水の蒸散が使われるかどうかは、物理というより生態(マ)学の問題である」と述べている。(「生態学」ではなくて、そう言いたければ「生理学」というべきであろう。)

「発電機は冷却水ではまわらない」という類の表現は俗耳に入り易く、アジテーション用には持って来いの表現である。しかし、このことによって杉本は、かれの熱力学理解がカルノー以前の段階に留まっていること、および歴史的無知を、自ら告白してしまったのである。なぜなら、カルノーによれば「動力を得るためには、熱を作り出すだけでは不十分であって、冷たさをも供給しなければならない；冷たさなしには、熱は役に立たない」のであるから。また、人類史上、熱機関が実用的に産業に用いられたのは(パパン、セーヴァリに次ぐ)ニューコメンの蒸気機関が

最初であったが、この機関が鉱山の坑道の底から水を汲み上げたのは、水を熱して蒸気にしたその高温の位相においてではなく、シリンダーに冷水を注いで水蒸気を凝縮せしめたその低温の位相においてであった；まさに「冷却水が仕事を生み出した！」のであるから。

なお、光合成と火力発電機とを比喩的に対照させ、その比喩の文脈において「ブドウ糖の低エントロピー性」と「電力というエネルギーの低エントロピー性」とを対照させることは対称性を失っている。この比喩において炭水化物と対照されるべきものは、電力から仕事をされて状態の変化するしかるべき物質系であるべきであって、電力そのものであるべきではない。光合成を何らかの熱機関になぞらえたければ、たとえば次のようにすべきである。

光合成に有効な太陽光部分(実効温度千数百度)が低温の環境へ移行する過程で仕事Wを生み出す。この仕事は物質系(光合成の化学式の左辺)に与えられて、その物質系の状態が変化する(化学式の右辺になる)。このとき系の内部エネルギーやエントロピーが変化する。よく「仕事はエントロピーがゼロの(良質の)エネルギーだ」といわれるが、仕事を取り出すことを目的とした熱機関のことを論じるのではなく、物質の状態のことを論じようとするとき、このような表現は不適切で紛らわしい。仕事は状態量ではないからである。仕事と物質系のエネルギーやエントロピーとの関係を考察するために、物質系をピストン付きシリンダー内の理想気体だとしてみる。「仕事はエントロピーがゼロのエネルギーだ」という表現が含む内容を正確に言い表せば、「系に準静断熱的に仕事をしてやれば、系のエントロピーをふやさずに、内部エネルギーを高めることができる」ということである。しかし、これは事の一面をしか記述していない。もう一つの大事な面は「系に準静等温的に仕事をしてやれば、系の内部エネルギーは変わらないで、エントロピーが低下する」ということである。系を準静等温的に変化させるためには、系をそれと温度の等しい熱溜に接触させておく必要があり、加えた仕事Wに等しい熱量が熱溜に流出する。系のエントロピーを低下させるためには「熱捨て場」としての熱溜(低温熱溜)の存在が不可欠なのである。実効温度千数百度の太陽光の低温への移行の過程で生み出された仕事Wは、断熱的に、すなわち、系が低温熱溜と接することなく、系に与えられれば、系の内部エネルギーを高める。その意味で「系のエネルギーを高めるのは太陽光」なのである。系が低温熱溜(=水=冷却水)と接しつつ、等温的に仕事Wが与えられて、はじめて系のエントロピーは低下する。その意味で「系のエントロピーを低めるのは水」なのである。

エネルギーの熱化とは、具体的には、低温熱溜を構成する物質の内部エネルギーへの、当該エネルギーの転化である。光エネルギーの熱化を論じようとして、光エネルギーの熱化一般が物理の問題であり、それが水の蒸発の形で具体化するかどうかは生態学！の問題だとして、これを物理の領域から追い出すのは、物理の領域からの低温熱溜の追放、つまり、五体満足の熱力学を物理の領域から追い出すことに等しい。低温熱溜の本質的重要性を認識する者のみが、カルノー主義者でありうるものであり、非カルノー主義者杉本は、物理学の盟から、低温熱溜の水と一緒に、赤ん坊たる熱力学まで流し捨て去ろうとしているのである。

物理学と物理学の諸概念は、自然界の諸現象のより深い理解のために駆使されるべきなのであり、このような立場からは、光合成の化学式に現われない水の重要性の指摘にまで及んでこそ、物理学が光合成の理解に物理学ならではの寄与をなした、と言えるのである。

杉本はまた、『パリティ』の講座「エントロピー」の中で、光合成についての勝木の見解であると杉本が考える考え方への批判の文脈の中で、光合成も水の電気分解も基本的に同じだとの見解を披瀝している[『パリティ』1 No.9 (1986) p.79]。光合成 $6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2$ では右辺がエントロピーが小さく、水の電気分解 $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$ では右辺のエントロピーが大きい。光合成ではエントロピーの低いエネルギーとして光が取り入れられ、水の電気分解ではエントロピーの低いエネルギーとして電気が取り入れられているので、反応を逆向きに起こさせれば、どちらもエントロピーの低いエネルギーを取り出せるから、同様に役立つ、というのである。非カルノー主義者杉本はカルノー主義者勝木の問題意識を理解していない。水の電気分解では、右辺のエントロピーが左辺より大きいから

ら、エネルギーを供給すれば（そのことによって外界のエントロピーが減少しても、物質系のエントロピーがそれを上回って増大するような状況であれば）反応は右へ進行しうる。しかし、光合成では、右辺のエントロピーが左辺より小さいから、外界からエネルギーを供給しただけでは（そのことによって外界のエントロピーは減少し、かつ物質系のエントロピーも減少するのであるから）反応は右へは進行しない。反応が右へ進むためには、どこかで、この化学式に現われない部分で、エントロピーの増大がなされていなければならない、というのが、勝木の主張なのである。勝木は「役に立つ」とか「役に立たない」とかの俗っぽい・あいまいな概念で話を進めてはいない。勝木は生命の関与する諸現象の中で、何が如何に低エントロピー源として機能するか、ということ論じてきた。その中で、水と炭水化物という、熱的性質の互いに相拮抗する、2種類の低エントロピー源、低エネルギーのそれと高エネルギーのそれ、の存在に気付いたのである。杉本流の「低エントロピーのエネルギーが役に立つ」式の認識では、低エネルギーの低エントロピー源たる水が視野に入らないのである。杉本が非カルノー主義者である所以である。

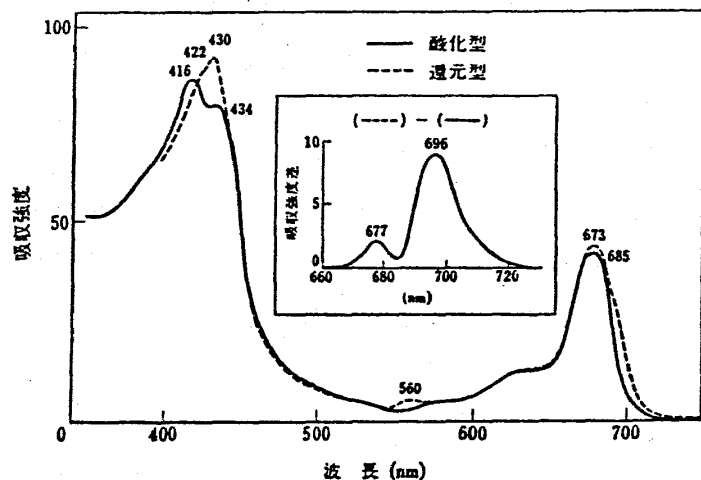
v) 光合成に有効な波長範囲

クロロフィル(葉緑素)や クロロフィル・蛋白複合体の吸収スペクトルから、光合成に有効な太陽光の波長範囲を $450 \pm 50 \text{ nm}$, $680 \pm 30 \text{ nm}$ と評価してみる。

[たとえば I. Ikegami and S. Katoh: Enrichment of Photosystem I Reaction Center Chlorophyll from Spinach Chloroplasts *Biochem. Biophys. Acta* 376 588 (1975);

宮地重遠編『光合成 I』(朝倉書店, 1981) p.64
には、上の文献から引用した、ホウレンソウから調製した光化学系 I の標品の吸収スペクトルとして、右の図が掲載されている。]

以下の計算が示すように、太陽光中、この波長の部分が占める割合はエネルギーにして、約19%である。



Planck の輻射の法則によれば、

振動数が ν と $\nu + d\nu$ の間にある輻射のエネルギー密度 $u(\nu, T)d\nu$ は、

$$u(\nu, T)d\nu = \frac{8\pi h}{c^3} \frac{\nu^3}{\exp(h\nu/kT) - 1} d\nu,$$

で与えられる。ここで T は輻射を放射する黒体の温度、 h は Planck 定数、 k は Boltzmann 定数、 c は光速である。上記の有効波長領域のエネルギーの全波長領域に対する比を η とすれば、 η は

$$\eta = \frac{\sum_{i=1,2} \int_{\nu_i - \Delta \nu_i / 2}^{\nu_i + \Delta \nu_i / 2} \nu^3 d\nu / \{(\exp \frac{h\nu}{kT}) - 1\}}{\int_0^\infty \nu^3 d\nu / \{(\exp \frac{h\nu}{kT}) - 1\}},$$

ここで $\lambda_1 \pm \Delta \lambda_1 = 450 \pm 50 \text{ nm}$ および $\lambda_2 \pm \Delta \lambda_2 = 680 \pm 30 \text{ nm}$ に対応して、

$\nu_1 = 6.67 \times 10^{14}$ Hz, $\Delta \nu_1 = 1.5 \times 10^{14}$ Hz, $\nu_2 = 4.4 \times 10^{14}$ Hz および $\Delta \nu_2 = 0.4 \times 10^{14}$ Hz ととり, 分母の積分を実行し, 分子の被積分関数を ν_1 での値で置き換えれば,

$$\eta = \frac{\sum (i=1,2) \delta_i x_i^3 / (\exp x_i - 1)}{\pi^4 / 15},$$

が得られる。ここで

$$x_i \equiv h \nu_i / kT,$$

$$\delta_i \equiv h \Delta \nu_i / kT \text{ である。}$$

太陽光に対しては

$$T = T_\odot = 5,770 \text{ K}$$

あるから, $x_1 = 5.55$,

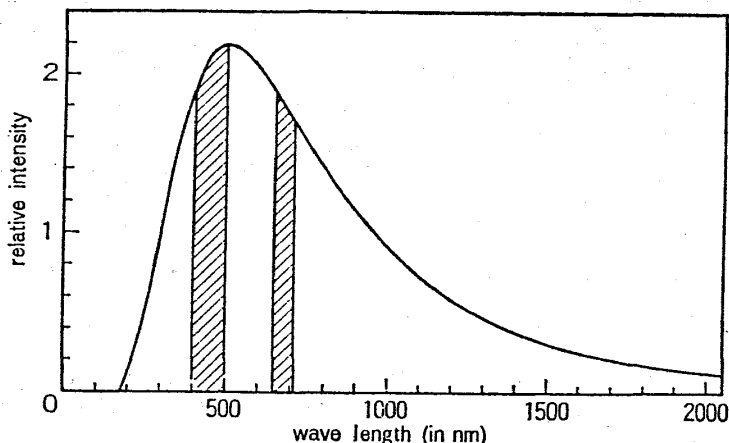
$$\delta_1 = 1.25, x_2 = 3.66,$$

$$\delta_2 = 0.33 \text{ となり,}$$

これから $\eta = 0.19$ が

得られる。太陽光中,

光合成に有効な部分を, 上の図で影をつけて表しておく。



vi) 太陽光のうち, 光合成の役に立たない部分

前項から分かるように, 有効領域を除いた残り 81%分が, まったく光合成の役に立たない部分である。C₆H₁₂O₆ 1分子を生成するのに 48~60個の光子が必要であるから, C₆H₁₂O₆ 1モルの生成には そのアボガドロ数倍の光子が必要であり, そのエネルギーは (2040~2550) × 10³ cal であって, (194~243) mol の水の気化熱に相当する。これが太陽光中の有効成分(=19%)に相当するのであるから, 役に立たない 81%分のエネルギーは, もしそれが全部熱化したとすると, C₆H₁₂O₆ 1モル当り, (194~243)mol × (81/19) = (828~1035)mol 分の水の気化熱に相当する。この役に立たない部分を全部植物が吸収した上で, 水の蒸発によって処理するという訳ではない。半分吸収し, 半分は反射しているとする, 処理に必要な水の蒸発量は半分の (414~517)molとなる。1/4 吸収・3/4 反射ならそのまた半分の (207~259)mol となる。この最後の値をとってみると, C₆H₁₂O₆ 1モルを生成するために必要な, 化学式に現われない (はじめ液体の水として根から吸収され, ついには気体の水として気孔から逃散する) 水の量として

$$(207 \sim 259) \text{ mol} + (130 \sim 178) \text{ mol} = (337 \sim 437) \text{ mol} \text{ が得られる。}$$



光合成の役に立って熱化した太陽光の処理に必要な水の量

光合成の役に立たない太陽光の熱化したものの処理に必要な水の量

ただし, ここで植物体の温度と環境温度とはほとんど差なしとして, 輻射による放熱は無視した。

5. 光合成とは

以上の考察から明らかなように, 光合成とは「太陽光と大量の水とが, 相互に相手を

生かすように関わりあいながら、二酸化炭素と水とから、高エネルギー・低エントロピーの炭水化物を作り出す反応」である。このとき、炭水化物を高エネルギーたらしめるのは太陽光であり、低エントロピーたらしめるのは水（化学式に現われない水）である。

〔付記〕ある物質が低エントロピー物質とみなされるべきであるか、高エントロピー物質とみなされるべきであるかは、その物質が関与する具体的な過程と、そこでのその物質の具体的な役割とによる。光合成の化学式に現われる $C_6H_{12}O_6$ の素材としての水は高エントロピー物質とみなされるべきである。また、光合成によって作られた炭水化物を材料として植物体のセルローズが組み上げられるとき、セルローズの原料となった炭水化物は（セルローズに比べて）高エントロピーの物質であり、このセルローズ生成時のエントロピー減少を、光合成によって作られた炭水化物の酸化（と水の気化）によるエントロピーの増大が補償している。このとき、酸化して二酸化炭素となる炭水化物は低エントロピー物質として機能しているのである。具体的な過程とそこにおける個々の物質の具体的な役割と無関係に、何か絶対的な低エントロピー物質・高エントロピー物質があるわけではない。

§ 6. ある天体が「生きている」天体であるための必要条件

1. エントロピー廃棄機構を持つこと

さて、ある天体が、そこに生命が発生し、それが維持され、存続しつづける、という意味で「生きている」天体でありうるためには、その天体が、エントロピー廃棄機構を持つことが必要である。すなわち、当該天体が「高温の熱を熱源天体から受けとって、低温の熱を宇宙空間に捨てる」ことができるために、

- ① 適当な距離における、適当な温度・適当な大きさの熱源天体の存在、そのエントロピー廃棄機構が実際に運行しうるために、
 - ② その運行を具現する適当な基本物質の存在、および
 - ③ その基本物質を作業物質とする適当な輪業(サイクル)の存在
- が必要である。

2. エントロピー廃棄の効率

そのエントロピー廃棄が効率よく行なわれるためには、（それが「基本物質」の気体と液体とのエントロピー差の利用するとすれば）

「基本物質」は、大きな気化熱を持つべきであり、また、生命にとっての環境としての当該天体の“地表”は、「基本物質」が、基本的に液体で存在でき、かつ、気化しやすいような状態でなくてはならない。

気化した「基本物質」が上空へ上昇して行けるために、当該天体の“地表”には「基本物質」の蒸気よりも重い大気が存在せねばならず、上空の温度より“地表”の温度が高くあるためには、（当該天体の内部からの発熱——“地熱”が無視できれば）大気による温室効果がなければならない。そのためには、大気は熱源天体の輻射に対して透明でなくてはならない。

当該天体は、気化した「基本物質」を保持できるほど十分に重くなければならず、気化した「基本物質」が（“地表”よりも十分低温の）高空にまで上昇しうるほど十分

に軽くなくてはならない。

“地表”の温度が低下して「基本物質」が固化しても、熱源天体の熱を受けて液体に戻ることができるためには、「基本物質」は固体の方が液体よりも軽くて、固体が液体の表面に浮くようなものでなくてはならない（さもなくば、“地表”の状況では固化が起こらないようなものでなくてはならない）。

このような条件は、実現するにはいささか厳し過ぎるように私には思える。

3. 地球の場合

①は太陽、②は水、③は水循環である。そして、地球が「生きた星」でありえたのは、「地球の天文学的・地球物理学の特性」と「水の特異な物性」との奇蹟的な和合によるのである、というのが、私の心情的な実感である。そして、宇宙広しといえども、生命の存在する天体は地球だけであろう、との思いを私は抱く。

ところで、銀河系の中の現存文明星の数 n を見積もる Drake(ドレイク)の式がある。銀河系の恒星数を N 、その中で惑星を持つものの割合を p 、その惑星系中の生物生存に適した惑星の数を e 、その中で実際に生命が誕生する割合を ℓ 、その中で知的生物にまで進化するものの割合を i 、その知的生物が宇宙との通信技術文明を発達させる確率を c 、惑星の寿命に対する技術文明の寿命の割合を L とすると、

$$n = N p e \ell i c L$$

セーガンは $N = 4 \times 10^{11}$, $p = 1/3$, $e = 2$, $\ell = 1/3$, $i \cdot c = 1/100$, $L \leq 1/10^9$ とおいて、 $n = 10$ と見積もっている [C.Sagan, *Cosmos* (Random House, New York 1980) pp.298-301]。このセーガンの見積りは『朝日新聞』1982.10.25 付に紹介されているが、そこでは下の表のようになっている。

上記の見積りとの違いは *Cosmos* では L が 10^{-9} と評価されているのに、右の表では 1% と評価されている所にある。*Cosmos* で 10^{-9} と評価したのは、地球が出来てから数十億年経つが、技術文明が生まれて、高々数十年しか経っておらず、核戦争で技術文明が滅びれば、 $L = (\text{数十年}) / (\text{数十億年}) = 10^{-9}$ となるからである。ここにはセーガンの危機意識が反映されている。

銀河系の恒星数	:	4×10^{11}
その 1/3 に平均 10 個の惑星、惑星数	:	1.3×10^{12}
生物生存に適したものはその 1/5	:	2.6×10^{11}
その 1/3 に生命誕生	:	$\sim 1 \times 10^{11}$
その 1/100 に知的生物	:	$\sim 1 \times 10^9$
∴ 1 度は文明が栄えた星	:	$\sim 1 \times 10^9$
その文明星の非自滅・生きのび率 1%	:	$\sim 1 \times 10^7$
∴ 銀河系内の現存文明星	:	$\sim 1 \times 10^7 = 1,000 \text{ 万個}$

松井孝典の n の見積りは次の通りである (『地球・宇宙・そして人間』徳間書店 1987, pp.273-281)。銀河系二千億個の星のうち、寿命が 20 億年を超える (= 太陽のような) 星は約 85%, したがって $N = 2 \times 10^{11} \times 0.85 = 1.7 \times 10^{11}$; $p = 0.1$ (これは山勘で); また、 $e = \ell = i = c = 1$ (これは太陽系のような惑星系があれば、必然的に太陽系のような惑星系が形成され、ちょうど地球に相当する位置に、地球と同じような質量を持った水惑星が、その第 3 惑星として形成され、その水惑星の上には必然的に生命が生まれ、それが必然的に人間のような知的生命に進化し、その知的生命は必然的に技術文明を持つにいたる、との松井の宇宙史観に基づいている) とみなす; L はセーガン同様、高等文明の継続時間を高々 100 年、星の寿命を百億年として、 $L = 10^{-9}$ (不注意から松井はこれを 10^{-7} として計算を進めた)、したがって、 $n = 10^{11} \times 0.1 \times 1 \times 1 \times 1 \times 1 \times 1 \times 10^{-7}$ (正しくは 10^{-9}) = 1000 (正しくは 100)。

ところで銀河系は、中心部の厚さが約 1.5 万光年、銀河円板の半径が約 5 万光年のレンズ状をしていて、中心から太陽系までの距離が約 3 万光年、太陽系の所での厚さが約 5 千光年である。そこで銀河系を大雑把に、中心部の直径 1.5 万光年の球と半径 5 万光年・厚さ 5 千光年の円柱板とを組合せたものであるとみなせば、その体積は $4 \times 10^{13} (\text{光年})^3$ 、半径 5 万光年・厚さ 1 万光年の円柱であるとみなせば、その体積は $8 \times 10^{13} (\text{光年})^3$ 、半径 5 万光年の球 (これは明らかに過大評価である) で

あるとみなせば、その体積は $5 \times 10^{14} (\text{光年})^3$ となる。したがって、銀河系の体積をほぼ $10^{14} (\text{光年})^3$ と見積もってやってもよいであろう。ここに ν 個の星をばらまいたとき、星 1 個当りの体積に等しい体積を持つ球(いわば星の Wigner cell 球)の直径 d が平均星間距離だとすると、 $\nu \pi d^3 / 6 = 10^{14} (\text{光年})^3$ より $d^3 = (2 \cdot 10^{14} / \nu) (\text{光年})^3$ がえられる。 ν として銀河系の恒星数 $N = (2 \sim 4) \times 10^{11}$ をとれば、 $d \sim (\text{数光年ないし } 10 \text{ 光年})$ がえられるが、太陽系から最も近いケンタウルス座の α 星までの距離が約 4.3 光年であること、『理科年表』の「近距離の恒星」の欄には 10 光年以内の距離にある恒星としてシリウスも含めて 8 個 (11 光年以内をとれば 12 個) の恒星が挙げられていること (Wigner cell 球を最密に詰めれば最近接隣接球の数は 12 である) からみて、星間距離として、上記のようにして得られる d をとることは、まんだら外れではなさそうである。

そこで ν として、文明星の数 n をとれば、文明星間の平均距離が得られる。セーガンの見積りとして『朝日新聞』に紹介された $n = 10^7$ をとれば $d \sim 300$ 光年が、 $n = 10^3$ をとれば $d \sim 6000$ 光年が、 $n = 10$ をとれば $d \sim 3$ 万光年が得られる。

私が、地球が「生きた星」でありえたのは「地球の天文学的・地球物理学特性」と「水の特異な物性」との奇蹟的な和合によるのであり、このような条件は、実現するにはいささか厳し過ぎるであろうと思い、「宇宙広しといえども、生命の存在する天体は地球だけであろう」との思いを心情的に抱いているのは、人類発生の宇宙史的意義についての印象深い講義を聴いたことがあるからである。

私が宇宙の涯しない広大さのことを知って、それにひきかえ人間とは、何とちっぽけな取るにたらぬ存在なのだろうなどと思ってみたりしたのは、中学の高学年 (3 ~ 4 年生) の頃だったような気がする。人間のことをちっぽけな取るにたらぬ存在だなどと思ってみることは、なにかタブーを犯すようなスリルと快感があって、私は内心ちょっと得意だった。しかしこんな考えが、一見非俗のようで実はこの上なく通俗的なものであることを思い知らせてくれたのは、(旧制) 高校時代に教わった梯明秀 (かみしきひで) 先生の哲学の講義だった。すでに 40 年以上も昔のことであるが、今でも鮮明に覚えている講義の一節に「人類発生の宇宙史的意義」ということがあった：“宇宙は人類が発生するまではただ有るがまま (an sich) に存在していた。宇宙の中に人類が発生して、宇宙とは何か、と考えるようになった。このことは (人類も宇宙の一部であるから) 宇宙が宇宙自身を対象として意識するようになったことを意味する。すなわち、人類発生によって宇宙は即自的 (an sich) な段階から向自的 (für sich) な段階に入ったのである。” 私は、人類存在の意義をその宇宙史的意義から説きおこす気宇壮大な話に、圧倒される思いで聴き入った。宇宙の涯しない広さ・宇宙の歴史の涯しない長さ、人間の大きさや寿命・人間の住んでいる世界の大きさや歴史の長さなどを、ただ大小関係でだけ比べて、人間をちっぽけなものだと思ったりした、私の考えの浅はかさを反省した。そして逆に宇宙が広大で永劫であればあるだけ、それだけ人間も広大で永劫なのだと思うようになった。

何だそんなものは一種の「宇宙教」じゃないか、という人がいるかも知れない。しかし、梯先生は日本に軍国主義が支配的であった 1930 年代に、それまでの社会科学・自然科学の成果をふまえて、総合的な唯物弁証法的な世界像を構築するという意欲的なお仕事を『物質の哲学的概念』とか『社会の起源』とかの著書を通じてやってきておられた。私を感銘させた講義は、戦時中のこれらのお仕事の上に立って、先生が 1948 年に教壇から語られたものだったのである。今、私が私の物の考え方や思想を振り返ってみると、その芯のところに人間万歳とでもいうべき思想があるように思う。その思想は、友人たちとの交流や、読書や、もろもろの社会生活や社会的行為に関与することを通じて培われてきたものであるが、その根底にあるのは、梯先生のこの講義からうけた感銘である。

地球以外に知的生命が存在して、それが宇宙について何事かを哲学しているとすると、人類発生の宇宙史的意義が何だか薄らぐような気がして、生命が発生したのは地球上だけであって欲しいと思ってしまうのである。

セーガンや松井の文明星数の見積り、 $10 \sim 100$ と、私の心情的見積り 1 との間には、数値としては大した違いはない (もちろん、 $n = 1$ と $n \geq 2$ との間には質的な違いがあるが)。しかし、前者では文明星の数を減らす最大の要因は、惑星間交信を可能にするような高度技術文明継続時間の惑星の寿命に対する比である (したがって、生命の発生・進化は、さらに起こっていて、高度技術文明にまで到達した惑星はふん

だんにあったし、ふんだんにあるだろうが、いずれも高度技術文明を100年ほどしか維持できずに、高度技術文明は消滅してしまう、と想定したことになっている)のに対し、後者においては、そもそも生命発生の条件が地球でしか満たされていないのだ、と想定したことになっている。

実は私はセーガンに対してある違和感を抱いていた。セーガンが「核の冬」を憂え、地球に核戦争をもたらしてはならぬと真剣に考え、行動していることに共感を覚えつつも、かれが地球外知的生命へのメッセージと称して、有名な裸の男女と、太陽系と、水素原子と、パルサーを表す放射図形とを刻んだ銘板をパイオニア10に載せたことを、大衆受けをねらった(宇宙研究に多額の金を出すことを容認する世論を形成するための)学問的には誠実でないパフォーマンスであり、非学問的な邪道であると感じたからである。のちに、私は1987年6月末、ハンガリー・バラトン湖畔で開かれた国際天文学連合IAUのシンポジウム“Bioastronomy — The Next Steps”に招かれて参加し、この講義の主要部分を“Water: An Absolute Requirement for Life”と題して報告した。セーガンはこのシンポジウムには出席しなかったが、終了間際にセーガンの著書 *The Cosmic Connection* が大量に届き、一部ずつ参加者に贈られた。私は帰国後、夏休みにこれを読み(『宇宙との連帯』という題で訳本が出ていることを後に知った)、セーガンのメッセージは宇宙人に宛てたかの如くにみえて、実は地球人に宛てられていること、生物学的には人間とは極めて異質であるに違いない宇宙人とのコミュニケーションを志向する人類が、何ゆえ地球上で人類同士、偏狭な排外主義・盲目的愛国主義の虜になって、観念的・現実的に反目・敵対しあうのか、その愚を克服し、国境や社会的利害集団の枠やあらゆる人為的に形成された部分的集団の枠やを越えて、人類全体の相互理解と相互信頼を醸成・樹立しようではないかと(宇宙人に仮託しながら)地球人に訴えるものであること、が分かった。宇宙人がいると信じたいセーガンと、宇宙人はいないと信じたい私とが、実は同じ思いから、一方は宇宙人がいると信じたがり、一方は宇宙人はいないと信じたがっているのだ、ということが分かった。そして、セーガンに対する違和感が私から消えた。

バラトン湖畔で、IAUのシンポジウムに出席していた天文学者 寿岳 潤(じゅく・じゅん)氏と語り合う機会があったが、地球を生命の誕生しえた、特別の・例外的な星だと思ったが私への寿岳氏のコメントも示唆的であった。“Bioastronomyのシンポジウムには、これまでも天文学者以外に生物学者も参加しているが、生物学者は概して地球外生命の存在に否定的であり、天文学者がその存在を積極的に肯定する傾向がある。歴史的に見て、天文学における認識の深化・世界像の転換は、地球を特別視していた状況を脱却して、他の惑星と同列のものとみなすような視点を獲得したことによって、果たされた。宇宙生物学にこれを外挿すれば、地球に生命が存在することは事実であるから、地球がそれと同列であるような星、その上に生命が存在する星は、地球以外にもあるであろう。それが天文学者としての予感である”(寿岳談話：文責勝木)。にもかかわらず、私は「人類発生の宇宙史的意義」にこだわりつつ、地球を、そして、人類を、宇宙史に一つの時期を画した、特別の存在であると考え私の考えを、維持しつづけたいと思っている。

宇宙の中に存在している素粒子が(そして、原子・分子が)ある種の集り方をすることによって、生物が示すような振舞をすることができる、ということは、そのことが現実のものとなる以前は、単なる潜在的可能性に過ぎなかった。潜在的可能性とそれが実現して現実のものとなることとの間には、大きな隔たりがある。地球ではその潜在的可能性が現実のものとなっている。意識の問題、それにともなう“an sich”から“für sich”への宇宙史的な段階の移行の問題、と大上段に振りかぶらなくても、宇宙内物質の持っていた潜在的可能性の(稀有の条件下における)現実化という点で、地球は独特である。

地球外生命を考える場合に、2つの立場がありうる。地球外生命も地球型(炭素型)生命であろうと考える立場と、地球型とは全然別の(炭素型でない)生命が存在しうであろうと考える立場である。後者の立場は、炭素型生命に対して(エントロピー的見地から)水が果たしている役割を、当該非炭素型生命に対して何が果たすのかを具体的に示すことがないかぎり、エントロピー的見地からの批判に耐えられない。

§ 7. 土壌と消化管、食べ物と排泄物

生物は開放系であって、環境と熱や物質のやりとりをしているが、そのやりとりの場所の一つとして、植物における根と土壌、動物における消化管を考えてみたい。

1. 養分の吸収

i) 植物：根によって土壌から； 動物：絨毛によって腸から

植物が根によって土壌から、動物が絨毛によって腸から養分を吸収するとき、それは大きな高分子をそのまま吸収するのではなく、分解または消化されて、小さな分子になったものを吸収する。

ii) もとの大きな高分子と、小さな分子となった養分のエントロピー

もとの大きな高分子のままであった方がエントロピーは小さく、分解・消化されて小さな分子となった養分の方がエントロピーは大きい。

吸収する前にわざわざエントロピーを大きくする（＝エントロピー的に不経済なこと？ をする）のはなぜだろうか？

iii) 大きな高分子：そのままでは取り込めない

それは、大きな高分子はそのままでは取り込めないからである。大きな高分子のままであった方がエントロピーは小さいが、分子が大きすぎて、生物体と環境との境の壁を通り抜けられないからである。また、分解される前の高分子は、生物体の高分子とは異質の特異性を持っていて、生物体がこれをそのまま取り込むと中毒するからである。したがって、エントロピー的には不経済でも、分解・消化して（高エントロピーの低分子にして）取り込んだ後で、これまで体内に蓄積してあった低エントロピーの炭水化物や、体外から取り入れた低エントロピーの水（や炭水化物）を消費する（高エントロピー状態に変えて体外に排出する）ことによって、取り込んだ高エントロピーの低分子養分から、低エントロピーの生物体を組み上げるのである。つまり、このとき炭水化物や水を必要とし、炭水化物を二酸化炭素に変えるための酸素を必要とするのである。

iv) 食べ物と固形排泄物

漫然と考えると、動物のエントロピーの非増大を補償しているのは、食べ物（エントロピー小）と固形排泄物（エントロピー大）のエントロピーの差のように思えたりするが、実はそうではない。固形排泄物は、食べ物が消化され、吸収可能な養分となって吸収された後の残りかすがその主体であって、動物の生命維持とは基本的に無関係だったものである（生命活動にともなって生じた老廃物で腸に排泄されたものも固形排泄物の一部になるから、固形排泄物のすべての部分が動物の生命維持と基本的に無関係だったというわけではないが）。

〔付：物質循環の視点からみた尿尿の処理〕排泄物のことに触れたので、ちょっと話がとぶが、尿尿の処理にも言及しておこう。

大都会である江戸と東京の尿尿処理を図式的に比較してみると、右の図のようになる。江戸では後背地の農村から米や野菜が運び込まれ、尿尿は農村に肥料として還元され、

海産物	尿尿
江戸湾	江戸
農村	農村
廃水	農産物

雑糞水は適度の養分を含んで江戸湾に流れ込み、魚介や海草を育てて、江戸前の海産物として、江戸に戻ってきた。物質循環がスムーズに行なわれていた。当時、江戸が世界屈指の大都会であったにもかかわらず、世界の(欧米の)大都会に付きものであった不潔・非衛生状態と無縁でありえたのは、このことによる。さて、現在の東京では、大量の食糧品が(たとえばアメリカからの農産物として)運び込まれているが、それが元の場所に還元されることなく、大量の尿尿となって海上に投棄されている。物質循環は断ち切られている。今、日米間で米を含む農産物輸入の自由化が懸案になっているが、物質循環の見地から見た農産物輸入の自由化に条件として、食糧の変形した成の果としての尿尿をアメリカが引き取ること、を課してもよいであろう。これはアメリカ農業にとってもためになるはずだ。それをやらないと、アメリカの穀倉地帯は遠からず砂漠になるだろう。アメリカの農業は鉱山採掘的農業とでもいうべき様相を呈しており、豊富な地下水の乱掘によって農業の生産力の高さが支えられているのである。[この付記は、エントロピー学会シンポジウムでの諸発表の受け売り]

<<東京>> 尿尿 農産物
海上投棄 ← 東京 ← 米国

2. 土壌や消化管の中での分解・消化

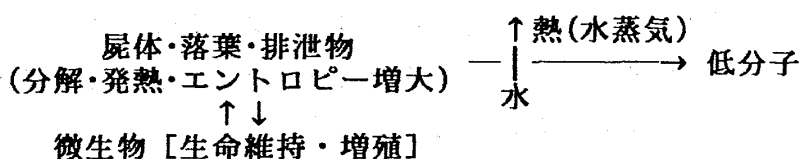
i) 土壌

動植物の屍体・落葉・排泄物等は、分解されてしまった状態に比べればエントロピーは低いが、高等植物はこれらをこのままでは利用することができない。

土壌中の微生物が、これら低エントロピー(高エネルギー)高分子化合物を低エントロピー源として利用し、これを分解して、高エントロピー(低エネルギー)の(低分子の)物質に変えることによって(同時に、液体の水を水蒸気に変えることによって)、微生物自体のエントロピー増大を防いで、生命を維持する。

微生物の生命維持(エントロピーの非増大、ないし減少)のために、高エネルギーの低エントロピー源として利用された高分子化合物は、そのことによって分解され、遂には高等植物が利用できるものになる。

微生物による低エントロピー・高エネルギーの高分子化合物の低エントロピー源としての利用の様式を図式的に右に示す。



[なぜミイラは乾燥状態で保存されるか、乾燥状態でないと保存されないか?]

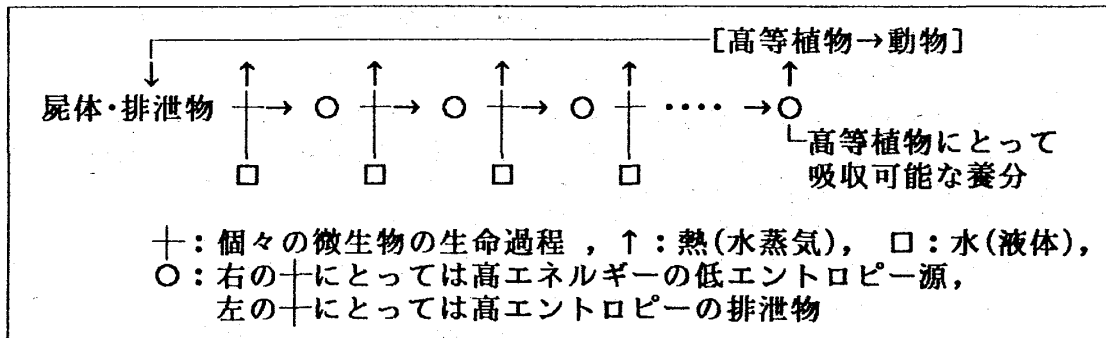
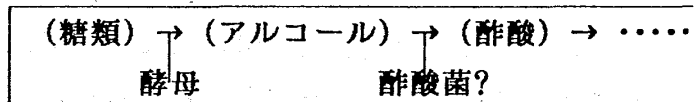
微生物にとって、高エネルギーの低エントロピー源は遺体として存在する。これを低エントロピー源として機能させれば、発熱する。この熱を水の蒸発によって処理しなければ、微生物自体の機構が、温度が上がりすぎて、破壊される。低エネルギーの低エントロピー物質たる水がなければ、高エネルギーの低エントロピー源は低エントロピー源として機能しえない。

カビがじめじめした所に生えるのも同じ理由からである。

ii) 低エントロピー源利用の連鎖

高エネルギー・低エントロピー物質の微生物による利用は、何段階にもわたる連鎖をなしている。たとえば、酵母は糖類を低エントロピー源として利用し、それをよりエントロピーの高いアルコールに変えることによって生きてゆくが、そのアルコールを低エントロピー源として利用し、これをエントロピーのより高い酢酸に変えることによって生きてゆく微生物もいる。

低エントロピーの高分子化合物は、このように何段階にもわたって微生物に利用されな



がら分解され、最後には高等植物にとって吸収可能な(高エントロピーの)低分子化合物となり、高等植物によって吸収されたあとで、植物体内で水と炭水化物の消費によって、その植物の特質をそなえた高分子化合物に組み上げられる。

[辛口のワインと甘口のワイン] 生物集団の死滅には2つの型がある。食糧(=高エネルギーの低エントロピー源)がなくなつての死滅と、環境が高エントロピー化して、環境に高エントロピー物質を排出することが出来なくての(=環境汚染による)死滅である。ワインは樽の中で醸造するが、出来たワインには辛口と甘口がある。辛口ワインは酵母にとって餌の糖類がなくなったもの、甘口ワインは餌の糖類はまだ残っているが酵母にとっての環境が排泄物たるアルコールで(酵母にとっては)汚染されて、これ以上生きつづける(=糖をアルコールに変える)ことが出来なくなったものである。(これは槌田敦説の勝木流の受売り)

「土に帰す」・「水に流す」：日本語には、「土に帰す」とか「水に流す」とかの表現があるが、このような表現は、エントロピー的見地からみて、極めて含蓄の深い言葉だということができる。

iii) 生態系

以上のような考察から、生態系とは「(高エネルギー)低エントロピー源の利用の連鎖によって循環的につながった、広汎な共生の体系である」といえよう。

iv) 植物と根、動物と消化管

植物は、水や養分を大地の土壌から根によって吸収する。そのために植物、特に根のある植物は、成体となつてからは位置の移動が自由にはできない。

動物が自由に移動できるのはなぜか。それは、環境を体内に取り込んでいるからである。すなわち、植物にとっての土壌に相当するものを消化管として体内に取り込み(唾液から始まって、土壌中の微生物に相当する数々の消化酵素が、消化管の中でうまく働いている)、生命発生時の海に相当するものを血液として体内に取り込んだからである。腸壁あるいは絨毛はさしづめ植物の根あるいは根毛に相当しているといえよう。

消化酵素	⇔	土壌中の微生物
消化管	⇔	土壌
血液	⇔	海

v) 「土が病む」とは?

逆に植物の立場に立ってみると、植物にとっての土壌は、われわれの胃や腸に相当している。今、化学肥料の乱用等によって、土が病んでいるといわれるが、それを植物語に翻訳すれば、植物たちはわれわれの胃腸病に相当する病いを患っている、ということが出来るかも知れない。胸焼や下痢に悩むようなとき、われわれは病む土に生うる植物の苦悩にも思いをいたすべきである。

動物の消化管内の消化酵素による有機物の分解は、土壌中の微生物なしには（つまり、生命の存在なしには）起こらないと思われた現象が、生命が存在しなくても、酵素という化学物質があれば進行するということを示すものである。これは § 2 の 2 での江上の指摘の 1 実例である。

消化酵素だけでは力不足で、微生物そのものを胃の中に住まわせている動物もいる。たとえば、牛や羊。『科学の事典』（岩波書店、1985）の「消化・吸収・排出」の項には、「哺乳類の複腔胃には、多数の微生物がいて、発酵している部分（前胃）がある。ウシやヒツジでは第1胃と第2胃がこれにあたる。微生物は、いろいろな栄養素や繊維質を分解して、酢酸などの短鎖脂肪酸や、二酸化炭素、メタン、水などをつくる。短鎖脂肪酸は、胃壁から吸収されて、動物にエネルギー源として利用される。……ウシやヒツジの唾液には、血中の尿素がとけだしている。前胃にいる細菌は、この尿素から自分の体（菌体）のたんぱく質を合成する。その量は、ウシで1日に約100gである。このたんぱく質は小腸で消化され、吸収される。つまり、ウシの体のたんぱく質の分解物である尿素を、たんぱく質合成の材料として再利用していることになる（尿素の再循環）。だから、えさのたんぱく質が少なくても生きていられる。このように、前胃発酵がさかんな動物は、繊維分が多く、たんぱく質が少ないえさでも生きてゆける。つまり、草食に適している。」とある。〔尿素にまで分解してしまうと、蛋白質合成の材料としては動物にとっては使えないのだろうが、細菌は尿素から蛋白質を合成できる。その蛋白質を消化して（尿素までは分解せず、動物に利用可能な途中段階まで——多分、アミノ酸まで分解して）、動物にとって利用できる蛋白質合成の材料にするのであろう。〕動物の消化管が、土壌と生態学的に“相似”であることが、このことに明確に示されている。

われわれの腸内にも沢山の細菌がいるが、もともと消化管が土壌に相当するものであることを考えると、細菌が住み着くのは当り前のことなのかも知れない。細菌は、悪さばかりでなく、良いこともしているであろう。

3. 水の重要性（気づかれないくらい重要なのだ !!）

エントロピー的視点に立つことによって初めて理解可能となることは、低エントロピー源としての液体の水の重要性である。

われわれは、生きていくのに不可欠なものとして、酸素・食べ物・水を思い描くのが常である。そのこと自体は間違いではないが、これらのそれぞれの重要性に対する、われわれの暗黙裡の実感の度合いを比較し、その実感が適切か否かを検討してみよう。

i) 酸素の必要性・重要性和、それに対する実感

酸素は、十分な量の体内蓄積は不可能であって、常時空中から（または水に溶解したものを水中で水から）補給しなければならず、10分程度の窒息が殆ど確実に死を招くことは、生存のための酸素の不可欠性を有無をいわさず、強烈に実感させる。しかし、酸素の役割はあくまで補助剤としてのものである。すなわち、高エネルギー・低エントロピーの炭水化物を低エントロピー源として機能させるさいの、補助剤としての役割である。

ii) 炭水化物の必要性・重要性和、それに対する実感

炭水化物は、(酸素とは対蹠的に) 生体内でかなりの量の蓄積が可能であって、数日の断食も死を招くことはないが、食糧の入手には代価の支払を要すること、および食うことの楽しさと、空腹ないし飢餓の苦しさの対比が、炭水化物の重要性を有無をいわず、実感させる。

iii) 水の必要性・重要性と、それに対する実感

生体における水の蓄積可能性はちょうど上の兩者の中間にある。

数日の水絶ちは確実に死を招くが、酸素の欠乏の場合ほど時間的に激烈ではないこと、食糧とちがって水が無料で(または、食糧に比べてずっと安価で) 入手できることなどのために、われわれは無意識のうちに(経験主義的に) 酸素や炭水化物に比べて、水の重要性を過小評価しがちである。

水の摂取が比較的容易であることは、実は、比較的容易に摂取できねばならないほどに重要だ、ということの現われである。

水の摂取が比較的容易であるがゆえにかえってその重要性が見落とされがちであることは、排尿が排便に比べて、生命維持の上では(=エントロピー廃棄機構としては) 段違いに重要であるがゆえに、排泄行為としてはずっと簡便でわずらわしさの少ないものであり、そのことでかえって排尿より排便の方が(わずらわしくて、印象が濃いために) 重要であるかのように実感されることと似ている。実は、簡便に排尿できねばならないほどに排尿は生命維持のために重要なのである。事実、便秘が生死に関わることは殆どないが、尿閉は尿毒症を招き、生死に関わる。

低エネルギーの低エントロピー源たる水の役割が無視されがちであることは、高エネルギーの低エントロピー源たる炭水化物だけを一面的にクローズアップすることになり、高エネルギー性と低エントロピー性を概念的に明確に区別して認識することを妨げ、低エントロピー性として把握されるべき特質が高エネルギー性として把握されて“維持のエネルギー”のような適切ならざる概念が無反省に用いられるような状況をもたらし、また“負のエントロピー”をもっぱらエネルギーとのみ結びつけて理解する偏向(たとえば“太陽光のネゲントロピー性”のように)を生んだ。液体の水が低エネルギー物質であることに惑わされてその低エントロピー性を認識することが出来ず、生物の存在にとっての水の重要性を理論的に説明出来ないまま「水の重要性は、生体の大部分が水であることから自明である」といった類の、説明にならない説明で、なれあいの理解の上に安住するにとどまる傾向があった。酸素の欠乏がもたらす急速な死も、炭水化物をエネルギー源(カロリー源)としてだけみる立場からは、絶対に理解することのできないはずのことであり、低エントロピー源とみることによって初めて理解できるはずのことである。エネルギーの欠乏ならば、おそらく少時のそれには耐えられるであろうが、時々刻々のエントロピーの増大こそは、それを間髪を入れず取り除くことをしない場合、生体の当該組織の壊死をもたらす可能性があるだろうからである。エントロピー廃棄のためには、炭水化物を低エントロピー源として機能させる必要があり、酸素の欠乏はそれを不可能にするからである。(そして、低エントロピー源として機能した炭水化物が発する熱を除去するのが水なのである。)

ここでもう一度カルノーの言葉を引用しておきたい。低温熱溜(=水)の重要性の認識こそは、

カルノーの思想の根幹をなすものである。低エントロピー性を高エネ

カルノー：「火の動力について」

“蒸気機関で動力が発生するのは、熱素が消費されるためでなく、熱い物体から冷たい物体への熱素の移動によるのである。この原理は熱によって動かされるすべての機関に適用できる。動力を得るためには、熱を作りだすだけでは不十分である。冷

ルギー性に解消するのは、カルノーの思想からの逸脱である。

たさをも供給しなければならない。冷たさなしには、熱は役に立たないのである。”

§ 8. エントロピー廃棄の多重構造とその階層性

§ 2 の 4 で論じたように、環境が環境でありうるためには、環境は自らの環境を持たねばならない。つまり、エントロピー廃棄は多重構造を持っている。この多重構造とその階層性について、考察してみよう。

1. 人体を例に

i) 細胞からのエントロピー廃棄

細胞は血管を流れる血液(動脈血)から、養分と O_2 を摂取して生命活動を行なった後に、その過程で生じた老廃物と CO_2 と熱を血液中に排出する。老廃物と CO_2 を受け入れて、血液は静脈血となる。

いわば、血液(血管)は、上水道であり、下水道であり、冷却用の冷却水であり、体内に取り込んだ海である。

ii) 血液からのエントロピー廃棄

血液中の CO_2 は、肺で酸素と交換して排出され、また、呼気による放熱もなされる。血液中の老廃物は、腎臓あるいは汗腺で濾過され、血液中から排出される。

血液中の老廃物を取り去ることができないとき、血液は汚れて、細胞は血液から低エントロピー物質を取り入れることも、血液中に高エントロピーの老廃物を捨てることもできなくなって、生命活動が維持できなくなり、人は病気になる。

iii) 人体からのエントロピー廃棄

肺では、(炭水化物を低エントロピー源として機能させる補助剤としての O_2 が取り入れられ、) CO_2 が排出される。また、呼気による放熱もある。

汗腺からは、老廃物が皮膚表面に排出されるが、同時に、汗の蒸発(=放熱)がなされる。

腎臓でされた老廃物は尿となって膀胱にいたり、体外に排尿される。

iv) 環境からのエントロピー廃棄

このようにして環境(=地表)に排出された高エントロピー物質のエントロピーは、究極的には、地球に備わったエントロピー廃棄機構であるところの水循環によって、放熱として、宇宙空間へ放出される。

生体からのエントロピー廃棄過程は非常にデリケートな過程であり、この過程の正常な進行のためには、体温、体液の成分と濃度、圧力、環境の温度、湿度等が、適当な状態に保たれていることが必要であり、それが崩れると病気になり、ひどければ死に至る。生物が2種類の低エントロピー物質を持っていることが、この微妙なバランスの保持を可能にする。体温が下がり過ぎたときには、炭水化物を低エントロピー源として機能させることによって、生体のエントロピーを高めないで、体温を上げることができる。体温が上がり過ぎたときには、水を低エントロピー源として機能させることによって、生体のエントロピーを高めないで、体温を下げることができる。

2. 温度からみた階層性

エントロピー廃棄の多重構造の、それぞれの段階における温度に着目してみると、次の“序列”的な関係があることが分かる：

$$T(\text{生体内部}) > T(\text{体表}) > T(\text{環境・地表}) > T(\text{上空}) > T(\text{宇宙空間})$$

この温度の序列は次の事実からの必然的な結果である。すなわち、エントロピー廃棄の各段階で、当該系からの環境への放熱が必要であり、放熱ができるためには、系の温度は、環境の温度より高くなくてはならぬ。

水循環による地球からのエントロピー廃棄は $T(\text{地球・上空}) > T(\text{宇宙空間})$ であるがゆえに、可能である。細胞からのエントロピー廃棄は $T(\text{体内}) > T(\text{体表})$ であるがゆえに、可能である。

もし、われわれの体の中の細胞が、人体に束縛されていることを不自由だと感じ、自由を求めて、体の外で生きようとしたと、仮定してみよう。この“自由細胞”は、環境が直接自分にとって快適な温度であって欲しいと思うだろう。だが、もし、環境が直接細胞にとって快適な温度だったとしたら——それは人間にとっては暑すぎる。

地球に“拘束”されてしか生きて行けないことを自由への束縛だと思い、「宇宙への進出」を夢見る人たちがいる。その人たちは、宇宙空間が直接人間にとって快適な温度であることを望むかも知れない。しかし、環境が直接細胞にとって快適な温度だったら人間にとっては暑すぎるのと同様、もし、宇宙空間が直接人間にとって快適な温度だったとしたら——それは“生きている星”地球にとっては暑すぎるのである。

生物生存の条件は、当該生物にとっての直接の環境の、個々の温度・個々の圧力等でのみ考察されるのではなく、エントロピー廃棄の階層的な多重構造の全体の中で見なくてはならない。

深海底に熱水鉱床があることが発見された。熱水鉱床からは硫化水素をはじめとする様々な物を含んだ 200～300℃ の高温水が噴出しており、その付近には予想よりずっと豊かに生物が生息していることが分かった。この事実から、200℃という高温や数十気圧という高圧のもとでさえ、生物が生きている！と驚かされている。しかし、単に高温だ、高圧だ、というだけでなしに、この場合のエントロピー廃棄の機構が具体的にどうなっているのかを考察することが、現象の本質理解へつながる道だと思う。噴出口からは熱水が吹き出していたとしても、そこからある程度離れた場所での海底の水温は4℃程度であろう。噴出口の周りの海底はかなり急な温度勾配をもっているはずである。ほんとに生物は 200℃の場所で生きているだろうか、温度勾配がなにか重要な役割を果たしているだろうか、化学的には H_2S を有効に利用しているのであろうが、その具体的な様相はどのよう、そこでの生態系はどのようであろうか、等々を調べたい気がする。

§ 9. 若干の応用問題

1. 以上述べたことは単なる思弁か？

以上、エントロピー的見地から様々な事を考察してきた。その考察は、これまでの知見に何か新しい知見を加える、というよりは、主に、周知の事実をエントロピー的見地から解釈しなおす、という類のものであった。

このような考察は、観念的な抽象的な思考にすぎず、科学というよりは自然哲学的な

思弁にすぎず、現実を生起する諸問題に対しては無縁で無力な思考の遊戯にすぎないであろうか？

否。このような思考は、決して単なる観念遊戯でもなければ、現実問題に対して無縁でも無力でもない。それは、現実批判の有力な立脚点を与えうる。

2. 現在のイデオロギー状況の一特徴

私は、現在のイデオロギー状況における一つの特徴は、科学の衣をまとった詐欺まがいの議論の横行にある、と思っている。そのような議論を展開する者は、科学が発展しさえすればどんなことでも可能になる、といった類の、一種の科学万能主義をふりかざしている。しかし、出来ないことを「出来ない」と明言することも、科学の大事な役目である。熱力学はまさにそのような学問であって、熱力学の第1法則と第2法則の確立は永久機関への幻想を断ち切り、善意の技術家の徒労を未然に防ぎ、詐欺師の跳梁を封じた。現代もまた、現代にふさわしい熱力学の2法則に対応するものを必要としているのであり、エントロピー的統一的自然像の確立がそれにあたるものであろう、と私は考えている。

「科学・技術の発展は、ときに壮大な浪費を伴う」との実感を、特に軍事費に関連して私は持つ。昔、私の学生の頃、物知りがいて教えてくれた。自軍の飛行機が撃墜されたり軍艦が沈められたりすることは、死の商人どもの歓迎するところなのだ、そのことで兵器は消費され新たな需要が生ずるからだ、と。戦後45年間、あるいは日本軍が復活してから40年間、日本軍の兵器は演習や軍事業務中の事故で消耗することはあっても、戦争で大量に消費されることはないままで来た。にもかかわらず、特別の聖域として、多額の軍事費が要求されつづけている。その根拠は何か。科学技術の日進月歩が軍事技術の日進月歩をもたらして日ごとに新兵器を生み、それが昨日の高価な新兵器をたちまち時代遅れのものにし、新兵器売込の口実となる。日本の「防衛計画」がアメリカの兵器売り込み計画に主導されている事実が、このことを雄弁に物語る。科学技術が軍事と密接に結びつく時代には、科学技術者の自由も損なわれる。

3. 応用問題

ある種の混沌とした是非を分かちがたくみえる議論に、エントロピー的見地に立つことによって、明快な断を下すことが出来ることを、したがって、私が展開してきた思弁が現実問題に対して無縁でも無力でもないことを、若干の応用問題を論ずることによって示したい。

i) 砂漠でもたわわにみのる植物

長期にわたって帝国主義列強の植民地として搾取されつづけてきたために自立的な経済発展の基盤を培いえず、そのために独立後もその後遺症に悩む地域、すなわち「第三世界」の国々がある。遺伝子組換え実験の正当化のために、これらの国々の食糧難が言挙げされることがある。遺伝子組換えによって、砂漠でもたわわに稔る植物を創り出すことができれば、これらの国々(特にアフリカ諸国)の食糧難解決に寄与しうるだろう、というのである。

だが、遺伝子組換えによって「砂漠でもたわわに稔る植物」を創り出せるであろうか？「光合成」の章で明らかにしたように、光合成には日光だけでなく大量の水が必要である。水の乏しい所では、いかに灼熱の太陽が照りつけようとも、大規模の光合成は行なわれえず、穀物はたわわには稔らない。アメリカ国立塩害問題研究所のヤン・シェルフガルド氏が「水不足でも育つ植物は生長が遅く、早く育つのは水を沢山やらないといけないという二律背反も自然界にはあり……」(『朝日新聞 1982.10.25)と語っていることは、エントロピー的視点からの結論を裏付けている。「砂漠でない水の豊かな所に植えれば、たわわに稔る穀物」を作ることはできる。その種子を砂漠に播いても、貧相な植物にしかならない。

食糧難解決のために、科学・技術的立場からなすべきことは「砂漠でもたわわに稔る植物の開発」ではなくて「沃土の砂漠化の防止」および「砂漠の沃土化」である。これが、この問題に対するエントロピー的見地からの答えである。

ii) 自立して生きてゆくスペース・コロニー

スペース・シャトルの成功をもって、スペース・コロニー時代の幕開けだとの説をなすものがある。スペース・シャトル計画は 1986 年 1 月の大惨事によって、一時そのテンポを落さざるを得なかったが、かりにこの大惨事がなかったとしても、それは本当にスペース・コロニー時代の幕開けでありえたらうか？ そもそもスペース・コロニー時代などというものがあろうのだろうか？

宇宙植民論者が宇宙植民島(スペース・コロニー)にはエントロピー廃棄機構が備わっていないなければならないことを認識している兆候は全く見られない。かれら(日本の宇宙植民論者)は、エントロピー廃棄の重要性を認識せず、エントロピー廃棄における水の重要性を認識せず、ただオニールの構想を口移しに反復して、植民島の建設場所(ラグランジュ点)、建設用資材の供給地(月)・精錬方法・輸送方法、植民島の大きさ・人口・形・内部のモデルプラン、等々について、微に入り、かつ壮大な画餅を描き上げる。しかし、水についてはほとんど触れない。わずかに、生活地域で必要に応じて小川なども作られるだろう、農業地域では養魚場や水田が作られる、といっただけである。かれらにとって水は、単なる、心なごませる田園風景の点景の一つにすぎず、かれらは地球上における水の本質的役割(=エントロピー廃棄の作業物質としての)を認識していない。

かれらは、太陽電池を用いて、太陽光をエネルギーに変換さえすれば、万事うまく行く、と思っているのだ。しかし、太陽光がエネルギーに変換されるとき、若干の太陽光が熱化する。この熱化のさいのエントロピーの増大が何かある系のエントロピーの低下を補償する。この熱化による温度上昇を気化によって防ぎ、エントロピーの増大を担うのが、水——水循環である。

しかし、宇宙植民島では、水はエントロピー廃棄の作業物質たりえない。そうでありうるための必要条件を宇宙植民島は備えていない。まず第一に、宇宙植民島の質量が小さすぎる。宇宙植民島は、重力で水を保持するのではなく、天井を張って、水を保持している(天井を張るのは大気を保持するためでもある)。

気化して水蒸気になった水が、大気からの浮力によって、遠心力に抗して、中心部(天井)に向かって上昇し、天井で放熱して液体または固体にもどったとしても、そのまま天井に付着または凍結して、“下”には落ちて来ず、水循環は断ち切られるだろう。宇宙植民島は“生きている星”としての条件を満たしえないのである。熱源天体は太陽である。作業物質は太陽電池であるか？ だとして、エントロピー廃棄のどのようなサイクルが成り立つのか??? 宇宙植民島は自立して生きていくことは出来ず、たとえ作られたとしても、地球に寄生することなしには生きて行けない。スペース・ステーションやスペース・ラボラトリーは可能であろうが、地球から自立して生きて行けるスペース・コロニーは実現不可能である。エントロピー廃棄問題を無視したコロニーの建設は、宇宙空間に第2種永久機関を作り上げることに等しいからである。宇宙植民論者は宇宙空間に第2種永久機関を作り上げることを夢想しているのであり、しかもそれを地球の危機を救う救世主であるかのごとく、自ら祭り上げているのである。これは科学というよりはむしろ詐欺である。これがエントロピー的見地からの、スペース・コロニーに対する結論である。

iii) 自己増殖機械

第2種永久機関の落とし穴に落ちた点では、鬼才ダイソンも例外ではない(『宇宙をかき乱すべきか』18,19,20章)。かれは、フォン・ノイマンが原理的な製作可能性を証明したという、自己増殖オートマンにかれの夢を託す。それが原理的に製作可能であったとして、その可能性を現実性に転化させる契機が何であるかの考察を欠いたまま、ただ指図書と原料と太陽エネルギーとがありさえすれば、自己増殖が可能だと考えて、かれの思考実験を展開する。かれは、自己増殖にともなうエントロピー低下を何が補償するのかについて、思いをめぐらすことがない。数学者ムアの着想したという「人工植物」の思考実験の障碍を、かれはただ、経済的障碍と繁殖しすぎの生態学的障碍にのみ求める。その真の障碍がエントロピー廃棄機構の欠如、すなわち、繁殖不可能にあることはエントロピー的見地からは明白なのに。もっとも、ダイソンは2度ほど、水の役割の重要性の認識に接近している。1度目

は、火星が経済的価値をまったく持たぬのは、液体の水と温暖さの欠如のためであるとして。2度目は、地球が日光と水との豊富な唯一の場所であり、これが生命が地球上で生じた理由であろうとして。折角ここまで近づきながら、かれは水の役割を物理学者の目でとことん突き詰めるということをし、グレーな技術とグリーンな技術という押韻(アリテリョソ)的・語呂合わせ的な技術の分類に自ら興ずるあまり、たちまちそこから遠ざかって、グレーな技術の領域では鉄とアルミニウムと珪素で作られた自己増殖機械が繁殖するであろうと夢想するにいたる。

かれの詩人的資質・性向がここではネガティヴに働いて、かれを真理から遠ざけたといえよう。あるいは鬼才ダイソンの鬼才ゆえの自縄自縛か。エントロピー的視点に立ってこのダイソン自伝の後半を読むとき、かれの議論が才気あふれる絢爛たるものであればあるだけ、その議論の華麗な虚しさが際立ってくる。

iv) 地下都市

1989年2月の“大興の礼”に大挙来日した外国報道陣中の少なからぬチームが、来日のついでに、東京に本社を置く大手建設会社の「アンダーグラウンド・フロンティア(地下開発)」の企画を取材したという。この事実を伝える『朝日新聞』(89.4.22)は“東京への人口集中、機能集中が生んだ地下高騰が呼び水となり、建設業界にはいま、地下開発旋風が吹き荒れている。国が音頭をとる大深度地下利用法案づくりという追い風もあり、大手各社は地下都市開発構想をつぎつぎと打ち出し、海外のマスコミの注目を引くまでになっているのだ”と述べて、その構想をやや詳しく紹介し、その後また(89.5.10)、“地下数十メートルの大空間で、惑星が浮かぶ宇宙映像を見ながらスキーを滑る。こんな施設を備えた「地下都市」を、明治神宮外苑の神宮球場などの地下につくる構想が持ち上がっている。建設会社の間組がこのほど発表した「青山地区ギア構想」で、昨年から今年にかけて、各省庁や建設大手が、行き詰まりの都市再開発策として競って打ち出したジオフロント(地下開発)構想の一つだ。「まだ夢物語」という声もあるが、開発地区を特定した構想は初めて。「技術的には十分可能。二十年後には実現させます」と、具体化に向けての研究会を設けるなど、関係者は本気である。”としてその計画を詳細に紹介し、“大深度地下空間構想としては、これ以外に、清水建設が「アーバン・ジオ・グリッド構想」、大成建設が「アリスシティーネットワーク構想」をそれぞれ昨年発表している。背景はここ数年の東京の地価高騰と過密。人口、都市機能の膨張を地上でこなせなければ、地下以外に残された空間は無いというわけだ。/現在の地下ブームの引き金になったのは、昨春、運輸省が打ち出した「大深度地下鉄構想」。各省庁も構想を次々と発表し、今国会に提出する大深度地下利用法案の一本化作業を進めているが、許可権などをめぐる縄張り争いで難航している。”と伝えた。

このような建設会社の地下都市建設構想は、新しい科学技術の夢を実現し、大都市の過密状況解消の鍵となりうるだろうか？ 答えは、エントロピー的視点に立てば一目瞭然、No! である。

地下都市の活動は、エントロピー増大則の必然的結果として、大量の熱の発生をともなう。地下都市の活動が活発であればあるほど、その発生熱量は大きい。地下都市の活動を継続するためには、この発生した熱の廃棄が不可欠である。この熱の廃棄を空冷式で行なうとするか。すると、その地下都市の地上にある都市は、下から吹き上げる温風で都市砂漠と化してしまうであろう。水冷式で行なうとするか。そのためには、大量の水を必要とし、水不足と排出温水の公害が地下都市の周辺地域に生ずるであろう。あるいは、そもそも水が足りず、水冷式には出来ないかも知れないのである。

v) シリコンバレー

半導体工業団地の工場の、清浄無垢の作業場で高性能の半導体集積回路が作られている。その清潔な作業場は、こんな奇麗な場所で働きたいという気を起こさせる。しかし、局所の清浄無垢は周辺の汚染を伴う、というのが、エントロピーの見地からの一結論である。私が今の職場に赴任した頃の初期の卒業生の中には、すでに会社の部長クラスになっている者もあり、求人のために私の研究室を訪れる。ある時、その一人に訊いてみた。きっときれいな大量の水(蒸留水)を必要とするに違いないと思うが、水に含まれていた不純物などの処理はどうやっているのか？ 答えて曰く、もともと水に含まれていた不純物には大して気は使わない。それはもともと含まれていたもので、われわれが汚染したものではないから。むしろ大変なのは、も

ともとの水に含まれていなかったものの(廃液の)処理である。素材の洗浄に大量の有機溶剤を使う。その廃液を川に流す訳にはゆかぬ。工場敷地内の溜池に溜めてあるが、それがどんどん溜まっていく。それが一番頭が痛い。

vi) 過剰包装

化学工業に広い重要な用途のある水酸化ナトリウム(苛性ソーダ)は食塩の電気分解によって作られる。このとき陽極から塩素が発生する。塩素をそのまま大気中に放出するわけにはいかない。この塩素を石油化学工業の一原料として用いて、包装用の透明膜が製造される。われわれがデパートの食品売場で過剰包装の食料品を買い込むとき、われわれは食料品と一緒に「たっぷり塩素を吸い込んだ石油」を持ち帰るのである。このラップ類は消費者の家庭でゴミとなり、自治体のゴミ焼却場で燃やされる。このとき塩素(むしろ塩酸)が発生する。何のことはない、苛性ソーダ製造の現場で直ちに塩素を空気中に放出すれば、大気汚染の企業責任は誰の目にも一目瞭然なものだから、塩素を石油に吸わせて包装用透明膜に化けさせて商品に仕立て、これを消費者に押しつけるのである。ゴミ焼却のさい、わずかながらダイオキシンも発生する。その量はゴミ焼却のさいの発生塩酸量が多いほど多いそうである。発生塩酸量が多いときは、それを苛性ソーダに吸わせて、大気中への塩酸放出量を抑制する。だが、この苛性ソーダはどのようにして作ったのか? 食塩の電気分解によって。では、そのとき発生した塩素は? 何と漫画的な堂々めぐりであることよ! 過剰包装は、塩素発生企業の責任を消費者と自治体に転化する社会構造の、商品流通過程における一発現形態である(以上は河宮信郎による指摘の、勝木流受け売り)。ちなみに包装用透明膜(ラップ)類の原材料は、ポリ塩化ビニリデン $[-H_2C-CCl_2-]_n$ ないし ポリ塩化ビニール $[-H_2C-CHCl-]_n$ であるが、その塩素含有率は重量比にして、前者で $(2 \cdot 35.5 / (2 \cdot 1 + 12 + 12 + 2 \cdot 35.5)) = 73.2\%$ 、後者で $(35.5 / (2 \cdot 1 + 12 + 12 + 1 + 35.5)) = 56.8\%$ である。なおパック用のケース類は、スチロール樹脂、ポリエチレン、ポリプロピレン等が主たる原材料であるが、これらには塩素は含まれていない。

§ 10. さらに論すべきこと・論じうること

以上、主として「地球・環境・生命論」とでもいうべきものをエントロピー的視点に立って論じてきた。エントロピー的視点から論すべき問題は、このほかにも次のようなものがありそうである: 物質循環論、資源論、技術論、生産過程論; 鉱工業技術史論、農漁業技術史論; 環境論(環境現象学から環境科学へ)、各論的生態系論、微生物論、土壌論; 環境緑化論、森林論; 進化論; 宇宙生物(地球外生命)論; (情報論?)。

上にあげた問題の中には、すでに植田敦や河宮信郎によって論じられている問題もある(植田:『資源物理学入門』, 河宮:『エントロピーと工業社会の選択』)

環境論が環境科学になるためには、それを科学たらしめる適切な概念の把握・確立が必要であるが、エントロピー的立場に立つことによって、それが可能となるだろう。

情報論に()と?をつけたのは、情報理論における情報が物理学におけるエントロピーと同じ数学的表現を持つということで、両者を次元だけが違う本質的に同じもの、とみなして「情報エントロピー」などと呼んでよいかどうか、疑問だからである(もしそうなら、仮りに現金と預金の総和が一定だ、というような場合、両者を合わせたようなものを「財産エネルギー」などと称して、物理学におけるエネルギーと同一視してよいのか? という疑問が起こる)。何か「情報エントロピー」と対になって現われる温度に相当するような量が定義でき、その量が系の知見として有用である、というようなことが実際に存在することが、情報論に持ち込んだエントロピーという概念を物理学でのエントロピーと同一視する事が出来るというためには必要だ、という気がする。

私は、社会・経済現象を直接エントロピーという概念によって説明する道は取らない。社会現象の理解に対するエントロピー的視点からの寄与は、これまで経済学の枠の外に捨ておかれていた(特にそれを意識的に取り入れることをしなくても経済学が経済学たりえていた、あるいは、経済学としての有効性を保持しえていた——と思われていた)

自然的諸制約を意識的に経済学の中に取り入れるべきであることを明示した点、および、棄てることをも経済学の対象として経済学の中に取り入れるべきであることを明示した点にある。それらを意識的に取り込んだ上で形成される、社会的諸現象を研究するのにふさわしい観念体系とその諸概念に基づいて、社会的諸現象の理解・説明がなされるべきであって、物理学分野の不可逆過程の研究の中から新たに浮かび上がってきた物理学的な諸概念に短絡的に社会的諸現象を結びつけることによって、社会現象の新説明(むしろ珍説明)を提出すべきではない、と考える。

私自身に即していえば、エントロピー的視点に立つことによって、「生産力と生産関係の矛盾」という言葉が、非常な深みと重みをもって理解できるようになった。「生産力の発展を理性的に抑制できないような生産関係」が現時点での「生産力と生産関係の矛盾」の典型的な現われである。

§ 11. 生きてゆくことに伴う物質の循環とエントロピー廃棄

これまでに展開してきた考察に基づいて、「生きてゆくことに伴う物質の循環とエントロピー廃棄」を一つの図式にまとめてみた。“勝木の図式”と仮りに名付けて、次頁に示す。

(説明)

図の白抜き矢印は、低エントロピー物質とその移動を示し、

影をつけてよごした灰色の矢印は、高エントロピー物質とその移動を示す。

上段には、水蒸気が上空での熱放射によって液体(または固体)の水にもどる過程が示されている。これは、地球からのエントロピー廃棄の過程でもある。

中段には、光合成の過程が示されている。水(低エントロピー)と二酸化炭素(高エントロピー)と太陽光(エネルギー)とが導入・消費されて、高エネルギー・低エントロピーの炭水化物が生成・蓄積され、同時に水蒸気(高エントロピー)と酸素が生成・排出される。図中に示した CH_2O は、 $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ の $1/6$ 分子を意味する。

下段には、生命活動を非常に単純化し模式化したものが示されている。

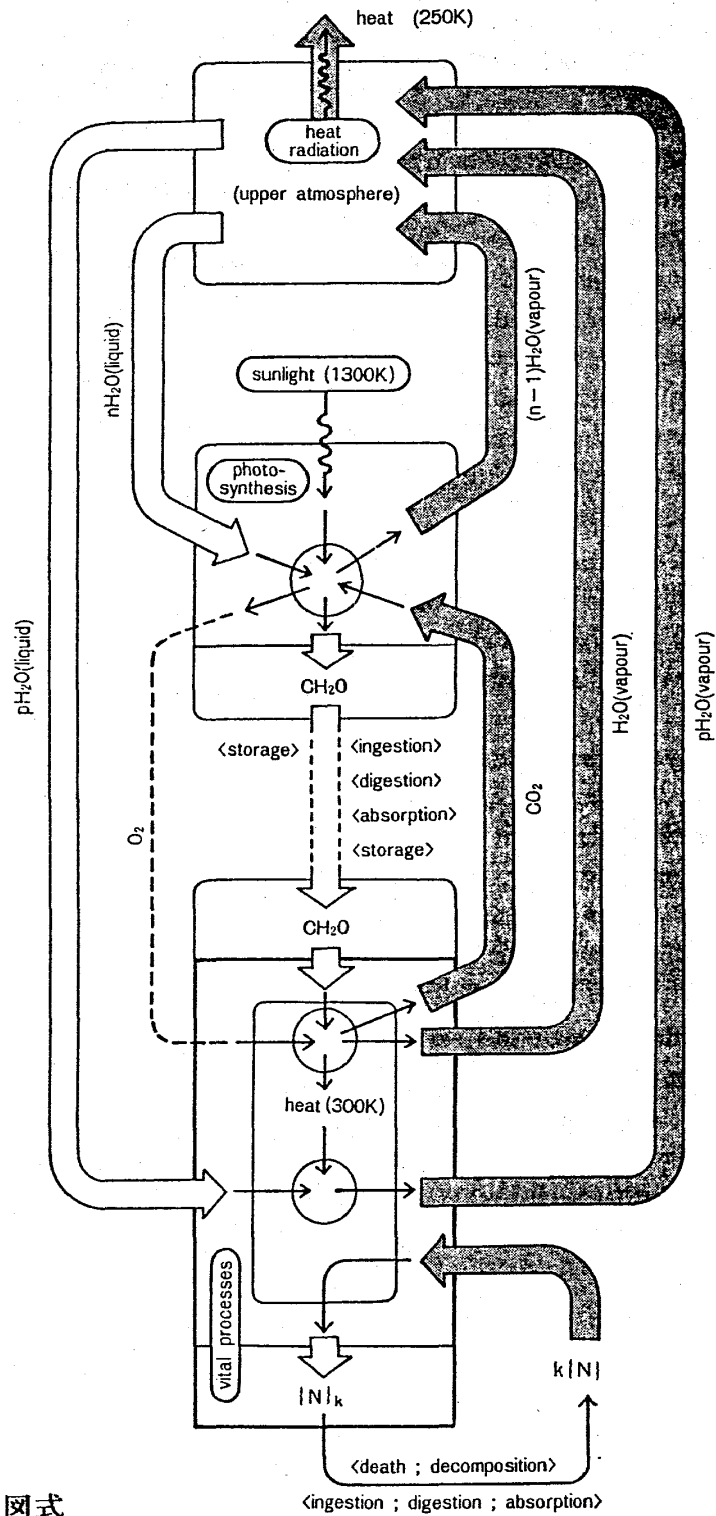
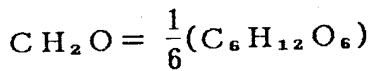
アミノ酸(高エントロピー窒素化合物)から蛋白質(低エントロピー窒素化合物)が生成・同化される過程を、生命活動の代表として、ここでは示した。

植物体内に蓄積された、または、動物が食べ消化し吸収して体内に蓄えた炭水化物(低エントロピー)と、その酸化剤としての酸素と、水(低エントロピー)と、植物が根から吸収した、または、動物が食べ消化し吸収したアミノ酸(高エントロピー、 $k\{N\}$ と書いておく)とが導入・消費されて、蛋白質(低エントロピー、 $\{N\}_k$ と書いておく)が生成・同化され、同時に二酸化炭素(高エントロピー)と高エントロピー状態の水(水蒸気あるいは老廃物を溶かした水)が生成・排出される。

炭水化物の酸化のさいに発生する熱は、究極的には水を水蒸気に変えることによって、体表から放散される。

(補足) 植物の場合、土壌中に行なわれる $\{N\}_k \rightarrow k\{N\}$ の変化を図には単に死亡・分解とのみ書き込んでおいたが、土壌中の微生物に着目するとき、この部分には、この図の全体に匹敵するような図が、光合成の部分をしかるべき作用に取りかえた上で、組み込まれるなければならない。

【土壌内微生物の問題】 東北大学遺伝生態研究センターの1988年度のワークショップとして「遺伝子情報、エントロピー則からみた水田湛水生態系の特徴」が開かれ、土壌学者、土壌微生物学者、微生物生態学者、物理学者(私)の4人が集まって討論した。その議論の中で、“勝木の図式”のお粗末部分(=土壌中の微生物の部分)を補強する材料になるような議論が多々あった。たとえば、(私のメモ、ないし記憶に誤りがなければ)微生物にとってリン(P)はリン酸塩の加水分解によってしか得られず、加水分解のさいにはエネルギーは放出されないで、微生物がエネルギーを必要とするときは有機物をねらって、これの分解によってエネルギーを得、「もの」を必要とするときはリン酸塩の加水



勝木の図式

生きていくことにともなう物質の循環とエントロピーの廃棄

absorption 吸収, death 死, decomposition 分解, digestion 消化,
 heat 熱, heat radiation 熱放射, ingestion 摂食, liquid 液体,
 photo-synthesis 光合成, storage 蓄積・貯蔵, sunlight 日光,
 upper atmosphere 大気上空, vapour 蒸気, vital processes 生命活動過程,

分解によってこれを得る。「もの」が欲しいかエネルギーが欲しいかによって、微生物がねらう物が違う、という話があった。エントロピー的見地からは、栄養物を、生物体の構成材料となる(構成された生物体と比べて)高エントロピーの物質と、そのさいのエントロピー低下を補償するのに必要な(高エネルギーの)低エントロピー物質とに分けて考えるべきであるが、「もの」が欲しいかエネルギーが欲しいかによって、微生物がねらう物が違う、という話は、エントロピー的立場と合致している。「もの」とは「生物体の構成材料となる(構成された生物体と比べて)高エントロピーの物質」のことであり、「エネルギー」とは「エントロピー低下を補償するのに必要な、高エネルギーの低エントロピー物質」のことである。

このワークショップへの参加者の一人(服部勉)の著書『大地の微生物世界』(岩波新書、1987)に書かれたことへのコメントという形で、以下、土壌内微生物についてのエントロピー的考察(というよりは、考察のための心覚え)を試みたい。

「ウイルスは常に特定生物に寄生して増殖」する、と述べられている(6頁)が、これは「生命単独」では生命の展開はできず、生命の展開のためには環境が必要である、ということの、(ウイルスという)最も原初的な・最もミクロなレベルでの現われである。微生物にとっての栄養の話が8頁から9頁にかけて書かれているが、その栄養が「体の材料」(俗に言う「血となり肉となる」栄養)としてのものか、「高エネルギーの低エントロピー源」(俗に言う「カロリー源」)としてのものか、微生物によって「栄養」として利用された結果としての物質の変化が、どちらの型の「栄養」として利用された結果であるのか、なども知りたいと思った。

また、「塩類は微生物の生存に欠くことのできない栄養分」である(9頁)が、これは上の2つの型のどちらなのか、それとも第3の型(人間にとってのビタミンなどのように、生命活動=微妙に調整されて進行する諸反応の総体、の進行調節剤)のものなのかも知りたいと思った。「養分」というとき、いつもこの2つ(または3つ)の型のものを意識的に区別して念頭におくべきだ(こうすることによって、低エントロピー源でありながら低エネルギーであるために「養分」とは考えられていない液体のきれいな水のことが、意識されるようになる)と、私は考える。

「光や生物遺体を利用しないで、無機物だけを利用して生活する細菌」(11頁)にとって、その無機物はどのような仕組みで、「高エネルギーの低エントロピー源」として機能するのだろうか、という疑問も生じた。

窒素固定菌の存在と、窒素循環におけるその役割(13, 44-46, 110-112, 121-122頁)も極めて興味深いものがある。太陽系原始星雲から微惑星の集積によって地球が形成されて以来、地質学的過程によっては、大気中の窒素量は殆ど影響を受けなかったようである。おそらく窒素循環には生物が本質的な役割を担っており、大気はその循環における窒素溜めの役割を果たしているのであろう。

パストゥールが発酵や腐敗を「微生物の増殖に必要なエネルギーを供給する」ものだと考えたことや、増殖を「栄養物から微生物体を合成する過程」と「微生物体を合成するのに必要なエネルギーをつくり出す過程」の2つに分けて考えたこと(40-41頁)も興味深い。エントロピー的見地からは、発酵や腐敗は「高エネルギー・低エントロピー物質を低エントロピー源として機能させる」過程であり、増殖のうち前者すなわち「栄養物から微生物体を合成する過程」はエントロピーを減少させる過程、後者すなわち「微生物体を合成するのに必要なエネルギーをつくり出す過程」は(全体としてはエントロピーが増大しなければならないために)前者と常に組み合わさって起こるエントロピー増大の過程である。(「必要なエネルギーを供給する」とか「つくり出す過程」という表現は、エントロピー的見地からは、適切でない。この過程は「有機物を分解してエネルギーを取り出してそれを微生物に供給する過程」なのではなく、「有機物に化学エネルギーとして蓄えられていたエントロピー0のエネルギーを、熱というエントロピーを持ったエネルギーに変える、エントロピー増大の過程」だからである。この過程でエントロピーが増大するから、「栄養物から微生物体を合成する、エントロピー減少の過程」が、このエントロピー増大の過程と組み合わさって起こりうるのである。)

樹脂の表面が微生物にとって(液体培地中よりも)かなり好適な増殖環境だ、という指摘(79頁)も興味深い。著者はその理由を「周囲を水で囲まれて、自らの体を保つことは、相当のエネルギー消費を要求する」ことにあると考えているが、エントロピー的見地からは次のようにいえる。高エネルギー・低エントロピー物質が低エントロピー源として効率よく機能するためには、ある程度の温度を保持する必要がある。特に、高エネルギー・低エントロピー物質は低エントロピー源として機能するさい、§4.2で述べ

たように、正のフィードバック機構が働くから、温度の低下は、高エネルギー・低エントロピー物質が低エントロピー源として機能することを著しく妨げる〔鳥の卵の孵化のさい、親鳥が卵を“温める”のは、卵に熱を加えているのではなく、過度の放熱（によって温度が下がり、そのために、高エネルギー・低エントロピー物質が低エントロピー源として機能しなくなるということ）を防いでいるのである〕。樹脂の表面の微生物は、完全には水に囲まれていないことによって、温度の過度の低下を防ぎやすい、ということが、樹脂表面が好適な増殖環境であることの理由であろう。

「窒素固定菌は、空中の窒素ガスをアンモニアに変えるだけでなく、各種の糖や脂肪酸を酸化する」という指摘（121頁）も興味深い。微生物が各種の糖や脂肪酸を酸化するとき、これらの糖や脂肪酸は高エネルギーの低エントロピー源として機能し、そのさいこれらのエントロピーが増大するから、窒素ガスからアンモニアが生成されるさいのエントロピーの低下が補償できる。物質を化学変化させるという見地から見たとき、「微生物の働きもそれほど単純でない」（122頁）ことが分かってきているが、微生物からみて、その物質がどんな役割のものなのか、高エネルギーの低エントロピー源として機能して、そのさい化学変化したのか、生体材料として取り込まれ、生体構成物となるさいに化学変化したのか、の別を、意識的に区別しながら見ていきたい、という気がする。ある種の細菌が、「イオウの化合物の酸化と還元を同時に営む」ことが発見され、このことは「これまでの微生物観からいえば驚きである」（122頁）とのことであるが、これなども、微生物からみて、その物質がどんな役割のものか、を意識的に考えてゆくことによって理解できるのではないかと、との予感を私は持つ。

濃すぎる肉汁培地のような富栄養環境では増殖出来ない低栄養微生物たちの存在（130-160頁）も、興味深い。低栄養微生物にとっての肉汁培地希釈の効果の説明として、①希釈による有毒物質の毒性低下、②富栄養状態では増殖不能・希釈状態でのみ増殖可能、の2つがあげられ、著者は②にはあいまいさを含むが示唆と含蓄に富むとして、②の線にそってのその後の研究と考察の発展を述べているが、私もこの問題のエントロピー論的考察は、おそらく②の線を支持し、それを裏付けることになるだろうとの予感を持つ。濃すぎる溶液は、低栄養微生物にとって、エントロピー廃棄機構を正常に働かせない要因になっているのだろう、と思うからである。もちろん、このような考えが説得力を持つためには、エントロピー廃棄機構がどんなもので、環境の富栄養状態がどのようにそれを妨げるかを、具体的に示されなければならないが。

「低栄養微生物たちが、空気中や水中のごく微量の有機物を効率よく吸収する」という指摘（158頁）（そして、やがてかれら自身が、かれら自身よりは高栄養の微生物にとっての栄養になる？——それは、唾液中の尿素から自分の体の蛋白質を作り、それを牛や羊の蛋白源として自分の体ごと提供してしまう、牛や羊の前胃に棲む細菌を私に連想させる）も興味深い。§ 7.2 iii) で私は「生態系とは、高エネルギー・低エントロピー物質の低エントロピー源としての利用の連鎖によって循環的につながった広汎な共生の体系である」と述べたが、これは著者の「こうして微量の有機物が、多くの低栄養微生物たちによって、つぎつぎと利用されることになる。……一見味もそっけもないように思われる落葉の分解過程には、思いもかけない微生物たちの微小社会が無数に連結し（下線は勝木）、活動していることになる」という指摘（159頁）と完全に合致している。物質循環の中で占める低栄養微生物の役割は極めて大きく、窒素循環の中で大気が「窒素溜め」としての役割を果たしているのも、低栄養微生物が存在していることによって、のかも知れない。著者の指摘通り「その実態は、まだほとんど解明されていない」（159頁）のであるが。

§ 12. 補遺

書き足しておきたいと思ういくつかの事例やコメントをここに書く。

〔真夏の植物の繁茂と水〕植物の成長・繁茂は、光合成の直接の結果ではなく、「生命活動」の結果である。活発な「生命活動」は大量の炭水化物を消費するから、活発な光合成で大量の炭水化物を作り出しておかねばならない。一定時間内に炭水化物の大量の酸化が進行するためには高温である必要があり、大量の酸化の進行はまた高温をもたらす。夏の灼熱の太陽と高気温が、十分な量の水の存在を前提として、大量の光合成を可能にし、夏の高温の環境が植物の高体温の維持を可能にして、過熱を防止するのに必要な十分な量の水の存在を前提として、活発な「生命活動」をもたらす。水が不足するとき、

活発な「生命活動」(大量の炭水化物の酸化をともなう)は生命体自身を焼き焦がす。夏、植物に水を遣り忘れると、たちまち植物が赤茶色になって枯れてしまうのは、自らの活発な「生命活動」が自らを焼いたからである。太陽と水とが、両者相俟って、車の両輪をなすのである。水なき太陽は灼熱地獄であり、太陽なき水は寒冷地獄である。

〔発芽〕植物の発芽のさい酸素の消費量は増加し、また、水分がなければ種子は発芽しない(発芽の前に種子は急激な吸水を行ない、いちじるしく膨潤する)。酸素の消費量が増加するのは、発芽という活発な「生命活動」のさい、多量の炭水化物の酸化をともなうので、それに必要な酸素を呼吸を盛んにして補給するからである。このとき発熱するが、その発熱による過熱を防止するために、水が必要である。水がないと種子が発芽しないのは、発芽のさいの炭水化物の酸化による発熱が、(水がないと)発芽機構を過熱・破壊するからである。種子は発芽にあたって、前もって十分の水を用意しておくのである。

〔水中植物の光合成〕水中植物の光合成のさい、“化学式に現われない水”は植物体から水蒸気としては蒸散しない。陸上植物における水の蒸散の本質的役割は、植物体の温度を上げずに放熱するところにある。水中植物の場合、周りの水がいわば「水冷式」で植物体を冷却(植物からみれば放熱)している。そのさいの水温の上昇は、水面における水の蒸発によって補償される。

〔吸水量と蒸散量〕ある生物学科学生が、ヒマワリの吸水量と蒸散量とを2時間ごとに丸1日測ったデータを用いたレポートを私に提出した(1988年度)。その数値を私は足し算してみたが、その結果は、1日の吸水量は合計 235cm^3 で、蒸散量は合計 231cm^3 ということになった。それで、この差 4cm^3 が $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ の中に固定されたと考えると、($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ 1モル中に、水6モルが固定されると考えられ) $4:231=6:346.5$ であるから、ヒマワリでは $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ 1モルが出来るといって、約350モルの水が蒸発していることになる。この値は § 5.4 vi) における評価とよく一致している。もっとも、吸水量と蒸散量の差の内の一部は、 $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ の中に固定されずに、植物の含水量を変化させるだけかも知れない。この場合は、 $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ の中に固定される水の量はさらに少なくなるから、 $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ 1モルを作るさいに必要な(蒸散する)水の量はもっと多くなる。〔念のためその学生に出典を確かめたところ、『植物生理学』(増田芳雄、培風館、1988) 126頁のグラフに依拠したとのことであった。このグラフは Plant and soil water relationships: A modern synthesis (R.J.Kramer, McGraw-Hill, 1969) から引用したものであるらしい。このグラフをみると、私のした2時間ごと数値の足し算は正しい1日の吸水・蒸散量を与えるものではなかったようである。しかし、吸水量と蒸散量の比は正しく与えており、上でえた $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ 1モル生成のさい、約350モルの水が蒸発するとの結論には変わりはない。〕

生態学には「要水量(蒸散係数ともいう)」という概念もあり、『生物学辞典』(第3版、岩波書店、1983)によれば、「植物体1gの乾燥物質形成に要した蒸散量」である。「実際には、ある植物の発芽から、収穫までに与えた水の量を計り、最後の全乾燥物質の重量(g)で除したものをいう。外的条件によって同種植物でも著しい差異があるが、湿った適度の気候の下での孤立個体では大体において350~700の間にある」とのことである。そこで要水量を大雑把に500とみなそう。他方 R.H.Whittaker (望月二朗)『生態学概説』によれば(p.179)、ニューヨーク州 Long Island の Brookhaven の若いナラマツ林、およびテネシー州グレート・スモーキー山脈国立公園の窪地の落葉樹の極相林の総生産量(=純生産量+呼吸による消費量)は、前者で $2650(=1200+1450)\text{g/m}^2\cdot\text{年}$ 、後者で $3500(=1390+2110)\text{g/m}^2\cdot\text{年}$ である。そこで純生産量が乾燥物質に相当すると考え、かつ総生産量(すべて光合成によって作られたと考える)が純生産量のほぼ2.5倍($2650/1200=2.2$, $3500/1390=2.5$)であるとみなすと、生産量1g当りの蒸散水量は200gとなる。 $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ の分子量は180であるから、 $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ 1モルの形成にともなう蒸散水量は、36kg、2000モルとなる。これは § 5.4 vi) 末尾で評価した値の約5倍である。

“呼吸による消費量”が約60%であることは、光合成で出来た炭水化物のうち60%が自らの生命活動の中で低エントロピー源として機能して消費され、残り40%が植物体構築の(高エントロピー)材料として使われた——この場合、勝木の図式の下部の $k\{N\}$ が材料としての $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ に対応し、 $\{N\}_k$ が構築された植物体(純生産量)に対応する

—— ことを意味する。

〔きれいな空気と汚れた空気〕呼吸するとき、“きれいな” O_2 を吸い“汚れた” CO_2 を吐く、というが、それはエントロピー的に見て、的外れの表現ではない。しかし、“きれい” “汚ない” の基準は、酸素だから、炭酸ガスだからという点にあるのではなく、大気中の酸素・炭酸ガスの分圧の高低にある。大気の組成が吸気と呼気の清・濁を規定するのである。

〔汗水垂らして働くことのエントロピー的意義〕人間の抽象的・一般的・社会的生産労働は、目的に適った低エントロピー物質を作る、あるいは物質を目的に適った低エントロピーの状態にもたらしめるものである、といえる。このとき、そのエントロピー低下を補償するために、人は自らを構成する物質のエントロピーを増大させ、発熱し、それを放散するために汗をかき、放熱する。これらは水循環に乗せて、宇宙空間に棄てることのできるエントロピーである。つまり、自然のままでは地球の外に棄てることのできない、高エントロピー状態の物質としてのエントロピーを、形態変化せしめて、地球の外に棄てることのできる熱としての形態あるいは(水循環に乗せることのできる)水蒸気としての形態にかえることが、人間の労働のエントロピー的見地からの意味である。まさに文字通り人間は「汗水垂らして働く」のである。

〔“エントロピー車”(カルノーの熱機関)〕カルノーは熱機関の機能の本質を、蒸気機関出現以前の動力機械の王者であった水車との類比で、熱素が高温から低温に“流れ落ちる”さいに仕事をする事にあるととらえ、熱機関における熱素を水車における水に相当するものと考えた。力学的な動力機械では摩擦による“仕事の損失”がないものを理想的な動力機械とみなすことができるが、カルノーは理想的な熱機関として、温度差のある所での熱伝導による“仕事の損失”のないもの、つまり、熱のやりとりがつねに温度の等しいものの間でのみ行なわれる(準静的過程)ようなものを考えた。カルノー自身は熱機関の理論を作るさいには熱素説の立場に立ったから、熱の一部が仕事に変わるとは考えなかった。熱機関を水車と対比させたカルノーの最初の考えを生かしながら、熱の一部が仕事に変わるということを考慮に入れてカルノー理論を少し修正すると(あるいは、カルノーが“熱”という言葉で把握していたのは、現在の我々の理解する“熱”ではなくてエントロピーだと考えれば——われわれはカルノーが、熱がエネルギーの一形態だということをこの段階では理解していなかった、と言いがちであるが、むしろカルノーは“熱”という言葉でエントロピー概念を先取りしていたのであり、我々はカルノーの慧眼に脱帽すべきなのである)、カルノーの熱機関は、エントロピー S が高温から低温に温度差 ΔT の所を“流れ落ちて” $S \Delta T$ の仕事をする“動力機械”である(ちょうど水車が、重さ W の水が高度差 ΔH の所を流れ落ちて $W \Delta H$ の仕事をする動力機械であるように)ということができる。実際、カルノー・サイクルにおいて高温熱源、低温熱源の温度を T_1, T_2 とすれば、高温熱源から $S = Q_1/T_1$ が流入して低温熱源へ $S = Q_2/T_2$ が流れ去る。そのさいする仕事 W は、 $W = Q_1 - Q_2 = S(T_1 - T_2) = S \Delta T$ である。(カルノーの熱機関が“エントロピー車”だとみなせることを私に教えてくれたのは、河宮信郎である。)

〔自由エネルギーとエントロピー〕化学反応の進行の方向は、ふつう系の(Gibbs の)自由エネルギーによつて論じられる。これは系と外界(環境)とが平衡状態にある場合、(系と外界の温度・圧力が等しいために)系と外界とを含めた全体のエントロピーの増大が、系だけに着目した場合の系の自由エネルギーの減少と同等であることによっている。いちいち外界のことを断らなくても系の状態だけで議論を進めることができるので、たしかに自由エネルギーは便利で有用な概念であるが、その反面、それは系の状態量であって、外界が背後に隠れてしまっているために、ともすれば系に対する外界の役割を忘れさせるという弱点を持つ。エントロピー的視点に立つ場合、いつも「系と環境とを含めた全体のエントロピー」で議論しようとするので、系だけでなく、その環境のことも常に意識される、という利点がある。

〔ネゲントロピー〕Schrödinger は、かつて生物の特徴はネゲントロピー(負のエントロピー)を摂取することにある、という考えを表明した。しかし、熱力学で確立されたエントロピーなる概念の実体は、統計力学によって、系のある巨視状態に属する相異なる微視状態の総数 W の対数のボルツマン定数倍であることが明らかにされた。 W の本性上、 W は1より大きな整数であるから、その対数は正であり、従ってエントロピ

一は常に正であって、負のエントロピーは存在しない。では、Schrödinger の“負のエントロピー”という概念は荒唐無稽なものであったか。否。それは、生物という不思議な存在様式を理解する鍵がエントロピーにあることを指摘した点で、極めて重要な歴史的意義を持つものであった。しかし、その概念はかりそめのものであって、“負のエントロピー”という言葉で把握されていた現象の実体が明らかになった時点で棄て去られるべき概念である。それは、歴史のある段階で正しく使われるならば積極的意義を持つような概念であるけれども、ネゲントロピーという、聴いて耳にしゃれて響き、とりわけ語って口に快い自己満足を覚えさせる言葉の、耳ざわり・口ざわりの良さに惹かれて、その実体の解明を怠り、そのかりそめの概念に固執しつづけるならば、それは反対物に転化し、現象の本質の認識を妨げる。

卑俗な譬え話。私の架空の銀行預金通帳の先々月末の残高が 100 万円であったとせよ。今月私は 20 万円を預け入れ、利子も 1000 円付いたから、“エン増大の法則”によって、この通帳における“エンの増大”が期待された。しかし、先月の帳尻は 95 万 1000 円であって、“エン”はかえって減少していた。これは不思議な現象である。そこで私は「私の預金通帳の特徴はネゲン(負の円)を摂取することにある」と認識する。「ネゲンを摂取する」という概念によって預金通帳の現象を見直してみると、それは良く現象の特徴をとらえていた。先月も先々月も私の預金通帳はネゲンを摂取していた。来月も再来月も通帳はネゲンを摂取するだろうと私は予言することができ、予言は的中するにちがいない。だが、予言することができ、予言が実際に的中するにちがいないとして、それで果して現象の本質が把握されたといえるだろうか。否である。それは預金通帳の示す不思議な現象をネゲンの摂取という言葉・かりそめの概念に置き換えただけであって、何ら現象の実体を解明するものとはなりえていない。“ネゲンの摂取”の具体的なプロセスを地道に調べることによってのみ、ネゲンの正体が明らかになる。通帳の中身を良く調べてみると、この通帳からは先月、住宅ローンの月々の返済分 12 万円、電気・ガス・水道・電話代 5 万円、子供の授業料 8 万円が自動振替によって引き去られていたことが判明する。エンの減少はネゲンの摂取によってではなく、エンの排出(預け入れられた量を上回るエンの排出)によって生じていたのである。(生物に関していえば、「生物の特徴はネゲントロピーの摂取にある」というとき、実際に起こっていることは、生物体に流入したエントロピーと生命現象の諸過程で生物体内に発生したエントロピーの和よりも多いエントロピーを、生物が体外に排出しているということである。)

この譬え話が示唆するように、ネゲントロピーという言葉・概念には、思考を安易にそれによりかからせて、あらわに意識的に考察の対象とすべき事柄を意識にのぼらせることを妨げ、その概念にこだわらしめて、かえって思考を混乱させる、という魔力のようなものがある。

ネゲントロピーは、すでにエントロピーの差引勘定を済ませたあとの概念であって、エントロピーの取入れ・廃棄で話をするときに必要な煩わしい言い回しをしなくてもすむから、有用で便利な概念である、と主張する“ネゲントロピー愛好者”もいる。ネゲントロピーの落とし穴は、まさに差引勘定を済ませてしまって、汚水と一緒に赤ん坊まで流してしまう所にある。ネゲントロピーという“便利な”概念によってではなく、常にエントロピーの出入りを問題にしようとする立場に立つとき、エントロピーの取入れがどこからどのように行なわれ、エントロピーの廃棄がどこへどのように行なわれるかが、必ず意識的に念頭におかれる。そして、エントロピーの出入りのさい大事なことは、系のエントロピーの取入れ先と廃棄先とが別々の所だということである(これは、熱機関の考察のさい、高温熱源と低温熱源とをひっくるめて、差引勘定を済ませて、まとめて外界に一本化するのではなく、高温熱源と低温熱源とを常に別のもので、別々に考慮に入れることに対応している)。考察のさい、着目する系・エントロピーの取入れ先(=高温熱源に対応)・エントロピーの廃棄先(=低温熱源に対応)の三者が三位一体となってあらわに意識に上るような概念が、真に有効なのである。ネゲントロピー概念は、対象を系と系以外の 2 つに分けるだけで、エントロピーの取入れ先と廃棄先とを不分明に癒合させてしまう。だから、エントロピー的な考察のさい、有効には機能しない。

たとえば、光合成のさいの化学系のエントロピー低下を、(液体の水ではなく)太陽光のネゲントロピー性に帰そうとする論者の論理は、要するに 2 つの熱源に接して輪業をおこなう系(熱機関)に、高温熱源(温度 T)から熱量 Q が流入することにともなうエントロピーの流入が Q/T であり、低温熱溜(温度 T')に熱量 Q' が流出することにともなうエントロピーの流出が Q'/T' であり、一般に $Q'/T' > Q/T$ であることから $Q'/T' - Q/T (> 0)$ をネゲントロピーと呼ぶことに等しい。この“ネゲントロピ

一”は高温熱源(あるいは太陽光)に固有のものではなく、熱機関(あるいは光合成の機構)の特性を反映したものであるのに、肝腎の熱機関を捨象して、あたかもそれが熱源の特性であるかのように思っているのである。さらに、ネグントロピーをこのようなものと考え、本来有用性の指標として導入されたはずの“ネグントロピー”が、理想的な可逆カルノー機関ではゼロになり、熱機関の効率が悪ければ悪いほどネグントロピーが大きくなる、という結果をもたらす。このように“ネグントロピー”は、有用性の指標としての有用性を持たないのである。

ネグントロピー概念の愛好者杉本大一郎もこの矛盾には突き当たったようで、それでもネグントロピー概念を維持しようとして、その著書の中で苦しい議論を展開した[『エントロピー入門』(中央公論社, 1985) pp.150-151]。曰く：

“カルノー・サイクルは……ネグントロピーはまったく食べずに、高温熱源のエントロピーの低さをそのまま製品に転化し、固定化した” “もう少し出来の悪い……熱機関では、投入されたエントロピーよりも出ていったエントロピーのほうが多く、この系はネグントロピーを食べている” “ネグントロピーという概念が導入されたとき、これは生命を維持するために食べるといういかにも価値のありそうなものと思われた。しかし、同じことをするのにネグントロピーを食べなくてもよいほうが、より賢いのである。シュレーディンガーが言ったことをこの文脈の中で言い直してみると、「ネグントロピーを食べないほうが賢いのだが、まったく食べないで生命を維持することはできない」ということになる”

本来「(着目した系が)ネグントロピーを食べる」というのは、その系のエントロピーが減少することのシュレーディンガー流の表現であった。ところが杉本の「ネグントロピーを食べる」という言葉には、明確に区別されるべき二つの概念、すなわち、着目した系のエントロピーの低下と、熱機関の輪業の過程で発生したエントロピーの排出とが未分化のまま包含されており、後者の問題で突き当たった矛盾を前者の問題にそのまま流用して、杉本はシュレーディンガーの提言を勝手にまったく逆のものに言いかえてしまっているのである。

熱機関の問題に関しては、杉本が低温熱溜の意義をはっきり認識していないことが、これを混乱させている。非可逆機関が1サイクル後にもとの状態に戻り、したがってエントロピーももとに戻っているとき、杉本はその過程における低温熱溜への排熱をそれとして明瞭に意識することをせず、非可逆過程で発生したエントロピーを(暗黙裡に)高温熱の“ネグントロピー”で相殺している。熱機関の効率という概念を用いて議論すれば単純明快な話を、わざわざ“ネグントロピー”によって複雑晦渋なものとし、自ら錯乱してしまったのである。

さて、熱源の提供する“ネグントロピー”の大きさ $|\Delta S| = Q'/T' - Q/T$ は、熱機関の効率を η' 、1サイクル当り熱機関が供与する仕事を W とすれば、 $|\Delta S| = \{(T - T')/T - \eta'\} \cdot Q/T$ であつて、流入単位熱量当りの“ネグントロピー”は熱機関の効率(と両熱源の温度)によって完全に定まる(熱機関が可逆機関であるときは、 $\eta' = \eta \equiv (T - T')/T$ であるから、 $|\Delta S| = 0$ となる)。したがって、熱機関の問題に“ネグントロピー”を持ち出す必要はなく、熱機関の効率で論ずれば事足りるのである。むしろ肝腎の熱機関の効率という概念を背後に隠してしまう点で、“ネグントロピー”概念は有害でさえある。

このように“ネグントロピー”概念が人の思考を混乱させる紛らわしい概念であることを、“ネグントロピー”概念の愛好者杉本が自らの錯乱を通じて立証した。

思えば Schrödinger も罪深いことをしたものだ—— おっちょこちょいの新しがり屋がしゃれたつもりで口にしたり、そのことによって、自らの熱力学理解がカルノー以前の段階にあることを得々として吹聴することになってしまうような、蠱惑的な言葉を發明してしまったのだから——。

§ 13. おわりに —— エントロピー事始め

1. 海兵隠語「エントロピー」= わけの分からぬ物や事

私がエントロピーという言葉を知ったのは、中学1年の時だった。1941年12月8日(現地時間7日)の真珠湾攻撃に参加した特殊潜行艇5隻の乗組員10名中9名は戦死して軍神となり、その軍人としての階級は2階級特別進級(普通は戦死時1階級進級)し

たが、その中に横山正治少佐(戦死前中尉)がおり、その横山正治をモデルとして作家岩田豊雄(獅子文六)が小説『海軍』を書いた(それは『朝日新聞』に1942年7月1日から12月24日まで、176回にわたって連載された)。その小説が単行本になったのが1943年2月であり、私は中学1年(1943年4月～)のときにそれを読んだのである。表紙は水色で白抜きで風神・雷神の画が描かれていたと記憶する。

この小説は松竹が映画化し(演出:田坂具隆,主演:山内明),1943年12月8日を期して公開された。それを中学から団体で観に行き、学校に戻ったあと、私は感激さめやらず、映画中の“座右の銘”的な文句「断じて行へば鬼神も之を避く」を教室の黒板に書いた覚えがある。

この小説には、作中の主人公 谷真人 の海軍兵学校時代のことも描かれていた(ちなみに海軍兵学校へは「入学する」のではなく、海軍兵学校が当人に「海軍兵学校生徒ヲ命ス」るのである)が、海軍兵学校生徒間ないし海軍若手将校間で使われる隠語にも触れて[たとえば旧制高校生徒のメツチェン(Mädchen)は、海兵生徒ではコッペルであった。英語の daughter → 銅 → copper → “昔風の発音”でコッペル,との連想的推移による],「わけの分からぬもののことを“エントロピー”という」と書いてあった。エントロピーは何度聴いても分からん,というのがその隠語の由来であった。このことは、強烈な印象となって私の脳裡に残った。

4年後、高等学校に進学して「物理学」の講義の中で熱力学と初めて対面したとき、まさにエントロピーが小説『海軍』で読んだ通りの「エントロピーな」ものであることを私は痛感したのだった。爾来、私にとってエントロピーはわけの分からぬものでありつづけた。

大学で物理学科に入って統計力学を教わり、 $S = k \log W$ であると知って、やっとエントロピーのことが分かったような気にはなったが、それとてよく考えてみれば、熱力学的な S は理解せぬまま、 W ならば理解可能なので、 $k \log W$ に翻訳して、そのことで何だか S を理解したような気になっていたのだった。しかし、この場合私が理解していたのは W であって、 S ではなかった。 $S = k \log W$ だと知って、それで熱力学的エントロピーが分かったか、頭が理解するだけでなくほんとに心が納得したかとなると、これはいささか怪しいのである。

この講義ノートに書いたような事をここ数年来考え始めるようになってから、少しずつエントロピーのことが、やっと私に、熱力学的にも分かり始めてきた、という気がする。

2. エントロピーを考え始める

私が、このノートで書いたような形でエントロピーに関心を持つようになったきっかけは、槌田敦が『科学』[48 (1978) No.2,3,5] に書いた「資源物理学への試み」にある。それは私に“衝撃”と呼びたいほどの知的刺激を与える、極めて興味深いものであった(光合成に対するエントロピー的視点からの考察や、地球に備わったエントロピー廃棄の機構に関する考察も、そこで槌田は与えていた)。しかし、この当時私は、私のなすべき主たる仕事を「日本物性物理学史の実証的解明」にあると思い定めており、槌田の提起したエントロピー問題に強い興味は抱きつつも、それは槌田のなすべき仕事であると思って、自分がこの問題に手をつけることはしなかった。

ところが、槌田のそのような仕事 “「研究」というよりは「論評」でしかない”との理由で、槌田の所属する理化学研究所の年次報告書の所員業績目録に採録されなかった、という話が私の耳に入った。そのことを非学問的な所業であると私は感じ、それを批判すべきであると考えた。そして、その批判は、槌田の問題提起をきっかけにした研究分野が生まれ、それが実際に豊かで新しい知見をもたらすことになったとき、最も鋭くなされたということができらるだろうと思い、それに些かなりとも寄与すべく、私も槌田の驥尾に付して、日本物性物理学史の仕事のかたわら、エントロピーについ

て思いをめぐらすようになったのである。

私がこの問題でした最初のことは、1982年春の物理学会物理教育分科会における河宮と連名の「“エントロピー車” (カルノーの熱機関)」についての報告であった[『物理教育』30(1982) 134-137]。私は、円満具足した統一的な自然像の確立のためには、エネルギー的見地からだけでなく、エントロピー的見地からも自然現象を見なければならぬ；中等教育の場でエントロピー的見地に立った統一的自然観が確立されるべきである；と主張し、それへの遥か手前の一步として、大学教育での熱力学段階でのエントロピー概念の物理的直観的把握を容易ならしめるものとして、カルノー機関が水車との対比でエントロピー車とみなせることを示したのである。

その年の秋、私は『物理が好きになる本』なる一書をものしたが、その「雑」の章に「宇宙と人間」なる一節を設け、人類発生の宇宙史的意義、光合成、人体からのエントロピー廃棄、マッチ売りの少女、地球からのエントロピー廃棄機構等に触れた。しかし、この段階では、光合成で作られる炭水化物の低エントロピー性は指摘してあるが、それと植物体の低エントロピー性とが未分化のまま癒合しており、炭水化物を高エネルギーの低エントロピー物質とみなす視点はまだ確立されていなかった。

私はかねがね自然事象の描写のさい、自然事象を直接に描くという方法以外に、自然事象に接したときの人の心を描くことによって自然事象の本質をより深く描き出すという方法がありうるのではないかと考えていた。大西巨人は小説『神聖喜劇』で、ある社会事象に接したときの主人公東堂太郎の心の動きを丹念に描くことによって、その社会事象の本質が鮮明に浮かび上がってくる、という書き方をしている。自然事象の本質を鮮明に描き出すのに『神聖喜劇』流の書き方があるのではなからうか；私はこの本でひそかにそれも試みてみた。

この本の出版社はPR誌『蟻塔』を月刊(当時)で発行しているが、新刊書の著者であるからだろう、私にそれへの寄稿を求めた。私は「人はなぜ水を飲み、物を食べ、息をするのか——エントロピー的視点からの考察」と題するエッセイを書いた(1983年2月)。炭水化物を高エネルギーの低エントロピー物質とみなす視点はそこで確立された。消化器官と土壌の類似性もそこではっきり意識され、またエントロピー廃棄と物質循環の“勝木の図式”もそこで与えられた。

このエッセイを面白がった人がいた。東大農学部農芸化学科教授で『蛋白質・核酸・酵素』の編集委員 矢野圭司氏である。氏の招きで「発酵工業協会」の1983年度総会(9月)に「生物は何故水が必要か」と題する特別講演をした(もう一人の特別講演者は三菱化成生命研の大島泰郎氏で演題は「異常環境下の微生物」であった)。ここでは、地球の水循環、光合成、低エントロピー源としての炭水化物、土壌と消化管、「生きている」天体であるための必要条件、人類発生の宇宙史的意義等について語ったが、このときは、光合成のさいのエントロピー減少量を、 CO_2 中の炭素と $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ 中の炭素に着目してそのCをあたかも理想気体であるかの如くにみなし、反応前の 6CO_2 の体積と反応後の $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ の体積の比から見積るということをしていた。[『発酵と工業』41(1983) pp.1031-41]。

その後、左辺の $6\text{H}_2\text{O}$ が液体であり、右辺に気体の 6O_2 が現われていることから、Cだけに着目した上記のような見積りで果してどれくらい誤りを射たことになっているか、との疑問が私のうちに生じた。ある時、この疑問のことを化学科の同僚横井政時氏に話したら、横井氏が物理化学の分野では化合物の生成エンタルピーやエントロピーやのデータがすでに表になって与えられていると教えてくれ、生成エンタルピーの意味や計算の仕方を教えてくれた。私がこの化学的データのことを知らず、Cを理想気体のように思ってエントロピー減少を見積るということをしていたことは、ある意味でプラスであった。それは化学式における標準状態でのエントロピー差だけでなく、関与する気体の圧力差によるエントロピー減少をも自然に私の考慮に入れさせたからである。最初から化学的データのことを知っていたら、標準状態でのエントロ

ピー差だけの評価で満足していたかも知れない。

このちゃんとした、光合成のさいのエントロピー減少量の計算は、エントロピー学会の第1回シンポジウム(1983年11月)で報告した[『エントロピー読本』(日本評論社, 1984) pp.98-103]。

また、「生物は何故水が必要か」の別刷を地質学科の同僚山下昇氏に献呈したさい、山下氏は「地球に最古の海が出来てから四十数億年の間、地表で水が液体で存在しつづけたことが驚異的だ」と言った。それに答えるべく、私が大急ぎで考えだした計算が§3.2.i~iv)の計算であった。

私があまり規模の大きくない理学部に所属しており、同じ建物の一階下とか三階下とかに他学科の同僚の部屋があって、気軽に手軽にそこを訪れて議論や質問が出来る、という状況がプラスに働いた、ということができよう。

この頃まだ私にとっては、光合成に關与する太陽光の温度をどう考えるべきか、が不分明であった。それを明快に教えてくれたのは教養部の同僚三輪浩氏である。三輪氏は太陽輻射のエネルギーと統計力学的エントロピーの關係から、各振動数ごとに温度がどうなるかの表式を示してくれた[『核融合通信』特集号(1984年10月) pp.10-14]が、私はそれを、ある温度での黒体輻射のその振動数部分のエネルギー密度がちょうど太陽光のその振動数部分のエネルギー密度に等しいような、その黒体の温度、という風に私なりに翻訳して理解した。三輪氏はまた、植物の葉緑体が完全に乱反射した後の6800nmの光を吸収するものとすれば、その有効温度は約1300Kであるとも教えてくれた。

1984年末頃までに到達した私の見解は単行本『エントロピー』(朝倉書店, 1985, pp.77-102) および『科学』55 213-222 (1985) に書いた。

他方、私はエントロピー的視点に立った地球・環境・生命に関する考察は、ただ単に研究者としてだけの考察、研究室の中での考察のみに留まっていたはず、教育等の場を通じて広く人々のものにならなくてはならないと、ずっと考えていた。そのような見地から、私は1983年秋の物理学会物理教育分科会で「人はなぜ水を飲み、物を食べ、息をするのか——エントロピー的視点からの考察」と題して講演し、そこで中等教育の場でのエントロピー教育の必要性を力説したが、それに対するコメントの多くは「それは困難だ、事実上不可能だ、大学生にとってさえエントロピーは最も理解困難な概念なのに」というものであり、出席者のほとんどもそのコメントに暗黙裡に合意しているようであった。困難さに関しては私も同感であったが、中等教育におけるエントロピー教育が必要であるなら、その困難を克服する道を実際に具体的に见つけることを物理教育界はしなければならないというのが、私の主張であった。

上智大学の笠耐さんのところに送られてきていた“Entropy in the School”という表題の、ヨーロッパでの物理教育の研究会の報告書をみつけて、そのコピーを私に送ってくれたのは九州大学の中山正敏氏であった。その研究会は1983年にハンガリーのバラトン湖畔で開かれたものであったが、そこには「エントロピーを教えることの方がエネルギーを教えることよりも易しい」とか「生徒にとってはエントロピー概念の方がエネルギー概念よりも理解しやすい」という意見さえ、いくつも載っていたのである。§1.4.(イ)で紹介したT6th女史は、中等教育(School)でエントロピーは教えねばならぬし、教えることができるという、最も急進的・実践的な主張者であった。中等教育でのエントロピー教育の必要性は主張しながら、その困難さにも合意した私などは、女史に比べればきわめて鈍(はく)なエントロピー論者であった。この報告書から極めて強い感銘を受けた私は、研究室の修士課程在学学生伊達崎広君と一緒にこの報告書を読み、その勉強ノートを、笠さんの主宰する「物理教育研究会」の会内誌『物理教育通信』に紹介することとした[No.42(1985.11)から No.54(1988.12)]

まで断続的に9回にわたって掲載]。

研究会の主宰者でハンガリーの物理学者である MARX György (マルクス・ジョルジ) の編集になるこの報告書は 'Background' の章でエントロピーに関する天文学的、化学的、生物学的、数学的、哲学的ならびに社会経済学的見地からの解説を与えていたが、私はこの講義ノートで展開したような、いわば地球の見地からの解説を欠いていた。私には報告書中の解説は、なぜ地球上にのみ生命が存在するのか、という問題に対しては、あるものは余りにも一般的すぎ、あるものは特殊すぎで、「帯に短かし、襷に長し」でいずれも適切さを欠くと感じ、私の考察は国際的にも寄与しうると確信し、私の考察を英語にすることを試みた。

1986年秋に「物理教育国際会議」が日本で開かれた。それに先立って Marx が来日して基研に滞在し、Tóth も国際会議の準備を手伝うために早めに来日した。私は夏二人を松本に招待して議論した。かれらは私の考察を面白がった。そして、来年(1987)バートンで Bioastronomy の国際会議があるが、そこでその話をする気はないか、といった。中等教育の場でのエントロピー教育が必要である、という私の瓢箪は、こんな経緯で、1987年の IAU の Bioastronomy のコロキウムで、私が招待講演者の一人として "Water: An Absolute Requirement for Life" について語るという駒を産んだ [Bioastronomy—The Next Steps (G.Marx ed., Kluwer Academic Publishers, 1988) pp.15-19]。ついでながら、このコロキウムへの参加の途中ウィーンへより、Boltzmann の外孫であるウィーン大学の Prof. Framm の前でこの問題について語るということもした。Entropy in the School の中で disorder を論じて desk type, disco type と表現した面白い人 (Dr. Pflug, それまで未知の間柄) がおり、手紙を出してみたら、歓待する、Framm 教授にも会わせてやる、Boltzmann の墓にも連れて行ってやる、と返事をくれたのである。

長野県野辺山にある宇宙電波観測所のコロキウム系の出口修至氏は Bioastronomy—The Next Steps に載った私の論文をみて、1988年12月に同所のコロキウムで私にしゃべらせてくれた。

東北大学遺伝生態研究センター (IGE) の服部勉氏は1988年度にワークショップ「水田湛水生態系の新研究——遺伝情報、エントロピー則から見る」を計画・実施し、私をそのワークショップの一員として参加させてくれた [IGE シリーズ 3 (1989) pp.39-55]。

これらのことを通じて、私は私のエントロピー論が対象とすべき分野の具体的な様相を、少しずつではあるが、知りえてきた。

研究者でない人々にエントロピー的見地からの地球・環境・生命観を語る機会が、2度ほど私にはあった。

1984年度の九州大学公開講座『水を考える』に講師の一人として参加して一般市民の聴講者に対して「地球の生物と水」と題して、この講義ノートの抄録のような話をした [『水を考える』(九大出版会, 1986) pp.59-83]。

また、岐阜大学教養部が毎年計画している教養部生対象の特別講演会の講師として招かれて、1986年6月に同様の話をした。

どちらの講演も好評であったと私は判断し、特に後者の経験は、私のエントロピー的地球・環境・生命論が大学の授業の教材になりうるとの確信を私に持たしめた。

私は信州大学理学部で学部2年生(全学科にわたる)を対象とする「物理学概論」の講義の後期半年分を担当しているが、岐阜大学教養部での講演の好評に力を得て、1986年度以降は「地球・生命・エントロピー」と題して、ほぼこの講義ノートに書いたことを(および、熱力学的なエントロピーの導出と統計力学的な $S = k \log W$ を最後に付け加えて)講義することに踏み切った。この信州大学における講義は今年度で4

回したことになるが、これも概して好評であったと私は判断している。また、毎回の講義のあとでその日の講義に対する学生のコメントを書いて提出してもらっているが、学生のコメントから私はこれまでも多くのヒントを得た。

なお、この講義ノートをおのような形で『物性研究』用に準備する過程で、私は自分のことをカルノー主義者であると、明確に意識するようになった。

3. 今後の見通し

科学は、科学者でない人々にとって、どのようなものであるのだろうか？

今、科学の効用は、もっぱら技術を媒介としてそれが産業に寄与し、そのことによって人々の生活を豊かにする、ということに求められているようである。だが、果してそれが、科学の最も強調すべき寄与なのであるだろうか？ 人々に思いもかけなかった物の考え方を提示し、人々に物を考えたり、新しいことを知ったりする喜びを提示すること、そこに科学の最も強調すべき効用があるのではないのか？

人々の知的な生活を豊かにすること、人類の哲学・思想を豊かにすること、そこにこそ科学の中心的価値が見出されるべきではないのか？

そして、地球・環境・生命をエントロピーの目で見えていこうとすることは、このような喜びを人々に与えることが出来るのではなからうか。

モリエールの劇中人物が、自分のしゃべっていたのが散文だと知って、そのことにいたく感銘を受けたのと同様に、人々が、自分が食べていたのは高エネルギーの低エントロピー物質であったかと知って、そのことを面白がったり、自分が水を飲むのはそういうわけだったのかと興がったりするようになったとき、科学は人々のものになり、科学を創り上げるのに人々が積極的に寄与できる状況が生まれるのではなからうか。科学は人々の前にそのようなテーマを提示すべきなのである。

謝辞

私がこのような形でエントロピー問題を考える一般的きっかけを与えてくれたことを「資源物理学の試み」の著者・植田敦氏に； また植田氏の試みを評価せず、氏の業績を年次報告書の所員業績目録へ採録することを拒否することによって、私のある種の俠気を励起し、私がエントロピー問題を考える具体的・直接的きっかけを与えてくれたことを（皮肉ではなく衷心から）往時の理研当局者に； 様々の示唆・教示・討論を、エントロピー問題の意義に関して ほぼ共通の認識を抱いている友人・河宮信郎、白鳥紀一、中山正敏、三輪浩の諸氏に； 発酵工業協会の総会で講演する機会を与えてくれたことを 矢野圭司氏と同協会に； 化学物質の熱力学的諸関数のデータの所在ならびに生成エンタルピー等の計算法の教示を 信州大学理学部化学科の横井政時氏に； 地表での海の存続に関するコメントで私の関心を広げてくれたことを 信州大学理学部地質学科（現在は名誉教授）の山下昇氏に； 私の議論に関心をもち、Bioastronomy のコロキウムで講演する機会とそのきっかけを与えてくれたことを Marx, Tóth の両氏およびこのコロキウムの組織者に； ウィーン訪問時の親切と討論を Dr. Pflug に； ワークショップ「水田湛水生態系の新研究——遺伝情報、エントロピー則から見る」を企画し、私の視野を広げてくれたことを 東北大学遺伝生態研究センターの服部勉氏に； 宇宙電波観測所のコロキウムでしゃべる機会を与えてくれたことを 出口修至氏に； 公開講座『水を考える』で話をする機会を与えてくれたことを 九州大学教養部と賀来章輔氏に； 特別講演会で話をする機会を与えてくれたことを 岐阜大学教養部と山田鏐二氏に； 講義内容へのコメントによる私への様々なヒントを 信州大学理学部の受講生諸君に； 夏の学校で講義する機会を与えてくれたことを 物性若手の諸君と後藤英夫君に； 本『物性研究』誌に掲載してくれることを 本誌編集部； 私の仕事への好意的関心を小出昭一郎氏と中野藤生氏に； それぞれ心からお礼申し上げる。

(1990. 2. 7)