

不可逆性、自己組織化、そして複雑系

生活工学のための熱力学序論 X

Irreversibility, Self-organization, and Complexity

Introduction to Thermodynamics for Human Environmental Engineering. X

妹尾 学

Manabu SENO

(東京大学名誉教授)

1. はじめに

自然科学は我々の自然に対する理解を深めるもので、近代科学は 1687 年刊行の Newton のプリンキピアに始まるといわれる。そこでは物体の運動を論じる力学が展開され、ニュートンの力学方程式は天体の運動を鮮かに記述し、まさに神の威光を具現するものであった。科学的解明が進むとともに、遠くギリシヤに源をもつイデア的な理想系が究明され、そこに事物の本質が求められた。地上の物体の運動は天体の運動ほど理想的でない。この非理想性はできれば避けたい事柄であった。幸なことに、地上でも諸力の釣合う静的な状態は理想的に解明され、力学は静力学を中心として発展し、そこからの偏りとして動力学が論じられた。

物体の運動という変化は力学によって解明されたが、物質状態の変化は Newton を始めとする多くの自然哲学者の努力にも拘らず、容易には解明されなかった。たとえば化学変化をひき起こす力として化学親和力 (chemical affinity) が想定されたが、その本性は力学では証明できなかった。この解明には力の概念よりも、力を生じる場の概念がより有効であり、場を規定するエネルギー (energy) が定義され、エネルギーの勾配 (微分量) を表すポテンシャル (potential) が力に相当する。これらの概念は力学を超えるものであり、やがて熱力学の成立に到る。

物質系が変化するとき、系のエネルギーは外界との熱や仕事のやりとりによって変化する。ただし、外界を含めた系の全エネルギーは常に一定にとどまる (第一法則)。力学の問題では、運動の変化は物体の力学エネルギー (運動エネルギーとポテンシャルエネルギーの和) が減少する方向に進み、極小の状

態で静止する。これに対して状態変化の簡単な例として気体の真空中への膨張を考えてみよう。Joule の実験としてよく知られるように、この変化で気体の温度変化は認められず、系のエネルギー (内部エネルギー) の変化はない。エネルギーが一定にとどまるのに変化は自発的に起こる。この駆動力はなにかという問題は容易には解明されなかったが、やがて問題は熱の本性に根ざすものであることが明らかになり、熱力学として体系化された。気体の真空中への膨張は系のエントロピーが増大する方向に進む。一般化すると、自発変化は不可逆であり、不可逆性 (irreversibility) はエントロピーの増大 (エントロピー生成) を伴う (第二法則)。

エントロピー (entropy) の概念は Clausius により導入されたが、その物理的意味は Boltzmann の苦闘によって基本的に解明され、エントロピーは物質系の乱雑さ、すなわち物質を構成する粒子の配置の乱雑さを表す統計的物理量であることが示された。

熱力学は生体を含めすべての物質系の変化に適用しうるものであり、我々が到達した自然科学の理論のなかでも最も普遍性が高い。あらゆる系の変化を総括的に矛盾なく説明しうる理論は熱力学をおいて他にない。しかし熱力学は万全ではなく、なによりも熱力学は巨視的な状態量に関するものであり、モデルなしには微視的考察はできない。そして、熱力学は本来動的過程の解明を目的としたものであるが、理想性の観点からとくに静的な平衡状態に対して適用されてきた事情がある。熱力学 (thermodynamics) ではなく熱静学 (thermostatistics) ではないかと言われるゆえんである。この限界を乗り越え、非平衡状態への拡大が企てられてきた。本稿では、

Prigogine の業績を中心にこの課題を論じていこう。

2. エントロピー収支

熱力学第二法則については既に本シリーズのⅢ¹⁾ およびⅣ²⁾ で述べたので、ここではできるだけ簡潔に Prigogine の議論に沿って話を進めていこう³⁾。第二法則は通常 Clausius の不等式

$$dS \geq \frac{dQ}{T} \quad (1)$$

(Q 系へ入る熱、 T 温度、 S エントロピー)で定式化されるが、Clausius は系への熱の出入りによるエントロピー変化とともに、系内で進む不可逆過程により生成するエントロピー N の存在に注目し、不等式(1)を

$$N = S - S_0 - \int \frac{dQ}{T} \geq 0 \quad (2)$$

と書き換えた。 S_0 は始めの状態、 S は終りの状態のエントロピーで、第三項の熱の出入り dQ によるエントロピー変化(これは正にも負にもなる)を補償されるエントロピーと考えると、 N は非補償的な変換によるエントロピー変化であり、これは必ず正の値をとることになる。これが第二法則の要点である。

(2)を微分形に書き換えると、

$$\begin{aligned} dS &= \frac{dQ}{T} + N \\ &\equiv d_e S + d_i S \end{aligned} \quad (3)$$

$d_e S = dQ/T$ はエントロピー輸送 (entropy transport)、 $d_i S = N$ はエントロピー生成 (entropy production) とよばれる。Prigogine の業績は $d_i S$ の解釈から始まる。 $d_i S$ は不可逆的な変化によるので、変化を引き起こす力(熱力学力) F と変化の進む程度を表す熱力学流れ X の積で支えられるであろう。複数の種類の変化 k が同時に進むとき、

$$d_i S = \sum F_k dX_k \geq 0 \quad (4)$$

あるいは

$$\frac{d_i S}{dt} = \sum F_k \frac{dX_k}{dt} \geq 0 \quad (5)$$

と書ける。たとえば化学反応に対して、 F_k は反応親和力、 X_k は反応進度である。

さて、変化しつつある系では系全体にわたる状態量は定義できない。そこで平衡から著しくはずれていない場合、部分的に局所平衡 (local equilibrium) の近似が成り立つと考え、それぞれの部分の熱力学状態量を定義し、その変化を議論する。局所平衡の仮定は一つの近似であるが、変化が激しくないとき、部分を十分に小さくとることによって、必要な精度で成り立つことが保証されている。この局所部分についてエントロピーなどの状態量が定義される。

詳細な議論は原典にゆずり、ここでは結果のみをまとめておこう。エントロピーの局所的増大はエントロピー密度 $s(x, t)$ で表され、局所エントロピー生成(速度) $\sigma(x, t)$ は次式で定義できる。(x 位置座標、t 時間)

$$\sigma(x, t) = \frac{ds}{dt} \geq 0 \quad (6)$$

系の全エントロピー生成は

$$\frac{d_i S}{dt} = \int \sigma(x, t) dV \geq 0 \quad (7)$$

で与えられる。これらの前提のもとに、連続の式、エネルギー保存則などを用いてエントロピー釣合いの式が導かれる。結果を

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \nabla \cdot J_s = \sigma \quad (8)$$

の形で表すと、エントロピー流 J_s および局所エントロピー生成 σ はそれぞれ次のように与えられる。

$$J_s = \frac{J_u}{T} - \sum \frac{\mu_i J_i}{T} \quad (9)$$

$$\sigma = \nabla \left(\frac{1}{T} \right) \cdot J_u - \nabla \left(\frac{\mu_i}{T} \right) \cdot J_i + \frac{E}{T} \cdot I + \sum \frac{A_j}{T} v_j \quad (10)$$

ここで、 J_u エネルギー流、 J_i 成分 i の物質流、 I 電流、 v_j 化学反応 j の速度、 μ_i 成分 i の化学ポテンシャル、 E 電位差、 A_j 反応 j の化学親和力 である。式(10)は形式的に、

$$\sigma = \sum F_k J_k \geq 0 \quad (11)$$

と書かれ、エントロピー生成(速度) σ が熱力学力 F_k と流れ速度 J_k の二次形式で与えられることを示す。式(10)は熱伝導、物質

拡散、電気伝導、化学反応によるエントロピー生成に対する寄与を具体的に示し、これからそれぞれの不可逆過程における力と流れの具体的な表現を知ることができる。

式(11)が非平衡熱力学の基本式である。

3. 非平衡状態の熱力学

基本式(11)を用いて非平衡状態にある系の熱力学的解析を進めることができる。熱力学力 F_i と流れ J_i との間に古くから現象論的な法則が知られてきた。とくに平衡に近く力があまり大きくないとき、流れ J_i と力 F_i の間に線形関係が成り立ち、流れ i と j の間の相関を含めると、

$$J_i = \sum L_{ij} F_j \quad (12)$$

と書ける。 L_{ij} は現象論係数である。とくに単一の流れの場合、式(12)は熱伝導に対する Fourier の式、拡散に対する Fick の式、電気伝導に対する Ohm の式として知られる。

一般には異なる流れの間の相関を考慮しなければならない。このときエントロピー生成は次の形に書ける。

$$\sigma = \sum \sum L_{ij} F_i F_j \geq 0 \quad (13)$$

現象論係数の行列 L_{ij} は正定値をとる。1931年、Lars Onsager は微視的可逆性の原理に基づいて、線形関係が成り立つ領域で現象論係数の間に次の相反関係

$$L_{ij} = L_{ji} \quad (14)$$

が成り立つことを示した。この関係は実験的にも十分確証された。

いくつかの力が同時に働いている系で、その一部の力を有限の一定値に保ったとき、系はやがて時間的に変動のない定常状態 (stationary state) に達する。線形領域においては定常状態で全エントロピー生成 P は極小値をとる。このことは1947年、Prigogine により一般的に示され、定常状態におけるエントロピー生成極小の定理とよばれる。たとえば、2つの流れがあるとき、線形現象論法則は、

$$J_1 = L_{11} F_1 + L_{12} F_2, \quad J_2 = L_{21} F_1 + L_{22} F_2 \quad (15)$$

全エントロピー生成 P は、相反関係 $L_{12} = L_{21}$ を用いて

$$P = \frac{d_i S}{dt} = \int (F_1 J_1 + F_2 J_2) dV \\ = \int (L_{11} F_1^2 + 2L_{12} F_1 F_2 + L_{22} F_2^2) dV \quad (16)$$

となる。たとえば F_1 が一定値に保たれるとき、

$$\left(\frac{\partial P}{\partial F_2} \right)_{F_1} = \int 2(L_{12} F_1 + L_{22} F_2) dV = 0 \quad (17)$$

となり、 P は $J_2 = 0$ のとき極値をとることが示される。すなわち力 F_1 を一定値 F_1^0 に拘束したとき、定常状態では $F_2 = -(L_{21} / L_{22}) F_1^0$ の定値をとり、 $J_2 = 0$ となるが、このとき P は極小値をとることを、式(17)は示している。

この極値定理は

$$dP/dt \leq 0 \quad (18)$$

を意味し、エネルギー(熱力学ポテンシャル)の極値定理が平衡状態の安定性を保証するのと同様に、式(18)が線形非平衡状態における定常状態の安定性を保証する。系がゆらぎによって定常状態を離れることがあっても、系は自発的に P が減少する方向へ変化し、やがて元の定常状態に引き戻されることになる。

安定な線形定常状態は、我々が日常よく経験する状態である。衣服・住居を含む生活環境における定常状態をよく把握し、その特性を以上に述べた手法に従って解析するのは意義あることと考えられるが、あまり進んでいない。

平衡状態からもっと遠く離れると、力と流れの間の線形関係は成り立たなくなる。この非線形領域では種々特異的な挙動がみられると考えられるが、現在のところまだ体系的な理解は得られていない。非線形領域は極めて多岐にわたり、一般的な解析が進められないからである。非線形現象の解析は、近年コンピューターによる数値解析が主流を占め、注目すべき多くの結果が知られるようになったが、理論的解明は十分ではない。ここではまず Prigogine の取組みをみてみよう。

全エントロピー生成

$$P = \int \sigma dV = \int (\sum F_i J_i) dV \quad (19)$$

は、力 F の変化による部分と流れ J の変化による部分に分けることができる。

$$\frac{dP}{dt} = \frac{d_F P}{dt} + \frac{d_J P}{dt} \quad (20)$$

時間に依存しない境界条件の下では、式(20)右辺の第一項について一般に次の関係

$$\frac{d_F P}{dt} \leq 0 \quad (21)$$

が成り立つことが示されるが、第二項の符号は定まらない。とくに線形領域では、

$$\frac{d_F P}{dt} = \frac{d_S P}{dt} \quad (22)$$

が成り立ち、式(18)の関係の成立が保証されるが、非線形領域では式(22)は成り立たず、非線形定常状態の安定性は保証されない。

状態の安定性に関して、Lyapunov によって一般的な判別条件が与えられている。与えられた定常状態の安定性は系に小さい摂動 δX_k を加えたときの挙動を解析することによって調べられる。 X_k が張る状態空間である汎関数 $L(\delta X_k)$ が定義され、これが次の条件

$$L(\delta X_k) > 0, \quad \frac{d}{dt} L(\delta X_k) < 0 \quad (23)$$

を満たせば、その定常状態は安定である。Prigogine は Lyapunov 汎関数の性質をもつ熱力学状態関数として、常に負値をもつエントロピーの二次変分 $\delta^2 S$ を見出し、これを過剰エントロピー生成 (excess entropy production) と名付けた。Lyapunov 汎関数は

$$L = -\delta^2 S > 0 \quad (24)$$

と定義される。したがって定常状態の安定性は

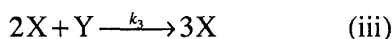
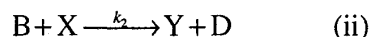
$$\frac{d}{dt} \frac{\delta^2 S}{2} = \sum \delta F_i \delta J_i > 0 \quad (25)$$

によって保証され、この条件が破れるとき定常状態は不安定になりうる。系の挙動を表す状態変化の方程式が与えられた場合、実際の安定性判別には線形安定性解析が用いられる。

4. 自己組織化

1959年 B.P. Belousov、次いで 1964年 A.M. Zhabotinskii によって周期的に変化を続ける反応系が見出された。水系で $Ce^{4+} \sim Ce^{3+}$ 存在下マロン酸の臭素酸による酸化反応で、攪拌条件では誘導期の後、 Ce^{4+} 濃度の変化により無色から黄色に周期的に変動することが直視できる。静置すると、局所的な反応の進行を示す縞状のパターンを生じ進行波として観察される。このような反応挙動はそれまで知られず、初め実験条件の不備のためとみなされたが、繰返しの追試の結果、これらの特性は十分に確認された。そして反応論的な研究が熱心に進められ、1970年代には R.J. Field、E. Körös、R.M. Noyes によって FKN モデルと呼ばれる詳細な反応機構が提出された⁴⁾。この反応系で特徴的なことは反応経路に自触媒的過程をもつことで、これにより反応系の非線形性がとくに顕著となり、反応系は時間的に不変の定常状態に達せず、振動的挙動を示すようになると考えられる。FKN モデルによれば、この反応系には2つのルートがあり、反応条件によりそのどちらかが選択されそのルートで反応が進むが、やがてそのルートは不安定化し、もう一つのルートに切り換えられ、その挙動が自動的に繰返される。

Prigogine らは Belousov-Zhabotinskii 反応のような化学振動系の特性を表す単純化されたモデル Brusselator を提案し、その動的挙動は詳細に解析した。



反応物 A、B の濃度はそれぞれ一定値に維持され、生成物 D、E は系から除かれる。この条件で定常解は、

$$[X]_0 = \frac{k_1}{k_4} [A], \quad [Y]_0 = \frac{k_4 k_2}{k_3 k_1} \frac{[B]}{[A]} \quad (26)$$

で与えられるが、この定常状態は次の条件

$$[B] > \frac{k_4}{k_2} + \frac{k_3 k_1^2}{k_2 k_4^2} [A]^2 \quad (27)$$

が成り立つとき不安定化し、振動状態へ転移する。

化学反応は本来非線形性の強いプロセスであるが、自触媒的な反応はとくに非線形性が強く、平衡状態から遠く離れた条件を維持すると、定常状態は不安定化し、振動状態のような動的秩序状態に転移することがある。

Prigogine はこのような現象を安定な定常状態に繋がる熱力学的分枝 (thermodynamic branch) の分岐 (bifurcation) による動的秩序構造の形成と考え、これを散逸構造 (dissipative structure) とよんだ。散逸構造をつくる転移は対称性を破る転移 (symmetry-breaking transition) である。自然界には散逸構造とみられる動的秩序構造の例は多いと考えられる。

散逸構造の形成は、熱力学第二法則に由来する宇宙の熱的死の予測に反するようにもみえる。Kelvin 卿が言うように、系が外界から隔離され放置されると、系内で進行する不可逆変化によって絶えずエントロピーは増大し、やがてエントロピー最大の状態に到達する。この状態ではエネルギーはそのまま残るが、全系均質でもはやなんの変化も起こらず、ただ死の静寂のみが支配する。我々の宇宙もこの運命に従わざるを得ないであろうという予言である。

不可逆変化の過程で秩序形成が自発的に進むという論議は、この予言に真向から反するようにもみえる。しかし、Prigogine は孤立した系ではなく、物質とエネルギーの流れが維持され、かつ流れを支配する力が十分に大きいとき、動的な秩序形成が起こる可能性があることを示したのである。この状況は決して第二法則に反するものではない。一般に系が外界とエントロピー (熱と物質) の交換 $d_e S$ があると、系は平衡状態から離れて、エントロピー生成 $d_i S$ を伴う不可逆変化が起こ

る。系から流出するエントロピーは系へ流入するエントロピーより大きく、その差が系内の不可逆変化によるエントロピー生成に相当する。条件が満たされれば、よりエントロピー生成の少ない状態へ自発的に転移し、自己組織化の過程が起こるのであろう。これが散逸構造の形成である。

自己組織化 (self-organization) という現象は、古くから生物学の分野で形態の自律形成として注目されてきた。一般的には、系自体がもつメカニズムによって一定の機能をもつ秩序構造が形成されることを意味し、散逸構造の形成はその一例となる。自己組織化はとくに化学物質の拡散—反応系の動的特性として興味深く、M.Eigen は “Self-organization of Matter and the Evolution of Biological Macromolecules” と題する論文⁵⁾で、自触媒機構をもつモノマー重合系で、物質進化の問題を論じている。

Prigogine とはやや異った視点で、H.Haken はシナジェティクス Synaletics とよぶ研究分野の開拓を進めている^{6, 7)}。 “Non-equilibrium Phase Transitions and Self-organization in Physics, Chemistry and Biology” という副題からも分るように、散逸構造理論と同じような問題を取扱うが、熱力学的な視点に捕われず、一般の協力現象 (cooperative phenomena) に焦点をあて、弱い相互作用をもつ個体集団の挙動を数理的に解析し、巨視的スケールの構造や機能を生み出す自己組織化を支配する法則性の確立を目的として、体系化を進めている。

5. カオス

1963年、気象学者 E.N.Lorenz は気象の時間的変化を記述する数理モデルを作り、コンピュータ解析を行っていた。あるとき同じような初期条件を与えたにも拘らず、時間的発展の計算結果が大きく異なることがあることに気付いた。問題は初期値の与え方にあった。初期値を 0.506127 と入力したとき、数式系は一定の解を与えたが、0.506 と入力すると、解は不定となり、さまざまな時間的

発展をとる。このことはたとえ数式的に厳密に定義された系であっても、ある条件で解け不安定化し非常に小さな偏差に対しても結果として大きな変動は招くことがあることを示している。これは決定論的な系においてみられる不規則で乱雑な挙動であり、決定論的なカオス (chaos) とよばれる。決定論的なカオスシステムは、小さな攪乱が軌道に大きな変化をひき起こすため、系の時間的に詳細な行動を予測することはできない。このことは古く H.Poincare (1892) によっても示唆されていた。

この問題は我々の認識の働きと深く関わっている。もし人間の能力が無限に大きく、どんな誤差をも見逃さず真に厳密な制御が可能であれば、決定論的なカオスの多くは除かれるかもしれない。しかし Lorenz が論じたモデルは大気の大気対流の運動を記述する三次元力学系で、多様な分岐現象を示す複雑な非線形系である。このような系では定常解はしばしば不安定化し、不連続的な変化を示すこともある。この場合、カオスはより本質的な系の挙動とみなすことができる。コンピューターシミュレーションにより多くのカオスシステムの特徴が詳細に解析され、実験的にもたとえば Belousov-Zhabotinskii 反応系でも観測されている。

カオスシステムは位相空間内でストレンジアトラクター (strange attractor) をもつ。位相空間内で系の代表点が接近する領域をアトラクターというが、安定な非線形系では、代表点はある固定点に漸近的に接近するが、または閉じた極限周期軌道 (リミットサイクル) に入り、そこをまわり続けるのが一般的である。前者の場合、安定な均衡状態に落ち込み、後者の場合、安定な周期運動を続ける。しかし Lorenz のカオスシステムでは、2つの引込み領域のまわりを8の字形にまわるアトラクターをもち、軌跡は決して交差することなく、アトラクターを出たり入ったりする。アトラクターへの進入角度の僅かな違いが全く異なる軌道をつくり、決定論に従いながら、その運動状態は全く予測不能である。

6. 複雑系

我々をとりまく自然そして人間の社会の挙動は一般にかなり複雑である。多くの要因が同時に働き、しかもそれらの要因の間で種々の干渉 (相互作用) が働いている。このような挙動を解析し説明するために、近代科学が主にとった手法は、系を構成部分に分割し、要因を要素に細かく分類し、これらの部分および要素の性質を徹底的に究明することである。そこで見出された単純な法則が物事の本質とみなされる。この還元論 (reductionism) の淵源は遠くギリシアに遡り、物質を原子の集合とみなす思想は長い歴史をもつ。キリスト教などの一神教は、神と人間、人間と自然を厳しく対立するものとして把握、またデカルトは身体と精神 (心) を画然と二分したが、これらも還元主義の流れの中に位置づけられよう。

還元論の立場では、全体はその部分の和として支えられ、系の挙動は構成部分の挙動を知ることによって解明される。実際にこの関係は比較的単純な系では近似的に十分の精度で成り立つ。本稿での用語を用いれば、線形関係が成り立つ限り、還元論の立場は十分に保証される。しかし我々をとりまく複雑な系では、要素間に強い相互作用が働き、また自己組織化やカオスの生起にみられるように強い非線形要素も働く。そのような場合、系全体としての挙動は部分の挙動の和としては表わせない。全体として系に由来する振舞は、そのままの形で究明しなければならない。これが全体論 (holism) の立場である。

全体論の立場に立てば、それぞれの系の構成要素が何であるかによらず、系全体としての共通の性質がみえてくるであろう。原子・分子よりなる物質系、種々のニューロン・シナプスよりなる脳・神経系、種々の人間よりなる社会系、これらが集団であることによつて示す諸挙動に共通する一般的性質である。還元論の立場に立つ解析では、この全体系の示す一般的性質は解析できない。系全体をみる目が必要になってくる。

このような新しい知への要求は、第二次世

界大戦後 1940 年代にもあった。N.Wiener によるサイバネティクス (Cybernetics) の提唱である。著書“サイバネティクス”の副題は“動物と機械における制御と通信”である⁸⁾。当時、技術が急速に進歩し、工学の現場では情報の伝達・処理や自動制御の問題が緊急の課題としてあった。これらの課題は種々の分野で問題となったが、共通して測定、通信、演算、制御など情報処理を必要とした。そしてこの問題は本質的に人工の機械系に限らず、生物系においてもみられ、また精神科学や社会学においても重要な課題であった。Wiener はこれらの問題に対して船の操舵手の働き、すなわち潮の流れや風向きなど海の状態の移り変りを考慮して所定のコースに最も近い航路をとるように舵をとる技術が必要と考え、舵手に因んだ名前を与えたのである。サイバネティクスは境界領域の科学・技術として当時幸々しく迎えられたが、そのままの形としてではなく、フィードバック系を中心とする自動制御理論や情報処理理論の構成要素としてその立場を見出している。

1980 年代に入って、今度は複雑系 (complexity) の発想が賑やかに論じられている⁹⁾。その背景には、複雑な系を全体論的に扱うという基本的立場とともに、進んだ取扱いを可能にする計算機科学の長速の進歩がある。サイバネティクスの場合とは異なり、今度は技術としてよりも学問的関心が強い。生命のような複雑系の創成と進化が究極的な話題となる。J.Holland による遺伝的アルゴリズムの創出や、C.Langton による人工生命のライフゲームを演じるセルラーオートマトンの考案は、確かにシステムの進化をシリコン上で実現し、生きるシステムを数理的に解明する。またこれまでに述べてきた自己組織化やカオスの出現は、非線形領域での対称性を破る状態転移を明確に理論づけるので、このような方向での研究はやがて生命の創造への道をきり拓くと期待される。突然変異的な進化は生物学で創発 (emergence) と呼ばれてきた。創発は熱力学第二法則が予測し得ない変化である。それは第二法則が予測

するカオスとは異なる領域、しかしそれと近接する領域で起こるであろう。環境適応系のカオスの縁での創発 (emergent revolution at the edge of chaos)、これがキー・ワードとなる。

熱力学は本来部分集合体の巨視的理論であり、全体論の立場をとる。S.A.Kauffman は期待を込めて次のように言う。「生物圏は自律体の発生と絶え間ない共進化を通して自律的に構築された。自律体とは少なくとも一つの熱力学的仕事のサイクルを実行できる、自己複製可能なシステムである。すべての熱力学システムに適用できる一般法則がないとしても、熱力学的に開かれた自己構築するシステムに一般に適用できる法則はあるのではないか。私はそのような法則の存在を信じている¹⁰⁾。」

複雑系に厳密な定義を与えることはまだできない。現状では、“多様に関連し合う多数の部分からなり、全体が部分の和以上の挙動を示すシステム”としか言えない。ただし、このようなシステムは我々のまわりに数多く存在している。その挙動を統一的に解析できる共通の規範が見出されれば、我々の生活にとって多大の便宜が得られるであろう。熱力学が進化して、複雑系における創発の現象を適確に解明できるようになることに、希望を託したい。

7. おわりに

近代科学と技術の発展の歴史を次のように大観することができよう。

I. 17 世紀 ~ 18 世紀始め

時計 (機械仕掛) の時代

II. 18 世紀中頃 ~ 20 世紀始め

蒸気機関の時代

III. 20 世紀中頃 ~

コンピューターの時代

I は機械と力学の時代、II はエネルギーと熱力学の時代、そして III はエントロピーと情報科学の時代と特徴づけることもできる。

熱力学の中で生まれ育ったエントロピーは、やや鬼子的存在であり、いま情報科学の中で中心概念の一つとして活躍している。状況の不確定性の程度はエントロピーで定量化されるが、ある信号(情報)を受けることにより不確定性は減少するので、そのエントロピー減少量で信号がもつ情報量を表すことができる。情報エントロピーは物質に伴われるものではないので、熱力学エントロピーとは別種のものともみなすことができる。

しかし、これは問題をはらんでおり、前回IX¹¹⁾で述べたMaxwellのデモンがこれに火をつけた。デモンが系のエントロピーを減少させることができたのは、分子速度の情報を得て、間仕切を開閉したからである。L.Szilardの究明により、分子速度の情報をうるために仕事が必要であり、これによるエントロピーの増大がある。これが系のエントロピー減少を上まわり、系とデモンを合わせれば決して第二法則に背馳することはないことが明らかにされた。

このことを情報理論の立場からみると、系のエントロピーはデモンからの情報を受けたことにより減少したということもできる。すなわち、デモンを系外におき、デモンからの情報の流れ(これは負のエントロピーをもつ)が系内に入って、その結果として系のエントロピーが減少したとみるのである。この見方では情報エントロピーは従来の熱力学エントロピーと同等に働く。

この種の問題は実は以前からあった。Gibbsのパラドックスと呼ばれる問題である。たとえば多数の水素分子よりなる系で、これをすべて同じ水素分子とみるか、パラ水素とオルト水素の混合物とみるかによって、系のエントロピーの値が異なるという問題である。これも系に対する情報量がからむ問題である。

この問題はMaxwellのデモンより深い根をもつ。先に複雑系は還元主義の立場をとると言ったが、より深刻な問題に主観と客観の問題がある。自然科学はこれまで観察者である自分を系外において対象を客観的に眺

めてきた。しかしGibbsのパラドックスでは主観があらわに入ってくる。複雑系の問題でも意志をもつ個体の存在を考慮に入れなければならない。このとき、意志をもつ観察者をもはや系外にとどめることは難しくなる。我々自身を内包したシステムが問題となるのである。Maxwellのデモンを系内に取込むことは容易であったが、意志をもつ人をも系内に取込むとき、系はどのように挙動するかこれを熱力学はどのように記述するか、興味の尽きない話題である。

参考文献

- 1) 妹尾学, 生活工学研究, 5, 176 (2003)
- 2) 妹尾学, 生活工学研究, 7, 74 (2005)
- 3) I.Prigogine, D.Kondepudi, "Thermodynamique", Odile Jacob (1999); 妹尾学, 岩元和敏訳, "現代熱力学", 朝倉書店 (2001)
- 4) R.J.Field, M.Burger, "Oscillations and Traveling Waves in Chemical Systems", John Wiley (1985)
- 5) M.Eigen, *Naturwiss.*, 58, 465 (1971)
- 6) H.Haken, "Synergetics-An Introduction", Springer (1978); 牧島邦夫, 小森尚志訳, "協同現象の数理", 東海大学出版会 (1980)
- 7) H.Haken, "Advanced synergetics", Springer (1983); 斎藤信彦, 小森尚志, 長島知正, "シナジェティクスの基礎", 東海大学出版会 (1986)
- 8) N.Wiener, "Cybernetics" 2nd ed., MIT Press (1961); 池原止戈夫ら訳, "サイバネティックス", 岩波書店 (1962)
- 9) M.Waldrop, "Complexity: the Emerging Science at the Edge of Order and Chaos", (1992); 田中三彦, 遠山峻征訳, "複雑系", 新潮社 (1996)
- 10) S.A.Kauffman, "Investigations", Oxford Univ. Press (2000); 河野至恩訳, "カウフマン, 生命と宇宙を語る," 日経 (2002)
- 11) 妹尾学, 生活工学研究, 8, 162 (2006)

[完]