

I . プリゴジン / I . スタンジェール著

『混沌からの秩序』 大いなる旅立ち

龍門 歩

ずいぶん以前から、今をときめく【複雑系】に関する基本的な概念を確立したプリゴジンの記念碑的著書を読みたかったのです。昨年の秋になってやっとその機会に恵まれたので真剣に通読したところ、その豊富な成果に驚き、内容についてできるだけ多くの人に伝えたいと思うようになりました。まったくの門外漢であり、何の知識もバックグラウンドもない僕にとって、それは無謀な企てでした。それは、本稿を読んでいただければすぐにおわかりだと思います。しかしぼくとしては、【複雑系】は[不可逆現象を、時間の矢を導入することによって、物理学として読み解いた]というふうに理解することができ、その到達点から生まれる多くの科学的成果に実感として期待できるようになったのです。

ディドロの生命観や、ハイゼンベルグ、量子力学、さらには生命進化のパラダイム等々、まだまだ多くのことに言及したかったのですが、僕の浅学菲才ではとても及ばぬことでした。わずかにこの小さな稿を通じて、少しでも【複雑系】に関する興味を抱いていただけるなら、望外の幸せです。

「」は『混沌からの秩序』からの引用。

[]は龍門のメモ。

太字はプリゴジン、**太字**は龍門。

1 .【古典力学】では『時間は可逆』

僕たちは古典力学の確立者 = ニュートン (1643 ~ 1727) の法則を知っている。慣性の法則、運動方程式、作用反作用の三つである。この法則を僕たちは高校時代に習った。ある物体を地上から投げ上げるとすると、その物体の質量、初速度、投げ上げる角度がわかれば、どのような軌跡を描いてどこに落下するかを運動方程式で計算することができた (ナポレオンはこの運動法則に通じていて、大砲の弾丸を正確に撃ち、勝利したと言われている)。「すなわち、『初期』と呼ばれるある瞬間における各質点の位置と速度、および力学的力を加速度に関係づける [無限小量] の概念 = 微分過程] 運動方程式である。『初期状態』から出発して、運動方程式を積分してゆくと、一連の状態、すなわち系を構成する物体の軌跡が一組得られる。」というわけだ。

ところで、「この方程式の構造から、もし系の質点の速度を反転すれば、系は『時間を逆戻り』する」。実際、「時間反転 $t \rightarrow -t$ や、速度反転 $v \rightarrow -v$ のような数学的に等価な変化の意味」は明らかである。ということは、力学的「軌跡の基本的性質は、法則性と決定論と可逆性である。」

ん？ 「可逆」？ そう，ガリレオやホイヘンスなども含めて古典力学者たちは，「力学はこの可逆性が，すべての力学変化にあると考え」ていた。僕は吃驚した。古典力学者たちは，宇宙は不変であり，過去も現在も未来も区別はなく，時間に何の価値もないとすら考えていたとは！ [このような概念については高校では教えてくれなかった]

なお，『ホーキングの最新宇宙論』でホーキングも，「物理法則は過去と未来で区別できません。」と書いている。そして現在の物理学として一般化して，「もっと正確に言えば，物理法則は C，T，P と呼ばれる捜査を組み合わせても変化しません。」と述べている。

あ，そういうこと……(^;). そこで僕は，ネットでわかりやすい表現を探してみた。

物理学の世界では時間とは方程式に現れる変数の一つです。素粒子の反応を計算する方程式では，粒子と反粒子を入れ替えて (C)，鏡に映した世界を見る時 (P)，時間がさかのぼっている (T) とした方程式と区別することができない，という性質があり，「CPT 定理」と呼ばれています。この定理は1955年にパウリとルーデルスによって独立に証明されました。(高エネルギー加速器研究機構WEBサイト)

なるほど。ということは，量子力学においても時間は可逆なのだ。

2. ハミルトニアン

ニュートン以後，ラグランジュ [1736 ~ 1813：ニュートンの体系を一般的な基準系や座標系へ一般化した] を経て，ハミルトン (1805 ~ 1865) による“ハミルトン形式”の確立に至った。以後「自然科学の目的は，ニュートンが定式化し，ラグランジュやハミルトンらの優れた物理学者や数学者が拡張した法則に，すべての観測結果を還元すること」になった。

ハミルトン形式は，ネットで調べた結果，僕として理解しやすい表現を用いれば，“物体はあらゆる可能な運動のうちで，位置エネルギーや運動エネルギーに関する積分量が最小になるように運動する”という法則で，これが新しい関数“ハミルトニアン”を導入することによって成り立つ。

ハミルトニアンは「系の位置エネルギーと運動エネルギーとの和，つまり全エネルギー」であり，「正準変数 座標と運動量 で表される。」という。「ハミルトニアン (略) が系の力学を完全に記述」し，「この関数さえわかれば，少なくとも原理的には，考えられるすべての問題を解くことができる。」。そして「これが次第に電気や磁気の理論をも包含するように拡張されて」ゆき，「量子力学においても用いられた。」。ただし，「量子力学ではハミルトニアンはもはや座標と運動量の単純な関数ではなく，新しい種類のもの，演算子となる」のだが。さらに，「ハミルトニアンを微分して得られる座標や運動量の時間変動を表す式を正準方程式と呼」び，「古典力学を適用できる力学的変化はすべて，これらの単純な数学方程式に還元できる。」ことになったのだから，これはすごい業績だ。「正準方程式は可逆であり，「保存的でもある。」。「系のエネルギーを正準変数 座標と運動量 で表したハミルトニアンは，これがもたらす変化にもかかわらず，それ自身は時間がたっても変化しない。」という。

3 . 熱力学

以上のような「時間は可逆である」とし、「不可逆現象を排除」する「ニュートンの科学への挑戦は、フーリエが熱伝導を支配する法則を定式化したときに始まった（この1811年を、プリゴジンは「複雑系の科学」の誕生した日付」と位置づけている）。その法則とは、「固体・液体・気体のいずれの状態の物質に」おいても「熱伝導」によって「熱の流れは温度勾配に比例する」というものである（念のため、熱力学とは「圧力、体積、化学組成、温度の『性質の変化の相関の科学』」で、巨視的世界のエネルギー収支を扱う学問だということです）。

硬い表現なので、現在まとめられている【熱力学の法則】をおさらいすると、次の三法則のことらしい。

* 第0法則 = 物体AとB，BとCがそれぞれ熱平衡ならば，AとCも熱平衡にある。つまり，温度が一意に定まることを示している。

* 第1法則 = 孤立系では外部との物質や熱，仕事のやり取りがない限り，エネルギーは一定に保たれる。

* 第2法則 = 「熱は高温熱源から低温熱源へ流れ，その逆には流れない」。

ただ、「これより一世紀前にブールハーフェが，熱が常に広がり一様になってゆくことを強調していた」。「すなわち，複雑な現象 多数の粒子の間の相互作用を伴う の科学と，時間的非対称性とは，最初から結びついていたわけである。しかし，熱伝導は，[19世紀初め]工学的な観点から散逸という概念とまず結びついてはじめて，不可逆過程の本性に迫る研究の端緒となった。」。

その過程をざっと見てみよう。

19世紀の初めころ，「力学と同様に熱の科学も，物理的対象としての本来の概念と，機械あるいは機関（エンジン）の定義 すなわち，力学的仕事を生み出す特定の方式における因果関係の明確化 との両方を意味していた。」

「熱を伴う物理過程の研究では.....温度，圧力，体積，その他の一組の巨視的パラメータを用いる。さらに，系とその環境との関係を示す，境界条件も考慮しなければならない。」。

言い換えれば，「力学機関は，それが外界から受け取った位置エネルギーを仕事として返す。原因と結果とが同じ性質のものであり，少なくとも理想的には等価である。」「これとは対照的に，熱機関は状態の物質的变化を意味している。.....単に運動の伝達としてだけではなく，真の変換の過程の結果」であり，「それは運動を生産する。」。それゆえにこそ，「系に運動を生産する能力を回復させるために，系をその初期の状態に戻さなければならない。」。「すなわち，なされた仕事と，相互に相殺関係にある二過程を作り出すために系に供給されなければならない熱量との比の問題が，まさに不可逆過程の概念を物理学に導入する端緒となった。」のである。

4 . エネルギー保存則

こうして、「運動の力学と同程度に、あらゆる点で数学的に厳密であり、しかもニュートンの世界とは異質な、新たな物理学理論が創造された。このとき以来、数学・物理学・ニュートンの科学の三者は、同義語ではなくなった。」のである。逆に言えば、それまでは「数学・物理学・ニュートンの科学の三者は、同義語」だったわけで、僕のような門外漢には〔可逆な時間〕と同じく、実に奇妙に思える。

ところで 1847 年、ジュールによって「化学、熱学、電気学、磁気学、生物学のあいだの結びつきが、『変換』として捉えられ」、「物理化学的变化に共通の一般的当量を定義し、保存量の測定を可能にした。この量が後に、『エネルギー』として知られるようになった。彼は、水の温度を 1 度上げるのに必要な力学的仕事を測定することによって、最初の等価性を確立した。」のである。その後マイヤー、ヘルムホルツらによって**エネルギー保存則**〔電磁気現象、化学変化なども含め、物理現象全般にわたりすべての形態のエネルギーが保存される〕が定式化され、「新しい現象の探求のための指導原理となった。」という。

ちなみに〔エネルギー〕について復習しておこう。

〔力学的エネルギー〕運動エネルギーと位置エネルギーの和。

〔内部エネルギー〕物質を構成している原子（またはイオン）の熱運動の（力学的・電磁氣的）エネルギーの総和。

〔電磁場のエネルギー〕一般に電荷や電流があって電磁場ができているとき、そのエネルギーはまわりの空間にエネルギーが分布していると考えられることができる。なお、この場のエネルギーについても、全空間で考えると 電磁場に蓄えられた全エネルギーの減少率 = 仕事や熱などで消費される電力 というエネルギー保存則が成り立つ。

〔光のエネルギー〕光は電磁波であり、電磁波というのは電場・磁場の振動している状態だから、光のエネルギーというのも電磁場のエネルギーである。〔なお〕、振動数 ν の光はエネルギー量子 $h\nu$ (h はプランクの定数) をもつ。すなわち光のエネルギーは $h\nu$ というひとかたまりの大きさでやり取りされる。

〔エネルギーとしての質量〕核反応は質量がエネルギーに変わる例といえるが〔いわゆる核兵器もその一種ですね〕、逆に 線による電子・陽電子対の生成のようにエネルギーを利用して物質をつくり出す例もある。これらのことから質量もけっきょくエネルギーの一つの形態であると考えられるようになった。〔【ネットで百科】より〕

それにしても、磁力は曲線を描くが、いったいなぜなのだろう？ すべての物理的振る舞いは最短距離を目指すはずだが.....たとえば、自由落下するボールが重力曲線でカーブしたらピッチャーの球種が格段に増えるだろう.....

しかし、「自然には、等価性やエネルギーの保存などを越えた別の面がある。そこには蒸気機関のボイラー、化学変化、生と死などが含まれる。」。ここで科学者たちは「熱力学の最も独自性のある寄与、すなわち不可逆性の概念に到達」したのである。このことをプリゴジンは再三書いているが、それはいかに「不可逆の概念」が新しい科学にとって重大な認識であったかを物語るようだ。

5 .〔カルノー・サイクル〕と〔時の矢〕

これより前、サディ・カルノーが父の跡を継いで、最高の効率を持つ熱機関を追求していた。そのためには、「衝撃、摩擦、速度の不連続変化を最小限に作られ運転されなければならないと結論した。」。その結果、「温度の違う物体の接触を伴わずに、温度の異なる二つの熱源の間に熱を伝達するという逆説的な」理想的熱機関を論理立てたのである〔1824年。この熱機関は机上のモデルだが、それでもこの理想にいくらかでも近い状態を作り出して実験することが可能であり、現実にもさまざまに応用されているという〕。すなわち、(1) 高温熱源に接して熱を吸収、(2) 断熱膨張、(3) 低温熱源に接して熱を失い、(4) 断熱圧縮 の四つの過程を行う系である。ここで、〔(1)(2) / (3)(4)という〕「二つの等温行程は、系を熱源から隔離した二つの行程によって結ばれ、全体はサイクルを作りあげる。この断熱行程では、熱はもはや系に出入りしないが、系の温度は、膨張あるいは圧縮の結果、変化する。」のである。

ただし、「なぜ現実の機関の効率が、理論によって予測された理想的効率より低いのか、という損失の問題」を取り上げることはしなかった。「このモデルは、二つの熱源の温度差を維持している燃焼の結果のみを取り扱」い、「石炭が燃えている炉についていっさい沈黙している。」。

このカルノー・サイクルに関連してクラウジウスが1850年、「二つの熱源が必要なこと、および、カルノーの述べた理論効率の公式が熱機関特有の問題を表していること」に気が付き、エネルギー「変換を補償する過程(3)(4)が、機関を初期の力学的・熱的条件に戻すために必要であることを発見した。」。そして「エネルギー変換を表す収支関係に加えて、熱源の間の熱流速と熱の仕事への変換」という「系の状態に及ぼす効果の間の、新しい関係を導入」し、「力学的効果と熱力学を結びつける」、「エネルギー保存を基礎とし」た熱力学を確立したのであった。

この理論は「自然が熱機関の効率に課した上限を決定した」。このことは、「例えばあるエネルギー差は、少なくとも他の等価なエネルギー差を一つ破壊しないと作り出せない」という一事をもってしても容易に理解できる。これがさらに、「『損失』も含めた自然そのものを記述」するための新しい問題を提起した。すなわち、「エネルギー収支の損失をどう含めるか。損失はどのようにして効率を下げるのか。これらの疑問が、熱力学第二法則に至る道を拓いた。」。

この経過を踏まえて1852年ウィリアム・トムソンは、「自然界では力学的エネルギーは減少する普遍的傾向がある」という法則を定式化した。ここで使われている「普遍的」とは、「宇宙論的な含意が明らかな『ユニバーサル』という言葉で」ある。

「トムソンは、原動機工学から宇宙論への目のくらむような飛躍をしたのである。」。すなわち、この法則において「単に新しい理想機関〔カルノー・サイクル〕を反映しただけでなく、エネルギーが保存される世界の中に、不可逆な熱伝導の結果を取りこんだ。」

「この世界とは、ある程度の不可逆な廃棄と使い道のない散逸とを代償にして、熱が運動に変換される動力機関である。(略)変換を次々に重ねるにつれ、その差を使い尽くし、最終状態である熱平衡、『熱的死』へと向かう。(略)最後には、力学的効果を生み出す温度差が全くゼロになってしまう。」。

6 . エントロピー概念の誕生

次いで 1865 年、「クラウジウスが [あらためて] 工学から宇宙論への飛躍をする番になった。」。彼は「エネルギー保存則を越えて、カルノー・サイクル中での、『有用な』エネルギー交換と、不可逆的に消費された『散逸した』エネルギーとの違いを表現する方法」として「新しい概念、エントロピーを導入した」のである。その関数は一般に S と記される。

さて、エントロピーについて調べてみると「複雑さ、乱雑さの度合を表わすための熱力学的概念」という表現が一般的であり、僕もそれ以上のことは考えてこなかった。たとえば、「ある体積の容器の中にハエを入れたときと、その 2 倍の体積の容器に入れたときとで、どちらのほうかハエの飛び方が複雑になるかを考えれば類推できるであろう」[ネットで百科] というように。これはこれでわかるのだが、ここまでプリゴジンの記述にはこのような表現も、エントロピーを直接的に定義した概念もない。僕は、この先どのように読解していったらいいか決めかねて立ち止まってしまった。そして、実に長いあいだ思考した結果、プリゴジンの言葉をそのまま流用して、「エントロピーとは不可逆的に消費されたエネルギーの散逸である」と概念化しても間違いはないだろうと結論した。というのも、プリゴジンはこう述べているからだ。

しかし、「われわれは系の状態関数であるエネルギーをよく知っている。状態関数とは、その状態を定義づけるパラメータ（圧力、体積、温度）の値だけに依存する関数である。」

「理想機関であろうとなかろうと、個々のサイクルの終点では、系の状態関数であるエントロピーはその初期値に戻る。」

つまり、エネルギー、エントロピー共に「状態関数」である。とすれば、下手をすると「エントロピーとはエントロピーの散逸である」ということになってしまい、何の定義にもならない。と僕はいったん悲観したのだが、この後に続けて、「理想化を放棄した途端に、エントロピーとエネルギーとの間の類似性は失われる。」と述べてあり、理想機関においては両者は「類似している」と明言されている。ということは、「同一ではない」のであろう。心細いが、とりあえずこの線で先へ進む。

「短い時間間隔 d_t の間のエントロピー変化 dS 」は、理想機関の場合、「機関と環境との交換を表す項によって完全に表現できる。熱が系に流れ込むのではなく、系から放出されるような実験を組むことが [も] できる。これに対応するエントロピー変化は、単にその符号を変えたものである。したがって、この種の [この系の] エントロピーへの寄与は、それが正または負のいずれの記号も取れるという意味で可逆的であり、これを $d_e S$ と呼ぶことに」する。

いっぽう、「現実の機関においては (略)、可逆的交換に加えて、系の中には、熱損失、摩擦などの不可逆過程がある。これらが系の中で、エントロピーの増大、すなわち『エントロピー生成』を行う。」 $= d_i S$ 。「これは外界との熱交換を逆向きにしても、その符号を変えない。すべての不可逆過程（例えば熱伝導）と同様に、エントロピー生成は、常に同一方向に進む。…… $d_i S$ は常に正か、または不可逆過程のない場合にはゼロになる。」

ちなみに、「前者が外界との交換 (e) を意味し、後者が系内部 (i) の不可逆仮定を意味する。したがってエントロピー変化 dS は、全く異なった物理的意味をもつ二項、 $d_e S$ と $d_i S$ との和である。」

「エントロピー変化は [が], 二つの部分に分解できる (略) 性質を理解するために、(略) エネルギーを E で表し、短い時間 d_t における変化を dE とすると、 dE は「エネルギー交換による項 $d_e E$ と、エネルギーの『内部生成』に結びついた項 $d_i E$ との和に等しい」。「しかし、エネルギー保存則によれば、エネルギーはけっして『生成』されず、ただ単に一つの場所から他の場所へ伝達されるだけである。したがって、エネルギー変化 dE は $d_e E$ だけとなる。」

うーん、それぞれの説明はわかるのだが、だからといってエントロピーについて理解が深まったとは言えない……したがって、説明することはできない……。

ともかくクラウジウスは「エントロピーの流れ $d_e S$ を系によって受け取られた (あるいは、放出された) 熱を用いて定量的に表現することに成功した。」そうである。

もっとも「彼は $d_i S / d_t > 0$ という不等式の存在を述べただけだった」が、「これは重要な進歩だった。というのは、カルノー・サイクル以外の熱力学的な系を考えたときでも、エントロピーの流れとエントロピー生成との区別ができるからである。」つまり、「増大するエントロピーは、系の自発的な時間発展に対応している」ことを明らかにし、「エディントンが適切に呼んだように『時の矢』となる。すべての孤立系にとって、エントロピー増大の方向が未来への方向である。」

なるほど、ここで「不可逆的現象」と「不可逆的時間」が結びついたわけだ。

ところで、[宇宙全体はベストの孤立系] であると考えたクラウジウスは、「二つの熱力学法則の宇宙論的な定式化の基礎を打ち立てた。

「宇宙のエネルギーは一定である。」

「宇宙のエントロピーは、最大値に向かって増大する。」

「増大するエントロピーは、もはや損失の同義語ではなく、今や、系内部の自然の過程」すなわち「最終的にはエントロピー最大の状態である熱力学的『平衡』に、系を導く過程である。」

ふむ……では、エントロピーをこう定義しなおしてみようか。

[エントロピーとは、系を熱力学的『平衡』に導く過程である]

これは、前述の定義からして、「自然の過程では、エネルギーは不可逆的に浪費され、散逸する結果、熱力学的平衡に至る」ということをも意味します。

どうでしょうか？ 複雑性とか無秩序性などとは無縁の、落ち着いた状態を想像してしまいますねえ……しかし、どのような [過程] であれ、[過程] は単純でもなければ、秩序立ってもいない……いいかもしれないぞ。

7. 平衡状態から非平衡状態へ

ところで、「熱力学的物体もその可逆変化に限定された場合は、境界条件によって制御できる。このような熱力学的物体とは、温度・体積・圧力がゆっくりと一連の平衡状態を

通って変化し、操作を逆にしさえすれば初期状態に戻るような、任意の熱平衡系である。
(略)この文脈では、不可逆性は『否定的』なものであり、系の制御がはずれた途端に起こる『無制御』変化のように見える。」つまり、「散逸の『否定的』性質は(略)、熱力学的物体が部分的にしか制御できないことを示している。」

しかも、「熱力学的系では、すべての変化が等価なのではない。これが数式 $dS = d_e S + d_i S$ の意味である。平衡への自発的变化 $d_i S$ は、境界条件(例えば、環境温度)を変更することによって制御され決定される変化 $d_e S$ とは異なる。」とある。これは理解できるが、さらに「孤立系において、平衡は非平衡状態の『アトラクター(引きつけるもの)』に見える。したがって、先の主張は、アトラクター状態への時間発展が、他のすべての変化(略)とは異なっていると述べれば、一般化できる。」と続いていて、僕はこんどは、「アトラクター」についてわからなくなり、考え込んでしまった。

ところか、すぐあとに、「エントロピーの不可逆な増大 $d_i S / d_t$ は、系を『引きつける』状態、系が好み、系自身の『自由意志』ではそこから動こうとはしない状態への系の接近を表す。」と述べているので、[アトラクターとはエントロピーの振る舞いである]と言えるのではないかということに気が付いた。こう解釈すれば、エントロピーもアトラクターも動的な性質として同一文の中で定義できる。そこで現段階において、僕流に次のように記述したい。

[エントロピーとは、アトラクター状態として振る舞いながら系を熱力学的『平衡』に導く『過程』である]

かくして、「孤立系では、すべての非平衡状態は、同じ平衡状態へと時間発展する。平衡が達成されたとき、系は[力学とは違って]その初期条件をすなわち、系がどのように準備されたかを忘れている。」ので、「[熱力学的]複雑な系は莫大な数の粒子からできて」おり、「それを再現することは、力学的見地からは、事実上不可能である。」

ここで僕たちは、「運動の世界に適用される力学、および、エントロピー増大に向かう内在的方向性をもった複雑な系の科学、熱力学」という、「根本的に違う二つの記述に出会った。」この二つは、いかにして両立できるのか? これが以降の命題となった。

8. 確率の登場

その命題を受けてボルツマンは、「軌跡の物理学[たぶん、力学のことだと思う。紛らわしい表現をしないでほしいと、プリゴジンにお願いしたいものだ]を、熱力学によって記述される状況も対象として含むように拡張するために」、「新しい概念の革新を確率論の中に探し」、「秩序原理」を打ち立てた。「秩序原理」とは、「ある系にとって最も実現しやすい状態とは、系内で同時に起こっている多数の出来事が、統計的に、相互に打ち消し合うような状態」だということである。

では、「確率の概念を物理学に応用した簡単な例を考えてみよう。二つの等しい部屋に仕切られた箱に N 個の粒子が入っている。」とき、「第一の部屋に N_1 個の粒子を見出す確率を求めるとする(第二の部屋には $N_2 = N - N_1$ 個入っていることになる)。「組み合わせ理論を用いれば、粒子 N 個の分配法のおのおのが達成される場合の数はすぐ計算でき

る。例えば、 $N = 8$ であれば、一方の部屋に八粒子を入れる場合の数は一通りである。ところが、一方の部屋に一粒子、他方に七粒子入れる場合の数は(略)[一つ一つの]粒子が識別可能としたとき、八通りとなる。さらに、八粒子を二部屋に等分配する場合の数は、 $8! / 4! 4! = 70$ 通りである(ここで $n! = 1 \cdot 2 \cdot 3 \dots (n - 1) \cdot n$) [この計算式については僕は知らないが、理解はできますね]。同様にして、 N がいくつであれ、任意の分配 N_1 、 N_2 を行う場合の数を〔欧大陸の〕物理学ではコンプレクシオン数 P と呼ぶ。その表式は、 $P = N! / N_1! N_2!$ である。」。

このことからわかるように、「巨視的な系に見られる 10^{23} の桁の N の値に対しては、可能な分配の圧倒的多数は、分布 $N_1 = N_2 = N/2$ に対応する。」。こうしてボルツマンは、「不可逆的なエントロピーの増大が、分子的無秩序の増大の表現、あるいは、初期の非対称性をすべて次第に忘却することの表現とみなせることに気づいた」。なぜなら、「非対称性は、[場合の数] P 最大の状態と比べたとき、コンプレクシオン数を減らすからである。そこで、ボルツマンはエントロピー S を、コプレクシオン数と同一視することをねらった。(略)ボルツマンの有名な等式 $S = k \log P$ (k : ボルツマン定数)は、「確率が増すからエントロピーは増大する」という考えを定量的に表している [対数 logarithm は乗法を加法に置き換える]。

この結果について、「不可逆な熱力学的変化が確率を増加させる方向の変化であり、アトラクター状態が最大確率に対応する巨視的状态であることを意味する。」となっているが、「アトラクター状態」についてよく理解できていない僕には、かなりイメージしにくい [後述]。

しかし、なにはともあれ、こうして「はじめて、物理学的概念が確率によって説明されたのである。」。

そして「確率は、系が初期の非対称性や特殊な分布をすべて忘却することを、的確に説明できる(例えば、系の一部に集められた粒子集団、あるいは、温度の違う二つの気体が混合されたときにできる速度分布 [それはそうですね。そんなもの、いちいちわかるわけありません])。この忘却が可能なのは、その系固有のどんな時間発展であろうとも、系の進展が究極的には、無秩序で対称性が最大の巨視的状态に対応する、ミクロな状態の一つに向かうためである。」。

ムム、これもわかりづらい。「ミクロな状態の一つ」とは、たとえば、ある気体の集団における無数の分子の全体的な挙動(巨視的状态)ではなく、たとえば分子一つ一つが一個の〔ボールの軌跡〕に向かうということだろうか? でも、少なくとも素粒子の振る舞いは、ニュートン力学では記述できないはず……これは別の話かな [分子の運動という解釈でいいようです]。

そして、「いったんこの状態に到達すれば、系はこの状態から近い距離を短い時間だけしか離れることはできない。言い換えれば、系はこのアトラクター状態 [“平衡状態に近づこうとする振る舞い” だろうか] のまわりをゆらぐだけである。

「ボルツマンの秩序原理によれば、先の例では、初期分布にかかわらず、系の時間発展の最後には等分配 $N_1 = N_2$ となる。この状態が、系の巨視的な不可逆的時間発展に終止符を打つ。もちろん粒子は、一方の部屋から他方へ動き続けるが、平均としては、どの瞬間も、一方向に行く粒子数と逆方向に行く粒子数とは等しい。その結果、粒子の運動は平衡

状態 $N_1 = N_2$ のまわりに小さい寿命の短いゆらぎを起こすだけである。このように、ボルツマンの確率論的解釈は、平衡熱力学によって研究されたアトラクターの特異性を理解できるようにした。」

[<http://www.kcn.ne.jp/~saiji/entrance.htm> , <http://www.nikonet.or.jp/spring/Fractal/Fractal.htm> , http://www.nticc.or.jp/pub/ic_mag/ic015/kurosaki/kurosaki_j.html 等を参照してみてください。楽しい図形の動きが見られます]

さて、「ここでは、全エネルギーだけでなく粒子数も境界条件によって固定された孤立系を考えてきた。しかし、ボルツマンの説明を、境界と相互作用するような開放系に拡張することができる。例えば、環境との熱交換によって温度を一定に保つように境界条件を決められた閉じた系においては、平衡はエントロピーの最大によってではなく、類似の関数、自由エネルギー [$F = E - TS$] の最小によって決められる。」ここに、 E は系のエネルギー、 T は温度（絶対0が273 ）、 S は前出のエントロピーである。

? また思考停止。「開放系に拡張」と言いながら「閉じた系」における記述をしている。どういうことなのか?

ちなみに、系について ネットで参照しよう。『生命を考える』というサイトでは次のように説明してくれている (<http://www.obihiro.ac.jp/~rhythms/>)。

仮想的にせよ、現実にせよ、一つの境界が定められるとき、その内部を系（システム）という。外部は、外界、或いは環境とも呼ぶ。細胞や個体、或いは地球はどれも系である。地球と地球生物の全体をひっくるめて地球生態系という。

系は外界とのエネルギーや物質のやりとりの有無に応じて三つに大別されている。孤立系では全く交換がない。宇宙がその典型であるが、例えば、発泡スチロール製の閉じた箱や魔法瓶の内部も、「擬似的な」孤立系とみなすことができる。この中では、エントロピー（乱雑性）は増大するばかりである。

第二の系は閉鎖系。エネルギー交換はするが物質交換はない。地球は太陽から輻射エネルギーを受け、熱を放出している。隕石が衝突したりしているので厳密には物質交換はゼロとはいえないが、地球を閉鎖系と見てよいだろう。だが、等温閉鎖系ではないから、太陽輻射が続く限り、地球の自由エネルギーが消滅することはない。

第三の系は開放系である。エネルギー交換も物質交換も行う。森林生態系、草原生態系、湖生態系、など様々な地域生態系があるが、どれも開放系である。一つ一つの種個体群、例えば高崎山のサル個体群なり、日本列島に棲む人々全体の個体群も、開放系とみなすことができる。もちろん、生物個体や単細胞生物の細胞は（明瞭な境界をもった）開放系である。

やはり、プリゴジンの記述はおかしい。「閉鎖系」と書くべきではないのか? が、まったくの素人が専門家に楯突いてもしかたがない。ここは、「孤立系でない系」という理解にとどめておこう。そうすれば、上の「公式は、平衡がエネルギーとエントロピーとの間の競合の結果であることを示している。」という記述もわかる。そしてこの公式から読み取ることができるように、「低温ではエネルギーが優勢で、結晶のような秩序ある（小エントロピー）低エネルギー構造が生成する。」。いっぽう「高温では、エントロピーが優勢で、分子的無秩序が広がる。」というわけだ。

9 . 非平衡が秩序の源

さて、やっと僕たちは次のようなまとめをおぼろげながら理解できるところへやってきた。

「平衡の熱力学は、自然の複雑さに対する、物理学の回答であった。この回答は、エネルギーの散逸、初期条件の忘却、無秩序への進化 [時間発展] によって表現され」「非常に多くの物理化学現象に満足のゆく説明を与えている。」

それでも、「平衡構造の概念だけでわれわれが自然界で出会う種々の構造を理解」することはできない。「生細胞や都市を調べると(略)、これらの系は単に開かれているだけでなく、開かれているからこそ存在するのである。これらは、外界から入ってくる物質やエネルギー [これは明らかに『開放系』ですね] の流速で生きている。結晶は単離することはできるが、都市や細胞は、環境から切り離されると死ぬ。」。しかも、「熱力学平衡のモデルと全く異質なものは、生物だけではない。流体力学や化学反応も外界と、物質とエネルギーのやりとりを行うのが普通である。」。

「このような状況に対して、ボルツマンの秩序原理がどのように適用されるのかを知るのは難しい。」。なるほど、そりゃそうだ。たとえば、「対流には、コヒーレンス、つまり莫大な数の分子の協力が必要である。これは無秩序の反対であり(略)、『起こりそうにない』状態である。もし対流を『奇跡』と考えるならば、最も単純な生物にも見られる高度の特異性をもった生命については、どう表現すればよいのだろうか。」。

そう。だいいち、「われわれのなじんでいる世界では、**平衡はまれでこわれやすい状態**である。」ということは、僕たちは経験的・直観的に知っている。しかも、地球は「系の部分的隔離ができるほど、太陽から十分離れて」いるからこそ、「平衡に向かう時間発展ができるのであり、「平衡と非平衡とが共存する『なまぬるい』世界」なのだ。

ところが、**またもだからこそ、生物のダーウィンの進化が可能だった**と言える。「ダーウィンの理論は、種の自発的なゆらぎを仮定することから始まり、次いで淘汰があって生物学的不可逆進化に至っている。したがって、ボルツマンと同様に、乱雑さが不可逆性をもたらしている。」わけだ。ところが、その結果は、ボルツマンの解釈では「初期条件の忘却、初期構造の『破壊』を意味するが、他方、ダーウィンの進化には自己組織化、複雑さの永続的増大が伴う」という、相容れないかのような帰結に至る。

さて、このような文脈において、「生物進化は、熱力学で記述されたあくまでも無秩序生が増え続ける世界において、どんな意味をもつのか。平衡に向かう熱力学的時間と、増大する複雑性へ向かう進化が起こっている時間とはどういう関係にあるのか。」を、科学者たちは探求しつづけた。その経緯や成果について述べるには、僕はあまりにもあまりにも力不足だ。

ただ、力学と熱力学が新しい確率や統計など数学的手法で統一され、**カオス、非線形、不安定性、ゆらぎ**などをキーワードとして、「秩序(あるいは無秩序)の概念は、[ボルツマンの時代に] 考えられていたよりもずっと複雑である」事象を乗り越え、「非平衡が秩序の源であり、「非平衡が『混沌から秩序』を生み出す。」ことが明らかにされたことをお伝えして、本稿を終わります。

2005.01.18