

もし君の理論が熱力学第二法則に反することがわかったなら、私はもう君に何も希望を与えられない。

その理論は屈辱にまみれて葬られる以外にない。

－ A・S・エディントン (The Nature of Physical World)

およそ数ある物理法則の中で、熱力学第二法則は特別な地位を占めている。もしあらゆる知識の中から最も重要なものを1つだけ挙げよと言われれば、私は間違いなく熱力学第二法則、即ちエントロピー増大則を掲げる。この意見に異議を唱える人は多いかもしれないが、賛同する人もまた少なくないと思う。

マックスウェルの悪魔とは、この熱力学第二法則に真っ向から対立する概念である。少なくともこれまでには対立するものと信じられてきた。しかし、本当に「悪魔の存在＝熱力学第二法則の否定」なのだろうか。本論で私が最も腐心したのは、いかにして「悪魔と第二法則を両立させるか」ということだった。そして、どうやら両者には共存の道があることが分かってきたのである。

この章では、なぜ「時刻不確定な悪魔」が熱力学第二法則に反しないのかについて検証する。もし第二法則に反しないのであれば、悪魔には論ずるだけの価値がある。検証の結果、やはり第二法則に抵触するようであれば、悪魔は葬り去られるより他にない。私の考えの及ぶ限りにおいて、悪魔は第二法則に抵触しなかった。果たして本当に悪魔と第二法則は共存できるのか。結局のところそれは、本章を読み終えた読者自身の判断にお任せすることになるであろう。

最も古い学問の1つである幾何学では、伝統的に直線定規とコンパスだけを用いて作図を行う。直線とは最も単純で基本的な図形であり、円とは最も美しく完全な図形だ。古代ギリシャの人々はそう考えたのである。円と直線、この2つの図形はそのまま相対する2つの世界観を表している。遠い未来の世界がどうなっているかを想像すると、我々の考え方は大別して2つの極に至る。1つは、世界とは直線的に進歩、あるいは退廃する、というものである。世界とは本質的に方向を持ち、何らかの軸に従って、あるいは導かれて進んでゆく。そのように、世界を「直線」として捉える見方がある。いま1つは、世界とは円環が巡る様に繰り返す、というものである。「歴史は繰り返す。」世界には始めも終わりもなく、本質的には同じことを何度でも再現する。そのように、世界を「円」として捉える見方もある。

物理学においても、この2つの世界観を巡っての議論が為されてきた。エントロピー増大則とは、どちらかといえば世界を「直線」として捉える側の見方である。閉じた系内においてエントロピーは増大する一方であり、決して元には戻ってこない。エントロピー増大の傾向は進歩、発展と言うよりは消費、退廃に近いであろう。ただ、エントロピー増大則自体にはそういった価値観は一切含まれていない。物理的な事実のみを受け止めるならば、世界とは不可逆過程であり、ある特定の向きにしか進行しない。そのようにエントロピー増大則は教えている。

これに対して、世界はむしろ「円」であるべきだとの反論が為されたことがある。※ 有限の大きさの閉じた力学系において、系の状態は初期状態に限りなく近い状態(近傍)に何度でも再帰する。これはポアンカレの再帰定理と呼ばれている。極端な話、系が取り得る全ての場合を取り尽くしてしまえば、以降、系は過去に現れたのと同じ状態を取るしかなくなるだろう。時間は(たぶん)無限にある。一方、系の大きさは有限なのだ。しかしよく考えてみると、たとえ系の大きさが有限であっても、状態の数が有限であるかどうかはわからない。面積が1の小さな正方形であっても、その上にある点の数は、もし面が連続的なものだったなら無限にあるはずだ。なので、長い時間の後に系の状態が全ての場合を「取り尽くす」かどうか、簡単にはわからない。むしろ一般には全ての点は取り尽くせないものと考えるべきだろう。しかし1点ではなくある有限の範囲を考えれば、系の状態は確実にその範囲内を通過する。それゆえ、1度現れた状態と完全に同じでは無いにせよ、限りなく近い状態には必ず戻ってくるはずだ。

エントロピー増大か再帰か、この議論には決着が着いたのだろうか。現実には我々が生きる世界については、エントロピー増大則で間違いないというのが今日の結論である。確かに理屈の上では再帰といった考え方があるかもしれない。しかし、系が全ての状態を取り尽くすのに要する時間はあまりにも長すぎるのだ。たとえ話として、長さ30分の映画を全て撮り尽くすことを考えてみよう。仮に映画が秒間30コマだったなら、30分で54000枚の画像が必要になる。1枚の画像がパソコンの画面程度(1024x768)であったとすると、およそ80万個程度の画素(ピクセル、画面を構成する点)を含むことになる。さて、ここで30分映画の「全ての場合」を撮り尽くすとすると、一体どの程度の数字になるだろうか。白黒映画だけに限ったとしても、 $2^{(80万 * 54000)}$ といった数になる。地球誕生から現在までを50億年として、それが何秒であったかを考えてみると、 $50億 * 365.25 * 24 * 60 * 60 \text{ 秒} = 1577880000 \text{ 億秒}$ 。これはおよそ 2^{57} 程度の数字である。つまり、地球の始まりから今まで毎秒1本ずつ映画を作成したとしても「全ての30分映画」のほんの一部しか作り得ないことになる。全ての場合を取り尽くす、というのはそういうことなのだ。30分の映画どころか、全ての俳句、つまり 50^{17} ですら全て作り尽くすことは人間にとって不可能なのである。系が元の状態に再帰するまでの平均時間をポアンカレ・サイクルという。一般的な系において、ポアンカレ・サイクルは地球の年齢よりも遙かに長く、我々にとって現実的な意味を持たない。対して、エントロピーが増大するタイムスケールは我々にとってちょうど意味がある程度の長さになる。

以上の様な議論を経て、今日ではよほど特殊な場合を除けば世界を「直線」として捉えることが常識となっている。しかし、ここに不確定分子モーターという、いささか常識にはそぐわない異端の概念がある。不確定分子モーターとは、一度利用して熱に変わったエネルギーを再び利用可能な形態に再帰

する仕組みである。それは自ずと「円」の立場に立つことになる。仮に不確定分子モーターの様な仕組みが世に存在するのであれば、世界は「円」の様相を呈していなければならない。そうでなければ、やはり不確定分子モーター自体が矛盾をはらむことになる。

次節以降で不確定分子モーターの検証を行うのだが、その基調には「円」の世界観がある。「直線」の世界に慣れ親しんだ頭脳にとって、「円」の世界は受け容れ難いものかもしれない。不確定分子モーターが成立するか否かは、最終的には「世界は円か直線か」といった問題に帰着することになる。

混乱を恐れずにあえて言えば、円と直線とは相反する対立概念ではない。エントロピー増大則は正しく、かつ、世の中には再帰循環する系もあるというのが私の考えだ。（円も半径を無限に大きくすれば直線となるではないか！）エントロピー増大則と不確定分子モーター、次節より双方の両立の道を探ってみよう。

■ ※

ボルツマンの提唱したH定理(エントロピーの元になる考え方)に対して、ツェルメロは力学系の再帰性に基づく反論を行った。また、ロシュミットは力学系の可逆性に基づいた反論を行った。再帰性とは「有限な系であれば、いつかは元(の状態の限りなく近く)に戻ってくるはず」ということ。可逆性とは「1つ1つの構成要素については、行きも帰りも同等にあり得る」ということ。なのに全体として一方通行なのはおかしいではないか、との反論を行ったのである。

※ 2008/05/22 宇宙の年齢 → 地球の年齢に修正。地球の年齢は約46億年、宇宙の年齢は137億年とされている。

不確定分子モーターは、熱力学の法則に反しているのではないだろうか？

もし分子モーターによって温度差を作ることができたとしたらどうなるだろうか。不確定分子モーターとは、もともと温度差の無い環境下で動作する装置であった。もし温度差の無いところから利用可能なエネルギーが得られたとすれば、そのエネルギーを用いて新たな温度差を作ることができるだろう。いま、2つの等温の部屋A、Bがあったとして、Aには分子モーター本体を置き、Bには摩擦のある物体を置く。Aの分子モーターで得られたエネルギーを使ってBにある物体を動かし、摩擦熱を発生させれば、Aの温度が下がり、Bの温度が上昇することになる。A、Bの温度が等しいときと、温度差があるときを比べると「場合の数」はどうなっているか。当然、A、Bの温度が等しいときの方が、温度差があるときよりも「場合の数」は大きい。途中経過がどうであれ、「場合の数」が少なくなるのは物理的におかしい。仮に温度差が生じたとすれば、その温度差を用いて通常の熱機関(カルノーサイクルなど)を回すことができるだろう。そして、通常の熱機関からは取り出す時刻が明確な「確定的な」エネルギーが得られるはずだ。不確定分子モーターから「確定的な」エネルギーを取り出すことはできないはずではなかったか。

ここに不確定分子モーターの矛盾があるのではないだろうか。確かに、モーターの動作が「不確定」であれば、A、Bの温度差がどれ程になるか予想がつかないかもしれない。あるいはモーターが確率的にしか動作しないのであれば、温度差が得られないこともあるかもしれない。しかし、そういった温度のばらつきや確率的な動作を考慮してもなお、わずかな温度差から確定的なエネルギーを取り出すことができるはずだ。分子モーターをたくさん並べて動作させるか、あるいは何度も繰り返し動作させることによって、より安定した温度差を作り出すことができるだろう。温度差が無い状態とは、最も場合の数が多い状態なのである。そこから少しでも温度の分布(確率分布)が食い違ったなら、場合の数は減少せざるを得ない。「場合の数」とは、すなわちエントロピーのことである。分子モーターが動作した結果、エントロピーが減少したのであればそれはおかしい。結局のところ、分子モーターとは温度差を作り出せないのだと結論付けられる。

温度差を作ることができない、これは不確定分子モーターの致命的な欠陥ではないだろうか。温度差が作れない、そして温度差が作れるような状況になってもいけないのであれば、一体分子モーターに何ができるというのか。やはり不確定分子モーターとは画に描いた餅に過ぎないのではなからうか。普通であれば、この辺りで不確定分子モーター＝実現不能な永久機関として議論に終止符を打つところであろう。しかし本論ではここであきらめずに、しつこく分子モーターの可能性を追ってみることにする。普通であればとりこぼしていた収穫を拾うことができるかもしれない。

温度差を作ることなく、矛盾無しに分子モーターが動作するのはどのような状況だろうか。例えば上ではA、B2つの部屋の間を断熱壁で仕切り、熱がBに溜まるような状況を考えたのだが、ここで断熱壁に穴を開けてBからAに自由に熱が移動できるようにしたらどうだろう。分子モーターがAからBに熱を移動する一方で、移動した熱は壁に開いた穴を通じて再びBからAに戻ってくるだろう。ちょうどこれは穴の開いたバケツにせつせと水を注ぐようなもので、全体としては何の用も為さない。何の用も為さない代わりに、この状態では少なくとも温度差による矛盾は生じない。この状態で、分子モーターがAからBへ熱を運び、壁の穴を通じてBからAに熱が流れるものだったとしても、つまり熱の流れが一方方向に循環するものだったとしても不思議はないのである。熱の流れは外部に対して何の用も為さないので、ここでの循環はちょうど摩擦のない車輪が一方方向に回り続ける状況に似ている。果たして熱が意図した通り一方方向に循環するのか、いまのところ確たる保証は無い。ひょっとすると一方方向に循環するという考え方も間違っていて、熱は分子モーターでも壁の穴でもランダムに行ったり来たりするだけなのかもしれない。考えてみると、不確定分子モーターも分子の熱運動も全て可逆な部品から成り立っている。全ての部品について行きと帰りは対称であり、等しく起こり得る。なのになぜ一方方向への循環が生じると言えるの

だろうか。もし一方向への循環が生じるというのなら、その非対称性の理由をどこかに求めなければならないだろう。

壁に穴の開いたモデルをもう少し単純化して、分子モーターの外部は一次元の連成振動子で取り囲まれているのだとしよう。一次元の連成振動子とは、バネと重り(質点)を一系列に、交互につないだ糸のことである。分子モーターの出力先をバネにつなぎ、その先に重りをつなぐ。その重りの先にさらにバネと重りを交互につないで延長し、ぐるりと一周して終端を分子モーターの熱の取り込み口につなぐ。第二章で紹介した様な分子モーターをイメージすれば、熱の取り込み口とは熱運動する分子を取り囲むピストンの外壁ということになるだろう。この円環上に振動を与えたとき、果たして振動は一方向にのみ伝搬するであろうか。

振動の様相を想像するのは、そう簡単ではない。1つだけ、確実に一方向に振動が伝搬する場合がある。それは分子モーターの1サイクルと、振動が外部を取り巻く円環を一巡する周期がちょうどぴたり一致する場合である。(あるいはサイクルの整数倍が一致する場合である。)振動が円環を一巡してモーターに戻ってきたとき、ちょうど都合よくモーターが振動を受け容れる状態になっていたなら、振動は乱れることなく一方向に順送りされるだろう。しかし、この状態が実現するのは周期が寸分違わず一致している場合のみ、一点だけである。また、ちょうど周期が一致しているのであれば、順方向と同様に逆方向にも一巡し得るはずだ。なので、分子モーターが温度差の無い条件下で一方向に動作するか否かは、もう少し別の角度から検討する必要がある。

はじめの問題に立ち返って、分子モーターによって温度差が作れるか否かを検討してみよう。振動子のモデルをあてはめれば、温度差が作れないことがはっきりする。分子モーターの出力先を1つの閉じた部屋(上の説明では部屋B)に振り向けるとは、モデル化すれば出力先にばねと重りを連ねて、最後にその端を壁に固定した状況と同じだ。一方、モーターの熱の取り込み口の方も、同様にばねと重りを連ねて、端を壁に固定する。全体として、直線上に並んだ振動子の一部に分子モーターが入った格好になる。この直線全体に振動を加えたとして、それらの振動が分子モーターの出力側だけに集まってくるということがあり得るだろうか。振動は時折一カ所に集中することはあっても、長時間観測すればほぼ全体に行き渡るであろう。(完全に均一に行き渡る、全ての場合を等しくなめ尽くすという保証はない。単純な一次元振動子であれば、むしろ全ての場合について均等には行き渡らない。しかし、特定の空間内を巡回することには違いない。)直線の場合は明らかに、一方向という概念は成立しない。

以上より、不確定分子モーターに残された可能性は次のものに絞られることになる。

- 1: 温度差はできない。分子モーターを取り巻く環境が「直線」であれば、分子モーターが意図した様に一方向に動作することはあり得ない。

2: 分子モーターを取り巻く環境が「円環」であれば、一方向にのみ動作する可能性が残されている。この場合温度差ができないのだから、分子モーターの動作が熱力学の法則によって否定されることはない。ただし「円環」の外部に対して有意な働きかけはできない。

果たして円環の上でエネルギーが一方向に流れることがあり得るのかどうか、検討の余地が残されている。もし分子モーターが円環上で一方向にのみ動作するというのであれば、その非対称性はどこから生じるのか、理由を明らかにする必要がある。

■ 図解:

分子モーターの先に、一次元の連成振動子を付けたら・・・

壁|.....○.....○.....○.....|<-モーターの出力
↑バネ ↑質点

結局は出力は必ずモーターに跳ね返ってくるはず。このバネと質点がすごくながーく延びたのが「気体分子の熱運動する部屋」と考える。(端の壁が自由端であっても考えは同じ、跳ね返ってくることに変わりない) この思考実験から、出力先の部屋の温度を上げることは不可能であることがわかる。

○.....○.....○....| -> モーターの入力

|
|
|

|
|
V

○.....○.....○....| <-モーターの出力

しかし、上のようにエネルギーが循環しているとなると話は違う。これなら振動が一方向きに回転することも有り得るではないか。

不確定分子モーターの本質は、一方向の流れを作り出すことにある。熱運動とはあらゆる方向への均等な運動、つまり双方向である。双方向の運動に、可逆な部品だけを用いて一方向の流れを作り出すことができるだろうか。もし一方向の流れが作り出せるというのであれば、それを生み出す何か根本的な理由があるはずだ。その理由が見出せないなら、やはり一方向の流れを作り出すことは不可能だと結論せざるを得ない。そもそも非対称性とは、どのような状況下で生じるのであろうか。以下に探ってみよう。

最も単純な系から出発しよう。一方向にだけエネルギーが流れる状況とは、ちょうど摩擦のない車輪が一方向に回り続ける状況に似ている。いま、右回りと左回りの区別ができる車輪があったとする。そして、たまたま手元にあった1個の車輪が右回りであったとしよう。この1個の車輪は左右2つの可能性のうち、右だけをとっているのだから非対称である。なぜ非対称なのだろうか。この場合、なぜと聞かれても返答に困る。たまたま最初に右回りだったからである。非対称性の起源は車輪の構造にあるのではなく、初期条件にあったに過ぎない。他にも似たような車輪をたくさん、無作為に用意すれば、恐らくそのうちの半分は右回りで、半分は左回りとなるであろう。その中からたまたま取りだした1個が右回りであった、というだけの話である。

上の車輪の例はいまさら取り立てて言うほどのこともない、当たり前の話なのだが、ここから1つの見解を引き出せる。非対称性は初期条件として与えることができる。最初にたまたま右回りであって、その後右回りを続けるものがあっても不思議はない、ということである。逆に言えば、もし構造が対称であるならば、初期条件として与える以外の方法で非対称性を生み出す方法はない。(少なくともかつて見出されたことはない。素粒子の世界でパリティが破れる現象があると言われているが、ここでは古典的なものに話を限ろう。) この考えを不確定分子モーターにあてはめてみると、分子モーターのどこかに初期条件として与えられる非対称性が潜んでいる、ということになる。ということは、そもそも最初に分子モーターを配置した向きが非対称性を生んでいるのではないだろうか。分子モーターの配置の仕方には、ある向き、例えばA→Bに配置した場合と、その逆向き、B→Aに配置した場合の2通りがある。そして実際に実現するのは2通りのうちどちらか1つなのだから、ここに非対称性の源泉を見ることができるのではない。しかし、この推測を簡単に受け容れる訳にはゆかない。なぜなら分子モーターは可逆な部品のみによって構成されているのである。配置が2通りある、というのは分子モーター自身が非対称であってこそ初めて成り立つのだが、分子モーター自身の非対称性はまだ明らかではない。ここでは

「非対称性は初期条件に織り込まれている必要がある」

という事実の確認にとどめ、考察を進めることにする。

一方向に回転する車輪は外部から力が加わらない限り方向を転ずることはない。右回りはいつまでたっても右回りのままである。これをもう一步熱運動に近づけるため、何らかのきっかけでクルリと向きが反転する車輪というものを考えてみよう。このような機械的な装置を想像するのは困難だが、例えば電子のスピンのようなものを思い浮かべればよいだろう。(実際の電子は剛体のように回転しているわけではない。磁場に対して2つの状態をとる性質を模式的に右回り、左回り、と表現しているだけである。) いま、右回りしている車輪に外部から何らかのきっかけを与えると車輪の向きが反転し、左回りに転ずるのだとしよう。ポテンシャルエネルギーのイメージを思い描けば、車輪の向きの反転は、ちょうど1つの谷底から山を越えてもう1つの谷底へと移るようなものである。このポテンシャルの山のことを「障壁」と呼ぼう。また、反転するのに必要となる外力の大きさ、越えなければならない山の高さを「障壁の高さ」と呼ぶことにしよう。このような反転付き車輪の場合、もはや非対称性を維持することはできない。たとえ最初に車輪が右回りであったとしても、何かのはずみで障壁を越え、逆回りに転ずるかもしれないからである。右回りなら右回りといった状態を維持するための方法は、基本的には2つしかない。

1. 障壁の高さを非常に高くして、左右の反転が事実上できないようにする。
2. 右回りと左回りの間に差異を設け、例えば右回りの方を左回りよりも起こりやすくする。

1. の方法は要するに反転できないように閉じこめておく、ということである。機械的な普通の車輪は勝手に反転したりしないので、ある意味高さ無限大の障壁に囲まれている、とも言えるだろう。

2. の方法は、右回りと左回りの間にポテンシャルエネルギーの差を設けておく、というものである。例えば電子のスピンの場合、磁場をかければ磁場に沿った向きのスピンは居心地が良く、反対向きのスピンは居心地が悪い。かくして磁場に沿った向きのスピンの方が多くなる。

さて、不確定分子モーターの非対称性を考える場合、上の方法2. の方は適用できない。というのも方法2. にはエネルギー勾配(エネルギーの差異)が必要だからである。不確定分子モーターに残された方法は1. の障壁の高さを非常に高くする、というものである。右回りなら右回り、といった性質をかたくなに維持し、それ以外の状態が実現しない様に制限を設けるということだ。スピンのたとえを借りるならば、非対称性にはちょうど不揮発性メモリーの様な性質が必要なのである。不確定分子モーターのどこを探せばこういった「非対称の記憶」があるのか、簡単には分からない。ここでも非対称性の1つの条件として

「制限された状態を維持することが必要」

だということを確認するにとどめる。

さて、以上で非対称性をもたらす前提条件について考えてきたのだが、次に、分子モーターが動作した場合に系が満たすべき条件を挙げてみたい。一方向にのみ回っている状態は、両方向いずれにも回り得る状態と比較すれば、より限定された状態しか取り得ない。系が取り得る全ての状態を取り尽くしたのが熱平衡なのだとすれば、一方向にのみ回っている状態は熱平衡ではない。

「一方向に回っている系は熱平衡に達していない。少なくとも左右1bitだけの情報量を有している。」

いま、右なら右方向だけに、確実に一方向にだけに回っている系があったとしよう。それが車輪の回転であっても、電子のスピンであっても構わない。とにかく一方向の系全体は1bitのメモリーとして機能し得ることに気づく。1bitのメモリーが保持する値を不定にすることによって、1bit相当の $kT \cdot \ln 2$ だけの利用可能なエネルギーが取り出せるはずだ。つまり、右回り一方向の状態は、右か左か分からないような状態に比べれば1bit分だけ熱平衡から離れているのである。この点が不確定分子モーターにとって最大の疑問点となる。不確定分子モーターは、初期の熱平衡状態から出発し、非対称な一方向の状態を作る。この始めと終わりの間にある、少なくとも1bitの違いは一体どこから生じたのだろうか。

改めて見直すと、不確定分子モーターの持つ非対称性には疑問が残ることがわかるだろう。ここでは非対称性の満たす条件として次の3点を挙げた。

1. 非対称性は初期条件に織り込まれている必要がある。
2. 系が全ての状態を取り得るのではなく、一部の状態しか取り得ないような制限(拘束条件)が必要。
3. 系は熱平衡状態に達しておらず、少なくとも非対称の起源となる1bitの情報を有していなければならない。

不確定分子モーターは、これらの条件を全て満たさなければならないのである。

不確定分子モーターの挙動について、温度差、非対称性といった観点から吟味し、最終的に我々は「系が熱平衡に達しているか否か」という点に立ち戻ってきた。熱平衡状態とは、当然のことながら何もかも生まない。不確定分子モーターが動作している状態とは、少なくとも熱平衡から1bit離れた状態でなければならない。熱平衡から離れた状態はいかにして実現できるのだろうか。この点について深く考えてみたい。

平衡状態とは、マクロに見て何の変化も見られない静止した状態のことを指す。平衡の反対は非平衡である。非平衡状態とは、静止していない状態のこと。エネルギーの高低差や物質の濃度差などがあり、それらによって引き起こされる「流れのある状態」のことを指す。食べ、呼吸し、排泄する、生きとし生ける生物は全て非平衡系である。太陽から恵みの光を受け、夜空に赤外線を廃棄する地球も1つの大きな非平衡系だ。平衡状態とは、もはやそれ以上何の変化も見られない、いわば「死んだ」状態である。対して、流れのある非平衡状態は、食物や太陽といった供給源によって「生かされて」いるのである。熱統計力学という学問の興味が非平衡系に向かうのは自然なことであろう。この自然な成り行き故に、エネルギーの高低差以外にもう一つ、系を平衡状態から遠ざける方法があるということについて、これまでほとんど取り上げられることがなかったように思う。

系を平衡状態から遠ざけるもう1つの方法とは何か。それは系を「壁で仕切ること」である。詳しく言えば、束縛条件によって系の状態を制限することである。もちろん、単に壁を差し込むだけで平衡状態からずれが生じるという訳ではない。静止した気体に仕切を入れたところで、それ以上何も変化は起こらない。「壁で仕切ること」によって系を平衡状態から遠ざけるためには、それなりの前提条件が必要なのである。その条件が何であるかについては前節に少しだけヒントを示しておいたのだが、はっきりした答は以下で明らかにしよう。

壁で仕切ることによって達せられる非平衡状態とはどのようなものか。例えば、高圧の気体が入った部屋と真空の部屋が1枚の壁で仕切られた状態を想定してみよう。仕切の壁を外せば、気体は真空の部屋に流れ込み、最後には2つの部屋は等しい圧力の気体で満たされるであろう。2つの部屋が等圧となった最後の状態が平衡状態である。対して、まだ壁で隔てられて圧力が等しくなっていない状態は、一種の「非平衡状態」であると言える。この非平衡状態は外部からの働きかけやエネルギー勾配によって形作られた類のものではない。単に壁で押さええているだけである。あまりにも自明なので、こういった壁で押さええている状態のことを通常は「非平衡」などと呼ばないし、それ以上特別な注意を払うことも少ない。しかし、壁で閉じこめられた気体は確かに熱平衡から遠ざかった状態にある。

次に、壁で仕切る操作によって平衡状態から遠ざかった状態を作り出すことができないものか、考えてみよう。例えば、ただ1分子から成る気体が入った部屋を、壁によって複数個の小さな部屋に切り分けたとしたらどうだろうか。気体分子は小部屋のうちのどれか1つに入るのだから、当初平衡状態にあった気体は高圧の小部屋と真空に切り分けられたことになる。ただし、この細かく仕切られた状態を熱平衡から遠ざかっていると言えるかどうかは微妙だ。分子はどの小部屋に入ったのか不明であるし、仕切りの操作を何度も繰り返せば、どの小部屋に入る確率も等しくなるからである。ここで、平衡状態の意味をミクロな視点から考え直してみよう。系が平衡状態にあるとは即ち、分子がどの小部屋にも等しい確率で入るということである。長時間に渡って分子の挙動を観察したとき、ある小部屋の中に分子が入っている時間が、他の(大きさの同じ)小部屋に入っている時間とゆらぎの範囲内で等しくなっていれば、系は平衡状態にあるのだと言える。もしある1つの小部屋の中に、他の小部屋よりも十分長い時間分子が留まっていたとしたら、その系は平衡状態に無いと言えるだろう。そこで、壁で仕切る操作によって分子を1つの小部屋に長く留めておく方法を考えてみることにしよう。

基本的なアイデアは、ある特定の小部屋に分子が入ったら、それをできるだけ長く押さえつけておくというものだ。問題は誰が分子を押さえつけるのかということなのだが、それは特定の観測者や知的生命

体に委ねるのではなく、機械的な物理系に委ねるものとする。つまりここでは2つの系を問題の対象として取り上げる。1つの系は、いま平衡状態から遠ざけようとしている分子1個だけの系。もう1つの系は、その1個の分子の挙動を外部からコントロールするための系である。2つの系に名前を付けた方が便利なので、前者を「**対象系**」、後者を「**コントロール系**」と呼ぶことにしよう。対象系とコントロール系の間には、エネルギーの流れも無ければ物質の流れも無い。あるのはただ「**壁で仕切る**」という操作だけである。より詳しく述べると、

「対象系、あるいはコントロール系が特定の状態Aになったら、それに対応する特定の仕切によって系内が分断される。対象系、あるいはコントロール系がA以外の状態(Aの補集合)になったら、対応する仕切は取り払われ、系に対する制限は無くなる。」

系の状態に応じて仕切が入ったり取り払われたりする仕組みは、対象系、コントロール系間のエネルギーの流れを必要としない。また、仕切の出し入れに(原理的には)余分なエネルギーを消費することもない。(仕切の出し入れという道具立ては、第2章、第3章で述べた悪魔の装置に用いたゲート、ハンドルといったものと同じだ。)以上の仕組みがあれば、対象系の分子を1カ所に長く留めておくこと、つまり対象系を平衡状態から遠ざけておくことができるのである。

いま、対象系には熱運動する分子が1個だけ入っているものとする。1個の分子は対象系内を自由に、くまなく巡っており、ある瞬間にどこにあるのか予測がつかない。一方、コントロール系にも1個だけ運動する分子が入っているものとする。ただしこちらの方の分子の運動は既知であり、初期状態でどこにあるのか明確にわかっている。コントロール系は仕切によって2つの部分に分かれているものとする。2つの部分をそれぞれL、Sとする。Lは非常に大きく、Sは小さい。(LargeとSmall) 初期状態で、コントロール系の分子はSに入っている。対象系の中の、ある特定の小領域をAとしよう。対象系の分子が小領域Aに入ると、コントロール系のLとSの間にあった仕切が外れるものとする。すると、コントロール系のSに入っていた分子はSから出て行って領域Lに入る。コントロール系の分子が領域Lに入ると、対象系の小領域Aの回りに仕切が入って、Aは分断されるものとしよう。このとき、Aに入っていた分子はそのままA内に閉じこめられることになる。ここで領域Lが非常に大きいものであったなら、コントロール系の分子がLを巡回して再びSに戻ってくるまで、対象系の分子はAに閉じこめられたままとなる。つまり、Lを十分大きくとれば、分子がAに留まる時間はいくらでも長くすることができる。コントロール系の分子が再びSに戻ってくれば、対象系の分子をAに閉じこめていた仕切が外れて、対象系の分子はAの外に出ることになる。このときコントロール系の分子は再びSに戻り、初期の状態と同じになる。以上により、仕切の出入りによって対象系の分子をいくらでも長く小領域Aに閉じこめておけることが分かるであろう。

この仕組みで問題となるのは、分子の運動には有限の時間がかかるので、若干の時間のずれが生じる点であろう。

- 1: 対象系の分子がAに入ってから、コントロール系の分子がLに入るまでの間に時間がかかる。
その間に対象系の分子がAから出て行ってしまふかもしれない。
 - 2: コントロール系の分子がSに入ってから、対象系の分子がAを出て行くまでの間に時間がかかる。
その間にコントロール系の分子が再びLに入ってしまうかもしれない。

対象系の分子をAに長く留めておくという目的からすれば、1:の場合は問題になるが、2:の場合は問題にならない。そこで、

- ・コントロール系Sの大きさを非常に小さくとる。
 - ・Aの形状と大きさを工夫して、対象系の分子がAを通過する時間が、コントロール系の分子がSを一巡する時間よりも大きくなるようにする。
 - ・Aの外周を囲う仕切の大きさにゆとりを持たせて、領域Aよりも少し大きめに取る。

といった措置によって時間のずれの問題は回避できる。

以上の仕組み全体を改めて見直してみよう。考えている系全体=対象系+コントロール系は、平衡状態に達しているわけではない。対象系だけを見れば平衡状態に近いが、コントロール系内部の分子

運動は既知であり、平衡状態からはほど遠い。対象系とコントロール系は、互いに「仕切」という操作によって影響を及ぼしあっているが、互いにエネルギーをやりとりしてはいない。この点が重要だ。2つの系は熱的に接しているわけではない。なのでコントロール系は、未知の分子運動を含む対象系に影響をあたえつつも、自分自身は未知の運動にかき乱されないまま「コントロールを保って」いられるのである。つまり、コントロール系は熱源に接しておらず、対象系と熱平衡には無いのだ。それゆえ、コントロール系が初期に持っていた情報は攪乱されずに、いつまでも保持し続けることができるのである。コントロール系と相互に影響し合うことによって、対象系は熱平衡から遠ざかることができた。なぜ熱平衡から遠ざかることができたのか、その源泉はコントロール系が有していた初期情報にあることに気付く。コントロール系が保持し続けている情報を「分けてもらう」ことによって、対象系は熱平衡から外れることができたのである。上の装置では、コントロール系の持つ情報量は $\ln(S/(S+L))$ であった。この情報量の分だけ、対象系は平衡状態から外れることができるのである。

それでは、系全体＝対象系＋コントロール系を考えたとき、平衡系がコントロール系から分けてもらった情報の分だけ、系全体の情報は増えているのだろうか。そうではない。実は、情報を分けてもらおうがもらまいが、系全体としての情報量は全く変化していないのである。簡単のため、コントロール系と影響を及ぼし合う以前の対象系、つまり情報を「分けてもらう」以前の対象系の持つ情報量が0であったとしよう。一方、コントロール系の持つ情報量がIであったとする。2つの系の間に仕切を通じて影響を及ぼし合う仕組みを作れば、対象系は平衡状態から外れることができるので情報量Iを有することになる。しかし、このときコントロール系＋対象系の全情報量は2Iにはならない。なぜなら、コントロール系と対象系は完全に連動しており、どちらか一方の状態を見れば他方の状態を言い当てることができる。従って両方の系を合わせた情報量は、やはりIのままなのである。情報を「分けてもらう」と言うより、同じ情報を「共有する」と言った方が適切であろう。一方、情報量ではなくエントロピー、即ち系が取り得る場合の数という側面から見るとどうなるだろうか。たとえ対象系がいくらかの情報を共有したとしても、全体としての場合の数は減りようがない。上の例で考えても、確かに対象系の分子が動き回れる空間の広さそのものは減少していない。ただ、分子が特定の場所に留まる時間の長さを変えることによって、長時間平均において平衡状態とは異なった分布を実現しているのである。仕切の操作によって全体のエントロピーが変化していないのは間違いない。では、対象系のみエントロピーはどうなるか。対象系は平衡状態と異なる分布を示すのだから、エントロピーは減少しているのだろうか。これは紛らわしい問題ではあるが、対象系のみに限ってもエントロピーは変化していないというのが正解であろう。熱量の出入が無く、体積変化も無い対象系でエントロピーが変化するとは考え難いからである。なので、この対象系は平衡状態とは異なった分布を持ちながらもエントロピーは平衡状態と同じといった特殊な状態にあることになる。

このように考えてみると、仕切によって影響を及ぼし合う仕組みは何ら実質的な物理量を移動していないことがわかる。エネルギーも、物質も、情報量さえも移動してはいない。情報を移動しているのではなく、単にコントロール系の持つ情報が対象系に影響を及ぼしているに過ぎない。

熱平衡に置かれた対象系は、適切な初期情報を有する他の系と相互作用することによって、熱平衡から外れた分布を有することができる。

1: まず、熱に攪乱されない初期情報Iを有する系がある。

この系のことを「コントロール系」と呼ぶことにする。

2: 一方、未知の運動を含む、平衡状態に置かれた系がある。

この系のことを「対象系」と呼ぶことにする。

3: コントロール系と対象系の間の状態を連動させることによって、2つの系で情報を共有することができる。

その結果、全く情報を有していなかった対象系から見ればコントロール系から情報を分け与えられたように見える。

4: 2つの系がいかなる方法で連動するのかといえば、互いに「仕切を入れる」という操作によってである。

仕切を入れるとは「一方の系が特定の状態になったら、他方の系の内部を分断する」という操作のことである。

5: 対象系のみに着目したとき、対象系は情報量 I だけ平衡状態から外れることができる。

ただし、全体として情報量が増えたわけではない。

なぜなら、対象系とコントロール系は連動しているため、全体的な場合の数が減ったことにはならないからである。

仕切を入れるという操作によって、エネルギーもエントロピーも変化することなしに、長時間平均における分布のみを変えることができるのである。

未到達領域

2006/08/28

いまだ平衡状態に達していない系には、大別して2種類ある。

- 1: まだ平衡に至っていない緩和過程
- 2: 壁で仕切られていて平衡に達しない系

平衡から遠ざかった状態を作り出すにも、やはり2つの方法がある。

- 1: エネルギーの高低差や物質の濃度差などによって流れを作り出す
- 2: 系の状態に応じて仕切の出し入れを行う

1:の方法は自明であろう。対して2:の方法で平衡から遠ざかった状態が作り出せるというのは少々意外かもしれない。

1:の方法で流れを保つためには、着目している系が外部に対して開かれており、エネルギーや物質の流入が不可欠である。

実は2:の方法でも同様に、着目している系の外部に、平衡に達していないもう1つの別の系の存在が不可欠なのである。

- 1:の方法では外部の系とエネルギーや物質をやりとりする。
- 2:の方法でも、もう1つの系と何らかの相互作用を及ぼし合う。

何らかの相互作用といっても、それはエネルギーでもなければ物質でも情報でもない。系が持つ情報に依存した、ある種の相互作用をやりとりするのである。より具体的には、一方の系が特定の状態となったとき、他方の系に対して仕切を入れるといった操作を行う。他方の系に対してスイッチのON、OFFを行う、と言えば分かりやすいかもしれない。つまり2:の方法とは、仕切の出し入れという操作を通じて外部の系が持つ情報を取り込むことなのである。1:の方法がありふれた現象であるのに対し、2:の方法は多分に恣意的で、实例を目にすることもほとんど無い。それゆえ2:の方法がどこまで非現実的に思えるのも無理からぬ話であろう。本当に2:の方法は成立し得るのだろうか。真偽の程を確かめるため、ここでは2:の方法に固有のある重要な性質に着目する。その性質とは、2:の方法によって平衡状態から遠ざかっている系には必ず「未到達領域」がある、ということだ。

「未到達領域」とは何であろうか。それは、仕切の壁などの束縛条件によって実現が妨げられている系の状態のことを指す。(未到達領域という用語は一般的ではなく、本論だけの特別な言い回し) 例えば、仕切によって左右2つの部屋に分割された空間において、右の部屋だけに気体分子が入っている状況を想定したとする。このとき、仕切を外すまでは実際には起こり得ない、左の部屋に気体分子が入った状態が未到達領域である。仕切を外して左右両方の部屋に気体分子が入れば、未到達領域は消滅する。仕切を外す前の、まだ未到達領域が残っている状態を、比喩的な言い方で「生きた」状態と呼ぶことにしよう。仕切を外して、未到達領域が無くなった状態を「死んだ」状態と呼ぶことにする。また、仕切を外す以前に系が取り得ていた状態を「到達領域」と言うことにしよう。今の例では、右の部屋に気体分子が入っている状態が「到達領域」である。つまり、

(仕切を外し終えた後の系が取り得る全領域) = (到達領域) U (未到達領域)

である。これは仕切の壁というものの性質からして自明であろう。

未到達領域という考え方を念頭に置いて、前節で述べた「1個の分子を領域Aに長く留め置く仕組み」を再考してみよう。ここで考えた仕組み全体、対象系とコントロール系を合わせた全ては平衡状態にはない。ちょうど仕切の壁に押さえつけられているように、どこかに未到達領域を残しているのである。それはどこか。前節の仕組みは、

- ・コントロール系が領域Sにあるとき、対象系は領域Aにない。
- ・コントロール系が領域Lにあるとき、対象系は領域Aにある。

という組み合わせで動いていた。この組み合わせで動作している状態が、いま実現している状態、すなわち到達領域である。ということは、この逆の組み合わせ、

- ・コントロール系が領域Sにあるとき、対象系は領域Aにある。
- ・コントロール系が領域Lにあるとき、対象系は領域Aにない。

これが未到達領域ということになる。この未到達領域である反対の組み合わせを行った場合、系の挙動はどうなるだろうか。前節の結果とは逆に、対象系が領域Aに留まっている時間は平衡状態よりも短くなることだろう。領域Aは長い時間壁に囲まれており、その中に分子が入り込めるチャンスは少なくなるからである。

ここで改めて

$$(\text{全領域}) = (\text{到達領域}) \cup (\text{未到達領域})$$

という関係を思い起こそう。いま、ある仕組みによって分子が領域Aに長く留まっていたのだとすると、その反対の仕組みによって分子が領域Aに留まる時間は逆に短くなる。そして、到達領域の仕組みによって長くなった分は、未到達領域の仕組みによって短くなった分とちょうど打ち消し合って、両者の平均は平衡状態の平均と一致する。つまり、両者は相補的な関係にある。前節の仕組みによって、分子が領域Aに平衡状態よりも長く留まっていたのだとしよう。ここで、何かのはずみでコントロール系のLとSの領域の組み合わせが逆転したとすると、今度は分子が領域Aに留まる時間は平衡状態よりも短くなる。さらにここで再びLとSの領域の組み合わせが逆転したならば、分子が領域Aに留まる時間も元に戻る。もし、L、S領域の組み合わせ逆転が頻繁に、50%、50%の確率で生じたとすれば、系は平均して熱平衡と同じ分布に至ることになる。こうなると、ここで考えている系では何が「仕切の壁」に相当するのかが明らかになる。L、S領域の組み合わせの逆転が、ちょうど「仕切の壁」を越えることに相当する。例えばタイミングのずれによって分子を取りこぼした場合、対象系の分子が領域Aから抜け出したにも関わらず、コントロール系が状態Lになった場合などが「仕切の壁」を越えたことになるわけだ。これは仕切の密閉が完全ではなく、隙間や穴から気体分子が漏れてしまった様なものである。

以上の様に未到達領域という観点からすれば、前節の仕組みも決して不自然ではないことが理解できるであろう。仕切の出し入れによって系を平衡から遠ざける方法とは、本質的には仕切の壁によって気体分子を1つの領域に押し込めておくのと同じなのである。なので、この方法では必ずどこかに「未到達領域」がある。気体分子を1つの領域内に押し込めれば、それ以外の領域には気体は到達しなくなる。未到達領域とは、この気体が到達しなくなっている領域のことである。現在到達している領域と、未到達領域を合わせれば、全領域が平衡状態になっているのと同じになる。系の状態が平衡から外れているのであれば、どこかに「仕切の壁」に相当するものがある。その壁を越えると系は平衡状態となり、「死んで」しまう。平衡から外れた「生きている」系の本質は、仕切の壁で押さえられているということだったのである。

改めて不確定分子モーターの検討に戻ろう。分子モーターに何が非対称性をもたらしているのか、これまでの考察を元に、その理由を探ってみよう。

ここで扱う分子モーターのモデルとして、第2章で述べた「悪魔の装置第一号」を取り上げる。悪魔の装置第一号とは次の様なものであった。

- ・熱運動する1個の分子が特定の小領域に入ったら、その直後にピストンを動かして気体分子から仕事を取り出す。
- ・ピストンを動かしているのは、閉じた経路内を行き来する信号、模式的には1個の運動するボールである。
- 閉じた経路とボールは外界と熱的には接触しておらず、単に「仕切の出入操作」を行う。

悪魔の装置第一号は、前の節で考えた「コントロール系」「対象系」といった仕組みによく似ている。経路と信号は「コントロール系」を成しており、熱運動している分子は「対象系」であろう。仕切の出し入れによって熱平衡から離れている系は、どこかに未到達領域を持っているはずであった。未到達領域とは、簡単に言えば「仕切の壁」の向こう側にあって系が到達できない領域のことである。それに対して、壁のこちら側、系が実際に取り得る状態のことを到達領域と呼んでいた。この、未到達領域、到達領域という考え方を非対称性を持つ系にあてはめるとどうなるか。例えば今、ある系が全体として右回りの性質を有していたとすれば、実際に起こっている右回りの状態が到達領域、実際に起こっていない左回りの状態が未到達領域ということになる。不確定分子モーターにおいても、もし右回りの流れが生じていたならば、その反対に左回りの流れを生じる状態がきつとあるに違いない。しかし、その左回りの状態は「仕切の壁」にさえぎられて実現してはいないのだろう。つまり「左回りの未到達領域」と「仕切の壁」を明らかにすることが、分子モーターに非対称性をもたらすメカニズムを理解するための最大の鍵なのである。

それでは、悪魔の装置第一号でどのようにすれば反対向きの流れが生じるのだろうか。悪魔の装置第一号では、気体分子がピストンを押すことによって仕事を成していた。反対向きの流れを生じさせるには、ピストンを引く形にすればよいはずだ。つまり、気体分子がピストンの壁の反対側に入って、逆向きにピストンを押している状態が「未到達領域」に相当する。ではその未到達な状態になったら、気体分子がピストンの反対側に入ったら何が起こるだろうか。まず考えられるのは、ピストンを逆向きに押し切ったところで装置は停止するという事だろう。ただ、このままではピストンの左側と右側での挙動が対称になっていない。左側の場合には最後まで押し切った後にピストンが移動して次のサイクルに入るのに対し、右側では最後まで押し切って変化が終わっている。この左右の違いが非対称性の起源なのだと言えなくもないが、なぜ非対称性が生じたのかについてまだ明らかではない。そこでもう少し装置を拡張して、右側と左側でできるだけ対称性を保つ様にしてみよう。

・分子がピストンの左側にあった場合：

分子はピストンを右に向かって押す。

ピストンの壁が右端(に近い領域)に達し、かつ分子が左側に寄っていたとき、コントロール系はピストンの壁を初期状態の中央付近に持ってくる。

・分子がピストンの右側にあった場合：

分子はピストンを左に向かって押す。

ピストンの壁が左端(に近い領域)に達し、かつ分子が右側に寄っていたとき、コントロール系はピストンの壁を初期状態の中央付近に持ってくる。

このように左右両側の動作が対称になって初めて、なぜ分子モーターが一方向だけに動作し得るのかが明らかになる。不確定分子モーターとは、元来左右どちらの方向にも動作し得る双方向のものであったのである。ただ、右回りに動作している分子モーターがあった場合、分子がピストンの壁をすり抜けない限り方向を左向きに反転させるチャンスがない。そのためにいつまでも右回りを維持し続けていたのである。

最も簡単な非対称系である「一方向に回り続ける車輪」を思い起こそう。車輪自体は非対称な構造を持ち合わせてはいない。ある車輪が右回りなのは、たまたま最初に右回りだったからに過ぎない。不確定分子モーターの持つ非対称性もつまるところ初期の状態、最初に分子をピストンのどちら側に置かかによって生じる。実際に一方向にだけ動作する分子モーターであれば片側の仕組みだけで十分であり、反対側の仕組みは省略できる。ただ理屈の上で左右両側の仕組みを想定すれば、非対称性は装置の構造によって生じるのではなく、初期情報によってもたらされていることが確認できるのである。

不確定分子モーターは無から非対称性を生み出しているわけではない。最初に分子モーターを作る際に、左右1bitだけの情報を持ち合わせていたのである。分子モーターは最初に持ち合わせていた1bitの情報を熱揺らぎで失うことなく、コントロール系に保持し続ける。そしてコントロール系から外界に対して仕切の出入りという影響を及ぼすことによって、外界に1bitだけの流れを作り出すのである。仮に何かの拍子に気体分子がピストンの壁の向こう側に入り込んだとすると、理屈の上では分子モーターの挙動は逆向きになる。これまで右回りだった車輪がクルリと反転して左回りに転じたようなものだ。この反転が頻繁に起こる様であれば、平均して分子モーターは一方向の流れを生じることができない。気体分子が反対側にはみ出すことは、即ち初期に持ってた1bitの情報を失うことを意味する。この1bitの初期情報は、いわば分子モーターの「命」なのである。命を失った分子モーターは死んでしまう。分子モーターを生かしているのは、一般的な非平衡系で見られるような外界からのエネルギー流ではない。当初よりかたくなに維持し続けてきた、ただ1bitの情報だったのだ。不確定分子モーターという仕組みを考える上で、この最初に与えられた1bitの情報は重要な意味を持つ。この初期情報のことを、本論では特に

「初源情報」

と呼ぶことにしよう。

悪魔の装置第一号の仕組みを詳細に考えてみると、どうしても完全にはなり得ない。何処かに気体分子が「逃げ出してしまう」可能性、抜け穴が残ってしまう。(実は、第一章の説明ではこの辺りを曖昧にした。注意深い読者には猜疑の種を残したかもしれない。)例えばピストンの移動が遅れてもたもたしているうちに分子が反対側に逃げ出してしまう、といった状況である。似たような状況は、先の節で取り上げた「平衡から遠ざかるためのコントロール系と対象系」の仕組みについても起こり得る。仕切がの壁が降りる前に、分子が領域Aから逃げ出してしまうといった状況が想定できるだろう。こういった「不都合な状況」は、系の大きさを変えたり、信号の速度を調整するなどの小手先の工夫によって極限まで減らすことはできる。しかし完全に無くすことはできない。なぜだろうか。悪魔の装置やコントロール系といった概念が不完全だからだろうか。思案の末私は、こういった抜け穴は些末的な問題ではなく、原理的に必ず生じるのだということに気付いた。つまり、平衡から外れた系には必ず「未到達領域」が存在する、というアイデアに至ったのである。到達領域と未到達領域の間は「仕切の壁」によって隔てられている。そして、実際のところ仕切の壁の高さが無限になることはあり得ない。それはちょうど、いかに高いポテンシャル障壁と言えども現実的には有限の高さしか持ち得ないことに似ている。ということは、分子モーターが永久に動作し続けることは現実的にはあり得ないことになる。運悪く初源情報を失った時点で、不確定分子モーターは活動を停止し、「死んで」しまうのである。

不確定分子モーターの持つ非対称性は初源情報によって与えられている。これによって、分子モーターは一方向に回る円環状の流れを作り出せることが分かった。平坦な床の上に円環状のレールを作り、その上に分子モーターを搭載した自動車を載せれば、自動車は熱運動を上手く利用して一方向に回ることだろう。従来の常識からすればこれでも十分驚きなのだが、エネルギー利用という観点からすれば「平坦な床の上」という制限は実に大きい。

分子モーターの自動車は走りはすれど、そこから確定的なエネルギーを取り出すことはできないのである。しかし目前に運動している物体がありながら、そこからエネルギーが取り出せないとは何とも合点がゆかない話ではないか。本当に分子モーターの自動車は平坦な床の上を走るだけで、ほんのわずかの坂も上ることは無いのだろうか。先の節で、不確定分子モーターは決して温度差を作り出すことができないと結論付けた。温度差を作り出すことができる状態と、平坦な床の上を回り続ける状態の差異は何なのか。分子モーターには何ができて、何ができないのか。この点を明確にしたい。

まず始めに、なぜ分子モーターが平坦な円環上を回ることができるのかについて整理しよう。

1. 最初に流れの向きを決めるのは、分子モーターが持っていた初源情報である。
初期に分子モーターを配置したとき、左右2つの可能性のうちの1つが選択される。
2. ランダムな熱運動から特定の向きに作用する仕事を取り出せるのは、仕事作用する時刻が不確定だからである。
分子モーターはいつ動き出すか分からない。この分からない、不確定要素の分だけ熱を仕事に振り向けることができる。

2. の性質のため、ある時刻に分子モーター(で走る自動車)が円環上のどの位置にあるのか、あらかじめ予測することができない。また、分子モーターの走る速度についても、長時間の後には何ら言い当てることができなくなる。速度は熱平衡分布に近づいてゆく。その結果、位置も速度も分からなくなる。ただ言えるのは、円環上を一方向に回ること、一方の向きが他方の向きよりも優先されるということだけである。つまり、この円環上の運動を記述するのに必要な情報は、ただ「右か左か」の1bitだけなのだ。こうして全体を視野に入れてみると、情報量についての収支決算は合っていることに気付くであろう。分子モーターは最初に1bitだけの情報を有していた。ランダムな熱運動が持つ情報はゼロである。この2つを合わせた結果、生じた円環上の運動が持ち得る情報量は当初と同じ1bitだけなのである。逆に言えば、このように情報量を保存しているからこそ円環上の運動が矛盾なく成立するのだと言える。円環上の運動は一見奇抜に思えるが、情報量の側面からすれば確かに掟を破ってはいない。

1bitの情報量の保存。この基準に照らし合わせれば、何が可能で何が不可能なのか、明確な境界線を引くことができる。もし分子モーターを使って結果的に温度差が生じたならば、そこには1bitを超える情報量が必要となるので不可能と分かる。より正確には1bit相当の微々たる温度差を生み出すまではできるが、それより大きな温度差は作り出せない。また、分子モーターを円環上のどこか特定の1カ所で止めることはできない。例えば分子モーターを円環全体の1/8の範囲内に押し込もうとすれば、そこには $\ln[2] \cdot 8 = 3\text{bit}$ 相当の情報が必要となる。もしある物体が全空間の1/8の範囲に収まっていたなら、その物体の位置を不定にすることによって3bit相当の利用可能なエネルギーが稼ぎ出せることになる。このエネルギーは全くの無から生じたことになるので矛盾が生じる。それでは反対に、1bitの情報量の保存を満たす状況であれば何の矛盾も無いのだろうか。次にそういった状況について考えてみたい。

1bitの情報量を保存する状況として取り上げたいのは、レールが平らではなく起伏があった場合である。より物理的な言い方をすれば、ポテンシャルが一定ではなく変化していた場合である。このとき分子モーターの挙動はどうなるだろうか。もし分子モーターが低い位置から出発して高い位置で止まった

としたら、始点と終点の間で確定的なエネルギーを生み出したことになり、不合理であろう。しかし、低い位置から出発して一旦高い山を越え、再び低い位置に降りてきたのだとしたらどうだろうか。始点と終点の高さが同じであれば、途中経過はどうであれ最終的に確定的なエネルギーを生み出したことにはならない。いま円環レール上の一点にポテンシャルの高い点、簡単に言えば山が1つあったとする。適度な高さの山であれば、勢いのついた分子モーターが山を越えることもあり得るだろう。勢いが足りなければ分子モーターは山を越えることができず、坂の途中で引き返してくるかもしれない。いつ、どのくらいの勢いで分子モーターが山にさしかかるのか、確実に言い当てることはできない。予測できるのは、山の高さと温度から、どの程度山越えが成功するかという確率だけだ。山越えに失敗することもあるのだから、分子モーターは円環上を行ったり来たりすることになる。それでも全くランダムな熱運動に従った物体の運動と比べれば、分子モーターは一方の向きを反対の向きよりも優先させるだろう。ランダムな熱運動では右回りと左回りが五分五分であったものが、分子モーターでは例えば7対3になる、といった具合に。なぜ一方向が優先されると言えるのか。それは分子モーターの運動を記述する情報が1bitで済むからである。ここでも平坦な場合と同様、分子モーターの現在位置と速度は決定的に予測することはできない。確実に言えるのは「一方向の向きが優先される」という1bitの情報だけなのである。それゆえ、もし分子モーターが一方向の山越えを優先的行ったとしても、情報量の側面において矛盾は無いことになる。

ところで、上の例の様に分子モーターが確率的に一方向を優先させるのだとすれば、その確率の値は何によって決まるのだろうか。例えば分子モーターが7対3の割合で右回り、左回りを行っていたとすれば、この7対3という数字の根拠は何か。その答えは、分子モーターが熱ゆらぎをどの程度の割合で一方向の運動に変換するのかに依存する。そもそも分子モーターの挙動とは確率的なものであった。ある一定の確率で順方向に動作し、その反対の確率で逆方向に動作する。順方向に動作する確率は、熱ゆらぎの温度と分子モーターにかかる負荷の大きさによって決まる。負荷が0の場合、分子モーターは理論上100%の確率で順方向に動作する。負荷が上がるにつれて順方向の確率は低くなり、負荷が分子モーターの平均出力と等しくなったとき、動作確率は50%となる。仮に分子モーターが100%順方向にのみ動作するものであったならば、分子モーターは円環レール上でいくらかでも加速し続けることになる。しかし、無制限に加速するといった状況は考え難い。実際には逆方向の動作が(マクロな物体で言うところの)摩擦力として働き、無制限な加速への歯止めをかける。外界から熱ゆらぎを受け取る性質上、分子モーターは外界と相互作用なしに済ますことはできない。それゆえ、もし分子モーターが特定の一方方向に走り出したとすると、外界(例えば周囲の気体分子など)から抗力を受ける。この抗力がそのまま負荷なって分子モーターの逆方向の動作確率を上げる。逆方向の動作確率が上がってゆけば、どこかで順方向の確率と等しくなるはずだ。かくして、順方向で得られた仕事と抗力が釣り合った状態が、分子モーターの平均速度ということになる。分子モーターは、この平均速度を中心として確率的に行きつ戻りつを繰り返す、といった挙動を示すことになる。

以上の確率的な挙動を理解すれば、分子モーターがどれほどの高さの山を越えることができるのかを推測することができる。分子モーターの平均出力に比して十分小さい山であれば、分子モーターは平坦なレール上走った場合とほとんど変わりなく山を越えるであろう。山の高さを少しづつ上げてゆくと、それにつれて分子モーターが山に跳ね返される率も上がってゆく。山の高さが分子モーターの平均出力と等しくなれば、山越え50%、跳ね返り50%となる。つまりこのとき分子モーターの出力の半分が一方方向の回転に寄与し、半分は無駄に失われることになる。それでは、山の高さをどれほど高くすれば山越えが無くなるのだろうか。答は、いかに高くしても理論上0%にはならない、ということである。極端な話、分子モーターではなく単に熱運動する粒子であっても山越えはできるであろう。熱運動する粒子の場合、山の高さが高くなるにつれて粒子が山越えする確率は徐々に低くなってゆく。そして山の高さが熱ゆらぎのオーダー kT に比して十分高くなれば、山越えの確率は事実上ゼロとなる。単に熱運動する粒子であれば、山を右から越える確率と左から越える確率は全く等しい。これが分子モーターだった場合、分子モーターの平均出力の分だけ一方方向の確率が上がる。例えば山の高さが $M kT$ 、分子モーターの平均出力が $X kT$ だったとすれば、左回りの山越えには $M kT$ の障壁を越えなければならないところ、右回りでは $(M - X) kT$ の障壁を越えれば済む。右回りでは、ちょうど分子モーターの平均出力

$X kT$ だけのゲタを履かせた格好になる。山があろうが無かろうが、理屈の上では分子モーターが持つ非対称性自体が失われることはないのである。ただ、分子モーターの平均出力に対して山の高さが非常に大きい場合、山の高さの影に隠れて非対称性の影響が薄れてゆく。つまり、山が高くなるほど右：左の確率は50:50に近づいてゆく。

非対称性を生み出す大元は、分子モーターの持つ「初源情報」ということであった。仮に初源情報が右と左の1bitだけの情報であったとすれば、分子モーターの挙動の差異も1bit相当の $kT \cdot \ln[2]$ ということになるのだろうか。例えば $M kT$ の高さの障壁がある系では、左回りが $M kT$ 、右回りが $(M - \ln[2]) kT$ ということになるのだろうか。そうではない。分子モーターの平均出力を決めているのは、出力自身が持つ「不確定要素」である。出力の大きさは、出力パターンがどれほど時間軸上でばらついているかによって決まる。初源情報は分子モーターが動作している限り保持し続けるものであって、初源情報自体が直接出力に転じるわけではない。分子モーターの出力は、時間軸上での出力パターン数が多くなるほど大きくなる。概して長い時間をかけた方が分子モーターの出力も大きくなり、より大きな山に対しても有効な非対称性を生じることができるようになるのである。

不確定分子モーターは、熱力学の法則に反しているのではないだろうか？
この問いかけから出発し、これまでいくつかの考察を行ってきた。

- ・分子モーターは確定的な温度差を生じることができない。
- ・分子モーターは最初に与えられた情報、初期情報によって非対称な挙動を行うことができる。
(分子モーターの持つ初期情報のことを、ここでは特に「初源情報」と呼んだ)
- ・分子モーターはポテンシャルの山を越えることができる。

これらの推論をつなぎ合わせて、分子モーターが実際にはどのように振る舞うのか、その全容を明らかにしたい。

まず、残された疑問の1つにとりかかろう。ポテンシャルの山越えができることは、温度差を作り出せないことと矛盾しないだろうか。山頂にある分子モーターは高いポテンシャルを有しているのだから、これを落下させることによって温度差が作り出せるのではないか。この矛盾は次の点によって解決を見る。

「分子モーターがいつ山頂に達するのか、その時刻がわからない。」

温度差が生じることと、一時的にポテンシャルの山を越えることは同値ではない。温度差がある状態とは、時間に依存しない恒常的な状態である。一方、ポテンシャルの山越えは時間に依存する。分子モーターはある特定の時刻にだけ山頂に留まる。そして分子モーターはいつ山頂にあるのか、その時刻を言い当てることができない。山頂にある時刻が言い当てられないその不確定な分だけ、分子モーターは与えられた高さの山を登ることができるのである。恒常的に温度差がある状態には、時間に依存する不確定な要素がどこにも見あたらない。確定的な自由エネルギーを不確定分子モーターによって生み出すことはできない。つまるところ不確定分子モーターが生み出せる結果は、その名の通り不確定な状態に限られるのである。

温度差とポテンシャルの違いは本質的ではない。たとえ温度差が生じたとしても、それが一時的に、不確定な時刻な時刻に生じるならば必ずしも禁止されてはいない。例えば分子モーターの出力に、断熱的に伸び縮みする空気バネをとりつければ、空気バネ内部にある気体の温度はバネの伸び縮みに合わせて上がったり下がったりする。ここでは温度差が生じているのだが、一時的なので矛盾は来さない。重要なのは恒常的か一時的か、確定的か不確定かなのであって、温度差であるかポテンシャルであるかではない。

山に登る分子モーターの議論は、1個の気体分子が特定の領域に入るかどうかの議論と本質的に同じことなのである。分子モーターの内部構造を思い起こしてみよう。そもそも不確定分子モーターとは、一定の空間内を巡回している1個の気体分子がある特定の領域内に収まったら、その時点で利用可能なエネルギーを取り出すという仕組みであった。いま問題としているのは、一定の円環レール上を巡回している1個の分子モーターが山頂に来たら、その時点で温度差が作り出せないかという点についてである。「一定の空間:気体分子:特定の領域」という組み合わせと「円環レール:分子モーター:ポテンシャルの山頂」という組み合わせを対比させれば、両者は同じことを異なる舞台装置の上で演じていることがわかるだろう。円環レール上の分子モーターの挙動は、言うなれば分子モーター内部にある気体分子の挙動を1段階外側で再構成しているのである。

分子モーターで走る自動車をポテンシャルの山頂に留めておいて、そこから落下するエネルギーを利用することを考えてみよう。この状況においては、山頂に達した瞬間を常に見張っている観測者が必要となる。なぜなら分子モーター自動車がいづ山頂に達するのか、その時刻をあらかじめ知ることができないからである。分子モーターの内部では、気体分子が特定領域に入った瞬間を見張る観測信号というものを考えた。それと同様に、山越えする分子モーター自動車においても「山頂に達したときスイッチ

が入り、山麓に落下するエネルギーを受け止める仕組みを置く」といった道具立てが必要となる。山頂から落下する分子モーター自動車を利用する仕組みは、一個の熱運動する気体分子を利用する仕組みと本質的に同じなのである。

分子モーター内部にある気体分子の挙動と、分子モーターを利用した物体(自動車)の運動が類似の性質を持つことを理解した上で、今度はさらにもう1段階外側の仕組みというものを考えてみよう。即ち「分子モーター自動車がポテンシャルの山から落下するエネルギーを利用して走る自動車」というものを考える。ここにおいて為される議論は、上で行われたものと全く同様となる。

1個の気体分子 → 分子モーター自動車 → 分子モーター自動車を利用したモーター・・・
この段階構造は、この後3段階、4段階、いくらでも続けることができるであろう。

広い意味での不確定分子モーターとは、不確定要素を持つ対象系と、それを観測するコントロール系との連鎖なのである。これまでは主に1個の熱運動する分子を観測するコントロール系を考えてきた。この最も単純な仕組みは、いわば最初の1段階目に相当する。広い意味での分子モーターとは、1段階目の分子モーターの不確定な出力を観測し、時に応じて利用する2段階目以降の仕組みまでも含む。そして、対象系、コントロール系の連鎖をたどって熱ゆらぎは巡回する。それではいま、対象系、コントロール系の連鎖が広範囲に拡大し、手の届く世界の全域を覆い尽くしているのだとしたらどうなるだろうか。熱ゆらぎは2種類の系によって織りなされた連鎖の上を、不確定な要素を携えつつも特定の向きに巡回し続けるであろう。対象系、コントロール系の連鎖によって構成された世界の上であれば、熱ゆらぎはもはや無意味に拡散する対象ではない。局所的には行きつ戻りつ試行錯誤しながらも、全体として見ればあたかも何物かに導かれる様に、特定の方向性を有した潮流を成すであろう。

不確定分子モーターが生み出すエネルギーの流れは、分子モーターを取り巻く世界全体を視野に入れて初めて矛盾なく理解できる。分子モーターを取り巻く世界とは、不確定であり、円環である。不確定であり、円環である場合に限り、淀みなくエネルギーが流れることができる。この円環の世界のどこかに確定的な結果を残そうとすれば、そこでエネルギーの流れは停滞する。分子モーターの出力を1カ所に集中しても、恒常的な温度差を作ることはできない。同様に、ここから確定的な自由エネルギーを取り出すこともできないのである。また、確定した時刻に確定した場所にエネルギーを振り分けることもできない。分子モーターを取り巻く世界において、確定的な結果は全く得られないのだ。ただ実現できることは、不確定な時刻に、一過性のエネルギーを振り分けることなのである。

万物は流転する。

形を留めず、流転する限りにおいて分子モーターは存続し続ける。流転が止まった瞬間に、分子モーター自身も止まるのだ。

「円環である」という言葉の意味は「直線的である」状況に対比させるといっそう明らかとなる。例えば分子モーターで走る自動車を有限長の直線レール上に置いたらどうなるか。仮に分子モーターが一方向に、右なら右に向けて走り出したとしても、結果的に分子モーターが直線レールの右端に偏在することにはならない。もし分子モーターがレールの右端に偏在したなら、偏在した分子モーターの位置をレール全体に均等に行き渡らせることによって確定的なエネルギーを取り出すことができるだろう。それは矛盾をきたす。右に向けて走ってきた分子モーターはレールの端に達すると、そこで反射して戻ってくることになる。右端にぶつかって停止するといったマクロな世界での常識は通用しない。ぶつかって停止するためには摩擦によって運動エネルギーを熱エネルギーに変換する過程が必要となるからである。直線的な世界では、分子モーターは不確定な往復運動を行う。それゆえ何の方向性も持ち得ないのである。直感的なイメージとして、直線的な状況とは円環を楕円に引き延ばし、潰してしまった極限状態だと見なすことができる。円環においては一方向に巡回していたものが、直線では往復運動に変わる。往復になった時点で円環の持っていた非対称性は失われることになる。

不確定であり、一時的である場合に限り、分子モーターはその存在を許される。この2点は、とりも直さず分子モーターがエントロピー増大則に反しないことを意味している。

- ・作用が不確定であれば、情報量の増大は起こらないし、エントロピーの減少も起こらない。
- ・たとえ実現する確率が低い状態であっても、一時的に実現することをエントロピー増大則は禁止していない。

最終的に分子モーターの可否は、次の2つの問いかけに帰着することになるだろう。

- ・果たして世界というものは不確定であり、円環であるのだろうか。
- ・世界は対象系、コントロール系といった互いに絡み合った構造を持っているのだろうか。

この2つの問いかけは哲学的な問題となる。世界そのものがどうなっているのか、私は安直に答えることはできない。しかし、上の2条件を満たす特定の小さな世界は実在しているものと、私は考えている。我々の住む複雑な世界、生態系、生きている地球上の世界は、何の構造も持たない宇宙空間のように平坦なものではない。そこは本質的に不確定であり、互いに絡み合い、コントロールを受け合うような性質を有している。このような構造を有する世界において、不確定分子モーターの視点は有意であろうと私は思うのである。

円環の連鎖から成る世界。これは不確定分子モーターが成り立つ条件を追っているうちに得られた概念である。しかし、そこには何か恣意的なものが感じられないだろうか。果たして現実の世界は分子モーターが成立するような、円環の連鎖から成り立っていると言えるのか。むしろ分子モーターに合わせて、世界の方を曲解しているのではないか。

確かに、世界が円環の連鎖のみから成り立っているという解釈は極端な理想化であって現実的ではない。現実の世界は2つの要素の混合から成っているというのが私の考えだ。1つ目の要素はごく一般的に知られているエントロピー増大過程。もう1つの要素は熱ゆらぎに源を発する不確定分子モーターの過程。前節からの比喻を借りれば、世界は「直線」と「円」の組み合わせから成り立っているのである。

エントロピー増大過程については改めて述べるまでもないので、ここでは円環の過程について述べよう。そもそも円環の過程とは何なのだろうか。これまでは分子モーターが円環になったレールの上を走るという特殊な状況を想定し、そこから漠然とエネルギーが巡回する様子を思い描いていた。それゆえ、円環の過程、円環の世界と言われても曖昧な像しか結ばない。ここで改めて、円環の世界に対しての定義付けを行なおう。対象とする系が円環的であるとは、

1. 系の状態が初期状態に再帰するような経路が存在すること。
2. ただし、その経路上のどの2状態も相異なっていること。

の2条件を満たすことである。

条件1. は円環であることを別の言葉で述べただけである。

条件2. は往復運動のように、正確に元来た道を引き返す過程を除外したものだ。※

多数の粒子から成るマクロな系が円環的であるかどうかについては注意が必要だ。有限な大きさの力学系であれば、理屈の上では全てが円環的だと言えなくもない(ポアンカレの再帰定理)。しかし、現実的に再帰するまでの時間があまりにも長かったり、確率があまりにも低いものはエントロピー増大の過程と見なす方が自然だろう。それゆえ、ここでは円環の定義にいささか現実的なもう1つの条件を付け加えることにする。

3. 再帰するまでの経路が十分に短いこと。

純粋に力学的な観点に立てば、円環的でない系を探す方が難しい。条件3. が無ければ全ての系は円環的なのである。しかし現実的には大多数のマクロな系は円環的ではない。

以上の3条件を見直せば、円環的な世界が特殊な概念ではなく、一般的なものであることがわかるだろう。円環的な世界観は決して目新しいものではない。しかし円環的な系を実験の上で見ることは希だったので、これまでは一部の数理的な話題以外に円環の概念が登場することはなかったのである。※

次に「円環の過程」について考えよう。(エントロピー増大過程に対する)円環の過程とは、

「円環的な系の状態遷移に従って、エネルギーが特定の方向に流れる過程」

のことである。ここで重要なのは「特定の方向に」という点だ。円環となる経路上を「右回りにも、左回りにも」等しい確率で遷移する過程は、ここで言う円環の過程ではない。要は非対称なのである。遷移を特定の方向に保つには、相応するだけの情報が外部からもたらされるか、系内で保持され続ける必要がある。ここでの情報量は、

$$I = \ln (\text{実現している特定の方向の場合の数} / \text{考え得る全方向の場合の数})$$

で計ることができる。例えば右回りか、左回りかのいずれか一方というのであれば、情報量は $I = \ln 2$ である。外部から情報を受け取るためには、必然的にエネルギーの流入が伴う。従って外部から情報が流入する過程は、どちらかと言えばエントロピー増大過程の方に分類される。※ 外部からの情報の流入が無いとすれば、特定の方向を保つための情報は初期条件として与えられたものである。この初期条件として与えられ情報のことを「初源情報」と呼んでいた。円環の過程とは、向きを保つための情報が初期条件として与えられた場合のみを指す。

・円環の過程の条件(定義):

「系に与えられた初期条件に従って、エネルギーが特定の方向に流れ続けること(そのような過程)」
「流れ続ける」ためには、系は自ずと円環的でなければならない。(あるいは無限に長い経路を持つ必要がある。)

■
以上で円環的な世界、円環の過程の定義付けが済んだわけだが、通り一辺倒の定義だけでは具体的なイメージに結びつき難いであろう。そこで、円環の世界を思い切り単純化したモデルによって以下に示そうと思う。

今ここに、コーヒーが注がれた1つカップがあることを想像して欲しい。カップの内側は非常に滑らかで、カップとコーヒーとの間には摩擦が全くないものとしよう。また、コーヒーの表面と空気との間の摩擦も無いものとする。この状況下で一度コーヒーをかき混ぜれば、摩擦が無い場合渦巻きの流れは失われることなくいつまでも回り続けることになる。コーヒーを構成する個々の分子は様々な向きに運動する。流れの中にミルクを投げれば、でたらめなコーヒーの分子運動にかき乱されて、やがてミルクはコーヒー全体に拡散するであろう。しかし、いかに乱雑な分子運動をしようとも、コーヒー全体の一様な流れは止むことがない。仮にこれが小さなコーヒーカップではなく、非常に大きな、宇宙全体がすっぽりと収まるような巨大なコーヒーカップだとしたらどうだろうか。宇宙全体が回っていたとしたら、全体として特定の角運動量を有していたとしたら、その回転を止める手だては一切無い。宇宙にはその外側が無いのだから(外側は考慮の外にあるのだから)、回転していても静止していても区別が付かないと反論されるかもしれない。しかし、たとえ外側が無かったとしても遠心力が働くので、回転の有無は内部だけで識別できるのである。円環の世界の最も基本的なイメージは「回っていること」にある。現実のマクロな世界では、どんな回転もいつかは止まる。コマであれ、地球であれ、いつかは勢いを失う時が来る。それでは、宇宙全体が回っていたとしたらどうだろうか。コマと違って、宇宙全体の回転はもはや止まりようがない。果たして宇宙全体が一定の角運動量を有しているかどうか、簡単に知る術はない。全く自転のない星は極めて珍しいように、むしろ宇宙全体が回っていた方が自然であるようにも思える。ただ、仮に宇宙全体が回っていたとしても、その一巡に要する時間は極めて長いであろう。それゆえ我々人間のスケールに及ぼす影響は極めてわずかであろうと考えられる。

宇宙のコーヒーカップはあまりにも大きすぎるので、次に、小さく閉じた小宇宙的なコーヒーカップを考えてみよう。小宇宙的なコーヒーカップとは、外界と何の交渉も持たず、その内部だけで一方向に回り続ける閉じた世界のことである。こういった小さく閉じたコーヒーカップがあったとしても、その内部の回転は外側の世界に何の影響も与えない。もし小さなコーヒーカップが外界に影響を与えるとすれば、そのときはカップの壁面に摩擦が働くとき、つまりこの小世界の回転が止まるときであろう。そのとき小さな世界の回転が止まる代わりに、角運動量保存のため、外界を含む大きな世界が少しだけ回転を増すことになる。小さなコーヒーカップと外界の間で運動量を直接やりとりすれば、小さな回転は大きな世界の一部に自然に埋もれてゆく。この埋もれてゆく過程は拡散の過程、つまりエントロピー増大の過程である。外界との接触がなければ小さな回転が失われることもなく、外界に影響を及ぼすこともない。外界と完全に接触すれば、外界に影響を与える代わりに小さな回転は失われる。

それでは、この両者の中間は存在しないのだろうか。小さな回転を失うことなしに、外界に影響を及ぼすことはできないものか。実はそういった中庸の方法がある。小さなコーヒーカップの回転を止めること

なしに、大きな世界を回す方法が存在するのである。ヒントはコーヒーカップと外界との接触の度合いにある。運動量、あるいはエネルギーのやりとりを行えば、小さなコーヒーカップはたちまち外の世界に飲み込まれるであろう。かといって何もやりとりを行わなければ、何も起こらない。エネルギーのやりとりを行わずに、相互の状態を伝え合い、影響を及ぼし合う様な接触が望ましい。この適度な接触とは、具体的にどういったものだろうか。答はこれまでに何度か述べられてはいるが、いま一度じっくり繰り返そう。適度な接触とは、互いに相手に対して「仕切を入れる」操作のことである。

「ある系が特定の状態になったら、相手の系内の経路を分断する」

この操作を通じて、2つの系は直接エネルギーのやり取りを行わずに、互いに影響を及ぼし合うことができる。ゆらぎによって外の世界の一部に偶然にも偏在が生じたとき、小さなコーヒーカップの中の仕切が外れて、偏在を特定向きの回転に変える。それ以外の場合、小さなコーヒーカップの中には仕切が入り、小さな系は次の偏在が生じるまで辛抱強く待ち続ける。このような操作を通じて、小さなコーヒーカップによって大きな世界を回すことができるのである。

ところで、このとき宇宙全体で見た角運動量はどうなっているのだろうか。角運動量は保存するはずだ。宇宙全体が、当初小さなコーヒーカップが持っていたより大きな角運動量を持ったとすれば、それはどこがおかしい。実は、長時間の平均をとれば角運動量は確かに保存しているのである。小さなコーヒーカップには長い待ち時間が必要となるのだが、その間は回転は停止している。その長い停止時間の分だけ、大きな外の世界を回すことができるのだ。もしコーヒーカップと外の世界の大きさが極端に異なっていたならば、待ち時間も極端に長くなる。この極端に長い待ち時間があるので、外の世界が一瞬だけ角運動量を有したとしても、長時間の平均をとれば当初小さなコーヒーカップが持っていた角運動量は保存するのである。

小さなコーヒーカップの回転が宇宙全体に影響を与える方法は、上記のごとく2種類ある。1つは密な接触、運動量、エネルギーの直接のやりとりによるエントロピー増大過程。もう1つは疎な接触、仕切の出入り操作のみによる円環の過程である。宇宙全体、長時間の角運動量という視点から見れば、両者の最終的な結果に違いは無い。それでは両者の違いはどこにあるのかと言えば、当初小さなコーヒーカップが有していた情報が失われるか、保持されたままであるかという点にある。エントロピー増大過程においてコーヒーカップの持っていた情報は宇宙全体に拡散し、失われる。円環の過程ではコーヒーカップの情報は保持されたままであり、ある時点で仕切を入れる操作を停止すれば初期の状態に戻ることができる。円環の過程は情報が手元に残っている、即ちコントロールが手元に残っているのである。ここがエントロピー増大過程に比して有用な点であり、円環の過程の核心であると言える。情報を制する者は、宇宙をも回すことができるのだ。

■ ※

条件2. は明示的に述べる必要はないかもしれない。というのは、力学系の軌道を考えれば条件2. は条件1. から導かれるのだから。ここでは「状態」を軌道上の1点ではなく、もう少し広い範囲(例えばマルコフ過程上の1つの状態)としてとらえて、条件2. を付け加えた。

■ ※

スピン反転を元に戻す実験、というのがあって話題を呼んだ。

■ ※

もちろん単に情報を受け取っただけでエントロピーが増大するわけではない。定常的にエネルギーの流入、流出を行い、両者の間に情報量の差異があったとき、つまり温度差があったときに初めてエントロピー増大過程となる。

■ ※

宇宙全体が回っているというアイデアは、近代物理の範囲で言えば「ニュートンのバケツ」にまで遡ると思う。ニュートンのバケツは絶対空間の論拠として考えられたものだが、ここでは論点が違うので、趣を変えてコーヒーカップにしてみました。

不確定分子モーターは熱力学第二法則と両立し得るか？

不確定分子モーターの著しい特徴は作用する時刻が不定ということだ。時刻を不定にすることによって、熱が有していた場合の数を減らすことなく利用可能な仕事への変換を可能としていた。確かにこの考えに従えば、場合の数についての矛盾は回避できるかもしれない。しかしそれだけで熱力学第二法則の制約を完全に満たしていると言えるのだろうか。本章では以下2点の疑問を取り上げ、それらに答える形で第二法則との共存の道筋を示した。

1: 不確定分子モーターは温度差を生じ得るか。

不確定分子モーターの出力を全て1つの熱浴に振り向ければ、そこに温度差を生じるはずだ。

途中経過がどうであれ、温度差の無い状態から最終的に温度差のある状態が生み出されるのは矛盾ではないか。

2: 非対称性はどこから生じるのか。

対称、可逆な構成部品から非対称な流れが生じるのは矛盾ではないか。

これらに対する回答は次の通り。

1: 確定的な温度差を生じることはいくつかできない。

一時的に、あるいは不確定な時刻に温度差を生じることだけができる。

不確定分子モーターが為し得るのは全て一時的な状態であって、確定的な結果を残すことはできない。

2: 非対称性は生み出されたのではなく、初期に与えられた情報を維持し続けているに過ぎない。

初期に与えられた情報のことを、ここでは特に「初源情報」と呼んだ。

1, 2は不確定分子モーターの情報収支に着目することで深く理解できる。

・初期状態で、不確定分子モーターには幾ばくかの初源情報が与えられている。

これが非対称性の源となる。

・不確定分子モーターは初源情報を保持し続けたまま、その後の動作を行う。

分子モーターは、外界とエネルギーのやりとりを行わずに初源情報を保持し続ける部分系を有している。

この部分系のことを「コントロール系」と呼んだ。

コントロール系は、外界とエネルギーも情報もやりとりしない。

ただ、外界と「仕切の出し入れ」という操作を通じて影響を及ぼし合う。

・「仕切の出し入れ」操作によって、世界全体(=コントロール系+外界)の情報が増える訳ではない。

不確定分子モーターの為し得る状態は「情報が増大しない」範囲に制約される。

例えば、確定的に温度差が生じている状態は情報が増えているので実現しない。

しかし、不確定な時刻に一時的に温度差が生じたとしても、情報量は増えないので制約は免れる。

・情報量が増えていないにもかかわらず、なぜ仕事を取り出すことができるのか。

それは「時刻が不確定」だからである。

不確定分子モーターは、その名のごとく時刻が不確定な分だけの仕事を成すことができる。

以上の様な情報の流れを念頭に置くと、不確定分子モーターの作用は円環的であることに思い至る。分子モーターの成す作用は全て一時的でしかなく、巡り巡って再び熱ゆらぎに返るということである。そのように巡回する経路があって初めて不確定分子モーターは動作し得る。

広い意味において、不確定分子モーターとは

「仕切の出入操作によってゆらぎを利用し、円環的な流れを生み出す過程」

のことである。世界の全てが円環的な流れから成っているというわけではない。世界は、エントロピー増大という直線的な過程と、巡り来る円環的な過程の絡み合いから成り立っているのである。