

等温壁で囲まれた部屋の中で熱運動している1個の気体分子から、継続的に仕事を取り出す方法を考案せよ。

Maxwellの悪魔、Szilardの悪魔など一連の考察の延長であるこの問題には、不可能という以外の別の答が存在する。その答を示すのが本章の目的である。

答となる方法は本章の最後に示すが、その前に私自身が答に至るまでに経た試行錯誤の過程を提示しておいた。

ちょうど熱力学におけるカルノーサイクルが理想的な前提の上に成り立っているように、ここで示そうとする答も多分に理想化されたものである。それ故、ここで示す答はわかりずらく、また受け入れ難い面を持つ。

ただ、ひとたび不可能という既成概念をうち捨て、答が存在することさえ認めてしまえば、この問題を解くこと自体は決して法外に困難ではない。よくできたパズルを楽しむような心持ちで、自ら答を導き出すのが理解に至る最良の道であろう。

まずは”シラードの悪魔”を手直しするところから始めよう。私が最初に思い付いたアイデアは、”悪魔の数を複数に増やす”というものだった。先に紹介した”シラードの悪魔”では、一個の気体分子が入っている箱を2つの部屋に分割することを考えた。ここでは2分割ではなく、3分割なり10分割なり、もっと多数の部屋に分割することを考える。(実はオリジナルのシラードの論文でも、2分割以外にm:n分割などの場合が言及されている。) 分割数を増やすとどんな良いことがあるかという、とりだされる仕事が増えるのである。より小さな部屋に閉じ込められた気体分子は、より強く圧縮された状態にある。部屋の分割数nに対して取り出される仕事Wは $W = kT * \ln(n)$ であり、nに対する単調増加である。一方、n個の部屋の中から分子の入った部屋を見つけるのにかかるエネルギーはどうなるだろうか。たくさんの部屋の中から一個の分子を見つけるのは大変な(自由エネルギー消費を伴う)作業なのだろうか。ここで私は「上手に探せばわずかの自由エネルギー消費で分子を見つけることができる」と考えた。

以下に、「たくさんの部屋の中から一個の分子を見つける方法」について検討してみよう。分子が在るか無いかを検知するには、有無を知らせる信号が必要となる。信号には、電気や光、音など様々なものがあるが、どんな形態の信号であろうともある大きさのエネルギーを有するはずだ。信号を作り出すのにかかるエネルギーはできるだけ小さく抑えたいところだが、熱雑音に負けないために信号の大きさには下限が存在する。この下限となる信号エネルギーの大きさをeとしよう。eの大きさは少なくとも、一個の分子から成る気体が2倍に膨張する際に得られるエネルギーよりは大きくなる。だから、分子の入った箱を2分割しても信号エネルギーeのもととはとれない。そこで、部屋の分割数を増やして、例えば2分割時の2倍のエネルギーを得ることを考えてみよう。2eのエネルギーを得るには、まず気体が2倍に膨張してe、さらに2倍に膨張してeだから、 $2 * 2 = 4$ 分割すればよいことになる。(部屋の数4ならば4eとなるわけではない。エネルギーを1e、2e、3eと増やすごとに部屋数は2、4、8と倍々に増える。) それでは、4つの部屋の中から1個の分子を見つけ出すには何回の観測が必要だろうか。単純に1つ1つの部屋をしらみつぶしにすれば、4回の観測が必要となる。4回の観測にかかるエネルギーが4e、取り出されるエネルギーは2eだから、差し引き2eの赤字となる。これでは2分割の方がまだましであった。

ところが、もう少し頭を使えば測定回数を2回にまで減らすことができることに気付く。4つの部屋を大きく右の2部屋と左の2部屋に分けて、一回目の測定では、まず右半分にあるか左半分にあるかを見極める。次に分子の存在する半分の中から、2部屋のどちらに分子があるのかを測定する。この方法だと測定回数は2回で済むので、測定にかかるエネルギー2e、取り出されるエネルギー2eで差し引き0となる。複数の部屋の中から1個の分子を見つけ出す方法として、最も測定回数が少ないのはここに挙げた「2分探索法」であるといわれている。「2分探索法」を用いた場合、部屋が8個の時測定回数3回＝得られるエネルギー3e、部屋が16個の時測定回数4回＝得られるエネルギー4e・・・常に測定に費やすエネルギーと得られるエネルギーが等しくなる。理論的には、(最も無駄のない方法で)測定にかかるエネルギー＝得られた情報＝取り出されるエネルギーと考えて良い。現実には、摩擦があつたり有限時間内にエネルギーをとりださねばならない(準静的過程ではない)ので、測定にかかったエネルギーの全てを回収することはできない。

ここで私はこう考えた。「2分探索法というのは理にかなってはいないが、ずいぶん不自然な方法だ」と。仮に自分が複数の部屋のどれかに入っている一個の分子を探すとしたら、どんな方法をとるだろうか。私はまず「部屋の中身が一目で見られれば便利だ」と思った。そのためには「部屋が透明な材質でできていけばよい」と考えたのである。透明な部屋に入った分子なら一目で見分けることができる。一目でよいのだから光をあてるのも一回で充分なのではないだろうか。いま、複数の透明な部屋を横一列に並べて、全ての部屋を貫通するように横から光をあてる。こうすれば光を当てるのは1回で済む。光は透明な部屋を貫通し、分子に当たって向きを変える。これを傍らで観測している者の目には、分子の入っている部屋がキラリと光るのが見えることだろう。「どの部屋が光ったのかを見分ける目」を適当な機械仕掛けで実現するには、光の有無を検知する受光器が少なくとも部屋の数だけ必要となる。部屋

の形や分子の動く範囲等を適当に工夫すれば、分子の入った部屋に対応する受光器が感応するように(3番目の部屋には3番目の受光器といった具合に)できるであろう。問題は複数の受光器を稼働させるのにどれだけのエネルギーを費やすかという点だが、これには解決策がある。受光器は受け身なのだから、稼働する受光器は光の当たった1個だけで、他の受光器は「休んで」いればよい。つまり受光器自体が後に続く系の起動スイッチとなっているわけだ。こうすれば部屋の数＝受光器の数が幾つあっても、費やすエネルギーは一定値で済む。一回の測定で分子が見つかってしまえばもうしめたもので、あとは気体の膨張と同じ要領で仕事を得られるだろう。この「透明な部屋」の方法だと、部屋の数が増えようとも測定回数はいつも1回だけである。だから多少のロスがあったとしても、部屋の数を増やせば必ずもとがとれるはずだ。

以上で私があみだしたのは、言うなれば「悪魔を複数用いる」方法である。たくさんの悪魔がいても、活動するのは常に1匹だけで、残りの悪魔は「寝ている」。消費するエネルギーは1匹分、取り出すエネルギーは部屋複数個分だから、これはうまい話であろう。悪魔はお互いに、別の仲間がいることを知らない。なぜなら共同で活動することがないからである。例えば3番目の悪魔が活動しているとき、悪魔自身は自分が「3」であることを知らない。悪魔に与えられる情報は単に「今活動しろ」という一事だけで、「3番目が活動しろ」ということではない。ここに測定が1回で済む秘密がある。もし悪魔に「3番目、5番目」という数字を伝達しようとすれば、一個の光量子では足りない。しかし「何番目」といった情報は、エネルギーを取り出すという最終目的には不要だ。この装置が稼働している際中、果たしてどの悪魔が働いたのか知る方法は無い。知る必要も無いのである。

2分探索法では、一回の測定で得られる結果は「ある」か「ない」かの2通りだという暗黙の了解があった。ところが光の状態には「ある」「なし」だけではなく「どの向きからやってきたか」ということもあるだろう。物理的な1個の光量子に対して1ビットの情報ではなく、光の向きを利用して1ビットより大きな情報を託せるはずだ。「1ビットの情報＝1個の光量子とするのはおかしい。情報と物理的な実在との間には特別な規則など存在しないのではないか」、これが「複数の悪魔」が投げ掛ける論点だ。いまここにA、B、C、Dの4個のスイッチがあったとしよう。条件aが起こった場合、光量子が飛んでいってAのスイッチを押す。条件bの場合にはBを、cの時にはCを、dならDを押すとしよう。このような機構の実現に、特に物理的な問題はない。ここでスイッチを押す光量子にはA、B、C、Dの4状態が託されているのだから、たった1個の光量子に4状態＝2ビットの情報が乗っていることになる。スイッチの数を増やせばもっと多くの情報が盛り込めるであろう。伝達媒体は光量子でなくとも、電気信号でも、歯車と棒のような力学的な機構でも何でも構わない。要点は、「1ビットの情報＝1個の粒子」という図式はただのつじつま合わせに過ぎず、現実には情報と物理的な実在の間には何の関係もないという所にある。

さて、以上で本当にMaxwellの悪魔が実現できたのだろうか。「複数の悪魔」こそ、実現可能な第二種永久機関なのだろうか。実は、せっかく一生懸命考えた理屈ではあるが、この「複数の悪魔」は期待通りには働かない。では上記の説明に何が足りないのだろうか。

・・・以下の答を見る前に、ちょっと考えてみて欲しい・・・

「複数の悪魔」の説明は間違っているわけではない。ガチガチの古典的解釈をすれば、あるいは絶対0度の下でなら「情報と物理的な実在の間には何の関係もない」と言えるかもしれない。しかし、ここで考えている装置は常に熱ゆらぎにさらされている。この点が「複数の悪魔」の見落としているポイントである。熱ゆらぎにさらされている装置は、いかなる場合でも100%確実に動作するという保証が無い。熱ゆらぎに比して装置を動かしているエネルギーが大きくなれば、誤動作する確率が下がるというだけのことには過ぎない。「悪魔の数」すなわち装置の数を増やすということは、それだけ熱ゆらぎに付け入るスキを与えるわけだから、誤動作する確率を上げる結果となる。

予期せぬ熱ゆらぎを受けた場合、装置はどうなるであろうか。最悪の場合、装置が破壊されることもあるだろうが、ここでは可能性を探るため最良の場合を考えよう。仮にあらゆる熱ゆらぎをシャットアウトするような断熱壁があったとして、これで装置をできる限り保護する。(完全な断熱壁とは、力学的な分子運動だけでなく電磁波をも通してはならない。現実にはこんな壁があるとは考えにくい、「摩擦のない運

動」などと同様の理想化である。) 装置の至る所に断熱壁を張り巡らしたとしても、構造上どうしても熱にさらさなければならぬポイントが存在する。それは「入口」と「出口」だ。「入口」とは分子が外部の熱エネルギーを吸収する箇所、「出口」とは測定に用いた信号(光量子など)を捨て去る箇所である。この2箇所のうち、入口については対処法がある。一つのやり方は、エネルギーを取り入れている最中は観測装置にフタをして、装置を熱ゆらぎから守る方法である。観測するときには、観測装置のフタを外すと同時に外部からの熱エネルギー取り入れを一時中断する。反対に、熱エネルギー取り入れを行なうときには観測装置のフタを閉じるのである。また、分子をそろばん玉のように固定して、X方向に熱振動するがY方向には固定するなどの方法もある。このとき、測定はY方向から行ない、仕事はX方向から取り出せばよい。いずれにせよ、装置の中の観測する系と仕事を取り出す系を分離すれば、「入口」から観測装置に熱ゆらぎを持ち込む心配はない。

残る問題は「出口」である。役目を終えた信号のエネルギーはどこに消えるのだろうか。エネルギーの捨て場所は、装置の周囲をとりまく熱源以外にない。信号エネルギーが周囲の熱ゆらぎに比べて充分大きければ(つまり外気温に比べて捨て去るエネルギーの方が高温なら)排出はスムーズに行なわれることだろう。しかし、信号エネルギーが熱ゆらぎに比べてほんのわずかだけ大きいぎりぎりの線では、排出は簡単ではない。ちょうど信号エネルギーを捨てようとした瞬間に、ゆらぎによって周囲の温度の方が高かったという事態があり得る。周囲の温度の方が排出しようとするエネルギーの温度より高いと、エネルギーを捨てることのできないばかりか、逆に周囲から装置内にエネルギーが入ってくる。この「熱ゆらぎによるエネルギーの逆流」を防ぐにはどうしたらよいかというと、逆流に負けないぐらい信号エネルギーを大きくするしかない。実は、この逆流に負けないぐらいの大きさというのが「信号エネルギーの下限 e 」なのである。

ところで、「熱雑音に打ち勝つ」とか「逆流に負けない」とは、一体どういうことなのだろうか。熱雑音というのは全くランダムなゆらぎだから、どれほど大きな信号エネルギーを持ってきたとしても、理屈の上では100%絶対に熱雑音を上回るという保証は得られない。つまり、熱雑音にさらされている装置は、どれほど大きなエネルギーを投入しても100%確実に動作するわけではなく、0.000...01%ぐらいは誤動作する可能性が残されていることになる。次に、機械をできるだけわずかのエネルギーで動かすことを考えて、信号エネルギーを小さくしていったらどうなるだろうか。信号エネルギーが小さくなるにつれて、装置の誤動作率は徐々に上がってゆく。0.000...01%が0.01%ぐらいになり、30%になり、ついには50%を越えることだろう。誤動作率が50%を越えると装置は全く用を為さない。信号エネルギーが熱雑音に打ち勝つぎりぎりの大きさ e とは、この誤動作率50%をぎりぎりクリアする大きさのことだったのである。(現実問題として考えると誤動作率が50%をぎりぎり下回った程度では、やはり使い物にならない気がする。しかし理屈の上では、たとえ誤動作率49%の装置であっても何度も何度も根気よく動かせば1%ずつ事態が好転してゆく、ととらえるのである。)

ある装置にエネルギーの出入口が1つだけあったとして、この装置が誤動作率50%未満で動作するためには、排出するエネルギーの大きさが e より大きくなければならぬとしよう。それでは、エネルギーの出口が2個ある装置が誤動作率50%未満で動作するには、排出するエネルギーの大きさは e のままで良いのだろうか。残念ながら、1個1個の出口で誤動作率50%だと、両方合わせて正しく動作するのは $50\% \times 50\% = 25\%$ となってしまう。1個が正しく動いても、もう1個が間違っていたら全体としては間違ってしまうのだから。両方合わせて誤動作率50%未満とするには、1個の出口につき $1/\sqrt{2} = \text{約}70\%$ より大きな確率で正常な動作が保証されなければならない。そうすると、エネルギーの大きさは e よりもっと大きな値でなければならない。出口の数が増えれば増えるほど、全ての出口を同時に正しく動作させるのは困難となるので、それだけ大きなエネルギーを要することになる。以上が「複数の悪魔」、シラードの悪魔の部屋の数を増やしたものが永久機関として成り立たない理由である。(複数の熱の出入口を持つ装置の中には、どれか1個が誤動作しても別の1個が正常動作すれば、装置全体としてはそこそこ正しく働くものもあるかもしれない。しかし、ここで考えた「複数の悪魔」は、全ての出口について正常動作しなければ装置全体が正しく働かないのである。)

「信号エネルギーの下限 e 」とか「装置の誤動作率」といった概念は、熱ゆらぎにさらされている世界の下で初めて生じる。熱ゆらぎの全くない、絶対0度の中や、熱的に全く孤立した魔法瓶の中のような世界なら、信号エネルギーはいくらでも小さくとることが可能だろう。「熱ゆらぎにさらされた世界」より「ゆらぎのない世界」の方が単純に考え易いので、落とし穴に陥ってしまうのである。Maxwellの悪魔は、熱ゆらぎにさらされている世界で働かなければ意味がないのだから。

前節で紹介した”複数の悪魔”にはもう一つのレパートリーがある。「信号を空間的にではなく時間的に識別する」というものだ。

前節の”複数の悪魔”では、部屋の中の分子の状態に応じて測定信号が「空間的に」異なる場所に飛んで行くことを考えた。分子が1番目の部屋にあれば測定信号はスイッチAを押す、2番目の部屋ならスイッチBを、3番目ならCを、といった具合に。それゆえ使い終えた信号の出口もA、B、C、と複数できるので、永久機関としては成立しないということであった。何とかして出口を1つにすることはできのだろうか。そこで思い付いたのが、空間的な位置の違いではなく時間的なタイミングの違いを利用するというアイデアだ。まず、出口を1つにするために信号の通る道筋はあくまでも1つにする。たった1つの道筋でどのように分子の状態を伝達するかというと、信号の通過する時間を変えるのである。例えば、分子が1番目の部屋にあれば信号は1秒後に到達、2番目の部屋なら2秒後、3番目なら3秒後、といった具合に。

ただ1本の電線を用いて情報を伝達する様子を思い浮かべてみよう。一昔前には単線式モールス信号という通信方法があった。(単線式というのは、2本のケーブルを敷くのが大変なのでケーブルは+側1本だけにして-側はアースにつないだものである。光ファイバーに何十もの回線を通せる現代の通信事情から見ると何ともちゃちな方法ではあるが、とにかく通信はできる。) 単線モールス信号の装置を用いて、できるだけ少ないエネルギーで情報を伝達するにはどのような方法で通信したらよいだろうか。仮に、電鍵を押した時だけ電流が流れるのだとすれば、できるだけ電鍵を押さずに通信する方法を考えてみて欲しい。

私が考えた最も省エネの通信方法は”トン”2つだけであらゆる情報を送るというものだ。1回目のトンが開始、2回目のトンが終了、受信者は2つのトンの間に何秒かかったかを数える。例えば、1秒ならA、2秒ならB、という風に決めておけば1〜26秒でアルファベット1文字を送ることができる。ではアルファベット2文字を送るにはどうするかというと、2文字のアルファベットを27進数に見立てて、10の位(27の位?)を1文字目、1の位を2文字目とするのである。例えば”AA”は $27+1=28$ 秒、”CB”は $27*3+2=83$ 秒といった具合である。この方法なら、アルファベットで書かれたものなら手紙だろうと百科辞典だろうと何だって送れる。(空白文字は28秒としよう。) ただし、百科辞典を送ろうと思ったら何百万年も(あるいはそれ以上)かかってしまうのだが。とにかく理屈の上では”トン”2つだけでいかなる情報も伝達できる。

この「省エネ通信法」を Maxwellの悪魔に応用したのが、先に述べた「信号を時間的に識別する」ということなのである。ケーブル即ち信号の通る道筋は1本、信号自身はどれほど情報量が増えてもトンが1個で済む。(上で初めと終わりの2個と言ったが、連続して前回の通信が終わったらすぐ次を始めることにすれば1回の通信に1個のトンで充分であろう。) 信号が伝達する情報は熱運動する分子の位置、信号を受けた装置は受け取った情報をもとに分子からエネルギーを取り出すという算段を立てる。分子の位置に関する情報が多ければ多いほど得られるエネルギーは大きくなる。一方どれほど情報が増えても信号に費やすエネルギーは「トン1個分」の一定値なのだから、情報を増やしてゆけば(時間はかかるけれど)得られるエネルギーの方が費やすエネルギーをいつかは上回るはずだ。

熱雑音のある中で、大量の情報をごくわずかのエネルギーで伝達することは、第二種永久機関を作ることと同じ意味を持つ。Wの情報量をkTWより少ないエネルギーで伝達することができれば、永久機関を作ったといってもかまわない。2つの”トン”の間にかかった時間を用いて通信を行えば、消費するエネルギーは”トン”という信号1個分だけだ。ならば、この「省エネ通信法」こそが本当に悪魔の秘密なのだろうか。

残念ながら今度の場合もやはり見落としがある。2つの”トン”の間にいくらでも多くの情報を盛り込める・・・これは嘘ではない。問題は、1個の”トン”という信号の大きさである。例えばこの方法で大量の情

報を送るため、2つの信号の間隔が100年も開いたとしよう。その100年間、通信ケーブルは熱雑音にさらされるので、相当大きなノイズを拾う可能性がある。通信にかかる時間が長くなればなるほど、より大きなノイズを拾う危険性が高まる。100年もの間、音沙汰無しに放っておいたのだから、100年たったそのときは相手にはっきり目立つようにうんと大きな信号を送らねばならない。送ろうとする情報量が多ければ多いほど時間がかかり、時間がかかるほど信号を大きくしなければならぬ・・・ということで、結局この通信方法を用いてもエネルギーあたり無尽蔵に情報を送ることはできないのである。

このことを悪魔の装置にあてはめて考えてみよう。信号の通る道筋は一つだけなのだから、外界の熱ゆらぎとの接点ー出口は確かに1箇所だけだ。しかし、信号の通過時間を用いて情報を伝達しようとするれば、信号がやってこない空白の時間が開くはずだ。その間、出口は開けっ放しで熱ゆらぎと接触し続ける。開けっ放しの時間が長ければ長い程、出口から熱ゆらぎが装置内に逆流してくる機会が増すことになる。開けっ放しが困るのなら出口に扉を付けておいて、信号が出るときだけ開けばよいと思うかもしれない。しかし、一体誰が扉の開閉を行なうのだろうか。扉をいつ開けるのかを知るには情報が必要なので、これはいたちごっことなる。

全章の”複数の悪魔”が空間的に出口を増やしたのに対し、今回は時間的に出口のチャンスを増やしたのだと言えよう。「空間がだめなら時間でやってみよう」という発想は大事だが、悪魔の装置の場合どちらも不可能なようだ。

本節のテーマは次の疑問に答えることである。

「本来、場合の数とエネルギーの間には何の関係もないはずではないか？」

これまで幾つかの例によって「因果律があるから第二種永久機関は不可能」と述べてはきたが、この主張は「場合の数とエネルギーが直結している」という前提の上に成り立っている。よく考えてみると、1通り、2通りと数えることのできる状態数と、物と動かす力は「本来全く別のもの」ではないだろうか。たとえ古典力学の法則、因果律が絶対だったとしても、「場合の数」とエネルギーを切り離すことができれば、因果律に否定されることなしに第二種永久機関が実現できるのではないだろうか。

ここでは「エネルギー交換」による悪魔の装置を考案しよう。基本的な設計方針は「大きなエネルギーを得るために、小さなエネルギーを犠牲にする」というもの。「飛んでくる方向のわからない大きな運動エネルギーを持った分子」の向きを特定する代わりに、「小さな運動エネルギーを持つ分子」の向きを不定にするのである。この装置は2つの物を取り入れる。1つは熱運動する分子A、もう一つは既知の運動をする分子B—これまで信号と呼んできたもの—である。そして、装置から取り出されるのは以下の2つ、運動量がはっきりとわかっている分子A、でたらめな運動を行う分子B。ここで、もし(分子Aの運動エネルギー) > (分子Bの運動エネルギー) だったなら、我々は大小の運動エネルギーの差分だけのエネルギーを手に入れたことになるだろう。また、「場合の数」について言えば、最初に分子Aが背負っていた「わからなさ」は分子Bが背負うことになるのだから、因果律には違反していない。

このような交換自体が物理的に不可能でないことは、直感的にもわかることと思う。私たちが走行している自動車を見た場合、目に入ってくる光のエネルギーより自動車の持つ運動エネルギーが大きいことは明白であろう。ここで自動車の来た向きに合わせて適宜交通信号を変えてやれば、同じ方向に向かわせることも不可能ではない。同様の操作は相手が分子だって可能なことだ。

分子Aは外部から熱運動で飛んでくる気体分子—簡単のため、例によって右か左かのどちらかから飛んでくるもの—としよう。分子Bは、分子Aより小さな運動エネルギーを持っているという前提だから、できるだけ遅く、いっそのこと静止した分子を置くということにすればよいのではないか。分子Bは、分子Aに比べてずっと質量が小さいものとする。こうしておけば分子同士が衝突しても、分子Aにはあまり影響がない—分子Aの持つ運動エネルギーを損なわない。まず、装置内には「測定用の」分子Bを置いておく。ここに外から分子Aが飛んできて、分子Bに衝突、分子Bを弾き飛ばす。飛ばされた分子Bは装置内部の測定装置に引っかかって、次いでやってくる分子Aからエネルギーを取り出すように誘導する。測定を終えた後の分子Bは使い捨てで構わない。すでにその分のエネルギーを分子Aから受け取っているのだから、十分に元はとっている。

以上のように衝突のプロセスだけを考えて場合、「エネルギーと場合の数」のやりとりには何の不都合も生じない。上記のような衝突によって、確かに分子Bの持つ場合の数は増えることになる。しかし、より大きなエネルギーを有する分子Aの運動が特定できれば、小さな犠牲は払ってもよいであろう。このような方法で悪魔の装置を実現できるのであろうか。

今回の装置には、2つの点に見落としがある。1つ目は「静止した分子B」を用意するのが大変(エネルギーを食う)ということ。2つ目は使い捨てにしたはずの分子Bが、熱運動に煽られて戻ってくることである。「静止した分子」というのは、温度が低い分子に他ならない。つまり、あらかじめ分子Bを冷やしておかなければならないわけで、これなら温度差によって動く熱機関と何ら変わらない。(質量の大きな分子なら動かないかもしれないが、分子Aより小さな質量でないと用を為さない。) また、分子Bが熱運動で逆流しないためにも、廃棄処分にそれ相応のエネルギーがかかる。根本的な問題は、分子A、分子Bを「同じ温度」の場所から取ってきて「同じ温度」の場所に廃棄しなければならない、という点にある。「静止した分子Bさえ用意することができればエネルギーを取り出すことができる」という考察は、「エネルギーを得る為には温度差が必要」という論理を裏付けているのである。

以上の「分子衝突の悪魔」は、単純ですぐに嘘が見破れたかもしれない。このシンプルな例を持ち出したのは、次のことが言いたかったからである。

「どんなに目を皿のようにしても衝突のプロセス自体に間違いを発見することはできない。不合理は同じ温度の下にさらされている、という辺りから見つかる」

ということ。

「場合の数とエネルギーの間には何の関係もないはずだ」というのは”衝突のプロセス”だけに着目する限りは正しい主張なのである。”周囲の温度”がなければ、場合の数とエネルギーの間には何の関係もない。ところが、これが”ある一定の温度の下に”どっぴりつかたとたん、深い意味を持ち始める。”温度”とは、”情報”というものを買う(運ぶ)ために必要な”エネルギーの相場”のようなものである。”温度が高い”ということは、”情報の相場が高い”ということに相当する。絶対零度なら(熱雑音が全くないのだから)ほんのわずかのエネルギーで大量の情報を運ぶ(買う)ことができる。温度が高ければ、同じ情報量を運ぶにも大きなエネルギーを”支払”わなければならない。”相場”なのだから、店によっては少々高い所もあるかもしれないし、たまたま安売りしている所があるかもしれない。これが”ゆらぎ”に相当する。しかし、おしなべて全体を見渡すと「情報1bitあたりいくら」といった適正価格が存在する。この適正価格こそがすなわち”温度”なのである。よく考えると、物の値段だって人間が勝手に取り決めたもので「本来幾らでなければならない」という掟が存在するわけではない。にも関わらず適正価格が決まるのは、数多くの取り引きの平均をとるからであろう。

通信機を使ってどこかに情報を伝達するには、伝達信号に雑音に負けないだけのエネルギーが必要となる。この事情は信号が、電波、光、音声、その他何であっても変わらない。在来の熱機関の効率をはるかに上回るエンジンを作ろうとする試みと、極限までに少ないエネルギーで大量の情報を伝達しようとする試みとは、同じ壁に行く手を阻まれているのである。熱雑音さえなければ、ごく微弱な信号に大量の情報を乗せることは決して”物理的に不可能”なわけではない。通信ケーブルが外部ノイズから完全にシールドされていれば信号エネルギーの下限、などという概念は存在しなかったのである。

「場合の数とエネルギーの間には何の関係もないはずではないか？」これはもっともな疑問であろう。経済社会のないところで”物”に”値段”などという属性が付いていなかったように、温度のないところで「場合の数3通りにつきエネルギー幾ら」などというルールは存在しなかったのだ。”適正価格”は”周囲とのバランス”によって決定される。悪魔の装置で”外部の熱雑音に接する”ということは、ちょうど自由市場に接するのと同様である。装置全体を断熱壁で保護し、内部だけで価格を釣り上げようとしても、外部の自由市場と接する所でボロが出てしまうのである。本節で考えた悪魔の装置は「情報量とエネルギーを上手に取り引きして儲けることはできないか」というアイデアだったのだが、人間の世界ならいざ知らず、どうやら物理の世界にうまい裏取り引きはなかったようだ。

いったい過去にどれほどの人が永久機関にチャレンジしてきたのか、私にはわからない。ただ、そこに費やされた大半の努力は、幾許かの正しい知識があれば無駄にせず済んだはずだ。前の章に、第一種永久機関の間違いを探す方法を述べた。それは「永久機関が1周してもとの状態に戻るまでのポテンシャルエネルギーダイアグラムを書く」というものだった。「1周してもとに戻ってくるまでの、上り坂と下り坂の合計は等しいはず」だ。しかしこのチェック法は第一種の永久機関にしか有効ではない。第二種永久機関はエネルギー保存則については満たしているのだから、「上り坂と下り坂」についてのつじつまは一応合っている。

それでは、第二種永久機関の間違い見破る定番の方法はないのだろうか。ある。その方法とは

「逆転の発想～装置を逆向きに動かしてみる」

ことである。

第二種永久機関とは、熱エネルギーを他の有用な形態に変換する装置である。この装置を逆回しに運転すれば、有用な形態のエネルギーが熱エネルギーに変換（変換というより消費）されるはずだ。ここで、果たしてこの装置を順方向に動かすのと、逆方向に動かすのとどちらが自然な動きだろうかと考えてみるのである。大抵の場合、逆方向運転の方が順方向運転よりもよほど自然なはずだ。ここでいう「より自然な」とは、正しくは「より高い確率で実現する」という意味である。この世にあるどんな装置も（あるいはどんな現象も）順方向に動けば必ずその逆方向にも動かすことができる。逆方向に運転するとは、時間を逆転してみるということと同じである。酸素と水素が化合して水ができるなら、この逆に水が分解して酸素と水素に戻る逆反応も存在する。ただ順反応と逆反応を比べた場合、順反応が起こる確率の方が逆反応が起こる確率よりも圧倒的に高い。だから大量の酸素分子と水素分子があったなら、ほとんどが水の状態となっている。理論に忠実に考えるなら、水のなかにはごくわずかの確率で酸素分子と水素分子が混じっていることになる。例えばここに、ガソリンを燃焼して前進する自動車があったとしよう。この過程を正確に逆回しにすれば、空気中から廃棄ガスと熱を取り入れながら後退する自動車ということになるだろう。こんな逆転自動車など絶対ありえないように思えるが、ひとつひとつの過程を調べてゆくと100%不可能ともいえなくなる。ガソリンの燃焼という化学反応にも、わずかながら逆反応が存在する。爆発してピストンを押す気体も、逆に圧縮すればガソリンを生成する逆反応のためのエネルギーを作り出すことになる。理屈の上では逆転自動車があってもおかしくはない、ただそれが実際起こる確率が極端に低いのである。

そもそも第二種永久機関とは、自然に起こる変化の向きを何とか逆転しようとする試みであった。だから第二種永久機関で最も注意を払うべき点は「どちらの向きに動くか」である。しかしながら第二種永久機関を考案しようとする人達は、大抵の場合、順方向に間違いなく動くということのチェックに終始して、装置が逆方向にも動くということを念頭に置かない。そして順方向の動きに一通り間違いがないとわかると「ついに永久機関を考案した」と早合点してしまうことになる。確かに、一連の挙動を分解して、各々の動作を検証しても間違いは見つからないであろう。理屈でいえば熱を吸って後退する逆転自動車だって間違いではないのだから。本当の問題は「間違いなく動く」かどうかではなく「間違いなく意図した向きに動く」かどうかなのだ。

悪魔の装置を考える上で、しっかりおさえなければならないのが「入口と出口」である。たとえ装置の身にどんな複雑な仕掛けが凝らしてあろうとも、何が入って何が出てくるのかをしっかりと見張っていれば、装置全体を一つのブラックボックスとして扱うことができる。装置が意図した向きに動くかどうか見極めるのに、着目すべきは「本当に入口からエネルギーが入るのか」「本当に出口からエネルギーが出て

いくのか」の2点に尽きる。入口と出口では向きは逆だが基本的な考え方は一緒なので、特に見落としやすい出口について考えよう。

出口からエネルギーが出ていくための条件とは「出口から出そうとするエネルギーの温度の方が、排出先である周囲の温度より高いこと」である。これは経験上は当然のことで、気温20度の部屋で100度の湯をさますことはできるが、10度の水をさますことはできない。ならば、20.00000000000001度の湯を気温20度の部屋に置いたら確実に20度まで下がるだろうか。これほどわずかの温度差だと、確実かどうかは疑わしくなってくる。熱とはランダムな分子運動の集まりだから、局所的な値は常に変動している。非常に敏感な温度計で気温を計れば、ある瞬間には20.00...01度、次の瞬間には19.99...99度といった具合に変動している値が得られることだろう。気温20度という意味は、この変動の長時間に渡る平均値が20だということなのである。だから、20.00000000000001度の湯を外気にさらしたところ、たまたま気温の方が20.00000000000002度だったということも充分ありえる。こういうときは瞬間的にはあるが、気温から湯の方に熱が逆流する。ただ、平均値で比べれば湯の方が気温よりもほんの少し高いのだから、湯から外気に熱が移る確率の方が、気温から湯に逆流する確率よりもほんの少しだけ高い。熱は、ある瞬間には湯から外気に移り、次の瞬間には逆流したりを繰り返すのだが、長い目で見れば高温の湯から低温の外気への回数の方が、逆流する回数よりも多くなる。個々の分子の振る舞いにはランダムな要素が含まれるので「この分子は確実にこの方向に動く」と言いきることはできない。言えるのは「往きの方が帰りよりも起こりやすい」といった確率だけなのである。

いま考えている悪魔の装置が意図した向きに動くかどうか、結局は確率的にしか言えない。「順方向に動く確率90%、逆方向は10%、だからこの装置はトータルで(長時間平均して)順方向に動く」といった具合に。悪魔の装置だけでなく、実際この世にある全ての装置、いや、全ての変化は厳密には確率的にしか表現できない。自動車だって99.999...99%の確率でまっとうに走り、0.000...01%の確率で逆走(?)するのだと言える。

悪魔の装置で、出口からエネルギーが出ていく様子を詳しく見てみよう。出口から出てゆこうとするエネルギーが外気の熱ゆらぎに比べてさほど大きくなければ(あるいは出口の温度が外気温よりも微かに高い程度だったなら)エネルギーが絶対確実に放出されるとは断言できなくなってくる。出てゆこうとするエネルギーが小さくなればなるほど、逆流する確率は上がってゆく。それでは、このエネルギーの大きさと逆流確率の関係はどのようになっているのだろうか。予想できるのは、エネルギーを小さくしてゆくと逆流確率は急速に上がるだろうということ。反対に、エネルギーを大きくすれば逆流確率は0%に限りなく近づいてはゆくけれど完全に0%にはならないということである。グラフに書けば、エネルギーの大きさに対して徐々に0%に近づくようなカーブが描ける。この関係は「多数の分子にエネルギーを分配するとどのようにゆきわたるか」という問題に帰着できるので、その答は1章で述べたボルツマン分布となる。つまり、グラフの曲線は指数関数となる。この指数曲線上で確率50%の点、即ち(エネルギー=熱ゆらぎの平均値)となる点に注目しよう。これ以下の大きさのエネルギーは出口から外に出て行けない、あるいは外の熱ゆらぎにさらすことができないことを意味する。つまり、この50%の点におけるエネルギーの大きさが有効な意味を持つ最小値なのである。

以上を理解すれば、第二種永久機関のような装置がはたして思惑通り順方向に動作するのか、逆向きに動くのか、はっきりと見分けがつけられる。“シラードの悪魔”の様な装置では、出口から排出する(信号)エネルギーが「確率50%を越す大きさ」でなければならぬので、結局得られる仕事との採算がとれない。前節で紹介した“複数の悪魔”は、複数の出口について全て50%以上の確率で動作しなければならないので、これも思惑通りには働かない。その他、どれほど複雑な装置であっても直接熱にさらされている入口、出口をしっかりと見張っていれば、大抵の誤りは看破できるはずだ。

私が考えた次なるアイデアは「一度使用した信号エネルギーをひとまとめに合流する」というものだ。これについては以下の2Typeを考案した。

■ Type 1 : 出口合流 Type

分子の熱運動を利用する悪魔の装置で一番の問題となるのは、装置が外界の熱源と接する部分—入口と出口である。そこで、入口と出口を極力少なくまとめることを考える。最低限必要なのは、外界の熱源から熱エネルギーを取り入れる入口と、仕事を取り出す為の出口、この2つは外せない。前の節で考えた”複数の悪魔”のような装置には、複数の”信号エネルギーの出口”があった。これらの出口を何とか1つにまとめることができれば、悪魔の装置が実現味を帯びてくる。熱ゆらぎと接する出口が1つだけならば、装置内部で信号がどれほど多くの状態を持つとも、信号強度は一定のまま済む。従って(情報量/信号エネルギー)はいくらでも増やせることになるだろう。

具体的にどうやって信号を1つにまとめるのかというと、単に「合流」させるだけでよい。例えば、信号の粒子が力学的な質点—ビリヤードの玉のようなものだったとしよう。2つの別々の方向から転がってきた玉の軌跡を1つに揃えるには、Y字型の管を通せばよいだろう。玉が右の入口から入っても左から入っても、1つの出口から出てゆくようにY字管を滑らかなカーブで構成する。信号が電気だった場合はもっと簡単で、単に2本の線を1箇所に結び合わせるだけでよい。あまりにも単純な話ではあるが、

- 1: Y字型の管や結線によって信号を1つにまとめられるのはれっきとした事実。
2: 理論上、複数の信号を1つにまとめることができれば第二種永久機関が実現できる。

ということで、悪魔の装置が実現できることになる。

■ Type 2 : 複数回収 Type

上記Type1をもう少し発展させて、いっそのこと信号の出口をなくしてしまおうという試みが、次に述べるType2である。もし一度測定を終えた信号を一つにまとめることができたなら、その信号エネルギーを使い捨てにするのはあまりにももったいない話だ。信号エネルギーを再利用できれば、エネルギーの面でこれ以上有利なことはない。信号エネルギーの再利用にはもう1つ大きな利点がある。測定から再利用まで一巡する間、信号は外界の熱ゆらぎに一度もさらされない。信号だけで完全に閉じた回路を形作れるので、熱雑音や信号強度について難しいことを一切考慮する必要がなくなる。

再利用するということは、使用前の状態に戻すということである。測定する前と後とで、いったい信号の何が変わるのだろうか。測定の対象となる分子がN通りの状態をとるものであれば(例えば2つの部屋のどちらかに入っている場合は2通り)、信号はこのN通りの状態を伝達できなければならない。測定以前の信号の状態が1通りだったのに対して、測定以後の信号はN通りの状態のうちいずれかをとっているわけだ。この「1通り」対「N通り」の違いが信号の使用前と使用後の本質的な違いである。だから、N通りの信号を「合流」させてもとの1通りに戻してやれば、信号エネルギーを何度でもリサイクルすることが可能となる

以上、2typeの悪魔の装置が実現できるか否かは、結局「複数の状態の信号を1つにまとめることができるかどうか」にかかっている。ここで、「信号をまとめる法」についていま一度じっくり考え直してみよう。上に、2つの信号を1つにする最も単純な方法は「Y字型の管」を通して合流させることだと書いた。直感的に考えて、これより単純な方法はないだろう。あまりに単純なので、この”Y字管”のどこかに見落としがあるとも思えないのだが、今回の永久機関にはここしか疑わしい箇所は見当たらない。そこで、第二種永久機関の嘘を見破る公式的おまじない「逆転の発想—装置を逆向きに動かしてみる」を適応してみよう。Y字管の出口から逆に玉を入れてみる。すると玉は右から出るだろうか、それとも左からか。

常識的な答は”ほんのわずかの偶然で”右か左か決まるというものだろう。この”わずかの偶然”の正体は何だろうか。Y字管と玉が正確にできていたとすれば、残るは

1:玉を入れるときに正確に真中に入れなかったか、

2:玉がちょうど分岐点にさしかかったとき、外からちょっとした”ゆらぎ”を受けたか、
のいずれかであろう。

1:の場合は「玉は一見出口で1つに合流したかのように見えるが、よく見ると玉には2状態あって同一ではない」ことを意味する。例えば、右の入口から入った玉は出口では右回転しており、左から入ってきたものは左回転しているといった具合に。だから逆に出口の方から玉を入れれば、ほんの少しでも右回転しているものは右に、左回転しているものは左に行くことになる。もし正確に回転0で玉を入れれば・・・玉は分岐点に引っ掛かって止まるはずだ。結局これは左右2つの入口から入った玉の状態を、左右の回転の違いに置き換えただけに過ぎず、本当の意味で「2状態を1状態に合流した」とはいえない。たとえ玉を回転0で正確に真中に入れたとしても、実際のY字管では中央に引っ掛かるなどということはずあり得ない。

2:外からのちょっとした”ゆらぎ”を受けて左右どちらかに行くことだろう。この外からのちょっとした”ゆらぎ”とは、我々がこれまで「熱ゆらぎ」と呼んできたものに他ならない。外から熱ゆらぎを受けなければ、1状態だった玉が右か左かの2状態に分かれることはない。逆に、左右の入口から入った玉が合流点で一つになるためには、ほんのわずかばかりのエネルギーを熱の形で外に捨てなければならないのである。Y字管をどれほど上手に、滑らかに作っても玉は合流点で必ず少しだけ勢いをそがれる。エネルギーを失わずに合流することは不可能なのだ。(2本の川が1つに合流する所をよく観察するとよい。2つの水がスムーズに合流する所など実際にはほとんど無い。出会い頭にぶつかり合い、うず潮のような複雑な流れが生じていることであろう。)

結局、一見あたりまえに思える「合流」ということも、つぶさに考察すれば永久機関としては利用できないということだ。そもそも熱運動から利用可能な仕事を取り出すという作業は、「ランダムな運動を1つの向きに揃える」ということであった。これが不可能なことは、前章ですで見えてきた通りである。熱運動する分子を箱に閉じ込め、話を測定信号に置き換えたとしても本質的な結論は変わらない。これまでしてきたことは、実はただの置き換えに過ぎなかったのである。

「ランダムな熱運動」->「どの部屋に入っているか分からない分子」->「N通りの信号」

ただ、熱運動を信号に置き換えることによって、当初漠然と「1つの向きに揃える」といっていた内容の本質が浮き彫りにされてきた。

もし「N通りの信号を1通りにまとめることができれば」第二種永久機関は実現できる。物理的に実在するものであれば、「信号」は具体的に何であっても構わない。力学的な玉でも、電気パルスでも、特殊な粒子や分子でも何でもよい。どんなものでもよいから、要は「N通り(複数)の状態から1通りの状態を作れないだろうか」という問題なのである。

もし、N通りの状態から1通りの状態ができたとすれば、これを「逆転の発想ー逆に動かしてみたら」どうなるか。それは1通りの、同一の原因から異なるN通りの結果が生じることを意味する。今日まで、我々はこのような現象を(日常レベルでは)目にしたことはないし、今後もないだろうと信じている。1通りの原因からはただ1通りの結果が、N通りの状態の原因からはN通りの状態の結果が生じる、これが我々の信じる物理法則なのである。

試行錯誤その3 ～ 奇跡を捕まえる装置

2006/08/22

これまで悪魔の装置への挑戦を”シラードの悪魔”のようなからくりから始めて幾つか試みてきた。が、第二種永久機関という大テーマは小手先の技工やテクニクでどうにかなるものではないようだ。ここで、いま一度基本に戻って、0から悪魔の装置の設計図を練り直してみよう。

「ものが勝手に増えたり減ったりしない」「無から有は生じない」この事実は日常の経験に照らし合わせても素直に納得がゆく。空の帽子の中から鳩が出てくるのはむしろ不思議なことで、空はいつまでたっても空なのが本来である。この当然の事実に”質量保存則”とか”エネルギー保存則”とか仰々しい名前で呼んだところで、「何をいまさら」と思うのがむしろ自然な感覚であろう。

「エネルギーを無から作り出すことはできない」

第一種永久機関が不可能だと宣言されても、大抵の人は素直に納得する。これは「エネルギーは一定」という概念が日常経験に合致するからである。

ところが、これが第二種永久機関となると「経験に照らし合わせて明らかに納得」できるだろうか。第二種永久機関というのは「無からエネルギーを作り出す」ものではなくて「一度使ったエネルギーを再利用する」ものだ。第二種永久機関が不可能な理由は「エントロピーが増加するからだ」と言われる。エントロピーとは、“乱雑さ”の度合い、例えば”部屋の散らかり具合”のようなもので、放っておけば（誰も掃除をしなれば）部屋が散らかってゆくと同じように、エネルギーも放っておけば良質なものから悪質なものに変化するのだと言われる。しかし、この説明は第一種永久機関の場合ほど自明とは思えない。部屋が散らかるのなら片付ければ良いではないか。日常経験に照らし合わせて考えると、ものを乱雑に配置するか秩序だてて置くかはむしろ管理する人の問題で、あまり自然の法則に関係するとは思えない。極限の世界では日常経験があてにならないこともある。分子や原子が活躍するミクロの世界では日常経験でものをいっても意味がないかもしれない。そこで、たとえ話などではなく、エントロピーの中身を詳しくひもといてみると「エントロピーの増大」とはどうやら確率の問題らしい。早い話、ロイヤルストレートフラッシュがなかなか出ないのと同じ理由で、エントロピーは増大するものらしい。しかし、卑しくも自然の法則を名乗ろうとするものが「確率」などといういいかげんな根拠の上に成り立っていてもよいものか。ロイヤルストレートフラッシュだってたまには出るではないか。ということはエントロピー増大則もたまには破れるということなのか。ならば、第二種永久機関だってたまにはできたっていいじゃないか。納得できるかできないかは結局のところ個人の問題だが、第一種永久機関に比べて第二種永久機関はかなり納得しづらいと感じるのは私だけであろうか。上記のような疑問は、まっとうに熱統計力学を勉強すれば、むしろ当然出てくると思うのだが・・・。

もし第二種永久機関ができる可能性が残されているとすれば、それは「ごく稀に出るロイヤルストレートフラッシュをつかまえる」以外にはないであろう。このような”奇跡”をとらえたとしても、それは「エントロピー増大則」に違反したことはない。何せエントロピー増大則は”確率”なのだから、確率の低い状態が絶対にありえないとは言っていない。赤絵の具と青絵の具を混ぜると紫になるが、紫をどれほどかき混ぜたところでもとの赤と青には戻らない。なぜか。それは赤と青が分離しているのが1通りなのに対して、2つが混ざって紫になっている状態はミクロに見れば何通りもの～10の何十乗通りといった膨大な一状態があるからだ。だから、絵の具は確率的に99.999・・・%は紫になっていることだろう。しかし、絵の具は0.000・・・01%の確率で赤と青に分離しているのだとも言える。とにかく0%ではない。辛抱強くひたすらひたすら絵の具を混ぜていけば、いつかは”奇跡の瞬間”に巡り合えるかもしれない。絵の具は手で混ぜねばならないが、熱運動する分子なら勝手に混ぜてくれる。空気中の酸素と窒素は大抵は均一に混じっているが、ひよっとするとごく小さい確率で2つに分離するかもしれない。2種の気体が分離する所を見るには、とにかくひたすら長い間待つだけでよい。どの位待てばよいのか。気体分子は標準状態で1リットルに 2.7×10^{22} 乗個程入っている。このうちの1/5の酸素分子が秒速500mで跳ね回っていたらすれば、一辺10cmの箱の中を1秒あたり5万回行ったり来たりできるわけだ。ただ1個だけの分子が箱の右1/5に収まるのを見るには1/50000秒待てばよさそうだが、(2.

7) * 10の22乗個の分子が一斉に箱の右1/5に入るには、 $(1/5)^{(2.7) * 10^{22}}$ 、つまり $(1/5) * (1/5) * (1/5) * \dots$ を $(2.7) * 10^{22}$ 乗繰り返す、という非常に小さい確率になる。これは小数点以下の0の数に10の何十乗という数、 $10^{-(0.7 * (10^{22}))}$ で、(まともに計算するのもばからしい、憶とか兆とかをはるかに越えている)いかに1/50000秒が短くともこの膨大な数にとっては焼け石に水だ。地球ができてから今までざっと50憶年と言われているが、50憶年=157788兆秒で、たかだか10の17乗程度、分子の数の10の22乗すら下回る。地球ができてから今までを何百回、何千回と繰り返さなければ”奇跡”は起こらないわけで、なるほど確かに”奇跡”と呼ぶに値する。

大抵の人は、10の何十乗といった天文学的な数値をつきつけられれば納得せざるを得ないだろう。「熱統計力学は10の何十乗といった膨大な数の分子を扱う。この位膨大な数になると”確率”は絶対的な意味を持つ。」しかし、しかしまだ疑問は残る。確かに膨大な数の分子を相手にした場合は”奇跡”を望むのは無理かもしれない。それならば、ごく少数の分子を相手にすれば”確率”はゆらぎのではないか。例えば、1リットルの空間の中にただ1個だけの酸素分子と4個の窒素分子しかなければ、 $(1/5) * 4 * (4/5) = \text{約}8\%$ 程度の確率で酸素と窒素は分離する。分子が1/50000秒程度で部屋を横切ることを考えれば、我々は1秒に数千回もの”奇跡”にお目にかかれるわけだ。数千憶年待たねばならないとか、千分の一秒で済むといった議論は「量」の問題であって「質」の問題と違うのではないだろうか。熱統計力学というのは膨大な数の集団を扱う学問である。1個2個の分子の挙動を問題にする学問ではない。しかし、いま我々が知りたいのは「第二種永久機関ができるかどうか」であって「熱統計力学という学問がどうなっているか」ではない。もし少数の分子で”奇跡”を見ることができれば、過去の人間が築いた学問がどうであれ、少数の分子によって第二種永久機関ができる可能性が残されていることになる。

実際に、ごく少数の分子による”奇跡”を見た人はいるのだろうか。答はYesである。1リットルの空間に $3 * 10^{22}$ 個の気体分子があるからといって、10の22乗分の1リットルの中に常に3個の分子があるとは限らない。3個のこともあれば、たまたま2個のことも、5個のことも、全く空だということもあるだろう。”平均すれば”3個なのだが、個々に調べた値にはばらつきがある。平均して気温20度の部屋も、ある一点の温度を精密に計れば19.9999度だったり、20.0001度だったりする。これが「ゆらぎ」という現象だ。マクロな目で平均値を見れば一定に見えるものもミクロな目で詳しく見ると常に変動している、この変動こそが”小さな奇跡”の現われなのである。

我々はいつでも、ゆらぎという現象を通じて”小さな奇跡”を見ることができる。それでは次に、この”奇跡”を捕まえることはできないものかどうか考えてみよう。例えば平均気温20度の部屋で、ある一点の温度がたまたま20.01度になったとしよう。この瞬間を逃さずに、たまたま高温となった小さな空間を囲って保持する。同様に、温度が19.99度以下になったら、これも囲んで保持する。これを繰り返せば、いつしか部屋全体は20.01度以上の囲みと、19.99度以下の囲みの集まりで埋め尽くされることだろう。

ここで、20.01度以上の高温の囲み同志を集め、19.99度以下の低温の囲み同志を集めれば、最終的に均一な温度の中から高温と低温を作り出したことになるであろう。ゆらぎが存在するのは疑いのない事実だ。しかし、ゆらぎの中から極端に大きなもの—10の何十乗もの分子が全て部屋の右半分偏るとか、部屋全体の温度が一斉に平均値から100度もずれるとか、こういった”奇跡”をただ待っていたのでは、それこそ数十憶年かけても実現できない。我々はそんなに長い時間待つわけにはいかないのだから、短い時間内に実現できる”小さい範囲の小さな奇跡”で満足する他はない。でも、それで充分だ。小さな奇跡を集めれば大きな奇跡となる。「ゆらぎを集める」この方法なら一見すると熱力学第二法則に違反していないように思える。たとえ小さな確率でしか起こらないことでも、実際に起こってしまえば100%だ。小さな奇跡は、ゆらぎはいつでも起こっている。ただ、今まで誰もそれを利用しなかつただけなのではないだろうか。

「ゆらぎを集める」ことが本当に可能なかどうか、もう少し単純化したモデルで考察しよう。最も単純なケースとして、部屋の中に気体分子が1個だけ入っていることを考える。次に、部屋の温度を考えてもよいのだが、ここではもっと直接的にこの1個の分子を直接捕まえることを考えよう。この分子を、能動的にマジックハンドか何かで捕まえようとしても無駄な(エネルギーがかかり過ぎる)ことは前節までで学ん

だ通りだ。今回は受動的に、罌を仕掛けておいて向こうから飛んでくるのをひたすら待つ。分子という名のねずみを捕まえるねずみ取りを仕掛けるのだと思えばよい。この”分子ねずみ取り”の仕掛けと”ゆらぎ”にはどのような関連があるのだろうか。”分子ねずみ取り”は分子数のゆらぎを捕まえる装置なのだ。(気体という見方をすれば圧力のゆらぎを捕まえる装置)分子は全部で1個しかないのだから、ねずみ取り近辺の空間に含まれる分子数は、平均で0. xx個となる。例えばねずみ取りの大きさ(体積)が部屋全体の1/10だとすれば、ねずみ取りには平均で0. 1個の分子が入っていることになる。しかし分子は分割できないので、実際のねずみ取りの中の分子数は0個か1個かのどちらしかない。ねずみ取りの中に分子1個が入っていたとすれば、平均値0. 1個からのずれ0. 9個が分子数のゆらぎであると言えるだろう。ねずみ取り本体は、基本的には本物のねずみ取りを分子の大きさに縮小したものである。最初入口の蓋は開いているのですが、中に分子が飛び込んできて内壁に触れると入口の蓋が閉じて、見事分子を捕獲するという仕掛けだ。蓋を閉じるという作業にはエネルギーが必要となる。本物のねずみ取りをセットすることを想像してみるとよい。最初に蓋をカシャンと持ち上げるときに、我々の手によってねずみ取り内部のバネにエネルギーを蓄えるであろう。蓋を閉ざしてねずみが逃げないようにおさえているのは、このバネに蓄えられたエネルギーなのである。ねずみ取りと言えどもエネルギー0で働くわけではない。ただ、最初に一定のエネルギーさえバネに与えておけば、あとは放っておいても構わないのがねずみ取りの良い所だ。ねずみ取りに費やすエネルギーは一定値である。一方、ねずみを一分子を捕まえた後で、そこから得られるエネルギーは(部屋全体の広さ:ねずみ取りの大きさ)の比率で決まる。より広い部屋でねずみを捕まえた方が、より大きなエネルギーが得られることになる。確かに、部屋が広ければ広いほどねずみを捕まえるまでの時間はかかるだろう。(大きな部屋の中から分子を見つけ出すのは、それだけ”大きな奇跡”だということだ。)しかし、部屋が広かろうが狭かろうがねずみ取り本体は変わらない。ねずみ取り自身のエネルギーを回収できる程度に広く、かといって天文学的な待ち時間にならないように適当な大きさに部屋を設定すれば、この「分子ねずみ取り装置」を用いてエネルギーを取り出すことができるのではないか。

今回の「分子ねずみ取り装置」はエントロピーの基本にたちかえり、じっくり考え直したものだ。従来熱統計力学が無視してきたような小さな確率で実現する状態を、取り出して、捕まえたら第二種永久機関にならないのだろうか。

これに対する第一の反論「小さな確率というのは本当に10の何十乗といった小さな確率で、現実実現するまで待つことはできない」にはすでに答えた。確率が10の何十乗にもなってしまうのは10の何十乗個もの分子を扱うからで、始めから1-2個の分子を扱えば何の問題もない。

そこで第二の反論「分子が1個だけというのは特種な状況だ。少なくとも複数個の分子を扱わないと意味を持たないのではないか。」確かにシラードの悪魔から始まって、気体と言いながら箱の中に分子1個だけという特種な状況を扱ってきた。しかし、分子1個というのは決して特殊なケースではなく、一般的な場合を内包しているのである。例えば、2個の分子が同時に部屋の右半分に入る確率は1/4だが、これを1個の分子が部屋の右側1/4に入るという状況に置き換えて考えることができる。さらに一般的に考えるなら、複数の分子を1章で紹介した状態空間上の一点としてとらえ、この点が状態空間上のある指定した領域(ねずみ取りの中)に入ったら所定の動作を行なう(蓋が閉じる)とすればよい。分子1個だけだからとか、ねずみ取りだからといって一般性を欠いているわけではない。単純化されたたとえ話であっても、そこに含まれる原理は汲み取る価値がある。

分子大のねずみ取りを作成すれば、確かに分子を捕まえることができる、ここまでは間違いない。今度こそ本当の永久機関の原理にたどり付いたのだろうか。ここで、永久機関の嘘を見破る法「逆転の発想-装置を逆向きに動かしてみる」を適応してみよう。ねずみ取りを逆向きに動かす、とはどういうことだろうか。それは「ねずみ取りの蓋が偶然開いて、ねずみ(分子)が外に逃げ出す」ということだ。分子ねずみ取りの蓋も熱ゆらぎにさらされている。蓋を閉じるのに使ったエネルギーは外界に捨て去るしかない。ここで(エネルギーを捨てる出口の部分で)、蓋は外界の熱ゆらぎに接してしまう。熱ゆらぎの影響を受けるといことは、ゆらぎの力によって閉じていた蓋が逆に開いてしまう可能性があるということだ。確かにねずみ取りは、ある一定時間以上待てばほぼ確実に(これも確率だが)分子を捕まえることがで

きる。しかし、そこから先の時間ずっと分子を捕まえ続けていられる保証がない。分子が逃げ出すことがあるとすると、ねずみ取りを回収したとき中に確実に分子が入っているかどうか分からなくなる。分子が中に入っているかいるか否かは、結局確率の問題となってしまうのである。

分子がねずみ取りから逃げ出す確率は何で決まるのだろうか。それはねずみ取りの入口を閉じるバネの強さつまりねずみ取りに費やすエネルギーによって決まる。より強いバネ、より大きなエネルギーを投げればそれだけ分子は逃げ出しにくくなるが、費やしたエネルギーを回収するのがより困難になる。より大きなエネルギーを回収するにはより大きな部屋にねずみ取りを設置するしかない。しかし分子が逃げ出すことを考慮すると、部屋が広ければ広いほど分子は捕まりにくい―ねずみ取りの中に入っている確率は下がることになる。本物のねずみ取りを想像すると「部屋が広かろうが狭かろうがねずみ取り本体は変わらないので、捕獲する能力はいっしょ」と思うかもしれないが、分子のねずみ取りは「部屋が広いほど捕まえにくい」のである。分子を捕える確率を上げようとする、より大きなエネルギーを投じるか、部屋を狭くするしかない。そのどちらを行なっても得られるエネルギーは小さくなってしまふ…。こんなわけで、分子ねずみ取りも残念ながら永久機関には成り得ない。

少し上に書いた「小さな空間を囲ってキープする装置」―気温20度の部屋の中から、20.01度になった部分を取り出す装置―も、分子ねずみ取りと同様の理由で不可能である。ゆらぎによって温度が高くなった部分のみを囲うことは不可能ではない。しかし、それを保持し続けることができないのである。

「分子ねずみ取り」とか「囲いこみ装置」とか妙なものを考えやがって、あまりにも現実離れして無意味だ」と感じている読者諸兄に、現実にかような装置がある、といったら驚くだろうか。現実に極細の針金でできたねずみ取りがあるというのではない。何のことはない、ある種の化学反応が「分子ねずみ取り」と同じことをやっているというだけの話だ。例えば、固体表面に分子が吸着する反応は、固体というねずみ取りに分子が捕まるのと同じことだ。ねずみ取りのバネの強さ＝吸着エネルギー、部屋の広さ＝分子の濃度、に相当する。吸着反応は必ずしもくっつくばかりではなく、熱でゆさぶってやれば逆の解離反応も起こる。くっついている分子と逃げている(離れている)分子の割合は、熱力学から予想される値と一致する。決して永久機関にはならない。さらに、たとえ分子が1個だけであっても、その分子の挙動―例えば分子がくっついている時間と逃げている時間の比率―は熱統計力学に従う。本章の途中で「分子がたくさんなら確率は成り立つ、少数の場合はあやしい」といったような議論があったが、これは結局は不毛な議論だ。分子が多数だろうと少数だろうと、又、ねずみ取りのような仮想的な話だろうと現実的な化学実験だろうと、分子のふるまいは理論から導かれた確率に一致するというのが結論である。

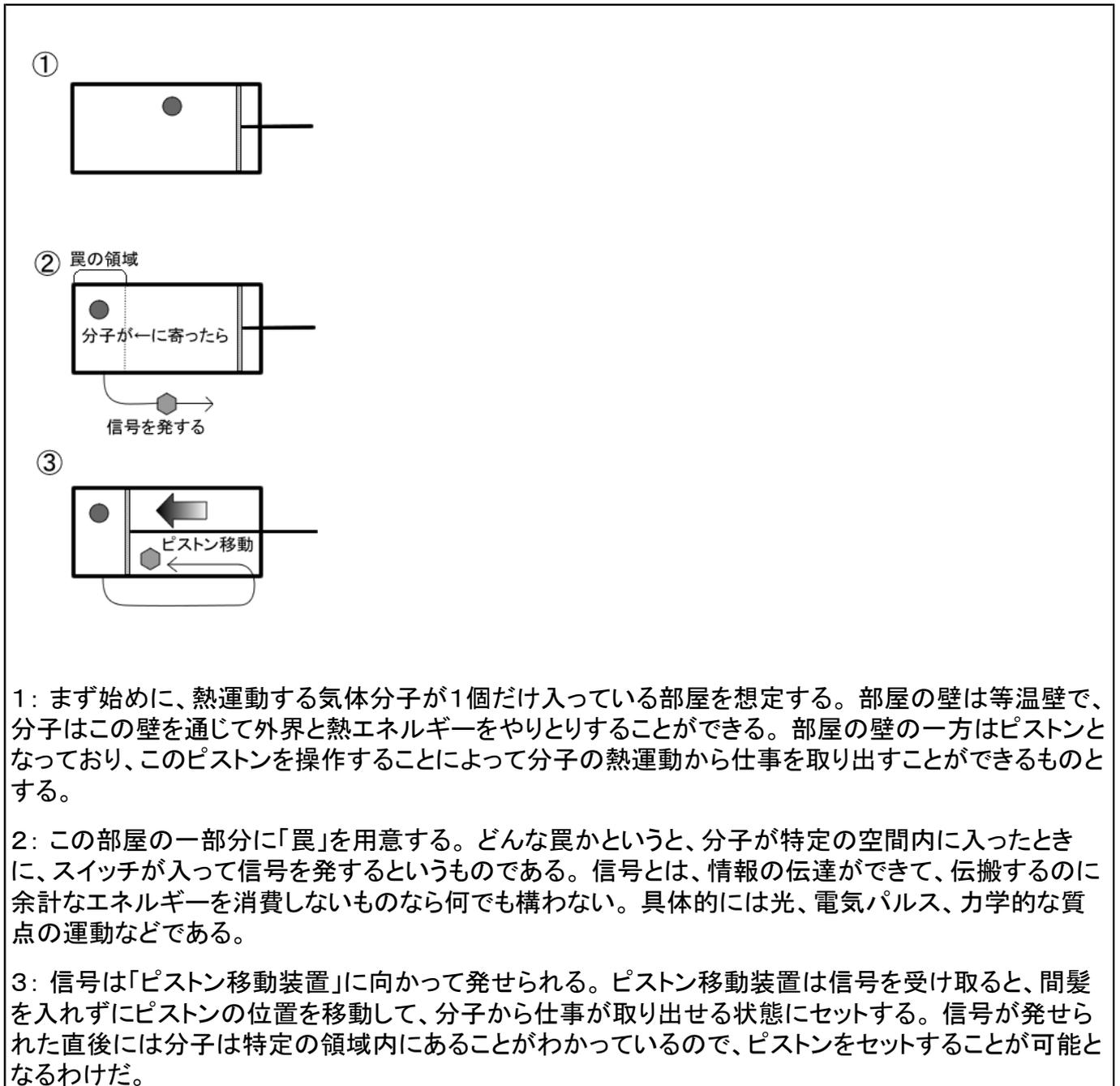
こうして検証してみると、熱統計力学に穴はなしとの感を深めるしかない。間違っていることがあるとすれば、それは学ぶ者の誤解に負うものがほとんどなのではないだろうか。そして、熱統計力学が完璧なのだとすれば、悪魔の装置の設計などあきらめた方がよいのではなかろうか。

第二章 1分子気体パズルに挑む 悪魔の装置第一号

2006/08/22

本論の最終目的は「熱運動から利用可能なエネルギーを取り出す装置は実現可能」を示すことだった。なのに、これまでの様々な試みはことごとく失敗し、その度に得られる結論は「やはり熱統計力学は正しい。どう転んでも永久機関は不可能」というものであった。しかし、失敗は成功の元。これまでの試行錯誤から得られた知識によって、我々は答のすぐ近くにまで来ているのである。本節では、いよいよ実現可能な悪魔の装置について触れよう。

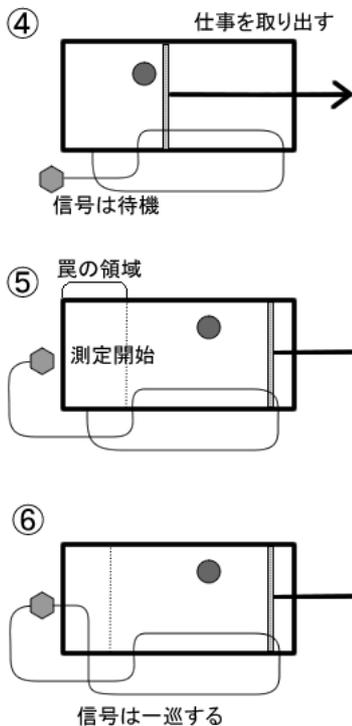
私が編み出した実現可能な悪魔の装置は、これまでの試行錯誤の集大成のようなものだ。



1: まず始めに、熱運動する気体分子が1個だけ入っている部屋を想定する。部屋の壁は等温壁で、分子はこの壁を通じて外界と熱エネルギーをやりとりすることができる。部屋の壁の一方はピストンとなっており、このピストンを操作することによって分子の熱運動から仕事を取り出すことができるものとする。

2: この部屋の一部に「罫」を用意する。どんな罫かという、分子が特定の空間内に入ったときに、スイッチが入って信号を発するというものである。信号とは、情報の伝達ができ、伝搬するのに余計なエネルギーを消費しないものなら何でも構わない。具体的には光、電気パルス、力学的な質点の運動などである。

3: 信号は「ピストン移動装置」に向かって発せられる。ピストン移動装置は信号を受け取ると、間髪を入れずにピストンの位置を移動して、分子から仕事を取り出せる状態にセットする。信号が発せられた直後には分子は特定の領域内にあることがわかっているので、ピストンをセットすることが可能となるわけだ。



4: 仕事を取り出す。信号は外界に捨ててしまうのではなく、仕事を取り出している間、回路内で待機する。

5: 仕事を取り出し終わったら1周期終了で、最初の「罾」の状態に戻る。次に使う信号は回路内で待機していたものを再利用する。つまりこの「罾」とは、「分子が特定の空間内に入ったときに、待機していた信号をピストン移動装置に送るためのスイッチ」だったのである。

6: 信号は閉じた経路を一巡するだけで外界に一切接していないので、信号自体が熱ゆらぎに攪乱される心配はない。

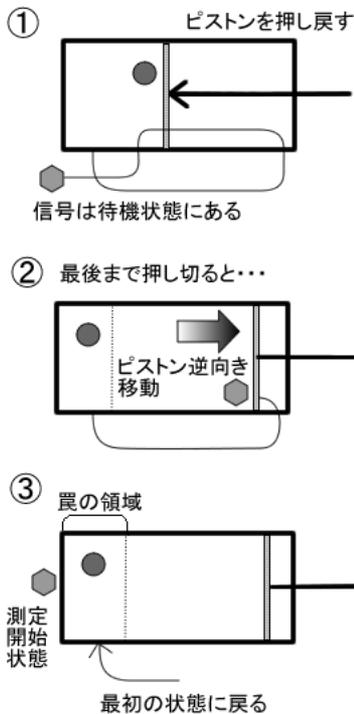
以上が”悪魔の装置第一号”の概要だ。上の説明で不十分な点は後ほど詰めることにして、まず全体を眺めた印象から始めよう。

正直に言って、私がこれを考案したときも「今までの試行錯誤と同様、きっとどこかが間違っているはずだ」と考えた。前節の”分子ねずみ取り”と大差ない。一体どこが違うのか。

まず第一に、分子を捕えたら”間髪を入れずに”仕事を取り出す、という点が違う。これは「分子に逃げ出す隙を与えず、捕えた直後100%確実な状態で仕事を取り出してしまおう」というもくろみである。

次に、信号の経路が閉ざされている点が違う。これで信号に関する限り熱ゆらぎの心配をしなくても済む。実はこの装置、”分子ねずみ取り”の弱点を何とか補おうとした苦し紛れのものだったのである。ところが、この苦し紛れの改良が予想以上の成果をもたらすことになったのである。

この装置がいままで試行錯誤の数々と違うのは、始めて”逆転テスト”にパスしたことだ。第二種永久機関の間違いを見破る常套手段は「逆転の発想ー逆向きに動かしてみる」であった。この逆転テストでは、同時に2つの事柄をチェックしている。1つめは「装置が順方向に動くだけでなく逆方向にも動き得ることを見落としていないか」という点。もう1つは「因果律を満たしているか、即ち、1つの初期状態が必ず1つの結果に対応しているかどうか」という点だ。上の装置を逆に動かしてみよう。上では分子運動から仕事を取り出していた所を、今度は逆に分子運動をわずかに上回る力でピストンを押し戻してみる。するとどうなるか、



1: ピストンを所定の位置まで押し戻すと、回路内で待機していた信号は「ピストン移動装置」に逆から入ることになる。すると、ピストンは上の移動とは逆に、押し戻す前の初期位置まで巻き戻されることになる。

2: ピストンを押し戻す仕事は気体分子に蓄えられる(気体の温度を上げる)のだが、気体から等温壁を通じて、最終的には熱となって外界に放出される。

3: このとき、気体分子はピストンに押されて「罨」の範囲に入っているから、「ピストン移動装置」から逆に出てきた信号は「罨」を逆に通り返して待機状態に戻る。

4: これで逆向きに一巡した。ここで再びピストンを押せば1:を再開する。

以上の様に、この装置は全て可逆過程の組み合わせから成っているのである。従って、分子運動をわずかに上回る力でピストンを押せば、押した仕事→熱という変換を行ない、反対に分子運動よりわずかに小さい負荷をピストンにかければ、熱→仕事という変換をやってのける。極端な場合、負荷を0にすれば装置は何の滞りもなく順方向に空回りするのであろう。負荷0なら装置は外界から熱を吸収もしなければ、仕事を産み出しもしない。この状態は、例えば摩擦がなく外界と接してもいない車輪が一方の向きに回転し続けているのに似た状況である。永久運動であって永久機関ではない。ここで、ピストンがほぼ確実に順方向に動くように小さな負荷をかければ、取り出す仕事は少さくなるが、装置の動く向きは高い確率で順方向となるだろう。一回に取り出す仕事の量=ピストンへの負荷を小さくすればするほど、装置が順方向に動く確率が上がり、その極限として負荷0で順方向の確率100%となる。逆に負荷を大きくしていくと逆方向の確率が上がり、ある点で50%を越え、その後、負荷無限大で逆方向確率100%に漸近する。つまり、この装置は確率的に見ても順方向に動くのである。

「逆転テスト」の第一のポイント「逆方向にも動き得ることを見落としていないか」はパスしたので、次は第二のポイント「因果律、1つの初期状態が1つの結果に対応しているかどうか」をチェックしよう。装置を構成する個々の要素は可逆過程で、どこをとっても1つの原因:1つの結果を満たしている。しかし、装

置は外界から熱＝ランダムな運動を取り入れているのだから、装置の原因となる状態－初期状態は1つではないはずだ。にもかかわらず結果である、取り出される仕事の状態は1つだけとなっている。これはつじつまが合わない、やはりこの装置のどこかがおかしいのだろうか・・・実は、ここにこそ悪魔の装置の核心となる答がある。(この答が解った！という人は、もうここから先を読む必要はない程の重要概念だ。) この悪魔の装置の核心部分は、最終的な結論として後の章にとっておこう。

前節で挙げた”悪魔の装置第一号”について、もう少し詳しく検討してみよう。

■ 構成要素

最初に、この装置を構成する要素を改めて定義しよう。この装置の中心となる部分は「信号」とその通る「経路」、「ゲート」と「ハンドル」の4つの要素から成り立っている。

私は装置内部の動きを、信号を中心に考えて大きく2つに分類した。1つは外からの条件が信号をどのように制御するか(外部→信号)ということ、もう一つは信号がどのように外にある対象を操作するか(信号→外部)ということである。前者の(外部→信号)という働きをする装置を総称して「ゲート」、後者の(信号→外部)という働きをする装置を総称して「ハンドル」と呼ぶことにしよう。(どちらもここだけの特別な呼び名である。) 擬人的な言い方をすれば、

・信号と経路は、神経のようなもの

・ゲートとは、外部からの刺激を受ける感覚器官のようなもの

・ハンドルとは、刺激に対する反応、あるいは外部へ働きかけを行う筋肉のようなもの

である。この4要素に「気体分子」や「ピストン」、それらを収容する「等温壁でできた箱」などが加わって装置全体を形成する。

1: 「信号」とは、情報の伝達が可能で、ある経路内を外から何の供給も受けずに減衰することなく伝搬する物理的実体のことである。信号は1個2個と離散的に数えられる状態でなければならない。例えば、電気パルス、ソリトンは信号として使うことができるが、長時間かけて電圧が徐々に変動するなどといった状態は不適である。(誰が信号を数えるのかというと、信号の観測装置—ここでは「ゲート」や「ハンドル」と呼んでいる装置が数えるわけだ。「どの程度短時間ならパルスといえるのか」「どの程度以上の電圧なら1個と見なされるのか」は結局「ゲート」装置や「ハンドル」装置の精度に依存する。必ずしも信号が量子である必要はない。) 典型的な信号は光や電子ビーム、電氣的波動、運動する質点(ボール)などである。特定の化合物を伝搬物質として利用する方法は(生物の体内でよく用いられている方法)、常に外から新しい物質や自由エネルギーを供給しなければならないので不適である。ここで考察する装置では、信号は1個だけ使用する。

2: 「経路」とは、信号の通り道のことである。経路は1次元である。(球面波や平面波の伝わる空間ではなく線だということ。又は、ただ1つのパラメーターで信号の位置が特定できるということ。) 経路は空間内の任意の場所に配置することができる。”減衰することなしに”信号を伝達しなければならないので、経路は「摩擦のない物体」や「電気抵抗0の線」でできていなければならない。また、経路は「完全な断熱壁」で外部の熱ゆらぎから遮断されていなければならない。(こういった理想的な物体が現実存在するかどうかはひとまず置いておいて、ここでは理論上の極限值として存在を認めることにする。) 信号が外部から熱ゆらぎの影響を受けるのは経路の開いた端(入口と出口)においてであって、閉じた経路内の信号は熱ゆらぎの影響を受けない。経路は双方向に、順方向にも逆方向にも同じように信号を通さなければならない。経路は分岐したり合流したりすることはできない。

3: 「ゲート」とは、外部から信号を制御する装置のことである。経路上を伝搬する信号に対して我々が為しえる最も基本的な操作は、

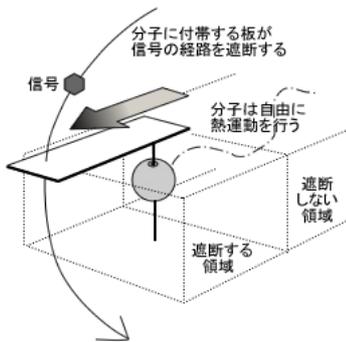
「経路をある1点で分断し、信号の通過を阻む」

「分断された2つの経路を接合し、信号が通過できるように仕立てる」

という2つである。この分断、接合の働きを担う装置がゲートだ。ゲートの状態には、信号の通過を許可する開と、通過を禁止する閉の2状態しかない。半分通すとか、選択的に通すといったことはできない。ゲートの働きは、要するに電気スイッチと同じである。分断された経路—閉じたゲートに入った信号は、反射して戻ってくるものとする。(分断点で止まって消えてしまうのではない。) ゲートは経路と同様

に双方向で、どちらの向きにも通過（あるいは反射）することができる。一方の向きだけ選択的に通過、あるいは遮断することはできない。このゲート自身の操作に、自由エネルギーの消費は伴わないものとする。なぜならゲートは経路を切り貼りするだけで、中身の信号に直接力を加えるものではないからである。現実にはスイッチを動かすにはわずかばかりの力は必要だが、この力は（たとえ熱ゆらぎの下にであろうとも）理論上は極限まで0に近づけることが可能だ。※（熱ゆらぎの下だとゲートの開閉がゆらぐのではないかと懸念されるかもしれないが、熱ゆらぎが直接影響するのは以下に述べる”ゲートの開閉条件”であって”ゲート自身”ではない。もし、熱ゆらぎによってゲートの開閉条件がゆらぐのであればゲート自身もゆらぐし、熱が加わっても開閉条件が変化しなければゲート自身がゆらぐことはない。）

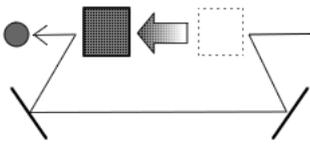
ゲートの開閉はいったい誰が行なうかについてだが、これは人間や意志ある知性体が行なうのではなく、特定の物理的条件に委ねることとする。特定の物理的条件とは「ある状態になったら」ということである。例えば「部屋が明るくなったなら」とか「特定の部分に圧力が加わったら」などのことである。ゲートを閉じる物理的条件は、ゲートを開ける物理的条件の補集合でなければならない。簡単にいうと「開けるのと反対のことをすれば閉じる」ということだ。例えば「明るくなったなら開く」ゲートは「暗くなったら閉じる」。「明るくなったら開き、圧力が加わったら閉じる」ゲートはルール違反である。なぜなら「暗くて圧力が加わった」ゲートがどうなるかわからないからだ。（ただし複合条件「明るくかつ圧力が加わったときだけ開く」ならばOKだ。これなら「暗くて圧力が加わったとき」ゲートは閉じるのだとはっきりわかるのだから。）ゲートの開閉は物理的条件の状態のみによって一意に決まり、条件の変化する順序には依存しない。（コンピューター風に表現すると if (condition) then { Gate OPEN } else { Gate Close } といったものである。）以上をまとめて、「ゲート」とは、ある特定の物理的条件に対応して、信号の通過許可、通過禁止を決める装置のことである。



実際に、あらゆる物理的条件に対して適当なゲートが作成できるかどうかは明らかではない。条件によってはとてつもなく複雑なゲート装置を作成しなければならないかもしれない。しかし、ここでは「摩擦のない物体」と同様に理想的な立場を採って、あらゆる物理的条件に対して適当なゲート装置が用意できることにしよう。ここで考察する装置では「ある物体が特定の空間領域に含まれていれば」という物理的条件を用いる。用意するゲートは2つ、「熱運動する分子が特定の空間領域に入ったら開く」ゲートと、「ピストンがある位置に達したら開く」ゲートである。これらのゲートが実際どのような造りになってるかは深く追及しない。例えば「分子が部屋の壁に触れたら」ということでも良いし、分子自身がゲートの一部となっていてそのままスイッチの働きをするということでも良いだろう。理屈の上で矛盾のないゲート装置を考えるのはさほど困難ではないので、適当に想像力を働かせて欲しい。

4: 「ハンドル」とは、入力された信号に応じて外部の対象を操作する装置のことである。重要な条件は、ハンドル装置全体が可逆でなければならないことである。もしハンドルに入った信号が入ったきりで出てこなかったら可逆にはならない。このため、ハンドルには2つの経路接点—入口と出口が用意されている。信号が入口から入って出口から抜ける間に、ハンドルは特定の操作Aを行なう。この反対に、信号が出口から入って入口から抜けたときには、ハンドルは操作Aとは全く逆の操作 \bar{A} を行なう。どちらが「入口」でどちらを「出口」とするかは便宜上のとり決めで、実際には対称である。ハンドルの行なう操作も可逆なものに限定する。又、ハンドル自身の動作に自由エネルギーの消費は伴わないこととす

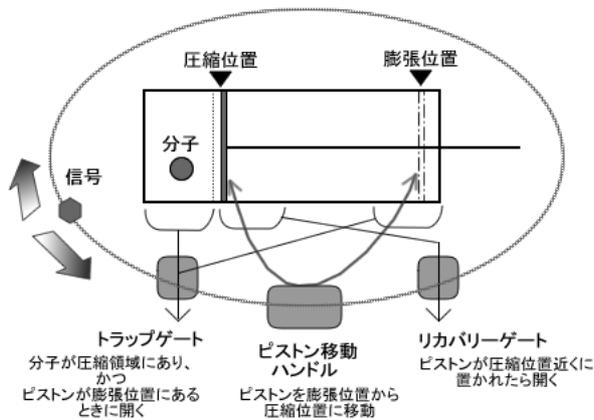
る。ハンドルが行なう操作についても自由エネルギーを消費しないものに限る。(可逆なのだからそうなる。)



ハンドルの具体例として、対象となる物体を移動するハンドルを考えてみよう。このハンドルは信号が入口から出口に抜ける間に物体をa地点からb地点に移動し、反対に出口から入口に抜ける間に物体をb地点からa地点に移動するものとする。信号には光、物体には光を完全反射する小球を想定しよう。静止した物体に光を当てると、ビリヤードの玉突きのように光は反射し、静止した物体は動き始める。(光子は運動量を持っているので。) 反射した後の光を先回りさせて、今度は物体の反対側から当てると、先の反射と全く逆の過程を経て物体は静止する。このように、物体の移動は2回の反射によって実現できる。ここで考察する装置で用いるハンドルは1つだけ、「ピストンを移動する装置」である。この装置の中身は上に記した「物体を移動するハンドル」の様なものを想定すれば良いだろう。

■ 装置の構成

「信号」「経路」「ゲート」「ハンドル」、これら4つの要素を組み合わせることで悪魔の装置の全体像を構成しよう。装置には1つの信号と1つの閉じた経路がある。経路上には2つのゲートと1つのハンドルが置かれている。以上は装置の動きを制御するコントロールブロック、人間で言えば神経回路に相当する。制御される側の実体ブロック、人間で言えば骨格や筋肉に相当する部分は、熱運動する気体分子が1個だけ入っているピストンである。2つのゲートには名前をつけた方が便利なので、それぞれ「トラップゲート」「リカバゲート」と呼ぶことにしよう。トラップゲートは気体分子を捕える「罠」に相当する。トラップゲートが開く条件は「気体分子がある特定の領域内に入っているとき」である。分子が特定の領域内に収まったという状態は、一個だけの分子から成る気体が特定の領域内に圧縮されたことと同じだ。つまり、この特定の領域は、気体をピストンで圧縮したときの領域に相当している。そこで、この領域のことを「圧縮領域」と呼ぶことにしよう。装置全体の動きを考慮すると、実はトラップゲートの開閉条件にもう一つ付け加える必要があるのだが、これについては後述する。気体分子が圧縮領域に入ったら、すかさずピストンをセットして、圧縮された気体の膨張から仕事を取り出せる状態を作りたい。この、これから仕事を取り出そうとする状態のことを「圧縮状態」と呼ぼう。圧縮状態におけるピストンの位置、つまりピストンがいちばん奥まで押し込まれている位置を「圧縮位置」としよう。この反対に、気体が膨張しきって仕事を取りだし終えた後の状態を「膨張状態」、そのときのピストンの位置、つまりピストンがのびきったときの位置を「膨張位置」とする。ピストンを圧縮位置にセットするのはハンドルの役目である。このハンドルは、膨張位置にあるピストンを外して圧縮位置にもってくる。つまりこのハンドルは、一度仕事を取りだし終えたピストンを「巻き戻して」再スタートさせるわけだ。(ハンドルは可逆だから、もし信号が逆から入ってきたら、圧縮位置から膨張位置まで仕事を全く取り出すことなく「速送り」するわけだ。) もう一つのゲート、リカバゲートの開閉はピストンの位置によって決まる。リカバゲートを設けた意図は「分子が圧縮領域に入るまで待機する待ちモード」と「圧縮された気体から仕事を取り出す作業モード」の2モードを切り分けることにある。この2つのモードを識別するには、ピストンの位置に着目するのが妥当であろう。仕事を取り出す以前、ピストンが圧縮位置にあるとき、リカバゲートは開く。それ以外のピストンの位置へ膨張する気体がちょっとでもピストンを動かしたら、以後リカバゲートは閉じるものとする。



以上のゲートとハンドルを、閉じた経路上に

「(スタート)→トラップゲート→ピストン移動ハンドル→リカバリーゲート→(一周してトラップゲートに戻る)」

という順序に配置する。

1: 一番最初は膨張状態、つまりピストンがのびきった状態からスタートする。このとき信号はトラップゲートの手前の経路上、つまりリカバリーゲートとトラップゲートの間の経路上にある。(上に”スタート”と記した所にある。) 両方のゲートが閉じていれば、信号は両ゲートで反射して経路上をいったりきたりする。これが”信号が待機している”状態である。

2: ここで気体分子が圧縮領域に入ってトラップゲートが開けば、信号はゲートを通過してピストン移動ハンドルに入る。(この仕掛けだと、トラップゲートが開いている間に、信号がハンドルの方に進行していなければトラップゲートの通過はできない。せっかくトラップゲートが開いたのに、運悪く信号が経路の反対側のリカバリーゲートのあたりにいるということもあるだろう。トラップゲートが開いたからといって必ずしも信号がピストン移動ハンドルに入るわけではない。しかし、たとえこのような”運の悪い状況”があったとしても装置全体の働きに支障はきたさない。なぜなら、運の悪かったその回はあきらめて、運良く信号がゲートを通過するまで気長に待てばよいのだから。このトラップゲートの罨が待っているのは、単に分子が圧縮領域に入ることではなく、「分子が圧縮領域に入ってなおかつ信号がハンドルの方に進行している」という状況なのである。)

3: 信号がピストン移動ハンドルを通過すると、ピストンは膨張位置から圧縮位置に移動する。このとき気体分子は圧縮領域に入っているはずなので、分子のとりこぼし(分子がピストンの反対側に入ってしまうこと)はない。信号がピストン移動ハンドルに入ったとき、ピストンは必ず膨張位置になければならない。しかし、ピストンは熱ゆらぎによって押し戻されることがあるので、必ず膨張位置に留まっている保証はない。そこで、トラップゲートにもう一つの条件「ピストンが膨張位置にあるときだけ開く」を追加することになる。つまり、トラップゲートの開閉条件は「気体分子が圧縮領域内にあって、かつピストンが膨張位置にあるとき開く」ということである。

4: 信号がピストン移動ハンドルを出た直後、ピストンは圧縮位置にセットされているのでリカバリーゲートは開いている。信号はリカバリーゲートを通過して最初の待機していた状態(トラップゲートとリカバリーゲートの間の往復)に戻る。リカバリーゲートが開いているのは、ピストンが圧縮位置にセットされた直後だけだ。その後、気体分子がピストンを押せばリカバリーゲートは閉じるので、信号がトラップゲートで反射して戻ってきてハンドルに逆流する事態は防がれる。また、気体がピストンを押して仕事を取り出している最中にトラップゲートが開いてしまうことはない。なぜならトラップゲートはピストンが膨張位置に達しない限り開かないからである。

5: 仕事を取りだし終えて、ピストンが膨張位置に達すれば最初の状態に戻る。これで1サイクル終了となる。

以上で装置が順方向に動く様子を一通り説明したわけだが、逆方向の動きも見てみなければ片手落ちというものであろう。この装置は全て可逆な要素から構成されているので、装置全体も可逆なはずだ。

1: 信号がトラップゲートとリカバゲートの間を往復して、“待機している”状態から始めよう。ここでピストンが伸びきって“膨張状態”になれば上記の順方向の動きが始まるのだが、反対にピストンが熱ゆらぎによって押されて“圧縮状態”となると、装置は逆方向に動き始める。ピストンが“圧縮位置”にくると、リカバゲートが開く。信号はリカバゲートを通過してピストン移動ハンドルに逆から入ることになる。

2: 信号がピストン移動ハンドルを逆向きに通過すると、ピストンは圧縮位置から膨張位置へと移動する。

3: ピストンがハンドルから出た直後は、分子はまだ圧縮位置にいて、かつピストンは膨張位置にあるので、トラップゲートが開いている。信号はトラップゲートを通過して最初の待機していた状態に戻る。これで一巡した。

この逆向きの一巡で何が行なわれたのかというと「ピストンを押して気体を圧縮した」ことになる。ピストンを押した仕事は気体の温度を上げることに使われるのだが、気体を囲む等温壁を通じて最終的には熱となって外界に放出される。結局、この装置は順方向に動けば熱→仕事という変換を、逆方向に動けば仕事→熱という変換を行なうわけだ。(くどい様だが、ここでいう順逆という呼び方は便宜的なもので、実際には順方向も逆方向も同等な権利を持っている。)

「悪魔の装置第一号」の、一通りの説明は以上である。

■ 疑問点

以下に、悪魔の装置第一号について想定される疑問点について補足しよう。

ポイントその1

この装置の上では、何が順方向と逆方向を分けているのか。

それは気体が圧縮するか膨張するかによる。この装置を順方向に動かしているのは「気体が等温膨張してピストンを押す」過程である。反対に「気体がピストンに押されて等温圧縮」されれば装置は逆方向に動く。気体が膨張するか、圧縮するかは何で決まるのかというと、気体を押しつけている力、つまりピストンにかかる力の大きさによって決まる。ピストンにかかる力が0なら、気体は確実に自由膨張するので装置は100%順方向に動くことになる。ただし、力が0なのだから装置から一切仕事を取り出すことはできない。ピストンにかかる力を増やしていったら、ちょうど気体の膨張する力とつりあったとき(この状態が準静的な状態なのだが)順方向と逆方向は50%、50%となる。というより、装置どちらの向きにも積極的には動かないであろう。気体とピストンは熱でゆらいでいるので、たまたまピストンが圧縮位置に達することがあれば装置は一回だけ順方向に動くが、これと同等の確率で膨張位置に達すれば一回だけ逆方向の動きが起こるだろう。順方向の回数と逆方向の回数はトータルで等しくなり、取り出される仕事の大きさは平均で0となる。この50%、50%の点より負荷を軽くすれば、つまりピストンにかかる力が気体の膨張する力より小さければ、気体の膨張が圧縮よりも起こりやすくなるので、装置が順方向に動く確率が上がる。反対に負荷を重くすれば圧縮が起こりやすくなり、逆方向に動く確率が上がる。注意すべきは、いかなる場合でも(ピストンにかかる力0の場合以外は)順方向だけ100%、逆方向だけ100%

ということはあるえないということだ。順方向、逆方向はいつでも起こり得る。ピストンにかかる力の大きさによって変化するのは、順逆の起こる確率なのである。この確率が50%を越えるか否かによって、装置を長時間動かしたトータルで得られる仕事 \pm が決まる。熱を仕事に変換する装置を考えると、最も重要なポイントは”装置の動く向き”である。仕事 \rightarrow 熱はエントロピーが増大する自然な向きなのに対して、熱 \rightarrow 仕事は普通に考えればエントロピーが減少する不自然な向きだ。仕事 \rightarrow 熱となる”逆方向の動き”はあっても不思議はないが、熱 \rightarrow 仕事の”順方向の動き”にはどこか無理がある、と疑うのが当然であろう。しかしどういう理由か、この装置は順方向、逆方向両方が起こりえる仕掛けになっている。なぜこうなるのか、本当の理由はさらに深く探る必要がある。とりあえずここでの結論は「一回に取り出す仕事の大きさが小さいほど順方向に動きやすい」ということに留めておこう。

ポイントその2

ピストンは瞬時に動くのか？

この装置ではピストンが瞬時に動く必要がある。ピストンが移動している間に気体分子が圧縮領域から出てしまうと困るからだ。信号の伝達速度は有限だし、分子の移動より速くピストンを動かすなどということはなかなか考えにくい。これには幾つかの解決策がある。一つは、ピストンを2つ交互に用いる方法だ。信号が順方向にハンドルに入ったら、分子を圧縮領域から逃がさないように、まっさきに新たなピストンを圧縮位置に置く。その後、膨張位置にある前回用いたピストンをおもむろに取り外せばよい。似たような方法だが、ピストン以外の補助的な板を用いて、まず気体を圧縮領域内に確実にロックしておいてからピストンの移動を行なってもよいだろう。(ロッカー \rightarrow ピストン移動 \rightarrow ロック解除という手続きを踏む。もちろんこれも可逆) 信号の伝達に時間がかかることを考慮して、圧縮領域をピストンを置く位置よりも多少狭めにとっておく配慮も必要だろう。取り出される仕事が減りはするが、装置の設計にはゆとりが生じるだろう。

ポイントその3

順方向の動きで気体分子がピストンを押すのが遅れて、リカバーゲートが開きっぱなしということがあるのではないか？

これはあり得ることだ。順方向の動きで、リカバーゲートを閉じるのは気体分子の役目である。気体分子の熱運動はでたらめで、所定時間内に必ずピストンを押すという保証はない。もし気体がピストンを押さずリカバーゲートが開きっぱなしだったら、信号は閉じているトラップゲートで反射して戻ってきて、ハンドルに逆から入ることになる。つまり逆方向の動きが開始されることになる。熱を相手にしているのだから、根本的に逆方向の動きをなくす方法は存在しない。できるだけ逆方向の動きを減らすには、分子がピストンの最初の一押しをしやすいようにピストンにかかる負荷を軽くするなり、リカバーゲート \leftarrow トラップゲート間の経路長を増して信号の1往復の時間を増やす、等の工夫が必要だろう。

ポイントその4

ピストンも熱運動しているはずだが影響はないのか。

この装置でもうひとつやっかいなのが、ピストン自身も熱運動しているということだ。従って一点の”膨張位置”にピタリとピストンを止めるとか、ちょうど”圧縮位置”にピストンをもってくることはできない。しかし、膨張位置や圧縮位置は何も一点である必要はない。ある程度の広がりのある範囲、”膨張範囲”と”圧縮範囲”で構わない。もし、ある範囲内で熱運動するピストンを一点に移動しなければならないのなら、熱運動を押さえ付けなければならないので余計な自由エネルギーを必要とするだろう。しかし、同じ”範囲”から”範囲”への移動であれば特に自由エネルギーは必要ない。ピストンの熱運動がハンドルを通じて信号に影響しないかとの懸念もありますが、これには解決策がある。例えば、がっちりした断熱壁でできた箱に熱運動している物体が入っていたとして、この箱を移動したとしても箱に触れ

た手が熱運動するわけではないだろう。あるいは、もしピストンが水平方向に熱運動するなら、水平方向にはノータッチのまま垂直方向から触れればよい。熱運動する物体を移動するからといって、必ずしも移動する主体が熱運動の影響を受けるわけではないのである。（実際こんな点でもつつきだすときりが無い。箱の中でも重心は移動するはずだ・・・それならばあらかじめ重心移動を打ち消すような balancer を取り付ければよい、しかし・・・といった具合に。）

まだ他にもあやしいポイントは幾らでもあることと思う。特に、ゲートやハンドルの具体的な構造について、ここでは特に触れなかった。しかし、この場で”あやしいポイント”の全てについて答えるのはやめにしよう。私自身もあれこれと色々考えたのだが、全ての疑問に答えるには具体的な装置の設計図を提示する以外にはないと悟った。これは本論の分を越える。本論の目的は「悪魔の装置がどんな原理で動くのか」を明らかにすることにある。ここに掲げた「悪魔の装置第一号」にはまだまだ疑問や不満が残るが、仮想的な装置の子細な点にこだわるより、もっと原理的な側面を追求することにしよう。

本章では、熱運動する分子から仕事を取り出す方法について試行錯誤してきた。そして最後に、どうやら可能性がありそうな答にたどり着いた。以下に、これまで考えてきた装置をまとめてみよう。

■ 試行錯誤その1 ～ 複数の悪魔

この装置のポイントは、場合の数とエネルギーの関係を崩すことにあった。単純に考えれば、1通り、2通りと数えられる場合の数と物を動かす力の間には何の関連もないように思える。しかし、全てが”熱雑音にさらされている”世界では、一定の情報を運ぶのに必要なエネルギーの相場というものが存在する。それゆえ、どのように装置をいじった所で「情報とエネルギーの関係」をつき崩すことはできなかった。

■ 試行錯誤その2 ～ 信号の合流

信号を熱雑音にさらすのが不都合なら、できるだけ熱との接触を絶って装置の内部だけで上手く信号の処理を行うことはできないだろうか。しかし、一度使用した信号をリサイクルするためには、どうしても「異なる複数の状態を1通りにまとめる」操作が不可欠で、これは因果律に照らして不可能であった。

■ 試行錯誤その3 ～ 奇跡を捕まえる装置

エントロピー増大則は確率に立脚しているのだから、ごく小さな確立で起こる”奇跡”を否定してはいない。ならば、罌を張って”奇跡”を捕らえることはできないだろうか。確かに”奇跡”は”ゆらぎ”という形で実現してはいるのだが、それを捕らえて保持し続けることは困難なのである。なぜなら、ゆらぎを捕らえる装置自身もまた、ゆらぎにさらされているからである。

■ そして、”悪魔の装置第一号” . . .

”悪魔の装置第一号”は、他の実現不可能な第二種永久機関と何が違うのだろうか。違いをはっきりさせるために比較検討してみよう。悪魔の装置の根底にあるアイデアは「ゆらぎを利用する」ということだ。シラードの悪魔から始まる「気体分子がちょうど部屋の片隅の領域に入ったら」というくぐり方は「偶然、仕事を取り出すのに都合のよいゆらぎが生じたら」と読み換えられる。「ゆらぎは常に起こっている。だから、このゆらぎをひたすら観測し続けて、利用者にとって都合のよいものだけを取り出そう。」これが悪魔の装置の大もとのアイデアであった。ゆらぎを利用するという点においては、第一号も他の第二種永久機関と同じである。はっきりと違う点はゆらぎの取り出し方にある。

1: 悪魔の装置第一号

ゆらぎが生じた直後に仕事を取り出す。

2: 試行錯誤その3 ～ 分子ねずみ取り装置

ゆらぎが「罌」にかかるのを待ち、適当な頃合を見て罌から仕事を取り出す。

3: 試行錯誤その1, 2 ～ シラードの悪魔とその改良版

ゆらぎ発生タイミングとは無関係に、観測を行なった直後に仕事を取り出す。

重要な鍵は、ゆらぎを取り出すタイミングにある。失敗した永久機関は、仕事を取り出すタイミングを利用者が決めている。つまり、いつ仕事を取り出されるのかは装置の設計者が指定しているのである。こ

れに対して悪魔の装置第一号では、仕事を取り出すタイミングは「ゆらぎ」に委ねられている。たとえ装置の設計者であっても、いつ仕事を取り出されるのかを予言することはできない。

「仕事を取り出される時刻がわからない」

これこそ悪魔の装置第一号だけが持つ、きわだった特長なのである。

いったい「仕事を取り出される時刻がわからない」ことに、どのような意味があるのだろうか。第二種永久機関、熱を仕事に変換するときに、古典力学的に考えてどうしても避けられない困難ある。それは因果律、1つの初期状態は必ず1つの結果に対応するという法則である。永久機関の入力である熱は、ランダムな運動なのだから複数の状態をとり得る。一方、永久機関の出力である仕事は、ただ1つの状態しかとれない。永久機関の中身がどれほど巧妙な装置だったとしても、複数の状態をただ1つの状態に変換することは因果律に照らし合わせて不可能である。

ところが、ここで「仕事を取り出される時刻がわからない」のだとしたらどうだろうか。例えば、1秒後に仕事を取り出される場合と、2秒後に仕事を取り出される場合とでは、2つの異なった状態ととらえることができるだろう。初期状態である熱が複数の状態をとっていたとしても、結果が現われる時刻に複数の可能性を持たせてやれば、因果律を満たすことができる。例えば、「右から飛んでくるか、左から飛んでくるかわからない分子運動」は左右2通りの状態を持っている。これを何らかの装置によって「1秒後に取り出されるか、2秒後に取り出されるかわからない仕事」に変換したとしても、因果律の点から見て特に矛盾はない。左右がわからないのが2通り、1秒後か2秒後がわからないのも2通りなのだから、2通りの原因が2通りの結果に対応しても何らおかしくはないだろう。実際には、(A)右→1秒後、(B)左→2秒後、のどちらかが起こっているのだが、装置を動かす者にとってA、Bどちらが起こったのか最後まで知ることができないのである。(知ろうとすればそのために自由エネルギーを費やさなければならない。)もし「右から飛んでくるか、左から飛んでくるかわからない分子運動」を「確実に1秒後に取り出される仕事」に変換しようとするれば、破綻を来すことになる。なぜなら、左右がわからないという2通りの原因に対して、ただ1通りの結果を期待しているからだ。

仕事を取り出される時刻がわからない

これこそが、熱運動を仕事に変換するために欠かせない必要条件だったのである。この条件にあてはまらないもの、即ち「仕事を取り出される時刻がはっきりと確定できる」装置は因果律に反するので実現不可能である。これまでに考えられてきた大半の第二種永久機関は、この時刻が確定していて実現不可能な永久機関の範疇に入っていた。それらに比して、時刻不確定な悪魔の装置は一線を画している。時刻不確定な悪魔の装置はもはや熱力学の法則に反するものではなく、それゆえ矛盾を来さないのだと私は考えている。

様々な試行錯誤を経て、我々はいよいよ「時刻不確定」という重要な鍵を手に入れたようだ。次章からは、この鍵を少しずつエントロピーという学術用語に置き換える努力を初めよう。そうすれば「時刻不確定」というアイデアがどのように熱力学の法則と調和するかが解かることだろう。