

「マクスウェルの悪魔」

京都大学次世代研究者育成センター特定助教
沙川貴大さん



まえがき

マクスウェルの悪魔を実験的に実現し、情報をエネルギーに変換することに世界ではじめて成功した京都大学助教（当時東京大学物理学専攻博士課程3年）の沙川貴大さんにお話を伺いました。

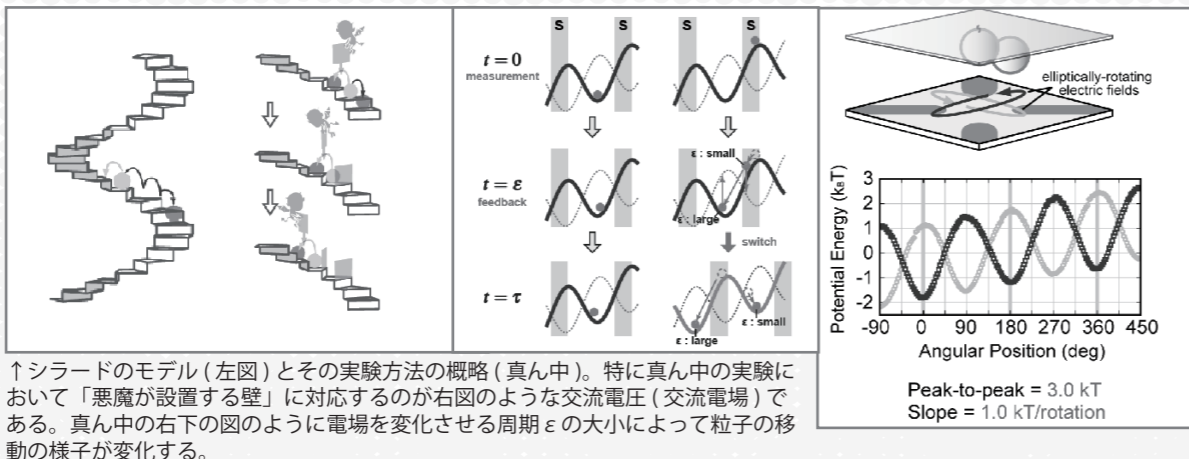
マクスウェルの悪魔とは、150年以上前に物理学者マクスウェルによって提唱された架空の存在です。開閉できる小窓がついた壁で仕切られた二つの部屋を考え、部屋の中の空気分子の状態を全て正確に知っている架空の存在（悪魔）がいるとします。悪魔が片方の部屋（部屋1）からもう片方の部屋（部屋2）へ速い分子が通るとき小窓を開け、部屋2から部屋1へ遅い分子が通るとき小窓を開けるとすると、部屋1には遅い分子が集められ、部屋2には速い分子が集められることとなります。その結果、分子の運動の緩い部屋1は温度が低く、逆に激しい部屋2は温度が高くなり、最初に二つの部屋の温度が同じであっても温度に差ができてしまうことが分かります。エネルギーを使ってもいないのに温度勾配ができるのはおかしいと論争になりましたが、後にマクスウェルの悪魔は情報を扱うのにエネルギーを使い、その情報をエネルギーとして、温度勾配を作っているということがわかりました。

1 粒子の場合に情報とエネルギーを結び付ける思考実験は、80年程前にシラードによって考えられています。ここではシラードのモデルと同等な簡単なモデルについて考えます。粒子が螺旋階段上において上下にブラウン運動（揺らぎによるランダムな運動）をしているとします。このとき粒子の運動を観察し、粒子が上に登った時に粒子の直下に壁を入れるということを繰り返すと粒子を上昇させ、エネルギーを与えることができます。この思考実験はマクスウェルの悪魔の実現方法を示唆するものです。

インタビュー

学生A マクスウェルの悪魔の実験の概要を教えてください。

沙川さん 室温の水中に300nmぐらいのポリスチレンの粒子を2個浸けます。カバーガラスに1個の粒子を接着し、2個目を1個目につけると、2個目が1個目を中心にランダムに運動します。そこに4つの電極で交流電場をかけてやると実効的に、2種類の螺旋階段上のポテンシャルを作



ることができます。ポイントは波型になっていることと坂になっていることです。粒子が谷の底にあるときには何もしないのですが、谷から上がって山の左に来た時にポテンシャルをスイッチします。そうすると、山の上だった所が谷の底になるので若干粒子が右へ移動することになります。これがシラードの思考実験の壁を入れることに対応していて、これを繰り返していくことで登っていくだろうと考えられます。結果、観測した瞬間から実際にポテンシャルが切り替わる時間が短いほど上へあがっていくということが確かめられました。逆に長いと自然に落ちていきます。ポテンシャルを切り替える時に粒子に与えたエネルギーを差し引いても粒子がエネルギーを得ているということがわかりました。情報を自由エネルギーに変えられたわけです。変換効率は理論的な上限の30%程でした。

階段の例のような当たり前に思えることを、熱揺らぎしている系で実際に示したことは実は非常に難しく、物理として意味のあることなのです。また、情報という一見物理と関係のないものが、実は物理と対等に扱えることを示したという基礎的な物理としての意義もあります。もう一つ専門的に重要な点はジャルジンスキー等式という非平衡統計力学の重要な等式の一つを実験的に検証したということです。

学生B 実験に至るまでの経緯を教えてください。

沙川さん 生命情報セミナーというセミナーをきっかけに非平衡物理学の実験をやっている佐野研の人たちと仲良くなり、共同研究をしようという話になりました。佐野研で博士を取り、現中央大所属の鳥谷部さんという方が今回のような実験のエキスパートなので鳥谷部さんが実験をやることに、僕が理論をすることになりました。理論は主に僕が考えながら上田先生と議論する感じで、実験については鳥谷部さん、佐野先生、宗行先生、上田先生と僕で議論して、実際に実験するのはほとんど鳥谷部さんでした。

学生B マクスウェルの悪魔というテーマを選ばれたのはなぜでしょうか。

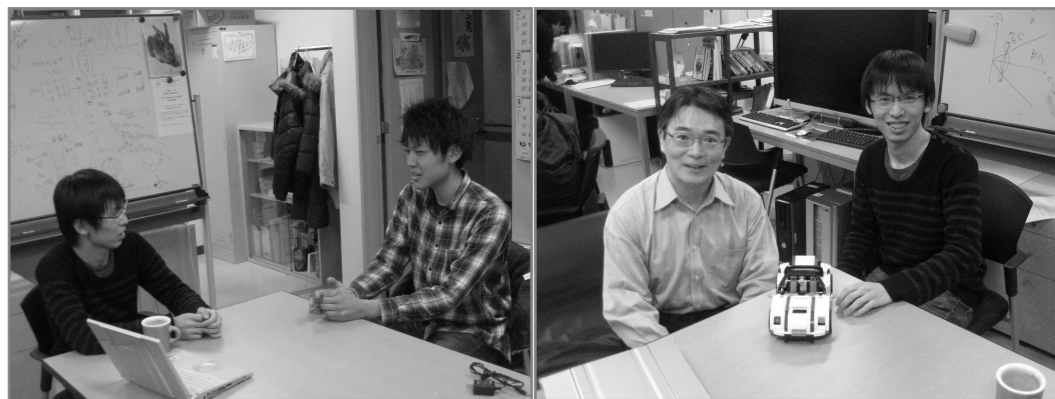
沙川さん 京都大学の学部生だったころに非平衡統計力学と量子情報に興味がありました。そこで何となく両方できそう

な東工大の上田研に進学したのですが、修士1年のときに研究テーマを決めずふらふらしていたら上田先生に「マクスウェルの悪魔について考えてみるのはどうでしょう？」と聞かれてそれをきっかけに研究ははじめました。情報を自由エネルギーに変えることに関しては80年以上前に提案されていたのですが、それについての一般的な理論はなく、それを作ることがモチベーションでした。それが最近までできなかった理由は、熱力学的な非平衡の話と量子情報の話を組み合わせる必要があったからです。非平衡統計力学は15年ぐらい前から大きな進歩があった分野、量子情報理論はここ30年ぐらいで発達した分野で、これらを組み合わせることで初めて一般的な理論が作れました。一般的というのは具体的に言うと、情報を最大限どこまで自由エネルギーに変えられるのかという原理的な変換効率の上限を証明したわけです。それと、熱力学第2法則を深く表現するジャルジンスキー等式を情報がある場合に一般化しました。そして今回の実験で情報を自由エネルギーに変換することにはじめて成功し、ジャルジンスキー等式を検証しました。

学生A アイディアを試すと失敗するという試行錯誤があったと思うのですがその期間はどれぐらいありましたか？

沙川さん 結構すんなりとできました。最初は実現したのとは全然違うやり方でやっていて、それがうまくいかなかったのですが、鳥谷部さんがアイディアを思いついてからは大きな障害はなく実現しました。最初は世界的に標準的に使われているレーザーピンセットという方法を使って系を制御しようとしていました。粒子にレーザーを当てるとレーザーの中心に向かって力が働くので、それを使って系を制御しようというのは、非平衡や生物物理の実験で非常によく使われています。例えば、鳥谷部さんのいらっしゃる宗行研では生体内のたんぱく質の動きを制御・測定するのに使われています。今回、何が問題だったのかというとレーザーが存在すると調和振動子の(谷型の)ポテンシャルができるわけなのですが、もっと複雑な波のようなポテンシャルを作らなければいけなかったのです。レーザーを高速でスキャンすると粒子はその動きについていけないので実効的に波型のポテンシャルが実現できるのですが、実際にやってみると高価な装置を使ってもガタガタになり綺麗な波型をなかなか作れません。熱揺らぎの10~100分の1の大きさのエネルギーが問題になる今回の実験では使えない。そこで、鳥谷部さんは電極を四隅に配置して交流電場をかけると回転ブラウン運動している粒子に実効的に色々なポテンシャルを実現できるということを考えました。これはもともと分子モーターという回転する生体分子を実験的に解析するために作ったものなのですが、それを応用するとマクスウェルの悪魔の実験もできるのではと。

学生A 幅広い実験の知識が全く別の分野で役立つわけですね。



↑インタビューの様子。左が沙川さん。

↑師である上田先生(左)と沙川さん

学生B 沙川さん自身も非平衡物理と量子情報の二つの分野が生きたわけですが、それらに興味を持ったのはなぜでしょうか。そもそも物理に興味を持ったのはなぜでしょうか？

沙川さん 学部的时候に早川さんという非平衡統計力学の先生がいて彼の授業を受けていたのは大きいと思います。量子情報は友達と輪講をやっていたことと、卒業研究で高橋研という量子光学の研究室に所属し、量子測定の実験をしたのがきっかけです。物理自体には高2ぐらいから興味を持っていました。当時の物理の先生が面白くて、先生と4、5人で相対性理論のゼミをやっていました。それが大きかったと思います。ま、それに入ったのは物理に興味があったからなわけですがそこをなぜと聞かれると困りますが、小学生のとき、家に小さな望遠鏡があって土星の輪を見て面白かったのがきっかけで、雑誌のNewtonで宇宙の写真を眺めたりしていました。

学生B 今後研究をどのように発展させていくつもりなのでしょうか。

沙川さん ひとつには揺らぎというものを使ってしい歳系というものを制御する原理を探求していきたいと思っています。揺らぎというのは普通ノイズであり、ないほうが良いというイメージですが、生物の分子モーターなどは揺らぎがないと動きません。生物が揺らぎを利用しているのは非常に効率が良いからのはずで、揺らぎを活用するとナノマシンを制御できるかもしれません。マクスウェルの悪魔というのは情報を使って制御するというかなり繊細な制御の仕方をしていきます。情報を使わなければ上手く制御できないものを、情報を使ってやることで綺麗に制御できるかもしれないのです。

学生A ナノスケールの物の制御の幅が広がるということですね。

学生B 本日はありがとうございました。