村下　今回情報をエネルギーに変えられたということで話題になったわけですが、そうなるまでの経緯は？

沙川さん　修士の東工大にいたころまではずっと理論をやっていたのですが、博士課程で東大に移って、佐野研という非平衡の実験の研究室の人と話しているうちに共同研究をやろうということになりました。

松田　どうして佐野研の人と？

沙川さん　生命情報セミナーという謎のセミナーがあって、最初佐野先生と生物物理の樋口先生とでやることになっていたのですが、そこになぜか上田先生も加わってというような経緯で交流があって、それをきっかけにという感じです。佐野研でドクターを取った多谷部さんという方がいま中央大にいて、と谷部さんがいるところの研究室が宗之研という研究室なんですけど、多谷部さんはそういう実験のエキスパートの方なので、多谷部さんが実験をやることになりました。

村下　それではもともとこういうテーマには興味を持たれていたのですか？

沙川　もちろん。修士のころからそいうう研究をしてました。

村下　修士のころというのも、学部で面白そうだと思ったきっかけはありますか？

沙川　学部のころに非平衡統計力学と、量子情報に興味がありました。その二つにもともと興味があり、何となく両方できそうな上田研に来たのですが、修士1年のときにふらふらしていたら上田先生にマクスウェルデーモンとかどうよ、と聞かれてそれがきっかけです。

村下　沙川さんはマクスウェルデーモンに理論的な面からアプローチされたということですが具体的にどういう理論を展開されたのですか？

沙川　情報をエネルギーに変えるというのは少し不正確で、情報を自由エネルギーに、情報を使えるエネルギーに変えることに関しては、、80年以上前にシラーという人が提案していたのですが、それについての一般的な理論はありませんでした。それを現代的な理論して作ろうというのがありました。それが最近までできなかったというのは熱力学的な非平衡の話と、情報の話を組み合わせる必要があったということがあります。情報理論はここ30年ぐらいで発達した分野で、非平衡統計力学は15年ぐらい前に大きな進歩があった分野で、これらを組み合わせることで一般的な理論が作れたわけです。一般的というのは具体的に言うと、情報があったら自由エネルギーに変えられるというけれども、最大限どこまで変えられるかその原理的な変換効率の上限はどこかというのを証明したわけです。それと、熱力学第2法則を深く表現すれば等式になるのですが、ジャルテンスキー等式という恒等式なのですが、それを情報がある場合に一般化した、ということをやりました。そのうえでどういう実験をしたかというと、ひとつにはその関係式を検証したというのがあるのですが、一般向けに重要な点は情報を自由エネルギーに変換するということに初めて成功したという点です。80年前から試行実験としてはずっと言われてきたのですがそれをはじめて実現できたというのは大きいと思います。

松田　その実験のアイディアというのはだれがどういう風に思いついたのですか？

沙川　まぁ、主に、僕と多谷部さんと佐野先生で議論した結果です。共同研究射と議論しながらなんとなく出てきたという感じです。もともとこういう実験をしようとするとき色々な候補があるわけで、半導体を加工したものや、今回使ったポリスチレンでやるのかというようなことや、あるいは低温でやるのか高温でやるのかというようなことはあります。今回はその中の一つ、佐野研や宗之研でやっているような室温の揺らぎの大きな系でやればいいというとこまでは自分自身も思っていたのですが、実際にどうやればいいかということを最初は適当に議論していて、多谷部さんがこういう系を使えばいいというのを思いついて、実際にできそうだということになったという感じです。

松田　アイディアを試すと失敗するという試行錯誤があると思うのですがその期間はどれぐらいあったのですか？

沙川　結構すんなりできました。最初は実現したのとは全然違うやり方でやっていたのです。それがいまいちうまくいかなかったのですが、多谷部さんがこうやればいいと思いついてからはすぐ、障害とかもなく実現しました。多谷部さんが考案したのはなかなか新しい方法でそれがないとなかなか厳しかったと思います。世界で広く使われているレーザーピンセットを使う方法などではなかなか厳しいと思います。できなくはないと思いますが、綺麗に制御するのは難しい。

松田　多谷部さんのアイディアというのはどのへんがすごごかったのですか？最初にやっていた方法というのはよくやられているのですか？

沙川　それは世界的に標準的に使われている方法です。最初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たのですが、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、それを使って制御しようというのは非常に標準的な方法で、特に非平衡の実験、生物物理の実験などで非常によく使われている。多谷部さんがいらっしゃる宗之研は生物物理の実験室で、生体内のたんぱく質とかの動きをこういうのを使って測定したり制御したりするのによく使われている。今回何が問題だったかというと、レーザーをそのまま静止させていると調和振動子のポテンシャルができるわけなんですが、マクスウェルデーモンを作るためにはもっと複雑な波がたみたいなのを作らなければいけない。レーザーをすごい勢いで光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ということになります。しかし実際にやってみるとわかるのですが、高価な装置を使っても綺麗波がたにはなかなかなりません。結構がたがたになってしまって、熱揺らぎの10分の１や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難しいということだったのです。今回多谷部さんは光じゃなくて電場を使えば、電極を四隅に配置して底に交流電場をかけることで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。何のためにこれを作ったかというと、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こういうものを作ったのです。それを応用するとマクスウェルデーモンの実験もできるのではないかと。

松田　幅広い実験をやっていると全然関係ない分野で役に立ったわけですね。

村下　沙川さん自身も非平衡物理と量子情報というふたつの分野が生きたわけですよね。そのふたつというのはなぜ興味をもたれたのですか？

沙川　難しい質問ですね。学部のときからなのですがきっかけというのはあまり思いつかないのですが。学部のとき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というのは大きいと思います。量子情報はなぜかわからないです。友達と輪講をやっていたのですが、それがきっかけといえばきっかけです。

松田　物理の分野も色々あり、特にどの分野が興味があるわけでなく、基礎をまんべんなく勉強しているのですが、どういうことをきっかけに自分の研究する分野を決めるのですか。

沙川　ありきたりなことしかいえませんが、自分の面白いというのが一番です。

村下　そもそも物理に興味を持ったのはいつからですか？

沙川　高2ぐらいからだと思います。ざっくり宇宙とかだと小学生ぐらいかな。当時、物理の先生が面白くて、高2のときに相対性理論のゼミをやっていたんです。先生と4，5人の学生と夏ぐらいからやっていて自分は11月ぐらいから入ったのですがそれが大きかったと思います。まぁそれは物理に興味があったから入ったわけでそこをなぜかと聞かれると困りますが。雑誌のニュートンとかは中学生のころから読んでいました。

村下　もともと興味のあった宇宙の分野にはなぜ行かなかったのですか？

沙川　宇宙は眺めるのは楽しいけど研究するのはいいやみたいな。

松田　宇宙に興味を持ったのは？

沙川　ニュートンとかにのっている綺麗な写真を見て感動したからです。

松田　ニュートンなどの理系の雑誌を読むようになったきっかけは？

沙川　それは親が買って家にあったからですね。あと1万円ぐらいの小さな望遠鏡が家にあり、小学生のころ土星の輪を見てのが面白かったです。

村下　ご両親も宇宙に興味がある方なのでしょうか？

沙川　特にそうは思いません。親は星を見るのが好きとかいうそのレベルだと思います。

村下　研究のほうは一段落した感じなのでしょうか。

沙川　いえ、あと1，2年は今の研究を続けられたらいいかなと思っています。

村下　どういう方向に発展させていくつもりなのでしょうか？

沙川　ひとつには揺らぎ問うものを使って小さい系を制御する原理を探求していきたいと思います。揺らぎというのは普通はノイズとして扱われないほうがいいというようなものなのですが、生物の分子モーターなどは揺らぎがないと動かないと言われています。細胞の中で化学物質を輸送する生体分子は水の中にあり、ブラウン運動をするわけですが、揺らぎがないと動きません。揺らぎというものを活用して、ナノマシンの制御をするという方向です。

村下　こういうものが人工的に作れるのでしょうか？

沙川　人工的にも作れます。最近は車の形をした分子を合成して光を当てると走るらしいです。これぐらいの小さいものを合成できるようになっています。生物が揺らぎを利用しているのは非常に効率がいいからのはずです。　（20分）

松田　研究の役割分担はどのようになっているのですか？

沙川　理論については僕がほとんどすべて自分でやって、上田先生と議論する感じで、実験は実験家の方と相談して、この実験をやられたのはほとんど多谷部さん、あと佐野先生と自分と議論してという感じです。理論は基本個人プレーです。

松田　理論と実験の情報交換はどのようにしているのですか？

沙川　たまに会ったりとかメールしたりと普通ですね。

松田　話を聞いていると全然生物と関係ないような研究が、生物と関係してきているわけじゃないですか。最近の物理というのは生物が大きくかかわってくるのですか？

沙川　それは分野によりますね。非平衡はすごく生物とかかわっています。量子情報はほとんど生物とかかわりがないのですが、最近光合成において光が当たって電子が輸送される際に量子コヒーレンスが保たれているというような話もあり、量子がそういう風にかかわってくるという点では少し意外でした。今でも物理の大半は生物と関係ないと思います。ただ、電子運の計算などが高分子でもできるようになり、そういう意味では今まで関係なかったような接点が増えてきているというのはあると思います。

松田　逆に生物の実験をしている人たちは物理を知らないと無理じゃないですか？

沙川　それは微妙なところですね。生物やっている人は物理をほとんど知らないですね。佐野研とかは物理の観点から生物をやっていますが、生物物理のマジョリティーはほぼ生物ですから、そこで物理の道具を使っている、簡単な熱力学を使うという意味では物理ですが。

松田　生物の研究でも仕組みを知りたいと思ったら物理が必要なわけですね。

沙川　そうなっていくかも知れません。

松田　化学もそうですよね。

村下　来年から京大のほうに勤められると聞きましたが、そうすると研究基盤も向こうに移るのですか？

沙川　そうです。完全に移ります。

村下　これまでの共同研究というのは？

沙川　それは続けるかも知れません。まだわからないです。自分がそこにいるという出かです。あと、京都の人との共同研究は必然的に増えると思います。

村下　京都に行くことになったのはどうしてでしょうか？

沙川　白衣プロジェクトというのが京大にありまして、助教を20名ぐらい全分野から取るというもので、大学の運営などの雑用がなくすごく良い研究環境なので、それに応募して受かったということです。あと、京大出身なので京都がいいかなというのもありました。

松田　逆に京都大出身なのに、現在東京の院にいるのはなぜですか？

沙川　当時は量子情報の理論をベースに統計力学もやりたいと思っていて、当時京大には量子情報の研究室がなかったので、色々見た結果、統計力学もできそうな当時東工大にあった上田研に行くことにしました。丁度博士に上がるときに研究室ごと東大に移るということで、わざわざ博士課程の院試を受け直して東大に来ました。そういう流れです。

松田　大学院を学部と返る人は多いのですか？

沙川　結構多いと思います。統計は知りませんが。

村下　話が変わりますが、マクスウェルの悪魔というのが実用的にどのように役に立つのかということについて聞かせていただきたいのですが？

沙川　先ほど言ったようなナノマシン。室温で動作するからにはどうしてもブラウン運動の揺らぎにさらされるわけですよね。薬をカプセルに入れて送って幹部に来たらはじけるというようなドラッグデリバリーはマシンというほど高度ではないかもしれませんが、最近こういうものができるようになったので、こういうものをどういう風にうまく制御するかということにつながってくると思います。マクスウェルデーモンというのは、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ます。なので、情報を使わなければ上手くいかないものについて、情報を使ってやることによって散逸熱を抑えるなど綺麗にできるかもしれないなどということにつながればいいと思います。

松田　細かいものの制御の幅が広がるということですね。医療や生体内のコントロールなども？

沙川　そこまで書くとうそっぽいですが(笑)

村下　そういう工学的な応用はご自身で何かされようと思っていますか？

沙川　あんまりないです。物理的な意義としては、情報と熱力学的な量が等価であるということを示したことに意味がある。

松田　本当に理論家という感じですね。

村下　これから他の人に工学的に使っていただけたらいいなという感じでしょうか？

沙川　そういう感じです。

松田　今回の実験の概要を一般の方向けにわかるようにお教えください。

沙川　粒子が螺旋階段をにいて上下にブラウン運動しているときに、上に行った時だけ壁を入れると粒子を上昇させることができるというのが原理なのですが、今回実際に何をやったかというと、室温の水中に300nmぐらいの粒子をつけて、カバーガラスに1個の粒子をつけます。2個目を1個目につけると、2個目が1個目を中心に回転ブラウン運動します。そこに4つの電極に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。これは周期境界になっているのでイメージとしては螺旋階段上のポテンシャルができていることになります。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、山の上だったとこ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。これが先ほど言った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。これが実験結果なのですが、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。逆に長いと落ちていきます。縦軸は粒子が上ったエネルギーからポテンシャルをスイッチングする時に受け取ったエネルギーを引いたものです。熱力学第2法則によれば絶対にマイナスにならなければいけない量で、情報を使ってフィードバック制御してやることでプラスにできました。従来の熱力学第2法則より多くのエネルギーを得たということになります。大体変換効率は30%、理論的な限界は*得た情報量×温度＞得たエネルギー*というのがなりたつのですが、実験によると情報は0.22、エネルギーは0.06ということで大体30パーセントということです。もう一つは非平衡の関係式を示したというのがあります。

村下　変換効率はあげていけそうなのですか？

沙川　あげていけそうです。このやり方ではこれが限界かもしれませんが。

沙川　物理として何がすごいかというと、階段の例のような当たり前っぽいことを、実際に熱揺らぎしている系で実際にのぼるということを示したということが難しくすごいのです。あと、情報量とエネルギーの間に関係があるというのを見たということです。情報という一見物理とは関係のないものが、実は物理と対等に扱えるということに基礎的な物理としての意味がある。応用は知りません。

150年前マクスウェルの壁を開けるあけないの悪魔があり、1粒子で情報とエネルギーを結び付ける試みは80年前ぐらいにシラードという人が考えていて、何が普通の熱力学と違うのかというと情報とエネルギーを結び付けている点で、こういう情報熱機関という考えは昔からあったのです。

松田　80年前できなかったのに今できたのは？

沙川　それは技術の進歩だと思います。理論的にはもちろん理論の進歩というのもあるのですが、実験的には完全に技術の進歩です。

村下　今後の研究も引き続き高いうテーマが中心になるのですか？

沙川　しばらくは。他のテーマも考えつつ。

松田　研究は多くのテーマを平行して考えるのが普通なのですか？

沙川　人にもよりますがポジションにもよると思います。学生だと一つしかやらないのが普通だと思いますが、教授になると幾つも平行してやります。

松田　沙川さんは他にも何か？

沙川　量子推定、量子情報の共同研究もしています。それとか、このテーマの中でもいくつか平行してやっているものはあります。