



科学研究費補助金新学術領域研究

「光圧によるナノ物質操作と秩序の創生」

News Letter Vol. 13

March 16, 2021

巻頭言

～タンパク質分子1個の熱ゆらぎを直接操作して、桁違いの省エネ原理を発見しよう！～

柳田 敏雄（大阪大学）

石原先生が、この領域を立ち上げるのでアドバイザーをお願いしたいと私のところに来られました。私は何をアドバイスできるかというより、この領域で私が長年チャレンジしてきたことを実現していただけないかと要望しました。私も、増原 ERATO プロジェクトの皆さんにいろいろ学びながら、光ピンセットを使って、筋肉で働く分子モーター（ミオシンと呼ばれる 10–20 nm サイズのタンパク質分子。アクチンフィラメントに沿って一方向に運動する。エネルギー源は ATP の分解エネルギー）1 個の運動や力を、nm、pN の精度で測定する研究をしてきました。さらには、1 分子イメージング法を開発し、運動、力に加えて化学反応（ATP 分解反応）も同時に測定し、生物分子モーターが、ブラウン運動を遮断するのではなく、それをうまく利用して働いていることを発見しました。もう少し詳しく説明すると、運動はブラウン運動で行い、ATP のエネルギーはランダムなブラウン運動から一方向の運動を選択するのに使っているように見えたのです（ブラウン運動の平均エネルギーはたかだか 1 k BT ですが、これも揺らいでいるので、まれに 10 k BT で揺らいだときを選んで利用している。そのまれの頻度はボルツマン分布から数万分の 1 ($\sim \exp(-10 \text{ k BT} / \text{k BT})$) 程度と見積もられます。分子モーターのブラウン運動はマイクロ秒で起こるので、まれといっても数十ミリ秒に一回起こることになり、観察される分子モーターの運動頻度とほぼ一致し、筋肉の収縮速度もエネルギー効率も説明できます）。これは、熱運動を遮断して働く人工機械の原理と根本的に異なるので、以前人工機械の代表格である半導体やトランジスタを研究してきた私にとっては大発見でした。熱運動を使っているといっても、マックスウエルデーモンが働いているわけではないので、つぎの問題は ATP の化学エネルギーを使って熱エネルギーを利用するメカニズムです。まず、思い浮かぶのはファインマンの熱ラチェットです。ご存じのように、そのままではデーモンになるので、爪と歯車に温度差をつける必要があります。当時物理の世界ではちょっと



したブームになったように思うのですが、生物組織では常温でも長寿命のホノンが存在するという議論がありました。ATP のエネルギーで音響ホノンを励起して、爪に相当する分子モーターの执行的温度を上げ、歯車に相当するアクチンフィラメントとの間に温度差ができていたのではと思ったのです。しかし、その証明は難しく、このブームも下火になったので諦めました。次は、原子クーリングのように、光ピンセットで分子モーターの熱運動を抑制してその実効温度を下げることであれば、ATP のエネルギーがなくても分子モーターは仕事をするができるはずと考えトライしましたが、何分、分子モーターの大きさは 10 ナノメートル程度で、それを直接捕らえることは我々の技術ではどうにもなりません。そんな時、石原先生がお見えになったのです。これ幸いと、この話をして、何とかありませんかとお願いしたのです。領域会議での皆さんの研究を聞かせていただき、研究の進展は目を見張るばかりです。きっと実現していただけるのではないかと楽しみにしています。タンパク質分子を直接トラップする！です。

余談ですが、熱運動を利用して働く現象は、分子モーターだけでなく、細胞のイオンポンプ、ガン化などに関係するレセプター、そして遺伝子発現の反応でも見いだされ注目されています。さらに、ヒトの脳でもゆらぎが重要な働きをしていると考えられるようになってきました。ゆらぎは生物の階層を超えてその仕組みを考える上での基本概念といっても過言ではなくなりました。ご存じのように、今 AI や 5G など ICT が注目されていますが、深刻な問題はエネルギーです。10 年後には、ICT だけで今の総発電量を消費すると予想されています。パリ協定どころではないのです。それに対し、AI に比べ圧倒的に多種多様で複雑な情報処理をしているヒトの脳は考えるのに 1 ワット（代謝を含めても 20 ワット）しか消費しません。細胞も遺伝子発現の制御をとっていても非常に複雑な制御をしていますが、せいぜい数ピコワットしか使っていません。この深刻なエネルギー問題を解決するのは生物に学ぶことではないかと思えます。すなわち、生物のゆらぎを使う原理です。この意味でも、まずは生物分子モーターがブラウン運動を利用する物理的メカニズムを解明することが重要であると思えます。みなさん、よろしくお願いします。

共同研究紹介

光誘起力顕微鏡における半導体量子ドットに作用するナノスケールの光誘起力の起源解明

菅原 康弘（大阪大学工学研究科、A01 班）

我々のグループは、計画研究 A01「光圧を識る：光圧の理論と計測・観測技術開発による基礎の確立」における石原グループ（大阪府立大・大阪大学）と計画研究 A04 の鳥本グループ（名古屋大学）の共同研究により、光誘起力顕微鏡における半導体ナノ量子ドットに作用するナノスケールの光誘起力の起源を実験的・理論的に解明することに成功した。

光誘起力顕微鏡は、原子間力顕微鏡技術に基づき、試料表面の光学的性質を高い空間分解能で画像化する新たな顕微鏡である[1, 2]。この顕微鏡では、原子間力顕微鏡の金属探針と試料表面に光を照射し、金属探針に誘起される双極子と試料表面に誘起される双極子との間の双極子・双極子相互作用を力として検出する。通常、カンチレバーと探針は、単結晶のシリコンの微細加工技術を用いて製作され、探針には金属薄膜がコートされる。

今回の研究では、半導体ナノ物質として、鳥本グループが作製したナノロッド結晶の両端に楕円形の結晶（ナノ楕円体）が付き、ダンベル構造を示すZAIS（Zn-Ag-In-S）量子ドットを取り上げた。ま



ず、ナノ楕円体とナノロッドに働く光誘起力の波長依存性を実験的・理論的に検討した。その結果、波長660nmの光誘起力像では、ナノ楕円体とナノロッドの間に大きなコントラスト差が生じることが分かった。他方、波長520nmの光誘起力像では、ナノ楕円体とナノロッドの間にはほとんどコントラスト差が生じないことが分かった。これらの結果は、光誘起力は、ナノ物質の

分極率の虚部ではなく、実部を反映する勾配力に起因することを示唆している[3]。次に、半導体量子ドットに働く光誘起力の3次元ベクトルの導出を実験的・理論的に試みた(図参照)。実験では、探針・試料間距離を変えながら光誘起力を3次元的に計測し、数値解析により光誘起力の3次元ベクトルを導出した。図に示すように、ナノ楕円体に向かって強い力が作用することが分かった。また、石原グループにより独自開発された手法による計算結果も、実験結果をよく説明する結果となっている。これらの結果より、光誘起力は、量子ドットから5nm程度の距離まで作用していることが判明した。

光誘起力顕微鏡を用いることにより、将来的には、単一分子内部の光学応答の可視化が可能になると期待される。特に、励起状態の情報を含む誘起分極の空間パターンを力として原子スケールで画像化できる可能性がある。また、光が持つ波長、偏光、波数ベクトルなどの自由度を活用することにより、分極パターンを多次元的に画像化できると考えられる。究極的には、単一分子の光学禁制遷移に伴う誘起分極の空間パターンやキラル分子の励起状態の対称性などを上記の光自由度を用い多次元的に画像化できるようになると期待される。

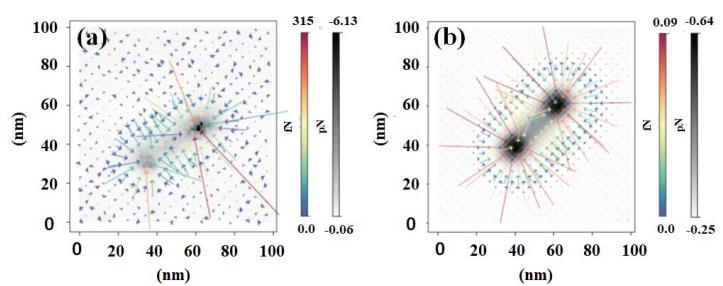


図 半導体量子ドットに働く光誘起力ベクトル(波長660nm)の(a)測定結果と(b)理論計算結果

- 1) J. Yamanishi, Y. Naitoh, Y. J. Li and Y. Sugawara, *Appl. Phys. Lett.*, **110**, 123102(2017).
- 2) J. Yamanishi, Y. Naitoh, Y. J. Li and Y. Sugawara, *Phys. Rev. Appl.*, **9**, 024031(2018).
- 3) H. Yamane, J. Yamanishi, N. Yokoshi, Y. Sugawara, and H. Ishihara, *Optics Express*, **28**, 34787 (2020).

領域から育った新たな研究

ナノ粒子と光圧を用いた量子流体研究

荻輪 陽介(大阪大学基礎工学研究科 A02 班芦田グループ)

本新学術領域が立ち上がる前から、私は大阪大学の芦田昌明教授(A02)グループの一員として、ナノ粒子の選別的な光マニピュレーションに取り組んでいました(こちらのテーマについても、今でも推進中です)。ナノ粒子と光の相互作用の強さは、ナノ粒子の物性に依って共鳴的な波長依存性を示します。したがって、狭帯域の光から生じる吸収力・散乱力によって、雑多なナノ粒子群から特定の物性を持つナノ粒子のみを選択的に輸送することが可能となります。その際に、「低温の方がナノ粒子の本質的な物性が顕在化する」、「選別的なマニピュレーションの効率を高めるには周囲の流体の粘性が小さい方が有利」といった理由から、超流動ヘリウムを光マニピュレーションの舞



台として用いていました。当時は、あくまでも「光による輸送」が柱であり、「超流動ヘリウム」は、その目的のための一要素に過ぎない、という立場でした。

2016年に本新学術領域が始まり、その活動に参加する中で、領域内の様々な研究者と出会い、幅広い議論をする機会を得ることができました。その議論を通じて、深く反省したのは「超流動ヘリウムのことを、もっときちんと理解する必要があるのではないか」ということです。このような考えに至ったのは、本領域が非常に多様なバックグラウンドを持つ研究者から構成されているおかげでありました。私の専門である物理学はもとより、合成化学や生物学そして流体力学まで、各分野のトップレベルの研究者と異なる角度から議論を行うことで、自分の研究を新鮮な視点で捉え直すことができたというわけです。

反省した私は、とりあえず google で「超流動ヘリウム」と検索してみたものの、既に知っているような通り一遍の解説しか出てきません（学生に普段から口を酸っぱくして言っている「web の情報ではなく、教科書や論文を読みなさい」という言葉を自分に言うべきでした）。ところが、その過程で「どうやら日本の超流動ヘリウムの研究は、世界でも非常に大きな存在感を持っているようだ」ということが分かってきました。その中でも、まさに世界的権威の一人といえる坪田誠先生の所属を何気なく見てみると、何と、同じ大阪の目と鼻の先、大阪市立大学におられるということがわかりました。あまり人付き合いが得意ではない私ですが、「こんなチャンスは滅多に無い」と一念発起して、全く面識のなかった坪田先生に、いきなり長文のメールを送り付けたのでした。

唐突なメールにも関わらず、坪田先生に快く対応していただき、何度も膝を突き合わせて議論を行うことが出来ました。そこで明らかになったのは、超流動ヘリウムの研究と光技術の融合に大きな可能性があるということです。特にナノ粒子の光マニピュレーションや光トラップの技術は、超流動ヘリウムの研究と非常に相性が良いにもかかわらず、全く手がつけられていないということがわかりました。例えば、超流動ヘリウム中には流れの循環が量子化された構造である量子渦が存在しています。この量子渦は、オングストロームオーダーと非常に細いため、通常は観測することが出来ません。しかし、超流動ヘリウム中にナノ粒子を大量に分散させると、ナノ粒子が自発的に渦の中心軸上に安定化するため、ナノ粒子からの散乱光を結像することで、量子渦のダイナミクスを観測することが出来ます。ここに光マニピュレーション技術を融合したらどうなるのでしょうか？まるで量子渦を操作するかのよう、ナノ粒子と量子渦の複合体を操作できるのではないのでしょうか？今まさに進行中の研究テーマでもあるため、詳細は省かせていただきますが、この例に限らず超流動ヘリウムの科学と光科学の交わる場所には、大きなフロンティアが広がっていることは間違いなさそうです。今では、この研究分野が世界でも大きな分野へと育っていくようにと、日々必死に楽しく研究に取り組んでいます。