



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. 7

December 27, 2018

『ノーベル物理学賞により加速する光圧の科学研究』

増原 宏（台湾・国立交通大學理學院）

Arthur Ashkin 博士が 2018 年のノーベル物理学賞に輝いた。彼は 1970 年代初期に溶液中の高分子微粒子に光圧を印加する実験を発表し、1986 年に光ピンセットのアイデアを世に問うた。光が対象物体に力を及ぼすという現象は、古くは Newton、Maxwell の時代から多くの知識人、研究者の興味の対象となってきた。19 世紀末にはロシアのレベデフが光の圧力を証明する実験に成功している。数年後には夏目漱石の知るところとなり、彼の小説「三四郎」に光の力を測る実験のくだりが書かれている。Mainman がレーザーの発振に成功する 60 年以上前のことである。そしてレーザーが発表されてから 26 年後に、光ピンセットが実現した。この歴史は、原理的な発想が実験で証明され、その技術が開発され、やがてツールとして使われるレベルに達し、さまざまな科学技術分野に広がっていく、その時間の流れを示している。

私たちのグループの話で恐縮であるが、1988 年に ERATO 増原プロジェクトが新技術開発事業団（現 JST）の創造科学推進事業として発足し、その研究トピックスの一つがこの光ピンセットを駆使した化学の研究であった。このテーマ設定と研究展開にあたっては、プロジェクト研究員笹木敬司博士（本新学術研究プロジェクトの事務局担当メンバー）の貢献が極めて大きかった。私たちは、光学顕微鏡に 1064 nm レーザー光を集光し、溶液中の高分子微粒子の捕捉、操作、配列、微細加工の実験研究の先鞭をつけた。また溶液中のマイクロメートルサイズの単一微粒子、単一液滴、単一結晶を一粒ずつ焦点に保持し、時間分解蛍光分光、時間分解可視吸収分光、レーザー発振、電気化学的反応、接着、光重合、パターンニングなどの研究を展開した。光ピンセットの化学研究は世界にさきがけてわが国で行われ、1993 年までのその成果は「マイクロ化学」（化学同人、1993 年）にまとめられている。Ashkin 博士は 1997 年に自らの光ピンセットの仕事を Proc. Nat'l Acad. Sci.誌に総説としてまとめているが、光ピンセットの化学研究については増原 ERATO プロジェクトが行ったとし、我々の英文成果集である「Microchemistry」（Ed. by Masuhara et al., North-Holland, 1994）を引用している。

1990 年代中ごろから光ピンセットの化学研究の対象は、単一微粒子・単一液体から溶液中のナノ粒子、高分子、生体分子、分子クラスターに移った。これらは集光レーザービームのサイズより小さいので、多数捕捉され、ポテンシャル内で集合、会合、結晶化、組織化を示す。光圧特有の相転移、析出、



配列などのダイナミクスを、ナノ粒子や高分子のサイズ、構造と関連付けて分子論的に論ずることができるようになった。通常光ピンセットの実験は液中で行われてきたが、最近では溶液表面、固体・溶液の界面、液液界面でこそ光ピンセット特有の化学現象が誘起されることが明らかになってきた。また物理化学的には、光圧に誘起される分子現象を力学計測、物理計測、分光計測しながら分子論的電子論的に解明する研究や、分子やナノ粒子が集合し構造を形成するダイナミクスを調べ材料化への展開を図る研究が盛んになっている。

石原新学術領域研究においては、このような化学研究のみならず、光物性、光学、マイクロナノテクノロジー、マイクロナノマシン、生物物理に広がる、世界的にも例を見ない包括的な光圧サイエンスを展開している。Ashkin 博士のノーベル賞決定より数年早く発足し、すでに独創的な新しい成果を次々と発表している。代表者をはじめ主要メンバーの先見の明に敬意を表したい。またこの機会に新学術研究の推進に関連して日頃思い、また今回 Ashkin さんのノーベル賞であらためて感じたことを述べさせてさせていただく。

第一に、いわゆるインパクトファクターの高い雑誌に投稿することが、各方面から求められているが、Ashkin さんの初期のオリジナルな論文は Physical Review Letters, Applied Physics Letters、光ピンセットの論文は Optics Letters の専門誌である。その後バクテリア、ビールス、細胞に応用した仕事は、Nature, Science に発表されているが、引用回数は前者の論文が数倍多い。また彼が組織的にバイオ研究を展開したわけではない。しかしノーベル賞の理由としては、「光ピンセットとその生物システムへの応用」と書かれている。この状況をしっかりと確認しておきたいと思う。

第二は、ノーベル賞に輝いた時からその研究分野に多くの研究者が集まり、そのサイエンスが圧倒的に広がるということである。私が若いころ関わった時間分解分光法の開発とそれを駆使した光化学の研究分野を見てみよう。時間分解分光におけるポンププローブ分光のアイデアもまた、レーザーが開発される 20 年くらい前に、イギリス海軍技術将校だった George Porter 教授が、海軍で無線の研究中に発想したものと聞いている。初期には限られた物理化学の専門家が手作りの装置で奮闘していたが、1967 年 George Porter 教授たちは時間分解分光を含む高速反応の研究でノーベル化学賞を受けると、時間分解で反応素過程を調べる研究は一般的に認められ急激に広がった。今では有機化学者、光合成を調べる光生物学者、太陽電池の開発技術者も使う必須の手法の一つとなった。光圧の科学技術にとって今年の 2018 年はまさにこのような折り返し点であり、今後急激に光圧の研究と技術開発は加速すると期待される。光ピンセットの科学技術に関わる私たちにとってまことに喜ばしい追い風である。

第三は、しかし我々はそれでいいのかという意見もある。私は 1967 年の Porter 教授たちのノーベル賞受賞後の追い風のもと、ルビーレーザーを用いた時間分解の光化学、いわゆるナノ秒化学でデビューし、若いときに小さな成功体験を持ったと感じた。しかしその延長上に、量的拡大に次のサイエンスがあるとは思わなかった。レーザーのもつポテンシャルは強く実感していたので、80 年代に入る頃からレーザーを駆使した新しい分子現象の探索と解明に従事してきた。その一つが光ピンセットの化学研究で、今日の Ashkin さんのノーベル賞を幸せな気持ちで迎えた。この経験から、私は本当の研究のオリジナリティーを追求する本新学術の班員は、光圧の研究をしながら Beyond Photon Pressure を夢見て努力しているのだろうと思っている。石原新学術は、Beyond Photon Pressure、Post Photon Pressure、その種も生み出すだろうと期待している

共同研究紹介

超流動ヘリウム中のレーザーアブレーションによる CdSe 量子ドットの作製と評価

芦田 昌明・蓑輪 陽介（大阪大学基礎工学研究科、A02 班）

我々のグループは、大阪大学の伊都グループとの共同研究を通じて、可視光域での発光材料として有名な CdSe 量子ドットの超流動ヘリウム中での作製とその単一粒子分光に成功しました。このレーザーアブレーションを用いた作製手法は、光マニピュレーションの理想的な舞台である、粘性が低くブラウン運動の影響も小さな超流動ヘリウム中に量子ドットを分散させることができる強力な方法となります。

これまで我々は、超流動ヘリウム中におけるレーザーアブレーションによって真球度や結晶性が高い半導体微粒子の作製に成功してきました。1) そのうちミクロンサイズのものの特性評価は詳細に行ってきましたが、2) ナノサイズのいわゆる量子ドットの単一粒子としての光学特性は未解明でした。今回、単一分子分光にも経験豊富な伊都グループと共同研究を行うことで、個々の量子ドットが良好な光学特性を示すことを明らかとすることができました。

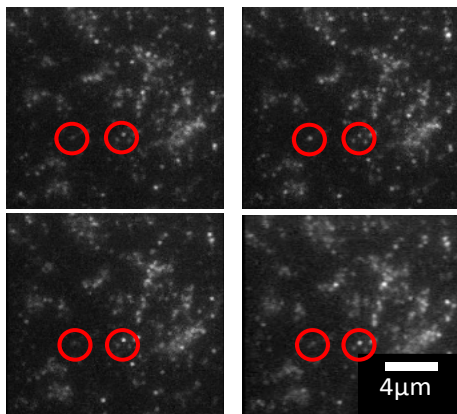


図1 作製された CdSe 微粒子群の光学顕微鏡像

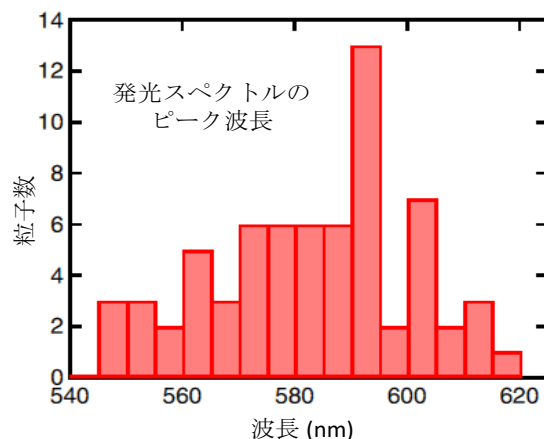


図2 CdSe 量子ドットの発光波長の分布

図1は作製された CdSe 微粒子の光学顕微鏡像の時間変化です。赤丸内の輝点の強度が経時変化する明滅現象が見られることから、これらが単一の量子ドットからの発光であることがわかります。3) また、図2に示す通り、発光波長は 540-620nm の範囲にありました。サイズに応じて発光波長が変化する量子サイズ効果を明瞭に観測したものと考えられます。

この成果は、A02 班の共同研究の重要な課題となっている、理想的な極低温環境と実用的な室温環境各々における光マニピュレーションの橋渡しにも大きな一歩となるもので、超流動ヘリウム中で作製された量子ドットを室温環境下で特性評価できること、そして実際に良好な量子ドットとしての特性を示すことを明らかとしたものと位置付けられます。理想環境下で作製された量子ドットやその配列構造の新規な機能が室温大気中でも期待されます。

参考文献：

1. S. Okamoto, et al., rts 4, 5186 (2014).
2. Y. Minowa, et al., Optics Express 25, 10449 (2017).
3. Y. Minowa, et al., Journal of Nanophotonics 13, 012506 (2019).



若手トレーニング道場

本領域では、新しい研究領域開拓のために、異分野の手法の交流を通じた若手研究者育成が不可欠との観点から、異分野手法若手トレーニング道場の活動を行うこととし、8つ道場を開催しています。

A：光源制御道場（担当：尾松孝茂 千葉大学工学研究院）

B：微細基板技術道場（担当：笹木敬司 北海道大学電子科学研究所）

C1：超精密力計測道場（担当：菅原康弘 大阪大学工学研究科）

C2：超高感度力計測道場（担当：秋田成司 大阪府立大学工学研究科）

D：光圧捕捉実践道場（担当：坪井泰之 大阪市立大学理学研究科 / 伊都将司 大阪大学基礎工学研究科）

E：微視的非局所光学応答理論道場（担当：石原一 大阪府立大学工学研究科）

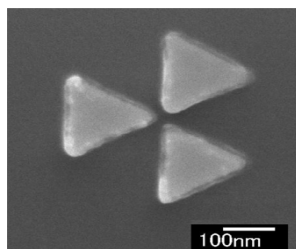
F：分子流体理論道場（担当：川野聡恭 大阪大学基礎工学研究科）

G：微粒子合成道場（担当：鳥本司 名古屋大学工学研究科）

B：微細基板技術道場 報告

笹木敬司（北海道大学電子科学研究所、A03 班）

2018 年 12 月 17 日～19 日に北海道大学において、微細基板技術道場を開催しました。領域内 3 グループから 3 名の学生（院生 2 名、4 年生 1 名）が受講生として参加しました。初日の午前中、笹木研究室において様々な形状の金ナノ構造を用いた最近の研究やナノ加工の流れについての座学を行い、初日午後からは、本学のナノテクノロジー連携研究推進室の小田島特任助教に講師をお願いし、場所も創成科学研究棟のクリーンルームに移動して行いました。最初に、入室の仕方や注意事項について学んだ後、こちらで準備した金ナノトライマー構造の CAD および EB 描画装置による描画までを行いました。二日目も朝からクリーンルーム作業を開始し、各自の描画した金ナノ構造基板のリフトオフ、洗浄を行いました。三日目には、各自が作製した金ナノトライマー構造の SEM 像観察を行い、終了となりました。各自が熱心に作業を行ない、ナノ構造作製の作業手順を一通り体験し、その雰囲気やテクニックを習得することが出来ました。



学生が試作した
金ナノトライマー構造



クリーンルーム内での作業の様子

アウトリーチ活動報告

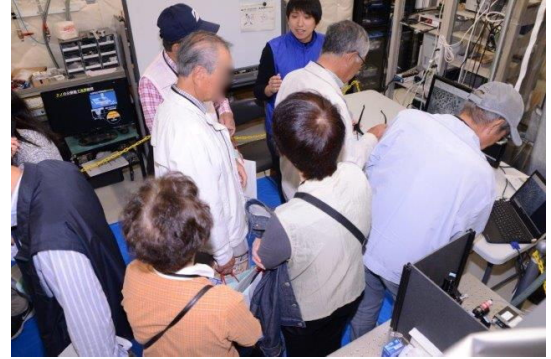
「分子科学研究所一般公開での光トラッピングデモ」

岡本 裕巳（分子科学研究所、A02 班）

去る 10 月 20 日（土）に、愛知県岡崎市の分子科学研究所一般公開が開催され、A02 計画研究の岡本の研究室の一部を一般市民に公開しました。研究室の公開では岡本グループの主要な計測装置である近



接場光学顕微鏡などの展示の他に、光トラッピングのデモンストレーションを行いました。ちょうど Ashkin 博士のノーベル物理学賞受賞の報せがあった直後でもあり、その点も交えて説明しました。一般の市民の方々にとっては、強い光で微粒子が捕まること自体の説明にも驚きと不思議な感覚をお持ちのようでしたが、それを実際のデモ実験機で見ることによって、感激された方も多かったように見受けました。光の焦点にポリマービーズが吸い寄せられるところがビデオ画面上で映し出されると、しばしば「おー！！」という声が上がっていました。当日は分子研全体で 4000 人近い市民が来訪し、岡本グループの研究室の入り口には常時大変な長い列の待ち行列ができており、ここだけでも恐らく 2000 人前後が訪れて、光トラッピングを見て行かれたのではないかと思います。訪れた方々はそれぞれに光トラッピングの面白さを知って帰られたと期待しています。



「大阪大学共創 DAY@EXPOCITY にて ～光の力で小さな粒を捕まえよう～」

横山 知大（大阪大学基礎工学研究科、A01 班石原 G）

大阪府吹田市のエキスポシティにて大阪大学のイベントが 11 月 17 日（土）にあり、新学術メンバーである石原 G・芦田 G・伊都 G（宮坂研）の合同でデモンストレーション用顕微鏡（以下、デモ機）での光ピンセット体験を企画しました。

大阪大学に近いとはいえ、会場が一般の商業施設ということで、ご来場いただいた方は小学生低学年以下の子供たちとそのご家族が多く、子供たちの新鮮な反応に我々も癒されるイベントとなりました。小さなものが顕微鏡で見えるというだけで面白いようでしたが、それを光で摘んで、何より顕微鏡に触れるということを楽しんでもらえました。複数個の粒子を一度につかめるとゲームの様に楽しめる様で、マイクロ流路をデモ機に活用できたらもっと印象に残るイベントにできるかなと思います。また、大型のモニターがあると印象が強くなると思います。親御さんは子供たちの安全対策用ゴーグルの姿が嬉しいと写真を撮られて



いました。研究を身近に感じてもらうためには我々の発想とは異なる視点が必要だと痛感するものでした。さて、当日は非常に盛況で、400 人程度の来場者がありました。行列が出来てしまう程で、待ち時間などが今後の課題です。JAXA のイカロスなども絡めて紹介させて頂き、そもそも光が物を押せるということに驚いている方が多く、子供たちだけでなくご家族皆さんに楽しんでもらえたイベントになったと思います。



2018年7月～11月、領域メンバーが次のアウトリーチ活動を行いました。（上記除く）

石原 一（A01 班 大阪大学基礎工学研究科）

8月2日 基礎工学部公開講座で市民向けに光圧に関する講演を行いました。

8月10日 阪大オープンキャンパス模擬講義（高校生向け）において光圧に関する講演を行いました。

坪井泰之（A04 班 大阪市立大学理学研究科）

10月30日 大阪府立天王寺高校において、光ピンセットに関するSSH講演を行いました。

11月14日 学校法人大阪医科薬科大学 高槻中学校において、「二度のノーベル賞に輝く驚異の光マニピュレーションの世界」を講演しました

11月24日 私立高槻中学校において、光ピンセットに関する講演を行いました。

鳥本 司（A04 班 名古屋大学工学研究科）

7月14日 愛知県立西尾高等学校において、光エネルギー変換、光圧、光化学の基礎に関する講演を行いました。

8月5日 小中学生を対象として、理科に興味を持ってもらうための実験講座（光科学の基礎の授業と、太陽電池について受講者各自が試作）を、トヨタ産業技術記念館において行いました。

9月22日 名古屋大学工学研究科に愛知県立西尾高等学校の生徒さんたちをお迎えし、光に関する模擬実験を体験していただきました。

杉山輝樹（A04 班 奈良先端技術大学院大学（台湾国立交通大学））

11月16日 私立高槻高校のSSH事業の一環で、生徒さんたちを台湾交通大学にお迎えし、サイエンスレクチャーを行いました。

金田 隆（公募班 岡山大学自然科学研究科）

9月23～25日 岡山県立玉島高等学校 SSH事業の一環で、生徒さんたちを岡山大学理学部にお迎えし、講演、実験、研究発表の指導を行いました。

告知板

- 2019年1月23日（水）-24日（木）に名古屋大学において本領域第3回公開シンポジウムを開催いたします。

- 2019年11月11日（月）-14日（木）に生田神社会館（神戸市）において、本領域共催の国際会議 The International Symposium on Plasmonics and Nano-photonics (iSPN2019)を開催いたします。

発行 新学術領域研究「光圧ナノ物質操作」総括班 E-mail: secretariat@optical-manipulation.jp
--