



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. 6

November 27, 2018

『三四郎がみた光圧』

河田 聡(ナノフォトン株式会社、セレンディップ研究所)

夏目漱石という文学者は、科学とくに『光』に興味があったように思います。『三四郎』に、こんなくだりができます。

『日は丘の向こうから、木立と女性と赤煉瓦の建物を横に『光』を通していた。』『この時三四郎の受けた感じはただきれいな色彩だということであった。』

『青い空の静まり返った上皮に白い薄雲が刷毛先でかき払ったあとのように、筋かいに長く浮いている。』野々宮博士が言います、『あれはみんな雪の粉ですよ。こうやって下から見ると、ちっとも動いていない。しかし、あれで地上に起こる颶風以上の速力で動いているのですよ。』

小説『三四郎』では、小川三四郎が野々宮宗八の実験室で光圧実験を見ます。しかし、夏目漱石が五高時代の生徒である寺田寅彦の実験室で見たのは、本当は弾丸の飛行の気波のシュリーレン写真でした。光圧測定の実験は、寺田がたまたま読んでいた論文を説明しただけらしいのです。

ちなみにこのシュリーレン法は、フックの法則やフックの顕微鏡で知られるあのロバート・フックの発明です。実は細胞をセルと名付けたのもフックです。重力についてもニュートンより先に発表しており、ニュートンとは光の波動性と粒子性について激しく争っています。

さて、野々宮博士は『雲母か何かで十六武蔵ぐらいの大きさの円盤を作って、水晶の糸でつるして真空のうちにおいて、この円盤の面に弧光燈の光を直角にあてると、この円盤が押されて動く』と説明します。三四郎が尋ねます。『野々宮さん、水晶の糸がありますか』『水晶の粉をね、酸水素吹管の炎で溶かしておいて、両方の手で左右に引っ張ると細い糸ができるのです。』要するに、今で言う光ファイバーです。

小説『三四郎』は今からちょうど110年前、1908年に出版されました。この文芸小説に描かれている110年前と現代と、光圧を含む先端科学研究はどちらがより大胆で挑戦的で先進的でしょう。最近の研究には、意外性が少なくなっているような気がします。できることしかやらない？私の友人（歳の離



れた)は今、人工流れ星の実験とエンタテインメントとしてのビジネス化を目指しています。すばらしい挑戦です。光圧なら人工彗星の実験も見てみたいですね。SFの世界では光圧宇宙船や光圧ロボット(マジンガーZは光子力で動くらしい)、太陽帆(ソーラーセイル:これはSFのみならず実用化している)など、楽しそうです。

私自身も、25,6年前に少し光圧実験に関わりました。ナノ微粒子や金属薄膜を放射圧で空中に浮かせたり、導波路や表面プラズモンで走らせたり浮かせたり、抗原抗体反応の力を測定したり、円偏光で微粒子を回したり、近接場顕微鏡プローブを放射圧で走査したりして、楽しみました。そのときに一緒に研究をした杉浦忠男君は、いま熊本にいます。熊本は『三四郎』の出身地です。三四郎は熊本から上京する汽車で、女性の『色』が京大阪に近づくにつれ次第に白くなると気づきます。いまだと差別的かもしれないませんが、素直に科学的に『色』の話です。細川藩の熊本は、地方都市です。地方分権国家であるアメリカや中国では地方都市はますます元気ですが、日本では元気がありません。大政奉還はともかく版籍奉還は間違いでした。日本もそろそろ中央集権行政から脱却して、地方の大学や産業、都市が元気になるような税制や自治制度を復活するのが良いと思います。

例によって話が逸れました。昨年1月にキックオフでのお話しさせていただいた内容の一部を、巻頭言に代えさせていただきます。以下、本稿の出典の一部です。

夏目漱石『三四郎』, 岩波文庫, 1908 : 河田聡『三四郎が見た光と色の科学』, OplusE, 2009 : 小宮豊隆『夏目漱石先生の追憶』, 寺田寅彦随筆集第3巻, 岩波文庫: 渡辺正隆『一粒の柿の種』(岩波「科学」に連載), 岩波書店, 2008 : 中島秀人『ロバート・フック: ニュートンに消された男』, 朝日選書, 1996

共同研究紹介

集光レーザー型光ピンセットによる八面体金ナノ粒子の捕捉

坪井 泰之・東海林 竜也 (大阪市立大学理学研究科)

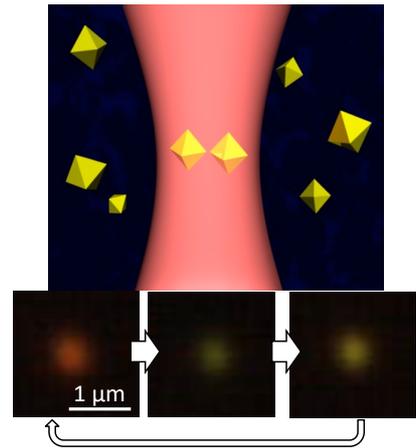
我々、坪井グループは鳥本グループ(名大)、飯田グループ(阪府大)との共同研究C「分子の選択的力学操作を通じた化学過程の制御」により、光圧により八面体金ナノ粒子を捕捉することで、ナノ粒子の配向を制御できることを明らかにしました。

金や銀などの貴金属ナノ粒子は、その大きさや形状、配向などに応じた特異な光物性を示します。この貴金属ナノ粒子を特定の向きに揃えて並べることができれば、表面増強ラマン散乱に代表される高感度分析手法に利用できますが、それらの配向を溶液中で人為的に制御することは困難を極めます。

そこで本研究ではナノ粒子の配向制御を目指し、水溶液中の八面体金ナノ粒子を集光レーザー型光ピンセットにより捕捉し、その捕捉挙動を顕微レイリー散乱分光法により明らかにしました。鳥本・亀山らが合成した八面体金ナノ粒子が分散した水溶液に、近赤外レーザー光を集光することで、ナノ粒子の光捕捉に成功しました。捕捉したナノ粒子は、局在表面プラズモンに由来する波長600 nm付近の光を強く散乱するため、鮮やかなオレンジ色を呈します。今回我々は、この金八面体ナノ粒子を光捕捉すると、オレンジ色から緑色や黄色に散乱光が一時的に変化する現象を発見しました。これは、これまでの光捕捉では見られなかった興味深い現象です。



この現象を明らかにすべく、顕微レイリー散乱分光法を実施しました。その結果、集光スポット内でナノ粒子を2個同時に光捕捉すると、650 nm 付近に新たな散乱ピークが出現することがわかりました。これは、2個のナノ粒子がある特定の配向状態を保って光捕捉されていることを示唆しています。この実験結果を理論的に解明すべく、飯田・田村らは有限要素法を用いて、ナノ粒子二量体の散乱断面積の波長依存性を数値計算しました。このときナノ粒子二量体は、頂点と頂点が接近した配向や面と面が接近した配向など、いくつかの配向パターンが考えられます。これらをつぶさに解析した結果、光ピンセットにより形成したナノ粒子二量体は、頂点と頂点が接近した配向をとっていると結論付けられました。



以上、本研究では溶液中で自然発生的に作ることが難しい貴金属ナノ粒子の配向を、光圧により人為的に制御することに成功しました。このような光圧により配向制御したナノ粒子を用いることで、光化学反応の反応性・選択性の向上や新奇光反応の開拓が期待できます。

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、次の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）

レーザー共振器設計の基本と連続波、Q スイッチ、モードロックなどのレーザーの基本動作を理解する。また、発振したレーザー光の波長変換や波面変調するための基本的な概念を理解する。初心者でも比較的発振させやすい半導体レーザー励起 Nd:YVO₄ レーザーを取り上げ、レーザー発振(連続波・パルス)させて、ビーム品質や自己相関波形を計測する。さらに、空間変調器を用いて発振させたレーザー光の波面変調を行い、光渦を発生させる。

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）

単一分子トラッピング・ナノマニピュレーションに活用するプラズモニックナノ構造体を作製する微細加工技術について、基礎知識から最先端技術のノウハウを領域の若手研究者・学生に伝授するとともに、実習実験を積み重ねて局在プラズモンに関する知見・データベースを領域全体で共有化し、各グループの技術と融合させることによりプラズモニックナノ操作技術を深化させて、領域共同研究の基盤とする計画である。履修内容は、①ナノパターン作製のための基礎的な技術に関する講義、②電子ビーム描画装置を用いたナノパターン形成実習、③スバッタ装置を用いたリフトオフ法によるナノ構造作製実習である。

C1：超精密力計測道場（担当：菅原康弘 大阪大学工学研究科）

微弱な力を高感度・高分解能に検出する計測技術を修得する。具体的な課題としては、①カンチレバーの力学特性とノイズ源について理解する、②高感度変位測定技術とノイズ源について理解する、③原子



間力顕微鏡による表面原子の撮像法を理解する。修行内容は、①微弱な力を高感度に測定するセンサーであるカンチレバーの力学特性を測定および様々なノイズ源の高感度な評価、②光の振れ角からカンチレバーの微小変位を測定する光てこ変位検出法の修得、周波数変調方式を用いた力検出法の修得、カンチレバーの機械的共振現象を用いた力の高感度検出の原理の理解、③大気中で様々な表面に働く原子間力を高感度・高分解能に測定する方法の修得である。

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）

履修科目は、①センサデバイス作成技術、②センサによる簡易測定系構築（身近にある装置を使って）、③測定の高高度化の3項目である。具体的な履修内容としては、①センサデバイス作成技術：CNT, 2D材料を用いた力計測デバイスを微細加工技術（フォトリソグラフィ、超臨界乾燥装置など）を使って作成が出来るようになる、②センサによる簡易測定系構築：光学顕微鏡やSEMといった汎用機器とパソコンを用いた画像解析による簡易測定法を習得する（特に今回のプロジェクトでは光学顕微鏡はほぼすべての研究機関が有しているため、製作したデバイスを簡単に持ち帰って試すことが出来る）、③測定の高高度化：専用の測定装置を用いた画像処理だけによらない高感度な計測技術を学び取る（PLLによる共振周波数トラッキングなど）。

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）

履修項目は、①レーザー光ピンセットの原理と装置の理解、②レーザー光ピンセットの光学系アライメントと分光計測、③プラズモン光ピンセットの実践である。具体的な内容としては、①レーザー光ピンセットの原理と装置の理解（光圧の原理と、光ピンセットの装置構成を理解する）、②レーザー光ピンセットの光学系アライメントと分光計測（実際に光学系に触れ、蛍光色素担持ポリスチレンビーズを光捕捉する光学系を構築するとともに、捕捉したポリスチレン粒子の顕微蛍光スペクトルを測定する）、③プラズモン光ピンセットの実践（入門生希望に応じた履修コースとして、貴金属ナノ構造を組み込んだ試料セルの製作やその取扱いを学び、プラズモン光ピンセットによるナノ粒子捕捉を実践する）ことである。

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）

履修科目は、①自己無撞着計算の原理習得、②光圧の具体的計算法、③計算プログラム使用法である。具体的な内容としては、③自己無撞着計算の原理（金属構造とナノ微粒子が共存する系では、光圧はナノ微粒子に対する外場だけでは評価できず、金属、ナノ微粒子、光の運動が自己無撞着に決まった結果得られる場を用いる必要があり、このような光学応答の原理を学ぶ）、②光圧の具体的計算法（Maxwell方程式の基礎から実際の計算まで学び、自己無撞着な場が決まれば体積積分、或いは表面積分などを用いて光圧を計算する）、③プログラムの使用法（上記、自己無撞着計算のために組まれたプログラムの使い方を習得し、自身の実験結果の解析を自分で出来るようにすると共に、必要なインターフェースを自ら構築してもらうこともある）である。

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）

①マクロスケールの流動現象を支配する Navier-Stokes 方程式に関し、有限差分法に基づく離散化スキームおよびその緩和法等を用いた陰解法シミュレーション技術を学ぶ。Fortran プログラミングにおけ



る高速化および高精度化、シミュレーション結果の可視化技法の演習も行う。②ナノ・マイクロスケール流動現象に対する統計力学的手法について、支配方程式となる Langevin 方程式や Boltzmann 方程式の背景と基礎を学ぶ。分子間衝突項のモデリングや、確率論的手法に基づく数値解析法の数理とプログラミング技術を修得する。③導入として、エネルギー最小原理に基づく変分法と第一原理計算による分子構造および電子状態解析の基本を学ぶ。光に共鳴する励起状態の計算手法についても紹介する。電子状態の時間変化に対するモデリング技術、長時間平均の安定化手法等、プログラミングを行いながら修得する。さらには、Schrödinger 方程式に基づく電子スケールと分子動力学法に基づく分子スケールを繋ぐ、新しい数理物理とその数値解析手法を学ぶ。

G：微粒子合成道場（担当：鳥本司 名古屋大学工学研究科）

量子ドットと呼ばれる半導体ナノ粒子は、そのチューナブルな物理化学特性を利用して発光素子生体分子マーカー等への利用が進んでいる。しかし市販されている Cd 系量子ドットは高毒性元素を含むために、実用用途には向かない。現在、ZnS-AgInS₂ 固溶体 (ZAIS) からなる量子ドットが、低毒性元素で構成されていること、粒子組成やサイズの制御によって自在に光学特性を変調できることから、次世代の量子ドットとして注目されている。本道場では、量子ドットの液相化学合成法の基礎を学ぶとともに、鳥本 G (名古屋大学) が開発した ZAIS 粒子について、そのサイズ・形状制御法を習得し、光学特性の変化を観察する。

D：光圧捕捉実践道場 報告

伊都将司 (大阪大学基礎工学研究科、A02 班)

坪井泰之 (大阪市立大学理学研究科、A04 班)

本年 10 月 16 日~18 日、坪井グループ、伊都グループの研究室メンバーが講師となり、光圧捕捉 (レーザー光ピンセット) 実践道場を大阪市立大・坪井研究室で開催しました。受講生は領域内 3 グループから 5 名の大学院生でした。初日、東海林講師 (坪井 G) が講義形式でレーザー光ピンセットの駆動原理と光学系構築のポイントを解説しました。二日目は実験室に移動し、2 台の光ピンセットブースに分かれ、顕微鏡にレーザーを導入する光学系の調整から実技トレーニングがスタートしました。受講生たちは二日間の実技トレーニングにより、捕捉光学系の構築、観察と分光計測光学系の構築から光学微粒子を実際に捕捉し、その蛍光スペクトルを測定する一連のテクニックを習得することが出来ました。

国際会議報告

「第 12 回凝縮系における励起子及び光学過程国際会議」

石原 一 (大阪府立大学工学研究科)

2018 年 7 月 9 日~13 日、本新学術領域を共催として第 12 回凝縮系における励起子及び光学過程国際会議 (12th International Conference on Excitonic and Photonic Processes in Condensed Matter and Nano Materials : EXCON 2018) が奈良春日野国際フォーラム 豊において開催されました。EXCON は「バルク



から分子材料・生体物質等を含むナノ構造体までの様々な凝縮系の励起状態」を議論する場として、1994年に Darwin (オーストラリア) で第1回が開催され、豪州、欧州、北米大陸、日本で回り持ち、今回で12回目を迎えています。今回の会議では新学術領域メンバーが中心となる「光圧特別セッション」が設定され、光圧科学の最前線がアピールされました。

本会議にはプレナリー講演者としてお招きした THz・超高速量子光学の分野で著名な Alfred Leitenstorfer 教授 (ドイツ、コンスタンツ大学)、有機エレクトロニクスの権威、安達千波矢教授 (九州大学) をはじめとして、13カ国より250名を超える参加者があり、有機材料、2次元物質からプラズモニクスなどを含む最先端のトピックスについて議論されました。光圧セッションでは領域代表のプロジェクト紹介に引き続き、デンマークからお招きした Lene B. Oddershede 教授、中国からお招きした Xiaohao Xu 博士、また領域からは笹木敬司、岡本裕巳、尾松孝茂の各計画研究代表者により、それぞれの先端的研究が紹介されました。さらに領域の若手研究者による力の入った講演もなされ、印象的なセッションとなりました。また EXCON2018 では一般講演においても本新学術領域から多数の参加があったことが特徴的で、本領域のプレゼンスを大いに高める会議となりました。

バンケットでは奈良の利き酒を楽しみ、またエクスカージョンでは法隆寺の世界遺産の数々を鑑賞した後、茶の湯・わび茶発祥地にある慈光院などを訪れ、国内外の参加者が奈良の文化を満喫しました。さらに最終日には奈良コンベンションビューロー、及び東大寺の特別な計らいで、通常は入れない大仏像の直近での見学会があり、多くの参加者が東大寺住職の直々の解説を楽しむことが出来ました。



奈良春日野国際フォーラム豊正面玄関での集合写真

次回の EXCON はスウェーデンのルンドでの開催が予定されています。そのときには再び本新学術の大きな成果が披露できることを期待しています。

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