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. 9 January 24, 2020

巻頭言

谷田貝 豊彦（宇都宮大学）

光圧で思い浮かべるのは、「ロシュワールド」である。もう 30 年以上前になるかと思うが、初めて「ロシュワールド」に出会って、そのスケールの大きさに衝撃を受けた。6 光年[1)] 先のバーナード星系に、光圧を利用した恒星間宇宙艇プロメテウス号で 40 年の飛行をする壮大な S F である[2)]。その当時の宇宙旅行といえばせいぜい太陽系内の世界であったが、この S F で本格的に舞台が恒星間に広がった。

バーナード星は、ケンタウルス星系に次いで太陽系に近い恒星である。太陽に比べると温度が低い赤色矮星で、この恒星には、惑星が存在すると報告されたのは 1960 年代であった。二つの惑星がバーナード星の周りを公転しているとされた。その後、この観測結果は測定誤差であるとして退けられてしまったが、当時の人々にとって、地球外惑星、地球外生物、異星人などが現実味を帯びてきたことは容易に想像できよう。「ロシュワールド」が書かれたのは 1985 年、日本語に翻訳されたのは 1986 年であった。2018 年、再びバーナード星に惑星が公転していることが発見された[3)]。この惑星は、1960 年代に“発見”されたものとは異なりバーナード星 b と呼ばれている。公転周期は 233 日、質量は太陽の 3.2 倍、表面温度は約 170° K であると推定されている。

さて、光圧の話に戻ろう。恒星間宇宙艇プロメテウス号の推進力は、光圧による。まず、水星近くに建設された太陽光励起のレーザー群が、プロメテウス号の推進に必要な 1.3PW のエネルギー生み出す。レーザーの数は 1000 であり、各々は 1.3TW 出力の赤外レーザーである。幅 30km の集光器に入射する太陽光エネルギーは 6.5TW であるので効率は 20%である。各レーザービームは、数キロ離れたビーム統合器システムに導かれる。各ビームは、直径 100 メートルに及ぶホログラムレンズ（プラスチック製フレネル輪帯板）に当てられ、1000 本のビームはビーム統合円筒に集められ、1.3PW のコヒーレントな単一ビームになる。ビーム統合器にはビームの方位を変える鏡も搭載されている。また、土星と天王星の軌道の中間に伝送レンズが設置され、直径は 100km に及ぶ。飛行の最初の 5 年間は、この大きさ

でもよいが、最終的には直径が 1000km にまで拡張する計画である [4]。

プロメテウス号だが、長さは 66m、直径 20m の円筒形で、直径 1000km の光帆にぶら下がっている。光帆はハニカム構造の超薄アルミニウム製である。

いよいよ出発の時が来た。水星近くのビーム統合器からレーザー光が発せられ、土星との間に漂う伝送レンズにレーザー光が 2 時間後に到達する。二日後に、光帆が光圧を受けて膨らんでくる。乗務員たちの体がゆっくりと床に下降してゆく [5]。

光圧推進の宇宙艇での最大の問題点は、目的の天体に到着時にどのようにして停止するかだ。（常識的に考えると、到着地点にも逆推進用の光源が必要である。）プロメテウス号は、どのようにして着陸したのだろうか。また、40 年の長期にわたり、本国は（大アメリカ合衆国、この時、ケベック州を除くほとんどのカナダの州がアメリカ合衆国に統合されている）この計画を続けることができるのか。実は、伝送レンズの 1/3 が破壊される事故が起こり、また、いつまで続くかわからないプロジェクトに対して、議会の予算が削られ伝送レンズ建設は遅々として進まない。このような数々の困難をどのように克服したのであろうか。乗組員は地球に帰還できたのだろうか。

前置きが長すぎたが、本新学術領域研究での目的、手段、社会的背景などと、「ロシュワールド」の世界となんと共通点が多いことだろうか。もちろん、ナノの世界と光年の世界の話で、スケールは真逆（10^{-9}m から 10^{16}m）であるが。プロジェクトが始まる前に予想される困難（宇宙艇停止の問題）また、プロジェクト中に発生する困難（予算削減、レンズの破壊）を解決するには、乗組員、地上のサポーター（研究者ばかりでなく行政も）の密接な連携が必要であろう。プロジェクトが真に成功と評価されるには [6]、本質的な困難（本新学術領域研究では何か？）のいくつかも克服する必要があろう。などと考えながら、寝正月を過ごした。

脚注

1) 光年（こうねん）は、一年間に光が進む距離で 9.46×10^{15}m である天文学の用語であることはご存じであろう。ところが、これを「ひかりねん」と呼ぶことになった年があった。2015 年である。この年は、UNESCO が定めた International Year of Light の年であった。わが国でこれをなんと呼ぼうか、研究者間で議論が巻き起こった。一番すなおには、国際ひかり年がいいように思うが、天文関係者からは強い反対意見がでたことは当然であった。最終的には、“深く考えない”ことで収まったようである。ところで、International Day of Light（https://www.lightday.org/）があることはご存じあろうか。毎年、5 月 16 日に、各国で“盛大な”イベントが行われている。

2) Robert L. Forward: “The flight of the dragonfly”, Pocket Books by Simon & Schuster, Inc. 1984. 邦訳：ロシュワールド、山高昭訳、ハヤカワ文庫(1985)。原著者の Forward(1932-2002)は、米国の物理学者で、長年 Hughes Aircraft に勤務し、重力波の検出の研究、光帆、宇宙船推進力などの研究がある。

3) Ribas, I. et al.: “A candidate super-Earth planet orbiting near the snow line of Barnard’s star”. Nature 563 (7731): 365-368(2018).

4) バーナード星にレーザー光が到達するまでに、伝送レンズからの遠赤外レーザービームがどのくらい広がるか見積もってみよう。ビーム径 D：1000km、波長 λ：1.5 μm、距離 L: 6 光年=6×9.46×10^{15}m とすると、ビームの半径は δ=1.22 λ L/D=10km で、直径は 20km となる。伝送レンズに多少の誤差や制御ミスがあろうと、レーザーのエネルギーは直径 1000km の光帆をもつ宇宙船に伝送されるであろう。さすが、物理学者 Forward さん。

5) 出発から 20 年後、プロメテウス号の速度は 0.01G にまで加速され、光速度の 20%に達し慣性飛行に入る。太陽系から 2 光年、バーナード星から 4 光年の位置にあった。

6) バーナード星調査隊からの報告は、2076 年 1 月 14-15 日に大アメリカ合衆国下院科学技術委員会での公聴会で討議された。アメリカ独立 300 年の年。

共同研究紹介

集光ラゲールガウシアンビームの光圧によるキラル結晶化のエナンチオ制御

杉山 輝樹（奈良先端科学技術大学院大学、A04 班）

我々のグループでは、千葉大学の尾松グループとともに、共同研究 B「粒子間相互作用の制御と結晶等の階層構造創製」として、集光ラゲールガウシアンビームの光圧によるキラル結晶化のエナンチオ制御に関する研究を行っています。

キラル結晶とは、結晶内の分子配列に回映軸が存在しない結晶のことです。分子が不斉炭素を有するキラル分子の場合には、その析出した結晶は必ずキラリティーを示します。一方、アキラル分子の場合には、その結晶には統計的に約 8%の確率でキラリティーが発現します。一般的に、キラル結晶化とは後者の場合を指します。このキラル結晶には 2 種類のエナンチオマー（鏡像異性体）が存在し、全く不斉外場がない条件下では各々の生成確率は理論上 1:1 に収束します。本研究は、集光ラゲールガウシアンビームが示すキラルな光圧によりこのキラル結晶のエナンチオマーを制御し、地球生命におけるホモキラリティーの起源の解明や医薬品のエナンチオ分離の研究に貢献したいと考えています。

今回、塩素酸ナトリウムの重水溶液をサンプルとして使用し、さらに溶液中に 150 nm の金ナノ粒子を分散させています。光圧を溶液に作用させた場合に観察される結晶化挙動を図 1 に示します。照射後、最初に金ナノ粒子凝集体が捕捉され、その凝集体が軌道角運動量の方向に応じて回転する様子が観察されました（図 1a）。続いて、複屈折性を有するアキラル結晶が析出し（図 1b）、その後、複屈折

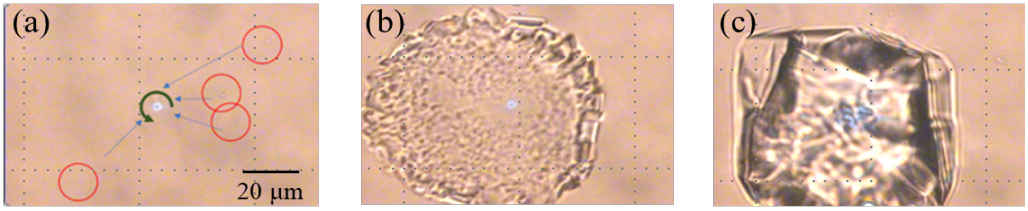


図 1 光圧による塩素酸ナトリウムのキラル結晶化の挙動

性を示さないキラル結晶への転移が観察されました（図 1c）。この実験を、ラゲールガウシアンビームの全角運動量量子数をパラメータとして各 30 サンプルずつ行い結晶鏡像体過剰率を見積もったところ、軌道角運動量に非常に強く依存し、50%を超える大きな鏡像体過剰率を示すことが分かりました。一般的に、核生成が起こる臨界核の大きさは非常に小さく（大きくても数ナノメートルオーダー）、ラゲールガウシアンビームのモード半径はもちろん、光の波長に比べても極めて小さいため、どのようにラゲールガウスビームの軌道角運動量がキラル結晶の利き手を決定しているのかについて、これから解き明かしていく必要があります。

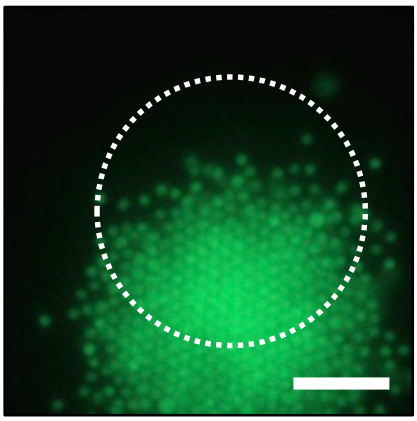
共同研究紹介

ランダム配列ナノ起伏上の広域レーザー照射によるナノ粒子群の大領域規則配列現象

花崎 逸雄（東京農工大学、2017-2018 公募研究）
東海林 竜也、坪井 泰之（大阪市立大学理学研究科、A04 班）

光圧によるナノ粒子の捕捉は、単一粒子の捕捉技術の観点からは、粒径が小さいほど光圧の確保が困難になるという課題への対処が必要です。これに対しては、レーザーの出力を高めたり、プラズモンの原理を活用する試みがなされてきましたが、捕捉を阻害する対流などが発生する原因となる温度上昇を抑えながら光圧を確保する上で、ランダムに配列したナノニードル群を基板として活用する NASSCA 技術[1]が近年注目されています。さらに、本新学術領域の重要な共同研究コンセプトの 1 つに「粒子間相互作用の制御と結晶等の階層構造創製」があります。ここで留意すべきこととして、単一粒子の捕捉と多数の粒子を捕捉することは、共通点はあるにせよ同一の技術課題ではない、ということです。

そもそも単一粒子を捕捉する場合でも、力場形状のあるべき基礎的条件が明らかになったのはごく最近です[2]。まして、数多くの粒子を捕捉して結晶などの構造を実現するとなれば、なおさら未知の領域が広大に残っています。粒子間の相互作用と光圧の共存により、集団的な挙動が現れることもあります[3]。このような観点から、私達は NASSCA の技術を使い、敢えて焦点の絞りに限界のある産業用レーザーを活用することにより、粒径 500nm のポリスチレン粒子群を直径 10um 以上の大面積で捕捉し、しかも規則的な配列を実現しました[4]。あたかも二次元のフォトニック結晶のようです。その様子を図に示します。基板上のランダムなナノニードル構造 1 本はナノ粒子 1 個よりは小さいものの、個々のニードルの存在が無視できるほど空間的な特徴スケールに差はありません。そのことを鑑みれば、ランダムな起伏構造上に整然と並んだ結晶構造が出現することはやはり相当に意外な現象です。



ブラックシリコン上に光補足で形成された 2D コロイド結晶構造. Scale; bar = 5 μm.

ランダムな配列のまま捕捉することに対して結晶配列を実現できる条件は異なっている可能性があります。このような規則配列を発見する上では、膨大に考えられる実験条件因子の中から的確な追究を行う必要があります。NASSCA を集団構造形成につなげるために、焦点を絞り切らないレーザーを使うことに加え、

ランダムな起伏の影響を考慮して十分に場所を変えてサンプリングする必要があることにも着眼するのは、異なる専門性を有する共同研究者のチームによる相乗効果の一端です。「光圧によるナノ物質操作を秩序の創生」においては光学的な側面の追究だけでなく、それが物質操作を通じていかにして秩序の創生につながるのかという段階で、有限温度で必ず伴うナノ物質のランダムさに満ちたダイナミクスを取り扱う視点がカギを握ります。また，現象を明らかにする上で顕微鏡動画データ解析が担う役割も重要となります[5]。

[1] T. Shoji, A. Mototsuji, A. Balytis, D. Linklater, S. Juodkazis, Y. Tsuboi, *Sci. Rep.*, **7**, 12298 (2017).
[2] I. Hanasaki, T. Nemoto, and Y. Y. Tanaka, *Phys. Rev. E*, **99**, 022119 (2019).
[3] I. Hanasaki, and C. Hosokawa, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **58**, SDDK07 (2019).
[4] I. Hanasaki, T. Shoji, Y. Tsuboi, *ACS Appl. Nanomaterials,* **2**, 7637 (2019).
[5] I. Hanasaki, K.Okano, H.Y. Yoshikawa, T.Sugiyama, *J.Phys.Chem.Lett.*, **10**, 7452 (2019).

国際会議参加報告

ICP2019　参加報告

坪井 泰之（大阪市立大学理学研究科、A04 班）

International Conference on Photochemistry（ICP）は、IUPAC 光化学国際会議と並んで世界最大の光化学関係の国際会議であり、50 年以上の歴史を誇り、由緒と伝統ある光化学の「本場所」とも言うべき会議です。筆者は、三澤弘明教授（北大）と共に、この会議の運営委員を務めています。昨年（2019 年）の本会議は米国コロラド州のコロラド大ボールダー校にて開催されました。緑に恵まれ、広々としたとても美しいキャンパスでした（写真）。

会場となったコロラド大ボールダー校のキャンパス

会議のハイライトは、レジェンド教授陣のプレナリー講演でした。グラハム・フレミング教授（UC バークレー、超高速分光）、マイケル・ワジエルスキー教授（ノースウェスタン大、有機物理化学）、デイヴィッド・マクミラン教授（プリンストン大、光レドックス触媒）、ポール・マルバニー教授（メルボルン大、プラズモン化学）などの超豪華メンバーの講演は迫力満点で、日本からは本領域の評価委

員でもある増原宏先生（台湾・国立交通大、光マニピュレーション化学）も講演されたことは領域としても大変誇らしいことでした。

本会議での講演・発表件数は以下のとおりでした（カッコ内数字は所属機関が日本のもの）。プレナリー講演 8 件（0）、招待講演 56 件（2）、口頭発表 183 件（18）、ポスター発表 148 件（27）で、例年と比べて日本からの参加者は少ない印象でした。講演・発表される分野については、伝統的な有機光化学と分光物理化学はもはや主軸分野とは言えなくなるくらいバラエティに富み、環境光化学、材料・デバイス化学、プラズモニック化学、マイクロ化学、ナノ粒子科学、それに光触媒など多岐の話題に渡っていて、それぞれの話題の最先端を大いに楽しむことが出来ました。

講演会場の様子

一方で、米国の大学の開催らしく（？）、ホスピタリティーは必ずしも行き届いたものではなく、キャンパス内で迷子になる人や、夕食のレストランを求めて長らくさまよう人も少なくなかったようです。主催者の意向で「ペーパーレス」を標榜した会議でしたが、各種案内が少なく、ダウンタウンエリアから会場までのアクセスが不便であっただけにもう少し情報があると助かりました。

少し先の話にはなりますが、2023 年 ICP は 20 年ぶりに日本で開催され、札幌が会場になります。盛会で、かつ親切で不自由なく夏の北海道を多面的に楽しんでいただける会議を目指していますので、関連分野の皆様には、是非ご支援をお願い申し上げます。

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