

# 光ピンセットの分析化学への展開

東海林 竜也

## 1 はじめに

光により微小な物質の運動を制御し、自在に操作する技術を、光マニピュレーションと呼ぶ。この光マニピュレーションは、ノーベル物理学賞に二度輝いている。最初は1997年に、Steven Chuら3氏に「developments of methods to cool and trap atoms with laser light (レーザー光を用いた原子の冷却および捕捉法の開発)」の功績で授与された。このレーザー光による原子操作技術は、レーザー冷却と呼ばれる。二度目は2018年に、Arthur Ashkin氏に「optical tweezers and their application to biological systems (光ピンセットとその生物系への応用)」の功績で授与された。レーザー冷却も光ピンセットも、後述する光の運動量を利用している点は共通している。本稿で扱う光ピンセットは、主として室温付近下で液相中または気相中の $\text{nm} \sim \mu\text{m}$ オーダーの微粒子を捕捉・操作する技術として知られている。

光ピンセットを用いることで、溶液中を浮遊する細菌や細胞などの $\mu\text{m}$ オーダーの微粒子を捕まえたり、空気中の水滴や高分子微粒子を捕まえたり、操作したりできる。光ピンセットの用途は多岐にわたるが、本稿では分析化学の観点から、光ピンセットを用いた力計測法と顕微分光分析法に焦点を当てる。

## 2 光圧の原理

光子1個がもつ運動量 $\mathbf{p}$ は、 $(h\nu/c) \hat{\mathbf{u}}$  ( $h$ : プランク定数,  $\nu$ : 光の周波数,  $c$ : 光の速度,  $\hat{\mathbf{u}}$ : 光子の運動方向を示す単位ベクトル) で与えられる。例えば、波長 $1064 \text{ nm}$ の光子1個の運動量は、 $6.23 \times 10^{-28} \text{ N s}$ と求まる。この光子が物質表面に衝突したとき、光子の運動量が変化する。それに伴い物質には作用反作用の法則に従い光の力(光圧)が作用する。例えば、市販のレーザーポインターのような光出力 $1 \text{ mW}$ の連続発振型の可視レーザー光(光子数約 $10^{15}$ 個)が、鏡に垂直に入射し(図1(a)の光線 $\mathbf{r}_i$ )完全に反射したとき(図中 $\mathbf{r}_r$ )、運動量変化は $-2\mathbf{p}$ であり、この運動量変化分が鏡を押す

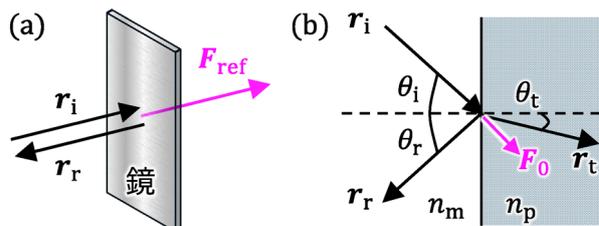


図1 幾何光学的な光圧の考え方

(a)鏡に光が垂直入射したとき、(b)透明物質に角度を持って光が入射したとき

光圧となる(図中 $\mathbf{F}_{\text{ref}}$ )。このときの光圧は、約 $7 \text{ pN}$ と求まる。この力は日常生活では無視できる程に微弱であるが、後述するキネシンに代表されるように $\text{nm} \sim \mu\text{m}$ 領域で働く力に光圧は十分匹敵する。

この光圧を用いた微粒子の捕捉・操作技術を光ピンセットと呼ぶ。微粒子に対する光のふるまい方は、微粒子の大きさ(粒径)により変わる。そのため微粒子を球体としその直径(粒径)を $d$ 、光の波長(真空中)を $\lambda$ とすると、 $d \gg \lambda$ のときは幾何光学的に、 $d \ll \lambda$ (Rayleigh散乱)のときは波動光学的に光ピンセットの原理を取り扱うことができる。幾何光学的に取り扱うと光ピンセットを直感的に理解しやすく、Rayleigh散乱領域では理論的な議論がしやすい。なお、その中間である $d = \lambda$ のMie散乱領域は複雑な電磁気学的取り扱いが必要になるが、幾何光学およびRayleigh散乱による原理から推測できる。光ピンセットを理論的に理解するためには、上記三つの領域における光のふるまい方を考えなければいけないが、定性的には同じ結論に至る。いずれの場合も、微粒子に働く光圧は、一つは光の空間的な強度分布により集光付近へと粒子を引き寄せるとある勾配力(gradiant force;  $\mathbf{F}_{\text{grad}}$ )と、もう一つは光の進行方向に粒子を押し出す力である散乱力(scattering force;  $\mathbf{F}_{\text{scat}}$ )の二つに大別できる。この二つの足し合わせの結果、集光付近から光の進行方向に少しずれた位置にて粒子は捕捉される。

### 2・1 粒子が波長より十分に大きい場合（幾何光学）

図1(b)に示すように、媒質（例えば空気や水）（屈折率  $n_m$ ）から1本の光線が透明材料（屈折率  $n_p$ ）に入射したときの光（光線  $r_i$ ）の運動量変化を考える。材料と周囲の屈折率に差がある場合、光線の一部は物質表面で反射（ $r_r$ ）、または入射角  $\theta_i$  と屈折率の違いに応じ屈折し、材料内部に透過（ $r_t$ ）する。このとき、スネルの法則より屈折角  $\theta_t$  を、フレネルの式より反射率および透過率を求めると、光圧  $F_0$  を式(1)より得られる。

$$F_0 = \frac{n_m P_i}{c} \hat{u} - \frac{n_p P_t}{c} \hat{v} - \frac{n_m P_r}{c} \hat{w} \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 $n_m, n_p$  は媒質および材料の屈折率、 $P_i, P_t, P_r$  は入射、透過、反射光の光出力、 $\hat{u}, \hat{v}, \hat{w}$  は入射、透過、反射光の進行方向を示す単位ベクトルである。屈折による運動量変化に伴い粒子に働く力が勾配力、反射に伴い作用する力が散乱力に相当する（図1(b)には描画を省略）。複数の光線が入射したとき、各光線の合力として光圧を求める。

マイクロ粒子に作用する光圧の向きと大きさは、レーザーの波長、偏光、光出力や強度分布、捕捉対象物の粒径、形状、屈折率等に大きく依存する。ここでは、シンプルな光捕捉例として図2(a)に示すように、真球のマイクロメートルサイズの誘電体を顕微鏡の対物レンズで集光した1本のレーザー光を用いて光捕捉した場合を考える（装置構成については3章で述べる）。光ピンセットで主に使用されるレーザー光は、強度分布が光軸を中心にしてガウス分布とみなせる gaussian ビームである。そのため、ビームの中心軸上で強度が最も強く、

周縁部に向かうにつれ弱くなる。図2(a)にはビームの中心部の光線  $r_1$  と周縁部の光線  $r_2$  を図示した。各入射光（ $r_{i,1}, r_{i,2}$ ）の一部は界面で屈折し粒子内部に透過する。その後、粒子内部と媒質の界面でも屈折し、透過光として粒子から出射される（ $r_{t,1}, r_{t,2}$ ）。光線  $r_1$  と  $r_2$  のそれぞれの運動量変化の総和  $\Delta p$  より、粒子には集光点方向に向く勾配力が働く。このように、レーザー集光付近に粒子があれば、光の屈折に伴う勾配力は粒子がどの位置にあっても集光方向に働く。焦点に粒子が位置すると、各光線の勾配力の総和はゼロとなり、焦点位置にて粒子は捕捉される。実際には、勾配力と同時に各界面での反射による散乱力も作用するため（反射光は図示していない）、勾配力と散乱力の総和により、粒子は集光位置から光の進行方向に少し押された位置にて捕捉される。

### 2・2 粒子が光の波長よりも小さい場合（Rayleigh 散乱）

光の波長よりも粒径  $d$  が十分小さい物体（ $d \approx 0.1\lambda \sim 0.2\lambda$ ）による光の散乱現象を Rayleigh 散乱という。粒子に光が当たると、光電場により粒子が分極する。粒径が波長よりも十分小さい場合、分極を1個の双極子として近似できる（双極子近似）。双極子に働く光圧は、電磁波の空間的な勾配に起因する勾配力と、Rayleigh 散乱（双極子による一時的な光吸収とその後の輻射）に起因する散乱力に大別できる。この光圧  $F$  をローレンツ力より導出すると、式(2)が与えられる。

$$F = \frac{1}{2} \alpha \nabla |E|^2 + \alpha \frac{\partial (E \times B)}{\partial t} \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 $\alpha$  は粒子の分極率、 $E$  は光の電場、 $B$  は光の磁束密度、 $t$  は時間である。式(2)の右辺第一項は勾配力を、第二項は散乱力を表す。第一項は勾配力が分極率と光電場の2乗（ $\propto$  光強度）の空間的な傾きに比例することを示している。勾配力は光強度が最大すなわち集光方向に働き、集光位置でゼロとなる。第二項は、Rayleigh 散乱を起こす前後の双極子の運動量の時間変化を表している。入射光の一時的な吸収により双極子は入射光の運動量を受け取る。その後の入射光のエネルギーを全て放出する輻射過程に伴う運動量変化は、輻射光の向きが前後対称に分布するためゼロとなる。結果的に散乱力は入射光の進行方向に向かう押す力として双極子に作用する<sup>1)</sup>。

光の波長よりも小さなナノ粒子や分子は、溶液中では熱揺らぎによりブラウン運動をしている。そのため、光圧のポテンシャルエネルギー  $U$  が、ブラウン運動由来のエネルギー  $k_B T$  ( $k_B$ : ボルツマン定数、 $T$ : 絶対温度) より十分高くなければ粒子は捕捉されない。この光圧のポテンシャルエネルギーの近似解は、次式で得られる<sup>2)</sup>。

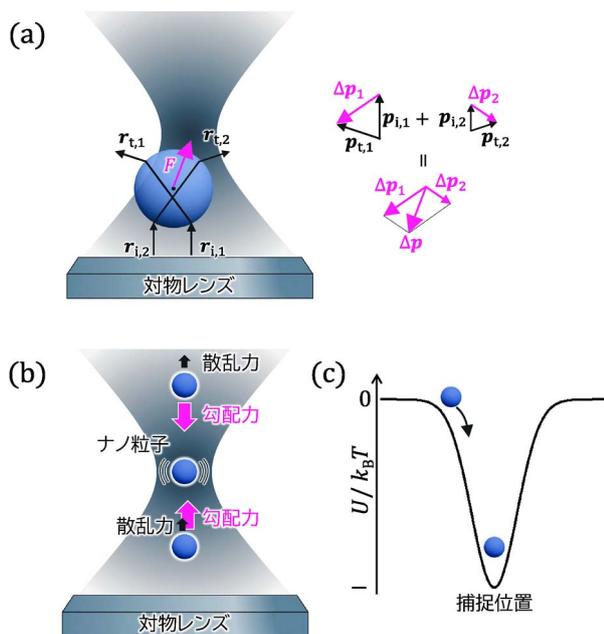


図2 (a) 光の波長よりも大きな微粒子の光捕捉、(b) 光の波長よりも小さな微粒子の光捕捉の模式図

$$U = \frac{2\pi n_m r^3 (n_p/n_m)^2 - 1}{c} \frac{2P}{\pi w_0^2} \dots\dots\dots (3)$$

ここで  $c$  は光速 [m/s]、 $r$  は粒子の半径 [m]、 $P$  はレーザー光の出力 [W] である。 $w_0$  はガウシアンビームの集光位置におけるスポットサイズ (光強度が光の中心軸上の値から  $1/e^2$  になる半径) である。 $U > 10 k_B T$  のとき、粒子を安定的に捕捉できる (図 2(c))。

### 3 光ピンセットの実際

現在では、光ピンセット装置が複数の会社から市販されており、光学部品を揃えて独自に装置を組まずとも実験可能である。ここでは、光ピンセットに必要な構成部品について述べる。光ピンセット装置の概略図を図 3 に示すように、連続発振型 (continuous wave; cw) のレーザー、光学顕微鏡、レーザー光を顕微鏡に導入するための光学部品、観察用のモニター (CMOS カメラとコンピュータ) で構成される。これに加えて、顕微分光測定のための光源や検出器、光圧の力を計測するための位置検出 (変位計測) 器や、捕捉位置変更のためのガルバノミラーやピエゾステージなどを組み合わせることがある。

#### 3.1 レーザー

選定には、発振波長、光出力、集光特性、安定性が重要である。これら条件を満たしかつ導入コストの観点から、Nd:YAG や Nd:YVO<sub>4</sub> などの DPSS レーザーがよく用いられている。筆者らは、捕捉物の顕微蛍光/ラマン測定を行うことから、捕捉対象物の光吸収がない発振波長 1064 nm の cw レーザーを用いることが多い。捕捉試料を主に水溶液に溶解させることが多いが、その際には溶媒の光吸収に伴う熱発生に注意する必要がある。軽水 (H<sub>2</sub>O) は、波長 1200 nm 近傍に OH 伸縮振動の倍音に対応する吸収があるため、1064 nm のレーザー光を集光すると、無輻射失活に伴う焦点位置の温度上昇が引き起こされる。集光条件によるが、光出力 100

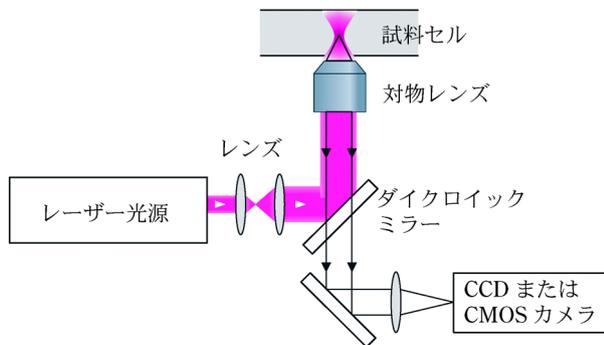


図 3 光ピンセット装置の概略図  
レーザー光源、顕微鏡 (対物レンズ)、観察用カメラ、光学部品 (レンズ、ミラー) からなる

mW あたり 1~2℃ の温度上昇が報告されている<sup>3)4)</sup>。温度上昇を避けるためには、高価ではあるが光源としてチタンサファイアレーザー (波長可変領域  $\lambda = 725 \sim 975$  nm) を導入したり、軽水の代わりに重水 (D<sub>2</sub>O) を使用したりすることで対応できる。

#### 3.2 光学顕微鏡

正立型、倒立型顕微鏡どちらでも光ピンセットに使用できる。図 3 は倒立型顕微鏡を用いたときの概略図である。対物レンズの選定は極めて重要であり、強い光圧を作用させるためには高開口数 (1.2 以上) かつ透過率の高い対物レンズが用いられる。透過率の波長依存性は対物レンズの種類によって大きく異なるため<sup>1)</sup>、不明な場合はメーカーに問い合わせる。

#### 3.3 力計測用位置検出センサー

粒子に作用する光圧を計測する機器として、高速高精度デジタルカメラまたは四分割フォトダイオードがよく用いられる。光ピンセットの力計測はこれら機器とソフトウェアが一体化となって市販されている。

#### 3.4 分光測定用構成部品

光捕捉した微粒子からの分光情報を取得するため、捕捉光源用のレーザーと同軸で可視レーザーをビームエキスパンダーおよびミラーなどの光学部品を用いて導入することがある。捕捉対象物からのシグナルを選択的に取得するための共焦点光学系用のピンホール、および分光器と CCD などの検出器を用いる。

#### 3.5 捕捉対象物

以上の装置構成からなる光ピンセットを用いれば、あらゆる物質を捕まえることができるだろうか。原理から考えると、(i) 媒質 (例: 水や空気) よりも捕捉対象物の屈折率が大きいこと、(ii) 捕捉光 (レーザー光) の吸収や反射が少ないこと、が捕捉条件として挙げられる ((i), (ii) の条件を満たさない物質でも光学系を工夫することで捕捉できることもある)。この条件を満たせば、市販品でも多くの  $\mu\text{m}$  オーダーの物質は捕捉可能であろう。具体的には、赤血球などの細胞やポリスチレンやシリカからなる透明微小球などが挙げられる。さらに高価ではあるが、高出力 (出射口で 3 W 以上) かつ高い集光特性を有するレーザー光と高開口数 (1.2 以上) の対物レンズを選べば、金属ナノ粒子、量子ドットなどの無機材料や、グラフェンやカーボンナノチューブなどの炭素材料だけでなく、DNA や水溶性高分子鎖、さらに条件によってはタンパク質などのソフトマテリアルの光捕捉も可能となる。

#### 4 光ピンセットを用いた力計測法

光ピンセットにより捕捉された微粒子が外力によりわずかに捕捉位置からずれると、光圧により捕捉位置からの変位  $\Delta x$  に比例した力（復元力）がフックの法則に従い粒子に作用する（図 4(a)）。復元力の大きさ  $F$  は、捕捉の強さを表すバネ定数（stiffness または spring constant） $k$  を事前に決定し、外力に伴う変位を位置検出センサーで計測することで、 $F = -k\Delta x$  から求めることができる。光ピンセットのバネ定数は、捕捉粒子の変位データをパワースペクトル密度（power spectrum density; PSD）解析や自己相関関数（autocorrelation function; ACF）解析、平均二乗変位（mean squared displacement; MSD）解析などにより決定する。バネ定数の大きさは、捕捉対象物およびレーザー光に依存するが、およそ  $0.001 \text{ pN/nm} \sim 0.2 \text{ pN/nm}$  程度となる。例えば、水中に浮遊する直径  $500 \text{ nm}$  のポリスチレン微小球を集光した近赤外レーザー光（光出力  $1 \text{ W}$ ）で捕捉したとき、バネ定数は  $0.16 \text{ pN/nm}$  となる<sup>1)</sup>。

光ピンセットは、時間分解能・空間分解能の高い力計測法であり、様々な分野で活躍している。とりわけ、

モータータンパク質や DNA などの生体物質の力学応答計測に重要な役割を果たしている。この光ピンセットの生物物理への利用は快挙にいとまがないが、代表的な研究成果の一つであるモータータンパク質の運動測定について紹介する（図 4(b)）<sup>5)6)</sup>。

キネシンは、細胞内の物質輸送などに関与するモータータンパク質の一種である。このキネシンは、アデノシン三リン酸（ATP）を加水分解しエネルギーを獲得することで、細胞骨格の一種である微小管に沿って移動できる。このキネシンに結合させた微粒子を光ピンセットで捕捉し、基板表面上にある微小管にキネシンを接近させる（図 4(b) 中 (i)）。キネシンが微小管上を運動すると、キネシンに結合した微粒子も追従して捕捉位置からずれることになる。ずれ（変位）に応じて復元力が作用する（図中 (ii)）。ある程度キネシンが移動して微粒子に作用する復元力が、キネシンの移動する力を上回ると微粒子は元の捕捉位置に引き戻される（図中 (iii)）。この一連の変位を計測し、バネ定数より復元力を求めることで、キネシン 1 分子が行う力学応答を議論できる。キネシンが復元力に逆らって発生する力は最大で約  $7 \text{ pN}$  であり、変位の経時変化からキネシンが約  $8 \text{ nm}$

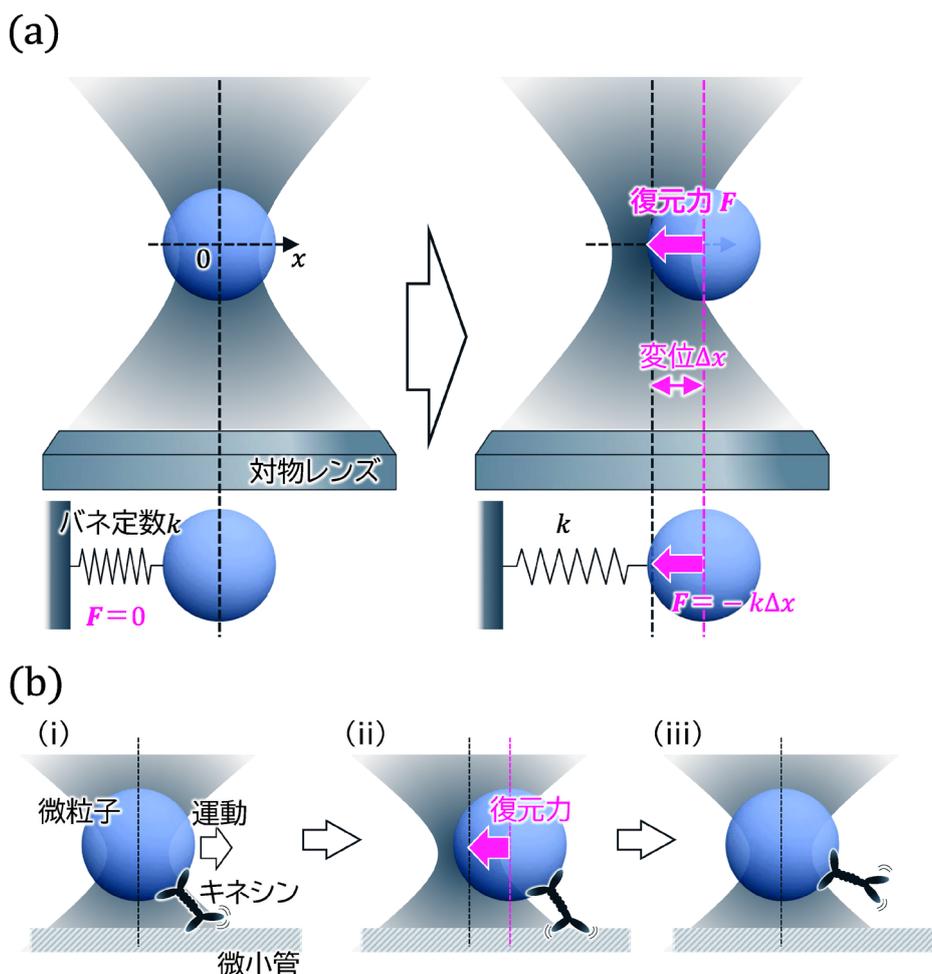


図 4 (a) 光ピンセットによる力計測の概略図, (b) 微小管上を運動するキネシンの力計測の模式図

のステップを踏んで移動することがわかった<sup>6)</sup>。このような生体分子の力学応答計測として光ピンセットは生物物理の分野でよく利用されている。

## 5 光ピンセットを組み合わせた顕微分光分析

光ピンセットは光学顕微鏡を使用するため、従来の顕微分光法と組み合わせることも可能である。これにより、光捕捉した物質の分光学的情報を取得できる。例えば、顕微ラマン分光法と組み合わせることで、正常赤血球とサラセミア症候群を引き起こす標的赤血球の識別を、染色標本を作製することなく光捕捉しその場 (*in situ*) 分析することで達成できる<sup>7)</sup>。本章では、光ピンセットと各種顕微分光法を組み合わせた分析化学手法について事例を織り交ぜて紹介する。

### 5.1 顕微吸収/散乱分光法

光ピンセットと顕微分光法を組み合わせた分析法は、微粒子一粒を個別選択的に評価する手法として優れている。本節では光ピンセットを用いた貴金属ナノ粒子の単粒子分析について述べる。金や銀などの貴金属ナノ粒子は、特定の波長の光との強いカップリングにより、粒子中の自由電子が集団振動を起こす。この現象を局在表面プラズモン共鳴 (localized surface plasmon resonance; LSPR) と呼ぶ。LSPR の共鳴波長は、ナノ粒子のサイズ、形状、材質により大きく変化する。合成したナノ粒子の光物性は、紫外可視吸光度計により金属ナノ粒子の分散溶液を測定し評価できる。しかしながら、個々のナノ粒子のわずかな粒径や形状の違いに鋭敏に反映するため、従来法ではナノ粒子一粒の精緻な評価は容易ではない。溶液中ではなくガラス板などの支持体上に散布した貴金属ナノ粒子であれば、個々のナノ粒子の光物性も評価できるが、この場合、支持体があることで共鳴波長が長波長シフトすることや電磁場計算のモデリングを複

雑化する問題がある。

そこで光ピンセットにより貴金属ナノ粒子を捕捉すれば、水中に浮遊した状態のナノ粒子一粒の吸収や散乱スペクトルが取得できる。光捕捉した金属ナノ粒子の散乱スペクトルは、顕微鏡の暗視野コンデンサーを用いて得られる (図 5(a))<sup>8)</sup>。暗視野コンデンサーを光学顕微鏡の照明光と試料セルの間に導入すると、試料からの散乱光や回折光のみが対物レンズに入射するため、直径数 nm のコロイド粒子も観察できる。暗視野コンデンサーと分光器、検出器を組み合わせることで、捕捉中の貴金属ナノ粒子一粒の散乱スペクトルが取得でき、ナノ粒子の形状や配向変化、ナノ粒子の二量化過程などを分光学的に追跡できる。さらに、波長可変型レーザーとガルバノミラーを用いた空間変調分光法により、光捕捉した金ナノロッド一粒の消光 (= 吸収 + 散乱) 断面積の二次元イメージングも報告されている (図 5(b))<sup>9)</sup>。

### 5.2 顕微蛍光分光法

各種顕微分光法の中でも、顕微蛍光分光法は感度と測定容易性に優れており、光ピンセットと組み合わせた報告例は多岐にわたる。例えば、YOYO-1 などの蛍光色素で染色した 1 本の DNA を直接光捕捉すると、捕捉前は溶液中に広がった状態 (コイル状態) をとっていた DNA が、集光位置に徐々に引き寄せられるとともにコンパクトに折り畳まれたグロビュール状態へと変化する様子を観察できる<sup>10)</sup>。

従来の顕微蛍光法の注意点に加えて光ピンセットを組み合わせた場合の注意点として、捕捉光源による捕捉対象物の光退色が挙げられる。捕捉光源 (主に近赤外光) の光強度 (集光点で  $10^6$  W/cm<sup>2</sup> オーダー) は、蛍光励起光源 (主に可視光) よりも遥かに大きい。そのため、高強度の近赤外光を励起状態の蛍光色素に照射すると、蛍光色素による近赤外光の二光子吸収が起こりうる。こ

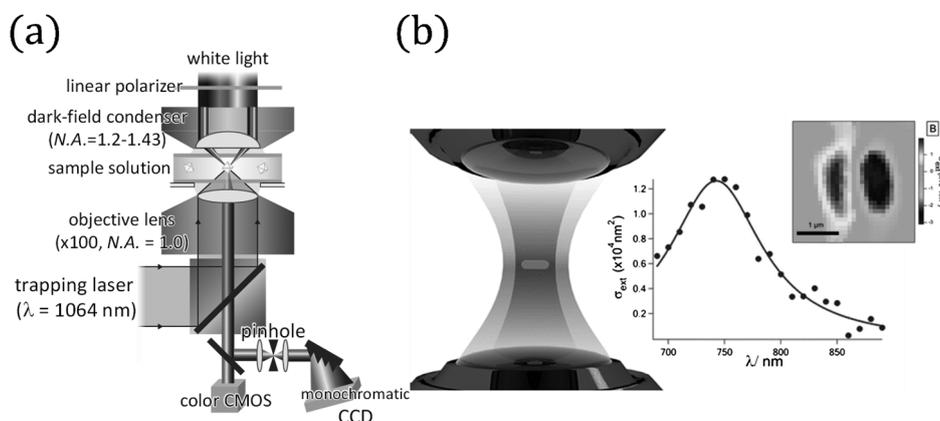


図 5 (a) 光ピンセットと顕微散乱分光法を組み合わせた光学系の概要図<sup>8)</sup>、(b) 光捕捉した金ナノロッド単粒子の消光スペクトル測定<sup>9)</sup>

(Reprinted with permission from J. Phys. Chem. C 2019, **123**, 23096–23102 and Nano Lett. 2015, **15**, 7731–7735. Copyright 2019, 2015 American Chemical Society.)

のような光退色を避けた実験系を組むことで、光ピンセットと蛍光観察の併用が可能となる。市販品の光ピンセット装置には、蛍光励起光源と付随する光学部品がオプションで提供されている。

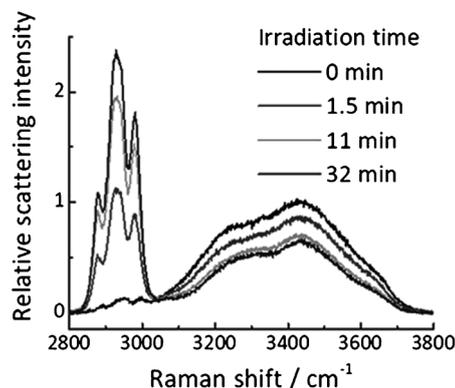
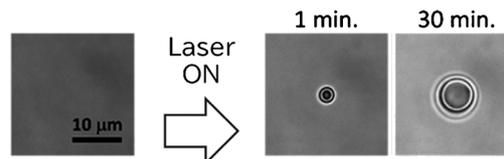


図6 光ピンセットにより形成した高分子液滴の顕微ラマン分光分析<sup>12)</sup>

(Reprinted with permission from *J. Phys. Chem. B* 2020, **124**, 8454–8463. Copyright 2020 American Chemical Society.)

### 5.3 顕微ラマン分光法

ラマン分光法は赤外吸収分光法とともに振動分光法として分子の構造解析に広く利用されている。顕微鏡と組み合わせることで結晶面内の欠陥や成分分布のイメージング、微小領域の不純物分析などが可能なことから幅広い分野で利用されている。非蛍光性物質でも検出できるため、光ピンセット法と組み合わせ捕捉対象物の構造解析・成分分析に利用されている。溶液中で捕捉した微粒子だけでなく、空気中で光捕捉した水滴中の成分分析にも顕微ラマン分光法は用いられる<sup>11)</sup>。

一例として、温度応答性高分子の光捕捉と顕微ラマン分光法による構造解析について紹介する。水溶液中のポリ(N-イソプロピルアクリルアミド) (poly(N-isopropylacrylamide; pNIPAm)) に代表される温度応答性高分子は、室温付近では水溶液に溶解している。このpNIPAm水溶液を約32℃以上に昇温すると、脱水したpNIPAmがコイル・グロビュール相転移を経て、疎水性相互作用により高分子鎖同士が凝集することで、水溶液中には高分子が凝集した高分子液滴を形成する。この相分離現象を理解するために、相分離後の高分子液滴を光ピンセットにより形成し、液滴中の高分子や水の構造を顕微ラマン分光法により知ることができる(図6)。このとき使用する捕捉用光源は、近赤外レーザー光( $\lambda=1064\text{ nm}$ )を使用する。集光位置の昇温(3.1節)により高分子液滴を形成するとともに、光圧により液滴を観測領域中に安定的に保持し、ラマン分光情報を選択的に取得できる。さらに事前に濃度既知の高分子水溶液のラマンスペクトルから検量線を作成することで、液滴中の高分子濃度を見積もることができる。筆者らはこの手法を用いることで、分子量や化学構造、立体構造が液滴中の高分子濃度に与える影響について調べている<sup>12)</sup>。

## 6 おわりに

本稿では、光ピンセットを用いた分析化学について述べた。日常生活では認知できないほど微弱な力である光圧は、ナノからマイクロメートルの世界では無視できない力となる。この光圧を利用した微粒子の捕捉・操作法を光ピンセットと呼ぶ。本稿では、光ピンセットの原理を光の波長よりも大きな微粒子を捕捉する場合と波長よりも小さな微粒子を捕捉する場合に大別して述べた。代表的な光ピンセットは、1本のレーザー光を顕微鏡の対物レンズで集光することで実現でき、その装置構成について紹介した。この光ピンセットの分析化学へのアプ

ローチとして、光圧による力計測法と顕微分光法を組み合わせた捕捉物質の構造解析について紹介した。

光ピンセットは、空間変調素子やラゲール・ガウシアンビームなどの光学技術の発展に伴い、ただ粒子を捕まえるだけでなく、複数の粒子を並べて操作したり、回転運動をさせたりすることもできるようになった。さらに、プラズモンナノ構造体やフォトニック結晶などのナノフォトニクスを利用した新たな光ピンセットも報告されはじめ、光ピンセット技術は今後さらに発展を遂げるであろう。本稿で述べた力計測法、顕微分光法の進展とともに、これまでアクセス困難であったナノ粒子、分子レベルの個別選択的な分析手法のツールとして光ピンセットが活躍することを期待している。

## 文 献

- 1) K. C. Neuman, S. M. Block : *Rev. Sci. Instrum.*, **75**, 2787 (2004).
- 2) Y. Harada, T. Asakura : *Opt. Commun.*, **124**, 529 (1996).
- 3) S. Ito, T. Sugiyama, N. Toitani, G. Katayama, H. Miyasaka : *J. Phys. Chem. B*, **111**, 2365 (2007).
- 4) F. Català, F. Marsà, M. Montes-Usategui, A. Farré, E. Martín-Badosa : *Sci. Rep.*, **7**, 1 (2017).
- 5) K. Svoboda, C. F. Schmidt, B. J. Schnapp, S. M. Block : *Nature*, **365**, 721 (1993).
- 6) H. Kojima, E. Muto, H. Higuchi, T. Yanagida : *Biophys. J.*, **73**, 2012 (1997).
- 7) A. C. De Luca, G. Rusciano, R. Ciancia, V. Martinelli, G. Pesce, B. Rotoli, L. Selvaggi, A. Sasso : *Opt. Express*, **16**, 7943 (2008).
- 8) T. Shoji, M. Tamura, T. Kameyama, T. Iida, Y. Tsuboi, T. Torimoto : *J. Phys. Chem. C*, **123**, 23096 (2019).

- 9) Z. Li, W. Mao, M. S. Devadas, G. V. Hartland : *Nano Lett.*, **15**, 7731 (2015).
- 10) M. Ichikawa, K. Yoshikawa, Y. Matsuzawa : *J. Phys. Soc. Jpn.*, **74**, 1958 (2004).
- 11) S. Ishizaka, F. Guo, X. Tian, S. Seng, Y. A. Tobon, S. Sobanska : *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, **93**, 86 (2020).
- 12) K. Ushiro, T. Shoji, M. Matsumoto, T.-A. Asoh, H. Horibe, Y. Katsumoto, Y. Tsuboi : *J. Phys. Chem. B*, **124**, 8454 (2020).



東海林 竜也 (Tatsuya Shoji)  
神奈川大学理学部 (〒259-1293 神奈川県平塚市土屋 2946)。北海道大学大学院理学院化学専攻博士後期課程修了。博士 (理学)。《現在の研究テーマ》ナノ構造を利用した光ピンセットの開発と分析化学への応用。

### 『ぶんせき』再録集 vol. 1 出版のお知らせ

ぶんせき誌の過去記事の有効利用の一環として、『ぶんせき』再録集 vol. 1 が出版されました。2011 年から 2020 年まで、10 年間分の〈ミニファイル〉の記事が詰まっています。

下記 10 章からなり、それぞれ 12 から 14 の話題が集められています。

1. 実験器具に用いられる素材の特徴
2. 分析がかかわる資格
3. 顕微鏡と画像データ処理
4. 最新の web 文献検索データベース
5. ポータブル型分析装置
6. 分析化学と材料物性
7. 分析化学者のための多変量解析入門
8. 土壌分析
9. サンプルング
10. 前処理に必要な器具や装置の正しい使用法

本書はアマゾンオンデマンド出版サービスを利用して出版した書籍ですので、書店には並びません。アマゾンサイトからのネット注文のみとなりますので、ご注意ください。詳しくは「ぶんせき」誌ホームページをご確認ください。