

# マイクロチップレーザーの開発

## 平等拓範

総合研究大学院大学助教授機能分子科学専攻／自然科学研究機構分子科学研究所助教授

小型でありながら、圧倒的なパワーをもち、波長や時間的特性の制御も可能なマイクロチップレーザー。  
その高性能化の背景には、従来の固体レーザー材料の特性を徹底的に見直す努力があった。

### 固体レーザーを超えるレーザー

メイマンにより発明されたレーザー光は、空間的・時間的なコヒーレンス（可干渉性）に優れるため、物質との強い相互作用が期待できる。なかでも固体レーザーは、Qスイッチやモードロックによる高輝度光発生が可能であるなどの際立った特長を備えていたため、不安定かつ大型で大電力を要するものの、先端科学技術の探求には不可欠な存在であり続けた。

これに対して、マイクロチップレーザーは、低出力ながらもコヒーレンスに優れた特殊な高性能固体レーザーとして登場した。従来の固体レーザーにはスペクトル純度が低いという欠点があり、これを改善するために厚さ1mm程度の薄ガラス板などをエタロン（反射面の間隔を一定に保つためのスペーサー）として挿入するが、マイクロチップレーザーではエタロンそのものをレーザー共振器とする。これは、レーザー媒質を薄くして一つの発振モードでしか共振しないようにするためだが、

効率も出力も低くなるため、レーザーとしては現実的でなかった。

われわれはマイクロチップレーザー材料探索の指針となる性能指数を明らかにし、Nd:YVO<sub>4</sub><sup>\*1</sup>を用いて連続波(CW)100mWを超える高効率、單一周波数発振を実現してみせることで、この分野の確立を促した。その後も、既存の固体レーザーや常識にとらわれず、理想的な固体レーザー材料を求め、本来あるべきレーザー構成とは何であるかを問い合わせてきた。

その結果、今日では結晶厚300 μmのYb:YAG<sup>\*2</sup>マイクロチップからCWで340Wの出力を得るに至っている（図1a）。パワー密度では57.7kW/cm<sup>3</sup>となり、角砂糖1個分の媒質容積から大型のレーザー加工機数十台分の約60kWという出力が得られる勘定になる。このような大出力化は、形状をマイクロチップとし、均質な面冷却を実現することで可能となった。

さらに、高出力超短パルスレーザーを狙った研究も進めている。具体的には、

セラミックスの高い自由度に着目し、Yb:YAGの母材に別の元素を導入することでスペクトル幅を拡大し、280フェムト秒<sup>\*3</sup>という短パルスの発生に成功している。また、これらの高輝度レーザー材料の発振波長は1 μm付近に限定されているため、波長域の拡大も図っている。実際、光リソグラフィーにより作製した擬似位相整合(QPM)素子(周期分極反転マグネシウム添加ニオブ酸リチウムPPMgLN)を用いて波長変換を行い、紫外光から中赤外光領域までの高効率発振を検証した（図1b）。

### マイクロ固体フォトニクスの幕開け

これらの成功は、地道な分光学的研究の積み重ねに基づいている。例えば、固体レーザー媒質として広く使われているNd:YAG<sup>\*2</sup>は、レーザー黎明期に発掘されたもので、長い歴史をもち、もう研究の余地はないと思われていた。しかし、誘導放出断面積など発振特性にかかわる重要なパラメーターが文献によって数倍以上も異なっており、吸収断面積すらよく

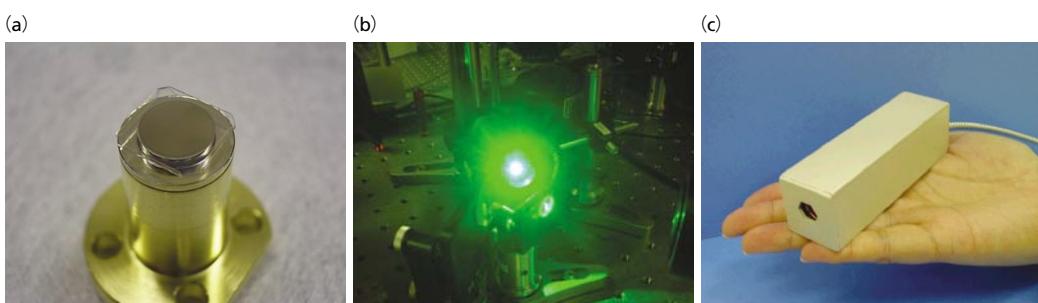


図1 (a) 金属材料加工用高出力レーザーとして開発した単結晶Yb:YAG/セラミックYAG複合構造マイクロチップレーザー（結晶厚は300 μm）。(b) PPMgLNによる高効率単行波長変換により得られた高出力CW緑色光。(c) 受動Qスイッチによる手のひらサイズメガワットレーザー（尖頭出力1.7MW、パルス幅480ピコ秒）。  
写真提供：常包正樹ほか／水内公典ほか／酒井博ほか／平等拓範

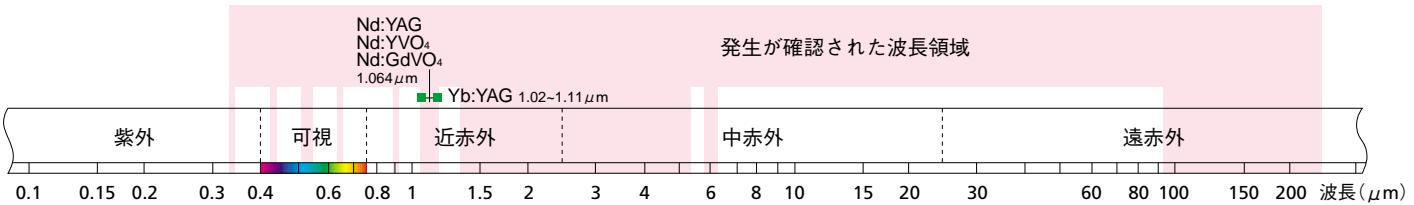


図2 光波制御マイクロチップレーザーにより拡大された波長域。領域拡大に向けた挑戦は今も続いている。

わかつていいというのが実情であった。

そこで、分光学的な基礎に立ち返った研究の結果、共振器長が15mmの受動Qスイッチマイクロチップレーザーにおいて、單一周波数、基本横モードでパルスエネルギー0.96mJ、時間幅480ピコ秒<sup>\*4</sup>、すなわち、尖頭値で1.7MW<sup>\*5</sup>に達する高輝度出力特性が実現できた。輝度にして0.14PW/sr·cm<sup>2</sup>とサブペタワット<sup>\*6</sup>の特性が、手のひらサイズの装置により、バッテリー駆動も可能な低消費電力で得られたことになる(図1c)。この高輝度特性は非線形波長変換に有利であり、すでに波長200μmに至るテラヘルツ波<sup>\*7</sup>発生も高効率に得られている(図2)。

マイクロチップレーザーの光分子科学、および、その関連分野への応用範囲は広い。通常の光学素子では不可能だが、マイクロチップレーザーなら、低輝度の半導体レーザー光を結合し、高ビーム品質光に変換することができる。さらに、スペクトル純度の改善、光スイッチによる時間的な特性の制御、QPM等の非線形光学素子を用いた波長変換、位相特性制御などが望める(図3)。

また、マイクロチップ構造では、通常の固体レーザーに比べて光子の共振器走行時間が3桁以上短いことから、量子干渉効果が顕在化する。このため、溶液中微小粒子のブラウン運動や混濁した水槽中のコイン表面形状が観察できる高精度光干渉計、カオス通信などへの応用も提案されている。

加えて、高機能非線形光学波長変換により得られるCW及びパルスの紫外光、可視光、赤外光、テラヘルツ波、コヒーレント光は、バイオ・メディカル、光ディスプレーから環境計測・セキュリティま

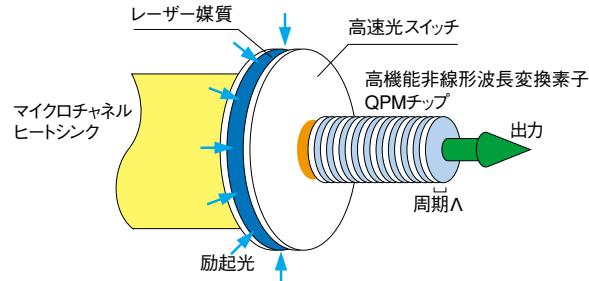


図3 マイクロチップレーザーの概念

での高度な応用を可能とする。例えば、紫外光で皮膚がんが発生することからもわかるように、紫外光はDNAに直接作用する。一方で、中赤外光域は分子振動にもとづく固有吸収が多くあり、分子の同定や選択励起が可能となる。広帯域で発振が可能なレーザーは、分子レベルの仕事を行う際のピンセット、ハサミや糊となり、われわれに大きな可能性を与えるであろう。

また、マイクロチップレーザーは2次元アレイ化も容易であり、位相同期動作による大出力化・多機能化も可能である。この他にも、微細穴開けから金属光造形までを含めたレーザー加工が視野に入ってきた。さらに小型堅牢性を利用したレーザー点火内燃機関による低燃費・低排気ガス車の提案など、エネルギー・環境分野への応用も可能になりつつある。

このように光波特性を自在に制御できるマイクロチップレーザーは、今や「マイクロ固体フォトニクス」とでも呼ぶべき新領域を形成しつつあり、基礎科学から産業までの幅広い分野から開発が期待されている。完成度が高く近寄り難い先端技術も、意外と初步的な問題が見過ごされ、物事を複雑にしていたりする。詰まったときは思い切って切り口を変えるのもたいへんよい。先入観をもたない若い人たちの参加により、レーザー開発の

さらなる発展が望めるものと期待している。

\*1 YVO<sub>4</sub>(イットリウムバナジウム)をレーザー媒質の母体とし、ネオジムイオン(Nd<sup>3+</sup>)を添加してレーザー発振させる。

\*2 YAGは、イットリウム・アルミニウム・ガーネット(Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>)の略。これを母体とし、イッタルビウムイオン(Yb<sup>3+</sup>)やNd<sup>3+</sup>を添加してレーザー発振させる。

\*3 1フェムト秒=10<sup>-15</sup>秒(1000兆分の1秒)

\*4 1ピコ秒=10<sup>-12</sup>秒(1兆分の1秒)

\*5 1MW(メガワット)=10<sup>6</sup>W(100万W)

\*6 1PW(ペタワット)=10<sup>15</sup>W(1000兆W)

\*7 p.8参照。



平等拓範(たいら・たくのり)

三菱電機のLSI研究所から大学に転出し、高分解光法を背景としたレーザーレーダーによる環境計測に従事した。その際、実験時間の大半を固体レーザーの調整に費やし、先端科学技術であるはずのレーザーに大きな疑問を感じた。企業で超LSI、マイクロプロセッサーを研究開発していた視点より固体レーザー及びその周辺技術を見直したところ、かなり根深い問題があることに気がつき、現在に至った。写真提供：平等拓範

# 赤外域・紫外域の高強度レーザー

## 猿倉信彦

総合研究大学院大学助教授光科学専攻／自然科学研究機構分子科学研究所助教授

超短パルスや超強力パルスをつくるレーザーは分子科学の研究に欠かせないが、これまで波長範囲が可視光付近に限られていた。波長範囲を赤外光や紫外光にまで広げるために、精力的な研究が行われている。

光は大きく自然光とレーザー光とに分けることができる。レーザー光は自然光に比べてはるかに高い輝度、指向性、スペクトル純度をもつ。この光を得ることによって、人はこれまで捉えられなかつた現象を「観る」ことができる新しい「知覚」を手に入れた。

このレーザー光が最初に実現されたのは1960年であるが、その後急速に発達し、発達につれて常に新しい「知覚」を生み出している。現在では、10フェムト秒<sup>\*1</sup>以下の超短パルスや、テラワット( $10^{12}\text{W}$ )を超えるピークパワーのパルスも発生させることができる。このようなレーザーを用いると、超高速現象を観測したり、超高強度、超高圧、超高密度等の極限状態下での物理現象を解明するな

ど極限の現象を「観る」ことができる。

このように、レーザーを用いて観測できる現象を広げるためには、より広い波長領域でのレーザー開発が期待されている。そこで、われわれはさらなる新しい「知覚」を創造するために、人の目で捉えられる可視光よりも波長の長い赤外光と、波長の短い紫外光の領域において、安定で強いレーザー光をつくり出している。

### 赤外光源の開発

可視域よりも波長の長い赤外領域は大きく三つの領域に分けられ、可視域に近い順に近赤外、中赤外、遠赤外領域と呼ばれる。この幅広い領域の中でも、われわれは特に中赤外から遠赤外領域にあた

る、周波数にして0.1~100テラヘルツ<sup>\*2</sup>(THz)付近の領域のレーザー光源開発にターゲットを絞っている。

この領域は、10年ほど前までは光源や検出器の開発が十分に進んでいなかったこともあり、未開拓の領域と言われてきた。そこで近年、周波数帯域がテラヘルツ付近にあるこの領域を「テラヘルツ領域」と称し、多くの研究者がさまざまなアプローチによる研究を行っている。

われわれは、磁場中において半導体基板にチタンサファイアレーザーからの超短パルスレーザー光を照射することで、従来光源に比べて非常に高い平均出力のテラヘルツ電磁波を発生させることに成功している。このテラヘルツ電磁波の発生および磁場による増幅現象を詳しく調

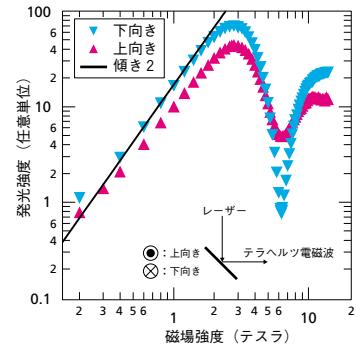
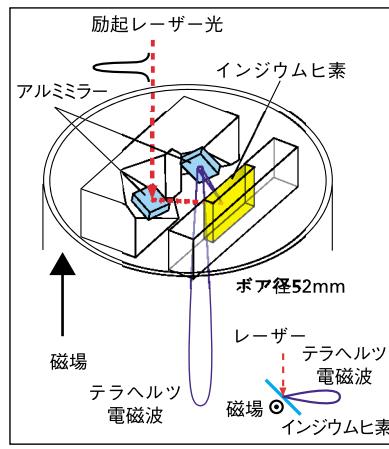
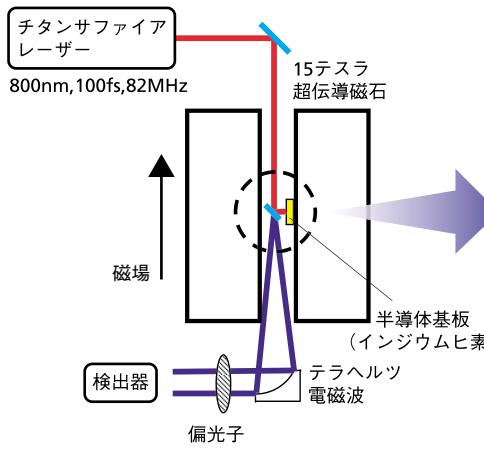


図1 テラヘルツ電磁波の発生と磁場依存性。磁場の中で半導体（インジウムヒ素）基板にチタンサファイアレーザーのパルスをあてると、テラヘルツ電磁波が発生する（左）。磁場を上向きにかけるか、下向きにかけるかによって発生する電磁波の強度は異なる（右）。ここには示さないが、電磁波の周波数分布も磁場の向きによって異なる。

べると、特異な物理現象が数多く見つかる。

これらの現象が起こるメカニズムを解明し、さらに出力の高い光源を実現するために、最近では世界でも有数の超伝導磁石を用いて15テスラという超高磁場下でのテラヘルツ電磁波発生実験も行っている。図1はその実験のようすの模式図とその結果である。この実験によって、磁場による増幅メカニズム解明のための貴重なデータが得られたのみならず、超強磁場中で半導体がテラヘルツ電磁波に対して透明になるという新たな興味深い現象も観測されている。

このように、テラヘルツ領域の研究は、光源に関するわれわれの研究のみを見ても物理学的観点から非常におもしろい広がりを見せており、もちろん、この光源は、非破壊非接触の計測や、テラヘルツ領域にある各物質特有の吸収スペクトルを利用した薬物等の物質同定といった実用的な応用から、最近ではタンパク質の機能解析などの生物学的研究にも用いられるようになっており、人の「知覚」の広がりに一役買っている。

## 紫外光源の開発

もう一つの研究対象は可視域よりも波長の短い紫外領域である。この領域では、三つのアプローチで光源開発を行っている。

図2の写真はチョクラルスキー法<sup>\*3</sup>によって成長させた“ライカフ”という名の結晶である（成分はLiCaAlF<sub>6</sub>）。現在、半導体リソグラフィー用の光学材料としてフッ化カルシウム（CaF<sub>2</sub>）が用いられているが、ライカフ結晶のほうがこれより短い波長まで非常に高い透過特性をもつことをわれわれが見いだし、次世代の紫外光学材料としても高く評価されるようになった。

このライカフ結晶にセリウムイオンを添加すると、紫外領域で光を発するようになる。図3はその光をストリーカカメラと呼ばれる装置で観察したデータである。この結晶を用いたレーザーシステムを構築することによって、ガスを用いた



図2 セリウムライカフ結晶（右）写真提供：猿倉信彦

従来のシステムのサイズ、ランニングコスト、安定性といった問題点を解決した高出力レーザーを実現している。

また、この結晶以外にも、従来、表面弾性波素子に用いられていたリチウムテトラボレート（Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>）を非線形結晶として使用し、赤外・可視レーザーからの波長変換による紫外レーザー光の発生を実現している。この結晶は他の非線形結晶に比べて簡単に大きな結晶がつくれ、劣化しにくいという優れた特性を備えている。

さらに最近では、フッ化物を用いて、紫外領域でも最も波長の短い真空紫外領域での半導体レーザー開発のための研究を始めている。従来、放射光施設を利用しなければならなかった計測も、このような光源が実現すれば、簡便に行えるようになる。このように、これまでになかった光源を実現することによって、新しいことを「観る」ことを可能にする「光」をつくり出し、新たな「知覚」を生み出している。

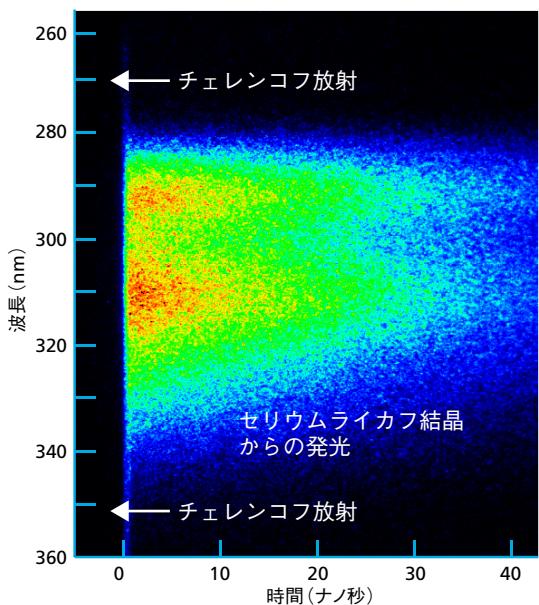


図3 電子ビームで励起したセリウムライカフ結晶からの発光のストリーカイメージ。時間を追って波長ごとの強度を測定したもの。290nm付近、320nm付近のピークが数十ナノ秒にわたって持続するのがわかる。

\*1 1 フェムト秒=10<sup>-15</sup>秒（1000兆分の1秒）

\*2 1THz（テラヘルツ）=10<sup>12</sup>Hz（1兆周期／秒）

\*3 融体に種結晶を浸けてゆっくり回転させながら引き上げ、単結晶を成長させる方法。



猿倉信彦（さるくら・のぶひこ）

特異な新物性あるいは優れた潜在的特徴を備えた新物質も、その具体的な機能活用の方向性が見いだされない限り新材料とはなりえない。物性科学から光科学やデバイス工学にいたる幅広い領域での知識や問題意識をもち、光工学の対象となる領域で新物質を発掘し新材料に育て上げることや、既存の材料や既知の物質の新しい観点での新機能発現を研究目標と定め、近年の研究活動を続けている。

写真提供：猿倉信彦

# 「近接場」の光で見えてきたナノの世界

## 岡本裕巳

総合研究大学院大学教授構造分子科学専攻／自然科学研究機構分子科学研究所教授

光学顕微鏡の倍率には、光の波長による制約がある。

近接場という光を使うことにより、この制約を乗り越え、ナノの世界を観察できるようになった。

### 従来の顕微鏡の歴史と限界

光学顕微鏡は小さなものを見ることで拡大して観察できるポピュラーな道具だが、どこまで小さいものを見ることができるだろうか。顕微鏡をのぞいたときに、100倍ぐらいの倍率なら小さくてもはっきりと見えるのに、1000倍近くまで拡大すると全体にぼんやりした感じに見えてしまう—そんな経験がある人も多いだろう。

16世紀に顕微鏡が発明されてから、レンズ技術者たちは、より完璧なレンズをつくれば無限に倍率を上げられると考

て努力を続けた。しかし19世紀になって、実はこの考え方は誤りで、光学顕微鏡では光の波長（可視光線では500nm<sup>\*</sup>程度）よりも小さいものは原理的に観察できないことがわかつってきた。普通に売られている顕微鏡の倍率が1000倍前後までしかないのは、そのぐらいの倍率でこの原理的な限界に達してしまうからである。この限界のため、光の波長よりも小さいものの形を直接見ることは長らく不可能だった。

この状況に風穴を開けたのが、1952年の電子顕微鏡の発明であった。電子顕微

鏡では光を使わないため、光の波長で決まる光学顕微鏡の限界ではなく、現在では分子のような小さなものも見ることができる。さらに、最近になって走査トンネル顕微鏡や原子間力顕微鏡のような新しい顕微鏡が発明され、これによっても分子や原子を観察することができるようになった。

しかし、これらの新しい顕微鏡では、光学顕微鏡のようにカラー写真を撮ることがほとんどできない。カラー撮影の本質は、観察対象の性質が光の波長ごとにどう違うかを観測することである。それが可能になると、分光学の知識を応用して観察対象に関するさまざまな性質を調べることができる。光学顕微鏡はあまり高い倍率では観察できないが、他の方法では得がたい特長をもっているのである。

そのため、光を使った顕微鏡でも、波長の限界を超えて倍率を上げようといろいろな試みがなされた。なかでも強力な方法の一つとして考え出されたのが、ここで取り上げる近接場光学顕微鏡（以下、SNOMと略記）である。

### 近接場光学顕微鏡(SNOM)のしくみ

SNOMは、従来の顕微鏡と異なり、倍率を得るためにレンズを使わない（光を効率よく集めるためのレンズは用いるが、倍率には無関係である）。その代わりに、金属の薄膜に非常に小さな孔（直径数十～100nm程度）を開いたものを使う。孔の大きさが

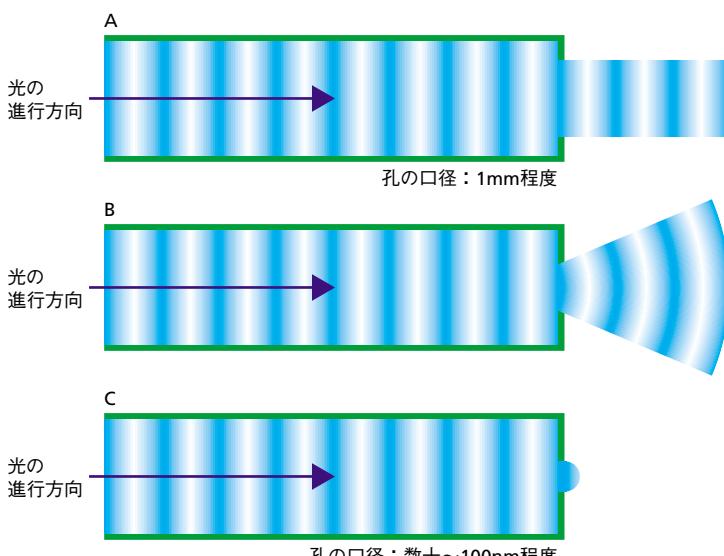


図1 孔の大きさによる光の伝わり方の違い。孔の口径が波長よりも十分大きいときには光は孔を通って直進する（A）が、孔が小さくなると孔から広がって伝わるようになり（B）、孔の口径が波長よりも小さくなると、光は孔の付近にだけ局在して、空間を伝わらなくなる（C）。光の局在する範囲は、おおむね孔の口径程度の距離までである。

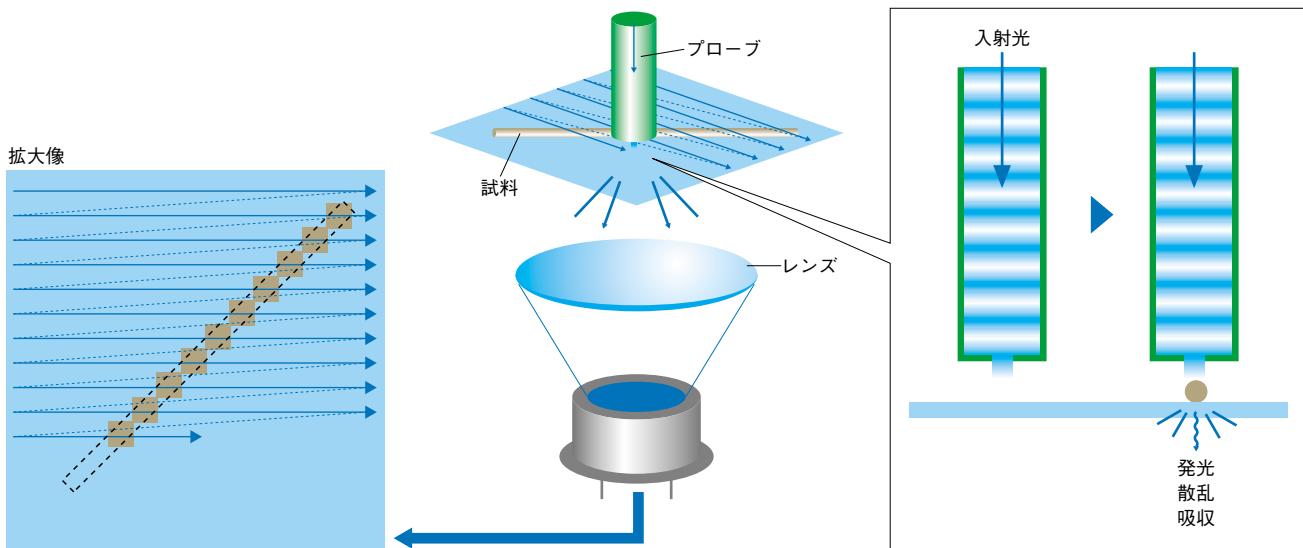


図2 近接場光学顕微鏡(SNOM)の構成。実際のSNOMでは、光ファイバーの先端に微小な孔のあいた金属膜をつくり、これをプローブとして用いる。プローブを試料表面に近づけて掃引すると、目的物の近くにプローブが来たときに、発光や光の散乱、吸収が起こる。発光や散乱、吸収の強さを試料表面上の位置に対して記録すれば、試料の拡大像が観察できる。

1mm程度であれば、そこにあてた光は孔を通って直進するが、孔が光の波長よりも小さくなると、光は孔を通って伝わることができず、孔の周辺のみに局在するようになる(図1)。鉄筋コンクリートの建物の中では、ラジオが窓の近くでないとうまく受信できないことがあるが、これと同じ原理である(ラジオの電波は光と同じ電磁波で、波長が数mから数百mと長い)。このように孔の近所に局在した、空間を伝わらない光を「近接場」と呼ぶ。

この「近接場」を使って、次のような方法で光の波長よりも小さいものの観察ができる。例として、蛍光色素でできた試料に孔を近づけていく場合を考えてみる。孔が色素試料から遠いときには、光が色素に到達しないので何も起こらないが、孔が色素試料のすぐ近くに来ると、光は色素に吸収され、色素は蛍光を出す。蛍光を測定しながら孔を動かし、試料表面上を細かくなぞっていけば、試料の拡大像が得られる(図2)。蛍光を出さない試料でも、散乱光や、孔からわずかに出て試料を透過してくる光を測定することで、同様な観察が可能になる。

この方法では、見ることのできるもの的小ささ(つまり倍率)は波長によらず、用いる孔の直径で決まるため、小さな孔さえつくれば、従来の顕微鏡を超える性

能を実現することができる。また、光を使った顕微鏡であるため、カラー写真を撮ることができるという、電子顕微鏡などにない特長をあわせもっている。実際に、SNOMが考案されて以来、このような特長を生かして、ナノ構造の観察や特性の研究に、さまざまな場面で利用されるようになってきている。

### ナノ構造物質の近接場イメージ

SNOMによる研究の例として、最近われわれの研究グループの井村考平博士(助手)が中心となって永原哲彦博士、ジョンクク・リム氏らと行った、ナノ構造物質の波動関数の観察について紹介する。研究対象として観察したのは、貴金属の一つである金のナノロッドである。金ナノロッドは直径が20nm前後、長さが数百nmのまっすぐな棒状の微粒子で、水溶液中で化学合成によって単結晶として作製できる。

その金ナノロッドをSNOMで観察した結果、図3のようなイメージが得られた。観察する波長によって、近接場光学像は異なる形になり(図3B、C)、特に波長780nmの光(可視光より少し波長の長い近赤外域の光)では、ひょうたんのような風変わりな形が観察されている。SNOMの装置では、近接場光学像と同時に試料表

面の形(トポグラフと呼ぶ)も得られる。トポグラフ像ではナノロッドがまっすぐな棒であることがわかるが(図3A)、近接場による観察では違った形の像が得られたということである。

また、もっと長いナノロッドでは、さらに明暗の数が増え、縞模様が現れている(図3D)。われわれがふだん目にする金属製の棒では、縞模様が見えるなどということは絶対ないが、ナノの世界ではこのような不思議な見え方になるのである。この縞の数はナノロッドが長いほど多くなり、また観察する波長が短いほど縞の間隔が狭くなることもわかった。こんなナノロッドの見え方は、光を使った方法によって初めて明らかになったことで、電子顕微鏡などでは決してわからなかつたことである。

### 物質の波動関数

われわれのグループで、このようなひょうたん形や縞模様のイメージが見える原因を探った結果、これが物質の波動関数のイメージであるということがわかった。

われわれの世界の物質は電子などの素粒子からできており、それらの動きは量子力学の法則によって支配されている。量子力学の世界では電子の状態は波動関

数によって表され（波動関数の2乗は電子の存在確率を表す）、電子の波動関数のようすを知ることで、電気の伝わり方など物質のさまざまな性質を理解できる。このように波動関数は量子論で最も基本的で重要な概念で、波動関数の形と時間変化を知ることは、物質の性質を議論する上で重要な意味をもつ。

通常われわれが手にすることができる物質に関する波動関数は、おおむねピコメートル<sup>\*2</sup>からナノメートル程度の単位で変化する関数で、それを観察するにはナノメートル以下の小さな空間を観察できる方法が必要となる。先に触れた走査トンネル顕微鏡では、電子の波動関数（正確には存在確率）が観察されることが知られている。

金属の中にはたくさんの自由電子があるが、それらは集団として一定の規則性をもって振動する（この自由電子の集団振動のことをプラズモンと呼ぶ）。金属のナノ微粒子では、光を照射すると、その光が吸収されて、プラズモンの電子振動が引き起こされる。その電子の振動の大きさはナノ

ロッド上の位置によって異なり、その振幅を位置の関数として表したもののが波動関数になる。（量子論的には、プラズモンは一種の粒子のように考えることができ、プラズモンの波動関数はその存在確率の振幅を表すものになる。）

光の散乱や吸収の大きさは電子の振動の振幅に密接に関係しており、大まかに言えば、電子の振幅が大きいと光の吸収・散乱が強くなる。われわれが観察した縞模様は、電子の振幅が位置によって異なり、暗く見える場所（光の吸収・散乱の強い場所）では電子の振幅が大きく、明るい場所では振幅が小さいことを意味する。上述のようにプラズモンの波動関数は電子の振幅を表すことから、われわれが見た縞模様はまさにその波動関数に対応していると考えられる。実際に、われわれが得ているさまざまな実験結果は、縞模様が波動関数に由来するという仮定で矛盾なく説明でき、縞の間隔などは理論的な予測ともよく一致することがわかつてききた。

われわれがSNOMで見た金ナノロッドの縞模様は、こうしてプラズモンの波

動関数であることがわかった。このような観察は、光を用いた高倍率の観察方法である、近接場光学顕微鏡によって初めて可能になったものである。今後、SNOMが分子レベルに近い小さなものまで見えるようになり、その他のいろいろな意味でも性能が向上していけば、さらにさまざまな波動関数が観察できるようになると期待される。

上に述べたように、波動関数はこの世界の物質の性質をつかさどる最も基本的なものである。これを実験的に「観る」ことができると、例えば、さまざまなナノ構造の中をどのようにして電子の振動が伝わるのか、ナノ構造中の電子の波を使った高速な情報伝達ができないかななど、物質の性質の機構を解明し、新たな応用を開拓していくための基礎研究が格段に進むと考えられる。このように、波動関数の観察には大きな意義と発展性があると考えている。

\*1 1 nm（ナノメートル）=  $10^{-9}$ m（10億分の1m）

\*2 1 pm（ピコメートル）=  $10^{-12}$ m（1兆分の1m）

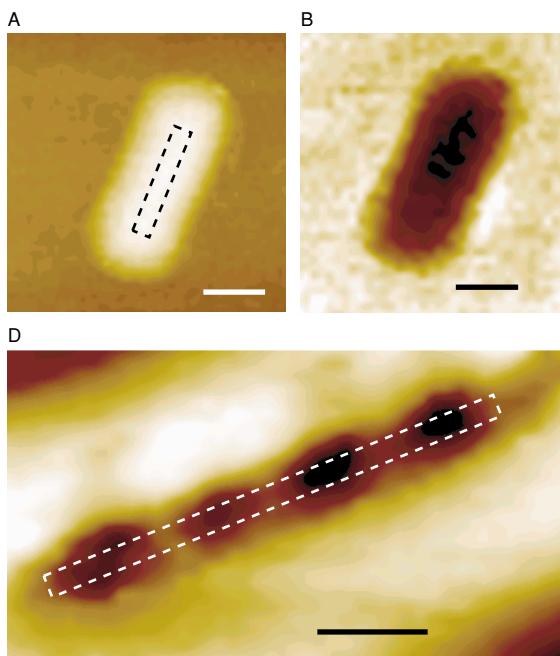


図3 金のナノロッドの近接場光学顕微鏡によるイメージ。(A) 約180nmの長さのナノロッドの形状（トポグラフ）像。装置の性能の限界のため、実際の寸法よりも広がった像として観察されているが、実際のナノロッドはおおむね点線で示した大きさである。(B) 同じナノロッドの波長530nmの光を使った近接場光学像。(C) 同じく780nmの光を使った近接場光学像。ひょうたんのような特徴的な形が観察される。(D) 約440nmの長さのナノロッドの、780nmの光を使った近接場光学像。縞の数が(C)よりも増えている。実際のナノロッドの大きさの概略を点線で示してある。図中のスケールバーはそれぞれ100nmを表す。(Reproduced with permission from *J. Phys. Chem. B*, vol. 108, No. 42, p. 16345. ©2004 American Chemical Society)



岡本裕巳（おかもと・ひろみ）

高校生のときに、光で化学が研究できることを知って驚き、数年後に分光学を専門とすることになった。専門のキャリアを積んでいたときに、光でナノメートルの世界が見えることを知って驚き、数年後に異動したのを機にそれを手段として研究することになった。周期からすると、知的の遊び心を持ち続けていれば、もう1回何かがあるかもしれない。写真提供：岡本裕巳

# 1個の生体分子の運動を観る

## 原田慶恵

財団法人 東京都医学研究機構・東京都臨床医学総合研究所・副参事研究員

1個の生体分子に1分子の蛍光色素で目印をつける。顕微鏡の感度を上げる工夫をする。新たな光源を使う。そしてついに、個々の生体分子が働いているときの動きが見えるようになった。

われわれの体の中にはタンパク質やDNAなど多種多様な生体分子が存在し、それぞれが役割分担に従って正しく機能することで、生命活動は営まれている。生命現象を根本から理解するためには、まず、「個々の分子がどのようなメカニズムで機能しているのか」を明らかにすることが非常に重要である。そのための最も直接的な方法は、生体分子が機能しているようすを実際に目で見てしまうことであり、20年ほど前から実験が始まった。

しかし、大きさが数十nm<sup>\*1</sup>しかない生体分子を「観る」ことは簡単ではない。光学顕微鏡では最小でも数百nm程度のものまでしか見えない<sup>\*2</sup>。電子顕微鏡ならこれより小さいものが見えるが、試料を真空中で観察する方式のため、生体分子を見るのには適さない。生体分子が働くようすを見るには、生体中と似た水溶液の中で観察する必要があるからだ。

そこで、水溶液の観察に適した光学顕微鏡で生体分子を観察するために、生体分子に目印をつけることが考えられた。たとえば、直径約1μm<sup>\*3</sup>のビーズや、多数の蛍光色素で明るく光らせた抗体のかたまりなどを生体分子に結合させて観察する方法が開発された。これらの方法を使えば、市販の顕微鏡で手軽に生体分子の動きを観察できる。

しかし、生体分子にその数百倍もの大きさの目印をつければ、生体分子の機能

や動きが損なわれることも多い。そこで、われわれは今から10年ほど前に、たった1分子の蛍光色素が出す光を蛍光顕微鏡で観察する方法を開発し、1個の生体分子に蛍光色素1分子をつけてその動きを観察することに成功した。「目印」の大きさの影響を受けずに、生体分子の動きを見る能够性が得られるようになったのである。

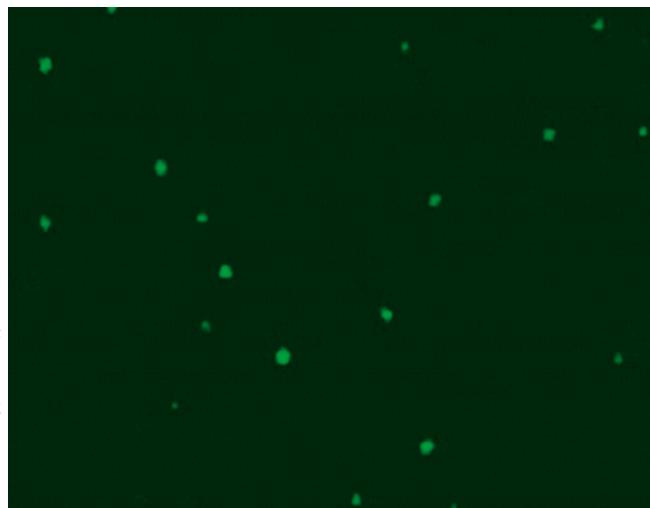
### 1分子の蛍光色素のイメージング

われわれは、蛍光色素1分子を観察することは可能なのかというところから出發した。調べてみると、蛍光顕微鏡下で蛍光色素をレーザーなどの比較的強力な光源によって励起すると、1個の分子が市販の高感度カメラで見るのに十分な明

るさの光を放つことがわかった。蛍光色素1分子の観察が難しいのは、光学部品が励起光を受けて発する蛍光や、水による散乱光、励起光のもれなどが明るい背景光となり、あたかも昼間に星を観察するような状態になってしまうからである。

そこで、われわれはまず、強力な光で励起しても退色しにくい蛍光色素を探した。さまざまな蛍光色素の性質を調べた結果、シアニン色素のCy3が最適であるとわかったので、この色素に適した励起波長、蛍光波長を決定した。次に、蛍光色素が発する光をできるだけ効率よく集め、背景光をできるだけ減らすように、蛍光顕微鏡の対物レンズ、ミラー、フィルターなどを慎重に選んだ。さらに改良

図1 蛍光色素Cy3を結合させた酵素タンパク質分子（グルタチオントランスフェラーゼ）をエバネッセント照明で観察した蛍光顕微鏡像。個々の蛍光スポットが1分子のタンパク質。白黒カメラで撮影した写真に画像処理で着色した。  
写真提供：貴家康尋／原田慶恵



を加え、背景光を従来の50分の1程度に減らすことができた。観察感度を上げるために、光を增幅するイメージインテンシファイアと高感度カメラを組み合わせ、1分子のCy3がどうにか観察できるようになった。

しかし、生体分子の動きを数十秒間にわたって追跡するためには、さらに背景光を減少させ、蛍光色素1分子をより明るく観察できるようにする必要がある。そこでわれわれは、蛍光顕微鏡に、これまでの照明とはまったく異なる「エバネッセント光」を導入した。

水溶液をスライドガラスに載せ、励起用のレーザーをある角度以上の入射角で下からあてると、レーザーはスライドガラスと水溶液の界面で全反射されるが、そのとき、水溶液側にわずかに光がしみ出す。これがエバネッセント光で、岡本先生の解説にある「近接場」と似た光である。このエバネッセント光は界面からせいぜい150nmの範囲までしか届かないのでも、この範囲にある蛍光色素しか励起

されない。そのため、この範囲外の水溶液の散乱や蛍光色素による背景光を抑えられる。また、照射系と結像系が完全に分離されているので、光学部品の発する背景光も最小に抑えることができる。

この照明法により、背景光は市販の蛍光顕微鏡の2000分の1以下に減少し、蛍光色素1分子を明るい輝点として数分間安定に観察できるようになった(図1にエバネッセント照明による観察例を示す。エバネッセント光のイメージは、図2でおわかりいただけるかと思う)。

### モータータンパク質1分子の滑り運動を見る

この1分子イメージング顕微鏡を使って、1分子のタンパク質が実際に機能しているところを観察した。タンパク質分子は、筋収縮や細胞の運動、細胞内物質輸送などさまざまな運動を担っている。なかでも、アデノシン三リン酸(ATP)などの化学エネルギーを使って回転運動や滑り運動などを行うタンパク質分子群を、「生物分子モーター」と呼ぶ。これ

らのモータータンパク質分子はダイナミックに動いて働くので、1分子イメージングの手法を使って研究するのに適している。

そこで、その一つであるキネシン分子の動きを観察することにした(図2)。キネシンは神経細胞の軸索内でミトコンドリアやシナプス小胞前駆体などの輸送を行う。モーターの機能をもった部分(2個の丸い部分)と、細長い尾部からなる。尾部の先に輸送する「荷物」を結合し、ATPの加水分解エネルギーを使ってモーターの部分で微小管(タンパク質できた細長いレール)の上を滑る。

この滑り運動を観察するにはまず、キネシン分子に蛍光色素を結合させなければならない。そのため、遺伝子工学的手法を用いて、尾部の端に反応性の高いアミノ酸(システイン)を導入した。この変異キネシンを大腸菌につくらせて精製し、導入したシステインにCy3を結合させた。一方、Cy5という別の蛍光色素を結合させた微小管をガラス表面にくっつ

図2 キネシン1分子の滑り運動観察の模式図

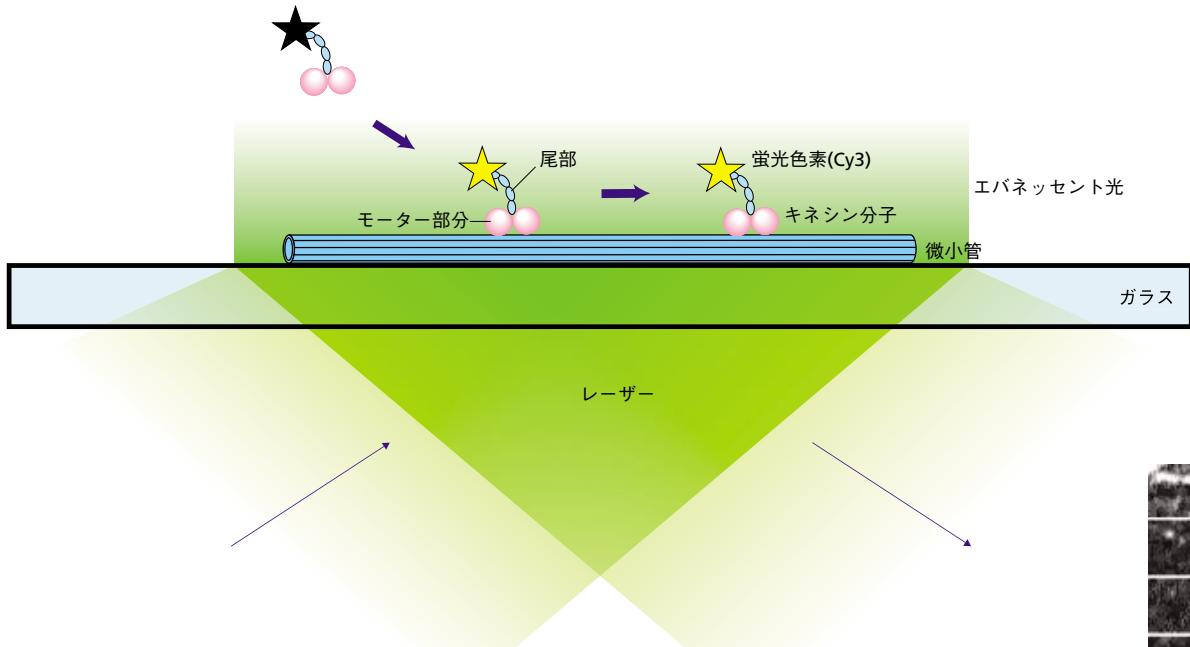
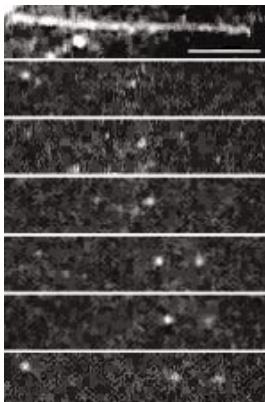


図3 キネシンの滑り運動。いちばん上の像はCy5を結合させた微小管。スケールバーは5 μm。2番めから下は、Cy3を結合させたキネシン分子が微小管に沿って滑り運動するようすを1秒ごとに撮影した像。  
写真提供：武藤悦子／原田慶恵



けてその位置を確認しておく。

ここに、ATPを含む溶液とともにCy3キネシンを加え、エバネッセント照明蛍光顕微鏡で観察すると、個々のCy3キネシン分子が微小管上を一方向に滑り運動するようすが観察された(図3)。滑り速度はおよそ0.5 μm/秒で、多分子を使った方法で観察された速度とほぼ同じであった。これは、タンパク質1分子が機能するところを直接観察した初めての例である。

### 神経細胞の成長機構を解明する

キネシンの観察は細胞外で行ったものだが、最近は細胞膜上や細胞内の生体分子の1分子イメージングが行えるようになってきた。われわれは、神経細胞の成長機構の解明に1分子イメージング技術を応用することを試みている。

受精卵が胚から個体になるとき、神経細胞はそれぞれ決まった標的細胞に向かって軸索を伸ばす。遠く離れた標的細胞まで軸索をガイドするのは、軸索の先端にある成長円錐である。成長円錐は神経成長因子(NGF)存在下では活発に運動し、1時間に数十μmの速さで前進する。成長円錐が微量のNFGに応答する仕組みを明らかにするためには、成長円錐膜上にあるNFG受容体にNFG分子が結合するようすを観察する必要がある。そこで、ニワトリの神経細胞の成長円錐に、Cy3を結合させたNFG(Cy3 NFG)を投与し、蛍光顕微鏡で観察することにした。

先に述べたエバネッセント光はガラス表面のごく近くにしか届かないで、細胞のように厚みのある試料での1分子観察には使えない。そこでわれわれは、水銀ランプからの光を光ファイバーで均一にし、これを光源として試料面近傍を明るく照らす「クリティカル照明法」を用いた。この方法で観察を行うと、溶液中のCy3 NFGは速いブラウン運動をするため観察されず、成長円錐膜上の受容体に結合したCy3 NFG分子のみが観察できる。成長円錐は厚さがわずか数百nmなので、思いの外きれいな1分子蛍光像を観察することができた(図4)。

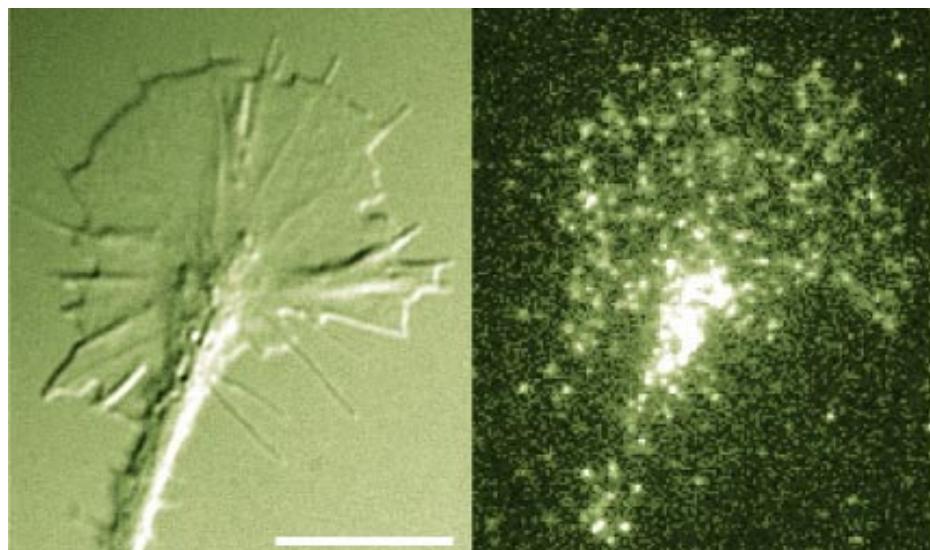


図4 Cy3を結合させた神経成長因子(Cy3 NFG)を投与したニワトリ胚背根節神経細胞の神経成長円錐の微分干渉顕微鏡像(左)と蛍光顕微鏡像(右)。スケールバーは10 μm。Cy3 NFGは葉のように広がった膜上全体に結合している。また、成長円錐基部に非常に多く集積している。白黒カメラで撮影した写真に画像処理で着色した。  
写真提供：谷知己／原田慶恵

培養溶液にCy3 NFGを加えると成長円錐は前進運動を開始する。このとき、成長円錐膜上には多数のCy3 NFGが結合しているのが観察された。Cy3 NFG分子一つ一つの動きを追跡した結果、受容体と結合したNFGは、膜上に広がって運動した後、成長円錐の周縁から内側に向かい、成長円錐と神経軸索との結合部に集まって細胞内に取り込まれることが示唆された。およそ40分子のNFGが結合すると成長円錐が運動を開始することなども明らかになった。今後は、NFGが結合した受容体の変化も同時に可視化し、さらに詳しく機構を解明したいと考えている。

### 生命現象の1分子イメージング

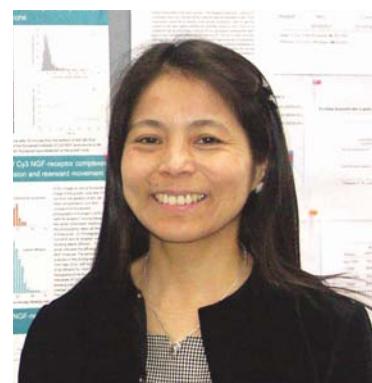
以上簡単に1分子イメージング技術とその応用例を紹介した。ここで紹介した技術は、タンパク質間の相互作用、タンパク質とDNAの相互作用など、あらゆる生体分子の機能を1分子レベルで研究するのに応用できる。現在、エバネッセント照明を組み込んだ蛍光顕微鏡が市販されており、手軽に1分子蛍光観察ができるようになった。また、カメラの技術の進歩によって、10年前とは比べものにならないほどきれいな1分子蛍光像を観

察できるようになった。これからも次々と新しい技術が開発され、遠からず生きた細胞内の情報伝達の3次元イメージングができるようになるだろう。

\*1 1 nm (ナノメートル) =  $10^{-9}$ m (10億分の1m)

\*2 p.10も参照。

\*3 1 μm (マイクロメートル) =  $10^{-6}$ m (100万分の1m)



原田慶恵(はらだ・よしえ)

博士課程の途中まで「ジウリムシで何かおもしろい研究を」と試みていたが、丸ごとの生き物を相手にすることは手に負えず、方向転換した。筋収縮の際のタンパク質分子の機能の研究から、個々のタンパク質分子が機能しているところを直接見てしまおうということになって現在に至る。DNAの端にビーズをつけ、DNA分子モーターの動きの観察も行っている。平成16年度には、総合研究大学院大学先導科学研究科の非常勤講師として講義を行った。  
写真提供：原田慶恵

# 量子の波を光で制御する

大森賢治

総合研究大学院大学教授機能分子科学専攻／自然科学研究機構分子科学研究所教授

レーザー光を使うと、分子の「波」としての性質を制御することができる。

20年前にはアイデアにすぎなかったこの技術が、反応制御、情報処理などに応用される見通しが出てきた。

「物質は、見方によって粒子になったり波になったりする」。量子論の本質はここにある。量子論の誕生から70年以上が経った現在、コンピューターやコンパクトディスクなど、その応用製品は現代人の日常生活から切り離せない存在になった。しかし、いまだに、量子論の描く世界観は私たちの身のまわりの現実社会とつながりそうにないし、物質の「波」としての性質を最大限に利用できているようにも思えない。

われわれは、量子論をよりよく理解し、新たな応用分野を切り開くことを目標に、物質の波としての性質（コヒーレンス）を完全に制御するというテーマに挑戦している。このような制御は「コヒーレント制御」と呼ばれ、原子からナノ構造に至るさまざまな量子系において、結合選択

的な反応制御<sup>\*1</sup>や量子コンピューティングなどの先端的なテクノロジーの開発につながるものとして期待されている。

## 分子の中で干渉を起こす

コヒーレント制御の概念を説明するために、以下では、物質の例として二原子分子（2個の原子からなる分子）を考えよう。1個の二原子分子は、さまざまな状態をとりうる。分子中の電子の運動、2個の原子の間の振動（さらには、分子の回転や並進運動）のそれぞれに、いくつもの可能な状態があるからだ。こうした分子の状態は量子力学に従い、波動関数<sup>\*2</sup>で表される。

コヒーレント制御は、このような電子や原子の運動を制御する技術、言い換えれば、分子の波動関数の振幅と位相を操作する技術である。位相とは、波の振動

のタイミングのことである。レーザー光は、位相の揃った光（いくつもの光子の波の山と山、谷と谷が揃っている）であるため、コヒーレント制御のための有望な手段の一つと考えられている。

例えば、分子に適当な周波数のレーザー光を照射すると、分子の中に電子波や原子波を発生させることができるが、それらの量子波の振幅と位相にはレーザー電場の振幅と位相が転写される。従って、照射する光の振幅や位相を操作することによって、分子の中の電子波や原子波を制御することができるはずである。

このようなアイデアを最初に提唱したのは、カナダのポール・ブルーマーとイスラエルのモーゼ・シャピロという理論家であり、その当初の目的は、化学反応を制御することであった。例えば、分子

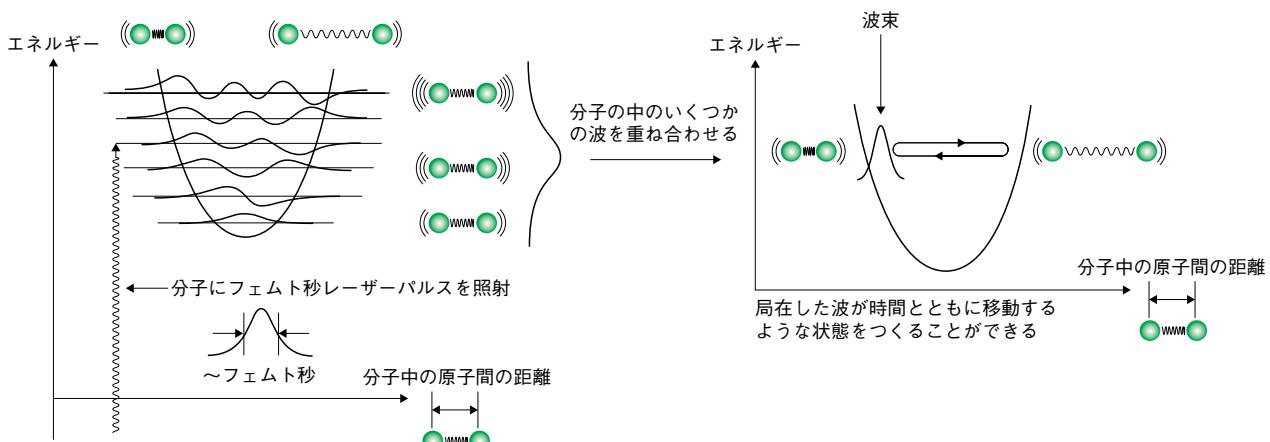


図1 フェムト秒光パルスによって分子の振動波束が発生するしくみ。(分子科学研究所編：『分子科学者がいどむ12の謎』(2005、化学同人)、8章より転載)

に振動数の異なる2種類のレーザー光を同時に照射すると、それぞれの光の波の振動に同期した複数の原子波や電子波が生じ、分子の中で重なり合って干渉を起こす（量子力学の世界では、1個の分子が同時にいくつもの状態をとれる）。このため、2種類のレーザー光の振動の位相を調節すれば、分子がたどりうるいくつかの反応経路のうち、例えば分子の分解だけを促進するような干渉を引き起させる可能性があるわけだ。このような制御はブルーマーシャピロ型と呼ばれる。

また、近年ではフェムト秒<sup>\*3</sup>幅の超短パルスレーザーが開発され、これを用いた反応制御も試みられるようになった。例えば、図1に示すように、二原子分子に分子振動の周期（通常ピコ秒<sup>\*4</sup>以下のオーダー）よりも短い光パルスを照射すると、複数の異なる分子振動状態（それぞれは原子の定在波であり、振動固有状態と呼ぶ）が存在する状況をつくり出すことができる。

それらの定在波は、一定の位相関係で重ね合わせられると干渉し、互いに強め合う場所に「波束」と呼ばれる局在した原子波が発生する。波束を構成するおののおのの定在波（固有状態）の振幅と位相には、対応する周波数帯の光電場の振幅と位相が転写されるので、光の振幅と位相を操作すれば波束を制御することができる。

波束を構成する定在波の振動速度がそれぞれ異なるため、波束は時間とともに移動していく。そこで、狙った位置に波束が到達したタイミングを見計らって別のフェムト秒レーザーパルスを照射し、反応を制御する試みも行われている。このような制御はタナーライス型と呼ばれるもので、イスラエルのデイヴィッド・タナーと米国のスチュアート・ライスという理論家によって考案された。

ブルーマーシャピロ型とタナーライス型のアイデアは1980年代の半ばに考案されていたが、実験室での実現のためには1990年代の急速なレーザー技術の発達を待つ必要があった。現在では、化学反応制御のほかにも、金属固体中の電子ダイナミクスの探索や、物質の量子

状態を用いた情報処理など、コヒーレント制御の応用範囲は急速な広がりを見せている。

### 分子に情報を書き込む

原子や分子に、相対位相がロックされた二つのフェムト秒レーザーパルスを連続的に照射すると、一つの原子や分子の中に二つの波束が発生し干渉を起こす。これは波束干渉法と呼ばれ、上記のブルーマーシャピロ型とタナーライス型

の両方のエッセンスを融合させた重要な基盤技術の一つである。

波束干渉法は、この10年来、開発が進んできた。その中心となったのは、上で述べた分子の振動波束ではなく、1個の原子の中の電子の波束である。原子の中では、電子がとれるエネルギーはとびとびで、値が決まっている。この各状態の振幅と位相を波束干渉で制御する技術が進み、これによって情報の読み書きをするような画期的な試みも始まっている。

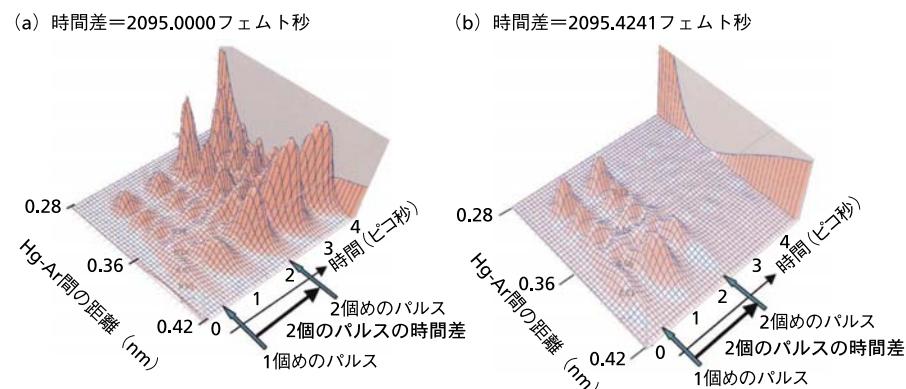


図2 HgAr分子の中で2個の振動波束が干渉するようすを示すシミュレーション。波動関数の2乗をプロットしてある。(K. Ohmori et al., *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.*, **145**, 17-21 (2001)より転載)



図3 実験風景。正面の壁に投影された画面は、APMから出射された2個のフェムト秒レーザーパルス対を分光器に入射して測定したスペクトル干渉である。このスペクトル干渉の山や谷の位置が横方向にぶれなければ、空間的に隔たった2個のフェムト秒パルスの位相差が安定していることになる。このときの実験条件では、隣り合った山と山の間隔が約850アト秒に相当している。この写真は8秒露光で撮られたものだが、その間ぶれが見られない。実際に40分以上の連続測定を行うことが多いが、その間もこの壁上の干渉波形はほぼ静止している。撮影：由利修一

しかし、処理速度や記憶容量の点では、多数の状態をとりうる媒体を用いるほうがはるかに有利である。単独の原子には、二原子分子のような振動や回転がないのでとれる状態は少なく、分子のほうに軍配が上がる。ただし、こういった情報処理はアンサンブル（原子や分子の集合体）を用いて行われるが、その際、とりうる状態が多いことがあだとなる。分子アンサンブルはおもに回転運動に起因する量子位相緩和が激しく（位相の乱れが起こりやすく）、全体としての波の性質が急速に失われてしまう。

われわれは最近、分子アンサンブルの位相緩和を桁違いに軽減する手法を開発した。また、独自に開発した「アト秒<sup>\*5</sup>位相変調器（APM）」という高精度の光学干渉計を用いて、2個のフェムト秒光パルスの位相差をアト秒レベルでロックすることにも成功している。これら二つの技術を組み合わせることによって、かつてない高精度の分子波束干渉を達成すると同時に、振動固有状態をビットと見なしたコードの読み書きを実現している。

図2は、HgAr分子の中に発生した2個の振動波束が干渉するようすを示す理論シミュレーションである。このように、波束の相対位相を180°（～400アト秒）変化させると、分子内の干渉パターンは劇的に変化する。2個の波束を発生させるタイミングによっては、さらに複雑な干渉パターンをつくり出すことができる。これは、波束を構成する複数の定在波（振動固有状態）の振幅と位相関係が変化するためである。つまり、2個の波束を発生させるフェムト秒パルス対の位相差をアト秒レベルで制御することで、分子の中にさまざまな振幅位相情報を書き込めるのである。

図3は、われわれの研究グループが実際に実験を行っているようすを示す写真である。人間が動いても、干渉の縞が動かないことに注目していただきたい。このような高精度の波束干渉を活用すれば、分子の振動固有状態をビットとみなして、分子の中にデジタルコードを書き込むことができる。

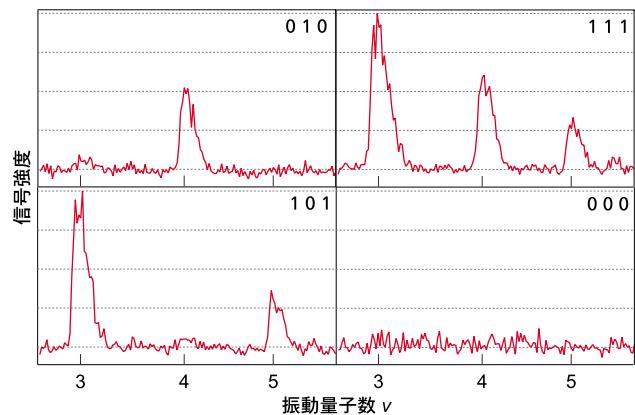


図4 HgAr分子内に30ナノ秒保存されたポピュレーションコード。フェムト秒パルス対照射の30ナノ秒後に各振動固有状態のポピュレーション（各状態がどれだけの割合で存在するか）を測定した。（K. Ohmori et al., *Phys. Rev. Lett.*, **91**, 243003-1-243003-4 (2003)より転載）

図4は、実際に分子内に書き込まれたコードを読み出した例である。読み出しにもレーザー光を使う。われわれはこれを「ポピュレーションコード」と呼んでいる。ポピュレーションコードは振幅情報のみを表しているが、現在では振幅と位相の両方を読み出すこともできるようになっている。さらに、書き込んだコードの書き換えを行うための技術開発を進めている。

### 量子論の理解に向けて

原子・分子レベルのミクロな世界では、量子波の干渉はごく普通に見られる現象である。すでに、コヒーレント制御の応用範囲は、気相中の孤立原子・分子ばかりでなく、液体や固体あるいは表面界面など広い範囲に及びつつある。最近では、光合成システムなどの生体系における量子コヒーレンスの役割も解明されつつあり、将来的には生体系もコヒーレント制御の対象になるかもしれない。

このような系では、多数の原子や分子が複雑に相互作用しており、孤立系に比べて物質の波としての性質が失われやすい。これは「デコヒーレンス」と呼ばれる現象である。今後、デコヒーレンスの機構を解明し、制御するための努力が必要になってくるだろう。

一方、量子論は今なおショッキングな理論である。粒子と波の二重性には頭を

悩ませている人も多い。コヒーレント制御が物質の波動性を利用したものである以上、その追求は量子論的な世界観の検証でもあるはずだ。量子論をよりよく理解するためのヒントがそこに隠されているかもしれない。

\*1 分子の中のいくつもの結合のうちで、特定の結合のみが反応するように制御すること。

\*2 p.11~12も参照。

\*3 1 フェムト秒=10<sup>-15</sup>秒（1000兆分の1秒）

\*4 1 ピコ秒=10<sup>-12</sup>秒（1兆分の1秒）

\*5 1 アト秒=10<sup>-18</sup>秒（100京分の1秒）



大森賢治（おおもり・けんじ）  
1991年、カリフォルニア工科大学のA. H. Zewail（1999年ノーベル化学賞受賞）がフェムト秒レーザーパルスを使って分子が解離するようすをリアルタイムに観測したという論文を発表した。これにショックを受けたのが、超高速レーザー科学にかかるきっかけとなった。現在は、フェムト秒パルスを使って物質の中につくった量子波がどのように乱れていくかに興味をもっている。  
写真提供：大森賢治

# 分子研の大学院教育

中村宏樹

総合研究大学院大学教授機能分子科学専攻／自然科学研究機構分子科学研究所所長

この世の中の多くのものは分子からできている。分子科学研究所は、分子の構造、物性、機能、反応、および、新しい分子の創製に関する基礎学術研究を行う中核的機関である。平成16年度から、自然科学研究機構の一員として再スタートした。世界最先端の施設・設備と人材を有し、化学のみならず、物理、生物にまたがる幅広い分野で世界第一線級の研究が行われている。それも、研究者の自主性と独創性に基づくものである。

総研大の基盤機関として構造分子科学と機能分子科学の2専攻（定員はそれぞれ6名）をもち、毎年何名かの留学生も受け入れている。平成18年度からは、学部卒の学生を受け入れる5年一貫制博士課程が導入される。これまでにも、大学教員になるなど有為な人材を多く輩出しているが、新制度によってより充実した人材育成ができると確信している。

通常の大学には見られない恵まれた研究環境、学生一人あたりの教員数の多さ、国際的な環境は、研究三昧に適している。研究グループ単位の研究活動、総研大本部における種々の活動



写真提供：分子科学研究所

に加え、分子研独自のコロキウム、フォーラム、オープンセミナーなど、研究者としての資質を高めるのに役立つさまざまな企画が工夫されている。分子研をよりよく知ってもらうために、一般公開、オープンハウス、夏の体験入学、冬の学校、公開講座などの活動が行われている。ぜひ、ホームページをのぞいていただきたい。

21世紀はアジアの世紀であり、前世紀の西洋哲学とは異なる東洋的な新しい哲学に基づく新しい科学の誕生が期待されている。気骨、意欲、複眼的視点をもって新しい分子科学に挑戦する若者の参加を大いに歓迎する。厳しい研究生活の中にも、独創的研究の楽しさを感じとり、未来への希望をもって果敢に挑戦して行く若者を。なお、30周年を迎えた機会に『分子科学者がいどむ12の謎』という単行本を出版した（化学同人発行）。参考にしてもらえば幸いである。

# 光と振動をめぐる日々

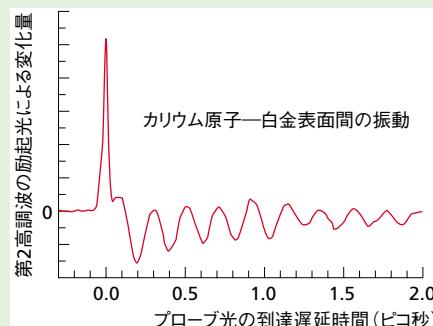
冬木正紀

総合研究大学院大学先導科学研究科光科学専攻2年

現在の研究は、アルカリ原子を吸着した金属表面において、アルカリ原子—金属間の振動を光により制御することです。通常の熱反応でも、吸着種—金属表面間の振動は励起され、吸着種は拡散し、反応を起こします。したがって、吸着種—金属表面間の振動は表面反応において重要な役割を果たします。しかし、熱エネルギーではこれを意のままに制御することは困難です。光による振動の制御は、最終的に固体表面における化学反応の理解と制御につながると考えています。

$10^{-14}$ 秒程度という、振動の周期より短い時間幅をもつ励起光を上述の金属表面に照射することで、アルカリ原子の振動の位相を揃えることができます。位相の揃った振動は金属表面の電場を周期的に変化させるため、プローブ光を遅れて照射するとプローブ光の第2高調波（もとの2倍の振動数をもつ波）の強度が振動周期に伴って変化します。すなわち、表面上に吸着した原子振動を実時間で直接観測することができるのです。

朝は、レーザーの起動により始まります。次に、超高真空チャンバーの内部に設置した金属の表面を清浄化します。一方で、



写真提供：冬木正紀

パルス光の時間幅と波長を自前の光学系により調整します。そして、ようやくタ方に金属表面にアルカリ原子を蒸着して、第2高調波の測定を開始することができるという日々です。

位相の揃ったアルカリ原子—金属間の振動を誘起するには、励起光を照射したとき、金属表面の電荷分布がどのように変わらるべきを理解する必要があります。また、アルカリ原子が吸着した金属表面では、振動以外に、表面フォノンも励起され、弾性波も金属内を走ります。しかも、これらは相互作用します。このため、アルカリ原子—金属間の振動を制御するには、表面フォノンや弾性波についても理解を深める必要があります。

光による吸着種振動の制御のためには毎日が挑戦です。親切で個性的なスタッフの方々や先輩方と共に、世界の科学へ貢献できるよう精進いたします。