

光分子科学

光が拓く新たな物質像

光分子科学の今

光分子科学の最前線

光分子科学の未来を語る

4次元デジタル宇宙プロジェクト

渦と螺旋——自然と人類のアート

『総研大 文化科学研究』を創刊

特集 光分子科学 光が拓く新たな物質像

Part1 光分子科学の今

- 3 「光で観る」時代から「光で制御する」時代へ
松本吉泰

Part2 光分子科学の最前線

- 6 マイクロチップレーザーの開発
平等拓範
- 8 赤外域・紫外域の高強度レーザー
猿倉信彦
- 10 「近接場」の光で見えてきたナノの世界
岡本裕巳
- 13 1個の生体分子の運動を観る
原田慶恵
- 16 量子の波を光で制御する
大森賢治
- 19 分子研の大学院教育
中村宏樹
光と振動をめぐる日々
冬木正紀

Part3 光分子科学の未来を語る

- 20 新しいレーザーで新しい分野を拓く
緑川克美
- 22 光の力を活かしたナノテクノロジー
増原 宏
- 24 光触媒が応用技術をリードする
藤嶋 昭

- 26 渦と螺旋——自然と人類のアート
松田行正
- 27 総合科学サイバー・ミュージアム 企画展「渦と螺旋」
吉田憲司
- 32 4次元デジタル宇宙をあなたに
国立天文台4次元デジタル宇宙プロジェクト
- 37 シアターの一般公開とコンテンツのリリース
蜷川由彦

大学院生に聞く 長倉研究奨励賞受賞者／総研大研究賞受賞者

- 40 女性ホルモンによらない、生殖器官の細胞増殖メカニズムを解明 宮川信一
インドネシア農村部の食文化を、多様な観点から分析 阿良田麻里子
- 41 南極海における、生物活動と硫化ジメチル生成の関連を追う 笠松伸江
電子のふるまいから、分子の状態を探る 高田正基
- 42 ゲージ理論と弦理論の等価性を部分的に解明 高山靖敏
カーボンナノチューブで大電流の放出を実現 野口恒行

- 43 レフェリージャーナル『総研大 文化科学研究』を創刊
鈴木貞美

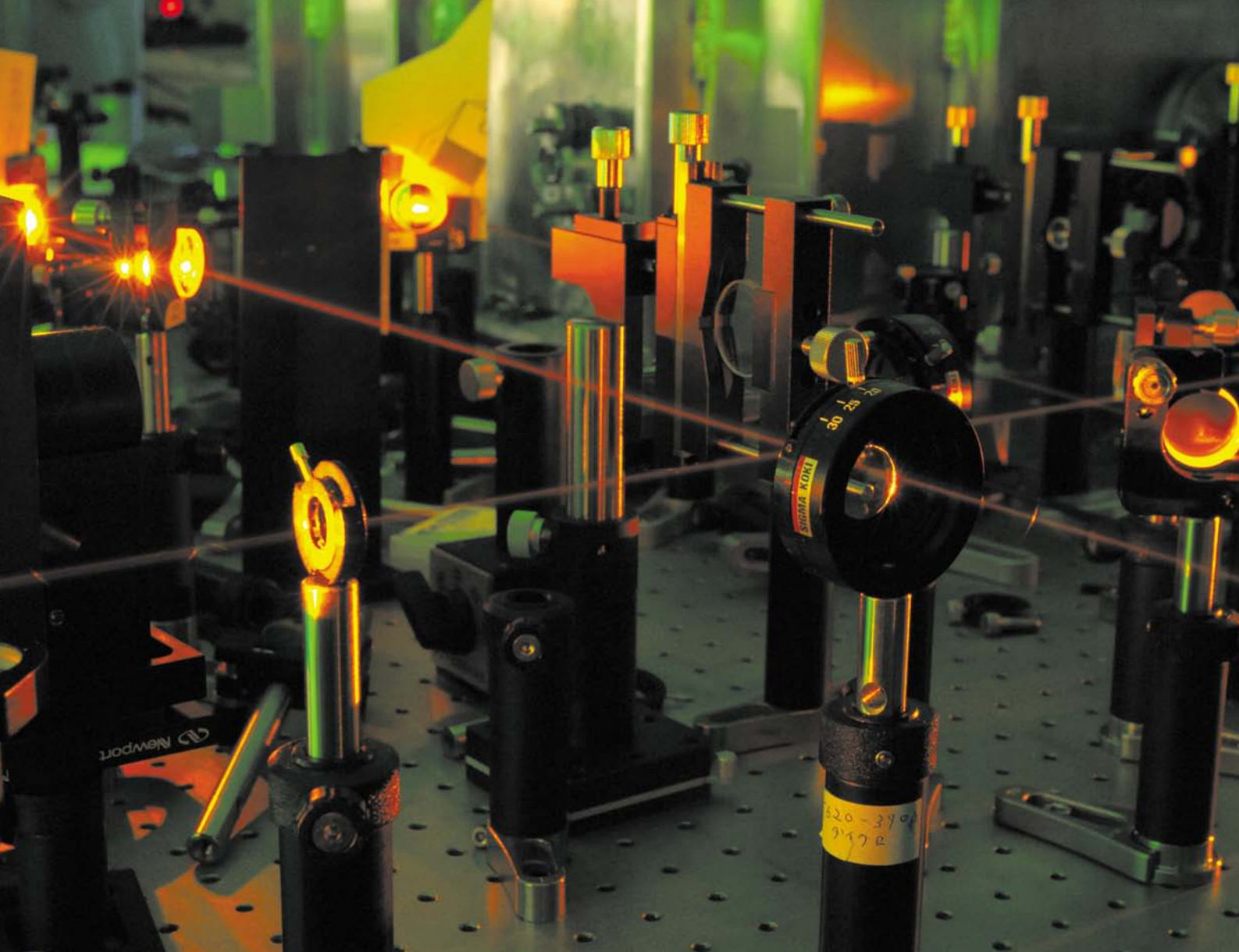
科学と社会

- 38 巨大地震と人類学の果たすべき役割
杉本良男
- 46 KEK史料室の活動
高岩義信

- 48 総合研究大学院大学の概要

表紙：近接場光学顕微鏡で見た金のナノロッド。長さ約440nmのまっすぐな棒に生じる電子の振動が、縞模様として観察される。

Reproduced with permission from
J. Am. Chem. Soc., vol. 126, No. 40, p. 12731,
©2004 American Chemical Society



特集

光分子科学

光が拓く新たな物質像

この世界の物質は、分子や原子から成り立っている。

分子や原子は、光を吸収したり放出したりする。光を吸収して変化することもある。

このような分子・原子と光の関係を利用して、物質の性質を調べたり、物質を反応させたりするのが「光分子科学」である。

最近では、レーザー光を中心にさまざまな光源が開発され、その特性を利用することによって、

これまで知られていなかった分子・原子の姿をとらえたり、いろいろなレベルで分子・原子を操ったりできるようになってきた。

この特集では、「光をつくる」「光で観る」「光で制御する」をキーワードとして、光分子科学という分野の現状をPart1で概観し、Part2では第一線の研究者による現在進行中の研究を通してこの分野の魅力を伝える。

そしてPart3では、この分野をリードする立場にある研究者へのインタビューにより、近未来の展望を描き出す。

「光で観る」時代から「光で制御する」時代へ

松本吉泰

総合研究大学院大学教授光科学専攻／自然科学研究機構分子科学研究所教授

光分子科学は、学術研究の重要な分野であるだけでなく、身のまわりで起こる現象にも深く関係している。研究は新たな方向に向かいつつあり、情報通信やエネルギー技術への応用も期待されている。

光分子科学とは？

さんさんと照りつける光の中で成長する草木。私たちの身近にありふれた光景だが、この中で光エネルギーを物質に変換するための光と分子が織り成す巧妙な作業が繰り返されている。また、この光景を見ている私たちの目にも、光を感じてこれを信号に変え、脳に伝達する巧妙な分子の仕組みが存在する。

ありがたいことではないが、都市圏（例えば東京都全域）では今でも年に20回程度の光化学スモッグ注意報が発令されているし、南極圏ではオゾンホールのおおきさが毎年話題になる。これらの現象も、光によって生成される活性な分子がトリガーとなって引き起こされるものである。

最近、家屋の壁や高速道路の照明器具などについた汚れが光によって自然に除去されるコーティングがあるのをご存知だろうか。これは光触媒というものの働きで、光と物質、光と分子のかかわりあいを上手に利用した例である。

このように、光と分子のかかわりは、私たちの身のまわりの自然現象から工学的な応用にいたる幅広い場面で現れる。これらを対象とするのが光分子科学であり、名前の堅さとは裏腹に私たちの暮らしに深くかかわっている。

光分子科学は、分子科学という学問分野の一領域である。自然界には多種類の

物質があり、また、さまざまな現象が起きている。物質を根源までさかのぼれば素粒子に行きつくが、物質の性質やこれがかかわる現象は0.1～数nm^{*}の分子（これ以降、原子も含む）の世界で理解するのがもっとも有効である。分子レベルで物質の成り立ち（組成、構造）、性質（電気的、磁氣的など）、物質間の変換（化学反応）の仕組みを研究するのが、分子科学という学問分野である。そのうちでも、光がかかわる分子科学を光分子科学と呼んでいる。

光分子科学は、私たちの身近な現象とかかわりがあるというだけではなく、学術における過去の歴史の中でたいへん重要な役割を果たしてきた。すなわち、光

と分子がどのように相互作用するのかを解明することは、分子というミクロな世界の科学（量子力学）が大きく発展する上で大きな役割を果たし、新規な理論であった量子力学の検証の場として有効に働いてきた。

さらに、光分子科学は、光と分子との相互作用を巧みに用いて物質の構造や機能の解明を行うという面でも、大きな成果を上げてきた。現在の光分子科学は、このような「光で観る」という立場をさらに強める一方で、「光で制御する」という、より能動的な立場に成長しようとしている。これは、光のエネルギーを他のエネルギー（電気など）や物質に有効に変換したり、分子がかかわるさまざまな現

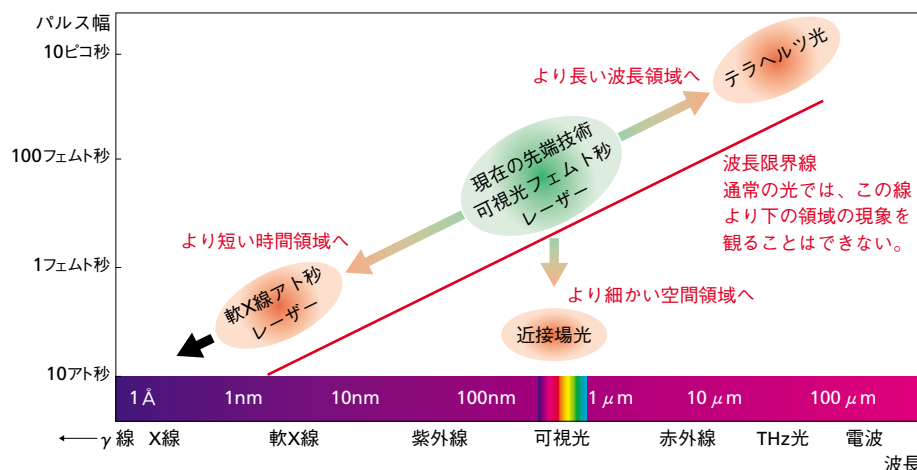


図1 さまざまな光の波長とパルス幅の関係

私たちの目に見える光（可視光）は、波長が数百nmである。これより長い波長の光や短い波長の光を使うと、物質の新たな側面を「観る」ことができる。特に、波長の短い光は、短いパルスをつくれることから、速い現象を「止めて」観ることが可能だ。（理化学研究所「エクストリームフォトニクス」資料より）

象を意のままに操ったりする研究で、今後、その重要性は増すと考えられる。そして、これらの研究を支えるのが、さまざまな特性の「光をつくる」研究である。

本特集では、光分子科学の現状と将来を概観するとともに、総合研究大学院大学、および、その基盤機関で行われている研究の一端を紹介する。

光分子科学における諸分野

まず、光分子科学のおもな分野を概観してみよう。光は、分子の構造を決定する有力な手段である。例えば、水分子は2個の水素原子と1個の酸素原子からなるが、3個の原子が直線的に並んでいるのか、あるいは、ある角度をもって配置しているのかといった分子の構造は、分子がどのようなエネルギー（あるいは波長）の光を吸収するかという吸収スペクトルの解析により精密に決めることができる。特に、赤外領域の吸収スペクトルは分子の指紋とでもいうべきもので、それぞれの分子によってスペクトルが異なるため、これから分子の特定ができる。このようにして分子を「光で観る」研究分野は分子分光学と呼ばれる。わが国の光分子科

学の中ではもっとも伝統のある分野である。

分子や原子、さらに、それらからなる物質の性質は、その中に含まれる電子の状態によって決定される。たとえば、物質の色は物質内の電子がどのような波長の光を吸収するかということに関連している。光を吸収すると、物質は光のエネルギー分だけ高いエネルギー状態に移るため不安定になる。その結果、分子内の結合が切れたり、電子が分子から外に飛び出したりすることも多い。このようにして生じる化学種やイオン種は反応性が高く、さらにさまざまな分子と反応する。このような、光により誘起される化学反応を調べる分野が光化学である。

分子分光学にしても光化学にしても、その発展は、レーザー光源と分子科学との出会いを抜きにして語ることはできない。また、分子分光学の成果が新たなレーザー光源を生み出してきたという歴史もある。レーザーの開発においては、発振する波長領域を拡大することとともに、より短いパルス光をつくるということに力が傾注されている（図1、および平等助教授、猿倉助教授の解説、緑川主任研究員のイン

タビュー参照）。

短パルス化に関しては、ナノ秒^{*2}からピコ秒^{*3}、フェムト秒^{*4}領域の短パルス光が今や実験室で容易に得られ、レーザー開発はアト秒^{*5}領域に踏み込もうとしている。分子内の振動運動の典型的な周期が約10フェムト秒だから、短パルス化によって文字通り分子の瞬間の状態をとらえることができる。このような分子の状態変化や運動を実時間でとらえる超高速分子分光という分野が形成されている。

光分子科学における最近の動向と将来

電磁波である光には、エネルギー（波長）、強度、位相（山と谷の現れるタイミング）などいろいろな属性がある。図2に、レーザーのさまざまな属性を軸にとって現状と今後の方向を示した。

今後、発展すると考えられる「光で制御する」研究の一つは、光の位相を積極的に活用するものである。従来の光分子科学は光のエネルギーをおもなパラメーターとして使ってきており、光の位相にはあまり注目してこなかった。しかし、光の位相も重要な光の属性であり、光と分子とをうまく相互作用させると、分子内に光の位相情報を書き込むことができる。このような研究は、分子を情報媒体としたり、分子の反応経路を選択したりすることにつながると期待されている（詳しくは大森教授の解説参照）。

レーザー開発の一つの方向は、上述したように「短パルス化」である。短パルス化により、分子を構成する原子核の動きをより精緻にとらえることが可能となり、アト秒領域になると分子の結合を担っている電子の動き（電子は原子核よりも3桁以上質量が小さいのでその動きはきわめて速い）自体を観測できるようになってくる。

短パルス化と同時に進んでいるのが、光強度を飛躍的に大きくするという方向である。分子内の結合は電子と原子核の間のクーロン力が基本であるが、分子内のクーロン場と同程度の強光子場のもとでは、分子は光子場とともに「光と分子の混じり合った状態」を形成し、その構

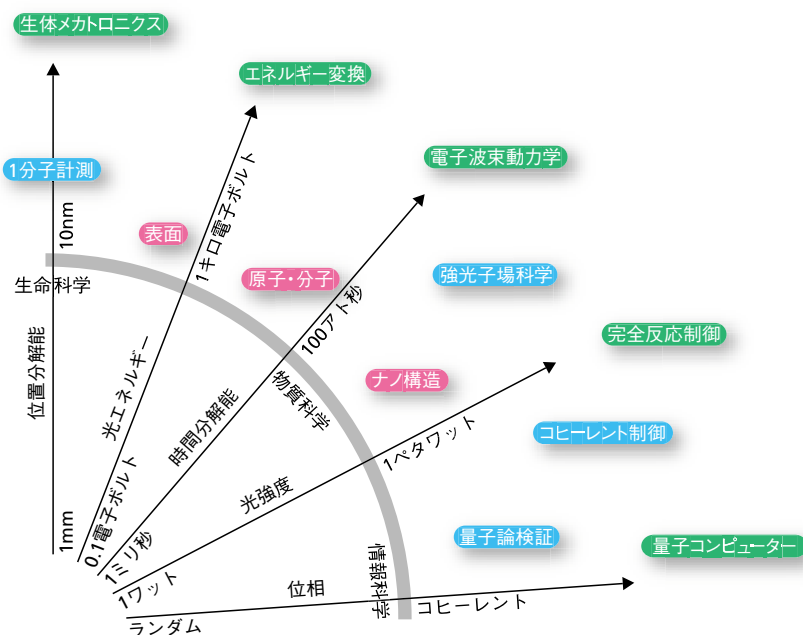


図2 レーザーのさまざまな属性と、それを利用して行われる研究の対象（赤色）。水色は現在の研究、緑色はこれからの研究を示す。



図3 光分子科学の諸分野とおもな研究機関

造と運動は光子場の性質によって大きく影響される。現在、このような強光子場を得ることが可能になりつつあり、強光子場下の分子の挙動を調べる分野が開けつつある。

「光で観る」といったとき、前項のような分光的手法ではなくむしろ光学顕微鏡のほうが一般的にはなじみ深いだろう。この分野での進展も著しく、空間分解能の向上や単一分子についての計測・分光が可能になりつつある。通常の光学顕微鏡の場合、空間分解能は光の回折による制限を受け、用いる光の波長程度が限界である。しかし、近接場という光を使うと、ナノメートル領域での計測や分光が可能となる（詳しくは岡本教授の解説参照）。また、通常の光学顕微鏡を用いても、観察する分子が十分大きく、また視野内にその数がきわめて少ない状況では単一分子の計測が行える。さまざまな蛍光色素や蛍光を発するタンパク質を利用する手法が開発され、生命科学分野におけるタンパク質分子の運動や機能の解明に役立っている（詳しくは原田副参事研究員の解説参照）。分光的手法と顕微鏡を合体して、固体中の反応を見ようという意欲的な研究もある（詳しくは増原教授のインタビュー参照）。

光分子科学においては、レーザーを用いたこのようなハードコアの研究とともに

に、もっと広い意味で重要な応用分野が開けつつある。はじめにも述べたように、光触媒である酸化チタンなどの金属酸化物では、これに吸着した細菌を含む有機物を微弱な紫外光で簡単に分解できることが見だされている。さらに、この表面自体が光照射によって疎水性から超親水性に変換できることもわかってきている（藤嶋理事長のインタビュー参照）。また、可視光のエネルギーを利用できる新たな太陽電池の開発や太陽光による水の光分解は、人類のエネルギー問題を解決するための重要な研究課題といえる。

総研大における取り組み

以上、光分子科学の諸分野とその現状・将来を概観した。これらの研究は研究所や大学の一部の講座が独立に行っている場合が多い（図3）。総研大では、光分子科学を含むもっと大きな枠組みとして光科学専攻を設置している。また、光分子科学に関連する他の専攻としては、物理科学研究科のうちでも分子研に設置された構造分子科学と機能分子科学の2専攻が中心となっている。また、生物分野関連では生命科学研究科の基礎生物学専攻をあげることができる。

ここで述べた光分子科学は、レーザーを中心とした、いわば、レーザー光分子科学とでもいうべきものである。スペー

スの関係で一切触れることができなかったが、放射光を光源とした光分子科学の分野が一方にはあり、分子研の2専攻とともに高エネルギー加速器科学研究科の物質構造科学専攻が大きな役割を果たしている。

これらの専攻では大学共同利用機関ならではの環境と施設を活用した、光分子科学における最先端の研究をベースとした大学院教育を実施している。

- *1 1 nm (ナノメートル) = 10^{-9} m (10億分の1 m)
- *2 1 ナノ秒 = 10^{-9} 秒 (10億分の1秒)
- *3 1 ピコ秒 = 10^{-12} 秒 (1兆分の1秒)
- *4 1 フェムト秒 = 10^{-15} 秒 (1000兆分の1秒)
- *5 1 アト秒 = 10^{-18} 秒 (100京分の1秒)



松本吉泰（まつもと・よしやす）

学生のころから光と物質の相互作用に興味をもっていた。現在まで、分子分光、表面光化学、表面超高速過程を中心に、電子や原子核のダイナミクスについて研究を行っている。固体表面で起こる反応のメカニズムを明らかにし、光や電子によって反応を制御することをめざしている。写真提供：松本吉泰

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（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はなかった。

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:YVO₄*¹を用いて連続波（CW）100mWを超える高効率、単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直してきた。

その結果、今日では結晶厚300 μ mのYb:YAG*²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/cm³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*³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 μ m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リソの幕開け

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*²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

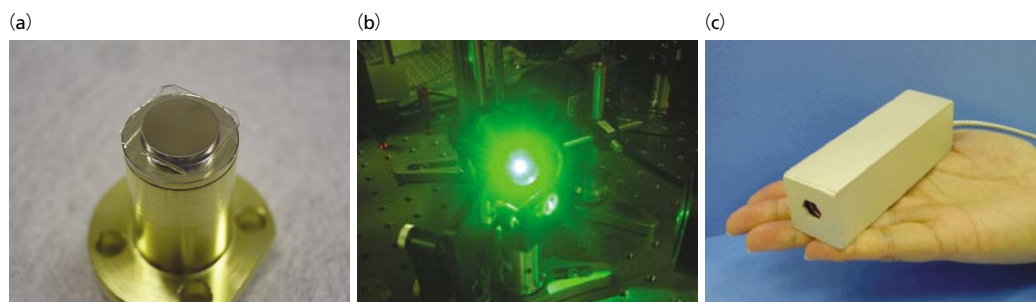


図1 (a) 金属材料加工用高出力レーザーとして開発した単結晶Yb:YAG/セラミックYAG複合構造マイクロチップレーザー（結晶厚は300 μ m）。(b) PPMgLNによる高効率単行波長変換により得られた高出力CW緑色光。(c) 受動Qスイッチによる手のひらサイズメガワットレーザー（尖頭出力1.7MW、パルス幅480ピコ秒）。写真提供：常包正樹ほか／水内公典ほか／酒井博ほか／平等拓範

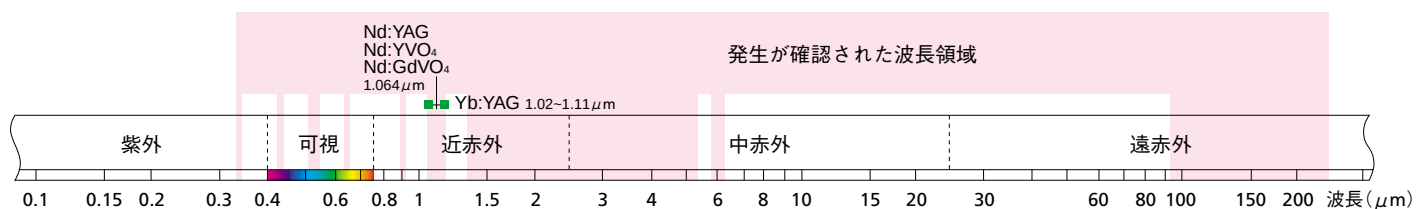


図2 光波制御マイクロチップレーザーにより拡大された波長域。領域拡大に向けた挑戦は今も続いている。

わかっていな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、単一周波数、基本横モードでパルスエネルギー0.96mJ、時間幅480ピコ秒^{*4}、すなわち、尖頭値で1.7MW^{*5}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-cm²とサブペタワット^{*6}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^{*7}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、光ディスプレイから環境計測・セキュリティま

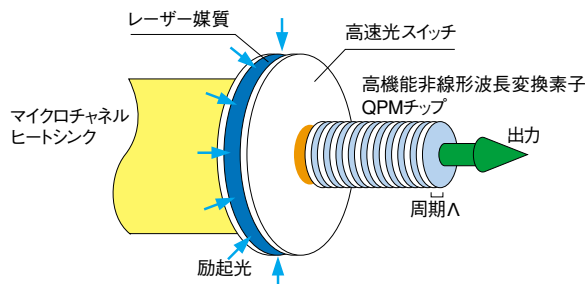


図3 マイクロチップレーザーの概念

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、意外と初歩的な問題が見過され、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 YVO₄（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（Nd³⁺）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（Y₃Al₅O₁₂）の略。これを母体とし、イッテルビウムイオン（Yb³⁺）やNd³⁺を添加してレーザー発振させる。
- *3 1フェムト秒＝10⁻¹⁵秒（1000兆分の1秒）
- *4 1ピコ秒＝10⁻¹²秒（1兆分の1秒）
- *5 1MW（メガワット）＝10⁶W（100万W）
- *6 1PW（ペタワット）＝10¹⁵W（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、高分解分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れるレーザーは分子科学の研究に欠かせないが、これまでは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った現象を「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」を生み出してきている。現在では、10フェムト秒^{*1}以下の超短パルスや、テラワット(10^{12} 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、超高压、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^{*2}(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、磁場中においた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

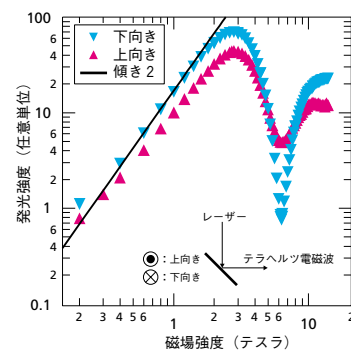
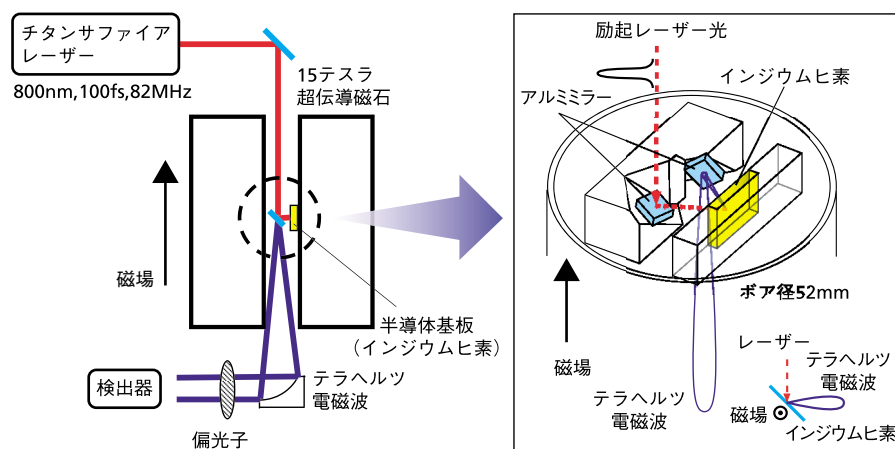


図1 テラヘルツ電磁波の発生と磁場依存性。磁場の中で半導体（インジウムヒ素）基板にチタンサファイアレーザーのパルスをあてると、テラヘルツ電磁波が発生する（左）。磁場を上向きにかけると、下向きにかけると発生する電磁波の強度は異なる（右）。ここには示さないが、電磁波の周波数分布も磁場の向きによって異なる。

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いる。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の写真はチョコラルスキー法^{*3}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_6 ）。現在、半導体リソグラフィ用の光学材料としてフッ化カルシウム（ CaF_2 ）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ク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（ $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ）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かれ、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、これまでは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。

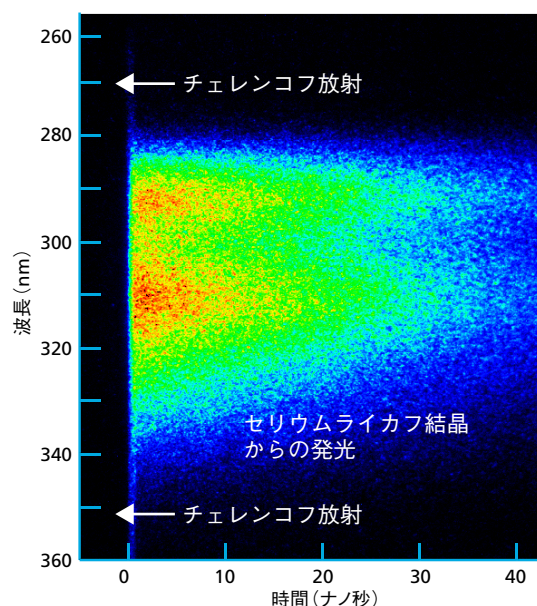


図3 電子ビームで励起したセリウムライカフ結晶からの発光のストリークイメージ。時間を追って波長ごとの強度を測定したものの。290nm付近、320nm付近のピークが数十ナノ秒にわたって持続するのがわかる。

- *1 1 フェムト秒＝ 10^{-15} 秒（1000兆分の1秒）
- *2 1THz（テラヘルツ）＝ 10^{12} 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れば無限に倍率を上げられると考え

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*1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はなく、現在では分子のような小さなものも見るができる。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う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、倍率を得るためのレンズを使わない（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）をあけたものを使う。孔の大きさが

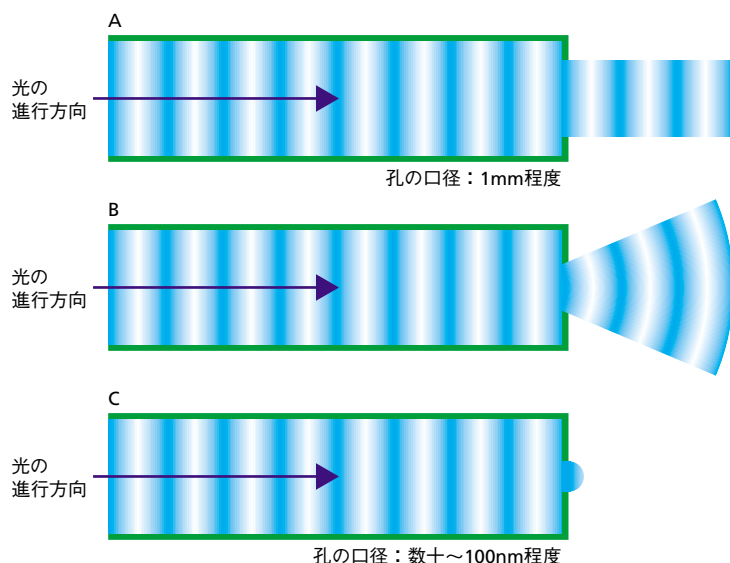


図1 孔の大きさによる光の伝わり方の違い。孔の口径が波長よりも十分大きいときには光は孔を通して直進する（A）が、孔が小さくなると孔から広がって伝わるようになり（B）、孔の口径が波長よりも小さくなると、光は孔の付近にだけ局在して、空間を伝わらなくなる（C）。光の局在する範囲は、おおむね孔の口径程度の距離までである。

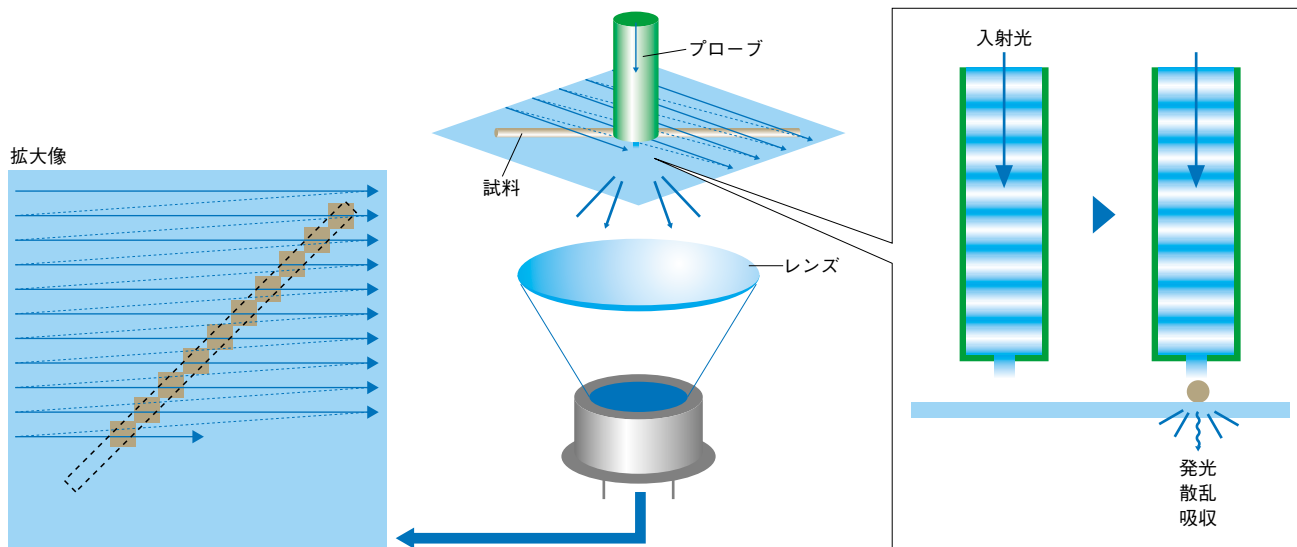


図2 近接場光学顕微鏡 (SNOM) の構成。実際のSNOMでは、光ファイバーの先端に微小な孔のあいた金属膜をつくり、これをプローブとして用いる。プローブを試料表面に近づけて掃引すると、目的物の近くにプローブが来たときに、発光や光の散乱、吸収が起こる。発光や散乱、吸収の強さを試料表面上の位置に対して記録すれば、試料の拡大像が観察できる。

1mm程度であれば、そこにあてた光は孔を通して直進するが、孔が光の波長よりも小さくなると、光は孔を通して伝わるができず、孔の周辺のみにも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の小ささ (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、電子顕微鏡などには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孝平博士 (助手) が中心となって永原哲彦博士、ジョンク・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ったことである。

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が、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*2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ってきた。

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1 m)

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

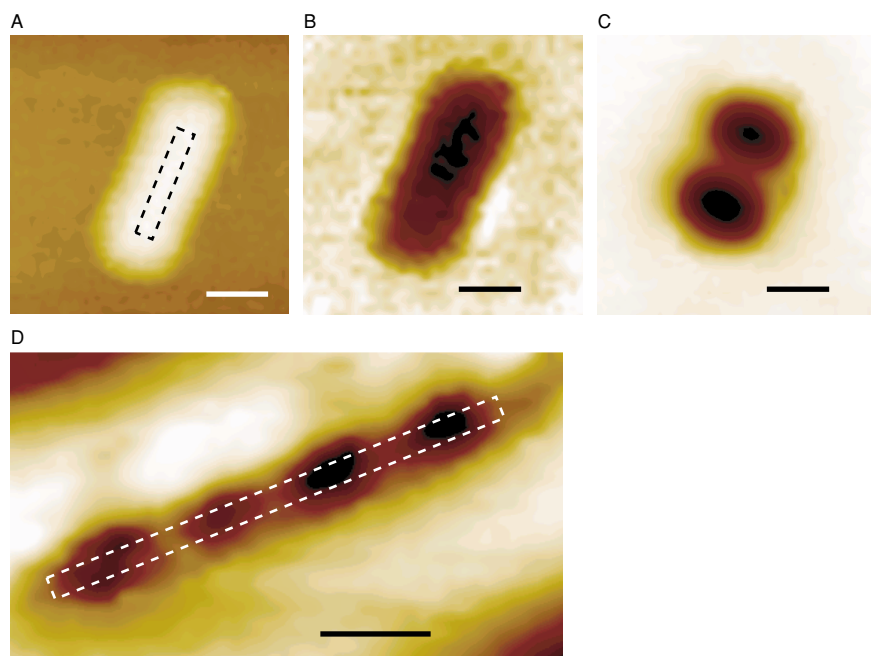


図3 金のナノロッドの近接場光学顕微鏡によるイメージ。(A) 約180nmの長さのナノロッドの形状（トポグラフィ）像。装置の性能の限界のため、実際の寸法よりも広がった像として観察されているが、実際のナノロッドはおおむね点線で示した大きさである。(B) 同じナノロッドの波長530nmの光を使った近接場光学像。(C) 同じく780nmの光を使った近接場光学像。ひょうたんのような特徴的な形が観察される。(D) 約440nmの長さのナノロッドの、780nmの光を使った近接場光学像。縞の数が(C)よりも増えている。実際のナノロッドの大きさの概略を点線で示してある。図中のスケールバーはそれぞれ100nmを表す。(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、知的遊び心を持ち続けていられれば、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^{*1}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^{*2}。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^{*3}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ことができ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発した。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

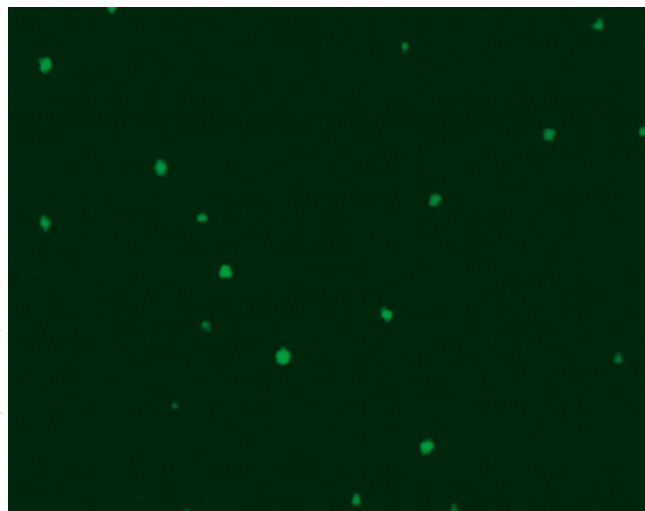


図1 蛍光色素Cy3を結合させた酵素タンパク質分子（グルタチオントランスフェラーゼ）をエパネット照明で観察した蛍光顕微鏡像。個々の蛍光スポットが1分子のタンパク質。白黒カメラで撮影した写真に画像処理で着色した。
写真提供：貴家康尋／原田慶恵

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、光を増幅するイメージ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、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。そのために、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

図2 キネシン1分子の滑り運動観察の模式図

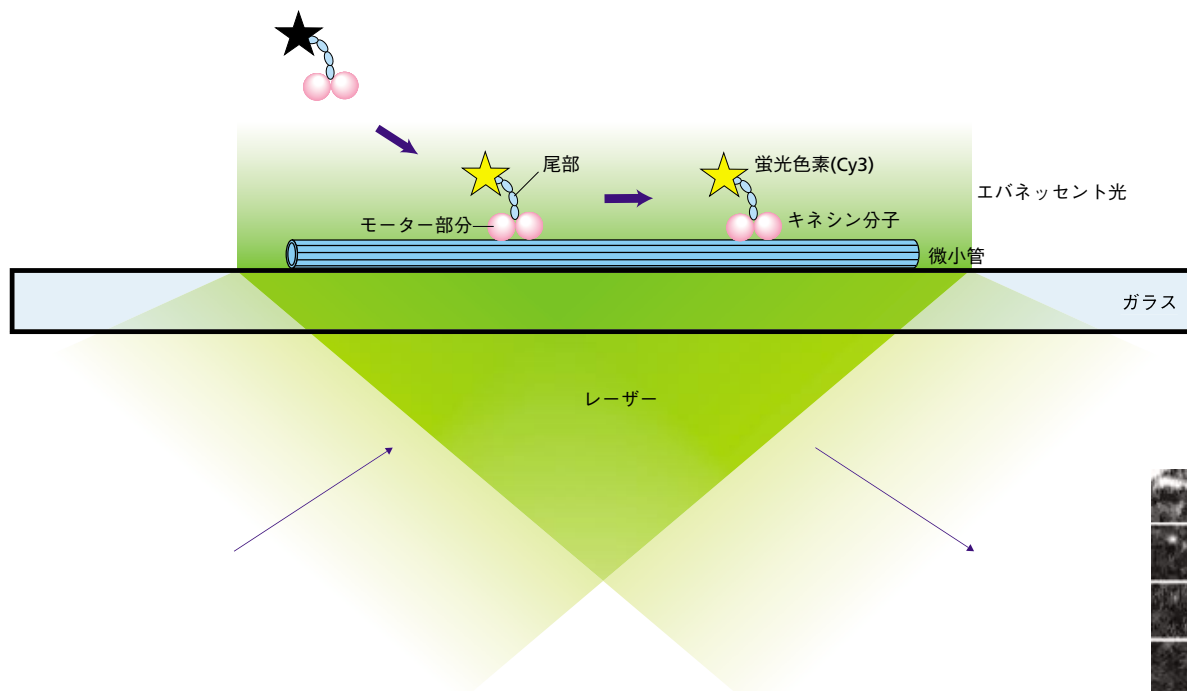
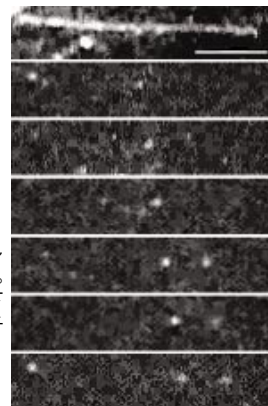


図3 キネシンの滑り運動。いちばん上の像はCy5を結合させた微小管。スケールバーは5 μm 。2番めから下は、Cy3を結合させたキネシン分子が微小管に沿って滑り運動するようすを1秒ごとに撮影した像。
写真提供：武藤悦子/原田慶恵



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 $0.5\mu\text{m}/\text{秒}$ 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NGF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NGF受容体にNGF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NGF(Cy3 NGF)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ので、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 NGF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 NGF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)。

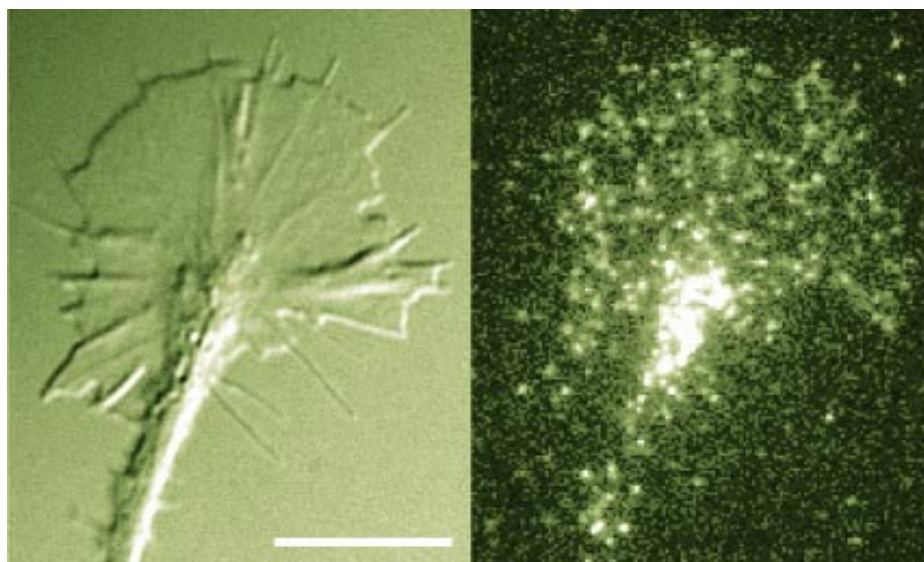


図4 Cy3を結合させた神経成長因子(Cy3 NGF)を投与したニワトリ胚背根節神経細胞の神経成長円錐の微分干渉顕微鏡像(左)と蛍光顕微鏡像(右)。スケールバーは $10\mu\text{m}$ 。Cy3 NGFは葉のように広がった膜上全体に結合している。また、成長円錐基部に非常に多く集積している。白黒カメラで撮影した写真に画像処理で着色した。写真提供: 谷知己/原田慶恵

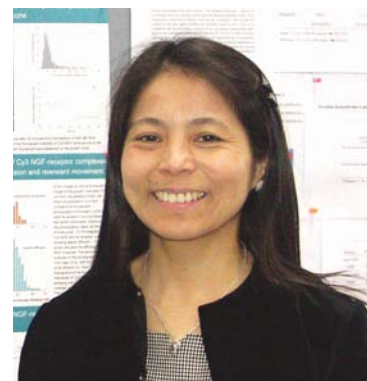
培養溶液にCy3 NGFを加えると成長円錐は前進運動を開始する。このとき、成長円錐膜上には多数のCy3 NGFが結合しているのが観察された。Cy3 NGF分子一つ一つの動きを追跡した結果、受容体と結合したNGFは、膜上に広がって運動した後、成長円錐の周縁から内側に向かい、成長円錐と神経軸索との結合部に集まって細胞内に取り込まれることが示唆された。およそ40分子のNGFが結合すると成長円錐が運動を開始することなども明らかになった。今後は、NGFが結合した受容体の変化も同時に可視化し、さらに詳しく機構を解明したいと考えている。

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1 m)
- *2 p.10も参照。
- *3 $1\mu\text{m}$ (マイクロメートル) = 10^{-6}m (100万分の1 m)



原田慶恵 (はらだ・よしえ)

博士課程の途中まで「ゾ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のは手に負えず、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端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^{*1}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^{*2}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

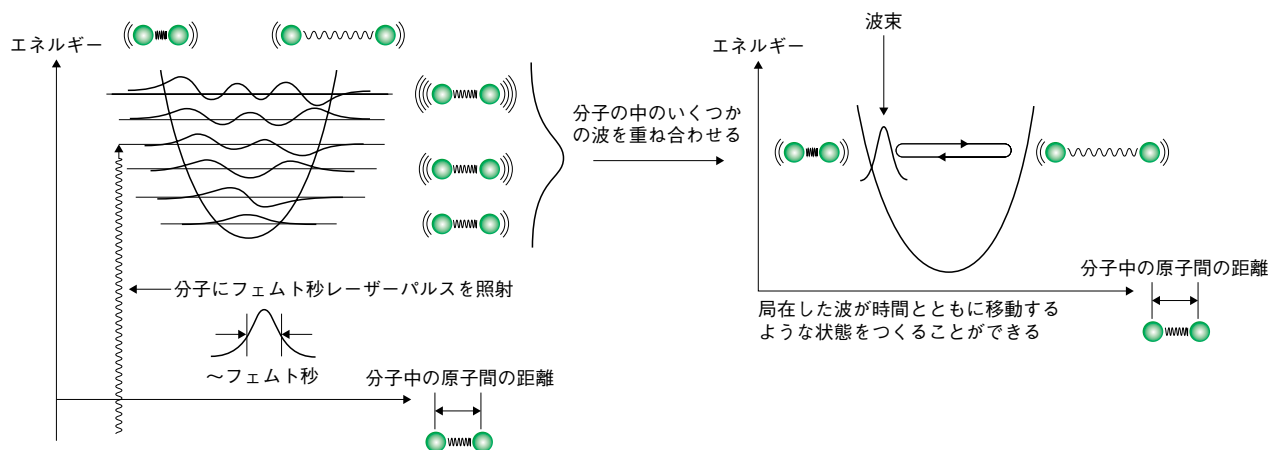


図1 フェムト秒光パルスによって分子の振動波束が発生するしくみ。(分子科学研究所編：『分子科学者がいどむ12の謎』（2005、化学同人）、8章より転載）

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こ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^{*3}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^{*4}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おの定在波（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。

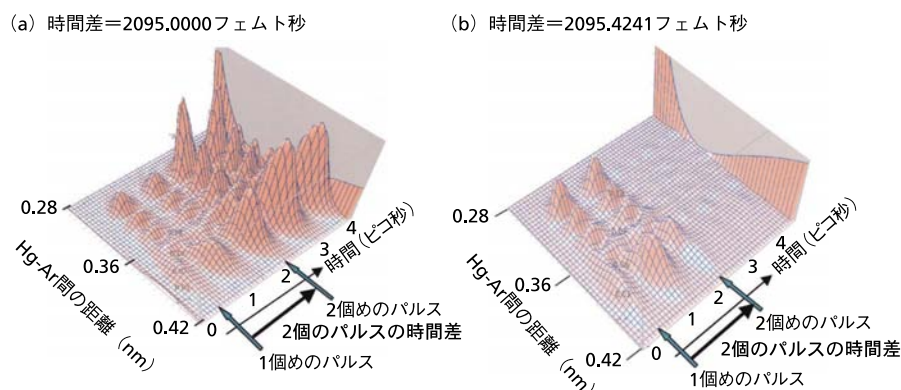


図2 HgAr分子の中で2個の振動波束が干渉するようすを示すシミュレーション。波動関数の2乗をプロットしてある。
(K. Ohmori et al., J. Photochem. Photobiol. A: Chem., 145, 17-21 (2001)より転載)



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。実際には40分以上の連続測定を行うことも多いが、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^{*5}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もできる。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。

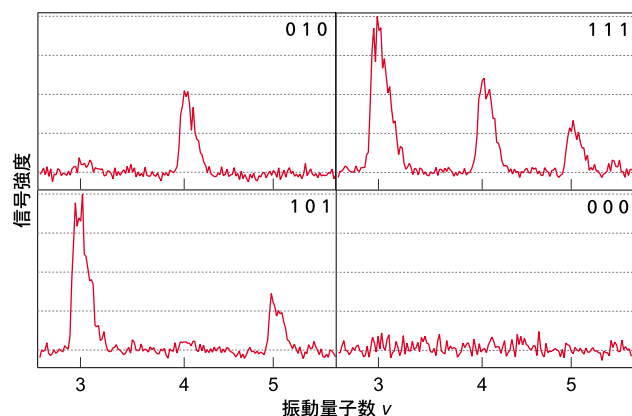


図4 HgAr分子内に30ナノ秒保存されたポピュレーションコード。フェムト秒パルス対照射の30ナノ秒後に各振動固有状態のポピュレーション（各状態がどれだけの割合で存在するか）を測定した。（K. Ohmori et al., *Phys. Rev. Lett.*, **91**, 243003-1-243003-4 (2003)より転載）

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^{-15} 秒（1000兆分の1秒）
- *4 1 ピコ秒＝ 10^{-12} 秒（1兆分の1秒）
- *5 1 アト秒＝ 10^{-18} 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わ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）。参考にしてもらえれば幸いである。

光と振動をめぐる日々

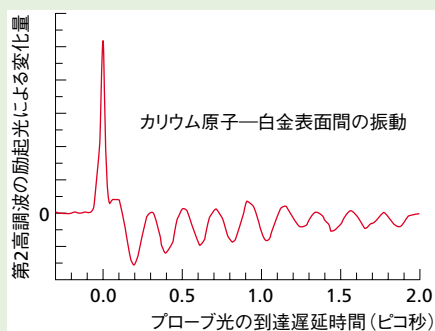
冬木正紀

総合研究大学院大学先端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記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、ようやく夕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るのか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。

新しいレーザーで新しい分野を拓く

緑川克美

理化学研究所レーザー物理工学研究室主任研究員

総研大ジャーナル 8号 2005秋 SOKENDAI Journal No.8
無断で転載することはお断りします。journal@soken.ac.jp

波長が数十nmの軟X線は、現在、レーザーで作り出せるいちばん波長の短い光だ。
波長が短いほど短いパルスをつくれることから、この光で新たな研究分野が開けると期待されている。

「光で観る」ことは科学の基本だと思います。望遠鏡と顕微鏡の発明以来、光による観察や計測は科学の進歩に大きな役割を果たしてきました。しかし、そのために使われてきた光は、可視域がほとんどでした。可視域ではレーザー光も簡単につくり出すことができ、レンズ、ミラー、ファイバーなどの光学素子も極限近くまで開発されています。

これからは、光の波長範囲*1を可視域周辺からもっと外側へと広げることで、科学の先端分野を切り開いていく時代で

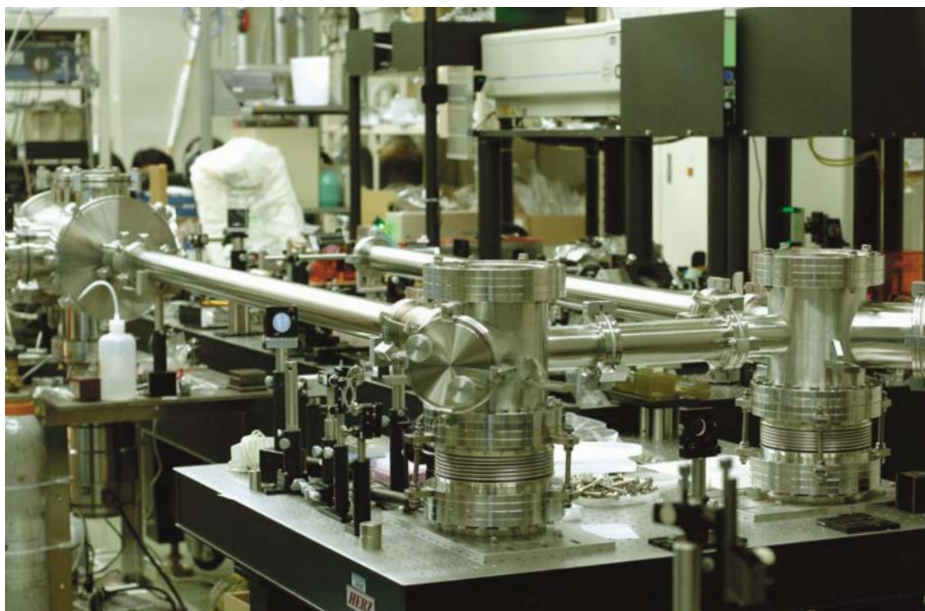
す。ところが、この領域では、光源も、光学素子もないに等しい。ですから、まず光源を開発し、同時に、「どんな手法を使えば、何がどのように見えるのか」を研究しなければなりません。

そのために、今年度から「エクストリームフォトリクス」というプロジェクトが始まりました。これまで光源開発や生体イメージングなどを行ってきた理化学研究所のいくつかの研究グループがまとめ、さらに、分子研や東大などのグループにも加わっていただいて、共通の目

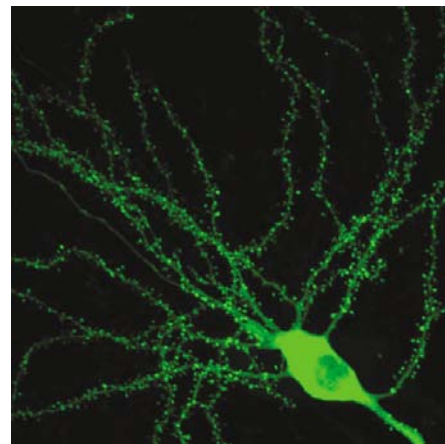
標に向けた研究を進めています。

新しい光で「観る」対象はいろいろ考えられますが、特に期待されるのは生物試料です。生物は、小さな分子、タンパク質などの高分子、それらが集まってできたオルガネラ（細胞器官）、細胞、細胞が集まった組織という階層構造をもっています。「より短い波長で観察すれば、より小さい階層を観察できる」のはもちろんですが、同じ階層をさまざまな波長と手法で観察できれば、異なった空間・時間スケールの情報が得られ、いろいろな

この装置で、軟X線レーザーのアト秒パルスをつくり出す研究が行われている。振動や気流を嫌うレーザー研究のために、装置を設置する建物の設計段階から、さまざまな配慮がなされた。撮影：由利修一



二光子レーザー走査顕微鏡により、神経細胞の中で蛍光タンパク質が光るようすを詳細にとらえることができる。脳科学総合研究センターの宮脇敦史チームリーダーとの共同研究。写真提供：宮脇敦史



生物現象の一部始終が明らかになるものと期待しています。

レーザー研究者の夢を実現

私自身の担当は、軟X線（波長の長いX線）レーザーの開発です。1960年にレーザーが発明されて以来、発振波長をX線にまで短くすることは研究者の大きな夢でした。X線レーザーは、大出力の励起光源を必要とすることが大きなネックであり、レーザーを励起光源として1980年代初めによく実現されました。しかし、そのときの装置は体育館のように巨大なものでした。

その後、フェムト秒レーザー^{*2}が開発され、そのパルスのエネルギーを圧縮する技術も開発されて励起光源に使えるようになりました。フェムト秒レーザーをうまく使うと、発振波長をもとの光の100分の1程度にまで短くできます。この波長変換技術により、卓上に置ける大きさの装置でX線レーザーを実現できるようになりました。ただし、実現された当初は、物理学的にはおもしろいものの、効率が低く、光源としては使い物になりませんでした。

波長変換の効率を落とさないためには、もとの波長の光と、変換後の波長の光の速さを揃えることが重要です。しかし、波長が異なるとレーザー媒質中での屈折率が異なるため、変換の前後で速さが変わってしまうのです。そこで私は、レーザーの集光方式や、媒質として用いるガスを入れるセル、ガス圧などを工夫することで、波長による速さの差をうまく解消する方法を開発しました。同時に、軟X線を反射させるのに適したミラーなども開発し、2003年に、従来の100～1000倍の強度をもつ世界最高瞬間輝度の軟X線レーザーの発振に成功しました。

新たな光で新たな現象を

このように強い光は、入力が2倍になると出力が4倍以上になるといった「非線形現象」を引き起こすので、超高速のスイッチなどさまざまなデバイスへの応用が考えられます。さらに、軟X線の波長は

緑川克美（みどりかわ・かつみ）
もともとは核融合に興味をもっていたが、レーザー核融合というのを知り、レーザーの研究室へ。そこでレーザーの魅力にとりつかれる。軟X線レーザーの高出力化、短パルス化に取り組む一方、「エクストリームフォトニクス」研究推進グループのリーダーとして、理化学研究所内の関係グループを束ね、分子科学研究所や東京大学との連携を進めている。

撮影：由利修一



短いので、可視光で実現できるフェムト秒に比べてずっと短いアト秒^{*3}のパルスがつくれます。フェムト秒レーザーでは、分子の回転や振動を見ることができ、化学反応の解析が進みましたが、アト秒レーザーでは原子の中の電子の運動が見えるはずです。

また、「水の窓」と呼ばれる波長領域の軟X線は、水には吸収されないのに炭素や窒素の原子には吸収されるので、水を含んだ生物試料の観察にたいへん適しています。生きた細胞の中のオルガネラ間でエネルギー輸送や情報伝達が起こるようすを、アト秒のパルスでストロボ写真のようにとらえられる日も近いと思います。

光源開発の一方で、これまでに蓄積したフェムト秒レーザーの制御技術を生体イメージングに生かすための共同研究も行っています。その一つが、二光子レーザー走査顕微鏡による神経細胞の観察です。目的の試料に蛍光タンパク質を組み込み、細胞内で光らせて観察するという手法がありますが、大脳皮質の神経細胞

はたくさん積み重なっており、奥の細胞の蛍光タンパク質だけに焦点を絞って励起光をあてるのが難しいのです。

フェムト秒レーザーを励起光に用いると、ある波長の光子が2個まとまってその半分の波長の光子1個と同じ働きをするという現象が起こり、奥まで届きやすい長波長の光で励起することができます。さらに、パルスに含まれる光の波長を調節して蛍光タンパク質の劣化を極力防ぎ、顕微鏡の視野を走査し終えるまで光らせることができました。

今回のプロジェクトでも、光を使ってさまざまなものを観ようとするグループとの連携を深めつつ、新たな光源を開発していくことになります。この強みを生かして新たな研究分野を開けるよう、微力を尽くしたいと思っています。

（取材・構成 青山聖子）

*1 p.3参照。

*2 10フェムト秒程度のパルスをつくれるレーザー。1フェムト秒＝ 10^{-15} 秒（1000兆分の1秒）。

*3 1アト秒＝ 10^{-18} 秒（100京分の1秒）。

光の力を活かしたナノテクノロジー

増原 宏

大阪大学大学院工学研究科教授

光をうまく使って物質の性質を調べる研究はずいぶん進んだ。
これからは、物質を反応させ、加工し、操るための道具として光を使いこなす時代である。

光はほんとうに不思議です。実体がなく、重さもないのに、物質と相互作用すると現れる。そして、光を受けた物質は突然、変化する。そこに魅入られ、長く研究を続けてきました。

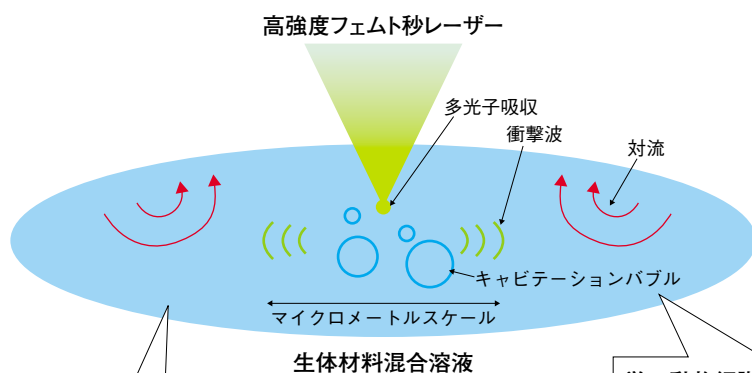
光科学の研究には、二つの意義があると考えています。一つは、どなたも賛同して下さることですが、新たな概念を生み出し、学問のフロンティアを切り開く

ことです。もう一つは、まったく新しい実際に役に立つ技術や手法を生み出すということです。藤嶋先生の光触媒は実用化に至ったすばらしい例ですが、まだそういう例は少ない。古くはナイロンの光重合^{*1}もありましたが、残念ながら、光を使わない効率的な重合が開發され、消えてしまいました。でも、熱や圧力をかけて反応させる手法は長い研究の歴史

があるのに対し、光を使う手法は研究が始まったばかり。もう少し時間をいただければ、たくさんのヒントと実用的にも成果が出せると思います。

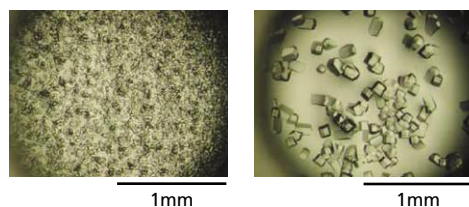
反応が起これば形が変わる

私自身は、二つめの意義につながることを意識しつつ、一つめの「フロンティアを開く」ことに貢献したいと思っています。

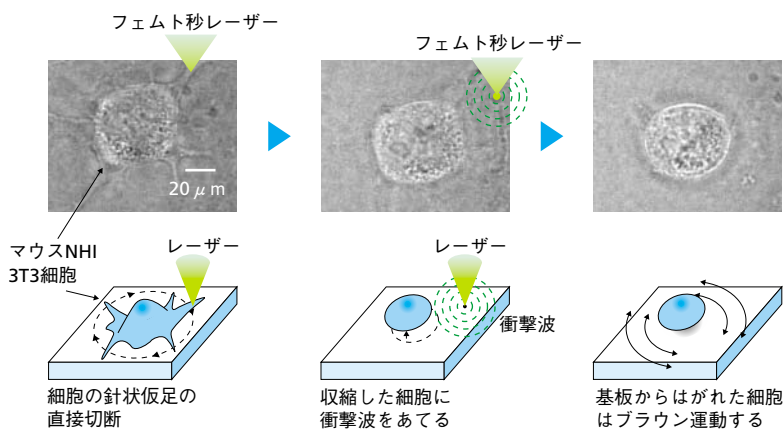


新しい可能性を生み出したフェムト秒レーザー
左は結晶化の例。レーザーをあてると、あてないときに比べて大きな結晶ができる。右は単一細胞操作の例。細胞が基板に伸ばした「足」をレーザーで切ってから、衝撃波で浮き上がらせる。

タンパク質の結晶化制御



単一動物細胞の非破壊単離



写真提供：増原宏／細川陽一郎

ます。光で「観たり」、「制御したり」する研究は着実に進展していますが、なかでも、私は「光ならではのナノテクノロジー」を目指しています。大きさが数nmから数十nmのナノ粒子は、分子とバルク（ある大きさをもったかたまり）の材料との「かけ橋」になるからです。研究の大きな柱は、①ナノ分光、②集光レーザービームの力によるナノ会合、③光によるナノ加工やナノ操作の三つです。

①のナノ分光の最近の代表的な成果は、ナノ結晶1粒の反応解析です。大きな結晶とは違い、ナノ結晶では光を結晶内全体に均一にあてて光反応を起こすことができます。また、光反応に伴う形状変化を原子間力顕微鏡という装置で調べることができるのが、ナノ結晶の利点です。

反応の追跡によく使われる吸収分光法は、さまざまな波長の光を物質にあて、どの波長の光が吸収されるかということから物質の中にどんな分子が含まれているのかを知る方法です。しかし、ナノ結晶は小さすぎて光の吸収が非常に少ない。このため、「レーリー散乱」という現象に目をつけました。ナノ結晶が散乱する光の波長と吸収する波長の間には一定の関係がある。これを利用し、散乱光から吸収スペクトルの情報を求め、分子の状態を調べることにしたのです。

こうして、固体の中で反応がどのくらい進んだときに、どのような形の変化が起こるかを調べる手法ができました。固体中で分子が反応すれば、その固体の形は変わるはずですが、これがナノ結晶で初めて具体的に示された。今後の研究のための道筋をつくれたと思っています。

レーザーで結晶化や細胞を操る

②は、ナノ粒子を思いのままに並べるという研究です。光は電磁波ですから、レーザーの光をレンズで強く絞ると、焦点のあたりにはとても強い電場ができます。液体中に浮遊しているナノ粒子は、ふだんは激しくブラウン運動していますが、この電場には捕まってしまいます。こうして捕らえた粒子を基板上に運び、

増原 宏（ますはら・ひろし）
大学院修士課程までは光化学反応
中間体の理論計算を研究していた
が、博士課程でレーザーを使う実
験を始め、その後は一貫してレー
ザーを用いた光化学の研究を行っ
ている。従来の手法には飽きたら
ず、1988年からの新技術事業団
（現・科学技術振興機構）ERATO
プロジェクトでは、光で分子を動
かす研究に着手。その後も、斬新
な手法を次々に生み出している。
光化学の研究拠点の3極化（アジ
ア・アメリカ・ヨーロッパ）を目
指してアジア光化学協会を設立す
るなど、この分野の国際的な牽引
車としても奮闘中。

撮影：由利修一



別の光で粒子と基板の境目を溶かして接着すれば固定できる。これを繰り返せば、基板上にナノ粒子で望みのパターンを描くことができます。

この手法の特徴は、室温下、液体中でパターンをつくれることです。温度変化や乾燥に弱いタンパク質も、この手法なら配列させることができます。種々のタンパク質を並べた病気診断用のプロテインチップもつくれると思っています。

③は、フェムト秒レーザーを強く絞って液体にあてると、衝撃波が発生することを利用した研究です。衝撃波は3次元の津波のようなもので、強い力をもっていきます。いちばん注目しているのは、タンパク質の結晶づくりへの応用です。

タンパク質の分子の形は結晶にX線をあてて調べるのが一般的ですが、きれいで大きい結晶をつくるのはとてもたいへんなのです。濃度を調節した溶液を何週間も放置して、ひたすら結晶ができるのを待つ。それでも、小さな結晶がたくさんできてくることもある。ところが、フェムト秒レーザーをあてると、結晶のタ

ネがすぐにできてそれが大きく育つ。あて方によって結晶の数や大きさを加減することもできるのです。

衝撃波では、細胞を1個ずつ動かすこともできます。細胞は、基板とも他の細胞ともくっつきやすく、ふつうの方法では引き離すことができませんが、フェムト秒レーザーをあてると、ふわっと浮き上がるのです。細胞の脇にあてるようにするので、細胞自身を損ねることはありません。単一細胞の操作ができるわけで、生物学研究に大いに役立つと期待しています。

ここで話したような研究を、科研費のプロジェクト（特定領域研究「極微構造反応」）では大勢のメンバーにより、さらに広範に展開しています。このような光分子科学の研究は、従来の光化学、物理化学という枠組みを越え、新たなインパクトを与える段階に入ったと考えています。

（取材・構成 青山聖子）

*1 重合とは、小さな分子（単量体という）が次々につながって高分子をつくる反応のこと。反応を起こすきっかけが光の場合を光重合という。

光触媒が応用技術をリードする

藤嶋 昭

財団法人 神奈川科学技術アカデミー理事長

光分子科学の応用として、最も身近なのが光触媒だ。
その発見と開発の歴史には、第2、第3の応用例を生み出すヒントがたくさん隠れている。

酸化チタンと出会ったのは大学院の時です。当時は、光を感じる半導体の研究が世界的にさかんでした。酸化亜鉛を水に入れて光をあてると酸素ガスが発生するという報告に刺激され、先輩が別の研究に使っていた酸化チタンの結晶を譲り受けて同様の実験をしました。すると、やはり酸素が出た。ただし、酸化亜鉛の場合はそれ自身が分解されて酸素ができたのに、酸化チタンは分解しなかった。水の分解で酸素が発生していたのです。一方、酸化チタンとつないでおいた白金電極のほうでは、水素が発生しました。

1972年にこの結果を*Nature*誌に発表す

ると、たいへんな注目を浴びました。私自身は、植物の光合成と同じように太陽の光で酸素をつくれたことに感動したのですが、世間は、クリーンなエネルギーである水素ガスをつくれることに期待を寄せた。その期待に応えるべく、水から大量の水素をつくる研究に取り組みました。しかし、太陽のエネルギーは密度が低く、かなり広い面積の酸化チタンを使っても、水素はたいしてつukれないことがわかりました。

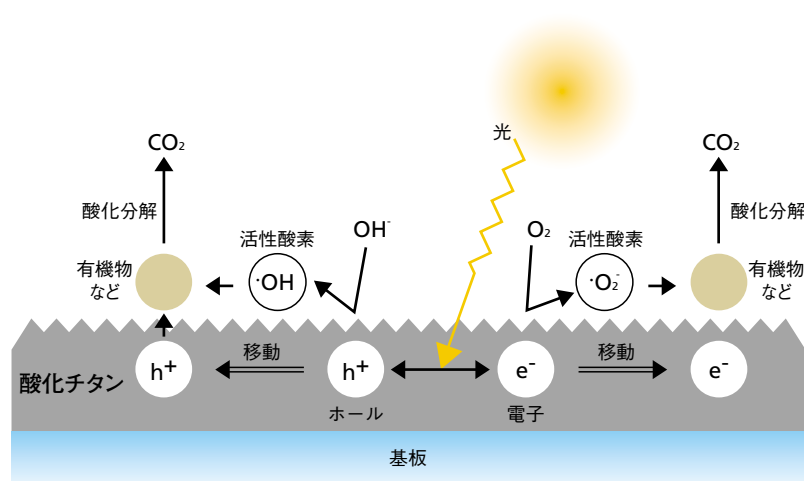
簡単には進まなかった実用化

転機が訪れたのは1989年でした。分子研にいた橋本和仁君（現・東京大学教授）を

講師に迎え、別の使い道はないかと模索しました。酸化チタンには、水を分解するほどの強い分解力がある。少量のものを分解することが有効な場面で使おうと、環境浄化への応用を思いつきました。

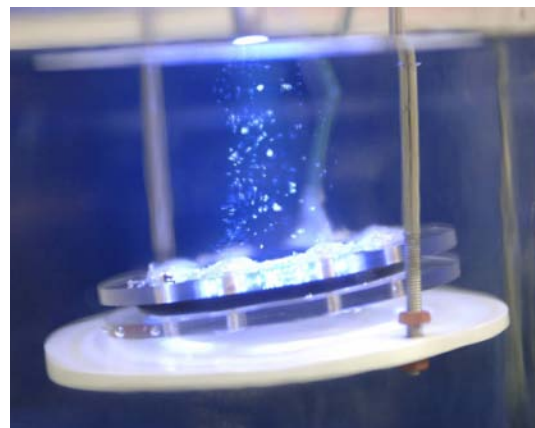
最初に取り組んだのは、細菌の除去でした。東陶機器の渡部俊也さん（現・東京大学教授）が共同研究のために来て、タイルの表面に酸化チタンをコーティングしてくれました。このタイルを手術室の床と壁に貼ったところ、空中浮遊細菌が蛍光灯の光で見事に除去されました。トイレの機器の表面に使えば、消臭や防汚の効果があることもわかりました。

そこで、私は北九州市まで東陶機器の



光触媒の働き

酸化チタンは半導体で、紫外線があたると電子とホールができる。この電子が水に溶けている酸素分子 (O_2) に渡され、また、ホールが水酸化イオン (OH^-) に渡されて活性酸素ができる。活性酸素やホールが汚れやにおいなどのもとである有機物を分解する。



最初に酸素の発生を確認した実験装置。光触媒ミュージアムに展示されている。紫外線をあてると、酸化チタンから酸素の細かい泡が立ち上る。撮影：由利修一

藤嶋 昭（ふじしま・あきら）
大学院生の時、本多健一助教授とともに、酸化チタンへの光照射で水の電気分解が起こることを発見。この現象は「ホンダーフジシマ効果」と呼ばれ、世界的に有名になった。光触媒としての応用を切り開いてからは、企業との共同研究、留学生の受け入れなどを活発に行い、大きな研究プロジェクトを次々に組織してこの分野を引っ張っている。東京大学教授を退官した2003年、現職に。子供たちの理科離れを防ぐ一助にしたいと、神奈川科学技術アカデミー内に「光触媒ミュージアム」を設けた。

撮影：由利修一



江副茂社長に会いに行きました。新しい技術を実用化するときは、トップに話をもっていくほうがいい。下のほうの人はサラリーマンですから、「製品化して失敗したら困る」となって、そこで話が止まってしまうがちです。江副社長はご母堂を院内感染で亡くされたらしく、この技術に感動し、企業化を精力的に進めてくれました。

その後、タバコのおいをとる空気清浄機にも、高速道路のトンネル照明のカバーガラスにも使われるようになりました。トント拍子に見えるかもしれませんが、おもに粉末での応用が試みられていた酸化チタンを、「コーティング」という形で固定して使ったところに大きなブレイクスルーがあったと思っています。また、どれも実用化にはネックがありました。

例えば、カバーガラスの場合、酸化チタンをコーティングしても最初は効果が出ませんでした。熱処理をして密着させるため、ガラスの中のナトリウムイオンが拡散ってきて酸化チタンにとけ込み、分解力のない物質に変化してしまったのです。ナトリウムイオンの移動を防ぐためにガラスの表面を透明なシリカでカバ

ーしてから酸化チタンをコーティングし、ようやく実用化にこぎつけることができました。

広がり続ける応用範囲

10年前、東陶機器で鏡の表面へのコーティングを研究していたとき、酸化チタンのもう一つの性質が明らかになりました。汚れが除去されてきれいになっただけでなく、水が水滴にならずに広がったのです。その理由を詳しく調べたところ、酸化チタンが光を受けたときにいちばん表面にある酸素原子がとれ、水が吸着しやすくなったことがわかりました。

この「超親水性」の発見により、酸化チタン光触媒の応用範囲はさらに広がりました。建物の外装材料に使うと、雨が水滴にならずに流れるため汚れがとれやすくなり、常にきれいに保てるのです。ガラスはすでに、ルーブル美術館のピラミッドや中部国際空港の窓に使われています。外壁や屋根にうっすらと水を流すこともできるので、その「打ち水効果」で室温上昇を防ごうという研究も愛知万博内で行われました。

私は、科学技術は誰もが天寿をまっとうできるような社会の実現に貢献すべき

だと考えています。酸化チタンはその理想にかなり近いものですが、もっと貢献できるように、医学部の研究者と共同で医療面への応用も進めています。カテーテルの表面にコーティングして清潔さを保つとか、分解力をがん治療のために使おうという研究をしています。

酸化チタンの弱みは、光のうちでも紫外線でしか分解力を発揮しないことです。可視光でも働くようにするため、酸素原子の一部を窒素などほかの原子に置き換える研究も行われています。そうなれば、白熱電球の光でも働くので、さらに応用が広がります。

科学上のすばらしい発見は、発見者が一人で成し遂げたように思われがちですが、背景には必ず、時代の風や研究仲間の熱気があったはずで。私自身も、世界的な研究の流れの中で、酸化チタンの結晶に出会えたことで大きな発見ができました。現在、私が率いる研究グループは熱気に満ちているし、ほかにも、たくさん熱いグループがある。その中から、思わぬ発想が生まれ、斬新な応用や新たな物質が次々に見つかるものと期待しています。

（取材・構成 青山聖子）