

# 「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 $0.1\sim$ 数 $\text{nm}^*$ 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

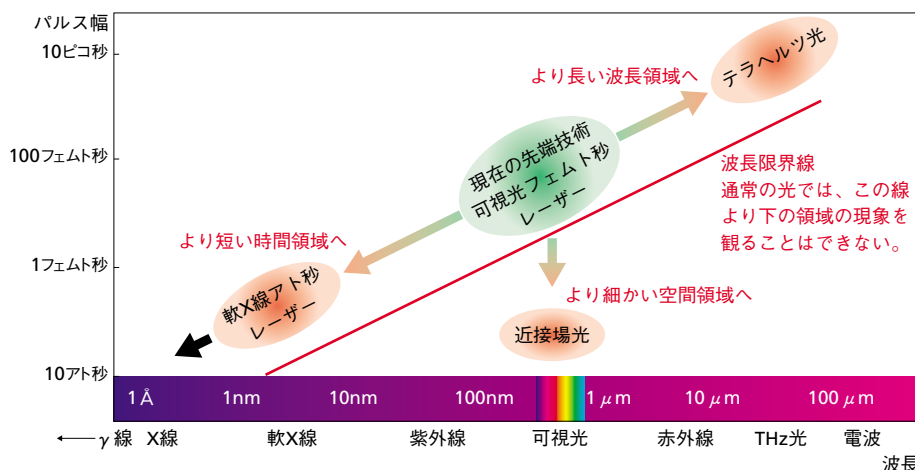


図1 さまざまな光の波長とパルス幅の関係

私たちの目に見える光（可視光）は、波長が数百 $\text{nm}$ 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ふべきもので、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<sup>\*2</sup>からピコ秒<sup>\*3</sup>、フェムト秒<sup>\*4</sup>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<sup>\*5</sup>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

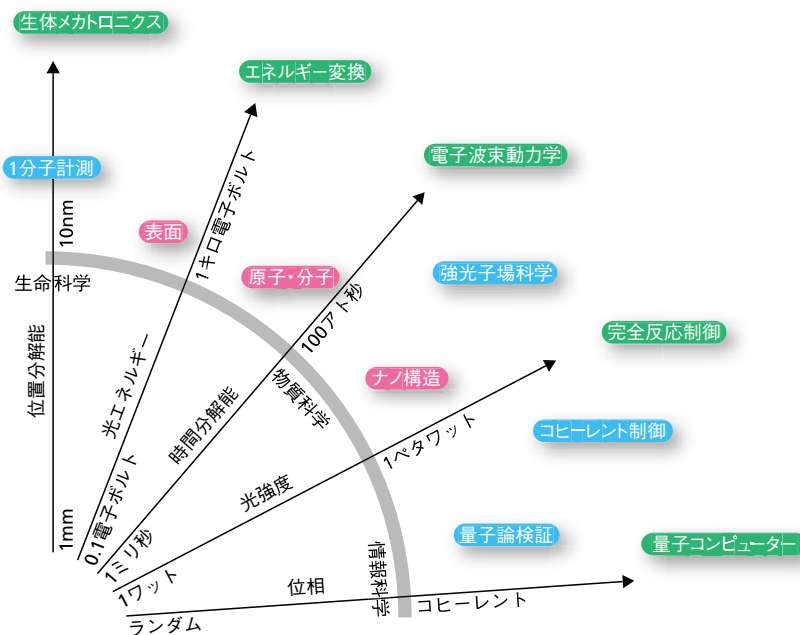


図2 レーザーのさまざまな属性と、それを利用して行われる研究の対象（赤色）。水色は現在の研究、緑色はこれからの研究を示す。



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（詳しくは原田副専任研究員の解説参照）。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所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