

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

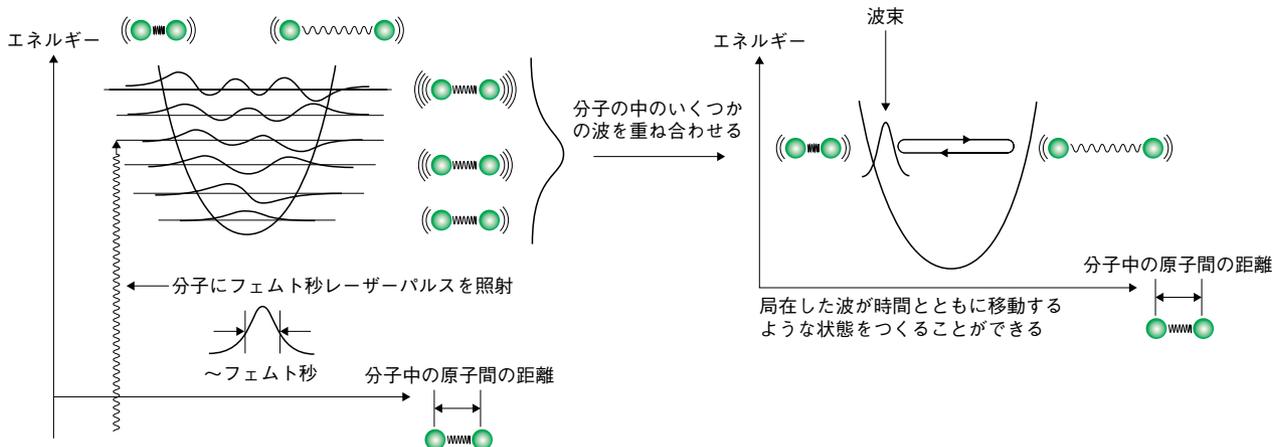


図1 フェムト秒光パルスによって分子の振動波束が発生するしくみ。(分子科学研究所編：『分子科学者がいどむ12の謎』（2005、化学同人）、8章より転載）

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。

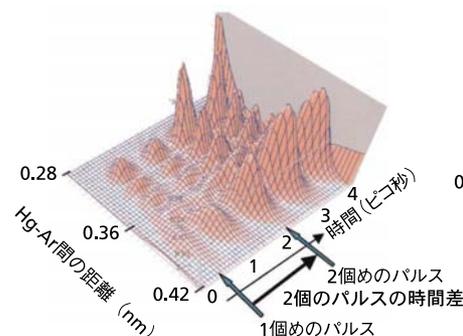
分子に情報を書き込む

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。

(a) 時間差=2095.0000フェムト秒



(b) 時間差=2095.4241フェムト秒

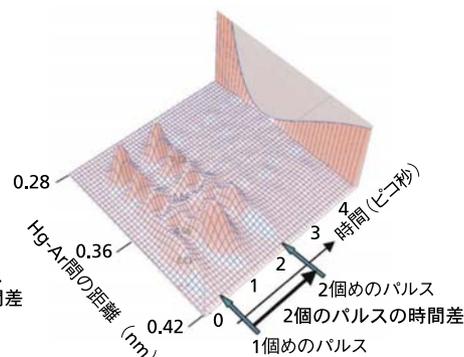


図2 HgAr分子の中で2個の振動波束が干渉するようすを示すシミュレーション。波動関数の2乗をプロットしてある。(K. Ohmori et al., *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.*, **145**, 17-21 (2001)より転載)



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。

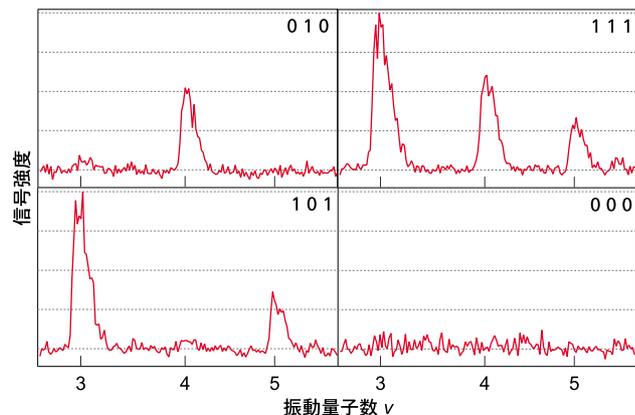


図4 HgAr分子内に30ナノ秒保存されたポピュレーションコード。フェムト秒パルス対照射の30ナノ秒後に各振動固有状態のポピュレーション（各状態がどれだけの割合で存在するか）を測定した。（K. Ohmori et al., *Phys. Rev. Lett.*, **91**, 243003-1-243003-4 (2003)より転載）

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 分子の中のいくつかの結合のうちで、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