

光とナノ物質が織りなすミクロな世界



研究室紹介

石 原 一*

Microscopic world created through interplay of light and nanostructures

Key Words : Nanostructures, Photo-physics, Optical manipulation

はじめに

自然の中であれ、技術を通してであれ、私たちは日々光の恩恵を受けて暮らしています。そのような光は、必ず物質との相互作用を通して我々人間によって認識され、また役立つ形となって現れます。光は物質とどのように相互作用するのか。この問題は古くより様々な学問分野で最も基本的な問題の1つとして考察されてきており、多くの知見が蓄積されてきました。それにもかかわらず、近年、この問題が多様な分野で一層活発に研究されている背景には、ナノスケールな物質制御・観測技術の発達があります。物質のナノスケールなサイズ・形状の制御や、そこで起こる電子的・光学的現象の観測技術の発達は、天然にはなかった性質を持つ多様な物質や光の状態を生み出し、またこれまで知られなかった個々のナノ物質が顕す現象を明らかにしてきました。このようなナノ物質を舞台に、解明すべき光と物質の相互作用の問題はさらに広がり、技術として利用可能な光と物質の相互作用の自由度も格段に高まっています。私たちの研究室ではこのような最先端の科学と技術を背景にして光とナノ物質が織りなすミクロな世界を解明し、その可能性を追求しています。

理学の一分野に物性物理学があります。私たちの研究室はその一つの研究領域である光物性物理学を研究するグループの流れを汲んでいます。現在は、教授の石原と、横山知大助教をスタッフとし、大阪大学基礎工学研究科において、光とナノ物質の相互作用を理論的手法に基づいて研究しています。

研究室のキーワードは「光」と「ナノ物質」ですが、これに限定しているわけではなく、学生など構成メンバーの興味に従ってこれに当てはまらないテーマも扱い、また基礎理論から、企業と共同で行う応用研究まで柔軟に手がけています。理論研究の性質から来る特徴もありますが、互いに協力しながらも、基本的にひとり一人が各人のテーマに取り組み体制になっています。



研究室のメンバー (2019年春)

研究室の活動

素粒子・原子核物理学、宇宙物理学などと並ぶ物



* Hajime ISHIHARA

1959年12月生まれ
大阪大学大学院 基礎工学研究科 物理系専攻博士後期課程 (1990年)
現在、大阪大学大学院 基礎工学研究科 物質創成専攻 教授 工学博士
TEL : 06-6850-6405
E-mail : ishi@mp.es.osaka-u.ac.jp

また、理論の研究室ではありますが、実験グループとの共同研究を重視しており、これまでも私たちのグループが理論的に予言してきたことの実験検証や、興味深い実験結果の理論的説明などを多くの実験グループと共同で行ってきました。面白いのはこのような共同作業を通して、理論的に予想していたことを超えてさらに意外な実験事実が判明したり、実験だけからは分からなかった可能性が理論的に明らかになったりすることです。以下ではそのような

共同研究も含め、幾つかの最近の研究事例を紹介します。

究極の相互作用

可視光近辺の光の場合、物質との相互作用は、光の電場と原子や分子に束縛された電子との相互作用として現れます。このような電子の波動関数の広がりには概ねナノメートル程度までというのが通常です。一方で光の量子である光子は空間的に局在させることができないため、狙いを定めて光を照射したとしても、1つの光子は概ね波長程度の差し渡し（数100 nm から数 μm ）の面積の何処かにやってくるようになります。これが意味することは、一つの光子と一つのナノ物質が相互作用する確率は本来的に非常に小さいということです。この確率を大きくすることは、例えば物質の微視的な成り立ちを光で調べたり、また物質によって各種の信号としての光を制御したりする上で重要な課題です。

相互作用を大きくするための1つのアプローチは、「まと」である電子の波動関数の広がりを大きくすることです。実は原子や分子が多数集まった固体などではそれぞれに付随する電子の状態がナノサイズの固体全体に広がって、タイミングを揃えて光に合わせ振動することにより大きな「まと」として働くことが知られています。従来はこの機構による相互作用の増大は限られた条件の中だけで考えられてきました。すなわち光の波長は十分長いので、電子波動関数内での電場振幅の空間変動は考えず（長波長近似）、またそれが、双極子的なパターンでのみ電荷を振動させる（双極子近似）という、2つの近似的描像に基づいて議論されてきました。私たちは、光物性実験グループである大阪大学基礎工学研究科の芦田先生のグループと共同で、上記制限を取り払い、光と電子が互いに波と波の関係として相互作用する状況を作り出すと、従来より桁違いに強い相互

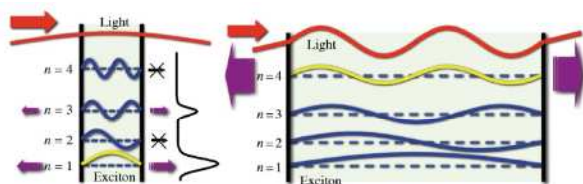


図1：光の波と物質の波を重ね合わせ、光と物質の桁違いに強い結合を実現することにより、超高速光スイッチや熱発生のない光デバイス実現の可能性が広がる。

作用が実現できると考え、それが記述できる新しい理論の開発と試料作製、及び分光実験を行って解析しました（図1）。その結果、従来では考えられなかった巨大な光－物質相互作用の証拠である超高速発光（約10フェムト秒で発光）を観測しました[1]。これは超高速発光であると言われた従来の観測例よりもさらに何桁も速く、室温でも励起エネルギーが熱に変換するよりも速く終了する光学過程です。これは発熱のないサーマルフリーフォトニクス実現の可能性を示しており、固体と光の相互作用の大きさとしても究極的といえる状況を作り出した例になっています。

電子遷移選択則の破れ

光子とナノ物質が相互作用する確率を高めるもう一つのアプローチは上で述べたのとは逆に、光のエネルギーを、ナノ物質の体積と同程度の領域に閉じ込めてしまうことです。このアプローチの1つとして、金属の微細構造に光を照射し、その先端部や、ナノメートルスケールの間隙に強い局所電場を発生させる手法が盛んに研究されています。これは光によって金属中の自由電子を集団で振動させた際に、その電荷の集中によっておこる、局在表面プラズモン共鳴と呼ばれる現象です。あたかも光をアンテナで捕らえてエネルギーを集中させるような現象ですので、光アンテナ効果とも呼ばれます（図2）。

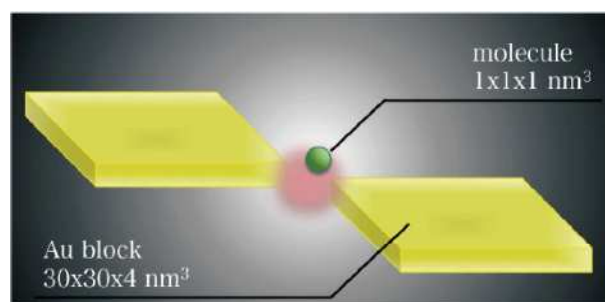


図2：金属ナノギャップにおける局在表面プラズモン共鳴による増強電場と分子の相互作用のイメージ。

光アンテナ効果を使えば光子のエネルギーがナノ構造に移る確率は大いに高まり、強い相互作用が実現されます。この現象のもう一つ興味深い点は、上で述べた「光の電場振幅の空間変動を無視する長波長近似」が破綻する点です。通常、長波長近似下では以下のような事情が存在します。ナノ構造に振動

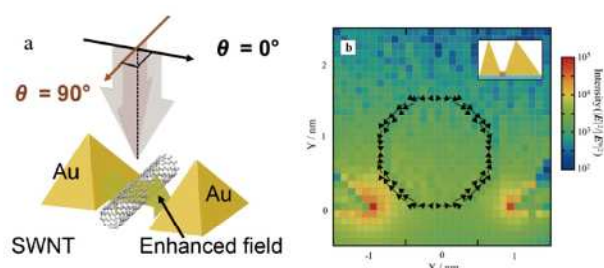


図3：(a) 金属ナノギャップ中の単層カーボンナノチューブのイメージ。(b) ナノギャップ中カーボンナノチューブ近傍の電場強度の計算図。

電場がかかると電荷が正負の極に分かれて振動しますが、これは双極子的な振動です。しかし一般にナノ構造の振動にはもっと沢山の極があるパターンも存在し、むしろそのような励起準位の方が多く存在します。通常、ナノスケール領域では光の電場は一定（長波長近似）なので双極子的なパターンしか励起することができません。このことは物質の光学応答の原理として、「遷移選択則」や「光学禁制遷移」などの言葉で光物性や光化学の教科書でも説明されます。しかし、金属アンテナで作られる局在した電場であれば長波長近似は破れており、このような光学的に禁制とされる励起のパターンも作ることができると期待されます。このことを調べるために北海道大学理学研究院の村越先生のグループと共同で、金属のナノスケールな間隙におかれた単一のカーボンナノチューブのラマン信号を解析し、世界で初めて光学禁制な電子遷移が許容化されることを実証しました [2] (図3)。この結果は、通常ではナノ物質が光を吸収しない周波数でも、吸収させることが出来るようになることを意味しており、光エネルギーの高効率利用に繋がる可能生があります。

光圧によるナノ物質の操作

光とナノ物質の相互作用の効果は、光学的な応答信号を通してのみでなく、ナノ物質の力学的運動を通して現れます。光は運動量を持っているので物質に散乱されたり吸収されたりするとその運動量が物質に移り、物質には力が働きます。この力は光圧と呼ばれます。2018年のノーベル物理学賞の受賞者の一人である A. Ashkin 博士は1986年に、この光圧の原理によって、一本のレーザービームで微小物質を捕捉・操作できることを実証しました。この技術は光ピンセットと呼ばれ、その後、多様な研究

分野で活用されましたが、特にバイオ分野で細胞の操作や生体分子間に働く力の計測などに威力を発揮したことが良く知られ、上記ノーベル賞の主要な理由となっています。

光ピンセットは主に光の波長程度より大きなマイクロサイズの粒子を捕捉・操作するのに使われます。それよりも小さくなると光の散乱や吸収が小さくなり、生じる力が環境などの擾乱に打ち勝てず捕捉が難しくなります。近年、このような問題を克服してナノ物質を光圧で操作するための研究が盛んになってきました。例えば前出の局在表面プラズモン共鳴をもちいて、ナノ物質に対しても強い光圧を生じさせる手法などが盛んに研究されています。一方、私たちの研究グループでは、ナノ物質に閉じ込められた離散的な電子状態間の遷移に共鳴する光を用いた手法を提案してきました。共鳴効果があると光の散乱断面積の増強によって光圧が増強することが期待されます。また、さらに興味深いことは特定の周波数の光を照射するとその周波数のエネルギーに合う共鳴準位をもつ粒子のみに選択的に力が働くなど、ナノ物質の微視的な特性がマクロな運動の様相に直結するという面白い効果があることです。共鳴効果による効率的な光圧発生や選択的操作については私達との共同研究も含め、色々な分野のグループによって実験実証されました。また、共鳴条件を用いると物質の非線形光学効果が発現しやすく、複数のビームが物質を介して相互作用することを利用して、単に捕捉したり押したりするだけではなく、粒子をレーザーの光源側に引き寄せるような力を実現することもできます。このような効果をうまく利用すると、技術的に多様な操作が実現するだけでなく、物質科学と光圧技術がリンクする興味深い研究領域が広がる可能生があります [3]。

このような新しい光圧の学術を開拓することを目的として、2016年度より文部科学省による新学術領域研究「光圧によるナノ物質操作と秩序の創生」がスタートしました (<http://optical-manipulation.jp>)。本領域では、物理、化学、工学の様々な分野の研究者が集まり、局在表面プラズモン共鳴やナノ物質の電子的共鳴効果など、物質の微視的特性を活用した手法で、光圧によるナノ物質操作の新しい方法論を開拓し、ナノ物質による新奇な秩序の創生を実現しようとしています。本領域研究により、光圧による

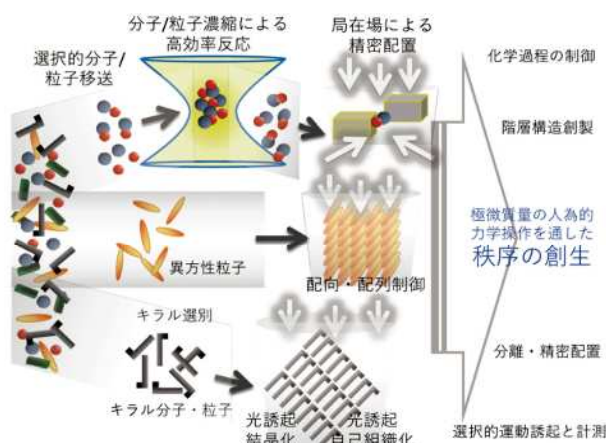


図4：ナノ物質の光圧操作が拓く新しい微視的秩序の創生。(大阪大学基礎工学研究科 伊都将司先生によるイメージ)

ナノ粒子の選別や新奇なキラリ結晶の制御などが実現し始めており、次世代の光物質科学の展開へと夢が広がっています (図4)。

おわりに

上述のように本研究室では光とナノ物質が織りなすミクロな世界を理論的手法で明らかにしていくことを活動の柱としていますが、実験グループとも協力しながら新しい現象を説明したり、また予想された現象を実証したりすることを通し、研究コミュニティを広げています。スタッフ、学生らの構成員ひとり一人が興奮するような発見をし、それを世界に向かって発信することによって各人の能力を目一

杯伸ばすことが研究室の大事な目的ですが、研究室から飛び出し、色々な人と巡り会うことを通してそれが実現できるとさらに幸せです。ですので、この記事に目を留められ、何か関心を持たれたり、また、一緒に何かできそう、と思われた方は、どうぞお気軽にお声かけいただけましたら幸いです。

参考文献

- [1] T. Kinoshita, et al., Phys. Rev. Lett. **122**, 157401 (2019), T. Matsuda, et al., Sci. Rep. **9**, 8453 (2019), 大阪大学プレスリリース「発熱する暇がない!? 高品質 ZnO 結晶による熱損失のない超高速な光学現象を世界初実証」(https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2019/20190508_1)、毎日新聞 2019 年 5 月 19 日朝刊「光吸収 すぐまた光に 酸化亜鉛利用 エネルギー消費 100 分の 1 も」など。
- [2] M. Takase, et al., Nat. Photon. **7**, 550 (2013), 読売新聞 2013 年 6 月 3 日朝刊「透明物質の光吸収 実験成功」など。
- [3] 「光圧によるナノ物質の個別運動制御と秩序の創生」固体物理 Vol.51, No.10, 535 (2016)、「光圧によるナノ物質操作と新しい物質科学への展開」CSJ カレントレビュー「プラズモンと光圧が導くナノ物質科学ーナノ空間に閉じ込めた光で物質を制御するー」(化学同人) (2019) など。

