



独立行政法人理化学研究所
国立大学法人名古屋大学
独立行政法人科学技術振興機構

“姉妹”光子の共同作業で観察波長の限界を突破

—物質を調べる波長と分解能を決定する波長を分離する手法を考案—

本研究成果のポイント

- “姉妹”光子を利用して波長の380分の1という超高空間分解能を達成
- 物質が“妹”光子に応答している様子を“姉”光子が観察する
- 物質の光学応答を直接観察できる超高空間分解能の光学顕微鏡が実現可能に

独立行政法人理化学研究所（野依良治理事長）と国立大学法人名古屋大学（濱口道成総長）は、X線領域での非線形光学^{*1}現象を利用して、波長206オングストローム（Å）^{*2}でその380分の1相当である0.54Åというこれまでの手法では到達できなかった超高空間分解能の顕微手法を開発しました。これは理研播磨研究所放射光科学総合研究センター（石川哲也センター長）石川X線干渉光学研究室の玉作賢治専任研究員、石川哲也主任研究員らと名古屋大学大学院工学研究科西堀英治准教授による研究成果です。

16世紀末に顕微鏡が発明されて以来、その分解能を向上させることは最も重要なテーマでした。しかし1878年に、独逸イェナ大学のE.アッペが、空間分解能は原理的に波長の約半分で決定され、それより細かいものは見ることができないことを示しました。その後世界中の研究者は、この壁を打ち破るためにさまざまな手法を試みましたが、いまだに波長の10分の1程度の空間分解能が限界です。この分解能では「物質内の電子が光に対してどのように応答しているのか？（光学応答）」すなわち「なぜそのような色をしているのか？」を直接観察することができませんでした。

この問題を解決するために、非常に強いX線が利用できる大型放射光施設SPring-8^{*3}の理研ビームラインBL19LXUを用いて、1つの“親”光子^{*4}が2つの“姉妹”光子に分かれるX線非線形光学現象を利用した新たな超高空間分解能顕微法を開発しました。この手法では、長い波長の“妹”光子がモノに作用し、“姉”光子がその様子を観察するというように、“姉妹”光子が分担して共同作業をします。この時“姉”光子はX線であるため、非常に高空間分解能で観察することができます。実際にダイヤモンドにX線（“親”光子）を照射し、“妹”光子が極端紫外光^{*5}になる場合を調べたところ、内部の電子の挙動を個別に観察することに成功しました。

本研究で波長の限界をはるかに超えた超高空間分解能顕微鏡が実現可能であることを示しました。今後のさらなる測定技術の進歩により、物質の光学応答を直接観察し、物質のより深い理解と高度な利用に貢献すると期待されます。

本研究は、科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業 個人型研究（さががけ）「光の利用と物質材料・生命機能」研究領域（研究総括：増原宏 奈良先端科学技術大学院大学特任教授／台湾国立交通大学講座教授）における研究課題「X線非線形回折を利用した局所光学応答解析」（研究者：玉作賢治）の一環として行われ、本研究成果は科学雑誌『Nature Physics』のオンライン版（7月17日付け：日本時間7月18日）に掲載されました。

1. 背景

顕微鏡の歴史は非常に古く、その発明は 16 世紀末にさかのぼります。また、肉眼では見えないものを最初に見た事例は、ガリレオ・ガリレイが昆虫の複眼を観察したもの（1610 年頃）といわれています。それ以来、「いかに細かいものを見られるか？」というのが、光学分野での重要なテーマの 1 つでした。しかし 1878 年に、独国イエナ大学の E.アッペが、空間分解能は原理的に波長の約半分で決定されることを示して以来（図 1）、例えばタンパク質の構造解析に X 線が利用されているように、細かいものを見るためには短い波長を使うというのが常識となりました。一方で、世界中の研究者が波長の限界に挑み、現在では可視光領域の光で波長の 10 分の 1 程度、すなわち数 100 Å まで見るできるようになりました。

しかし、波長の 10 分の 1 の分解能では、物質内で光に対してどのように電子が応答しているかを見ることは不可能です。つまり、赤く見える物質が、どのように電子が応答することで赤く見えるのかを、“赤い光”（波長 6,000 Å）で見ることはできません。これを電子レベル（オングストローム分解能）で見るには X 線を使う必要がありますが、X 線は“赤い光”ではないため、X 線で得た情報は赤く見えている電子の応答と直接の関係がありません。

このように、X 線より長い波長領域でオングストローム分解能を達成することは、単に顕微鏡の歴史に新たな 1 ページを刻むだけでなく、可視光など長い波長の光に対する物質内の応答を、電子レベルで直接観察できる手段を得るという重要な意義を持ちます。

2. 研究手法と成果

研究グループは、物質が光に対してどのように応答しているのかを、波長による空間分解能の限界を超えて詳細に観察するため、モノに作用する調べたい波長の光の特徴と、電子レベルの情報を与える短い波長（X 線）の能力を、同時に利用することを考えました。しかし、単に光と X 線を物質にあてるだけでは、それぞれが勝手に振舞う（反射・吸収される）だけで、有用な情報は得られません。そこで、X 線領域での非線形光学現象の 1 つである、X 線パラメトリック下方変換^{*6}（2007 年 6 月 14 日プレスリリース）：

<http://www.riken.jp/r-world/info/release/press/2007/070614/detail.html>）を活用することにしました。この非線形光学過程では、1 つの X 線の“親”光子が、2 つの“姉妹”光子に分裂します。この時、応答を調べたい光の波長に“妹”光子を選び、“姉”光子を X 線に選ぶと、物質が“妹”光子に応答している様子を“姉”光子で観察することができます。“姉妹”光子は 1 つの“親”光子から生まれるため、“姉”光子と“妹”光子に一種の共同作業をさせることができるのです。

従来の手法は、単一の光を用いてその限界に挑むものであったのに対して、今回の手法は、物質を調べる波長と分解能を決定する波長を分離することで、波長による限界を超えるという全く新しい試みです。実際に、非常に強力な X 線が利用できる SPring-8 の理研ビームライン BL19LXU を用いて、波長 1.12 Å の“親”光子から、波長 1.13 Å の“姉”光子と波長 206 Å（極端紫外光）の“妹”光子が生まれる過程を利用しました。その結果、炭素原子同士をつなぐ手の部分（価電子）は極端紫外光の振動と逆向きに、また炭素原子に強く束縛された電子（内殻電子）は極端紫外光の振

動と同じ向きに、それぞれ振動していることを初めて確認しました（図 2）。従来の手法では、物質全体でならされた平均的な電子の振る舞いしか知ることができませんでしたが、今回の超高空間分解能顕微法により、それぞれの電子の応答を分離して観測することに成功しました。

また、X 線である“姉”光子が細かくものを見ることができるという特徴を生かした結果、分解能は 0.54Å まで高まりました。これは、調べたい波長（ 206Å ）の 380 分の 1 に達します。これまで実現されていた分解能は可視光領域で波長の約 10 分の 1 程度であったことから、これを大幅に更新する世界で最も高い値です。

3. 今後の期待

今回、“姉妹”光子を使う新しい方法の有効性を示すことができました。2011 年現在、“姉”光子を選別する分光技術の制約により、“妹”光子を可視光などのより長い波長領域に選ぶことができません。しかし、今後の測定技術の進歩により、波長の限界をはるかに超えた超高空間分解能顕微法が、物質の光に対する応答の研究に応用されるものと期待されます。

光学応答は、物質内部の電子状態に関する貴重な情報を与え、学術的にも産業的にも重要な物質の機能の理解に役立ちます。例えば、高温超伝導やスピントロニクスなどの有用な機能を持つ材料では、電子同士の反発により特異な電子の秩序が現れます。これらを光で、かつ、オングストローム分解能で直接見ることができれば、機能を深く理解し、それを強化することが可能になります。こうして得られた成果は、例えば超伝導リニアモーターに使う超伝導材料や、低消費電力の新しいデバイスの開発に生かされるものと期待されます。

<補足説明>

※1 非線形光学

物質の光への応答が、光の波の振幅に比例しない光学現象を扱う。このような効果は線形応答に比べて極めて弱いため、通常その観測にはレーザーが必要とされる。

※2 オングストローム(Å)

原子レベルの大きさを扱うための長さの単位(Å)。1 Å = 1 千万分の 1 mm。例えば、炭素原子の半径は約 0.7 Å。

※3 大型放射光施設 SPring-8

兵庫県の播磨科学公園都市にある世界最高の放射光を生み出す理化学研究所の施設。SPring-8 の名前は Super Photon ring 8GeV に由来する。放射光とは、電子を光とほぼ等しい速度まで加速し、電磁石によって進行方向を曲げた時に発生する、絞られた強力な電磁波のこと。

※4 光子

光を粒子として扱うときの概念。

※5 極端紫外光

可視光 (4,000~7,000 Å) より波長が短い紫外領域の内、波長が数 100 Å 程度の領域。

※6 パラメトリック下方変換

物質中の電子との相互作用により 1 つの光子が、2 つの光子に変換される非線形光学現象。

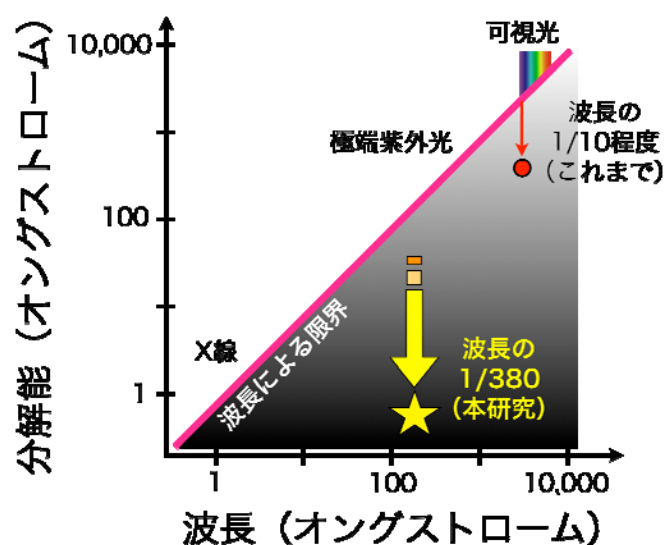


図1 波長と分解能の関係

一般に、どれだけ細かいものを見られるかは、使っている波長が下限を与える。通常、グラ

フの右下の領域は見ることはできない。本研究では、“妹”光子のいる極端紫外領域で X 線である“姉”光子の特徴を利用することにより、極端紫外光の波長の 380 分の 1 という超高分解能を実現した。

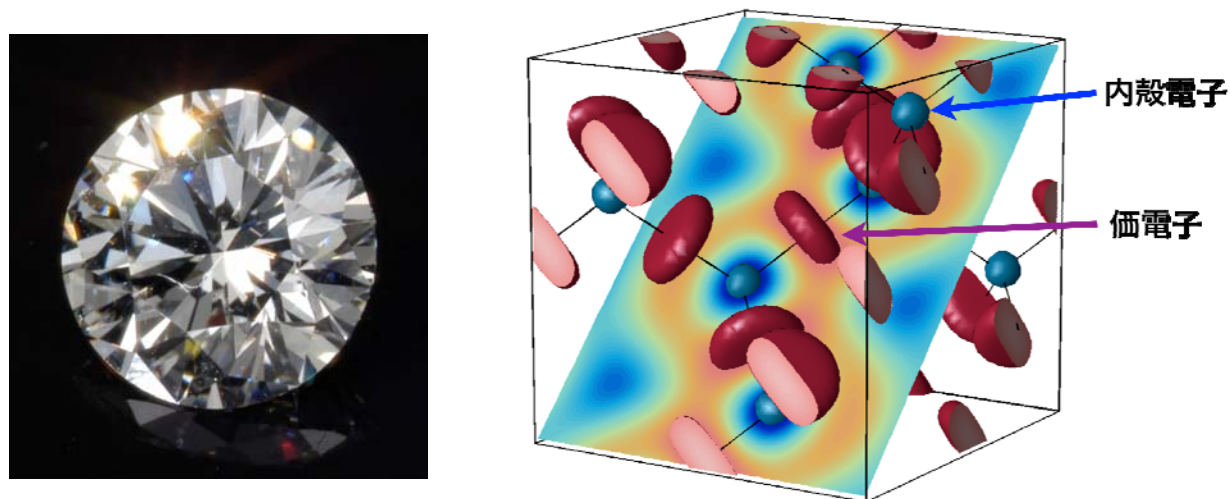


図 2 肉眼で見たダイヤモンド（左）と“姉”光子が見た“妹”光子に応答するダイヤモンドの様子（右）

炭素原子に強く束縛された内殻電子に対応する青い球状の領域は光の電場と同じ向きに動き、原子間の結合を担っている価電子に対応する赤い円盤の領域は、逆向きに動くことが分かった。立方体の 1 辺の長さは、約 $3.6\text{ \AA}$ であり、 $206\text{ \AA}$ の波長よりはるかに細かく見えていることが分かる。