

フォトニック結晶を使って、光速を5万分の1に抑えることに世界で初めて成功

納富雅也・田辺孝純

光を制御できるフォトニック結晶共振器を用いて、NTT 物性科学基礎研究所の研究グループが光を1ナノ秒間閉じこめ、世界で初めて光の速度を5万分の1に抑えることに成功。超高速・大容量の情報処理技術につながるこの成果は、今年1月に創刊された *Nature Photonics* 1月号で発表された¹。チームリーダーの納富雅也特別研究員と測定を担当した田辺孝純研究員に、研究の目的や経緯、今後の展望などについて話を聞いた。

光による情報の伝送は実現、次は光で処理する時代へ

Nature Digest — なぜ光を蓄積したり、速度を遅らせたりする研究を行うのでしょうか？

納富 — 通信の研究はもともと電気で行われていて、導線を使って電気信号を送り、LSIのような電気信号回路で情報を処理します。それが光ファイバーの登場により、光信号による超高速の伝送がほぼ完全に実現しました。しかし、情報の処理は電気のままというのが現状のため、それを光化するのが高度情報化社会を推進するうえでの大きなブレイクスルーとなります。電気処理の場合は、電圧を変えたりすることによって電気信号をためたり、伝播速度を変えたりしますが、光でもそれに対応することが求められます。光の場合は、超高速で伝わり、干渉性が低いので、いくつもの異なる波長の信号を同時に送れるという長所がある一方、閉じ込めて蓄積することや伝播速度を変えることが非常にむずかしいのです。私たちは、その問題を解決するためにフォトニック結晶を用いました。

ND — フォトニック結晶とはどのようなものなのでしょう？

納富 — 光の波長（数百～数千nm）と同程度の周期的な屈折率分布をもった人工結晶のことです。最大の特徴は、光に対するバンド構造^{*1}を有していて、それによって光の閉じ込めの強さや伝播速度が決まることです。特にフォトニックバンドギャップ（PBG）とよばれる波長領域では、光の絶縁体として機能するため、光を非常に強く閉じ込めることができます。自然界には、例えばダイヤモンドやガラスなど電気の絶縁体は存

在しますが、光の絶縁体は存在していません。PBGを利用して、フォトニック結晶中に光導波路^{*2}や光共振器^{*3}の構造を作り出すことができ、低消費電力で高速な情報処理チップの実現につながると考えられています。

ND — フォトニック結晶の研究は、いつごろ始まったのですか？

納富 — 1979年に、当時東京大学工学部にいた大高一雄先生（現千葉大学教授）が光を閉じ込める構造についての基本概念を提唱しました²が、エポックメイキングとなったのは、1987年にベル研究所（現UCLA）のヤプロノビッチ博士とトロント大学のジョン教授がそれぞれに発表した2つの論文です^{3,4}。その内容を受けて数値計算などの理論研究が始まり、1990年代の終わりごろからは半導体の微細加工技術でフォトニック結晶を作製する試みが世界中で一斉に始まりました。私たちのグループが研究を始めたのもそのころで、1998年のことです。

高性能の光共振器と高精度の測定系が成功のかぎ

ND — では、その開発の経緯についてお聞かせください。

納富 — フォトニック結晶にはいろいろなタイプがありますが、私たちは電子線露光とドライエッチングによって、シリコンの薄膜に直径230nm程度の穴を周期的に配列した、比較的単純な構造のものを作製しました（図1）。この結晶には、およそ1200～1600nmの波長領域に大きなPBGがあることを2000年に確認しました。続いて中心1列の穴を抜いて光の通り道を開けた導波路を作製したところ、光の伝播速度を100分

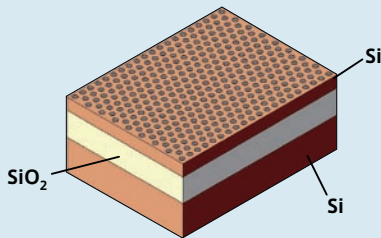


図1：NTTが作製したシリコンフォトニック結晶の概観。シリコン基板上に直径230nm程度の穴が三角格子状に配列されている（実験に用いた試料では下部のSiO₂は除去）。

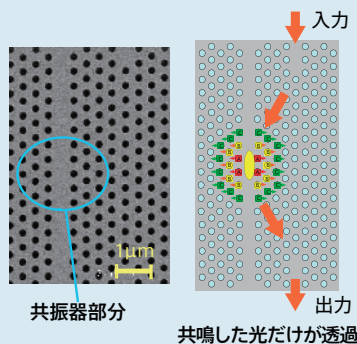


図2：共振器の電子顕微鏡画像（左）と模式図（右）。光絶縁体として働く周期構造部分と直線状に穴を取り除いた線状欠損部分から成る。穴のない領域はフォトニックバンドギャップが存在しないため光を通し、それに隣接する穴（赤、黄、緑）の位置をわずかに（それぞれ9、6、3nm）外側にずらすことにより、強い閉じ込め効果を実現している。電子顕微鏡画像では、穴の微小なシフトは判別不能。



納富雅也 (のうとみ・まさや) 写真右 / NTT 物性科学基礎研究所量子光物性研究部フォトニックナノ構造研究グループ特別研究員。工学博士。専門は応用物理学。1964年、熊本県生まれ。1986年、東京大学工学部卒業、1988年、同大学大学院工学研究科修士課程修了。同年、NTTに入社、光エレクトロニクス研究所配属。1997年、東京大学より工学博士号取得。2001年より、現職。2002年より東京工業大学客員助教授を兼務。

田辺孝純 (たなべ・たかすみ) 写真左 / NTT 物性科学基礎研究所量子光物性研究部フォトニックナノ構造研究グループ研究員。工学博士。専門は電子工学。

1976年、宮城県生まれ。2000年、慶應義塾大学理工学部卒業。2004年、同大学大学院工学研究科博士課程修了。同年、NTT入社、現在に至る。今回の論文では、時間分解の測定を担当。

NTT 物性科学基礎研究所量子光物性研究部は、光通信技術や光情報処理技術に大きなブレイクスルーをもたらす革新的な基盤技術の提案、並びに量子光学・光物性分野における学術的貢献を目指して研究を進めている。光材料から光デバイス、システムに至るまで幅広い研究分野を、フォトニックナノ構造研究グループを含め3つのグループが有機的に結合して研究を行っている。

の1にすることに世界で初めて成功しました⁵。その後、導波路の特性を向上させることに注力し、2005年には2dB/cmという導波路損失の世界最低記録を作るところまでいきました。しかし、導波路だけでは回線の役目しか果たしません。情報の処理には共振器が適しているので、導波路と共振器を組み合わせれば、複雑な機能が実現できるだろうと考えました。

ND — それが今回の成果となった共振器ですね。どのような構造ですか？

納富 — 導波路の光の通り道の一部をわずかに広げることで、光を強く閉じ込められるようにしたものです (図2)。穴のシフトは、内側から9nm、6nm、3nmと段階的にずらしています。このデザインが功を奏して、スペクトルの共鳴幅の測定値が1.3 pmという微小共振器としては世界最高性能の値を示すことができました。この共鳴幅から決まる閉じ込めの強さを表す指標のQ値は、120万という高い値になります。

ND — 閉じ込めや遅延の時間は、どのように測定されたのですか？

田辺 — 時間分解の測定は主に2つを行いました。1つは、共振器にどれだけ光が閉じ込められるかという光子寿命の測定です。これは共振器にまず連続的な光を入れて満タンにした後、光の入力を突然切ります。そうすると、たまっていた光が漏れてくるので、その速度から蓄積時間を導き出すというやり方です。今回、1.01ナノ秒間蓄積されたことがわかりましたが、これはそれまでの最長記録を1桁以上更新したことになります。もう1つは、共振器にどれくらいの時間光がとどまって出てくるのかという光遅延時間の直接測定です。光のパルスを共振器に入れて出てくるまでの時間を比較導波路と比べて、その差から通過時間を測定し、共振器内での光の速度を導き出すというやり方です。今回測定された速度は5800m/sで、光の速度 (約30万 km/s) の5万分の1以下に減速されていることを確認しました。これまで400～500分の1だった減速率を大幅に更新したことになります。

共振器を情報処理以外の分野でも活用できる可能性が

ND — 今後の方向性をお聞かせください。

納富 — 今回開発した共振器を使って、光スイッチを作製したり、デバイスの動作エネルギーをさらに下げる工夫をしたいですね。いくつも連結させて複雑な構造とし、遅延時間をさらに伸ばすことも考えています。また情報処理からは外れるのですが、私は共振器を使って起きる物理現象に興味をもっています。

例えば、共振器を水平に半分切断した構造を考えて、できた真ん中の空間に光パルスをため込むと、光が共振器を上下に押しします。私たちの共振器だと、その押す力によってなされる力学的仕事が従来の方法よりも非常に大きく、光から力学エネルギーへの変換効率が1兆倍も大きいことが計算でわかってきました⁶。通常、光がする力学的仕事は非常に小さく、現在、細胞を拾うような光ピンセット^{*4}などに応用されてはいるものの、効率が悪く、かなり大きなレーザーのパワーを使ってようやく拾い上げるといった状況です。エネルギーの変換効率が格段によくなることで、物理的に面白いものができる可能性があります。そんな点も探っていきたいと考えています。

ND — 最後に、企業で研究するメリットとは何でしょうか？

納富 — 私たちのいる厚木の研究所には、500名程度の研究者がハードウェアに関するさまざまな研究をしています。自分と同じテーマで研究している人はいませんが、例えば今回のような光速の変調技術が必要であるとすれば、それに関連する専門家が身近にたくさんいて、日常的に議論ができます。これが大学だと、同じ研究室の大学院生を相手にするか、たまに学会に行って話をする程度で、わりと閉じてしまっている場合が多いのです。いつでもプロの研究者と議論ができて、必要があれば社内のお他チームとの提携も含めて広く研究ができる。私はそういった研究環境が気に入っています。

ND — ありがとうございます。 ■

聞き手は北原逸美 (Nature Digestのエディター)。

*1 バンド構造
結晶などの固体の中で、波として振舞う粒子 (電子や光子) が取ることのできるエネルギーと波数との関係を示した曲線のこと。

*2 光導波路
電気回路中を電子が流れるように、基板上に形成した回路中が光が伝播できるようにした構造で、いわば、光の配線板。

*3 光共振器
光子をある空間に長時間閉じこめる性質をもつデバイス構造。より高い光子密度を得るためには共振器のサイズを小さくする必要がある。

*4 光ピンセット
光が物質の表面で反射・屈折する際に発生する光放射圧という力を利用して、レーザー光を用いて、細胞やDNAを非接触で捕捉・操作する技術。

1. Tanabe, T. et al, *Nature Photonics*, **1**, 49-52 (2007)
2. Ohtaka, K. et al, *Phys. Rev.* **B19**, 10, 5057-5067 (1979)
3. Yablonoitch, E., *Phys. Rev. Lett.* **58**, 2059 (1987)
4. John, S., *Phys. Rev. Lett.* **58**, 2486 (1987)
5. Notomi, M. et al, *Phys. Rev. Lett.* **87**, 253902 (2001)
6. Notomi, M. et al, *Phys. Rev. Lett.* **97**, 023903 (2006)