

未来を拓く先端技術

フォトニック結晶による光の制御

のうとみ まさや

納富 雅也

NTT物性科学基礎研究所

NTT物性科学基礎研究所では、フォトニック結晶と呼ばれる特殊な構造を研究しています。この構造を用いることにより、非常に強い光の閉じ込め、スローライト状態、奇妙な負の屈折現象など、通常の物質では不可能なさまざまな現象が実現されることが明らかになってきています。またこれらの性質を用いて、光メモリなどの光デバイスのサイズおよび消費エネルギーを大幅に小さくすることに成功しており、本格的な光集積への道がみえつつあります。

フォトニック結晶とは

ここでは、NTT物性科学基礎研究所で研究を行っている「フォトニック結晶」と呼ばれる素材について紹介します。ほとんどの方にとっては耳慣れない言葉ではないかと思いますが、まずフォトニック結晶とは何か、なぜそんなものを研究しているのか、について簡単に説明した後に、実際に我々の研究チームで行っている研究成果を紹介します⁽¹⁾。

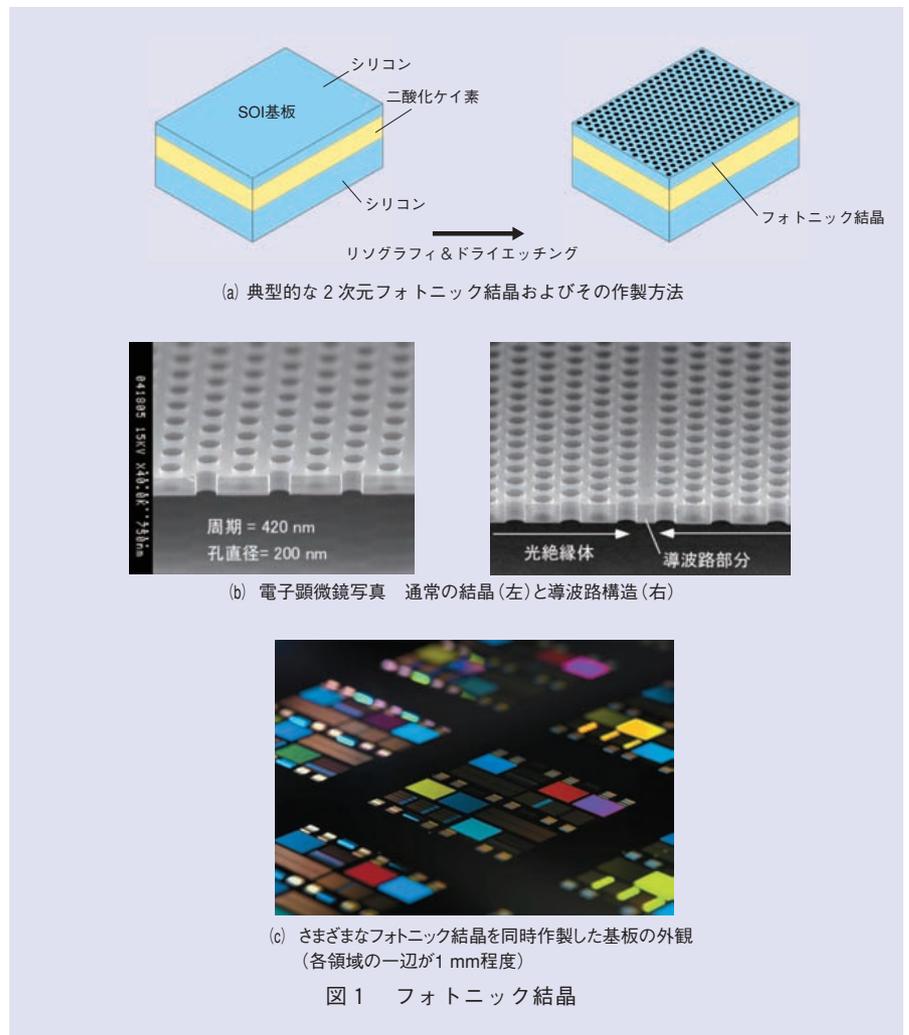
現在世の中でさまざまなタイプのフォトニック結晶が研究されていますが、その一例（実際に我々が研究している構造）を図1に示します。その外観は図1(c)のように結晶のタイプによってさまざまな色が付いて見えます。ただそれが「結晶」という名の由来ではありません。また、微視的に見ると実際の構造は結晶というイメージからは遠く、単に誘電体に周期的に穴の空いた構造です。フォトニック結晶の正確な定義は「屈折率が光の波長と同程度の周期で、周期的に変調された構造」です。

図1(a)に示すように、この構造は半導体（シリコンやインジウムリンなど）の薄膜に電子線リソグラフィとドライエッチング技術によって、周期的な空孔（典型的なサイズとしては、孔半径100 nm、孔周期420 nm）を形成しています。図

1(b)は作製した試料の電子顕微鏡写真像です。屈折率の大きな半導体（屈折率は3程度）と屈折率の小さな空気

（屈折率は1程度）が交互に並んでおり、上記の定義に合致しています。

なぜ、このような人工周期構造体が、



フォトニック結晶と呼ばれているのでしょうか。これを理解していただくために、まず通常の結晶について考えてみます。通常の結晶は、周期的な原子の配列で構成されていて、結晶中に存在する電子には周期的なポテンシャルが働いています。周期ポテンシャル中の電子は自由空間中の電子とは大きく違う振る舞いを示すことが知られており、その結果として自然界に存在する結晶は、導体になったり、絶縁体になったり、半導体になったりします。別の言い方をすれば、自然界に多様な電気的性質を示す物質が存在する原因は、結晶の周期性に起因します。この振る舞いは、電子の量子力学的な波動性に起因しているため、同じ波動である光についても同様な効果が期待できるはずなのですが、自然界の結晶の周期は光の波長に比べて3桁以上小さいために、光はこの周期性を感じることはできません。その結果、通常の物質は光についてはすべて導体（または吸収体）であり、光を吸収せずに通さない「光の絶縁体」は存在しません。

ところが、フォトニック結晶は、光の波長にちょうどマッチした人工的な周期構造なので、通常の物質がさまざまな電気的性質を発現するのと同じ理由で、さまざまな（通常の物質では不可能な）光学的性質を発現することができます。例えば光を全く通さない「光の絶縁体」を実現することができます。

実際に図1のフォトニック結晶中の光の振る舞いを記述する分散関係（各波長でどのような光の伝搬モードが存在するかを示したものを図2(a)に示します。参考までに通常の物質中での光の分散関係を図2(b)に示します。このように光の伝搬の仕方がフォトニック結晶中では、全く変わってしまい複数のバンド構造（各赤線に相当し、これらはフォトニックバンド構造と呼ばれる）で表現されることが分かります。

図2(a)においてPBG（フォトニックバンドギャップ）と示された周波数（波長）領域には導波モードが一切存在しません。この波長領域でこのフォトニック結晶は光絶縁体として機能します。このPBG以外の領域でも分散曲線は、図2(b)の単純な直線と比べると複雑な振る舞いをしていますが、これは光の伝搬速度や伝搬方向、異方性が通常の物質とは大きく異なっていることを意味しています。また、PBGを持つ光絶縁体で取り囲んでやることにより、極小サイズの光配線（導波路）や共振器（後述）をつくることができます。図1(b)の右の写真は導波路の作製例です。

フォトニック結晶の効果としてもっとも端的な例は、図1(c)のカラフルな色合いに見ることができます。この色は、このフォトニック結晶が複雑なバンド構造を持っており、波長によって反射率が異なるために出ている色です。素材はシリコンなので本来無色なのですが、このようにフォトニック結晶では人工的な色が見れます。

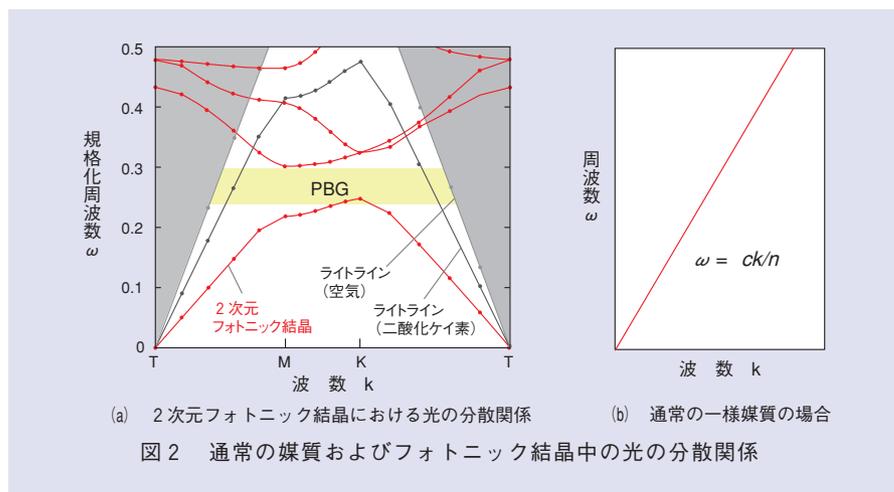
このような興味深い特徴を持つ人工的な数100 nmスケールの周期構造は、最近の微細加工技術の進展によって初めて作製が可能になりました。理論そのものは20年ほど前からあったのですが、こ

こ数年フォトニック結晶がいろいろな分野から注目を集めているのは、このような結晶が実際に作製できるようになったためです。

なぜフォトニック結晶に注目するのか

現在、フレッツ光などのFTTH（Fiber To The Home）サービスに代表される「光」技術はICTに革新をもたらしつつあります。これまでの光技術は主に長距離間の情報伝送に用いられており、情報ノードにおける信号処理はいまだに電気回路技術によって担われているのが現状で、近年の情報処理の高ビットレート化に伴い、この電気回路部分の消費電力および発熱が深刻な問題になりつつあります。最近、このノード部の信号処理に光技術を持ち込めば、消費電力や発熱問題を回避できるという可能性が議論されており、多くの期待を集めています。しかし、従来の光技術は次のような3つの理由で、それが容易ではありません。まず、光素子のサイズが多過ぎること、次に、光素子の効率が悪いこと、最後に、光素子の集積化が難しいこと、です。

以下でいくつかの実例で示すようにフォ



トニック結晶は、こういった従来の光技術の限界を凌駕する可能性を持っています。我々は、その点に着目しフォトニック結晶が新しい光の集積技術の基本になり得る可能性を持っていると期待しています。我々の研究は、現在はずべて電気回路で処理されているマイクロプロセッサなどのチップの中に、将来的にフォトニック結晶をベースとした光ネットワーク技術を導入し、高ビットレートで低消費電力で動作可能な情報処理チップを実現することを目標としています。この技術により、将来的に情報処理ノードにも本格的に光を導入することが可能となり、電気回路処理において現在顕在化しつつある発熱限界、消費エネルギー限界を克服できると期待しています。

光の閉じ込め

光は自然界の中でもっとも速い速度で伝搬し、空間的に小さな領域に閉じ込めることが容易ではありません。この特徴が光素子のサイズを制限し、集積化を難しくしています。通常のミラーでは1回当りに必ず数%の吸収損失があるために、光の閉じ込めには使えません。光ファイバでは全反射という高反射率の現象を使って光を閉じ込めていますが、この現象は素子サイズが光の波長よりもずっと大きくないと有効に働きません。

ところが光の絶縁体として機能するフォトニック結晶で狭い空間を囲ってやると、光をその狭い空間に強く閉じ込めることが可能となります。このような光閉じ込め構造は光共振器として機能し、さまざまな光素子の基本構造となります。近年、フォトニック結晶の作製精度が向上し、また、光を閉じ込めるための最適化されたデザインが発見されたため、実際に $0.1 \mu\text{m}^3$ 程度の極小領域に光を長時間閉じ込める共振器が実現しています。

図3(a)~(c)は我々が研究している2

次元フォトニック結晶をベースとした光共振器構造です^{(2),(3)}。光絶縁体として機能する結晶の1列分の孔を省き、その1列の色付けした部分の孔をわずかに3, 6, 9 nmずつ外側にずらすことによって、中央部にモード体積 $0.1 \mu\text{m}^3$ 程度の共振器が形成されます。実際にシリコンを用いて作製したフォトニック結晶共振器(図3(c))に対して、図3(d)のように鋭い共振が観測され、同時に図3(e)のように共振器内に1 ns以上の時間光を閉じ込められることも測定されました。共振器の性能を表すQ値としては200万程度の値に相当し、波長サイズの共振器としては従来の技術では実現不可能な性能の共振器が実現しています。

光素子の大規模集積化

前述したように、光素子は通常同一チップ内に集積化することが簡単ではありません。しかし、フォトニック結晶では光の絶縁性を利用することにより、高

密度に超小型の光素子を集積化することができます。最近我々の研究グループでは、図4に示したような超小型高Q光共振器を大規模に集積化して結合させた結合共振器の作製に世界で初めて成功しました⁽⁴⁾。この素子では小型共振器をわずか $2.9 \mu\text{m}$ 間隔で最大400個まで結合し、入出力導波路を集積化した構造が実現しています。このような大規模な光集積は従来の光技術では困難でしたが、フォトニック結晶を用いて達成することができました。

極小エネルギーで動くデバイス

極小領域に光を長く閉じ込めることができると、光と物質の相互作用の増強が可能のため、非常に弱い光でデバイスを動作させることができるようになります。レーザ、スイッチ、メモリ、受光器などさまざまなデバイスで同様な効果が期待できますが、ここではその一例としてメモリに適用した例を紹介します。

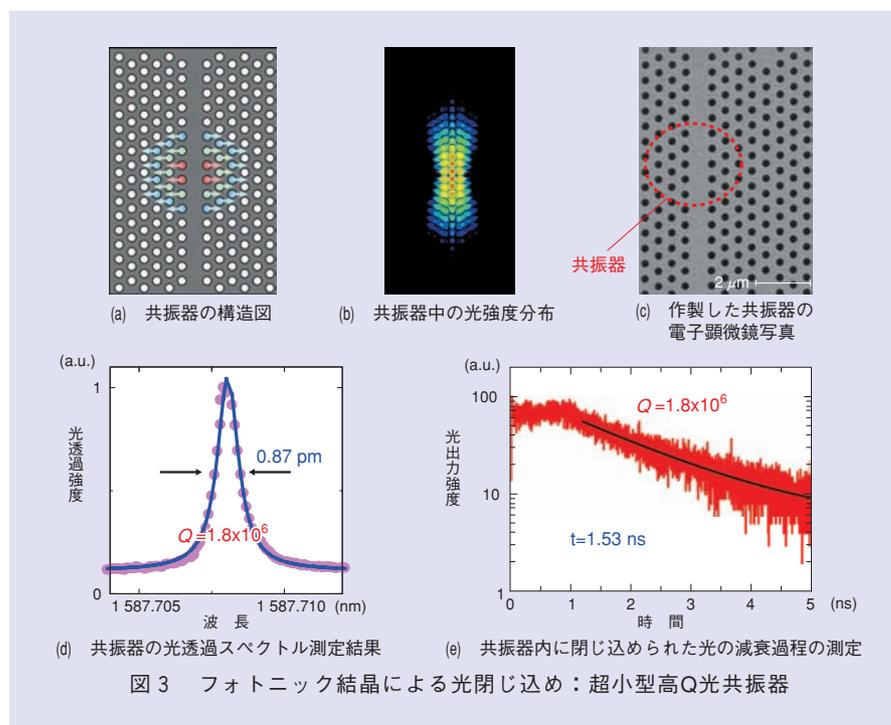


図3 フォトニック結晶による光閉じ込め：超小型高Q光共振器

図5は我々がNTT フォトニクス研究所と共同で開発したフォトニック結晶共振器をベースとした光ビットメモリです⁽⁵⁾。このメモリは素子の光透過状態のオンとオフで1ビット情報の記憶を行います。従来このような光メモリは消費パワーが数mW程度と大きいため、集積化して使うことは困難でしたが、我々はフォトニック結晶共振器を用いることにより劇的に(2桁以上)消費パワーを下げることが成功しています。図5(b)の例では40 μ Wのエネルギーで動作しています。

ここではまだ1個のメモリの動作ですが、前の例から分かるように、このようなフォトニック結晶素子は将来的に大規模に集積化することが可能と思われます。そうすれば光によるRAM(Random Access Memory)の実現もみえてきます。現在、我々のチームでは大阪大学、九州大学、NECと共同研究を行って、光ルータへの適用を目指した光RAMの研究を行っています。

このようなメモリ素子を連結させると、もっと複雑な論理処理も可能となることが知られており、我々のチームでは単純なRAMだけでなく光による論理処理まで見据えた研究も行っています。

また、同様の原理でさまざまなデバイスの低エネルギー化が可能です。実際、我々はメモリ以外にも、光スイッチ、光変調器、光受光器、レーザなど、従来のデバイスに比べて圧倒的に小さなエネルギーでの動作を実現しています。

光を遅くするスローライト

従来の光技術のもう1つの限界要因

は、光の伝搬速度を制御できない、という点です。通常光は物質の中を超高速で駆け抜け、止めることも、減速することもできません。これは電圧によって自在に電流の流れを制御できる電気回路処理との際立った違いです。情報処理をする場合には(特に論理処理を行う場合には)、いったん信号を待たせる必要がある場合が多くあります。また、何らかの相互作用を行って処理を行う場合

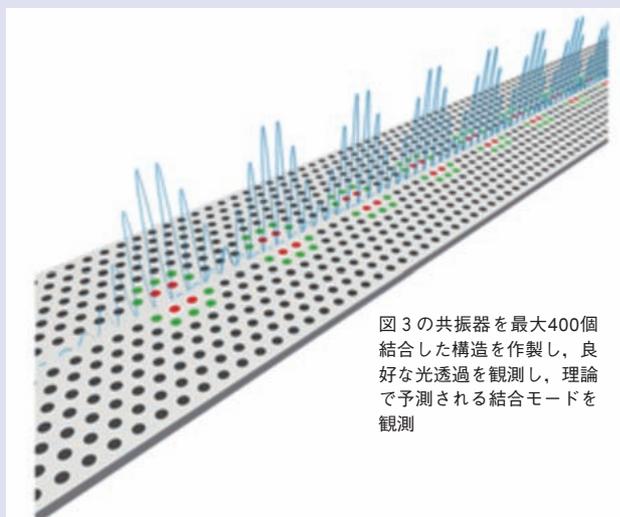
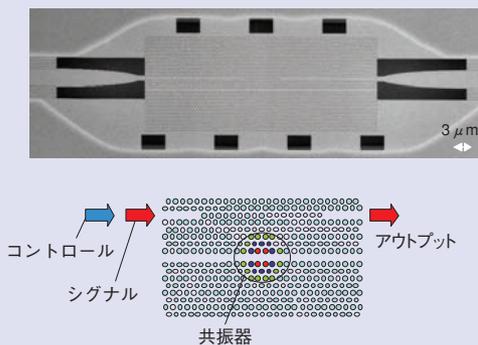
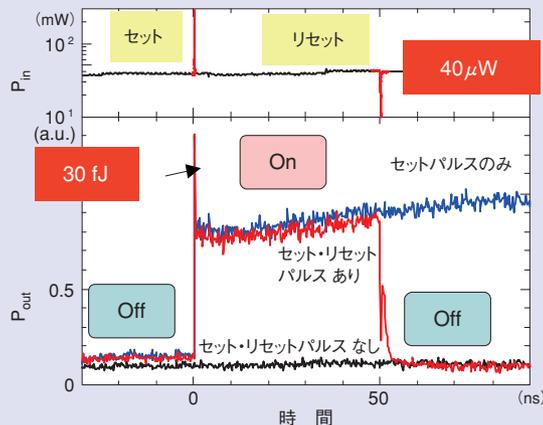


図3の共振器を最大400個結合した構造を作製し、良好な光透過を観測し、理論で予測される結合モードを観測

図4 大規模結合ナノ共振器



(a) デバイスの電子顕微鏡写真および素子構成図



(b) 光ビットメモリ動作測定結果

図5 フォトニック結晶共振器を用いた光ビットメモリ

には、その部分だけゆっくりと信号が伝搬したほうがより効率的に相互作用を行わせることができます。したがって、光の速度を遅くする技術は極めて重要です。

ところが従来の物質では光の伝搬速度は真空中の光速 c を媒質の屈折率 n （通常1から3程度の値）で割った値であり、秒速10万～30万km程度の値で、これ以上変えることはできません。これが従来物質の限界でした。

一方、フォトニック結晶では図1(b)のように分散関係を大きく変えることができるので、光の伝搬速度も大きく変えることができます（伝搬速度は分散の傾きで決まります）。我々は、フォトニック結晶のそのような特徴に着目して、図6(a)のようなシリコンのフォトニック結晶導波路を用いて2001年に光速を約100分の1に遅くすることに成功しました⁽⁶⁾。それまで極低温の特殊な原子を用いたスローライトの報告はありましたが、このような室温の誘電体構造でのスローラ

イトとしては世界で初めての報告でした。

またその後、図6(b)のようなフォトニック結晶超高Q共振器を用いて、さらに大幅な光の減速にも成功し、5万分の1の減速を達成しています。この値は光が秒速6kmで伝搬していることに相当し、これは現在までに報告されている誘電体のスローライトとしてはもっとも遅い値となっています。

現在は、このようなスローライト状態を用いて高効率に相互作用を起こさせるデバイスや、光のバッファに向けた研究を行っています。

負の屈折による奇妙な光伝搬現象

図2においてフォトニック結晶では光の伝搬の仕方が大きく変わるとい話をしましたが、最後にそのもっとも印象的な例を紹介します。

ある屈折率を持った媒質の界面に光が斜めに入射すると、一般に「屈折」と

呼ばれる現象が起こります。屈折角はスネルの法則を通じて媒質の屈折率で決まり、通常の媒質の屈折率は正であるため、屈折の報告は図7(a)に示すように通常は常に正です。

ところが、フォトニック結晶では、図7(b)のような屈折角が負になるような現象が可能となります。これは図2のような特異な分散カーブからフォトニック結晶の実質的な屈折率を負にすることができるからです。図7(d)はあるフォトニック結晶にビームが入射した状況を数値シミュレーションによって計算した結果です。このようにフォトニック結晶で負の屈折が起こり得ることを、我々は2000年に初めて発見し世の中に発表しました⁽⁷⁾。その後、多くの実験で追試され現在は光学の分野で大きな研究分野に成長しています。

負の屈折が起こると通常の常識に反するようなさまざまな現象が可能となります。その一例を図7(c)に示します。この図のように点光源から出た光は負の屈

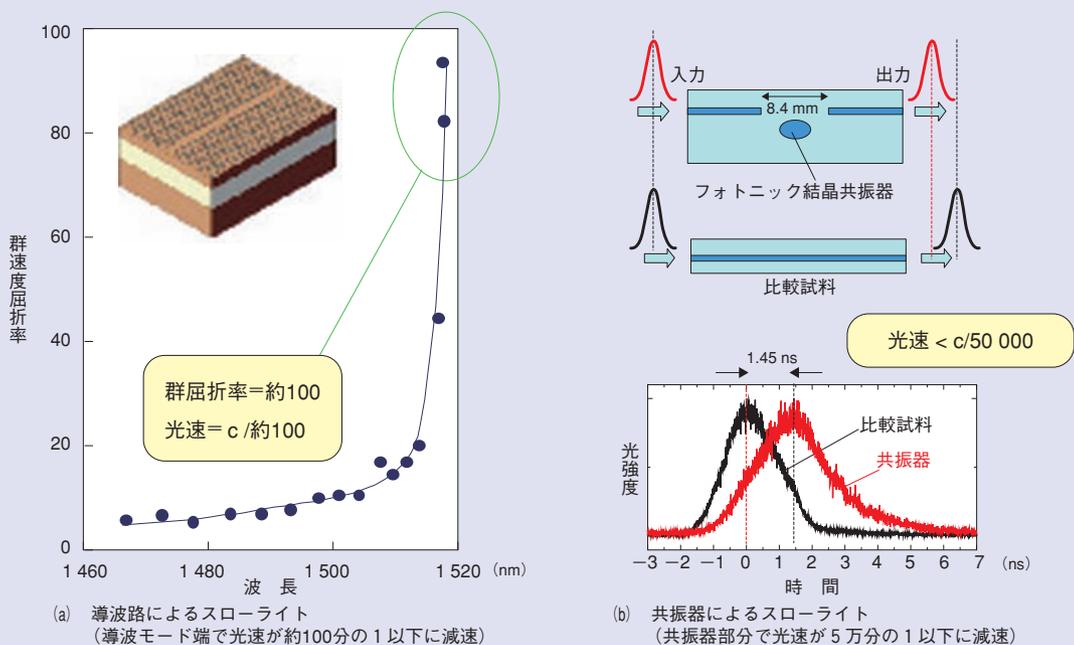


図6 フォトニック結晶による結晶スローライト

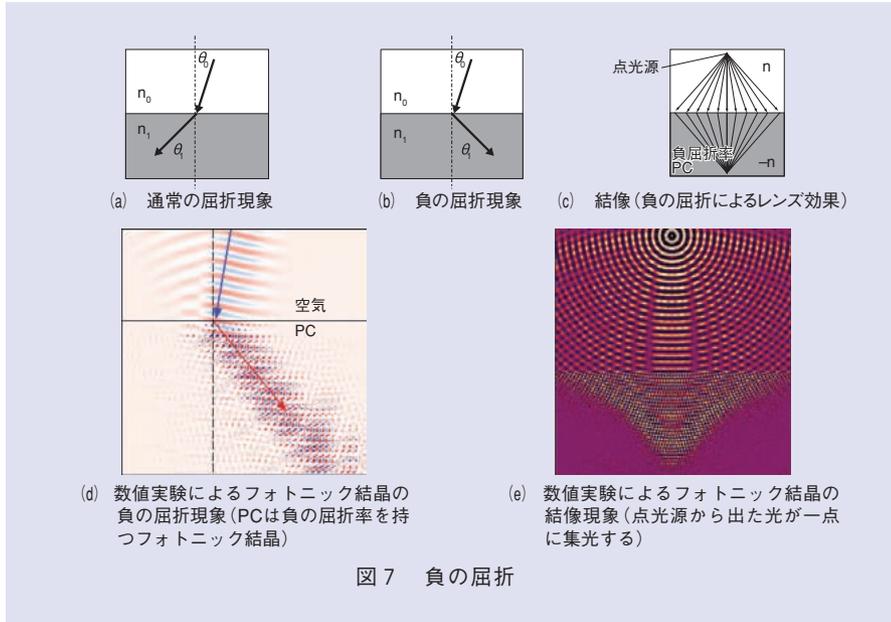


図7 負の屈折

折媒質に入ると再び一点に集光するので、図7(e)では実際に点光源から出た光が負の屈折率を持つフォトニック結晶内でどのように伝播するかを数値シミュレーションによって計算しています。点光源から出た光がフォトニック結晶中で一点に集光していることが分かります。これはこのフォトニック結晶がレンズと同様の働きをしていることを示しています。しかし、通常のレンズは、中心軸を持ち湾曲した界面を持ち、一定の焦点距離を持ちますが、負の屈折媒質は、中心軸もなければ、焦点距離もなく、平坦な界面があるだけです。そのような界面がレンズとして働くのは屈折率が負になったことの直接の帰結なのです。

おわりに

我々が10年余にわたって研究しているフォトニック結晶について、駆け足で紹介しました。

本技術によって従来の光学の常識では不可能とされていたことが、次々と可能になってきています。我々は、この興味深いフォトニック結晶の特性を生かし

て、将来的に光の複雑な処理をすべて小さなチップの中で行えるようになるのを夢見て研究を行っています。

今回は光情報処理への応用に重きをおいた説明となりましたが、負の屈折のような奇妙な現象も次々と見付かっており、光学の基本概念そのものにも大きく影響を及ぼしつつあります。その意味でフォトニック結晶は、幅広く光物理全体に対するブレークスルー材料として期待を集めており、現在も精力的に世界中で研究が行われているホットな研究分野です。

この研究の一部は情報通信研究機構(NICT) および科学技術振興機構(JST)の助成を受けて行われました。

参考文献

- (1) M. Notomi : "Manipulating Light by Photonic Crystals," NTT Technical Review, Vol. 7, No.9, 2009.
- (2) E. Kuramochi, M. Notomi, S. Mitsugi, A. Shinya, T. Tanabe, and T. Watanabe : "Ultra-high-Q photonic crystal nanocavities realized by the local width modulation of a line defect," Appl. Phys. Lett., Vol. 88, No. 4, p. 041112, 2006.
- (3) T. Tanabe, M. Notomi, E. Kuramochi, A. Shinya, and H. Taniyama : "Trapping and delaying photons for one nanosecond in an ultrasmall high-Q photonic-crystal nanocavity,"

- Nature Photonics 1, pp. 49-52, 2007.
- (4) M. Notomi, E. Kuramochi, and T. Tanabe : "Large-scale arrays of ultrahigh-Q coupled nanocavities," Nature Photonics 2, pp. 741-747, 2008.
 - (5) A. Shinya, S. Matsuo, Yosia, T. Tanabe, E. Kuramochi, T. Sato, T. Kakitsuka, and M. Notomi : "All-optical on-chip bit memory based on ultra high Q InGaAsP photonic crystal," Opt. Express, Vol. 16, No. 23, pp. 19382-19387, 2008.
 - (6) M. Notomi, K. Yamada, A. Shinya, J. Takahashi, C. Takahashi, and I. Yokohama : "Extremely large group-velocity dispersion of line-defect waveguides in photonic crystal slabs," Phys. Rev. Lett., Vol. 87, No. 5, pp. 253902-253905, 2001.
 - (7) M. Notomi : "Theory of light propagation in strongly modulated photonic crystals: Refraction like behavior in the vicinity of the photonic band gap," Phys. Rev. B 62, pp. 10696-10705, 2000.



納富 雅也

微細加工技術を駆使して自然界に存在しない物質をつかって、将来の光技術に革新を引き起こす、ということを目指し、基礎的な研究を行っています。すぐにアウトプットが出ず苦労することも多いですが、これまでに存在しなかったデバイス、材料、現象を自分の実験室でつくる、という醍醐味にスリリングな日々を送っています。

◆問い合わせ先

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
TEL 046-240-3553
FAX 046-240-4305
E-mail notomi@nttbl.jp
URL <http://www.brl.ntt.co.jp/group/ryoung-g/index-j.html>