

スマート社会をけん引する フォトニック結晶レーザー



の だ す す む

野田 進

京都大学 大学院工学研究科 教授
2000年よりCREST研究代表者
(2000~05年, 05~10年, 11~16年, 17年~現在)、
13~18年 ACCEL研究代表者

光を自在に制御する「フォトニック結晶」。スマートモビリティを始めとするSociety 5.0を実現するための鍵となる技術の1つとして、近年フォトニック結晶レーザーは大きく発展を遂げている。これまで20年に及ぶ研究に取り組んできた京都大学大学院工学研究科の野田進教授の歩みを振り返る。

実用に近づく自動運転車 課題はセンサーの性能向上

自律移動ロボットや自動運転車はいまや実用間近の段階まで開発が進んでいる。しかし実用化に当たった課題はいくつか残されており、「ライダー(Light Detection and Ranging: LiDAR)」の性能向上もその1つだ。

ライダーはリモートセンサーの一種で、レーザー光を物体に照射し跳ね返ってくるまでの時間を計ることで、物体までの距離を測定する装置だ。周囲の状況を常に把握しながら動く自律移動ロボットや自動運転車にとっては、「目」の役割を果たすライダー。この性能が上がれば、より安全でスムーズな移動が可能になることから、近年開発競争が活発になっている。

これまでライダーの光源には半導体レーザーが用いられているが、小型、安価で扱いやすいものの、高出力にするとレーザー光が広がり性能が下がるため、複数のレンズを組み合わせさせて集光するなど、装置の大型化、高コスト化が問題となっていた。

2020年6月、京都大学大学院工学研究科の野田進教授は、北陽電機(大阪府大阪市)と共同で「フォトニック結晶レーザー」を使った高性能なライダーを開発した。野田さんはフォトニック結晶の第一人者で、約20年にわたって研究開発を進め「フォトニック結晶工学」という新たな科学技術分野の礎を築いてきた。今回発表したフォトニック結晶レーザーは、その集大成の1つとも呼べるものだ。



周期構造で光を制御 自然界にも同じ原理

フォトニック結晶とは、光の波長と同程度の数百ナノメートル(ナノは10億分の1)の間隔で、屈折率の異なる物質を周期的に並べた人工結晶である(図1)。エレクトロニクス分野において、半導体が電子の振る舞いを精密に制御しているのと同様に、光の振る舞いを自由自在に制御できるのが特徴だ。

フォトニック結晶は光の波長と同程度の間隔の周期構造を持ち、その中では、ある範囲の波長の光を通さない「フォトニックバンドギャップ現象」が起こる。

自然界にも同じ原理のものが多くあり、モルフォチョウやタマムシ、オパールも表面に微細な周期構造を持っているので、構造色と呼ばれる独特な光沢を発する。

屈折率の異なる物質を周期的に並べるには、結晶に孔を開ける方法がある。孔と孔との間隔や位置、孔の大きさ、形を工夫することで、光の振る舞いを制御できる。「結晶の母材として、現在、ガリウムヒ素などの半導体材料を用いています。それは、これら半導体材料は、様々なデバイスへの展開にとって非常に有用な材料だからです」と野田さんは語る。

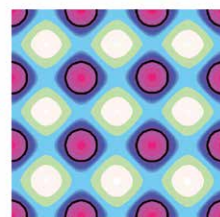
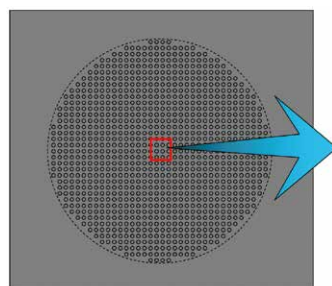
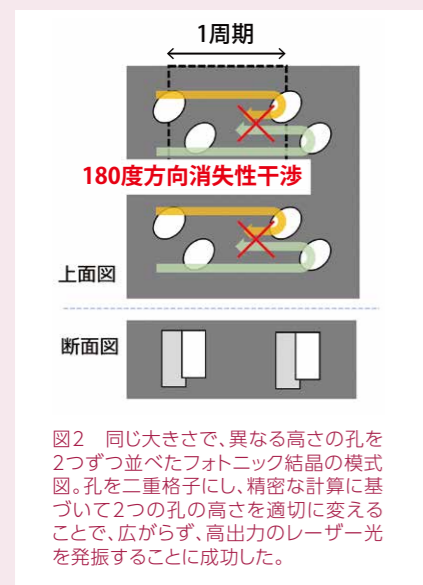


図1 フォトニック結晶。半導体材料に小さな孔が周期的に開けられている(左)。フォトニック結晶により制御された電磁界分布(誌面垂直方向の磁界成分)が示されている。ピンク色、白色は、それぞれ磁界が逆向きを向いていることを示す(右)。

二重格子にすることで 高出力、直進発振を実現

1999年、野田さんはバンドギャップができるぎりぎりのところに現れるバンド端で、大面積の共振状態が現れることに着目し、この共振状態を半導体レーザーの共振器として用いるという着想に至った。実際にフォトニック結晶を集積し、この共振状態を活用したフォトニック結晶レーザーを作り、動作させた。すると期待通りに大面積できれいな発振が得られ、さらに出力光が面垂直方向に真っすぐ出射された。以来、野田さんはフォトニック結晶レーザーの物理の解明とともに、特性向上に努めてきた。その結果、ライダーの小型軽量化、低コスト化に加え、高出力化、安定化にもつながり、現在大きな期待が寄せられている。

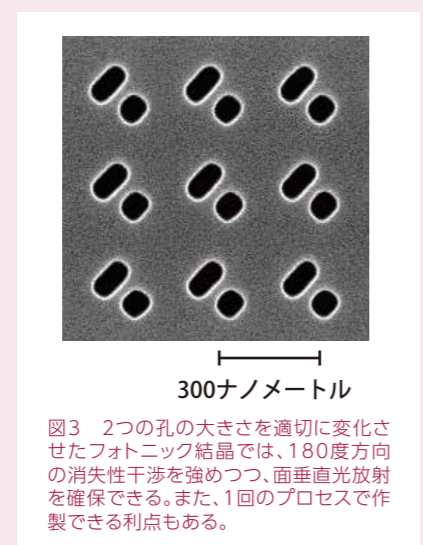
その中でも、特に重要なブレイクスルーは、フォトニック結晶の周期構造を二重格子にすることだった。従来は周期点1つ当たり1つだった孔を2つにし、それぞれの孔の高さを変えたのだ(図2)。「二重格子の発想自体は随分前に思い付いたのですが、当時はまだ理論的な計算ができていませんでしたし、これだけ細かなフォトニック結晶を正確に作る技術もありませんでした」と野田さんは振り返る。この二重格子フォトニック結晶では、それぞれの格子で回折される光波同士で打ち消し合いの干渉が起こり、光分布が広が



る。その結果、基本モードのみで動作し、高品質なレーザー光を出すことが可能となることがわかり、直径500マイクロメートルという従来の半導体レーザーの1万倍以上の面積で、10ワット級の高出力、高品質なレーザーの開発につながった。

さらに、2つの孔の組み合わせを変えることで孔の高さをそろえることにも成功し、製作工程を短縮できた他、下方への放射光も有効利用し、高効率化を図った(図3)。まさに、綿密な計算による理論の裏付けと微細加工技術の蓄積によって得られた成果といえる。

こうして開発したフォトニック結晶レーザーと従来の半導体レーザーを実際に比べてところ、レンズによる補正がない半導体レーザーではレーザー光がどんどん広がってしまうのに対し、フォトニック結晶レーザーでは、レンズがなくても約30メートル先までレーザー光がほとんど広がることなく届いた(図4)。「実験によって、ロボットの自動走行に適用するのに十分な性能があることが実証されました。その



	15cm	50cm	1m	10m	20m	30m
通常のブロードエリア半導体レーザー				確認できず	確認できず	確認できず
フォトニック結晶レーザー						

図4 従来の半導体レーザーとフォトニック結晶レーザーとの比較。直径500マイクロメートルという大面積のフォトニック結晶レーザーでは、約30メートル先まで光がほとんど広がることなく届く。

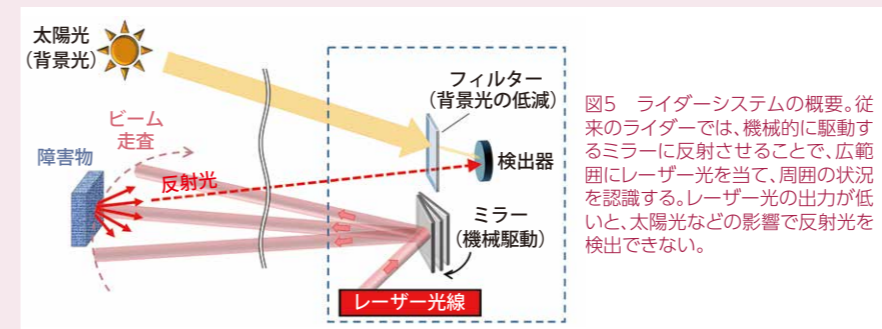
結果、ライダーの小型軽量化、低コスト化、高出力化、安定化が可能となり、従来の半導体レーザーの問題の大部分を克服できました」と野田さんは胸を張る。

2次元でビーム走査 物体の検知を高精度に

続いて、野田さんは電氣的にビームの出射をさまざまな方向に制御できる「複合変調フォトニック結晶レーザーチップ」の開発にも成功した。また、静岡大学発ベンチャー企業のブルックマンテクノロジー(静岡県浜松市)と共同でこのレーザーチップを使い、フラッシュ方式とビーム走査方式の併用による新たな非機械式のライダーも開発した。

従来のライダーは、レーザー光を反射するミラーの角度を変えることで、広範囲を走査している(図5)。これに対し、すでに1次元方向へのビーム走査技術の開発に成功していた野田さんは、それをさらに進展させ、2次元でのビーム走査によって、ミラーを搭載することなく電氣的にさまざまな角度にレーザー光を当てられるようにした。基本となるフォトニック結晶では、等間隔で同じ形と大きさの孔を並べているが、複合変調フォトニック結晶では孔の位置と大きさの両方を変えて、任意の方向へと光を放射できるようにしている(図6)。

この技術の開発に当たっても苦労があった。「初めは孔の位置だけ変えればよいと思っていました。ところがなぜか出力が大きくなりません。実験を繰り返すうちに、電界の打ち消し合いに



よって光が放射されないことに気付きました」と野田さんは振り返る。そして孔の位置を変えて打ち消し合いを崩すことで、高出力かつ高品質なビームを実現したのだ。

この複合変調フォトニック結晶を使って100個のレーザーを集積したチップを作製し、10×10個のマトリクスアレイ構造を持つ複合変調フォトニック結晶レーザーを開発した(図7)。このレーザーでは、10×10の行列の行と列を指定し電気を流すことで、その場所のチップのみからレーザー光を発振させる。それぞれのチップによって発振されるレーザー光の方向が異なるため、電氣的に制御することで、レーザー光を使って2次元走査ができるという仕組みだ。これにより、1つ数ワットのレーザー光を4つ同時に、別々の方向に出すことができるようになった。

さらに、チップ面積を4倍にするだけで、ビームの出射数を現在の900倍の9万個にできることもわかり、周囲の物体をより高精度で検知できるようになるという。野田さんは「特に、従来のフラッシュ方式のみのライダーでは計測が難しかった黒い物体も、このチップを使ったビーム走査方式を併用することで、レーザー光を集中的に当てて距離を測れるようになります」とメリットを語る。

JSTと共に歩んできた20年 光るリーダーシップ

フォトニック結晶の研究開発を野田さんが始めたのは1990年代のことだった。そして、2000年からおよそ20年にわたり、JSTのプログラムで研究を続けている。

この間の成果は枚挙にいとまがない。00年、05年とCRESTに採択され、当時はまだ萌芽の段階だったフォトニック結晶による光の発生、制御に取り組み、その基礎を築いた。その中で、野田さんはフォトニック結晶レーザー技術を大きく発展させていった。また東日本大震災の直後で自然エネルギーの活用が叫ばれていた11年からは、フォトニック結晶レーザーとは逆に、フォトニック結晶の周期構造を工夫することで幅広い波長の光を吸収できるようにし、シリコン太陽電池のエネルギー変換効率を高めることに成功した。

また、13年からはACCELで三菱電機(東京都千代田区)、ローム(京都府京都市)、浜松ホトニクス(静岡県浜松市)といった企業と連携し、フォトニック結晶レーザーの実用化を目指す研究開発に取り組んだ。野田さんが複合変調フォトニック結晶レーザーの概念を思い付いたのはこの頃のことだ。「自動運転車の研究開発が盛り上がりを見せ始めていた時期だったため、現

在のCRESTで、変調フォトニック結晶レーザーによる2次元ビーム走査技術の開発に取り組むことになったのです。さらに、幸いにも省庁連携型のSIPプロジェクトにも採択され、CRESTと共同して社会実装を強力に押し進める体制が整いました」。

これらの成果を語る上で、野田さんのリーダーシップも見逃せない。「研究を進めるに当たっては、研究室でもプロジェクトチームでも、ミーティングをしっかりとって、各人の考えを尊重しつつ、チームとしての方向性を統一しながら進めてきました。得意分野の異なる人が交流し、知恵を出し合うことで、1+1を3にすることができます」と語る野田さんの方針は、未来を担う若い研究人材の育成も考慮したものだ。また、装置の開発に携わる企業との細やかなコミュニケーションは、技術力の向上にもつながっている。

今後は、まず企業と共同でフォトニック結晶レーザーを搭載したライダーの1日も早い実用化を目指すという。また、レーザーの連続動作や輝度の向上を実現し、従来の炭酸ガスレーザーなどに替わる超小型の加工レーザーの開発も計画している。「将来は、全てのレーザーがフォトニック結晶レーザーに替わることを夢見ています」と語る野田さん。自らの成果がスマート社会 Society 5.0を支える基盤技術となる日を目指し、これからも仲間と共にまい進していく。

