



特集1

# 革新的半導体レーザーの 新たな挑戦

## 光を自在に操る「フォトニック結晶」で高出力化を実現

IT機器で活躍する半導体レーザーは、製造業で普及しているガスレーザーと比べてはるかに出力が小さく、加工目的で使うには無理がある。そんな常識を京都大学の野田進教授らが壊しつつある。半導体を材料に、その概念を根底から覆す小型で高出力の「フォトニック結晶レーザー」を開発し、従来品と桁違いの出力での実用化を目指している。社会的・経済的な価値創造を目指すJSTの新プログラム「ACCEL」では、レーザーの開発や製品化に精通した民間企業出身の八木重典プログラムマネージャー（PM）が加わり、10ワット級素子の実現を目指して新たな挑戦を開始、レーザー技術の世界に旋風を巻き起こそうとしている。

### 半導体レーザーの 出力を上げる

レーザー光は、ある特定の波長を持つ光だけを集め、波の山や谷（位相）や進行方向を揃えて増幅し、大きなパワーを出す。音波でいえば、マイクとスピーカーを近づけ過ぎたときに「ピー」という大きな音が出る。スピーカーの音をマイクが拾い、増幅されて再びスピーカーから出た音をマイクが拾う。この連鎖で起きるハウリング（音の回り込みによる共振）と同じ原理である。

光では、固体やガスの分子などに何らかの方法でエネルギーを与えておいて光を当てると、元の光と波長などが揃った光が出る「誘導放出」という現象がある。レーザー発振器では、合わせ鏡などの間に光を閉じ込めて、誘導放出をハウリングのように繰り返すことで特定の波長を増幅し、強力な光を生み出す。

レーザー発振器には、光源によってガスや固体、半導体などの種類がある。レーザー利用市場の大部分を占めるのが、大出力が必要な産業用加工機器の主役である炭酸ガスレーザーだ。キロワット単位の機器が普及し、大きいものでは金属の切断や溶接、小さいものでは電子機器の基板加工など広い分野で採用されている。熱くなる発光部はガスを流し続けることで冷やせるので、高出力化が可能だが、出力に応じた量のガスが光源



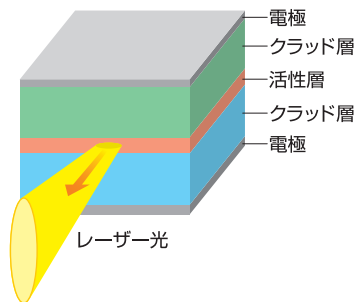
計測装置へのフォトニック結晶レーザーの取り付けを見守る野田さん（右）と八木さん（左奥）

として必要になるため装置が小型化できないのが欠点だった。

半導体レーザーは、つめの先ほどの素子に電流を流すだけで発振し、非常に小型で安価な装置をつくることができる。

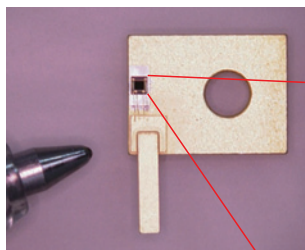
制御も容易で扱いやすく、エネルギー利用効率も高い。材料の工夫でさまざまな波長（色）が出せる点も応用の幅を広げている。DVDやブルーレイなどの光学ディスクの読み書きや光通信の光源など、

従来の半導体レーザー



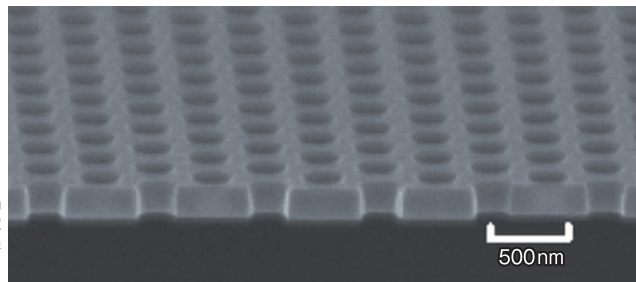
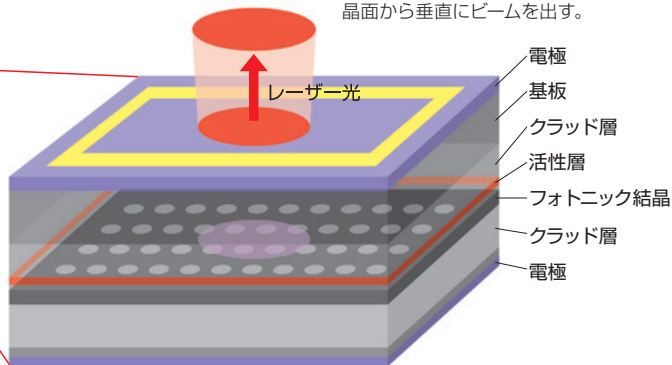
従来型の半導体レーザーでは、光を発光面の端で反射させて増幅する。反射層の工夫で面発光型の素子も実現されているが、いずれも出射したビームが広がる傾向にある。

フォトニック結晶レーザー



共同研究先の企業から近く出荷予定のフォトニック結晶レーザー素子の試作品。扱いやすいように板状の電極が取り付けられている。ボールペンの先と比較すると、素子(黒い四角形)の小ささがわかる。

光を出す活性層にフォトニック結晶の層を重ねることで強い光をつくり、結晶面から垂直にビームを出す。



2次元フォトニック結晶の一例の電子顕微鏡写真。ナノスケールの精巧な孔が並ぶ。

繊細な制御が求められる情報通信分野で活用されている。ただし、発光面を大きくして出力を上げようとする、発振する波長が複数になったり、ビームのパターンが乱れたりすることなどが課題となっている。発振したビームが広がってしまうため集光レンズが欠かせないなどの問題もある。

その半導体レーザーの課題を解決し、大幅な高出力化を目指しているのが、昨年12月にJSTの新プログラム「ACCEL」で始動した野田さんと八木さんのコンビだ。

光を閉じ込める“結晶”

野田さんは、光を自由自在に操ることができる微細構造を持つ半導体材料「フォトニック結晶」を考案し、その物理的基礎から応用までを研究してきた。まだ「ナノテク」という言葉さえなかった1990年代に半導体の微細加工装置と格闘しな

がら製作を試み、1999年に実現させた。

フォトニック結晶とは、いったいどのような“結晶”なのだろう。実は、原子や分子が1ナノメートルより短い程度の周期で整然と並ぶ化学的な結晶とはスケールも概念も異なる。レーザーに使われる2次元のものは、半導体の板に光の波長とほぼ同じ幅で、数百ナノメートルごとに孔を規則正しくびっしりとあけた構造を持つ(上写真)。この特殊な構造が、あたかも細かな“鏡”がたくさん並べてあるかのように光を反射して、“結晶”の面内に光を閉じ込め、高密度なビームを生み出す(p.5上図)。フォトニック結晶の詳しい仕組みは『JSTnews』2006年1月号参照。

野田さんはこれを利用し、半導体レーザーでありながら大出力の「フォトニック結晶レーザー」の開発に取り組んできた。

「出力を上げるためにどんどん発光面を大きくしていても、位相も波長も完全に揃ったレーザーをつくれる唯一の技術だと考えています」と太鼓判を押す。

八木 重典 やぎ・しげのり

JST戦略研究推進部  
ACCELプログラムマネージャー

1972年、東京大学工学部卒業、72年に東京大学大学院工学研究科修士課程を修了し、三菱電機中央研究所に勤務。炭酸ガスレーザーの研究開発やレーザー加工機事業を主導し、同社役員技監、技術顧問などを歴任。79年、博士号取得。77～83年度の国家プロジェクト「超高性能レーザー応用複合生産システム」では中心的役割を果たし、日本の高出力レーザーの基盤をつくった。2009年よりレーザー学会副会長。13年より現職。

プログラムマネージャー (PM) の役割とは

- 創造的で相互啓発を可能にする研究開発環境を整備すること
- ① 目標管理や計画修正、研究開発体制変更の提案
  - ② 市場適合性を考えた研究展開の検討や既存技術についての助言
  - ③ 知的財産権などについての協議や取りまとめ
  - ④ 研究開発に関する対外発信

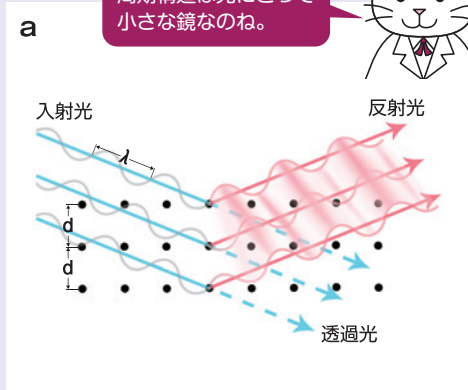




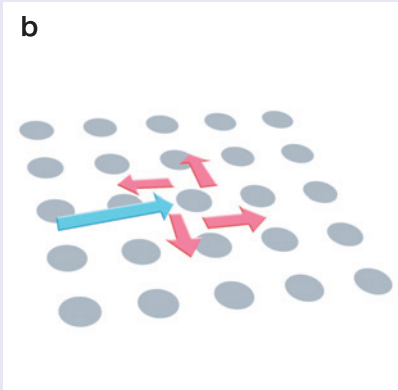


## フォトニック結晶レーザーの仕組み

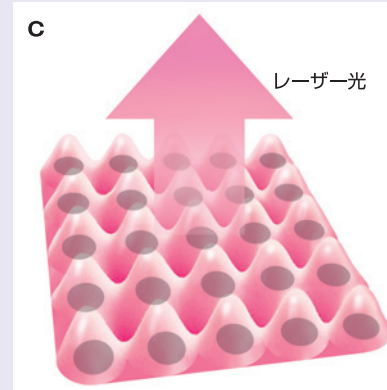
周期構造は光にとって  
小さな鏡なのね。



光はその波長(λ)に対して特定の条件を満たす幅(d)の周期構造(黒点3列)に差し込むと、反射光の位相が揃い強い光を返す。



野田さんのフォトニック結晶では、光の波長と同程度の幅で無数の孔をあけることで、位相の揃った光を前後左右、さらには上にも反射する。



反射された多量の光が足し合わされることで、強い光が生まれてレーザー発振し、面に垂直に放射される。

半導体で光を出す活性層にフォトニック結晶の層を重ねているのがミソだ(p.4右上図)。活性層に電気を流すと光が生まれ、“結晶”で増幅される。光の強さが一定以上になると、面に対して垂直にまっすぐなビームが出る。光の波長と同じ長さで並んだ小さな鏡が共同して働くため、発光面を広くして光を強めても、波長や位相、進行方向が揃った収束性の高いビームを発振できる。他の半導体レーザーで出力を上げるときの悩みのタネだった波長の乱れとビームの収束性が一気に解決できる。半導体レーザーの弱点を補い、装置の小型化と大出力化の両立を目指す夢の技術だ。

### 実用化に向けたステップ

しかし、理屈はわかって、実際に性能を上げるにはアイデアと努力が必要となる。

新しい構造を考えて試作すると、データを採るまでに最低でも1カ月はかかる。データがとれたら、さらに再設計する。孔の形や並べ方を少し変えるだけで、面内の光の分布や出るビームの形などの性能が大きく変わる(p.6下図)。特に孔の形の対称性を下げることで点状のビームをつくれた(同図f)ことは、大きなブレークスルーであった。数えきれない試行錯誤の中から、より効果的に光を反射する構造を実現し、発光面の面積を拡大しても波長や位相が揃ったレーザーをつくり

出すことに成功した(p.6左上図)。

「確かに大変な作業ですが、設計した構造で良い結果が出たときには感動します」と目を輝かせる。

「最初のころは、電磁気学の基礎方程式を大型コンピュータで何日もかけて解き続けていました」。10年ほど前から、少しずつ計算手法を進歩させた。実際に起こるさまざまな現象や影響を読み解くことができる独自の解析モデルを確立

し、新しい構造を入力すれば、すぐにレーザーのビームの形状や強さ、必要な電圧などが予測できるようになった。

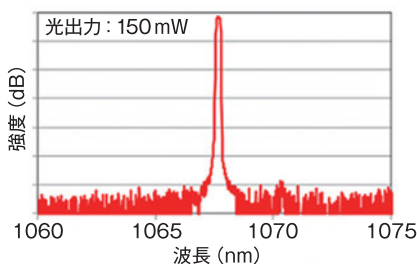
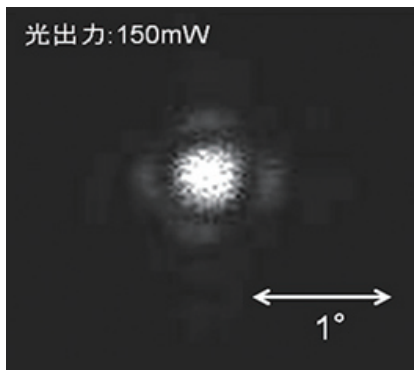
現在では、試作した理想的な素子1つで従来よりはるかに強い約0.5ワットの出力が得られるまでになった。いよいよ今春からは、本格的な実用化に向けて、0.2ワット級のサンプルの出荷も始まる(p.4上中央写真)。「関心を持つ方は多く、

### 野田 進 のだ・すすむ

京都大学工学研究科 電子工学専攻  
光量子電子工学分野 教授

1982年、京都大学工学部電気工学科卒業。84年に京都大学大学院工学研究科修士課程修了、同年より三菱電機中央研究所研究員として勤務。88年に京都大学工学部電気工学科助手。91年に博士号取得。92年より同助教授。2000年より現職。11年より工学研究科附属光・電子理工学教育研究センター長を兼務。2000年に第14回日本IBM科学賞、09年に文部科学大臣表彰科学技術賞および第6回江崎玲於奈賞など受賞歴多数。2000年よりCREST研究代表者(2000~05年、05~10年、11~16年)、13年よりACCEL研究代表者。





フォトニック結晶レーザーのビームを投影した様子(上)。広がりが1度以下の非常に狭い領域に単一波長(下)の光を発生させる。

問い合わせも数多くあります。ガスレーザー並みの出力を得るにはまだまだ研究開発が必要ですが、現段階でも用途はたくさん見つかるはずですよ」と言う。

フォトニック結晶レーザーは、ビームが強力で広がらないのが特長だ。ガスレーザーと比べればまだ1,000分の1に満たない出力だが、1ミリ角程度の結晶で10

ワット以上出せると予測している。発熱などの問題も残されているが、いかに小さく強力な素子かがわかる。

### プログラマナーが果たす役割

昨年12月に始まったACCELの大きな特徴は、民間企業などでの経験を通じて研究開発マネジメントに長けたPMが、直接、研究開発に参画する点だ。今回のプログラムのPMに就任した八木重典さんは、総合電機メーカーでの炭酸ガスレーザーの研究開発やレーザー加工機事業の中心人物で、レーザー学会副会長も務めた。

「八木さんとは以前にもレーザー技術について議論する機会があり、非常に的確なご意見をいただいています。ACCELで名前が挙がった時にも、この人ならばと思いました」と野田さんも好印象を持つ。

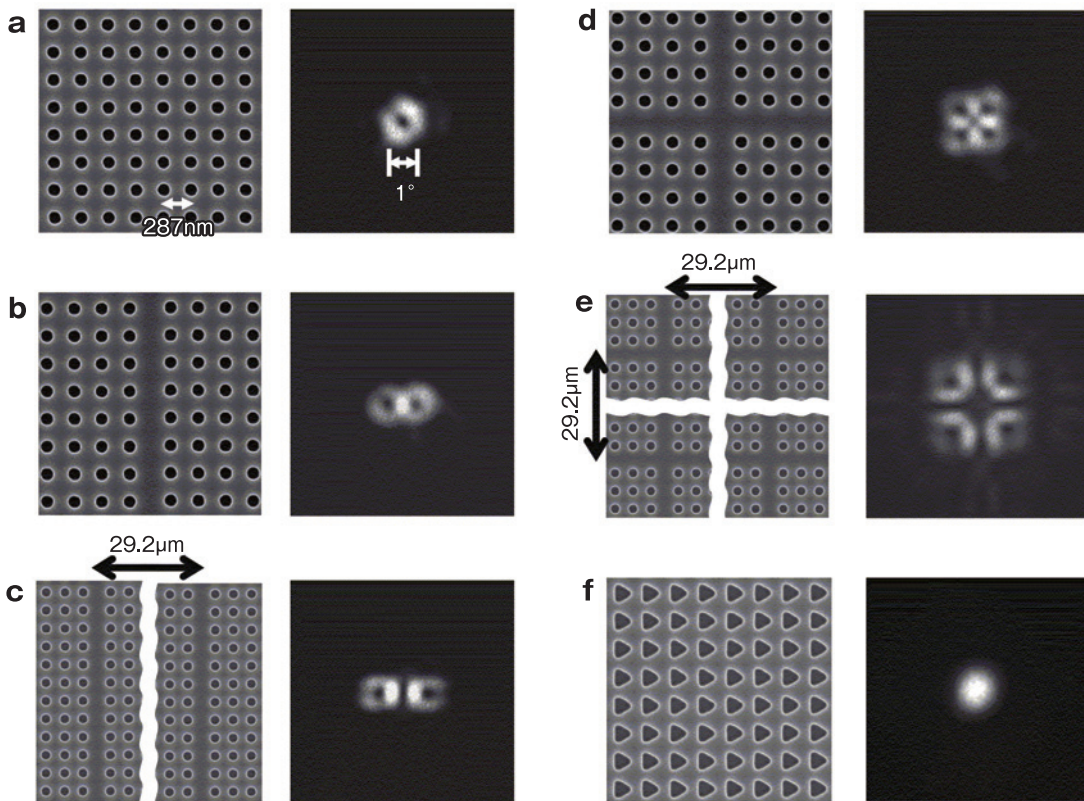
1970年代、炭酸ガスレーザーの発展により、電動金ノコで1日がかりの作業だった鋼板の切断作業が大幅に効率化され、ブームが巻き起こった。この花形の技術も、実際に産業機器として確立するまでには、いくつもの課題を乗り越えねばならなかった。八木さんはその折に独創的な手法を提案し、成功へと導いた経

験を持つ。開発した技術は、今も大きなシェアを占める。

「本当に使える形にしてこそ意義があります。さまざまな困難を解決するところに研究開発の醍醐味を感じます」と自信をのぞかせる。フォトニック結晶レーザーも、理想的な条件で使う実験室のレベルから、さまざまな条件をモデル化できるようになり、ようやく八木さんの出番がやってきたと言える。

「野田さんの名前はかなり以前から、雑誌『Nature』の論文などでたびたび見かけていました。フォトニック結晶レーザーは日本の独創的な技術なので、ぜひお手伝いをしたいと思っています」と語る。

炭酸ガスレーザーと半導体レーザーは仕組みがまったく異なり、別々の学会が存在するくらい学問的には隔たった技術だが、装置の小型化や大出力化など、目指す機能・性能は共通している。「八木さんは経験に根ざした実用化指向のビジョンを明確に持っています。大学の研究は理想を求めるあまり、実用化の出口がなかなか見つけれられないことが多いので、産業分野で製品化を経験した方の助言が非常に有益なのです」と野田さんは期待を寄せる。



フォトニック結晶の孔の形や間隔を変えると、さまざまな形状のビームが出る。丸い孔がつくるドーナツ型の光(a)は、浮遊する微粒子を中にとらえる性質があり、光ピンセットへの応用も期待される。孔を三角形にすると丸い点状の理想に近いビームになった(f)。また、表紙背景にeの実際の構造のイメージを示した。





## 真のディスカッションができる場をつくる

フォトニック結晶レーザーの大出力化が進めば、加工機器分野でも将来の日本の主要技術になる。ACCELでは、1素子あたり10ワットの出力を目指している。「これは産業界で生きてきた私の直感です。それだけ出るようになれば、一気に応用範囲が広がります」。フォトニック結晶レーザーで加工できれば、ずっとコンパクトな装置が組める。発振器そのものを動かして直接ビームを利用できるので複雑な光学系（鏡やレンズ）も不要で、もし必要があればファイバーを経由してもいい。0.5ワットでも、集光レンズなしで火傷をする温度が出せる。「出力がもう少しだけ上がれば、電子機器部品の加工や医療用などに発展する可能性があります」と見ている。

柔軟性も忘れない。「研究開発計画を少し変更し、別の出口に向けて予算と労力をかけることで技術が磨かれることもあります。例えば、出力を確保するためにビームの品質を少し落としてもいい。10ワットの最終目標を達成するために、問題のない範囲で研究計画の修正を提案するのも、私の重要な仕事です」と言う。

野田研究室の伝統的な強みは、フォトニック結晶を研究者が自身で製作している点だ。「これが世界中の研究者たちが、なかなか追いつけない重要な理由です」と八木さんも高く評価する。独走に近い研究開発を行ってきたが、これからはいろいろな企業やベンチャーに参加してもらい、それぞれが持つ能力やアイデアを出し合っ、高め合う段階にきている。

現在ACCELには、民間企業3社が共同研究に加わっている。得意技術を生かし、発振器の製造や応用、発振器を束ねて高出力なビームにまとめる研究を分担している。「野田研究室では、まさに“梁山泊”のように、すばらしい研究者たちが集まって高度な議論を重ねてきました。そこ3つの企業が、『1+3=4』の足し算で終わるのでは面白くない。少なくとも倍々にしていきたい」と言う八木さんは、参加企業の事業を拡大する成果を出しつつ、学問的な進展にも貢献したいと考えてい

る。「企業の研究者には、課題を持ち帰って検討できるベースキャンプがあります。彼らの『チームとしての本気』を引き出したい。そのために、有意義な議論ができる関係や雰囲気づくりを最も大切にしたい」と話す。「もし秘密主義に陥れば、『足し算』の成果すら出せないでしょう。もつれがちな知的財産の扱いを整理するのも私の役割です」という八木さんにに対し、「今まで何でも自分でやってきたので、PMが付くことでこの研究がどう変わるのか楽しみにしています」と野田さんも顔をほころばせる。

## レーザー利用の刷新を目指せ!

「1つの技術が成功するには、まったく新しい分野を開拓するか、既存の技術に取って代わるか、2つの道があります」と八木さん。医学・生物学など、レーザー技術の使い道がまだまだ開拓途上の分野では、新規性が最大の強みだ。高品質なビームなど、今までにない性能や機能は、その技術にしかできない用途を開拓することで大きく飛躍する。これまで野田さんが提案してきた応用は幅広い（『JST news』2008年1月号参照）。しかし、「技術の本当の力は、既存の汎用

技術を置き換えてこそ証明されます。フォトニック結晶レーザーは、その可能性を十分秘めています」と力説する。

性能とコスト、信頼性など、すべてが既存の技術を上回って初めて、なじんだ技術からの乗り換えを企業に決断させることができる。

今後は、10年かけてつくり上げた計算モデルを拡張させながら、発光面積の拡大を図る。その過程では、ビームに異なる波長が混在する心配もある。小さい面積に大きなエネルギーを注ぐので、効率的な放熱も課題となる。他分野で使われている知恵と工夫を探し出すのもPMの仕事の一環だ。

ACCELでの最終目標は、5年間で開発した素子をつないで出力100ワットを達成することだが、「いずれは1素子で100ワット、1キロワットを実現して、レーザー分野にイノベーションを起こしたい」と、野田さんの夢は大きく広がる。「初期の計算機は大きな部屋に所狭しと真空管を並べたものでしたが、現在のパソコンの方がはるかに高性能です。心臓部の真空管がLSI（集積回路）に置き換わっていったように、フォトニック結晶レーザーがあらゆるレーザーに取って代わる時代がやって来ることでしょう」。

