

高輝度・高機能フォトニック結晶レーザー(PCSEL)の進展

－超スマート社会（Society 5.0）の実現に向けて－

概要

京都大学大学院工学研究科の野田進 教授、吉田昌宏 同助教、附属光・電子理工学教育研究センターのメーナカ デゾイサ 教授、石崎賢司 同特定准教授、井上卓也 同助教、坂田諒一 同特定助教らのグループは、従来の半導体レーザーにはない高輝度・高機能性を有し、来るべき超スマート社会実現（Society 5.0）への貢献が期待されているフォトニック結晶レーザー(PCSEL)の最近における様々な進展（未発表の極最近の成果も含む）に関する総説論文を発表しました。

超スマート社会（Society 5.0）におけるスマートモビリティ（＝ロボットや車の自動運転等）やスマート製造（＝デジタル化による自動的かつ効率的なものづくり）の実現に向けて、現在、既存の半導体レーザーの低輝度性^{注1}や低機能性、また、CO₂レーザー、ファイバーレーザー等の大型レーザーのサイズや低効率性、高コスト性がボトルネックとなっています。研究グループは、これらのボトルネックを解消し、スマートモビリティやスマート製造分野におけるゲームチェンジを起こすべく、大型レーザーに匹敵する高輝度性を有し、かつ、外部光学系等を用いることなくビーム走査や様々なビームの生成が可能という高機能性を有する次世代半導体レーザー「フォトニック結晶レーザー(PCSEL)」の研究開発を進めてきました。本総説論文では、フォトニック結晶レーザーの高輝度性、高機能性の最近の大幅な向上に加え、短パルス・高ピーク出力化、短波長化、さらには機械学習との融合によるスマート化などの最新動向を解説しています。さらに、その中で、未発表の成果として、大面積(3mmΦ)フォトニック結晶レーザーのキロワット級の高ピーク出力パルス動作と、それによる金属表面へのレーザーカラーマーキングや、GaN 系青色フォトニック結晶レーザーを用いた水中における距離センサー（LiDAR センサー^{注2}）への応用に関する成果についても紹介しています。これらの成果は、フォトニック結晶レーザーの研究開発の一層の加速と、応用分野のさらなる拡大を促すものと期待されます。

本成果は、2024年12月号の英国科学誌 Nature Reviews Electrical Engineering に掲載され、その表紙を飾りました。

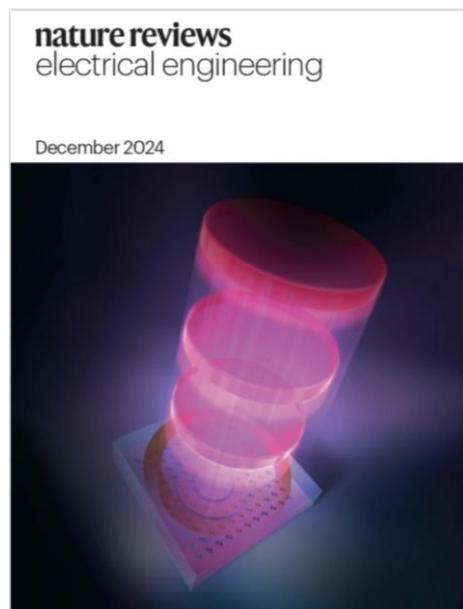


図. 本総説論文が掲載された Nature Reviews Electrical Engineering 誌 2024 年 12 月号の表紙。フォトニック結晶レーザーがその表紙を飾りました。

背景と総説論文の概要

レーザー技術は、デジタルツインや機械学習 (AI) などのデジタル技術とともに、将来の超スマート社会 (Society 5.0) におけるスマートモビリティやスマート製造を実現する上で、核となる技術といえます。小型、低コスト、高効率といった多くの利点をもつ半導体レーザーは、これらの応用において最も有望な光源です。しかしながら、既存の半導体レーザーは、高出力化するためにデバイス面積を拡大すると、ビーム品質が著しく劣化するため、輝度^{注1)}が大型レーザーの 1/10 以下 ($100 \text{ MW cm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ 以下) に留まるといった問題があります。そのため、レーザー加工応用では、ガスレーザーや固体レーザー (ファイバーレーザーを含む) 等の、大型・複雑で効率が悪い光源を用いざるを得ません。また、機能性も限られ、電子的ビーム走査や任意の形状をもつビーム生成が困難です。そのため、自動運転において目の役割を果たす距離センサー (LiDAR センサー^{注2)}) 等への応用には、ビーム整形のための複雑なレンズ系が必須であり、ビーム走査のための、外部ミラーやモーター等が不可欠となり、システムが大きく複雑になります。これらの点が応用上ボトルネックとなっており、これらを解決可能な小型・高効率・高輝度・高機能レーザー技術が強く求められています。

研究グループは、上記のボトルネックの解消が可能な新たな半導体レーザーとしてフォトニック結晶レーザー (PCSEL)^{注3)}を提案し、その研究開発を進めてきました。本レーザーの高輝度性および高機能性は、近年著しく発展し、様々な新たな展開も生まれています (図 1)。それに伴い、スマートモビリティやスマート製造のみならず、モバイル、通信、宇宙応用など、その応用範囲も一層の広がりを見せるようになり、世界的にも益々関心が高まっています。このような背景のもと、Nature Reviews Electrical Engineering 誌の主編集者からの依頼のもと、今回、フォトニック結晶レーザーの最近の進展に焦点を当てた総説論文を発表するに至りました。

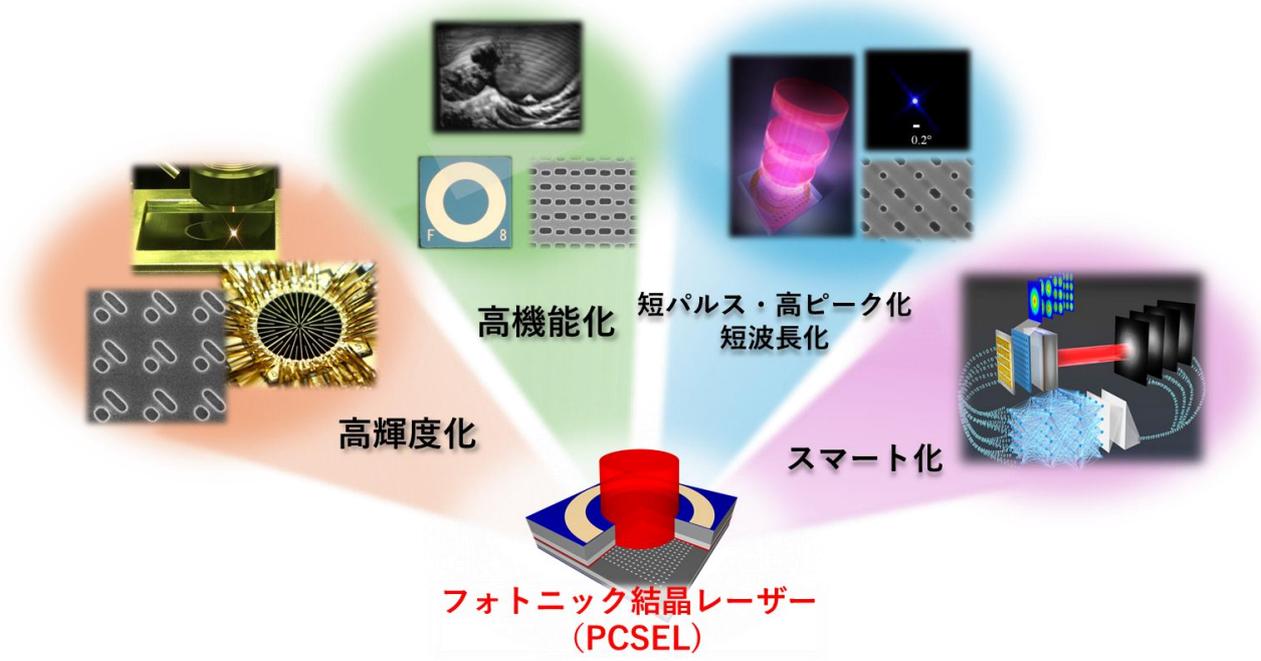


図 1. フォトニック結晶レーザー(PCSEL)の研究開発の進展。

本総説論文では、最初に、2つの正方格子フォトニック結晶を4分の1波長程度ずらして重ねた「二重格子フォトニック結晶」と呼ばれる新たなフォトニック結晶構造（次項の図2(a)参照）により大型レーザーに匹敵する高輝度性（ $\geq 1\text{GWcm}^{-1}\text{sr}^{-2}$ ）が実現可能なことを示しています。その中で、まず、直径500 μm のPCSELにて^{注4)}、パルス動作で $1.5\text{GWcm}^{-1}\text{sr}^{-2}$ の輝度を実現し、クラス最小のロボット用の距離センサー（LiDARセンサー^{注5)}）が、実現出来たことを示しています。また、ナノインプリント^{注6)}と呼ばれる手法で、フォトニック結晶が製造可能であり、低コストで量産可能なことを示しています。さらに、高温長時間動作試験や、低温から高温までの温度サイクルに対する耐性試験により十分な信頼性を有することをも示しています。続いて、PCSELを直径3mmという半導体レーザーとしては超大面積といえるサイズへと拡大し、二重格子格子構造に更なる工夫（次項に詳述）を行うことで^{注7,8)}、連続(CW)駆動においても、 $1\text{GWcm}^{-1}\text{sr}^{-2}$ を達成し、金属板の切断加工が可能になったことを示しています。

次に、高機能性に関しては、フォトニック結晶空孔の位置や大きさに変調を加えた「変調フォトニック結晶」と呼ばれる新たなフォトニック結晶構造を用いることで、外部の光学系や駆動機構無しで、電子的2次元ビーム走査^{注9)}や、多点ビームや任意の視野の均一ビーム生成、さらには絵画（富嶽三十六景等）のような自在なビームパターン生成の実現等について紹介しています。さらに、可飽和吸収効果やフォトニック結晶への意図的な共振周波数分布の導入により、短パルス（ $\leq 30\text{ps}$ ）かつ高ピーク出力（200W級）動作が実現^{注10,11)}出来ることや、窒化ガリウム（GaN）系材料を用いることで、青色波長域のワット級出力のPCSELの実現^{注12)}、さらには、機械学習との融合によるオンデマンドな発振モード制御といったスマート化に関する成果についても紹介しています。

以上に加え、未発表の最新のトピックとして、①大面積3mm PCSELのキロワット級パルス動作と、そのレーザーカラーマーキングへの応用、②GaN系青色PCSELの水中LiDARへの応用、という2点についても総説論文中にて紹介しています。これらの最新成果については、以下で詳しく説明します。

1. 最新トピック①：PCSELのキロワット級パルス動作とレーザーカラーマーキングの実現

まず、その基礎となる、二重格子フォトニック結晶(図2(a))構造とその役割について説明します。フォトニック結晶共振器の中に形成される共振姿態（モード）には、図2(b)に示すように、中央に腹をもつ基本モードと、端部に腹をもつ高次モードが存在します。高輝度動作のためには、基本モードのみで動作することが重要です。基本モードと高次モードの光出射方向は、同図に示すように、僅かに異なります。この出射方向の違いに着目し、斜めに射出する高次モードの損失を基本モードよりも十分に大きくし高次モードが発振しないように、二重格子構造を設計します^{注7)}。専門的にはなりますが、図2(a)に示す二重格子構造における格子間距離や空孔サイズのバランスの調整、さらには放射波（レーザー出力光）を介した光回折効果をも制御することで、図2(c)に示すように、垂直方向（ $\sim 0^\circ$ ）に射出する基本モードの損失は小さく保ったまま、斜め方向（ $> 0^\circ$ ）に射出する高次モードの損失のみを増大し、高次モードが発振しないような設計を行いました。その結果、すでに述べたように、レーザー加工応用に求められる連続(CW)駆動において、大型レーザーに匹敵する輝度（ $1\text{GWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ ）を達成することに成功しました^{注8)}。

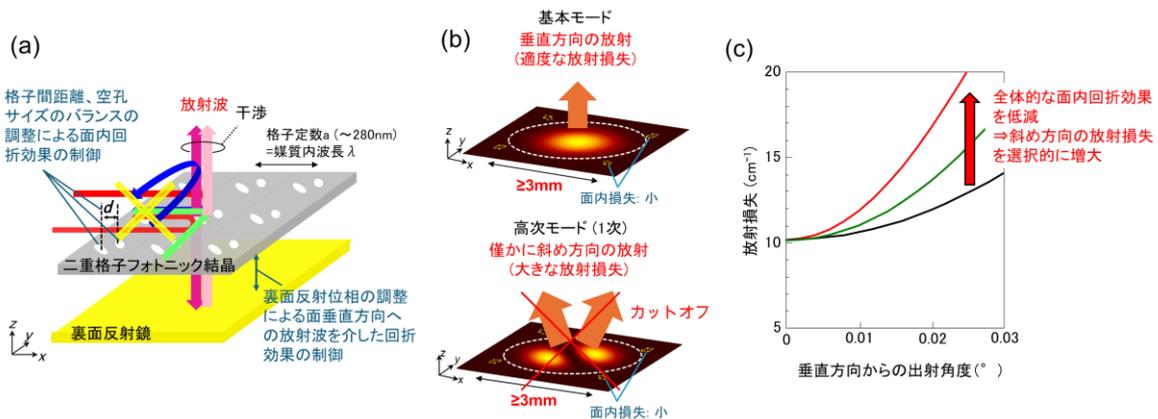


図 2. 大面積($\geq 3\text{mm}\Phi$)フォトニック結晶レーザーのために二重格子フォトニック結晶の設計。(a) 二重格子フォトニック結晶における光回折効果の概念図。面内の 180° 方向(赤矢印)と 90° 方向(緑矢印)の回折効果、さらに放射波を介した 180° 方向の回折効果(青矢印)を制御します。(b) 基本モード(上図)と高次モード(下図)の出射ビームの概念図。(c) 放射損失の出射角度依存性の計算結果。

このような大面積フォトニック結晶レーザーでは、熱の影響を受けない短い時間幅のパルス電流注入により駆動することによって、さらに高い光出力を実現可能であると期待できます。今回、実際に直径 3mm のフォトニック結晶レーザーを大電流パルス駆動ドライバへと実装し(図 3(a))、高ピーク出力動作の実現に取り組みました。その結果、図 3(b)に示すように、 1 kW という高ピーク出力を単一の半導体レーザーから得ることに成功しました。また、同右図には、本レーザーの遠方でのビームパターン(遠視野像)を示しますが、光出力 1 kW という高ピーク出力動作時においても、 0.2° という狭い拡がり角のビームが維持されていることがわかり、その結果として、輝度 $1\text{ GWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ が 1 kW パルス出力時にも得られることが確認できました。すなわち、 1 kW 出力かつ輝度 $1\text{ GWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ という高ピーク出力・高輝度動作の実現に初めて成功しました。

このような高ピーク出力・高輝度パルス動作によって、金属の表面を一瞬で変質(局所酸化)させることが可能になります。これを利用した興味深い応用として、レーザーカラーマーキングが挙げられます。金属(例えば、ステンレス)の表面にパルスレーザーを照射することで、金属表面に薄い酸化膜を形成することで、光干渉効果により、文字や絵を描くことができます。その際、レーザーの出力や照射時間等の調整により酸化膜の厚さを制御することで、これらの文字や絵を、酸化膜厚さに応じた、様々な色に発色させることが可能になります。そこで、実際に上記の 1 kW フォトニック結晶レーザーを用いて、このような金属(ステンレス)表面へのレーザーカラーマーキングの実証を試みました。その結果を図 3(c)に示します。同図に示すように、ステンレス表面を灰色から黄色といった様々な色に着色することが出来ており、半導体レーザー単一チップによる金属のレーザーカラーマーキングの実証に成功しました。レーザーカラーマーキングは、インクなどを使用せずに行うことが可能なため、描いた文字や絵が消えにくく、また廃棄物や廃水処理も発生しないため、環境に負荷の少ない着色技術であることなどから、製品への印字、刻印の技術としても注目されています。本成果を活用することで、今後、超小型で製造現場に設置しやすく、低コストなマーキング装置の実現が期待されます。また、超小型・低コストが可能となれば、例えば、カップやスプーンなどに家庭で気軽に名前や絵などを描けるようになることも期待できます。

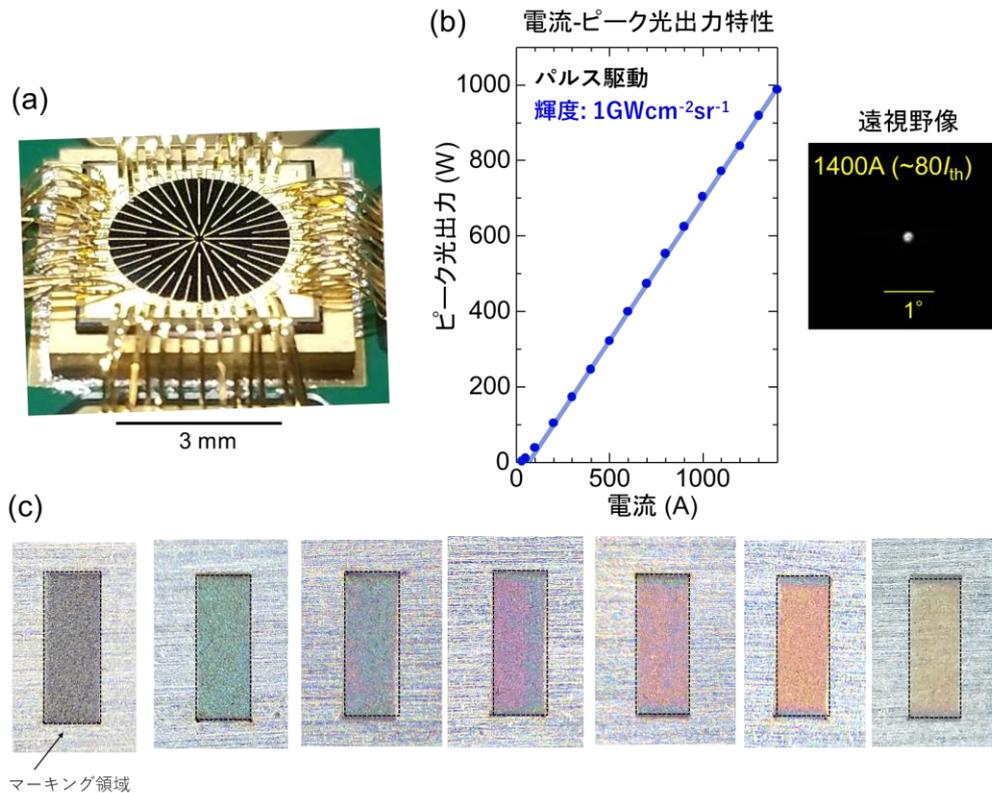


図 3. フォトニック結晶レーザーの kW 級パルス動作とレーザーカラーマーキング応用。(a) 大電流パルス駆動ドライバへと実装した直径 3mm フォトニック結晶レーザー。(b) パルス駆動における電流-ピーク光出力特性と 1kW 出力時の遠視野像（パルス幅 50ns、繰り返し周波数 100Hz）。(c) 高ピーク出力・高輝度 PCSEL を用いた金属（ステンレス）表面のカラーマーキングの実証。

2. 最新トピック②：水中 LiDAR センシングの実証

次に、GaN 系の青色波長域の PCSEL を用いた水中 LiDAR センサーについて紹介します。通常、LiDAR センサーは、レーザー光の波長として、近赤外波長域（波長 900nm 帯や 1550nm 帯等）を用います。しかしながら、図 4(a)の赤線に示すように、近赤外波長域の光は、水による吸収が大きいため、水中ではすぐに減衰し、レーザー光が遠くまで届きません。そのため、既存の LiDAR センサーは、水中では使えないという課題があります。また、大雨の中では、LiDAR センサーが同様の理由で動作しないという課題があります。このような近赤外波長域に比べて、青色波長域は、水の中での減衰が 1/10,000 以下と小さいという特長をもちます（図 4(a)の青線）。したがって、LiDAR センサーに青色波長域の GaN 系青色 PCSEL を用いることで、小型・低コストかつ、水中でも使用可能な LiDAR が実現できると考えられます。その結果、大雨の中での自動運転や、水中でのインフラ点検（橋脚など）や養殖場の監視等への応用が期待されます。

以上の背景を踏まえ、今回、図 4(b)に示すような、GaN 系青色 PCSEL ^{注12)}を用いた水中 LiDAR センシングの実証を行いました。同図には、PCSEL 内部に形成された二重格子フォトニック結晶構造の電子顕微写真が示されていますが、前項で述べた二重格子と異なり、より小さなデバイスサイズ(直径 300 μ m)

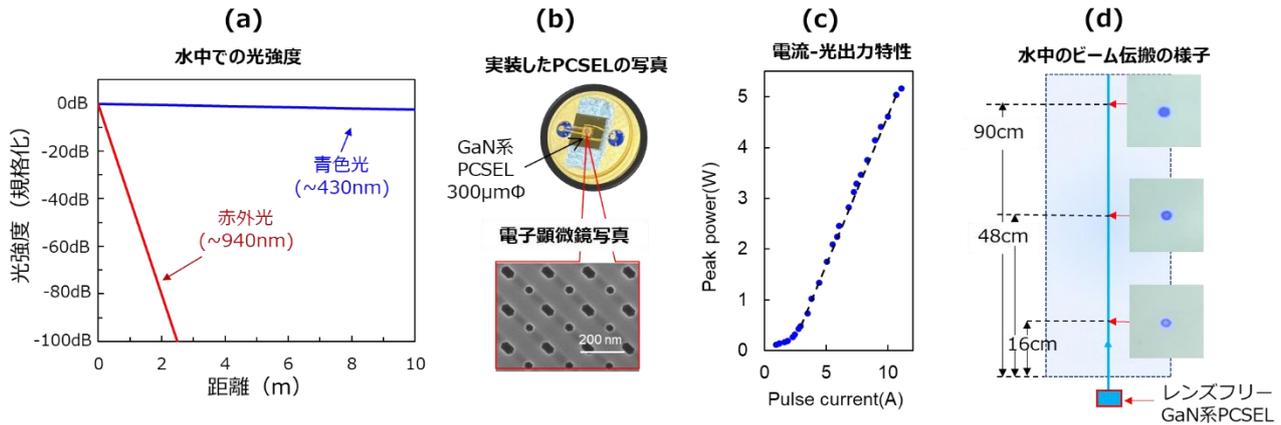


図4. 水中 LiDAR センサーのために用意した GaN 系 PCSEL。(a) 青色光と赤外光の水中で伝搬距離に対する光強度の計算。(b) 実装後の PCSEL の写真と内蔵しているフォトニック結晶ナノ構造の電子顕微鏡写真。(c) 数ナノ秒パルス駆動における電流-ピーク光出力特性。(d) レンズフリーでの GaN 系 PCSEL によるビームの水中での伝搬の様子。

で動作するように設計されています。本 PCSEL を数ナノ秒の電流パルスで動作させたときの電流光出力特性を図 4(c)に示します。同図より、ピーク出力 5 W が得られており、この出力において、水中で 20m 以上の測距が可能となると期待されます。図 4(c)には、GaN 系 PCSEL の出力ビームが、レンズフリーで水中を伝搬する様子を示しています（ここでは実験系の制約のため、伝搬距離は 1m 程度に限定されています）。同図より、水中での明確な伝搬が確認できます（ちなみに、近赤外光では、すぐに減衰し、伝搬不能なことを確認しています）。ここで、水中でのビーム拡がり角度は 0.1° 程度となり、図 4(d)の 90cm におけるビーム径は 2mm 以下となります。

上述の GaN 系 PCSEL を用いて、図 5(a)に示すような水中 LiDAR システムの構築を行いました。GaN 系 PCSEL からの狭発散角ビームをレンズフリーで投光し、水中に設けた魚の模型（2つ）の物体に対して、小型ミラーを機械的に駆動することで、2 次元的にビーム走査ができるようにしました。ここで、GaN 系 PCSEL の出射ビーム径が小さいことから、ビーム走査のためのミラーサイズは、2mm 以下という小型化が可能というメリットがあります。GaN 系 PCSEL から、ビームが物体に向けて照射され、そこからの反射・散乱光を光検出器で受光し、それに要する時間から距離を算出し、リアルタイムでの測距を可能にしています。図 5(b)には、水中に設けた 2つの魚の模型を示しています。それぞれ、LiDAR システムから 30cm、50cm 程度に離れた位置に設置されています（なお、距離は、実験に用いた水槽の寸法で制限されています）。本 LiDAR システムより、水中での測距を行った結果を図 5(c)に示します。また、同図右に示す QR コードから実際のリアルタイム測距の様子の動画もご覧いただけます。同図より、本システムより、水中の 2つの魚模型の距離は正しく、形も鮮明に計測することに成功しました。以上の結果より、GaN 系 PCSEL の活用により、水中の小型 LiDAR システムの構築が可能であることが示されました。この結果は、雨天（大雨）の中での車載用 LiDAR にも適用可能なことを示しています。

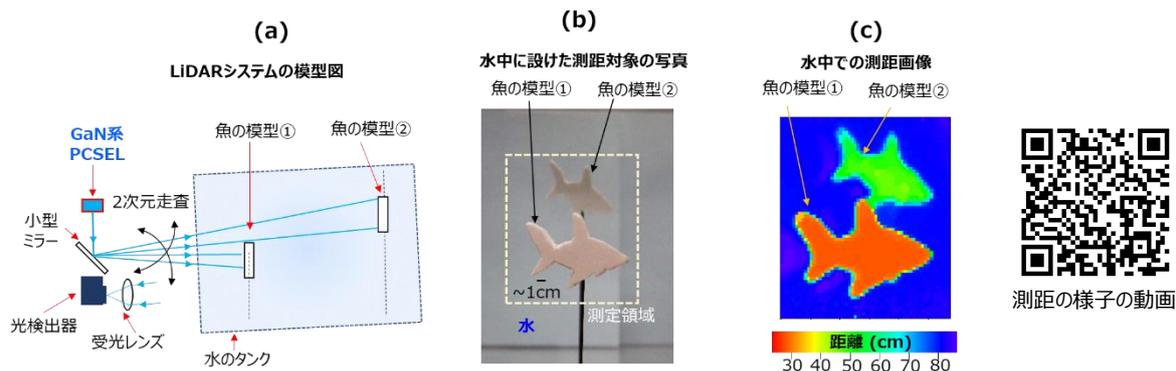


図 5. GaN 系 PCSEL を用いた水中 LiDAR システムおよび評価結果。(a) 水中 LiDAR システムの模式図。(b) 水中に設けた魚の模型の測距対象物の写真。(c) 水中での測距画像。QR コードから実際のリアルタイム測距の様子動画もご覧いただけます。

3. 今後の展望、波及効果

以上のように、将来の超スマート社会におけるスマートモビリティやスマート製造を実現する上でのボトルネック解消の鍵となる、フォトリック結晶レーザーについて、最近の進展の様子を紹介しました。フォトリック結晶レーザーは、近年、大型レーザーに匹敵する高輝度動作や、外部光学系等無しでのビーム走査・自在なビーム生成を実現するなど、輝度や機能性が著しく向上するとともに、短パルス・高ピーク出力化、短波長化の実現など、様々な新たな展開も生まれています。また、今後の量産化に向けて、ナノインプリントを用いた大量生産可能な方法によって PCSEL が製造可能であることや、PCSEL が十分な信頼性を有することも明らかとなってきています。さらに、最新のトピックとして今回詳しく説明したように、大面積 3mm PCSEL のキロワット級パルス動作とレーザーカラーマーキング応用や、GaN 系青色 PCSEL の水中 LiDAR への応用といった最新の成果も得られています。

今後の展望として、まず、高輝度 PCSEL においては、現在、直径 3mm の PCSEL の 10 倍の面積をもつ、直径 10mm の PCSEL の開発を進めています。これにより、単一デバイスからレーザー加工応用等において重要となる連続 (CW) 動作において、出力 1kW という、大型レーザーに匹敵する光出力が得られるものと期待されます。このように半導体レーザーのもつ小型・高効率・低コストという特長を兼ね備えつつ、高出力・高輝度連続動作可能な PCSEL が実現されることにより、既存の大型レーザーを PCSEL で一新することによるスマート製造分野におけるゲームチェンジが期待されます。さらに、将来的に、直径 30mm という超大面積での完全単一モード動作が実現出来ると、10kW 以上の連続出力かつ、輝度 $100 \sim 1000 \text{ GWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ が実現出来、大型レーザーをも凌駕する半導体レーザーの実現も期待されます。このような究極の PCSEL が実現出来ると、加工応用のみならず、宇宙応用 (宇宙セイルの推進用光源)、核融合のための光源、EUV 露光装置の励起光源など、新たな分野への活用が視野に入るものと期待されます。また、今回は詳しく述べませんでした、外部の光学系や駆動機構を用いることのない電子的 2 次元ビーム走査や多点射出を実現できる高機能 PCSEL の今後の展望として、短パルス・高ピーク出力化を図っていくことにより、自動車の自動運転に適用できるような長距離 (>100m) のオール電子式の全く新しい LiDAR の実現が期待され、スマートモビリティの実現に大きく寄与するものと考えられます。以上により、PCSEL の今後の研究開発が益々加速するとともに、上記のみならず、図 6 に示すような幅広い応用分野へ波及し、超スマート社会の実現に貢献することが期待されます。

フォトニック結晶レーザーにより拓がる超スマート社会(Society 5.0)

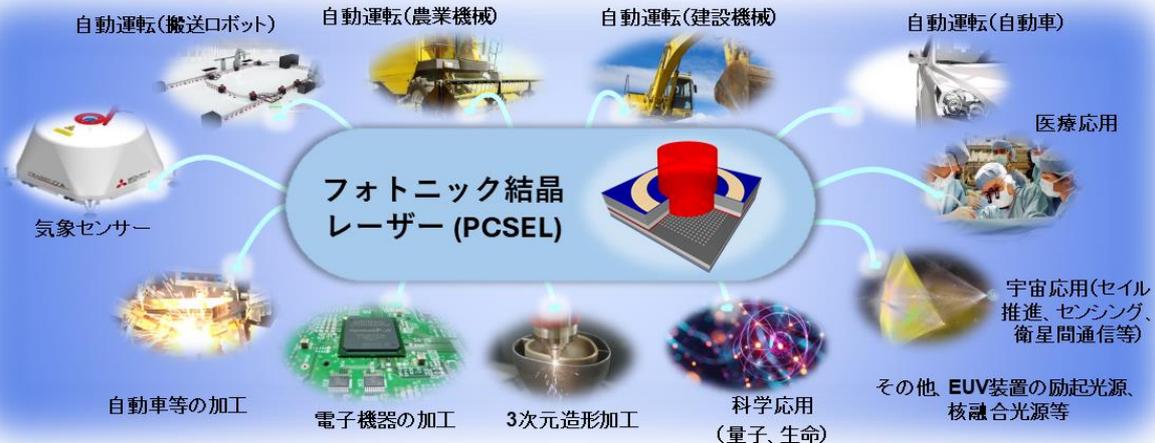


図 6. フォトニック結晶レーザーの様々な応用のイメージ図。

以上のような展開と、その成果の社会実装は、本年 12 月 2 日に設立された大学と企業との橋渡し法人（中間組織体）：一般社団法人『京都大学フォトニック結晶レーザー研究所』^{注 13)}との連携により、さらに加速されるものと期待されます。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、主に、以下のプロジェクトのもとに推進されました。

- ・内閣府 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 第2期 光・量子を活用した Society 5.0 実現化技術（管理人：量子科学技術研究開発機構）：研究課題「フォトニック結晶レーザーに係る研究開発」（2018年度から2022年度）
- ・内閣府 研究開発と Society 5.0 との橋渡しプログラム (BRIDGE)（管理人：量子科学技術研究開発機構）：研究課題「フォトニック結晶レーザー(PCSEL)によるスマート製造ゲームチェンジと PCSEL 拠点からの社会実装拡大」（2023年度から2024年度）
- ・日本学術振興会 科学研究費助成事業 特別推進研究「究極の光デバイス実現に向けた非エルミート・ナノフォトニクスの開拓」（2022年度から2026年度）
- ・内閣府 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 第3期 スマートモビリティプラットフォームの構築（管理人：新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)）：研究課題「小型 PCSEL-LiDAR 技術を活用した生活ゾーン・賑わいのある道路空間の実態を把握するインフラ・車載センサシステムの研究開発」（2023年度から2027年度）
- ・内閣府 経済安全保障重要技術育成プログラム (K Program)（管理人：新エネルギー・産業技術総合開発機構 NEDO）：研究題目「高効率・高品質レーザー加工技術の開発」（2024年度フェージビリティスタディ）
- ・京都大学フォトニック結晶レーザー拠点 (PCSEL COE) と様々な企業・機関との各種共同研究。

<用語解説>

注1) 輝度は単位面積、単位立体角あたりの光出力と定義され、レーザービームが如何に広がらないか、あるいは、如何に強く集光できるかを表す指標です。従来の半導体レーザーでは、小型・高効率・低コスト

ト・高制御性といった優れた特長をもつ一方で、高出力化するためにデバイス面積を拡大すると、電磁界分布に複数の腹を持つ高次モードの発生が避けられず、ビーム品質が著しく劣化するため、高輝度化は困難でした。そのため、他の大型、複雑で、高コストかつ効率も低いCO₂レーザーやファイバーレーザー等の輝度($\geq 1\text{GWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$)に比べて、1/10以下の輝度（最大でも100MWcm⁻²sr⁻¹程度）に留まっていた。

注2) LiDAR (Light Detection and Ranging) センサーは、レーザー光を物体等に対して照射して、物体から戻って来る光を検知して、距離の測定を行うものです。特に、レーザーパルスを物体に照射してその飛行時間を測定して距離に換算する方式は、Time of Flight (ToF)方式と呼ばれます。

注3) フォトニック結晶レーザーは、2次元フォトニック結晶(2次元的に波長程度の間隔で周期的屈折率分布を形成した光ナノ構造)を内蔵した面発光型の半導体レーザーです。大面積で安定した定在波状態が形成でき、高出力、高品質なビームが得られることで、高輝度動作が可能という特徴があります。また、フォトニック結晶の屈折率分布を様々な制御することで、2次元ビーム走査や、様々な形状のビームを射出可能という特徴を有します。

注4) プレス発表「新たなフォトニック結晶構造を用いて半導体レーザーの高輝度化に成功 - 来たるべき超スマート社会におけるスマート製造やスマートモビリティに貢献-」を参照。

<https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research-news/2018-12-20>

注5) プレス発表「フォトニック結晶レーザー搭載LiDARの大幅な小型化(体積1/3)に成功」を参照。

<https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research-news/2021-07-14-1>

注6) ナノインプリントは、微細加工技術のひとつであり、半導体基板上に塗布した樹脂膜に対して、パターンの刻まれたモールド(金型)を押し当てることによって、樹脂膜に対して、所望のパターンを転写するものです。パターンが転写された樹脂膜をマスクとし、さらに半導体基板を加工することによって、半導体基板上にパターンを形成することができます。ナノインプリントは、フォトニック結晶のような微細なパターンを、スタンプのようにして、大面積に一括で、かつ、高速に形成することができるため、大量生産に適した製造方法と言えます。

注7) プレス発表「100W~1kW級単一モードフォトニック結晶レーザーの設計指針の確立-超スマート社会を支える究極の半導体レーザー光源の実現に向けて-」を参照。

<https://www.t.kyoto-u.ac.jp/ja/research/topics/20220706>

注8) プレス発表「フォトニック結晶レーザーの高輝度単一モード連続動作の実現 - スマート製造を始めとする各種分野のゲームチェンジに向けて-」を参照。

<https://www.t.kyoto-u.ac.jp/ja/research/topics/20230615>

注9) プレス発表「電氣的に2次元ビーム走査可能な新たなフォトニック結晶レーザーチップの開発に成功」を参照。

<https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research-news/2020-07-22-0>

注10) プレス発表「短パルス・高ピーク出力動作可能な新しいフォトニック結晶レーザーの開発に成功 - 超微細加工、高精度光センシング、バイオイメージング等への応用に向けて-」を参照。

<https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research-news/2021-03-29-3>

注11) プレス発表「高速自己変化可能なフォトニック結晶による高ピーク出力・短パルス光の発生-超スマート社会を支える高精度光センシングやレーザー微細加工応用に向けて-」を参照。

<https://www.t.kyoto-u.ac.jp/ja/research/topics/20230127>

注1 2) プレス発表「高青色GaN系フォトニック結晶レーザーの高出力・高ビーム品質動作に成功一次世代の高品位レーザー加工、高輝度照明、水中LiDAR等の実現に向けて」を参照。

<https://www.t.kyoto-u.ac.jp/ja/research/topics/cecp3r>

注1 3) プレス発表「『一般社団法人 京都大学フォトニック結晶レーザー研究所』を設立しました」を参照。

<https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/news/2024-12-06-2>

<論文タイトルと著者>

タイトル：Photonic-crystal surface-emitting lasers (和訳：フォトニック結晶面発光レーザー)

著者：Susumu Noda*, Masahiro Yoshida, Takuya Inoue, Menaka De Zoysa, Kenji Ishizaki, Ryoichi Sakata (*: Corresponding author: S. Noda)

掲載誌：*Nature Reviews Electrical Engineering* DOI：10.1038/s44287-024-00113-x