

高度な材料加工のための青色レーザー、日本で開発

東條公資、升野振一郎、東野律子、塚本雅裕

高出力青色半導体レーザーによる次世代レーザー加工システムという目標に向けて進められている、プロジェクトを紹介する。

1960年から、最新光源技術は常にレーザー加工に採用されてきた。レーザー加工技術の進歩は、国家プロジェクトと密接に関連している。日本では、1977年からレーザー加工技術の開発が行われており、CO₂レーザー加工では世界最高の地位を達成するに至った。しかし2001年以降、著しい進展は見られず、その結果、現在の世界レーザー技術において、日本は、ドイツや米国に後れをとる状態にある。

ドイツでは、国家戦略に基づく政府投資が今でも盛んである。このような状況の下、日本でも複数の研究開発プロジェクトが活気を取り戻しつつある。その1つが、「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発2016～2020年度」というプロジェクトである。このプロジェクトの1つとして、短波長・短パルスレーザーとともに、青色半導体レーザーによる加工技術の開発が採択されている。最終的な目標は、キロワットクラスの青色半導体レーザーによる次世代加工システムを開発することにある⁽¹⁾。

半導体レーザーは、卓越した光強度を備え、波形が遠隔制御可能である他、将来的に製造分野で一般的に利用されるであろう、モノのインターネット(IoT: Internet of Things)や人工知能(AI: Artificial Intelligence)を活用した、オートメーションや無人工作機械に適しているというメリットを備える。これに加えて、卓越した出力を持つ青

色レーザー加工システムの処理性能を迅速に実現することができれば、現状に変化をもたらされ、日本は再び、今よりも高い地位に返り咲く可能性がある。ドイツでは2016年から、「EffiLAS」という国家プロジェクトの下で、直接加工用のキロワットクラスの青色半導体レーザーの開発が、国策として進められている⁽²⁾。したがって、日本の地位は予測不能であり、過去のように保証されたものではないと言えるかもしれない。

光源の分野でも、パラダイムシフトが否応なく生じている。近年の環境意識の高まりと、2014年のノーベル物理学賞から、特に照明分野で、窒化ガリウム(GaN)発光素子が多大な関心を集めている。とどまることなく高まる青色半導体素子の輝度と出力に支えられて、青色半導体レーザーは、主にプロジェクター光源向けに量産段階に達している。また、高出力青色レーザーは、現行光源と比べて多数のメリットがあり、産業界におけるレーザー加工の構図を書き換える可能性を秘めているとさえ言える。

青色半導体レーザー素子

ピックアップなどの用途向けの低出力光源として使用されている青色半導体レーザーの性能は、著しく向上している。最近では、素子あたり3W以上の出力が、商用提供されるようになってきている。

図1は、日亜化学工業の青色半導体

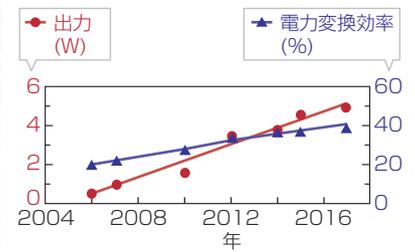


図1 青色半導体レーザーの出力と電力変換効率の推移。

レーザーの素子あたりの出力と電力変換効率(WPE: Wall Plug Efficiency)の推移を示したものである(同社のデータに基づき、著者がグラフ化した)。この10年間の著しい進歩によって、出力は約10倍、効率は約2倍になっているのがはっきりと見てとれる。主な用途はプロジェクター内のランプ交換で、緑色または赤色光を生成する蛍光体とともに使用されている。青色半導体レーザーは、ランプよりも寿命が長く、サイズが小さいので、このような照明やディスプレイの分野で、近年急速に利用が拡大している⁽³⁾。

その一方で、さまざまな加工目的に青色半導体レーザーを適用するには、現時点ではもう少し時間が必要である。加工における重要なパラメータである光源の輝度に関しては、青色半導体レーザーはすでに、赤外線(IR:infrared)半導体レーザーを上回っている。商用製品を基に、素子の端面の出力密度を比較すると、近赤外線半導体レーザーの高出力製品(11W/エミッタ)で、約6×10⁶W/cm²であるのに対し、青色半導体レーザー(3.5W/エミッタ)は、約12×

表 青色半導体レーザー(LD)のレーザー加工用光源としてのメリット。

	青色LD	IR LD	SHG
波長	青色	赤み	緑色
金属の吸収率	良い	中程度	悪くはない
輝度	良い	中程度	良い
後方反射耐性	高い	中程度	低い
寿命	1万時間以上	1万時間以上	5000時間程度
故障モード	磨耗	ランダム	ランダム

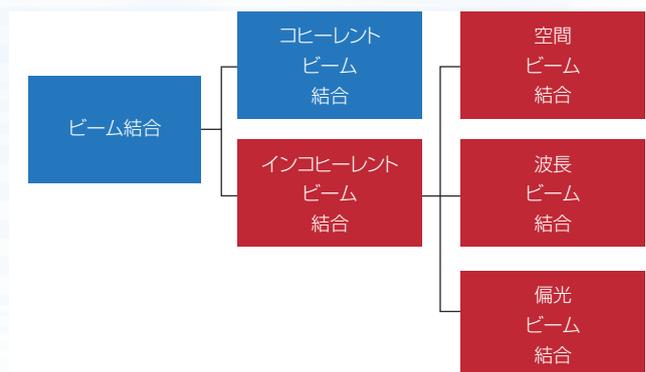


図2 レーザビーム結合方法。

106W/cm²である。

レーザー加工では、材料の光吸収効率も重要な項目である。一般的に反射率は、青色よりも短い短波長域で低下するため⁽⁴⁾、青色半導体レーザーを使用すれば、近赤外線半導体レーザーよりもはるかに低い出力で、同等の加工が行えると予測される。その結果、消費電力の大幅な低下と効率の向上が期待できる。

表は、近赤外線半導体レーザーや第2次高調波発生(SHG: Second Harmonic Generation)レーザー(短波長レーザーの一種)と比較した場合の青色半導体レーザーの卓越性を示している。上述の高い輝度と低い反射率以外にも、青色半導体レーザーには、後方反射耐性が高い、故障率が低い、直接変調が可能ななどのメリットがある。

一般的に、可視光半導体レーザーの素子は、TOパッケージ上に個別に搭載されるため、素子あたりの出力レベルは制限される⁽⁵⁾、⁽⁶⁾。今後の出力増加に伴い、複数の半導体素子を1つの大きなパッケージに搭載するマルチエミッタパッケージに加えて、レーザーバーの開発動向にも、十分に注視する必要がある。

青色半導体レーザーは、近赤外線半導体レーザーと比べて、単位面積あたりの生成熱が2倍以上になるため、効率的な冷却が必要である。また、青色半導

体レーザーに特有の高い光子エネルギーに起因する、浮遊粒子の集塵効果を防ぐために、封止性を厳密に管理できる、信頼性の高いパッケージ技術の開発が不可欠である。

より高い出力要件を満たす、高出力青色レーザーを開発するには、多数のパッケージを使用してレーザーモジュールを形成する必要がある。モジュール形式としては、空間ビーム出力、シングルファイバ出力、バンドルファイバ出力など、これを実現するためのさまざまな方法が存在する。シングルファイバ出力形式のモジュールを採用すれば、青色半導体レーザーの高輝度特性を損なわず、取り扱いに高い自由度が生まれ、近赤外線でも使用される汎用コネクタが使用でき、高い多用途性も得られる。また、ファイバ結合モジュールにはそれ以外にも、光源部分と発光部分が分離しているため熱設計が容易、最適な部品配置が可能、出力を簡単に上げられるなど、さまざまなメリットがある。

我々のチームは、レーザー加工をターゲットに、青色半導体レーザーを結合することによって高出力を達成した、高輝度のファイバ結合型青色ダイレクトダイオードレーザー(BDDL: Blue Direct Diode Laser)を開発した。半導体レーザーの高輝度特性を損なうことなく、コ

ア径100 μ mの光ファイバから青色レーザービームを自由に供給可能な、多用途レーザーモジュールである。以下では、B-DDLの基本技術、結合技術、いくつかの特性を紹介する。

ビーム結合

可視光半導体レーザー素子の実用的なエミッタあたり出力はこれまでのところ、商用提供されている製品で、単一波長で約3.5Wである。それよりも高い出力を得るには、多数の素子の出力を結合するためのビーム結合器が欠かせない。ビーム結合方法は、コヒーレントな方法とインコヒーレントな方法に分類される(図2)。両者のうち、インコヒーレントな方法は、レーザー間の繊細な位相制御を必要としない、実用的な方法とみなすことができる。

インコヒーレントな方法には、多数のビームを空間的に結合する空間結合方法、偏光ビームスプリッターによって直交する偏光を結合する偏光結合方法、異なる波長を同軸上で結合する波長結合方法がある⁽⁷⁾。図3は、各方法を示す概念図である。各方法にはそれぞれメリットとデメリットがあり、各方法を組み合わせて使用することも可能である。

上記の方法のうち、空間結合は、同一波長の多数の半導体レーザー素子を結

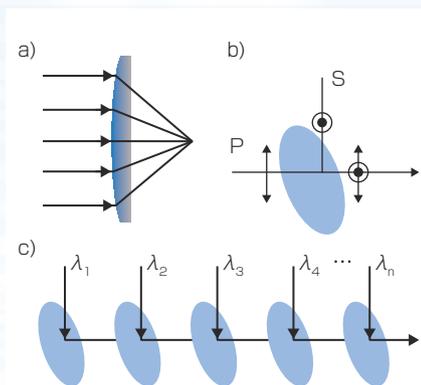


図3 (a)は空間ビーム結合、(b)は偏光ビーム結合、(c)は波長ビーム結合を示す概念図。

合して、高出力を得る目的に適している。レーザの輝度 B は、レーザ出力 P 、照射スポット表面面積 S 、レーザビームの立体角 Ω を用いて、式(1)のように表される。

$$B = \frac{P}{S \cdot \Omega} = \frac{P}{(M^2 \cdot \lambda)^2} \quad (1)$$

ここで、 λ は波長、 M^2 はビーム品質を示すパラメータである。 M^2 は、ビームスポット半径 w_0 とビーム発散半角 θ_0 を用いて、式(2)のように表され、その値は、理想的なガウシアンビームの場合に最小値の1となる⁽⁸⁾。

$$M^2 = \frac{\pi \cdot w_0 \cdot \theta_0}{\lambda} \quad (2)$$

図4に示すように、多数の半導体レーザ(モードフィールド径 w_1 、発散角 θ_1)を一列に整列させて、焦点距離が f_1 と f_2 のレンズによって、マルチモードフ

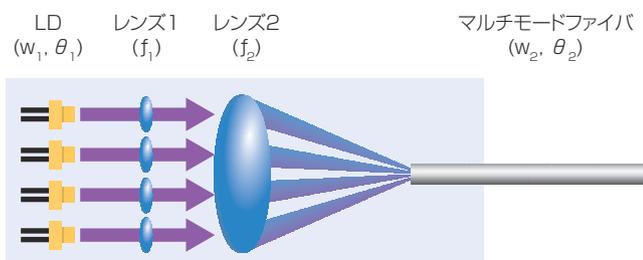


図4 マルチモードファイバへの結合例を示す図。

ァイバ(モードフィールド径 w_2 、発散角 θ_2)に結合する場合、結合可能な最大数 N は、以下の式(3)で近似される。

$$N = \frac{f_2 \theta_2}{f_1 \theta_1} \cdot F_f = \frac{f_2 w_1 M_1^2}{f_1 w_2 M_2^2} \cdot F_f \quad (3)$$

ここで、 F_f はビームの空間充填率、 M_1^2 と M_2^2 はそれぞれ、半導体レーザとファイバのビーム品質である。空間充填率 $F_f=1$ で、 $f_2 w_1 / f_1 w_2 = 1$ という最適な結合条件が成立する場合、結合可能なビーム数は、最大値 $N_{MAX} = M_2^2 / M_1^2$ となる。 $M_x^2 = 11.7$ で $M_y^2 = 5.0$ の波長450nmの半導体レーザ素子を使用し、コア径100 μ mのマルチモードファイバ(NA=0.2)をファイバとして使用する場合、空間結合可能な最大ビーム数は、約80となる。

図5は、空間結合を採用する、「BLUE IMPACT™」シリーズの20Wタイプのファイバ結合型高出力レーザモジュールの外観を示したものである。かつてないほどの高輝度を達成する同製品は、すでに銅のレーザ加工やレーザハンダなどの用途に広く利用されている⁽⁹⁾。

高出力

空間結合は、ファイバのコア径と開口数(NA: Numerical Aperture)によって、出力のスケラビリティが制約される。高い出力を小さなコア径のファイバに結合するには、波長結合と偏光結合の両方を使用することが必要で

ある。幸い、GaNベースのダイオードは、比較的ワイドバンドギャップのエネルギー範囲をカバーし、原理上、紫から赤色までの可視光を生成することができる。また、商用製品レベルの半導体レーザでも、375~532nmの短波長可視光域がカバーされている他、さまざまな波長の素子を選択することにより、波長結合を行うことができる。

図6は、空間結合、波長結合、偏光結合を組み合わせた高出力モジュールの概念図である。複数波長の半導体レーザの空間結合によって得られたサブモジュール $\lambda_1 \sim \lambda_3$ を、ダイクロイックフィルタによって1本のビームに統合した後、偏光結合によってさらに結合する。偏光結合と波長結合によって結合されたビームは、断面積と広がり角が増加しないため、サブモジュールと同じ品質を維持しつつ、高出力を達成することができる。

図7は、高出力BLUE IMPACT™シリーズの100Wタイプ製品の外観である。高出力と高輝度を達成しており、ビームパラメータ積(BPP: Beam Parameter Product)は10、コア径100 μ mのファイバからの光出力は100W、出力密度は1MW/cm²以上となっている。

レーザ特性

次は、ファイバ結合型高輝度青色半導体レーザモジュールBLUE IMPA



図5 20WのBLUE IMPACT™青色ダイレクトダイオードレーザ(DDL)モジュール。

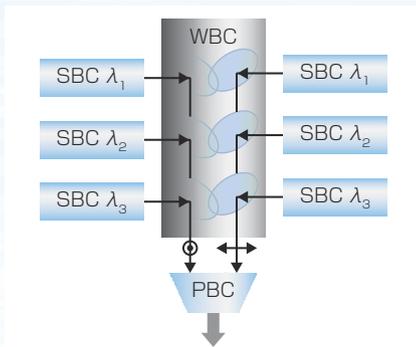


図6 DDLモジュールの高出力化のための空間ビーム結合、波長ビーム結合、偏光ビーム結合方法を示す図。

CTTMの特性を紹介する。必要となるレーザ出力に応じて、出力は最大で100W、ファイバコア径は最小で50 μm までのラインアップが用意されている。

図8に、20Wタイプ製品のスペクトルと出力特性の例を示す。コア径100 μm のファイバから、20W、波長450nmの青色出力が得られ、電気から光への変換効率は約20%である。青色半導体レーザ素子単体のWPEよりも低い、その要因は、ファイバのNAに収まらない周辺光の損失と、ファイバ端面上のフレネル反射の影響である。この例では、448nmを中心にと約4nmの幅にスペクトルが拡大されているが、搭載する半導体レーザ素子によって、それよりも狭くまたは広くすることが可能である。狭帯域を使用する場合は、固体レーザや、蛍光体に対する励起光源としての利用も考えられる。

図9は、ファイバ出力をレンズで1:1に集光した場合の焦点近傍における光学軸方向のビーム径の変化と、焦点位置でのビームプロファイルの例を示したものである。ファイバコア径と同じ100 μm にまで集光することができ、ファイバ出力光のNAは0.2であるため、70というM²の理論値が得られる。

図10は、100Wタイプ製品のビームプロファイルの近視野像 (NFP: Near



図7 100WのBLUE IMPACTTMファイバ結合型青色DDLモジュール。

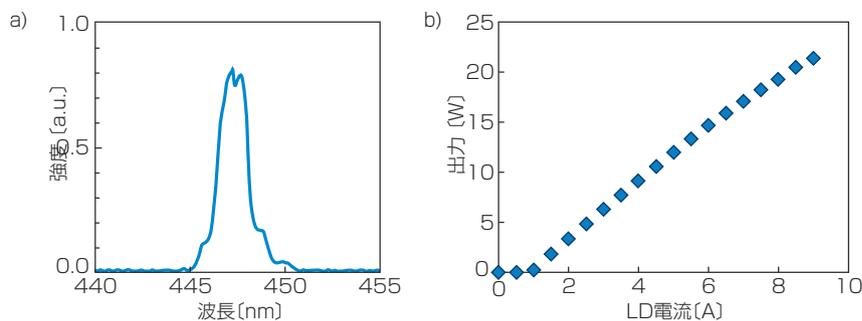


図8 20Wの青色DDLモジュールの出力特性として、(a)に出力ビームのスペクトル、(b)に出力パワーと半導体レーザ(LD)電流の関係を示す。

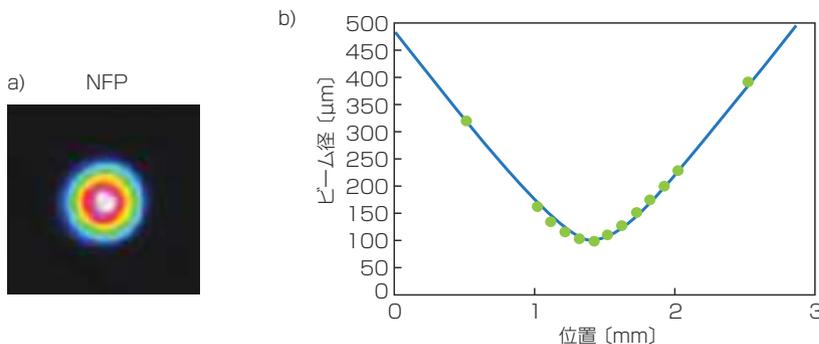


図9 20Wの青色DDLのビームプロファイルとして、(a)に出力ビームの近視野像、(b)にビーム伝搬特性を示す。

Field Pattern)と出力特性である。ファイバはステップインデックス型で、コア径は100 μm 、出力端のNFPは、それを反映してトップハット型となっている。理論値と同じ、70というM²値が得られている。

高出力青色レーザによる加工例

ここでは、高出力青色レーザによるレーザ加工例を紹介する。加工結果は

主に、BLUE IMPACTTMの100Wタイプを使用して得られたものである。自動車業界において電気自動車 (EV) への移行が進み、携帯端末の普及に伴ってリチウムイオンバッテリーの需要が高まっていることから、純銅のレーザ溶接に対する期待が高まっている。青色レーザは、純銅に対する光吸収率が40%以上で、従来のIRレーザよりも低い出力で溶融できるため、過度の

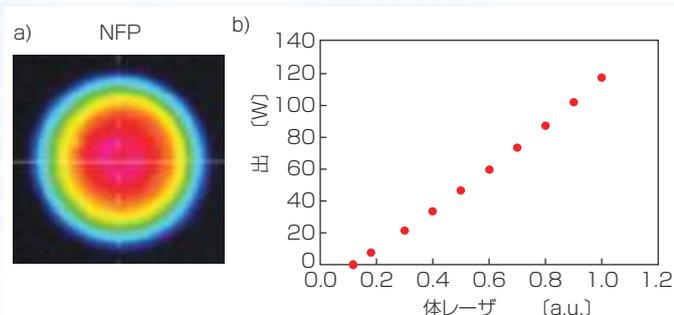


図10 100Wの青色DDLモジュールの出力特性として、(a)に出力ビームの近視野像、(b)に出力パワーと半導体レーザー電流の関係を示す。



図12 100W出力の青色レーザーを活用した3Dプリンター。純銅のダイレクトプロトタイプリングが可能である。(a)は、高出力青色レーザーを搭載するSLM方式の3Dプリンター、(b)は純銅粉末から積層造形した試作サンプル。

エネルギーに起因するスパッタを抑制することが可能である。これにより、マイルドな加工が達成できる。

図11は、100W出力の青色レーザーによって銅箔を重ね溶接した結果である。3枚の銅箔を重ねた厚さ $30\mu\text{m}$ の銅箔表面を、レーザーで約 10mm/秒 の速度でスキャンする。コア径 $100\mu\text{m}$ のファイバ出力は、1:1の投射比で集光されるため、試料表面のレーザースポット径も $100\mu\text{m}$ である。デブリ(加工屑)や周囲に対する熱影響が抑えられた、良好な溶接結果が得られている。

図12は、青色半導体レーザーで純銅を積層造形できる3Dプリンターと、その積層造形サンプルである⁽¹⁰⁾。大阪大が、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)プロジェクト「高輝度・高効率次世代レー

ザ技術開発」の下で開発した。100W出力の青色レーザーを、SLM(Selective Laser Melting)方式に基づく3Dプリンター上に搭載し、XYステージ上のレーザー集光ヘッドをスキャンして、パウダーベッド上の必要な部分のみの銅粉末を溶融し凝固する。パウダーベッド上では、 $100\mu\text{m}$ のスポット径にレーザーが集光される。これにより、高い電気伝導率と熱伝導率を持ち、これまではレーザーによる溶融が困難だった純銅のラミネート加工が可能となる。この技術は、航空・宇宙・電気自動車などの産業分野への応用が期待される。

IoTやAIなどに伴い、業界界では新しいパラダイムシフトが生じ始めてい

る。ツールを変えることなく数値制御や遠隔操作に対応できるレーザー加工技術は、この新世代の分野で主要な役割を担うことになるだろう。高出力青色レーザーによるレーザー加工は始まったばかりだが、今後さらに開発が進むにつれて、次世代の最先端製造の中核を担うツールになる可能性を秘めている。

注記

本件の一部は、NEDOプロジェクト「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」の下で実施された。BLUE IMPACT™は、島津製作所の商標である。

参考文献

- (1) See <https://goo.gl/rmvHt5>.
- (2) See <https://goo.gl/dai87Z>.
- (3) S. Okauchi and A. Hama, "The initiatives of market direction and activation of the gallium nitride-based laser diode for laser display," The 6th Laser Display and Lighting Conference (2017).
- (4) Laser Society of Japan, Laser Handbook Vol. 2 (2015).
- (5) T. Miyoshi and S. Nagahama, O plus E, 36, 6, 652 (2014).
- (6) S. Nagahama, "InGaN semiconductor laser diode and new application," Annual Meeting of the Laser Society of Japan digest of technical papers (2017).
- (7) T. Y. Fan, IEEE J. Select. Topics Quantum Electron., 11, 3, 567 (2005).
- (8) T. Taira, Rev. Laser Eng., 26, 10, 723-729 (1998).
- (9) M. Tsukamoto, J. Japan Laser Process. Soc., 24, 4 (2017).
- (10) M. Tsukamoto, Rev. Laser Eng., 45, 9 (2017).

著者紹介

東條公資は島津製作所所属。URL: www.shimadzu.com
 升野振一郎、東野律子、塚本雅裕は、大阪大接合科学研究所所属。
 e-mail: tukamoto@jwri.osaka-u.ac.jp URL: www.jwri.osaka-u.ac.jp/en

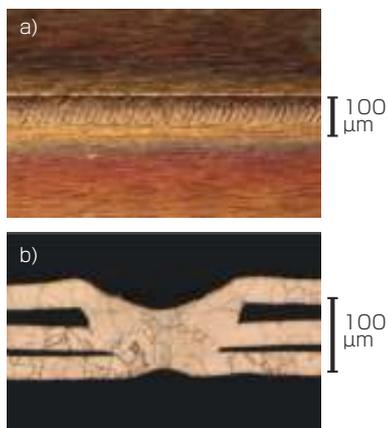


図11 $30\mu\text{m}$ の純銅シートを100W出力の青色レーザーで重ね溶接した結果。(a)は溶接ビードを真上から見た様子、(b)は断面図。