

# 青色半導体レーザによる加工応用とプロセス インフォマティクスに向けた品質評価技術

株式会社島津製作所

基盤技術研究所 先端分析ユニット フォトニクスグループ

宇野 進吾

カーボンニュートラルの実現に向けた電動車の普及拡大に伴い、純銅材の加工需要が高まっている。そこで、島津製作所は純銅に対して高い光吸収率を持つ青色波長に注目し、kWを超える高出力青色半導体レーザ光源を開発した。本稿では、銅単線の溶接や銅粉末のレーザコーティング例を示し、高出力青色半導体レーザが実践的な加工用光源であることを示す。また、当社分析計測機器を用いた加工品質の解析例を提示する。今後は解析結果を蓄積することで加工サンプルに最適な加工条件を事前予測するプロセスインフォマティクスへの展開が期待できる。

## 1. はじめに

国際的な目標であるSDGsを達成するための取り組みの一つとして、多くの国や地域で温室効果ガスの削減目標が設定されている。この実現のためには電力部門の再生可能エネルギーの導入、電力ネットワークのデジタルインフラ化をはじめ、産業・運輸・業務・家庭部門などで電化を推進することが求められている。特に、運輸部門の自動車関連は日本全体のCO<sub>2</sub>排出量の15%を超えており、温室効果ガス削減目標の達成に自動車の電動化は重要な要素と言える。<sup>[1]</sup>

自動車の電動化に伴い、主要部品はエンジンや変速機からモータやバッテリーなどに置き換わり、電気伝導度と熱伝導率の高い純銅材の加工需要が急激に拡大している。レーザを用いた加工においては、歴史的にガスレーザや固体レーザによる赤外光源が主として用いられてきたが、純銅材の場合、赤外線に対する光吸収率が低く、安定した加工が困難であるという課題があった。それに對して、純銅の光吸収率は波長が500nm以下の短波長になると急激に増加し、青色波長に対しては約60%に達するため、高効率で安定した加工が期待できる。<sup>[2]</sup>さらに、電流により直接駆動する半導体レーザの光をダイレ

クトに利用することで、半導体レーザが持つ時間応答性、遠隔操作性に優れ、メンテナンスフリーであるという特長を活用できる。そのため、青色半導体レーザは、今後の電動車の普及拡大において重要となる純銅材料の溶接に対応できる数少ないツールとして期待できる。

一般的に、レーザ加工は同じ材料であっても形状や表面状態、保持方法などで最適な加工条件が異なるため、加工サンプルに合わせて加工条件を最適化する事前検証作業が必要である。さらに、单一波長ではなく複数波長を用いた、いわゆるハイブリッド方式のレーザ加工や、ビームのプロファイルを制御する手法などが提案されており、最適な加工条件を決定するパラメータはますます複雑化している。<sup>[3]</sup>加工パラメータの網羅的な検証や、属人的な経験に基づく手法では最適化までに必要な時間とコストは膨大になる。そこで、データ駆動型のアプローチを通じて加工パラメータを最適化するプロセスインフォマティクスが注目されている。プロセスインフォマティクスは、加工サンプル品質の分析計測や加工中のリアルタイムモニタリングなどから加工品質に関するデータを収集し、管理、解析することで加工プロセスを深く理解し、加工品質を予測することで、最小限の実験およ

び解析で最適な加工パラメータを見出す手法である。

Society 5.0の実現形態の一つである超スマート社会では、高度なデジタル技術と物理的なインフラが統合されると言われている。IoTやAIを活用が進み、工作機器の自動化、無人化が進んだ次世代の自動車工場においては、當時データ収集と解析を行い、リアルタイムでの製造プロセス最適化が必須であり、青色半導体レーザとプロセスインフォマティクスは欠くことのできないピースになると考えられる。

## 2. 青色半導体レーザ光源の開発

当社は青色半導体レーザによる金属加工の可能性にいち早く着目し、2009年から加工用の青色レーザの開発を開始した。レーザプロジェクタの普及拡大に後押しされ、青色半導体レーザ素子単体の高効率化、高出力化技術の進歩は目覚ましいが、レーザ加工用光源としては出力不足である。<sup>[4]</sup>そこで、当社は大阪大学の塙本雅裕教授らとともに2016年度からNEDOプロジェクト「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」に参画し、多数の青色半導体レーザ素子出力を束ねる独自の高輝度ビームコンバイング技術を開発し、レーザ加工で重要なパラメータである高輝度と高出力を両立した青色半導体レーザの開発を行った。開発したレーザの一覧を表1にまとめる。2016年の出力100W/ファイバコア径100umのファイバ結合型青色半導体レーザ光源の開発を皮切りに、2018年には出力200W/ファイバコア径100umへの高輝度化、高出力化に成功した。また、5台の200W青色半導体レーザ光源のファイバ出力を束ねて1本のファイバに再結合するコンバイナを開発し、ファイバ1本あたり1kW出力のレーザを実現した。さらに、同年に出力

100W/ファイバコア径100umを世界に先駆けて製品化し、2月に開かれた世界最大の光学・フォトニクスの国際会議であるPhotonics Westでは、実質的に困難であった純銅のレーザ溶接や3Dプリンタを実証する動的展示を行い、一躍世界の注目を浴びた。2019年にはコリメートした半導体レーザ出力の超精密な組立技術を新たに開発し、出力500W/ファイバコア径200umを達成した。なお500W青色半導体レーザ光源の特長として、共通構造のサブモジュールが組み合わさった構成となっており、スケーラビリティを有している。500W青色半導体レーザ光源の電流一出力特性とビームプロファイルをそれぞれ図1、図2に示す。ファイバ端でのビームプロファイルはΦ200umのトップハット形状である。さらに2020年には500W青色半導体レーザ光源3台を結合するコンバイナを開発し、出力1.5kW/ファイバコア径Φ400umを達成した。新規設計した特殊形状のプリズム光学系を採用することでコンバイナの結合効率を向上させ、さらに光学系とメカ機構および水冷機能を一体化し

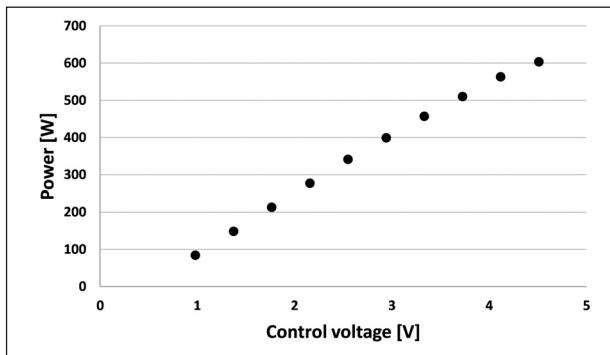


図1 500W青色レーザの電流一出力特性

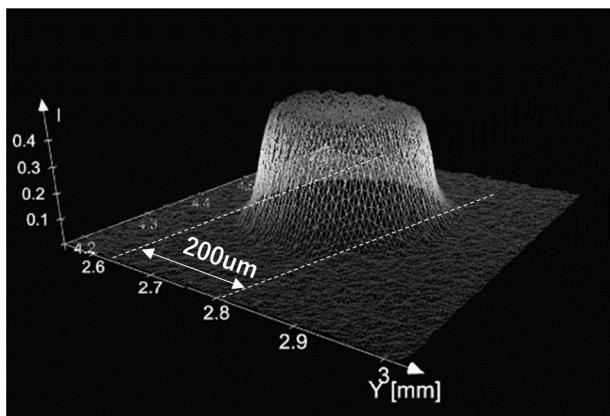


図2 500W青色レーザのビームプロファイル例

表1 開発した青色半導体レーザ光源一覧

年度	ファイバ出力 [W]	ファイバコア径 [um]	パワー密度 [MW/cm <sup>2</sup> ]
2016	100	Φ100	1.3
2018	200	Φ100	2.6
	1k	Φ400	0.8
2019	500	Φ200	1.6
2020	1.5k	Φ400	1.2

たモノリシック構造を採用することにより安定したファイバ結合を実現している。これにより厚さ1mmを超える銅板の溶接が可能になり、加工用光源として実践的なレベルにまで到達した。<sup>[5]-[7]</sup>

### 3. 青色半導体レーザを用いた加工例

電動車向けモータ用コイルに用いられる線材を想定してΦ1.8mmの純銅単線を用いた突合せ溶接を行った。銅線の切断面を突合せ、両銅線にレーザが当たるように突合せ部に照射した。突合せ部はAIW(ポリアミドイミド)被覆を除去している。加工条件はレーザ出力1.5kW、照射ビーム径600um、レーザ照射時間0.1secであり、酸化抑制のためにArガスを25L/minで照射部に吹き付けた。銅線の端面は工具による切断面であり、研磨などの処理は行っていない。加工結果を図3に示す。レーザ照射により銅線が一体化されている。接合部を含む銅線の電気抵抗を測定した結果、理論値と1%以下の精度で一致しており、電気的に銅単線とそん色のない性能であることを確認した。

次に、純銅のレーザコーティングの事例を紹介する。金属表面に銅をコーティングすることで、銅の持つ高い熱伝導性、電気伝導性を付与することが可能になる。レーザを用いたコーティング手法のひとつにレーザ粉体肉盛法(LMD:Laser Metal Deposition)がある。LMDは金属プレートなどの母材に向けてレーザを照射し、母材表面に

形成された溶融池に粉末状の金属を供給することで溶融凝固させて堆積する工法である。レーザ溶接プロセスを用いたコーティングは、大気中でのドライプロセスであり、接合強度が非常に強く、レーザの照射位置を制御することによりコーティング領域を選択できるというメリットがある。従来のLMDではレーザを中心部に配置し、円周方向から金属粉末を供給するが、本実験では金属粉末を中央部に配置し、3台の青色レーザを円周方向から照射することで金属粉末を飛行中(母材表面に到達する前)に溶融させる手法を採用している。これにより、溶融池の形成を最小限に抑制することが可能であり、低入熱かつ高速なコーティングを実現している。<sup>[8][9]</sup>

厚さ2mmのSUSプレートを母材とし、純銅粉末を供給しながら3方向から青色レーザを照射し、その焦点をX-Y平面にラスタスキャンすることでSUSプレート表面に純銅をコーティングした。実験セットアップを図4に示す。加工条件は、青色レーザ出力は合計120W、スキャン速度は80mm/secである。純銅粉末の平均粒径は約30umであり、噴射およびレーザの焦点位置での粉末の収束径に関わるArガス流量を(a)3.5L/minと(b)0L/min(ガスなし)の2つの条件でコーティングを実施した。実質的に条件(b)の粉末供給量は、条件(a)の約半分である。図5に示す結果の通り、どちらのサンプルもSUSプレート表面に隙間なく銅のコーティングができている。コーティング部の色を比較すると(a)よりも(b)が銅の色が薄い。その考察については後述する。



図3 Φ1.8mm純銅単線の溶接例

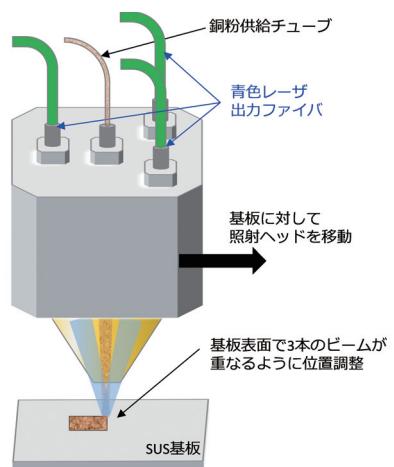


図4 レーザコーティング実験のセットアップ

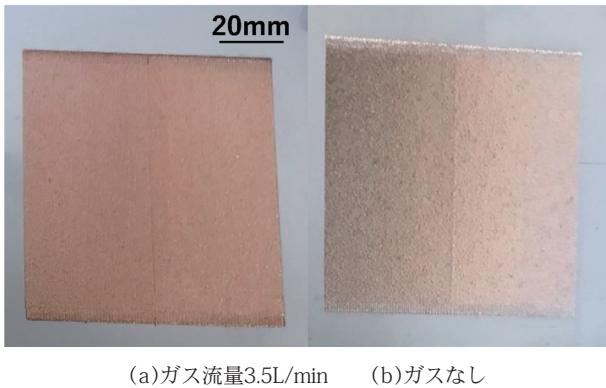


図5 SUSプレート上への銅コーティング例

#### 4. 分析計測機器を用いた加工品質の検証

純銅材の加工プロセスを従来の抵抗溶接、アーク溶接からレーザ溶接へスマーズに移行するためには、レーザ溶接の加工品質を正確に検証することが不可欠である。特に溶接内部のボイド(空隙部)は接合強度に影響を与えるため定量的な解析が必須である。さらに、正確で信頼性の高い計測はプロセスインフォマティクスにとって欠かせない情報であり、プロセスの最適化の予測や品質保証にも貢献する。当社は多様な分析計測機器を製品化しており、本章では加工サンプルの分析、特性評価に適したマイクロフォーカスX線CT、電子プローブマイクロアナライザ(EPMA:Electron Probe Micro Analyzer)を用いた加工サンプルの評価結果を紹介する。

##### 4.1 マイクロフォーカスX線CTを用いた検証

マイクロフォーカスX線CTは、加工サンプルを360°回転させながら微小領域からX線ビームを照射する。X線は物体内の異なる材料や密度の違いによって吸収される量が異なるため影となって表れ、あらゆる角度における透過X線量を測定してデータ処理することで加工サンプルの内部構造イメージを再構築することが可能である。フォーカスされたX線ビームは非常に細いため高い空間分解能を有し、加工サンプル内部の微細なボイドやクラックなどを高精細に分析することができる。加工サンプルを切断、研磨して観察する手法と比較して非破壊分析であることに加えて、1つの断面だけでなく加工部全体の連続的な断面観察が可能となる。一度で多くのデータ取得が可能であり、プロセスインフォマティクスには

最適な装置といえる。当社のマイクロフォーカスX線CTシステム「inspeXio SMX-225CT FPD」の外観と代表的な仕様をそれぞれ図6、表2に示す。



図6 マイクロフォーカスX線CT  
「inspeXio SMX-225CT FPD」の外観写真

表2 「inspeXio SMX-225CT FPD」の主な仕様

Item	Performance
搭載可能サンプルサイズ	Φ350×H300 mm
搭載可能サンプル重量	9kg
最大スキャン領域	Φ250×H300 mm
X線透過厚さ	15mm程度 (鉄の場合の参考値)

マイクロフォーカスX線CTを用いて図3に示したΦ1.8mmの純銅単線の突合せ溶接の加工サンプルを観察した。結果を図7に示す。溶接部全体の連続的な断面観察により、クラックや未接合箇所は存在しないことが確認

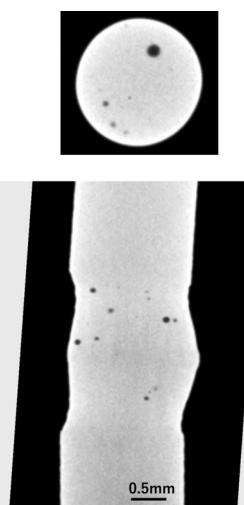


図7 Φ1.8mm銅単線溶接のCT画像

できた。また、直径Φ100umのボイドが1か所、さらにΦ数10umのボイドが複数存在することが判明した。前述した電気抵抗の測定結果から、このボイド量であれば電気的に純銅単線とそん色がないことが確認できる。

#### 4.2 電子プローブマイクロアナライザを用いた検証

EPMAは電子ビームをサンプルに照射し、発生した反跳電子や特性X線のエネルギーと強度を分析することで元素組成や元素分布を非破壊で分析可能な装置である。電子ビームは非常に細く収束されているため高い空間分解能を有し、加工部の元素マッピングや特定の化学組成の濃度範囲領域の特定など加工サンプル内部の元素情報を評価することができる。異種金属接合においては、当該金属の希釈具合を分析することが可能である。

当社のEPMA「EPMA-8050G」の外観と仕様をそれぞれ図8と表3に示す。図5に示したSUSプレート表面に純銅コーティングを施した加工サンプルをEPMA-8050Gを用いて観察した結果を図9に示す。SUSの分布の解析にはSUSの主成分である鉄のK $\alpha$ 線を利用した。1つの断面でFe(K $\alpha$ )とCu(K $\alpha$ )のエネルギーと強度から鉄と銅の



図8 EPMA「EPMA-8050G」の外観写真

表3 「EPMA-8050G」の主な仕様

Item	Performance
形態観察	40~100,000倍程度
測定元素範囲	Be(原子番号:4)~U(原子番号:92)
分析深さ	表面から数μm
搭載可能サンプルサイズ	90×90×H30 mm
搭載可能サンプル重量	2kg(耐真空、導電性要)

2次元元素マッピングを作成した。図5(a)の加工サンプルの測定結果を図9(a)に、図5(b)の加工サンプルの測定結果を図9(b)に示す。(a)は鉄と銅が比較的分離しており、表面部はほぼ銅であることがわかる。これに対して、(b)はコーティング表面にも希釈された鉄が存在している。よって、図5(b)でコーティング部の銅の色が薄い原因是、母材であるSUSの希釈によるものと判明した。粉末供給量を減らしたことにより青色レーザが母材のSUSプレートに多く到達し、SUSの溶融量が増加したため希釈割合が高くなつたと考えられる。

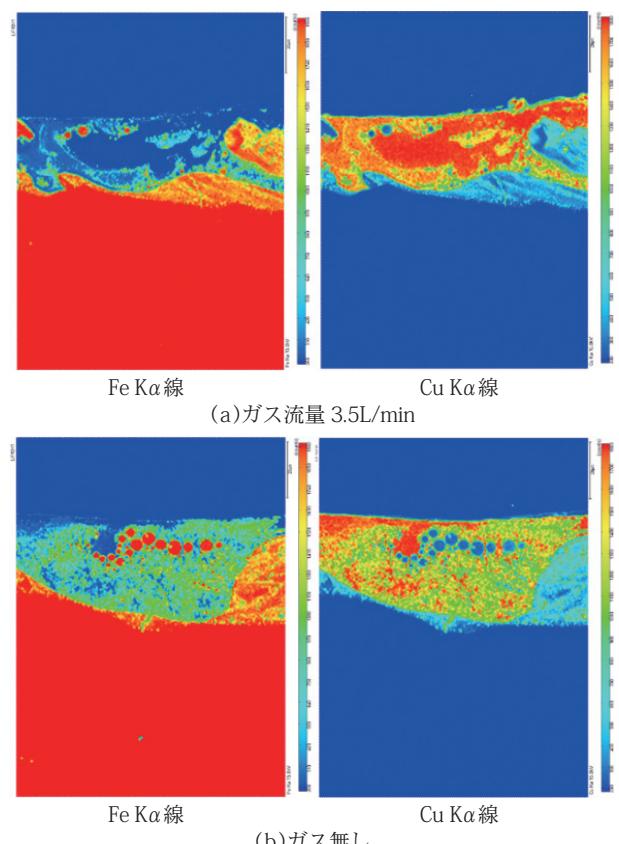


図9 EPMAによる銅コーティングサンプルの元素マッピング

#### 5. おわりに

当社が開発を進める高輝度青色半導体レーザ光源を用いて、電動車向けのアプリケーションを想定した純銅部材のレーザ溶接及びレーザコーティングのサンプル加工を実施した。また、マイクロフォーカスX線CT装置で加工サンプル内部の非破壊分析を行い、ボイドやクラックの有無を高精度に検証するとともに、電子プローブマイクロアナライザを用いてレーザコーティングにおける母

材金属と溶着金属の希釈について解析を行った。その結果、青色半導体レーザ光源を用いることで高品質な純銅加工が可能であることを示した。

今後はマイクロフォーカスX線CTと電子プローブマイクロアナライザの結果をフィードバックし、ボイドの低減および異種金属の溶け込み最適化を行っていく必要がある。さらに、様々な加工条件での品質データを取得、蓄積し、プロセスインフォマティクスへの展開を行うことでサンプル形状、表面状態などに合わせて加工条件の迅速な最適化が期待できる。当社の他の分析計測機器(万能試験機、高速ビデオカメラ、レーザスペクトラムアナライザ等)も加工品質の検証に有効である。複数の分析計測装置から得られたデータを組み合わせることで、プロセスインフォマティクスの予測精度の向上が期待でき、電動車部品の生産拡大に対応した新たな工法の開発とその品質保証に対するソリューションの提案を目指していく。

## 6. 謝辞

本研究の一部は、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)のプロジェクトである「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」により行われた。また、大阪大学接合科学研究所の塙本雅裕教授には格別のご指導を賜り、厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] <https://www.meti.go.jp/press/2021/06/20210618005/20210618005.html>(2023年8月23日参照).
- [2] S. Engler, R. Ramsayer, R. Poprawe: “Process Studies on Laser Welding of Copper with Brilliant Green and Infrared Lasers”. Physics Procedia 12(2011), 339-346.
- [3] S. Fujio, K. Takenaka, Y. Sato, R. Ito, E. Hori, M. Tsukamoto, “Effect of blue diode laser intensity on welding of pure copper wire using blue-IR hybrid laser”, Journal of Laser Applications, vol. 34, issue 4, 042021, 2022.
- [4] 長濱慎一, 「InGaN 半導体レーザーとその新しい応用」, レーザー学会学術講演会第37回会年次大会予稿集, P108pP01, 2017.
- [5] 東條公資, 升野振一郎, 東野律子, 塙本雅裕, 「高輝度パワーブルーレーザ」, レーザ加工学会誌, 25-3, 7-12, 2018.
- [6] 東條公資, 「先進加工応用に向けた高出力青色半導体レーザ」, スマートプロセス学会誌, 9-2, p41-44, 2020.
- [7] 宇野進吾, 「高輝度青色半導体レーザ光源の開発と適用加工例」, 溶接技術, Vol69, p60-63, 2021.
- [8] 塙本雅裕, 「高付加価値設計・製造を実現するレーザコーティング技術の研究開発」, レーザ加工学会誌, Vol. 24, 4, 2017.
- [9] 佐藤雄二, 「次世代レーザコーティング技術の開発と今後の展望」, レーザ加工学会誌, Vol25, p12-17, 2018.

## 略歴

宇野 進吾 (うの しんご)

2008年 株式会社島津製作所 入社

2008年～2012年

Qスイッチ固体パルスレーザの開発

2011年～2015年

外部共振器型半導体レーザの開発

2015年～

高出力青色半導体レーザ光源の開発

現在: レーザ加工用光源の研究に従事