

5 kW シングルモードファイバレーザ

先端技術総合研究所 田久保 勇也¹・生駒 晋也²・内山 圭祐²・柏木 正浩³・島 研介⁴

5 kW Single-mode Fiber Laser

Y. Takubo, S. Ikoma, K. Uchiyama, M. Kashiwagi, and K. Shima

高い出力とビーム品質を有するシングルモードファイバレーザは、様々な材料加工への応用が期待されている。今回、5 kW という高出力のシングルモードファイバレーザを実現した。高出力化の際に問題となる誘導ラマン散乱 (SRS) は十分抑制されており、加工現場への導入を見据えた 20 m のデリバリファイバ長においても問題のないレベルであった。また本レーザを用いて高反射材である無酸素銅の加工実験を行い、レーザが高い加工性能と耐反射性を持つことを確認した。

A single-mode fiber laser, which has high output power and good beam quality, is demanded in various fields of materials processing. In this report, a 5 kW single-mode fiber laser is demonstrated. Stimulated Raman scattering (SRS), which is a major problem in high power fiber laser, is well suppressed in the fabricated laser even with the 20-m-long delivery fiber. Such long delivery fiber is suitable for practical processing fields. In addition, the processing experiment of a pure copper with the laser is carried out. The high processing quality and the tolerance to the back reflection light are confirmed.

1. ま え が き

ファイバレーザは高ビーム品質、小型・軽量、高エネルギー変換効率等の多くの利点をもち、様々なレーザ加工の分野において気体レーザに代わる形で市場を拡大している。特に回折限界に近いビームを得ることができるシングルモードファイバレーザは、その優れたビーム品質をいかした微細加工や低熱影響加工、ガルバノスキャナと組み合わせた高速リモート加工等への応用が可能である。

シングルモードファイバレーザは多様な加工応用が可能な反面、高出力化が非常に難しいという課題をもつ。高出力化を妨げる主要因は、非線形光学効果の 1 つである誘導ラマン散乱 (stimulated Raman scattering, 以下 SRS) である。高出力ファイバレーザにおいてはレーザ光をポンプ光として SRS が発生し、出力の不安定化を引き起こすほか、SRS により発生したストークス光が加工物から反射してきてレーザに逆入射し、励起用の半導体レーザダイオードモジュール (laser diode module, 以下 LDM) を損傷させてしまう可能性もある。したがって通常のシングルモードファイバレーザの場合、銅やアルミニウムといった高反射材への加工応用は難しい。また

SRS はレーザ光の伝搬距離が長いほど発生しやすいため、デリバリファイバの長さにも制限を与える。製造現場への導入においては 20 m を超える長いデリバリファイバ長が望ましいとされており、SRS 抑制能力の高いファイバレーザが求められている。

当社では SRS 抑制能力を高めたシングルモードファイバレーザの開発を行っており、これまで 20 m のデリバリファイバ長を有する 3 kW シングルモードファイバレーザを用いて、高反射材である銅の加工を実現している¹⁾。また同レーザをガルバノスキャナと組み合わせることで、高速リモート加工についても実現している²⁾。

今回新たに 5 kW 出力のシングルモードファイバレーザを実現したので、以下に報告を行う。レーザは高い SRS 抑制能力をもっており、SRS によって発生するストークス光は、デリバリ長 20 m においてもレーザ光に対してパワー比率 -45 dB に抑えられている。また開発したレーザをガルバノスキャナと組み合わせて無酸素銅の加工実験を行い、加工性能および耐反射性の評価を行ったので、あわせて報告を行う。

2. 5 kW シングルモードファイバレーザの特性

図 1 に今回作製した 5 kW シングルモードファイバレーザの構成を示す。レーザはファブリ・ペロー型の共振器であり、励起用の LDM、励起コンバイナ、ファイバブラッググレーティング (fiber Bragg grating, 以下 FBG)、

1 レーザフォトニクス研究部 (工学博士)

2 レーザフォトニクス研究部

3 レーザフォトニクス研究部 部長 (工学博士)

4 ファイバレーザ研究部 上席研究員

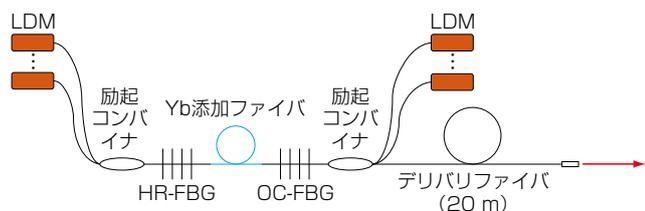


図1 5 kW シングルモードファイバレーザの構成図
Fig. 1. Schematic diagram of the 5 kW single-mode fiber laser.

Yb添加ファイバ、デリバリファイバ、出射端から構成される。

励起光は共振器の双方向から励起コンバイナによって束ねられ、共振器に入力される。共振器は増幅媒質であるYb添加ファイバを高反射FBG (HR-FBG) および低反射FBG (OC-FBG) で挟む構成となっており、OC-FBGを透過した光をデリバリファイバによって伝搬させ、出射端からレーザ出力として取り出している。今回用いたデリバリファイバの長さは20 mである。

図2にYb添加ファイバに注入された励起光パワーに対するレーザの出力光パワー、および焦点位置におけるビームプロファイルを示す。励起光パワーが約6.3 kWのときに5 kW出力を達成しており、励起光から出力光への変換効率は約79%である。ビーム断面の強度分布はガウシアン形状が得られており、ビーム品質を表す指標である M^2 (エムスクエア) の値は1.3である。これより、5 kW出力においてシングルモード発振が実現できていることが確認できた。

図3にレーザの発振スペクトルを示す。レーザの発振波長は1070 nmである。5 kW出力時においてもSRSのストークス光はレーザ光に対して-45 dB程度であり、20 mのデリバリファイバの伝搬というSRSが発生しやすい状況においても、ストークス光は十分抑えられていることが確認できた。一方で発振波長の周辺、1050 nmおよび1090 nm付近にサイドピークが現れており、これらは四光波混合が原因であると考えられる。SRSと異なり、四光波混合が発生するためには原因となる光同士の位相整合が必要であるため、仮にレーザへの逆入射が生じたとしても加速度的に四光波混合が発生する可能性は低い。したがって実際のレーザ応用において悪影響をもたらす可能性は低いと考えられる。

3. 加工応用

作製したシングルモードファイバレーザの加工性能、および耐反射性を評価するために、ガルバノスキャナを用いた加工実験を行った。実験系を図4に示す。5 kW シングルモードファイバレーザを3Dガルバノスキャナに接続し、無酸素銅の平板表面に集光点をあわせることで、ビード・オン・プレート (BoP) 加工を行った。ガルバノスキャナの走査範囲は150 mm×150 mmで、ワーキン

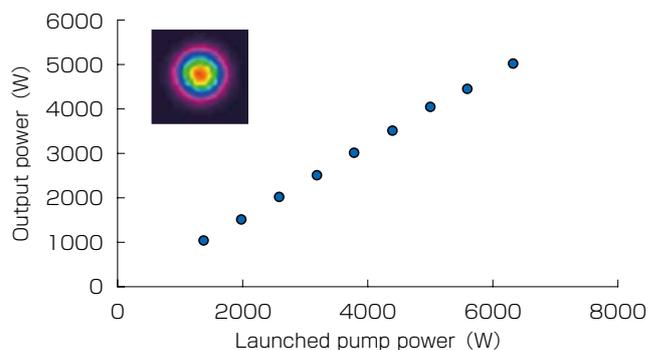


図2 励起光パワーに対する出力パワー特性と焦点位置におけるビームプロファイル
Fig. 2. Output power of the 5 kW single-mode fiber laser and the field pattern at the focal point.

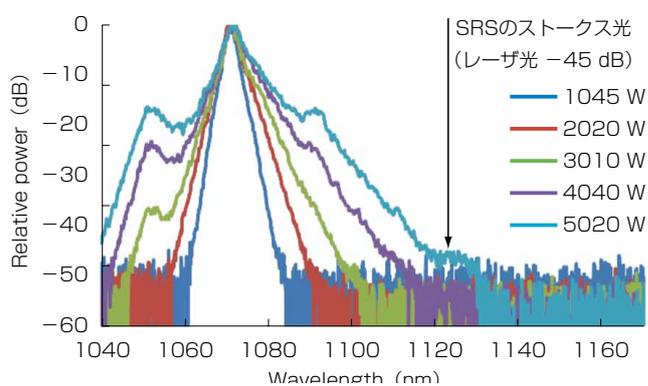


図3 5 kW シングルモードファイバレーザの出力スペクトル
Fig. 3. Output spectra of the 5 kW single-mode fiber laser.

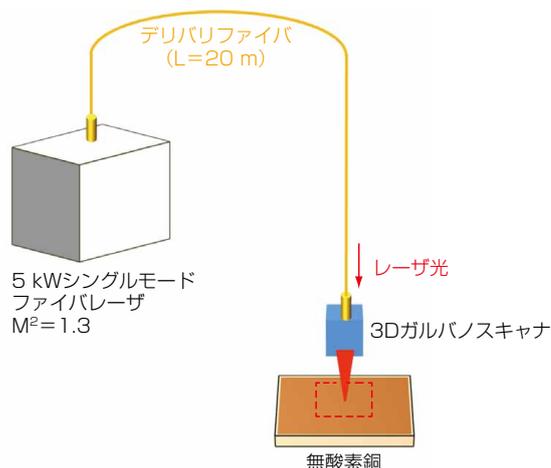


図4 加工実験系

Fig. 4. Schematic configuration of processing test setup.

グディスタンスは約300 mmである。また、集光点におけるビーム幅は38 μm である。

図5に出力1 kW、3 kW、5 kWにおける、ガルバノスキャナの走査速度に対するビード幅およびビード深さの変化を示す。ビード幅に関しては出力パワーに対する

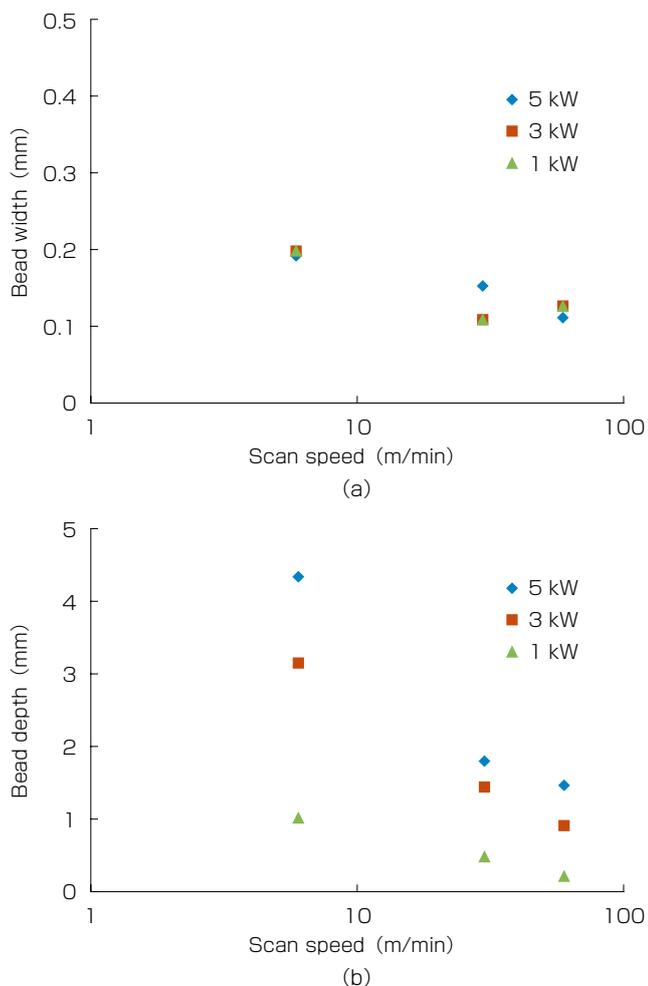


図5 5 kW シングルモードファイバレーザを用いた加工実験結果 (a) 走査速度に対するビード幅の変化 (b) 走査速度に対するビード深さの変化

Fig. 5. Test results of bead-on-plate using 5 kW single-mode fiber laser. (a) Scan speed dependence of bead width. (b) Scan speed dependence of bead depth.

変化があまり見られなかったのに対し、ビード深さに関しては出力パワーが高いほど深くなるという結果が得られた。出力 5 kW、走査速度 6 m/min におけるビード深さは 4.32 mm である。またビード深さをビード幅で割った値であるアスペクト比は同条件において約 22 である。

図 6 に出力 5 kW、走査速度 6 m/min におけるシングルモードファイバレーザ、およびマルチモードファイバレーザによる無酸素銅の加工断面を示す。マルチモードファイバレーザを用いて加工を行った場合のアスペクト比は約 6.3 である。高ビーム品質であるシングルモードファイバレーザを用いることによって、高アスペクト比の加工が実現できることが確認できた。

加工実験中にシングルモードファイバレーザの出力が不安定になることはなく、またストークス光の逆入射によってレーザが損傷することもなかった。高反射材である無酸素銅の加工を通して、作製した 5 kW シングルモードファイバレーザが高い耐反射性をもつことが確認できた。

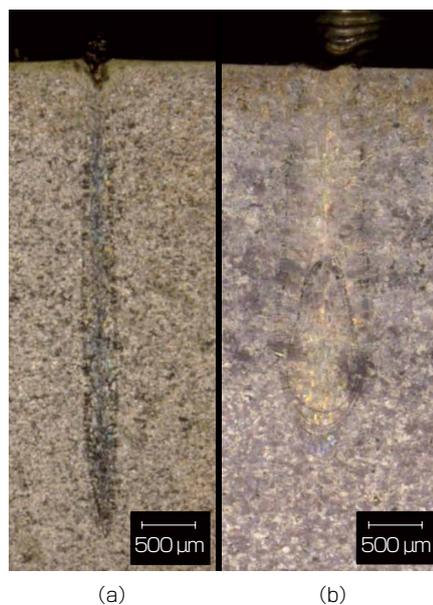


図6 5 kW 出力のファイバレーザを用いた無酸素銅の加工断面 (a) シングルモードファイバレーザでの加工 (b) マルチモードファイバレーザでの加工

Fig. 6. Cross-section of processed copper plate by 5-kW fiber lasers. (a) By 5-kW single-mode fiber laser. (b) By 5-kW multimode fiber laser.

4. む す び

当社は今回新たに出力 5 kW、 $M^2 = 1.3$ のシングルモードファイバレーザを開発した。レーザは高い SRS 抑制能力をもっており、デリバリファイバ長 20 m においても SRS のストークス光はレーザ光に対し -45 dB に抑えられていた。

また作製したシングルモードファイバレーザを用いて無酸素銅の加工実験を行い、出力 5 kW、走査速度 6 m/min においてアスペクト比 22 という高精度な加工を実現した。高反射材である銅の加工時においてもレーザ出力は安定しており、耐反射性の高さが確認できた。

今後も長いデリバリ長と高い耐反射性を維持しながら、シングルモードファイバレーザの高出力化を推し進めていく。

参 考 文 献

- 1) S. Ikoma, H. K. Nguyen, M. Kashiwagi, K. Uchiyama, K. Shima, and D. Tanaka, "3 kW single stage all-fiber Yb-doped single-mode fiber laser for highly reflective and highly thermal conductive materials processing", Proc. SPIE 100830, 10083Y, 2017.
- 2) K. Uchiyama, S. Ikoma, Y. Takubo, M. Kashiwagi, K. Shima, and D. Tanaka, "High speed laser processing using a 3 kW single-mode fiber laser with a 20-m-long delivery fiber", Proc. of LPM2017, Mo3-O-7, 2017.