

3 kW シングルモード Yb ファイバレーザの特性と加工実証

先端技術総合研究所 生駒 晋也¹・NGUYEN Huy Khanh¹・内山 圭祐¹
柏木 正浩²・島 研介³

3 kW single-mode Yb-doped fiber laser and demonstrations of highly reflective materials processing

S. Ikoma, H. K. Nguyen, K. Uchiyama, M. Kashiwagi, and K. Shima

高出力かつ優れたビーム品質をもつシングルモードファイバレーザにおいて、システムへ導入する際の設計自由度、すなわち十分なデリバリファイバ長と安定した出力光パワーが重要となる。今回、20 m のデリバリファイバ長を有しながら、3 kW 出力時においても誘導ラマン散乱 (SRS) が十分に抑制されたシングルモードファイバレーザを実現した。また、本シングルモードファイバレーザを用いて、高反射率で加工が困難である無酸素銅に対し加工を行い、SRSによるストークス光の発生を抑制することで出力光パワーが不安定にならず、高品質な加工ができることを確認した。

A high power single-mode fiber laser is required sufficient length of delivery fiber and stable output power for the sake of design flexibility of a laser system. A 3 kW all-fiber single-mode Yb-doped fiber laser has been demonstrated. The length of the delivery fiber is 20 m which is long enough to be used in most of laser processing machines. SRS (Stimulated Raman Scattering) is 30 dB below the laser light power at the output power of 3 kW even with a 20-m delivery fiber. The M-squared factor is 1.3. Single-mode beam quality is obtained. And to evaluate practical utility of the 3 kW single-mode fiber laser, BoP (Bead on Plate) demonstration onto a pure copper is carried out.

1. ま え が き

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から、加工分野において加工物への深い溶け込みと細い加工線幅が実現できる。特に、出力光パワーが 1 kW を超える場合でも高いビーム品質を有するため、アルミや銅に代表される、高反射率かつ高熱伝導率の材質にまで加工対象が拡大されている。

近年、出力光パワーが 3~5 kW の高出力シングルモード Yb ファイバレーザの報告がなされている¹⁾。しかし、高出力化に伴い非線形光学効果、特に誘導ラマン散乱 (Stimulated Raman Scattering : SRS) が大きくなり、ファイバレーザの動作が不安定になる問題があった。このため SRS を抑制する目的で、ビームデリバリ部のファイバ長は 10 m 以下と短くする必要があり、高出力シングルモードファイバレーザを加工システム等へ導入する際の障壁となっていた。

この問題を解決するために、これまで当社は 20 m の

ビームデリバリ部分のファイバ長を有し、かつレーザ光と SRS によるストークス光とのパワーの比率を 50 dB 以上まで確保した 2 kW シングルモード Yb ファイバレーザを実現している²⁾。

今回、出力を 1.5 倍の 3 kW に引き上げると共に、SRS によるストークス光とのパワーの比率を 30 dB 以上を確保しつつ、デリバリーファイバ長が 20 m であるシングルモード Yb ファイバレーザを実現した。

このシングルモード Yb ファイバレーザを用いて、レーザ発振波長での反射率が高く、加工が困難である無酸素銅に対して加工を行うことで、SRS で発生するストークス光の抑制に関して評価を行ったので、以下に報告を行う。

2. 3 kW シングルモード Yb ファイバレーザの構成

図 1 に作製した 3 kW シングルモードファイバレーザの構成を示す。このシングルモード Yb ファイバレーザはレーザ発振に必要な励起用半導体レーザダイオードモジュール、Fiber Bragg Grating (FBG)、励起コンバイナ、Yb 添加ファイバ、デリバリファイバ、レーザ光出射端から構成される。

1 ファイバレーザ研究部

2 ファイバレーザ研究部 グループ長 (科学博士)

3 ファイバレーザ研究部 次長

励起光の光共振器への入力励起コンバイナを介して行う。Yb添加ファイバへ3 kW出力に必要な励起光入力を実現するために、双方向励起を行っている。

レーザ発振する光共振器はYb添加ファイバを高反射FBG (HR-FBG) と低反射FBG (OC-FBG) で挟み込む構成となっている。励起光を吸収したYb添加ファイバはFBGの反射波長でレーザ光を発生する。この光共振器に20 mのデリバリファイバを接続し、レーザ光射出端よりレーザ光を射出する。

3. 3 kW シングルモード Yb ファイバレーザの諸特性

図2に作製した3 kWシングルモードYbファイバレーザにおける発振時の出力特性と、ビームの焦点位置における出力光のビームプロファイルを示す。Yb添加ファイバへ結合された励起光量が4 kWの時に、出力光パワーは3 kWを達成した。

また出力光の断面強度分布はガウシアンに近い形状が得られており、ビームプロファイル測定から見積もられたビーム品質 M^2 は1.3であった。以上から、作製したYbファイバレーザにおいて、3 kWの出力光パワーと良好なビーム品質の両立が確認できた。

図3に出力光パワー3 kWでの出力光スペクトルを示

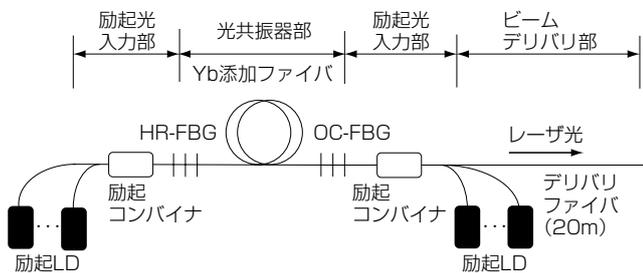


図1 3 kW シングルモード Yb ファイバレーザ構成図
Fig. 1. Schematic configuration of fabricated 3 kW single-mode fiber laser with a 20-m long delivery fiber.

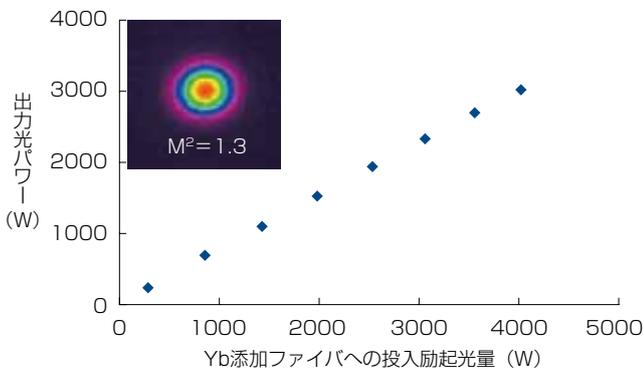


図2 3 kW シングルモード Yb ファイバレーザの出力特性とビームプロファイル
Fig. 2. Output power of 3 kW single-mode fiber laser and beam profile at the focal point.

す。3 kW時にレーザ光とストークス光のパワー比率で30 dB以上を確保できた。以上から3 kW出力かつ、デリバリファイバ長を20 m伝搬したシングルモードのレーザ光では、SRSにより発生するストークス光を抑制できている。

4. 3 kW シングルモード Yb ファイバレーザによる加工検証

ファイバレーザによる加工、特に高出力での加工では、加工物表面からの反射光がデリバリファイバに再結合し、出力光パワーが不安定となる現象が生じやすい。作製したシングルモードYbファイバレーザが、加工物からの反射光によって挙動が不安定とならないかを評価することを目的として、高反射率の材料に対して加工を行い、その際の加工痕とシングルモードYbファイバレーザの挙動から検証を行った。

加工検証における加工条件を表1に示す。被加工物は高反射率かつ高熱伝導率を有し、ファイバレーザ加工では難加工材とされている無酸素銅 (C 1020) とし、加工方法は平板の被加工物表面に集光点を合わせてレーザ照射を行う、ビード・オン・プレート (BoP) とした。

シングルモードYbファイバレーザの3 kW出力時での無酸素銅へのBoP加工断面と、同じ加工条件でのBoP加工を、3 kWマルチモードYbファイバレーザで行った際の加工断面を図4に並べて示す。マルチモードYbファイバレーザに関し、デリバリファイバのコア径は100 μmで、ビーム品質は M^2 値でおよそ13である。シングルモードYbファイバレーザによって無酸素銅に対しても加工幅が狭く、加えて加工深さが深い加工が実現された。一方マルチモードYbファイバレーザではシングルモードYbファイバレーザに対し、加工幅が大きく加工深

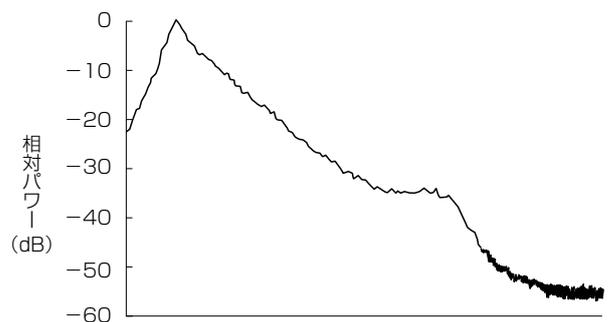


図3 出力光パワー3 kWでの出力光スペクトル
Fig. 3. Output spectra at the laser outputpower of 3 kW.

表1 加工検証における加工条件
Table 1. Test conditions of processing demonstration.

加工ヘッドの光学倍率	1 倍
被加工物	無酸素銅 (C 1020) 厚さ 5 mm
集光位置	加工物表面
加工速度	6 m/分

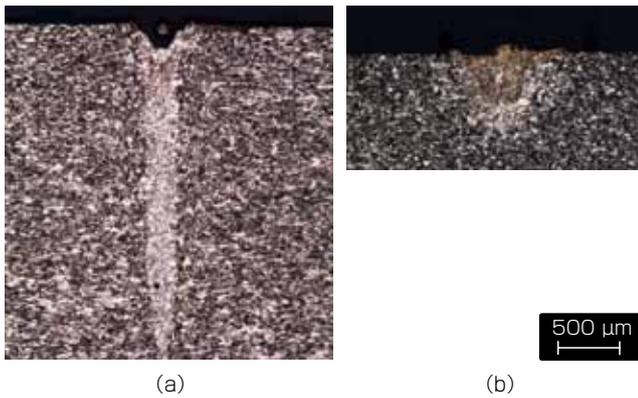


図4 ファイバレーザ 3 kW 出力での無酸素銅への BoP 加工断面
 (a) シングルモードファイバレーザ
 (b) マルチモードファイバレーザ
 Fig. 4. Cross-section of the copper plates molten by 3 kW laser output power.
 (a) Single-mode fiber laser.
 (b) Multi-mode fiber laser.

さも浅いことがわかる。これは、シングルモード Yb ファイバレーザのビーム品質が高く、焦点深度が深いいため、深さ方向に効率よく熱を与えることができるためである。

出力 3 kW におけるシングルモード Yb ファイバレーザとマルチモード Yb ファイバレーザの無酸素銅への加工結果を表 2 に示す。マルチモード Yb ファイバレーザに対して、シングルモード Yb ファイバレーザは加工幅で半分以下、加工深さで約 4 倍の加工が実現できた。

なお 3 kW シングルモード Yb ファイバレーザでの BoP 加工では、無酸素銅から反射してデリバリーファイバに再結合したストークス光は、SRS により増幅はされるものの、HR-FBG の近傍での見積もりは、レーザー光パワーの -30 dB 程度となる。以上からレーザー出力は安定であるといえる。

以上から加工が困難とされている高反射率の材料に対しても、当社の 3 kW シングルモード Yb ファイバレーザでは SRS で発生するストークス光を抑制し、出力不安定にならず高品質の加工が可能であることが確認できた。

表2 各種ファイバレーザにおける 3 kW 出力での無酸素銅への加工結果
 Table 2. Measurements of penetration depth and bead width in the processing demonstrations.

	シングルモード ファイバレーザ	マルチモード ファイバレーザ
加工幅 (mm)	0.52	1.17
加工深さ (mm)	2.60	0.66

5. む す び

当社は今回、デリバリーファイバ長が 20 m であるファイバレーザにおいて、SRS を抑制することでレーザー光とストークス光のパワー比率を約 30 dB とし、シングルモードビーム品質 ($M^2 = 1.3$) と 3 kW の出力光パワーを達成した。

加えてこのシングルモード Yb ファイバレーザの加工における反射光への耐性を検証するため、高反射率の無酸素銅に対して加工を行った結果、反射光の影響を受けずに、安定して高品質な加工ができることを確認した。

今後もデリバリーファイバ長を確保しつつ、SRS を抑制を強化し、加工応用に十分な反射耐性を有するシングルモード Yb ファイバレーザの高出力化を推進していく。

参 考 文 献

- 1) F. Beier, C. Hupel, S. Kuhn, S. Hein, J. Ihring, B. Sattler, N. Haarlammert, T. Schreiber, R. Rberhadrt, and A. Tunnermann: "Narrow linewidth, single mode 3kW average power from a directly diode pumped ytterbium-doped low NA fiber amplifier." Opt. Express Vol. 24, No. 6, 6011-6020, 2016.
- 2) Y. Mashiko, H. K. Nguyen, M. Kashiwagi, T. Kitabayashi, K. shima, and D. Tanaka: "2 kW single-mode fiber laser with 20-m long delivery fiber and high SRS suppression." Proc. of SPIE, Vol. 9728, 972805, 2016.