先端レーザー等を用いた加工技術の研究（第２報）

斎藤　雄治*　長谷川　雅人*　田宮　宏一*　小林　豊*

High Precision Laser Cutting and Welding Using Single-Mode Fiber Lasers

SAITO Yuji*, HASEGAWA Masato*, TAMIYA Kouiti* and KOBAYASHI Yutaka*

抄　　録

ファイバーレーザーはビーム品質が高く集光径を小さくできることから微細加工に適している。本研究では，マグネシウム合金等の金属材料に対してファイバーレーザーによる微細加工の可能性を検討するために，出力 2W のパルス波および出力 100W の連続波のファイバーレーザー発振器を用いて，ビーム特性を調べるとともに微細切断および微細溶接の加工実験を行った。

1. 緒　　言

軽量化，省資源化，高機能化等のため，あらゆる機器や部品に対して小型化や高性能化が望まれている。このため，多くの工業製品に対して微細加工が適用されており，微細加工に関する研究も盛んに行われている。

ファイバーレーザーはビーム品質が高く集光径を小さくできるため，微細加工に適している。このため当センターでは，平成 16 年度よりファイバーレーザーを用いた微細加工の実験を行ってきた。第 1 報では，出力 10W のパルス波レーザーと出力 100W の連続波レーザーを用いた炭素鋼やマグネシウム（Mg）合金の薄板の切断加工と穴あけ加工についての実験結果を示すとともに，有限要素法を用いた穴あけ加工における熱伝導解析の結果を報告した [1]。

本報では，出力 2W のパルス波レーザーと出力 100W の連続波レーザーを用いて Mg 合金やステンレス鋼等の板材の微細切断および，微細溶接について加工実験を行った。その結果，板厚 10μm のステンレス鋼板の重ね合わせ溶接などの微細加工が可能であったので報告する。

2. 実験方法

2.1　ファイバーレーザー発振器

実験には，IPG 社製の平均出力 2W のパルス波レーザー発振器 YLP-0,1/8/20（以降，2W-PW と表記する）および SPI 社製の出力 100W の連続波レーザー発振器 red POWER（以降，100W-CW と表記する）を用いた。2W-PW の本体外観を図 1 に，100W-CW の本体外観を図 2 に示す。またそれぞれの仕様を表 1 に示す。2W-PW の平均出力は 2W と小さいが，ピークパワーは 12-kW 以上と高くパルス幅は 8ns 未満と短いことから，熱影響の小さい微細加工が期待できる。なお，発振器から発振されたレーザー光は光ファ

図 1　2W-PW の本体概観

図 2　100W-CW の本体概観 [2]

＊　中越技術支援センター

表１　実験に用いたファイバーレーザー発振器の主な仕様 [2)3)]

	2W-PW	100W-CW
メーカ(機種名)	IPG 社(YLP-0,1/8/20)	SPI 社(red POWER)
モード	パルス波（PW）	連続波（CW）, 変調波も可能
パルス周波数 (kHz)	20～100	---
出力 (W)	2（平均出力）	100
パルス幅 (ns)	<8 （20kHz において）	---
出力可変範囲 (W)	0.2～2.2	10～100
波長 (nm)	1060～1070	1090±5
ビーム品質 (M^2)	<2	1.1
ピーク出力 (kW)	>12	---
偏光	ランダム	ランダム
コリメート光径 (mm)	6～9	5

イバーで伝送され，コリメータから平行光（コリメート光）となって出力される。

2.2　光学系

本研究では集光性を高くするためコリメート光径を拡大してから集光する光学系を用いた。ここで，集光径 d と集光レンズへの入射径 D との間には回折理論より次式の関係がある [4)]。

$$d = \frac{4}{\pi}\frac{\lambda \cdot f}{D} M^2 \quad \cdots\cdots (1)$$

λ：波長，f：レンズの焦点距離，

M^2：ビーム品質（回折限界で M^2=1）

式（1）より，λが一定の場合，M^2 および f が小さく D が大きいほど，集光径 d は小さくなることがわかる。本研究では，1.5 倍，2.5 倍，4 倍のビームエキスパンダーを用いてコリメート光径を拡大してから集光した。また，f を極力小さくするため，集光レンズの焦点距離 f は 40mm とした。表 1 の特性値と式（1）より，本研究で用いた光学系での最小の集光径は，2W-PW で 1.5 倍のエキスパンダーを使用した場合 8μm，100W-CW で 4 倍のエキスパンダーを使用した場合 5μm となる。実際の集光径はレンズの収差等により，式（1）で求めた値よりやや大きくなると考えられる。

実験は，図 3 に示すように光学系を 5 軸加工機の加工ヘッドに取付けて行った。また，加工材料からの反射光（戻り光）による発振器の破損を防ぐため，レーザー光軸は試料の表面法線に対して 20 度（2W-PW の場合）または 10 度（100W-CW の場合）傾けた。

2.3　コリメート光の出力と強度分布測定

2.1 節で述べた発振器について，発振器の出力設定値に対する実際のコリメート光の出力（コリメータ出力）をオフィール社製のレーザーパワーメーターF150A を用いて測定した。測定は，コリメート光をパワーメーターの検出器に直接照射して行った。

また，発振器から出たレーザー光のビームモードを調べるため，オフィール社製のビームプロファイラーFX-50 を用いて，コリメート光のプロファイル（エネルギー強度分布）を測定し

図 3　5 軸加工機の加工ヘッドに取付けた光学系の外観

た。測定は機器の損傷を避けるため，ビームプロファイラーの直前に透過率 1/50 の ND フィルターを二枚または三枚重ねて設置した。2W-PW については，プロファイラーの受光面に対してコリメート光径が過大のため，1/4 ダウンコリメータでコリメート光径を 1/4 に縮小し測定した。

2.4 焦点位置

集光レンズで絞られたレーザーの光径が最小となる位置が焦点位置である。焦点位置は切断や溶接の加工特性に大きく影響するため，焦点位置の決定はきわめて重要である。本研究では，光学系の加工材料表面からの高さを変えて一定速度でレーザー光を照射した後，断面を研磨・腐食して溶け込み部を金属顕微鏡で観察し，溶け込み深さが最大となる位置を焦点位置とした。加工材料にはステンレス鋼（SUS304）を用いた。

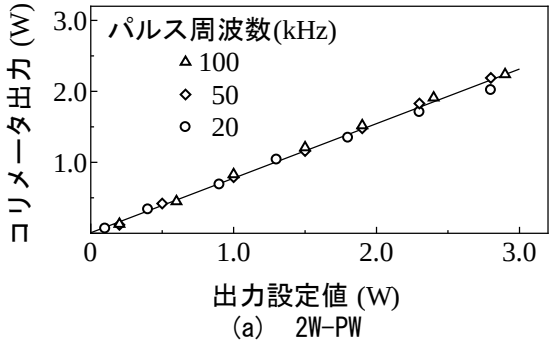
2.5 加工実験

加工材料には Mg 合金（AZ31），ステンレス鋼（SUS304），チタン（Ti）合金（2 種），アルミニウム（Al）合金（A5052）を用いた。それぞれの発振器について，アシストガスの種類やガス圧，レーザー出力，発振モード（パルス波，連続波，変調波），送り速度等を変えて，微細切断および微細溶接の加工実験を行った。100W-PW による Mg 合金の溶接実験を除き，焦点位置は加工材料表面にとった。切断実験は，一定速度でレーザー光を照射後，切断した材料の表面と切断面を顕微鏡で観察した。溶接実験は，同じ板材を二枚重ねたものに一定速度でレーザー光を照射して重ね合わせ溶接した後，断面を研磨して溶接部を金属顕微鏡で観察した。

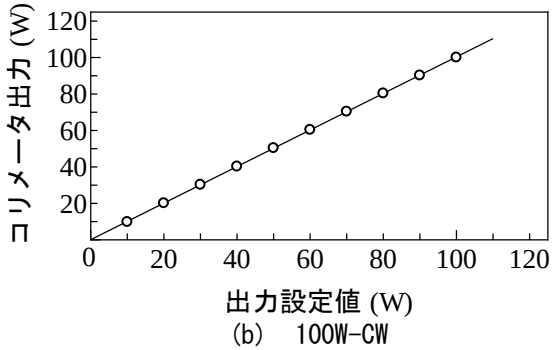
3. 実験結果および考察

3.1 基礎実験

図 4 には，種々の出力設定値に対して測定したコリメータ出力を示した。図中の直線は，最小二乗法による近似直線である。図 4（a）には，パルス周波数を 20，50 および 100kHz とした場合の 2W-PW のコリメータ出力を示した。コリメータ出力の各測定点は直線によく乗っていることから，コリメータ出力は出力設定値に比例して変化することがわかる。また，コリメータ出力は，周波数によらず出力設定値の約 75%に

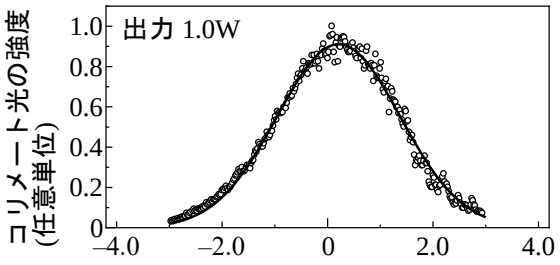


(a) 2W-PW

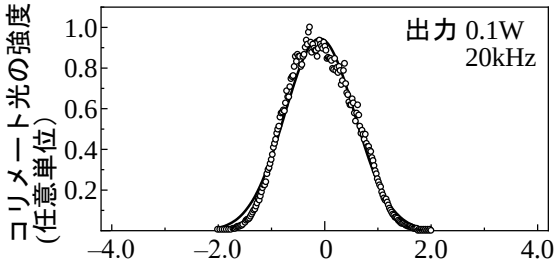


(b) 100W-CW

図 4 出力設定値に対するコリメータ出力



(a) 2W-PW



(b) 100W-CW

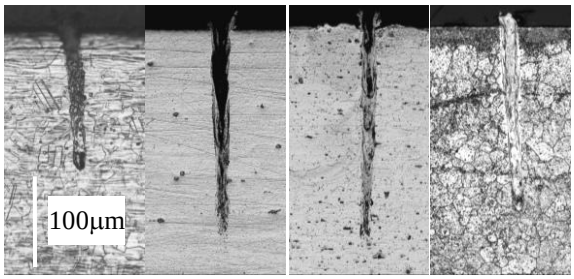
図 5 コリメート光断面の強度分布

表 2　2W-PW の加工条件

実験の種類	レーザー出力 (W)	レーザーパルス周波数(kHz)	送り速度 (mm/min)	アシストガス	アシストガス圧(kPa)
各種金属の溶け込み（図 6）	2.0	20	100	N_2	5
種々の板厚のステンレス鋼の溶接（図 7）	2.0	20	100	N_2	5
板厚 10μm のステンレス鋼の溶接（図 8）	0.07	20	100	N_2	5
板厚 50μm の Mg 合金の切断（図 9）	0.7〜2.0	20	100	N_2	10

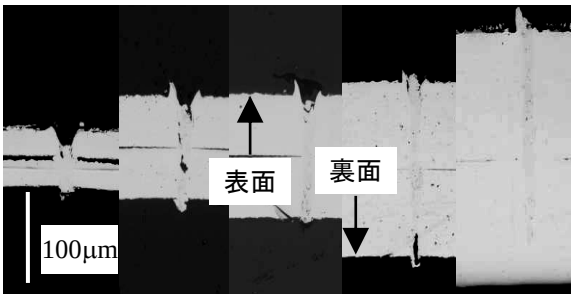
なっていることがわかる。図 4（b）には，100W-CW のコリメータ出力を示した。コリメータ出力は出力設定値に比例しており，値もほぼ一致していることがわかる。

図 5（a）および（b）には，2W-PW および 100W-CW のコリメート光断面の強度分布を示した。図には，コリメート光の強度の各点に最小二乗法を用いて近似したガウス曲線を示した。2W-PW，100W-CW ともにコリメート光の強度の各測定点はガウス曲線によく乗っているため，ビームモードは集光性に最も優れたシングルモード [5]と考えられる。図 5 において，最大強度の 13.5％（$1/e^2$ 値）となるコリメート光径は 2W-PW が 2.4mm，100W-CW が 4.7mm である。ここで，2W-PW のコリメート光径は 1/4 ダウンコリメータを用いた値のため，実際のコリメート光径は 9.6mm となる。これらの測定値は，表 1 に示したコリメート光径とほぼ一致した。



ステンレス鋼　Mg 合金　　Al 合金　　Ti 合金

図 6　各種金属の溶け込み断面



20μm　40μm　50μm　70μm　100μm

図 7　種々の板厚のステンレス鋼の重ね合わせ溶接断面（出力2W）

3.2　2W-PW による加工実験

表 2 に，2W-PW を用いた実験の加工条件を示す。

図 6 に送り速度 100mm/min で各種金属材料にレーザーを照射したときの断面の溶け込み状態の観察結果を示す。溶け込み部のアスペクト比は 8〜19 と大きく，溶け込み深さは Mg 合金と Al 合金で約 230μm，Ti 合金で約 200μm，ステンレス鋼で約 150μm となった。

図 7 にレーザー出力を 2W に設定し，板厚を変えてステンレス鋼を重ね合わせ溶接した断面

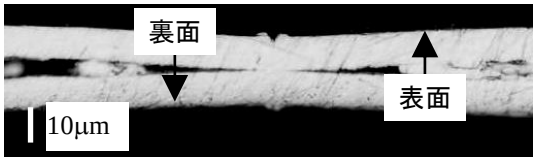
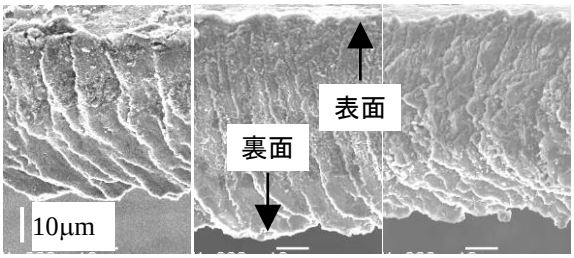


図8　板厚10μmのステンレス鋼の重ね合わせ溶接断面(出力0.07W)



2W　1W　0.7W

図9　板厚50μmのMg合金の切断面

表 3　100W-CW の加工条件

実験の種類	レーザー出力 (W)	レーザー変調周波数 (kHz)	送り速度 (mm/min)	アシストガス	アシストガス圧(kPa)
板厚 0.8mm の Mg 合金の切断（図 10）	100	CW	10	Air	300
板厚 0.2mm の Mg 合金の切断（図 11）	100	CW	10	Air	200
板厚 0.2mm の Mg 合金の高速切断（図 12）	100	CW	5000	Air	200
板厚 0.1mm のステンレス鋼の切断（図 13）	30	1	10	Air	150
板厚 0.17mm の Mg 合金の溶接（図 14）	50	CW	10	Ar	5

の観察結果を示す。溶接部はよく溶け込んでいることがわかる。また，板厚 20～50μm において溶接部の表面側が陥没したように観察されるが，これは板厚に対して照射エネルギーが過大のため，材料が蒸発または溶け落ちたものと考えられる。

図 8 にレーザー出力 0.07W で板厚 10μm のステンレスフィラーゲージを重ね合わせ溶接した断面を示す。レーザー出力を適正にとることにより良好な溶接が可能なことがわかる。

図 9 にレーザー出力を変化させ板厚 50μm の Mg 合金の板材を切断したときの切断面を示す。出力が小さいほど切断面の粗さは小さくなっている。なお，写真では板厚が異なって見えるが，これは撮影時の板の傾きによるものである。

3.3　100W-CW による溶接・切断加工実験

表 3 に，100W-CW を用いた実験の加工条件を示す。

図 10 に板厚 0.8mm の Mg 合金の板材について切断実験を行い，切断幅が最小となったときの試料を示す。熱影響部はわずかで切断幅は 56μm と小さいが，切断面は粗い。

図 11 に板厚 0.2mm の Mg 合金の板材について切断幅が最小となった試料を示す。このときの送り速度は 10mm/min とした。熱影響部はわずかで切断幅は 39μm と小さいが，切断面においてドロスが裏面側に多く出ている。

図 12 に図 11 と同じ板材を送り速度 5000-mm/min で切断した試料を示す。切断幅は 210-μm で，図 11 に示した送り速度 10mm/min の結果と比べてかなり広い。送り速度を大きくすることによって切断幅が大きくなる原因については，さらに実験を重ねて検討する必要がある。

図 13 に板厚 0.1mm のステンレス鋼（SUS-304）の板材について，連続波レーザを 1kHz で

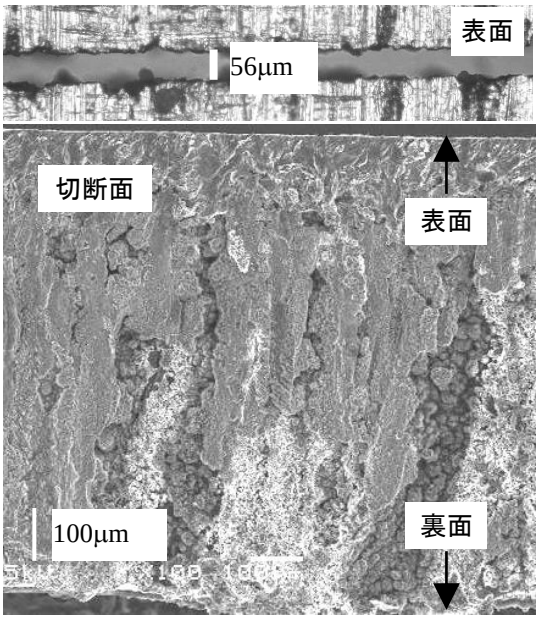


図10　板厚0.8mmのMg合金の切断

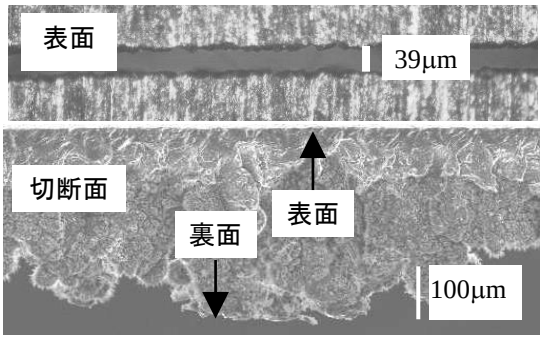


図11　板厚0.2mmのMg合金の切断

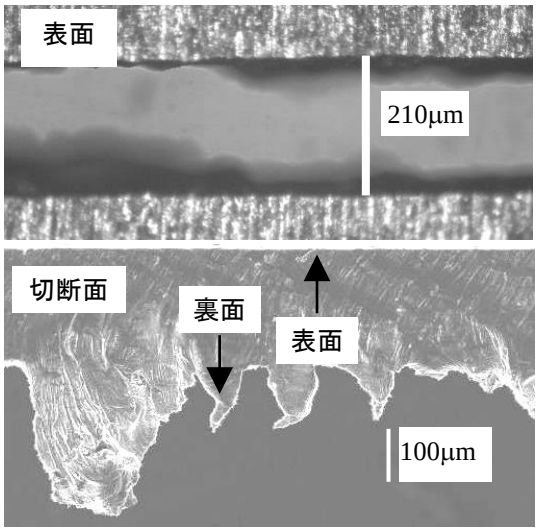


図12　板厚0.2㎜のMg合金の高速切断

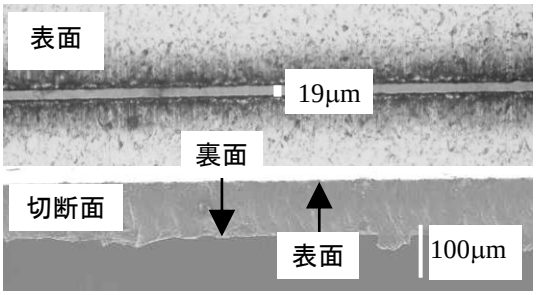


図 13　板厚 0.1㎜ のステンレス鋼の切断

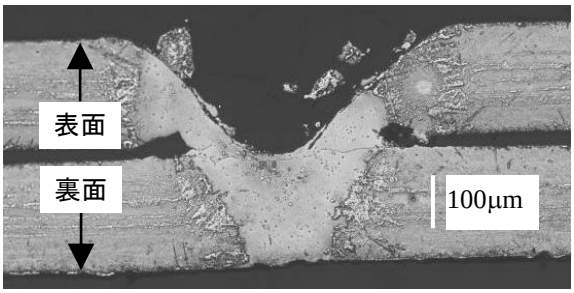


図 14　板厚 0.17㎜ の Mg 合金の重ね合わせ溶接断面

変調して切断実験を行い，切断幅が最小となった試料を示す。熱影響部は少なく，切断幅は19μm と小さい。また，切断面はドロスが少なく良好な状態であることがわかる。

図14に板厚0.17mmのMg合金の板材を重ね合わせ溶接した断面を示す。この試料では，焦点位置を加工材料表面から約1mm上方にずらしてレーザーのパワー密度を小さくするとともにガス圧を5kPaと低くしたにも関わらず，溶接部の表面側が大きく陥没している。これはマグネシウムの沸点が1090℃とステンレス鋼などに比べてかなり低い[6]ため蒸発したものと考えられる。より良い溶接状態を得るにはレーザー出力を小さくすること，焦点位置をさらに上方にすること，集光レンズを変更して集光径を大きくすること等，条件の最適化が必要と考えられる。今後，さらに最適な溶接条件を探るため，実験を重ねていく予定である。

4. 結　　言

2W および 100W のファイバーレーザー発振器のレーザー光を 3～15μm（計算値）に集光して微細切断および微細溶接の加工実験を行った。得られた主な結果は以下のとおり。

(1) 板厚 10μm のステンレス鋼(SUS304)の重ね合わせ溶接が可能なことを確認した。
(2) 板厚 0.8mm の Mg 合金（AZ31）の板材を切断幅約 60μm で切断できた。
(3) 板厚 0.2mm の Mg 合金（AZ31）の板材を切断幅約 40μm で切断できた。
(4) 板厚 0.1mm のステンレス鋼（SUS304）の板材を切断幅約 20μm で切断できた。
(5) 板厚 0.17mm の Mg 合金（AZ31）の板材の重ね合わせ溶接ができた。

参考文献

1) 長谷川雅人他, “先端レーザー等を用いた加工技術の研究”, 工業技術総合研究所工業技術研究報告書, 34, 2005, p.128-133.
2) “100W CW/Modulated High Power Fiber Laser Product Manual”, Southampton Photonics Ltd., p. 1, 19-24.
3) “YLP-0,1/8/20 User’s Guide”, IPG Photonics, p.14-15.
4) 宮本勇, “ファイバーレーザーの応用”, 溶接学会誌, 72, 8, 2003, pp.13-17.
5) 金岡優, “レーザー加工”, 日刊工業新聞社, 1999, p.10.
6) 日本金属学会編, “金属データブック”, 丸善, 1989, p.10.