先端レーザー等を用いた加工技術の研究

長谷川　雅人*　　宮口　孝司*　　小林　豊*　　斉藤　雄治*
樋口　智*　　本田　崇**　　田村　信***

A Study on the Properties of the Advanced Laser Processing Technology

HASEGAWA Masato*,　MIYAGUCHI Takashi*,　KOBAYASHI Yutaka*,
SAITO Yuji*,　HIGUCHI Satoru*,　HONDA Takashi**　and　TAMURA Makoto***

抄　録

高エネルギー密度レーザー光であるファイバーレーザーを使ったマグネシウム等各種材料の高速・高精度切断加工および微細加工の可能性の検討を目的として 10W-PW（パルス）レーザーと100W-CW（連続波）レーザーの特性調査、切断および穴あけの加工実験を行った。さらに有限要素法を用いて穴あけ加工の熱伝導シミュレーションを行った。

1. 緒　　言

近年、小型携帯機器の普及、機能の高度化による部品点数の増加などの理由により高精度微細加工が求められている。本研究ではこれまでの加工用レーザーに比べ、ビーム品質に優れエネルギー密度が高いことから次世代レーザーとして期待されているファイバーレーザーを用いて微細加工技術への応用を検討した。

2. ファイバーレーザーについて

ファイバーレーザーは励起、発振、伝送を全てファイバーの中で行うシンプルな構造のレーザーである。発振用ファイバーはダブルクラッド構造をとり、外側クラッド層に導入された半導体レーザーにより中央部の内部コアを励起してレーザー光を発生する。固定した共振器をもたないためアライメント調整が不要で安定した出力が得られる。また微小径の内部コアの中を伝達することで優れたビーム品質のシングルモードの高密度エネルギー光を発生する。もともとは通信用途に開発されたが、近年大出力化が進み切断、曲げ、溶接など精密微細加工への応用が期待されている。[1)] 図 1 に発振原理を示す。

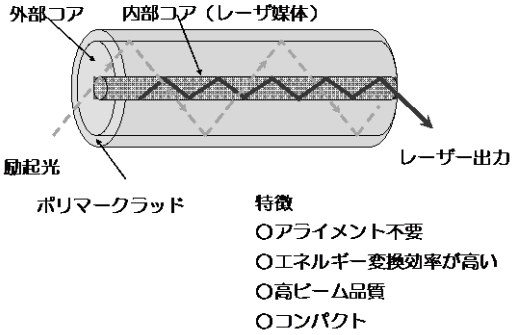


図１　ファイバーレーザーの発振原理

3. 10W-PW ファイバーレーザーによる加工実験

3.1　レーザー発振器

使用したファイバーレーザーの型式と主な仕様を表1に示す。実験は出力10W、周波数100kHzに固定して行った。

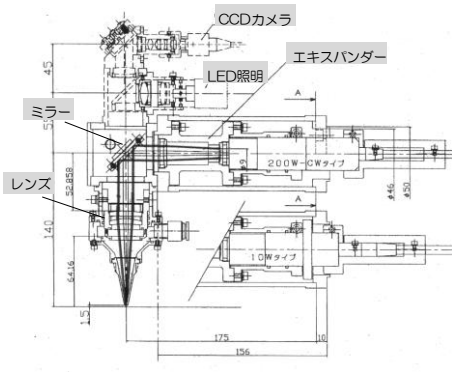
*　　中越技術支援センター
**　　素材応用技術支援センター
***　県央技術支援センター加茂センター

表１　使用したファイバーレーザーの仕様

メーカー・型式	IPG フォトニクスジャパン　YLP-0.5/40/10
最高出力	10W
出力モード	PW(20k～100kHz 可変)
波長	1064nm
M^2	<2

3.2　光学系

図 2 に光学系を示す。光ファイバーから出たレーザー光はコリメートレンズを通った後エキスパンダー（1.5 倍）でビーム径を広げられ、ミラーで 90°向きを変えてレンズで集光され照射される。ビーム径は計算値で約 25μm であるが実際にはレンズの収差があるため 30μm 程度と考えられる。



☆ビーム径は約24μm（計算値）

図２　光学系

3.3　加工機

レーザー発振器を図 3 に示すような 5 軸の加工機に取り付けて実験を行った。また、戻り光による破損防止のためレーザー光は加工材料に対し 10°傾けて照射した（図 4 参照）。

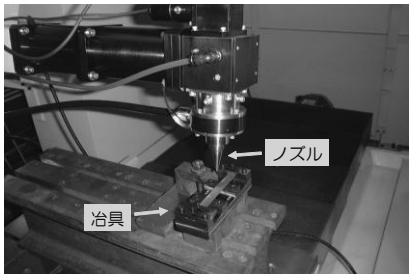
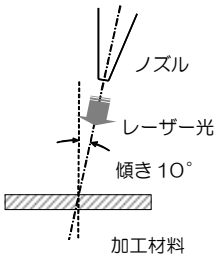


図３　加工ヘッド



戻り光による破損防止
のため入射角 10° で照射

図４　レーザー光の照射角度

3.4　レーザー光の基本特性

3.4.1　出力

光ファイバーから出射されてコリメートされたレーザー光（光学系通過前）、およびその後エキスパンダー、集光レンズの光学系を通過したレーザー光の出力をパワーメーターで測定した結果を図 5 に示す。光学系による減衰率は 5～8%程度であった。

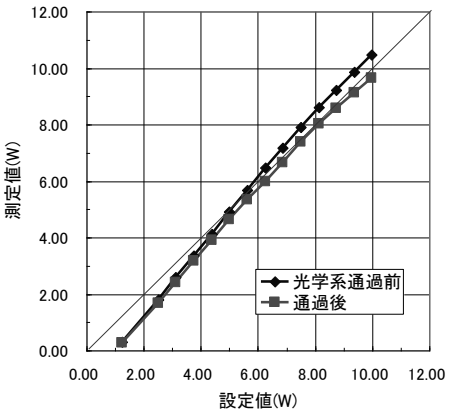


図５　出力測定結果

3.4.2 溶け込み深さによる焦点位置の確認

加工材料表面からノズル先端までの距離をワークディスタンス（WD）とし、これを変えてレーザー光を照射し、その断面の溶け込み深さを観察することによって焦点位置を確認した。加工材料には 250μm の厚さの市販のフィラーゲージ（炭素工具鋼）を使った。レーザー光を照射しながらワークを移動して加工した後、その断面を 10%シュウ酸水溶液中で電解腐食して金属顕微鏡で観察した。加工条件を表 2 に示す。

表２　加工条件

加工材料:炭素工具鋼（t=200μm）
加工速度：0.5m/sec（F500）
アシストガス(N_2)の圧力:0.01MPa

図 6 に WD=0.6mm のときの結果、図 7 に WD と溶け込み深さの関係を示す。写真の白い部分が熱影響を受けて溶け込んだと思われる部分である。その脇の中間色の部分は熱影響部であるが熱影響部は比較的小さな範囲に収まっている。図 7 から WD が 0.5mm～0.6mm のところで最も溶け込みが深く、溶け込み幅が小さい（溶け込み深さのおよそ 1/3）ことからこの付近に焦点位置があると考えられる。また、WD が 0.1～0.3mm、0.8～1.0mm の間では溶け込み方が非対称であり、それぞれの区間で溶け込みの大きい側が逆になっていることからビームが一点に均一に集光されていないものと思われる。逆に一点にきれいに集光するように改善することができればさらなる性能の向上が期待できる。

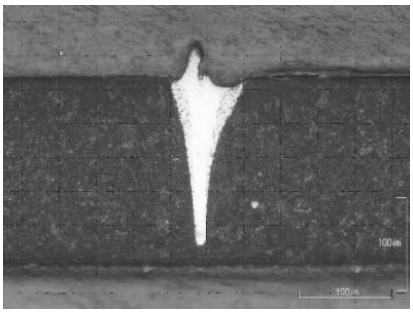


図６　熱影響部の断面写真

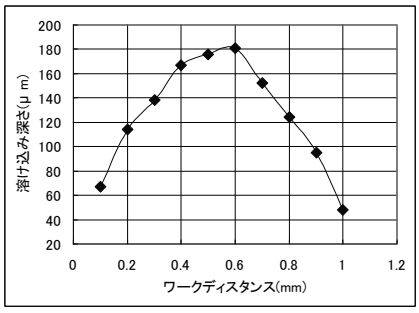


図７　WD と溶け込み深さの関係

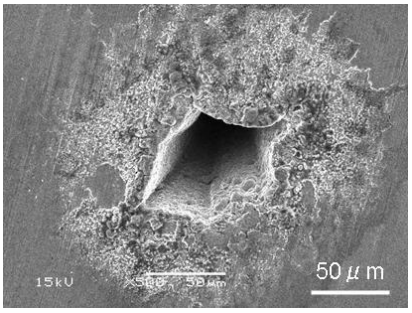
3.4.3　ビームの強度分布

ビームの強度分布を簡易的に検証するため、穴加工後の穴形状と断面形状を SEM と金属顕微鏡でそれぞれ観察した。加工条件を表 3 に示す。

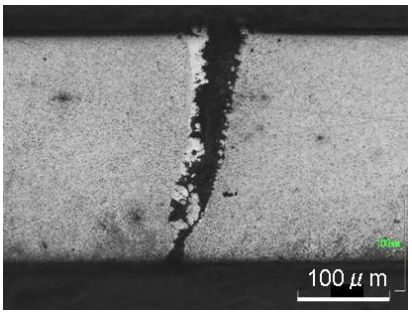
表３　加工条件

加工材料:炭素工具鋼（t=250μm）
レーザー照射時間：30sec
WD=0.5mm
アシストガス(N_2)の圧力：0.05MPa

図 8 に穴加工を行ったときの表面の SEM 写真と断面の金属顕微鏡写真を示す。穴の形状は円形ではなくゆがんだ多角形をしている。この結果は前項の実験結果と一致するものであり、ビームの集光が均一でないことによると考えられる。原因としては、光学系のずれ等に起因することが考えられるが現段階では不明である。光学系の再調整を行い確認が必要であると考える。また、断面写真からは熱影響部分の広がりは少ないことが分かる。



（ａ）表面



（ｂ）　断面

図８　穴形状の観察

3.5　各種条件での切断実験

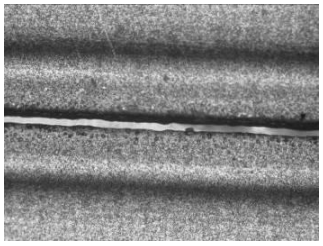
3.5.1　アシストガスの圧力の影響

アシストガスの圧力を変えて切断実験を行い、切断面を実体顕微鏡で観察した。表 4 に加工条件を示す。

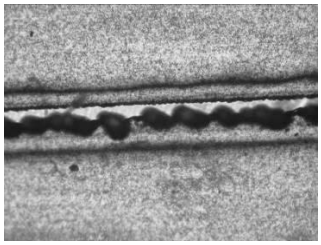
図 9 は切断面の裏側の写真である。アシストガスの圧力が高くなると周辺の熱影響部分は狭くなるもののドロスの付着が多くなった。また切断幅は約 30μm でビーム径の理論計算値 25μm とほぼ同じである。アシストガスとドロスの付着の関係については通常の結果と逆の傾向を示しており、この理由については切断幅、板厚と関連があると推測するが詳しい理由は不明である。

表４　加工条件

加工材料:炭素工具鋼（t=40μm）
加工速度：0.5m/min
WD:0.5mm
アシストガス(N_2)の圧力:0.01～0.80MPa



（ａ）　0.01MPa



（ｂ）　0.8MPa

図９　アシストガスの圧力による切断面の違い

3.5.2　板厚と加工速度の関係

加工材料の板厚と加工速度を変えて切断を行い相関を調べた。表 5 に加工条件、図 10 に結果を示す。板厚は最大 70μm まで切断可能であり、加工速度 3m/min 以上では 40μm 以上の板厚は切断できなかった

表５　加工条件

加工材料：炭素工具鋼（t=30～100μm）
加工速度：0.5～3m/min
WD:0.5mm
アシストガス(N_2)の圧力：0.005MPa

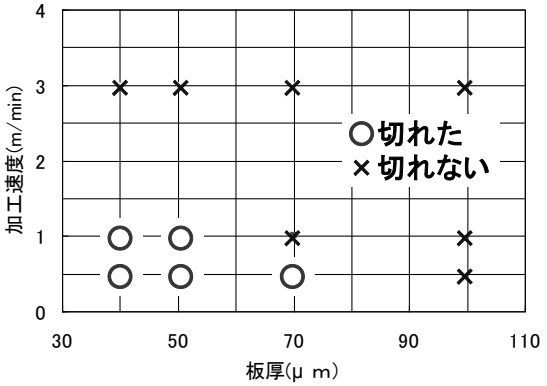


図１０　板厚と加工速度の関係

4. 100W-CW ファイバーレーザーによる加工実験

100W-CW ファイバーレーザーについて基礎的な加工実験を行った。以下に主な実験結果を示す。発振器は IPG フォトニクス社製 YLR-100-M を使用した。

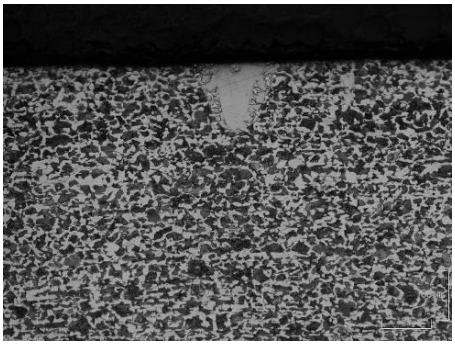
4.1　レーザー照射による断面の溶け込み

加工速度およびレーザーの出力を変えたときのレーザー照射による断面の溶け込みの状態を調べた。表 6 に加工条件、図 11 に加工速度 0.2m/min と 30m/min のときの写真を示す。加工材料は断面を研磨および 5%ナイタール溶液で腐食させ金属顕微鏡で観察した。図 12 は加工速度と溶け込み深さおよび幅の関係を示す。

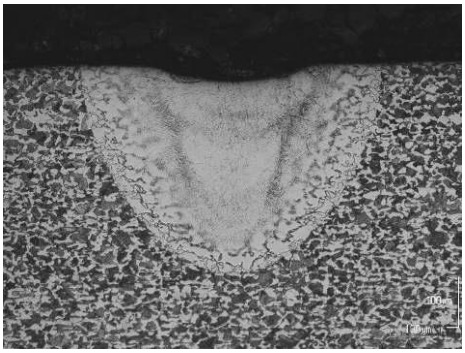
表６　加工条件

加工材料:S45C(寸法 20×12×300mm)
加工速度：0.2～30m/min
WD:0.8mm
アシストガス(N_2)の圧力:0.43MPa

図 11、12 から加工速度が小さいほど溶け込み深さ、幅ともに大きく、溶け込み深さは最大 330μm である。また、溶け込み深さと幅が同程度



（ａ）加工速度 0.2m/min



（ｂ）加工速度 30m/min

図１１　溶け込み深さの観察

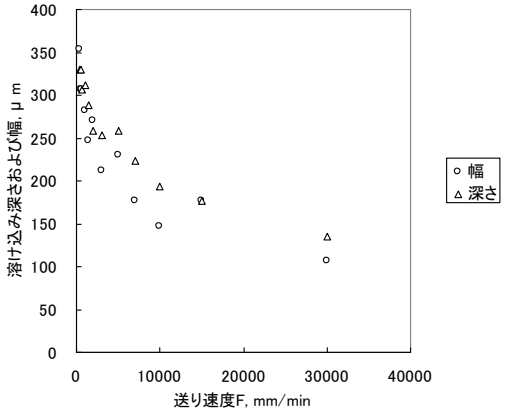


図１２　加工速度と溶け込み深さおよび幅の関係

であり、10W-PW の溶け込み幅が深さの 1/3 程度であったことと比較すると熱影響を受ける面積が広いことがわかる。

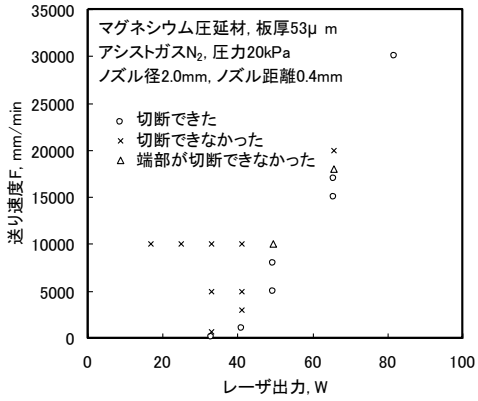
4.2　マグネシウム圧延材の切断

レーザーの出力と加工速度を変えてマグネシウム合金の切断実験を行った。表 7 に加工条件を、図 13 にレーザーの出力と加工速度の関係を、図 14 に切断面の観察写真の一例を示す。出力 81W

表７　加工条件

材料:マグネシウム合金（幅 38mm、厚さ 53μm）
加工速度：0.1～30m/min
WD:0.4mm
ガス圧（N_2）:20kPa

図１３　レーザー出力と加工速度の関係



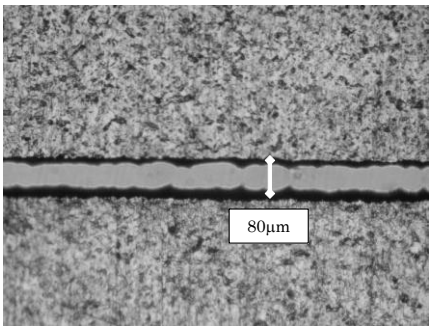


図１４　切断面の一例（加工速度 1m/min、アシストガスの圧力 0.05MPa、WD=0.4mm）

（最大出力）の場合、加工速度 30m/min で切断可能であった。また切断幅は約 80μm でビーム径の理論値 29μm に比べ大きかった。

5.　有限要素法による熱伝導解析

ファイバーレーザーによる穴あけ加工における穴形状や熱影響の違いを調べるため、有限要素法による熱伝導解析を行った。解析は汎用の非線形構造解析プログラム MARC（日本マーク㈱）を用いて行った。

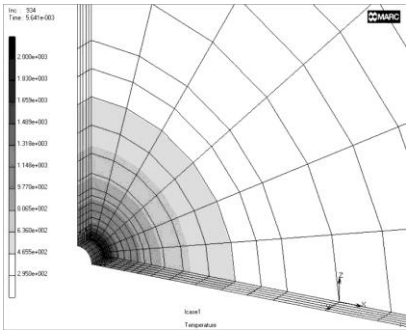
5.1　解析条件

100W-CW、10W-PW、10W-PW の 3 種類につい

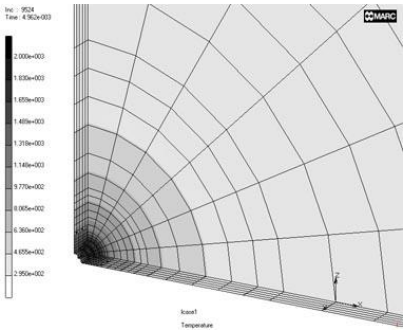
て解析を行った。レーザーの出力分布は焦点の径における出力の値とレーザー中心におけるピーク値との比が 1/e^2 となるように設定した（e は自然対数)。パルス出力の 10W は平均での値であり、レーザー照射の ON/OFF が単純に繰り返されると仮定して解析を行った。

表８　解析条件

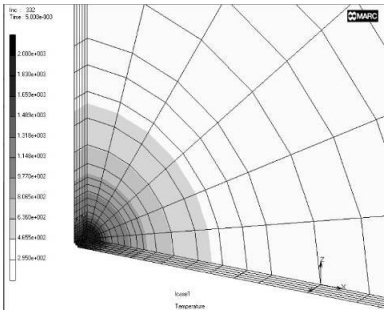
出力方式	CW	PW
出力(W)	100、10	10(平均値)
周波数(kHz)	－	20
ビーム径(μm)	40	40



（ａ）　100W-CW



（ｂ）　10W-PW



（C）　10W-CW

図１５　解析結果

5.2　解析結果

図 15 にステンレス（SUS304）板（t=40μm）にレーザーを照射したときの解析結果を示す。

レーザー光の吸収率は 35%、照射時間 0.005sec とした。100W-CW と 10W-PW ではどちらも穴は貫通しており 100W-CW のほうが熱影響が大きく穴の大きさも大きい。この結果は前述の実験結果とも一致する。10W-CW と 10W-PW では 10W-CW のほうが穴の大きさは小さいが熱影響は大きい結果となった。これはパルス波のほうが出力のピーク値が大きいため融解温度に達する体積が大きくなり、連続波では加熱時間が長いために熱影響を受ける面積が広がるものと考える。

6. 結　　言

１　10W-PWファイバーレーザーによる加工実験

（１）厚さ70μmの炭素工具鋼の板材を切断できた。このときの切断幅は約30μmで、ビーム径の理論値（25μm）とほぼ一致した。

（２）レーザー照射によって生じる溶け込みの幅は、溶け込み深さの約1/3であった。

（３）穴加工の形状は円形とならずに多角形となった。この原因については今後検討する。

２　100W-CWファイバーレーザーによる加工実験

（１）厚さ53μmのマグネシウム合金の板材を加工速度30m/minで切断できた。このときの切断幅は約80μmで、ビーム径の理論値（29μm）に比べて大きかった。

３　穴あけ加工の熱伝導シミュレーション

（１）熱影響を受ける範囲および穴の大きさは100W-CWのほうが10W-PWよりも大きい。

（２）同じ出力10WでCWはPWに比べ融解する体積は小さいが、その分周囲に広がる熱量は大きい結果となった。

参考文献

１）朴, 大家, 宮本, ”シングルモードファイバーレーザーによる精密微細溶接”，レーザ加工学会誌，vol.11,No1(2004)