

Qスイッチパルスファイバレーザによる マグネシウム合金 MS-AZ31B のレーザ切断加工に関する基礎的検討

北田 良二*

Fundamental Study on Laser Cutting of Magnesium Alloy MS-AZ31B Using Q-Switched Fiber Laser

by
Ryoji KITADA *

要 旨

実用金属のなかで最軽量であるマグネシウム合金は、軽量化を目的として、自動車や携帯電話など多くの分野への実用展開が進んでおり、持続的社會に対して必要不可欠な実用金属となっている。しかしながら、マグネシウム合金には、引火や発火がしやすいといった欠点があるため難加工材として知られており、加工技術の研究開発は重要な取り組みとなる。例えば、レーザ加工においては、機械加工の課題であるマグネシウム合金の切りくずの後処理を検討する必要がある。また、無負荷加工であるため、柔らかいマグネシウム合金であっても薄板や長尺品の加工が可能となる。

本研究では、Qスイッチパルスファイバレーザを用いて、汎用的に使用されているマグネシウム合金 MS-AZ31B の薄板に対して、レーザ光を重ね走査することでレーザ切断加工の可能性について検討した。レーザ重ね走査回数に対する切断加工特性を評価した結果、レーザ重ね走査回数5回以上のレーザ高速走査において、最大切断溝幅 0.25 mm 程度、最大デブリ高さ 0.25 mm 程度、最大ドロス高さ 0.05 mm 程度の熱影響が抑制された高品質な切断加工が可能であることが明らかとなった。

Key Words : Q-switched fiber laser, Laser cutting, Magnesium alloy, Kerf width, Dross, Debris

1. はじめに

マグネシウム合金には、軽量、高い比強度・比剛性、放熱性など他の実用金属にはない優れた材料特性がある¹⁾。そのため、軽量化などを目的として自動車や航空機などの輸送機類、ノートパソコンや携帯電話などの電子機器類への実用展開が進んでいる。したがって、マグネシウム合金の市場規模は年々拡大しており、持

続的社會に対して必要不可欠な実用金属として注目されている²⁾。しかしながら、マグネシウム合金には耐食性が低い、引火や発火がしやすいといった欠点がある。その一方で、マグネシウム合金の欠点である燃焼性を解決するために難燃性・耐熱性マグネシウム合金の開発が進められており、今後の実用展開が期待される³⁾。

このようにマグネシウム合金には実用金属として多くの利点があるが、難加工材であるため実用展開において加工技術の研究開発は極めて重要となる。例えば、切削加工などの機械加工

*崇城大学工学部機械工学科教授

を行う場合、切りくずの処理を適切に行わなければ発火する恐れがある⁴⁾。また、レーザ加工においては、適切な加工条件でなければレーザ加工熱によって容易に燃焼してしまう⁵⁾⁻⁷⁾。しかしながら、レーザ加工には機械加工の課題であるマグネシウム合金の切りくずの後処理を検討する必要がなく、無負荷加工であるため、柔らかいマグネシウム合金であっても薄板や長尺品の加工が可能となる。そこで、マグネシウム合金へレーザ加工を適用する基礎的な研究に注目した⁵⁾⁻⁷⁾。これまでに、金属材料などの切断加工で汎用的に使用されている炭酸ガスレーザを用いて、マグネシウム合金の薄板に対する切断加工特性を調査した⁸⁾。また、金属材料に対する吸収性がよく、反射の影響が少ないためにアルミニウム合金や銅などの切断加工に適しているQスイッチパルスファイバレーザをマグネシウム合金薄板の切断加工へ適用することを検討してきた⁹⁾。それらの結果、マグネシウム合金に対するレーザ切断加工の適用可能性が示された。今回、Qスイッチパルスファイバレーザを用いて、汎用的に使用されているマグネシウム合金MS-AZ31Bの薄板に対して、レーザ光を高速で重ね走査するレーザ切断加工について検討したので報告する。

2. マグネシウム合金のレーザ切断加工実験方法

2.1 マグネシウム合金試験片

マグネシウム合金は、JIS規格に基づき組成と物性値が異なる多くの種類があるが、本研究では加工性に優れて最も汎用的に使用されているマグネシウム合金であるMS-AZ31Bを使用した¹⁰⁾。表1にMS-AZ31B(押出型材)の化学組成および物理的性質を示す¹¹⁾⁻¹³⁾。Alを3mass%、Znを1mass%含有した、規格順位がBのマグネシウム合金である。

切断加工実験に使用したマグネシウム合金MS-AZ31Bの試験片サイズは、長さ50mm、幅10mm、厚み 0.5 ± 0.02 mmに統一することで、試験片サイズがレーザ切断加工に影響しないようにした。試験片の外観写真を図1に示す。試

験片は押出し材を切り出して製作しており、試験片表面はフライス加工面とした。

通常、金属のレーザ加工においてはレーザ光を反射しやすいため加工効率が悪い^{14,15)}。そこで、試験片をアセトンで超音波洗浄した後に、レーザ光吸収剤(ファインケミカルジャパン、ブラックガードスプレーFC-153)を浸漬法により均一に塗布(両面膜厚約 $10 \mu\text{m}$)することでレーザ切断加工時のレーザ光反射を抑制して、レーザ光を安定して吸収させた。試験片1枚につき1ラインのみレーザ光を走査してレーザ切断加工を行い、レーザ切断加工した後に試験片に塗布されたレーザ光吸収剤をエタノール洗浄で除去した。

2.2 Qスイッチパルスファイバレーザによるマグネシウム合金の切断加工法

Qスイッチパルスファイバレーザによる切断加工実験の模式図およびレーザ切断加工の様子を図2に示す。レーザ光をガルバノミラーで走

表1 マグネシウム合金MS-AZ31B(押出型材)の化学組成と物理的性質

標準化学組成 [mass%]	Al 2.4 ~ 3.6, Mn 0.15 ~ 1.0, Zn 0.50 ~ 1.5, Fe 0.005 以下, Si 0.10 以下, Cu 0.05 以下, Ni 0.005 以下, Ca 0.04 以下, Mg 残部
比重(室温)	1.78
融点(概略値) [°C]	固相点 575 液相点 630
発火温度 [°C]	470 ~ 550
線膨張係数(20~200 °C) [$10^{-6}/\text{K}$]	26.0
熱伝導率(20 °C) [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]	75
比熱(20 °C) [$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$]	1.05
ヤング率 [GPa]	45
引張強さ(室温) [MPa]	255
0.2% 耐力 [MPa]	200
せん断強さ [MPa]	130
伸び [%]	12
硬さ [HR]	49

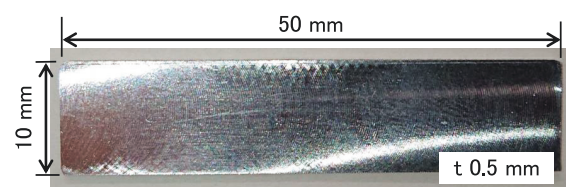
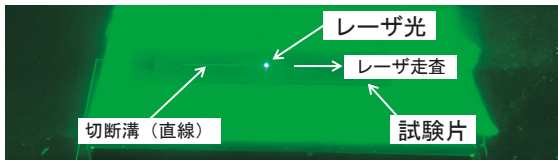
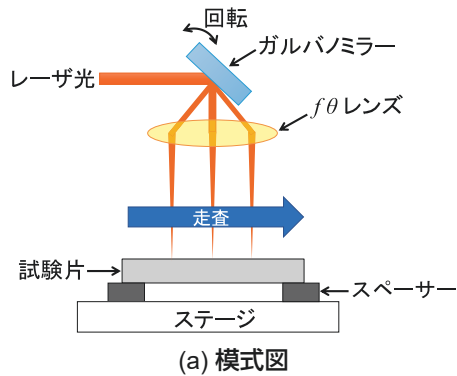


図1 マグネシウム合金MS-AZ31B試験片の外観写真

査しながら試験片表面に向けて垂直に曲げて、 $f\theta$ レンズ（焦点距離 160 mm）にてレーザ光を絞って試験片表面へ照射した。スペーサーの上に固定された試験片に対して、レーザ出口側をステージ上から浮かせた状態で、レーザ光を所定の走査速度と重ね走査回数で走査することで試験片裏面へレーザ光を貫通させて切断加工した。このとき、レーザ光の焦点位置は試験片表面として、焦点位置におけるスポット径は 0.045 mm である。加工雰囲気は大気であり、レーザ光を吸収した試験片材料がレーザ熱加工により除去されることで切断される。

レーザ切断加工実験で使用した Q スイッチ



(b) 切断加工の様子

図 2 レーザ切断加工法

表 2 Q スイッチパルスファイバレーザ加工機の主な仕様

メーカー	株式会社フジクラ
型式	FLP-G11-100-10-7-04
レーザ発振器	Qスイッチパルスファイバレーザ
出力	100 W
発振モード	Qスイッチパルス
偏光	ランダム
中心波長	1088 nm
繰り返し周波数	100-200 kHz
パルス幅 τ	50-200 ns @ 100~200 kHz 90 ns: 100 kHz 110 ns: 150 kHz 114 ns: 200 kHz
パルスエネルギー	1.0 mJ @ 100 kHz
ピーク出力 P_{max}	≥ 6.5 kW (typ.7.0 kW)
ビーム品質 (M^2)	≤ 1.8 (typ.1.5)
ビーム径 (4σ)	7 mm

パルスファイバレーザ加工機の主な仕様を表 2 に示す。また、Q スイッチパルス発振によるレーザパルスの模式図を図 3 に示す¹⁶⁾。本装置では、レーザ出力（図 3 の平均出力 P_{ave} ）、繰り返し周波数（図 3 の $1/\text{周期 } T$ ）、レーザ走査速度、レーザ重ね走査回数を制御することができる。予備実験の結果、マグネシウム合金 MS-AZ31B の切断加工が可能であるレーザ走査条件として、表 3 に示すレーザ走査条件（設定値）に固定して試験片の切断加工実験を実施した。試験片 1 枚に対してレーザ光を 1 回以上重ね走査することで形成された 1 ライン（レーザ走査長さ 30 mm）の切断加工溝について、溝性状やドロソ高さなどの切断加工特性を評価した¹⁷⁾。

3. マグネシウム合金のレーザ切断加工結果および考察

3.1 レーザ重ね走査における切断加工溝性状の変化

表 3 に示すレーザ走査条件において、レーザ重ね走査回数 1 回、レーザ走査速度 1.3 mm/s（最低走査速度）にて切断加工した試験片の外観写真（レーザ光吸収剤除去後）を図 4 に示す。レーザ入射側に切断加工溝を確認できる。また、

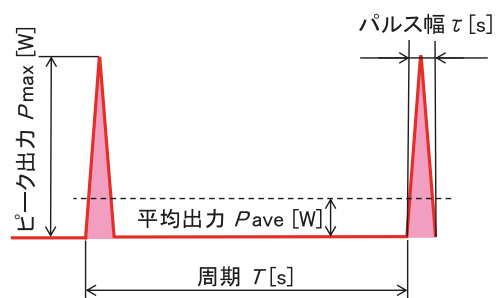


図 3 Q スイッチパルス発振によるレーザパルス

表 3 レーザ走査条件（設定値）

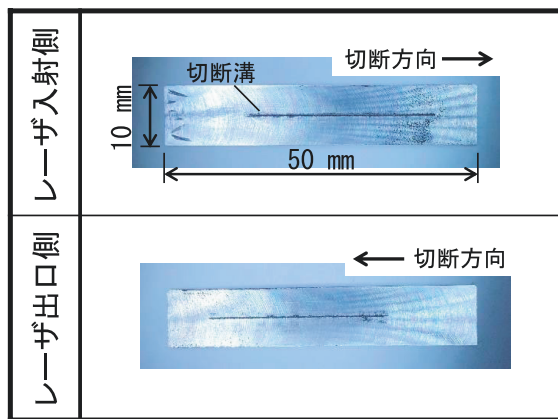
パラメータ	水準
レーザ出力	100 W
繰り返し周波数	200 kHz (パルス幅 114 ns)
焦点位置	試験片表面 (スポット径 0.045 mm)
レーザ走査長さ	30 mm
加工雰囲気	大気

レーザ出口側においても、レーザ光が貫通した切断加工溝が確認できる。したがって、レーザ走査によってマグネシウム合金 MS-AZ31B の切断加工が可能であるとわかった。しかしながら、切断加工溝には溶融再凝固物が付着しており、レーザ光を完全に貫通させた良好な切断溝は得られなかった。そこで、レーザ光を高速で重ね走査することで、切断溝に溶融再凝固物の付着が少ない良好な切断加工が可能であるのか検討した。

表3に示すレーザ走査条件でレーザ走査時間を23秒に固定して、レーザ重ね走査回数を1回、2回、3回、4回、5回、10回と変化させて切断加工実験を行った。表4にレーザ重ね走査回数とレーザ走査速度の関係を示す。レーザ重ね走査回数が増えるほどレーザ走査速度は速くなる。繰り返し周波数は200 kHzに固定されているため、パルスレーザ照射のビームスポットの重なり率であるオーバーラップ率は、レーザ重ね走査回数が増えるほど低くなる¹⁸⁾。したがって、オーバーラップ率の高いレーザ重ね

走査回数が少ない場合は、試験片表面のマグネシウム合金は高温となり昇華による除去加工が支配的になるものと考えられる。一方、レーザ重ね走査回数が多い場合は、オーバーラップ率が低く、パルスレーザが離散的に照射されることから、マグネシウム合金は溶融と蒸発・飛散による除去加工が支配的になるものと考えられる。

レーザ重ね走査回数に対する試験片の切断加工溝性状の変化を光学顕微鏡(松電舎、高倍率USB3.0マイクロスコープFZR350PC2)により観察した結果を図5に示す。レーザ重ね走査において切断方向は図中の一方向のみであり、重ね走査間でインターバルは設けていない。そして、同一レーザ走査条件において2回以上の実



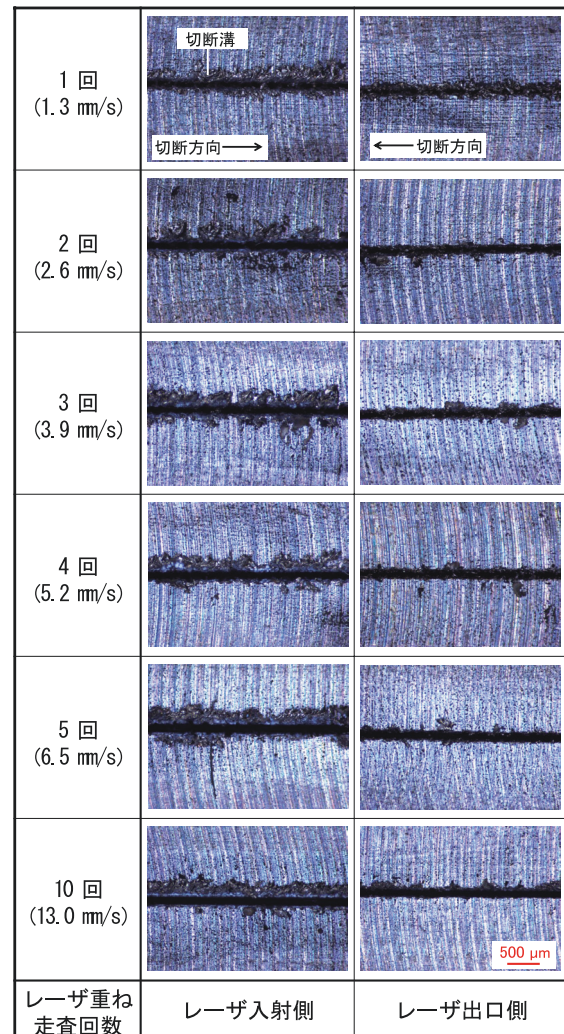
レーザ出力：100 W，繰り返し周波数：200 kHz，
レーザ重ね走査回数：1回，レーザ走査速度：1.3 mm/s

図4 レーザ切断加工試験片の外観写真

表4 レーザ重ね走査回数とレーザ走査速度(設定値)

レーザ重ね走査回数	レーザ走査速度
1回	1.3 mm/s
2回	2.6 mm/s
3回	3.9 mm/s
4回	5.2 mm/s
5回	6.5 mm/s
10回	13.0 mm/s

レーザ走査時間：23 s



レーザ出力：100 W，繰り返し周波数：200 kHz，
レーザ走査時間：23 s

図5 レーザ重ね走査回数と切断加工溝性状の関係

験をしており再現性を確認した。レーザ重ね走査回数2回～4回の試験片では、1回と比較して、切断溝内の溶融再凝固物は少なく付着量は微量であった。また、レーザ光はレーザ出口側に貫通しており、直線状に綺麗に切断されていた。そして、レーザ重ね走査回数5回および10回の試験片では切断溝内の溶融再凝固物はほとんどなく、切断溝は綺麗な直線であった。同一レーザ走査時間でレーザ重ね走査回数を増やすことで、走査回数が増えるほど高速走査となるために熱影響が抑制され、レーザ重ね走査回数10回のように熱影響の少ない良好な切断加工が得られたものと考えられる。切断溝幅をみると、レーザ入射側および出口側ともに、レーザ重ね走査回数が増えるほど広がる傾向であるが、レーザ重ね走査回数4回以上においては、その変化は小さくなった。レーザ入射側のデブリ発生においては、レーザ重ね走査回数が増えるにしたがってデブリ付着量は多くなり切断溝周辺に広がる傾向となった。一方、レーザ出口側のドロス発生においては、レーザ重ね走査回数が増えるにつれて少なくなる傾向となった。

以上の結果より、同一レーザ走査時間において、レーザ重ね走査回数を増やしてレーザ走査速度を高速にすることで、熱影響を抑制した溶融再凝固物の付着が少ない良好な切断溝が得られることがわかった。一方、レーザ走査回数に対して切断溝幅やドロスおよびデブリ発生に変化がみられた。そこで、図5の試験片について、レーザ重ね走査回数に対する切断溝幅、ドロス高さおよびデブリ高さの変化を評価した。

3.2 レーザ重ね走査における切断溝幅の変化

レーザ重ね走査回数に対する切断溝幅の変化を測定顕微鏡（ニコンインスティック、測定顕微鏡 MM-22）により測定した結果を図6に示す（ただし、レーザ重ね走査回数1回は、切断溝幅内に溶融再凝固物が多く付着しており、切断溝幅を明確に測定できなかったため評価外とした）。グラフ内のプロットは、レーザ入射側およびレーザ出口側の最大切断溝幅の測定結果であり、実験回数2回の測定結果を各レーザ重ね走査回数に対して示したものである。

レーザ入射側の結果を見ると、レーザ重ね走査回数2回から5回までは、走査回数が増えるにしたがって直線的に切断溝幅が増加することがわかる。一方、レーザ重ね走査回数5回と10回においては、切断溝幅は大きく変化していない。同一レーザ走査時間において、レーザ重ね走査回数を増加すると、レーザ走査速度が速くなるため、切断溝内の溶融再凝固物が段階的に除去されやすくなり、切断溝幅が広がった結果であると考えられる。そして、レーザ重ね走査回数5回以上においては、レーザ光が試験片を貫通するのみとなり、除去加工量は大きく増加しなかったため、切断溝幅の変化は起こらなかったものと考えられる。一方、レーザ出口側の傾向をみると、レーザ入射側と同様の傾向であることがわかる。レーザ入射側と同様に、レーザ重ね走査による除去加工量の変化が影響した結果であると考えられる。

次に、レーザ入射側と出口側の切断溝幅の大きさを比較すると、全体的に入射側が広く、出口側が狭くなっていることがわかる。レーザ光の焦点位置は、試験片表面であるため、入射側でのレーザ光吸収が強く除去加工が大きくなるため、このような切断溝幅の違いが発生したものと考えられる。また、レーザ重ね走査により、段階的に除去加工が進行することから、レーザ入射側と出口側の切断溝幅が異なるテーパ形状の切断加工断面が発生しやすくなったものと考えられる。

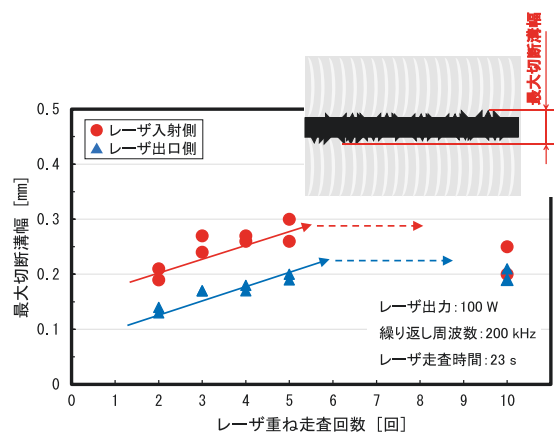


図6 レーザ重ね走査回数と最大切断溝幅の関係

3.3 レーザ重ね走査におけるデブリ高さおよびドロス高さの変化

レーザー重ね走査における切断溝に発生したデブリおよびドロスの状態について、切断溝周囲の最大デブリ高さと最大ドロス高さを測定顕微鏡（ニコンインスティック、測定顕微鏡 MM-22）により測定した。

レーザー重ね走査回数に対する最大デブリ高さの測定結果を図7に示す。グラフ内のプロットは、実験回数2回の測定結果を各レーザー重ね走査回数に対して示したものである。最大デブリ高さは、レーザー重ね走査回数を増すと、走査回数1回から5回までは、走査回数が増加するにしたがって直線的に高くなることわかる。そして、レーザー重ね走査回数5回と10回では、最大デブリ高さは同程度であり、5回以上の走査回数になるとデブリ付着量は飽和している。この最大デブリ高さの傾向は、図6に示す切断溝幅の変化と一致している。レーザー重ね走査回

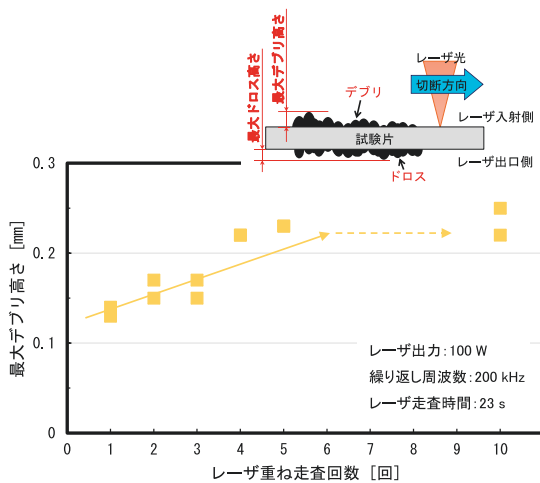


図7 レーザ重ね走査回数と最大デブリ高さの関係

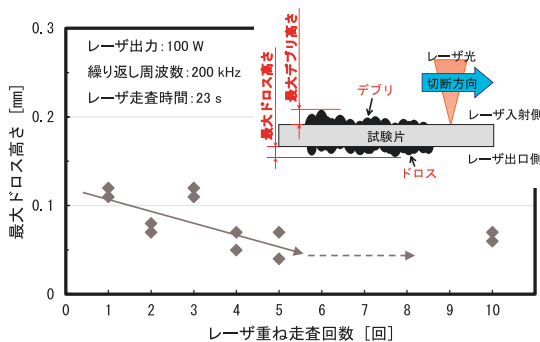


図8 レーザ重ね走査回数と最大ドロス高さの関係

数が多くなるほど除去加工量が増えて切断溝幅が大きくなるため、デブリ付着は増加したものと考えられる。そして、レーザー重ね走査回数5回以上においては、切断溝幅は変化しなかったため、切断における除去加工量も変化せず、最大デブリ高さは飽和したものと考えられる。

最大デブリ高さと同様に、レーザー重ね走査回数に対する最大ドロス高さの測定結果を図8に示す。最大ドロス高さは、レーザー重ね走査回数を増すと、走査回数1回から5回までは、走査回数が増加するにしたがって直線的に低くなることわかる。そして、レーザー重ね走査回数5回と10回では、最大ドロス高さは同程度であり、5回以上の走査回数になるとドロス付着量は飽和している。このレーザー重ね走査回数と最大ドロス高さの傾向は、図6に示す切断溝幅の傾向と一致している。レーザー重ね走査回数が増えるほど切断溝幅が広がるため、切断溝から除去加工されたマグネシウム合金の溶融物が排出されやすくなった結果であると考えられる。そして、レーザー重ね走査回数5回以上においては、切断溝幅は変化しなかったため、除去加工量も変化せず、最大ドロス高さは飽和したものと考えられる。

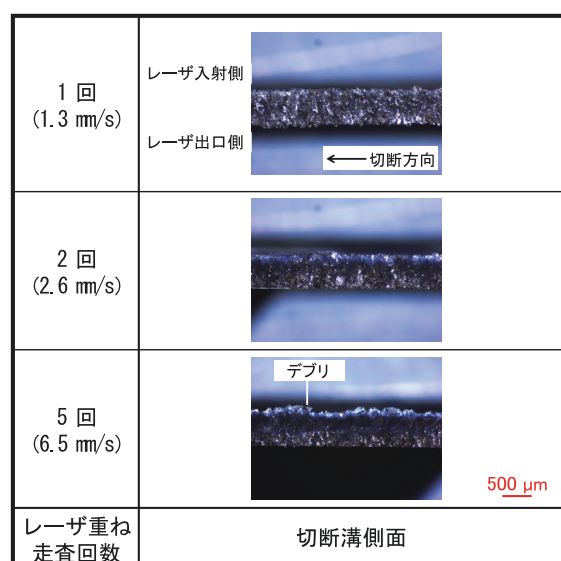
次に、レーザー重ね走査回数における最大デブリ高さと最大ドロス高さの傾向をみると、相反する傾向であることがわかる。これは、レーザー重ね走査回数における切断溝幅の傾向が影響した結果であると考えられる。切断溝幅が広いほど、マグネシウム合金の除去加工量が増えるため、レーザー入射側のデブリ付着が多くなる。一方、レーザー出口側への溶融除去加工物は排出されやすくなるためドロス付着は少なくなるものと考えられる。また、最大デブリ高さと最大ドロス高さを比較すると、最大デブリ高さのほうが、最大ドロス高さよりも全体的に高い。これも、切断溝幅の傾向が影響した結果であり、レーザー入射側の切断溝幅は出口側よりも広いいため、溶融除去加工物がレーザー入射側により多く飛散して、デブリ付着高さはドロス付着高さよりも高くなったものと考えられる。

3.4 レーザ重ね走査における切断溝側面の観察

レーザ切断加工においては、切断面の状態が加工品質を左右するため、切断溝側面の評価が重要となる¹⁷⁾。そこで、レーザ重ね走査における図5の試験片について、光学顕微鏡（松電舎、高倍率 USB3.0 マイクロスコープ FZR350 PC2）により切断溝側面の状態を観察した。

図9に、レーザ重ね走査における試験片の切断溝側面観察結果を示す。レーザ重ね走査回数1回の切断側面の状態をみると、デブリ付着は他の走査回数と比べると少なく、ドロス付着はほとんど確認できなかった。そして、レーザ重ね走査回数が増加するにしたがってデブリ付着は多くなることが確認された。一方、ドロス付着においては、レーザ重ね走査回数を増やしてもほとんど確認することはできなかった。切断側面観察の結果から、デブリ付着およびドロス付着の傾向は、図7および図8の最大デブリ高さおよび最大ドロス高さの傾向とよく一致していることがわかった。

次に、切断溝側面の粗さと熱影響の状態をみると、レーザ重ね走査回数が増えるにしたがって、側面は溶融再凝固物により滑らかとなっていることがわかる。一方、レーザ光が複数回入射されることにより、側面は、入熱による酸化のため黒色への変色が大きくなっていることが



レーザ出力：100 W，繰り返し周波数：200 kHz，
レーザ走査時間：23 s

図9 レーザ重ね走査回数と切断溝側面の関係

わかる。

以上の結果より、レーザ光を高速で重ね走査して切断する場合、デブリ付着や入熱による側面の酸化と変色が切断加工品質の課題になるものと考えらえる。

4. まとめ

汎用マグネシウム合金 MS-AZ31B の薄板（厚み 0.5 mm）に対して、Q スwitchパルスファイバレーザを重ね走査することにより切断加工実験を実施した。切断溝性状、切断溝幅、ドロス高さ、デブリ高さおよび切断溝側面を評価することで、レーザ切断加工特性を考察した。本研究により得られた結果を以下にまとめる。

- (1) レーザ走査時間を同じにしたレーザ重ね走査による切断加工では、レーザ重ね走査回数を増やすにしたがって切断溝幅が広くなり、熱影響の少ない良好な切断溝性状が得られる。
- (2) レーザ重ね走査回数を増やすにつれて、最大デブリ高さは増加して、最大ドロス高さは減少する。
- (3) レーザ重ね走査回数を増やすにつれて、切断溝側面は滑らかな加工面となり、入熱・酸化による変色は大きくなる。
- (4) レーザ重ね走査回数5回以上のレーザ高速走査において、最大切断溝幅 0.25 mm 程度、最大デブリ高さ 0.25 mm 程度、最大ドロス高さ 0.05 mm 程度の熱影響が抑制された高品質な精密切断加工が可能である。

今後、デブリ付着およびドロス付着や熱影響を抑制するために、レーザ切断加工雰囲気や低酸素濃度にするなど、新たな切断加工プロセスについて検討して、さらなる高品質・精密加工の可能性について考察していく。

謝 辞

本論文は、2021年度の卒業研究として実施した研究成果である。本研究テーマについて、

実験および評価に尽力して貴重な研究データを収集してくれた平田真也君に深く感謝する。

本研究で使用したマグネシウム合金材料について物性データを提供頂いた不二ライトメタル株式会社に感謝申し上げます。また、本研究で使用したQスイッチパルスファイバレーザ加工機を貸出し、レーザ加工について助言を頂いたフジクラプレシジョン株式会社に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 日本マグネシウム協会編：現場で生かす金属材料シリーズ マグネシウム，丸善出版，(2011)，20-33.
- 2) 日本マグネシウム協会編：現場で生かす金属材料シリーズ マグネシウム，丸善出版，(2011)，8-18.
- 3) 河村能人：航空機実装化を目指したKUMADAIマグネシウム合金の研究開発，軽金属，第65巻，第9号(2015)，466-471.
- 4) 日本マグネシウム協会編：現場で生かす金属材料シリーズ マグネシウム，丸善出版，(2011)，198-203.
- 5) 重松一典，斎藤尚文，中西勝，馬渕守，松山晴俊，中村守：AZ31マグネシウム合金薄板のレーザ切断，軽金属，第50巻，9号(2000)，446-450.
- 6) Ali Gökhan Demir, Barbara Previtali, and Carlo Alberto Biffi: Fibre Laser Cutting and Chemical Etching of AZ31 for Manufacturing Biodegradable Stents, *Advances in Materials Science and Engineering*, Volume 2013, Article ID 692635, 11 pages
- 7) 遠藤雅守：マグネシウム合金のレーザー切断加工，天田財団助成研究成果報告，Vol. 17，(2004)，71-76.
- 8) 北田良二：マグネシウム合金のレーザ切断加工に関する基礎的検討 - 炭酸ガスレーザによるAZ31B板材の切断特性 -，崇城大学紀要，第46巻，(2021)，117-125.
- 9) 北田良二：パルスファイバレーザによるマグネシウム合金のレーザ切断加工に関する基礎的検討，崇城大学紀要，第47巻，(2022)，37-42.
- 10) 日本マグネシウム協会編：マグネシウム技術便覧，カロス出版，(2000)，73-74.
- 11) JIS H 4204：2018，マグネシウム合金押出形材
- 12) 日本マグネシウム協会編：マグネシウム技術便覧，カロス出版，(2000)，58.
- 13) 日本マグネシウム協会編：現場で生かす金属材料シリーズ マグネシウム，丸善出版，(2011)，50-53.
- 14) 宮崎俊行，宮沢肇，村川正夫，吉岡俊朗：レーザ加工技術，産業図書，(1991)，18-19.
- 15) 新井武二，レーザ加工の基礎工学 改訂版 理論・シミュレーションによる現象から応用まで，丸善出版，(2013)，139-140.
- 16) 新井武二，レーザ加工の基礎工学 改訂版 理論・シミュレーションによる現象から応用まで，丸善出版，(2013)，168-180.
- 17) 新井武二，レーザ加工の基礎工学 改訂版 理論・シミュレーションによる現象から応用まで，丸善出版，(2013)，192-204.
- 18) 新井武二，レーザ加工の基礎工学 改訂版 理論・シミュレーションによる現象から応用まで，丸善出版，(2013)，168-180.