

## 資 料

## 板金材料へのレーザー除去加工に及ぼす加工パラメータの影響

植田 優\*・廣江 拓也\*・小松原 聡\*

## 1. 目 的

1960年にT.H.Maimanがルビー結晶を用いて波長694.3nmの赤色光を発振させたことに始まる<sup>1)</sup>レーザー(Laser: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, 放射の誘導放出による光の増幅)は、太陽光や蛍光灯光と比べ、単色性(同一波長)や指向性(同一位相)が高く、高エネルギー密度が得られるといった特徴がある。そのため、光源からの距離によって集光径が広がらず、増幅することで非常に大きなエネルギーを得ることができる。これまでの多くの研究者や技術者による発振媒体の探索、高出力化、エネルギー効率改善、ビーム品質向上を目的とした研究開発<sup>2)</sup>の結果、現代社会では日用品から産業利用に至るさまざまな場面でレーザーの恩恵を受けるようになった。近年では、3Dプリンターとして注目が集まる付加製造技術(AM)のエネルギー源<sup>3)</sup>といった、最先端技術での利用も期待されている。

機械金属産業においては、レーザー加工が自動車、造船、電気電子機器、金型などの国内基幹産業で広く用いられてきた。レーザー加工は主に除去加工、接合加工、表面改質に分類されるが、これらは加工材料表面に照射されたレーザーの熱エネルギーへの変換による加熱、溶融あるいは蒸発温度に到達した時の相変化を利用する<sup>4)</sup>点において共通する。金属などの固体材料にレーザーを照射すると光の一部は吸収され、材料表面はレーザーの波長に依存したエネルギーを受け取る。これにより原子振動を引き起こし、瞬間的に材料表面の温度が上昇する。除去加工では、局所的な熱エネルギーの印加により溶融あるいは蒸発した材料を高圧ガスによって飛散させ、熱影響の少ない切断や穴あけを行うことが特徴である<sup>5)</sup>。接合加工では、局所的に加工材料を溶融する微細溶接やブレージングが熱影響の少ない接合法として利用される。また、表面改質では材料表面の急激な加熱と急冷による焼入れ<sup>6)</sup>や成膜加工を行うクラデイング<sup>6,7)</sup>が実用化されつつあり、新たな加工技術として注目されている。

金属板材を原材料として所定の形状に加工する板金加工では、板材の切断や穴あけにレーザー除去加工を多用して

いる。板金加工では一般に厚さ1mm前後の金属板材が使用されるが、工業製品の小型軽量化、高精度化への要求が厳しくなる中、板金加工においても薄板材料に対する微細かつ高精度なレーザー除去加工が求められる。しかし除去加工工程では、光の吸収と加工材料の加熱、溶融、そして飛散、冷却といった複雑な現象が、瞬間的かつ連続的に起こる。このことが、技術開発や試作開発、生産現場における効率化、不良解析などを困難にする一因であると考えられる。

そこで本研究では、薄板材料へのより微細なレーザー除去加工の適用を目的に、レーザー発振条件などの加工パラメータが加工品質、特に加工線幅の寸法に及ぼす影響について調べることにした。

## 2. 方 法

## 2.1 実験材料

供試材には厚さ0.3mmの市販のオーステナイト系ステンレス鋼(SUS304)板を用いた。

SUS304は、表面に形成される厚さ数ナノメートルの緻密な不動態膜により耐食性がとくに優れ、厨房製品、医療製品をはじめ家庭用品、建築用品、自動車部品、化学プラント、食品工業、原子力発電、LNGプラントなど広範囲な用途で使用される<sup>8)</sup>。板状の素材としても薄板から厚板まで安定的に供給され、板金加工材料として汎用的に利用される。

## 2.2 実験装置

本研究では、公益財団法人JKA平成31(令和元)年度機械振興補助事業において導入した2次元レーザー加工機(LaserLife社製CSB-450F型)を用いてレーザー切断加工を行った。

本装置は、レーザー発振器、伝送用ファイバー、光学ヘッド、アシストガス供給系、XY駆動機構、排気装置および制御装置で構成される。本装置の外観を図1に、主な仕様を表1に示す。本装置は定格出力450Wのファイバーレーザーによってパルス状レーザーを発振する。ファイバーレーザーは、古くからの加工用レーザーであるCO<sub>2</sub>レーザーやYAGレーザーと比べて、ビーム品質、エネルギー効率、放熱性およびメンテナンス性に優れ、かつ小型軽量化できることから、2000年代頃から利用が急激に拡大して

\*生産技術科

いる<sup>9)</sup>。

本装置では光学ヘッドと加工材料の距離を静電容量センサーの原理により加工中は常に一定に保つことで、歪みや反りのある金属板材に対して加工精度を高めている。

レーザーのエネルギーにより局所的に溶融した加工材料を飛散させるアシストガスには、最大2.0MPaの酸素、窒素、アルゴンまたは圧縮空気を使用した。それを光学ヘッドからレーザーと同軸で照射位置に放出し、試料テーブル下方から排気することでガス流れを形成する。



図1 2次元レーザー加工装置の外観

表1 主な仕様

| レーザー   | ファイバーレーザー          |
|--------|--------------------|
| 波長     | 1062nm             |
| 発振形式   | パルス                |
| 出力     | 最高450W             |
| 移動速度   | 最高12m/min          |
| 加工エリア  | 600×600mm          |
| デフォーカス | ±4mm               |
| アシストガス | 窒素, 酸素, アルゴン, 圧縮空気 |
| ガス圧力   | 最高2.0MPa           |

## 2.3 実験方法

### 2.3.1 レーザー除去加工

加工プロセスを図2に示す。図2(a)に示すように、レーザー発振器で生成したパルス状レーザーは光ファイバーによって光学ヘッドまで伝送され、剣山型試料テーブル上に固定した加工材料に対して垂直に照射される。レーザー除去加工は、まず光学ヘッドを移動させずに貫通穴をあけ(ピアス加工)、次に光学ヘッドを所定の移動速度で移動させながら直線状に加工(線加工)する。レーザーエネルギーにより溶融した加工材料は、高圧ガス(本実験では純度99.99%の窒素を使用)で飛散、除去される。

パルス発振波形は、図2(b)に示すように、ピーク出力、1パルス中の照射時間を示すパルス幅、1パルスあたりの時間を示すパルス間隔で決定される。

本研究では、最適なレーザー除去加工条件を見出すため表2に示す範囲で加工パラメータを変化させて加工長さ100mmの直線加工を行い、そのときの加工線の形状観察および加工線幅(カーフ幅)の寸法測定を行った。

観察および測定には、デジタルマイクロスコープ(株式会社キーエンス製VHX-5000型)および走査型電子顕微鏡(日本電子(株)製JSM-IT100LA型)を用いた。なお、特に注釈がない限り、観察および測定は加工長さの中央部にて行った。

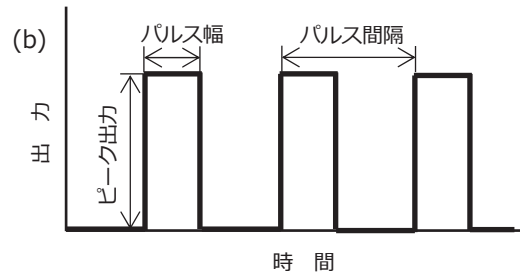
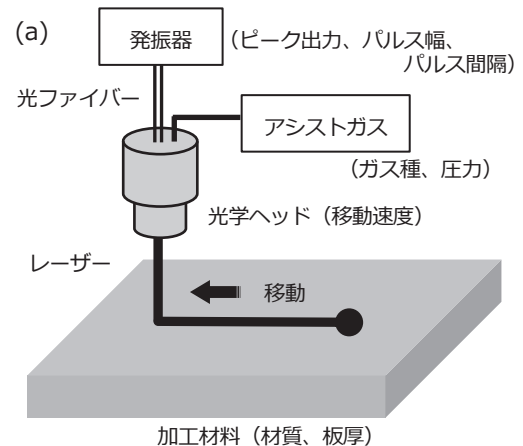


図2 レーザー加工プロセス

(a)加工模式図 (b)パルス発振波形

表2 加工パラメータ

|       |                |
|-------|----------------|
| ピーク出力 | 225～900W       |
| パルス幅  | 0.05～0.11ms    |
| パルス間隔 | 0.5～2.0ms      |
| 移動速度  | 500～5000mm/min |
| ガス圧力  | 0.5～2.0MPa     |

### 2.3.2 発振条件の影響

図2(b)に示したとおり、パルス発振波形はピーク出力、パルス幅およびパルス間隔で決定される。そこで発振条件(パルス発振波形)がカーフ幅に及ぼす影響について評価するために、これらのうち2つを固定した状態で残り1つ

を変化させてレーザー除去加工を行い、照射面側のカーフ幅寸法を測定した。発振条件以外の加工条件は、移動速度1000mm/min、ガス圧力2.0MPa一定とした。

### 2.3.3 移動速度の影響

光学ヘッドの移動速度がカーフ幅に及ぼす影響について評価するために、移動速度を変化させてレーザー除去加工を行い、カーフ幅の寸法測定および形状観察を行った。移動速度以外の加工条件は、ピーク出力225W、パルス幅0.10ms、パルス間隔0.50ms、ガス圧力2.0MPa一定とした。

### 2.3.4 アシストガス圧力の影響

アシストガス圧力がカーフ幅に及ぼす影響について評価するために、ガス圧力（窒素ガス）を変化させてレーザー除去加工を行い、カーフ幅の寸法測定および形状観察を行った。ガス圧力以外の加工条件は、ピーク出力900W、パルス幅0.05ms、パルス間隔0.50ms、移動速度1000mm/min一定とした。

## 3. 結 果

### 3.1 試料外観

レーザー除去加工後の代表的な外観について、デジタルマイクロスコープによる断面の観察結果を図3に示す。レーザーは図の上部より照射し、紙面手前から奥側に向かって移動した。照射面側ほどカーフ幅は広く、照射背面に向かって細くなるテーパ状断面が形成された。レーザー加工ではエネルギーの吸収により照射面表面で加熱、溶融が開始し、照射背面および照射点の外周方向に向かってその熱が伝わることで加工が進行する。そのため、照射面側で溶融領域が大きくなり、テーパ状の加工断面が形成されたと考えられる。

次に、走査電子顕微鏡による照射面および照射背面の観察結果を図4に示す。図4 (a) に示すように、照射面のピアス加工点周囲には、最初の貫通穴加工時に飛散した溶融物（スパッタ）が堆積した。また、図4 (b) に示すように、照射背面にはアシストガスによって飛散しきれず周囲に付着した溶融物（ドロス）が付着した。スパッタの堆

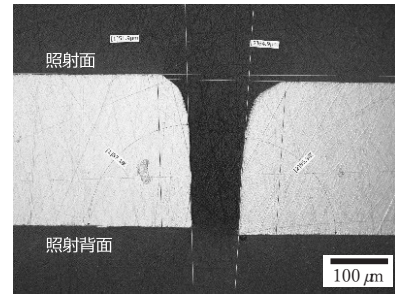


図3 レーザー加工断面

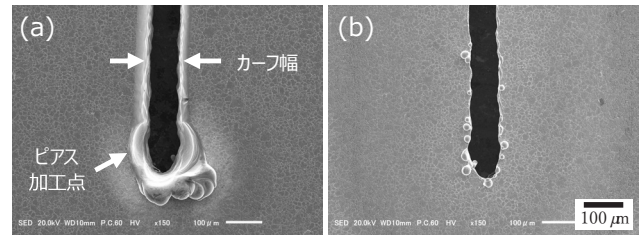


図4 レーザー加工の外観

(a)照射面 (b)照射背面

積やドロスの付着は、加工精度の不良や製品的美観、作業者の安全性などの製造上の課題となることから、後加工や加工条件の最適化による対策が必要となる。

### 3.2 発振条件の影響

発振条件がカーフ幅に及ぼす影響について、照射面のカーフ幅寸法の測定結果を図5に示す。図5 (a) および (b) に示すように、ピーク出力が高いほど、またはパルス幅が長いほどカーフ幅寸法は大きくなる傾向を示した。また、図5 (c) に示すように、パルス間隔が長いほどカーフ幅寸法は小さくなる傾向を示した。本実験範囲では、すべて安定した直線加工ができており、発振条件の最適化によって約120μm幅での加工が可能であった。

移動速度が一定の場合、ピーク出力が高いあるいはパルス幅が長いほど、レーザー照射による入熱量は大きくなる。前節でも述べたように、熱エネルギーは照射背面方向だけでなく照射点の外周方向へも拡散することから、溶融領域

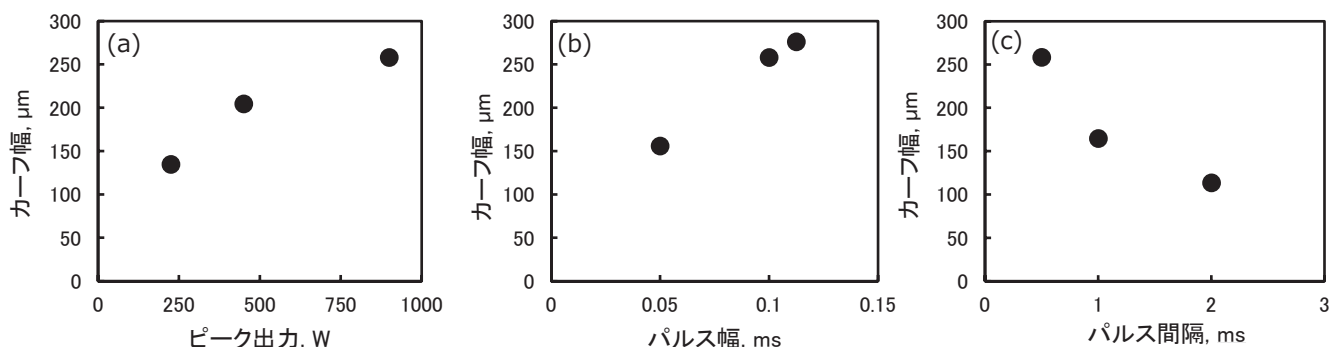


図5 カーフ幅寸法に及ぼす発振条件の影響

(a)ピーク出力の影響 (b)パルス幅の影響 (c)パルス間隔の影響

が大きくなり、結果的にカーフ幅寸法は大きくなる。また、パルス幅一定の時のパルス間隔の大小は、パルス状照射時の停止時間の大小を意味する。そのため、パルス間隔が長くなるほど冷却時間が長くなり、余剰の熱エネルギーが取り除かれることでカーフ幅寸法の増大を抑える働きがあると考えられる。

以上の結果から、カーフ幅寸法を小さくすることによるレーザー除去加工の微細化には、加工を維持する以上の過剰な熱エネルギーを供給しない発振条件の最適化が有効である。

### 3.3 移動速度の影響

光学ヘッドの移動速度がカーフ幅に及ぼす影響について、照射面のカーフ幅寸法の測定結果を図6に示す。移動速度1000mm/min以下では移動速度の増加とともにカーフ幅寸法は小さくなるが、それ以上の移動速度ではほぼ一定の値を示した。

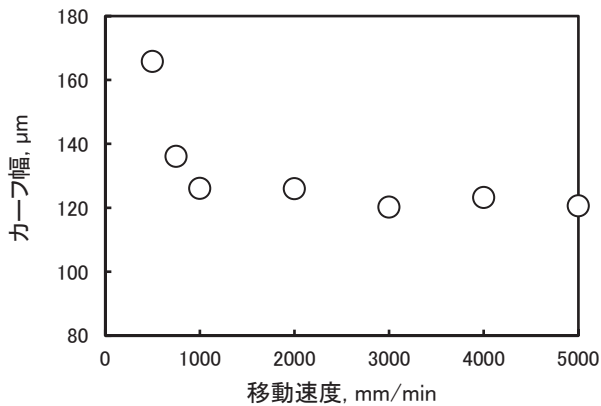


図6 カーフ幅寸法に及ぼす移動速度の影響

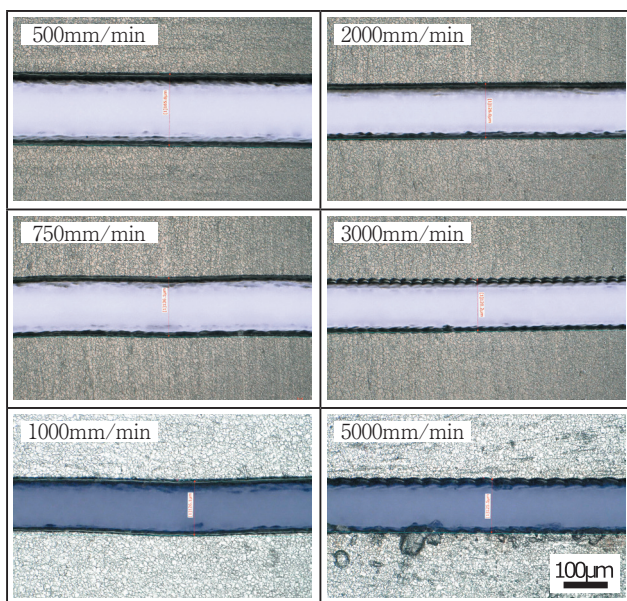


図7 カーフ幅形状に及ぼす移動速度の影響

次に、それぞれの移動速度でレーザー除去加工した照射面の外観を図7に示す。移動速度1000mm/min以下では、加工線のエッジも直線状で、安定した直線加工の外観を示した。それ以上の移動速度では、カーフ幅寸法に大きな差は見られないが、2000mm/min以上ではエッジが円弧状になり、安定した直線加工の外観を示さなかった。さらに移動速度を増加することで、除去加工ができない状態になることが予測される。

一定間隔でパルス状レーザーが照射される場合、移動速度が小さいほど入熱量が大きく、言い換えれば加工部周辺を予熱することになる。これによって加工材料の溶融が容易になり、結果的にカーフ幅寸法は大きくなると考えられる。一方、移動速度の増加は、同様の理由から、カーフ幅寸法を小さくすることに有効であるが、移動速度に対して照射間隔が大きくなるため、貫通穴外周の円弧形状がエッジに現れたものと考えられる。

以上の結果から、カーフ幅寸法を小さくすることによるレーザー除去加工の微細化には、移動速度の高速化が有効であるが、必要以上の高速化はエッジの直線性の低下を招くことになる。本実験範囲では、移動速度1000～2000mm/minが最適値であるといえる。

### 3.4 アシストガス圧力の影響

ガス圧力がカーフ幅に及ぼす影響について、照射面および照射背面のカーフ幅寸法の測定結果を図8に示す。加工材料の板厚が0.3mmと薄いため、ガス圧力によるカーフ幅寸法の顕著な差は見られないが、高圧ほど若干小さくなる傾向を示した。また、図3と同様に、照射面のほうが照射背面よりカーフ幅寸法が大きくなるテーバー形状を示した。

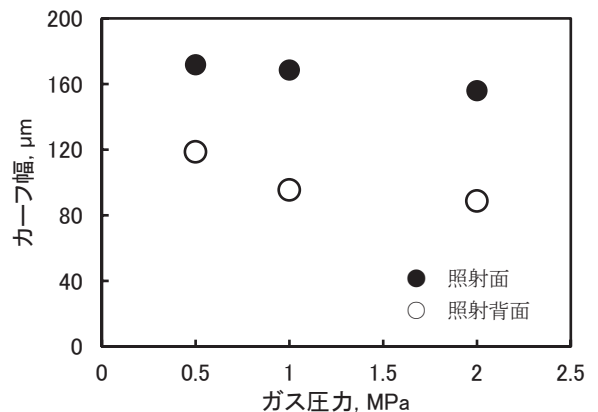


図8 カーフ幅寸法に及ぼすガス圧力の影響

次に、それぞれのガス圧力でレーザー除去加工した照射背面の外観を図9に示す。ガス圧力2.0MPaでは、エッジは直線状で、ドロスの付着もない良好な外観を示した。しかし、ガス圧力0.5MPaではエッジ全域に塊状あるいは玉状のドロスが付着し、エッジの直線性が低下した。これは、溶融物を飛散するのに十分なガス圧力が照射背面において

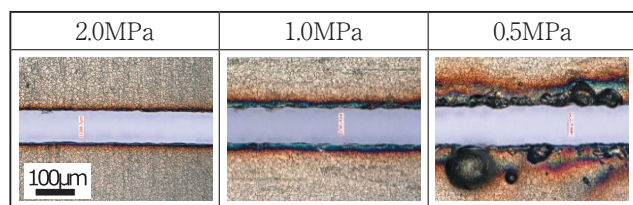


図9 カーフ幅形状に及ぼすガス圧力の影響

得られていないことが原因と考えられる。

以上の結果から、ガス圧力の高圧化は、カーフ幅寸法を小さくすることによるレーザー除去加工の微細化だけでなくドロス付着の低減についても有効である。

### 3.5 まとめ

本研究では、切断や穴あけなどの除去加工を目的とした商用のレーザー加工機を用いて、カーフ幅を狭くすることによる微細なレーザー除去加工の可能性について検討した。発振条件や移動速度、ガス圧力といった加工パラメータによる加工材料への影響を把握し、レーザー加工機の仕様範囲内で加工パラメータを最適化することでカーフ幅の微細化は可能である。しかし、ガス圧力の高圧化のように、最適化によって加工コストの上昇を招く場合もあるので実用化には注意を要する。

一方、微細化を目的としたアブレーション加工を行う短パルスレーザー加工機も工業利用されつつある<sup>10)</sup>が、それら専用機器を導入することなく加工バリエーションを向上できることは、生産現場での技術開発、課題解決などに有益である。

## 謝 辞

本研究は、株式会社ゼンキンメタルとの共同研究において実施したものである。研究の遂行にあたり、同社取締役技術・品質管理部長 新田敏也様ならびに技術・品質管理部技術改善担当 喜田浩昭様には深く敬意と感謝の意を表します。

## 文 献

- 1) 霜田光一. レーザー発明のインパクト. レーザー研究. 1991, vol.19, no.1, p.5-7.
- 2) 霜田光一. 20世紀のレーザー史. レーザー研究. 2001, vol.29, no.1, p.28-36.
- 3) 京極秀樹. レーザーを用いた金属Additive Manufacturing技術の最新動向. 精密工学会誌. 2016, vol.82, no.7, p.619-623.
- 4) 川澄博通. 高出力レーザー加工の現状と将来. レーザー研究. 1983, vol.11, no.5, p.3.
- 5) 徳永剛. レーザ加工の基礎. 精密工学会誌. 2009, vol.75, no.5, p.595-598.
- 6) 後藤光宏. レーザ焼入れとレーザクラッディングの産業応用. 電気加工技術. 2020, vol.44, no.136, p.8-12.
- 7) 塚本雅裕. 金属AM技術を支えるレーザ技術開発. スマートプロセス学会誌. 2017, vol.6, no.3, p.104-108.
- 8) 野原清彦. “ステンレス鋼の用途”. ステンレス鋼大全. 初版, 日刊工業新聞社, 2016, p.31-40.
- 9) 荒谷雄. ファイバーレーザとその加工の最前線. 高温学会誌. 2009, vol.35, no.4, p.176-182.
- 10) 新井武二. “短パルス微細レーザー加工の現状”. レーザー微細加工-基礎現象と産業応用-. 初版, 丸善出版, 2018, p.189-218.