YAGレーザを用いた微細加工における ドロス生成に関する研究*

窪田真一郎** 宇野義幸*** 松本泰典+

Study on Dross Generation in Fine Machining with Pulsed YAG Laser

Shin-ichiro KUBOTA, Yoshiyuki UNO and Yasunori MATSUMOTO

Abstract

YAG laser has actively been used for precision micro machining, since it has become possible to get stable and high quality beam and the spot diameter can be focused less than 100 micrometers. High energy beam machining with YAG laser or CO₂ laser is heat energy machining accompanied with heating, fusion, evaporation processes, therefore the adhesions of spatter and dross to base material lead to the deterioration of machining integrity. In this paper, the dross generation mechanism in precision micro cutting of thin plate with pulsed YAG laser is experimentally investigated.

Main conclusions obtained are as follows:

- (1) In a single pulse machining, the spatter scatters on the base material surface at irradiation side and the dross sticks around the hole at exit side.
- (2) Oxygen assist gas makes the mobility of melting material increase, which leads to the decrease of the adhesion of dross.
- (3) The height of dross is greatly affected by the beam overlap rate, and it takes maximum when the beam overlap rate is about 93%.
- (4) The dropout phenomenon of dross is occurred when the beam overlap rate is more than 96%.
- (5) The generation of dross is restrained by shortening the gap distance between the nozzle of assist gas and the workpiece.

1. 緒 言

発振波長が $1.06\ \mu\text{m}$ の近赤外領域に属しているYAGレーザは、発振特性や光学部品の性能の向上によって、安定したビームモードでかつスポット径を $100\ \mu\text{m}$ 以下まで集光することが可能になっ

たことから、現在では精密微細加工への応用が積極的に行われている。半導体素子におけるリードフレームや配線基板の印刷に用いられているスクリーンマスクなどの薄板微細加工は、これまでプレス加工やエッチングによって行われてきたが、今後LSIの多ピン化、高密度化によって従来の方法だけでは対応が困難になることが予想される。YAGレーザを用いた精密微細加工法は、これらの分野で適用される可能性を有する加工法である。

* 1995年度精密工学会秋季大会(平成7年9月29日)にて発表

** 岡山県工業技術センター

*** 岡山大学工学部

+ 株式会社クラレ

しかしながらYAGレーザや炭酸ガスレーザによる高エネルギービーム加工は、レーザ照射部において加熱、熔融、蒸発過程をとまなう熱加工であり、飛散、流動した被加工物の母材への付着すなわちドロスやスパッタが製品の精度および品質の低下の原因となる。このうちスパッタは防止剤を塗布することで付着を抑えることができるが、ドロスについてはまだ有効な防止法がないのが現状である。そこで本研究では、パルスYAGレーザを用いた薄板微細加工において発生するドロスの生成過程を解明するとともに、その抑制法について実験的検討を行った。

2. 実験方法

図1に実験装置の模式図を示す。使用した発振器は、LAZAG社製 Nd:YAGレーザ (KLS 322, 定格300W) である。ポンピングはキセノンフラッシュランプによって行われパルスレーザとして出力される。パルス周波数の設定範囲は0.1~300 Hzである。また1パルス当たりのエネルギー供給時間であるパルス幅は0.1~20msに設定できる。共振器を構成するエンドミラーおよび出力ミラーの曲率と距離を適切に選ぶことによって、ビームモードを変化させることが可能である。本実験ではビームモードをシングルモード(TEM₀₀)に設定した。集光レンズは焦点距離が50mmのものを使用し、焦点位置はあらかじめ単発穴あけ加工を行って穴径が最小となる位置とした。アシストガスとしては、酸素、窒素、アルゴンを使用し、加工特性の違いを検討した。また、ガスを噴射するノズル先端と加工試料表面のギャップ距離は当初は通

図1 実験装置の概略図

表1 加工試料の成分

Ni	Mn	Si
42	<0.8	<0.3

42Ni-Fe						
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
<0.08	<1.00	<2.00	<0.040	<0.030	8.00~10.50	18.00~20.00

SUS304

表2 加工試料の熱的物性値

	42Ni-Fe	SUS304
Melting point(K)	1703	1727
Thermal conductivity(W/(mK))	15.9	16.2
Coefficient of thermal expansion(K ⁻¹)	4.3×10 ⁻⁶	17.8×10 ⁻⁶

常用いられている1mmに設定した。加工試料はZ軸を有するX-Yステージ上の治具に固定し、NC制御コントローラ (THK社製ツインクラ5000II)によって所定の送り速度で加工を行った。

表1は、本実験で使用した42Ni-FeおよびSUS304の成分を、また表2は熱的物性値を示したものである¹⁾²⁾。42Ni-Feは半導体リードフレームの主材料でありシリコンの線膨張係数4.3×10⁻⁶ (1/K)に合わせてつくられている³⁾。一方SUS304は、スクリーンマスクに使用されているオーステナイト系ステンレス鋼である。一般に半導体リードフレームや配線パターン用のスクリーンマスク等には、板厚が100~200μmの薄板が使用されている。本実験では板厚が150μmのものを使用した。

3. 実験結果および考察

3.1 単発加工実験

パルスYAGレーザによる切断加工は単発加工の繰り返しにより加工が行われ、付着するドロスはその過程で生成される溶融物の重畳されたものである。そこで最初に単発加工実験を行い、その際生成されるドロスについて検討した。

図2(a)は、単発加工によって形成される穴の貫通速度を求めるための測定光学系を模式的に示

図2 貫通速度の測定光学系と測定例

したものである⁹⁾。試料表面に照射されるレーザ光および被加工物を貫通するレーザ光をフォトディテクタによって検出し、デジタルオシロスコープに入力した。この際レーザ照射部から発生する散乱光の影響を抑制するために赤外線透過フィルターを設けた。図2(b)は、この測定光学系で得られた測定波形を示したものである。図に示すように両波形の立ち上がり時間の差 ΔT を貫通時間とし、板厚を ΔT で除した値を貫通速度とした。図より薄板の貫通はレーザ照射時間に比べて極めて短時間のうちに終了していることがわかる。

図3は、42Ni-Feに単発加工実験を行った場合の入射側と出口側のSEM写真を示したものである。図中左側2枚はアシストガスを用いない場合、右側は酸素をアシストガスとして用いた場合を示す。図から明らかに、レーザ入射側ではアシストガスの有無に関わらずスパッタの飛散が見られる。これは照射部において蒸発する際に発生する酸化圧力により飛散したものと考えられる。一方出口側では、アシストガスを使用しなかった場合

図3 単発加工における加工穴近傍のSEM写真

は溶融した材料が加工穴を覆う状態で再凝固しているのに対して、アシストガスを使用した場合は

図4 貫通速度とアシストガスの関係

加工穴周囲に再凝固した材料の付着は見られるが、良好に貫通加工が行われていることがわかる。

図4は、単発加工においてアシストガスが貫通速度に与える影響を示したものである。図から明らかなように、両加工物ともアシストガスの有無によって貫通速度にほとんど差は認められない。42Ni-FeがSUS304より貫通速度が大きいのは熱的物性の違いによると考えられる。すなわち一般に熱加工では融点と熱伝導率の積の値が小さい方が加工されやすい⁹⁾。この場合も、表2で示したように42Ni-FeはSUS304に比べてその値が小さいため加工されやすく、貫通速度が大きくなったと考えられる。

図3、図4の結果から、アシストガスが貫通速度に及ぼす影響は少なく、主にレーザー照射時に生成される溶融物を速やかに流動させ母材への付着を抑制する効果があることがわかる。

3.2 切断加工

3.2.1 アシストガスの影響

42Ni-Feに対して各種条件下で切断実験を行い、生成されたドロスの形状を観察するとともにドロス高さおよび切断幅を測定した。

図5は、切断加工における評価パラメータを模式的に示したものである。ここではドロス高さは、母材とドロスの最高点との距離 H とした。ドロ

図5 ドロス高さとカーフ幅の定義

ス高さ H の測定は、ドロスの最高点を拾いやすくするために、先端丸み半径の大きいプローブ ($R=800\mu\text{m}$) を用いて触針式粗さ計で測定し、10箇所の平均値で表した。また切断幅はレーザー入射側の溝幅 W とした。

図6は、切断溝断面のエッチング面を示す。図から明らかなようにアシストガスにアルゴン、窒素を使用した場合、切断溝には大量の溶融層が残留している。しかしながら、酸素を使用した場合には溶融層の残留はほとんど見られない。一般に、アシストガスに酸素を使用すると溶融物の粘性と表面張力が減少し、レーザー光の吸収率が増加する効果があるといわれている⁹⁾。このためアシストガスに酸素を使用した場合には、窒素、アルゴンと比較して溶融物の流動性が向上し、溝内部の溶融物がガスの圧力によって除去されやすいと考えられる。以上の結果より、以後の実験ではアシストガスとして酸素を使用した。

3.2.2 切断速度の影響

パルスYAGレーザーにおける切断加工は単発加工の繰り返しによって行われ、生成されるドロスの形状は単発加工の重なり方に大きく影響される。そこで、ビームスポットの重なり率を表すためにビームラップ率を定義する。図7は、ビームラップ率の概念図を示したものである。ビームスポットの重なり長さを K 、単発加工によって求められる加工穴直径を D_H 、パルス周波数を f 、送り速度を V とするとビームラップ率 η は式(1)で表され

100μm

$f=100\text{Hz}$, $\tau=0.2\text{ms}$, $E=0.10\text{J/p}$, $V=2\text{mm/s}$

図6 切断溝断面の光学顕微鏡写真

$$\eta = \frac{K}{D_H} = \left(1 - \frac{V}{D_H \cdot f}\right) \times 100(\%) \quad (6)$$

η : Beam overlap rate
 K : Overlap of beam spot
 D_H : Hole diameter
 f : Pulse frequency
 V : Feed rate

図7 ビームラップ率の定義

る⁷⁾。

$$\eta = \frac{K}{D_H} = \left\{1 - \frac{V}{D_H \cdot f}\right\} \times 100(\%) \quad (1)$$

ここで、 η : ビームラップ率、 K : 重なり長さ、 D_H : 加工穴径、 f : パルス周波数、 V : 送り速度を表す。

この式から明かなように、パルス周波数が増加あるいは送り速度が減少するとともにビームラップ率は増加する⁶⁾。本研究ではパルス周波数 f は100Hz一定で実験している。またパルスエネルギーおよびパルス幅は、あらかじめ切断実験を行い安定した切断加工が可能な条件を求めた。

図8は、ドロス高さおよび切断幅と送り速度の関係を示したものである。また各送り速度に対応するビームラップ率も示す。図から明らかなように、切断幅は送り速度にかかわらずほぼ一定である。一方ドロス高さは、送り速度が0.8mm/s($\eta=93\%$)付近を境界として変化形態が大きく異なる。すなわち送り速度0.8mm/s付近においてドロス高さは最大となり、0.8mm/sより大きい範囲で

図8 ドロス高さおよび切断幅と送り速度の関係

図9 0.8mm/s以上の送り速度で生成されるドロスのSEM写真

は送り速度の増加にともなってドロス高さはほぼ一定の割合で減少する。また0.8mm/s以下の範囲では送り速度の減少にともなって急激にドロス高さは小さくなり、0.5mm/s ($\eta=96\%$)以下では減少の割合は小さくなる。

図9は、送り速度が0.8mm/s以上で生成されるドロスの形状を示したものである。図から明らかなように、すでに付着している凝固物に重畳するようにドロスが成長している。送り速度の増加にともなってドロス高さが低下しているのは、図に見られるようにビームラップ率が低下し溶融物が連続的に生成されないためである。

図10は、ビームラップ率を変化させた場合のレーザ入射側の光学顕微鏡写真である。図から明らかなように、ビームラップ率の高い加工では良好な切断面が得られているのに対して、ビームラップ率が低い条件では、単発加工において発生したスパッタの飛散が顕著に見られ、また切断品質も悪化する。この理由は以下のように考えられる。

図11は、図9、図10の結果から推定されるドロスの生成過程モデルを示したものである。TEM₀₀モードレーザはガウス分布に近似される強度分布をもつ。すなわちスポット中央で強度が最も高く、半径方向に広がるにしたがって強度は低下する。

図10 ビームラップ率を変化させたときの入射側の光学顕微鏡写真

(a) High beam overlap rate (b) Low beam overlap rate

図11 ドロスの生成過程モデル

このようなビームモードをもつパルスレーザが薄板に照射されるとスポット中央では瞬間的に材料が溶融，沸騰し急激な体積膨張が起るため溶融

物が飛散する（Boiling area）。一方強度分布が低い領域においては材料を沸騰させるまでには至らず溶融が起こる（Melting area）。送り速度が小さい場合，すなわちビームラップ率が高い条件では新たに照射される部分は溶融加工が主に行われる。そのため，各レーザパルスによって生成される溶融物の付着が高密度で繰り返される結果，ドロス高さは大きくなる。これに対して送り速度が大きい，すなわちビームラップ率が低い場合は，新たにビームが照射される部分には溶融領域に加えて沸騰領域も含まれることになる。その結果，加工状態は単発加工に近づきスパッタの飛散が顕著になるとともにドロス高さが小さくなると考えられる。

図12は，送り速度が0.8mm/s以下のドロス形状のSEM写真を示したものである。ここでは比較のためにSUS304に対しても同様の加工を行った。

$f=100\text{Hz}$, $\tau=0.2\text{ms}$, $E=0.10\text{J/p}$, $\text{O}_2(490\text{kPa})$

図12 0.8mm/s以下の送り速度で生成されるドロスのSEM写真

これらの図から明らかなように、切断溝近傍には若干のドロスは残留しているが、ほとんどのドロスは欠落している。SUS304における送り速度が0.4mm/s ($\eta=97\%$)では重畳したドロスが母材から剥離し、一部分のみで結合しているのがわかる。

図8および図9で述べたように、送り速度が0.8mm/s以上の範囲では、送り速度の低下にともなってドロス高さは増加し、 $V=0.8\text{mm/s}$ の条件では柱状のドロスが生成されている。0.8mm/s以下の条件では、さらにビームラップ率が増加

し、断面積の小さい柱状の溶融物が重畳した状態で付着していると推測される。その結果、ドロスの母材表面での接触面積が減少し、付着力が低下していると考えられる。これらのことに加えて溶融した材料が再凝固するときに体積収縮による引っ張り応力が生じ、結合部にクラックが発生しドロスの欠落が起こると考えられる。

以上の結果から、ビームラップ率を極端に高めドロスを高密度で生成させることによって、ドロスの欠落現象が発生することが明らかになった。しかしこの場合は、必然的に加工速度が減少するとともに、熱影響層が増大する結果となる。

3.2.3 ギャップ距離の短縮によるドロスの抑制

切断部近傍へ吹き付けるアシストガスが、ドロスの流動性に大きく影響することは前節で述べた。アシストガスの効果を向上させるためには、被加工物表面とノズル先端とのギャップ距離を短くすることによって、ガスを低損失で切断部近傍に吹き付けることが望ましいと考えられる。通常、ギャップ距離を短くすることは被加工物とノズルとの干渉の面から問題となるが、薄板切断では実用上あまり問題ないと考えられる。ここではギャップ距離の短縮によるドロスの抑制の可能性を検討した。

図13は、ドロス高さに及ぼすギャップ距離の影響を示したものである。図から明らかなように1470kPaの高压で酸素を吹き付けた場合、ギャップ距離の減少にしたがってドロス高さは徐々に減少し、ギャップ距離が0.5mm以下では20 μm 程度でほぼ一定となる。一方490kPaの圧力で吹き付けた場合は、ギャップ距離が0.5mmまではドロス高さは180~200 μm であるが、0.5mm以下においてはほぼ一定の割合で減少し0.05mmで30 μm 程度となる。

図14は、ギャップ距離を変化させたときに生成したドロス形状を示したものである。図から明らかなように、ギャップ距離が0.5mm以下においてはドロスの生成がかなり抑制され、良好な切断品質が得られている。以上の実験結果から、ドロスの生成を抑制するためには、アシストガスと母材との化学反応によって熔融物の流動性を向上させるとともに、ノズルと被加工物とのギャップ距離を短縮してアシストガスの圧力損失を極力抑えることが重要であると

図13 ドロス高さギャップ距離の関係

$f=100\text{Hz}$, $\tau=0.2\text{ms}$, $E=0.10\text{J/p}$, 42Ni-Fe

Scanning direction

図14 ギャップ距離を変化させたときのドロスのSEM写真

思われる。

4. 結 言

パルスYAGレーザを用いた薄板精密切断におけるドロスの生成機構およびその抑制法について主にビームラップ率、アシストガスの観点から実験的検討を行った。本研究で得られた主な結論は、以下のとおりである。

- (1) 単発加工においては、レーザ入射側ではスパッタが母材表面に飛散し、出口側では穴周囲にドロスが付着する。
- (2) アシストガスに酸素を使用することによって溶融物の流動性が向上し、ドロスの付着が減少する。
- (3) ドロス高さはビームラップ率に大きく影響を受け、ビームラップ率が93%付近においてドロス高さは最大となる。
- (4) ビームラップ率が96%以上の領域では、ドロスの欠落現象が起こる。
- (5) アシストガスのノズルと被加工物とのギャップ距離を短縮することによって、ドロスの生成が抑制される。

最後に、本研究を実施するにあたり、便宜を図っていただきました日立建機(株)に謝意を表します。

参考文献

- 1) 長谷川正義：ステンレス鋼便覧，日刊工業新聞社(1973)428.430
- 2) 電気製鋼研究会：特殊鋼便覧，理工学社(1969)16-11.
- 3) 小寺嘉秀：半導体材料，大日本図書(1980)64.
- 4) 渡辺武弘：レーザ加工における溶融・除去のメカニズムと加工形状に関する基礎研究，東京大学学位論文(1987)38.
- 5) 斎藤長男：放電加工のしくみと100%活用法，技術評論社(1979)56.
- 6) 川澄博通：レーザ加工技術，日刊工業新聞社(1985)171.
- 7) 三宅英孝，今井祥人：レーザビームによる薄リブ電極加工，電気加工学会全国大会(1994)講演論文集107.

(1996年7月1日 受付)