

# パルスYAGレーザーによる超精密切断技術の開発

舟田義則\* 舟木克之\*

今日、工業製品の小型化・高機能化が進む中で、波長の短いYAGレーザーによる高精度なレーザー加工技術の確立が求められている。しかし、これまでのロッド型YAGレーザーでは、YAG結晶に生ずる熱歪みの影響を受け、レーザー光の集光性が低いことが原因でその普及は一部に限られている。これに対して最近、熱歪みの影響を受けず、集光性の高いレーザー光を発振できるスラブ型YAG結晶が開発された。本研究では、スラブ型パルスYAGレーザーを使用して、鉄系材料の切断特性を調べ、レーザー切断の高精度化や高品質化の方法を検討した。その結果を以下に示す。(1) 1mm厚の炭素工具鋼板を再凝固層が少なく、溶融幅60 $\mu$ m以下で高精度に切断可能である。(2) 窒素ガスを使用することにより、切断面の酸化を防止した無酸化切断が可能である。(3) セラミックス微粉塗布によって、溶融物の溶着を防止したバリフリー切断が可能である。

キーワード：スラブ型パルスYAGレーザー、超精密レーザー切断、無酸化切断、バリフリー切断

## Development of Precision Cutting by Pulsed YAG Laser

Yoshinori FUNADA and Katsuyuki FUNAKI

With the miniaturization and high-functionalization of the industrial products, cutting with YAG laser is expected as a new precise machining. However, the YAG oscillator with the rod shaped crystal has the influence of the thermal distortion in it, and the condensing nature of the beam is found to be low, making it unsuitable for cutting. Recently, the oscillator with the slab shaped crystal is developed, which has no influence of the thermal distortion. In this paper, the cutting behavior on this laser is investigated, and the cutting quality is evaluated for the purpose of the application to a precision cutting. The following results are obtained. (1) The dross free laser cutting can be made with a kurf less than 60 $\mu$ m for the carbon tool steel. (2) The oxidation of stainless steel during the laser cutting can be prevented using nitrogen gas. (3) Forming of the burr can be prevented by applying ceramic powder.

Keywords : slab type YAG laser, high precision laser cutting, oxidation free cutting, burr free cutting

### 1. 緒言

1960年代にレーザーが発明されて以来、材料の加工ツールとして様々な分野で適用が試みられ、最も応用が進んだのがプレス・板金分野等での板材の切断である。レーザー切断は、ガス切断などの従来の溶断技術に比べて制御性が良く、周囲に与える熱影響が小さいため、NC制御技術と組み合わせることで、金型を用いずに板材を自由な形状に切断することが可能である。そのため、近年の多品種小ロット生産に有効な加工技術として認識されている<sup>1)</sup>。

現在最も普及しているレーザー加工機は、レーザー発

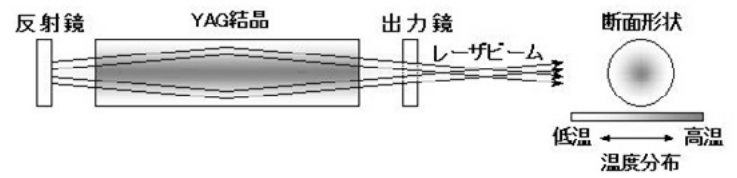
振媒体に炭酸ガスを使用するCO<sub>2</sub>レーザーである。これは、10kW級の高出力発振が可能で、厚い鋼板を高速で切断できることを特長としている<sup>2)</sup>。しかしながら、CO<sub>2</sub>レーザーの波長が約10 $\mu$ mと長いために、レーザー光を細く絞ることが難しく<sup>3)</sup>、最近の工業製品の高精度化・微細化ニーズに関して、切断時の熱影響が無視できないという問題を生じている。

一方、波長がCO<sub>2</sub>レーザーの1/10と短いYAGレーザーは集光性に優れ、スポット径の微小化が容易であり、熱影響の少ない精密切断分野での応用が期待されている<sup>4)</sup>。従来のYAGレーザーは、発振媒体にロッド型のYAG結晶(Yttrium Aluminum Garnet : Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>)と呼ばれる固体材料を使用しており、レーザー出力を上

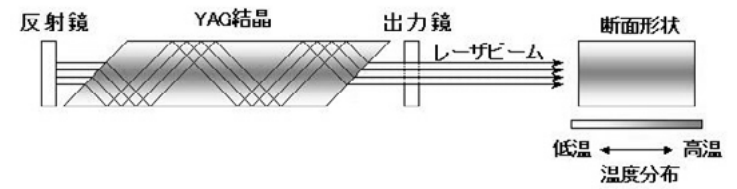
\*機械電子部



図1 スラブ型パルスYAGレーザー加工機



(a) ロッド型の場合



(b) スラブ型の場合

図2 結晶形状によるレーザー光伝播の違い

げると結晶内外の温度差によって生じる熱歪みによってビーム品質が劣化し、レーザー光を細く絞れないという問題があった<sup>5)</sup>。これに対し、最近、スラブ型と呼ばれる角形状をしたYAG結晶を用いることでビーム品質を維持しながら高出力のレーザー発振が可能になった。その結果、従来のCO<sub>2</sub>レーザーでは困難なレーザー切断の高精度化や微細化が現実味を帯びてきた<sup>6)</sup>。

本研究では、スラブ型パルスYAGレーザー加工機を使用して、主に鉄系金属材料に対するレーザー切断特性を調べるとともに、切断面の高精度化や高品質化を検討したので、ここに報告する。

## 2. 実験方法

### 2.1 スラブ型パルスYAGレーザー加工機

本研究では、図1に示すスラブ型YAG結晶を搭載したスラブ型パルスYAGレーザー加工機(コマツエンジニアリング製 2×2タイプ)を使用した。図2に示すように、従来のロッド型結晶では、軸に平行にレーザー光が伝播するため、結晶の中心部とその周辺との間の温度差により生ずる光学的歪みの影響を受け、ビーム品質が劣化し、集光性が悪い。これに対し、角柱の端面を斜めに切り落としたスラブ型結晶では、レーザー光は結晶内をジグザグに伝播するため、温度差に起因する結晶の歪みの影響が相殺され、レーザー出力を上げててもビーム品質の低下がないことを特長としている<sup>7)</sup>。

また、同加工機はレーザー発振をパルス化することで、パルスoff時に適度な冷却時間を設けることができ、材料への過剰な入熱が抑えられる。これらによ

表1 レーザー加工機的主要性能

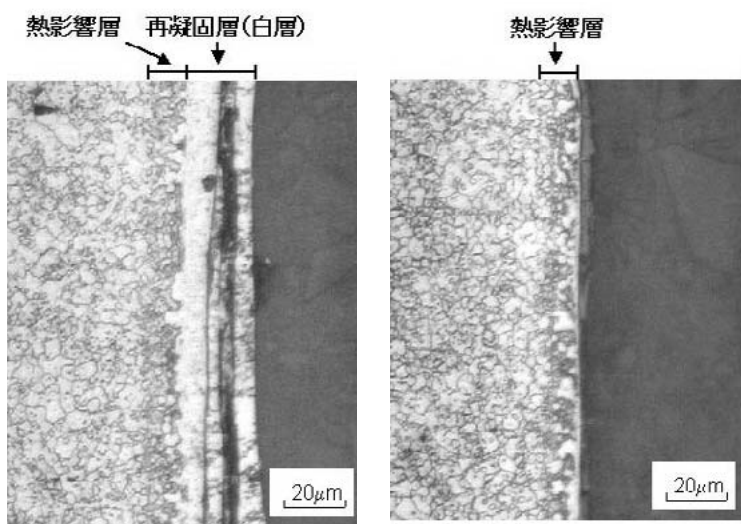
結晶形状	スラブ型
発振形態	パルス発振
最大平均出力	500 W
最大ピーク出力	8.6 kW
パルス幅	0.1 ~ 6.0 ms
最大パルス周波数	600 Hz
最大ワーク寸法	500 mm × 500 mm
Z軸ストローク	85 mm
位置決め精度	0.005 mm / 500 mm

って、精密かつ微細な加工が期待できる<sup>8)</sup>。表1に主要性能を示す。

### 2.2 レーザー切断実験方法

実験材料に1mm厚のステンレス鋼板(SUS304)や炭素工具鋼板(SK5)を使用した。切断実験は、これらの材料表面上にレーザー光をf80レンズにて集光、照射し、高圧ガスをアシストガスとして吹き付けながら切断方向に材料を送った。使用した加工ノズル径は1.8mmであり、試料表面とノズル先端との距離を1mmとした。また、パルス幅を0.2msで一定とし、ピーク出力やパルス当たりの送り量(送りピッチ)、アシストガス種を変えてレーザー切断実験を行った。

実験後の試料については、レーザー切断部を切断方向と直交方向に切断し、その断面をデジタルマイクロスコープ(キーエンス社製VH-6300)で観察するとともに電子線マイクロアナライザー(EDAX社製PV9800)による元素分析を行った。また、切断部周辺の寸法測定や切断面の粗さ測定(テーラー・ホブソン社製フォームタリサーフS4)も行った。



(a) ピーク出力 0.8kW 送りピッチ 33μm (b) ピーク出力 2.4kW 送りピッチ 1.3μm

図3 SK5材の切断部断面のマクロ組織

### 3. 結果および考察

#### 3.1 スラブ型パルスYAGレーザーの切断特性

##### 3.1.1 レーザ切断部の断面観察

SK5材をレーザー切断した後、試料断面を3%ナイトル液でエッチングして観察した例を図3に示す。同図(a)に示した条件では、切断面最表部に幅20μm程度の白層と呼ばれる再凝固層が見られる。これは、レーザー光の照射により一旦熔融した材料が除去されずにそのまま凝固したものである。これに対して、ピーク出力が高く、送りピッチの短い条件で切断した同図(b)では、再凝固層はほとんど存在せず、清浄な切断面が得られており、切断条件によって切断面の状態が異なることがわかる。

一方、熱影響層の厚さは、いずれの切断条件でもほぼ10μmで一定であり、CO<sub>2</sub>レーザーと比べて薄い。本実験では、パルス幅が短く、デューティー比が最大でも10%以下と小さいため、周囲の温度分布範囲は狭くなる。そのため、切断面に生成される熱影響層の幅は薄くなると考えられる。

##### 3.1.2 熔融幅

SK5材をレーザー切断した際に熔融した幅を切断部の断面観察から測定し、切断条件との関係を求めた結果を図4に示す。ピーク出力が高いほど熔融幅は広くなり、高速での切断が可能であった。これは、ピーク出力が高いほど高温領域が広がるためと考えられる。それでも、熔融幅は、レーザー光の最小スポット径が0.2mm程度であった従来のCO<sub>2</sub>レーザーやYAGレーザーに比べて<sup>9)</sup>全体的に小さく、最小60μmの熔融幅で精密切断が可能であることがわかる。

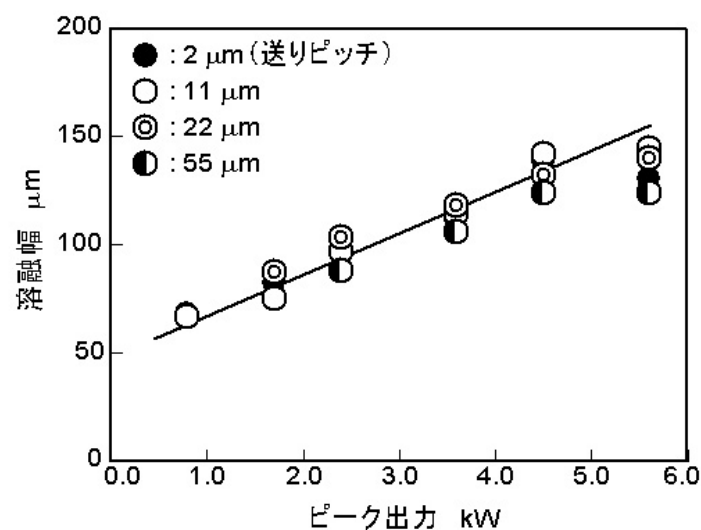


図4 熔融幅に及ぼす切断条件の影響

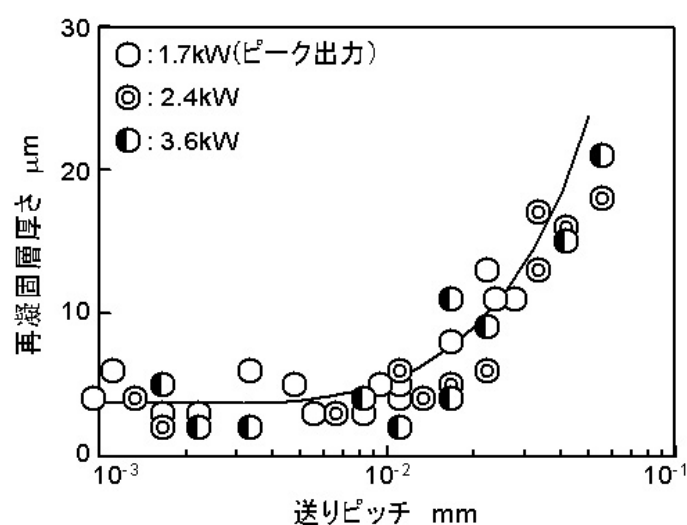


図5 再凝固層厚さに及ぼす切断条件の影響

一方、熔融幅は送りピッチの影響をほとんど受けていない。これは、前項でも述べたように、パルス幅が短く、レーザー照射部が瞬時に熔融除去されるとともに周囲の温度分布範囲が狭いために、送りピッチを短くし、レーザー光が同一箇所照射される回数を多くしても、熔融範囲を広げるほどに周囲の温度は上昇しないからと考えられる。

##### 3.1.3 再凝固層厚さ

SK5材のレーザー切断断面に形成された再凝固層の厚さを測定した結果を図5に示す。送りピッチが10<sup>-2</sup>mm以下の範囲では、再凝固層の厚さは2~3μmと薄い。これは、送りピッチが小さいほど同一箇所にレーザー光が照射される回数が増えるため、シェーピング効果により再凝固層が除去されるからと考えられる。

一方、送りピッチが10<sup>-2</sup>mm以上では、急激に再凝固層は厚くなる。これは、送りピッチがレーザー光のスポット径に比べて大きくなり過ぎると、再凝固層のシェーピングが起こり難くなるためと考えられる。

一方、ピーク出力の変化は再凝固層の厚さに明瞭な変化を与えない。一般に、ピーク出力の上昇は照射部の高温領域を広げるが、本実験条件の範囲では、溶融物の除去効率を変化させるほどの影響は及ぼさない。

### 3.1.3 切断面粗さ

図6は、SK5材のレーザー切断面の粗さを測定した結果である。送りピッチが小さいときには切断面粗さも小さいが、ピッチが $10^{-2}$ mm付近を超えると増大し始める。一方、ピーク出力を変えても粗さには明瞭な変化がみられない。これらは、再凝固層の厚さと同様の傾向を示している。

そこで、再凝固層の厚さと切断面粗さの関係を図7のようにプロットすると、両者の間には直線的な関係があり、測定される切断面粗さは、溶融物が再凝固して切断面に残留した際の不均一さを反映しているものと考えられる。したがって、精密かつ高品質なレーザー切断を行うには、再凝固層の制御が重要な

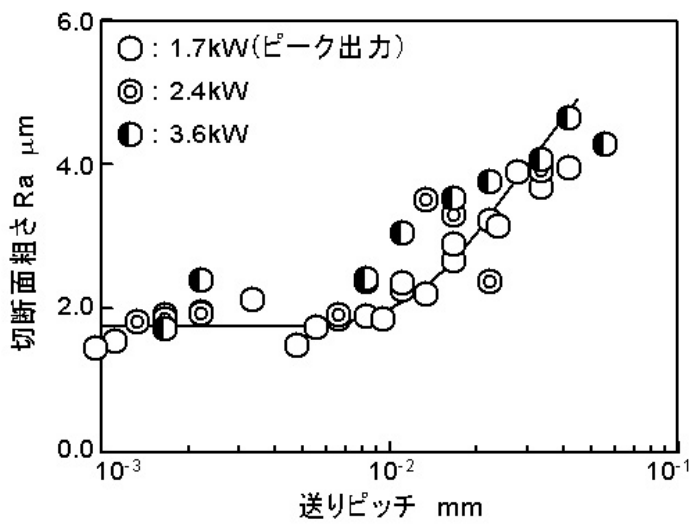


図6 切断面粗さに及ぼす切断条件の影響

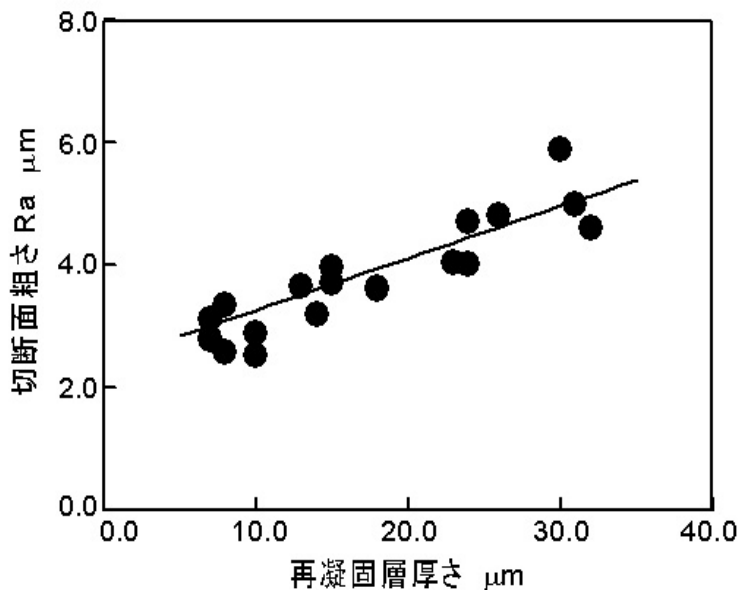
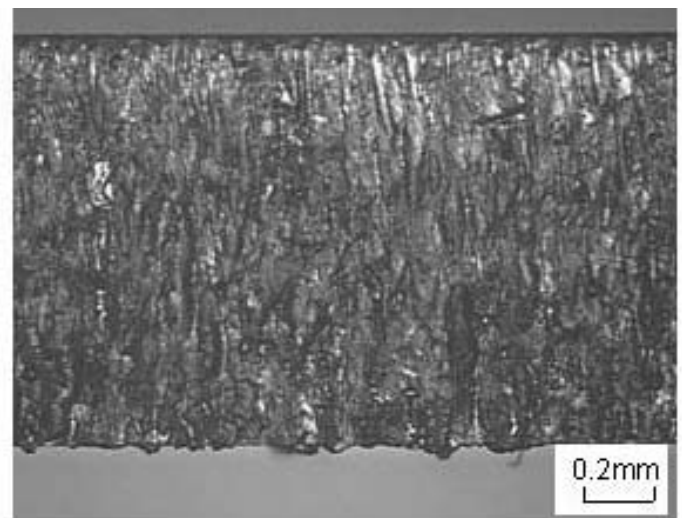


図7 再凝固層の厚さと切断面粗さとの関係

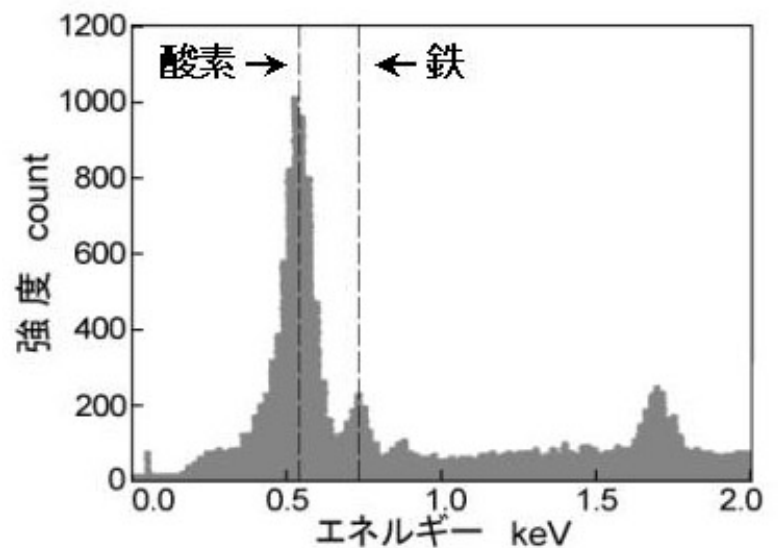
検討要因となる。なお、本実験で使用したスラブ型YAGレーザーは、最小で $Ra=1.4\mu\text{m}$ 程度の切断面を得ることができ、精密切断に有効である。

### 3.2 無酸化レーザー切断技術

ピーク出力が6.0kWで送りピッチが $11\mu\text{m}$ 、アシストガスに0.9MPaの圧縮空気を使用してSUS304材を切断し、そのときの切断面を観察した結果と電子線マイクロアナライザーにより元素分析した結果を図8に示す。切断面は黒く焼け焦げており、元素分析結果によれば、多量の酸素が検出されている。黒く見える所はレーザー切断時の熱によって鉄が酸化したものと判断できる。これは、本実験結果にのみ見られる現象ではなく、従来のレーザー切断においても同様に生じている。こうした切断面の酸化は、外観を悪くするだけでなく、溶接等の後工程がある場合に欠陥の原因になる。また、フッ硝酸による酸洗浄は可能であるものの、その使用は廃液処理等の観点から環境負荷が大きい。



(a) レーザ切断面



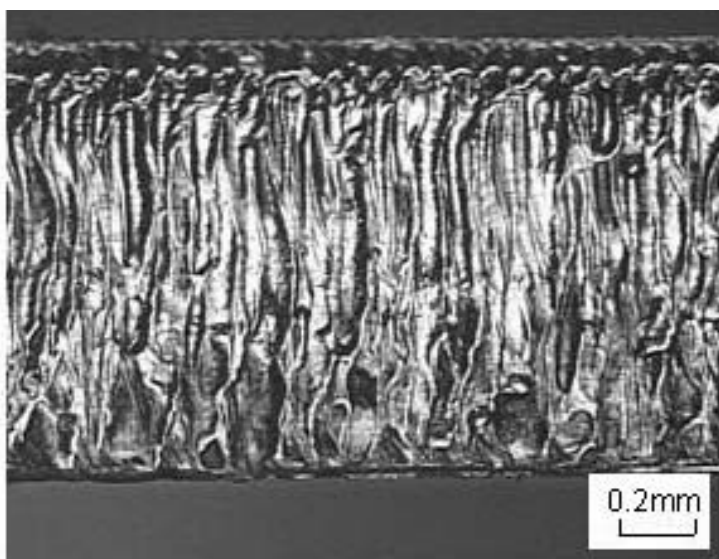
(b) 切断面の電子マイクロ分析結果

図8 圧縮空気を使用したレーザー切断面

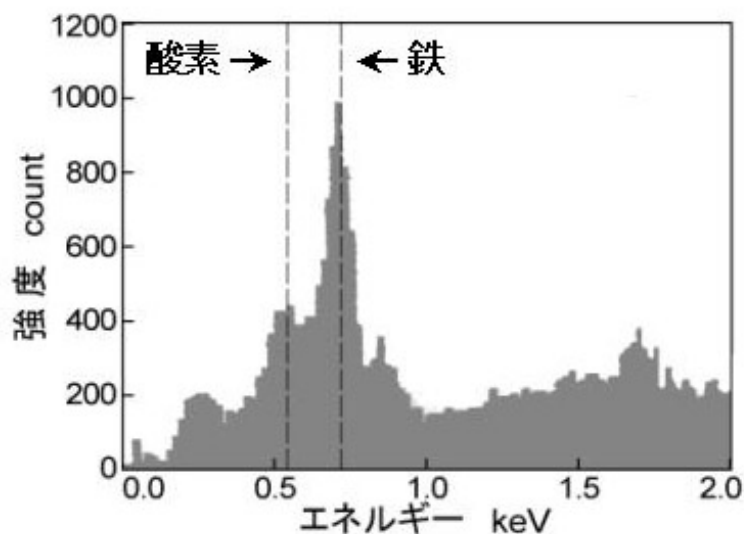
これに対して、上述と同一条件の下、アシストガスに0.7MPaの高圧窒素ガスを使用して切断した場合、図9に示すように、黒い焼け焦げた部分がなく、金属光沢を呈した清浄な切断面が得られる。また、元素分析結果からも分かるように、鉄に対応するピーク強度に比べて酸素のピーク強度は小さいことから、図8に比べて切断面の酸化が抑えられていると言える。これは、高圧窒素ガスの吹き付けによって切断部への酸素流入が阻止され、酸化が防止されたためと考えられる。スラブ型パルスYAGレーザー切断でも無酸化切断が可能であり、切断面の高品位化が図れることがわかる。

### 3.3 バリフリーレーザー切断技術

図10は、ピーク出力6.0kWで送りピッチ11 $\mu$ m、アシストガスに0.9MPaの圧縮空気を使用してSUS304材を切断し、そのときの切断面をレーザー照射面の反



(a) レーザ切断面



(b) 切断面の電子マイクロ分析結果

図9 高圧窒素ガスを使用したレーザー切断面

対側から観察したものである。切断面のエッジ付近に見られる柱状の塊は、レーザー切断時におけるバリであり、切断品の仕上がり精度を低下させる要因である。

図11は、同条件でSK5材を切断したときの切断部の裏側付近を拡大したものである。レーザー切断におけるバリは、切断時に溶融物が高圧アシストガスによって裏方向に向かって吹き飛ばされた一部が除去されずに、試料裏面に回り込み、そこで凝固したものであることがわかる。このバリの量は、送りピッチを短くして切断面の再凝固層が薄くなる条件で切断するほど多くなる傾向にあった。以上のことから、レーザー切断におけるバリの発生を防ぐには、切断時の溶融物が試料裏面に溶着するのを防ぐ必要があるといえる。

そこで、試料裏面に炭化珪素セラミックスの微粉を塗布した後に、上述と同一条件でSUS304材の切断を試みた。図12は、塗布した微粉を切断後に洗浄除去したときの切断部をレーザー照射面の裏側から観察したものである。図10にあるようなバリは全く見られず、シャープなエッジが得られている。セラミックス微粉等の塗布によって溶融物の溶着を防ぐこと



図10 SUS304材の切断部裏側エッジ

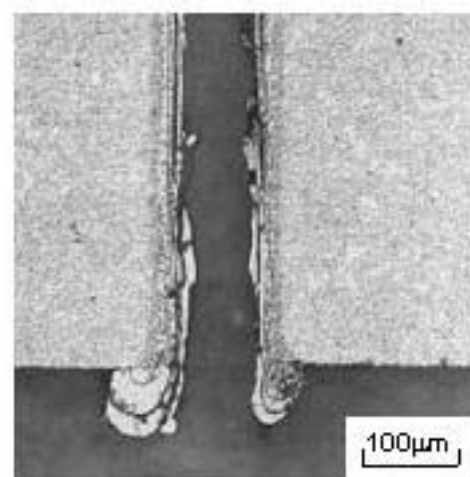


図11 SK5材の切断部におけるバリ断面

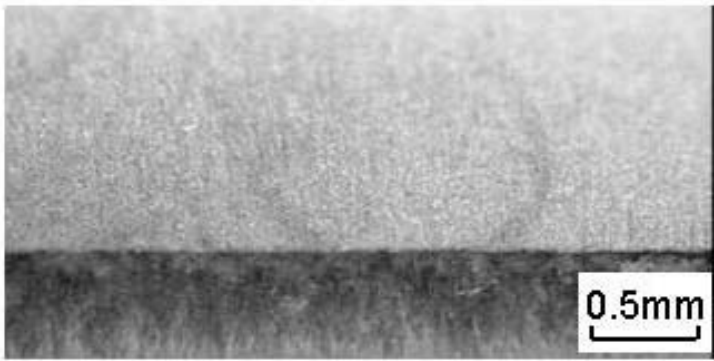


図12 セラミックス微粉塗布したSUS304材の切断部裏側エッジ

ができ、バリの全くない高品位なレーザー切断が可能であることがわかる。

#### 4. 結 言

超精密レーザー切断技術の開発を目的に、スラブ型パルスYAGレーザーを用いて、鉄系金属材料における切断特性を調べるとともに、切断部の高品位化を図る方法について検討した。その結果を以下に総括して述べる。

- (1)スラブ型パルスYAGレーザーを使用すれば、溶融幅0.1mm以下での切断が可能である。また、切断面粗さに影響を及ぼす再凝固層の厚さは、送りピッチが小さいほど薄くなり、清浄な切断面が得られる。
- (2)スラブ型パルスYAGレーザーによる切断において、高圧の窒素ガスをアシストガスに使用することによって、切断面の酸化を防止する無酸化レーザー切断が可能である。
- (3)材料裏面にセラミックス微粉を塗布することで、レーザー切断時の溶融物が裏面に溶着することが防止され、バリの全くない切断が可能である。

#### 参考文献

- 1) 宮本勇:生産技術としてのレーザー加工, 溶接技術, Vol.46, No.11, p.70-76 (1998)
- 2) 平本誠剛:CO<sub>2</sub>レーザー加工の電機機器製造への適用,レーザー熱加工研究会誌, Vol.4, No.3, p.5-8 (1997)
- 3) 入江定宏:YAGレーザーか, CO<sub>2</sub>レーザーか, 溶接技術, Vol.47, No.11, p.72-77 (1999)
- 4) 伊藤弘,山田明孝:半導体製造工程でのYAGレーザーの開発と適用, 溶接技術, Vol.46, No.11,

p.85-90 (1998)

- 5) 佐藤信二:高輝度固体レーザー加工機,レーザー熱加工研究会誌, Vol.4, No.2, p.186-187 (1997)
- 6) 三柳直毅:微細加工用パルスYAGレーザー,レーザー熱加工研究会誌, Vol.4, No.3, p.270-271 (1997)
- 7) 家久信明:大出力スラブ型YAGレーザーの開発と適用, 溶接技術, Vol. 47, No.12, p.102-106 (1999)
- 8) 工作機械技術研究会編:工作機械シリーズ・レーザー加工, 大河出版, p.63-70 (1992)
- 9) レーザ学会編:レーザーハンドブック, オーム社, p.672 (1982)