

平成21年 4月10日現在

研究種目：若手研究 (B)
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19760089
 研究課題名 (和文)
 熔融金属の除去能力に優れるノズルを用いた薄板の精密微細レーザ切断加工
 研究課題名 (英文) Fine Laser Cutting of Thin Plate by High-performance Nozzle for Molten Material
 研究代表者
 岡本 康寛 (OKAMOTO YASUHIRO)
 岡山大学・大学院自然科学研究科・助教
 研究者番号：40304331

研究成果の概要：

シングルモードファイバーレーザの様な高集光性ビームを用いた場合、加工溝が微細となることから熔融金属の流動性が損なわれ、切断特性を悪化させている。この点を克服するために、熔融金属の除去能力に優れるノズルを開発し、それを用いて銅およびステンレスの薄板に対して切断加工を行い、アシストガスの種類や切断速度などが及ぼす影響を明らかとする。それにより高性能ノズルを用いた薄板の精密微細切断加工法を確立する。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,100,000	0	2,100,000
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	360,000	3,660,000

研究分野： 特殊加工

科研費の分科・細目： 「工学」・「生産工学・加工学」

キーワード： シングルモードファイバーレーザ, 高性能ノズル, 精密切断加工, レーザ加工, ラバルスロート, アシストガス

1. 研究開始当初の背景

デバイスの小型高性能化がめざましい今日、それにもなって必要とされる加工サイズも当然の事ながらマイクロ化が進んでいる。また、多品種少量生産が必要とされることもあって、多種多様な微細部品を高効率に作製する手法が求められている。特に電子部品材料ではコスト面から銅基板材料が再着目されており、その適用範囲が広がっている。

しかし、従来のダイシングブレードを用いた銅薄板の精密微細切断加工ではバリ発生の問題から切断速度を現状より大きくすることは困難である。一方レーザ切断加工を検討した場合、ドライプロセスで直線のみでなく自

由曲線での切断が可能となるなどの利点はあるが、再凝固物(ドロス)の付着が精密切断特性を悪化させている。

ところで、近年、ビーム品質に優れたシングルモードのレーザが開発されている。その優れたビーム品質は、集光径の微細化によるパワー密度の増大、温度上昇時定数の短縮による高速加工、さらには3次元拡散によるプラズマ吸収損失の抑制などにつながり、加工プロセスが向上させることが期待できる。

しかし、切断を検討する場合、逆にその集光性の良さが問題となる。集光性に優れたファイバーレーザやYAGレーザの発振波長は近赤外域に属することから、レーザ光照射部お

よびその周囲は熔融状態となる。一般に熔融材料はレーザー光と同軸方向から噴出させるアシストガスにより除去されるが、得られる加工溝が微細であることから、熔融材料の流動性が低下するために多くの熔融再凝固物が残存する。そのため、熔融材料を効果的に除去できる切断加工用ノズルの開発が期待されている。

2. 研究の目的

これまで、ドロスの生成はレーザー光と同軸に噴出されるガス流れに大きく影響され、そのガス流れは使用するノズルの形状によって大きく異なることを明らかにしてきた。一般に使用ガス圧を大きくすることによりドロスの低減が可能であるが、試料上でのガス圧が同等でも、ドロスの生成状態は異なっていた。これは、ドロスの生成に試料上におけるガス圧に加えて流れの方向および速度が重要になってくことを示している。

そこで、本研究ではアシストガスの流速に着目して、流速を高める効果を有する高性能ノズルを開発する。そして、それを用いて銅およびステンレスの薄板に対して切断加工を行い、アシストガスの種類や切断速度などが及ぼす影響を明らかとする。それにより高性能ノズルを用いた薄板の精密微細切断加工法の確立を目指す。

3. 研究の方法

(1) 切断実験

実験装置の概略を図1に示す。集光レンズは焦点距離50mmのものを使用した。アシストガスには、酸素を使用し、ボンベ圧を100k-1600kPaまで変化させた。ノズル先端と加工試料表面とのギャップ距離は1mmに固定した。加工試料である厚さ150 μ mのSUS304を治具に固定し、送り速度を2mm/sとして切断加工を行った。また、加工時における熔融物除去の様子を高速ビデオカメラ（島津製作所製Hyper Vision HPV-1）を用いて撮影した。撮影のトリガーにはフォトディテクタおよびパルスジェネレータを用い、レーザーパルス照射から任意の時間間隔で撮影を行った。

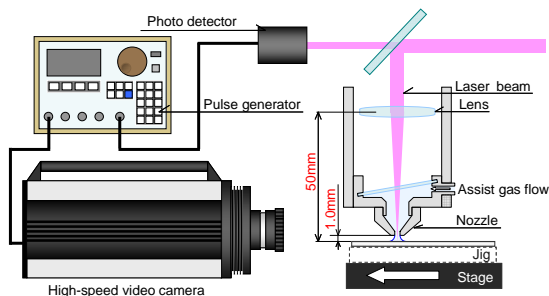


図1 実験装置の模式図

(2) 試料上ガス圧の測定方法

試料上ガス圧の測定法を図2に示す。図に示すように治具中央に $\phi 0.5$ mmの穴を設け、穴の直下にひずみゲージ式小型圧力変換機（共和電業社製PGM-20KE）を固定し、その値をアシストガスの試料上ガス圧として記録した。

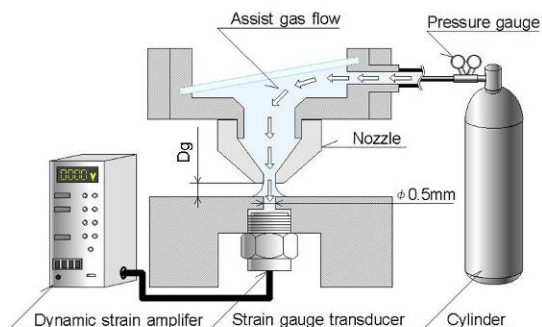
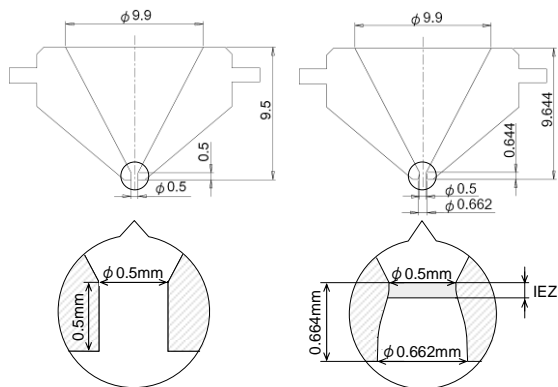


図2 試料上ガス圧の測定方法

(3) ノズル形状

本実験に使用したノズルを図3に示す。(a)はスロート部直径0.5mm、スロート部長さ0.5mmの一般的なストレートスロートノズルであり、以後 $\phi 0.5N$ と表記する。(b)はボンベ800kPaのときに適正ガス流れとなるよう設計されたノズルスロート部直径 $\phi 0.5$ mm、初期膨張部長さ150 μ mとしたラバルスロートノズルであり、以後 $\phi 0.5Laval$ IEZと表記する。両ノズルともスロート部直径が0.5mmと同じであることから、各ボンベ圧における消費流量は同一である。



(a) $\phi 0.5N$

(b) $\phi 0.5Laval$ IEZ

図3 ノズル形状

4. 研究成果

(1) 主な研究成果

① アシストガス流の特性

これまでで作製した直径0.5mmのラバルスロートを有する高性能ノズルからのアシストガス流をシュリーレン法にて観察したところ、図4に示すように、自由噴流では垂直衝撃波

面が存在しないガス流れを得られていることが確認された（写真上部の黒い台形部分がノズル先端）．アシストガスの流速を熱線流速計によりラバルスロートと有するノズルとストレートスロートと有するノズルで相対的に比較したところ、ストレートスロートφ0.5Nではノズルに供給する圧力を上昇させてもある一定値に漸近したが、ラバルスロートφ0.5Laval IEZでは試料上ガス圧に対して比例的に増大しており、大きな流速を得られていることが明かとなった．

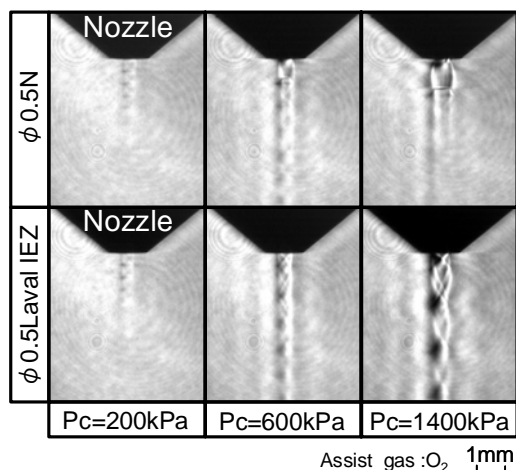


図4 自由噴流におけるアシストガスの流れ

一方、図5に示すように、ノズル直下1mmにφ0.2mmの穴を有する厚さ150μmの試料を設置した場合は自由噴流とは異なり、垂直衝撃波面の発生が確認された．しかし、ノズルに供給するアシストガス圧を増大させると垂直衝撃波面がノズルから離れる方向へと移動した．また、ストレートスロートノズルφ0.5Nでは試料下部のガス流れが明確に確認できないが、ラバルスロートノズルφ0.5Laval IEZではボンベ圧600kPaから明瞭に観察され、アシストガスの直進性が向上していた．試料上部に発生する垂直衝撃波面の発生位置は試料表面に生じる上向きの流れと試料上ガス圧によって決定されることとあわせて考えると、ノズルから噴出したガス流による下方への圧力が増大しているものと考えられる．

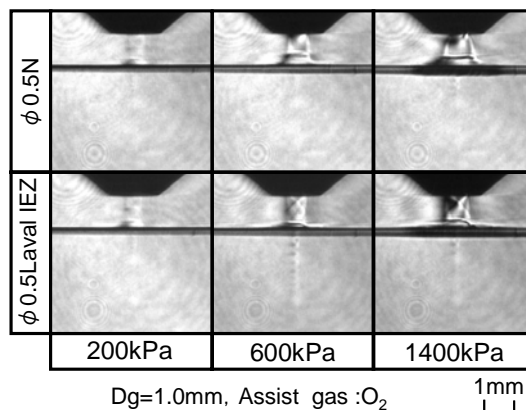


図5 ノズル直下に試料を設置した場合のアシストガスの流れ

図6に、試料上ガス圧とボンベ圧の関係を示す．プロットが不連続となっている箇所は試料上ガス圧が大きく変動する不安定領域1)であり、この領域における圧力測定は行っていない．φ0.5Laval IEZでは、ボンベ圧400kPa以降においてφ0.5Nよりも試料上ガス圧が大きな値を示している．特に、設計圧力であるボンベ圧800kPaにおいて最大値を示し、φ0.5Nの約5倍という高い試料上ガス圧を示した．

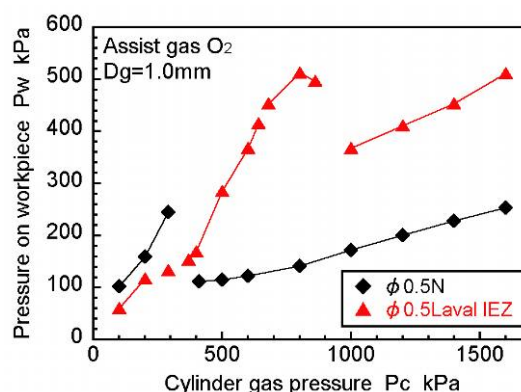
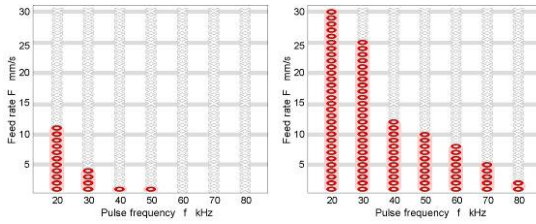


図6 試料上ガス圧とボンベ圧の関係

③切断実験およびその評価

金属薄板に対して切断加工実験を行い、切断条件が加工結果に及ぼす影響を検討した．最高切断可能速度を検討したところ、図7に示すようにQスイッチ発振の場合、厚さ0.1mmの銅薄板に対しては低パルス繰り返し数を用いることで高いピーク出力が得られることから高速での切断が可能であった．また、ラバルスロートノズルφ0.5Laval IEZを用いることで、従来のストレートスロートノズルφ0.5Nでは困難であった高パルス繰り返し数の領域においても切断が可能となった．さらに、アシストガスに窒素を用いることで、低速においてもドロス発生量を低減でき、熱影響の少ない良好な可能が可能となった．



(a) $\phi 0.5N$ (b) $\phi 0.5Laval$ IEZ
 図7 Qスイッチファイバレーザによる銅薄板の切断加工における切断可能範囲

図8に、パルスYAGレーザを用いて厚さ0.15mmのステンレス薄板を切断したときの、各ノズルにおけるポンベ圧とドロスの高さの関係を示す。どちらのノズルも図6で示した試料上ガス圧が高いポンベ圧の領域でドロス高さが小さくなっており、特にポンベ圧600kPa以降ではラバルスロートノズル $\phi 0.5Laval$ IEZのドロス高さはストレートスロートノズル $\phi 0.5N$ の約1/3となっていた。このように、低中ポンベ圧で高いドロス低減能力を有していることから、ラバルスロートノズル $\phi 0.5Laval$ IEZを用いることで同等のドロス高さが得られる領域でガス消費量を大幅に抑制でき、コスト削減が可能になると考えられる。

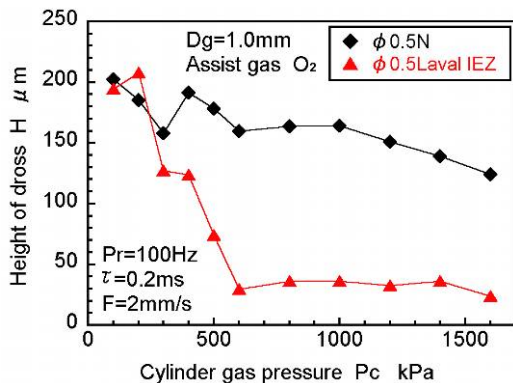


図8 パルスYAGレーザによるステンレス薄板の切断加工におけるドロス高さとポンベ圧の関係

④加工現象の観察による切断特性の解明

超高速度カメラを用いてパルスYAGレーザでステンレス薄板の切断加工時における熔融金属の飛散状況を観察した。図9に、ポンベ圧が200k、600k、1400kPaで行った切断加工中におけるスパッタの飛散状況を示す。図1で示したようにカメラの方向へ送りを与えている。これらの写真はレーザ光照射から750 μ s後のものである。いずれのポンベ圧においてもストレートスロートノズル $\phi 0.5N$ に比べラバルスロートノズル $\phi 0.5Laval$ IEZでは、試料上部、下部ともに熔融物の除去量が多く、

飛散角度も小さくなっており、熔融金属を下方へ効率的に排出できていた。また、ラバルスロートノズル $\phi 0.5Laval$ IEZでは、ポンベ圧600kPaと1400kPaの熔融物飛散量が同程度となっていた。これは、設計圧力に近いポンベ圧領域で、アシストガス流が適正流れに近くなり、その結果、ポンベ圧1400kPaに比べて低いポンベ圧600kPaにおいても高い熔融金属の除去能力が得られたためと考えられる。

以上のように、ラバルスロートノズル $\phi 0.5Laval$ IEZを用いることで高い試料上ガス圧が得られる。それにより熔融金属の除去量が向上し、従来のノズルでは困難であった加工条件においても切断が可能となったものと考えられる。また、これはドロスの低減効果にもつながるものであった。この効果は、低中圧のポンベ圧でも得られることから、従来のように高压ガスを用いずとも良好な切断が可能となり、アシストガスの消費量を大幅に抑制することができる。

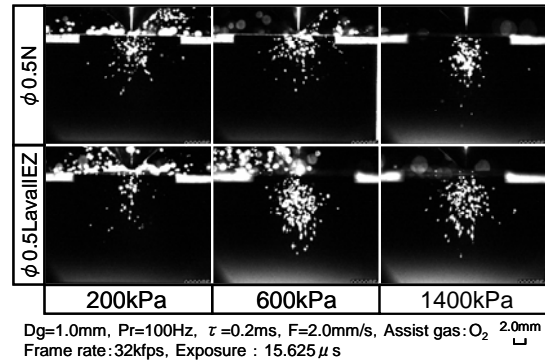


図9 パルスYAGレーザによるステンレス薄板の切断加工におけるスパッタ飛散状況の高速度観察

(2) 得られた成果の国内外における位置づけ
 薄板のレーザ切断加工においては、集光径の微細化が進みつつあるが、微細溝内部では熔融金属の流動性が低下することから、除去能力の高いノズルの開発が求められていた。本研究で開発したノズルは、ポンベ圧600kPa程度で良好な特性を示すことから、一般に用いられているコンプレッサから供給されるガス圧においても同様の効果が期待できる。従来の高压のポンベ圧を用いなければ克服できなかった領域を、開発したノズルを用いることで打破できればアシストガス消費量を大幅に低減することが可能となる。レーザ切断加工におけるランニングコストにおいてアシストガスのしめる割合は7割以上と言われていることから、本研究で開発したノズルを用いることで、大幅なコスト削減と切断品の向上が期待できる。

(3) 今後の展望

これまではノズルのスロート直径が0.5mmとしてノズル形状の開発を行ってきた。これは薄板をターゲットとしていること、およびアシストガスの消費量を抑制するためにはスロート直径が小さい方が望ましいためである。しかし、今後は本開発技術を厚板のレーザー切断加工へ展開していきたいと考えており、厚板切断においては高出力レーザーを用いることから大きなスロート直径が必要となる。そのために、スロート直径が1mm以上の領域においても同様の効果が得られるノズル形状を開発、展開していきたいと考えている。このスロート直径の大口径化が実現できれば、本開発技術の適用範囲は大幅に広げることができ、レーザー切断加工技術の発展へ貢献できるものと考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- ① Yasuhiro OKAMOTO, Ryoji KITADA, Yoshiyuki UNO and Hiroyuki DOI, Cutting of Solid Type Molded Composite Materials by Q-switched Fiber Laser with High-performance Nozzle, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 査読有, Vol. 2 No. 4, (2008), pp. 651-660.
- ② 宇野義幸, 岡本康寛, 精密微細レーザー切断加工用高性能ノズルの開発, 砥粒加工学会誌, 査読無, 52巻10号, (2008), pp. 573-576.

[学会発表] (計1件)

- ① 鈴木博士, 宇野義之, 岡本康寛, パルスYAGレーザーによる薄板の精密切断加工におけるノズル形状の影響, 2008年度精密工学会春季大会学術講演会, 2009年3月13日, 東京.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡本 康寛 (OKAMOTO YASUHIRO)
岡山大学・大学院自然科学研究科・助教
研究者番号: 40304331