

アシストガスを有効に利用できるラバルスロートノズルを用いた シングルモードファイバーレーザーによる精密微細切断加工

岡山大学 工学部 機械工学科
助教 岡本康寛
(平成 16 年度研究開発助成 AF-2004026)

キーワード: 精密切断, ファイバーレーザー, ノズル

1. 研究の目的と背景

波長が近赤外域に属しているレーザー光を用いた加工は、基本的に熱加工である。そのため、投入された熱によって工作物が溶融、蒸発し、それらの一部は加工点における材料の気化圧力により吹き飛ばされ、表面にスパッタとして付着する。このスパッタについては、あらかじめ防止剤を塗布することにより対策が可能である。しかし、残りの溶融した工作物は、レーザー光と同軸方向に噴出されるアシストガス流によって下方へ押し流されるようにして除去され、飛散するが、除去しきれなかった溶融物は裏面にドロスとして残留し、精密切断加工における表面特性を悪化させる^{1), 2)}。このため、アシストガスの流れはドロスの生成に大きな影響を与える。

ところで、近年小型で高効率なレーザー発振器としてファイバーレーザーが注目を集めている。このレーザーはファイバー自身が発振器を構成することから、安定性に優れる。また、ダブルクラッド機構のファイバーを用いることから高い光-光変換効率を可能とし、優れた品質のレーザービームを出力できることから今後の発展が期待されている^{3), 4)}。しかし、近赤外の波長領域に属するシングルモードファイバーレーザーを用いて薄板の切断加工を行った場合も、先に述べたように熱加工である。それに加え、優れたビーム品質により加工溝幅が微細になるために溶融材料の流動性が低下し、ドロスの発生が顕著となる。そのため、シングルモードファイバーレーザーによる薄板の切断加工にはドロスの除去能力が高いノズルが必要となる。

これまでの研究により、一般的な先細ノズルを使用した場合、高圧領域において試料上でのアシストガスの圧力は元圧の半分以下に減少することが明らかになっている⁵⁾。そこで、ノズルからのアシストガスの流れを解析し、試料上において高いアシストガス圧力が得られ、ドロスの除去能力に優れるノズルに関して検討を行ってきた^{6), 7)}。したがって、ファイバーレーザーにより形成される微細溝であっても、それらのドロスの除去能力に優れるノズルを応用して効果的に溶融材料を除去できることが期待される。以上のことから、これまでに開発してきたドロスの除去能力に優れるノズルをベースに、更に溶融材料の除去能力に優れるノズルを開発し、それを用い

たシングルファイバーレーザーによる精密微細切断加工法について検討を行った。

2. 実験方法

図1に本実験で使用した実験装置の模式図を示す。使用した発振器はSUNX社製Ybファイバーレーザー(LP-F13R-SS)である。この発振器は、LDにより励起が行われ、Qスイッチ発振が可能である。表1に本発振器の主な仕様を示す。直径6mmのコリメートビームを焦点距離49.9mmのレンズを用いて集光し、試料表面に焦点を合わせて加工を行った。集光レンズに入射前のレーザー光をCCD方式により観察したところTEM₀₀の非常に良好なシングルモードであった。そのレーザー光の集光点における直径を90/10 Kinfe Edge法⁸⁾により測定したところ約15μmであった。工作物には板厚100μmの銅板を用い、XYZステージ上のジグに固定した。切断実験は、NCコントローラにより所定の送り速度を与えて行った。アシストガスには酸素と窒素を用い、ノズル先端と加工試料表面のギャップ距離は1.0mmに設定した。

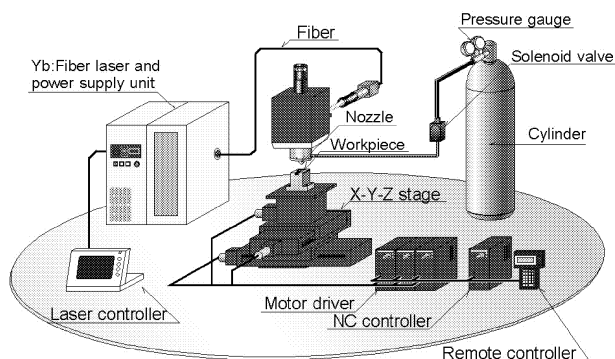


図1 レーザ加工装置の模式図

表1 レーザ発振器の主な仕様

波長	1060 nm
最大パルスエネルギー	1 mJ/P
最大平均出力	20 W
パルス繰り返し数	20k – 80 kHz
パルス幅	130 – 250 ns

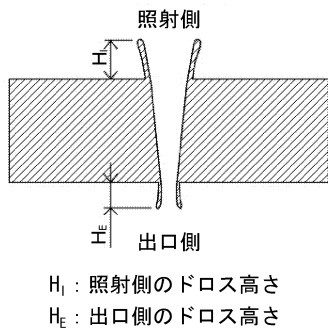


図2 ドロス高さの定義

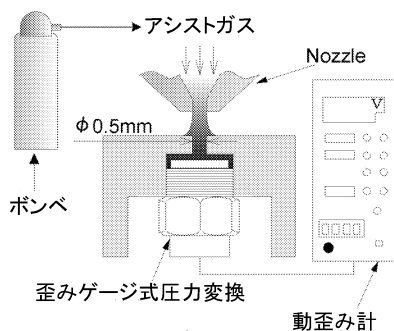


図3 試料上ガス圧の測定方法

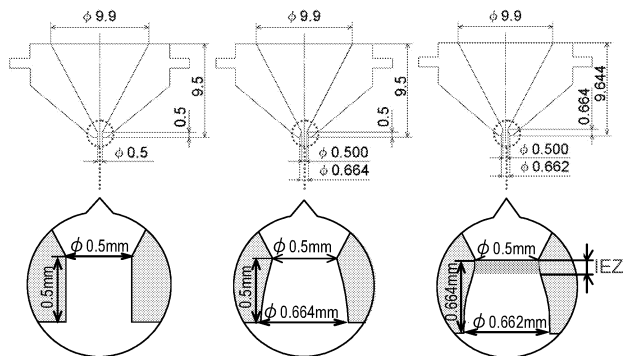
図2は切断加工を行った後の工作物断面を模式的に示したもので、上部がレーザー光入射側である。本実験におけるドロス高さは、母材とドロスの最高点との距離と定義し、レーザー光入射側におけるドロス高さを H_i 、出口側におけるドロス高さを H_e として表している。ドロス高さの測定には触針式表面形状測定器を使用し、最高点を判別しやすくするために先端丸み半径 800 μm の触針プローブを用い、10個の平均値とした。

試料上ガス圧の測定に際しては図3に示すように、加工状態を模擬してあらかじめ直径 0.5mm の穴を設け、その下に歪みゲージ式小型圧力変換器を設置してノズル直下における圧力として記録した。以後、この圧力を試料上ガス圧 P_w とし、ポンペ出口におけるアシストガス圧力はポンペ圧 P_c として区別する。

3. 高性能ノズル

図4は本実験で用いたノズル断面の模式図である。(a)は、直径 0.5mm、長さ 0.5mm のストレートスロートを有する先細ノズル Nozzle N である。(b)は外圧 101.3kPa の時にノズル内圧 800kPa で適正膨張となるように設計したスロート部を有する Nozzle Laval である。(c)は Nozzle Laval に長さ 150 μm の初期膨張部を設けた Nozzle Laval IEZ であり、いずれのノズルも出口部以外の形状は全て同一の形状とした。

図5は Nozzle N、Nozzle Laval、Nozzle Laval IEZ の試料上ガス圧とポンペ圧の関係を示したものである。なお、試料上ガス圧が一定値を示さず、圧力変動が大きかった



(a) Nozzle N (b) Nozzle Laval (c) Nozzle Laval IEZ

図4 ノズル形状

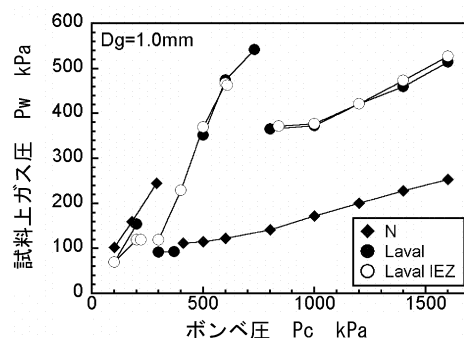


図5 試料上ガス圧とポンペ圧の関係

不安定領域は図中にプロットしていない。図から明らかなように、Nozzle N では試料上ガス圧が変動する不安定領域が1回しか発生しないのに対し、Nozzle Laval では3回、Nozzle Laval IEZ では2回発生している。そのためポンペ圧の設定には注意を要する。しかし、Nozzle Laval IEZ は Nozzle Laval よりも不安定領域の範囲が狭くなっており、初期膨張部を設けることによって不安定領域の低減に効果があることがわかる。

一方、試料上ガス圧に着目すると、いずれのノズルも、1回目の不安定領域まではポンペ圧の上昇にともなって試料上圧力も増加するが、不安定領域後は一端試料上ガス圧が減少している。2回目の不安定領域終了以降においては Nozzle Laval と Nozzle Laval IEZ の試料上ガス圧は Nozzle N に比べて高くなり、特にポンペ圧 600kPa 付近では約4倍以上程度高い値を示している。今回設計、試作した Nozzle Laval は、本実験における最高使用ポンペ圧の半分程度、すなわちポンペ圧 600~700kPa 付近で試料上ガス圧が最大となった。またこの時、試料上ガス圧はポンペ圧の約7割程度であり、Nozzle N では2割程度であることを考えると、Nozzle Laval と Nozzle Laval IEZ の圧力損失が極めて少ないことがわかる。しかし、3回目の不安定領域終了後は、試料上ガス圧は一旦減少している。

以上のように、Nozzle Laval と Nozzle Laval IEZ は、あるポンペ圧において試料上ガス圧が最大となり、従来の

表2 アシストガスに酸素を用いた場合の各パルス繰り返し回数における最大切断速度

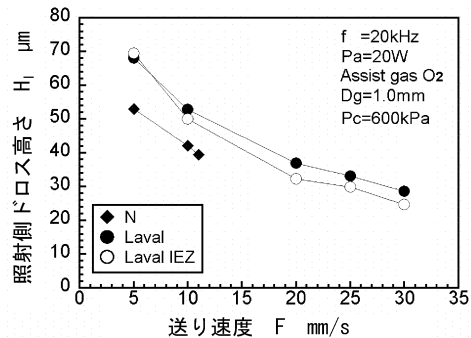
	20kHz	30kHz	40kHz	60kHz	80kHz
N	11mm/s	4mm/s	1mm/s	-	-
Laval	30mm/s	13mm/s	10mm/s	6mm/s	1mm/s
Laval IEZ	30mm/s	25mm/s	12mm/s	8mm/s	2mm/s

先細ノズル Nozzle N に比べて適正領域における試料上ガス圧増加の効果は大きい。そこで、以後の切断実験はアシストガスを有効に利用できるボンベ圧 600kPa に固定して行った。

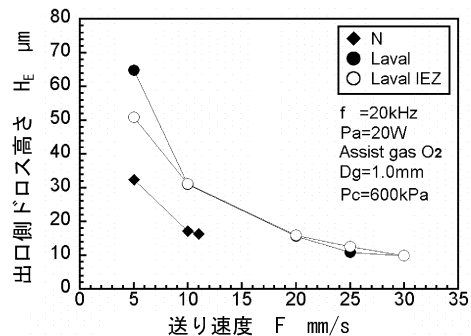
4. 実験結果及び考察

表2は試料上ガス圧の違いが顕著なボンベ圧 600kPa において、アシストガスに酸素を用い、パルス繰り返し数を 20k-80kHz まで変化させて各ノズルにおける切断の可否を検討した結果である。レーザ光を試料の端から端まで照射し、試料を完全に切り分けられた場合を切断可、完全に分離できなかった場合を切断不可とした。表から明らかなように、いずれのノズルも高いピーク出力が得られる低パルス繰り返し数において大きな切断可能速度が得られた。パルス繰り返し数 20kHz で Nozzle N の最大切断速度が 11mm/s であるのに対し、Nozzle Laval および Nozzle Laval IEZ は 30mm/s と Nozzle N の約 3 倍の速度で切断可能であった。なお、30mm/s は本システムの最大送り速度であり、それ以上の送り速度での切断実験は行っていないことから限界速度は判断できない。しかし、30mm/s においても良好な切断が行えていたことから、更に送り速度を大きく設定しても切断が行えるものと考えている。また、Nozzle Laval と Nozzle Laval IEZ を用いた場合、Nozzle N では切断が不可能な高パルス繰り返し数でも切断が可能であった。これは前述したように、ボンベ圧 600kPa において Nozzle N の試料上ガス圧が 120kPa 程度であるのに対して Nozzle Laval と Nozzle Laval IEZ では 470kPa 程度であり、約 4 倍と非常に高いことから、溶融物を効果的に排出できた結果であると考えられる。さらに、繰り返し数 30kHz では、Nozzle Laval IEZ の最高切断速度は Nozzle Laval の約 2 倍であり、それ以降のパルス繰り返し数でも Nozzle Laval よりも Nozzle Laval IEZ の最大切断速度が大きくなっている。しかし図5で示したように、両ノズルの試料上ガス圧は、ほぼ同程度であったことから、初期膨張部を設けることによりアシストガスの直進性が向上し、その結果高い最大切断速度が得られたものと考えられる。

図6は最も高い切断可能速度が得られたパルス繰り返し数 20kHz において、アシストガスに酸素を用いた場合のドロス高さ（ H_i ）と送り速度（ F ）の関係を示したものである。いずれのノズルを用いた場合も、低速においてドロス高さが大きくなったが、送り速度の増大にともないドロス高



(a) 照射側



(b) 出口側

図6 アシストガスに酸素を用いた場合のドロス高さと送り速度の関係

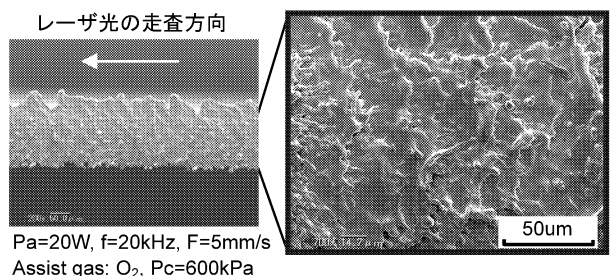


図7 アシストガスに酸素を用いた場合の Nozzle N による切断面の SEM 写真

さは減少した。しかし、同一の送り速度で比較すると、Nozzle N よりも Nozzle Laval と Nozzle Laval IEZ の方が大きくなっていた。この点は以下のように考えられる。Nozzle N の試料上ガス圧は低いため最大切断速度は小さく、切断カーブより溶融材料は効果的に除去されていない。したがって、Nozzle N における切断カーブから下方へ排出除去される材料の量は、Nozzle Laval や Nozzle Laval IEZ と比較して少ないものであったと考えられる。その結果、試料下方へ流出する溶融材料が少なくなったため、Nozzle Laval や Nozzle Laval IEZ よりも Nozzle N のドロス高さが小さくなったものと考えられる。一方、いずれの送り速度においても出口側よりもレーザ光照射側のドロス高さの方が大きくなっている

図7はアシストガスに酸素を用い、Nozzle N にて切断

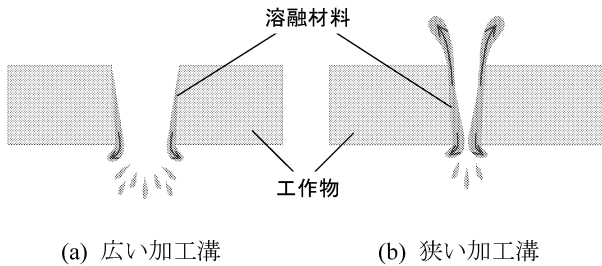


図 8 カーブ幅の違いによる溶融材料流れの差

表 3 アシストガスに窒素を用いた場合の各パルス繰り返し数における最大切断速度

	20kHz	30kHz	40kHz	60kHz	80kHz
N	-	-	-	-	-
Laval	30mm/s	-	-	-	-
Laval IEZ	30mm/s	-	-	-	-

を行ったときの切断面の電子顕微鏡写真である。レーザー光は図中において右側から左側へ走査している。図から明らかなように、溶融した材料は下方のみでなく、上方へも流動していることがわかる。一般に、溶融した材料は、図 8 (a) に示すように十分な切断カーブ幅がある場合には、アシストガスの流れによって下方へ除去される。しかしながら、シングルモードファイバーレーザーにより得られる切断カーブ幅は非常に狭いことから、図 8 (b) に示すように、溶融材料をアシストガス流により下方へ除去することは難しく、その結果、上方へ溶融材料が噴出したものと考えられる。

表 3 はポンペ圧 600kPa において、アシストガスに窒素を用い、パルス繰り返し数を 20k-80kHz まで変化させて各ノズルにおける切断の可否を検討した結果である。表から明らかなように、Nozzle N の場合は、いずれのパルス繰り返し数、送り速度においても完全に切り分けることは不可能であった。窒素アシストガスは不活性であり、酸化反応が期待できないことから、材料はレーザー光が吸収されることによって生ずる熱量のみにて温度上昇して溶融、蒸発される。そして、溶融材料は主にアシストガス流により除去が行われる。Nozzle N の試料上ガス圧は他の 2 つのノズルと比較して小さいことから、他のノズルよりも切断能力が劣っていたと考えられる。一方、Nozzle Laval と Nozzle Laval IEZ ではパルス繰り返し数 20kHz において 30mm/s と酸素アシストガスの場合と同等の切断速度が得られた。しかし、パルス繰り返し数 30kHz 以上では、いずれの送り速度においても試料を切り分けることはできなかった。Nozzle Laval IEZ の最大切断速度は Nozzle Laval と同等であったが、アシストガスに酸素を用いた場合は Nozzle Laval に比べて Nozzle Laval IEZ の方が良好な切断速度が得られていたことを考えると、送り速度を高く設定することによって、窒素

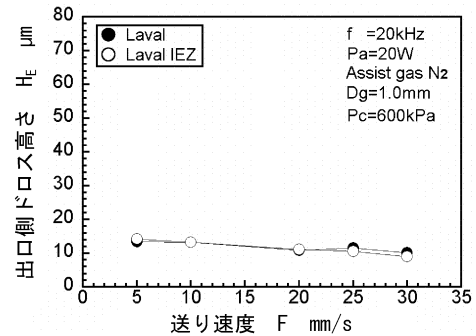
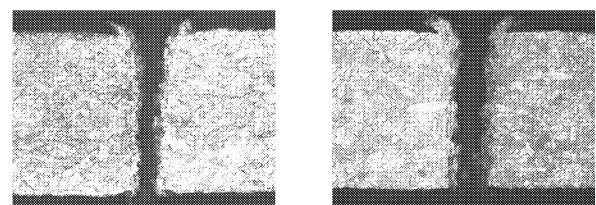


図 9 アシストガスに窒素を用いた場合における Nozzle Laval と Nozzle Laval IEZ の出口ドロス高さとの送り速度の関係



(a) Nozzle Laval (b) Nozzle Laval IEZ
Pa=20W, f=20kHz, F=30mm/s Assist gas: N₂, Pc=600kPa 50μm

図 10 アシストガスに窒素を用いた場合の Nozzle Laval および Nozzle Laval IEZ の切断断面写真

アシストガスの場合においても酸素アシストガスの場合と同様に Nozzle Laval IEZ を用いることで効率的な切断加工を行える可能性があるものと考えられる。

図 9 はパルス繰り返し数 20kHz においてアシストガスに酸素を用いた場合の、出口ドロス高さとの送り速度の関係を示したものである。前述したように Nozzle N は窒素アシストガスの場合、いずれの条件においても試料を完全に切り分けることが困難であったことから図中にプロットしていない。図から明らかなように、Nozzle Laval および Nozzle Laval IEZ とともに、いずれの送り速度においてもドロス高さは約 10μm とほぼ一定の値を示した。これは窒素が不活性ガスであることから、酸素を用いたときのような酸化反応による材料の過剰な溶融が起こらず、結果的にドロスを形成する切断溝からの溶融材料の排出量が少なくなったためと考えられる。

図 10 はアシストガスに窒素を用い、Nozzle Laval と Nozzle Laval IEZ にて送り速度 30mm/s で切断加工実験を行った時の断面写真を示したものである。溶融残留物が少なく、初期膨張部を設けた Nozzle Laval IEZ を用いることでよりストレートな加工溝が得られていることがわかる。さらに、図 11 に示すようにアシストガスに窒素を用いた場合、酸素を用いた場合と比較して試料に固着しているドロスの量が少なく、ストレートな切断溝が形成されている。このことから、アシストガスに窒素を用い

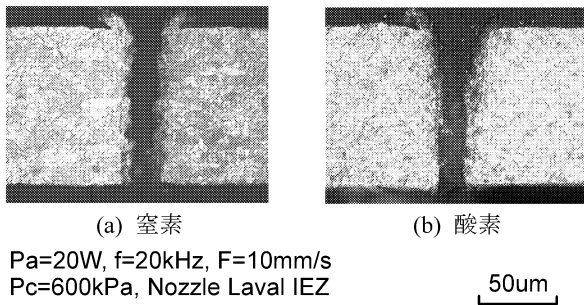


図 11 Nozzle Laval IEZ の切断断面写真

て初期膨張部を設けた Nozzle Laval IEZ で切断を行うことにより、良好な切断が行えることがわかる。

以上のように、熔融材料の除去能力の高いノズルを用いることで、シングルモードファイバーレーザーでの微細切断加工においても、高効率な切断が可能であることが明らかとなった。しかし、いずれの場合も試料裏面よりも試料表面に付着する熔融再凝固物の発生が顕著であった。これは前述したように、シングルモードファイバーレーザーにより形成される加工溝が非常に微細であるために試料裏面への熔融材料排出が困難であることから、上部に噴出するように除去された結果であると考えられる。この点については、今後更なる検討が必要である。

5. 結言

熔融材料の除去能力に優れるノズルを開発し、それを用いたシングルモードファイバーレーザーによる銅薄板の切断加工特性について検討を行った。本研究で得られた主な結論は以下のようである。

- (1) ノズルスロート部に初期膨張部を設けることで、試料上ガス圧が変動する不安点領域の発生範囲を低減できる。
- (2) Nozzle Laval と Nozzle Laval IEZ は高い試料上圧力が得られることから、両ノズルを用いることで最大 30mm/s の切断速度が得られた。
- (3) Nozzle N ではアシストガスを酸素から窒素へ変更するといずれの条件においても試料を完全に切り分けることは不可能であった。一方、Nozzle Laval と Nozzle Laval IEZ は高いピーク出力が得られる低

パルス繰り返しの条件でアシストガスの種類に関係なく同等の速度で切断が可能であった。

- (4) 初期膨張部を設けた Nozzle Laval IEZ は、酸素アシストガスの場合、ピーク出力が低い高パルス繰り返しの条件でも効率的な切断が可能であった。
- (5) ドロス高さは出口側よりもレーザー光照射側の方が高くなった。両ドロス高さとも送り速度の増大にともない減少した。
- (6) 窒素アシストガスを用いることで、ドロス高さを低減でき、ストレートな加工溝形状が得られた。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、ノズル作製にご協力、便宜を図っていただいた(株)化繊ノズル製作所に謝意を表する。

参考文献

- 1) George Chryssolouris : Laser Machining Theory and Practice, Springer-Verlag, (1991), 220.
- 2) 宮崎俊行, 宮沢 肇, 村上正夫, 吉岡俊郎 : レーザ加工技術, 産業図書, (1991) 14.
- 3) K. Matsuno. Development of High Power Laser in the Japanese National Project, Proceedings of International Congress on Laser Advanced Materials Processing, SPIE 4831, (2002) 90.
- 4) 武田晋 : シングルモードファイバーレーザーとその応用, 高温学会誌, 30, 2, (2004) 73. 桜内雄二郎 : プラスチック材料読本, 工業調査会, (1971) 108, 311.
- 5) 宇野義幸, 岡本康寛, 廣瀬和典, 川口茂孝, 窪田真一郎, 三柳直毅 : YAG レーザを用いた精密切断加工におけるアシストガスの供給法に関する研究, 精密工学会誌, 65, 101, (1999), 471-1475.
- 6) 岡本康寛, 宇野義幸, 村上義文, 細萱正義, 三柳直毅 : YAG レーザを用いた薄板の精密切断加工におけるラバルノズルの効果, 精密工学会誌, 70, 3, (2004), 433-437.
- 7) 宇野義幸, 岡本康寛 : レーザ加工に用いるアシストガスの噴射ノズル, 特許 3789899.
- 8) ISO/TC 172/SC 9/WG.