

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 30 日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K05173

研究課題名（和文）加工穴内に光ファイバを形成することによる超深穴レーザー加工法の開発

研究課題名（英文）Development of deep laser drilling method by forming optical fiber structure in the processing hole

研究代表者

吉木 啓介 (Keisuke, Yoshiki)

兵庫県立大学・産学連携・研究推進機構・非常勤研究員

研究者番号：60432548

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：レーザーによる穴加工法への光ファイバー効果の適用と超臨界流体の挙動を調査した。実験では、間欠照射の条件により超臨界流体の挙動が影響を受けレーザー加工の効果に影響を及ぼすことがわかった。そこで、加工周波数を調整することで噴流の影響を抑制し、レーザー加工のパルス間隔を最適化する基本的なガイドラインを示した。その結果、レーザー加工の深穴加工が従来以上に可能となった。また、金属材料の加工における穴内対流の観察を通じて超臨界流体がレーザーの熱による対流を確認した。本手法により、深穴レーザー加工の深さが増大し、レーザーのエネルギーをより効果的に材料へ伝えることでエネルギー効率と加工能力が大きく向上した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、超臨界二酸化炭素雰囲気中でのレーザー加工における噴流と対流の挙動とその影響を明らかにし、最適な加工条件を提案した。これは、従来の空気中でのレーザー加工に比べて高アスペクト比の深穴加工が可能で新しい技術を開発したことを意味する。超臨界二酸化炭素は高い流動特性により対流を生じ、切りくずの排出や集光の改善に有利である。また、二酸化炭素は有効利用や温室効果ガスの削減にも寄与する。この技術は、半導体や自動車などの分野で求められる高精度な深穴加工に応用できると期待される。本研究は、超臨界二酸化炭素雰囲気中でのレーザー加工に関する基礎的な知見を提供し、今後の応用展開に向けた重要な一歩となる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we investigated the application of the optical fiber effect and the behavior of supercritical fluids in laser hole processing. The experiment revealed that the behavior of supercritical fluids was affected by intermittent irradiation conditions and affected the effect of laser processing. Therefore, we adjusted the processing frequency to suppress the influence of jet flow and optimized the pulse interval of laser processing. We showed basic guidelines for laser processing, and as a result, deep hole laser processing became possible more than before. In addition, we revealed through observation of internal convection in metal material processing that supercritical fluids actually convect due to laser heat. This method makes it possible to perform difficult deep hole laser processing, effectively transmit laser energy to materials, and greatly improve energy efficiency and processing capacity.

研究分野：レーザー加工

キーワード：超臨界二酸化炭素 レーザー加工 深穴加工 高アスペクト比 対流 切りくず排出 噴流

1. 研究開始当初の背景

高アスペクト比の微細な穴の加工は、航空機や自動車などの軽量化に不可欠な技術として注目されている。特にガラスやセラミックスなどの脆性材料を対象とした高アスペクト比の穴加工は工業界が解決すべき重要課題の一つとなっている。これらの材料は機械的加工が困難である上に、微細加工においては治具への付着や欠片の付着が問題となる。

レーザー加工は非接触で行われるためこれらの課題を回避でき、微細な穴加工に適している。しかしながら、脆性材料では熱影響による割れが生じやすく、高アスペクト比での加工は容易でない。近年、レーザーを超臨界流体中で照射することにより、レーザーエネルギーの効率的な利用とともに熱的影響の低減が可能となった。

超臨界流体とは温度と圧力がその物質の臨界点以上の状態を示す流体で、気体と液体の中間的な性質を示す。特に二酸化炭素超臨界流体(SC-CO₂)は常温常圧で気体である二酸化炭素を超臨界状態にするもので、幅広い密度や粘性を持つため多くの用途に用いられている。

SC-CO₂ 中では密度が気体に近く粘性が低いため、レーザー加工時のリード抜けや割れの抑制に効果的である。一方でレーザー光は SC-CO₂ 中を通過する際に散乱・吸収されるため、試料の深部まで効率良くレーザー光を届かせるのは困難な課題となっていた。

本研究では SC-CO₂ 中で超深穴加工を可能とする新たな手法を開発することを目的とする。加工穴内に光ファイバを形成することで深い穴内部までレーザー光を届け、従来の限界を超える超深穴加工に挑む。

2. 研究の目的

本研究の目的は、SC-CO₂ 中での超深穴レーザー加工法の開発である。SC-CO₂ 中ではレーザー光が散乱・吸収されるため、深い穴内部まで効率的にレーザー光を届かせることが困難であり、穴加工の深さに制限があった。この課題を解決するため、加工穴内に光ファイバを形成する新たな手法を開発し、超深穴加工の実現を目指す。

光ファイバはレーザー光を効率良く伝送できるため、加工穴内に形成することで深い穴内部までレーザー光を届かせることが可能となる。加工穴内で形成された光ファイバ内を伝搬したレーザー光を用いて加工を進めていくことで、SC-CO₂ 中において従来の技術では困難であった超深穴加工を達成する。本手法により工業応用が可能な高効率な超深穴加工技術を開発し、高アスペクト比微細加工プロセスの高度化に貢献する。

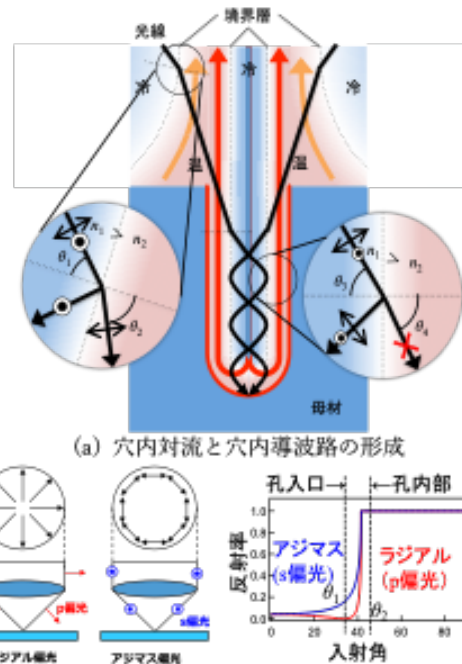


Fig. 1 穴内対流導波路と偏光による無減衰深穴

3. 研究の方法、及び結果

超臨界二酸化炭素雰囲気中のレーザー加工においては、加工初期パルスの照射と同時にブルーム噴流発生し、成長を始めるため、パルス間隔が十分に狭い場合、2パルス目以降のすべてのパルスが噴流の影響を受けると考えられる。そこで、単一パルスのレーザー光が発生させるブルーム噴流の成長過程を観察し、完全に消失するまでの時間を計測する。実際に加工を行う際に、パルス間隔をこの時間よりも大きく設定することにより、パルスとパルスが悪影響を与え合うことがない最適条件での連続照射を行うことができると考えられる。

そこで、レーザーパルス照射タイミングとカメラのシャッタータイミングをディレイジェネレーターによって制御し、レーザーパルス照射後の任意の時間における噴流の状態を撮影できる観察システムを開発した。開発した観察システムの概略図を Fig. 2 に示す。

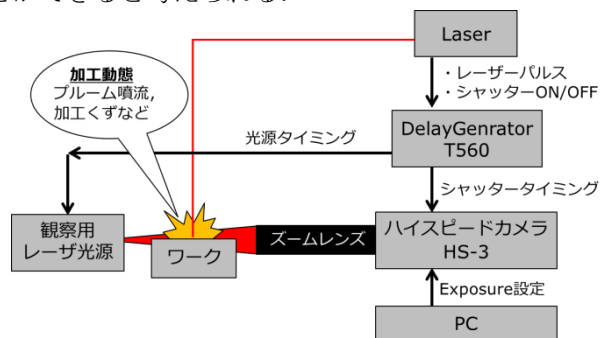


Fig. 2 加工レーザーと同期した撮影系の概略図

によるブルーム噴流の成長過程の観察を行った。圧力 14.39 MPa、温度 37.2 °Cにおけるブルーム噴流の成長過程を Fig. 3 に示す。レーザー

照射後 0 s の画像においては、プラズマおよび散乱光が強く映り込んでいる。10 μ s 以降は、ディレイタイムに応じて噴流は成長していくが、その成長速度は減少していくことがわかる。これは流体の粘性により噴流を構成する流体が周囲の抵抗を受けるためと考えられる。

さらに 150 μ s 以降の噴流の様子についても撮影を行ったところ、1 ms 程度までは噴流が存在していることがわかった。しかし、5 ms ではほとんど噴流は見られなかった。この結果から、パルスエネルギー 1 mJ、圧力 14.39 MPa および温度 37.2°C において、噴流が完全に消失するのに 1 ms 以上必要であることがわかった。実際に加工を行う際には、パルス間隔が 1 ms 程度、つまり 1 kHz で加工を行うことによって、それ以上の繰り返し周波数で加工を行う場合に比べて噴流とレーザーの干渉を抑えることができ、加工穴深さが大きくなると考えられる。

微細粒子を用いた穴内対流観察装置

加工くず排出を行う穴内対流を可視化することで、加工くずを排出できる加工条件を模索する。加工穴内部を可視化するため、厚み 500 μ m から 1000 μ m 程度のステンレス板に厚みと同じ幅の穴を開け、透明材料で挟み込むことで、横から観察可能な直方体型の穴を作成し、穴径も実際の加工穴に近い 200 μ m 程度とする。次に、微細粒子を雰囲気流体である二酸化炭素中に拡散させ、横から観察光源を入射する明視野観察を行う。この状態で観察試料に加工用レーザー光を照射するか、もしくは電熱材料においては加工レーザーと同程度の電力を投入することで、観察試料が加熱され、対流が発生すると考えられる。溝内に対流が発生した場合、微細粒子が流動に追従する様子が横から観察できるため、穴内の流れ場が可視化できると考えられる。レーザー光による穴内対流の発生では穴内壁と流体の温度差のほかに、流体中でレーザー光が焦点を結ぶことによる流動の発生の可能性もあるが、それに対して電熱材料による対流の発生では、単純に溝壁面と流体の温度差のみによって対流が発生できる。このため、電流を用いた対流発生装置でもレーザー光を用いた場合と同様の流動が発生できるなら、穴内対流を発生するために必要な要素は壁面に与えられる熱のみであることを確認できる。

分散する微細粒子としては夜光塗料（根本特殊化学製，LumiNova-GLL-300FF）を用いた。平均粒径は 2 μ m であるが、実際には数十 μ m レベルの凝集体が多くみられた。また、粒子を流体中に

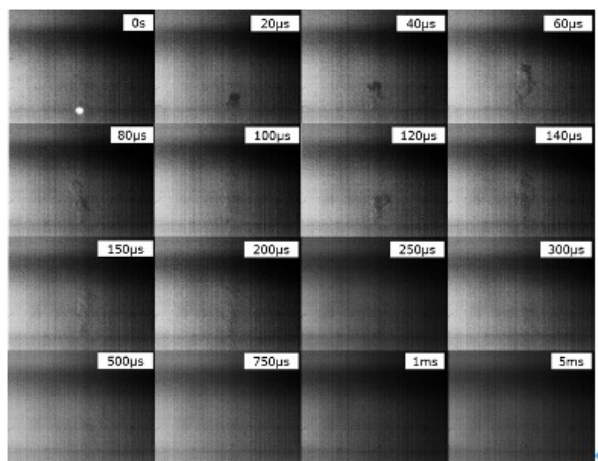


Fig. 3 超臨界二酸化炭素中の噴流成長過程



Fig. 4 カンタルを用いた観察チップ

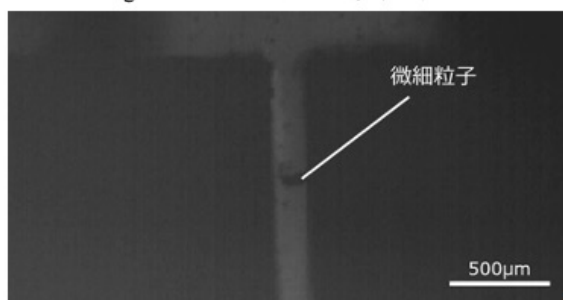


Fig. 5 電流による穴内対流の発生

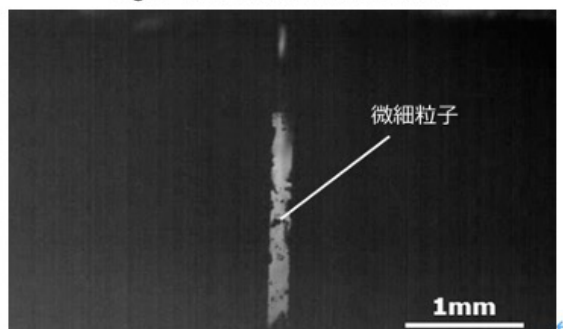


Fig. 6 加工レーザーによる穴内対流の発生

拡散するため、加工容器底面に攪拌子を設置し、容器外部に回転速度を制御可能な自作のスターラーを設置した。次に、穴内対流の可視化実験のため、薄い金属板に幅の狭い溝が加工された観察用チップを作製した。材質は快削鋼(日立金属製, FDAC)および電熱材料(ニラコ製, カンタル)を用い、加工は全てワイヤー放電で行った。厚み 0.5 mm の薄板を作製したのち、この薄板をクランプし、ワイヤー放電を用いて溝を作製する。ワイヤー径 0.1 mm のワイヤーカットで作製できる最小の溝幅は 0.2 mm 程度であるため、実際に作製を行い、溝の開始点と終点付近を光学顕微鏡(Supereyes 製, B011)で撮影し溝幅の計測を行った。その結果、溝幅はいずれの点でも約 200 μm となったため、穴底から穴上部まで一様な溝が作製できたといえる。作製したチップを Fig. 4 に示す。

次に、微細粒子を拡散した状態で、穴内対流を発生させた。粒子の拡散を行うため、回転速度を自由に設定できるスターラーを自作し、加工容器下部に設置した。

電流を用いて対流を発生させた場合の結果を Fig. 5 に示す。穴内対流が発生したことにより粉末が穴内部へ吸い込まれることが確認できる。また、穴内に流れ込んだ粒子の一部は上昇流に乗り、穴外へ排出されていく。さらに、レーザー光を用いて対流を発生させる場合についても Fig. 6 に示す。電流を用いた場合と同様に穴内に粒子が吸い込まれる様子と、排出される様子がみられる。これらの結果より、レーザー加工において穴内壁が加熱されることにより、穴内には被削材を排出しようとするような穴内対流が発生することを確認できたといえる。

連続照射による加工実験

単一パルス加工における噴流観察により、プルーム噴流消失に 1 ms 程度必要という結果が得られたため、パルス間隔を 1 ms(繰り返し周波数 1 kHz)として連続照射による加工を行う。この条件では、噴流の影響が低減され、加工結果が改善されると考えられる。加工条件を Table. 1 に示す。

また、この条件における加工結果を Fig. 7 および Fig. 8 に示す。10 kHz においては、条件 3, 6, 9 ですべて加工に失敗し、散乱されたレーザー光によるものと思われる皿型の加工痕がみられた。条件 9 のみある程度深さを持ったが、穴加工には失敗したといえる。しかしながら、1 kHz においては条件 9 において穴加工に成功した。また、条件 6 でもある程度深さのあるすりばち型の穴が加工されており、10 kHz での加工に比べて加工結果が改善されていることがわかる。1 kHz における加工では、あるパルスが発生させた噴流が収まってから次のパルスが入射されるため、10 kHz に比較して正常に集光され、加工に使用されるパルスの割合が高くなるためと考えられる。空气中においては周波数によらず同程度の穴が加工されたが、10 kHz における加工のほうが平均出力が高いため、より高温状態での加工となり、より穴径が大きくなったと考えられる。

1 kHz の実際の加工においては、母材が加熱されるため、加工が進むにつれて流動が成長す

Table 1 連続照射加工条件

波長[nm]	1064	
パルス幅[ns]	120	
パルスエネルギー[mJ]	0.84	
繰り返し周波数[kHz]	1	10
パルス数	120万	
加工時間[s]	1200	120

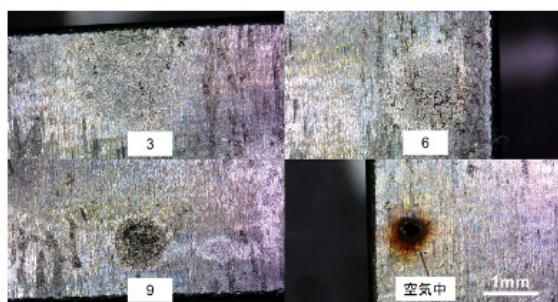


Fig. 7 連続照射10 kHz

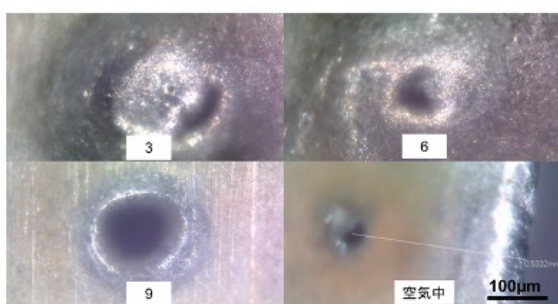


Fig. 8 連続照射1 kHz

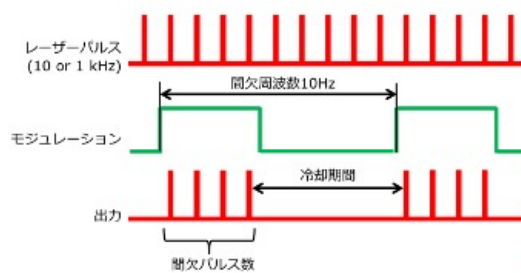


Fig. 9 間欠照射のイメージ図

る。実際の連続照射実験ではこのような流動が発生しているため、条件3や6など対流が激しくなり易い条件ではレーザー光の集光が阻害されたと考えられる。そのため、より低い周波数における加工を行うことで、さらなる加工結果の改善が行えると考えられる。

間欠照射による加工実験

さらに加工結果を改善するために、レーザーを連続的に照射するのではなく、数パルス照射するごとに母材に冷却時間を与える間欠照射を行う。Fig. 9に間欠照射のイメージ図を示す。10および100のパルス列が入射されたのち、対流が連続照射に比べてある程度収まるまで待機してから、次のパルス列を入射する。このようにして一定の繰り返し周波数のレーザーパルス列を一定のモジュレーション周波数で照射することにより、対流の影響を低減しながら加工を行うことができると考えられる。加工条件をTable 2に示す。間欠パルス数10と100の場合では、それぞれ各パルス列が母材に与える熱量が変化するため、発熱量も変化する。間欠パルス数が大きいことにより母材はより高温になり、対流の影響も大きくなると考えられる。また、パルス列の初期パルスが発生させた噴流に、後続のパルスは干渉され、集光が妨げられるため、間欠パルス数をあまり大きくしても、後続のパルスは加工に寄与できなくなると考えられる。

Fig. 10(a)およびFig. 10(b)に間欠パルス数100における10 kHzおよび1 kHzでの加工結果を示す。10 kHzにおいては、すべての条件で広い範囲に加工が起こり、加工痕がみられた。また、中央部には穴径の小さい穴がみられた。これは対流が十分に発達していない加工初期、もしくは前のパルス列の発生させた噴流から影響を受けない、各パルス列の初期のパルスによって加工されたものだと考えられる。1 kHzにおいても条件3、6では加工に失敗したが、条件9では穴加工に成功した。また、加工に失敗した条件3、6においても、皿型に加工が行われており、除去体積としては10 kHzより改善された結果となった。

次に、間欠パルス数10における10 kHzおよび1 kHzでの加工結果をFig. 11(a)およびFig. 11(b)に示す。間欠パルス数10の加工では、レーザーの繰り返し周波数によらず、すべての雰囲気条件において穴加工に成功した。しかしながら、依然として穴周辺の加工痕はみられるため、間欠パルス数10においても、母材に与えるエネルギーのうちの一部は不完全な集光によって浪費されているといえる。以上より、間欠照射においては、連続照射に近くなるほど、各パルスが次のパルスに与える悪影響が大きくなっていくと考えられる。また、各周波数における条件ごとの違いをみると、すべての照射条件において、条件9では黒変部の直径が最も小さくなっている。これは条件9の流体が比較的低密度で、ほかの雰囲気条件に比べると集光に与える悪影響が少ない条件であるためと考えられる。

Table 2 間欠照射加工条件

波長[nm]	1064			
パルス幅[ns]	120			
パルスエネルギー[mJ]	1			
繰り返し周波数[kHz]	10			
間欠パルス	10	100	10	100
間欠周波数[Hz]	10	5	10	
パルス数	30万			
加工時間[s]	3000	600	3000	300

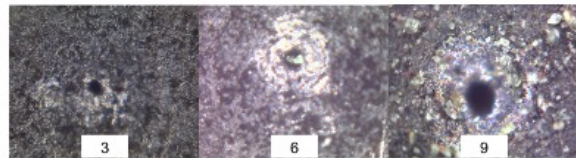


Fig. 10(a) 間欠パルス数 100 10 kHz

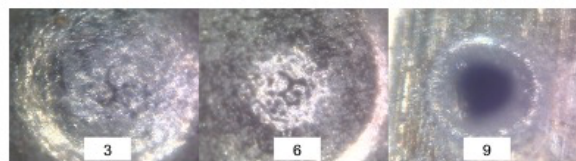


Fig. 10(b) 間欠パルス数 100 1 kHz

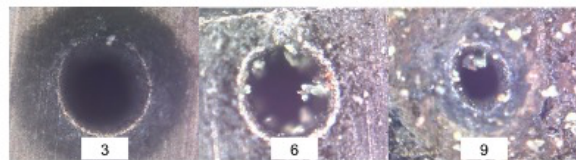


Fig. 11(a) 間欠パルス数 10 10 kHz

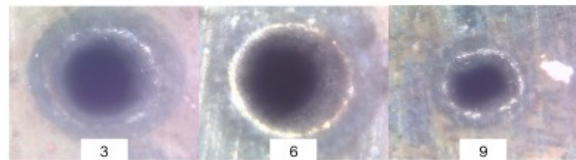


Fig. 11(b) 間欠パルス数 10 1 kHz

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yoshiki Keisuke, Yamamoto Takeshi	4. 巻 12428
2. 論文標題 Endurance performance of transmissive liquid crystal phase and polarization controllers for kW-class high-power lasers	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proc. SPIE	6. 最初と最後の頁 124280T
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/12.2649437	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yoshiki Keisuke, Yamamoto Takeshi	4. 巻 12442
2. 論文標題 Endurance performance of transmissive liquid crystal phase and polarization controllers for kW-class high-power lasers	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proc. SPIE	6. 最初と最後の頁 1244208
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/12.2649437	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------