

劣悪環境下における高出力レーザーによる難削材の 高効率除去加工に関する研究

東北学院大学 工学部 機械知能工学科

教授 松浦 寛

(平成 29 年度 重点研究開発助成 B 課題研究 AF-2017204)

キーワード：高出力レーザー，研削加工，半導体レーザー，光ファイバ

1. 研究背景・目的

災害等により、建造物が倒壊し、内部に有害物質が充満した場所に、人が入って作業することが難しい劣悪環境下で、構造体を早急に撤去しなければならない場合がある。例えば、原発事故による燃料デブリの除去では、放射線により人が立ち入れない、または沈没船内では水深によっては人が潜って行けないなどである。

さて、このような場合の構造物除去を考えると、研削は切り屑が粉体となるため吸引などにより回収が容易に行える利点がある。更に、無数の砥粒(切れ刃)によって、複合難削材など様々な材料を削ることができる。よって、我々は劣悪環境下において実用の可能性が高い方法の一つと考えている^{1)~8)}。しかし、研削は「仕上げ」が主目的のため、大量に除去する加工には適していない。そこで、本研究ではレーザーで被削材を加熱し軟化させることで加工効率の向上を目指した。

実験の結果、最大光出力 1 kW のレーザー援用研削では、研削のみで加工するよりも研削効率が良く、レーザー照射時間を長くするほど研削量が増加した。本報告では、その内容、および新たに開発した最大光出力 3 kW 光源について述べる。

2. 実験環境

デブリ除去を想定した実験系を図 1 に示す。半導体レーザー(以後、LD と呼ぶ) から出る光ファイバから出射する光を被削材に直接照射する方法である。LD の波長は、ファイバーレーザー(以後、FL と呼ぶ) の励起光の 915 nm である。光ファイバは放射能の影響を受け難い無機材料の石英マルチモード光ファイバ(以後、MMF と呼ぶ) である。一般に、光ファイバによるレーザー加工と云えば、FL が注目を集めている。FL 用のシングルモード光ファイバ(以後、SMF と呼ぶ) は設計パラメータ(コア径と比屈折率差)を調整することで横モードを少なくして高出力化を実現している。これによりビーム品質を表す M^2 値(理想は 1)も 1.2 前後と良いため、レンズでビームを絞り、パワー密度を上げることができる。

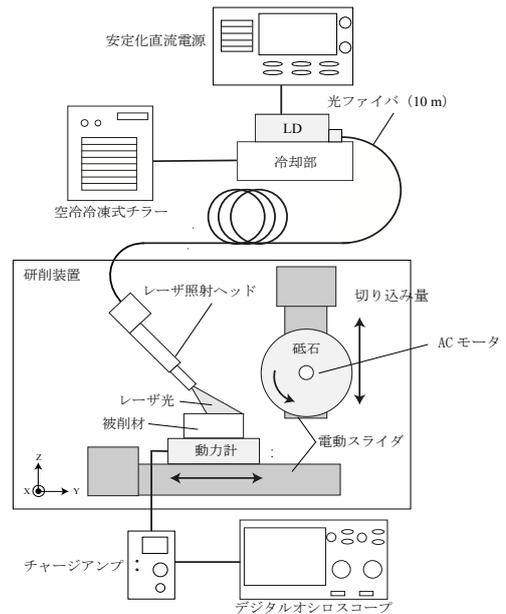


図 1 レーザ援用研削実験装置の概要

一方で、SMF は非線形媒質でもある。ラマン閾値近くの光出力を使う FL は誘導ラマン散乱 (SRS: Stimulated Raman Scattering) が課題の一つになっている。光出力と伝送損失(接続損失含む)が光ファイバの設計パラメータ上でトレードオフの関係にあり、FL 用 SMF の伝送損失は約 0.03 dB/m になる。一般的な生産工場に設置する FL は、レーザー本体から加工先まで 5 m 程度のため損失が目立たない。しかし、仮にレーザー本体を 200 m 離れたところに設置するならば、光出力の 75% が伝送損失となる。したがって、我々は伝送損失が一桁優れている MMF から直接照射する方式を採用した。

使用した LD 単体の最大定格は 60 W である。LD からの熱は、ヒートシンク内部に冷却水を循環させてチラーにより熱を逃がしている。砥石回転は、放射線により電子機器が使用できないため水流駆動モータを用いることになるが今回は AC モータ(回転数 6800 rpm)を使用した。砥石は、アルミナ(#30)砥粒を用いた直径 $\phi 250$ mm、厚さ 2.5 mm を使用した。これらを電動スライダにより、切り込み量(Z 軸方向)、および被削材の移動(Y 軸方向)

を制御して加工を行った。Y 軸方向の最高速度は 400 mm/s である。レーザの照射時間、研削時間は Y 軸送り速度で設定した。また、被削材にかかる法線・接線方向の研削抵抗は、電動スライダに取り付けた動力計（Kistler：9257A）で測定した。チャージアンプにより電圧増幅し、デジタルオシロスコープで計測した。被削材は、主に原子炉内の構造物に使用されている SUS304（長さ 50 mm、高さ 25 mm、幅 5 mm）とした。

3. レーザ照射条件決定

3.1 レーザヘッド構造

レーザ援用研削の実験系を図 2 に示す。レーザ照射ヘッドを照射面から Z 軸方向へ 45 deg、ヘッド先端から照射点までの距離 20 mm に設置し、初期位置から研削点までの距離を 60 mm とした。

一般に、レーザ加工機に用いられるヘッドは、レンズで集光することで高いパワー密度を得る。しかし、劣悪環境下では必ずレンズが汚染され、光透過率が低下する。また、レンズ交換が遠隔操作では困難なため、レンズを使用しないヘッドを設計した。図 3 にレーザ出射部の構造を示す。MMF 端面から直接光を出射する。20 個の LD を使用し、出射部を石英ガラス管でバンドルすることで 1 kW の高出力照射を可能にした。この構造にすると MMF 端面が損傷した際に先端をクリーブカットしてリフレッシュすることが可能になるからである。

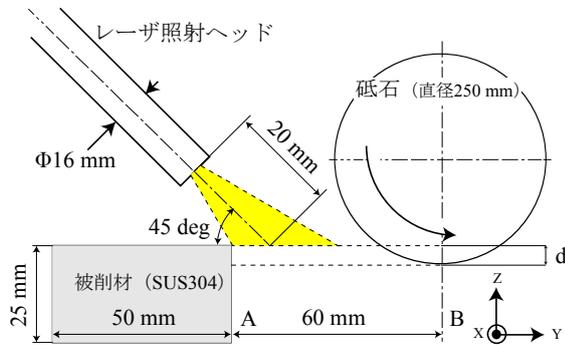


図 2 レーザ援用研削の実験系

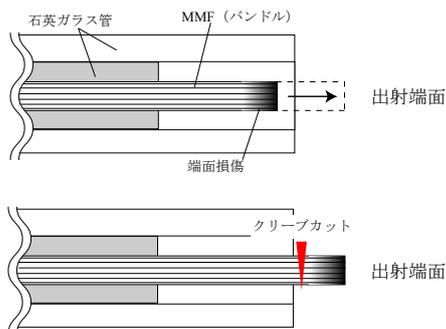
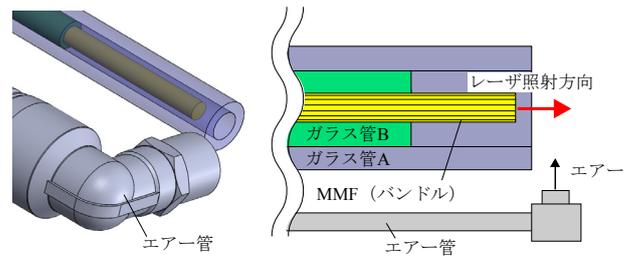
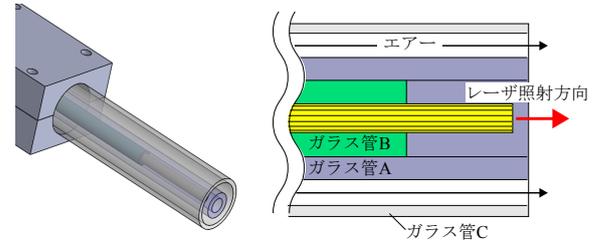


図 3 レーザ照射部の構造

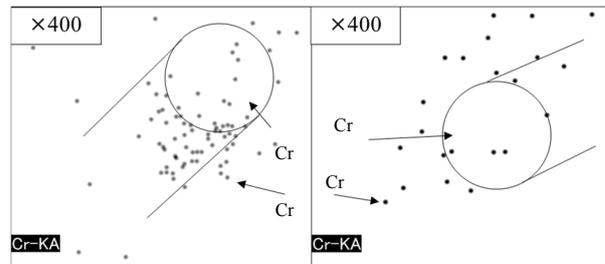


(a) 横方向噴射型



(b) 同軸方向噴射型

図 4 防塵のためのエア噴射方向および構造



(a) 横方向噴射型

(b) 同軸方向噴射型

図 5 SEM による分析結果

次に、加工中の切り屑の戻りによる端面損傷を防止するため圧縮空気を噴射する方法として 2 種類設計した。エア噴射構造の各モデルを図 4 (a), (b) に示す。レーザ照射方向の横方向から噴射する横方向噴射型と、レーザ照射方向と同じ方向に噴射する同軸方向噴射型である。レーザ援用研削の後、EDX 付電子顕微鏡 HITACHI 製 TM3000 (以降、SEM と呼ぶ) により元素分析を行い、MMF 端面への切り屑の付着量を評価した。まず、光出力 1kW において図 2 に d で示す切り込み深さを 1 mm、Y 軸送り速度 50 mm/s (照射時間 1 sec) の設定で 5 回回り、合計で 5 mm 研削した。各エア出射構造でレーザ援用研削を行った後、SEM で SUS304 の主成分である Cr の MMF 端面への付着量を分析した。分析結果を図 5 に示す。図 5 (b) の方が図 5 (a) よりも黒い点で示した Cr の付着量が少ないことが分かる。よって、図 4 (b) に示す同軸出射構造を採用した。

3.2 レーザ照射出力と照射時間

レーザ援用研削実験に向けて、被削材 (SUS304) が融点温度 (約 1400 °C) に達する照射条件を求めた。条件は光出力を 1 kW、レーザ照射範囲を被削材上面 (50×5 mm)

とした。レーザー照射による被削材の熱伝導状態を図 6 に示す。計算の都合により照射時間を 5 sec, 5 mm 毎に移動とした。SUS304 は熱伝導率が $16.7 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ であり、銅やアルミに比べて熱が伝導し難い⁹⁾。そこで、ラピッドフィード研削で現実的な切り込み深さが 2 mm と想定して、実際にどの程度の深さに熱が入るのかを計算した。与える熱量と熱伝達による放熱量のエネルギー収支を P :被削材に吸収されるエネルギー, m :質量, c :比熱, S :照射表面積, h :物質と空気の熱伝達率として、初期条件を加熱時間 $t=0 \text{ sec}$ の時、被削材の温度 $T=300 \text{ K}$ とする。仮定した条件より、質量 $m=3.96 \text{ g}$, 照射表面積 $S=250 \text{ mm}^2$ となった。また、静止した空気の熱伝達率を $h=5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 室温時 SUS304 の比熱を $c=500 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ とし、光吸収率と照射範囲を考慮すると $P=261 \text{ W}$ となる。これらから、照射時間 $t=15 \text{ sec}$ の時に $T \approx 1970 \text{ K}$ となり SUS304 の融点付近の温度が得られた。よって、初期の照射条件を光出力 1 kW, 最大照射時間を 15 sec に決定した。

4. レーザ援用研削実験 (光出力 1 kW)

レーザーの効果を評価するため、前項で決定した光出力と最大照射時間でレーザー援用研削を行った。加工前後の被削材重量の差を研削量, 砥石重量の差を磨耗量, 動力計から得られた電圧の変化を研削抵抗とし、レーザーの照射有無で比較した。

4.1 レーザ援用の効果

研削速度 50 mm/s , 研削のみ (レーザー照射なし) とレーザー照射時間 15 sec において切り込み深さ 1, 2 mm の合計 4 パターンの条件で実験を行った。研削量と砥石磨耗量を表 1 に、得られた研削抵抗を図 7, 8 に示す。研削抵抗を見ると切り込み深さに関係なくレーザー照射を行った方が、研削抵抗が抑えられている。

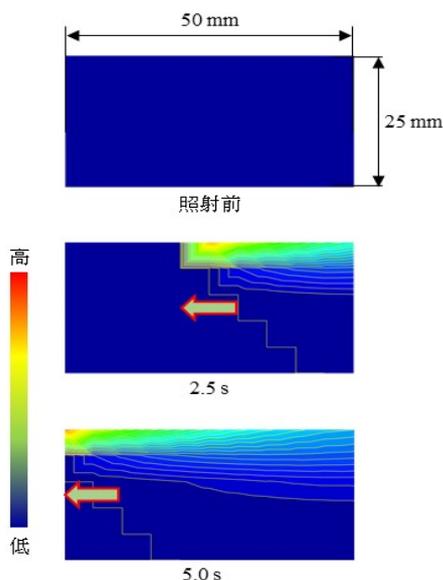


図 6 レーザ照射による加熱シミュレーション

表 1 研削量と砥石磨耗量の比較

切り込み深さ	研削量 (g)		砥石磨耗量 (g)	
	照射なし	照射あり	照射なし	照射あり
1 mm	0.55	0.93	0.33	0.45
2 mm	0.92	1.56	2.90	0.96

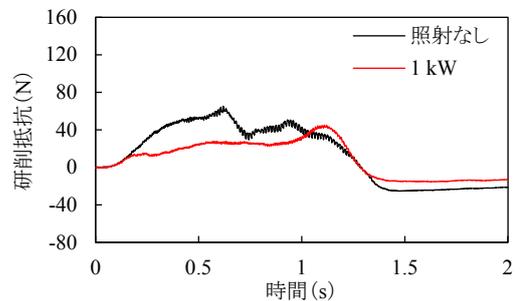


図 7 法線方向研削抵抗 (切り込み深さ 1 mm)

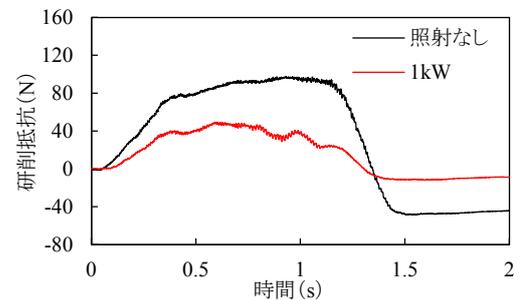


図 8 法線方向研削抵抗 (切り込み深さ 2 mm)

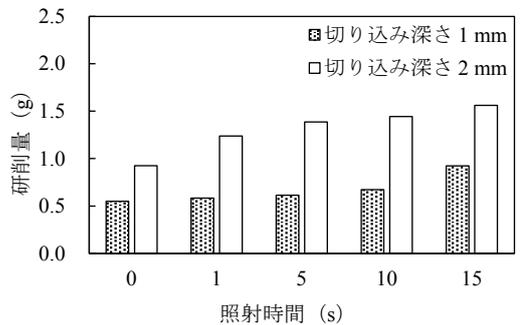


図 9 レーザ照射時間による研削量の変化

また、表 1 からレーザー照射ありは研削量が多く、切り込み深さ 2 mm において砥石磨耗量は少なくなっている。これより、レーザーによる加熱は被削材を軟化させ、砥石負荷を軽減させる効果がありそうなのが分かった。これにより、研削量の増加が見込めると考えられる。

4.2 レーザ照射時間による変化

レーザー照射時間を変化させて研削を行い、研削量と研削効率に与える影響を調べた。レーザー照射時間を 1, 5, 10, 15 sec で変化させて、研削速度 50 mm/s , 切り込み深さ 1, 2 mm の条件で実験を行った。研削効率は、研削量を加工時間 (レーザー照射時間 + 研削時間) で割った値とした。レーザー照射時間による研削量の変化を図 9 に示す。切り込み深さに関係なく、照射時間が長くなるほど研削量が増加する傾向が得られた。このことから設定切り込

み深さまで被削材を十分に加熱できれば、研削量が切り込み深さに比例して増加すると考えられる。研削効率を図 10 に示す。研削効率は切り込み深さ 1, 2 mm ともにレーザ照射時間 1 sec の条件で最も研削効率が良かった。しかし、レーザ照射時間が長くなるほど効率が悪くなる傾向にあることも分かった。よって、レーザで加熱するほど被削材が軟化し研削量が大きくなるが、効率を得るには加熱時間の最適化をする必要がある。

以上より、加熱時間の短縮するために、レーザの高出力化を行うことにし、目標とする最大光出力を 3 kW に設定した。

5. 3 kW 高出力化

5.1 レーザ照射による加熱効率向上の検討

短時間で高温にするためには単位面積当たりの光エネルギーが高いほど良い。そのため同じ光エネルギーなら照射面積は小さい方が良い。光出力 1 kW において実験を行った際の照射径を図 11 (a) に示す。角度をつけて照射を行うため照射範囲は楕円形となる。また、光出力 3 kW 用に MMF を実装すると、バンドル径が大きくなる。さらに、単位面積あたりのエア供給量が一定のため、ごみの付着する確率が増加する。そこで、図 11 (b) に示すようにレーザ照射ヘッドを 3 方向から 1 点を集中照射することにした。

5.2 LD 冷却部の設計・製作

光出力 3 kW を出射するには、LD が最低 60 個必要になる。市販のヒートシンクは高価なうえ、LD を実装すると容積も重量も大きくなるため、独自に設計を行うことにした。簡易的なモデルを作製し、冷却効果の確認した。測定に使用したモデルを図 12 に示す。LD の熱が冷却液へ移動する際の熱抵抗を低減させるため熱伝導の良いアルミを材料に用い、その内部に銅管を埋め込み、そこに冷却液を流す構造にした。LD に見立てたヒータを中心位置に設置し、埋め込んだ K 型熱電対で得られた電圧を増幅させて温度を記録した。冷却性能を調べるため、冷却液なしの状態ではヒータと熱電対を中心位置から 10 mm ずつ矢印方向に移動させて 20 mm まで測定した。

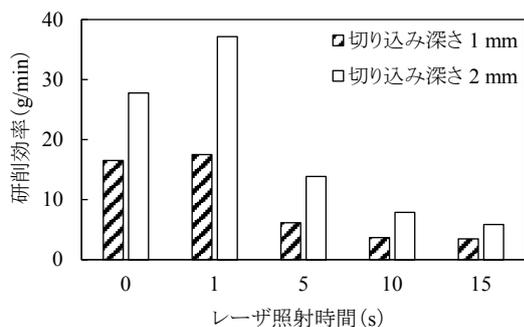


図 10 レーザ照射時間による研削効率の比較

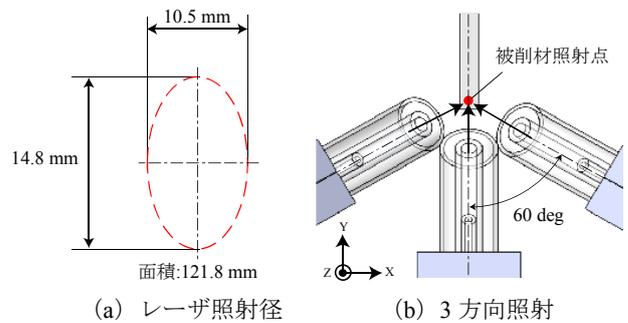


図 11 照射方法の変更

次に、ヒートシンク内部に冷却液を循環させながら同様の測定を行った。このときの温度推移の比較を図 13 に示す。各条件の最高温度を記録するため温度が落ち着くまで計測した。図 12 の赤点は中心位置を示している。冷却液なしの温度では、中心位置から離れるほど最高温度が低くなった。冷却ありと冷却なしの温度推移を比較すると、中心位置において温度差が最も大きく 37.3 °C であった。冷却することで、モデル中心部の冷却効果が最も大きいことを示している。また、温度上昇を抑えられた条件は冷却ありの中心位置から 20 mm の位置で温度は 58.5 °C であった。以上の実験結果から、市販品より優れた冷却性能が得られることが分かった。これより、動作温度の上限が 45°C の LD を効率よく冷却するには、循環する冷却液を発熱点の直下かつ直近を通す構造が良いことが分かった。

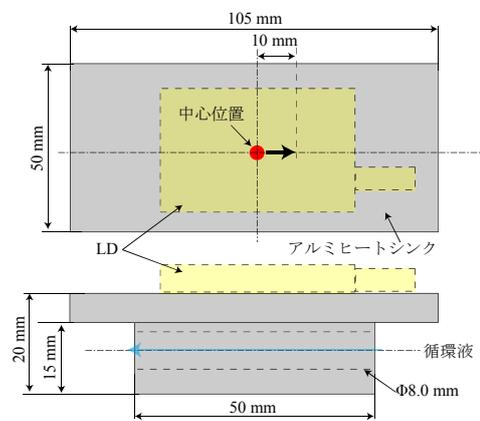


図 12 液冷実験モデル

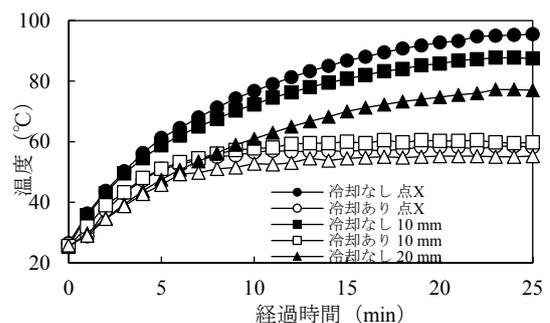


図 13 熱源移動による温度推移の比較



図 14 製作した LD 冷却部 (光出力 1kW)

これまでの実験結果を踏まえて、さらに小型化した LD 冷却部の構造を図 14 に示す。1 列に最大 12 個の LD を取り付けることができる。実装密度を上げるために、斜めに配置して MMF を同一方向に向けて、ファイバ収納性を開けている。重量は市販品の 1/2 になり、実装面積を 1/3 にすることができた。レーザの取り外し、および電源ケーブルの取り替えも容易に行えるよう工夫した。

光出力 3 kW を冷却可能か調べるため LD 側面に熱電対を取り付け温度測定を行った。1 kW では照射時間 15 sec で十分な溶融が確認されたため、余裕を持って 30 sec に設定した。その結果、30 sec 照射した際の最高温度は 38.5 °C であった。これは、LD の許容温度である 45 °C を十分に下回っているため冷却可能であった。また、製作実装して 1 年経過するが一度も故障、および発火などのトラブルはない。

5.3 光出力 3 kW レーザ照射による被削材の変化

光出力 3 kW のレーザ照射が可能となったため、光出力別に照射を行い、被削材の表面を観察した。条件は光出力 1 kW、2 kW、3 kW で Y 軸送り速度を 10 mm/s (レーザ照射時間 5 sec) に設定し、3 方向から照射を行った。黒く変形している部分を溶融部、変色している部分を変色部と表すことにした。

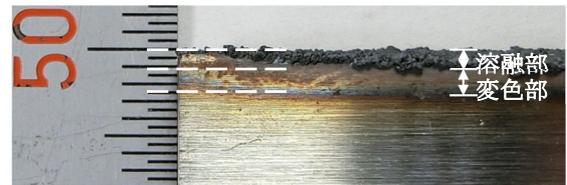
レーザ照射後の被削材を図 15 に示す。すべての条件において照射された部分を中心に変形し変色している。溶融部、変色部共に出力が大きくなるほど範囲が広がっていることが分かる。また、光出力 3 kW では変色部が 6 mm あり、光出力 1 kW の約 3 倍もある。これらの結果から、光出力 1 kW の 1/3 の照射時間でも同等の研削量が得られる可能性があることが分かった。

5.4 出力の違いによるレーザ援用研削の比較

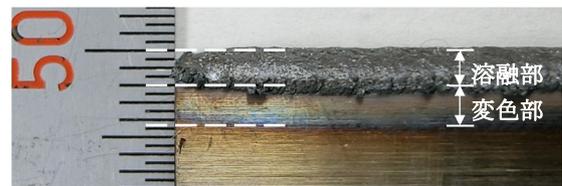
よって、光出力 3 kW にすると光出力 1 kW の 3 倍の効率が得られるかどうか実験を行った。3 方向からレーザ照射し研削速度 50 mm/s、切り込み深さを 2 mm に固定した。レーザ照射時間は考察した通り 1 kW は 15 sec、3 kW は 5 sec に設定した。

研削量から研削効率を計算し、砥石磨耗量、研削抵抗から砥石への負荷を評価した。研削量、砥石磨耗量、研削効率を表 2 に、研削抵抗を図 16 に示す。この実験結果から光出力 3 kW はレーザ照射時間が 1/3 でも研削量が同等で、研削効率が 17.0 g/min と良好な値であった。また、砥石磨耗量が少なく研削抵抗が低かった。これは、砥石への負荷が小さいことを表していると思われる。

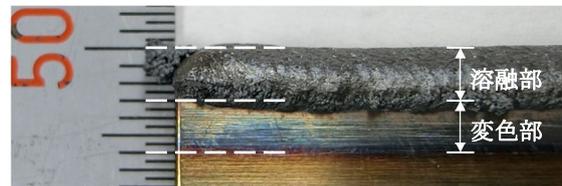
以上より、更に光出力を上げることで、レーザ加熱時間を短縮することが可能となり、研削効率も向上すると考えられる。また、照射された表面が溶融して軟化するためか砥石への負荷が低下するため、同等の加熱量であってもより深く切り込める可能性があることが分かった。



(a) 光出力 1 kW



(b) 光出力 2 kW



(c) 光出力 3 kW

図 15 レーザ照射後の試験片側面の様子

表 2 研削結果による比較

光出力 (kW)	研削量 (g)	砥石磨耗量 (g)	研削効率 (g/min)
1	1.76	1.11	6.6
3	1.71	0.57	17.0

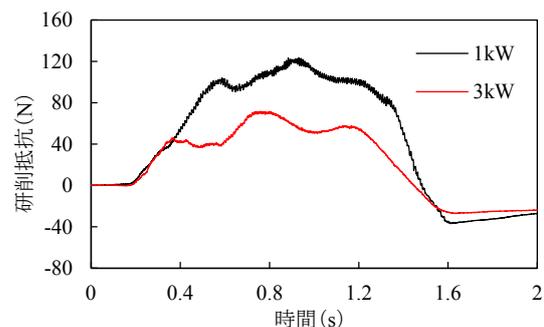


図 16 法線方向の研削抵抗による比較

6. 結言

光出力 1 kW での基礎実験をもとに光出力 3 kW のレーザー照射装置の設計製作を行い、これを用いたレーザー援用加工実験で以下の結果が得られた。

- (1) レーザ出射ヘッドの主要部品を石英で構成することで熱損傷を減らすことができた。
- (2) エアー同軸方向出射型を実装することで、光ファイバ端面の損傷を減らすことができた。
- (3) 光ファイババンドルの本数を増やすと歩留まりが悪くなるため、比較的容易に作ることができる 20 本バンドル (1 kW 相当) を基準とし、3 方向から 1 点に集中照射することで単位面積当たりのエネルギー密度を 3 kW と同等にする方が実用的であると分かった。
- (4) 市販されているヒートシンクの重量が 1/2 軽量で、実装面積が 1/3 になる小型軽量ヒートシンクを製作した。また、現場でも使用できる冷却効果が確認できた。
- (5) 光出力 3 kW のレーザー援用研削は、1 kW でのレーザー照射時間の 1/3 でも研削抵抗が少なく、かつ砥石磨耗を削減できることが分かった。

これらのことから、劣悪環境下において、レーザー援用研削が効率的に構造物の除去を行うための有効な手段であることを示した。今後は、長時間耐久性、および更なる高出力化を目指すと共に、切削加工での効果を確かめる。

謝 辞

本研究をご支援頂きました公益財団法人天田財団「重点研究開発助成」に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 高橋廉生, 他: 高出力レーザー援用研削加工による廃炉技術の開発, 電子情報通信学会光ファイバ応用技術研究会 (2018).
- 2) 安倍拓哉, 他: 劣悪環境下におけるレーザー援用研削加工に関する研究, 精密工学会講演論文集, 講演番号 M39 (2018).
- 3) 菊池祥平, 他: 廃炉技術のためのマルチモード光ファイバのバンドル化による高出力レーザーヘッドの開発, 電子情報通信学会光ファイバ応用技術研究会 (2018).
- 4) 堀尾克己, 他: 高出力半導体レーザーに用いる冷却装置の開発, 日本機械学会東北支部大会 (2019).
- 5) 菊池祥平, 他: 砥石回転数がレーザー援用研削加工の結果に与える影響, 砥粒加工学会 (2019).
- 6) 高橋廉生, 他: 高出力レーザー援用による難削材の加工性能に関する研究, 砥粒加工学会 (2019).
- 7) 山口憂, 他, 劣悪環境下を想定した研削加工におけるレーザー援用の効果, 砥粒加工学会学術講演会, 講演番号 C20(2017).
- 8) 安倍拓哉, 他: 劣悪環境下での高出力レーザー援用研削加工方法に関する研究, 日本機械学会東北支部大会 (2017).
- 9) ステンレス協会: ステンレス鋼データブック, 日韓工業新聞社 (2000), p.10