

# 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

著者	堀尾 克己, 橋本 知弥, 安倍 拓哉, 高橋 廉生, 菊池 祥平, 小野 憲文, 鈴木 利夫, 松浦 寛
雑誌名	東北学院大学工学部研究報告
巻	55
号	1
ページ	35-40
発行年	2021-02
URL	<a href="http://id.nii.ac.jp/1204/00024693/">http://id.nii.ac.jp/1204/00024693/</a>

研究論文

# 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

## High-efficiency removal of difficult-to-cut materials with a high-powered laser under an adverse environment

堀尾克己*	橋本知弥*	安倍拓哉**	高橋廉生***
Katsumi HORIO	Tomoya HASHIMOTO	Takuya AMBAI	Yoshiki TAKAHASHI
菊池祥平****	小野憲文*	鈴木利夫*	松浦寛*
Shohei KIKUCHI	Norifumi ONO	Toshio SUZUKI	Hiroshi MATSUURA

**Abstract:** Equipment, such as a nuclear reactor, in a collapsed building during a disaster must be removed immediately. However, in such a case people cannot enter the building due to radiation. Therefore, we examined a high-power laser-assisted grinding process that can be remotely operated at a high efficiency of 3 kg/min. Grinding with a 1 kW output from the laser resulted in a higher efficiency than using only grinding. In this study, the maximum output was increased to 3 kW to evaluate the effect of the optical power on the grinding. The results indicated that a 3 kW of output reduced the grinding resistance and wheel wear, compared to the 1 kW output.

**Keywords:** Hard-to-cut materials, Poor environment, High-power laser

### 1 緒言

災害等で建造物が倒壊し、有害物質が充満した劣悪環境下で、構造体の早急な撤去が求められる場合がある。例えば、原発事故による燃料デブリの除去は、内部に人が立ち入れないため除去効率が高い加工法を遠隔操作で行う必要がある。

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加工法の一つと考えている[1-8]。本研究では、レーザーで被削材を加熱し軟化させた後に研削を行うことで加工効率の向上を目指した。

最大光出力 1 kW のレーザー援用研削では、研削のみよりも研削効率が良い結果が得られた。また、レーザーによる加熱時間を長くするほど研削量が増加する傾向が得られた。本報告では、その内容について、および新たに開発した最大光出力 3 kW の光源について述べる。

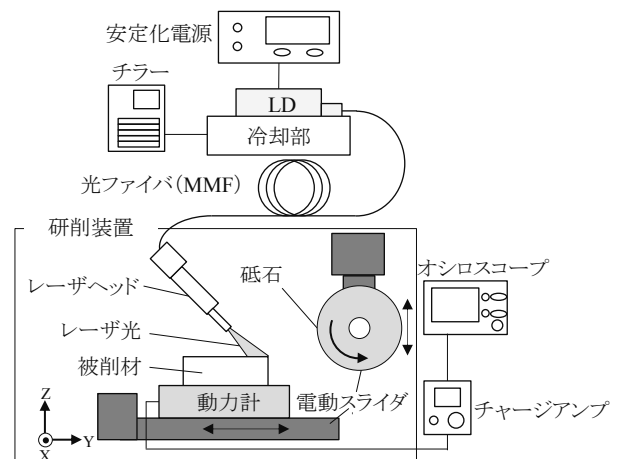


図1 実験装置の概要

\* 東北学院大学大学院

\*\* 東北学院大学大学院(現:プライムアース EV エナジー株式会社)

\*\*\* 東北学院大学大学院(現:矢崎総業株式会社)

\*\*\*\* 東北学院大学大学院(現:海上自衛隊幹部候補生学校)

## 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. 光ファイバは放射線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言え, 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, 高出力化を実現している. ビーム品質を表す M2 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.

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, レーザ本体を 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. よって, 伝送損失が一桁優れている MMF を使ったレーザー直接方式を採用した.

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. 研削は, AC モータ(主軸回転数 6800 rpm)にアルミナ(#30)砥粒を用いた直径 250 mm, 厚さ 2.5 mm の砥石を取り付けて行った. 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.

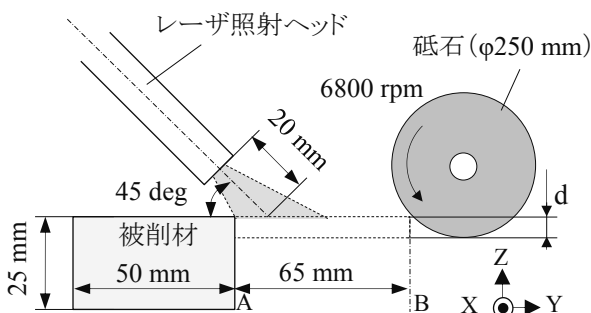


図 2 レーザ援用研削の実験系

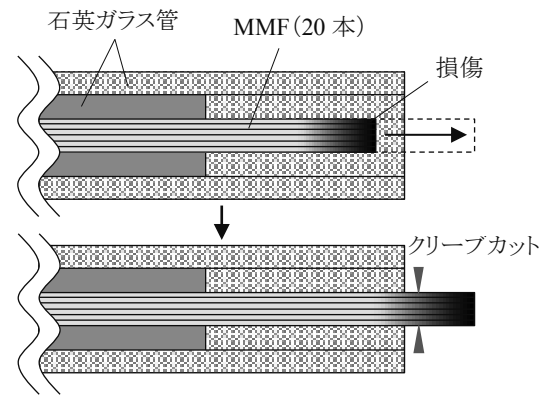


図 3 レーザ照射部の構造

Y 軸方向の最高速度は 400 mm/s であり, 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・接線方向の圧力を研削抵抗と定義し, 電動スライダに取り付けた動力計(Kistler:9257A)により測定した. 得られた信号を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

レーザー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を 20 mm に設置し, 初期位置から研削点の距離を 65 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 にレーザー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 から伸びる 20 本の MMF を石英ガラス管によって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.

### 3.2 レーザ照射出力と照射時間

研削実験に向けて, 被削材(SUS304)が融点温度(約 1673 K)に達する照射条件を求めた. 条件は光出力を 1 kW, 照射範囲を被削材上面(50×5 mm)とした. 照射時間を 5 s, 5 mm 毎に移動とした. SUS304 は熱伝導率が 16.7 W/(m<sup>2</sup>・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, どの程度の深さに熱が入るのかを計算した. レーザ照射による熱伝導状態を図 4 に示す. 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  $t = 0$  s の時, 被削材の温度  $T = 300$  K とする. 仮定条件より, 質量  $m = 3.96$  g, 照射表面積  $S = 250$  mm<sup>2</sup> となった. また, 静止した空気の熱伝達率を  $h = 5.4$  W/(m<sup>2</sup>•K), 室温時 SUS304 の比熱を  $c = 500$  J/(kg•K) とし, 光吸収率と照射範囲を考慮すると  $P = 261$  W となる. これらから, 照射時間  $t = 15$  s の時に  $T \approx 1970$  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 s に決定した.

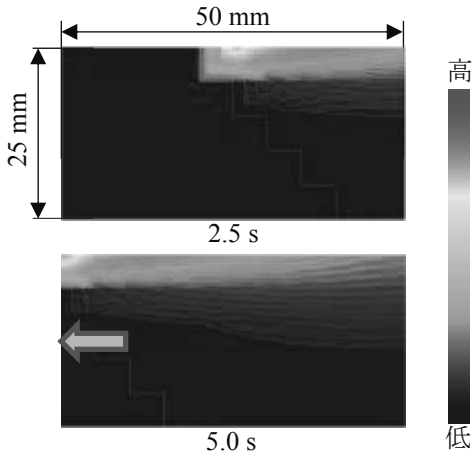


図 4 レーザ照射による加熱シミュレーション

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)	
	なし	あり	なし	あり
1 mm	0.55	0.93	0.33	0.45
2 mm	0.92	1.56	2.90	0.96

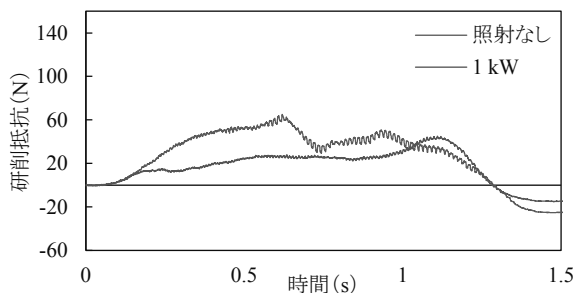


図 5 法線方向研削抵抗 (切り込み深さ 1 mm)

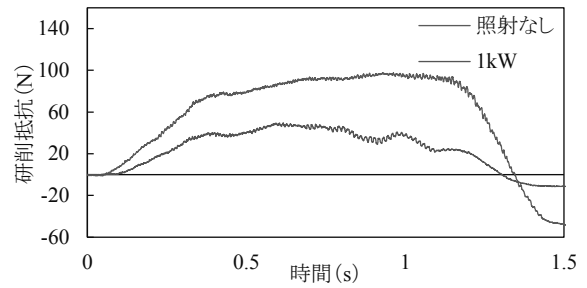


図 6 法線方向研削抵抗 (切り込み深さ 2 mm)

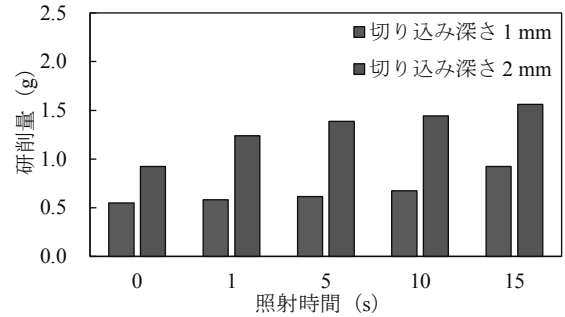


図 7 レーザ照射時間による研削量の変化

#### 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, 前項で決定したレーザー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, 研削のみとレーザー援用研削において切り込み深さ 1, 2 mm の条件で実験を行った. 照射方法は対象を動かしながら計 15 s 加熱した. 研削量と砥石磨耗量を表 1 に, 得られた研削抵抗を図 5, 6 に示す. 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. また, 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. これより, レーザ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ことが分かった. 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. レーザ照射時間を 1, 5, 10, 15 s 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. 照射時間に

よる研削量の変化を図 7 に示す. 切り込み深さに関係なく, 照射時間が長い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, 研削量が切り込み量に比例して増加すると考えられる. 研削効率を図 8 に示す. 研削効率は切り込み深さ 1, 2 mm ともに照射時間 1 s の条件で最も研削効率が良かった. しかし, 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, 加熱時間の最適化をする必要がある.

以上より, 加熱時間短縮のために, 高出力化を行うことにし, 目標最大光出力を 3 kW に設定した.

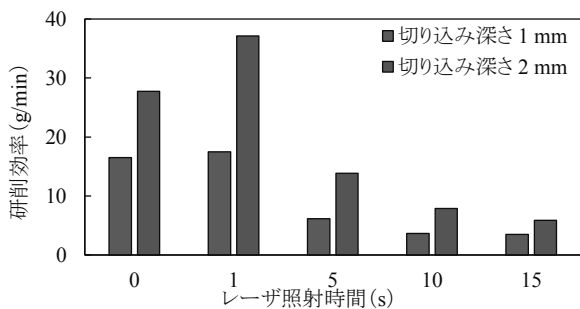


図 8 レーザ照射時間による研削効率の比較

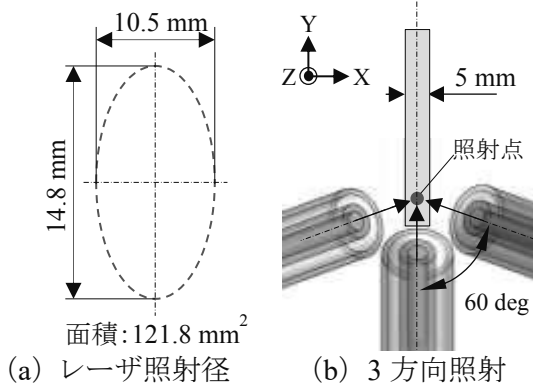


図 9 照射方法の変更

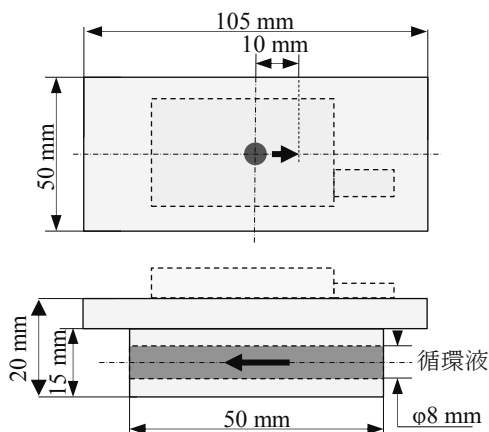


図 10 間接液冷方式モデル

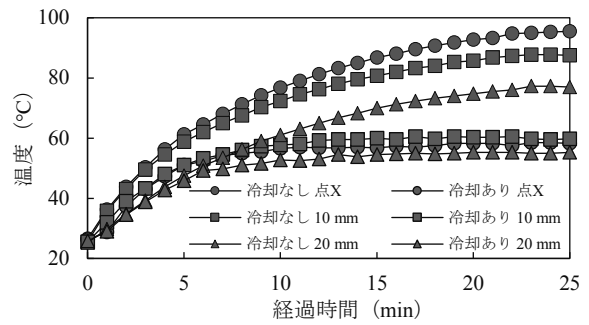


図 11 熱源移動による温度推移の比較

## 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. レーザ照射径と照射方法を図 9 に示す. ここで図 9(a) は上記の実験条件での照射径である. 角度をつけて照射を行うため照射範囲は楕円形となる. 図 9(b)は光出力 3 kW を実装するために 3 方向から照射した様子である. 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 9(b)の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 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 10 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 型熱電対から得られた電圧を増幅させて温度を記録した. どの位置に LD を設置すると最も冷却効果が得られるのか調べるため, 周囲温度 25 °C の条件下で冷却液なしの状態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.

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. 入口温度を 20 °C, 流量を 0.023 m<sup>3</sup>/min に設定した. 温度推移の比較を図 11 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 10 の赤点はモデルの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。これは冷却により、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。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。

実験結果を踏まえて、さらに小型化した冷却部の構造を図 12 に示す。1 列に最大 12 個の LD を取り付け可能である。実装密度を上げるため、斜めに配置し MMF を同一方向に向けて、ファイバ収納を設けた。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。レーザーの取り外し、および電源の取り替えも容易に行えるよう工夫した。

レーザー光出力 3 kW を冷却可能か調べるため LD 側面に熱電対を取りつけ温度測定を行った。冷却液の条件は先程の実験と同様である。1 kW では照射時間 15 s で十分な溶融が確認されたため、余裕を持ってレーザー照射時間を 30 s に設定した。その結果、30 s 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。

## 6 光出力 3 kW による実験

### 6.1 レーザ照射による被削材の変化

光出力 3 kW のレーザー照射が可能となったため、レーザー照射のみを行い、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 (レーザー照射時間 5 s) 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。

レーザー照射後の被削材を図 13 に示す。すべての条件において照射面が変色し、変形している。溶融部、変色部共に出力増加に伴い範囲が広がっていることが分かる。また 3 kW では変色部が 6 mm であり、1 kW の約 3 倍である。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を得られる可能性があることが分かった。

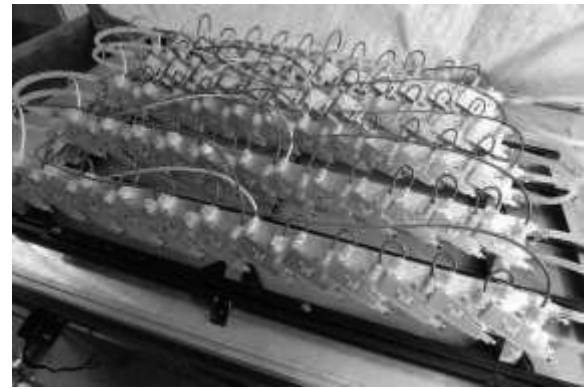
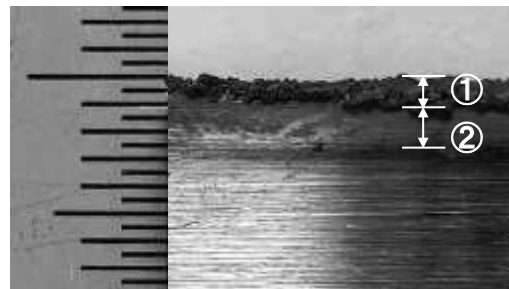
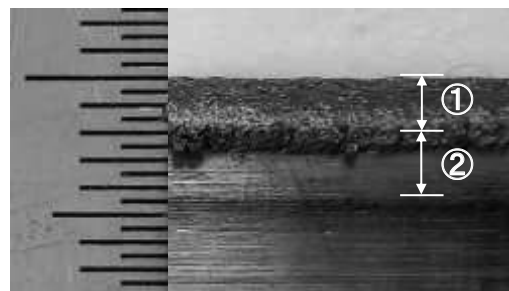


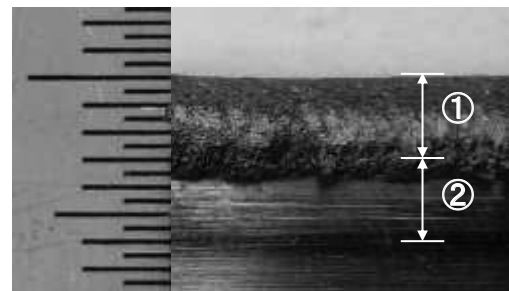
図 12 設計・製作した冷却部



(a) 光出力 1 kW



(b) 光出力 2 kW



(c) 光出力 3 kW

図 13 レーザ照射後の被削材側面の様子

### 6.2 レーザ援用研削結果による比較

そこで、考察通り光出力 1 kW の 3 倍の効率が得られるかどうか実験を行った。3 方向からレーザー照射し研削速度 50 mm/s、切り込み深さを 2 mm に固定した。照射時間を 1 kW では 15 s、3 kW では 5 s 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 14 に示す. この実験結果から光出力 3 kW はレーザー照射時間が 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, 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.

表 2 研削結果による比較

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

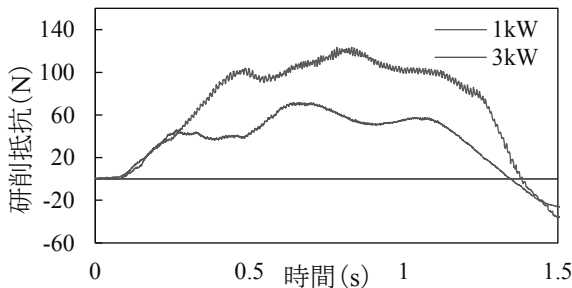


図 14 法線方向の研削抵抗による比較

## 7 結言

光出力 3 kW レーザ照射装置の設計, およびそ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) 3 方向から 1 点に照射するヘッドにより単位面積当たりのエネルギー密度を 3 倍にできた.

(2) 重量が従来ヒートシンクの 1/2, 実装面積が 1/3 の小型軽量ヒートシンクを製作した. また, 実用的な冷却効果であった.

(3) 光出力 3 kW のレーザー援用研削は 1 kW 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た.

以上より, レーザ援用研削において高出力化は除去効率を向上させる有効な手段であることを示せた. 今後は, 更なる出力の向上を目指すと共に, 切削加工での効果を確認する.

## 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. また, 本実験は日立 GE ニュークリアエナジー株式会社から装置の提供を受けて実施致しました.

## 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, 日刊工業新聞社 (2000), p.10