

# 論文 レーザを用いたコンクリート表面の効率的な切削方法の検討

濱岡 祥樹\*1・氏家 勲\*2・河合 慶有\*3・山崎 英樹\*4

**要旨：**原子力発電所の廃止措置に伴い、放射性物質を取り扱うエリア内設備の解体における課題の一つは放射性物質を含む廃棄物の量を減らすことにある。本研究では研磨材を必要としない切削法である、レーザを用いたコンクリート表面の切削性能について検討を行った。レーザの照射条件やコンクリートの水セメント比を変化させることによる切削深さおよび切削効率について検討した。その結果、レーザを用いた切削方法は、ショットブラスト工法と同程度の深さが切削可能で、さらに同量のコンクリート切削に要する時間を 1/2 倍程度に短縮できることが分かった。

**キーワード：**レーザ, 切削性能, ガラス化, 切削深さ, 切削時間, 水セメント比

## 1. はじめに

原子力発電所の廃止措置に伴い発生する放射性物質を含むコンクリートの処理が問題となっている。そこで廃止措置における建屋解体の際に、放射性物質が浸透したコンクリート部分をあらかじめ取り除いて処理することによって、一般の構造物と同様に解体できるとともに、放射性廃棄物の量を大幅に減らすことができる<sup>1)</sup>。コンクリートの表面除染技術としては、ショットブラスト工法、グラインディング工法、スキヤリファー工法（かきおとし）、ミーリング工法（平削り）などの工法がある<sup>2)</sup>。既往の研究において、ウォータージェット工法について評価した結果では、処理面に対する水の噴射角度を小さくすることにより、短時間でより凹凸度合いの小さい切削処理ができることが分かった<sup>3)</sup>。しかしながら、ウォータージェット工法では処理に用いた大量の水が新たな放射性廃棄物となること、ショットブラスト工法では、使用した研磨材が新たな放射性廃棄物となる問題がある。そこで、水や研磨材を使用しないで液体窒素によってコンクリートなどを切削する工法がある<sup>4)</sup>。この工法においては切削に用いた液体窒素が処理後に気化するため、二次放射性廃棄物が発生しない切削技術であるが、液体窒素を研磨材として用いることからそのハンドリングと経済性に課題がある。

そこで本研究では、レーザを用いたコンクリートの切削方法について検討する。レーザがコンクリート表面の切削に適応可能なことは既往の研究で報告されている<sup>5)</sup>。レーザによるコンクリートの切削の原理は、集光照射することで対象物を局所的に加熱し、レーザが表面部分を昇華させる過程、熱が表面部分を瞬間膨張させて発生する圧縮応力による熱破砕過程、もしくは、熱により結晶

水や浸透水等が水蒸気爆裂を起こし、その力により破砕される過程などによるものである<sup>6)</sup>。また、コンクリートがガラス化する溶融が生じる過程が生じると、溶融物がコンクリートの多孔質部分へと浸透し、見かけ上の研削量は増えるが、放射性物質の浸透域が広がる可能性がある。さらには切削物の回収方法などの課題もある。

このように原理が明確になっているにもかかわらず、レーザによるコンクリート切削技術は確立していない。そこで本研究は、最初の段階としてレーザの照射条件を把握することの他に、コンクリートの品質をパラメータに加えて、レーザによるコンクリート切削の効率の良い条件を検討する。本研究では、既存の方法である、ショットブラスト工法と比較し、レーザによる切削性能についても評価する。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料および配合

本実験で使用するコンクリートは、早強ポルトランドセメント(密度:3.10g/cm<sup>3</sup>), 細骨材(表乾密度:2.61g/cm<sup>3</sup>, 吸水率:1.20%, 粗粒率 2.70), 粗骨材(表乾密度:2.62g/cm<sup>3</sup>, 吸水率:1.20%)を用いた。また混和剤として高性能 AE 減水剤, AE 剤を使用した。本実験では、45%, 55% 及び 65% の 3 種類の水セメント比を用いて、単位水量を 175kg/m<sup>3</sup>, 細骨材率を 46% と設定した。3 種類の異なる水セメント比の配合を用いることで、強度を変化させた。コンクリートの配合を表-1 に示す。

### 2.2 供試体の作製及び養生

1 回のレーザ切削に用いる供試体寸法は、断面 15cm×15cm×高さ 3cm である。打設から 24 時間後に脱型を行い、材齢 28 日まで温度 20℃ の水中養生を行った。本研

\*1 愛媛大学大学院 理工学研究科生産環境工学専攻 (学生会員)

\*2 愛媛大学大学院 理工学研究科教授 工博 (正会員)

\*3 愛媛大学大学院 理工学研究科准教授 Ph.D. (正会員)

\*4 四国電力(株) 原子力本部 原子力保安研究所 保修高度化グループ

表-1 コンクリートの示方配合

| 粗骨材の<br>最大寸法 | スランプ | 水セメント<br>比 | 空気量 | 細骨材率 | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |      |     |     |          |      |
|--------------|------|------------|-----|------|--------------------------|------|-----|-----|----------|------|
|              |      |            |     |      | 水                        | セメント | 細骨材 | 粗骨材 | 高性能AE減水剤 | AE剤  |
| (mm)         | (cm) | (%)        | (%) | (%)  | W                        | C    | S   | G   | A        | B    |
| 20           | 8.0  | 45         | 4.0 | 46   | 175                      | 389  | 788 | 935 | 5.83     | 2.33 |
| 20           | 8.0  | 55         | 4.0 | 46   | 175                      | 318  | 815 | 967 | 4.77     | 1.91 |
| 20           | 8.0  | 65         | 4.0 | 46   | 175                      | 269  | 833 | 989 | 4.04     | 1.62 |

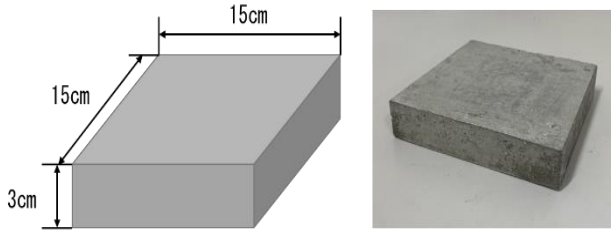


図-1 供試体の寸法

究では、打設底面を切削面として実験を行った。図-1に供試体の寸法を示す。また、上述した供試体とは別に直径 100mm の円柱供試体を各配合 3 本ずつ作成し、JISA1108 に準じて圧縮強度試験を実施した。材齢 28 日における各配合の圧縮強度は、W/C45%が 41.8N/mm<sup>2</sup>、W/C55%が 32.8N/mm<sup>2</sup>、W/C65%が 23.6N/mm<sup>2</sup>であった。なお、原子力発電所の建屋には主に呼び強度 24 のコンクリートが使用されている。

### 2.3 レーザによる切削実験

本実験では、レーザの出力数 (W)、レーザの照射速度 (m/min)、レーザの照射回数、供試体の水セメント比を変化させて実験を行った。レーザにより切削する面積は 50mm×100mm=5000mm<sup>2</sup>である。照射回数とは、50mm×100mm の範囲を一気にレーザ切削した回数で、50mm×100mm の範囲をレーザ切削すると 1 回であり、切削した範囲に再度レーザ切削すると 2 回、再々度行くと 3 回となる。

#### 2.3.1 レーザの仕様

本実験に使用したレーザは、ファイバ導光式の高出力レーザである。ファイバ導光式の高出力レーザに対応した 3D ガルバノスキャナヘッドユニットとガルバノコントローラ及び専用ケーブル等の添付品によって構成される。本実験ではガルバノスキャナヘッドユニットに 3D 工学倍率 3.8 倍、ガルバノコントローラを使用した。本実験で使用したレーザは、最大出力 8kW、最大照射速度 1000m/min である。最大加工面積は、250mm×240mm=60000mm<sup>2</sup>であり、レーザでの切削はレーザヘッドを固定して行うためこれ以上の面積を切削する際にはレーザヘッドを移動させることで切削可能である。システム構成の概要を図-2 に示す。またレーザによる切削状況を写真-1 に示す。

#### 2.3.2 平均切削深さ及び平均粗さの計測

表面形状の測定には、超高速インラインプロファイル

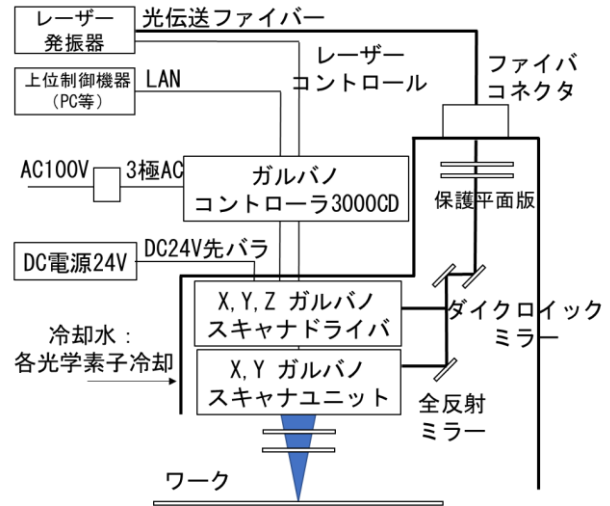


図-2 レーザのシステム構成の概要

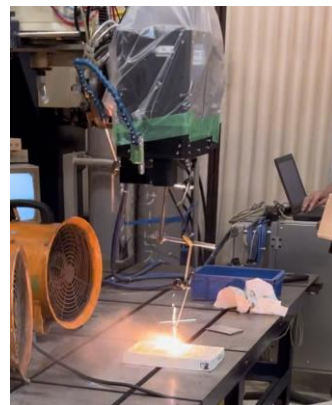


写真-1 レーザによる切削風景

測定器を使用した。この測定器は 2 次元レーザ変位計であり、帯状に広げられたレーザ光が対象面に当たり、その反射光を検出することで対象物の高さや厚み、形状などを測定できる機器である。測定の様子を写真-2 に示す。測定間隔は 0.3mm とし供試体での 50mm×100mm の切削面において 55778 点の測定を行った。切削が行われていない箇所を基準高さとして、基準高さからの差分を測定点毎に測定し、各点の測定値とした。全測定値の平均の値を供試体 1 体における平均切削深さとした。

また、凹凸度合を表す指標として式(1)を用いて平均粗さ  $R$  (mm) を算出した。

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{n} \quad (1)$$

ここに、 $x_i$ : 各測定点の切削深さ (mm)、 $\bar{x}$ : 供試体の平均切削深さ (mm)、 $n$ : 計測点数 (個) である。

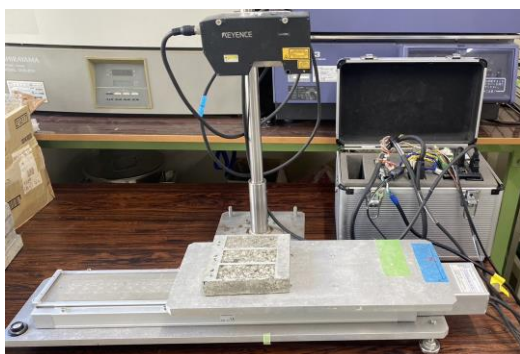


写真-2 表面形状測定の様子

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 レーザ出力の影響

図-3 にレーザ出力が 3kW, 6kW, 7kW および 8kW における平均切削深さを示す。6kW, 7kW の 4 回目, 8kW の 2~4 回目の測定結果を示していないが、切削面において骨材を含むコンクリートがガラス化してしまい、ガラス化部分表面でレーザ光が透過し反射しないため、平均切削深さの測定が適切に行えなかったためである。どの照射回数においてもレーザ出力が大きくなるにつれ、平均切削深さが増加している。ガラス化しない範囲までは、レーザ出力を大きくさせることで平均切削深さの増加が可能であると考えられる。ガラス化の判定は目視により行った。ガラス化部分はコンクリートと形状・外観が異なることから、また加熱されたコンクリート温度を測定すれば実構造物の解体においても判別は可能であると考ええる。

図-4 に各出力数による平均粗さを示す。レーザ出力による平均粗さに大きな違いは確認できなかった。そのため、レーザ出力を大きくすることによる平均粗さの差異はないと考えられる。ただし、照射回数 1 回で比較すると、レーザ出力が大きくなれば、切削面の凹凸が大きくなる傾向がみられる。さらに、レーザ出力を増加させるにつれ、ガラス化が生じやすくなった。これは、レーザ出力が大きい場合は小さい場合に比べて、同じ照射時間でも表面に蓄えられる熱エネルギーが増加するからである。レーザ出力を増加させれば、切削面の凹凸を抑えつつ、より多くの切削量を期待できる一方で、ガラス化も生じやすくなる。そのため、ガラス化が生じない範囲で大きな出力によるレーザの適用を検討する必要がある。

#### 3.2 照射速度の影響

図-5 は平均切削深さに及ぼすレーザの照射速度の影響を示す。平均切削深さは照射速度が低速の場合に最も大きくなり、照射速度が高速になるにつれてほぼ一定の値になる傾向が見られた。低速の場合に平均切削深さが大きくなったのは、高速の場合と比較して照射面に蓄えられる熱エネルギーが大きくなるためであると考えられる。レーザによる切削の原理は熱が表面を瞬間膨張させ

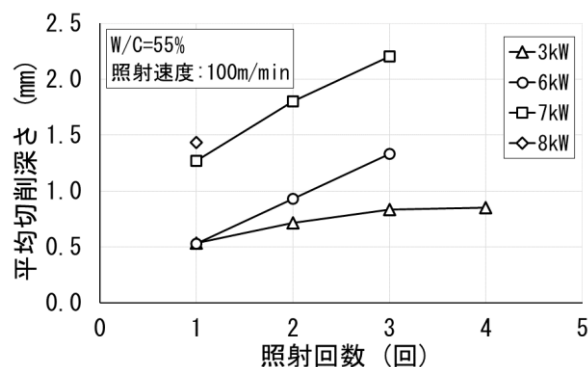


図-3 平均切削深さに及ぼす  
レーザ出力の影響

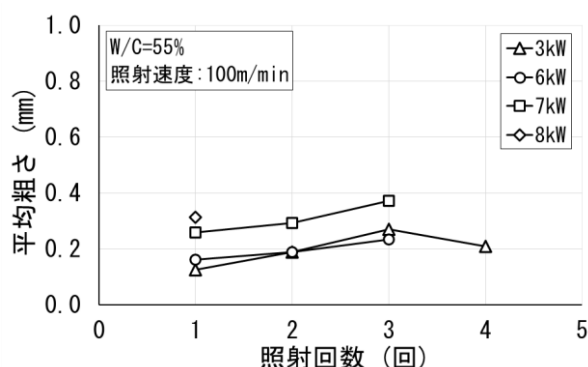


図-4 平均粗さに及ぼすレーザ出力の影響

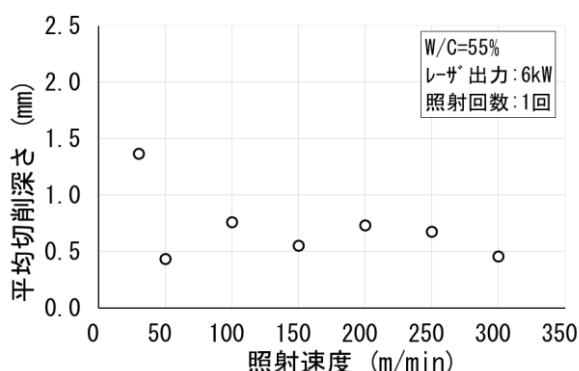


図-5 平均切削深さに及ぼす照射速度の影響

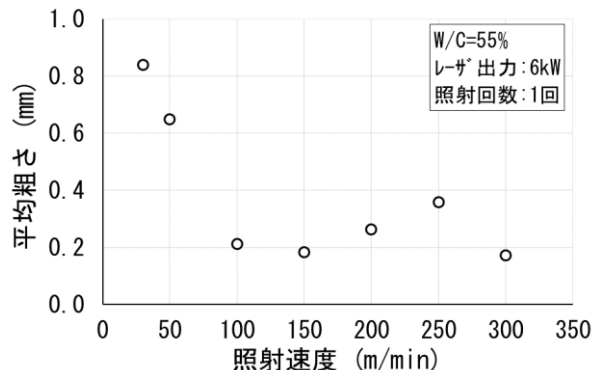


図-6 平均粗さに及ぼす照射速度の影響

て熱破碎を起こし表面が削られる。そのため低速でレーザ照射を行ったことでより深くまで供試体が熱せられ、大きく切削されたと考えられる。さらに、照射速度を増加させることで平均切削深さは一定の値になる傾向が観

測された。このことから、照射速度を増加させることによって、低速の場合と比べ、より短時間で同量の切削が可能なが推測される。

図-6 は平均粗さに及ぼす照射速度の影響を示す。照射速度が増加するにつれて、平均粗さが小さくなる傾向が見られた。これは照射速度が高速になるにつれ供試体の表面から浅い部分のみ熱破碎が行われ、表面の凹凸が少なくなったためであると考えられる。このことから照射速度を速くすることで、切削面の凹凸を小さくできることが考えられる。本研究は、最終的に原子力発電所の廃炉の際に発生する、放射性物質を含むコンクリートの量を減らすことが目的である。そのため可能な限り放射性物質の浸透部分のみの除去を行いたい。凹凸が大きくなると浸透されていない健全な箇所まで切削され、放射性廃棄物が多くなる。そのため可能な限り切削による表面の凹凸を減らすことも切削性能としては重要である。

図-7、図-8 は単位面積当たりの切削時間と平均切削深さおよび平均粗さについての関係を示す。ここにおける単位面積当たりの切削時間とは、レーザでの処理時間を切削面積（5000mm<sup>2</sup>）で除したものである。この値が小さいほど短時間でより多くの面積を切削できることを示している。平均切削深さにおいて、低速（30m/min, 50m/min）で1回の照射による切削よりも、高速（100m/min, 150m/min）で複数回の照射による切削を行った方法がより多くの量を切削できている。また、平均粗さにおいても、高速で複数回の照射による切削を行った方法が、低速で1回の切削方法に比べ凹凸が小さくなっている。このことから、低速で切削を行うよりも、高速で複数回にわたり切削を行う方が、表面の凹凸を小さくし、短時間でより多くの量を切削可能であると言える。

### 3.3 水セメント比の影響

図-9 に平均切削深さに及ぼす水セメント比の影響を示す。水セメント比の小さい供試体は圧縮強度が高いため、水セメント比の大きい供試体に比べ平均切削深さが小さくなることが予想されたが、水セメント比による平均切削深さには大きな違いが確認されなかった。また、図-10 に平均粗さに及ぼす水セメント比の影響を示す。平均粗さに関しても水セメント比の違いによる大きな影響は確認されなかった。そのため、レーザによる切削では圧縮強度の違いによる影響が少なく、本実験の範囲のコンクリートにおいては水セメント比が異なっても、レーザの切削条件が同じであれば同様にを行うことができると思われる。

### 3.4 水分供給の有無による違い

レーザによる切削原理は、レーザにより熱せられた結晶水や浸透水等が水蒸気爆裂を起こし、その力により破碎される過程などによるものである。そのため、供試体

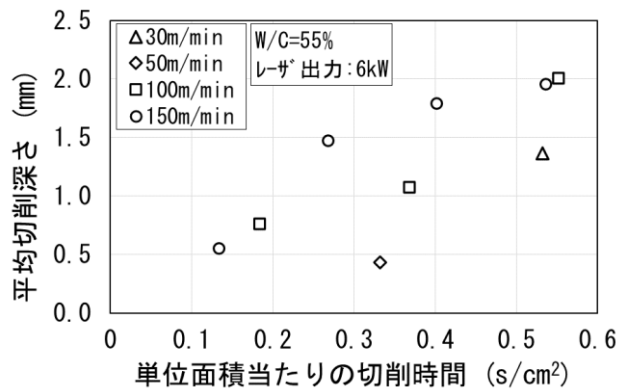


図-7 単位面積当たりの切削時間と平均切削深さの関係

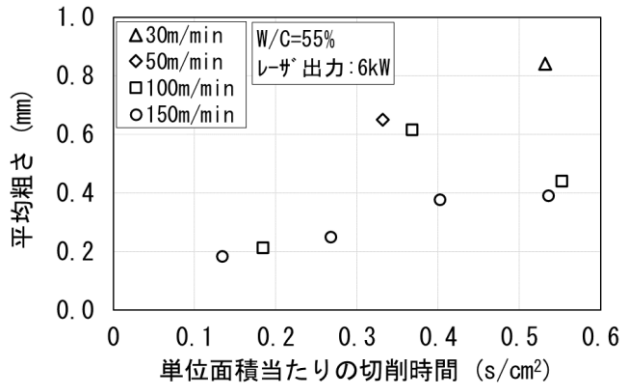


図-8 単位面積当たりの切削時間と平均粗さの関係

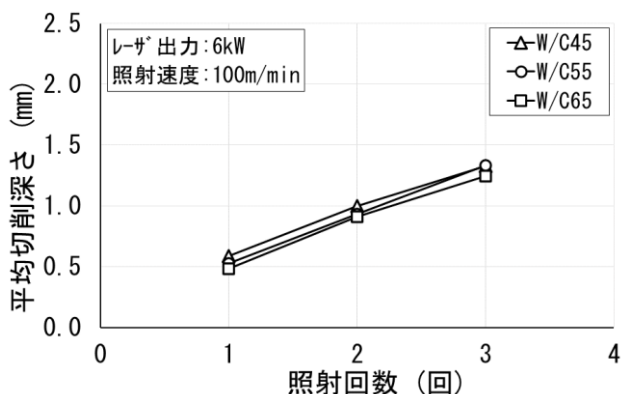


図-9 平均切削深さに及ぼす水セメント比の影響

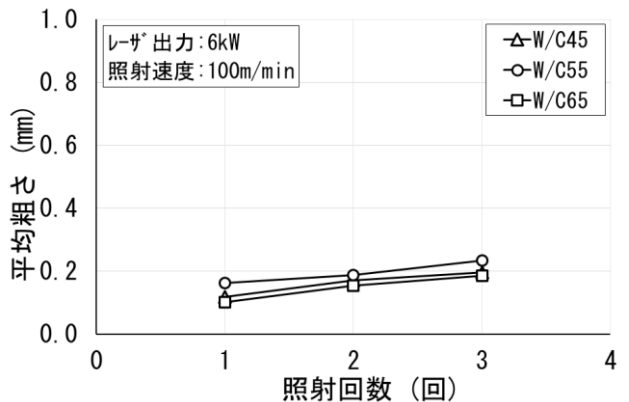


図-10 平均粗さに及ぼす水セメント比の影響

表面へレーザ照射直前に水分供給を行うことで平均切削深さの違いが起こるかどうかが検討するために実験を行った。供試体表面への水分は霧吹きにより、切削開始直前

に供給した。15×15mm の供試体面に約 5ml の水を 4 回に分け噴射を行い、表面に水が溜まることのないように、満遍なく濡らした。図-11 に平均切削深さに及ぼす水分供給の影響を示す。水分供給を行った切削方法は、水分供給のない方法に比べてわずかであるが大きく切削できることが確認できた。これは、レーザによる切削が水分の水蒸気爆発により引き起こされており、切削前行った水分供給が平均切削深さを増加させた要因であると考えられる。照射回数を重ねるごとに水分供給の有無による平均切削深さの差が小さくなっている。これは、水分供給を切削の直前で行ったため、水分が供試体表面から深部に浸透しておらず、直前に行った水分供給による影響を受けていないためと考えられる。あるいは、1 回目のレーザ照射により切削されずに残ったコンクリート部分の水分が蒸発したため、その後のレーザ照射によって切削に水分供給の影響が小さくなったことが考えられる。切削面に水分供給を行うことでより効率的に切削を行うことができると考えられるが、切削前の水分供給においては、放射性物質の付着部分に散水するため、過剰に供給を行うと放射性物質の含んだ水を発生させてしまう。そのため、水分供給による水分が表面から浸透する際に、放射性物質をさらに深部へと運ぶ可能性もあることから、そのことを考慮した散水方法を検討する必要がある。

### 3.5 既往の切削方法との比較

本項では、既往の研究<sup>3)</sup>で行ったショットブラスト工法と比べ、レーザ切削の切削性能がどの程度であるかを検討した。図-12 にレーザ切削とショットブラスト工法における単位面積当たりの切削時間と平均切削深さの関係を示す。レーザ切削ではレーザ出力 6kW、照射速度 150m/min として照射回数を増やした。一方、ショットブラスト工法は研削材を叩きつけ研削させる工法であり、既往の研究では研削材として、鉄球、鉄鋼スラグ、銅スラグを用いた。

レーザ切削ではショットブラスト工法とほぼ同程度の深さを切削することができている。平均切削深さが 2mm 程度に到達するまでにレーザ切削では単位面積当たりで約 0.6 秒であり、ショットブラスト工法では約 1.4 秒で、レーザはショットブラスト工法の約 2 倍の速さでコンクリートを切削することができる。なお、レーザ切削では、照射回数を重ねるごとに一回当たりの平均切削深さが減少している。これは、レーザ切削ではレーザの焦点距離を切削面に設定しているため、切削により切削面の高さが変化し、焦点距離との差が大きくなり十分に熱エネルギーの付与を行うことができなかったためであると考えられる。そのため、より深く切削するためには、複数回照射を行った後に再度、切削面に焦点距離を設定し直すことで、図-12 に示すような大きな切削量を期待

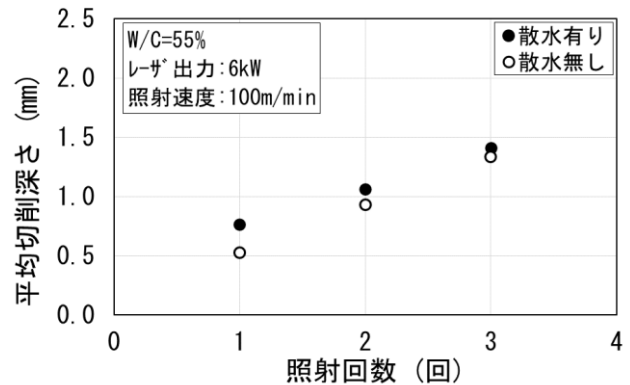


図-11 平均切削深さに及ぼす水分供給の影響

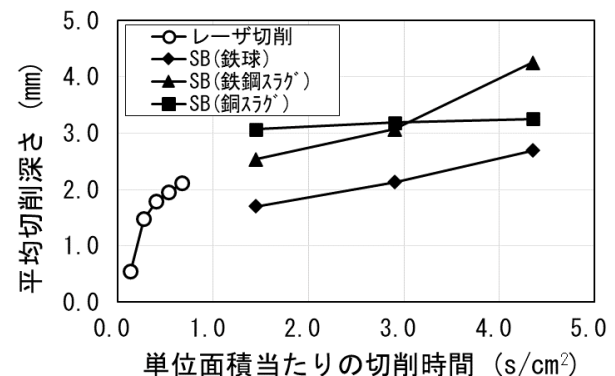


図-12 レーザ切削とショットブラスト工法における単位面積当たりの平均切削時間と平均切削深さ

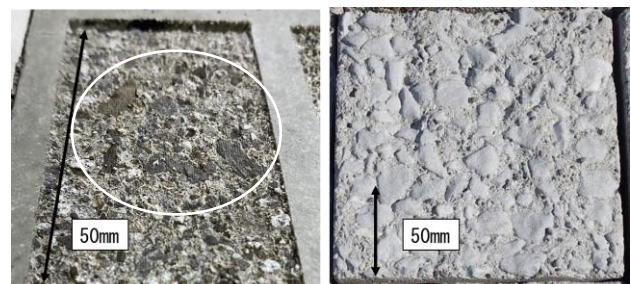


写真-3 レーザ切削(左)およびショットブラスト工法(右)による切削面の状況

できる。

写真-3 はレーザ切削およびショットブラスト工法による切削面の状況を示す。レーザ切削は、レーザ光を集光することによって表面温度を急激に上昇させ、対象の物質を昇華や熱破砕させる。そのため、写真-3 の白丸で囲った部分のように、コンクリート切削時にセメント硬化体部分だけでなく、細・粗骨材も同時に切削ができている。一方、ショットブラスト工法では研削材を叩きつけ切削するため、写真-3 に示すように比較的脆弱なセメント硬化体部分のみ切削され、骨材を同時にはつることができない。そのため、切削後の表面の凹凸が大きくなるとともに、骨材に放射性物質が含まれている場合に除去することができない。このようにレーザ切削では、ショットブラスト工法に比べ、短時間でより深く切削することが可能であり、セメント硬化体に加えて骨材も切

削ることができる点が優れていると考えられる。

### 3.6 ガラス化について

写真-4 はガラス化した切削面とガラス化せずに切削できた面の状況を示す。ガラス化の生じた切削面は凹凸が大きくなっていることが確認できる。レーザによるコンクリート切削原理は、急速加熱による熱破砕および強制融解剥離除去の2種類存在すると報告されている<sup>6)</sup>。本研究では溶融状態のガラス化の部分が放射性物質と共に健全なコンクリートの多孔質部分に浸透し、放射性物質を含む領域が拡大する可能性があるのではないかと考え、ガラス化しない熱破砕までで検討している。強制融解剥離除去による切削方法は、強制的にコンクリートにガラス化を生じさせ、ガラス化部分を機械的にはつることで除去するという方法である。なお、ガラス化した部分はレーザ光が透過するため、レーザでは切削できなかった。ガラス化の生じたコンクリートは凹凸が大きくなる一方で、より深く切削できる。ガラス化させる場合は、複数回レーザを照射する必要があるため、レーザの総移動距離を抑えることができる。健全なコンクリート部分へ放射性物質が浸透しないのであれば、熱応力破壊による切削よりも効率的に切削を行える可能性もある。現状、ガラス化により浸透が拡大されるかどうかは明確ではないため、今後はガラス化による浸透範囲の拡大についても検討を行う必要がある。

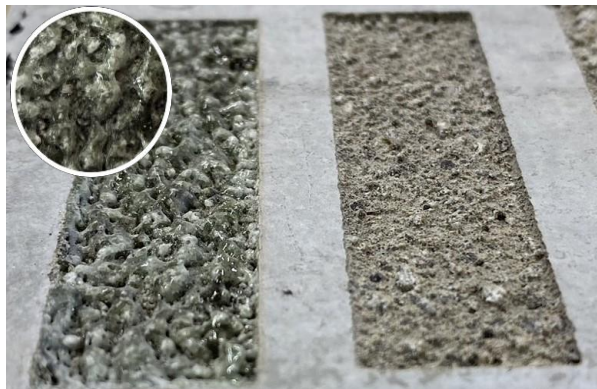


写真-4 ガラス化の有無による切削面の違い  
(左がガラス化の生じた切削面と拡大写真(丸内))

### 4. まとめ

本研究で得られたレーザによるコンクリートの切削に関する知見をまとめると以下のとおりである。

- 1) レーザ出力を増加させることでコンクリートの平均切削深さは深くなるが、平均粗さに関してはレーザ出力の影響はあまり認められなかった。
- 2) レーザの照射速度が速くなるほど、平均切削深さは小さくなり、平均粗さも小さくなる。さらに、ある照射速度以上になると、平均切削深さおよび平均粗さはほぼ一定の値になった。レーザ出力を大きくし、

照射速度を速くすることで、短時間により多くのコンクリート切削を行える可能性がある。

- 3) 水セメント比を変化させ、圧縮強度を変化させた場合にレーザ切削による平均切削深さおよび平均粗さに関して大きな差異は確認されなかった。
- 4) 既往の方法であるショットブラスト工法と比較すると、レーザ切削は、より短時間で同量のコンクリートを切削できることが確認された。また、レーザ切削では骨材も同時に切削できることができ、切削面の凹凸をより小さくでき、骨材が切削できないショットブラスト工法より放射性物質除去の観点から非常に優れている。
- 5) 切削直前のコンクリート表面に霧吹きにより水分供給を行うことで、水分供給を行っていない供試体と比較し、より深く切削することができる。また、高レーザ出力での切削では切削面がガラス化し深く切削できるが切削面の凹凸が大きくなる。

なお、レーザ切削面への散水およびコンクリートのガラス化はより多く切削することが期待できるが、今後は放射性物質の浸透域の拡大の点を含めてレーザによる効率の良いコンクリートの切削技術について検討する必要がある。

### 謝辞

レーザ切削の実験及び表面形状の測定・データ整理などでは愛媛大学工学部学部生の福原勇我君の協力を得ました。ここに謹んで謝意を表し、厚くお礼申し上げます。

### 参考文献

- 1) 宮坂靖彦, ほか: JPDR 解体実地試験の概要と成果, 日本原子力学会誌, Vol.38, No.7, pp.553-576, 1996
- 2) 伊藤章, 鳥居和敬: 第3回廃止措置技術-コンクリート解体/はつりの技術動向, 原子力学会誌, Vol.51, No.10, pp.763-767, 2009
- 3) 安井宏昭: コンクリート表面処理形状に及ぼす切削方法の影響に関する検討, 愛媛大学卒業論文, 2018, 2月
- 4) 株式会社 IHI: 二次廃棄物処理コストを低減する除染の切り札, IHI 技報 Vol.54, No.1, pp.12-13, 2014
- 5) 鎌田博文, 三森武男, 立岩正明, 杉本賢司: レーザによるコンクリート表層はく離の研究, レーザ学会, Vol.24, No.2, pp.182-190, 1996
- 6) 新井武二, 浅野哲崇, 及川昌志: 10kW ファイバーレーザによるコンクリート石材の剥離除去加工, 2012年度精密工学会春季大会, A10, pp.17-18, 2012