

# 粒子法シミュレーションを用いたレーザ掘削の可能性調査

課題責任者

川人 洋介 海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門

著者

川人 洋介\*<sup>1</sup>, 森 路子\*<sup>1</sup>

\*<sup>1</sup> 海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門

**キーワード**：粒子法シミュレーション，超高出力レーザ，光と物質との相互作用，レーザ掘削

## 1. 序論

レーザは、指向性エネルギーであるため、高精度で遠隔操作が可能な加工技術である。現在では、数十 kW 級のレーザが商業的に利用できる段階に達し、100 kW 級の出力を出せるファイバーレーザも登場してきている。このようなレーザは「超高出力レーザ」と呼ばれ、非常に強力な加工手段である。

近年、超高出力レーザの応用範囲はさらに拡大しており、宇宙空間や高放射線環境といった極限環境への応用研究が進められている。これらの応用研究では、レーザ照射によって材料内部に細長い穴（キーホール）が形成され、エネルギーが効率よく吸収される「キーホール現象」に着目した実験および数値解析が活発に行われている。

さらに、月面建設を想定した宇宙レーザ溶接や、原子力施設の廃止措置に向けた切断技術の検討も進められている。特に原子力発電所の廃炉作業においては、レーザ切断は追加の大規模設備を必要とせず、ロボットによる遠隔操作が容易であることから、安全性の高い切断技術として期待されている。

しかし、従来のレーザ切断では高圧のアシストガスを用いる方法が一般的であり、原子力施設へ適用した場合には、放射性物質が飛散するおそれがあることが課題となっていた。このため、メートル級の鉄筋コンクリート（RC）構造物を対象として、アシストガスを使用しないレーザ切断技術の確立が強く求められている。この課題に対し我々は、地球シミュレータを用いた数値解析を基盤とし、出力 30～60 kW の超高出力レーザによる新たな RC 切断手法を開発した。本手法では、レーザ照射によってコンクリートを溶融させ、重力により排出するとともに、溶融後のガラス化に伴う脆化を利用して切断領域を分離する。これにより、アシストガスを用いない RC 切断を実現した。

上記手法について、実験および地球シミュレータを用いた数値解析を行った結果、すべての条件において RC のガラス化が確認された。特に、出力 50 kW のレーザで総エネルギー 43 MJ を入力し、焦点位置を上下に移動させながら照射することで、厚さ 1 m の RC 構造物を貫通切断できることを実証した。さらに数値解析から、レーザによるバーンスルー（コンクリートの溶落ち）によって形成された貫通孔が、溶融領域内部へのレーザ伝播を促進し、結果として高効率な溶融および材料分離を実現していること

が明らかとなった。これらの実験と解析を組み合わせた一連の成果（図 1 参照）は、Optics and Lasers in Engineering, Vol.180 (2024), 108258 (Impact Factor: 3.5) に掲載され、原子力発電所の廃止措置を含む屋外環境における超高出力レーザ応用の有効性を示すものとして報告された。

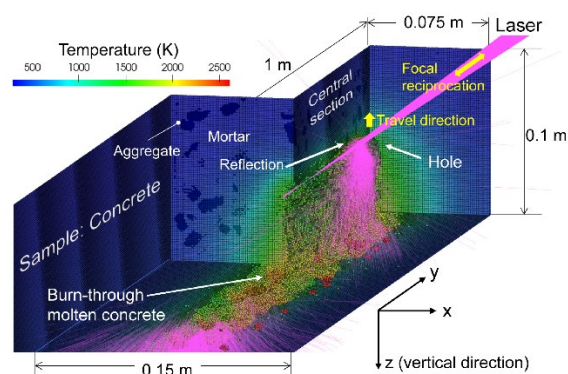


図 1 地球シミュレータによる数値解析結果

本研究では、先に述べたレーザ切断原理を発展させ、原子炉の廃炉作業におけるコンクリート部材を対象とした新たなレーザ掘削工法の確立に取り組む。これは、これまでの研究成果が学術誌に掲載されたことを契機に、資源・エネルギー分野においてレーザ掘削技術の応用可能性が注目されるようになったためである。

本研究は、これまでに開発してきた粒子法シミュレーションを基盤として手法の改良および拡張を行い、レーザ掘削時に形成されるコンクリートのガラス化状態や溶融挙動を数値的に評価可能な解析手法の構築を目的とする。レーザ切断が主として材料の分離を目的とする加工であるのに対し、レーザ掘削は深さ方向へのエネルギー集中によって材料内部を除去する加工であり、溶融物の排出挙動やレーザの内部伝播が支配的な課題となる。

## 2. 計算手法

粒子法は、解析対象を格子状に分割することなく、計算領域内に配置した粒子の情報に基づいて連続体の力学挙動を記述できる手法である。この特長により、キーホール形成のように自由表面が大きく変化する現象に対しても、安定した数値解析が可能となる。

本研究では、レーザ光を「光粒子」と表現し、コンクリ

ートを「材料粒子」として扱った。各時間ステップにおいて光粒子を材料粒子に投射し、コンクリートの状態に応じてレーザ光の挙動を切り替えて計算を行った。すなわち、コンクリートが固体状態の場合には表面での反射および吸収を考慮し、熔融して液体状態となった場合には、レーザ光が内部を透過しながら吸収されるものとした。本解析は、粒子総数約 350 万の規模で、地球シミュレータを用いて実施した。

コンクリートが熔融した場合は、ガラス化によりレーザ光が内部を透過可能になると仮定した。ガラス化したコンクリートは透明体としてモデル化し、液体粒子と衝突した光粒子は反射せず、吸収のみを受けるものとした。光の吸収は指数関数的に減衰するものとし、入射光強度  $I(0)$  が距離  $x$  進行後に  $I(x)$  となる関係を、以下の式で与えた。

$$I(x) = I(0)e^{-\alpha x} \quad (1)$$

ここで、減衰係数  $\alpha$  は次式で定義される。

$$\alpha = 4\pi k/\lambda \quad (2)$$

ここで、 $k$  は消光係数、 $\lambda$  はレーザ波長である。

一方、固体状態のコンクリートにレーザ光が入射した場合には、入射角と等しい角度で反射が生じるとともに、一部のエネルギーが粒子に吸収されるものとした。吸収率はフレネルの式に基づいて算出し、入射角  $\theta$  における  $P$  偏光および  $S$  偏光成分の吸収率を、次式で与えた。

$$A_p = \frac{4ncos\theta}{(n^2+k^2)cos^2\theta+2ncos\theta+1} \quad (3)$$

$$A_s = \frac{4ncos\theta}{n^2+k^2+2ncos\theta+cos^2\theta} \quad (4)$$

$$A = \frac{\alpha(A_p+A_s)}{2} \quad (5)$$

ここで、 $A_p$  :  $P$  偏向による吸収率、 $A_s$  :  $S$  偏向による吸収率、 $A$  : 吸収率である。

レーザ光粒子が持つエネルギーを  $E$  とすると、 $E \times A$  だけ固体粒子にエネルギーが吸収され、衝突後のレーザ光粒子が持つエネルギーは、 $E(1-A)$  となる。

### 3. 数値計算結果

レーザ出力および波長をそれぞれ 70 kW、1.07  $\mu\text{m}$  に設定し、実験と同サイズのコンクリート試料 (100  $\times$  100  $\times$  350 mm、粒子間隔 1 mm) の端面をレーザ集光位置に配置した。この条件下で、50 秒間レーザを照射し、いくつかの消光係数を仮定して数値計算を実施した。

その結果、消光係数が  $3.81 \times 10^{-7}$  の場合、図 2 に示す計算結果の温度分布より、照射 1 秒後にはコンクリート内部 63 m までレーザが侵入し、その周辺領域が熔融していることが確認できた。さらに 20 秒後には、図 3 に示すようにコンクリートを貫通している様子が明瞭に確認さ

れた。本数値計算結果は、実験において 18 秒で貫通したことと一致しており、レーザ貫通挙動を良好に再現できていると判断される。

消光係数は、レーザの内部伝播現象を特徴づける物性的指標として考えられる。実際の原子力発電所と同成分のコンクリートをレーザ熔融・ガラス化させ、分析片の消光係数を分光エリプソメータ測定により評価したところ、 $7.62 \times 10^{-7}$  の約半分程度であることが明らかとなった。

$\text{SiO}_2$  の消光係数は  $10^{-7}$  以下であることを考慮すると、特定の高出力レーザ条件下では、熔融状態のコンクリートが高透過ガラスのようにレーザを透過させることを意味している。また、このような現象は、大型放射光施設 SPring-8 における X 線透過観察においても同様に確認した。

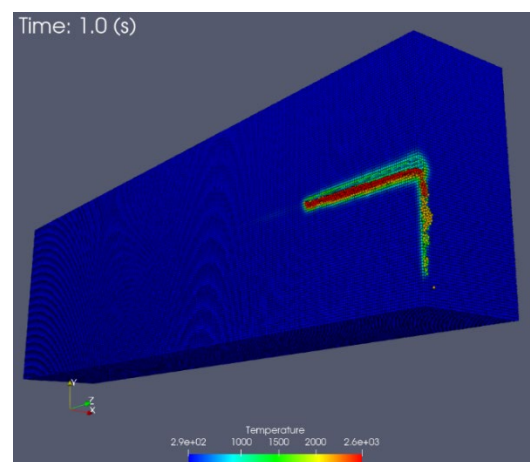


図2 レーザ照射 1 秒後のコンクリート内部温度分布 (入射レーザの光軸を含むコンクリートの断面で表示)

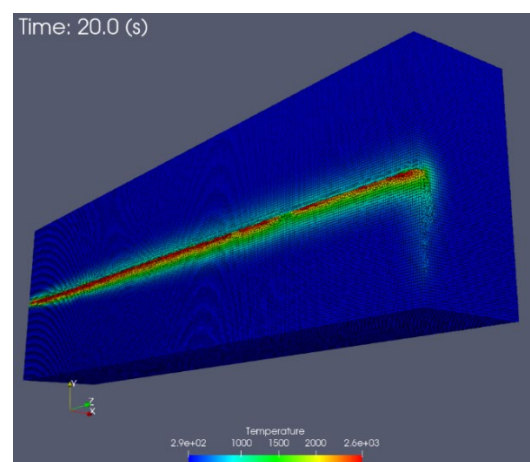


図3 レーザ照射 20 秒後のコンクリート内部温度分布

### 4. 結論

地球シミュレータによる数値解析の結果、特定の高出力レーザ条件下では、熔融状態のコンクリートは高透過ガラスのようにレーザを透過させる新たな物性を持つことが数理的にも明らかとなった。さらに、この現象を利用することで、レーザ掘削が可能であることが推察された。