

高出力レーザーによる岩石系材料の溶融過程の粒子法シミュレーション

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

亀田 敏弘*¹*¹ 海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門 数理科学・先端技術研究開発センター

キーワード：レーザー, 岩石, 相変化, 粒子法, 並列化

1. 序論

近年, 数 kW から 100 kW の産業用高強度レーザーが実用化され普及している。それに伴い、金属加工や溶接など様々な分野でレーザー光が用いられるようになっており、このような技術を岩石やコンクリートの加工や切断に応用する研究が進められている。杉田ら¹⁾ はレーザーのコンクリート切断への適用可能性を調べるために、出力 5 kW と 20 kW の CO₂ レーザを用いてレーザー出力、切断速度、焦点位置、アシストガスの種類や圧力等をパラメータとして、各種コンクリートやモルタルの切断実験を行っている。彼らの研究では出力を上げて真上から垂直にレーザーを当てる手法では切断できるコンクリート厚さに限界があると結論付けている。Juan ら²⁾ はコンクリートをプラズマジェットで溶断した際の熱伝搬について、実験を行い測定した値とコンクリート内部の熱伝導に関する解析モデルを用いて得られた理論温度を比較することで、材料内部の熱伝導損失を推定している。呉屋ら³⁾ は、20 kW を超える高出力ファイバーレーザーと超長焦点光学系を用いることで、最大板厚 1200 mm 極厚コンクリートのレーザー溶断が可能であることを報告している。これらの先行研究の成果に基づき、我々は、独自にコンクリートの溶断実験を行い、1000mm 程度のコンクリートの溶断を実験によって確認している (図-1)。

レーザー溶断を実用的な手法とするためには、効率的なレーザー照射条件を定める必要がある。レーザー照射条件を変化させて溶断状況を観察した貴重な例⁴⁾ が報告されているが、様々な状況に対する諸条件を実験的に同定するには多大な労力とコストが発生することが予想されるた

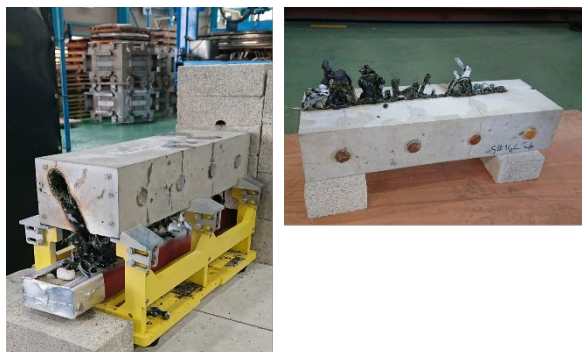


図-1 レーザで溶断されたコンクリート

め、我々はレーザーと材料のエネルギー授受を考慮した力

学に立脚した数値シミュレーションによって現象を予め予測することで、効率的なレーザー照射条件を定めるアプローチを選択した。

本研究では、地球シミュレータで効率よく計算ができるよう開発した並列化コードの実証と、コンクリートに対するレーザー溶断実験結果と整合性のあるシミュレーション結果の確認を目的とする。

2. 理論と手法

本研究で使用するアルゴリズムは非圧縮性流体の MPS (Moving Particle Semi-implicit) 法⁵⁾、を基に開発されたアルゴリズム⁶⁾ を岩石系固体材料を扱うために改良を加えたものである。具体的には、レーザー照射によるエネルギーの授受に関して、仮想的な光粒子を用いて衝突によってエネルギーを岩石側の粒子に与えている。レーザーのエネルギー吸収率という概念を導入することで、吸収率のパラメータをレーザー溶断の進行速度とシミュレーション結果と比較することで簡便に決定できる利点がある。光粒子のエネルギー分布はガウス分布を仮定しており、以下の式 (1) で表される⁶⁾。

$$f(X) = C \exp\left(-\frac{X^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

ただし X は、 x : レーザ照射中心からの距離、 r : レーザ照射半径を用いて、 $X = x/r$ で定義される無次元量、 C : 光粒子のエネルギーの合計値はレーザーが単位時間あたりに物体に与えるエネルギーと等しくなるよう設定した定数、 σ^2 : レーザ照射中心からの無次元距離 X に関する分散である。

光は材料に衝突する際、光学の偏光特性と入射角度に応じて吸収率 A が変化する。このモデルでは p 偏光に対する吸収率 A_p と s 偏光に対する吸収率 A_s を以下の式(2a)、(2b)で表す⁶⁾

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

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

ただし n : 屈折率, k : 消衰係数である。数値計算では A_p と A_s の相加平均にパラメータ α を乗じたものを吸収率 A として用いている。この α は実験的に同定する必要がある。本研究ではレーザー溶断速度がシミュレーションと実験との間で一致するよう α を決定した。

また、複合材料を粒子法で取り扱うため、物性パラメータには平均量であるコンクリートの物性を用いると共に、固体状態のコンクリートを粘性の極めて高い流体とした。既存のコンクリートの物性に関する研究を参考とした。

現象の再現に向けて、重力方向の違いによる溶融物の流動状況の把握と、端部境界の影響の把握を目的としたシミュレーションを行った。 $35 \times 35 \times 100 = 122500$ 粒子を用いて、重力方向の異なる供試体に同一レーザーを照射して溶融状況の相違の照査と、レーザー照射部分を移動させた場合の溶融形状の特徴の照査を行った。

3. 結果

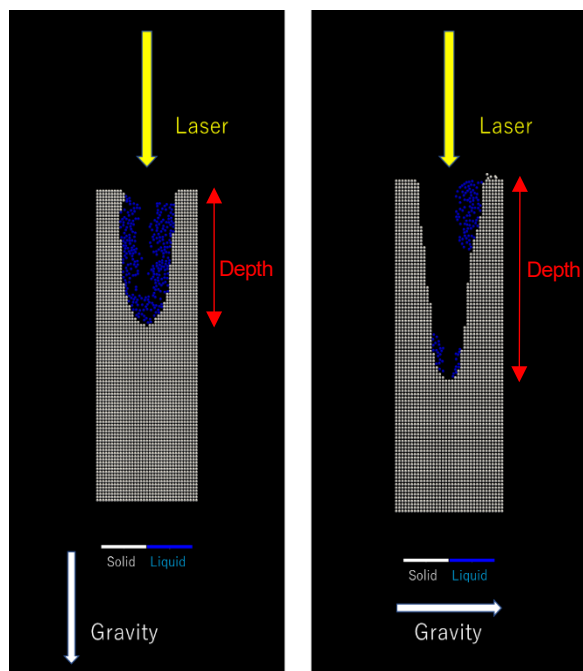


図-2 重力方向を変化させた場合の溶断状況
(重力の向き 左:鉛直下向き, 右:右向き)

図-2 に重力方向を変化させた場合の結果を示す。レーザー照射方向と重力が同一の場合には、溶融した液相が滞留していることが観察される。一方、レーザー照射方向と重力方向が90度をなす場合には、溶融した液相が排出されていることが観察される。溶融深さは後者のほうが大きくなった。図-3 にレーザーを移動させながら照射した場合の結果を示す。最初に照射を受けた端部では、溶融物が押し出される状況が観察された。照射部の移動の後、再び到達した端部では、中央部に比べて溶断が深くなる状況が観察された。

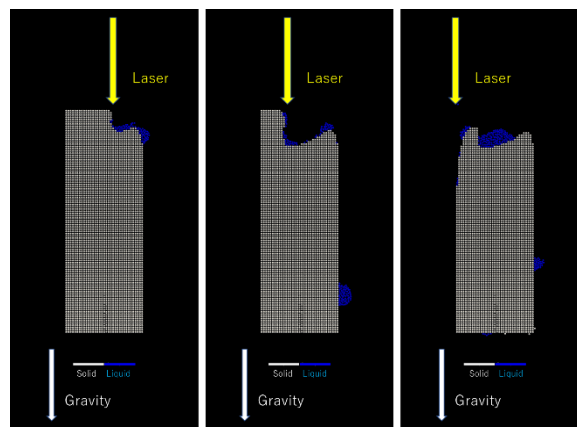


図-3 レーザを移動させた場合の溶融形状
(左から $t=0.0333, 0.0666, 0.1000$ sec)

4. 結論

レーザーを光粒子としてモデル化した粒子法により、岩石系材料の溶融のシミュレーションの適用可能性を検討した。まず、重力の影響で溶融物の挙動が異なることが再現され、得られた結果から、実験で報告されている、鉛直上向きからのレーザー照射では溶融物の排出が行われず溶断長さに限界が生じる状況や、水平方向からのレーザー照射では溶融物の排出が促進されて溶断長さが増加する状況と整合性が確認できた。次に、端部からの溶断における溶断深さの形状が再現され、既報告の実験結果 4) との整合性が確認された。

文献

- [1] K. Sugita, M. Mori, and T. Fujioka, "Application of CO2 Laser to Concrete Cutting," Concrete Journal, Japan, Vol.24 (9), 13-22, (1986), https://doi.org/10.3151/coj1975.24.9_13
- [2] J. C. Chamorro, L. Prevosto, E. Cejas et al., "Plasma Cutting of Concrete: Heat Propagation and Molten Material Removal From the Kerf," IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, Vol. 47 (6), 2859-2867, (June 2019), <https://doi.org/10.1109/TPS.2019.2914394>
- [3] S. Goya, H. Mori, T. Okuda, Y. Fujiya, et al., "Development of Thick Concrete Cutting System Using High-Power Laser," Mitsubishi Heavy Industries technical re-view Vol.58 (1), 1-8, (2021)
- [4] K. Nagai and K. Shimizu, "Using a High-Power Fibre Laser to Cut Concrete", Applied Science, 11(10), 4414, (2021)
- [5] S. Koshizuka, "A particle method for incompressible Viscous Flow with Fluid Fragmentation," Computational Fluid Dynamics J. 4,
- [6] K. Kinoshita, Y. Kawahito, and S. Katayama, et al., Visualization of Interaction between Fiber Laser Beam and Laser-Induced Plume, Japan Welding society, Vol.13 (1), 41-47, (2006).