

粒子法を用いた高出力レーザーによる岩石溶融プロセスの最適化

課題責任者

川人 洋介 海洋研究開発機構 超先鋭研究開発部門 超先鋭技術開発プログラム

著者

亀田 敏弘*¹

*¹ 海洋研究開発機構 数理科学・先端技術研究開発センター,

近年、技術進歩が著しい高出力レーザーを活用することで、数百 mm の厚さの岩石やコンクリートを溶断できることが示されており、レーザー照射の出力、速度、方向に応じた溶融加工プロセスをシミュレーションで把握することで、膨大な回数の実験を実施することなく、自動化や最適化に寄与する可能性が考えられるため、粒子法を用いて材料の溶断現象の数値シミュレーションによる再現を試みた。さらに、実用性を向上するために実験によって同定が必要なパラメータを少なくする工夫を行った。結果として、簡便な実験で計算パラメータを同定する手法を提案するとともに、高出力レーザーによるコンクリートの溶断速度を定量的にシミュレーションにおいて再現することが可能となった。

キーワード：溶融プロセス，粒子法，高出力レーザー，相変化，最適化

1. 研究の背景

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きている。このような技術発展に伴い、レーザーによるコンクリート溶断技術の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 レーザー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。この研究では出力を上げて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た (図 1)。

岩石やコンクリート構造物に対して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が、異なる構造物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め現実的ではないと考え、我々はコンクリート材料がレーザーから受け取るエネルギー、コンクリートの物性を反映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、シミュレーション実行のために同定が必要なパラメータを



図 1: 高出力レーザーによるコンクリートの溶断実験

簡便な実験によって定める方法を提案するとともに、溶断速度の定量的予測を実現した手法について述べる。

2. シミュレーション手法

本研究で使用するアルゴリズムは非圧縮性流体の MPS 法 (Moving Particle Semi-implicit) [4], [5] を基に開発されたアルゴリズム[6] をコンクリート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コンクリート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。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 [7], [8], [9] を参考として本研究で用いた値を表 1 に示す。

3. 決定を要するパラメータ

レーザー光の照射によって、レーザー光の一部が吸収されて熱エネルギーに変化し、その他は反射される。レーザー光を光子として扱うことはスケールが物質の粒子と比較して非常に小さなものであるため、材料の挙動を予測する上で膨大な数の光子粒子を導入することは現実的ではない。そこで本研究では仮想的な光粒子を用いて、レーザー加工時にプラズマやブルームが発生しレーザー光が屈折・吸収される現象[10] を踏まえたレーザー照射のモデル化手法を採用した。

光粒子が反射する際のエネルギー変化の様子を図 2 に示す。ここで A : 物質の吸収率, E_i : 光粒子が持つエネルギー量, θ : 入射角である。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 [11] 。

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

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 [11]。

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

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

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。

4. パラメータの同定

パラメータ同定のための供試体は 100 mm × 100 mm ×

表 1: 計算に用いたコンクリートの物性パラメータ

Density [ton/mm ³]	2.41×10 ⁻⁹
Melting point [°C]	1400
Boiling point [°C]	2977
Surface tension [N/mm]	7.5×10 ⁻⁵
Kinematic viscosity (solid) [mm ² /s]	186.61
Heat of melting [mJ/mm ³]	4317.35
Heat of evaporation [mJ/mm ³]	76551.0

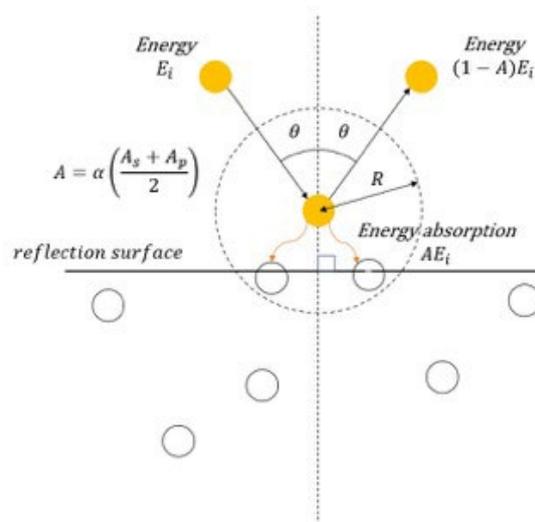


図 2: 仮想的な光粒子によるエネルギー授受モデル

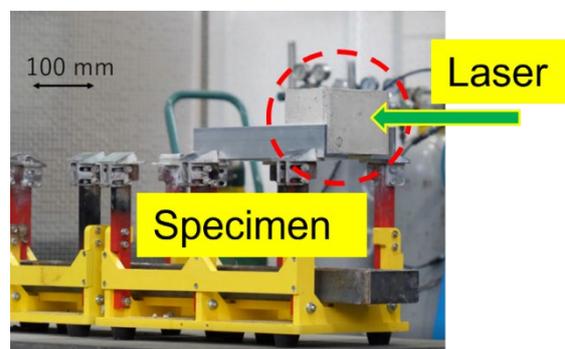


図 3: コンクリート供試体の設置状況



図 4: 照射後 80 フレームの状況

150 mm の直方体形状の無筋コンクリートである。実験では供試体は図 3 に示すように治具の上に設置してレーザを照射した。レーザ照射装置にはさくらい工業株式会社（兵庫県姫路市）が保有する 50 kW 出力ファイバーレーザ加工機を使用した。レーザヘッドは一般的な工業用ロボットアームの先端に取り付けられておりプリセットした方向に動かすことができる。レーザ照射中の様子はデジタルカメラを用いて 59.94 フレーム毎秒(FPS)の動画で記録し、溶断に要した時間は動画をコマ送りで再生し判断する。図 4 はレーザ照射開始から 80 フレーム目の画像、図 5 はレーザ照射開始から 81 フレーム目の様子である。80 フレーム目ではレーザの貫通が確認できていないが、81 フレーム目では図中の赤矢印で示すようにレーザが貫通し溶融したコンクリートが噴出している様子が確認できる。このことからこのフレーム間に貫通が発生したと判断される。動画は 59.94 FPS で撮影されていたため、100 mm 厚のコンクリートの貫通に要した時間は 1.335 秒から 1.351 秒である。したがって、コンクリート溶融速度は 74.02 mm/s から 74.91 mm/s と求められる。

同定が必要なパラメータ α を変化させて粒子法シミュレーションを行った結果を図 6 に示す。シミュレーションで得られた溶融が進行する過程の断面のスナップショットを図 7 に示す。本研究ではコンクリートの融点を 1400 °C と設定しているため、画像中に両矢印で示す箇所はコンクリートが溶融している領域であり、赤の破線で示す領域において粒子の溶融が見られる。

実験で得られた平均的な溶融速度である 74.5 mm/s は、シミュレーションでは $\alpha = 1/200 \sim 1/100$ 程度と対応づけられる結果となり、適切な実験とシミュレーションの比較条件を今後検討することにより、 α をより精度良く同定できると考えられる。

5. おわりに

本研究では、粒子法をレーザによるコンクリート溶断に適用して現象の予測を試みた。レーザの照射におけるエネルギーの授受を仮想的な光粒子を導入することでモデル化し、寄与するパラメータを実験によって同定する手法を示した。初年度では、単一のパラメータによる一般的な現象の再現の可否については未検証であり、また、パラメータを同定するための実験条件についても未検証である。これらを解決した上で、実際の構造物に応じて時間的観点、あるいは、エネルギー量の観点などから最適なレーザ照射条件を決定し、レーザヘッドの動作を自動制御することにより、コンクリート構造物の解体の高度化が実現すると考えている。また、最適化のためのシミュレーションの実施には高速化が不可欠であるため、次年度は並列化計算を進める予定である。

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),

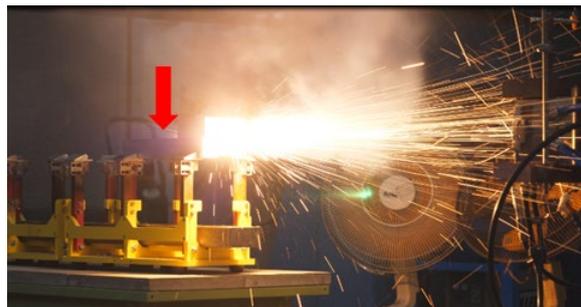


図 5: 照射後 81 フレームの状況

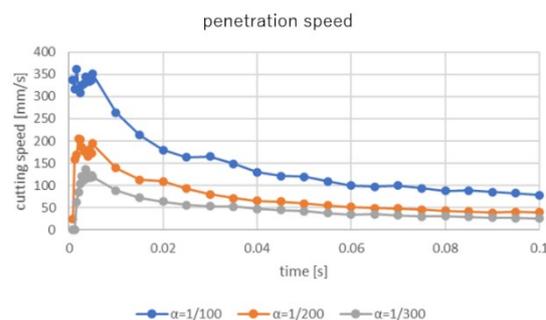


図 6: α を変化させた際の貫通速度の変化

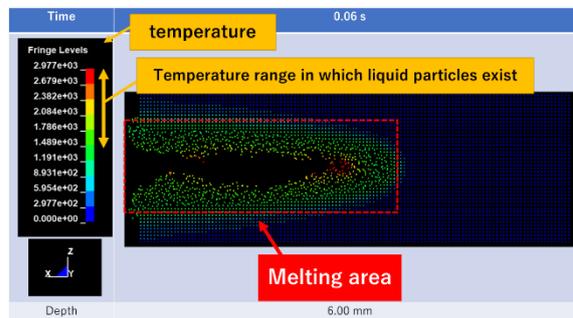


図 7: 溶融シミュレーションのスナップショット

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] S. Koshizuka, "A particle method for incompressible Viscous Flow with Fluid Fragmentation," Computational Fluid Dynamics J.4,

29-46, (1995).

[5] S. Koshizuka, Y. Oka, "Moving-Particle Semi-implicit Method for Fragmentation of Incompressible Fluid," Nuclear Science and Engineering Vol.123 (3), 421-434, (1996).

<https://doi.org/10.13182/NSE96-A24205>

[6] I. Chimura, Y. Kawahito, H. Murakawa, "Clarification of Keyhole Formation in Laser Welding of stainless Steel with Particle Method and X-ray in-situ Observation," Journal of Japan Laser Processing Society, Vol.23 (2), 145-152, (2016).

[7] K. Penttilä, "Molten corium and concrete thermodynamics and viscosity," RESEARCH REPORT VTT-R-01441-12.

[8] MatWeb MATERIAL PROPERTY. DATA, "Corundum, Aluminum Oxide, Alumina, 99.9% Al₂O₃," Available: http://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=c8c56ad547ae4cfabad15977bfb537f1.

[9] Y. Izumi, and S. Iizuka, "Short Note on Measurements of Surface Tension of Some Molten Volcanic Rocks," Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers, (1970).

[10] Y. Miyazaki, and S. Katayama, Power attenuation and focus shift of solid state laser beam caused by laser induced plume, Japan Welding Society Vol.32 (3), 180-190, (2014).

[11] 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).

Optimization of High Power Laser induced Rock Melting Process by Particle Method Simulation

Project Representative

Yosuke Kawahito

Advanced Science-Technology Research Program, Institute for
Extra-cutting-edge Science and Technology Avant-garde Research,
Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Authors

Toshihiro Kameda *¹

*¹Center for Mathematical Science and Advanced Technology, Research Institute for Value-Added-Information Generation, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

In recent years, it has been shown that it is possible to melt and cut rocks and concrete several hundred millimeters thick by using high-power lasers, which have been the subject of remarkable technological progress. Therefore, we attempted to reproduce the melting and cutting phenomena of materials by numerical simulation using the particle method. In addition, to improve practicality, we tried to reduce the number of parameters that need to be identified by experiments. As a result, we proposed a method to identify calculation parameters by a simple experiment, and were able to quantitatively reproduce the melting rate of concrete by a high-power laser in a numerical simulation.

Keywords : Melting process, Particle method, High power laser, Phase transition, Optimization

1. Introduction

In recent years, industrial high power lasers have become popular, and they are used in various fields not only metal processing and welding, but also rock and concrete. Sugita et al.[1] conducted experiments using 5 kW and 20 kW CO₂ lasers to cut various types of concrete and mortar to find parameters such as laser power, cutting speed, focal point, assist gas type and pressure. Juan et al. [2] compared the experimental values of heat transfer when concrete was melted by plasma jet with the theoretical temperature obtained by analyzing the heat conduction inside the concrete. Kureya et al.[3] reported that laser fusion cutting of ultra-thick concrete with a maximum thickness of 1200 mm was possible by using a high-power fiber laser of over 20 kW and ultra-long focal length optics. Based on the results of these previous studies, we conducted our own concrete melting experiments and confirmed melting of concrete of about 1000 mm in thickness by experiments (Fig. 1).

However, it is not practical to experimentally identify the laser irradiation conditions for different structures, because it is expected to be labor intensive and costly. We chose another approach to determine efficient laser irradiation conditions by predicting the phenomena in advance through numerical simulations based on mechanics that reflect the energy received by the concrete material from the laser and the physical properties of the concrete. In this study, we propose a method to determine the parameters that need to be identified for the simulation by a simple experiment, and describe the method that achieves quantitative prediction of the melting rate.

2. Methodology and Parameter Identification

The algorithm used in this study is based on the MPS (Moving Particle Semi-implicit) method [4], [5] for incompressible fluids



Fig. 1: High power laser induced concrete melting experiment

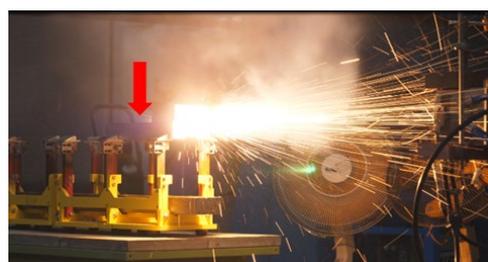


Fig. 2: Snapshot at 81st frame after laser radiation

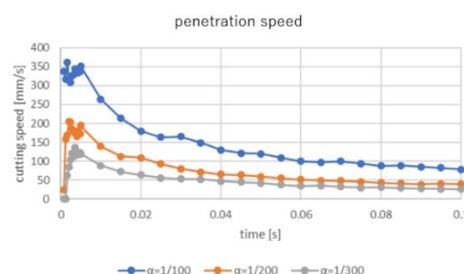


Fig. 3: Results of simulation by changing absorption parameter α

[6], modified to handle concrete materials. Specifically, energy is transferred to the concrete particles by collision using virtual optical particles. By introducing the concept of laser energy absorption rate, the absorption rate parameter can be easily determined by comparing the rate of laser fusion with the simulation results. In order to treat the composite material with the particle method, the physical properties of concrete, which is an average quantity, was used as the physical parameter, and the fluid was assumed to be highly viscous. The values used in this study are based on existing studies on the physical properties of concrete [7], [8]. In numerical calculations, the absorption coefficient is the additive average of A_p and A_s multiplied by the parameter α . This parameter α must be identified experimentally. In this study, α was determined so that the laser melting rate agrees between simulation and experiment.

The specimen used for parameter identification experiment was a 100 mm × 100 mm × 150 mm rectangular piece of unreinforced concrete. In the experiment, the specimen was placed on a jig and irradiated with a laser beam. A 50 kW output Faber laser machine was used as the laser irradiation device. The laser head is attached to the tip of a general industrial robot arm and can be moved in a preset direction. A digital camera was used to record video of the laser irradiation at 59.94 frames per second (FPS), and the time required for fusing was determined by replaying the video frame by frame. 81st frame shows penetration of the laser and molten concrete spurting out as indicated by the red arrow (Fig. 2). Since the video was shot at 59.94 FPS, the time required for penetration of 100 mm thick concrete was 1.335 to 1.351 seconds. Therefore, the concrete melting rate is obtained as 74.02 mm/s to 74.91 mm/s.

Fig. 3 shows the results of the particle method simulation by changing the parameter α , which requires identification. Fig. 4 shows a snapshot of a cross-section of the melting process obtained from the simulation. Since the melting point of concrete is set to 1400 °C in this study, the areas indicated by the double arrows in the image are areas where the concrete is melting, and particle melting can be seen in the area indicated by the red dashed line.

The average melting velocity of 74.5 mm/s obtained experimentally corresponds to $\alpha = 1/200$ - $1/100$ in the simulation, and it is expected that α can be identified more precisely by further investigation of the appropriate comparison conditions between experiment and simulation.

3. Summary and Conclusion

In this study, we attempted to predict the phenomenon by applying the particle method to the melting of concrete by laser irradiation. The energy transfer during laser irradiation is modeled by introducing virtual light particles, and the dominant parameter is identified experimentally. In the first year of the project, the feasibility of reproducing general phenomena with a single parameter has not yet been verified, and the experimental

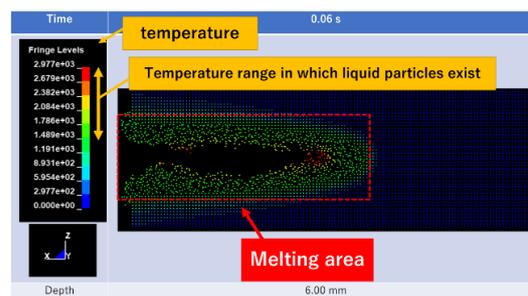


Fig. 4: Snapshot of melting simulation

conditions for identifying the parameters have not yet been investigated. After solving these problems, the optimal laser irradiation conditions will be determined from the viewpoint of time and energy amount according to the actual structure, and the operation of the laser head will be automatically controlled, thereby realizing advanced demolition of concrete structures. In addition, since higher speed is essential for the simulation for optimization, we plan to proceed with parallelized calculations in the next fiscal year.

References

- [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] S. Koshizuka, "A particle method for incompressible Viscous Flow with Fluid Fragmentation," *Computational Fluid Dynamics J.4*,
- [5] S. Koshizuka, Y. Oka, "Moving-Particle Semi-implicit Method for Fragmentation of Incompressible Fluid," *Nuclear Science and Engineering* Vol.123 (3), 421-434, (1996), <https://doi.org/10.13182/NSE96-A24205>
- [6] I. Chimura, Y. Kawahito, H. Murakawa, "Clarification of Keyhole Formation in Laser Welding of stainless Steel with Particle Method and X-ray in-situ Observation," *Journal of Japan Laser Processing Society*, Vol.23 (2), 145-152, (2016).
- [7] K. Penttilä, "Molten corium and concrete thermodynamics and viscosity," *RESEARCH REPORT VTT-R-01441-12*.
- [8] MatWeb MATERIAL PROPERTY. DATA, "Corundum, Aluminum Oxide, Alumina, 99.9% Al₂O₃," Available: http://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguiid=c8c56ad547ae4cfabad15977bfb537f1.