講演概要　高出力レーザを用いたコンクリート溶断技術の鉄道分野への適用

村手　悠人[1]・松井　洋平[2]・亀田　敏弘[3]

[1]学生会員　筑波大学大学院　理工情報生命学術院　システム情報工学研究群　構造エネルギー工学学位プログラム（〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1）
E-mail: s2020880@s.tsukuba.ac.jp

[2]非会員　筑波大学大学院　理工情報生命学術院　システム情報工学研究群　構造エネルギー工学学位プログラム
海洋研究開発機構　横須賀本部（〒237-0061 神奈川県横須賀市夏島町 2-15）
E-mail: yohei.matsui@gmail.com

[3]正会員　筑波大学准教授　システム情報系
（〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1）
E-mail: kameda@kz.tsukuba.ac.jp

鉄道分野では，構造物や施設が都市部や駅構内に存在することが多く，改築や解体撤去工事の際に騒音や粉塵が少ないことが求められるが，バンドソーなどの既存手法では，対策に困難が生じることも多い．筆者らが開発中の高出力レーザを活用することで，数百 mm の厚さのコンクリートを低騒音かつ低粉塵で溶断することができるため，鉄道分野のニーズを満たすことが期待できるが，実用化のためにはレーザ照射の出力，速度，方向などの最適な溶断条件を設定することが必要である．

本研究では，自由表面を持つ材料の大変形を扱うことが可能な粒子法シミュレーションを用いて，高出力レーザによる材料の溶断を定性的に再現することに成功し，実験から計算パラメータを同定することにより，定量的な溶断条件の検討が可能になる見通しを得た．

Key Words: *numerical simuration, laser cutting, concrete, optimization, MPS method*

1.　はじめに

駅の改良工事や線路下横断工等ではその場所の条件に合わせて施工方法を検討しており，その際近隣環境対策を行う必要性がある．特に駅構内などよりも住宅などの近接した箇所での夜間での作業での騒音・粉塵等の対策をしないと苦情の原因となりうる．現状コンクリートを切断する方法としてはウォールソーやワイヤーソーでの施工に限定されており，近隣環境対策として乾式・湿式を場所により使い分けて対応している．

また現状のコンクリート切断技術では騒音・粉塵対策によって弊害が生じてしまう場合がある．例えば上向き作業でのコンクリートはつり作業は周辺への騒音や粉塵対策として足場を防音シートで囲う関係上密閉空間になるため，作業員への粉塵による健康被害の可能性がある．こうした状況から，コンクリートを騒音や粉塵を発生させることなく切断する新しい手法が期待されている．

近年，数 kW から数十 kW の産業用高強度レーザによるコンクリート溶断技術が研究されている[1-4]．コンクリートを切断するための他の手法と比較して，レーザによる溶断ではコンクリートと鉄筋を同一の設備で切断できること，粉塵や騒音が発生せず，水による汚れの拡散がない加工が可能であること，レーザ加工機の先端は小型・軽量 で，かつリモートコントロールが容易であるため，工事作業に適用した場合従来の手法に比べより騒音・粉塵の発生を抑えることが期待できる．

レーザ溶断時の課題として，材料ごとの最適なレーザ溶断条件が未知数であることが挙げられる．レーザ溶断実験の様子を図-1 および図-2 に示す．実験的に同定するにはレーザ溶断条件を細かく変化させながら材料を溶断する必要があり，多大な労力とコストが必要になる．また筆者らが知る限りコンクリート溶断の粒子法シミュレーションに関する研究は存在しない．そこで本研究では粒子法を用いたシミュレーションを行い，材料に最適なレーザ入力パラメーターを算出することを目的とした．

パラメーターを算定する手順としては以下を想定して

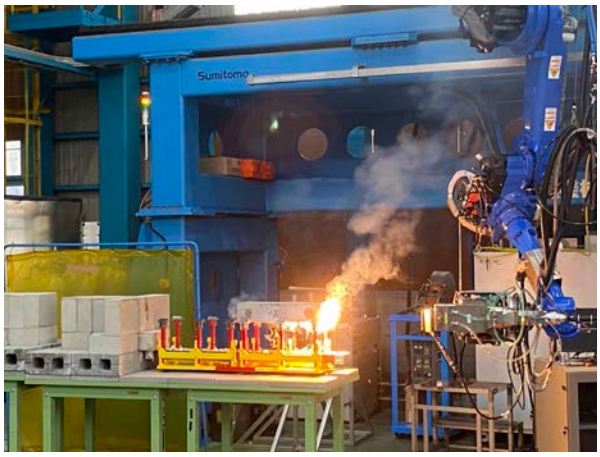

図-1 コンクリート試験片にレーザ光を照射する実験の様子

図-2 レーザ照射後のコンクリート試験片

いる．まずコンクリート溶融の数値的取り扱いを行うためのシミュレーターを構築する．次に，レーザ照射を MPS 法で扱うために仮想の光粒子の導入を行う．そして実験により溶融したコンクリートの物性値を求め，最適なレーザ入力パラメーターを算出する．本論文ではシミュレーターの構築と光粒子の導入について記述する．

2. シミュレーション手法

シミュレーション手法として用いる粒子法 [5]は格子を生成せず，連続体の挙動を粒子の運動によって計算する．各粒子には温度や圧力等のパラメーターの情報が存在している．そのため形状が大きく変動する現象の再現に適しており，本研究が対象としている現象の再現には最適と考え採用した．本研究で使用するアルゴリズムは非圧縮性流体の MPS 法 [6,7]を基に開発されたアルゴリズム [8]を本研究のために改良したものである．

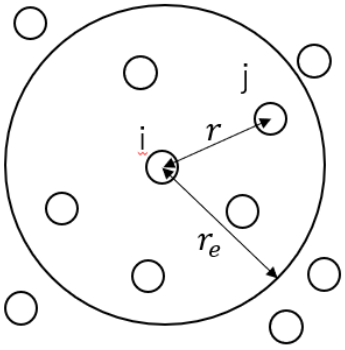

図-3 粒子重みの概念図

シミュレーション中の粒子の支配方程式 [9]は非圧縮性流体の連続の式，ナビエストークス方程式，ならびに伝熱の方程式であり，次の(1)式から(3)式で表される．

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{D\boldsymbol{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla P + \nu\nabla^2\boldsymbol{u} + \boldsymbol{g} + \frac{1}{\rho}\boldsymbol{S} \tag{2}$$

$$\rho c\frac{DT}{Dt} = \lambda\nabla^2 T + Q \tag{3}$$

ここで，ρ：密度，$\boldsymbol{u}$：時間，P：圧力，ν：動粘性係数，$\boldsymbol{g}$：重力加速度，$\boldsymbol{S}$：表面張力，c：比熱容量，T：温度，λ：熱伝導率，Q：入熱量である．また D/Dt はラグランジュ微分を表し，流れに対して流れとともに移動する視点から見た時間微分である．

粒子法では粒子間の相互作用を粒子数密度という概念を用いて表す．その概念図を**図-3** に，式を(4)式として示す．

$$n_i = \sum_{j\neq i} w(|\boldsymbol{r}_j - \boldsymbol{r}_i|) \tag{4}$$

ここで，n_i：粒子iの粒子数密度，$\boldsymbol{r}_j$：粒子 j の位置ベクトル，$\boldsymbol{r}_i$：粒子 i の位置ベクトルである．関数 $w(|\boldsymbol{r}_j - \boldsymbol{r}_i|)$は重み関数を表し，(5)式で表される．

$$w(r) = \begin{cases} \left(\frac{r_e}{r}\right) - 1 \ (r < r_e) \\ 0 \ (r \geq r_e) \end{cases} \tag{5}$$

ここで，$r = |\boldsymbol{r}_j - \boldsymbol{r}_i|$，$r_e$：影響半径で，粒子はこの影響半径内にある粒子からより近い粒子ほど強い影響を受けるよう定義される．本研究では影響半径を，密度の計算では粒子初期距離の 2.1 倍，圧力の計算では 4.0 倍に設定している [5]．

粒子の密度について(6)式で計算する．

$$\rho = \frac{m\sum_j w(|\boldsymbol{r}_j - \boldsymbol{r}_i|)}{\int_\Omega wdv} \tag{6}$$

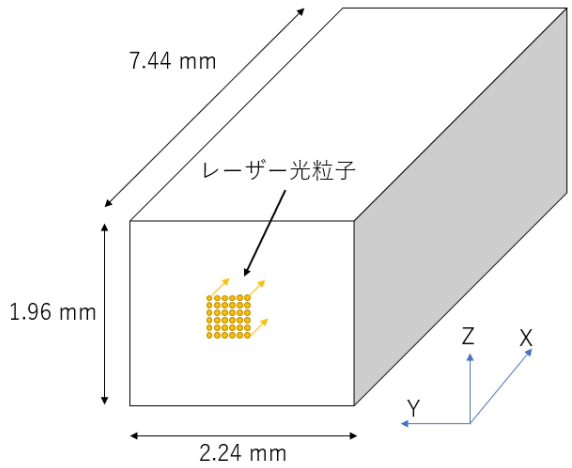

図-4　粒子の初期配置

表-1　粒子の初期配置

X 軸方向粒子数	94
Y 軸方向粒子数	29
Z 軸方向粒子数	20
粒子間隔	0.08 mm
光粒子中心座標	
X 軸方向座標	- 0.40 mm
Y 軸方向座標	1.12 mm
Z 軸方向座標	0.20 mm

ただしm：粒子の質量である．

任意の量Φに対して勾配は以下の(7)式で近似する．

$$\langle \nabla \Phi \rangle_i = \frac{d}{n_0} \sum_{i \neq j} \left[\frac{\Phi_j - \Phi_i}{|\boldsymbol{r}_j - \boldsymbol{r}_i|^2} (\boldsymbol{r}_j - \boldsymbol{r}_i) w(|\boldsymbol{r}_j - \boldsymbol{r}_i|) \right] \quad (7)$$

ここでd：次元数で 3 次元では 3，n^0：初期配置での粒子数密度である．

ラプラシアンは以下の(8)式に示すモデルを用いることで近似する．

$$\langle \nabla^2 \Phi \rangle_i = \frac{2d}{\lambda^0 n^0} \sum_{i \neq j} (\Phi_j - \Phi_i)\, w(|\boldsymbol{r}_j - \boldsymbol{r}_i|) \quad (8)$$

ここで

$$\lambda^0 = \frac{\sum_{j \neq i'} |\boldsymbol{r}_j{}^0 - \boldsymbol{r}_{i'}{}^0|^2 w(|\boldsymbol{r}_j{}^0 - \boldsymbol{r}_{i'}{}^0|)}{\sum_{j \neq i'} w(|\boldsymbol{r}_j{}^0 - \boldsymbol{r}_{i'}{}^0|)} \quad (9)$$

であり，$\boldsymbol{r}_j{}^0$：初期配置での粒子jの位置ベクトル，$\boldsymbol{r}_{i'}{}^0$：初期配置での粒子i'の位置ベクトルである．λ^0は影響半径内にある近傍粒子との距離の 2 乗の重みの平均値を意味しており，式(8)での係数$2d/\lambda^0 n^0$はラプラシアンモデルを拡散方程式に適用した際に，1 タイムステップにおける分散量の増加量を解析解と一致させるための係数である．

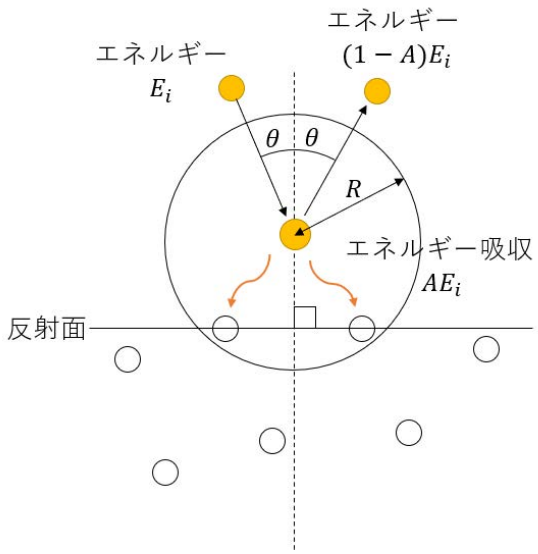

図-5　光粒子が反射する際のエネルギー変化

3.　シミュレーション条件

本研究ではシミュレーション手法に粒子法を用いるため，一般的な粒子法シミュレーションに倣い物体を三次元的に等間隔に配置した粒子として表した．

レーザ光の照射について，レーザー光による入熱は物体に照射された後エネルギーの一部が吸収され反射することを考慮して行われる．レーザー光の波長は物質の粒子配置と比較して非常に小さなものであるため，そのままのスケールでレーザー光の反射現象を正確に再現するためには膨大な数の光子粒子を導入する必要があり，その場合計算負荷が飛躍的に増大しシミュレーションを実施することが困難となる．そこで本研究ではステンレス鋼に対して使用実績のある [6]仮想的な光粒子を用いることでレーザー照射をモデル化する手法を採用した．

粒子の初期配置の様子を**図-4** に，またその詳細を表 1 に示す．光粒子は**図-4** に示すように YZ 平面から X 軸負方向に 0.4 mm 離れた正方形の領域内に 6×6 の合計 36 個配置され，タイムステップ毎に投射され 0.04 mm ずつ x 軸正方向に進行していく．

光粒子が反射する際のエネルギー変化の様子を**図-5** 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．光粒子のエネルギーの合計値はレーザ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．

光粒子は物体粒子が検出半径R以内に出現した段階で物体と衝突したとみなし，物体粒子に熱量を与え反射

表-2　シミュレーション条件

シミュレーション総時間	0.1 s
総タイムステップ	50000
重力加速度(Z 軸負方向)	9800 mm/s^2
融点	1723 K
沸点	3160 K
密度	7.93×10^{-9} ton/mm^3
動粘性係数	0.71 mm^2/s
表面張力	2.37×10^{-7} N/mm
レーザ出力	6 kW

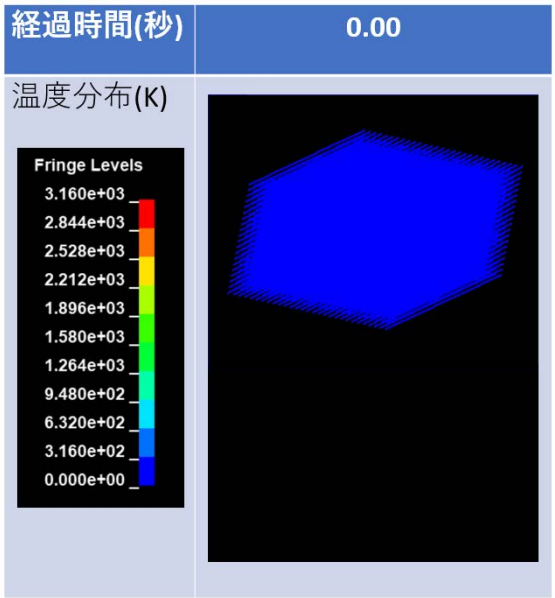

図-6　シミュレーション結果 (0.00 s 後)

面の法線方向について対称に反射する．光粒子は反射時に反射表面の粒子に入射角 θ における吸収エネルギー AE_i を粒子に受け渡す．検出半径 R 内に粒子が複数検出された場合，すべての粒子に均等にエネルギーを受け渡す．反射後光粒子はエネルギー $(1-A)E_i$ を持った状態でさらに反射を繰り返す．

粒子の相変化について，溶融潜熱と気化潜熱を考慮し，粒子が溶融潜熱を得るまでは固相，気化潜熱を得るまでは液相，それ以上の熱量を得た場合は気相と判断した．

シミュレーション条件を表 2 に示す．物性値はシミュレーションが溶融物の落下を再現できるかを確認するため，既に実験との結果の比較が行われているステンレス鋼のパラメーター[6]を採用した．ただし表面張力について，本研究では 3 次元粒子配置の全ての方向に対して非周期境界条件を設定しているため、実験との整合性を図るうえで以下の(9)式に示す無次元量ボンド数 B_O を用いて計算した．

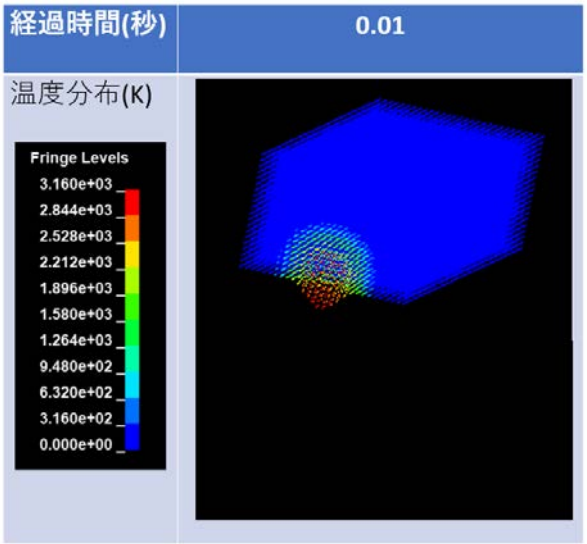

図-7　シミュレーション結果 (0.01 s 後)

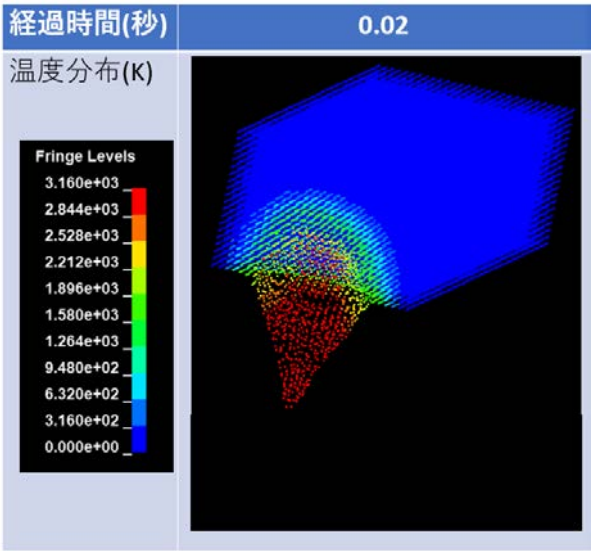

図-8　シミュレーション結果 (0.02 s 後)

$$B_O = \frac{\Delta\rho g L^2}{\sigma} \tag{9}$$

ただし，$\Delta\rho$：密度差，L：代表長さ，σ：表面張力である．

4.　シミュレーション結果

シミュレーションの結果について，粒子温度の変遷の様子をを図-6 から 図-11 として示す．図-6 はシミュレーション開始時刻 0.00 秒後の状況を図示したものであり，全ての粒子が初期温度である 293 K を示している．

図-7 および図-8 について，レーザー光粒子を投射した地点から温度が上昇し溶融した粒子が z 軸負方向に流れ

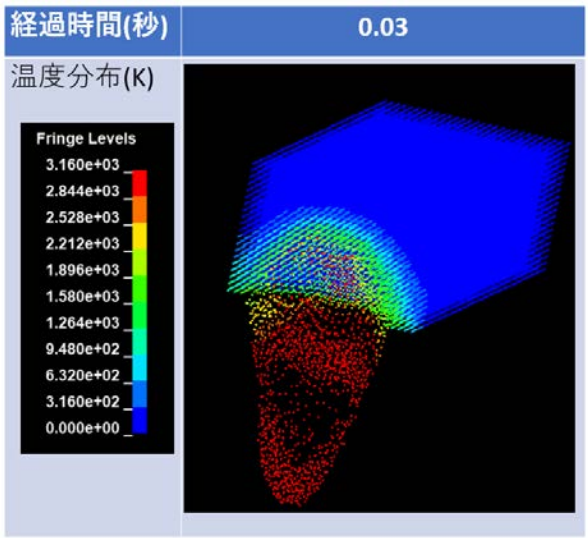

図-9　シミュレーション結果 (0.03 s 後)

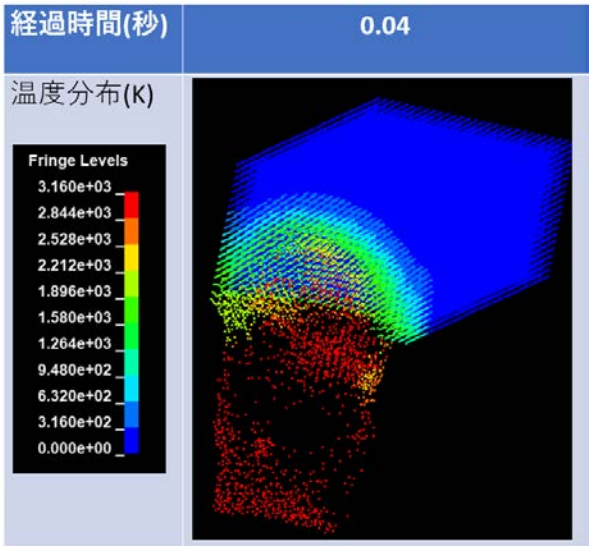

図-10　シミュレーション結果 (0.04 s 後)

出始める様子が確認できる.

図-9 から図-11 について，溶け落ちた粒子が空間中で結集しつつ落下している様子が確認できる．シミュレーション結果より，時間が経過するにつれて光粒子を照射した地点から温度が上昇し，粒子が固相から液相に変化し重力加速度によって落下していく変化の定性的な再現に成功した.

5.　まとめ

粒子法を用いてレーザ光と物質を粒子で再現することにより，高出力レーザによる溶断を定性的に再現することに成功した.

今後の課題として，実験を通し溶融コンクリートの物

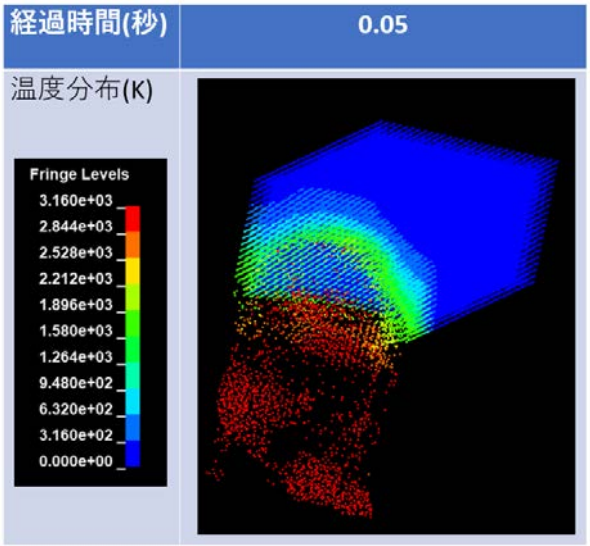

図-11　シミュレーション結果 (0.05 s 後)

性値を求めコンクリートのモデル化を行うこと，レーザの出力，入射角，焦点位置，レーザヘッドの移動速度等を変化させてシミュレーションを行い，コンクリート溶断の最適条件を決定することが挙げられる.

参考文献

1) Youngjin Seo , Dongkyoung Lee ,and Sukhoon Pyo: High-Power Fiber Laser Cutting for 50-mm-Thick Cement-Based Materials, Materials 2020, 13(5), 1113, 2020
2) Juan Camilo Chamorro , Leandro Prevosto and Ezequiel Cejas: Plasma Cutting of Concrete: Heat Propagation and Molten Material Removal From the Kerf, *IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE*, PP(99), pp.1-9, 2019
3) 沓水 昭：レーザー光による解体工法,コンクリート工学 29 巻 7 号, pp.48-52, 1991
4) 杉田和直，森正人，藤岡知夫：レーザのコンクリート切断への適用，コンクリート工学，24 巻，pp.13-22，1986
5) 越塚誠一，柴田和也，室谷浩平：粒子法入門 - 流体シミュレーションの基礎から並列計算と可視化まで, 丸善出版，2014
6) Koshizuka, S., Tamako, H. and Oka, Y.: A Particle Method for Incompressible Viscous Flow with Fluid Fragmentation, Computational Fluid Dynamics J, 4, 1995
7) Koshizuka, S. and Oka, Y.: Moving-Particle Semi-implicit Method for Fragmentation of Incompressible Fluid, Nuclear Science and Engineering 123, 1996
8) 千村伊作，川人洋介，村川英一：粒子法と X 線その場観察を用いたステンレス鋼レーザ溶接時のキーホール形成機構解明，レーザ加工学会誌，Vol23，No.2，2016
9) 越塚誠一：計算力学レクチャーシリーズ⑤粒子法,pp.15-19，丸善出版，2005

(Received April 2, 2021)
(Accepted June 4, 2021)

Application of Concrete Cutting Technology with High Power Laser in Railway Engineering Field

Yuto MURATE,Yohei MATSUI, Toshihiro KAMEDA

In the railway related fields, some structures and facilities are often located in urban areas or inside stations, and it is required to minimize noise and dust during renovation or demolition work. Existing methods, such as the use of band saws, often have difficulties in dealing with this problem. Although it was considered difficult to cut concrete using lasers in the past, the situation is changing recently with widely-used high power laser.

The concrete cutting technology using high-power laser, which is currently under development by the authors, can melt concrete up to several hundred millimeters thick, and is expected to meet the needs of the railway industry from the viewpoint of low noise and low dust.

For practical use, it is necessary to obtain the optimum melting conditions such as power, speed and direction of laser irradiation. In this study, we adopted particle method numerical simulation approach, in order to obtain the knowledge for improving the efficiency, which can handle both solid and liquid simultaneously, and their large deformation with free surface.

As a result, we succeeded in qualitatively reproducing the melting phenomena of high power laser cutting of material, and obtained the prospect that the further quantitative estimation becomes possible by identifying the various parameters through experiments.