

粒子法シミュレーションを用いた高出力レーザと金属との相互作用の可視化

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^{*1}

^{*1} 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，高出力レーザ，光と物質との相互作用，溶融，キーホール

1. 序論

レーザは優れた指向性エネルギーである。この指向性により、レーザは発明されてから現在に至るまで研究開発、産業、娯楽など多くの分野、特に産業界において従来工法と比べ生産性が高く加工精度が良いなどの特性から様々な製造工程で利用されてきた。さらなる生産性の向上やレーザ適用範囲の拡大を目指しレーザの高輝度・大出力化の開発が進められてきており、大出力化に伴いレーザの適用分野は、溶接や切断から、従来の製造法とは異なる付加価値製造（Additive Manufacturing）や極限環境下での使用に耐える部材の加工にまで広がってきている。例えば、大出力化に関しては 10 kW 以上の出力のレーザがすでに開発されている。45 kW CO₂ レーザ、10 kW Nd:YAG レーザ、60 kW ダイオードレーザは、それぞれ 1994 年、1999 年、2022 年に開発され、特に注目されているファイバーレーザは 100 kW 出力が 2009 年に米国で、2022 年に中国で開発された。現在、出力が数 kW 以上の超高出力レーザと呼ばれるレーザが市販されている。このようなレーザの高出力は、MW や GW にまで発展する最近注目の技術トレンドである。

本研究の背景としては、福島第一原発廃炉の安全な非接触の構造物の解体法として、アシストガスを使用しない鉄筋コンクリートの高出力レーザ切断法の開発とともに、その加工プロセスの評価法として、光と物質との相互作用を考慮した粒子法シミュレーションも開発した[1]。具体的には、溶融コンクリートは重力により引き下げられ、貫通孔が形成される。この貫通孔をレーザビームが反射しながら通過し、レーザ照射時間毎に溶融コンクリート内部を溶融させることを数理的に確認できた。溶融体積の実験値 $2.90 \times 10^6 \text{ mm}^3$ と 2000 K 以上になった計算での総量 $1.67 \times 10^6 \text{ mm}^3$ を比較すると、桁が一致しているので、計算値は概ね正しいと考える。

本粒子法シミュレーションの対象物質を鉄筋コンクリートから金属（アルミニウム）に変更し、溶融金属のレーザ照射部に形成される窪み（キーホール）挙動について数理的な検証を実施した。キーホールは、スパッタ等の粉塵の発生原因の一つと考えられ、一方学術的には、Zhao ら[2]や Khairallah ら[3]は、レーザ指向性によって生成される高効率なレーザ吸収現象として焦点が当てられ、キーホール発生の閾値とキーホール起因の欠陥発生メカニズ

ムを明らかにした。これらの結果は Science 誌に掲載され、注目の分野でもある。

2. 計算手法

粒子法では、解析対象を領域分割することなく、計算対象に均等に配置した点の情報に基づき、連続体の力学計算が可能であり、キーホールのような大変化を伴う自由表面の計算に適している。ここでは、レーザ光を表す光粒子を用い、金属の粒子計算の時間ステップ毎にこれらを投射して、表面での多重反射を計算し、エネルギー吸収を与えた。なお、レーザと金属との相互作用は、フレネル吸収に従って、金属母材、溶融池およびキーホール表面に対してレーザの反射を考慮して行われる。金属のレーザ照射時のキーホール挙動について、粒子総数 400 万の規模数値計算を地球シミュレータにて実施した（図 1 参照）。

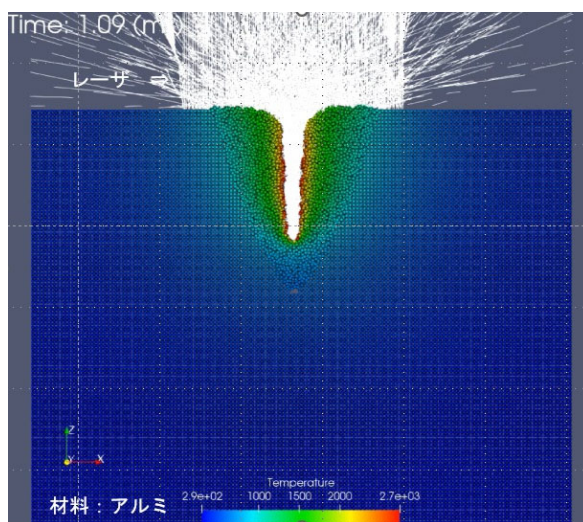


図 1 地球シミュレータによる粒子法大規模計算結果

3. 結果

大型放射光施設 SPring8 を用いたアルミニウム合金のキーホールの X 線透過観察が報告されている[4]。レーザ照射開始から 8 ms の間で観察された画像を図 2 に示す。なお、SPring8 では 1 ms 間隔の撮影が限界であった。8 ms の時間ではキーホール長はほぼ変化しないことがわかった。

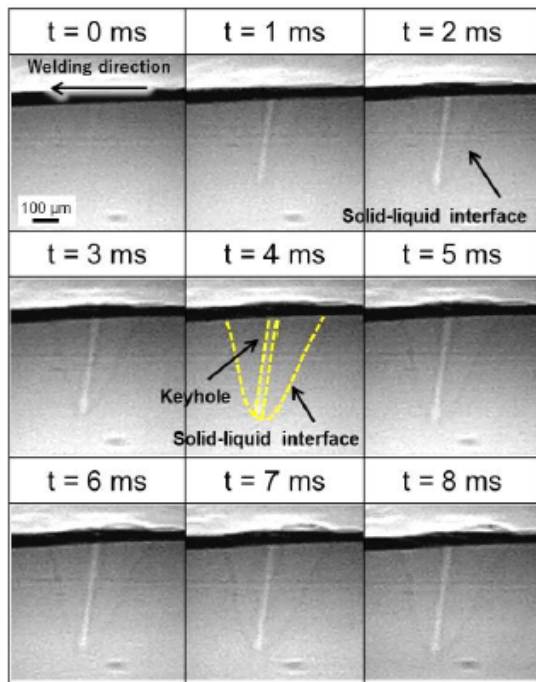


図2 SPring8を用いたAl合金のX線透過観察結果[4]

しかしながら、 10^{-7} s 間隔で計算している本数値計算では、キーホール長は大きく変化する。レーザ照射開始から 2 ms から 2.9 ms の間の 0.1 ms 毎の計算結果を図 3 に示す。この 1 ms の間にキーホール長の振動が 3 回発生していることが分かった。これは、実験結果のキーホールがほぼ一定の長さで変化しないこと矛盾する。その為、計算結果は、実際のキーホール挙動を表していないとの見解もあった。

そこで、この 1 ms 間の 0.01 ms 毎の画像を重ね合わせて平均化した。その結果を図 4 に示す。キーホールは直線的に形成されているように見え、実験結果とも整合することがわかった。これはこれまでにない成果である。

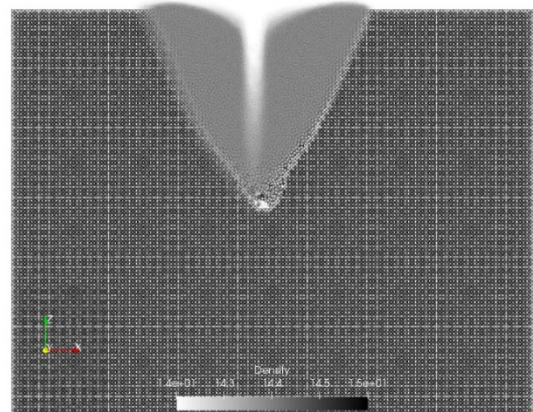


図4 2 ms～3 ms 間の 0.01 ms 毎の画像を平均した結果

4. 結論

先の述べた検討以外にも、金属の蒸発反力と熔融金属の表面張力とのバランスの検討、表面張力の温度依存性の検討、粒子密度の湯流れに及ぼす検討等を行い、本技術が従来法と異なり、スパッタ等の粉塵を大幅に抑制して構造物を切断でき、有効に放射性物質の拡散抑制できる数理的な知見を得た。

文献

- [1] Y. Kawahito, et al., “Ultra high power laser cutting of 1-m reinforced concrete with gravity,” *Optics and Lasers in Engineering* 180, 108258, (2024).
- [2] C. Zhao, N. D. Parab, et al., “Critical instability at moving keyhole tip generates porosity in laser melting,” *Science* (370), 1080, (2020).
- [3] S. A. Khairallah, A. A. Martin, et al., “Controlling interdependent meso-nanosecond dynamics and defect generation in metal 3D printing,” *Science* (368), 660, (2020).
- [4] 千村伊作, “粒子法を用いたレーザ溶接時におけるキーホール形成機構の解明および溶接変形予測”, 大阪大学, 博士論文, (2016).

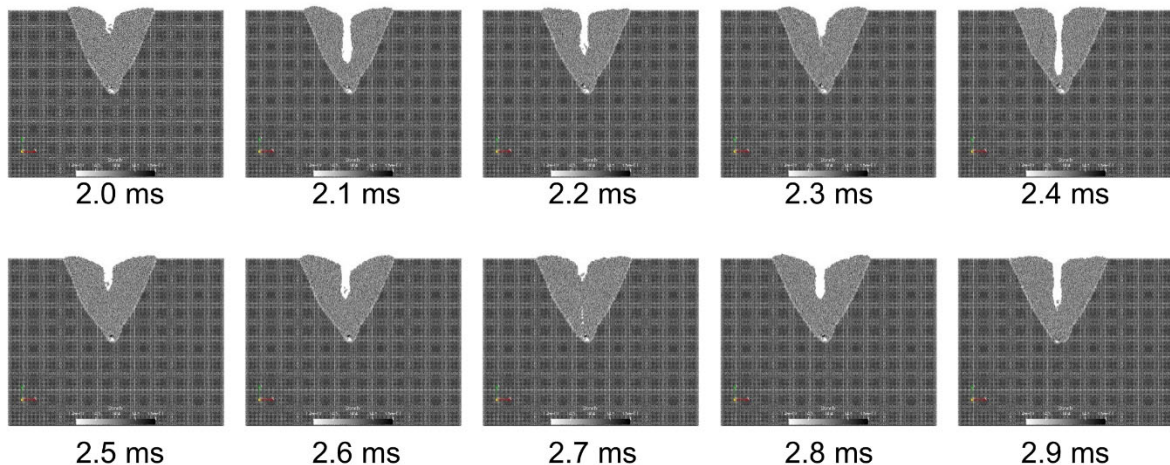


図3 地球シミュレータによるレーザ照射開始から 2 ms から 2.9 ms の間の 0.1 ms 毎のキーホールの計算結果