講座 レーザー生成プラズマの新しい温度,密度領域における物性とシミュレーション

5. レーザー加工のシミュレーション

5. Numerical Simulation of Laser Processing

山田知典,山下 晋,杉原健太,村松壽晴

YAMADA Tomonori, YAMASHITA Susumu, SUGIHARA Kenta and MURAMATSU Toshiharu

(独)日本原子力研究開発機構敦賀本部レーザー共同研究所

(原稿受付:2013年5月21日)

レーザー加工プロセスには、時間、空間スケールの異なる多くの物理機構が存在するため、複雑さや計算の 難しさから、十分に解明されているとは言い難い.本章では、こうしたレーザー加工時の複合物理現象の解明に 向けて開発されてきたシミュレーションモデルを紹介する.さらに、筆者らが開発を行った数値シミュレーショ ンコード (SPLICE)を用いたレーザー溶接・切断の数値シミュレーション結果と、放射光高輝度単色 X 線を用い た高精度実験やレーザーによる厚板鋼材切断試験の結果との比較対比を通じて得られた知見・課題等について紹 介する.

Keywords:

laser welding, laser cutting, one-fluid model, multiphase flow, phase change

5.1 はじめに

原子力発電所をはじめとした原子力施設,放射線取扱施 設等では,作業者の被ばく低減などの観点から,遠隔操作 により安全に作業することが望まれている.レーザーは, 出力密度制御や局所加工性,遠隔操作性に優れるため,一 般産業分野において今後最も期待される技術の一つである が,原子力分野での活用はそれにも増して期待される.本 章ではその中でとりわけ重要なレーザー加工に絞って主と して筆者らの研究開発を紹介する.レーザー加工プロセス には,時間,空間スケールの異なる多くの物理機構が存在 するため,複雑さや計測の難しさから,既往研究だけでは, 十分に解明されているとは言い難い.こうしたレーザー加 工時の複合物理現象の解明に向けた取り組みとして,数値 シミュレーションと,それに連携した高精度実験による レーザー加工技術高度化に向けた取り組みの一端を紹介す る.

5.2 レーザー加工プロセスにおける複雑な物理 現象とその数値シミュレーション

レーザー加工時の溶融・凝固現象のリアルタイム観測の ためX線透過法を用いた材料内部の観察が行われ,内部の 大きな流れ場や,気泡,Keyhole などの可視化には成功し ている[1,2].しかしながら,X線管では単位スペクトル幅 あたりの強度が弱いこともあり,固液(固体と液体の)界 面など密度差の小さい界面の像は明瞭に撮影することはで きない.更に,一般に溶融池内部の詳細な温度分布等の物 理量計測が困難であるため,実験だけで現象を把握するこ とは非常に難しく,測定値との比較対比により実験との対 応可能な数値シミュレーションと合わせた評価が重要となる.次にその一例として,固液界面を扱ったシミュレー ションの例を紹介する.

図1に示すようにレーザーにより溶融が起こり,熱伝導 で溶融領域が周囲に膨張する.溶融池の中では対流が起こ り,それが溶融池の膨張等にも影響を及ぼす.固液界面と はこの溶融池の境界のことで,レーザー加工の基礎的パラ メータとして重要であり,シミュレーションにおいても, その解法がキーポイントとなる.図1に示す溶融池表面は 平らではないが,Wangら[3]は,溶融池表面を平面と仮定 してシミュレーションを行い,対流の渦は界面近傍で生 じ,それが熱伝導や球状の溶融池形成を促すことを明らか にした.しかし,溶融池界面挙動は内部流動場に対し大き な影響を与えると考えられるため,フラットな溶融池界面 は内部流動場の詳細を明らかにするには不十分である.こ れに対し,溶融池界面の変動を考慮した研究もある.Ha



図1 高速度カメラによるレーザー溶接中の溶融池(Molten metal)とビード(Weld bead)形成挙動の撮影結果.

Applied Laser Technology Institute Tsuruga Head Office, Japan Atomic Energy Agency, Tsuruga, FUKUI 914-8585, Japan

Corresopounding author's e-mail: yamada.tomonori41@jaea.go.jp

ら[4]は、界面追跡手法に VOF (Volume of Fluid) 法[5]を 用い、溶融池界面の幅と深さが、界面変動を考慮しない場 合の結果と比較し、界面変動を考慮した場合は溶融時の界 面振動によりわずかに広く深くなることを明らかにした. ここで VOF 法とは、計算セル内での気相と液相の体積比 率により相界面を捕獲する方法であり、これにより各相で の密度や粘性係数などの物性値を定義することができる.

深溶込み溶接の複雑な現象のシミュレーションも行われ ている.Kiら[6,7]は,Level-Set法[8]を用い,溶融池界面 変動,蒸発反跳力,レーザーの多重反射を考慮したKeyhole 生成シミュレーションモデルを開発し,近似のない界 面変動及び Keyhole 挙動の再現に成功した.ここで Keyhole とは,図2に示すようにレーザーを移動しながら深溶 け込み溶接をする際,照射レーザー強度を上げると (10⁶ W/cm² 以上[9]),レーザー照射部にプラズマが発生 し,深く細い穴があいたような状態ができることであり, それを追うように深い溶融池が生じるものである.

野口ら[10]は VOF 法を用いて, Ki らと同様にレーザー の多重反射、材料の蒸発、蒸発反跳力を考慮した熱流体解 析手法を提案し, Keyhole 形成過程における穴壁面の吸収 レーザーパワー分布の変化、溶融金属の流速分布の変化お よび材料の違いによる加工穴形状の違いなどを検討した. これらの研究は、いずれも気液(気体と液体の)界面のみ を対象とした二相流体問題であるため, 溶接母材の溶融・ 凝固やその周囲雰囲気ガスとの相互作用を取り扱うことは できない.また,Level-Set 法を用いた場合には,自由表面 が陰的表現のため, Level-Set 関数の再初期化の過程で非物 理的な体積変動が生じるなど、物理量が保存しないといっ た問題がある. レーザー溶接・切断においては、シールド ガス,アシストガスを用いるため,溶融池界面と周囲雰囲 気ガスとの相互作用を考慮する必要がある.また、溶融・ 凝固過程の再現と、多くのマルチスケール複合現象を内包 するため大規模計算が必須となる.したがって、非常に計 算効率の高い気液固の三相を統一的に扱えるシミュレー ションモデルを構築することが必要となる.

以上の要請を満たすために筆者らの研究では、気液二相 流の数値シミュレーションモデルとして、各相を同一の方 程式系で統一的に解く一流体モデルを採用した.この一流 体モデルに対する離散化として、Xiaoらが提案した有限体



図 2 パワー密度が高い場合に形成される Keyhole 型の深溶込み 溶接の模式図.

積法に基づくマルチモーメント離散化モデルである VSIAM3 [11,12]を用いている.本研究では以下に示す理由により, VSIAM3 を採用した.

- ・他のマルチモーメント数値計算モデルに比べ,計算セル の表面と中心にだけステンシルを配置するため,比較的 計算コストが低い.
- ・有限体積法に基づいているため,質量や運動量などの物 理量が厳密に保存する.
- ・界面追跡スキーム(流体率関数の移流スキーム)に,流体の保存性と界面形状の精度に定評のあるTHINC/WLIC法[13,14]を採用した.この手法では界面の拡散が生じないため,Level-Set法における界面の再構築を必要とせず,かつ流体率が完全に保存する.ここで流体率とは,計算メッシュ内の各相の流体が占める割合である.
- 気液それぞれの相の境界面が大きく変化するような場合
 に直交座標系を用いて複雑な境界面を表すことができる
 ため界面変形による計算格子の再構成の必要がなく、数
 値誤差や数値不安定性を低減することが可能である.

5.3 主要現象のモデリング

5.3.1 支配方程式

レーザー照射により形成される溶融池は流体として取り 扱うことができるため、非圧縮粘性流体を仮定する.支配 方程式は、連続の式、Navier-Stokes 方程式、エネルギー方 程式で記述される.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \tag{1}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial_{\rho}}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (2\mu D_{ij}) + g_i + F_i, \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = \frac{1}{\rho C_v} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \frac{Q}{\rho C_v}, \quad (3)$$

ここで、重複する添え字は特に断らない限り総和規約をと ることとし、 u_i , T, ρ , p, μ , C_v , λ , Q, D_{ij} , $g_i = (0, 0, -g)$, F_i はそれぞれ、速度ベクトル、温度、密度、圧力、粘性係 数、比熱、熱伝導率、熱源、速度歪テンソル、重力加速度、 外力項である.

また,固相・気相・液相といった多相流体を表現するため,VOF法により各種流体を識別している.VOF 関数 ϕ の支配方程式は次式となる.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial (u_i \phi)}{\partial x_i} - \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \qquad (4)$$

式(4)により、 ϕ ($0 \le \phi \le 1$, 1:流体内部, 0:それ以外 の領域)を用いて各計算セルにおける物性値Y(密度, 粘性 係数, 比熱等) は次のように表される.

$$Y(\phi) = Y_S \phi_S + Y_L \phi_L + Y_G (1 - \phi_S - \phi_L), \qquad (5)$$

ここで, 添え字*S*, *L*, *G* はそれぞれ固相, 液相, 気相を表 す.

溶融池界面では、レーザー照射により照射点とその周囲 の温度勾配により、界面の接線方向の応力が駆動力となる

C

Marangoni 対流が生じる (図3). この効果を次式により 考慮した[15,16].

$$F_{i} = \sigma \kappa n_{i} - \frac{\partial \sigma}{\partial T} \left[(I_{ij} - n_{i} n_{j}) \frac{\partial T}{\partial x_{j}} \right], \qquad (6)$$

 n_i は流体界面に垂直な単位法線ベクトル, κ は曲率, σ は表面張力係数, I_{ij} は単位行列であり, n_i , κ はそれぞれ 次のように表される.

$$n_{i} = \frac{\partial \phi / \partial x_{i}}{|\partial / \partial x_{i}|}, \qquad \kappa = -\frac{\partial n_{i}}{\partial x_{i}}, \qquad (7)$$

式(6)右辺第一項は,表面張力の法線方向に関する寄与, 右辺第二項は界面上での表面張力勾配の寄与である (Marangoni stress).

5.3.2 相変化モデル

液相線,固相線の決定には温度回復法[17]を用いる (図4).この手法により相変化量の経時変化が推算でき, この体積変化量を本手法では流体率変化として直接的に取 り扱う.固体から液体への潜熱放出量は次式で定義する.

$$Q_S = \rho \varDelta V \varDelta g L, \qquad (8)$$

ここで, *ΔV* は計算セル体積, *Δg* は固相 (液相) 率の変化, *L* は融解(凝固) 潜熱である.

計算手順

- ① 相変化のない場合の温度分布を求める.
- ② 1単位時間ステップ内での液相線温度 T_L からの温度 降下 ($\Delta T = T_L - T$)を求める.
- ③ $\Delta T > 0$ ならば物質は凝固し、物質の温度は液相線温度 T_L へ回復する.従って、

$$Q_S = \rho C_p \Delta V \Delta T, \qquad (9)$$

④ 最終的に,物質率の変化量 *Δg* が得られる.



$$\Delta g = C_p \, \Delta T / L \,, \tag{10}$$

⑤ 本手法では相変化量 Δg が流体率変化量 Δφ と同等とし、流体率へ加える.

$$\phi = \phi \pm \varDelta \phi \,. \tag{11}$$

5.3.3 固相表現方法

固相に関しては、Hirtらによって提案された FAVOR (Fractional Area Volume Obstacle Representation) 法 [18,19]により表現する.体積占有率および面積開口率を それぞれ A, A_x, A_y, A_z とし, $A = 1 - \phi_S$ とする. これに より固体の外部は1であるから通常の計算が行われ,内部 では0であるから固体として扱われる.

以上より,固相にレーザー等による熱源が加わり融点を 超え相変化が起きる時,温度回復法により液相率が時々 刻々増加し,その分だけ固相率が減少する.毎ステップ $A = 1 - \phi_S$ を定義しなおせば固液界面の時間変化が追跡で きる.ここで,固相率とは,計算メッシュ内の各相の固体 が占める割合である.

5.3.4 レーザー入熱モデル

レーザー照射による物質中への入熱モデルとしては、次 式に示すBouguer-Lambert-Beer法則[20]が知られている.

$$q(x, y, z, t) = (1 - R)q_0(x, y, t)\exp(-\alpha z),$$
(12)

従って,式(3)右辺第二項のQは次式となる.

$$Q = -\frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}z} = -(1-R)q_0\alpha\,\exp\left(-\alpha z\right),\tag{13}$$

ここで R, a は波長依存の反射率および吸収係数を表す. また,それらはレーザー照射による入熱,相変化,化学反応により変化する.入射光強度は空間関数 f(x,y) (本研究では母材表面上での入熱プロファイルを表す)および時間関数 g(t) の積: $q_0 = q_m f(x,y)g(t)$ で表される.本研究では,時間関数 g(t) は一定とし,空間関数 f(x,y) は,(14)式で表されるガウス分布を用いた. $R \ge a$ は物質とその相を特定し,温度を限定するとデータとして与えられる定数であるが,実際はレーザーと被照射物質の時々刻々と変化する相互作用により,相が複雑に変化し,それに対応して入熱が決まる複合的な複雑な現象である.そこで,本研究では、5.4節に示す実験結果に合致するように反射率 R,吸収係数 a を人為的に選んでいる.レーザーと被照射物との相互作用の物理的詳細は課題となっている.

$$f(x, y) = \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{r_0^2}\right),$$
(14)

ここで, r_0 および q_m はそれぞれレーザー照射半径,レーザー出力密度 $[W/m^2]$ である.

5.4 溶接・切断のシミュレーションと実験結果

図5に大型放射光施設SPring-8の高輝度単色X線を用いた吸収コントラストイメージング法により観測されたアルミニウム合金中の溶融池内流動場の実験配置を示す.単色

で超高強度であることから溶融池境界がリアルタイムで鮮 明に撮影できるのが特徴である.図6に実験結果を示す. 図中の時間は、レーザー照射開始時をt=0としている.試 験片表面には、トレーサー粒子(炭化タンタル)を散布し、 出力260Wでレーザーを照射した.トレーサー粒子は、溶 融池内対流により中心から斜め下方向に移動した後、再び 中心付近で上昇している様子が確認された.また、レー ザーを照射し続けると、溶融金属内部で気泡が発生した. 気泡は、対流や浮力により溶融池内部を移動したが、凝固 速度が非常に速いため、試験片内部に閉じ込められ、溶接 欠陥となった.

図7に、図6と同等の条件でのSPLICE (residual Stress control using Phenomenological modeling for Laser welding repair process In Computational Environment) コードによ る数値シミュレーション結果を示す. レーザー入熱により 母材が溶融し溶融池が形成された. 矢印は流体の速度の方 向と大きさを示し、等高線表示は温度分布を示す. 図中の 速度分布より、気液界面の中央へのレーザー入熱により母 材が溶融し、溶融池が形成され、Marangoni効果によって、 その加熱された部分から界面の接線方向に沿うように固相 界面への流れが生じていることがわかる.これは、固液界 面での温度差に起因するものであり, 固液界面近傍で最大 となった. また, 溶融池内には, 固液界面に衝突して生じ る強い渦と、溶融池中心で生じる比較的弱い渦の2つの渦 が形成された.図6の対流挙動とは若干異なるが、実験で はトレーサー粒子を母材表面に散布しているため、その溶 融にレーザーのエネルギーが消費され、その残りがアルミ ニウムの溶融に寄与することになっているのも異なった現 象が生じている原因の一つと推測される.多様なパラメー タでの比較対比が望まれる.

このようにして金属の溶融・凝固過程を実験とシミュ レーション結果とを比較対比しつつ計算コードの精度を高 めている.次にこのコードをレーザーによる厚板金属切断 に適用した例を紹介する.レーザー厚板切断とは、レー ザー光と同軸方向に強いガス流を発生させ、そのガス流で レーザー照射により生じた溶融金属を吹き飛ばしながら高 速で切断する手法である.図8にレーザー切断の数値シ ミュレーション結果を示す.温度分布の等高線に、固体金 属表面,溶融金属表面,流体の速度ベクトルを重ねて表示



図5 試験片にレーザー照射した際に形成する溶融池と単色 X 線 による観察.



図6 高輝度単色 X 線を用いた吸収コントラストイメージング法による溶融池内観測[21,22].撮影の時間分解能を考慮し、材料表面で変化が起こった瞬間をレーザー照射開始(t=0)と仮定した.ここでレーザー照射時間は10秒である.(a)~(f)は照射開始から1.43秒,3.08秒,5.29秒,5.35秒,10.41秒,10.53秒後の像である.(e)~(f)は加熱時間10秒後の凝固過程を示しており、レーザー照射中に発生した気泡(Bubbles)が試験片内部に閉じ込められ、溶接欠陥(Weld Defect)となった.







図8 厚板のレーザー切断シミュレーション[25,26]. 最上段が 切断配置図. (A),(B)はそれぞれ順調な切断,切断残り の生じた切断過程を示す. ピアシングホール(Piercing hole)の一端に照射されたレーザーが切断方向(Cutting direction)に移動することにより,溶融が生じ,その溶融 物をガスにより除去しつつ切断は進行する.ここで切断対 象物の物性値として純鉄の溶融金属流体物性データを使 用.

している. レーザー加工ヘッドの移動速度 V。(切断速 度)およびアシストガス Ug 速度は下記のように設定した. ・ケースA: $V_S = 200 [\text{mm/min}], U_g = 10 [\text{m/sec}].$ ・ケースB: $V_S = 300 [\text{mm/min}], U_g = 10 [\text{m/sec}].$ ケース A では、切断速度が遅いため、レーザー入熱は板裏 部分へ直ちに伝熱される.入熱により溶融した金属は、ア シストガスにより直ちに外部に排除され、新たに露出した 固相表面にレーザー入熱されるという過程を経て切断フロ ントが形成された.しかしながら、ケースBのように切断 速度が極端に速くなると, 切断開始点の板裏部分への伝熱 遅れが生じ、融点に達しないため固相のまま残存する.こ の固相は、溶融金属の排出を妨げるため、レーザー照射直 下に溶融金属が留まることになり、板裏への貫通が遅延す る.一度貫通してしまえば、固体金属は残熱の影響で溶け やすくなるため、ほぼ定常的に切断フロントが形成される が、伝熱遅れにより固相のまま残存した金属は切断残りと なる.このような切断残りが生じることは、実際のレー ザー切断試験でも確認されている (図9).

この切断バージョンのシミュレーションコードを用い て、レーザーパワー、切断厚さ、切断スピードの関係を実 験結果のそれらと比較する試みも行っており、切断スピー ドが比較的速い領域での両者の一致が得られている.その 一方で切断スピードの遅い領域でのシミュレーションの課 題も浮かび上がってきている[27].このシミュレーション により、所定の厚さの鋼材等の切断に必要なレーザーパ ワー、切断スピード等が一定の信頼性のもと予測できる可 能性があり、課題を明確にしつつ、着実に開発を進め整備 していく所存である.

5.5 おわりに

数値シミュレーションを利用することにより,実験計測 だけでは困難なレーザー溶接・切断中の金属内部の現象を 再現でき,実験結果との比較・検討により,現象の定量評 価が可能となる.また,近年は高出力ファイバーレーザー



図 9 レーザー切断後の試験片表面(レーザー照射面)および裏面[25,26].切断速度が速いため、裏面に切断残り(Failure in cutting と矢印で示した部分)が生じた.

の開発により、それらを導入した厚板の溶接・切断などの 試験が活発に行われているが[28]、数値シミュレーション の利用は、目的とする厚みに対し必要となる出力の選定に 役立つとともに、溶接・切断の可否を決定する一つの指標 となる.現状では、実験とシミュレーションにより典型的 な現象に対して定性的な解釈が可能になったことが成果と して確認できる.今後物理モデルの高度化、関連する物性 値のデータベース化を進めることにより、汎用性の高い、 実際のレーザー加工に対しても役立つシミュレーション コードの開発をめざしたい.

参考文献

- [1] 木下圭介 他:溶接学会論文集 25,18 (2007).
- [2] Y. Arata et al., Trans. JWRI 14-2, 17 (1985).
- [3] H. Wang et al., J. Phys. D: Appl. Phys 39, 4722 (2006).
- [4] E.J. Ha and W.S. Kim, Int. J. Heat and Fluid Flow **26**, 613 (2005).
- [5] D.B. Kothe *et al.*, AIAA paper **96**, 0859 (1996).
- [6] H. Ki et al., Metall. Mater. Trans. A 33A, 1817 (2002).
- [7] H. Ki et al., Metall. Mater. Trans. A 33A, 1831 (2002).
- [8] M. Sussman, J. Comp. Phys. 114, 146 (1994).
- [9] S. Fufinaga *et al.*, J. Phys. D, 33, 492 (2000)
- [10] 野口 暁 他:レーザ加工学会誌 14,113 (2007).
- [11] F. Xiao, J. Comp. Phys. 195, 629 (2004).
- [12] F. Xiao, J. Comp. Phys. 213, 31(2006).
- [13] F. Xiao, Int. J. Numer. Meth. Fluids 48, 1023 (2005).
- [14] K. Yokoi, J. Comp. Phys. 226, 1985 (2007).
- [15] M. Lappa, CMC 2, 51 (2005).
- [16] H. Haj-Hariri and Q. Shi, Phys. Fluids 9, 845 (1997).
- [17] 大中逸雄:コンピュータ伝熱・凝固解析入門鋳造プロ セスへの応用(丸善株式会社).
- [18] C.W. Hirt, J. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 46-47, 327 (1993).
- [19] 森川泰成:日本建築学会学術講演梗概集D環境工学, 497 (1992).
- [20] E.N. Sobol, Phase Transformations and Ablation in Laser-Treated Solids (A Wiley-interscience publication, Hoboken, New Jersey, 1995).
- [21] T. Yamada et al., Proc. Visual-JW2012, JWP-33, 67 (2012).
- [22] T. Yamada et al., JLMN, 7, 244 (2012).
- [23] S. Yamashita et al., Q. J. Jpn. Weld. Soc., 29, 48s (2011).
- [24] 山下 晋他:第25回数値流体力学シンポジウム, C08-2, (2011).
- [25] K. Sugihara et al., Proc. 20th Int. Conf. Nucl. Eng., ICONE 20-54185, (2012).
- [26] 杉原健太 他:第25回数値流体力学シンポジウム, C08-1, (2012).
- [27] 杉原健太他:原子力学会2013年春の年会講演予稿集, A01,1 (2013).
- [28] 例えば,大道博行他:第77回レーザ加工学会講演論文 集,9(2012).



やま だ とも のり

2010年3月大阪大学大学院 工学研究科 マ テリアル生産科学専攻 博士後期課程修了 (博士(工学)). 2010年4月より日本原子 力研究開発機構敦賀本部レーザー共同研究

所,博士研究員. 2013年4月より日本原子力研究開発機構敦 賀本部レーザー共同研究所,任期付研究員.現在に至る.主 な研究分野は材料工学.



が原健太

2011年3月東京工業大学大学院理工学研究 科原子核工学専攻博士課程修了,博士(工 学). 2011年4月より日本原子力研究開発 機構敦賀本部レーザー共同研究所,博士研

究員. 2013年5月より現在, ライス大学研究員. 主な研究分 野:数值流体力学, HPC, GPU 計算, 気液二相流, 流体構造 練成解析.



やま した すすむ 一型

日本原子力研究開発機構原子力基礎工学研 究部門熱流動研究グループ研究員.東京工 業大学大学院総合理工学研究科博士後期課 程修了(博士(工学)).専門は数値流体力 学.現在はシビアアクシデント時における炉内状況の数値流

体力学的研究に従事.