

レーザーコーティングプロセスの計算科学 シミュレーションと加工条件の導出

Computational Science Simulation of laser Materials Processing and Provision of Their Irradiation Conditions

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
敦賀事業本部 敦賀連携推進センター
レーザー共同研究所
村松 壽晴

レーザー加工において、意図した性能や製品を実現するためには、ここで発生する溶融・凝固現象などを含む複合物理過程を把握した上で、レーザー照射条件などを適切に設定する必要がある。しかし、この条件適切化作業は、繰返しによる膨大なオーバーヘッドを伴うのが一般的であり、多品種少量生産などを指向する産業分野へのレーザー加工技術の導入を阻害する一因ともなっている。日本原子力研究開発機構では、加工材料にレーザー光が照射されてから加工が完了するまでの複合物理過程を定量的に取扱えるようにするため、マイクロ挙動とマクロ挙動とを多階層スケールモデルにより接続した計算科学シミュレーションコードSPLICEを開発中である。このSPLICEコードをレーザーコーティングプロセスに適用し、設計空間の可視化、レーザー照射条件の設定などを通じて、コーティングプロセスに係わるオーバーヘッドを効果的に低減させることが可能であることを確認した。

1. はじめに

昨今のレーザー加工技術に関する展示会などからも分かるように、高エネルギー密度と局所加工性など、優れた熱源としてのレーザー光の特性を背景として、多くの産業分野において様々な材料加工がレーザーを用いて行われている状況にある。更には、福島第一原子力発電所の燃料デブリ取出しへのレーザー加工技術の適用性評価なども、基礎・基盤的な観点から進められている [1] [2]。

他方、レーザー加工において、意図した性能や製品を実現するためには、ここで発生す

る溶融・凝固現象などを含む複合物理過程を把握した上で、レーザー照射条件などを適切に設定する必要がある。しかしながら、この条件適切化作業は、繰返しによる膨大なオーバーヘッドを伴うのが一般的であり、多品種少量生産などを指向する産業分野へのレーザー加工技術の導入を阻害する一因ともなっている(図1)。このような課題を解決するためには、製品などを作り込む上で必要となる諸情報、すなわち、設計空間の構造、設計空間における現設計点位置、設計変数間のトレードオフ情報、設計空間のクリフエッジ、設計

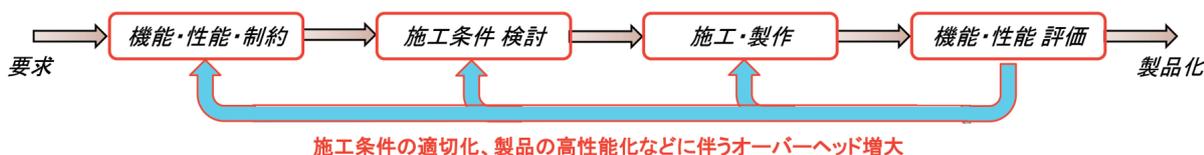


図1 設計・製造過程での繰返し作業に伴うオーバーヘッド

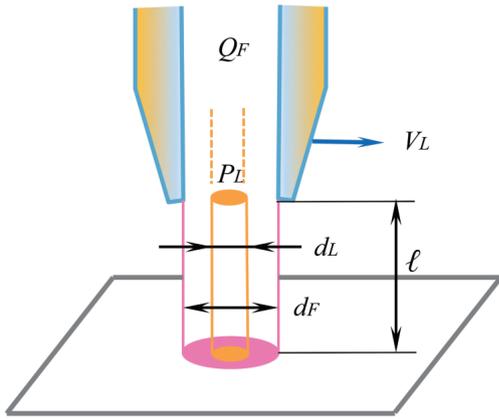


図3 SPLICEコードにおける金属粉エネルギー授受モデル

$$\Delta T \equiv \frac{D_E}{(d_L/2)^2 \ell \pi \gamma_V Q_F \tau \rho C_p} \quad (1)$$

ここで、 D_E : エネルギー密度 (J/mm^3)、 d_L : レーザー光径 (mm)、 ℓ : スタンドオフ (mm)、 γ_V : 金属粉体積割合 (-)、 Q_F : 金属粉供給率 (g/s)、 τ : 金属粉飛行時間 (s; $\equiv \ell/Vg$)、 Vg : ガス流速 (mm/s)、 ρ : 金属粉密度 (g/mm^3)、 C_p : 金属粉比熱 ($J/g \cdot ^\circ C$) である。

3.2 解析結果

図4は、金属粉エネルギー授受モデルの有無による結果への影響を、Case-4を対象として比較したものである。結果より分かる通り、当該効果が無い場合にはレーザー光からのエネルギーの全てが母材金属に吸収され、大きな溶け込み深さを持つ溶融池が形成されている。他方、当該効果を考慮した場合には、レーザー光からの一部が母材到達前に金属粉に供給され、結果として母材自体の溶融範囲が低下する。

Case-1～Case-4について、温度分布および溶け込み・コーティング膜厚の空間分布を図5および図6に比較する。これら全ての結果は、金属粉エネルギー授受効果を考慮したものである。結果より分かる通り、レーザー出力が大きく、金属粉供給量の小さなCase-1では、母材溶け込み深さが顕著なものとなっている。他方、レーザー出力を抑え、金属粉供給量を増やしたCase-3およびCase-4では、溶け込み深さが小さく且つ薄いコーティング膜厚が実現できている。

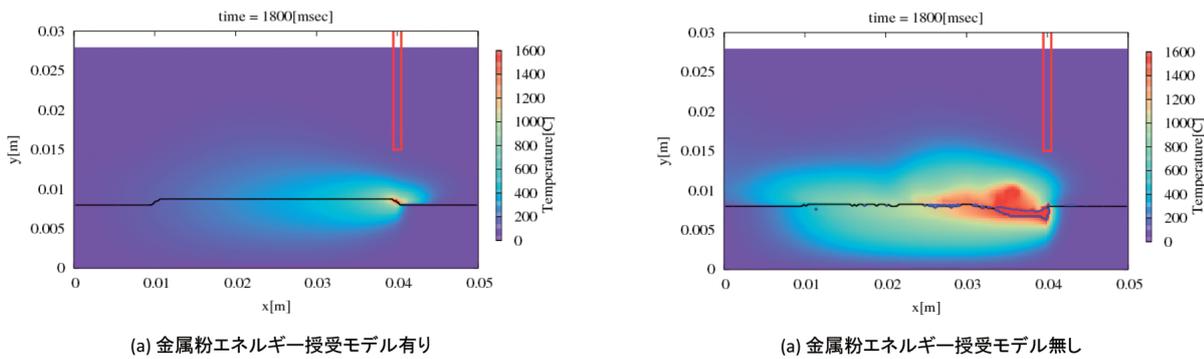


図4 金属粉授受モデルの有無によるレーザーコーティングプロセス評価結果の差異 (Case-4)

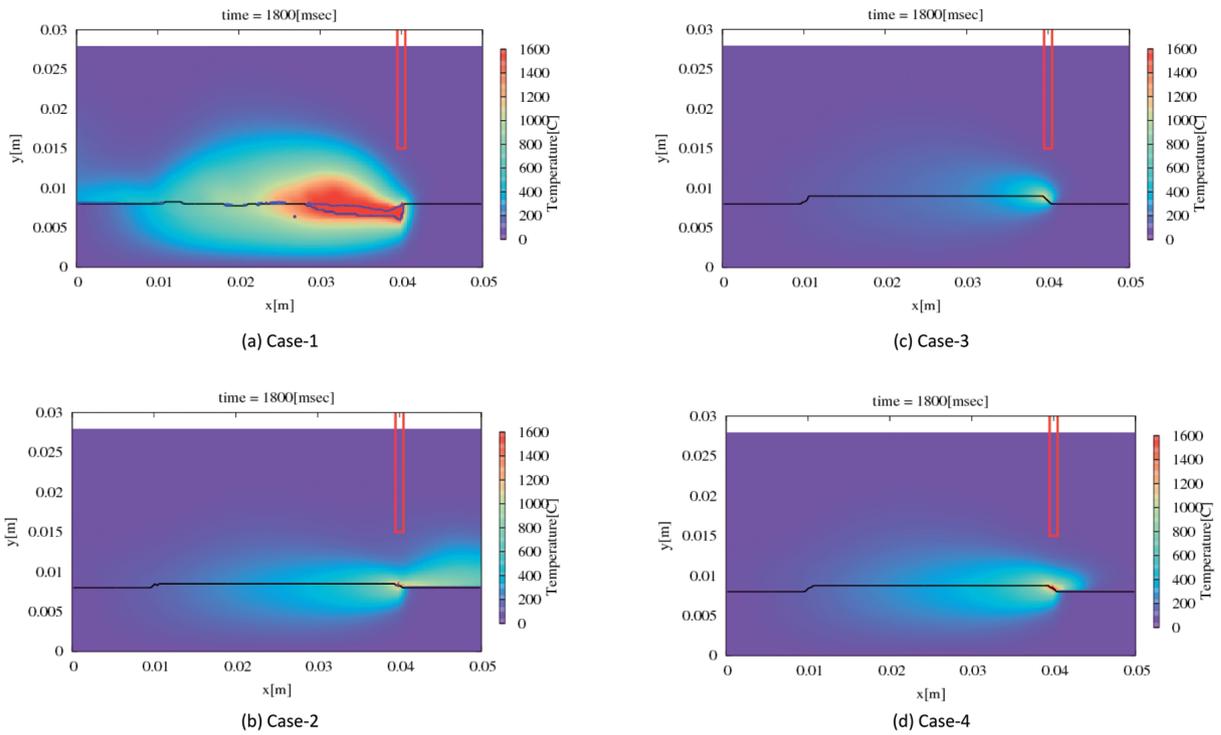


図5 レーザーコーティングパラメータ変化による空間温度分布評価結果の差異

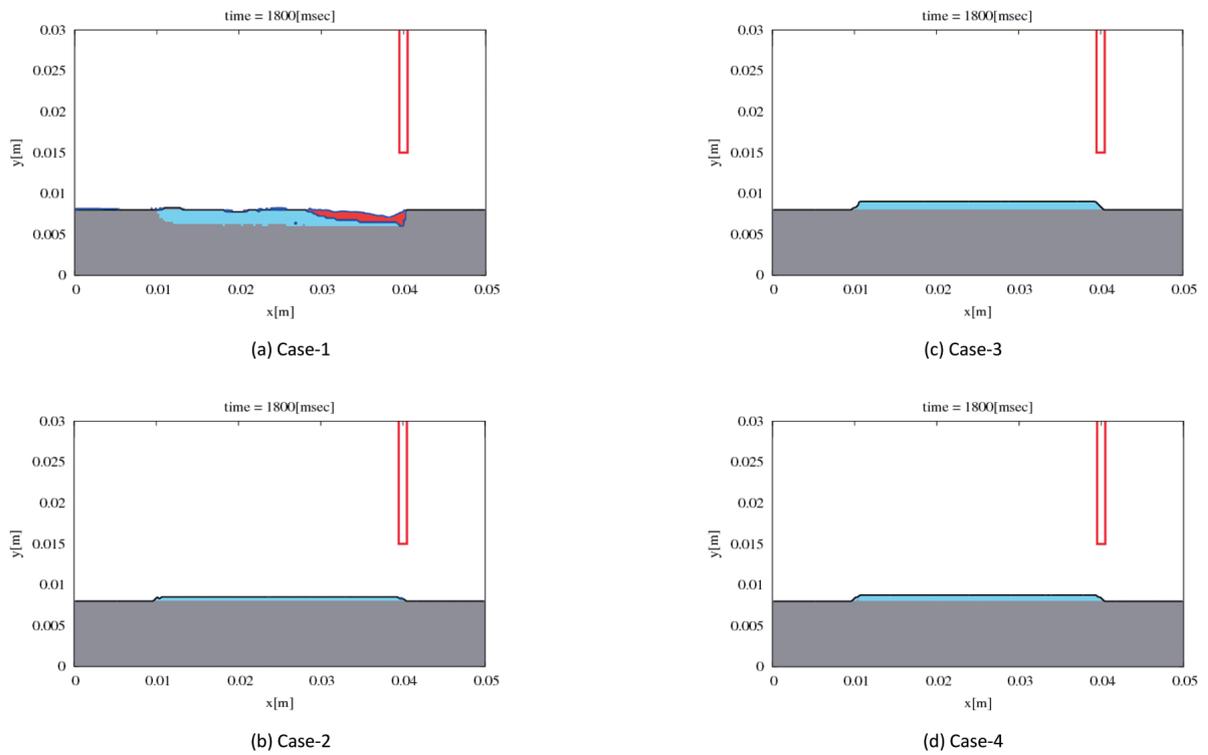


図6 レーザーコーティングパラメータ変化による溶け込み深さおよびコーティング膜厚評価結果の差異

4. フロントローディングを目指したデジタルモックアップ装置としてのSPLICEコードの活用

要求仕様を満足するレーザーコーティング製品を実現するためには、多くの試作を通じてレーザー照射条件などを規定するための膨大なオーバーヘッドを伴う繰返し作業が必要となる。このような問題に対し、SPLICEコードを用いたフロントローディングにより解決できれば、産業分野へのレーザー加工技術の導入が更に加速されると予想できる。

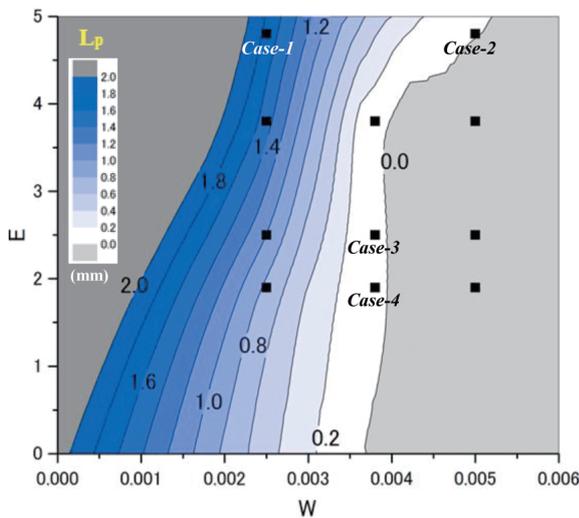
レーザーコーティングプロセスに影響を与えるパラメータを、単位面積当りの母材への入熱量Eと金属粉供給量Wとして整理し(式2および3)、EとWから成る設計空間(2.0 ≤ E ≤ 4.8, 0.0025 ≤ W ≤ 0.005)内で計7ケースのSPLICE追加解析を行った。

$$E \equiv \frac{P_L}{(d_L/2)^2 \pi} \frac{d_L}{V_L} = \frac{4 P_L}{d_L \pi V_L} \quad (2)$$

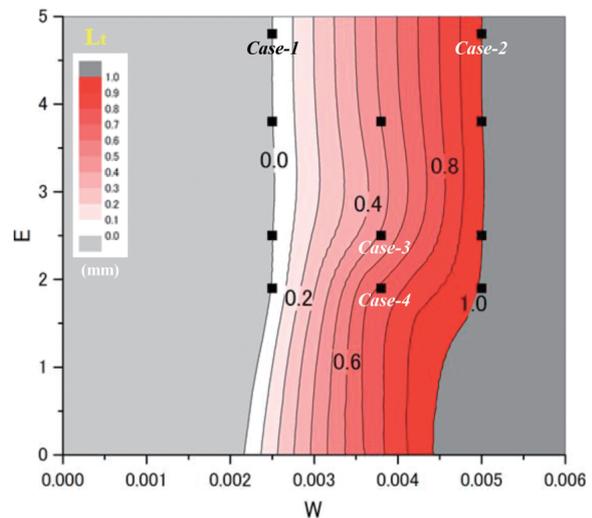
$$W \equiv \frac{Q_F}{(d_F/2)^2 \pi} \frac{d_F}{V_L} = \frac{4 Q_F}{d_F \pi V_L} \quad (3)$$

ここで、P_L:レーザー出力(W)、V_L:スウィープ速度(mm/min)である。

図7は、溶け込み深さ(L_p)とコーティング膜厚(L_t)について応答曲面表示した結果である。溶け込み深さと膜厚とを共に小さくしたコーティング製品を目指す場合、設計空間の中央領域近傍に条件設定のスイートポイントが存在すると言える。このような設計空間特性の把握を実験的手法のみで行おうとした場合、施工現場での試験片製作、試験片切断、試験片検査などの1~2ヶ月に亘る膨大な繰返し作業が、母材と金属粉との組合せ毎に求められる。他方、SPLICEコードによる設計空間の可視化は、この膨大なオーバーヘッドの2割程度への大幅な低減が可能であり、デジタルモックアップ装置としての計算科学シミュレーションコードを利用したフロントローディングが実現可能であることを示唆している。



(a) 溶け込み深さ L_p についての応答曲面



(a) コーティング膜厚 L_t についての応答曲面

図7 単位面積当りの母材への入熱量Eと金属粉供給量Wに対する応答曲面

5. 戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)

〔4〕でのSPLICEコードの利用

内閣府が推進するSIPの内、革新的設計生産技術のカテゴリーに、大阪大学と共同で提案した「高付加価値設計・生産を実現するレーザーコーティング技術の研究開発」が昨年11月に採択され、研究開発活動が本格化している状況にある。本研究開発は、次世代工業部品や製品製造のための高強度化、長寿命化、軽量化、低コスト化、省エネルギー化に向けた高付加価値設計を実現するため、高機能、高品質、難加工材料の次世代レーザーコーティングの基礎技術を確立し、レーザーコーティング装置の完成に結びつけようとするものである。日本原子力研究開発機構は、これを実現するためのレーザー入熱制御技術開発として、SPLICEコードおよび大型放射光施設SPring-8を利用して、レーザーコーティングメカニズムの解明とその適切化を行い、これを新基盤技術として装置設計側に情報提供する役割を担っている。

更に、新たに開発されるレーザーコーティング装置の市場展開フェーズでは、これを利用する場合のオーバーヘッドを効果的に低減させるためのフロントローディングツールとして、SPLICEコードを市場公開する計画となっている。

6. まとめ

レーザー加工プロセス計算科学シミュレーションコードSPLICEによって設計空間を可視化し、レーザー照射条件などの設定の伴うオーバーヘッドを低減させることが可能で、フロントローディングのためのツールとして有効であるとの見通しを得た。なお同手法は、溶接・溶断プロセスに対しても有効であることを確認している。

7. 参考文献

- [1] 村松 壽晴ほか、“レーザー光を用いた燃料デブリ・炉内構造物取出しに向けた研究(I)～研究計画および平成24年度研究成果～”、JAEA-Research 2013-024(2013).
- [2] 村松 壽晴ほか、“レーザー光を用いた燃料デブリ・炉内構造物取出しに向けた研究(II)～平成25年度研究成果～”、JAEA-Research 2014-018(2014).
- [3] T. Muramatsu, “Thermohydraulic Aspects in Laser Welding and Cutting Processes”, Proc. The 31th International Congress on Applications of Laser & Electro-Optics (ICALEO-31), No. 1904(2012), pp. 661-669.
- [4] http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/keikaku/10_sekkei.pdf.