

計算科学シミュレーションコード による レーザーコーティング条件の導出

Provision of Laser Coating Irradiation Conditions with a Computational Science Simulation Code SPLICE

日本原子力研究開発機構 村松 壽晴 Toshiharu MURAMATSU Non Member
日本原子力研究開発機構 吉氏 崇浩 Takahiro YOSHIUJI Non Member

A general-purpose three-dimensional thermohydraulics numerical simulation code SPLICE was developed at Japan Atomic Energy Agency and designed to deal with gas-liquid-solid consolidated incompressible viscous flows with a phase change process in various laser applications, such as welding, coating, cutting, *etc.* The result obtained from laser coating simulations is very encouraging in the sense that the SPLICE code would be used as one of efficient tools to provide the laser coating irradiation conditions.

Key words: laser materials processing, laser coating, computer science, numerical simulation, response surface

1. 緒言

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、ここで発生する熔融・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。

本稿では、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に開発中の、計算科学シミュ

レーションコード SPLICE の概要と評価例、およびオーバーヘッドの大幅低減を目指し、SPLICE コードをレーザー照射条件導出のための手段として利用したフロントローディング実現に対する見通しを述べる。

2 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^[3]

SPLICE コードは、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する気-液-固統一非圧縮性粘性流解析コードであり、レーザー加工時の様々な物理現象、例えばレーザー光-物質相互作用、半熔融帯を介した熔融金属-固体材料間の熱的機械的相互作用、熔融・凝固相変化過程などの複合物理過程を取扱うために必要な様々な物理モデルを導入している。表 1 に、SPLICE コードの主要目をまとめる。

Table 1 Main features of the SPLICE code

1. Basic equation	Phase-mixed time-averaged Navier-Stokes equation, and conservation equations for mass and energy
2. Mathematical models	Finite difference method with staggered mesh arrangements
• Discretization	2 nd order Runge-Kutta method
• Time integration	5 th order WENO method
• Approx. method for convection terms	AMG-BiCGstab method
• Matrix solver	
3. Physical models	Lambert-Beer's law
• Laser irradiation	THINC / WLIC methods
• Interface tracking	Surface tension force with Marangoni effects
• Free surface	Temperature recovering methods
• Phase change	

連絡先：村松 壽晴、〒914-8585 福井県敦賀市木崎65-20、国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構、レーザー共同研究所

E-mail : muramatsu.toshiharu@jaea.go.jp

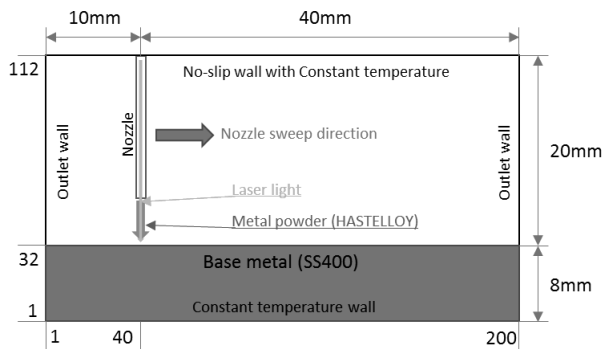


Fig. 1 Calculation model

Table 2 Calculation conditions

	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4
Base metal	SS400	←	←	←
Metal powder	Ti	←	←	←
Powder supply rate Q_F (g/min)	2.0	4.0	3.0	3.0
Nozzle diameter d_F (mm)	1.0	←	←	←
Laser power P_L (W)	750	750	400	300
Laser light diameter d_L (mm)	0.2	←	←	←
Sweep velocity V_L (mm/min)	1000	1000	1000	1000
Energy density D_E (kJ/mm ²)	4.8	←	2.5	1.9
Powder density D_F (g/mm ³)	0.0025	0.005	0.0038	←

3 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

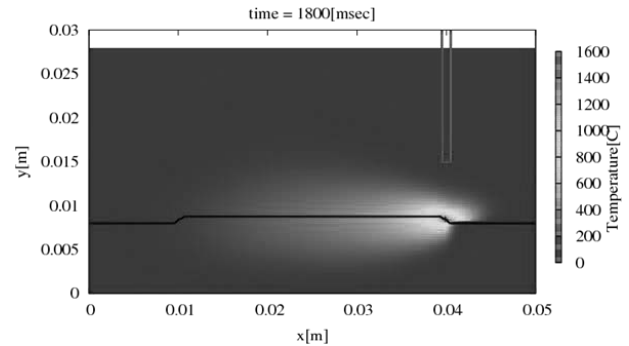
3.1 解析モデルおよび解析条件

SPLICE コードを典型的なレーザーコーティングプロセスの評価に適用した。図1に解析モデルを、表2に解析条件を示す。このSPLICE解析は、レーザー光(0.2mmφ)と金属粉(チタン)を母材表面(炭素鋼)に向かって噴出させ、これを左側から右側に向かってスウィープ(1,000 mm/min)させる場合を想定し、メッシュ幅0.25mmの2次元計算体系を用いて評価するものである。評価上のパラメータは金属粉供給量(Q_F)、レーザー出力(P_L)とし、パラメータを組合せた4ケースの数値解析を行う。

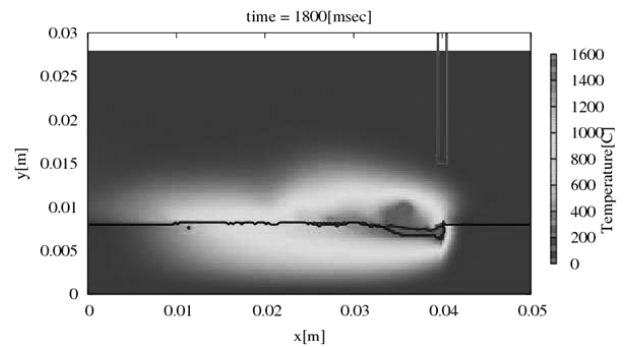
なお、レーザー加工ヘッドからの金属粉が、母材表面に到達するまでにレーザー光からエネルギーを受けて温度上昇するプロセス(金属粉エネルギー授受モデル)は、式(1)の関係を想定した。

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

ここで、 D_E : エネルギー密度(J/mm³)、 d_L : レーザー光径(mm)、 ℓ : スタンドオフ(mm)、 γv : 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; $\equiv \ell/V_g$)、 V_g : ガス流速(mm/s)、 ρ : 金属粉密度(g/mm³)、 C_p : 金属粉比熱(J/g・°C)である。



(a) With the effects



(b) Without the effects

Fig. 2 Effects on laser light irradiation model to metal powder

3.2 解析結果

図2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熔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熔融範囲が低下する。

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3および図4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(1.75mm)。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(≦0.25mm)且つ薄いコーティング膜厚(≦0.75mm)が実現できている。

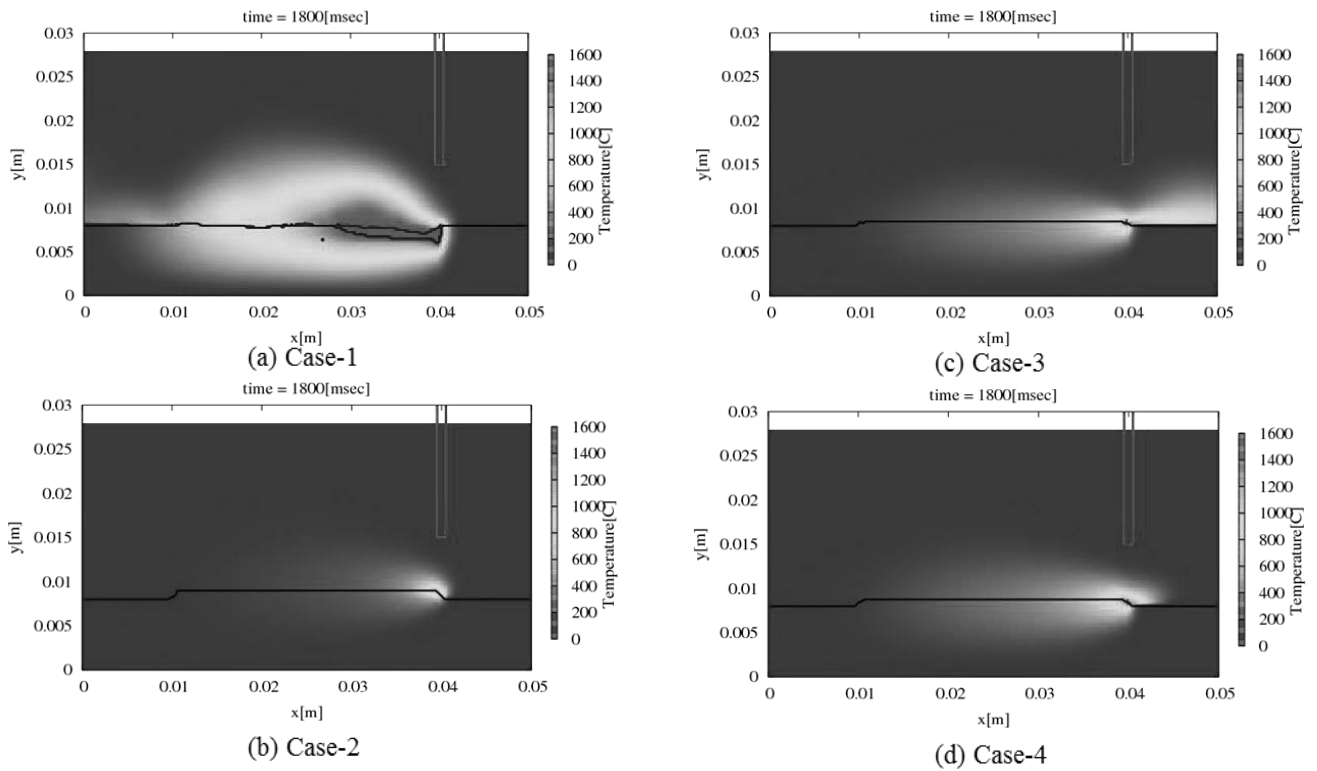


Fig. 3 Comparison of spatial temperature distributions

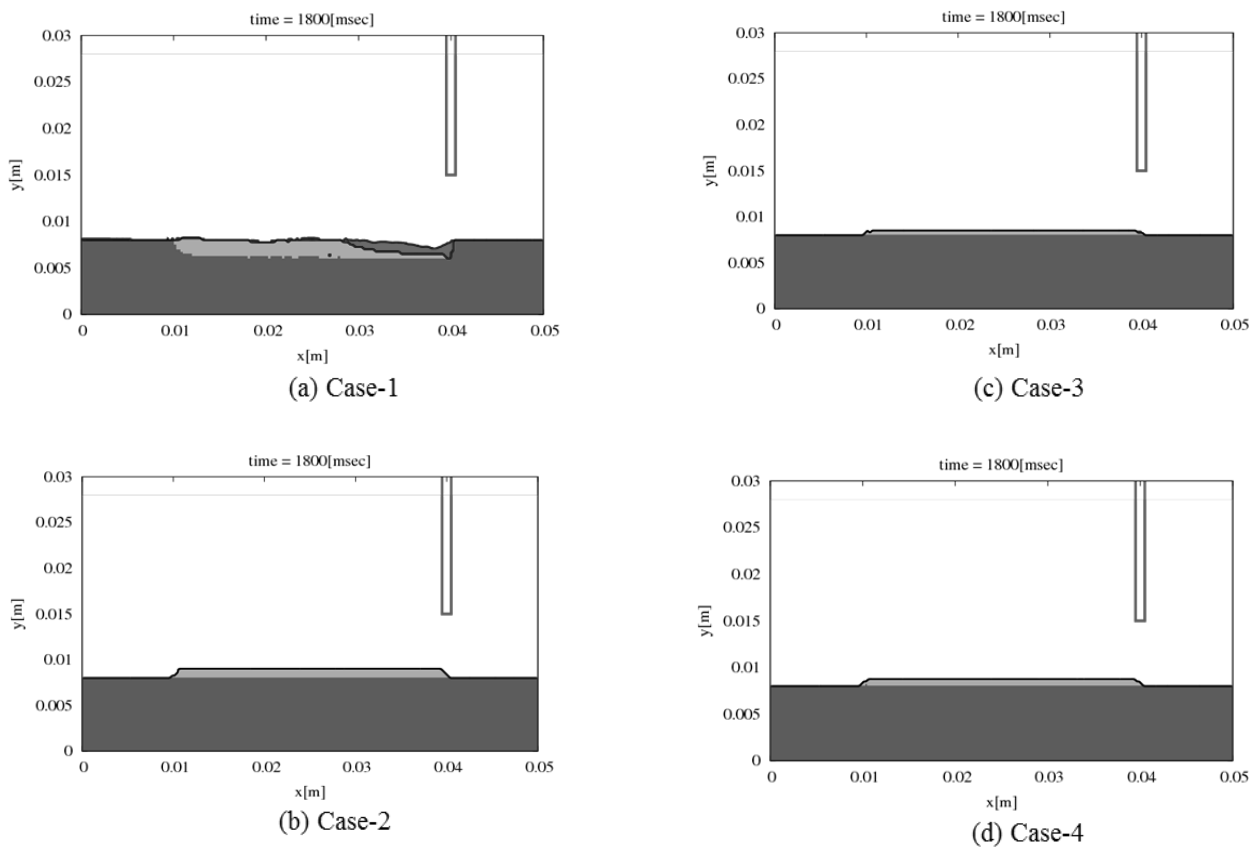


Fig. 4 Comparison of spatial distributions for melting penetration and coating film thickness

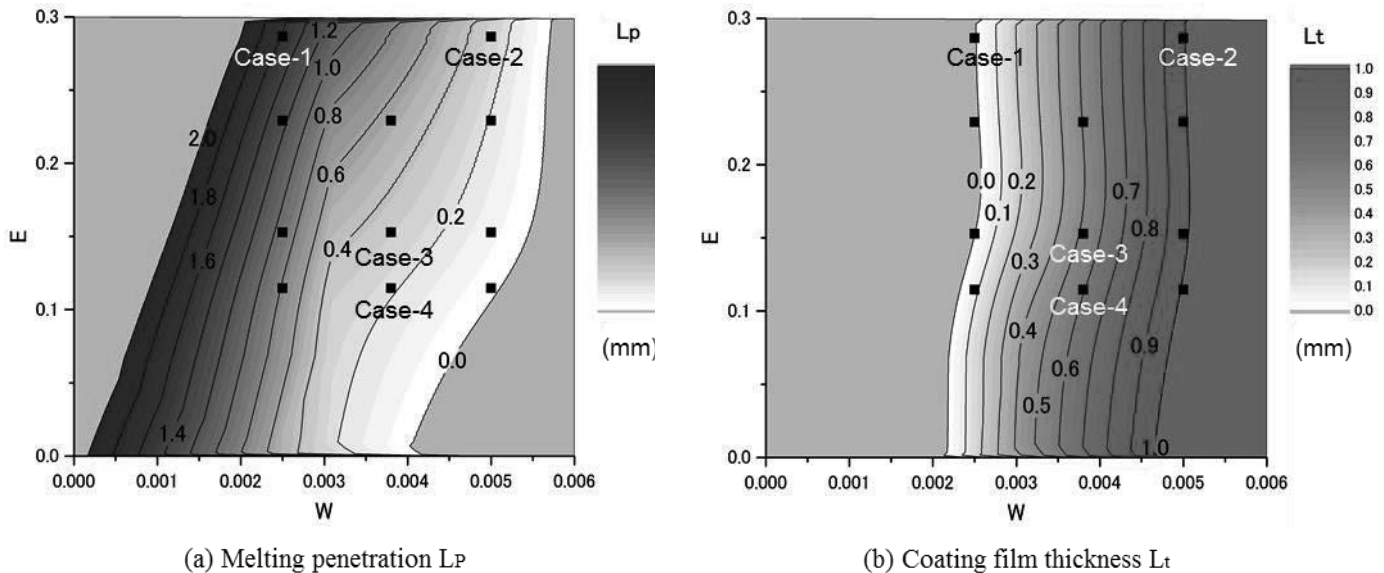


Fig. 5 Response surface maps for melting penetration and coating film thickness

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。この問題を 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。更には、原子力プラントを初めとする人工構造物に対し、必要に応じた耐熱性、耐腐食性などの高機能化を適切に施すことが可能となる。

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($0.1 \leq E \leq 0.29$, $0.0025 \leq W \leq 0.005$)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 5 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特性の可視化は、膨大なオーバーヘッドの大幅な低減に有効であり、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可能であることを示唆している。

5. 結言

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。

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.