

Advance/FrontFlow/MPによる溶接シミュレーション

杉中 隆史*

Welding simulation using Advance/FrontFlow/MP

Takafumi Suginaka*

Advance/FrontFlow/MP は蒸発、沸騰、凝縮などの相変化や表面張力を含め、気液二相流動を 3 次元で解析する非構造格子系ソフトウェアである。本ソフトウェアにレーザービームおよび電子ビームによる金属の溶融・蒸発・凝固解析機能を新たに導入した。本稿ではこの新機能と溶接シミュレーションの例を紹介する。

Keywords: 製造、溶接、溶融、蒸発、凝固、表面張力、レーザービーム、電子ビーム

1. はじめに

Advance/FrontFlow/MP は蒸発、沸騰、凝縮などの相変化や表面張力を含め、気液二相流動を 3 次元で解析する非構造格子系ソフトウェアである。本ソフトウェアにレーザービームおよび電子ビームによる金属の溶融・蒸発・凝固を解析するための機能を新たに導入した。この機能を使うことによって、溶接における溶融池の形状や挙動、凝固時の冷却速度を計算することができる。

本稿ではレーザービームおよび電子ビームによる金属の溶融・蒸発・凝固の解析機能と溶接シミュレーションの例を紹介する。

2. レーザービームおよび電子ビームによる金属の溶融・蒸発・凝固解析機能

2.1. 基礎方程式

(1) 概要

固体金属にレーザービームおよび電子ビームを照射し、固体金属の温度が融点に達すると金属は溶融する。溶融やスパッタ（溶融金属の飛散）や蒸発により変形した溶融金属表面の曲率半径がビーム径と同じオーダーであれば、表面張力が支配的な流れが起こる。本解析モデルはこの現象

*アドバンスソフト株式会社 熱流動エンジニアリングセンター

Thermal Hydraulics Engineering Centre, AdvanceSoft Corporation

を固体金属、溶融金属、蒸気金属、空気やアルゴンガスなどの非凝縮性気体の 4 相の相互作用と質量、運動量、エネルギーの保存則に基づいて計算する。

レーザービームおよび電子ビームを金属に照射すると、溶融金属内部の入熱分布は照射方向に卓越することが知られている。この現象は熱対向流で説明することができる。熱対向流は二流体モデルで扱うことができるため、本解析モデルは気相（蒸気金属と非凝縮性ガスの均質流）と液相（溶融金属）の各相に対し質量保存方程式、運動量保存方程式、エネルギー保存方程式を解く二流体モデルを使用する。また、固体金属については熱伝導方程式を解く。解析に使用する基礎方程式を以下に示す。

(2) 気相と液相の質量保存方程式

気相と液相の質量保存方程式は次式で表される。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_k \alpha_k) + \nabla \cdot (\rho_k \alpha_k \vec{v}_k) = \Gamma_k \quad (1)$$

ここで、 k は液相か気相かを識別するインデックスで、 k が 1 のときは液相を、 k が g のときは気相を表す。 ρ_k は k 相の密度 [kg/m^3]、 α_k は k 相の体積割合 [-]、 $\vec{v}_k$ は k 相の速度 [m/s]、 Γ_k は k 相の質量生成率 [$\text{kg}/\text{s}/\text{m}^3$] である。 α_k と Γ_k には次の関係がある。

$$\alpha_g + \alpha_l = 1 \quad (2)$$

$$\Gamma_g + \Gamma_l = 0 \quad (3)$$

(3) 気相と液相の運動量保存方程式

気相と液相の運動量保存方程式は次式で表される。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_k \alpha_k \vec{v}_k) + \nabla \cdot (\rho_k \alpha_k \vec{v}_k \vec{v}_k) = \\ -\nabla \cdot (\alpha_k \vec{\tau}_k) - \vec{F}_{ik} - \vec{F}_{gk} - \alpha_k \nabla P + \Gamma_k \vec{v}_{ik} \\ - \vec{F}_{st} - \vec{F}_{ma} - \vec{F}_{re} \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 $\vec{\tau}_k$ はk相のせん断応力[N/m²]、 $\vec{F}_{ik}$ は界面摩擦[N/m³]、 $\vec{F}_{gk}$ はk相に働く重力(= $\rho_k \alpha_k g_k$) [N/m³]、 P は圧力[N/m²]、 $\vec{v}_{ik}$ は気液界面の速度[m/s]で相手側の速度を使用、 $\vec{F}_{st}$ は表面張力をCSFモデルにより体積力に換算した項[N/m³]、 $\vec{F}_{ma}$ はマランゴニ力[N/m³]、 $\vec{F}_{re}$ は蒸発反跳力[N/m³]である。

(4) 気相と液相のエネルギー保存方程式

気相と液相のエネルギー保存方程式は次式で表される。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_k \alpha_k h_k) + \nabla \cdot (\rho_k \alpha_k h_k \vec{v}_k) = \\ -\nabla \cdot (\alpha_k q_k) + \alpha_k \frac{DP}{Dt} + \Gamma_k h_{ik} + q_{ik} \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 h_k はk相の飽和エンタルピー[J/kg]、 q_k はk相の熱流束[W/m²]、 h_{ik} はk相の飽和エンタルピー[J/kg]、 q_{ik} は気液界面でのk相への熱移動量[W/m²]である。

(5) 蒸気金属の質量保存方程式

蒸気金属の質量保存方程式は次式で表される。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g Y_w) + \nabla \cdot (\rho_g Y_w \vec{v}_g) = \Gamma_g \quad (6)$$

ここで、 Y_w は蒸気金属の気相に対する質量分率[-]である。

(6) 固体金属の熱伝導方程式

固体金属の熱伝導方程式は次式で表される。

$$\rho_s c_s \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_s \nabla^2 T \quad (7)$$

ここで、 ρ_s は固体金属の密度[kg/m³]、 c_s は固体金属の比熱[J/kg/K]、 T は温度[K]、 λ_s は固体金属の熱伝導率[W/m/K]である。

2.2. 融解と凝固の扱い

エネルギー保存方程式はエンタルピーを従属変数とする。融解熱あるいは凝固熱を考慮した融解と凝固を扱うため、エンタルピー h を図1のように定義する。

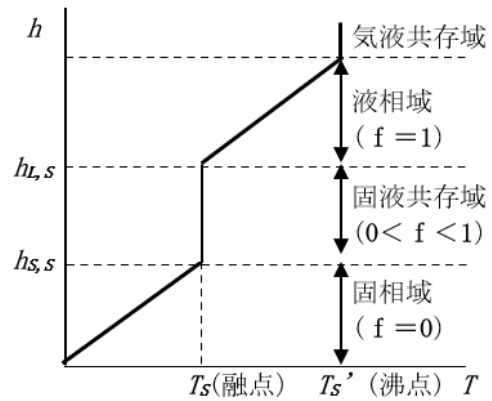


図1 温度 T とエンタルピー h の関係

液相率 f は固体金属の飽和エンタルピー $h_{s,s}$ と熔融金属の飽和エンタルピー $h_{L,S}$ を使って、次式で表される。

$$f = \frac{h - h_{s,s}}{h_{L,S} - h_{s,s}} \quad (8)$$

ここで、 $h_{L,S} - h_{s,s}$ は融解熱[J/kg]あるいは凝固熱[J/kg]を表す。

固相域、固液共存域、液相域のエンタルピーは次式で表される。

$$\text{固相域: } h = C_s T \quad (9)$$

$$\text{液相域: } h = C_{p,L}(T - T_s) + h_{L,S} \quad (10)$$

固液共存域:

$$h = C_s T(1 - f) + \{C_{p,L}(T - T_s) + h_{L,S}\}f \quad (11)$$

ここで、 C_s は固体金属の比熱[J/kg/K]、 $C_{p,L}$ は熔融金属の定圧比熱[J/kg/K]である。

2.3. 蒸発の反跳圧力

金属が蒸発すると金属表面に反跳圧力が作用

する。反跳圧力は以下に示す Anisimov によるモデルを使用する。

$$P_{recoil} = p_a \sum_{i=1}^n a_i \exp \left(-\frac{\lambda_i}{k_B} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{Bi}} \right) \right) \quad (12)$$

ここで、 p_a は圧力[Pa]、 n は元素数、 a_i は元素 i の含有率(体積割合)、 λ_i は凝集エネルギー[J]、 k_B はボルツマン定数(1.3806×10^{-23} [m² kg/s²/K])、 T は温度[K]、 T_{Bi} は沸点[K]である。

Anisimov によるモデルでは温度の上昇に伴い反跳圧力は指数関数的に増加する。

2.4. 蒸発速度

蒸発速度は以下に示す Anisimov によるモデルを使用する。

$$j = p_a \sum_{i=1}^n a_i \sqrt{\frac{M_i}{2\pi k_B T}} \exp \left(-\frac{\lambda_i}{k_B} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{Bi}} \right) \right) \quad (13)$$

ここで、 j は蒸発による質量流束 [kg/m²/s]、 M_i は原子質量[kg]である。

2.5. 放熱量

熔融金属表面から金属が蒸発することによる熔融金属の放熱量を以下の式で求め、単位体積当たりの熱量[W/m³]に換算したものを熔融金属のエネルギー保存方程式にシンク項として与える。

$$Q_{ablation} = -j L_v \quad (14)$$

ここで、 $Q_{ablation}$ はアブレーションによる放熱量[W/m²]、 j は蒸発の質量流束[kg/m²/s]、 L_v は蒸発潜熱[J/kg]である。

2.6. レーザービームの入熱モデル

レーザービームの入熱は金属表面に以下のガウス分布で与える。

$$q(r) = \frac{2W}{\pi r_0^2} \exp \left(-\frac{2r^2}{r_0^2} \right) \quad (15)$$

ここで、 $q(r)$ は熱流束[W/m²]、 W は入射エネルギー[W]、 r_0 はガウシアンビーム半径[m]、 r はビーム中心からの距離[m]である。

2.7. 電子ビームの入熱モデル

電子ビームの入熱はレーザービームの入熱と同様にガウス分布で与える。ただし、電子ビームの場合、金属表面から 4 μm 程度内部で入熱が最大になる。この入熱分布は以下の方法で与える。

レベルセット法を使用し、金属面から指定した距離だけ内側が最大になる δ 関数を作る。



金属内部で δ 関数をなまらせたガウス分布で熱量を与える。



全熱量が指定した値になるように熱量を修正する。

図 2 電子ビームの場合の入熱方法

2.8. 放射伝熱モデル

金属表面から気体への放射熱は以下に示す無限に広い平行二平板間の放射伝熱モデルを使用する。

$$q_i = \sigma \left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_{air}} - 1 \right)^{-1} (T_{air}^4 - T_i^4) \quad (16)$$

ここで、 q_i は金属表面の正味熱流束[W/m²]、 σ はステファンボルツマン定数 (5.670×10^{-8} [W/m²/K⁴])、 ε_1 は金属表面の放射率[-]、 ε_{air} は気体の放射率[-] (黒体とみなす場合は 1)、 T_{air} は気体の温度[K]、 T_i は金属表面の温度[K]である。

2.9. ビーム照射に適合した領域分割

並列計算は解析領域を小領域に分割し、各小領域の計算を CPU のプロセッサに割り振って行う。この小領域への分割をビームの照射方向に直交する面に対して 2 次元で行う。これにより、照射面の検索は小領域毎に独立して行うことができる。また、照射面を判定するための小領域間の通信が不要になるため、計算時間を短縮することができる。

3. 溶接シミュレーションの例

3.1. 解析対象

銅板のレーザー溶接を解析対象とし、ビーム出力による溶融池形状の違いを解析する。銅本来の放射率を使用すると溶融池形状が小さくなるため、黒化処理や化学反応などの処理により放射率が 0.3 になったものと仮定して解析する。

3.2. 解析条件

解析領域を図 3 に、解析条件を表 1 に示す。

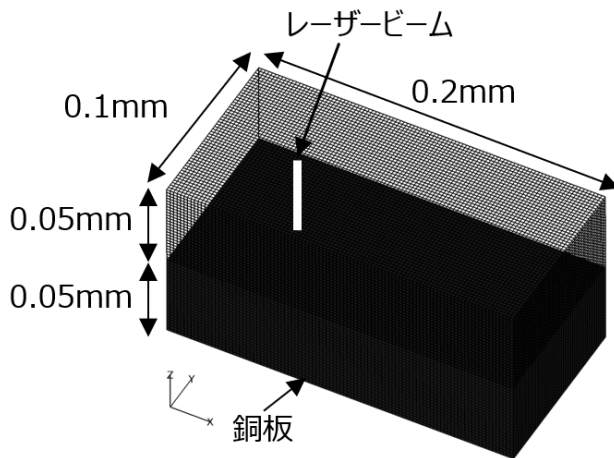


図 3 解析領域

表 1 解析条件

No.	項目	内容
1	ビーム	レーザービーム
2	ビーム径	100 μ m
3	ビーム出力	120W と 200W
4	ビーム走査速度	5m/s
5	金属材料	Cu
6	融点	1357.8K
7	沸点	2835.0K
8	融解潜熱	2.127×10^5 J/kg
9	蒸発潜熱	4.727×10^6 J/kg
10	初期温度	773.15K
11	底面と側面の温度	773.15K
12	金属表面の放射率	0.3 (仮定)
13	メッシュサイズ	2 μ m
14	格子数	250,000
15	時間刻み	10^{-9} s

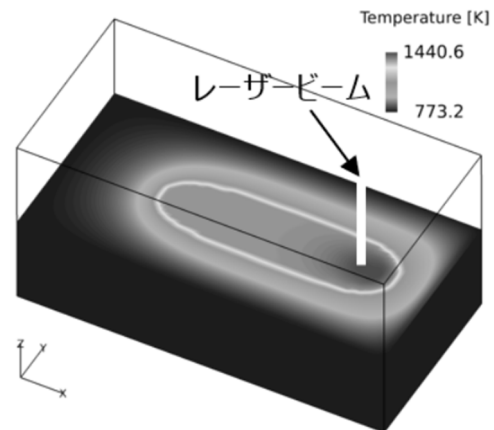
3.3. 解析結果

ビーム出力 120W の条件で 0.03ms における金属表面形状、温度分布、溶融分布を図 4 に示す。レーザー照射面は変形することなく溶融領域が進行している。0.03ms まで一度でも溶融した領域分布 (図 4(b)) と 0.03ms における溶融分布(図は省略)を比較することにより、溶融後に凝固した領域と凝固時の冷却温度を求めることができる。

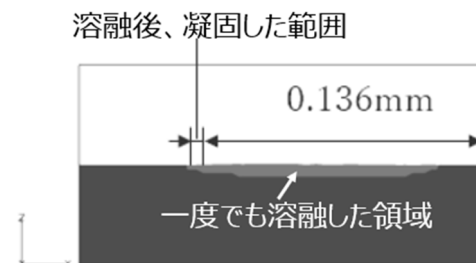
ビーム出力 200W の条件で 0.03ms における金属表面形状、温度分布、溶融分布を図 5 に示す。金属表面は乱れ、溶融金属の飛散 (スパッタリング) が見られる。

以上のことから、ビーム出力による溶融池形状の傾向は妥当である。

参考までに本解析の計算時間を表 2 に示す。



(a)金属表面形状と温度分布

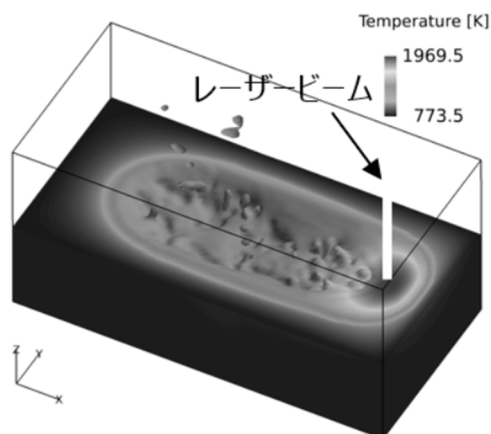


(b)レーザービーム走査断面の溶融分布

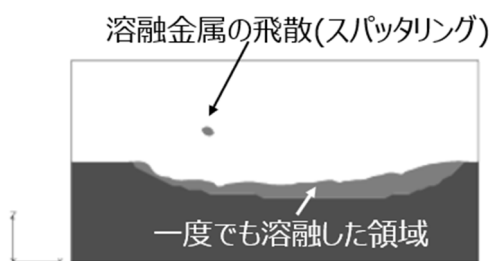
図 4 ビーム出力 120W で 0.03ms の結果

表 2 0.03ms までの計算時間

No.	項目	内容
1	CPU	Xeon E5-2650 v4 @ 2.20GHz
2	並列数	10
3	計算時間	21 時間 45 秒



(a) 金属表面形状と温度分布



(b) レーザービーム走査断面の溶融分布

図 5 ビーム出力 200W で 0.03ms の結果

参考文献

- [1] Watari, Ogura, Yamazaki, Inoue, Kamitani, Fujiya, Toyoda, Goya and Watanabe, "Two-fluid model to simulate metal powder bed fusion additive manufacturing", Journal of Fluid Science and Technology, The Japan Society of Mechanical Engineers, Vol.13, No.2 (2018).
- [2] 亘 紀子, 山崎 紀子, 小椋 謙, 渡辺 俊哉, "二流体モデルによる金属 3D プリントミクロスケールシミュレーション", 化学工学会, Vol.84, No.4(2020).

※ 技術情報誌アドバンスシミュレーションは、アドバンスソフト株式会社 ホームページのシミュレーション図書館から、PDF ファイルがダウンロードできます。(ダウンロードしていただくには、アドバンス/シミュレーションフォーラム会員登録が必要です。)

4. まとめ

本稿では、Advance/FrontFlow/MP に導入したレーザービームおよび電子ビームによる金属の溶融・蒸発・凝固解析機能と溶接シミュレーションの例を紹介した。この例ではビーム出力による溶融池形状の傾向が妥当であることを示した。

実験値と比較した計算事例については文献 [1][2]を参照されたい。

今後、本ソフトウェアを産業界で広く利用していただけるように、使いやすさと計算結果の信頼性を上げていく予定である。