

SLM造形過程におけるレーザ照射部近傍の粉体層溶融凝固を考慮した 過渡伝熱数値解析

池庄司 敏孝*1, 京極 秀樹*2, 米原 牧子*3, 荒木 正浩*4, 中村 和也*4

Numerical Simulation of Transient Heat Conduction Analysis in Laser Illuminated Area during SLM Process including Melting and Solidification of Powder Layer

Toshi-Taka IKESHOJI*1, Hideki KYOGOKU*2, Makiko YONEHARA*3,
Masahiro ARAKI*4 and Kazuya NAKAMURA*4

The selective laser melting (SLM) is a kind of additive manufacturing processes, which melts the thin powder layer selectively and forms 3D object by compiling many layers. To obtain the proper laser melting conditions for SLM process, the prediction of thermal field around the scanning laser spot is necessary. In this paper, a finite element method of transient heat conduction analysis is proposed to predict the thermal field. It is based on the energy conservation equation for enthalpy of bulk metal, powder metal and once-melt-and-solidified powder metal. The method includes the phenomena of melting and solidification of powder metal. The numerical simulation using this method is applied for Ni-based refractory alloy, Inconel-718, and the results of the simulation is presented with temperature contours and dimensions of melt pool.

Keywords: Additive Manufacturing, Inconel 718, Enthalpy of powder metals, Thermal conductivity of powder metal

1. はじめに

金属三次元積層造形(Additive Manufacturing, AM)は、マシニングセンター等を用いた除去加工法や精密鋳造と比較して三次元的で自由な形状を創生できると期待されている。AM法にはレーザ照射型堆積法(Laser Deposition), 電子ビーム溶融法(Electron Beam Melting, EBM)などもあるが、本研究ではレーザ照射式パウダーベッド型積層造形法(Selective Laser Melting, SLM)を扱う。SLMは造形物の3Dモデルを数10 μ m厚さに仮想的に薄く切断してスライスモデルづくり, スライスモデルと同等な数10 μ m厚さにひいた金属粉体層をレーザ

で選択的に溶融凝固させる過程を繰り返して粉体層を積層することにより, 金属3D造形物を得る方法である。

SLMは粉体層厚さが薄いことと, レーザスポット径が比較的小さいため, 他のAM過程と比較して形状精度が良いとされている。しかし, Ni基合金やステンレス鋼の造形では造形物の変形が問題となる場合がある。造形物の変形を予測するためにはレーザスポット周りの温度場を明らかにすることが必要である。

SLM過程のレーザスポット周りの温度場を過渡伝熱解析する研究はこれまでにない。Matsumoto et.al. は2次元有限要素法を用いてパウダ

原稿受付 2016年5月7日

*1 近畿大学 次世代基盤技術研究所 准教授 (〒739-2116 東広島市高屋うめの辺1番) E-mail ikeshoji.tt@hiro.kindai.ac.jp

*2 近畿大学 工学部 ロボティクス工学科 教授, 次世代基盤技術研究所 教授 (〒739-2116 東広島市高屋うめの辺1番)
E-mail kyogoku@hiro.kindai.ac.jp

*3 近畿大学 次世代基盤技術研究所 研究員 (〒739-2116 東広島市高屋うめの辺1番)

*4 技術研究組合次世代金属3D積層技術総合開発機構 (TRAFAM) 近畿大学広島分室 研究員
(〒739-2116 東広島市高屋うめの辺1番)

連絡先: 池庄司敏孝 (研究代表者)

ーベッド上をレーザー走査した状況を粉体から固体への変化は熱伝導解析で相変態を考慮して行った⁽¹⁾。3次元の熱伝導解析と造形物の変形の予測は Zaeh & Branner が行ったが、粉体の物性については考慮に入れていない^(2,3)。粉体の物性値については Husseain, et.al が粉体中の空孔率を ϕ で熱伝導率を $k_{\text{powder}} = k_{\text{bulk}}(1 - \phi)$ と推定してレーザースポット周りの温度分布を過渡伝熱解析で得ている。この粉体の熱伝導率は Loeb のモデルと等価であるが、推定値が実測値よりも 10 倍以上となる。同様な粉体モデルで熱伝導解析と残留応力解析を Hodge, et.al. が行っている⁽⁴⁾。粉体層の熱伝導率をより精度の高い近似で解析に含めることが必要である。

粉体層の熱伝導率については多くのモデルが提案されている⁽⁵⁻¹⁰⁾。多くのモデルは粉体の粒径 D_p を一定として完全球の粉体が空隙率 ϵ で充填されているとし、充填のされ方を幾何学的に表し、接触熱伝達と輻射熱伝達を考慮したモデルを作っている。

本研究では粉体の熱伝導率を実測値と比較的合致する Kunii-Smith モデル^(11,12)を用い、溶融凝固現象はエンタルピを用いたエネルギー保存則を解くことで考慮し、かつ、粉体の溶融凝固による密度、エンタルピ、熱伝導率の温度依存性を加味する。

2. 解析方法

SLM の造形条件としてはレーザー出力(PW)、レーザースポット径(SD)、レーザー走査速度(SS)、ハッチ幅(dy)、粉体層厚さ(dz)があり (図 1)、SS, dy, dz を組み合わせたエネルギー密度 E W/mm³ を目安とする。

$$E = \frac{PW}{SS \times dy \times dz}$$

本解析では Inconel 718 バルク体の上に厚さ $dz = 50 \mu\text{m}$ の粉体層が積層されているとした。粉体は粒径 $D_p = 40 \mu\text{m}$ が最疎充填され、空隙率は $\epsilon = 0.476$ とした。

造形条件は $PW = 292\text{W}$, $SD = 0.1, \text{mm}$, $SS = 610, \text{mm/s}$, $dy = 0.15, \text{mm}$ とし、エネルギー密度は 63.8W/mm^3 となった。

解析領域は幅 $0.95 \times$ 長さ $5.5 \times$ 高さ 0.35mm の直方体とし、幅方向と長さ方向の端から 0.25mm の位置を原点に、長さ方向に 5mm の線に沿ってレーザーを走査し、幅方向に 0.15mm ずらして、折り返し 5mm 走査し、再び、ずらして折り返したと仮定した (図 2)。

2.1 Inconel 718 の物性値

Inconel 718 の物性値は比較的新しく温度依存性も詳細に測定した Pottlacher, et.al.^(13,14)の結果を用いた。比エンタルピ $h_M, \text{J/kg}$ は以下のとおりである。

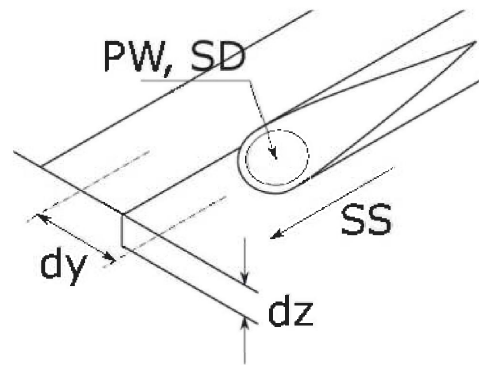


図 1. 造形条件の記号

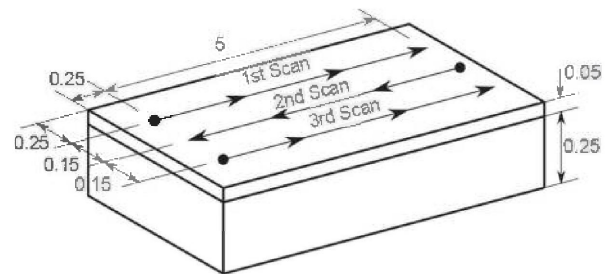


図 2. 解析領域, 単位 mm.

$$h_M(T) = \begin{cases} -104,989 + 286T + 0.165T^2 & (400 < T < 1000 \text{ K}) \\ -319,284 + 652T & (1000 < T < 1528 \text{ K}) \\ -4.7596 \times 10^6 + 3.5580 \times 10^3 T & (1528 < T < 1610 \text{ K}) \\ -283,854 + 778T & (1610 < T < 2100 \text{ K}) \end{cases}$$

密度 $\rho, \text{kg/m}^3$ は

$$\rho_A(T) = \begin{cases} 8256.42 - 0.2019T - 1.3779 \times 10^{-4} T^2 & (400 < T < 1000 \text{ K}) \\ 8392 - 0.431T & (1000 < T < 1528 \text{ K}) \\ 1.0587 \times 10^4 - 1.8672T & (1528 < T < 1610 \text{ K}) \\ 8366 - 0.488T & (1610 < T < 2100 \text{ K}) \end{cases}$$

比熱は $c, \text{J/(kg K)}$ は比エンタルピの温度微分をとって以下のようになる。

$$c_A(T) = \frac{dh_M}{dT} = \begin{cases} 286 + 0.3370T & (400 < T < 1000 \text{ K}) \\ 652 & (1000 < T < 1528 \text{ K}) \\ 778 & (1610 < T < 2100 \text{ K}) \end{cases}$$

密度と比熱から単位体積当たりのエンタルピ^o, $h_V, \text{J/m}^3$, は以下のように算出できる。

$$\begin{aligned} h_{V,400}(T) &= \int_{400}^T \rho_{400} c_{400} dT \\ &= -1.1600 \times 10^9 + 2.3613 \times 10^6 T + 1.3623 \\ &\quad \times 10^3 T^2 - 3.5435 \times 10^{-2} T^3 - 1.1272 \\ &\quad \times 10^{-5} T^4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
h_{V,1000}(T) &= \int_{1000}^T \rho_{1000} c_{1000} dT + h_{v,400}(1000) \\
&= -5.3311 \times 10^9 + 5.4716 \times 10^6 T - 1.4051 \\
&\quad \times 10^2 T^2 + h_{v,400}(1000) \\
&= -2.8141 \times 10^9 + 5.4716 \times 10^6 T - 1.4051 \\
&\quad \times 10^2 T^2
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
h_{V,f}(T) &= \int_{1528}^T \rho_f c_f dT = h_{v,1000}(1528) \\
&= -4.9799 \times 10^{10} + 3.76667 \times 10^7 T \\
&\quad - 3321.76 T^2 + h_{v,1000}(1528) \\
&= -4.4581 \times 10^{10} + 3.76667 \times 10^7 T \\
&\quad - 3321.76 T^2
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
h_{V,1610}(T) &= \int_{1610}^T \rho_{1000} c_{1000} dT + h_{v,f}(1610) \\
&= -9.987 \times 10^9 + 6.5088 \times 10^6 T - 1.8983 \\
&\quad \times 10^2 T^2 + h_{v,f}(1610) \\
&= -2.5345 \times 10^9 + 6.5088 \times 10^6 T - 1.8983 \\
&\quad \times 10^2 T^2
\end{aligned}$$

これを Inconel 718 バルク体の単位体積当たりのエンタルピーとした。

$$h_A(T) = h_v(T)$$

熱伝導率 λ , W/(K m)は

$$\lambda_A(T) = \begin{cases} 1.1224 + 0.0165T & (1000 < T < 1528 \text{ K}) \\ 4.8985 + 0.0136T & (1600 < T < 2100 \text{ K}) \end{cases}$$

とした。

2.2 Inconel 718 粉体の物性値

Inconel 718 粉体の物性値は推定値を用いた。密度 ρ_B , kg/m³ は粉体の空隙率 ϵ を用いて (図 3)

$$\rho_B(T) = (1 - \epsilon)\rho_A(T)$$

単位体積当たりのエンタルピー h_B , J/m³ は (図 4)

$$h_B(T) = (1 - \epsilon)h_A(T)$$

熱伝導率は Kunii-Smith モデル^(12,13)を用いて推定した。

$$\frac{\lambda_B(T)}{\lambda_g} = \epsilon \left(1 + \beta \frac{h_{rv} D_p}{k_g} \right) + \frac{\beta(1 - \epsilon)}{\frac{1}{\phi} + \frac{h_{rs} D_p}{\lambda_g} + \gamma \left(\frac{\lambda_g}{\lambda_s} \right)}$$

β は熱流れ方向の粉体粒子間距離と粒径の比であり最疎充填なので $\beta = 1$ とした。 γ は固体内熱伝導に関する粒子平均厚さと粒子直径の比であるが、 $\gamma = 1$ とした。 ϕ は粒子周囲の気体の有効膜厚さと粒子直径の比であり、

$$\phi = \frac{1}{2} \frac{\left(\frac{\kappa - 1}{\kappa} \right)^2 \sin^2 \theta}{\ln(\kappa - (\kappa - 1) \cos \theta) - \frac{\kappa - 1}{\kappa} (1 - \cos \theta)} - \frac{2}{3\kappa}$$

ここで、 $\sin \theta = 0.839773$, $\cos \theta = 0.542938$ とした。

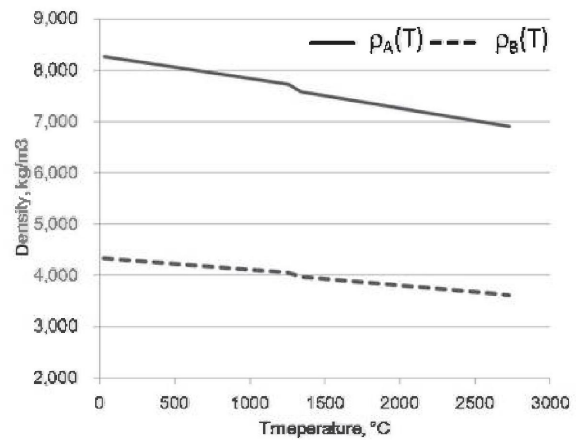


図 3. Inconel718 の密度変化の温度依存性

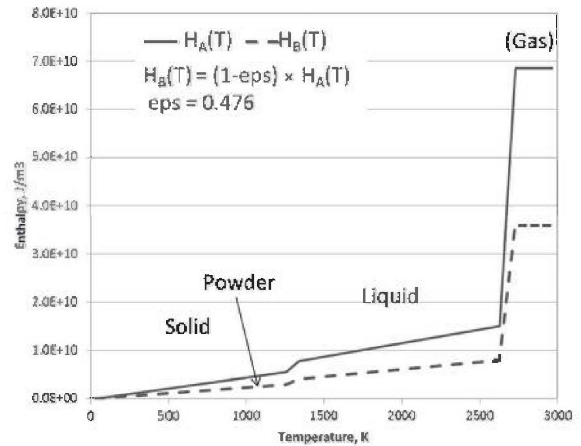


図 4. Inconel718 の単位体積当たりのエンタルピー変化の温度依存性

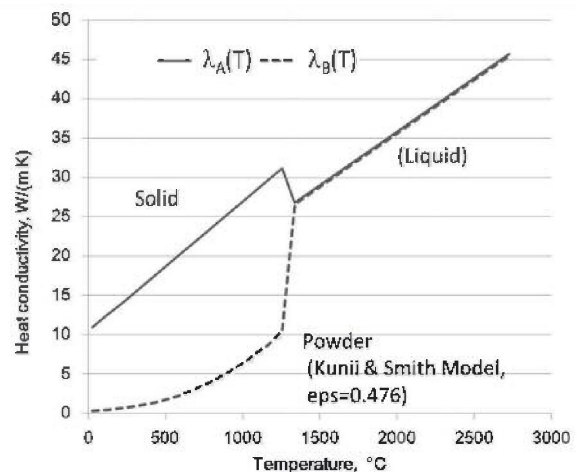


図 5. Inconel718 の熱伝導率の温度依存性

h_{rv} J/(m² s K) は粉体中の空隙—空隙間の輻射伝熱係数であり、 h_{rs} J/(m² s K) は固体面—固体面間の輻射伝熱係数である。

$$h_{rv} = \frac{2.2697693 \times 10^{-4}}{1 + \frac{\epsilon}{2(1-\epsilon)} - \alpha} \times \left(\frac{T}{100}\right)^3$$

$$h_{rs} = 2.2697693 \times 10^{-4} \left(\frac{\alpha}{2-\alpha}\right) \times \left(\frac{T}{100}\right)^3$$

雰囲気気体の熱伝導率はHoshino, T, et.al.⁽¹⁵⁾の実験式を用いた。

$$\lambda_g(T) = \sqrt{T} \left(-\frac{92.39}{T} + 1.647 + 5.225 \times 10^{-4} T \right)$$

液相線以上の温度域でのInconel 718粉体の熱伝導率はInconel 718バルク体の液体の熱伝導率と同じとした。粉体もバルク体も熔融状態では同じ液体だからである(図5)。

Kunii-Smithモデルにより推測したInconel 718粉体の熱伝導率は1000 Kで約0.5 W/(m K)で、バルク体の熱伝導率約16 W/(m K)の1/80程度となった(図6)。粉体の粒径が4μmと40μmではほぼ同程度であるが、400μmでは1000Kを超える高温域で40μmの場合に比べて5%程度大きくなった。空隙が大きくなったため輻射伝熱の影響が大きくなったためである。一方、粒径を40μm一定として輻射率を0.1~0.50と変化させると、輻射率の増加に伴い熱伝導率も増加するが、輻射率による差異は大きくなかった(図7)。

2.3 熔融凝固モデル

粉体の熔融と凝固は有限要素に割り当てた物性値を節点温度により変更することで本解析に組み込んでいる。バルク体の密度、単位体積当たりのエンタルピー、熱伝導率を $\rho_A(T)$, $h_A(T)$, $\lambda_A(T)$ 、粉体の物性値を $\rho_B(T)$, $h_B(T)$, $\lambda_B(T)$ とする。解析に用いる物性値(Mat. Prop)は3種類、#1~#3とした(表1)。#1はInconel 718バルク体を表す。#2はInconel 718粉体が、一旦、熔融した後に凝固した物質とした。この物質は粉体ではなく、バルク体であるが有限要素に占める物質の量が少なく、バルク体の1-ε倍である。そのため、密度、単位体積当たりのエンタルピーは粉体の値を用い、熱伝導率はバルク体の値を用いた。これはInconel 718粉体が有限要素に占める体積がバルク体よりも小さいため、熔融凝固した後でも

表 1. Inconel718バルク体, 熔融凝固粉体, 粉体の物性値選択

Mat.Prop.	ρ(T)	h(T)	λ(T)	
#1	A	A	A	Bulk
#2	B	B	A	Melted & Solidified Powder
#3	B	B	B	Powder

同様だからである。しかし、熱伝導率は熔融凝固して空隙がなくなったためバルク体と同等である。#3は粉体である。

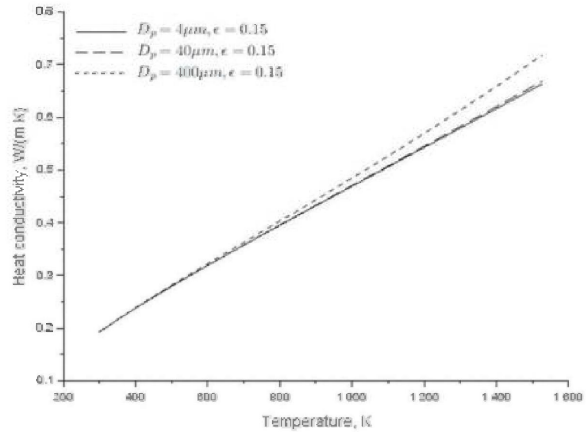


図 6. Kunii-SmithモデルによるInconel 718粉体の熱伝導の粒径による変化。

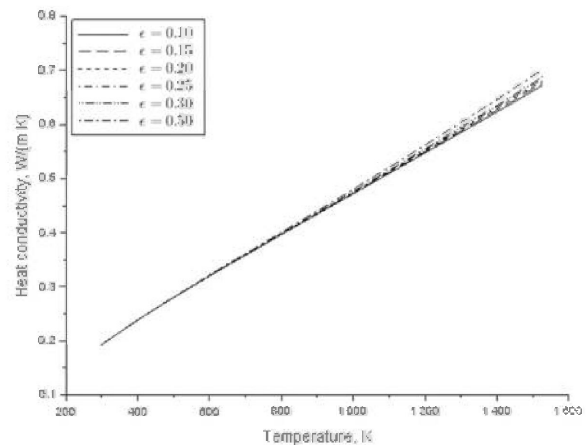


図 7. Kunii-SmithモデルによるInconel 718粉体の熱伝導の輻射率による変化(粒径40μm)。

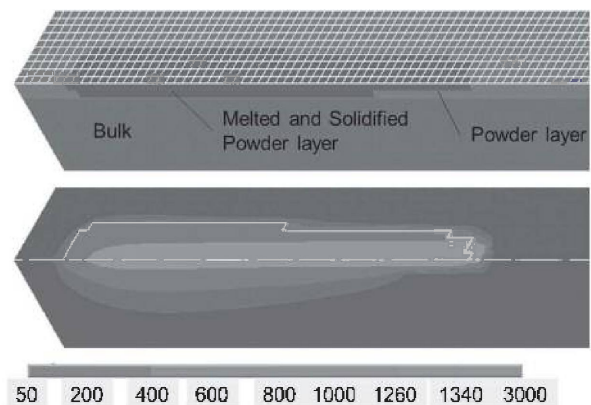


図 8. レーザスポット周りの熔融凝固によって変換された有限要素(上)と温度分布(下)。

1つの有限要素が解析初期に粉体とすると、物性値は#3である。過渡伝熱解析を進める途中で熱伝導により要素節点の温度が上昇したとする。有限要素に含まれる全節点の温度が固相線を超えた際に、物性値を#2の熔融凝固した粉体に変更する。図8にレーザ走査開始後30時間ステップ計算後の有限要素に割り当てられた物性値と温度分布を、計算領域上面と断面で示す。レーザ走査は図中左から右へ進むが、先頭のレーザスポット周りでは有限要素に含まれる全節点が固相線温度(1260°C)以上になっていないために温度のみ高くなり、物性値が#3から#2に交換されていない要素が観察された。

2.4 境界条件および初期条件

解析領域の側面と底面は Inconel718 バルク体が連続的に続いているとし、熱伝導率 18 W/(m K)の熱流出境条件を負荷した。上面は窒素の気流に晒されており、熱伝達率 40 W/(m K)の層流熱伝達条件を負荷した。

レーザ照射部の表面には熱流束を負荷した。レーザの強度はガウシアン分布に従うとした。レーザ照射中心か

ら r, m の円形の内の強度 P, W はレーザーパワーを P_0 とすると、

$$P(r) = P_0(1 - e^{-2r^2/w^2})$$

w はレーザスポット径である。 $r_1 < r < r_2$ の輪状の範囲の熱流束 $q, W/m^2$ は

$$q = P(r_2) - P(r_1) = \frac{P_0(e^{-2r_1^2/w^2} - e^{-2r_2^2/w^2})}{\pi(r_2^2 - r_1^2)}$$

熱流束を負荷する範囲は $r < 2w$ とした。

解析領域中のバルク体、粉体の初期温度は 50°C とした。

3. 結果ならびに考察

図9にレーザ走査による解析領域上面(レーザ照射面)の温度分布の変化を示す。レーザ照射開始から最初の走査(1st Path)の途中($t = 6.15s$)では、レーザスポット径と同程度の幅で、レーザ走査方向について対称な熔融池が形成された。熔融池はほぼ紡錘形であるが、熔融地後方では走査方向に直行方向に平坦な温度分布となった。

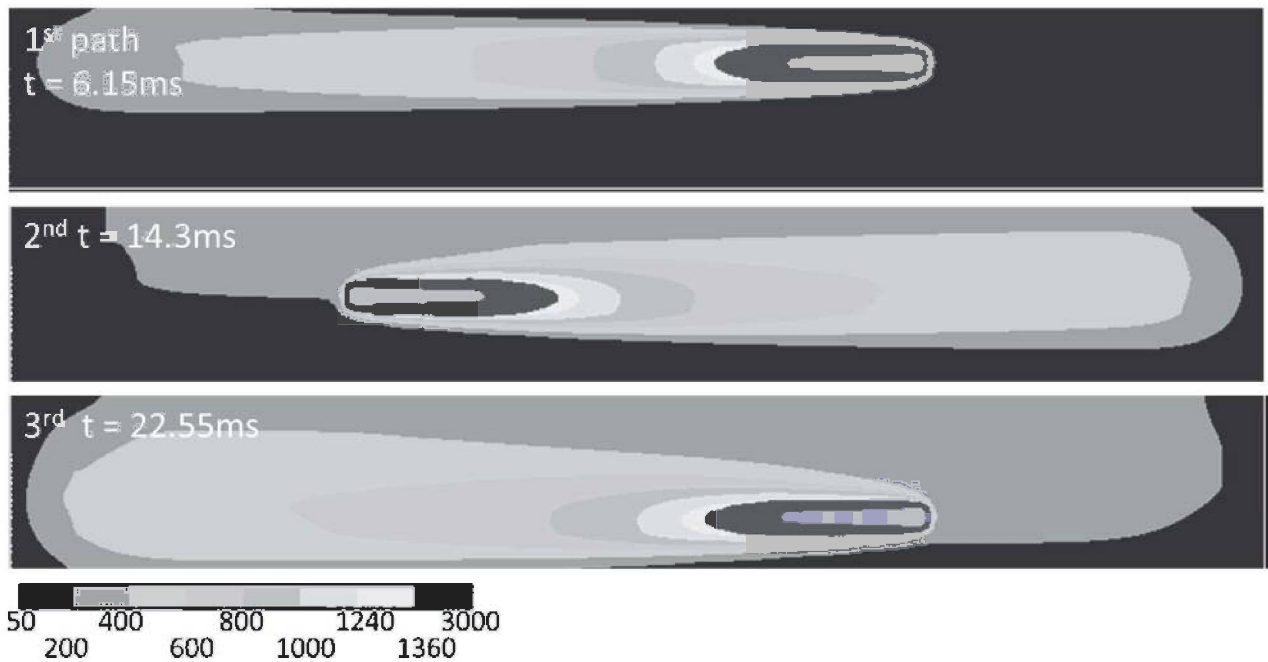


図9. 解析領域上面の温度分布

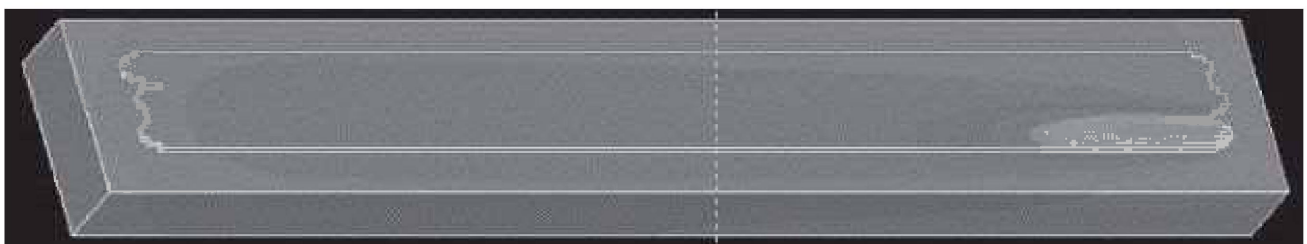


図10. 解析終了時点での Inconel 718 バルク体(#1)と熔融凝固した粉体(#2).

これは熔融池後方では凝固がおこり、有限要素の物性値がバルク体と同じ熱伝導率となっているため、粉体の部分よりも伝熱による熱の散逸が大きいと考えられる。2番目の走査(2nd path)では熔融池の側面が図中上方では走査方向に対して狭くなり、非対称な紡錘形となった。最初の走査により既に図中上側が凝固しているため、下側の粉体よりも熱伝導率が高くなっているためと考えられる。3番目の走査(3rd Path)では熔融池の非対称はより強調されるようになった。粉体の熔融凝固を加味した解析モデルにより熔融池が非対称形状になることが明らかになった。

粉体層の初期温度は50°Cとされたが、解析後、全体的に200°C以上となった。このことから、実際の造形には積層を重ねるごとに粉体層が当初の想定温度よりも高い温度に保たれることが懸念される。

解析終了時点での粉体が割り当てられた有限要素を取り除いたInconel 718バルク体(#1)と熔融凝固した粉体(#2)が割り当てられた有限要素を図に示す。Inconel 718バルク体の上に、白線で縁取りされた熔融凝固した粉体が表示されている。白線が二重になっている部分はもとの粉体の厚さを示している。レーザー走査の端点ではレーザースポットの円形状に沿った形で熔融凝固した様子が現れていた。また、2番目の走査(2nd path)の端点では前の走査による熔融凝固部との間に未熔融部が残されていた。

4. まとめ

粉体の熱伝導率をKunii-Smithモデルを導入し、かつ、粉体の熔融凝固による密度、エンタルピー、熱伝導率の温度依存性を加味した過渡伝熱解析を行った結果、SLM造形過程におけるレーザー照射部近傍の温度分布を予測することができた。

参考文献

(1) Matsumoto M, Shiomi M, Osakada K, Abe F, "Finite Element Analysis of Single Layer Forming on Metallic Powder Bed in Rapid Prototyping by Selective Laser Processing", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42,1(2002), 61-7.
(2) Zaeh M F, Branner G, "Investigations on Residual Stresses and Deformations in Selective Laser Melting", *Production Engineering*, 4,1(2010), 35-45.
(3) Zaeh M F, Branner G, Krol T A, editors, A, "Three Dimensional Fe-Model for the Investigation of Transient Physical Effects in Selective Laser Melting", 4th International Conference on Advanced Research

in Virtual and Physical Prototyping, VRAP 2009, October 6, 2009 - October 10, 2009; 2010; Leiria, Portugal: Taylor and Francis/Balkema.

(4) Hodge N E, Ferencz R M, Solberg J M, "Implementation of a Thermomechanical Model for the Simulation of Selective Laser Melting", *Comput Mech*, 54,1(2014), 33-51.

(5) Jaguaribe E F, Beasley D E, "Modeling of the Effective Thermal Conductivity and Diffusivity of a Packed Bed with Stagnant Fluid", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 27,3(1984), 399-407.

(6) Wilthan B, Schuetzenhoefer W, Pottlacher G, "Thermal Diffusivity and Thermal Conductivity of Five Different Steel Alloys in the Solid and Liquid Phases", *Int J Thermophys*, 36,8, (2015), 2259-72.

(7) Tsotsas E, Martin H, "Thermal-Conductivity of Packed-Beds - a Review", *Chemical Engineering and Processing*, 22,1, (1987), 19-37.

(8) Duncan A B, Peterson G P, Fletcher L S, "Effective Thermal Conductivity within Packed Beds of Spherical Particles", *Journal of Heat Transfer-Transactions of the Asme*, 111,1-4, (1989), 830-6.

(9) Zeng K, Pal D, Teng C, Stucker B E, "Evaluations of Effective Thermal Conductivity of Support Structures in Selective Laser Melting", *Additive Manufacturing*, 6,0, (2015), 67-73.

(10) Bedarkar S, Viswanathan N N, Ballal N B, "Measurement of Thermal Conductivity Along the Radial Direction in a Vertical Cylindrical Packed Bed", *Journal of Powder Technology*, 2015, (2015), 7.

(11) 矢木栄, 国井大蔵, "充填層の有効熱伝導度に関する研究", *化学工学*, 18,12, (1954), 576-85.

(12) 国井大蔵, "粉粒体の伝熱", *日本機械学会誌*, 60,456, (1957), 54-61.

(13) Pottlacher G, Hosaeus H, Kaschnitz E, Seifert A, "Thermophysical Properties of Solid and Liquid Inconel 718 Alloy", *Scandinavian Journal of Metallurgy*, 31,3, (2002), 161-8.

(14) Pottlacher G, Hosaeus H, Wilthan B, Kaschnitz E, Seifert A. "Thermophysical Properties of Solid and Liquid Inconel 718". *Thermochimica Acta*, 382, 1-2 (2002), 255-67.

(15) Hoshino T, Mito K, Nagashima A, Miyata M. "Determination of the Thermal-Conductivity of Argon and Nitrogen over a Wide Temperature Range through Data Evaluation and Shock-Tube Experiments". *Int J Thermophys*, 7,3 (1986), 647-62.