

レーザ式粉体床溶融法の溶融凝固数値解析における粉体床への レーザ入熱のANSYS MAPDLによる実装

池庄司 敏孝*1

Implementation of Laser Heat Input for Numerical Simulation of Laser Scanning Process with Melting and Solidification of Powder and Substrate by ANSYS MAPDL

Toshi-Tka IKESHOJI*1

To conduct the simulation of laser beam powder bed fusion process, the laser absorption rate values should be changed by material phases: surface of solid, surface of liquid, surface of powder bed, inside of powder bed and surface of solid at bottom of powder bed. On the case of copper powder bed, the phase-by-phase different laser absorption rate values must be considered. By considering the difference, the extinguish of melt pool for the narrow hatch pitch could be simulated. An example of ANSYS MAPDL code is attached.

Keywords: PBF - LB, selective laser melting, pure copper, laser absorption,

1. はじめに

レーザビーム式粉末床溶融法 (Laser Beam Powder Bed Fusion ; PBF-LB) は金属 3D 積層造形法の一つで金属粉体を極薄く平滑に敷き詰めた粉末床 (パウダーベッド) 上にレーザビームを照射, 走査して 3D モデルの断面を溶融凝固させることを繰り返して積層し三次元形状の金属部品を製造する加工法である. PBF-LB 法による造形物は, 現在, 内部欠陥が生じることがある. 内部欠陥とは, 粉体層がレーザ照射により十分に解せず空気が残った未融解溶融欠陥, レーザ照射によるキーホール形成の残存によるガス空隙, 溶融した金属が凝固する際に欠乏する凝固割れが主なものである. 図 1 にレーザビームを粉体層と既に凝固した部分の両方にまたがって照射した際のレーザ走査方向に垂直な断面の模式図を示す. 灰色の金属溶融部分, いわゆる, 溶融池と点線で示す既凝固部が離れている際には双方の間に未溶融欠陥が生じる恐れがある. レーザビーム照射による溶融金属の蒸発に伴う反跳力

(Recoil Pressure) により溶融金属中央に窪みが生じるが, これが崩れる時に内部に空隙を残すとガス空隙となる. 凝固割れは溶融池と凝固部の境界にかかる応力により生じる場所が変化するが, 金属の成分, 性質の影響が大きい.

いずれの欠陥もレーザビーム照射に伴う粉体層の溶融凝固現象を理解してレーザビーム照射条件を含む造形条

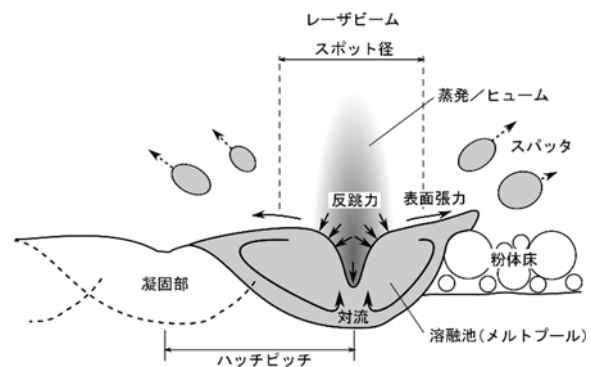


図 1 LB-PBF 過程の溶融池断面の模式図

原稿受付 2019年4月10日

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

E-mail ikeshoji.tt@hiro.kindai.ac.jp

件を最適化することで根絶することが望まれる。そのために、造形条件を変化させた多数の試行がなされるが、現在では数値解析技術の進歩と相まって、PBF・LB過程の熔融凝固現象を理解するため、あるいは、最適な造形条件を探索するために数値解析を援用した手法がとられている。

PBF・LB過程の熔融凝固現象を含めた数値解析では、固相、液相、粉体層の異なる相(Phase)が相互に変化する相変化を取り扱い、レーザー照射と走査による加熱と冷却を境界条件とする過渡伝熱解析を実施する必要がある。このような粉体層を含んだ相変化と過渡伝熱解析を取り扱う市販の汎用数値解析ツールは少なく、多かれ少なかれ改造を行う必要がある。その際に、汎用有限要素解析ソフトANSYSはスクリプト言語MAPDLを備えているため柔軟に対処ができる。

本稿ではANSYS MAPDLによる熔融凝固現象を含めたPBF・LB過程の数値化解析についてレーザー加熱境界条件の負荷の仕方について実装方法を述べる。

2. 粉体床のレーザー吸収率

固体や液体へ照射されたレーザービームは表面で一部が反射され、残りが内部に吸収される。吸収されるレーザー強度の割合はレーザーの波長と固体の物性により異なる。また、吸収されたレーザーのエネルギーは、一般に、表面からの深さにより指数関数的に減衰し、数マイクロメートル程度でほぼ0となる。

一方で、粉体層へ照射されたレーザービームは表面で一部が反射されるが粉体層に空隙があるため粉体層の内部へ侵入する。内部へと侵入したレーザービームは粉体層内部で反射と吸収を繰り返す。このため、固体や液体よりも深くまで減衰されずに伝わる。粉体層に照射されたレーザービームの吸収は基本的には表面からの深さにより指数関数的に減衰するが、粉体層の空隙率と平均粒形によってはほぼ0となるのは数百マイクロメートル程度の深さとなる。特筆すべきことは粉体層表面の下側数十マイクロメートルの深さでは減衰せず、逆に、吸収率が上昇する^(1,2)。これは粉体層に空隙から侵入したレーザービームが粉体層内部で乱反射するためと考えられている。

粉体床(パウダーベッド, Powder Bed)では粉体層がごく薄くその直下に既に凝固した固体が存在する。図2に示すように、(a)固相表面、(b)液相表面とともに、(c)粉体層表面、(d)粉体層内部、(e)粉体層底部固相表面と領域分けして考える必要がある。(d)粉体層内部でのレーザー吸収率は前述の吸収率のピーク値を考慮する必要がある。また、(e)の吸収率値は(d)の値に固体表面の吸収率を考慮する必要

があると考えられる。

粉体層のレーザー吸収率値は実験的に測定を試みた例⁽³⁾もあるが、粉体層はごく薄いため実験的に求めることは困難である。そのため、過渡伝熱解析における境界条件の参考値には、粉体層へのレーザービーム照射を模擬したレイトレーシング・シミュレーションにより求められている⁽⁴⁾。

3. MAPDLによる粉体床のレーザー吸収率

過渡伝熱解析の有限要素法では固体、液体、粉体層も有限要素に分割して、レーザー照射部は要素を発熱させる境界条件を付加する。照射したレーザービームの強度を P 、レーザービームの強度密度分布 ρ 、レーザー吸収率 ϵ とすると、境界条件とする発熱量は

$$q = P \times \rho \times \epsilon$$

となる。

レーザー吸収率 ϵ は前述の(a)–(e)により異なる値を割り当てる。図3に示すように、レーザービームが当たっている固体表面を含む要素、液体表面が当たっている要素、粉体層表面の要素、粉体層内部の要素、粉体層底部の固体の要素となる。図からもわかるように、固体表面と液体表面の有限要素の下側の有限要素は発熱脅威条件は付加しない。これは、固体表面や液体表面へのレーザービームの侵入深さが数マイクロメートルであることを反映している。付録1にMAPDLにてInconel718粉体床の吸収率の設定を例示する。このようなコードを物性値を設定する箇所に挿入する。

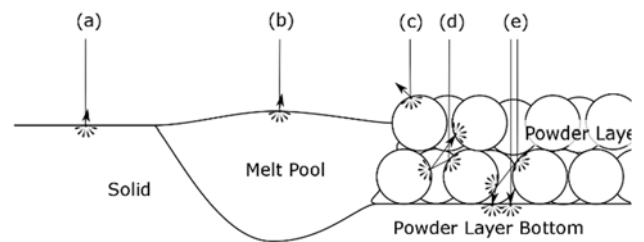


図2 レーザー吸収率と相。(a)固相表面、(b)液相表面、(c)粉体層表面、(d)粉体層内部、(e)粉体層底部固相表面

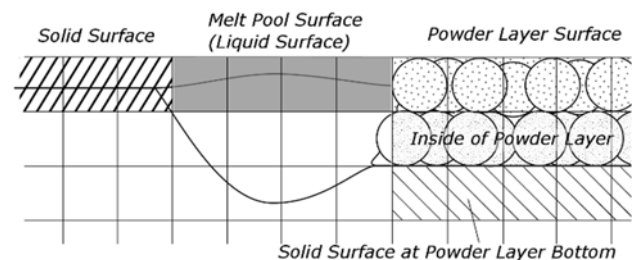


図3 有限要素と相毎に異なるレーザー吸収率の割当て

レーザービームの強度密度分布 ρ , いわゆる, レーザプロファイルは通常の PBF-LB 過程ではシングルモードレーザーを用いるためガウス分布とする.

レーザーの光強度は

$$I(r, z) = \frac{c\epsilon|A|^2}{2} \left(\frac{w_0}{w}\right)^2 \exp\left(-\frac{2r^2}{w^2}\right)$$

ここで, レーザビーム中心からの半径方向距離: r , 軸方向距離: z , 光速: c , 誘電率: ϵ , スポットサイズ(ビーム半径) : w とする.

$I(r, z) = I(0, z)\exp(-2r^2/w^2)$ なので, $I(w, z) = I(0, z)\exp(-2)$. であり,

$$P = P_0 \left(1 - \exp\left(-\frac{2r^2}{w^2}\right)\right)$$

となり,

$$\rho(r) = \frac{P}{P_0} = 1 - \exp\left(-\frac{2r^2}{w^2}\right)$$

となる.

$\rho(r)$ は1点に関するものであり, 有限要素に付加する発熱条件は有限要素がレーザービームにあたっている表面の領域での値なので

$$\rho = \iint \rho(x, y) dx dy$$

と面積積分する必要がある.

本稿では計算を簡易化するため単純化のため有限要素を6面体要素としレーザービームが照射されている領域では同じ大きさとしている. この重積分はガウス・ルジャンドル公式による求積にて掲載している. これによりもめられた離散的なレーザービームの強度密度分布 ρ を図4に示す. この数値はあらかじめ計算し, 数値表をテキスト形式で用意する. その数値表の読み込み部を付録2に例示する.

レーザー吸収率とレーザープロファイルの設定が MAPDL コードに読み込まれた後に要素発熱境界条件を付加する必要がある. 付録3にそのコードを例示する. 前述のように, 固体と液体は表面要素だけであるが, 粉体層は内部にまでレーザーが侵入することを実装しなければならない. 注意すべき点は粉体層や粉体層底部でも表面側に固体要素や液体要素がある場合には発熱境界条件は付加しないことである. この固体, 液体の下に隠れた粉体要素を除くため, 逆に, 表面が粉体である要素からその下側の要素を選択していく. MAPDL では隣接要素が座標軸上でどの向きにあるのかを調べることができない, つまり, レーザ照射とは反対側(下側)にあることが直接調べることができない. そのため, 表面粉体要素と隣接する要素の中心位置を

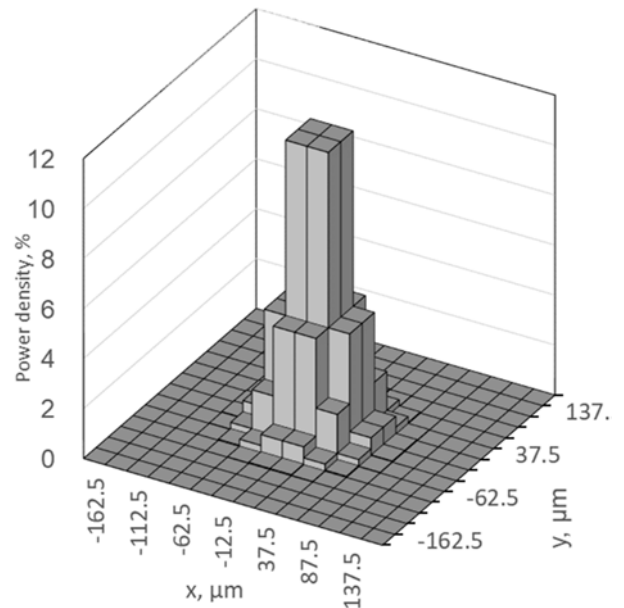


図4 ガウシアン分布によるレーザー強度分布比較して探索している.

4. 純銅のPBF-LB過程シミュレーション^⑤

純銅は固体のレーザー吸収率が極めて低く, かつ, 熱伝導率が高いため PBF-LB による造形が困難な材料の一つである. 同じ理由で数値シミュレーションでは粉体床と固体のレーザー吸収率を異なる値としないと正確な熔融池の形状が再現できない. そこで, 相毎に異なるレーザー吸収率を設定した数値シミュレーションの良い例となる.

図5に示すように純銅の粉体床上にレーザーを4往復走査させた状況を模擬した. 粉体層厚さ 50μm, レーザスポット径はφ0.1mm, レーザ出力は 800W, 走査速度は 300mm/s とし, ハッチピッチを 0.05, 0.10, 0.15mm とした. 純銅の純銅の固体, 液体, 粉体の物性値は図6に示すように温度依存性を持せ, さらに, 要素内節点温度が融点を超す, または, 低下することにより粉体, 液体, 固体の相変態を模擬している(図7).

相毎に異なるレーザー吸収率は液相表面 0.15, 粉体表面 0.101, 粉体内部, 固体表面 0.03, 粉体層下側固体 0.01 とした.

その結果, ハッチピッチにより異なる温度分布が得られた. 図8では赤色の領域が純銅の融点以上であり熔融池を表している. 上側の最初の復路の走査中の熔融池の形状はハッチピッチが 0.05, 0.10mm とともに同じ形状を示したが, 2回目の往路ではハッチピッチ 0.05mm では熔融池が消失した. また, ハッチピッチ 0.10mm でも熔融池は

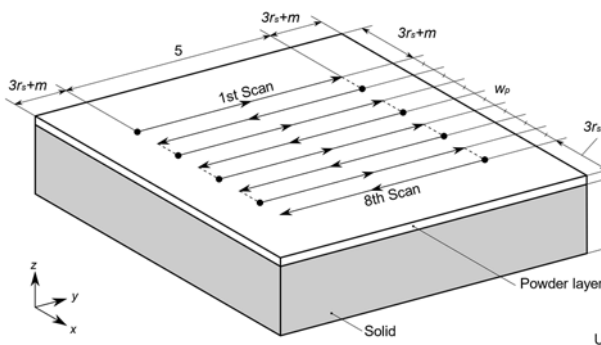


図 5 計算領域

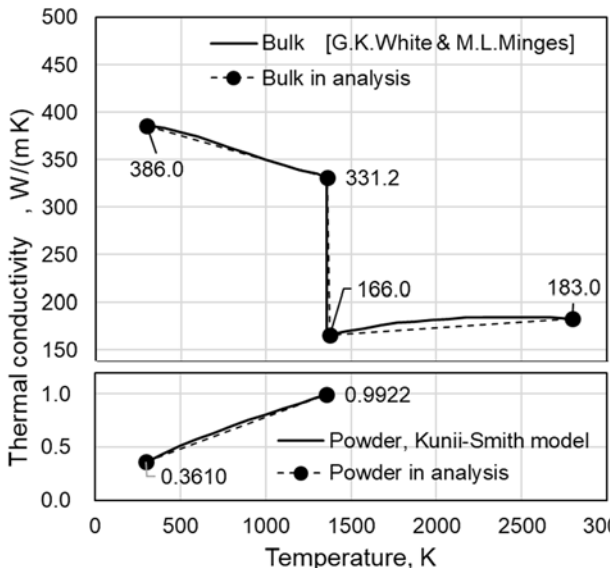
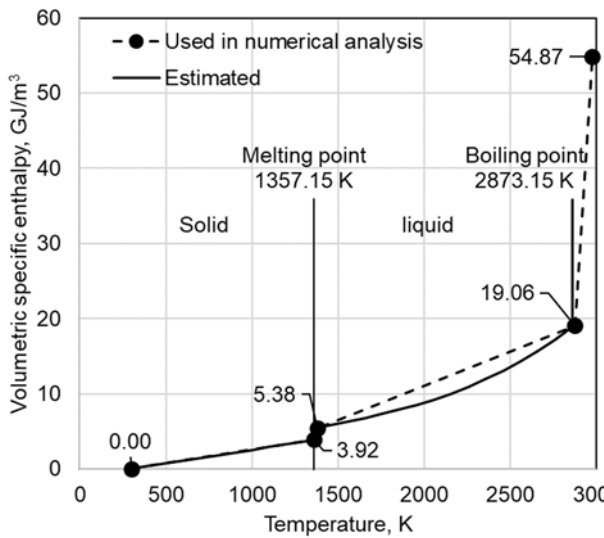


図 6 純銅の固体、液体、粉体の物性値

小さくなった。熔融池の長さ、幅、深さの寸法を計算すると熔融池の形成の不安定は明瞭に示された(図 9)。2 回目の往路(#3)と 3 回目の往路(#5)で、ハッチピッチ 0.05mm

のときには熔融池の長さ、幅、深さが 0 となり、消失したことが示された。一方、ハッチピッチ、0.10、0.15mm では最初の往路、復路(#1, #2)のみが熔融池が大きく、それ以降は小さいことが示された。

これはレーザー走査により粉体床が熔融凝固し固体が形成されたためである。最初の走査では粉体のみレーザービームが当たっているため、比較的大きなレーザー吸収率により大きい熔融池が形成されたが、2 回目以降は形成された固体部分と粉体部分にまたがてレーザービームが当たるため、固体の低いレーザー吸収率により十分な熔融がなされなかったと考えられる。さらに、純銅は熱伝導率が高いため、固体部分に吸収されたレーザーのエネルギーは散逸して固体表面の温度を上昇させなかったことが重なったからだと考えられる。

このように、相毎に異なるレーザー吸収率を設定することで熔融池形状をより正確に予測できると考えられる。

5. まとめ

レーザービーム式粉末床熔融法のレーザー走査部近傍の数値シミュレーションにおいてはレーザー吸収率を固体、液体、粉体(表面、内部)、粉体床底部に分けて割り当てることにより、より正確な熔融池形状を予測できることを純銅粉体の例を用いて説明した。

参考文献

- (1) Li X, Tan W. Numerical Investigation of Laser Absorption by Metal Powder Bed in Selective Laser Sintering Processes. Solid Freeform Fabrication 2016: Proceedings of the 27th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference; Univ. Texas, Austin 2016. p. 219-35.
- (2) Kharanzhevskiy E, Kostenkov S. Modeling of laser radiation transport in powder beds with high-dispersive metal particles. J Alloy Compd. 2014;586:S246-S9.
- (3) 古本 達明, 上田 隆司, 細川 晃, 阿部 諭, Childs THC. 積層造形用金属粉末の各種物性測定に関する研究: 熱伝導率およびレーザー光吸収率の簡易測定方法の提案. 精密工学会誌. 2007;73(5):558-62.
- (4) Boley CD, Khairallah SA, Rubenchik AM. Calculation of laser absorption by metal powders in additive manufacturing. Appl Optics. 2015;54(9):2477-82.

(5) Ikeshoji T.T, Nakamura K, Yonehara M, Imai K, Kyogoku H. Selective Laser Melting of Pure Copper. JOM. 2018;70(3):396-400.

付録 1 MAPDL によるレーザ吸収率設定

001 : ! 吸光率
002 : ems_mls = 0.4 ! 液相表面 吸光率 0.4
003 : ems_ptp = 0.6 ! 粉体表面 吸光率 0.6
004 : ems_pbt = 0.3 ! 粉体底面 吸光率 0.3
005 : ems_bsf = 0.2 ! 固体表面 吸光率 0.2
006 : ems_btm = 0.1 ! 粉体層下側固体 吸光率 0.1

付録 2 MAPDL によるレーザプロファイル設定

001 : !! Laser profile
002 : *dim,xyl,,4
003 : ! x,y 座標最大値, 最小値取得
004 : *VREAD,xyl(1,1),%LASERPROFILE%,txt,IJK,4,1,,1
005 : (4F12.8)
006 : xL1 = xyl(1)
007 : xL2 = xyl(2)
008 : yL1 = xyl(3)
009 : yL2 = xyl(4)
010 : ! テーブルサイズの取得
011 : *dim,nnl,,2
012 : *VREAD,nnl(1,1),%LASERPROFILE%,txt,IJK,2,1,,2
013 : (2F3.0)
014 : NNLX = nnl(1) ! table size in x
015 : NNLY = nnl(2) ! table size in y
016 : ! テーブルの取得
017 : *DIM,edat,ARRAY,NNLX*NNLY ! 配列の定義
018 : *DIM,lsrprf,table,NNLX,NNLY,,X,Y,,
019 : *TREAD,lsrprf(0,0),%LASERPROFILE%,txt,4
020 : ! 発熱条件用配列
021 : LOCAL,11,CART,0,0,0 ! レーザ照射部中心位置に座標系を作成
022 : coefl = laser_w/es2**3 ! (レーザ出力)/(細分割要素体積)
023 : *DIM,heatfn_mls,table,NNLX,NNLY,,X,Y,,11 ! 熔融池表面要素発熱
024 : *DIM,heatfn_ptp,table,NNLX,NNLY,,X,Y,,11 ! 粉体層上部要素発熱
025 : *DIM,heatfn_pbt,table,NNLX,NNLY,,X,Y,,11 ! 粉体層下部要素発熱
026 : *DIM,heatfn_bsf,table,NNLX,NNLY,,X,Y,,11 ! 固体(比溶解)要素発熱
027 : *DIM,heatfn_btm,table,NNLX,NNLY,,X,Y,,11 ! 粉体層

下側固体要素発熱

028 :
*TOPER,heatfn_mls,lsrprf,ADD,lsrprf,ems_mls*coefl,0,0
029 : *TOPER,heatfn_ptp,lsrprf,ADD,lsrprf,ems_ptp*coefl,0,0
030 : *TOPER,heatfn_pbt,lsrprf,ADD,lsrprf,ems_pbt*coefl,0,0
031 : *TOPER,heatfn_bsf,lsrprf,ADD,lsrprf,ems_bsf*coefl,0,0
032 :
*TOPER,heatfn_btm,lsrprf,ADD,lsrprf,ems_btm*coefl,0,0

付録 3 MAPDL による要素発熱境界条件負荷

001 : ESEL,S,TYPE,,1,1
002 : BFEDELE,ALL,ALL,ALL
003 : !!! レーザ照射による発熱の設定
004 : LOCAL,11,CART,xloc(i),yloc(i),0 ! レーザ照射部中心位置に座標系を作成
005 :
006 : ! 発熱境界条件適用
007 : ! parameter list
008 : ! enum ! 選択した要素の数
009 : ! emin ! 選択した複数要素の中の最小要素番号
010 : ! edat ! 選択した要素の番号を格納する配列
011 : ! Components subset list
012 : ! nmlt ! Nodes above liquidus
013 : ! emlt ! Elements melt pool
014 : ! emls ! Elements melt pool surface
015 : ! eptp ! Elements powder layer at top
016 : ! epbt ! Elements powder layer at bottom
017 : ! ebsf ! Elements bulk surface
018 : ! ebtm ! Elements bulk under powder layer
019 : num_nmlt = 0 ! Numbee of nodes w/ temp. > liquidus
020 : num_emlt = 0 ! Number of elements melt pool
021 : num_emls = 0 ! Number of elements melt pool surface
022 : num_eptp = 0 ! Number of elements powder layer at top
023 : num_epbt = 0 ! Number of elements powder layer at bottom
024 : num_ebsf = 0 ! Number of elements bulk surface
025 : num_ebtm = 0 ! Number of elements bulk under powder layer
026 : ! 熔融池
027 : NSEL,S,TEMP,liquidus,, ! 液相点以上の節点
028 : *GET,num_nmlt,NODE,,COUNT
029 : *IF,num_nmlt,GT,0,THEN
030 : CM,nmlt,NODE ! Nodes above liquidus
031 : ESEL,S,TYPE,,1,1
032 : ESEL,R,MAT,,1,3
033 : ESLN,R,1,ALL ! 液相点以上の節点で囲まれた要素のみ選択

```

034 : *GET,num_emlt,ELEM,,COUNT
035 : *IF,num_emlt,GT,0,THEN
036 : CM,emlt,ELEM ! Element melt pool
037 : *ENDIF
038 : ESEL,R,CENT,Z,-es2,0,0
039 : ESEL,R,CENT,X,xL1,xL2
040 : ESEL,R,CENT,Y,yL1,yL2
041 : *GET,num_emls,ELEM,,COUNT
042 : *IF,num_emls,GT,0,THEN
043 : CM,emls,ELEM ! Element melt pool
surface
044 : *ENDIF
045 : *ENDIF
046 : ALLSEL
047 : ! 非溶融固相
048 : ESEL,S,TYPE,,1
049 : ESEL,R,MAT,,1,2
050 : ESEL,R,CENT,Z,-es2,0,0
051 : ESEL,R,CENT,X,xL1,xL2
052 : ESEL,R,CENT,Y,yL1,yL2
053 : *IF,num_emlt,GT,0,THEN
054 : CMSEL,U,emlt ! 溶融要素を除外
055 : *ENDIF
056 : *GET,num_ebsf,ELEM,,COUNT
057 : *IF,num_ebsf,GT,0,THEN
058 : CM,ebsf,ELEM ! Element bulk surface
059 : *ENDIF
060 : ALLSEL
061 : ! 粉体層上部の粉体(溶融していない粉体層)
062 : ESEL,S,TYPE,,1
063 : ESEL,R,MAT,,3 ! 粉体を選択
064 : ESEL,R,CENT,Z,-es2,0,0 ! 粉体の最上層を選択
065 : ESEL,R,CENT,X,xL1,xL2 ! レーザプロファイルの
範囲内を選択
066 : ESEL,R,CENT,Y,yL1,yL2
067 : *IF,num_emlt,GT,0,THEN
068 : CMSEL,U,emlt ! 溶融要素を除外
069 : *ENDIF
070 : *GET,num_eptp,ELEM,,COUNT
071 : *IF,num_eptp,GT,0,THEN
072 : CM,eptp,ELEM ! Element powder top layer
073 : *ENDIF
074 : ! 粉体層下部の粉体(上部が溶融していない粉体
層)
075 : num_=num_eptp ! 選択要素数の取得
076 : *IF,num_,GT,0,THEN
077 : CMSEL,S,eptp
078 : ! 溶融していない上部粉体層の要素番号を格納
079 : *GET,emin,ELEM,,NUM,MIN ! 最小要素番号の取得
080 : edat(1)=emin
081 : *DO,ii,2,num_ ! 粉体層上部の粉体の要素
番号取得
082 : emin=ELNEXT(emin) ! emin の次に大きな要素
番号で emin を置き換え
083 : edat(ii)=emin ! 要素番号を格納
084 : *ENDDO
085 : ALLSEL
086 : ! z 方向下側の隣接要素探索
087 : *DO,jj,1,num_
088 : ez = edat(jj)
089 : *GET,zmin,ELEM,edat(jj),CENT,Z
090 : *DO,i i,1,6,1 ! (注意) 六面体要
素を仮定
091 : *GET,ei,ELEM,edat(jj),ADJ,ii ! 隣接要素番号取得
092 : *IF,ei,GT,0,THEN ! 隣接要素が存在す
れば...
093 : *GET,zi,ELEM,ei,CENT,Z ! 中心 z 座標を取得
094 : *IF,zi,LT,zmin,THEN ! z 座標が現在の最小
の z 座標
095 : zmin = zi ! より小さければ交換
096 : ez = ei
097 : *ENDIF
098 : *ENDIF
099 : *ENDDO
100 : edat(jj)=ez ! 最小の z 座標を
持つ要素を取得
101 : *ENDDO
102 : ESEL,S,ELEM,,edat(1)
103 : *DO,ii,2,num_
104 : ESEL,A,ELEM,,edat(ii)
105 : *ENDDO
106 : *GET,num_epbt,ELEM,,COUNT
107 : *IF,num_epbt,GT,0,THEN
108 : CM,epbt,ELEM ! Element
powder bottom layer
109 : *ENDIF
110 : *ENDIF
111 : ! 粉体層下部の固相
112 : *DO,jj,1,num_ ! z 方向下側の
隣接要素探索
113 : ez = edat(jj)
114 : *GET,zmin,ELEM,edat(jj),CENT,Z
115 : *DO,ii,1,6,1
116 : *GET,ei,ELEM,edat(jj),ADJ,ii
117 : *IF,ei,GT,0,THEN ! 隣接要素が存在す
れば...
118 : *GET,zi,ELEM,ei,CENT,Z
119 : *IF,zi,LT,zmin,THEN
120 : zmin = zi
121 : ez = ei

```

```

122 : *ENDIF
123 : *ENDIF
124 : *ENDDO
125 : edat(jj)=ez
126 : *ENDDO
127 : ESEL,S,ELEM,,edat(1)
128 : *DO,ii,2,num_
129 : ESEL,A,ELEM,,edat(ii)
130 : *ENDDO
131 : CM,ebtm,ELEM ! Elements bulk under powder layer
132 : *GET,num_ebtl,ELEM,,COUNT
133 :
134 : ALLSEL
135 :
136 : *IF,num_emls,GT,0,THEN
137 : CMSEL,S,emls
138 : BFE,all,HGEN,1,%heatfn_mls% ! 溶融池表面要素の発熱
139 : *ENDIF
140 : *IF,num_eptp,GT,0,THEN
141 : CMSEL,S,eptp
142 : BFE,all,HGEN,1,%heatfn_ptp% ! 粉体層上部要素の発熱
143 : *ENDIF
144 : *IF,num_epbt,GT,0,THEN
145 : CMSEL,S,epbt
146 : BFE,all,HGEN,1,%heatfn_pbt% ! 粉体層下部要素の発熱
147 : *ENDIF
148 : *IF,num_ebsf,GT,0,THEN
149 : CMSEL,S,ebsf
150 : BFE,all,HGEN,1,%heatfn_bsf% ! 固体（比溶融）要素の発熱
151 : *ENDIF
152 : *IF,num_ebtl,GT,0,THEN
153 : CMSEL,S,ebtl
154 : BFE,all,HGEN,1,%heatfn_btl% ! 粉体層下側固体要素の発熱
155 : *ENDIF
156 : CMDELE,nmlt
157 : CMDELE,emlt
158 : CMDELE,emls
159 : CMDELE,eptp
160 : CMDELE,epbt
161 : CMDELE,ebsf
162 : CMDELE,ebtl
163 : ALLSEL

```

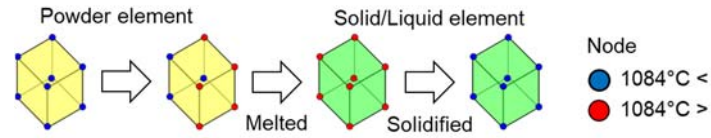


図 7 固体、液体、粉体の変換

Spot $\varnothing 0.10\text{mm}$, Scan speed 300 mm/s
 Power 800W, Hatch pitch 0.05mm

Hatch pitch 0.10mm

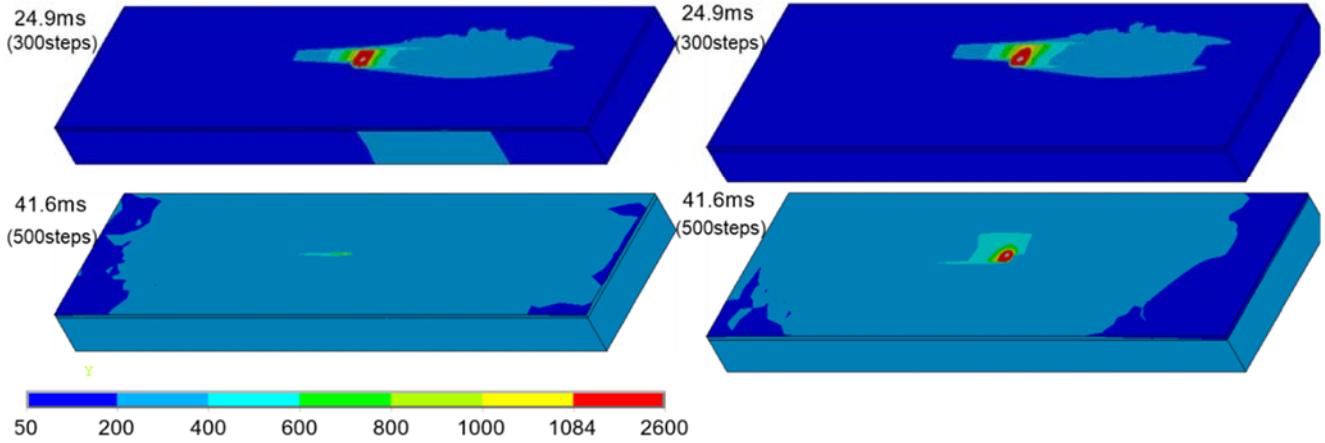


図 8 計算領域上面での温度分布

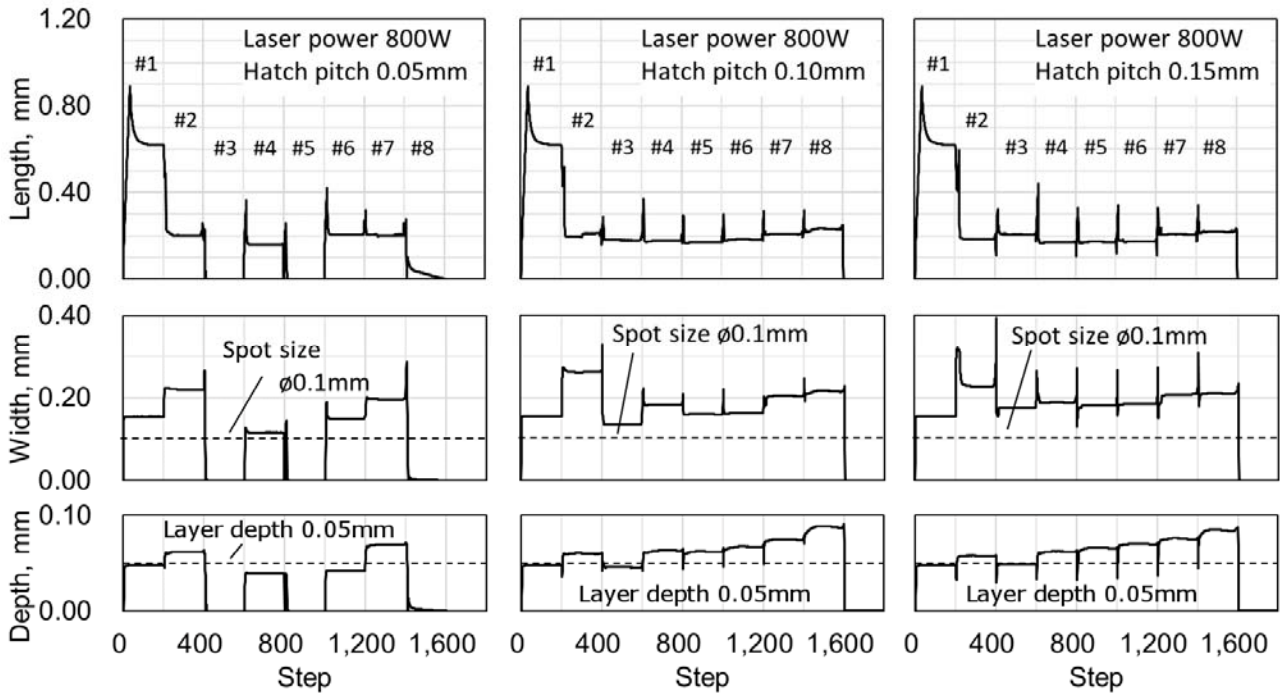


図 9 溶融池寸法の変化