

SLM 造形物製作における欠陥・凝固割れ抑制造形パラメータの探索方法

Process Design for Defect and Solidification Cracking Suppression in Selevtive Laser Melting Process

北野萌一

Houichi Kitano

物質・材料研究機構

構造材料研究拠点

主任研究員

1 はじめに

SLM (Selective Laser Melting) プロセスは、金属粉末床にレーザをスキャンし、粉末を局所的に溶融、凝固することで、所望の3D形状を製作する金属3D造形技術である。SLMプロセスの特徴は、高い形状自由度で造形物を製作できることである。この特徴は、既存の方法では製作困難な形状の製品を製作可能、精密部品の一体製作が可能、剛性を保ちつつ部材を軽量化可能といった利点に繋がる。さらに、材料の歩留まりも比較的良好いため、単位重量当たりの価格が高い材料の活用も可能である。

以上の通り、様々な利点を有するSLMプロセスであるが、課題もある。それは、造形物に空孔（ポロシティ）等の欠陥や割れが生じる可能性があることである^{1,3)}。SLMプロセスでは、材料の局所的な加熱と急冷による凝固が繰り返されるためである。造形物に欠陥や割れが発生すると、造形物の特性は大きく影響を受ける。そのため、欠陥や割れを抑制するた

めの材料選択や造形パラメータ（レーザ出力やスキャン速度）の選定が重要である。

本稿では、これまでに著者らが提案したNi基合金を対象とした、SLM造形物の欠陥および凝固割れを抑制するための造形パラメータ探索手法^{4,5)}を紹介する。ここで、凝固割れは、冷却過程の溶融領域内において固相と液相が共存する高い温度域で生じる割れであり、SLMプロセスにおいて最も初期に生じる割れである。凝固割れが発生するとその後の造形過程において、さらなる割れの発生が助長されるため、低減すべき重要な割れである。

2 SLMプロセスで生じる欠陥および割れの分類

SLMプロセスで生じる可能のある、欠陥および割れの分類を表1に示す。本分類はSLMプロセスと同様に、局所的な金属加熱が行われる溶接プロセスで生じる欠陥、割れの分類

表1 SLMプロセスで生じる欠陥および割れの分類

	分類	原因	対策(材料組成の調整以外)
欠陥	空孔 (ポロシティ)	周囲ガス、金属蒸気の溶融池内への巻き込み	- 溶込み深さの低減 - 溶融池流動状態の安定化
	融合不良	未溶融部の残存	- 溶込み深さの増加 - 隣接レーザパス間距離(ハッチスペース)の低減
割れ	凝固割れ	凝固過程で、残存液相が収縮応力に耐えきれずに開口	溶融池内部の冷却速度、応力挙動の制御
	液化割れ	粒界近傍偏析部が溶融し、収縮応力により開口	溶融池近傍の冷却速度、応力挙動の制御
	延性低下割れ	再結晶で生じる直線上の粒界が開口	材料組成の調整以外の対策は困難
	ひずみ 時効割れ	熱処理時の析出相に起因した応力により開口	熱処理条件(昇温速度、保持温度)の適正化

を参考にして、著者らが定義したものである。表1の分類では、欠陥は材料の分離を伴わないもの、割れは液相、固相に関わらず材料の分離を伴うものとして定義している。表中には、それぞれの欠陥、割れ発生メカニズムを示すとともに、材料組成調整以外、すなわち造形パラメータ調整の観点からの対策について概要を示している。

以降で紹介する欠陥・凝固割れ抑制造形パラメータ探索フローでは、欠陥については、空孔と融合不良の両方を、割れについては凝固割れのみを考慮して、それらが生じないパラメータの探索を行う。凝固割れ以外の割れを抑制するための造形パラメータ探索方法は今後の検討課題である。

3 欠陥・凝固割れ抑制造形パラメータ探索フローの概要⁵⁾

図1に、これまでに提案した欠陥・凝固割れ抑制プロセスパラメータ探索フローの概要を示す。この図に示す通り、提案フローは1パス造形部の溶融部形状、凝固割れの有無を評価し、その結果を用いて欠陥抑制造形パラメータマップの作成と有限要素解析 (Finite Element Method) による凝固割れ発生予測を行う。最後に、凝固割れおよび欠陥が発生しないと考えられる造形パラメータ (レーザー出力、スキャン速度) 範囲を決定する。ここで、1パス造形とは、溶接プロセスに関する基礎検討で一般に用いられるビードオンプレート溶接と同様に、レーザーを1方向に1回のみスキャンして溶融・凝固部を得るプロセスである。1パス造形は、極めて短時間で実施することができるという利点がある。また、詳細は後述するが、提案フローで得られる適正造形パラメータにより、多層多パスから成る造形物を製作した際にも、欠陥および凝固割れがほとんど生じない造形が可能という結果が得られている。

提案フローの実施に必要なものは、レーザー出力とスキャン速度を変更して実施した1パス造形部の評価結果と、FEMを実施するための材料物性値である。これらの情報は、多数の造形パラメータにより実際の造形物を製作して評価を行う場合と比べて、比較的短時間かつ低コストに収集することができる。

以降では、1パス造形部評価結果を参照した欠陥抑制造形パラメータマップの作成方法と凝固割れ予測方法について、より詳細に解説する。

4 欠陥抑制造形パラメータマップ作成方法

提案フローでは、空孔、融合不良が生じる原因となる現象として、Keyholing現象、Balling現象、Lack of fusion現象の

3つの現象を考えた。Keyholing現象は溶融領域の幅に比べて深さが極めて大きい場合に、溶融領域底部にポロシティが残存する現象である^{6,7)}。Keyholing現象は、高レーザー出力かつ低スキャン速度な造形条件で発生する。Balling現象は、溶融池の流動が不安定になって溶融金属が球状となって凝固したり^{8,9)}、溶融領域外縁に切欠き状の溝が生じる現象である。Balling現象は高レーザー出力かつ高スキャン速度な造形条件で発生し、融合不良の原因となる。Lack of fusion現象は、粉末層を完全に溶融できない場合に発生する。これは、低レー

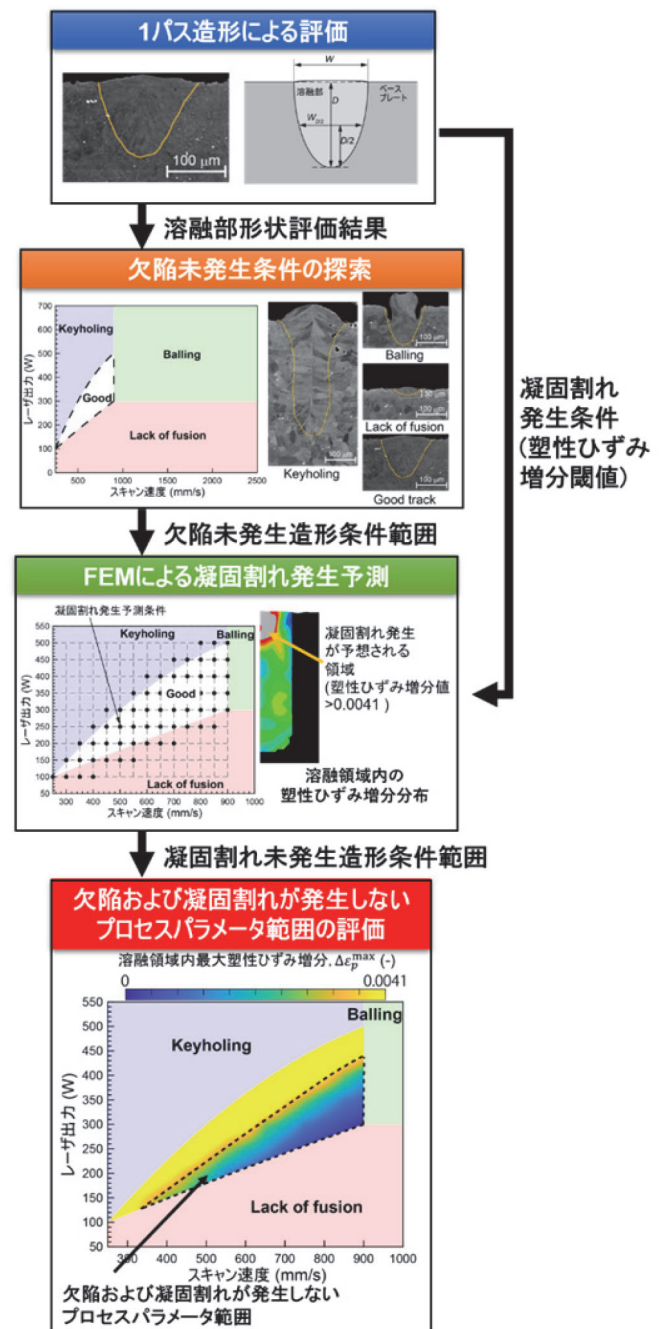
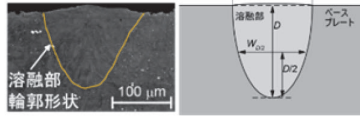


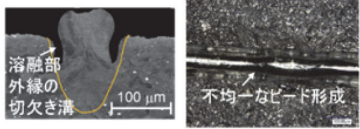
図1 欠陥・凝固割れ抑制造形パラメータ探索フローの概要 (Online version in color.)

-Keyholing発生条件範囲-

1パス造形試験における溶込み深さ D と溶込み幅 W の関係が、以下となる時にKeyholingが発生
 $D > 1.5 W$

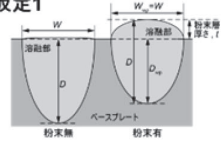
**-Balling発生条件範囲-**

1パス造形試験部の形状から定性的に判断(溶融部外縁の切欠き溝や不均一なビード形成の有無から評価)

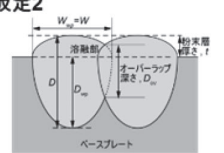
**-Lack of fusion発生条件範囲-**

仮定1: 粉末無造形部の溶込み深さ D と粉末有造形部の溶込み深さ D_{wp} の関係は、 $D = D_{wp} + t$ となり、粉末有無によって、溶込み幅は変化しない($W = W_{wp}$)。
 仮定2: 実造形時には隣接パス間のオーバーラップ深さ D_{ov} が粉末層厚さ t より小さい場合に、Lack of fusionが発生

仮定1



仮定2



上記二つの仮定より、ハッチスペース h 、粉末層厚さ t 、粉末無造形部の溶融部形状 D 、 W が、以下となる時にLack of fusionが発生

$$h > W \sqrt{1 - \frac{t}{D}}$$

図2 Keyholing現象、Balling現象、Lack of fusion現象の発生基準 (Online version in color.)

ザ出力かつ高スキャン速度な造形条件や、隣接レーザパス間の距離 (ハッチスペース) が大きい場合に発生する。

以上の考え方は、Seedeらが高張力鋼の造形で生じる欠陥抑制を目的に考案した、造形パラメータマップ作成方法¹⁰⁾を参考にしている。Seedeらは、1パス造形試験結果と数値シミュレーションを組み合わせる造形パラメータマップを作成したが、提案フローでは、1パス造形試験結果のみを参照する簡便な手法を採用した。

図2に、提案フローにおけるKeyholing現象、Balling現象、Lack of fusion現象の発生基準を示す。Keyholing現象については、従来研究等を参考に、1パス造形で得られる溶融部形状の深さ D と幅 W の関係が $D > 1.5 W$ となる範囲で発生するとした。Balling現象については、1パス造形部の定性評価により、切欠き上の溝やビード形状がスキャン長手方向に対して不均一になっている条件範囲を、Balling発生条件範囲として定めた。Lack of fusion現象については、溶融部形状の深さ D と幅 W 、粉末層厚さ t 、ハッチスペース h の関係が $h > W \sqrt{1 - t/D}$ となる場合に生じるとした。ここで、以上の欠陥発生推定のために用いる1パス造形部の溶融部形状の深さ D と幅 W は、粉末層を用いない1パス造形部で評価することを前提としている。

以上の判定基準により、1パス造形部の溶融部形状評価結果から、実造形において欠陥が生じない条件範囲を定めることができる。

5 熱弾塑性有限要素解析を用いた凝固割れ発生予測方法

提案フローでは、溶接プロセスにおける凝固割れ発生メカニズムおよび発生予測を参考に、1パス造形プロセスを模擬した熱弾塑性FEMで得られる弾塑性挙動から、凝固割れ発生の有無を評価する。

凝固割れは、図3に示す通り、溶融金属の凝固過程で柱状

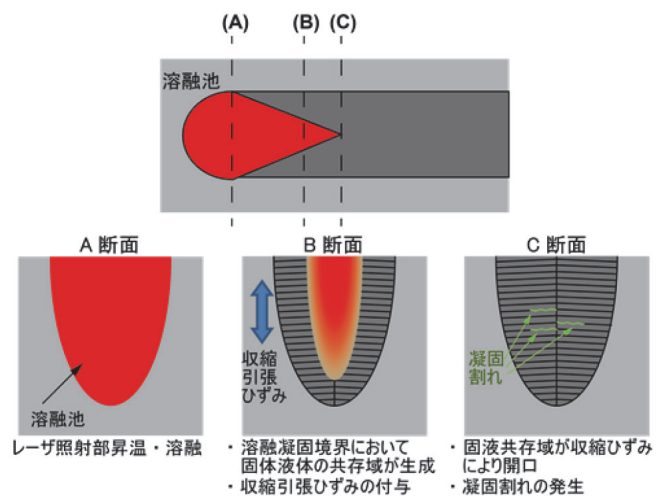


図3 凝固割れ発生のメカニズム (Online version in color.)

晶の境界面に残留する液相が凝固完了直前の収縮ひずみ抵抗しきれずに開口して発生する。液相が残留するのは、凝固に伴い不純物元素の偏析や低融点化合物 (Ni基超合金の場合にはNiS等) が生成するためである。溶接プロセスで生じる凝固割れ発生と相関のある因子として、固液共存温度域 (液相線温度 $T_L \geq$ 温度 $T \geq$ 固相線温度 T_S) 内で生じるひずみ量が提案されている。柴原らは、図4に示す通り、固液共存温度域における塑性ひずみの増加量 (塑性ひずみ増分 $\Delta \epsilon^p$) が閾値 $\Delta \epsilon_{cr}$ を超えた場合に、凝固割れが発生する可能性があることを示している¹¹⁾。

そこで、SLMプロセスにおいても同様に、1パス造形プロセスを模擬した熱弾塑性FEMから得られる、溶融領域内の塑性ひずみ増分 $\Delta \epsilon^p$ を評価することで凝固割れ発生の有無を予測することとした。閾値 $\Delta \epsilon_{cr}$ は、実際1パス造形における凝固割れ発生の有無と熱弾塑性FEMで得られる塑性ひずみ増分の溶融領域内最大値とを比較することで決定した。

6 HastelloyX造形における欠陥・凝固割れ抑制造形パラメータの探索

欠陥・凝固割れ抑制プロセスパラメータ探索フローの実施例として、HastelloyX造形における適正プロセスパラメータ探索を行った結果を示す。

6.1 欠陥抑制造形パラメータマップの作成

欠陥抑制造形パラメータマップ作成のための情報を収集するために、粉末を用いずに1パス造形を実施した。表2に、実施した造形条件を示す。ベースプレートにはHastelloyX相当材 (100×100×3 mm) を用いて、最大出力700 Wのファイバレーザ (スポット径80 μm) を備えたSLM装置を使用して実施した。表中の未実施条件は、明瞭な溶込みが観察されなかったため検討から除外した条件である。1パス造形物断面の走査電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope : SEM) 観察により、溶融部形状を評価した。

図5に溶融部形状評価結果から、欠陥が発生しないと考えられる条件範囲 (Good) を決定した結果を示す (粉末層厚さ: 30 μm、ハッチスペース 100 μm) として算出)。Goodで示さ

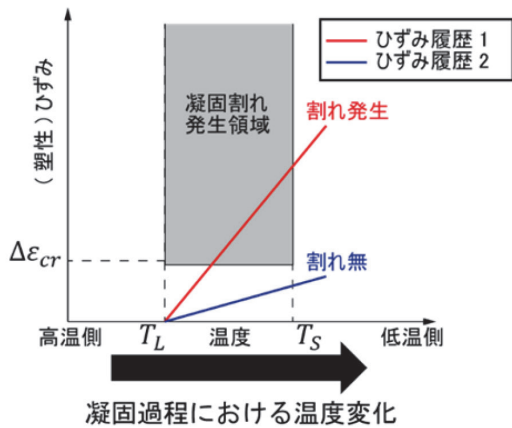


図4 凝固課程におけるひずみ履歴と凝固割れ発生の有無の関係 (Online version in color.)

表2 欠陥抑制造形パラメータマップ作成のために実施した粉末無1パス造形条件 (○が造形実施)

		スキャン速度 (mm/s)				
		250	500	900	1500	2000
レーザ出力 (W)	50	○	○	○	-	-
	100	○	○	○	-	-
	180	○	○	○	○	○
	300	○	○	○	○	○
	500	○	○	○	○	○
	700	○	○	○	○	○

れた領域内の造形条件を採用することで、空孔および融合不良が生じない造形が可能となる。ただし、この領域内の造形条件でも凝固割れが生じる可能性がある。

6.2 欠陥抑制造形パラメータマップ内の凝固割れ未発生条件範囲の探索

凝固割れ未発生条件の探索は前述の通り、熱弾塑性FEMで得られる塑性ひずみ増分評価により実施した。熱弾塑性FEMには図6に示す2次元1/2モデルを用いた。材料物性値はHastelloyXの特性に関する文献値等を参考に決定した。図6中の入熱領域は、粉末 (HastelloyX相当材) 層をベースプレート上に敷いて実施した1パス造形部の溶融部形状を参考に決定し、造形条件ごとに変更した。実施した1パス造形条件を表3に示す。ここで、粉末層の厚さは50 μmで一定とした。

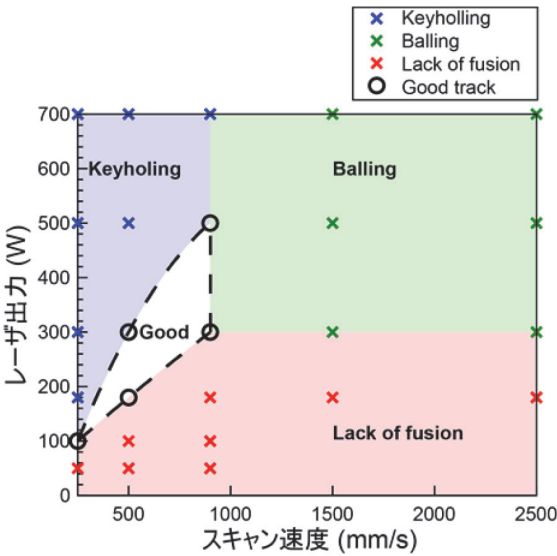


図5 欠陥抑制造形パラメータマップ作成結果⁵⁾ (Online version in color.)

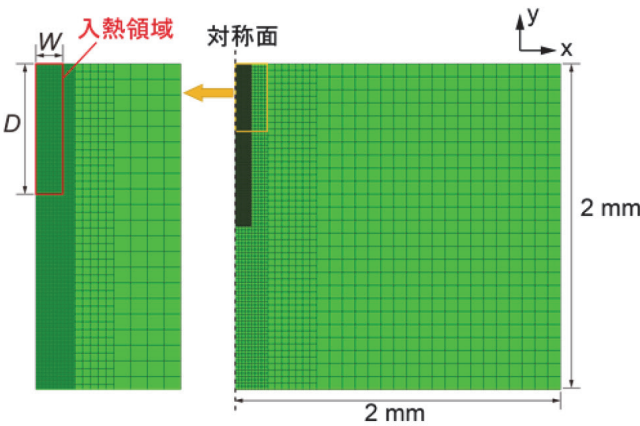


図6 2次元1/2有限要素モデル (Online version in color.)

各条件で製作した造形部断面のSEM観察により凝固割れの有無の評価も行った。

熱弾塑性解析で得られる塑性ひずみ増分の最大値と、実際

表3 凝固割れ未発生条件範囲の探索のために実施した粉末有1パス造形条件 (○が造形実施)

		スキャン速度 (mm/s)			
		250	500	900	1500
レーザー出力 (W)	100	○	○	○	-
	180	○	○	○	-
	300	○	○	○	○
	500	○	○	○	○
	700	-	○	○	○

の1パス造形における凝固割れ有無の関係を整理した結果を図7に示す。この図より、最大塑性ひずみ増分値が0.0041以下であれば、凝固割れが発生しないと考えられ、以降では凝固割れ発生閾値 $\Delta \epsilon_{cr} = 0.0041$ とした。ただし、1パス造形部断面の凝固割れ観察結果より、ほぼすべての凝固割れは図6のy方向に開口していることがわかったため、塑性ひずみ増分値はy方向の値のみを評価した。

図6のFEMモデルを用いて、6.1節で得られたGood領域近傍の造形条件における、溶融領域内最大塑性ひずみ増分を評価した結果 (予測実施条件は図8 (a) を参照) を図8 (b) に示す。図8 (b) の最大塑性ひずみ増分マップは、図8 (a) の条件での解析結果を内挿して表示したものである。この図からわかるようにGood領域内においても、凝固割れが発生する

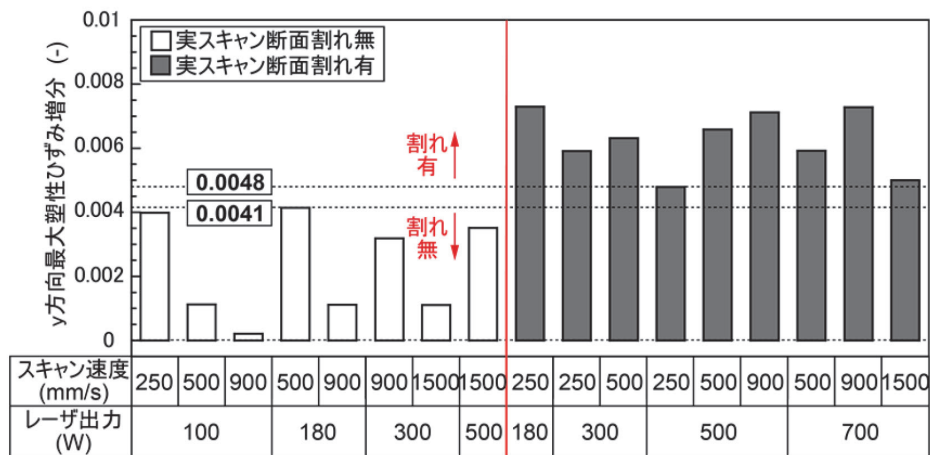


図7 熱弾塑性解析で得られる塑性ひずみ増分の最大値と1パス造形における凝固割れ有無の関係⁴⁾ (Online version in color.)

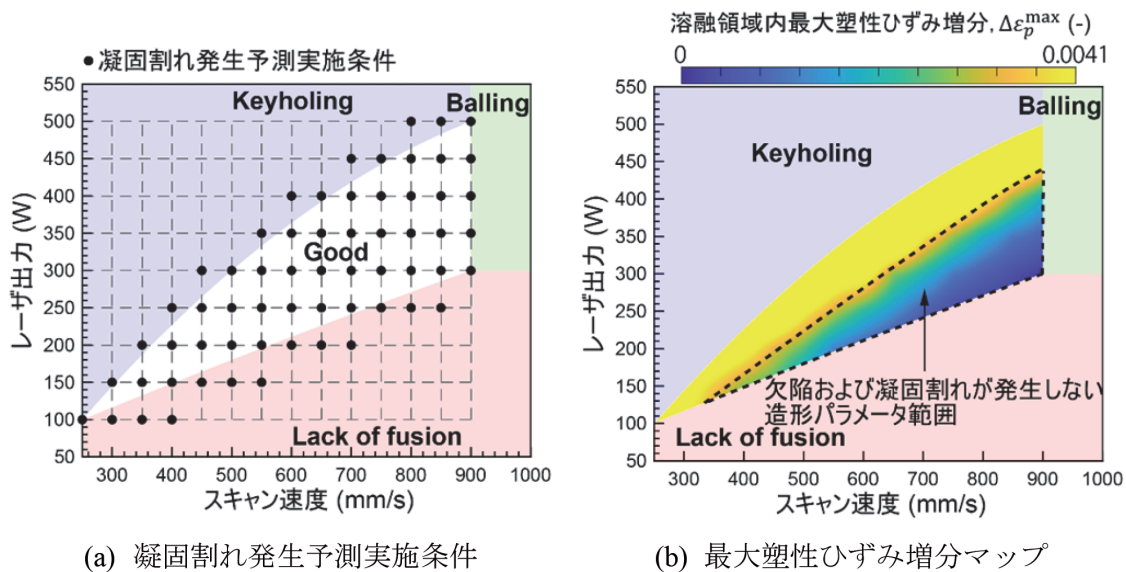


図8 欠陥および凝固割れが発生しない造形パラメータ範囲の評価⁵⁾
(a) 凝固割れ発生予測実施条件、(b) 最大塑性ひずみ増分マップ (Online version in color.)

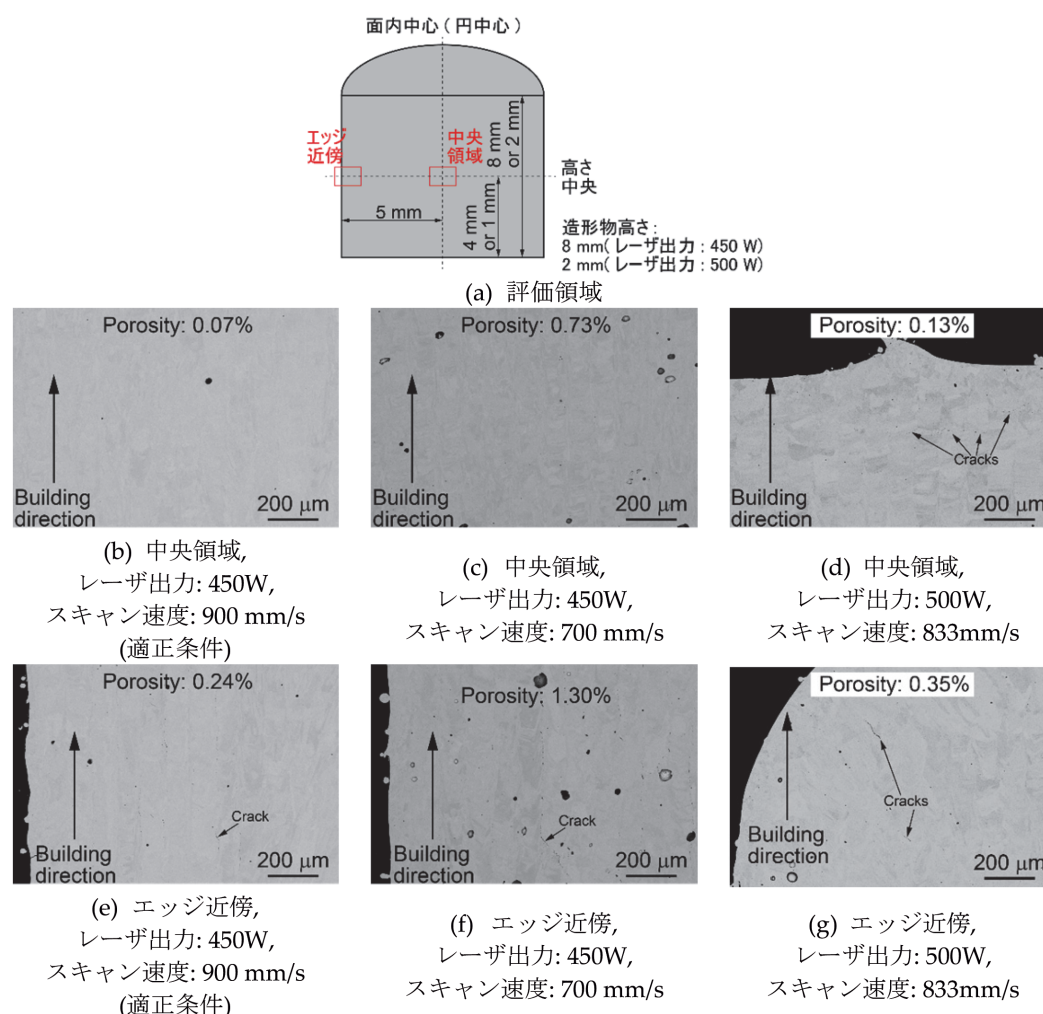


図9 造形物断面の評価結果⁵⁾ (a) 評価領域、(b) 中央領域、レーザー出力:450W、スキャン速度:900 mm/s (適正条件)、(c) 中央領域、レーザー出力:450W、スキャン速度:700 mm/s、(d) 中央領域、レーザー出力:500W、スキャン速度:833 mm/s、(e) エッジ近傍、レーザー出力:450W、スキャン速度:900 mm/s (適正条件)、(f) エッジ近傍、レーザー出力:450W、スキャン速度:700 mm/s、(g) エッジ近傍、レーザー出力:500W、スキャン速度:833 mm/s (Online version in color.)

可能性のある領域が認められ、欠陥抑制に加えて凝固割れ抑制の観点からも、造形条件を適正化する必要があることがわかる。

6.3 造形パラメータ探索結果の有効性検証

図8に示した結果の有効性検証として、欠陥および凝固割れが発生しない造形パラメータ範囲から、最もレーザー出力を大きくできる条件(造形能率が最も高いと考えられる条件)を適正条件として、レーザー出力:450W、スキャン速度900 mm/sと定め、実際に円柱造形物を製作した。ここで、円柱部の直径は10 mmとして、粉末層厚さ30 μ m、ハッチスペース100 μ mとした。比較対象として、適正条件よりスキャン速度が遅い条件(レーザー出力:450 W、スキャン速度:700 mm/s)と適正条件よりレーザー出力が大きく、スキャン速度が小さい条件(レーザー出力:500 W、スキャン速度:833

mm/s)での製作も行った。レーザー出力が450 Wの場合には円柱高さを8 mmとし、500 Wの場合には造形プロセスが不安定であったため、円柱高さを2 mmとした。

図9に製作した造形物の中央断面のSEM観察結果を示す。SEM観察結果は、造形物の高さ中央における円中心近傍(中央領域)と円周近傍(エッジ領域)の二箇所について示している。図9(d)上部および図9(e)、(f)、(g)の左部の領域は、造形物が存在しない領域(背景が写り込んでいる領域)であり、ポロシティの面積率の計算からは除外している。図9(g)において造形物の左部が丸みを帯びているのは、造形物上面近傍における造形プロセスが不安定なためである。まず図9(b)～(d)からわかるように、中央領域においては、適正条件により欠陥および割れがほとんど生じない造形が行えていることがわかる。適正条件以外の場合、適正条件の場合と比べて、ポロシティの面積率が数倍以上であり、さらに割れ

も観察された。以上の結果より、本研究で提案した造形パラメータ探索フローにより、実造形物の欠陥および凝固割れを抑制可能な造形パラメータを探索できることがわかった。

一方で、図9 (e) ～ (f) からわかるように、例え適正条件を採用したとしても、エッジ領域では若干のポロシティや割れが観察された。これは、エッジ領域ではレーザの折り返しにより熱履歴が1パス造形部とは大きく異なるためである。断面全体に渡って欠陥および割れを抑制する造形パラメータの探索方法は今後の検討課題である。

おわりに

本稿では、SLMプロセスの課題である欠陥や割れの発生を抑制するための、造形パラメータ探索方法について紹介した。SLMプロセスの造形パラメータの探索は、一般に時間やコストがかかるものであるため、提案手法が各産業分野におけるSLMプロセス活用の手助けになれば幸いである。凝固割れ以外のメカニズムで生じる割れや、エッジ領域の取り扱い方法については今後の検討課題であり、提案探索方法のさらなる発展を目指して、検討を進めている。

謝辞

本研究の一部は、戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」(管理法人：国立研究開発法人 科学技術振興機構 (JST)) の助成により実施されました。また、研究の実施にあたり、物質・材料研究機構 渡邊 誠氏および草野 正大氏、芝浦工業大学 辻井 正和氏にご助言、ご助力頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) H.Wu, D.Zhang, B.Yang, C.Chen, Y.Li, K.Zhou, L.Jiang and R.Liu : J. Mater. Sci. Technol., 36 (2020), 7.
- 2) N.J.Harrison, I.Todd and K.Mumtaz : Acta Mater., 94 (2015), 59,
- 3) G.Marchese, G.Basile, E.Bassini, A.Aversa, M.Lombardi, D.Ugues, P.Fino and S.Biamino : Materials, 11 (2018), 11.
- 4) H.Kitano, M.Tsujii, M.Kusano, A.Yumoto and M.Watanabe : Additive Manufacturing., 37 (2021), 101742.
- 5) H.Kitano, M.Kusano, M.Tsujii, A.Yumoto and M.Watanabe : Crystals, 11 (2021), 578.
- 6) S.Shrestha, T.Starr and K.Chou : J. Manuf. Sci. Eng., 141 (2019), 071004.
- 7) J.D.Roehling, A.Perron, J.L.Fattebert, T.Haxhimali, G.Guss, T.T.Li, D.Bober, A.W.Stokes, A.J.Clarke, P.E.A.Turchi, M.J.Matthews and J.T.McKeown : JOM, 70 (2018), 1589.
- 8) R.Li, J.Liu, Y.Shi, L.Wang and W.Jiang : Int. J. Adv. Manuf. Technol., 59 (2012), 1025.
- 9) P.Yadav, O.Rigo, C.Arviu, E.Le Guen and E.Lacoste : Crystals, 10 (2020), 524.
- 10) R.Seede, D.Shoukr, B.Zhang, A.Whitt, S.Gibbons, P.Flater, A.Elwany, R.Arroyave and I.Karaman : Acta Mater., 86 (2020), 199.
- 11) T.Harada, K.Ikushima, M.Shibahara, F.Kimura and T.Morimoto : Q.J. Jpn Weld. Soc., 33 (2015), 190s.

(2022年8月31日受付)