

# デジタル技術を用いた金属積層造形プロセスの高度化

－ 深層学習とプロセスシミュレーションによる金属3Dプリンタの課題改善－

高野昌宏\* 吉田勇太\* 宮川広康\*

金属積層造形プロセスにおける造形物の品質の安定化および改善を目的に、造形物の空隙率をインプロセスで推定する手法を開発した。レーザー照射時に発生する火花に着目し、カメラで撮影した火花動画から、深層学習を用いて空隙率の推定を行った。その結果、十分な精度で空隙率を推定できることを確認した。さらに、空隙率が規定値より大きくなった場合に、同じ造形層でレーザーを再照射する方法を実施し、空隙率が改善できることを示した。また、造形物の割れや反りに対するヒータ温度の影響を調べることを目的に、プロセスシミュレーションを実施した。プロセスシミュレーションでは、材料の相変態を考慮した材料物性を定義し、非定常熱伝導解析、及び非線形構造解析により、造形物に生じる反りや応力を調べた。結果として、ヒータ温度を造形中に可変制御することで、造形物に生じる引張応力を大きく低減できることを明らかにした。

キーワード: 金属積層造形, 粉末床溶融結合法, 深層学習, シミュレーション

Advancement of the Metal Additive Manufacturing Process Using Digital Technology  
- Improvement of Metal 3D Printer Problems Using Deep Learning and Process Simulation -

Masahiro TAKANO, Yuta YOSHIDA and Hiroyasu MIYAKAWA

For the purpose of stabilizing and improving the quality of fabricating structures using metal additive manufacturing, the proposed method was developed for estimating their porosity in-process. Focusing on the sparks generated during laser irradiation, the porosity was estimated using deep learning from a video of the sparks taken by a camera. As a result, it was confirmed that the porosity could be estimated with sufficient accuracy. Furthermore, when the porosity became larger than the control value, re-irradiating of the same laminate layer with the laser showed that the porosity could be improved. In addition, a process simulation was carried out for the purpose of investigating the effect of the heater temperature on the cracking and warping of the fabricating structure. In the process simulation, the material properties were defined in consideration of the phase transformation of the material, and the warpage and stress generated in the fabricating structure were investigated by unsteady heat conduction analysis and nonlinear structural analysis. As a result, it was shown that the tensile stress generated in the fabricating structure could be greatly reduced through variable control of the heater temperature in-process.

Keywords: metal additive manufacturing, powder bed fusion, deep learning, simulation

## 1. 緒 言

近年、3Dプリンタが実用的な生産装置として活用され始めており、複雑形状が創製できる特徴を活かし、金型などの部品製造で実用化が進められている。しかしながら、金属積層造形は、粉末材料の溶融をとまなうプロセスであるため、他の工法と比べ、品質のばらつきが大きいことや、造形物に割れが生じることが問

題になっている。品質のばらつきに関しては、溶融池の温度分布測定<sup>1)</sup>やレーザー超音波で空隙欠陥をインプロセスで調べる方法<sup>2,3)</sup>などが提案されている。また、造形物の割れに関しては、相変態の現象を利用して、割れを抑制する研究<sup>4)</sup>が行われている。そこで本報告では、粉末床溶融結合方式の金属3Dプリンタ(OPM250L・(株)ソディック)を対象に空隙率をリアルタイムに推定する手法の開発、並びに造形物の割れの要因を調べるために実施した造形プロセスシミュレシ

\*機械金属部

ョンの結果について述べる。

## 2. 金属積層造形プロセスの見える化

### 2.1 空隙率推定手法の概要

金属積層造形プロセスでは、通常99.7%以上(空隙率0.3%以下)の相対密度が得られるが、内部には耐久性などの品質に影響する数十 $\mu\text{m}$ 程度の微小な空隙が生じる。この空隙のサイズや量は、造形中の装置の状態によって変化し、品質にばらつきが生じる原因となる<sup>5,6)</sup>。これは光学系の汚れや造形機内のヒュームの滞留などにより、造形物表面(レーザー照射位置)でのレーザーパワーやスポット径などが変化するためである。そこで、造形後にしか調べることができない空隙の状態を造形中にリアルタイムに診断する方法が求められている。本研究では、レーザー照射時に発生するスパッタ等の火花の状態が熔融状態と相間していると考え、火花の状態から造形物の空隙率を推定する手法を考案した<sup>7)</sup>。その概要を図1に示す。造形中に発生する火花を造形装置内天井に設置したカメラ(XCG-CG510C・ソニー株)で撮影し、火花粒子の形状などを粒子解析により数値化する。数値化した特徴量を入力値として、空隙率やレーザーパワー、スポット径をAIの手法の一つである深層学習によりインプロセスで推定する仕組みである。ここでは、表1に示すように粒子解析で求めた特徴量

表1 特徴量

特徴量	
1	輝度値
2	輝度値R
3	輝度値G
4	輝度値比G/R
5	X方向位置
6	Y方向位置
7	照射中心からの距離
8	近似楕円の軸比
9	伸び率
10	水力直径
11	周囲長
12	面積
13	輝度値130以上の個数
14	近似楕円の軸比2未満の個数
15	伸び率8以上の個数
16	全粒子個数

表2 ネットワーク構造

層	ニューロン数
入力層	16
1層(中間層)	300
活性化関数 Tanh	300
Dropout	300
2層(中間層)	200
活性化関数 Sigmoid	200
3層(中間層)	150
Batch Normalization	150
4層(中間層)	100
活性化関数 Leaky ReLU	100
5層(中間層)	50
活性化関数 Tanh	50
Batch Normalization	50
6層(中間層)	30
活性化関数 Sigmoid	30
7層(中間層)	12
活性化関数 Tanh	12
出力層	3

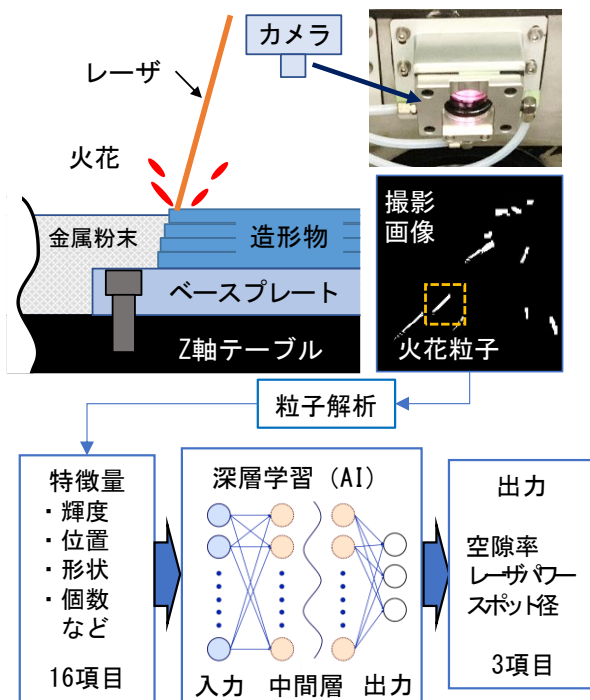


図1 考案した手法の概要

として、火花粒子の輝度値や位置、伸び率や面積などの形状を表すパラメータ、個数を選択した。また、深層学習のネットワークの構築には、汎用のソフトウェア(Neural Network Console・ソニーネットワークコミュニケーションズ株)を使用した。ネットワーク構造は、表2に示すように中間層を7層、最大ニューロン数を300とし、非線形性に対応する活性化関数や過学習などを防ぐためのDropout、学習を安定化させるBatch Normalizationを使用した<sup>8)</sup>。その構築に必要な学習データは以下の手順で取得した。

①レーザーパワー・スポット径を変更した様々な条件で火花動画を撮影する。

②その条件における造形物の空隙率を断面観察により測定する。

これらの結果から、入力値である火花粒子の特徴量と出力値である空隙率やレーザーパワー、スポット径の関係が求まる。これを教師データとして推定値と実測値の平均二乗誤差が最小になるように中間層のネットワークを構築する。本手法は、通常のカメラで火花の状態を撮影できるので、比較的安価にシステムの構築が可能である。

## 2. 2 推定結果

実験により取得したデータ(教師データ)をネットワークに学習させたときの誤差関数の推移(学習カーブ)を図2に示す。誤差関数は学習初期に大幅に低下した後、緩やかな低下を示し、適切に学習が行われていると確認できる。本手法の推定精度を検証するため、学習に用いていない約600点のデータから、空隙率やレ

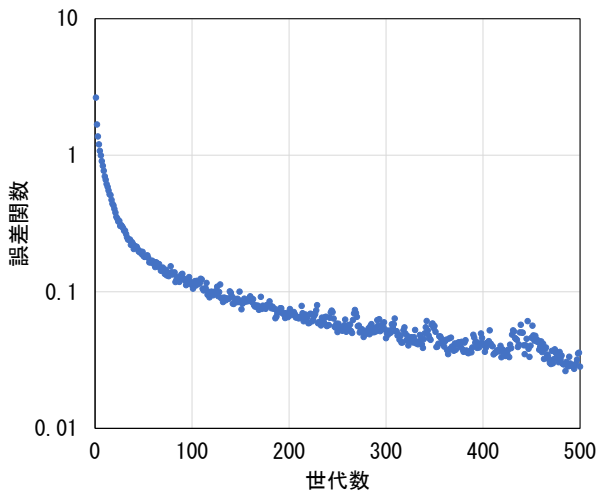


図2 学習カーブ

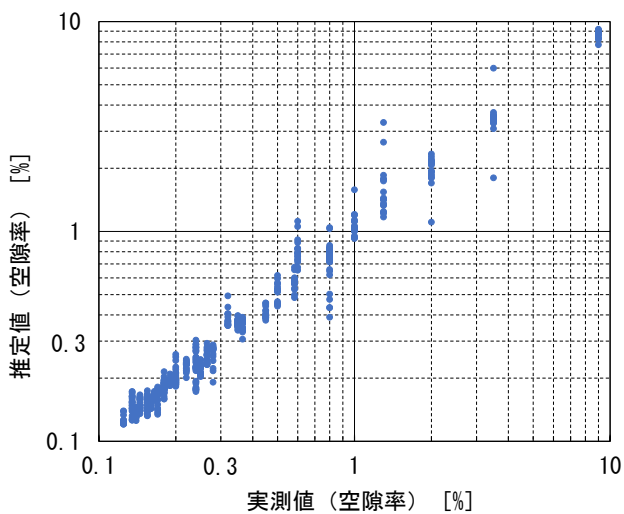


図3 空隙率の実測値と推定値の関係

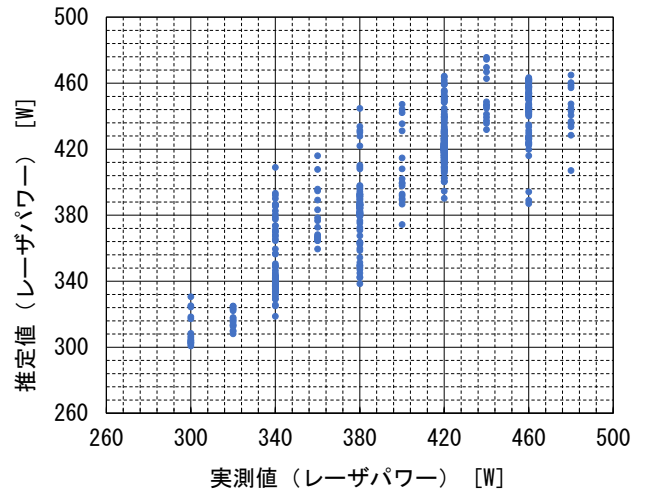


図4 レーザパワーの実測値と推定値の関係

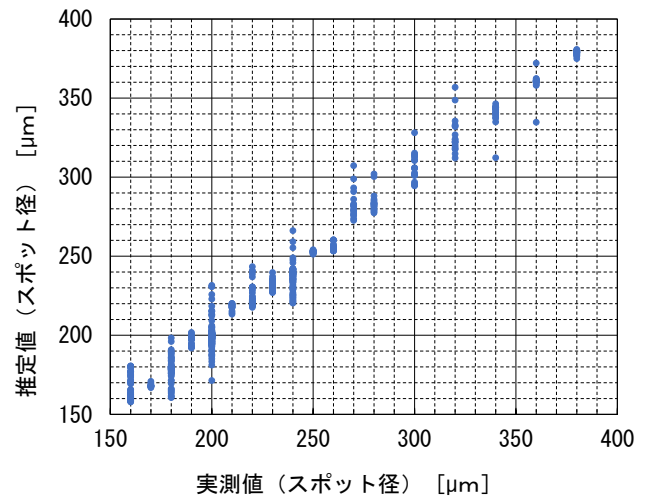


図5 スポット径の実測値と推定値の関係

ーザパワー、スポット径を推定した。それぞれの推定精度の評価結果を図3から図5に示す。造形の正常範囲内である0.3%以下の空隙率の推定精度は $\pm 0.056\%$  ( $3\sigma$ )であり、十分な推定精度が得られた。レーザースポット径も同様に概ね良好な推定精度が得られた。一方、レーザーパワーに関しては、パワーが高い場合の推定精度はやや低いが、パワーが低下したときは概ね推定できるという結果を得た。これらの結果から、レーザーの不具合診断やレーザー条件のフィードバックなどにも本手法は適用できる可能性が示された。

## 2. 3 フィードバックによる空隙率の改善

空隙率、及びレーザーパワー・スポット径を推定できることから、フィードバックによる空隙率改善の方法

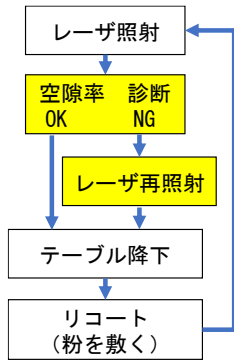
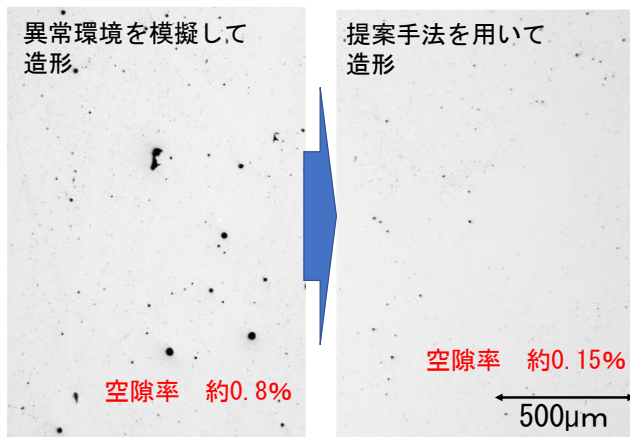


図6 フィードバック方法のフロー



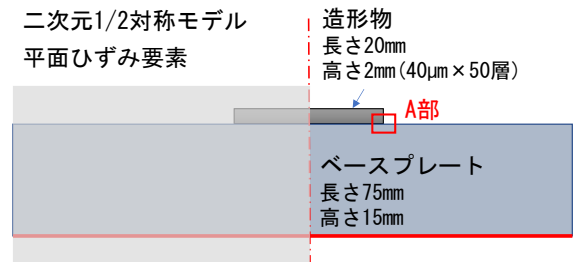
(a) フィードバック無 (b) フィードバック有  
図7 造形物の断面写真

を検討した。金属積層造形では、層を積み重ねて、形状を造形するプロセスである。そこで図6に示すように造形中に層ごとの空隙率を診断し、規定より多い場合は、次の層に移る前に、同じ位置にレーザーを再照射し、再熔融することで空隙率を改善できる可能性がある。このとき、レーザーパワーやスポット径の推定値が適正値から外れていれば修正を実施することとした。また既に造形された部分に照射することから熱が逃げやすいため、再照射時の走査速度を通常条件の1/2とし、十分に熔融ができる条件とした。本手法を用いたフィードバックの有効性を検証するため、通常200 $\mu\text{m}$ とするレーザースポット径をあえて300 $\mu\text{m}$ として異常状態を模擬した造形実験を実施した。フィードバック有りと無しの造形物の断面写真を図7にそれぞれ示す。フィードバック有りでは空隙が正常の状態に改善されており、本手法の有効性が確認された。

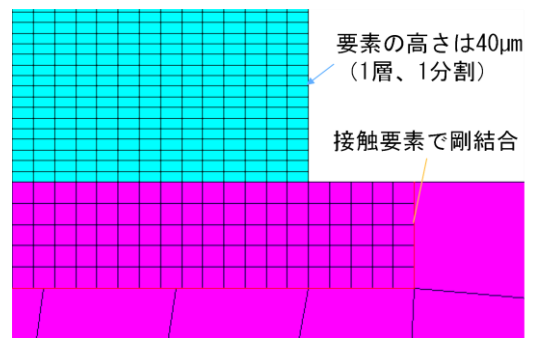
### 3. プロセスシミュレーション

#### 3. 1 シミュレーション方法

金属積層造形では、造形物に割れや反りが発生することも大きな問題となっている。これは熔融温度から室温までの冷却過程で生じる熱収縮が主な要因である。一方、炭素鋼などでは、冷却過程のある温度域でマルテンサイト変態による膨張が生じる。このため、造形物の温度を一定に保持するヒータ温度がマルテンサイト変態に影響する温度である場合、造形物の反りは大きく変化する。しかしながら、そのメカニズムは非常に複雑であり、反りや割れを予測することが難しい。そこで、金属積層造形プロセスのシミュレーションを実施し、ヒータ温度が反りや割れに及ぼす影響を調べた。解析モデルを図8に示す。解析は二次元1/2対称モデルとし、平面ひずみ要素を用いた。造形物のサイズは長さ20mm(1/2対称で10mm)、高さ2mm(40 $\mu\text{m}$ ×50層)とした。ベースプレートは長さ75mm(1/2対称で37.5mm)、高さ15mmとした。計算の負荷を考慮して造形物の要素の高さは1層1分割(40 $\mu\text{m}$ )とし、図8(b)に示す要素分割を行った。解析の手順は、造形物の温度を求める非定常熱伝導解析を造形終了まで実施し、その結果により得られた各時間及び位置における温度を解析条件とする非線形構造解析を実施した。積層時の各層における解析フローを図9に示す。最初に造形層1層の要素を生成し、熔融、熔融後の解析を行い、レーザー照射にともなう温度変化を解析する。その後、次の造形までの待



(a) モデル形状



(b) 要素分割図(A部)

図8 解析モデル

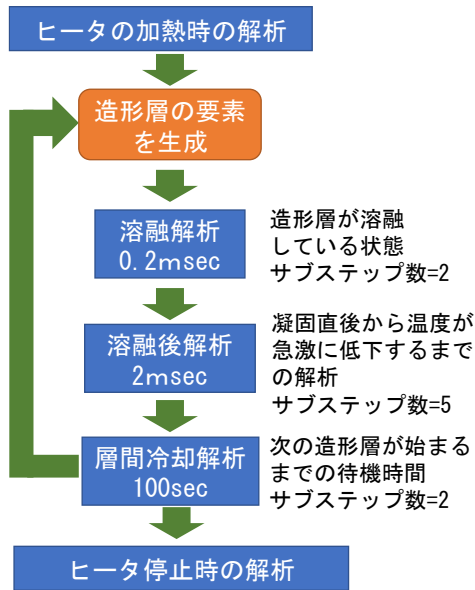


図9 積層時の解析のフロー

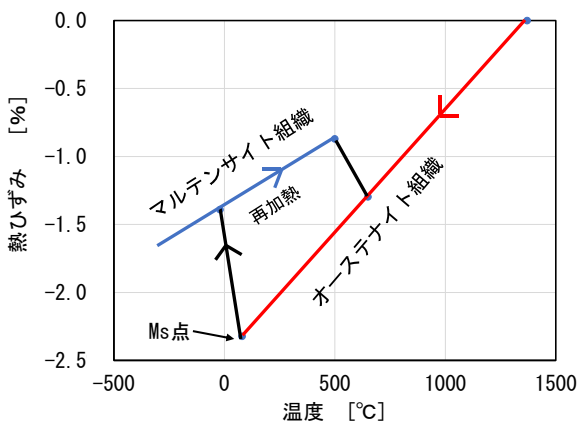


図10 熱ひずみと温度の関係

機時間も含めた層間冷却解析(100sec間)を実施する。これを各層毎に50回繰り返すことで積層造形プロセスを模擬する。また、ヒータによる加熱時の解析は積層前に行い、積層後にヒータ停止の冷却解析を実施する。これらの解析フローを非定常熱伝導解析、非線形構造解析それぞれで実施する。なお、非線形構造解析では、オーステナイト相、マルテンサイト相の相変態を考慮した材料物性(熱ひずみ、降伏応力、ヤング率、ポアソン比など)を定義した。材質はSUS420J2相当材とし、その熱ひずみと温度の関係を図10に示す。マルテンサイト変態開始温度Ms点や膨張量は、造形機内で測定した実測値をもとに決定した。溶融温度からの冷却過程はオーステナイト組織であり、80°Cでマルテンサイト変態が開始されると膨張が生じ、マルテンサイト変態

が完全に終了するまでは混合組織状態となっている。そのため、相分率に応じた材料物性を定義した。また、溶融領域は剛性がないとみなし、構造計算から除外し、かつ累積ひずみをリセットした。その他の領域に関しては、前の層のひずみが累積される状態とした。

### 3.2 シミュレーション結果

ヒータ温度を24°Cと120°Cとしてそれぞれ造形した場合の造形後の熱変形分布(上下方向)を図11に示す。造形物の反りは24°Cと120°Cとで反転する結果となった。120°Cで反りが反転した理由は、マルテンサイト変態開始温度Ms点よりも高いヒータ温度で造形したためである。降伏応力が小さいオーステナイト組織の状

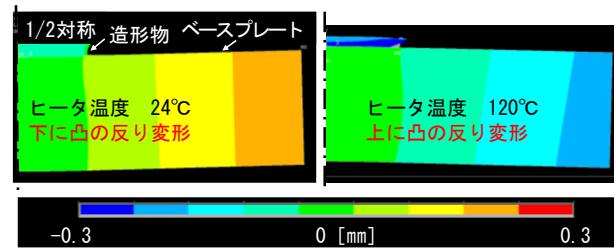


図11 熱変形分布

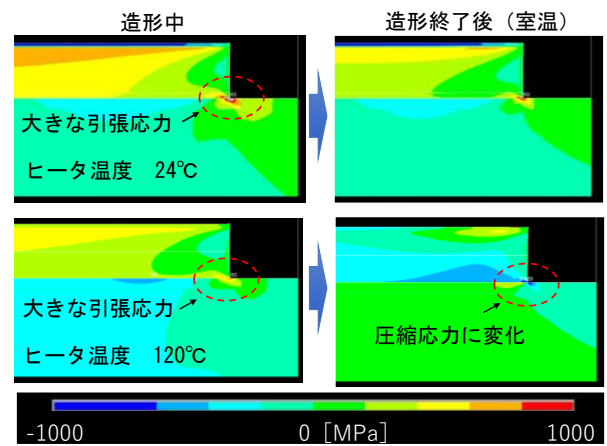
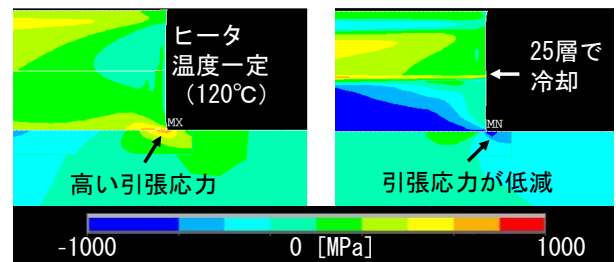


図12 応力分布



(a) ヒータ温度一定 (b) ヒータ温度変化

図13 応力分布の比較

態で造形したことで、造形物に生じる引張の残留応力が低く抑えられており、さらに造形終了後の冷却過程におけるマルテンサイト変態による膨張により、反りが反転した。したがって適正なヒータ温度を選択すれば反りを低減できる可能性が示された。次に割れへの影響を検証するため、造形物に発生する応力を調べた。図12に造形中および造形終了後の応力分布を示す。ヒータ温度が24℃および120℃のいずれの場合も造形中は、ベースプレート界面で高い引張応力が発生している。この引張応力は積層数が増えるにつれて増加するため、造形中に割れが生じる恐れがある。また、造形終了後の界面での残留応力分布は、120℃造形では大きく減少した。これは、積層終了後のヒータ停止時の冷却過程でマルテンサイト変態が生じたためである。そこで、120℃造形において、25層でヒータ温度を常温まで一旦冷却し、その後120℃まで再度昇温し、造形を継続した場合のシミュレーションを行った。その結果、図13に示すように造形中(50層目)の応力は引張から圧縮に変化したことが確認できた。これは、25層後の冷却過程で造形物がマルテンサイト変態により膨張し、引張応力が圧縮応力に変化したためである。したがって、適切なタイミングでヒータ温度制御を実行することで、積層数につれて増加する引張応力を圧縮応力に低下させることができるため、造形が難しい硬い材料や大きな造形物の割れを抑制できる可能性が得られた。以上より、ヒータ温度を造形中に変化させて造形することは、金属積層造形プロセスにおいて非常に有効であることが示唆された。

#### 4. 結 言

金属積層造形プロセスの高度化を目的に、深層学習による造形物のインプロセス空隙率推定、並びに造形プロセスシミュレーションによる割れの抑制について検討した。得られた結果を以下に示す。

- (1) 深層学習を用いてレーザー照射時の火花画像から空隙率を推定する手法を提案した。提案手法の空隙率の推定精度は $\pm 0.056\%$ 以下( $3\sigma$ )であった。
- (2) 造形層内でレーザーを再照射するフィードバック方法により、空隙率を改善できることを確認した。

- (3) 相変態を考慮した造形プロセスシミュレーションを実施し、ヒータ温度により造形物の反りが変化することを確認した。
- (4) 造形中にヒータ温度を変化させることで、造形物の引張応力を圧縮応力に変化させることが可能であることをプロセスシミュレーションにより確認した。

#### 謝 辞

本研究を遂行するに当たり、ご協力を頂いた株式会社ソディックに感謝します。

#### 参考文献

- 1) 竹下孝樹, 鈴木康夫. 品質保証のためのプロセスモニタリング技術. 日本機械学会2020年度年次大会講演論文集. 2020, F04106.
- 2) 佐藤治道, 小木曾久人, 佐藤直子, 清水透, 中野禪, 小原良和, 山中一司, パウダーベッド法で作製した3D積層造形物のレーザ超音波による特性評価. Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics, 2015, Vol. 36, 3J3-4
- 3) 小林徳康, 山本撰, 星岳志, 辻大輔. 金属積層造形におけるインプロセス非破壊検査に関する基礎検討. 溶接学会誌. 2021, Vol.90, No. 2, p. 102-106.
- 4) 新家一朗, 網岡宏至, 松村克也, 廣田敦司, 谷口圭一, 佐野定男, 岡崎秀二, 宮下泰行, 松本格, 安藤甫, 吉田勇太, 高野昌宏. 金属AMにおける相変態を用いた応力解放技術に関する研究. 精密工学会誌, 2020, Vol. 86, No. 2, p. 177-184.
- 5) 高野昌宏, 吉田勇太, 宮川広康, 谷内大世, 前川満良. 金属積層造形を用いた高耐久・高機能金型の開発. 石川県工業試験場研究報告. 2016, Vol. 65, p. 13-18.
- 6) Manatsu Ogawahara, Shinya Sasaki. Relationship between internal defect size and fatigue limit in selective laser melted Inconel 718. Mechanical Engineering Journal. 2021, Vol. 8, No. 1, p. 1-11.
- 7) 石川県, (株)ソディック. 造形状態推定システム, 方法, コンピュータプログラム, 及び学習モデルの学習方法. 特願2020-176102. 2020-10-20.
- 8) ソニーネットワークコミュニケーションズ(株). Neural Network Console Version 1.10 取扱説明書. 2017, p. 1-102.