

## レーザー再溶融を用いた金属粉末積層造形法における残留空孔分布および結晶方位制御

慶應義塾大学 ○松本 昂士, ◎柿沼 康弘, 小池 綾, 佐藤洋平

### 要旨

金属材料用の三次元造形法の一方式である指向性エネルギー堆積法は、造形物内部に空孔が含まれ、造形物強度が低いなどの問題がある。本研究ではこれらの問題を解決するため、造形物内部の結晶方位が乱れた領域で空孔が生じていることに着目し、レーザーのみを再照射することで結晶方位を変化させ、空孔低減と機械強度の向上を目指した。造形実験を通じて、提案手法が造形物全体の高密度化と表面硬さの向上を実現することを示した。

### 1. 結論

一般に金属 3D プリンタとして知られる金属粉末溶融積層造形法は、造形効率が高く、大型かつ複雑形状の部品が作製できるという特徴をもつ。そのため、自動車や航空宇宙分野における適用需要が高まっている。一方で、金属粉末溶融積層造形法では造形物内部に空孔が残存し、応力集中による強度低下が起きやすいといった課題がある<sup>[1]</sup>。本研究ではこの問題を解決するため、レーザー再溶融処理による空孔率低減および結晶方位制御による造形物の強度向上を目指した。

### 2. 指向性エネルギー堆積法

本研究では、金属粉末溶融積層造形法の一方式である指向性エネルギー堆積法を対象とする。指向性エネルギー堆積法では図 1 のようにキャリアガスとともに噴射された金属粉末が、レーザービームの照射により母材上に生じたメルトプールに供給されることで堆積される。この過程を目的形状の造形に合わせた経路上で繰り返し、積層を行う。

指向性エネルギー堆積法は造形効率が高く、複雑かつ大型の製品作製が可能であり、造形形状の自由度が高いといった利点から、自動車や航空宇宙産業における活用が期待されている<sup>[2]</sup>。

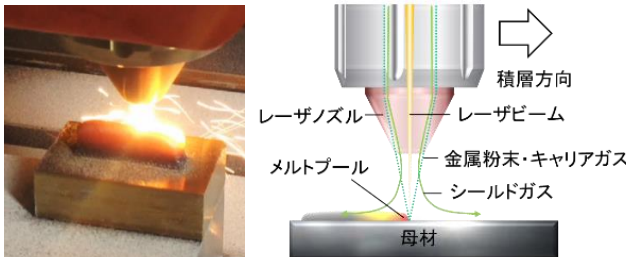


図 1 指向性エネルギー堆積法

### 3. 空孔率低減実験

#### 3.1 実験方法および実験条件

空孔率低減実験では、レーザー再溶融処理が造形物内部の空孔に与える影響を実験的に評価した。10 層ごとにレーザーで造形物上部を再溶融したもの、していないものを表 1, 2 の条件の下、それぞれ作製した。図 2 の切断線でアプレシブジェット加工機により切断し、その断面を粒子径 1 μm のダイヤモンドスララーを用いた鏡面研磨した。その後、光学顕微鏡により造形物断面画像を得た。造形物断面画像は二値化すると、空孔部分が黒く表示されるため、総画素数に対する黒色画素数の比を空孔率として算出した。また、二値化画像からガウス窓による畳込積分を行うことで図 3 のような空孔分布を表すカラーマップを作成した。本実験ではこれらの空孔率およびカラーマップに基づいて評価を行った。

表 1 積層条件

レーザー出力	W	1600
粉末供給量	g/min	18
キャリアガス供給量	l/min	6
シールドガス供給量	l/min	4
送り速度	mm/min	1000
積層層数	-	30, 50, 70
金属粉末	インコネル 625 (山陽特殊鋼製)	

表 2 レーザー再溶融処理の条件

レーザー出力	W	1600
送り速度	mm/min	1000

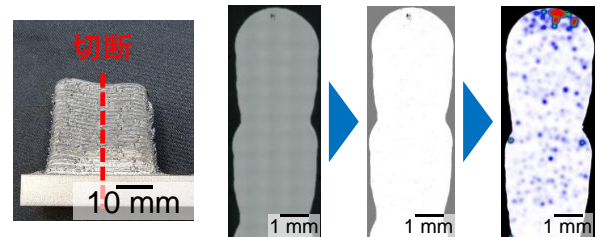


図 2 切断線

図 3 画像処理過程

#### 3.2 実験結果および考察

各条件における空孔率を図 4 に示す。10 層ごとに再溶融処理を行うことで、いずれも積層数においても空孔率低減に成功した。特に、70 層造形物では 60%の空孔率低減を達成した。これは、図 5, 6 から分かるように、多層造形物の最上層にデンドライト組織の成長方向が異なる層が存在し、それらの層間で微小空孔が多く生じていたが、再溶融処理によって、結晶方位が整った大きな組織を形成し、境界部分の欠陥がなくなったためと考えられる。

以上の結果より、指向性エネルギー堆積法によって積層した造形物について、10 層ごとにレーザー再溶融処理を行うことにより造形物全体の空孔率を低減することができ、特に造形物上部では空孔集中の抑制に成功したといえる。

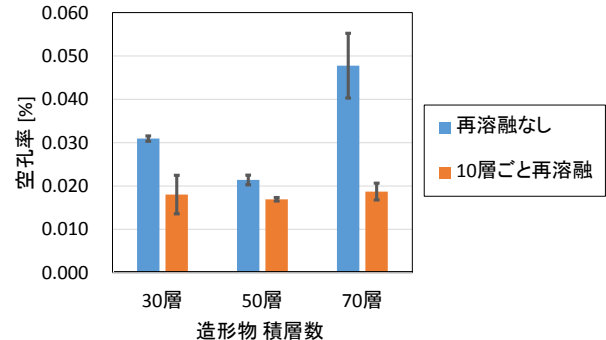


図 4 再溶融による空孔率低減

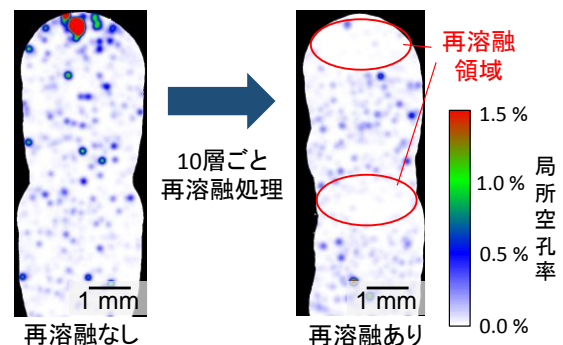


図 5 空孔分布図

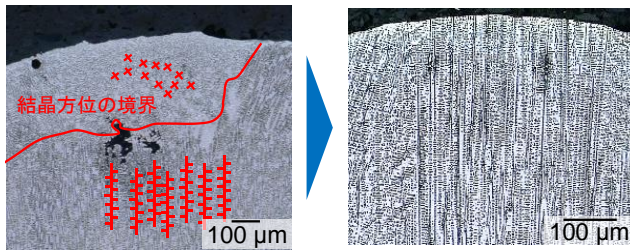


図 6 70 層積層物最上層

## 4. 結晶方位制御実験

### 4.1 実験方法および実験条件

レーザー再熔融処理が結晶方位および表面硬さに与える影響を実験的に評価した。表 3 の条件で積層した造形物の側面に表 4 の条件のもと、以下の手順でレーザー再熔融処理を行った。(図 7)

- 1) 造形物をジグに固定し、A 軸を 90° 回転させてステージを垂直にする。
  - 2) レーザを 1 ライン照射して C 軸を 180 度回転させ、反対の面の 1 ラインにもレーザー再熔融を行う。この処理の後、Y 方向にレーザーヘッドを 3 mm 移動させる。
  - 3) 両面全体に再熔融処理が行われるまで 2) の操作を繰り返す。
- 両面に再熔融を施した造形物に対し、エッチングおよび薄膜 XRD を用いて結晶方位を評価した。その後、再熔融した側面に対し、ビッカース硬さ試験を行った。

表 3 積層条件

レーザー出力	W	1200
粉末供給量	g/min	18
キャリアガス供給量	l/min	6
シールドガス供給量	l/min	4
送り速度	mm/min	1000
積層層数	-	50
金属粉末	インコネル 625 (山陽特殊鋼製)	

表 4 レーザ再熔融処理の条件

レーザー出力	W	1600
送り速度	mm/min	1000
ピッチ幅	mm	3

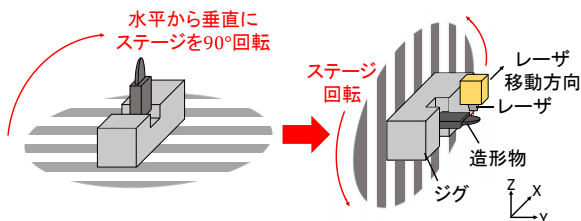


図 7 両面レーザー再熔融処理の工程

### 4.2 実験結果および考察

図 8 に再熔融後の断面エッチング画像を示す。再熔融されていない領域では結晶成長方向が縦向きである。一方で、再熔融された領域では成長方向をレーザー照射方向に変化させることができた。また、図 9 に造形物側面に対して行った薄膜 XRD の結果を示す。両面レーザー再熔融することで (111) 面および (220) 面が減少し、(200) 面が造形物表面に向いていることが確認できた。金属結晶は温度勾配方向に沿って成長するため、再熔融を行うことで、レーザー照射点の方向に向かって温度勾配が生じ、結晶方位が変化したためだと考えられる。

図 10 に造形物側面の硬さ試験結果を示す。なお、示されている数値は 3 サンプルの各地点における平均値である。両面レーザー再熔融することで造形物表面のビッカース硬さを最大で 17% 向上することができた。これは、再熔融を行うことで、優れた物性を持つ (200) 面を造形物表面に向かせたためだと考えられる。

以上より、造形物側面に再熔融処理を行い、結晶方位を造形物表面に向かせたことで、表面硬さの向上を実現した。

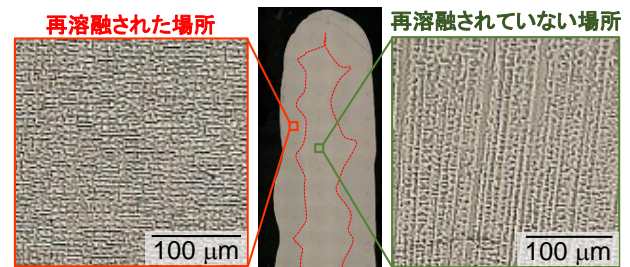


図 8 側面再熔融処理による結晶方位の変化

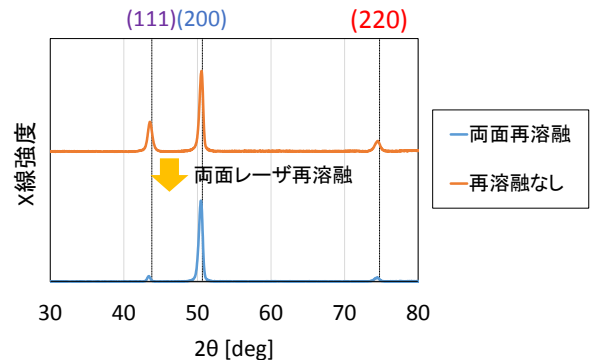


図 9 側面再熔融処理による結晶方位の変化

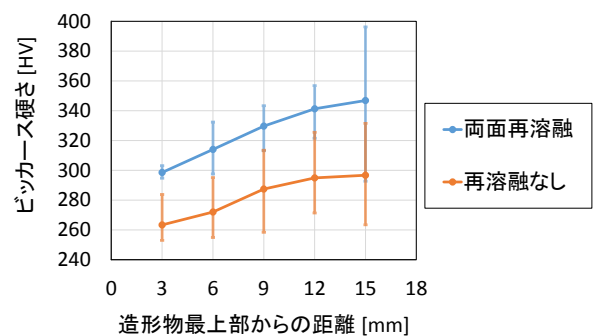


図 10 側面再熔融処理による表面硬さの変化

## 5. 結論

本研究では、レーザー再熔融処理が空孔率および金属結晶に与える影響について、実験的に評価した。得られた知見を以下に述べる。

- 1) 10 層ごとにレーザー照射処理を行うことにより造形物全体の空孔率を低減することができ、特に造形物上部の空孔集中をなくすことができた。
- 2) 造形物側面に再熔融処理を行うことで、結晶方位を造形物表面に向かせることができることを示した。また、(200) 面を造形物表面に向かせることで、最大で 17% の表面硬さが向上することを確認した。

## 6. 参考文献

- [1] M.H.Farshidianfar, Control of Microstructure in Laser Additive Manufacturing, (2014, 9), pp.1-10
- [2] 松田 英樹, 金属積層技術 (3D プリント) の最新動向, (2017, 7), pp.16-24