

指向性エネルギー堆積法によるポーラス金属造形のための空孔解析および機械特性評価

慶應義塾大学理工学部 システムデザイン工学科 小池研究室 ○竹内寿拓, ©小池綾

要旨

近年、自動車や航空宇宙分野において、軽量性や衝撃吸収性、振動吸収性に優れたポーラス金属が注目を集めているが、ポーラス金属は製造時の複雑な工程、高コスト化といった問題により実用化に至りにくい。本研究は、金属積層造形法の一つである指向性エネルギー堆積法を用いて、発泡剤を用いた簡便で応用可能性の高いポーラス金属造形法を提案する。造形物断面を評価する画像処理法を提案し、空孔分散性と機械強度の向上を目指す。

1. 緒論

金属材料に適用可能な 3D プリンタの方式である指向性エネルギー堆積法(DED: Directed Energy Deposition)は、造形効率がよく、大型かつ複雑形状の部品が作製可能であり、航空機産業などでは既に利用が始まっている。本研究では DED の新たな応用技術を確認することを目的として、内部に多くの空孔を含有するポーラス金属造形法を提案する。内部に多孔質構造をもつポーラス金属は軽量性、衝撃吸収性、制振性に優れるため、自動車や航空宇宙分野において注目を集めている。しかし従来製造においてポーラス金属は、工程の複雑化や高コスト化といった問題を抱えており、実用される例は少ない。そこで本研究は DED を用いてポーラス金属を造形することで、より簡便で応用可能性の高い造形手法を提案する。画像処理による新たな空孔分布の評価方法を提案し、空孔分散性と機械特性の向上を目的とした。

2. 指向性エネルギー堆積法(DED)

本研究で用いる DED は、図 1 に示すように、高出力のレーザーにより、ベースプレート上にメルトプールを形成し、同時に金属粉末を噴射し、熔融と凝固を繰り返すことで積層する方式である。DED は、複雑形状が作製でき、他の積層方式とくらべて高造形効率であり、切りくずなどの廃棄物が出ないため省資源であるなどといった利点から、自動車や航空宇宙分野における需要が高まっている。一方で、図 2 のように、造形物内部に空孔やクラックが残存し、機械強度が低下してしまうという点が現在も解決すべき課題として残っている^[1]。

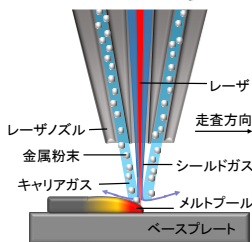


図1 指向性エネルギー堆積法の模式図

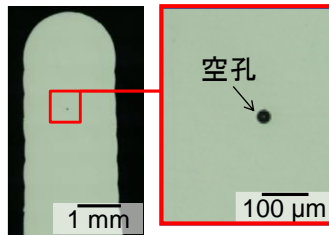


図2 造形物の断面観察画像に見られる内部に残存した空孔

3. ポーラス金属

ポーラス金属は材料内部に多量の気孔を有するため、軽量性や遮音性、耐衝撃性、圧縮性等に優れていることは多くの先行研究に示されている。しかし、熔融金属発泡法などの従来の作製方法は工程数が非常に多く高コストであり、熔融時の表面張力が高いため鉄鋼系材料への適用が困難といった欠点がある^[2]。

4. DED によるポーラス金属造形手法

ポーラス金属のより簡便な作製方法を実現するために、本研究では、図 3 の左に示すように DED において、高温下で水素を放出する水素化チタンを金属粉末に混合し積層することで、造形物内部に気泡を多量に残存させるポーラス金属造形手法を提案する。

さらに表面張力を低下させ、気泡の崩壊を防ぐために界面活性剤としてテルルも添加する。なお、従来の作製方法では実現が困難とされている鉄鋼材料として、ステンレス鋼(SUS316L)をポーラス金属造形法の実験対象とした。

本実験では、表 1 のような条件の下、ブロック形状のポーラス金属を作製した。積層数は、合計 30 層とし、熱の蓄積を防ぐため、6 層あるいは 4 層積層するたびに 10 分の空冷時間を設けた。また積層方法には、図 3 の右に示すように積層方向を常に一定とするマルチレイヤー、積層方向を垂直に変化させるクロスレイヤーの 2 種類を用いた。レーザー出力は、メルトプールサイズを一定にするようにレーザー出力を調整するクローズドループ制御 (CLC) を用いたが、比較のために一定出力の造形も行った。一定出力において、上層にいく程熱が逃げにくくなると考えられるので、上層にいくにつれてレーザー出力を低くした。

表 1 積層条件

材料粉末	SUS316L: 89 wt%		
	TiH ₂ : 10 wt%		
	Te: 1.0 wt%		
ベースプレート	素材: SUS304 縦 100 mm×横 100 mm×厚さ 10 mm		
キャリアガス シールドガス	アルゴンガス 純度 99.99%		
レーザー出力	一定出力	1 ~ 6 層: 1600 W 7 ~ 18 層: 1400 W 19 ~ 30 層: 1200 W	
	クローズドループ制御 (CLC)	メルトプールサイズを一定にするように制御	
積層経路	マルチレイヤー、クロスレイヤー		
積層数	30 層	6 層毎の空冷	6 層 × 5
		4 層毎の空冷	1 ~ 6 層: 6 層 × 1 7 ~ 30 層: 4 層 × 6

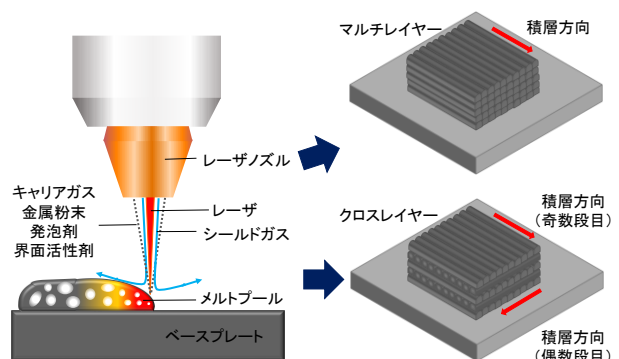


図3 DEDによるポーラス金属造形手法

5. ポーラス金属の空孔解析

作製したブロック造形物をマルチレイヤーの積層方向に対して垂直および水平方向に切断し、それぞれの断面に対し画像処理による空孔率の算出、空孔分布の評価を行った。空孔分布については、各空孔の重心に対して Delaunay 三角形分割を用い、分割三角形の面積をそれぞれ求め、正規化したヒストグラムを作成する空孔分散性の新たな評価手法を提案した。

図 4 に示した造形物断面の一例から、造形物内部に空孔を残存できたことがわかる。また図 5 のように、レーザ出力に CLC を適用することで空孔率が向上した。CLC の適用によりレーザ出力が調整され、気泡の成長が促進され、同時に加熱しすぎによる気泡の逃げを防ぐことができたと考えられる。さらにマルチレイヤーによる積層時は切断方向によって空孔率に差が生じ、空孔分布に異方性があることがわかった。また図 6 に示すように、6 層毎の空冷から、4 層毎の空冷にすることで空孔分布の偏りが改善した。よって、空冷の頻度を増やすことで、熱の蓄積による過加熱を防ぐことができ、空孔の粗大化、それによる結合、崩壊を抑制できたため、空孔分布が改善したと考えられる。

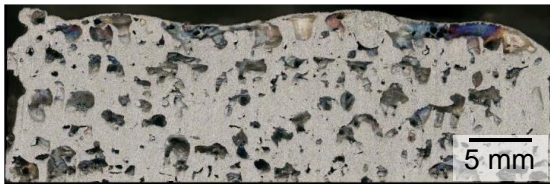


図 4 DED で作製したポーラス金属の断面

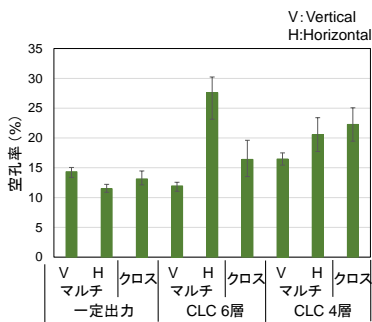


図 5 各造形物の空孔率

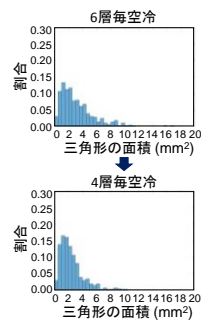


図 6 空孔の分散性

6. ポーラス金属の機械特性評価

各造形物において、マルチレイヤーの積層方向に対して水平に切り出した水平試験片と垂直に切り出した垂直試験片を 5 mm×5 mm×30 mm のサイズで作製し、5 mm×5 mm の面を底面として圧縮試験を行った。

図 7 に示すように、レーザ出力一定の造形物において、ひずみに対する圧縮応力が広範囲で一定となるプラトー領域は見られなかった。一方で、図 8 に示すように、CLC を適用した造形物においてプラトー領域が見られたことから、空孔率の向上がプラトー領域の発現に寄与したと考えられる。また、一般的にポーラス材料はプラトー領域の後に圧縮応力が急激に上昇する緻密化領域を持つが、本研究で作製したポーラス金属では観測されなかった。これは図 9 のように、試験片が圧縮の途中で座屈してしまったためと考えられる。さらに、マルチレイヤーと比較し、クロスレイヤーにおいて広いプラトー領域が見られた。特に 4 層毎空冷において CLC を適用したクロスレイヤーの条件ではプラトー領域が 18% のひずみ量まで続いた。よって、空孔分布の偏りが改善されると圧縮特性の向上に繋がると考えられる。エネルギー吸収量についてまとめると、図 10 に示すように、4 層毎空冷において CLC を適用したクロスレイヤーの条件でエネルギー吸収量が SUS316L の通常の造形物と比べ、7.7 倍となった。以上から提案

手法によって確かにポーラス金属が作製できており、その空孔率、空孔分布が圧縮特性に大きく影響を与えていることを示した。

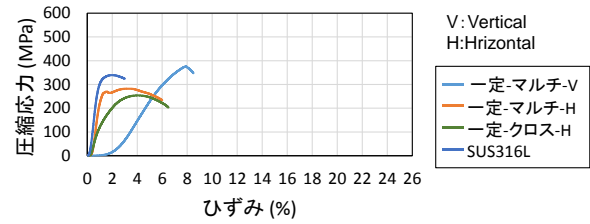


図 7 レーザ出力一定の造形物の圧縮試験の結果

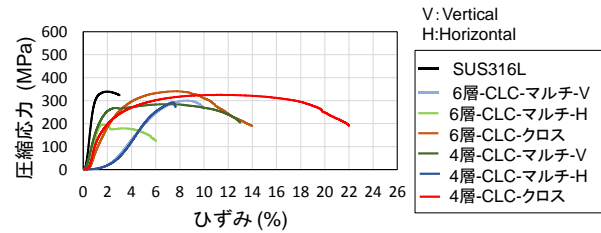


図 8 CLC を適用した造形物の圧縮試験の結果

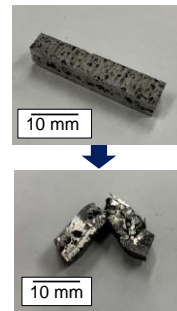


図 9 試験片の様子

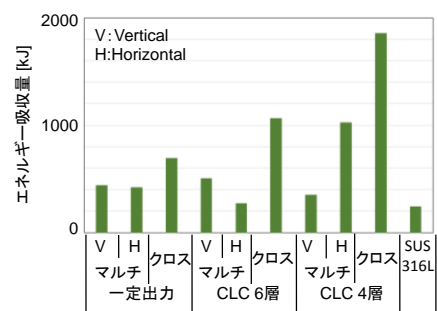


図 10 各造形物のエネルギー吸収量

7. 結論

本研究では、指向性エネルギー堆積法において水素化チタンを発泡剤としたポーラス金属造形法を提案し、造形物内部の空孔解析と圧縮試験を行った。また、内部構造が圧縮特性に与える影響を評価した。得られた知見を以下にまとめる。

- 1) クローズドループ制御 (CLC) を適用したレーザ出力で積層することで、気泡の逃げを抑制しつつ、気泡の成長を促し、空孔率が向上した。
- 2) マルチレイヤーの造形物では異方性が生じたが、クロスレイヤーの造形物では異方性が抑制され、より均一な空孔分布が得られた。
- 3) 空冷を 6 層毎から 4 層毎にして積層することで、造形物内に熱が蓄積されにくくなり、空孔の結合、粗大化、崩壊を抑制できたことで、空孔分布がより均一となった。
- 4) CLC を適用したレーザ出力による造形物において、圧縮試験時にプラトー領域を確認できた。
- 5) 4 層毎空冷において CLC を適用したレーザ出力でクロスレイヤーによる造形を行った場合、SUS316L と比べ、エネルギー吸収量が 7.7 倍に達した。

8. 参考文献

- [1] 松田英樹, 金属積層技術 (3D プリンタ) の最新動向, (2017, 7), pp. 16-24
- [2] 村上太一, 熔融金属生成と酸化鉄の還元制御による高気孔率発泡ステンレスの製造と評価, pp21-29