

3D プリンタを用いたポーラス金属作製技術の開発

高岩 徳寿* 荒井 辰也*

Development of Porous Metal Production Technology with 3D Printer
Norihiisa TAKAIWA and Tatsuya ARAI

射出成形において、金型からガスを排出するための構造や通気性能をもった部材が広く用いられている。また、自動車や航空宇宙関連分野においては、部品の軽量化に対するニーズが高い。本研究では、これらの分野への応用を見据えて、3D プリンタ（金属積層造形）を用いたポーラス金属作製技術の開発を行い、作製したポーラス金属の相対密度について検討した。CAD 設計によるポーラス構造の作製については、設計方法を工夫することで設計時の想定密度が 30% 以上あればポーラス金属が作製可能であることが分かった。造形条件振りによるポーラス金属の作製については、金属粉末に入射するエネルギー密度を調整することにより、相対密度が 40%程度から 99.9%の範囲で、任意の相対密度を持つポーラス金属が作製可能であることが分かった。

Key Words: 3D プリンタ, 金属積層造形, Additive Manufacturing, ポーラス金属, 金型, 軽量化

1 はじめに

近年、金属 3D プリンタの普及により、内部に複雑な冷却配管を有する金型の作製や、インコネルやチタン合金の造形による航空宇宙分野や医療分野への活用が活発に行われるようになってきており、3D プリンタを用いた試作開発サイクルの短期化や製造コスト低減に対する関心は高まってきている¹⁾⁵⁾。

射出成形においては、射出成形機での樹脂注入時に金型内に残留した空気や樹脂自体から発生するガスにより、樹脂が行き渡らないショートショットや、ガス焼け不良が発生することが知られている。また、高温高压のガスにより金型の腐食が発生し、金型のメンテナンスサイクルや寿命が早まり生産性が低下することがある。このような不具合を防ぐために、金型のパーティング面に溝を作製しガスが抜けるようにする方法や、金型の製品面でガスが溜まりやすい箇所には穴を開け、そこに通気性を持った金属部品を埋め込んでガスが抜けるようにする方法が用いられている。前者の方法では、製品にバリが発生する可能性があり、後者の方法では金型を後加工するために金型の製造工程の増加や、ガス抜きのための部材を配置できる箇所に制限がある等の弊害がある。そのため、ガス排出性能を有するポーラス金属を金型と一体に作製し、かつ自由な形状で任意の箇所に作製できる技術が必要とされている。

自動車、航空宇宙関連分野においては、燃費性能の向上のために部品の軽量化に対するニーズが非常に高い。近年、CAE 技術の発展により、トポロジーの最適化などの軽量化設計が比較的簡単にできるようになってきているが、こうした解析結果から得られる形状は、従来の機械加工では作製が難しい場合が多い。そのため、複雑な形状の作製を得意とする 3D プリンタを用いた

部品の軽量化の技術が注目されている。

そこで本研究では、将来的なポーラス金属を用いた高機能金型への活用や、部品の軽量化への応用に向けて、複雑な内部構造を作製することができる金属 3D プリンタを用いた、ポーラス金属作製のための CAD 設計手法の検討や造形条件の探索を行い、相対密度の評価方法の検討を行うことで、各条件と相対密度との関係を調査した。

2 研究の方法

2.1 ポーラス金属作製条件

ポーラス金属を作製するための手法として、CAD (Dassault Systemes (株) SOLIDWORKS) によってポーラス構造を設計する方法と、3D プリンタ (ソディック OPM-250L) の造形条件を変化させポーラス金属を作製する方法の 2 通りで実施した。使用した 3D プリンタを図 1 に示す。



図 1 3D プリンタ
(株) ソディック OPM-250L

*栃木県産業技術センター 機械電子技術部

造形に使用する材料はマルエージング鋼とした。造形条件については、レーザスポット径が 0.2mm、レーザ出力が 420W、走査速度が 1400mm/s、走査ピッチが 0.08mm、積層厚さが 0.04mm の条件を標準条件とした。

2. 2 密度の評価方法

作製したポーラス金属について、それぞれの作成条件と相対密度の相関を調査した。CAD 設計によって作製したポーラス金属については、体積全体を評価するために図 2 に示す X 線 CT 三次元測定機（株）ニコン MCT225）を用いて 3 次元データを取得し、データの体積から相対密度を算出した（以下、相対密度とする）。

造形条件振りにより作製したポーラス金属については、体積内でポーラス構造がランダムに配置していると考えられることから、図 3 に示す顕微鏡（オリンパス（株）GX71）によって断面画像を取得し、金属部分と空隙部分の面積を計算することで相対密度を算出した（以下、相対面密度とする）。観察する断面は、積層方向と垂直な平面となるように樹脂埋め研磨を行った。



図 2 X 線 CT 三次元測定機
（株）ニコン MCT225）



図 3 顕微鏡
（オリンパス（株）GX71）

3 結果及び考察

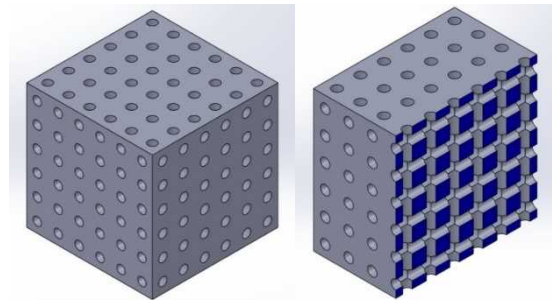
3. 1 ポーラス金属作製

3. 1. 1 CAD によるポーラス構造の設計

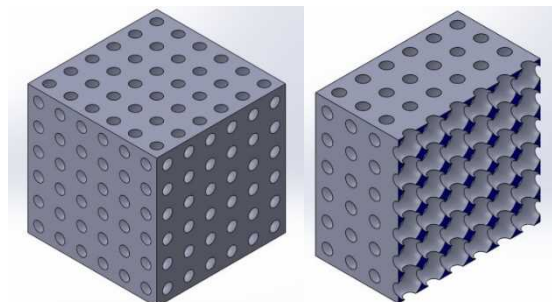
CAD により検討したポーラス構造を図 4 に、ポーラス構造の作成パターンを表 1 に示す。設計方法は、(a) 6mm 角の立方体から円柱を 1mm 間隔で除去、(b) 6mm 角の立方体から球を 1mm 間隔で除去、(c) 球と円柱を組み合わせて隣接する球同士が接触するように配置し 6mm 角の立方体に収まるようにしたもの 3 パターンで作成した。

作成したポーラス構造を持つ CAD データについて、3D プリンタを用いて造形を行った。φ 0.9mm の円柱を除去したデータについては、造形中に破損してしまい造形が不可能であることが分かった。設計密度を 30% 以下とすると、造形時にかかる金属粉末の重さやリコート時にかかる圧力に耐えられず、造形物が崩れてしまうリスクが高くなることが分かった。

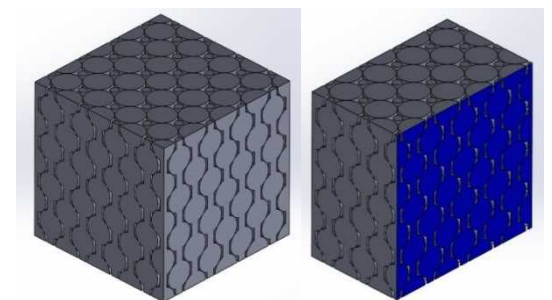
設計密度と相対密度の相関については次章で示す。



(a) 円柱 (φ 0.3mm) 除去の外観と断面



(b) 球 (φ 1.1mm) 除去の外観と断面



(c) 球 (φ 0.5mm) と円柱 (φ 0.2mm) の外観と断面

図 4 CAD によるポーラス構造図

表1 検討したポーラス構造パターン

空隙形状	サイズ(mm)	設計密度(%)	造形可否
円柱除去	φ0.3	69.50	
	φ0.5	58.77	
	φ0.7	33.06	
	φ0.9	14.63	造形不可
球除去	φ1.1	32.82	
球と円柱	φ0.5・φ0.2	82.05	
	φ1・φ0.3	78.59	

3. 1. 2 造形条件変更によるポーラス金属の作製

3Dプリンタの造形条件を変化させポーラス金属の作製を試みた。造形に使用したCADモデルは、直径6mm高さ10mmの円筒形とした。また、(1)式により定義されるエネルギー密度 E (J/mm³)を算出し、それぞれの条件における相対面密度との関係を定量的に評価した⁹⁾。

$$E = \frac{P}{vst} \quad (1)$$

ここで、 P はレーザ出力(W)、 v は走査速度(mm/s)、 s は走査ピッチ(mm)、 t は積層厚さ(mm)とした。

まず始めに、造形条件においてどの項目が相対面密度に影響を及ぼすかを調査するために、単一の項目について条件振りを実施した。実施した項目は、スポット径、レーザ出力、走査速度、走査ピッチ、積層厚さの5項目とした。造形条件とエネルギー密度及び造形結果について表2に示す。スポット径及びレーザ出力を変更すると、スポット径では0.45mm以上、レーザ出力では80W(エネルギー密度は17.86(J/mm³))以下となると造形が不可能になることが分かった。エネルギー密度と相対面密度の相関については次章で示す。

表2 造形条件変更の検討項目と造形結果

検討項目	造形 (標準条件)	エネルギー 密度 E (J/mm ³)	造形結果
スポット径 (mm)	0.1~0.6 (0.2)	93.75	0.45mm以上で 造形不可
レーザ出力 (W)	60~500 (420)	13.39~111.61	80W以下で 造形不可
走査速度 (mm/s)	800~5000 (1400)	26.25~164.06	全て造形可
走査ピッチ (mm)	0.05~0.40 (0.08)	18.75~150.00	全て造形可
積層厚さ (mm)	0.02~0.10 (0.04)	37.50~187.50	全て造形可

次に、比較的相対面密度に及ぼす影響が大きいレーザ出力と走査速度を、各5水準で変化させて造形を実施した。造形条件を表3に、それぞれの条件での造形の可否とエネルギー密度を表4に示す。条件の変更範囲は、標準条件を基にエネルギー密度が低下する条件のみを実施した。造形結果より、エネルギー密度が18 (J/mm³)以下になると造形が不可能となることが分かった。レーザ出力のみを変更した時の結果と合わせて、エネルギー密度と造形可否には関連があり、造形可能なエネルギー密度は概ね18(J/mm³)が下限であることが分かった。エネルギー密度と相対面密度の相関については次章で示す。

表3 レーザ出力と走査速度変更の造形条件

パラメータ	造形条件
スポット径(mm)	0.2
レーザ出力(W)	100, 200, 300, 400, 420
走査速度(mm/s)	1400, 2000, 3000, 4000, 5000
走査ピッチ(mm)	0.08
積層厚さ(mm)	0.04
エネルギー密度 (J/mm ³)	6.25~93.75

表4 レーザ出力及び走査速度変更の造形結果

		走査速度(mm/s)				
		1400	2000	3000	4000	5000
レーザ出力 (W)	420	○ (93.75)	○ (65.63)	○ (43.75)	○ (32.81)	○ (26.25)
	400	○ (89.29)	○ (62.50)	○ (41.67)	○ (31.25)	○ (25.00)
	300	○ (66.96)	○ (46.88)	○ (31.25)	○ (23.44)	○ (18.75)
	200	○ (44.26)	○ (31.25)	○ (20.83)	× (15.63)	× (12.50)
	100	○ (22.32)	× (15.63)	× (10.43)	× (7.81)	× (6.25)

○ : 造形可 × : 造形不可 () : エネルギー密度(J/mm³)

3. 2 密度の評価

3. 2. 1 CADにより設計した造形物の相対密度

3.1.1にて作製した造形物について、X線CT三次元測定機を用いて取得した3Dデータ例を図5に示す。このデータから表面粗さ等の影響を受けないように、データの中心で4mm角の立方体の領域を作成し、この領域内でのデータの体積から造形物の相対密度を算出した結果を表5に示す。円柱除去と球除去により作成した造形物については貫通穴が確認できたが、球と円柱を組み合わせて作った造形物は貫通穴が確認できなかった。また、X線CT三次元測定機で得たデータから相対密度を求めると、設計時に想定していた密度に対して約2割高くなっていること

が分かった。これは、造形に用いるレーザーのスポット径が0.2mmあるためレーザー焼結のときにスポット径の分だけ設計した隙間が埋められてしまうことや、X線CT三次元測定機の分解能により微小な隙間は検出できないことが原因と考えられる。

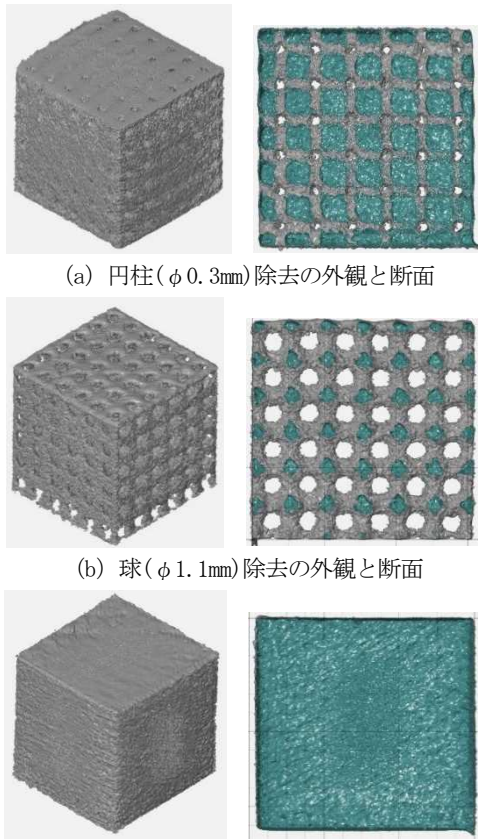


図5 CADにより設計した造形物のCTデータの例

表5 CADにより設計した造形物の相対密度

設計方法	サイズ(mm)	設計密度 (%)	相対密度 (%)
円柱除去	φ 0.3	69.50	82.54
	φ 0.5	58.77	68.19
	φ 0.7	33.06	40.02
	φ 0.9	14.63	造形不可
球除去	φ 1.1	32.82	41.64
球と円柱	φ 0.5・φ 0.3	82.05	99.95
	φ 1・φ 0.2	78.59	99.43

3. 2. 2 造形条件変更により作製した造形物の相対面密度

3.1.2にて作製した造形物について、樹脂埋め研磨後の断面を顕微鏡で観察し、取得した画像から相対面密度を算出した。レーザー出力変更により作製した造形物の断面画像を図6に、各条件のエネルギー密度と相対面密度の関係を図7に示す。この結果より、条件変更が相対面密度に及ぼす影響が強く、かつ相対面密度を比較的容易に制御できるのはレーザー出力、走査速度、走査

ピッチであることが分かった。

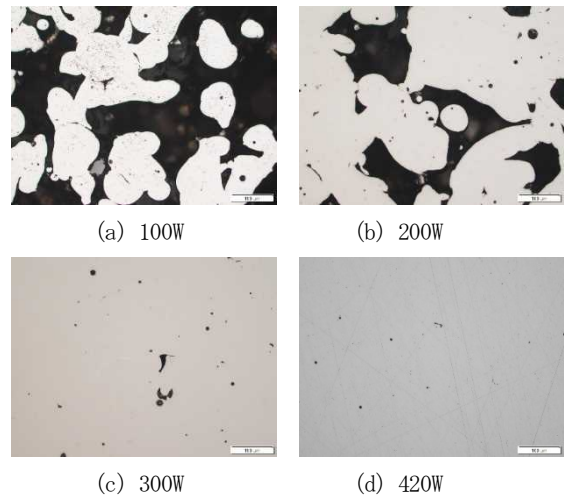
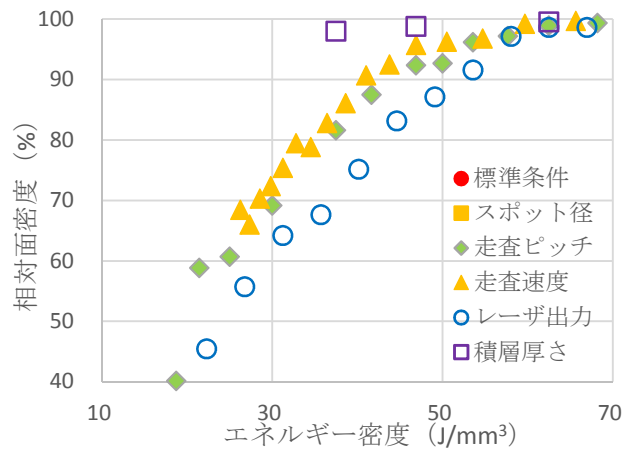
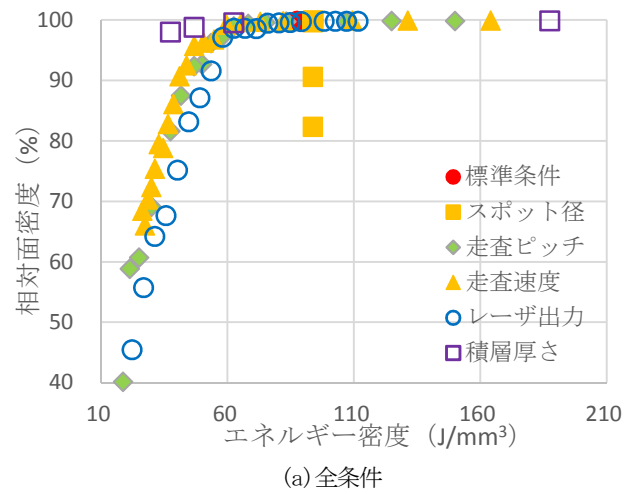


図6 レーザ出力変更により作製した造形物の断面画像



(b) エネルギー密度70J/mm³以下のみ表示

図7 エネルギー密度と相対面密度の関係

これまでの結果を踏まえて、任意の相対面密度を持った造形物の作製を確立するために以下の検討を行った。

- ① (2) 式により各パラメータに標準条件を入れ、エネルギー密度に任意の値を入れて係数nを算出。

- ②レーザー出力及び走査速度にnを乗除し、その条件で造形。
- ③造形物のエネルギー密度と相対面密度のグラフより関係を導き出す。
- ④導かれた関係から、任意の相対面密度を得るためのレーザー出力及び走査速度を算出し、造形して相対面密度を調べる。

$$E = \frac{nP}{(v/n)st} \quad (2)$$

以上の方法を実施した結果について、それぞれの造形物のエネルギー密度と相対面密度の関係を図8に示す。また、④を実施した際の想定面密度と、作製した造形物の相対面密度を表6に示す。この結果より、造形条件と相対面密度の関係を調査することで、概ね想定どおりの相対面密度をもったポーラス金属の作製が可能であることが分かった。

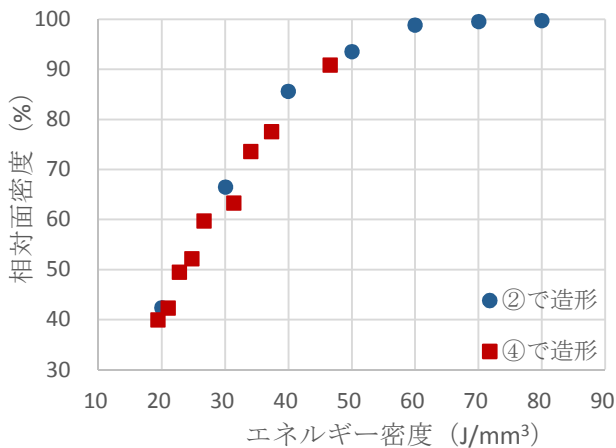


図8 ②、④のエネルギー密度と相対面密度の関係

表6 ④で作製した造形物の想定密度と実際の相対密度

想定面密度 (%)	レーザー出力 (W)	走査速度 (mm/s)	造形物の相対面密度 (%)
91.31	296	1986	90.88
80.59	265	2217	77.54
75.30	253	2321	73.57
70.36	243	2419	63.31
60.15	224	2623	59.72
55.34	216	2728	52.19
50.12	307	2839	49.50
45.15	199	2955	42.29
40.14	191	3078	39.96

4 おわりに

3D プリンタを用いたポーラス金属の作製を試み、次の結論を得た。

- (1) CAD により設計したポーラス構造の造形においては、設計時の想定密度を 30%以上とすれば造形可能である。また、作製した造形物の相対密度は想定した密度よりも 2 割程度高くなる。
- (2) 造形条件を変化させてポーラス金属を作製する場合は、エネルギー密度が概ね 18%以上あれば造形可能である。この方法で作製したポーラス金属の相対面密度は、40%程度から 99.9%まで作製可能である。
- (3) 造形条件ごとのエネルギー密度と相対面密度の関係を把握することで、相対面密度が 40%程度から上であれば任意の相対面密度をもったポーラス金属を作製可能である。

謝 辞

本事業で用いた機器の一部は公益財団法人 JKA の補助事業によるものであり、競輪マークを記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 阿部諭, 東喜万, 峠山祐彦, 不破勲, 吉田徳雄 : 精密工学会誌, vol.73 No.8, 912-916, (2007)
- 2) 高岩徳寿, 荒井辰也, 上野司 : 栃木県産業技術センター研究報告, No.15, 1-6, (2018)
- 3) 京極秀樹 : 特殊鋼, vol165 No.4, 22-24, (2016)
- 4) 田村知子 : 特殊鋼, vol165 No.4, 33-35, (2016)
- 5) 酒井仁史 : 特殊鋼, vol165 No.4, 36-40, (2016)
- 6) A.Simchi : Materials Science and Engineering A, 428, 148-158, (2006)

