

金属積層造形を用いた高耐久・高機能金型の開発

－金属積層造形の利活用拡大に向けて－

高野昌宏* 吉田勇太* 宮川広康* 谷内大世* 前川満良*

金属3Dプリンタは複雑な部品や金型を直接製造する生産装置としての活用が期待されているが、疲労強度が低いことや造形不良が生じるなどの課題がある。また、機能性の高い3Dプリンタの特長を活かした形状設計を行うことも重要である。本研究では、造形可能な形状の評価と疲労強度が向上するレーザー条件の検討を行った。その結果、内部欠陥を微小化し、疲労強度を向上させるにはレーザーの二重照射法が有効であった。また、有限要素解析に基づいて金型内部の複雑水管を設計し、耐久性、冷却性能の優れた射出成形金型を試作した。射出成形実験により成形時間の短縮や成形品の反りの低減に対する優れた効果が確認された。

キーワード:金属積層造形, 疲労強度, 射出成形

Development of High-durability and High-performance Injection Mold Fabricated by Metal Additive Manufacturing -Aiming for Effective Use of Metal Additive Manufacturing-

Masahiro TAKANO, Yuta YOSHIDA, Hiroyasu MIYAKAWA, Taisei YACHI and Mitsuyoshi MAEKAWA

Metal 3D printers are expected to be used as production apparatuses for the direct manufacturing of complex parts and molds. However, there are problems such as low strength and manufacturing defects. Moreover, design skill is required to manufacture the complex parts of high-performance. In this study, the geometric limits were evaluated, and derivation of the laser conditions in which fatigue strength is improved was performed. Injection molds with higher cooling performance were fabricated and their effects were verified. As a result, it was confirmed that the double laser irradiation method is effective in reducing the size of the internal defects and improving the fatigue strength. In addition, internal complex cooling channels for injection molds with high durability and high cooling performance were manufactured. The results of injection molding experiments indicated that the molds were extremely effective for shortening molding time and reducing warping.

Keywords : metal additive manufacturing, fatigue strength, injection molding

1. 緒 言

金属粉末をレーザーで熔融固化する金属3Dプリンタは、試作装置としてだけでなく複雑な部品や金型を直接製造する生産装置として期待されている。しかし、実部品に使用する造形物には強度等の品質が重要になるが、金属3Dプリンタ造形物は一般に疲労強度が低いとされている¹⁾。また、3Dプリンタならではの複雑形状を効果的に活かした機能性の高い部品を設計することも非常に重要である。

本研究では実部品の直接生産に必要な要素技術確立のため、造形可能な形状の評価と疲労強度を向上

させるレーザー条件の検討を行った。また、有限要素解析に基づいて設計した内部複雑水管を持つ射出成形金型を造形し、成形品の品質や生産性に対する効果を射出成形実験により検証した。

2. 造形限界

本研究で使用した金属3Dプリンタ((株)ソディック・OPM250L)は、薄く敷き詰めた金属粉末層に対し、必要な箇所に選択的にレーザー照射して熔融、凝固させ、これを繰り返しながら積層造形する方式(粉末床熔融接合法: Powder bed fusion)である。積層造形は、従来の加工方法では困難な内部中空構造などの複雑形状部品の製作が可能である利点を持つ一方で、細長い形状

*機械金属部

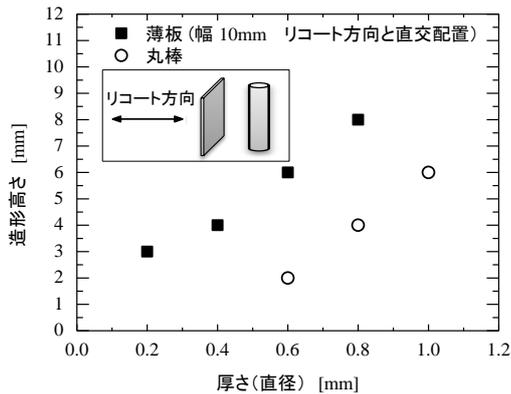


図1 薄板，丸棒の厚さと造形高さの関係

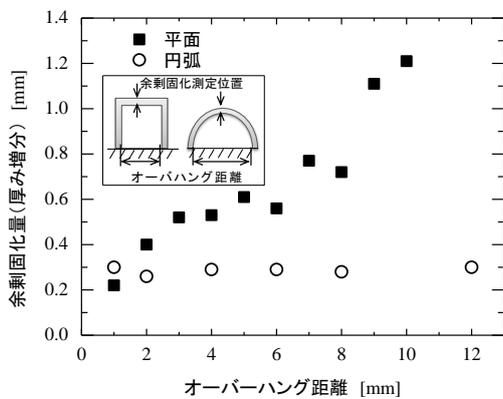


図2 オーバーハング距離と余剰固化量の関係

やオーバーハング部などの造形が難しい形状も存在している。そのため、造形可能な形状限界について検討した。図1に薄板や細径丸棒を造形した時の厚さ(直径)と造形可能高さの関係を示す。ここで薄板の幅は10mmとし、幅方向が金属粉末の供給方向(リコート方向)に対して直交するよう配置した。造形物が倒れずに造形できる薄板の最小厚さは0.2mm、丸棒の最小直径は0.6mmで、厚さや直径が大きくなるにつれて造形可能な高さも大きくなった。本金属3Dプリンタの厚さや径に対する高さの造形限界アスペクト比は、薄板で約10、丸棒で3~6であった。

次に造形可能なオーバーハング距離を調べた。オーバーハング部では、レーザー照射箇所の下に熱伝導の良い固形層が無いため入熱の逃げが少なく、設定値以上に下方に厚みが増加する余剰固化現象が生じ易い。オーバーハング部が板厚1mmの平面と円弧形状のサンプルを造形し、厚み増分(余剰固化量)を測定した。その結果を図2に示す。平面サンプルではオーバーハング

部の距離が増加するにつれて余剰固化量は増加したが、円弧形状のサンプルでは余剰固化量はほぼ一定で変化がなかった。このことから、金属3Dプリンタ造形物では平面状のオーバーハングが1mm以下となるよう形状設計することが望ましく、それ以上のオーバーハング距離となる場合には、円弧状に形状修正したり、サポート構造を付加するなどの設計時の考慮が必要である。

3. 疲労強度の向上

3. 1 造形物の内部欠陥

金属積層造形では微細な空隙(内部欠陥)が点在するため、疲労強度が低いと言われている。唐土らは、HIP処理により内部欠陥を無くすことで疲労強度を改善したことを報告している¹⁾。そこで、内部欠陥の大きさとレーザー条件の関係を調べ、内部欠陥を最小にするレーザー条件について検討を行った。内部欠陥が疲労強度に及ぼす影響を統一的に評価するパラメータとして、欠陥面積の平方根 $\sqrt{\text{area}}$ が村上らによって提案されている²⁾。そこで、造形サンプル中の欠陥サイズ $\sqrt{\text{area}}$ を断面写真から画像解析により測定した。測定した欠陥サイズ $\sqrt{\text{area}}$ の累積確率を正規確率紙にプロットした結果を図3に示す。なお、7 μm 以下の欠陥寸法は疲労強度に及ぼす影響が小さいとして除外した。その結果、10 μm 付近で屈曲点が存在し、欠陥寸法が大きい側では累積確率が比例的に増加していた。これを直線近似して、累積確率が99.98%における欠陥寸法を最大欠陥サイズとし、種々のレーザー条件で造形したサンプルで評価した。

図4にレーザーの走査速度と最大欠陥サイズ、欠陥個数の関係を示す。走査速度が小さくなるにつれて欠陥個数は減少し、最大欠陥サイズは700mm/sで最も小さくなった。次に同じ造形層でレーザーを二回照射(二重

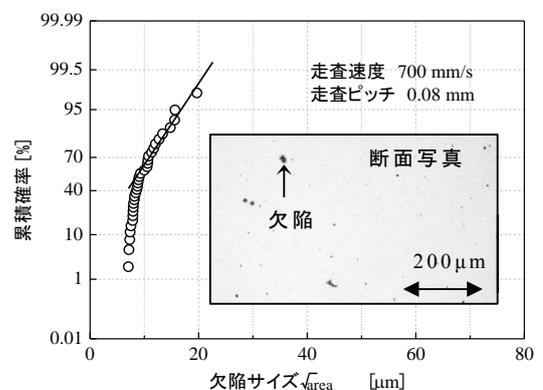


図3 欠陥サイズの累積頻度分布

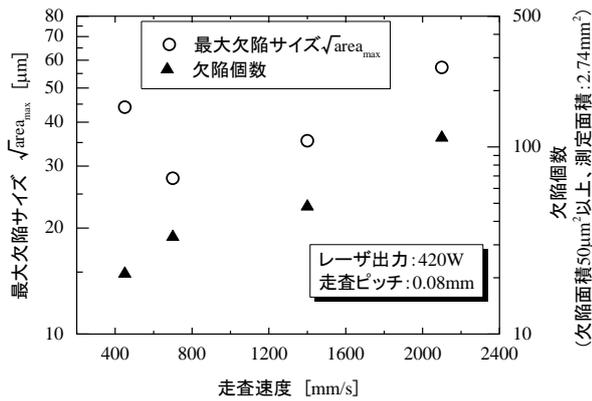


図4 走査速度と最大欠陥サイズ，欠陥個数の関係

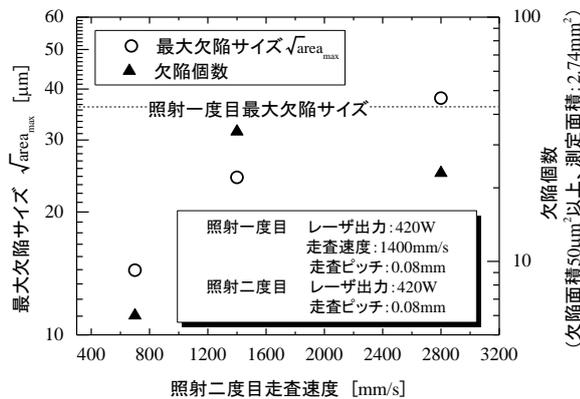


図5 二重照射の走査速度と最大欠陥サイズ，欠陥個数の関係

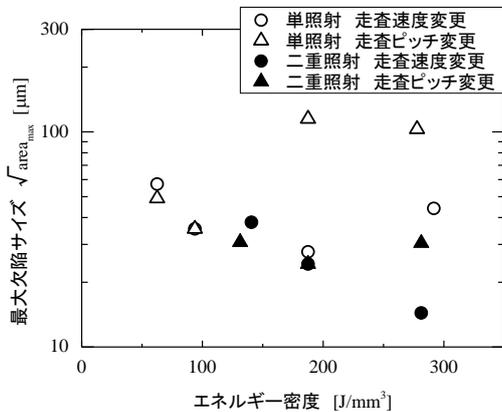


図6 エネルギー密度と最大欠陥サイズの関係

照射)した条件での欠陥サイズを調べた。二重照射における照射二度目の走査速度と最大欠陥サイズ，欠陥個数の関係を図5に示す。なお，照射一度目の走査速度は1400mm/sとした。同図から二重照射により，最大欠陥サイズが微細化されていることが確認できる。ここで，レーザー照射条件の違いを積層1層分の単位体積

当たりに投入されるエネルギー密度に換算し，エネルギー密度と最大欠陥サイズの関係として整理した。エネルギー密度 $E(\text{J}/\text{mm}^3)$ は，出力を $P(\text{W})$ ，走査速度を $v(\text{mm}/\text{s})$ ，走査ピッチを $s(\text{mm})$ ，積層厚を $t(\text{mm})$ として，以下の式で表される。

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

エネルギー密度と最大欠陥サイズの関係を図6に示す。同図では単照射，二重照射の走査速度を変更した条件に加えて，走査ピッチを変更した条件も合わせてプロットした。単照射において極小となる最大欠陥サイズが約 $30\mu\text{m}$ であるのに対し，二重照射では約 $15\mu\text{m}$ となった。このようにレーザーの二重照射法は欠陥サイズの微小化に有効であることを確認した。

3. 2 疲労強度の改善

レーザー条件により最大欠陥サイズが変化することから，種々のレーザー条件で作製した試料について疲労強度を測定した。表1に疲労試験サンプルの作成条件を示す。疲労試験片は，マルエージング鋼粉末を用いて積層造形後に表面研磨し， 485°C で3時間の時効処理を行った。疲労試験には小野式回転曲げ疲労試験機((株)島津製作所・H6型)を用い，繰り返し数500万回における疲労限度を測定した。なお，積層方向の影響を調べるため，試験片の軸方向が積層方向と同方向(縦積層)と直交方向(横積層)のそれぞれのサンプルを作成した。横積層試験片のS-N線図を図7に，縦積層試験片のS-N線図を図8に示す。ケースAは同じ鋼種の圧延材である。単照射のケースBでは，疲労限度は圧延材の7割程度であり，縦積層の方が横積層よりも疲労限度が低いという異方性を示した。これに対して，二重照射したケースCでは，単照射よりも疲労強度が高く，疲労限度は圧延材の9割程度まで改善された。しかしながら，二重照射では造形時間が長くなる短所がある。そこで，疲労破壊の起点となる表層 0.5mm (試験片直径 8mm)だ

表1 疲労試験サンプルの作成条件

ケース		レーザー条件			最大欠陥サイズ [μm]	
		出力 [W]	走査速度 [mm/s]	走査ピッチ [mm]		
A	圧延材	-	-	-	-	
B	一度照射	420	1400	0.08	35.4	
C	二度照射	一度目	420	1400	0.08	24.3
		二度目	420	1400	0.08	
D	表層 0.5mm のみ二度照射	一度目	420	1400	0.08	14.4
		二度目	420	700	0.08	

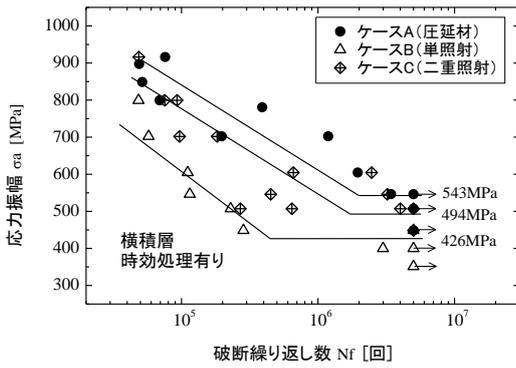


図7 横積層のS-N線図

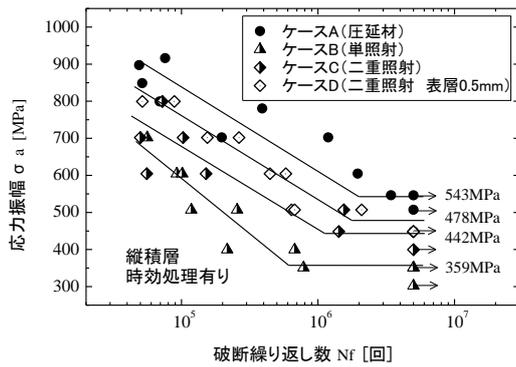


図8 縦積層のS-N線図

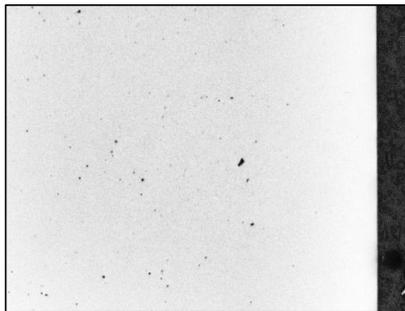


図9 ケースDの断面写真

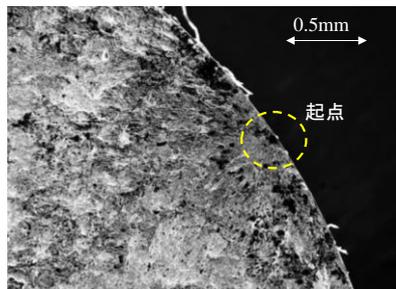


図10 ケースDの疲労破面

けを二重照射し、造形時間の増加を抑えた二層構造材を考案し、その疲労強度をケースDとして示した。なお、二重照射時の走査速度は、前節の結果で最小となった700mm/sで行った。図9は作成した疲労試験片の断

面写真である。二重照射した表面付近では、内部と比べて明らかに欠陥が微細化されていることがわかる。このケースDでは、積層サンプル全体を二重照射したケースCよりも高い疲労限度を示した(図8参照)。図10にケースDの疲労破面を示す。破壊の起点は内部では無く表面近傍に存在しており、二重照射の範囲は表面から0.5mmの深さでも十分であることが確認された。

4. 射出成形金型の設計・評価

4.1 内部複雑水管の設計

成形時間を短縮するため、射出成形金型には熔融樹脂を冷却する水管を内部に形成しているが、機械加工の制約により水管の配置場所や形状が制限される。金属3Dプリンタを用いれば複雑な冷却水管を自由に形成でき、冷却性能の向上が期待される。そこで、内部に複雑水管を有する金型を設計し、成形時間短縮と成形品の反り低減に対する効果を検証した。対象とした成形品は、図11に示すように内反りの発生が問題となり易い箱型形状とした。成形材料には結晶性で熱収縮が大きいポリアセタール(三菱エンジニアリングプラスチック(株)・ユピタールF10-01)を選定した。内部水管はできるだけ表面から近い位置で密に配置することが冷却的に望ましいが、近すぎると金型の強度が低下する。そこで水管のピッチや表面からの距離を決定するため、樹脂圧を受けて生じる金型の応力を有限要素解析により計算した。図12に金型の応力分布を示す。水管部分で最も高い応力が発生し、その値が前章で求めた疲労限度以下になるように水管の配置を決定した。また、水管の直径は冷却水の循環時の圧力損失を考慮して5.4mmとした。設計した水管形状を図13に示す。積層造形金型では図13(a)に示すように成形品表面近傍に水管を形成できるが、比較に用いた従来金型では機械加工上の制約により、同図(b)のように成形品から離れた位置にのみ水管を形成している。

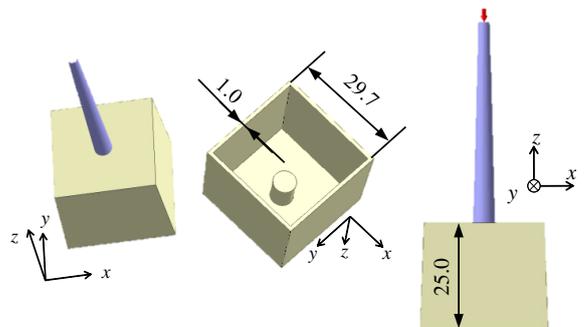


図11 成形品形状

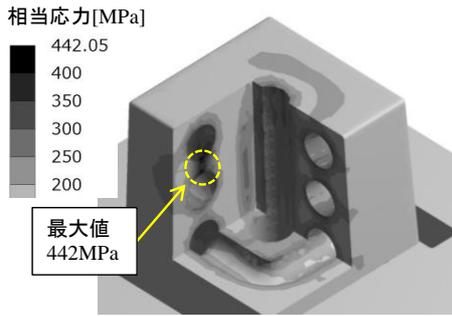


図12 金型の応力分布

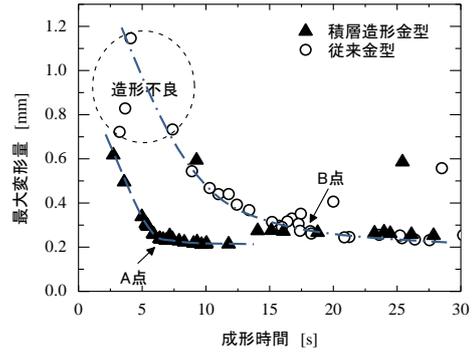
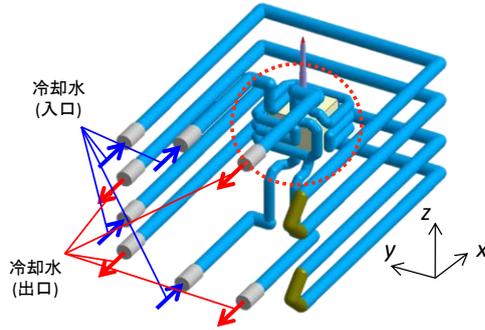
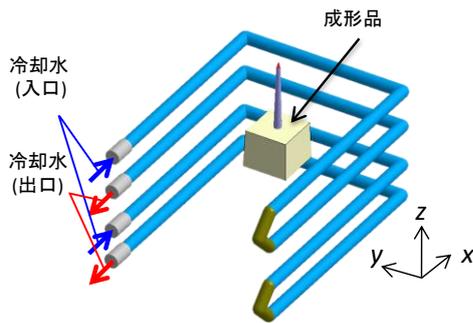


図14 成形時間と最大変形量の関係

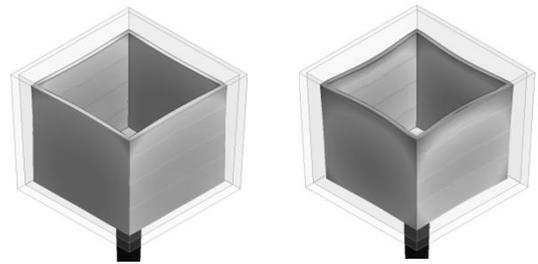


(a) 積層造形金型



(b) 従来金型

図13 金型の水管形状



(a) A点(積層造形金型) (b) B点(従来金型)

図15 成形品の変形形状

品の変形を図15に示す。従来金型では成形品内側に大きな反りが生じたのに対し、積層造形金型では収縮量の差は小さいが、反り量は大きく低減していることが確認できる。

4. 2 樹脂流動解析

複雑水管の効果の予測には、樹脂流動解析(コアテックシステム・Moldex3D)を使用した。射出成形においては射出時間や保圧力、冷却水温などの各成形パラメータを適正に設定する必要がある。そこで成形時間と最大変形量が最小となるように逐次近似最適化³⁾を行い、最適な成形パラメータを求めた。最適化されるまでに得られた全ての解析結果の最大変形量と成形時間の関係を図14に示す。同図からわかるように、成形時間が短くなるにつれて最大変形量が大きくなる傾向にあり、積層造形金型では、従来金型と比べて最大変形量、成形時間共に減少している。変形量の減少が収束したA点(積層造形金型)、B点(従来金型)における成形

4. 3 射出成形実験

実験に用いた金型は、金属3Dプリンタで積層造形した後に機械加工、放電加工、研磨加工を行って仕上げた。金型の表面粗さはRa0.1 μ mである。試作した金型を図16に示す。内部複雑水管の有効性を調べるため、射出成型機((株)ソディック・GL30-LP)を用いて成形実

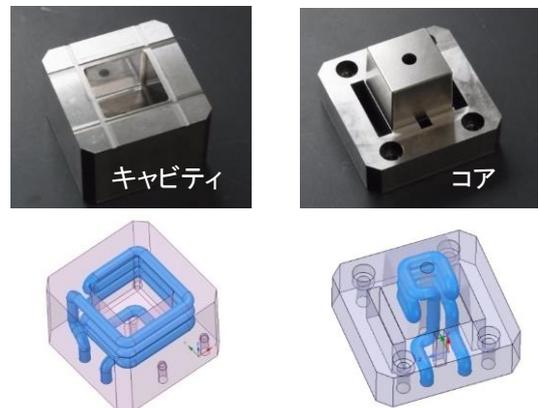


図16 製作した金型

験を行った。実験状況を図17に、成形品写真を図18に示す。成形条件は前節で得られた最適条件とした。図18からわかるように、従来金型の成形品では明らかに内反りが発生していたのに対し、積層造形金型の成形品では反りをほとんど確認できない。図19は熱画像計測装置で測定した取り出し直後の成形品の温度分布である。従来金型では成形品の冷却不足で温度が高く、温度ムラを生じている。一方、積層造形金型では温度ムラがなく均一に冷却されている。このように成形品の温度ムラが無くなったことが反り抑制の大きな要因であると考えられる。図20に成形時間と最大反り量の関係を示す。積層造形金型では成形時間1/2以下、成形品の反り量1/4以下に低減できていることがわかる。また、解析結果と実験結果は概ね一致しており、樹脂流動解析は複雑水管の設計、および効果の予測に有効な手段である。

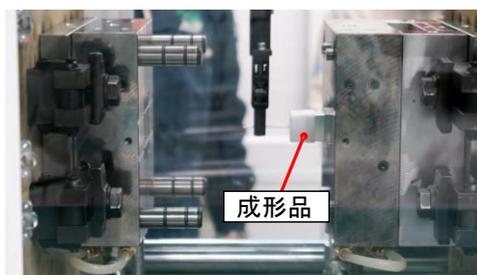


図17 実験状況



(a) 積層造形金型

(b) 従来金型

図18 成形品写真

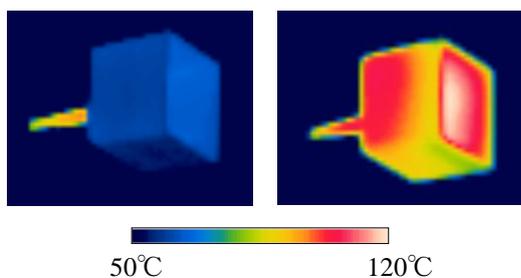


図19 取り出し直後の成形品の温度分布

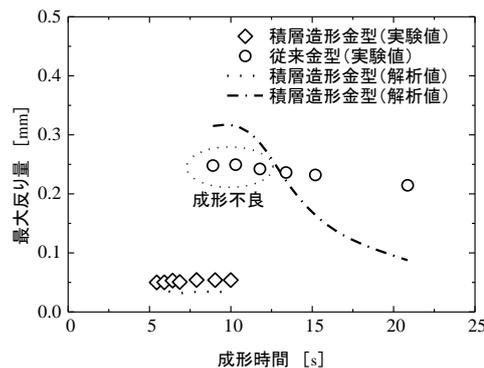


図20 成形時間と最大反り量の関係

5. 結 言

金属3Dプリンタを高付加価値な部品や金型生産に活用することを目的に、造形限界の評価や疲労強度の改善、および射出成形金型の設計と評価を実施し、以下の結果を得た。

- (1) レーザの単照射では造形物の内部に未熔融による欠陥を生じたが、レーザの二重照射を行うことで欠陥は微細化され、疲労強度の改善に有効であった。
- (2) 金属3Dプリンタを用いて試作した内部に複雑水管を有する金型は、成形品の温度を均一、かつ迅速に冷却でき、成形時間の短縮や反りを低減できる。

謝 辞

本研究を遂行するに当たり、多大なるご協力を頂きました(株)ソディック、並びに金沢大学教授北山哲士氏に感謝します。

参考文献

- 1) 唐土庄太郎, 増尾大慈, 矢倉孟, 山本泰弘. “積層造形とHIP処理によって準備したTi-6Al-4V材料の機械的特性”. 粉体および粉末冶金. 2013, vol. 61, no. 5, p. 250-254.
- 2) 村上敬宜, 宇宿尚史. “介在物寸法の統計的評価とそれに基づく高硬さ鋼の疲労限度予測”. 日本機械学会論文集(A編). 1989, vol. 55, no. 510, p. 213-221.
- 3) Satoshi Kitayama, Hiroyasu Miyakawa, Masahiro Takano, Shuji Aiba. “Multi-objective optimization of injection molding process parameters for short cycle time and warpage reduction using conformal cooling channel”. Int J AdvManf Technol. 2016, published.