

ハイサイクルダイカスト成形を実現する三次元冷却金型の 金属 3D プリント技術の構築

デジタルものづくり課 山本貴文、小川結貴、川堰宣隆*

1. 緒言

金属材料を対象とした 3D プリント技術として汎用的な手法であるレーザ積層造形(Laser powder bed fusion: LPBF)は、種々の産業分野で社会実装が加速している。射出成形加工の分野では、金型内部に三次元的な冷却流路を設けることで、生産速度向上、製品形状の高精度化、金型の高寿命化などを指向した熱制御が可能となり、生産現場では LPBF 製金型の実装が進行している。金型の素材は Fe と Ni を主成分としたマルエージング鋼が最も汎用的であり、これは時効硬化熱処理により析出硬化を図れる材料である。同素材は、LPBF の分野では樹脂成形用の金型として従来より使用されてきたが、最近ではより過酷な熱環境に晒されるアルミダイカストの金型素材としても報告例がある¹⁾。一方、マルエージング鋼は 490℃及び 610℃付近で金属間化合物の析出、700℃付近では $\alpha \rightarrow \gamma$ 変態が生じることが知られる²⁾。これは、ダイカスト環境下では過熱に伴う組織・相変化が生じ得ることを示唆し、金型の長期的な運用には懸念があると予想される。故に、現状のダイカスト金型の素材として最も実績を有する熱間工具鋼の粉末を用いた LPBF が有望な選択肢に成り得る。そこで、本研究では熱間工具鋼を用いた LPBF の適用性を検討し、より健全な金型を製造するために不可欠なプロセスパラメータや造形体の組織・機械的特性の関係を明らかにすることとした。

2. 実験方法

熱間工具鋼の粉末には、大同特殊鋼製の LTX™(SKD61 相当)合金粉末を使用した。同粉末は、化学組成の調整によりマルテンサイト変態開始温度を低くすることで、造形時の相変化に伴う体積変化から生じる歪を軽減し、造形時の割れ発生を抑制できる特徴を有する³⁾。これを造形材料として直径 10 mm、高さ 5 mm の円柱試験体を作製し、高密度体が得られるプロセスパラメータを探索した。LPBF 装置には、独 EOS 社製の EOSINT M280 を用いた。積層厚 40 μm 、ベースプレートの予熱温度 200℃の条件下で、レーザ照射条件(レーザ出力、走査速度、走査ピッチ)を可変した。造形は Ar 雰囲気下(酸素濃度: 約 0.1%以下)と N₂ 雰囲気下(酸素濃度: 約 0.5%以下)の 2 種の雰囲気で行った。得られた造形体の密度は、アルキメデス法で計測した。また、断面試料を機械研磨で鏡面に仕

上げて、組織観察を行った。次いで、機械的特性を評価するために、引張試験を実施した。引張試験時の応力方向が積層方向と鉛直関係となるように、LPBF 装置で作製した 12 mm×50 mm×H15 mm のブロックから、全長 46 mm、平行部 11 mm×3 mm、厚み 2 mm の小型試験片を切り出した。試験機には万能試験機(島津製作所、AG-50KNX)を用い、室温にて試験速度 1 mm/min の条件下で試験を実施した。

3. 実験結果

Ar 雰囲気下と N₂ 雰囲気下でレーザ照射条件の探索実験を行ったところ、Ar 雰囲気下では金属光沢を呈する造形体が得られたのに対し、N₂ 雰囲気では造形体表面がレーザの投入エネルギー量が小さい場合は黄色、高くなるほど青色に変化する傾向が見受けられた。N₂ 雰囲気下の挙動は、熔融凝固時にチャンバー内の酸素あるいは窒素が固溶、もしくは化合物を形成したために生じたと推察される。Fig. 1 に、粉末層に投入されるレーザエネルギー密度 E_d と密度の関係を整理した。 E_d は各レーザ照射パラメータから、式(1)により算出できる。

$$E_d(\text{J/mm}^3) = \frac{P(\text{J/s})}{v(\text{mm/s}) \cdot s(\text{mm}) \cdot t(\text{mm})} \quad (1)$$

ここで、 P はレーザ出力、 v は走査速度、 s は走査ピッチ、 t は積層厚を表す。Ar 雰囲気下と N₂ 雰囲気下での造形体の密度を同一のエネルギー密度で比較すると、概ね Ar 雰囲気下の方が高密度体を得られやすい傾向があった。なお、最適なエネルギー密度帯は、Ar 雰囲気下で 78 J/mm³ 付近、N₂ 雰囲気下で 63 J/mm³ 付近であり、N₂ 雰囲気下の方がより少ない熔融エネルギーで高密度化が可能である。また、これらの造形体の断面観察からは、試料内部にほとんど空隙が認められなかった。この結果は、両雰囲気下の造形体の密度差は、空隙に起因するものではなく、造形体を構成する化学組成の差異(即ち、酸素や窒素の固溶等)に起因することを示唆している。

Fig. 2 は、両雰囲気下で作製した高密度体の組織写真である。観察断面は、造形面に対して鉛直関係となる断面である。Fig. 2(a) より、断面中には鱗のような半円形状の組織形態が観測された。半円形状の組織はレーザ照射跡に対応し、これは LPBF 特有の組織形態である。一方、N₂ 雰囲気下ではベースとなる金属組織は Ar 雰囲気下と

*1 現 企画管理部

同じであるものの、造形方向に伸長した黒色の模様が観測された。これらは、前述した窒素あるいは酸素に起因して生じたものであると推察されるが、詳細な組織/相解析により、相同定や形成に至る過程を明らかにする必要があると考えている。

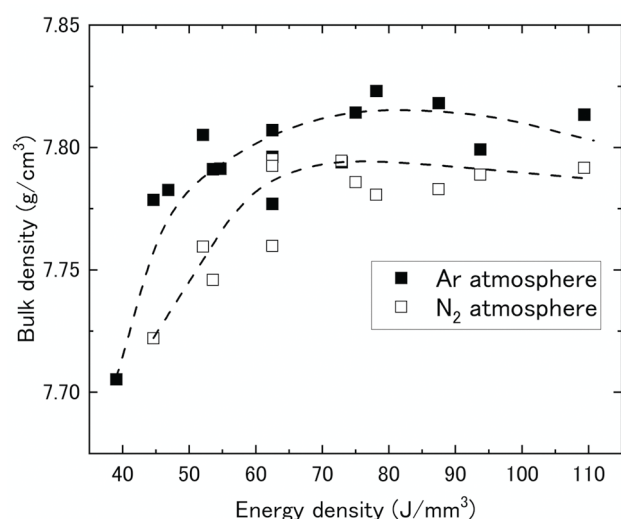


Fig. 1 エネルギー密度と造形体の密度の関係

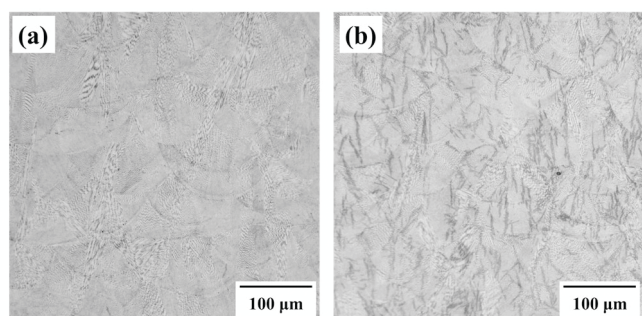


Fig. 2 造形体の組織写真: (a) Ar 雰囲気、(b) N₂ 雰囲気

Fig. 3 は、両雰囲気下で作製した造形体(造形まま材)の引張試験より取得した機械的特性(3 測定の実測値)を示す。最大引張強度と 0.2%耐力は、それぞれ約 2000MPa と約 1500MPa を示し、これらには造形雰囲気による依存性は認められなかった。一方、伸びは Ar 雰囲気下では 4.7%、N₂ 雰囲気下では 3.3%を示し、Ar 雰囲気を適用することで約 40%改善する傾向が見られた。今後、前述した組織変化との相関を明らかにするとともに、熱処理による機械的特性の制御性も検討を行う予定である。

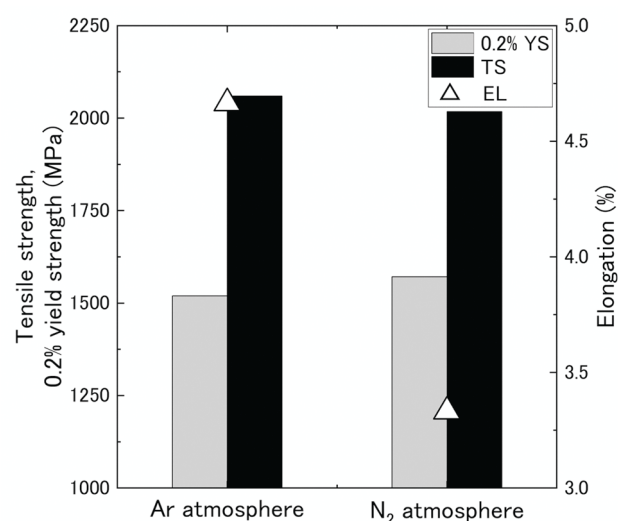


Fig. 3 造形体の最大引張強度・0.2%耐力・伸び

参考文献

- 1) 佐藤良輔 他: 鋳造工学 全国講演大会講演概要集, **176** (2020) 94-95
- 2) 高田尚記 他: 鉄と鋼, **109** (2023) 201-214
- 3) 吉本隆, 紙本朝子: 電気製鋼, **93** (2022) 21-28

キーワード : Additive Manufacturing、熱間工具鋼、ダイカスト、三次元冷却金型

Development of Metal AM Technology for 3D Cooling Molds Applicable to High-Cycle Die Casting

Digital Manufacturing Section; Takafumi YAMAMOTO, Yuki OGAWA and Noritaka KAWASEGI*¹

To enhance the applicability of additively manufactured die casting mold, we focused on the LPBF of the hot work tool steel. The relationship of process parameters and microstructure/mechanical properties, which are essential to produce a more robust mold, was investigated. Under two different atmospheres (Ar and N₂), optimization of the laser parameters allowed the production of samples with nearly full density. The difference in the building atmosphere affected the microstructure due to the rapid melting and solidification caused by laser irradiation. Furthermore, the results of the tensile test suggested that applying an Ar atmosphere could improve the elongation by about 40% compared to N₂ atmosphere.