

5 レーザ積層造形法を用いたダイカスト金型造形条件の検討

藤本直也、寺山 朗、田邊栄司

Investigation of die casting mold forming conditions using laser additive manufacturing

FUJIMOTO Naoya, TERAYAMA Akira and TANABE Eishi

In recent years, there has been much research on the manufacture of die casting molds with complex water-cooled pores in the interior by the additive manufacturing method. In the lamination molding of hot work tool steel, which is the mold material, cracking due to phase transformation caused by rapid cooling after molding has become a problem, and it is important to select appropriate molding conditions.

In this study, molding conditions were investigated using H13 metal powder, which is generally used for molds, and the relationship between energy density and porosity was evaluated. The higher the energy density, the denser the molding body. When the energy density exceeds the maximum point of the relationship with the relative density, the boundary of the melt pool becomes less clear, the voids increase, and the relative density decrease.

キーワード：レーザ積層造形、パウダーベッド、ダイカスト、金型

1 緒 言

金属積層造形法は、金型を使用せず複雑な形状や難しい造形を可能とする方法として活用されており、様々な分野で三次元複雑形状部品への適用が試みられている。金属積層造形法を用いて、切削加工では不可能な複雑形状水路を有するダイカスト金型の製作を可能にし、冷却性能の向上やハイサイクル化等の成果につながっている¹⁾。一方で、金属積層造形法では、造形後に急冷することが必須になっているため、それによる相変態に起因して発生するクラックが問題となっている²⁾。そのため、トラブルなく造形するには、適切な造形条件を選定することが重要である

本研究では、ダイカストの金型に用いられる熱間工具鋼 (H13) の金属粉末を、条件を変えて造形し、得られた造形物の機械的特性及び金属組織に及ぼす造形条件の影響を検討した。

2 実験方法

2.1 金属粉末の特性

造形用の金属粉末として、H13 (Carpenter Additive 製) を用いて造形を行った。粉末形状を図1に、粒度分布を図2に示す。28.4 μm を50%径 (中位径) とし、20 μm 程度の小さい形状と、40 μm 程度の大きい粉末が混在していた。60 μm を超えるサイズにおいてピークが立っているが、顕微鏡では観察されなかったため、凝集によるものと考えられる。

2.2 造形条件

造形にはパウダーベッド (PBF) 式造形機 SLM280HL (SLM ソリューションズ社製) を用いた。本研究では、緻密な造形体を得ることを目的として、レーザ出力 P (W) 及び走査速度 v (mm/s) を変化させた25条件のプロセスマップ³⁾で造形を行った。各条件は、式(1)で与えられるエネルギー密度 E (J/mm³) で整理した。

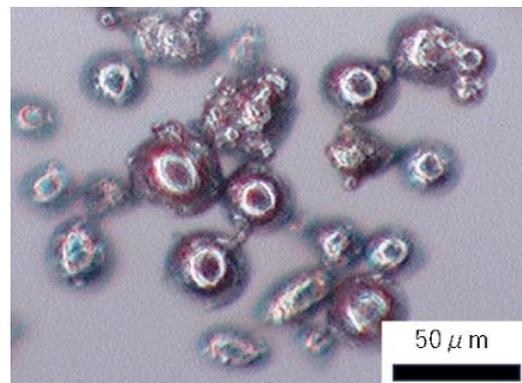


図1 H13 粉末

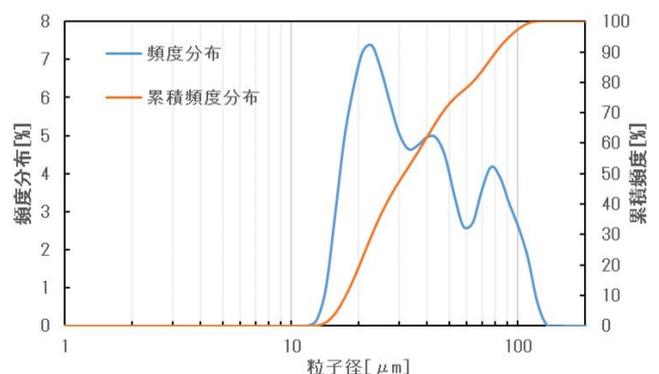


図2 粒度分布

$$E = \frac{P}{v \cdot h \cdot t} \quad (1)$$

P : レーザ出力、175、225、275、325、375W
 v : 走査速度、600、700、800、900、1000mm/s
 h : ハッチ幅 (レーザー間隔)、0.12mm
 t : 積層高さ、0.05mm

造形体の形状は1辺10mmの立方体として、積層方向はベースプレートに対して90°とした。また、造形雰囲気はアルゴンとした。

2.3 物性試験

各条件で得られた造形体について、密度を測定した。最も密度が高かった造形体は、造形条件(b) : エネルギー密度 $E = 65 \text{ J/mm}^3$ 、レーザー出力 $P = 275 \text{ W}$ 、走査速度 $v = 700 \text{ m/s}$ であった。(b)の断面組織は他の造形体と比べて空隙が少なく、密度が高いため、その造形体の密度 7.75 g/cm^3 を真密度と仮定して、各造形体の相対密度 D を算出した。また、造形体断面を研磨し、中心部の空隙を光学顕微鏡で確認した。その後、造形体断面をピクリン酸溶液でエッチングして金属組織を光学顕微鏡で観察し、ビッカース硬さを測定した。

2.4 強度試験

相対密度 D が高い上位5条件から、図3に示すダンベル形状引張試験片を造形した。積層方向は引張方向に対して垂直とし、平行部の断面形状は3mm角とした。また、シャルピー衝撃試験片 (JIS G 0202に則った10mm×10mm×55mmの直方体) を造形し、V切欠き加工を行い、4号試験片を製作した。造形後の試料及び造形後に金型を想定した熱処理をした試料を用いて、5条件各1試料で引張試験及び衝撃試験を行った。

2.5 EBSD法による結晶解析

造形後の試料及び造形後に熱処理した試料結晶粒径及び結晶方位を調査するために、EBSD法によって、金属粉末及び造形体の断面を観察した。

3 結果及び考察

3.1 造形条件の評価

エネルギー密度 E 及び相対密度 D の関係を図4に示す。相対密度は、エネルギー密度 E の増加に伴って増加

し、エネルギー密度 $E = 50 \sim 60 \text{ J/mm}^3$ において極大となり、以後はゆるやかに減少した。高エネルギーで溶融した際の凝固による引けが原因と考えられる。レーザー出力 P と走査速度 v からなるプロセスマップを相対密度によって3段階で評価した結果を図5に示す。レーザー出力 $P = 275 \text{ W}$ 、走査速度 $v = 700 \sim 900 \text{ m/s}$ の条件において相対密度 $D \geq 99.96\%$ で極大となり、良好な造形条件であることが分かった。

エッチング前の造形体断面の中心部及び、エッチング後の断面上部の金属組織写真を図6に示す。相対密度 D が低いほど、空隙のサイズが大きく、空隙の数が増える傾向が確認できた。(b)の造形体では空隙がほぼ見られないが、(c)の造形体では数 μm の小さな空隙が点在し、(a)の造形体では数十～数百 μm の空隙が多数見られた。また、エッチング後の写真から、半円状のメルトプール⁴⁾の凝固組織 (図中に○で示す) が見られた。(b)、(a)の造形体では、メルトプールの間隔はハッチ幅に相当する120～140 μm 程度であり、エネルギー密度が高い(c)の造形体では、隣接するメルトプール同士の境界が明確でなく、200～280 μm 程度のサイズになっていることが確認できた。

また、造形体最表面には内部とは明らかに異なる白い組織が見られた。これは急冷凝固により生成されたチル層と考えられる。(b)の造形体では、このチル層の厚みが150～170 μm 程度であり、エネルギー密度 E の増加に伴って厚くなっていた。試料断面の中心部分の硬さを測定した結果、ビッカース硬さからの換算値で54～56HRC程度であったのに対して、チル層の硬さは60～63HRC程度の高い硬さであった。

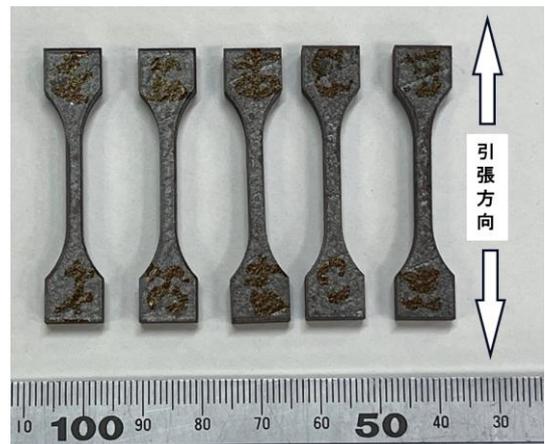


図3 造形した引張試験片

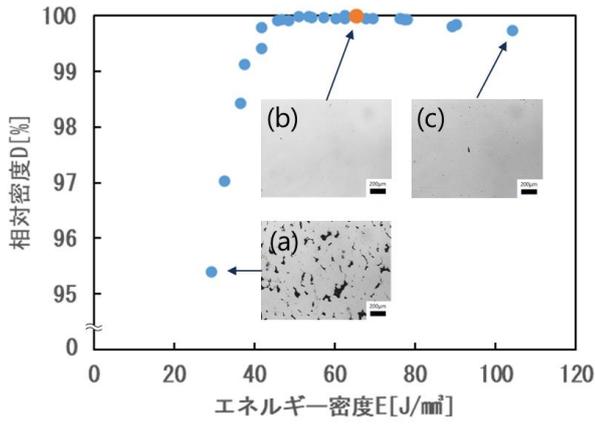


図4 エネルギー密度及び相対密度の関係

- : 相対密度 $\geq 99.96\%$
- ▲ : $99.96\% >$ 相対密度 $\geq 99.80\%$
- ✕ : $99.80\% >$ 相対密度

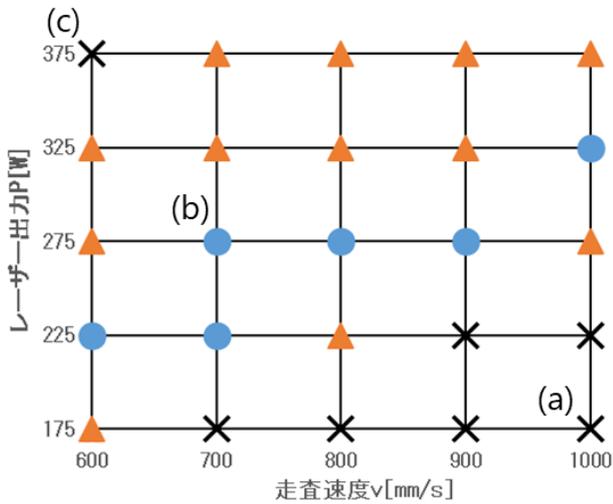


図5 プロセスマップの評価

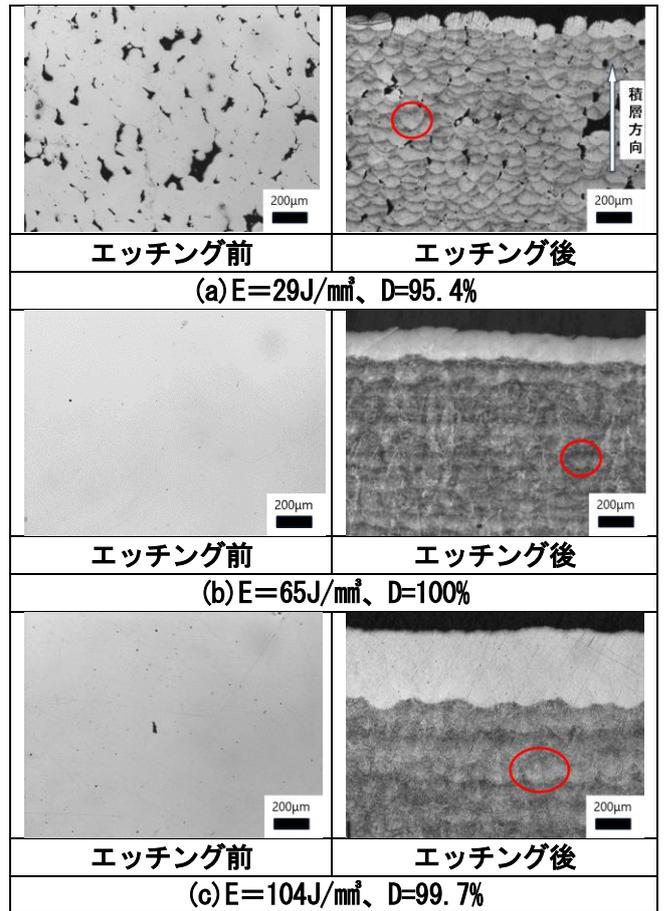


図6 断面組織写真

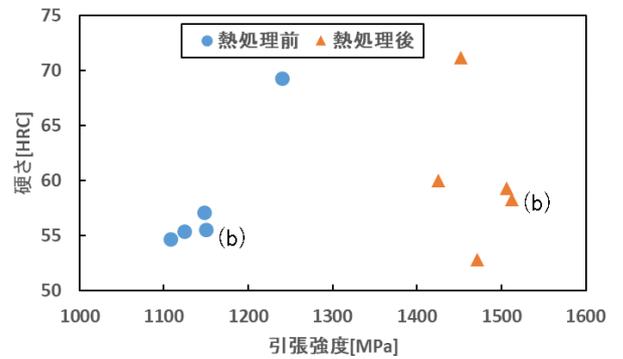


図7 引張強度と硬さの関係

3.2 強度試験結果

引張強度と硬さの関係を図7に示す。熱処理前と熱処理後で比較すると、熱処理によって同程度の硬さの引張強度が300~400MPa向上した。また、シャルピー衝撃試験結果を図8に示す。衝撃値は熱処理前及び熱処理後のいずれの造形体についても10J/cm²以下と報告されている積層造形された金型鋼材の衝撃値⁵⁾よりも低い値であった。熱処理によって引張強度が向上しても衝撃値が向上していないため、造形時やサポート材取り外し時にクラックが入るなどの影響を受けたことが原因として考えられるが、詳細は今後検討していく必要がある。

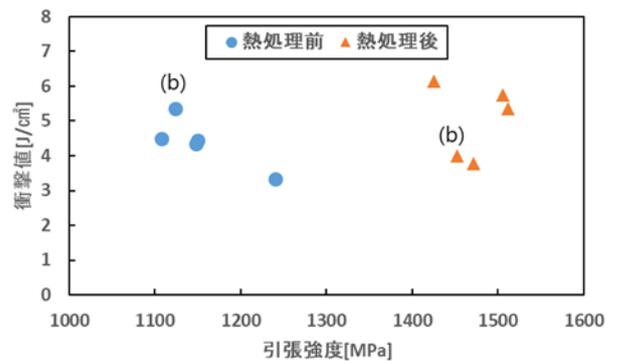
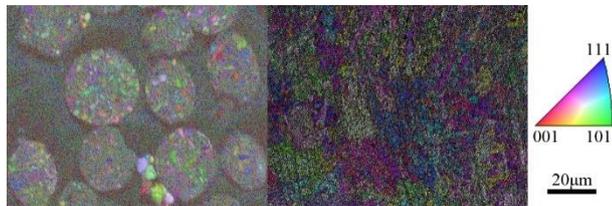


図8 衝撃値と引張強度の関係

3.3 EBSD を用いた断面観察

EBSDによって金属粉末及びレーザー出力 P : 275W、走査速度 v : 800mm/s、エネルギー密度 $E=54.6\text{J}/\text{mm}^2$ の造形体の断面を観察し、得られた白黒IQとカラーIPFを合成した像を図9に示す。金属粉末断面の結晶粒は $1\sim 5\mu\text{m}$ 程度の大きさであるのに対して、造形後はレーザーによる加熱の影響によって $20\sim 30\mu\text{m}$ 程度と大きくなっていた。レーザー積層造形では、特定の材料や条件下で得られた造形体の組織において、メルトプールが広がる方向へ優先配向した集合組織⁶⁾が見られたと報告されていたが、本造形体では集合組織は見られなかった。



金属粉末

造形体

図9 白黒IQとカラーIPFの合成像

4 結 言

H13の金属粉末を積層造形し、レーザー出力 P と走査速度 v によってエネルギー密度 E を変化させたプロセスマップを作成し、緻密な造形体が得られる積層造形条件を模索するとともに、造形体の機械的特性及び金属組織に関する評価を行った。

- (1) エネルギー密度が低くなるほど空隙が多くかつ大きくなることが分かった。エネルギー密度 $E=56\sim 65\text{J}/\text{mm}^2$ となるレーザー出力 $P=275\text{W}$ 、走査速度 $v=700$

$\sim 900\text{m/s}$ の造形条件で相対密度が極大となり、より大きいエネルギー密度では、メルトプールの境界が明確でなくなり、空隙が増え、相対密度が小さくなる。また、表層部には内部とは組織が異なるチル層ができることが分かった。

- (2) 造形体の引張試験結果から、引張強度は熱処理によって $300\sim 400\text{MPa}$ 向上した。また、衝撃試験を行ったところ、熱処理前の試料も、熱処理後の試料も $3\sim 6\text{J}/\text{cm}^2$ と非常に低い衝撃値であった。
- (3) 造形体のEBSD観察結果から、金属粉末よりも結晶粒が大きくなっていることが分かった。また、特定材料・条件において形成されることがあるレーザーの影響による集合組織の優先配向は見られなかった。

謝 辞

近畿大学の研究員受け入れ制度を利用して実施した本研究の遂行に当たり、京極秀樹特任教授並びに米原牧子研究員には多くの貴重なアドバイスを頂きました。ここに厚く感謝の意を表します。

文 献

- 1) 木村他：(株)豊田自動織機技報, No. 70, 2019
- 2) 辻井他：(株)山陽特殊製鋼技報, Vol. 2, No. 1, 1995
- 3) 荒木他：粉体及び金属冶金, Vol. 65, No. 7, 2018
- 4) 鈴木他：スマートプロセス学会誌, 第10巻, 第3号, 2021
- 5) 吉本他：大同特殊鋼(株)技術資料, vol193, 2022
- 6) 堤他：金属, vol. 93, No. 11, 2023