

# 合金工具鋼の 3D 積層造形技術の研究

## 3D Additive Manufacturing for Alloy Tool Steel

田野 誠 M. TANO 美佐田泰治 Y. MISADA 長濱貴也 T. NAGAHAMA  
溝口高史 T. MIZOGUCHI 三井哲弥 T. MITSUI 星野広行 H. HOSHINO

Laser beam powder bed fusion (PBF-LB) for alloy tool steel is developed to fabricate casting dies for automobile parts by additive manufacturing. Internal defects such as pores, micro cracks and carbide, which deteriorate mechanical properties, have been improved by the developed process parameters, reduction of crack susceptibility index, and heat treatment. As a result, the workpieces manufactured using PBF-LB achieved a tensile strength and Charpy impact value equivalent to the bulk samples.

**Key Words:** additive manufacturing, laser beam powder bed fusion, alloy tool steel

### 1. はじめに

近年、付加加工（AM：Additive Manufacturing）技術による生産技術革新が進んできている中、3D 積層造形技術が注目されている<sup>1)</sup>。金属積層造形の中で、主要な方式の一つである Laser Beam Powder Bed Fusion (PBF-LB) は、従来の工法では実現できない内部構造や複雑形状の加工が可能である<sup>2)</sup>。適用例として、自動車部品の鋳造金型が挙げられ、複雑形状の水冷管を内部に設け、形状に合わせて冷却条件を最適化することで、通常の金型に比べて製品の寸法精度および金型の寿命が向上するなどの利点がある<sup>3)-5)</sup>。一方で、PBF-LB 方式はレーザーで金属粉末を熔融凝固させる工法であり、加工条件や粉末特性が適切でない場合は、造形物の内部に欠陥が生じて機械的性質が低下する。特に、炭素含有量が多い材料は割れが発生しやすく、造形が困難である。そのため、PBF-LB 方式で金型を造形する場合、じん性が高いマルエージング鋼が用いられるが、通常の鋳造金型に使用される合金工具鋼と比べて熱伝導率や熱疲労特性（ヒートチェック）など性能面で劣る。

そこで、本研究では鋳造金型に用いられる合金工具鋼 SKD61 の 3D 積層造形技術の基盤構築に取り組む。本報では、合金工具鋼の PBF-LB について現状把握した結果から、造形品質の改善に向けた課題を抽出し、検討した方策とその効果について検証した結果を報告する。

### 2. PBF-LB の現状把握

#### 2.1 造形方法

AM 技術の中で主要な方式の一つである PBF-LB は主に金属製品の造形に用いられる。図 1 に PBF-LB の概略図を示す。ベースプレート上に金属粉末をリコーターで敷き詰めて形成したパウダーベッドにレーザーを照射して熔融凝固させる工程を繰り返して、1 層ずつ積層していく造形方法である。このように、製品の形状を 1 層ごとに積層して造形することで、内部構造や複雑形状の加工が可能となる。

#### 2.2 造形実験

造形機は SLM ソリューションズ社製の SLM280<sup>HL</sup>（最大造形寸法：280mm × 280mm × 350mm）を使用した。金属粉末は SKD61 粉末（粒径  $\phi 10 \sim 45\mu\text{m}$ ）を使用した。表 1 に化学組成を示す。図 2 に PBF-LB における主な造形パラメーターを示す。PBF-LB ではこ

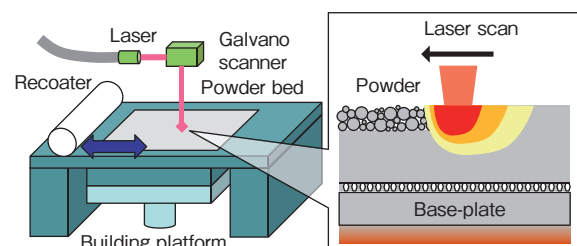


図 1 PBF-LB の概略図  
Schematic of PBF-LB

これらの造形パラメーターを包括した指標であるエネルギー密度  $E$  ( $J/mm^3$ ) と造形物の品質に相関があることが報告されている<sup>6)</sup>。エネルギー密度は、 $P$  を出力( $W$ )、 $v$  を走査速度 ( $mm/s$ )、 $s$  を走査間隔 ( $mm$ )、 $t$  を積層厚さ ( $mm$ ) として、次式で表される。

$$E = P/vst \tag{1}$$

本研究においても、エネルギー密度と造形物品質の評価指標である相対密度との関係から、造形結果を評価する。表2に加工条件を示す。ベースプレート上に造形パラメーターを変えた試験片 ( $15mm \times 15mm \times 30mm$ ) を16個造形して、アルキメデス法で理論密度  $7.78g/cm^3$  に対する相対密度を測定した。なお、造形物の温度勾配を緩和して熱応力を低減するために、ベースプレートの下に配置したヒーターでパウダーベッドを予備加熱しており、本報で実施した造形では  $200^\circ C$  とした。

### 2.3 実験結果

図3にエネルギー密度と相対密度の関係を示す。エネルギー密度を上昇させると相対密度も向上するが、適切なエネルギー密度を超えると相対密度が低下することがわかった。このように、適切なエネルギー密度の範囲では高い相対密度が得られ、その最大値は  $99.5\%$  であっ

表1 化学組成 (wt%)  
Chemical composition (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
0.41	1.09	0.42	0.012	0.006	5.02	1.25	1.10

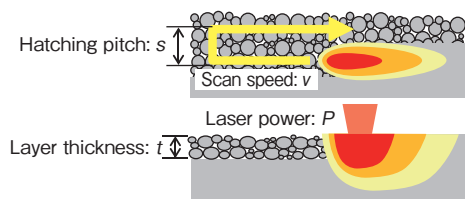


図2 造形パラメーター  
Process parameters

表2 加工条件  
Fabrication conditions

レーザー出力	155 ~ 480W
走査速度	460 ~ 1 430mm/s
走査間隔	0.08 ~ 0.21mm
積層厚さ	0.05mm

た。また、エネルギー密度が適切でない範囲では、レーザー照射時に粉末が未熔融の状態になることや、スパッタが生じて熔融不良となることで、造形物の内部に空孔が残ったため、相対密度が低いと考える。

造形物の機械的性質を評価するために、相対密度  $99.5\%$  が得られた条件で造形した試験片の引張試験 (JIS Z 2241 準拠, 試験片寸法  $\phi 7mm \times 64mm$ ) とシャルピー衝撃試験 (JIS Z 2242 準拠, 試験片寸法  $12mm \times 12mm \times 56mm$ ) を実施した。なお、As-built (造形まま) の硬さは  $55HRC$  であったため、鑄造金型に求められる硬さ ( $42 \sim 52HRC$ ) にするため、 $600^\circ C \times 4h$  (空冷)  $\times 2$  回の熱処理を実施し、 $47HRC$  とした。図4に機械的性質の測定結果を示す。試験片の硬さ相当の溶製材との比較で、引張強さとシャルピー衝撃値はそれぞれ  $80\%$  と  $20\%$  まで低下していることがわかった。機械的性質が低下する要因として、造形物内部の欠陥が影響することが考えられたため、造形物断面を観察した結果、図5に示すような微小な空孔や割れ、炭化物の析出が認められた。

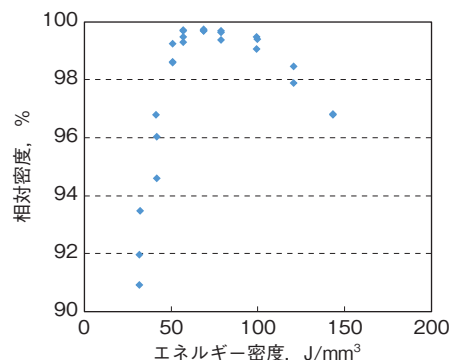


図3 エネルギー密度と相対密度の関係  
Relationship between energy density and relative density

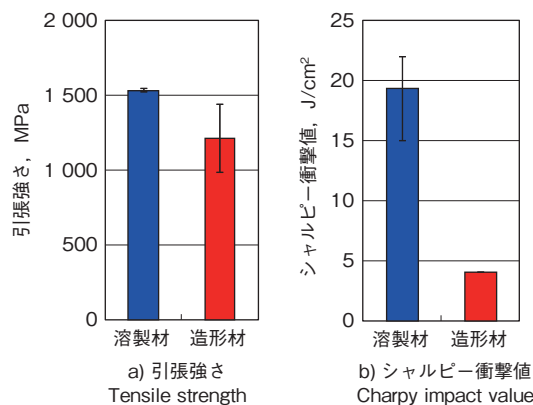


図4 機械的性質の測定結果  
Measurement result of mechanical properties

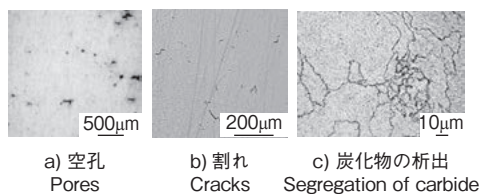


図5 造形物の断面観察結果  
Optical micrograph of specimens

### 3. 造形品質の向上

造形物の機械的性質が低下した要因として、微小な空孔や割れ、炭化物の析出が挙げられる。そのため、溶製材と同等の機械的性質を達成することを目標に、内部欠陥を低減する方策を検討し、造形品質の向上に取り組んだ。

#### 3.1 空孔の低減

空孔の形状からレーザー照射時の融合不良に起因すると考え、その原因となるスパッタの抑制について検討した。図6に熱流体解析の結果を示す。溶融池の中央で特に高温となり蒸発圧力が上昇するため、スパッタが生じやすいと考えられる。そのため、レーザー出力を低減して過入熱を抑制する必要があるが、造形品質はエネルギー密度と相関があるため、相対密度が低下することが予想される。そこで、レーザー出力は溶融池の深さに対する影響が大きいことに着目して、粉末粒径を考慮して積層厚さを0.03mmまで低減した。その結果、従来の加工条件で得られた相対密度99.5%に対して、本方策によって99.8%まで向上した。

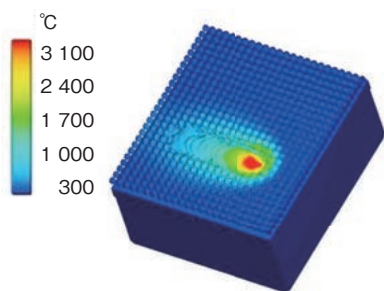


図6 熱流体解析の結果  
Result of thermal fluid analysis

#### 3.2 割れの抑制

割れは溶融池が凝固する過程で、固相間に残存した薄い液相部が熱応力によって開口して生じると考えられる。そこで、液相部に残る低融点化合物を低減するため

に、溶接の分野で割れやすさの指標として用いられる高温割れ感受性指数  $K$  が低く、割れ発生抑制が期待できる金型用高熱伝導率材（大同特殊鋼製、以下、高熱伝導率材）を選定した。高温割れ感受性指数  $K$  は各元素の含有量から次式で計算される<sup>7)</sup>。

$$K = \frac{C \times \left[ S + P + \frac{Si}{25} + Ni/100 \right]}{3Mn + Cr + Mo + V} \times 100 \quad (2)$$

表3に化学組成を示す。炭素とけい素が少ない組成であるため、高温割れ感受性指数はSKD61の2.9から0.7まで低下した。図5(b)に示す従来の割れ数26個/mm<sup>2</sup>に対して、観察した範囲では割れが確認されず大幅に抑制できることを確認した(図7)。

#### 3.3 炭化物偏析の抑制

高熱伝導率材はSKD61と組成が異なるため、金型使用範囲の硬さが得られる焼戻し温度を調査した。図8に焼戻し温度と硬さの関係を示す。600°C以下で金型の使用範囲の硬さが得られた。図9に550°Cで焼戻した後に断面観察した結果を示す。図5(c)で見られた炭化物の析出が低減することを確認した。

表3 化学組成 (wt%)  
Chemical composition (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
0.32	0.06	0.37	0.008	0.007	5.21	1.22	0.40

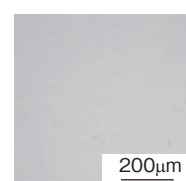


図7 造形物の断面観察結果  
Optical micrograph of specimens

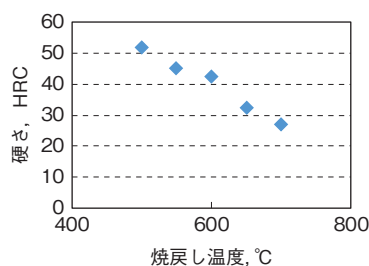


図8 焼戻し温度と硬さの関係  
Relationship between tempering temperature and hardness

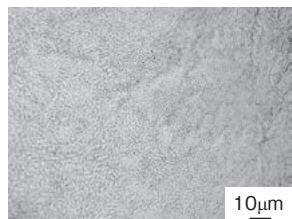


図9 造形物の断面観察結果  
Optical micrograph of specimens

### 3.4 機械的性質の評価

造形品質を向上させるために過入熱の抑制、割れ指数の低減、焼戻し温度の適正化を組み合わせ造形実験を行い、その機械的性質を評価した。なお、各試験片を550℃で焼戻した後の硬さは50HRCであったため、同等硬さのSKD61溶製材のカタログ値と比較した<sup>8)</sup>。

図10に機械的性質の測定結果を示す。造形品質向上の効果により、SKD61溶製材同等以上の引張強さとシャルピー衝撃値が得られることを確認した。特にシャルピー衝撃値が溶製材と比べて大幅に向上した要因はPBF-LBの特徴である急冷凝固によって金属組織が微細化したことによると考える。

## 4. おわりに

生産技術革新を推進するために、PBF-LBによる合金工具鋼の積層造形技術の基盤を構築した。レーザー照射時の熔融凝固や熱処理の際に生じる内部欠陥により機械的性質が低下する課題に対して、造形品質を向上させる方策を検討し、溶製材と同等の機械的性質が得られた。

今後は試作金型の評価とPBF-LBを活用するための最適設計技術の開発に取り組み、本技術の実用化による生産技術革新の実現を目指す。

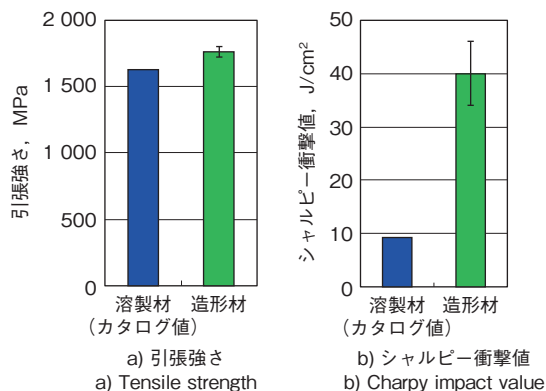


図10 機械的性質の測定結果  
Measurement result of mechanical properties

### 参考文献

- 1) 京極 秀樹：レーザーを用いた金属 Additive Manufacturing 技術の最新動向，精密工学会誌，82，7 (2016)619-623.
- 2) 技術研究組合次世代 3D 積層造形技術総合開発機構：金属積層造形技術入門(2016)8.
- 3) 京極秀樹：金属粉末レーザー積層造形技術の進展，溶接学会誌，83，4(2014)250-253.
- 4) M. Mazur, M. Leary, M. McMillan, J. Elambasseril, M. Brandt: SLM additive manufacture of H13 tool steel with conformal cooling and structural lattices, Rapid Prototyping Journal, 22, 3(2016)504-518.
- 5) M. Mazur, P. Brincat, M. Leary, M. Brandt: Numerical and experimental evaluation of a conformally cooled H13 steel injection mould manufactured with selective laser melting, Int. J. Advanced Manufacturing Technology, 93, (2017) 881-900.
- 6) 木村貴広，中本貴之：金属粉末レーザー積層造形法により作製した Al-10% Si-0.4% Mg 合金の組織と機械的性質，粉体および粉末冶金，61，11(2014)531-537.
- 7) 松田福久：溶接割れに関する材料上の諸問題－凝固割れについて－，溶接学会誌，44，7(1975)546-551.
- 8) 大同特殊鋼株式会社：DHA1-A カタログ No. SS0901

### 筆者



田野 誠\*  
M. TANO



美佐田泰治\*\*  
Y. MISADA



長濱貴也\*\*\*  
T. NAGAHAMA



溝口高史\*\*\*  
T. MIZOGUCHI



三井哲弥\*\*\*  
T. MITSUI



星野広行\*\*\*\*  
H. HOSHINO

\* 研究開発本部 加工技術研究部 博士 (工学)  
\*\* 研究開発本部 材料研究部  
\*\*\* 研究開発本部 加工技術研究部  
\*\*\*\* 生産サポート本部 素形材革新部