

# The 2nd Asia-Pacific International Conference on Additive Manufacturing (APICAM 2019)

名古屋工業大学 物理工学科  
教授 渡辺 義見

(平成 30 年度 国際会議等参加助成 AF-2018250-X2)

キーワード：レーザー積層造形法，ヘテロ凝固核，Al-TiC

## 1. 開催日時と開催場所

2019年6月30日から7月3日の間、オーストラリアのメルボルンで開催された 2nd Asia-Pacific International Conference on Additive Manufacturing (APICAM 2019)にて以下に紹介する「Selective laser melting of aluminum with TiC heterogeneous nucleation site particles (TiC ヘテロ凝固核粒子添加をしたアルミニウムのレーザー積層造形)」と題して招待講演を行う機会を与えて頂いたため、ここに報告する。

## 2. 国際会議報告

金属積層造形法の一つである SLM (Selective Laser Melting)は金属粉末を原料として、粉末層を形成し、レーザー照射により熔融・凝固を繰り返して三次元の積層物を造形する加工法であり、複雑形状の製品を短時間で加工できる。ここで、低比重かつ熱伝導性に優れたアルミニウムを、SLM により加工することで、軽量な熱制御部品などの実現が可能となる。しかし、SLM では造形体内部組織の粗大化・不均一化および粉末から発生するガスや凝固時の熔融部凝集による内部空孔の形成を原因とし、造形体の強度低下が欠点としてあげられる。SLM と同じく熔融・凝固プロセスを経ている casting 工学ではヘテロ凝固核粒子添加により、 casting 材の組織微細化および均一化が達成されている<sup>1-3)</sup>。このヘテロ凝固核粒子添加を SLM に応用することで造形体の組織微細化・均一化が期待される。さらに、母材と濡れ性の良い異物質を凝固核として添加することで熔融部の凝集が抑制され、内部空孔の減少が見込まれる。これらにより、造形体の強度向上が期待される<sup>4,5)</sup>。

本研究では造形体の強度向上を目的として、アルミニウムの casting においてヘテロ凝固核粒子として用いられている TiC 粒子をアルミニウム粉末に添加して積層造形を行った。そして、アルミニウム造形体の組織および強度に TiC 粒子が与える影響を調査した。

平均粒径 20  $\mu\text{m}$  の純アルミニウム粉末と、粒径が 2-5  $\mu\text{m}$  の TiC 粒子を用いて、TiC 粒子が混合粉末中において 0.1 vol%, 0.5 vol%および 1.0 vol%となるように純アルミニウム粉末に添加した。そして、60 分間攪拌し混合粉末を作製した。また、混合後に粉末の水分除去を目的として、200  $^{\circ}\text{C}$  の真空加熱処理を施した。加熱処理後これらの混合粉末を原料として積層造形装置により造形体を作製した。

Fig. 1 に示すようにレーザーの走査パターンを 1 層ごとに 90  $^{\circ}$  回転させ、アルミニウムベースプレート上に 5 mm  $\times$  7.5 mm の薄層を 10 mm 積み上げた。造形はアルゴン雰囲気で行い、レーザー照射条件を Table 1 に示す範囲で変化させた。作製した造形体の密度をアルキメデス法により測定し、相対密度を算出した。また、造形体の内部組織に TiC 粒子が及ぼす影響を調査するため、鉛直断面に対して EBSD (Electron Back Scattered Diffraction Pattern)法を用いて組織観察および結晶方位解析を行った。さらに、ビッカース硬度試験により造形体の強度評価を行った。

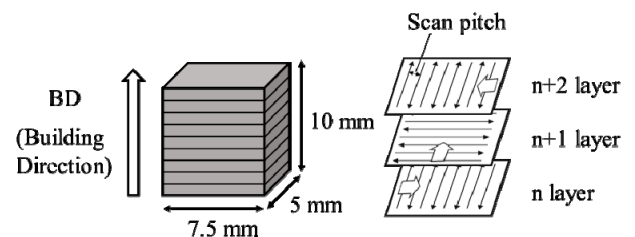


Fig. 1 試料形状とレーザー走査パターンの模式図。

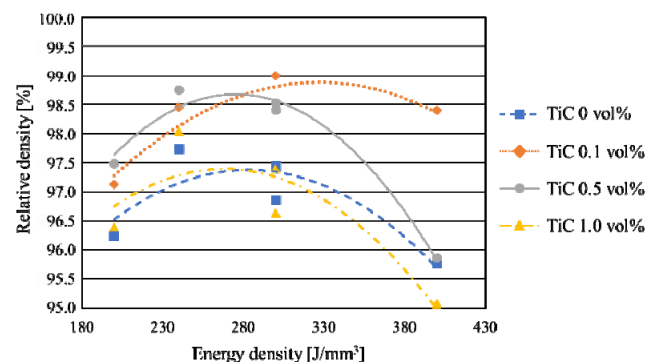


Fig. 2 造形体の相対密度に及ぼす TiC ヘテロ凝固核粒子添加の効果。

Table 1 レーザー照射条件。

Scan pitch [mm]	0.1
Layer thickness [mm]	0.025
Laser power [W]	300
Scan speed [mm/s]	300~600
Energy density [J/mm <sup>3</sup> ]	200~400

Fig. 2 にアルキメデス法により測定した密度を用いて算出した造形体の相対密度を示す。Fig. 2 より、TiC 粒子を 0.1 vol%あるいは 0.5 vol%含む造形体は、TiC 粒子を含まない造形体よりも高密度化していることがわかる。また、TiC 粒子を 0.1 vol%含む造形体は高エネルギー密度  $^{\circ}$ (400 J/mm<sup>3</sup>)の条件においても相対密度が大きく、空孔率が少ない。

Fig. 3(a)-(d)にそれぞれ、TiC 粒子の体積分率を 0 %, 0.1 %, 0.5 %, 1.0 %とし、エネルギー密度 240 J/mm<sup>3</sup>で作製した造形体鉛直断面の IPF (Inverse Pole Figure)マップおよび極点図を示す。試料座標系は積層方向 BD に対して、水平断面と平行に TD および ND を設定した。IPF マップの結晶方位の測定方向は測定面に平行な BD 方向で、測定の都合上(d)のみ 4 枚の IPF マップを合成し、極点測定も別々に行った。TiC 粒子を含まないあるいは 0.1 vol%含む造形体では、BD 方向に沿って<101>方向を優先方位とする粗大な柱状組織が形成している。一方、TiC 粒子を 0.5 vol%含む造形体では BD 方向に沿って<100>方向を優先方位とする微細な柱状組織が形成されており、TiC 粒子を 1.0 vol%含む造形体ではより微細な組織が形成されている。ヘテロ凝固核粒子の体積分率を増加させることで核生成サイトが増加し、結晶粒の微細化が達成された。しかし、積層方向への熱流による一方向凝固の影響が大きいため、組織の均一化は達成されなかった。

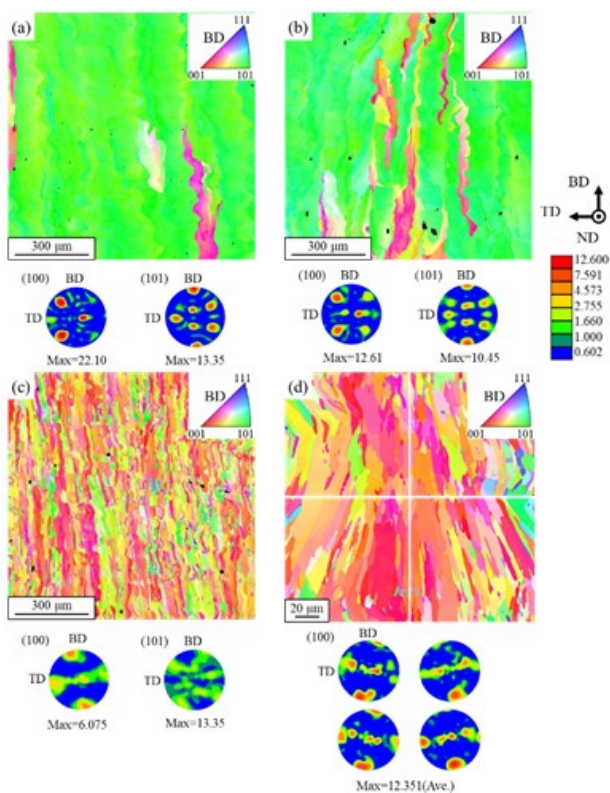


Fig. 3 エネルギー密度 240 J/mm<sup>3</sup>で作製した造形体鉛直断面の IPF (Inverse Pole Figure)マップおよび極点図。TiC 粒子の体積分率は(a) 0 %, (b) 0.1 %, (c) 0.5 %, および(d) 1.0 %である。

造形体の TiC 粒子の体積分率とビッカース硬さの関係を Fig. 4 に示す。造形体中の TiC 粒子の体積分率の増加に伴い、ビッカース硬さが向上した。これは結晶粒微細化による強化と造形体に残存する TiC 粒子による複合強化の重畳によるものと考えられる。

本研究ではアルミニウム粉末と TiC 粒子の混合粉末を原料として造形体を作製した。TiC 粒子の体積分率を 0.1 vol%あるいは 0.5 vol%とすることで内部空孔の少ない造形体を作製できた。TiC 粒子の体積分率を 0.5 vol%あるいは 1.0 vol%とすることで、造形体内部組織が微細化し、積層方向への柱状晶の結晶方位が変化することがわかった。また、TiC 粒子の体積分率の増加に伴い、ビッカース硬さが向上することがわかった。

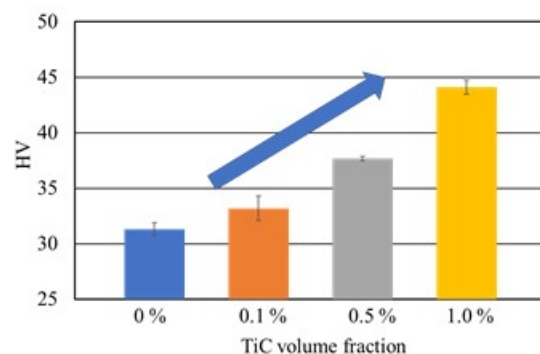


Fig. 4 造形体の TiC 粒子の体積分率とビッカース硬さの関係。

## 謝辞

本国際会議への出席、発表にあたり、公益財団法人天田財団よりご支援を得た。ここに心より感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) Y. Watanabe, T. Hamada and H. Sato: *Jpn J. Appl. Phys.*, **55**(2016), 01AG01.
- 2) Y. Watanabe, R. Yamazaki, K. Yamanaka and H. Sato: *J. Mater. Proc. Technol.*, **255**(2018), 400.
- 3) Y. Watanabe, K. Maekawa and H. Sato: *Jpn J. Appl. Phys.*, **57**(2018), 01AF08.
- 4) 渡辺義見, 佐藤雅史, 知場三周, 佐藤尚, 佐藤直子, 中野禪, 鈴木進補: レーザ加工学会誌, **26**(2019), 46.
- 5) 渡辺義見, 知場三周, 佐藤尚: 工業材料, **67-6**(2019), 38.
- 6) 中本貴之, 木村貴広, 白川信彦: 計測と制御 **54**(2015), 392.