

4th International Congress on 3D Materials Science (3DMS 2018)

名古屋工業大学 物理工学科

教授 渡辺 義見

(平成 29 年度 国際会議等参加助成 AF-2017255)

キーワード：レーザ積層造形法，ヘテロ凝固核，Ti-6Al-4V

1. 開催日時と開催場所

2018 年 6 月 10 日から 13 日の間、デンマークのヘルシンゲルで開催された 4th International Congress on 3D Materials Science (3DMS 2018)にて以下に紹介する「レーザ積層造形法により作製したヘテロ凝固核粒子添加 Ti-6Al-4V 造形体における空孔の 3 次元可視化」と題して発表する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

付加加工法(Additive Manufacturing, AM)は、3 次元積層造形（いわゆる 3D プリンタ）技術の総称であり、切削加工を代表とした除去加工、塑性加工や鋳造などの従来加工技術に次ぐ革新的な加工法として注目されている。これらのうち、金属積層造形に用いられるのは、主に粉末床熔融法(パウダーベッド法)と指向エネルギー堆積法(デポジション法)であり、この粉末床熔融法においては、熔融加熱の方法としてレーザを使用するレーザ積層造形(Selective Laser Melting: SLM)と電子線を使用する電子ビーム積層造形(Electron Beam Melting: EBM)がある。造形体は粉末焼結ではなく、熔融・凝固によって成型したものとなり、この熔融・凝固では一方向に凝固が進むため、図 1 の様に通常の部材とは異なる集合組織を持つ異方性材料となる。

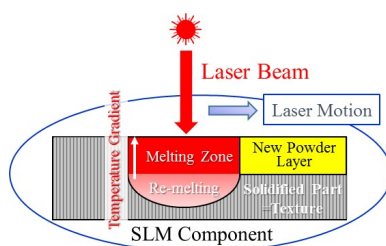


図 1 レーザ積層造形法によって生じる組織の模式図。

しかし、構造材製品化への展開に対しては、このような集合組織や異方性組織の存在が阻害要因となり得るため、この溶解・凝固の過程を検討し、集合組織形成の抑制や組織制御の可能性に関する検討も行われている。ところで、著者らはヘテロ凝固理論に基づく鋳造アルミニウムの結晶粒微細化に取り組んでおり¹⁻³⁾、ヘテロ凝固核理論を積層造形に応用すれば、集合組織形成の阻止が出来るのみならず、結晶粒の微細化による強度向上と均質凝固に伴う造形性の向上が見込まれると考えた。本研究では、Ti-6Al-4V

の積層造形において、ヘテロ凝固核粒子添加による組織制御を行った。Ti-6Al-4V のヘテロ凝固核粒子として TiC を選択し、この添加により高造形性かつ高強度が実現出来るかについての議論を行った。

Ti-6Al-4V 合金粉末（大阪チタニウム社製，ガスアトマイズ粉 TILOP64，粒径 45 μm 以下）と TiC ヘテロ凝固核粒子（高純度化学社製，TII02PB，粒径 2～5 μm ）を用い、混合粉末を作製した。ただし、TiC ヘテロ凝固核粒子の添加量は 0.3 vol%に固定している。この混合粉末を用いて、予熱と造形のレーザを照射することで積層造形を行った。図 2 に示すように、予熱には直径 10 mm の円内への縦横のレーザ照射、造形には 7.5 mm×5.0 mm の範囲への縦横のレーザ照射を行い、その後、輪郭にもレーザ照射を行っている。造形条件は、予熱出力が 13.5～14.4 W，造形出力が 21～108 W，予熱走査速度が 1200 mm/s，造形走査速度が 20～50 mm/s，走査ピッチが 0.1 mm，および積層ピッチが 0.05～0.1 mm である。得られた造形体の空孔を X 線 CT システム(SHIMADZU マイクロフォーカス X 線 CT システム inspe XioSMX-225CT)により可視化した。

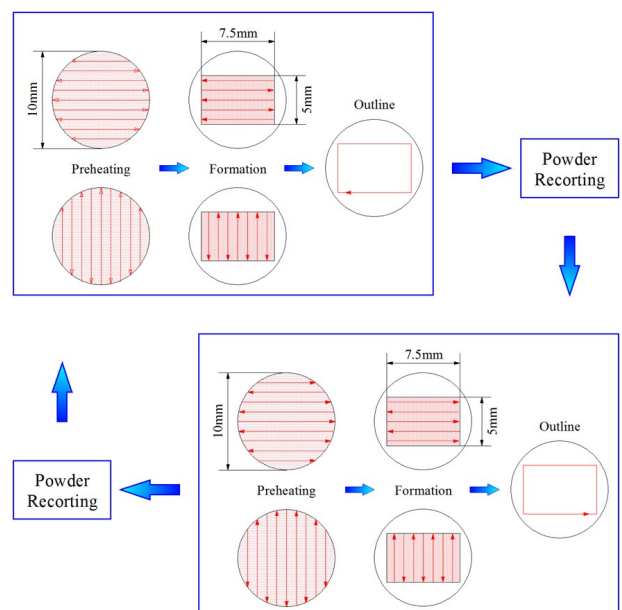


図 2 積層造形におけるレーザの照射パターン。

TiC ヘテロ凝固核粒子を添加して積層造形を行った。得られた造形体の断面組織写真の一例を図 3 に示す。ここで、

(a)から(c)はヘテロ凝固核粒子無添加, (d)から(f)はヘテロ凝固核粒子を 0.3 vol%添加した造形体の組織であり, (a)および(d)は積層造形時のレーザ出力が 21 W, (b)および(e)は 36.3 W, (c)および(f)は 108 W の結果である. 図のように TiC ヘテロ凝固核粒子の添加で造形体の欠陥が減少している.

投入したエネルギー密度に対して, 造形体の相対密度をプロットした結果を図 4 に示す. ここで, エネルギー密度 E (J/mm^3)はレーザ出力を P (W), 走査速度を v (mm/s), 走査ピッチを s (mm)および積層厚さを t (mm)としたとき,

$$E = P / v s t \quad (1)$$

により得られる⁴⁾. 図より, エネルギー密度の上昇に伴い, 相対密度は向上していることが分かる. また, TiC ヘテロ凝固核粒子を添加した造形体において, 相対密度の向上が確認でき, TiC ヘテロ凝固核粒子の添加により造形性が向上することが見いだされた. 加えて, 同じ密度の造形体を製造するのに, 小さなエネルギー密度で製造が可能であることが分かる. このように, 積層造形にヘテロ凝固理論を適用することにより, 高造形性と高強度が実現できることが見いだされた.

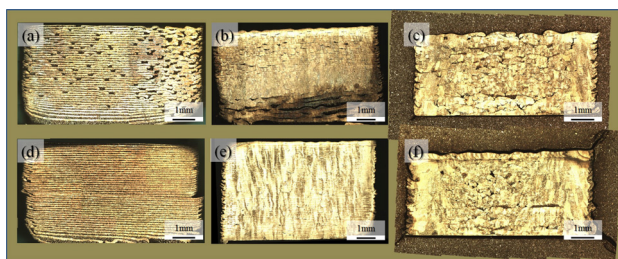


図 3 積層造形体の断面組織写真の一例. (a)ヘテロ凝固核粒子無添加, レーザ出力 21 W, (b)ヘテロ凝固核粒子無添加, レーザ出力 36.3 W, (c)ヘテロ凝固核粒子無添加, レーザ出力 108 W, (d)ヘテロ凝固核粒子 0.3 vol%添加, レーザ出力 21 W, (e)ヘテロ凝固核粒子 0.3 vol%添加, レーザ出力 36.3 W, (f)ヘテロ凝固核粒子 0.3 vol%添加, レーザ出力 108 W.

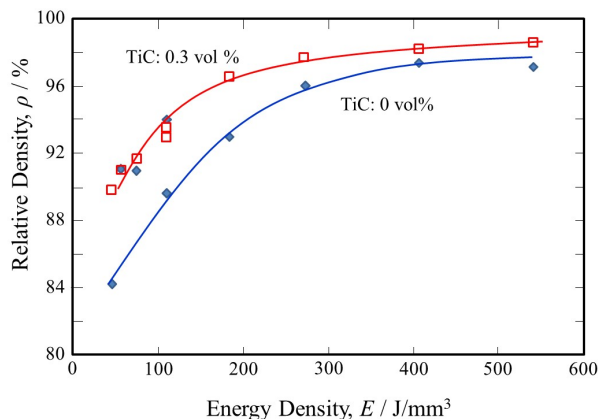


図 4 投入エネルギー密度と造形体の相対密度との関係. X 線 CT システムにより撮影した造形体の画像を元に,

欠陥解析ソフトにより内部空孔の解析を行った. その解析結果の一例を図 5 および図 6 に示す. 図中, 赤色は比較的大きな内部空孔を示す. これらの図に示すように, TiC ヘテロ凝固核の添加により, 造形体内部の空孔サイズおよび量が減少し, 緻密な造形となった.

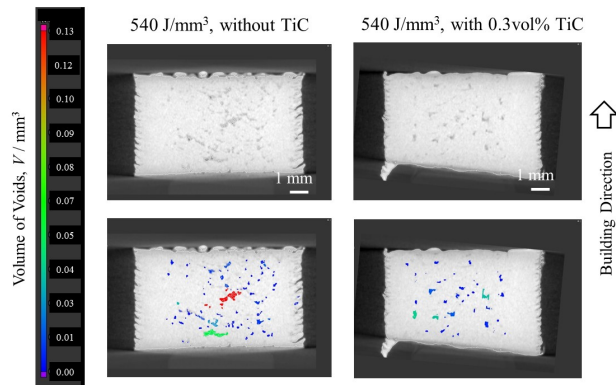


図 5 エネルギー密度が $540 \text{ J}/\text{mm}^3$ の条件で作製した造形体の内部欠陥.

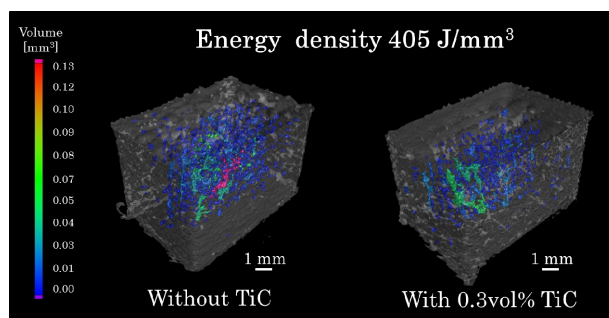


図 6 エネルギー密度が $405 \text{ J}/\text{mm}^3$ の条件で作製した造形体の内部欠陥の 3 次元可視化.

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る.

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) T. Nakamoto, T. Kimura and N. Shirakawa: *J. Soc. Instrum. Control Eng.*, **54**(2015), 392.