

レーザービーム 3次元積層造形における結晶組織制御 と残留応力緩和

首都大学東京 機械工学コース
教授 笥 幸次
(平成 26 年度一般研究開発助成 AF-2014214)

キーワード：レーザービーム，3次元積層造形，選択的レーザー溶融，結晶制御，ニッケル基超合金，Alloy718

1. 緒言

Ni 基超合金は高温での機械特性や耐食性が良く，中でも Alloy718 (Inconel 718 は Special Metals の商標)は，700 °C 以下の高温において良好な機械的特性，微視組織安定性，溶接性から航空宇宙材料として広範囲に用いられている．Platt&Whitney 社製 PW4000 エンジンで使用されている Ni 基超合金の実に 57 %が Alloy718 である⁽¹⁾．航空宇宙分野で幅広く用いられている Alloy718 であるが，難加工材であるにも関わらず，エンジンのディスク材として用いる場合を代表するように，鍛造後に切削加工を行わなければならない．また，高価な材料であるが，切削加工を行うことにより無駄になる材料が多いため，歩留まりが問題となる．これらの問題を解決するための方法として合理的な製造方法が求められてきた．そこで注目されているのが積層造形法である．設計自由度の高さ⁽²⁾から，軽量化，最適設計による特性向上，リードタイム削減などが期待されている．しかし，積層造形材は従来材と異なる微視組織を有していることが報告されている⁽³⁾．本研究では，レーザービーム積層造形によって作製した Alloy718 に対して熱処理が組織及び強度特性に与える影響，ならびにレーザービームの走査法の影響について報告する．

2. 実験方法

本研究では，EOS Nickel 718 合金粉末を用い，アルゴン雰囲気中で EOS M280 によって供試材を造形した．化学組成は Special Metals が製造している Inconel 718 とほぼ同等であり，組成を Tabel 1 に示す．レーザーには Yb ファイバーレーザーを用い，スポット径を狭くし，高エネルギー密度で粉末を凝固・固化させて一辺 45 mm の立方体試料を造形した．レーザー走査の影響を調べるため，各層毎に 67°回転させた 67°走査材と 90°回転させた 90°走査材を作

製した．これらの立方体を厚さ 3.1 mm にスライスし，その板から組織観察試料・強度試験片を放電加工機で切り出した．積層方向に対して平行に切り出した試料を 0°方位材，垂直に切り出した試料を 90°方位材とする．造形物から切り出した 2 方向の試験片をそのまま試験に用いた試料を as-built 材，Alloy718 の熱処理で一般的に用いられている AMS-5662 規格に従って熱処理を施した試料を標準熱処理(STA)材，AMS-5662 規格のうち，溶体化処理を行わず，切り出し後そのまま時効処理を行った試料を直接時効(DA)材とする．これらの試験片を用いて，OM，SEM，TEM を用いて組織観察を行った．加えて，強度特性を調べるために，ひずみ速度 0.008/s で室温および 650 °C で引張試験を行い，550 MPa，650 °C にてクリープ試験を行った．

Table 1 EOS Nickel Alloy 718⁽⁴⁾の化学組成 (mass%)

Ni	Cr	Nb	Mo	Ti	Al	Co
50.0	17.0	4.75	2.8	0.65	0.20	≤1.0
Cu	C	Si,Mn	P,S	B	Fe	
≤0.3	≤0.08	≤0.35	≤0.015	≤0.006	bal	

3. 実験結果

3.1 組織観察

図 1 に 67°走査材と 90°走査材における as-built 材の 0°面における IPF マップを示す．67°走査材では積層方向に沿う粗大な柱状晶粒が観察された．90°走査材では幅が 5 μm ほどの伸長した柱状晶粒と 30 μm ほどの粗大粒が観察され，両者ともに微細な結晶粒も見られた．レーザービームによる繰り返しの入熱，冷却によってエピタキシャル成長が促進され柱状晶粒が形成されたことが考えられる．特に 90°走査材ではハッチ間隔によって，レーザービームに

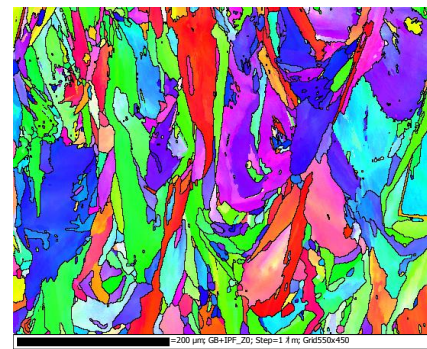
よる入熱と冷却が集中的に行われる部分が伸長した柱状晶粒になったと考えられる。図 2 は 67°走査材の as-built 材における TEM 像である。微細な Nb 化合物である Laves 相が基盤の目状に析出し (図 2 (a)), 柱状の転位セル (図 2 (b)) が観察された。Laves 相は溶体化熱処理中に δ 相に変態する。

3.2 引張特性

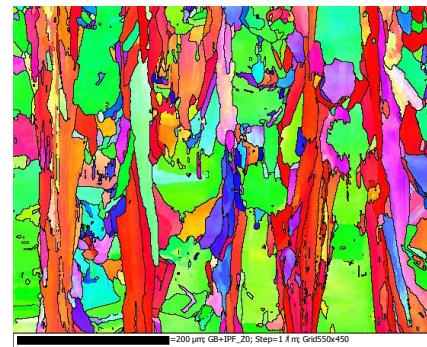
室温において, STA 材, DA 材いずれの試料においても 0°材および 90°材の間で強度特性の顕著な異方性は見られなかった。しかし, 67°走査材と 90°走査材によらず共通の傾向として, 延性は 0°方位材が, 強度は 90°方位材がわずかに高い値を示した。STA, DA 材の強度及び延性は, Alloy 718 溶解鍛造(C&W)材の規格値⁽³⁾を上回ることが明らかとなった。しかし図 3 に示すように, 650°C では 0.2% 耐力及び引張強度は溶解鍛造材よりも高くなっていたが, 延性は低い結果になった。特に 90°材での延性低下が顕著に見られ, 延性の異方性が見られた。一方向凝固 Ni 基超合金は, 高温において凝固方向に垂直な粒界に沿う破壊により, 延性が低下することが知られている⁽⁵⁾。積層造形材は図 1 からわかるように柱状晶粒の集合体とみなすことができ, 90°方位材は応力方向に垂直な粗大結晶粒界にそった破壊, 特にデンドライト界面にそった破壊が観察されたことから, デンドライト間に析出する δ 相^{(6), (7)}が関与していると考えられる。

3.3 クリープ特性

図 4 は積層造形材の 650°C, 550 MPa におけるクリープ曲線を示す。熱処理の有無にかかわらず積層造形材のクリープ延性及び破断寿命は溶解鍛造材よりも著しく低いことが分かった。溶体化処理と時効処理を施した STA 材は, as-built 材よりも破断寿命が短くなっていたが, 溶体化処理をせず直接時効処理を施した DA 材のクリープ破断寿命が積層材の中で最も長いことが分かった。同様に 90°走査材から切り出し, 熱処理を施した場合でも, 積層材は溶解鍛造材よりクリープ寿命及び延性は劣っていた。このことから, 積層造形材に対して, 従来の熱処理が必ずしも適していないことが明らかになった。



(a) 67°走査材



(b) 90°走査材

図 1 0°面上における IPF マップ

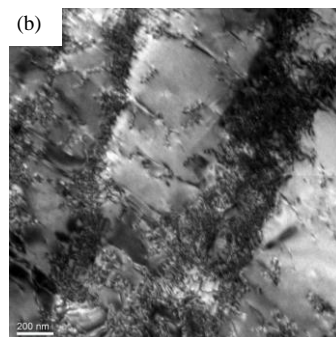
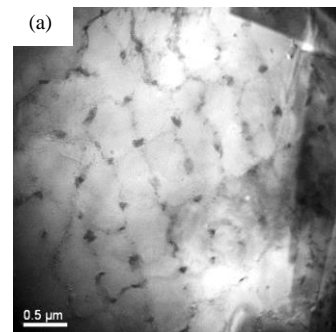
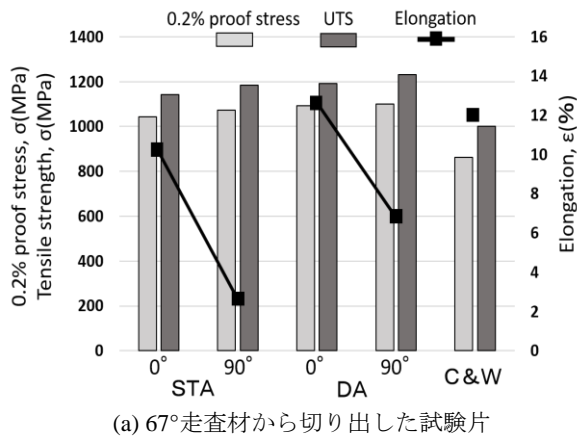


図 2 67°走査, as-built 材の TEM 組織写真

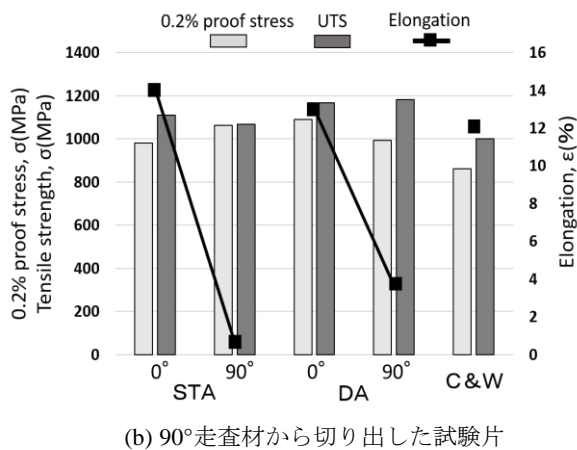
67°走査材の DA 0°方位材の破面側面を SEM で観察したところ、ビード界面に沿ってき裂が進展している様子が見られた。また、図 5 の破面観察において、デンドライト組織に沿った破面が観察された。90°走査 (as-built) 材のクリープ破面において図 6 のような基盤の目状の凹凸が観察され、走査パターンを反映した破面が観察された。破面は前節で述べた高温引張特性と同様に、クリープ延性低下の要因の一つとして、デンドライトに析出する δ 相⁽⁶⁾が関係していると考えられる。

4. 結言

積層造形した Alloy718 に対して、熱処理を施し、組織観察、引張試験およびクリープ試験を行った。



(a) 67°走査材から切り出した試験片



(b) 90°走査材から切り出した試験片

図 3 650°Cにおける引張特性

1. レーザー走査の回転角を 90°にすると、67°とした場合に比べてより伸長な柱状晶粒が形成された。
2. STA 材及び DA 材の引張強度は溶解鍛造材の規格値を上回った。650°Cでは、90°方位材の延性が著しく低かった。これは、高温での破壊は、積層方向に配列し非整合界面を有する δ 相に沿ってき裂が発生、進展するためである。

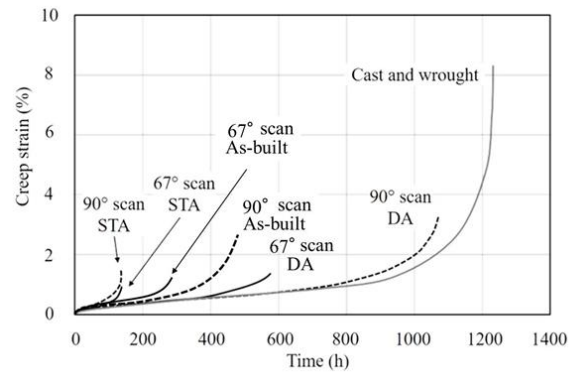


図 4 650°C, 550MPa でのクリープ曲線

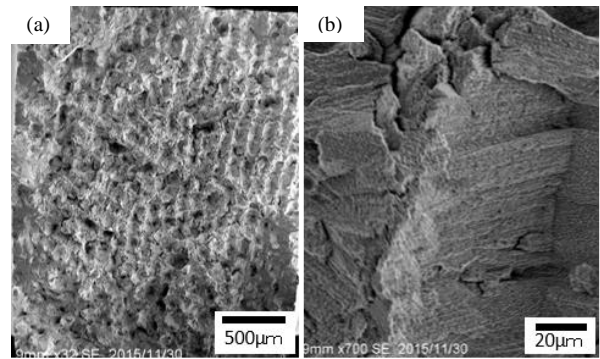


図 5 67°走査材から切り出した DA-0°方位試験片のクリープ破面。

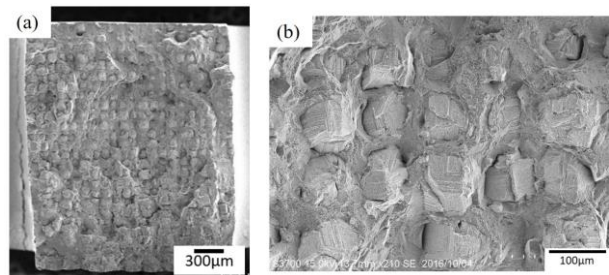


図 6 90°走査材から切り出した as-built-0°方位試験片のクリープ破面。

3. 650 °C, 550MPa のクリープ試験では, 積層造形材のクリープ延性及び破断寿命は, 熱処理の有無にかかわらず, 溶解鍛造材よりも著しく低かった. クリープ延性の低下は, デンドライト間に析出する δ 相界面に沿ったき裂発生・進展によるものと考えられる.
4. 90° レーザー走査積層材の方が 67° レーザー走査積層材よりも, 柱状晶が $\langle 001 \rangle$ 方向に配向する傾向があり, またアスペクト比の大きな結晶粒がクラックの進展を妨げるためクリープ特性が優れていた.

謝 辞

本研究は, 公益財団法人天田財団の平成 26 年度一般研究開発助成 (AF-2014214) を受けて行われた. ここに記して, 同財団に謝意を表します. また, 本研究の遂行にあたり実験を担当した堀川将大君に感謝の意を表します.

- (1) D.F.Paulonis and J.J.Schirra: Superalloys 718, 625, 710 and various Derivatives (2001), pp.13-37.
- (2) 経済産業省, “3D プリンタにできること”, METI journal, August/September 2013, pp.1-24.
- (3) Fencheng Liu et al, Optics & Laser Technology, 43(2011), pp.208-213.
- (4) EOS GmbH-Electro Optical Systems, “Material data sheet EOS Nickel Alloy ALLOY 718”, pp.3.
- (5) D.C.Pradha, K.K.Sharma and S.N.Tewari, J. OF Materials Science, 21 (1986), pp.2871-2875
- (6) Y. Kuo, S. Horikawa and K. Kakehi: Scr. Mater., 129(2017), pp.74-78
- (7) Y. Kuo, S. Horikawa and K. Kakehi: Mater. Des., 116(2017), pp.411-418