

L-PBF 法による多階層金属組織制御と高強度化

マテリアル生産科学専攻 マテリアル科学コース
生体材料学領域 中野研究室 菊川 泰地

1. 緒言

金属積層造形法の一つである L-PBF (Laser Powder Bed Fusion) 法は、複雑三次元形状を製造可能なプロセスとして注目されている。金属組織学的な観点では、高い冷却速度と熔融池内部の温度勾配により、セル組織をはじめとする L-PBF 法特有の微細組織が形成される。さらに、下層の結晶方位を引き継ぐエピタキシャル成長と、結晶の回転対称性を考慮したレーザ走査方向の制御により、単結晶様組織を含む結晶集合組織の形成も可能であり、L-PBF 法は階層的な微細組織を導入可能なプロセスと見なすことができる[1-2]。こうした階層性組織に基づいた力学特性への寄与を解明することで、従来プロセスでは実現不可能な積層造形ならではの高性能材料の創製が期待される。本研究では、L-PBF 法特有の微細組織が力学特性に及ぼす影響を解明するため、Ni 基超合金 Inconel 718 (以下、In718) を対象とし、階層性組織の中でも、自己組織的に形成される結晶学的ラメラ組織 (CLM: Crystallographic Lamellar Microstructure) とセル組織に注目し、力学特性を定量的に解析した。

2. 実験方法

結晶学的ラメラ組織とセル組織は、L-PBF 造形体内に共存する。そこで本研究では、2つのプロセス (1) スキャンストラテジー設計、(2) 熱処理を単独または組み合わせて適用し、結晶学的ラメラ組織とセル組織の有無を独立に制御した。レーザ出力 360 W、走査速度 1000 mm/s において、 $\pm X_{SS}$ (図 1 (a)) を用いて造形すると、結晶学的ラメラ組織が形成される[3]。微細組織を変化させずに結晶学的ラメラ組織を除去 (単結晶様組織を形成) するため、同一のレーザ条件を用いて新たなスキャンストラテジーを設計した。セル組織の除去には、In718 にて析出する可能性のある γ' 、 γ'' 、 δ 、Laves 相のソルバス温度を超える 1080°C で 1 時間の熱処理を行った。この際、結晶学的ラメラ組織に及ぼす影響についても確認を行った。(1)および(2)を組

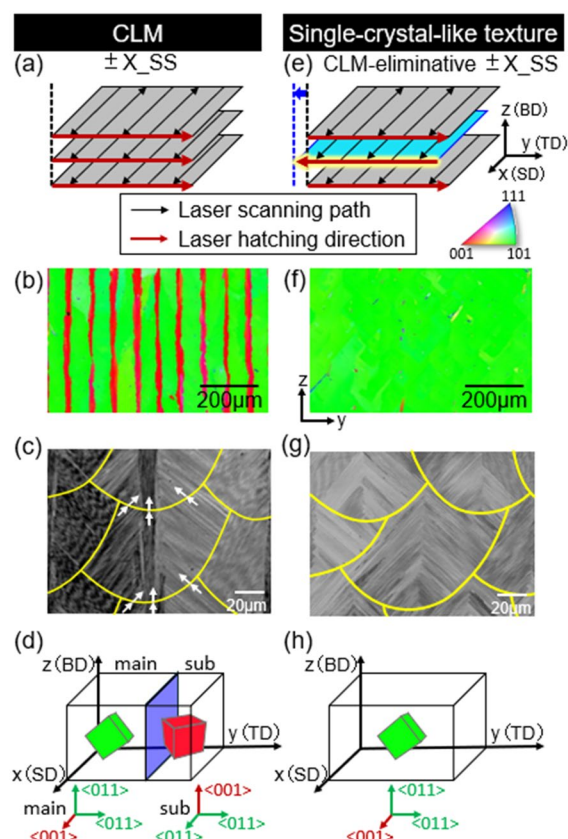


図 1: (a) CLM, (e) 単結晶様集合組織形成のためのスキャンストラテジーの模式図、(b, f) 造形体の逆極点図 (IPF) マップ、(c, g) 造形体の反射電子像 (d, h) 結晶方位関係の模式図

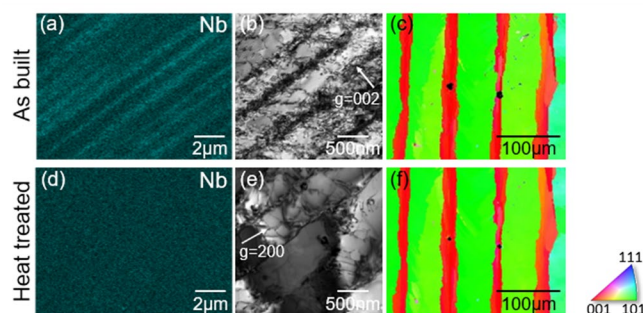


図 2: (a, d) Nb における EDS マップ、(b, e) TEM 明視野像、(c, f) IPF マップ、(a-c) 熱処理前、(d-f) 熱処理後

み合わせた4種類の試料に対して力学特性を解析した。

3. 結果と考察[4]

±X_SS では結晶学的ラメラ組織が形成された(図1(a), (b))。溶融池側面部からは造形方向へ<011>が、溶融池中央部からは造形方向へ<001>が優先配向した組織が、上下の溶融池を挟んでエピタキシャル成長した(図1(c), (d))。単結晶様組織の形成には、溶融池中央部での副層の形成を抑制する必要がある。そこで結晶のエピタキシャル成長の阻害を目的とし、上下層間でレーザ溶融位置を半分だけシフトさせた新規スキャンストラテジーを設計した(図1(e))。その結果、造形方向へ<011>のみが高配向化した単結晶様組織の獲得に成功した(図1(f))。

一方で、セル組織は熱処理により除去に成功した。セル組織の構成要素であるNb, Mo, Ti等の偏析と、偏析に沿った転位の集積構造が熱処理により消失した。さらに同処理によって結晶集合組織は変化せず、結晶学的ラメラ組織は維持された(図2)。

上述したプロセスを組み合わせることで、結晶学的ラメラ組織とセル組織を併せ持つCLM_AB、セル組織のみを有するSC_AB、結晶学的ラメラ組織のみを有するCLM_HT、いずれの組織も持たないSC_HTといった、微細組織の異なる4種類の造形体を作製した(AB: As-built, HT: Heat treated)。

図3に各造形体の降伏応力を示す。解析の結果、結晶学的ラメラ組織とセル組織はいずれも降伏応力を増大させることが明らかとなった。具体的には、セル組織の存在(AB材)によって、単結晶様組織では38%(453 MPaから627 MPaへ)、結晶学的ラメラ組織では42%(463 MPaから659 MPaへ)の大幅な強度上昇が認められた。また、結晶学的ラメラ組織の有無についても統計学的に有意な強度上昇への寄与が確認された(いずれも $P < 0.05$)。さらに結晶学的ラメラ組織とセル組織の間には相乗効果が認められた(表1)。

4. 結言

本研究では、L-PBF法において自己組織的に形成される、結晶学的ラメラ組織とセル組織について、それぞれをスキャンストラテジー制御と熱処理を活用することで各微細組織を単離する手法を確立した。さらに、それぞれが降伏応力に与える影響を定量的に解明し、セル組織が力学特性を大きく向上させ、階層性組織が相乗効果を有することを明らかにした。本研究結果に基づきL-PBF特有の階層性組織[5]を活用することで、従来の製造プロセスでは困難であった力学特性の自在な制御が期待される。

5. 参考文献

- [1] T. Ishimoto, T. Nakano, et al., *Acta Mater.* **2025**, 286, 120709.
- [2] K. Cho, T. Kikukawa, H. Yasuda, et al., *Acta Mater.* **2026**, 303, 121696.
- [3] O. Gokcekaya, T. Nakano, et al., *Acta Mater.* **2021**, 212, 116876.
- [4] T. Kikukawa, T. Nakano, et al., *Mater. Res. Lett.* **2025**, 13, 837-843.
- [5] T. Mayama, T. Kikukawa, T. Nakano, et al., *Addit. Manuf.* **2024**, 93, 104412.

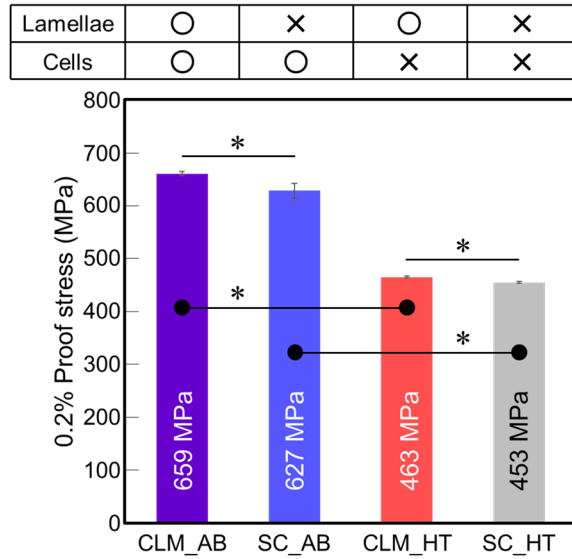


図3: CLMとセル組織の有無による降伏応力の差異

表1: 力学特性に対するCLM, セル組織, およびその相互作用の有意性(P値)。

Factor	Effect of lamellae	Effect of cells	Interaction
P-value	0.0011	9.2×10^{-11}	0.030