

# 金属

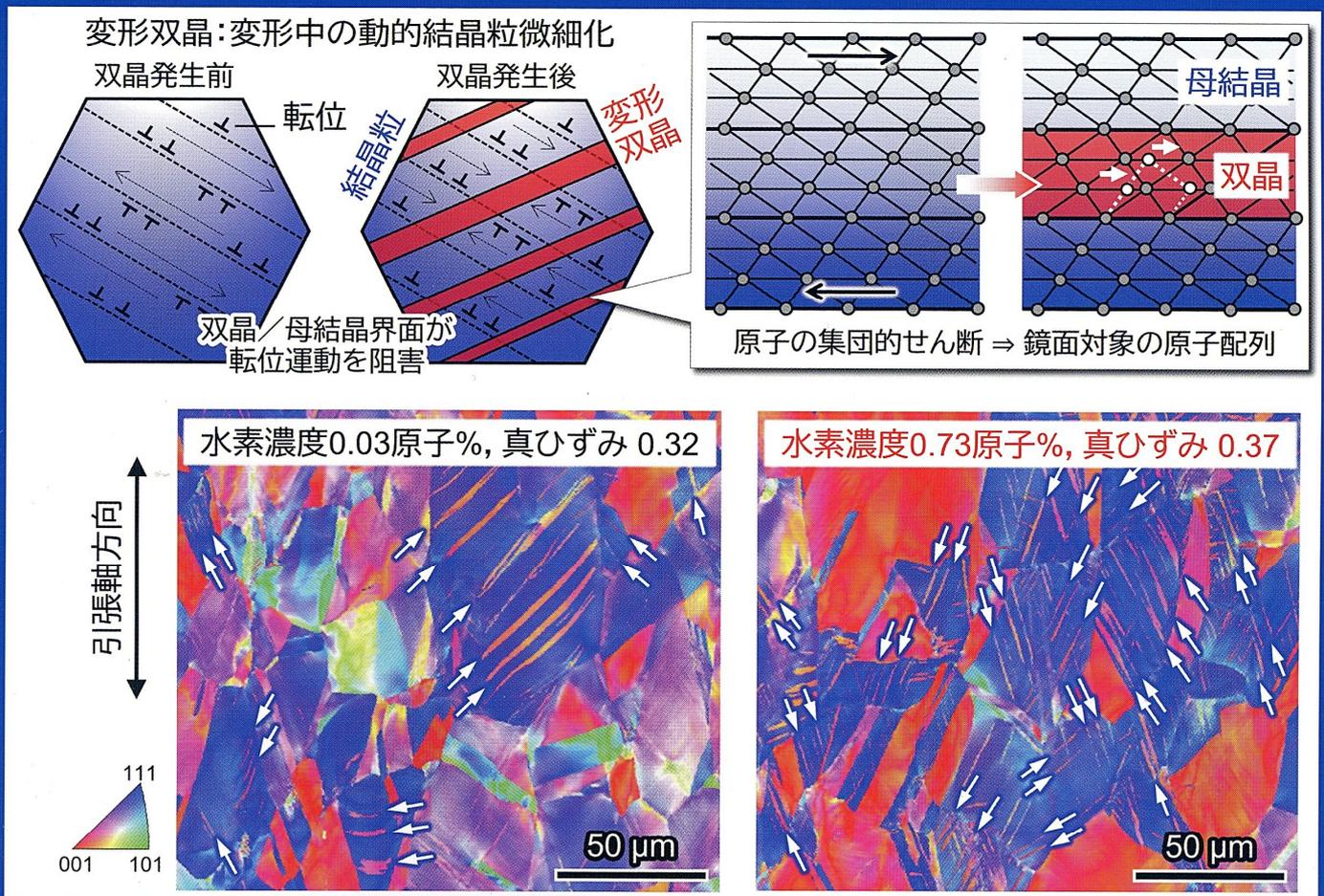
# 3

KINZOKU MATERIALS SCIENCE & TECHNOLOGY

Vol.96 No.3(2026)

## 特集

# NIMS 構造材料研究センター 最新成果



上図：変形双晶の発生・発達による転位運動の阻害と加工硬化のメカニズム

下図：SEM-EBSD法を用いた方位解析によって得られたJIS-SUS310S鋼中の変形組織（白色矢印は変形双晶の発生箇所）

本文 15 ページ参照

## 特集 NIMS 構造材料研究センター 最新成果

特集にあたって .....	大村孝仁	3(167)
放射光X線CT技術を駆使した高信頼性材料設計のためのマルチスケール解析 .....	大熊 学	5(169)
水素が鉄鋼材料を強くする ―水素を有効元素として活用できる可能性― .....	小川祐平	15(179)
電気泳動共析出法によるインヒビター担持層状複水酸化物被膜の開発 .....	廣本祥子	23(187)
低温環境におけるニッケルの水素脆化 .....	和田健太郎	32(196)
耐水素脆化自動車用高強度鋼の開発 ―粒界炭素偏析の活用指針― .....	岡田和歩	41(205)
植物由来高分子「リグニン」充填による軽量複合材料の高強度化 .....	タンクス ジョナサン, 田村堅志, 内藤公喜	49(213)
レーザー粉末床溶融結合法による IN7378LC 複雑形状部材の欠陥抑制造形 .....	草野正大, 渡邊 誠	55(219)

### 博物館紹介 博物館で学ぶ金属

産業観光の拠点としての博物館 ―燕市産業史料館を例に― .....	桑原美花	65(229)
-----------------------------------	------	---------

### トピックス レーザ粉末床溶融結合法で導入された Inconel 718 のセル組織による

顕著な強化発現 .....	菊川泰地, 石本卓也, 中野貴由	70(234)
---------------	------------------	---------

### 連載 「研究開発正攻法」―研究開発ある限り不況業種なし― (7)

合理的なアウトソーシング (Out-sourcing) .....	西田新一	77(241)
-----------------------------------	------	---------

工業材料 NEWS – WEB パトロールから .....		2(166)
-------------------------------	--	--------

催しものカレンダー 83(247) / 講演会・研究会案内 84(248)

次号予定 85(249) / 編集後記 86(250) / 広告索引 86(250)

編集顧問：井野博満，永田和宏

# レーザー粉末床溶融結合法で導入された Inconel 718 のセル組織による顕著な強化発現

菊川 泰地, 石本 卓也, 中野 貴由

L-PBF 法で作製した造形体は、セル組織やラメラ組織といった階層的な特異組織を有し、従来材より高強度を示す。本研究では、各組織の力学特性への寄与を定量的に理解するために、造形時の熱源走査戦略と熱処理条件を制御・解明した。その結果、セル組織が降伏応力を約 40% 向上させ、ラメラ組織との相乗効果により、強化をさらに促進することを見出した。本知見は、L-PBF 特有の階層性組織を生かした力学特性制御への重要な設計指針となる。

## はじめに

レーザー粉末床溶融結合 (L-PBF) 法は、従来、複雑な三次元形状を造形可能な製造プロセスとして主に活用されてきた。これに対し、筆者らのグループでは、熱源であるレーザーの走査方向に着目し、結晶の回転対称性、エピタキシャル成長、会合界面 (溶融池界面から成長した凝固組織が会合することで生じる界面) のエネルギー低下などを活用することで、単結晶様組織をはじめとする結晶集合組織の制御が人為的に可能であることを見出している<sup>1)~3)</sup>。さらに、より微視的なスケールにおいてナノスケールのセル組織が形成される<sup>4)~7)</sup>ことを踏まえると、L-PBF 法は金属組織内部に階層性組織を構築可能な手法といえる<sup>6)~8)</sup>。実際、こうした階層性組織の形成により、L-PBF 材は鋳造材と比較して極めて高い強度を示すことが報告されている<sup>9)~13)</sup>。

しかしながら、L-PBF 材には、プロセス中に自己組織化的に多階層にわたる複数の組織因子が同時に形成されるため、個々の因子が力学特性に及ぼす定量的な影響は未解明である。これは、組織の階層性ゆえに、特定の組織変化を目的としたプロセス条件の変更が、他の因子をも同時に変化させてしまうためである。L-PBF による金属材料の力学特性制御には、個々の組織因子の力学的寄与の定量的解明が不可欠である。

そこで本稿では、階層性組織が観察されている Ni 基超合金 Inconel 718 (以下、IN718) 造形体を対象とし、各微細組織因子の力学特性への定量的寄与について解説する。L-PBF により IN718 造形体を作製すると、特徴的な組織として以下の 2 つが自己組織化的に形成される。

- ①【マイクロメートルスケール】結晶学的ラメラ組織 (Crystallographic Lamellar Microstructure: CLM)<sup>12)14)</sup>: レーザを x 方向に往復走査するスキャンストラテジー (以下、 $\pm X\_SS$ ) によって形成される (図 1 (a))<sup>12)14)~17)</sup>。CLM は、異なる結晶配向を有する 2 種の層が交互に積層した組織であり、造形方向 (BD) に対して  $\langle 011 \rangle$  が優先配向した「主層」と、 $\langle 001 \rangle$  が優先配向した「副層」が y 方向に周期的に配列する。CLM は単結晶様造形体と比較して、強度の向上や、強度異方性の制御が可能である<sup>12)</sup>。
- ②【ナノメートルスケール】セル組織: 濃度偏析と偏析に沿った転位の集積によって特徴付けられる組織である<sup>12)14)15)</sup>。偏析は凝固時の溶質分配によって生じ<sup>18)</sup>、転位は造形時の熱応力によって導入される<sup>7)19)20)</sup>。

本研究では、(1) スキャンストラテジー (熱源走査戦略) 設計による CLM の有無の制御、および (2) 熱処理によりセル組織の消失を、単独または組み合わせで適用した。これにより、CLM とセル組織の有無を系統的に変化させた 4 種類の造形体を作

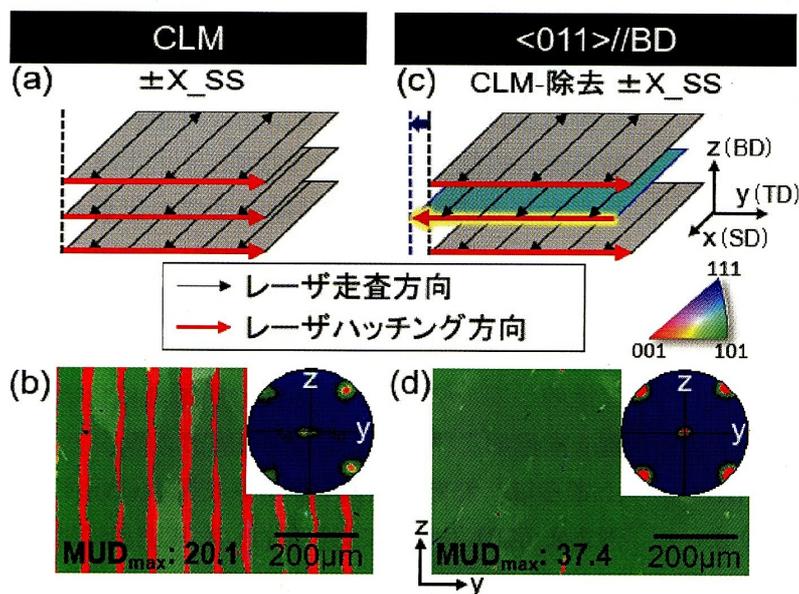


図1 (a) CLM, (c) 単結晶様集合組織形成のためのスキャンストラテジーの模式図, (b), (d) 造形体の逆極点図(IPF) マップ, {001} 極点図. CC BY 4.0 ライセンスの下で出版されている文献6)より引用.

表1 本研究で作製した4種類の造形体の分類(ラメラ組織とセル組織の有無による). CC BY 4.0 ライセンスの下で出版されている文献6)より引用.

	CLM_AB	SC_AB	CLM_HT	SC_HT
ラメラ組織	○	—	○	—
セル組織	○	○	—	—

AB : As-built, SC : Single crystalline-like texture, HT : Heat treated

製し(表1), それぞれの微細組織が力学特性に及ぼす影響を定量的に明らかにすることを目指した.

## L-PBF による IN718 単結晶様組織の作製と, 熱処理によるセル組織の除去<sup>6)</sup>

最適化されたレーザー条件, レーザ出力 360 W, レーザ走査速度 1000 mm/s<sup>12)</sup>にて,  $\pm X_{SS}$  を用いて造形すると, CLM (図1(b)) が形成される. 微細組織を変化させずに CLM を除去(単結晶様組織を形成)するため, 同一のレーザー条件を用いて新たなスキャンストラテジーを設計した. 単結晶様組織の形成には,  $\langle 001 \rangle // BD$  に配向した熔融池中央部での副層の形成を抑制する必要がある. 熔融池中央部では, 鉛直下向きへの熱流が支配的であり, 多くの立方晶金属が示す容易成長方向  $\langle 001 \rangle$  が BD に安定して成長する. この  $\langle 001 \rangle // BD$  成長を回避

するために, 本研究ではハッチ距離の半分だけ y 方向に走査位置をシフトさせた新規スキャンストラテジー(図1(c))を提案した. さらに, レーザハッチング方向についても各層で反転させることで, 斜めに進展する亜粒界の形成を抑制した.

セル組織の除去のため, IN718 にて形成の可能性のある  $\gamma'$ ,  $\gamma''$ ,  $\delta$ , Laves 相のソルバス温度<sup>19)21)</sup>を超える 1080°C で 1 時間, 真空雰囲気中で熱処理を行った.

## 単離プロセスにより消去された特異組織

図1に各スキャンストラテジーに対応する結晶方位を示す.  $\pm X_{SS}$  では既報<sup>12)</sup>の通り CLM が形成された. これに対し, 新規スキャンストラテジーでは, 極めて高い配向度を示す単結晶様組織の作製に成功した(図1(d)). CLMの主層は造形方向(z方向)およびy方向に  $\langle 011 \rangle$  が配向し, スキャン方向(x方向)に  $\langle 001 \rangle$  が配向する. 一方, 副層はz方向に  $\langle 001 \rangle$  が, xおよびy方向に  $\langle 011 \rangle$  が配向した組織を指す. 本研究で作製した単結晶様組織(MUD: 37.4)は, CLMの主層(MUD: 38.7)と同様の結晶配向を示し, 単結晶様組織は CLM から  $\langle 001 \rangle // BD$  配向した副層を消去した組織に対応することを意味する. 図2に副層が阻害されるメ

カニズムを示す.  $\pm X_{SS}$  では, 造形方向に  $\langle 001 \rangle$  が配向した副層が複数の熔融池を縦断するようにエピタキシャル成長する (図 2 (a)). 一方で, 新規ストラテジーでは,  $\langle 011 \rangle // BD$  方位が支配的となる. 仮に熔融池中央部で  $\langle 001 \rangle // BD$  の結晶方位を持つ結晶粒が核生成したとしても, 次層の熔融池における熱流ベクトル (図 2 (c) 赤矢印) が  $\langle 001 \rangle$  方向と大きな角度差を持つため, エピタキシャル成長が維持されない. その結果, 組織は熱流方向に沿った成長を優先し, 造形方向に  $\langle 011 \rangle$  が配向した組織が安定的に形成される. なお,  $\langle 011 \rangle // BD$  領域は, 直線的なエピタキシャル成長 (白矢印) または側枝的な成長 (水色矢印) を介して, 隣接する

凝固領域から結晶方位を引き継いでいる<sup>22)</sup>.

一般に, レーザ条件の調整による組織制御は広く検討されているが<sup>7)23)24)</sup>, レーザ条件の変更は結晶集合組織の変更だけでなく, セルサイズや偏析挙動などの他の微細組織因子にも影響を及ぼす<sup>12)</sup>. これに対して, 本研究で提案した新規スキャンストラテジーはレーザ条件を一切変更せずに単結晶様組織を形成できるため, 従来のレーザ制御と比較して, 結晶集合組織が力学特性に及ぼす影響を定量的に評価することが可能である.

さらに, 熱処理 (HT) の効果を図 3 に示す. 造形まま (AB) の状態においては, セル境界には Nb, Mo, Ti の偏析 (図 3 (a)) と偏析に沿う高密度の転

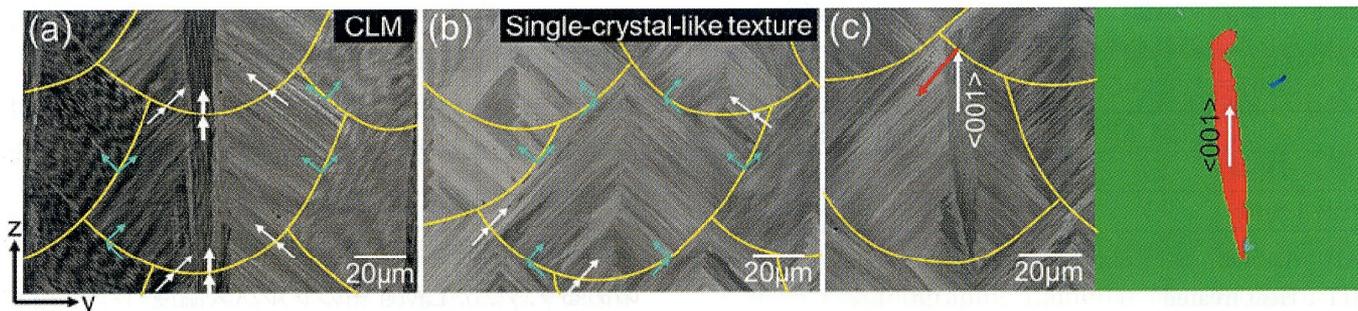


図 2 (a), (b) レーザ走査方向に垂直な断面の SEM 像. セル組織と熔融池境界のトレースを重ね合わせて表示. (c) 熔融池中央に突発的に現れた  $\langle 001 \rangle // BD$  配向の結晶粒. CC BY 4.0 ライセンスの下で出版されている文献 6) より引用.

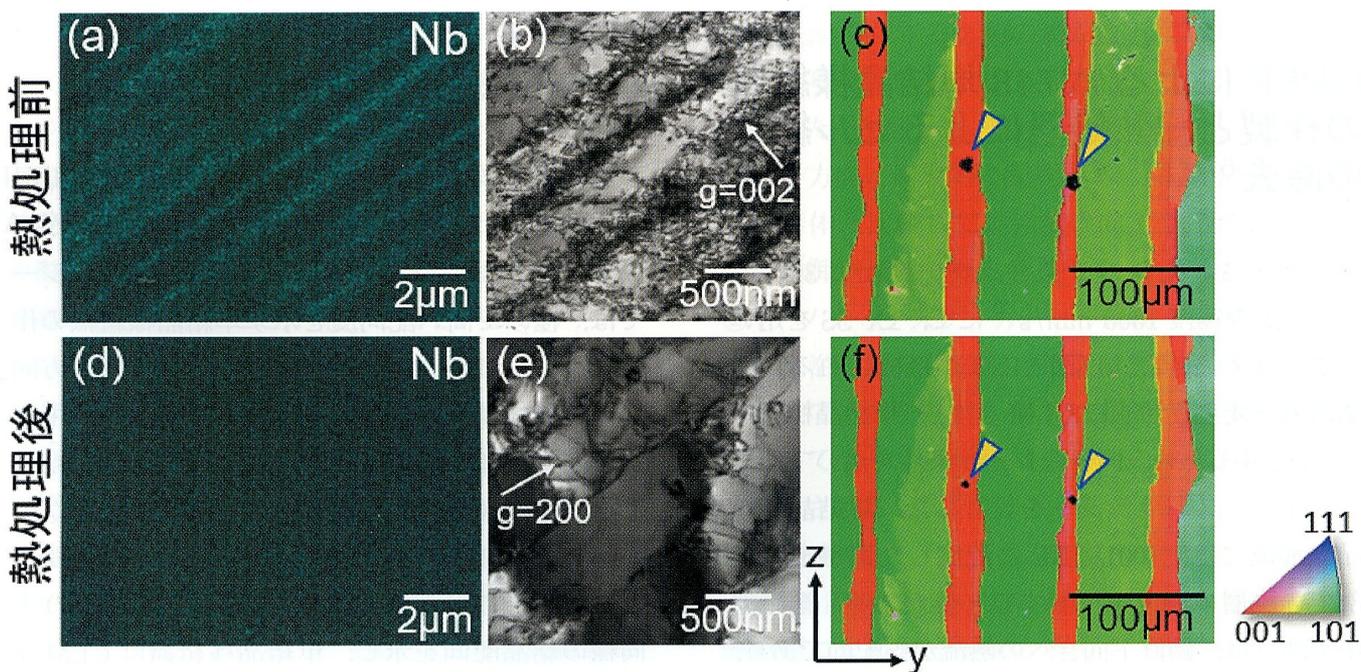


図 3 (a), (d) Nb に関する EDS マップ. (b), (e) TEM 明視野像. (c), (f) IPF マップ. (a)~(c) 熱処理前, (d)~(f) 熱処理後. CC BY 4.0 ライセンスの下で出版されている文献 6) より引用.

位集積 (図 3 (b)) が認められた。熱処理後、偏析は消失し、転位密度も著しく減少した (図 3 (e))。なお、熱処理後も消失せずに残存する球状介在物は炭化物 (Solvus 温度: 1265°C<sup>25)</sup>) であり、そのサイズや分布に顕著な変化は見られなかったことから、力学特性への寄与の変化は無視できる。さらに、再結晶や粒成長を含む結晶集合組織の変化も観察されなかった (図 3 (c), (f))。先行研究<sup>19)26)</sup>では、1100°C以上の高温または長時間の処理を行った場合には再結晶が生じることが報告されている。したがって、本研究で採用した熱処理条件は、結晶集合組織を完全に保持したまま、転位およびセル組織のみを消失させるための最適条件であった。

## 各微細組織因子が降伏応力に及ぼす影響の定量評価

上述した組織制御プロセスを組み合わせることによって、微細組織の異なる 4 種類の造形体を作製した。すなわち、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、ラメラ組織のみを有する CLM\_HT、そしてラメラ組織もセル組織も持たない SC\_HT である (表 1)。

図 4 に各造形体の降伏応力を示す。解析の結果、セル組織は降伏応力を顕著に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 (SC) では 38% (453 MPa から 627 MPa へ)、CLM では 42% (463 MPa から 659 MPa へ) の大幅な強度上昇が認められた ( $P < 0.05$ , 表 2)。一方、ラメラ組織の形成による強度増加も統計学的に有意 ( $P < 0.05$ ) であったが、その寄与は限定的であり、セル組織を持たない系 (HT 材) で 2.0%、セル組織を持つ造形体 (AB 材) で 5.1% の上昇にとどまった。このラメラ組織による小さいながらも有意な強度上昇のメカニズムを解明するためには、 $\langle 011 \rangle // BD$  の主層と  $\langle 001 \rangle // BD$  の副層との界面におけるすべり伝達 (Slip transfer) を考慮することが不可欠である。Livingston と Chalmers<sup>27)</sup> によって提案された、異

ラメラ組織	○	×	○	×
セル組織	○	○	×	×

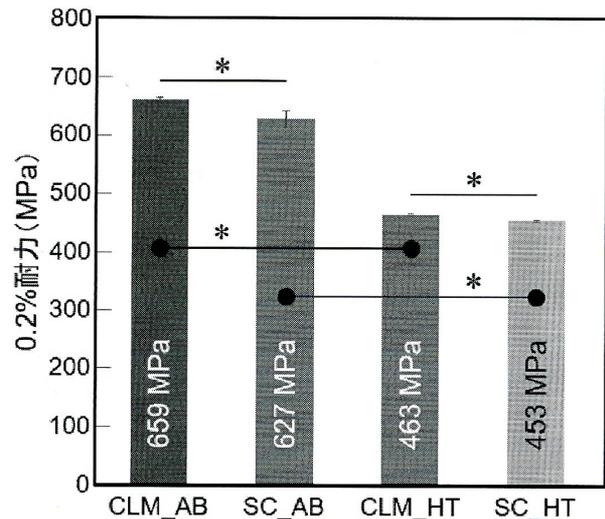


図 4 CLM とセル組織の有無による降伏応力の差異。CC BY 4.0 ライセンスの下で出版されている文献 6) より引用。

表 2 力学特性に対する CLM, セル組織, およびその交互作用の有意性 ( $P$  値)。

	ラメラ組織効果	セル組織効果	交互作用
$P$ 値	0.0011	$9.2 \times 10^{-11}$	0.030

CC BY 4.0 ライセンスの下で出版されている文献 6) より引用。

なる結晶方位を持つ 2 つの結晶間における幾何学的適合性因子 (応力伝達係数)  $N_{12}$  を用いると、塑性変形が連続的に生じる場合、隣接する結晶 A および結晶 B の界面における塑性変形の連続性は、各結晶のすべり系間の幾何学的関係に依存し、 $N_{12}$  は次式で定義される。

$$P_2 = P_1 \cdot N_{12} \\ = P_1 \cdot [(e_1 \cdot e_2)(g_1 \cdot g_2) + (e_1 \cdot g_2)(e_2 \cdot g_1)]$$

ここで、 $e_1$  および  $e_2$  はすべり面法線方向、 $g_1$  および  $g_2$  はすべり方向を表す。 $N_{12}$  が小さいほど界面を通じたすべり伝達に対する抵抗が大きくなり、その結果として強度は増加する。単結晶における  $N_{12}$  は 1 となる一方で、CLM における  $N_{12}$  は 0.819 と算出され、これは  $\langle 011 \rangle // BD$  と  $\langle 001 \rangle // BD$  粒の間の応力伝達に対して抵抗が存在することを示し、単結晶様造形体と比較して CLM 造形体の機械的特性が向上したと考えられる。さらに、荷重軸を

変化させることで、主層・副層間で活動するすべり系を変化させ、理論的に  $N_{12}$  値をさらに低下させることが可能である<sup>12)</sup>。したがって、スキャンストラテジーによる CLM の制御は、主層・副層界面を強化機構として積極的に活用できる手法であるといえる。

セル組織による強化機構については、これまでいくつかのモデルが提案されている。セル境界を一種の微細な粒界と見なし、強度が Hall-Petch 則に従うと報告されているが<sup>7)28)</sup>、一方で、セル境界は転位運動に対して一定の抵抗を与えるものの、完全な阻止には至らないとの指摘もある<sup>29)</sup>。

いずれにせよ、本研究の結果は、セル組織が L-PBF 法で造形された IN718 の高強度の支配的要因であることを明確に示しており、降伏応力を約 40% 増加させることが明らかとなった。セル組織の伸長方向は、結晶の  $\langle 001 \rangle$  成長方向と一致している<sup>7)22)</sup>。そのため、FCC 構造を有する IN718 の  $\{111\}$   $\langle 011 \rangle$  すべり系は、幾何学的に常に高密度のセル境界と交差することになり (図 5 (a))、荷重軸の方向に依存せずセル組織による強力な変形抵抗を受ける。図 5 (b), (c) に示す造形体表面のすべり線観察では、セル組織を有する CLM\_AB 造形体において、セル組織と転位線の交差が確認された。これは、転位がセル境界を、抵抗を受けながらも通過 (伝達) していることを示唆している。

さらに、本研究の特筆すべき知見として、二重配置分散分析 (Two-way ANOVA) の結果、セル

組織と CLM の強化効果の間には統計学的に有意な交互作用が認められたことが挙げられる (表 2)。一般に、金属材料における複数の強化機構の寄与は線形的に加算される (線形加算則)<sup>4)30)</sup>。しかしながら、本研究の結果は、L-PBF 特有の階層性組織間において、セル組織に起因するマトリックスの強化が、結晶方位差を有する CLM 界面におけるすべり抵抗をより効果的に引き出していることが示唆される。この知見に基づき、近年では、セル組織や CLM を含む組織を「基本単位」とし、結晶集合組織 (結晶配向方位) の異なる区画同士を人為的に配置することで、材料強度をさらに向上させつつ製品中の場所ごとに異なる力学的要請に応え得る造形体の創製が提案されている<sup>1)31)</sup>。本研究で明らかにした L-PBF 特有の階層性組織の相関を利用することで、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可能になると期待される。

## おわりに

本研究では、L-PBF 法により造形された IN718 におけるナノメータスケールのセル組織およびマイクロメータスケールの結晶学的ラメラ組織 (CLM) が、力学特性に及ぼす影響を定量的に解析した。新規スキャンストラテジーと熱処理を組み合わせることで、各組織因子の有無を独立に制御した 4 種類の造形体を作製・比較した結果、以下の知見を得た。

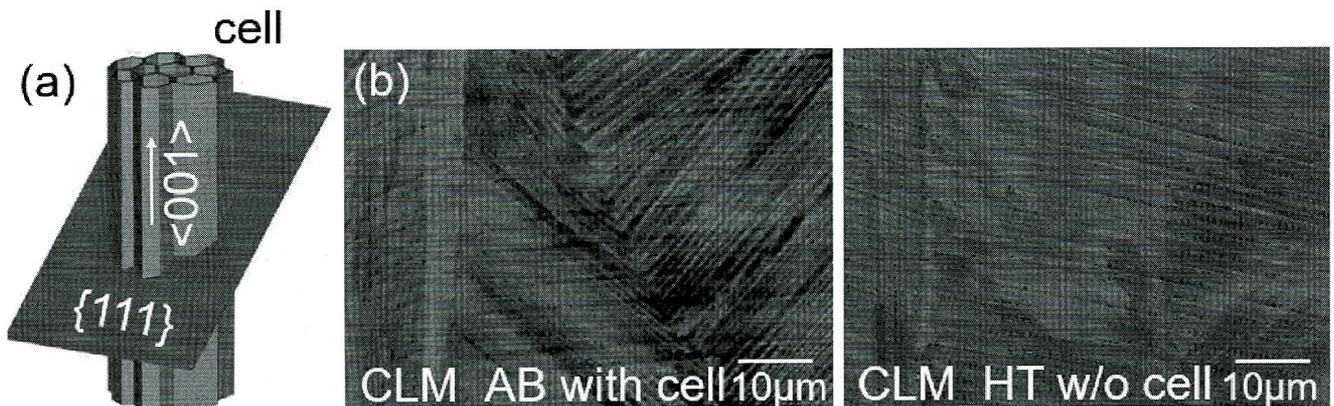


図 5 (a) FCC 結晶における  $\{111\}$  すべり面とセルネットワークの幾何学的関係の模式図。転位は常にセル組織と相互作用する。(b) CLM\_AB 造形体、(c) CLM\_HT 造形体の力学試験後に造形体表面に現れたすべり線。CC BY 4.0 ライセンスの下で出版されている文献 6) より引用。

(1) 強化の支配的要因の特定：セル組織は降伏応力を約 40% 増加させる支配的な因子であり、その寄与は CLM 単独による強化 (2.0~5.1%) を大幅に上回る。

(2) 組織間の相乗効果 (交互作用) の発見：二元配置分散分析により、セル組織と CLM の強化効果の間には統計学的に有意な交互作用が認められた。これは、両組織が共存することで単なる線形加算を超えた相乗的な強度上昇が発現することを示唆している。

(3) 強化機構の幾何学的・結晶学的解釈：セル組織による強化は、すべり系がセル組織伸長方向と常に交差するという幾何学的関係に起因する。一方、CLM による強化は、主層と副層の界面におけるすべり伝達抵抗 ( $N_{12}$  の低下) が寄与していることを明らかにした。

本研究で示した「微細組織因子を個別に制御し定量評価する」手法は、AM 特有の階層性組織を有する材料の強化機構に対する理解を深化させるものである。本知見は、今後、多様な合金系において階層性組織制御に基づいた自在な材料設計指針を構築する上での重要な基盤となると期待される。

## 謝辞

本研究は JST-CREST『革新的力学機能材料の創出に向けたナノスケール動的挙動と力学特性機構の解明』(ナノ力学) (研究総括 伊藤耕三)「カスタム力学機能制御学の構築～階層化異方性骨組織に学ぶ～」(JPMJCR2194) の支援を受けて実施された。

## 参考文献

- 1) T. Ishimoto, N. Morita, T. Nakano, et al.: Superimpositional design of crystallographic textures and macroscopic shapes via metal additive manufacturing—Game-change in component design, *Acta Mater.*, **286** (2025), 120709.
- 2) Y. Tsutsumi, T. Ishimoto, T. Nakano, et al.: Crystallographic texture- and grain boundary density-independent improvement of corrosion resistance in austenitic 316L stainless steel fabricated via laser powder bed fusion, *Addit. Manuf.*, **45** (2021), 102066.
- 3) T. Ishimoto, K. Hagihara, T. Nakano, et al.: Stability of crystallographic texture in laser powder bed fusion: Understanding the competition of crystal growth using a single crystalline seed, *Addit. Manuf.*, **43** (2021), 102004.
- 4) B. Guo, D. Cui, Q. Wu, et al.: Segregation-dislocation self-organized structures ductilize a work-hardened medium entropy alloy, *Nat. Commun.*, **16** (2025), 1475.
- 5) D. Kong, C. Dong, S. Wei, et al.: About metastable cellular structure in additively manufactured austenitic stainless steels, *Addit. Manuf.*, **38** (2021), 101804.
- 6) T. Kikukawa, T. Ishimoto, T. Nakano, et al.: Remarkable strengthening effects of cells in laser powder bed fusion-processed Inconel 718, *Mater. Res. Lett.*, **13** (2025), 837-843.
- 7) K. Cho, K. Yamashita, T. Nakano, et al.: Effect of nanoscale cellular structure on the mechanical properties of Inconel 718 with unique hierarchical structure fabricated by laser powder bed fusion, *Acta Mater.*, **303** (2026), 121696.
- 8) T. Nakano, T. Ishimoto, A. Matsugaki, et al.: Establishment of custom mechanical function control by forming singular interfaces in metal 3D printing: Learning from hierarchical anisotropic bone tissue, *Materia Japan*, **63** [1] (2024), 36-41.
- 9) Y. Xuan, J. Chang, Y. Ou, et al.: Heterogeneous structure architected by additive manufacturing: facile route towards strong and ductile steel, *Mater. Res. Lett.*, **12** (2024), 199-207.
- 10) C. Puzon, M. Buttard, A. Després, et al.: A novel laser powder bed fusion Al-Fe-Zr alloy for superior strength – conductivity trade-off, *Scr. Mater.*, **219** (2022), 114878.
- 11) O. Gokcekaya, T. Ishimoto, T. Nakano, et al.: Novel single crystalline-like non-equiatomic TiZrHfNbTaMo bio-high entropy alloy (BioHEA) developed by laser powder bed fusion, *Mater. Res. Lett.*, **12** (2023), 274-280.
- 12) O. Gokcekaya, T. Ishimoto, T. Nakano, et al.: Unique crystallographic texture formation in Inconel 718 by laser powder bed fusion and its effect on mechanical anisotropy, *Acta Mater.*, **212** (2021), 116876.
- 13) H. Chen, D. Egusa, Z. Li, et al.: Phase-separation induced dislocation-network cellular structures in Ti-Zr-Nb-Mo-Ta high-entropy alloy processed by laser powder bed fusion, *Addit. Manuf.*, **102** (2025), 104737.
- 14) S. H. Sun, T. Ishimoto, T. Nakano, et al.: Excellent mechanical and corrosion properties of austenitic stainless steel with a unique crystallographic lamellar

- microstructure via selective laser melting, *Scr. Mater.*, **159** (2019), 89-93.
- 15) P. Wang, Y. Zhu, N. Lu, et al.: Controllable period of crystallographic lamellar microstructure in ZGH451 superalloy prepared by laser powder bed fusion, *J. Mater. Sci. Technol.*, **211** (2025), 239-243.
- 16) P. Pant, F. Salvemini, S. Proper, et al.: A study of the influence of novel scan strategies on residual stress and microstructure of L-shaped LPBF IN718 samples, *Mater. Des.*, **214** (2022), 110386.
- 17) X. Xie, F. Zhang, C. Peng, et al.: Effect of scan strategy and substrate preheating on crack formation in IN738LC Ni-based superalloy during laser powder bed fusion, *Mater. Charact.*, **221** (2025), 114722.
- 18) M. Okugawa, K. Saito, H. Yoshima, et al.: Solute segregation in a rapidly solidified Hastelloy-X Ni-based superalloy during laser powder bed fusion investigated by phase-field and computational thermal-fluid dynamics simulations, *Addit. Manuf.*, **84** (2024), 104079.
- 19) W. M. Tucho, P. Cuvillier, A. Sjolyst-Kverneland, et al.: Microstructure and hardness studies of Inconel 718 manufactured by selective laser melting before and after solution heat treatment, *Mater. Sci. Eng. A*, **689** (2017), 220-232.
- 20) M. Godec, S. Zaeferrer, B. Podgornik, et al.: Quantitative multiscale correlative microstructure analysis of additive manufacturing of stainless steel 316L processed by selective laser melting, *Mater. Charact.*, **160** (2020), 110074.
- 21) C. Liu, Y. Wang, Y. Zhang, et al.: Deformation mechanisms of additively manufactured TiNbTaZrMo refractory high-entropy alloy: The role of cellular structure, *Int. J. Plast.*, **173** (2024), 103884.
- 22) M. S. Pham, B. Dovgyy, P. A. Hooper, et al.: The role of side-branching in microstructure development in laser powder-bed fusion, *Nat. Commun.*, **11** (2020), 749.
- 23) D. E. Jodi, T. Kitashima, Y. Koizumi, et al.: Manufacturing single crystals of pure nickel via selective laser melting with a flat-top laser beam, *Addit. Manuf. Lett.*, **3** (2022), 100066.
- 24) O. Andreau, I. Koutiri, P. Peyre, et al.: Texture control of 316L parts by modulation of the melt pool morphology in selective laser melting, *J. Mater. Process. Technol.*, **264** (2019), 21-31.
- 25) V. A. Popovich, E. V. Borisov, A. A. Popovich, et al.: Impact of heat treatment on mechanical behavior of Inconel 718 processed with tailored microstructure by selective laser melting, *Mater. Des.*, **131** (2017), 12-22.
- 26) E. M. Fayed, M. Saadati, D. Shahriari, et al.: Effect of homogenization and solution treatments time on the elevated-temperature mechanical behavior of Inconel 718 fabricated by laser powder bed fusion, *Sci. Rep.*, **11** (2021), 2020.
- 27) J. D. Livingston and B. Chalmers: Multiple slip in bicrystal deformation, *Acta Metall.*, **5** (1957), 322-327.
- 28) J. G. Kim, J. B. Seol, J. M. Park, et al.: Effects of cell network structure on the strength of additively manufactured stainless steels, *Met. Mater. Int.*, **27** (2021), 2614-2622.
- 29) S. H. Li, Y. Zhao, J. Radhakrishnan, et al.: A micropillar compression investigation into the plastic flow properties of additively manufactured alloys, *Acta Mater.*, **240** (2022), 118290.
- 30) B. Liu, Y. Ding, J. Xu, et al.: Outstanding strength-ductility synergy in Inconel 718 superalloy via laser powder bed fusion and thermomechanical treatment, *Addit. Manuf.*, **67** (2023), 103491.
- 31) T. Mayama, T. Ishimoto, T. Nakano, et al.: Novel strengthening mechanism of laser powder bed fusion manufactured Inconel 718: effects of customized hierarchical interfaces, *Addit. Manuf.*, **93** (2024), 104412.

きくかわ・たいち KIKUKAWA Taichi

2024 大阪大学工学部応用理工学科卒業。同年 大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻入学、現在に至る。Additive Manufacturing による金属材料の微細組織の形成機序解明・制御、機能性発現に関する研究開発に従事。学士(工学)(大阪大学)。

いしもと・たくや ISHIMOTO Takuya

2008 大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻博士後期課程修了、同年 大阪大学大学院工学研究科特任助教、2009 同助教、2014 同講師、2016 同准教授、2021 富山大学先進アルミニウム国際研究センター教授、大阪大学大学院工学研究科特任教授を兼任、現在に至る。チタンをはじめとする金属材料の微細組織・機能創出に関する研究開発に従事。博士(工学)(大阪大学)。

なかの・たかよし NAKANO Takayoshi

1992 大阪大学大学院工学研究科博士前期課程修了、同年 大阪大学工学部助手、1996 博士(工学)(大阪大学)。1999 大阪大学大学院工学研究科講師、2001 同助教、2008 同大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻教授、同大学異方性カスタム設計・AM 研究開発センター長、日本学術会議会員(第 26 期・27 期)などを兼任、現在に至る。高温耐熱材料の塑性変形機構の解明に端を発し、「異方性材料学」の学理構築のため、多様な骨基質配向化機構研究、金属 AM による異方性形状・材質制御に関する研究に従事。