

特集 ▶ デジタルファブリケーションによるバイオマテリアルの新展開

3D プリンティングを活用した金属系バイオマテリアルの機能制御

Functional Control of Metallic Biomaterials via 3D Printing

小笹 良輔
Ryosuke Ozasa

中野 貴由*
Takayoshi Nakano

大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻 Division of Materials and Manufacturing Science, Graduate School of Engineering, The University of Osaka

本稿では、金属 3D プリンティング (3DP) を活用した金属系バイオマテリアルの高機能化について、主に結晶集合組織や微細組織などの材質制御に着目して概説する。準安定 β 型 Ti 合金 (Ti-42Nb 合金) では結晶配向と微細な準安定相の制御による低ヤング率と高強度の両立、Mg-0.5Ca 合金では六方晶系の結晶対称性に基づく単結晶様組織の形成と力学的異方性の発現について紹介する。

キーワード レーザ粉末床溶融結合、結晶構造、結晶集合組織、微細組織、力学特性

1. はじめに

超高齢社会の到来や医療・健康ニーズの多様化、医療機器・技術の高度化にともない、バイオマテリアルにはさらなる高い機能性が求められている。なかでも金属系バイオマテリアルは、優れた強度や靱性などの特性をもつことから、骨や関節などの荷重支持を必要とする部位において重用されている。近年では、航空宇宙や輸送機器分野に加え、医療分野においても金属 3D プリンティング (3DP) の利活用が進んでいる。特に医療分野では、臓器サイズや形態、機能の個人差に対応するため、患者ごとにカスタマイズされた医療デバイスの需要が高まっている。なかでも、力学特性を埋入初期から発揮すべき骨・骨関節インプラントの製造において、金属 3DP に対する期待はさきわめて高い。

インプラントの適用対象である骨組織では、骨の種類や部位¹⁾、患者の投薬履歴や病態²⁻⁴⁾、遺伝的背景⁵⁾などに依存して、形状のみならず材質 (骨密度、骨基質配向性などの骨質) が多様な変化を示し、それぞれの骨が発現する力学特性は顕著に異なる。したがって、患者個々に合わせた骨のカスタム医療を実現するには、骨格や骨形状に加えて材質までもが最適化された、生体骨類似の構造・機能をもつ骨・骨関節インプラントの創製が期待される。

本稿では、金属 3DP のうち、金属系バイオマテリアルへの適用が進められているレーザ粉末床溶融結合 (Laser Powder Bed Fusion: L-PBF) に着目し、その特徴や骨インプラントへの適用事例の紹介、ならびに本手法を駆使した材質制御による技術について概説する。とりわけ、準安定 β 型 Ti 合金⁶⁾ および Mg 合金⁷⁾ の微細組織を介した機能性制御について、著者らの研究成果を中心に紹介する。

2. 金属 3DP と外部・内部形状の三次元制御

生体・医療用材料の作製に用いられる金属 3DP は、主に粉末床溶融結合 (PBF: Powder Bed Fusion) であり⁸⁾、レーザを熱源とする L-PBF、電子ビームを熱源とする電子ビーム粉末床溶融結合 (EB-PBF: Electron Beam-Powder Bed Fusion) が普及している。いずれの方式でも、原料金属粉末を平坦に掃引し、形成した粉末床に熱源を二次元スライスデータに基づき照射することで、照射領域のみを選択的に溶融・凝固する。このプロセスを層ごとに繰り返し、二次元要素を積層することで、最終的に三次元造形体を得ることができる (図 1)。

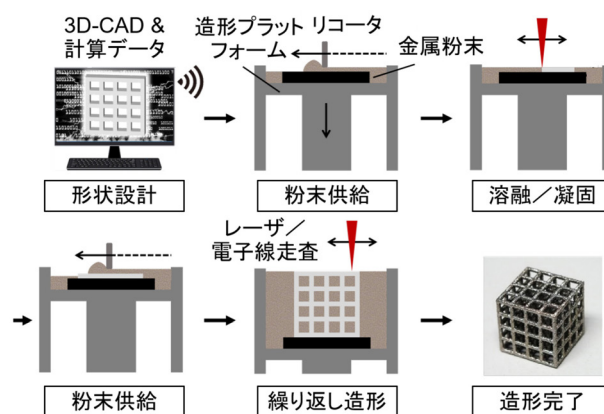


図1 PBF方式金属3DPによる造形プロセスの手順

金属 3DP は、その自在な形状制御能を活かした多品種生産、さらに究極的には一品一様のカスタム製品の製造に対応可能なプロセスといえる。インプラント形状の不適合は、たとえば人工股関節置換術の場合、ステムのルーシングや局所接触によりインプラントから周囲骨への正常な応

力伝達が阻害されて応力遮蔽が生じ、最終的には骨萎縮に至ることから、インプラントの外形形状適合はきわめて重要である⁹⁾。しかしながら、現状のインプラント製品のほとんどは患者の平均骨格形状に基づく既製品であり、インプラント形状に適合させるよう侵襲的に患者の骨を削り、骨側にてサイズの調整をしている。こうしたなか、患者の骨を健全に残しつつ、ルースニングの生じないインプラントを提供するため、X-ray Computed Tomography (XCT) 法により取得した患者骨格の三次元形状データに基づき、患者個々の骨形状に適合したカスタムメイドインプラントを金属 3DP により製造する研究開発が国内外で進められている¹⁰⁾。

一般的に、L-PBF では直径約 100 μm に集光されたレーザーを用いて、粒径 15–45 μm 程度の金属粉末からなる粉末床を局所的に熔融し、微小な熔融池を形成しながら造形が進行する。そのため、L-PBF は、微細かつ複雑な形状を高い形状精度で造形可能である。こうした L-PBF の特徴を最大限に活かし、中野らは、階層型一方向配向溝構造(Honeycomb Tree Structure: HTS)をもつ椎間スペーサーを開発した¹¹⁾。本構造の導入により、生体内への埋入初期には微細溝によって骨芽細胞の伸展・配向と早期の配向化骨形成を誘導し、中長期的には力学的刺激によって健全な骨質の維持が可能となる(図 2)。HTS は三次元的な多孔質構造の内部に微細な一方向性溝を組み込んだ複雑な階層構造であり、切削加工等の従来法では作製が困難である。HTS は L-PBF の高い形状自由度と微細造形能力を駆使して初めて実現可能な構造であり、本手法独自の特徴を活かした好例である。

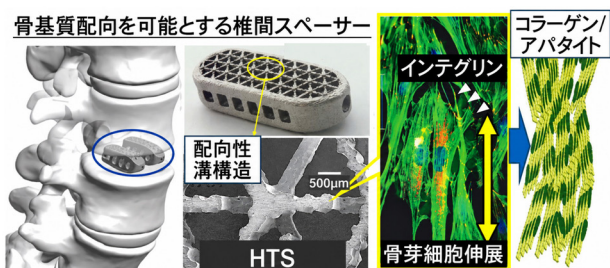


図 2 HTS により骨芽細胞・骨基質の配向化誘導と長期的な骨質維持を可能とする、L-PBF 製椎間スペーサー。文献 11 より改変引用 (CC BY 4.0)

3. 準安定 β 型 Ti 合金の微細組織・機能性制御

金属 3DP の特徴は、前述の外部・内部形状の制御だけでなく、金属材料の力学特性や機能特性を決定する材質の制御、特に結晶配向方位を制御できることにある。材質制御は、特に、周囲骨との力学的な生体適合性が求められる骨デバイスの創製において有効となる。多くの金属は、骨と比較して高いヤング率を示すため、応力が金属に偏って伝達されることで周囲骨への力学的刺激が低下(応力遮

蔽) してしまう。したがって、たとえば人工股関節に使用する金属系バイオマテリアルには、応力遮蔽を生じないための低ヤング率と材料自体が変形・破壊しないための高強度といった相反する機能性の両立が求められる。しかしながら、比較的低いヤング率を示す Ti 合金であっても、骨類似の低ヤング率 (30 GPa) には到達できていないうえ、強度はヤング率と同調して変化する。すなわち、低ヤング率化にともない強度も低下するのが現状である。

こうした背景のもと、筆者らは、低ヤング率を実現するための金属系バイオマテリアルとして、準安定 β 型 Ti 合金の一種である Ti-42Nb (wt. %) 合金に注目した⁶⁾。本合金は、体心立方 (body-centered cubic: bcc) 構造をもつ β 相の格子不安定性に起因して、 β 母相は低いヤング率を示す¹²⁾ 反面、 ω 相などの準安定相がヤング率と強度を増加する¹³⁾。したがって、Ti-42Nb 合金の力学特性を制御するには、 β 相の組織制御に加えて、 ω 相の形態や体積率を制御することが重要となる。

図 3 には、Ti-42Nb 合金に対する熱源走査戦略(層ごとのレーザー走査の方向やパターン)の違いに依存した x, y, z 方向への優先結晶配向方位の違いを示す⁶⁾。ここで、赤色は低ヤング率の $\langle 001 \rangle$ 方位、黄緑色は比較的高いヤング率の $\langle 011 \rangle$ 方位、青色はヤング率が最大となる $\langle 111 \rangle$ 方位を示している。 $\pm 0^\circ$ -scan (x 方向のみにレーザーを往復走査)、 $\pm 90^\circ$ -scan (積層ごとに x 方向と y 方向に沿って交互にレーザーを往復走査)、 $+120^\circ$ -scan (積層ごとに 120° 回転してレーザーを片道走査) では、結晶配向方位が顕著に異なり、特に $\pm 90^\circ$ -scan では、x, y, z 方向のいずれにも低弾性の $\langle 001 \rangle$ が優先配向化する。こうした結晶集合組織の形成には、凝固時の熱流方向と各レーザー走査間で形成される界面の存在が重要となる。同一方向への往復走査を行う $\pm 0^\circ$ -scan では、レーザー走査方向に対して鉛直な断面内で結晶成長が生じ、熔融池の左右から成長した結晶は熔融池中央付近にて会合する。この際、熱流は放物線状に形成された熔融池外縁(レーザー走査痕)の法線方向に沿って生じるため、これらの方向に対応して $\langle 001 \rangle$

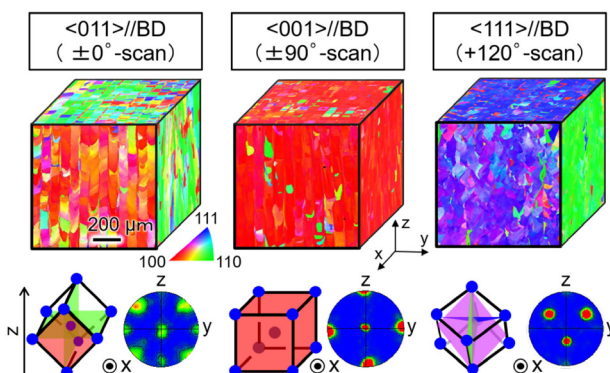


図 3 熱源走査戦略に応じた結晶方位の変化。上段: IPF マップ、下段: 配向状態の模式図と 100 極点図。文献 6 より改変引用 (CC BY 4.0)

が場所ごとに異なる方向に成長するものと予想される。しかしながら、実際には、熔融池内のいずれの場所においても、 $\langle 001 \rangle$ は造形 (z) 方向から約 $\pm 45^\circ$ 傾斜しており、左右から成長した結晶は熔融池中央付近にて会合し、結晶方位差の小さい亜粒界を形成する。このことは、 $\pm 0^\circ$ -scan における結晶成長方向と結晶集合組織の制御は、熱流だけではなく会合界面での界面エネルギー最小化を駆動力として実現されたことを意味する。

$+120^\circ$ -scan においては、 $\pm 0^\circ$ -scan と同様に、界面エネルギーの低下を駆動力に、熔融池内左右における結晶粒の方位が整合するように成長し、会合界面に対して平行に $\langle 011 \rangle$ が配向化する。しかしながら、往復走査の $\pm 0^\circ$ -scan の場合とは異なり、 $+120^\circ$ -scan ではレーザーの片道走査と 3 方向 (0° , 120° , 240°) からのレーザー走査により、 $\langle 011 \rangle$ がレーザー走査方向に対して 35.3° 傾斜する結果、z 方向には $\langle 111 \rangle$ が優先配向化する。これらの熱源走査戦略に対して、 $\pm 90^\circ$ -scan では、x 方向と y 方向のいずれにも $\langle 001 \rangle$ と $\langle 011 \rangle$ の競合成長が生じるものの、高い成長速度をもつ $\langle 001 \rangle$ が優先成長することで、x, y, z 方向の直交三軸に沿って $\langle 001 \rangle$ 配向化が達成するものと理解される。

図 4 には、Ti-42Nb 合金の L-PBF 材における STEM 観察の結果を示す⁶⁾。制限視野電子回折パターン(図 4 (a))とその強度プロファイル(図 4 (b))より、 β 母相に加えて、 ω 相と α'' 相の存在が観察される。ここで、高角環状暗視野走査透過電子顕微鏡 (HAADF-STEM) 像(図 4 (c))および逆高速フーリエ変換 (IFFT) (図 4 (d)) 像を用いて画像解析した結果、粒径は、 ω 相が 2.3 ± 0.7 nm, α'' 相が 1.8 ± 0.4 nm であり、それぞれの体積率は 1.2% と 3.7% であると見積もられた。すなわち、Ti-42Nb 合金の L-PBF

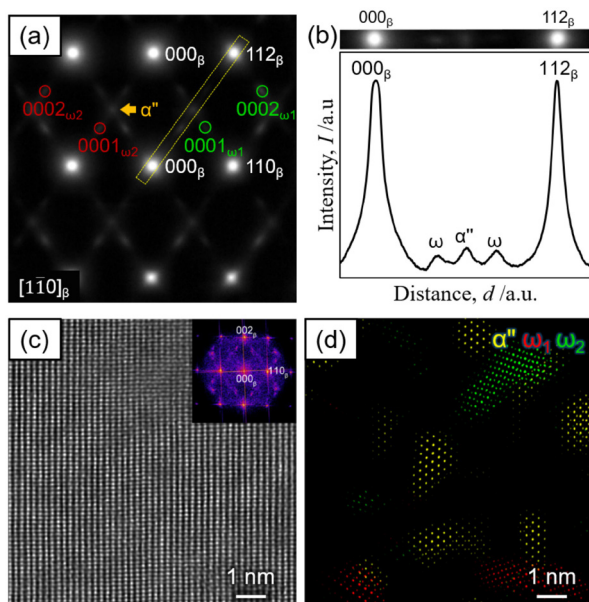


図 4 微細な ω 相と α'' 相の形成。(a) 制限視野電子回折パターン ($[110]_\beta$ 入射)。(b) 強度プロファイル。(c) HAADF-STEM 像と対応する FFT パターン。(d) IFFT 像。文献 6 より改変引用 (CC BY 4.0)

材では、急凝固により数 nm の極めて微細な準安定相が少量形成された。

一般に、析出物は塑性変形を担う転位の運動を妨げることで材料を強化する。この際、転位が析出物を切断して通過するせん断機構と析出物を迂回するオロワン機構が考えられ、粒子のサイズや体積率に応じて支配的な機構が変化する。本研究では両機構を比較した結果、観察された ω 相と α'' 相では、せん断機構が支配的であると評価された(図 5)⁶⁾。その結果、 $\langle 001 \rangle$ 配向材において ω 相と α'' 相による降伏応力の増加はそれぞれ約 219 MPa, 約 65 MPa と推定されることから、特に微細 ω 相が本合金の強化に重要な役割を果たすことが理解される。

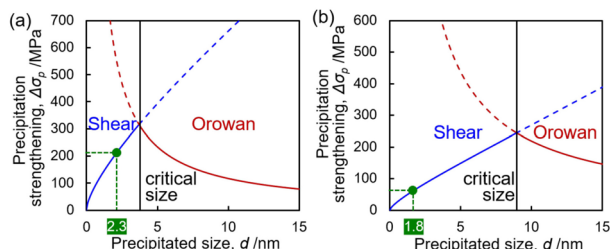


図 5 $\langle 001 \rangle$ 配向材における析出物のサイズに応じた強化増分の変化。(a) ω 相 (体積率 1.2%)、(b) α'' 相 (体積率 3.7%)。文献 6 より改変引用 (CC BY 4.0)

一方で、Effective-Mean-Field 理論¹⁴⁾を用いて ω 相がヤング率に及ぼす影響について評価した結果、 ω 相体積率の増加にともないヤング率は上昇するが、今回の体積率 (1.2%) ではその上昇はきわめて小さい (1 GPa 未満) のものと見積もられた⁶⁾。これらの結果より、微細かつ少量形成された ω 相は、転位との相互作用を介して大きな強度上昇をもたらす一方で、巨視的な弾性率への寄与は小さいことが理解された。

こうして得られた $\langle 001 \rangle$ 配向材は、ヤング率 40.9 GPa, 降伏応力 635.3 MPa, 塑性伸び 13.6% を示した⁶⁾。降伏応力をヤング率で除した比は 15.5×10^{-3} であり、従来の Ti 合金群と比較して高い値に位置する(図 6)。このように、

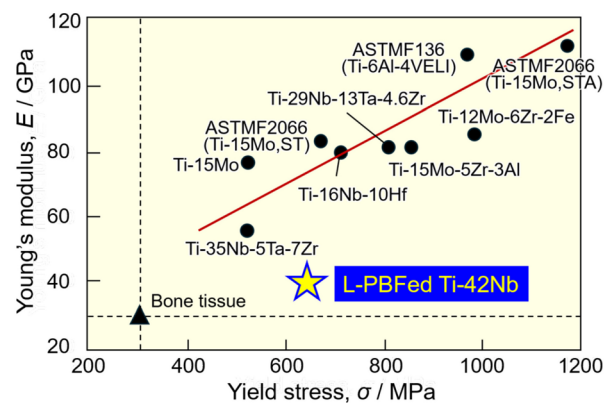


図 6 L-PBF 製 Ti-42Nb 合金と既報の Ti 合金における「ヤング率－降伏応力」の関係性

L-PBF 特有の凝固プロセスを駆使することで、 $\langle 001 \rangle$ 配向化により低ヤング率化を実現しつつ、微細 ω 相の形成によりヤング率を上昇させずに降伏応力のみを向上することに成功した。本合金は高い細胞増殖性を示すことも確認されている⁶⁾。したがって、今後は骨デバイスとしての活用が期待され、その有効性検証のために疲労特性や耐食性などの特性や生体内応答などの各種試験によるさらなる機能解明が望まれる。

4. 六方晶系 Mg 合金の結晶集合組織制御と異方性機能発現

Mg 合金は、実用化されている金属材料の中で最も軽量であり、高い比強度を有することから、次世代の構造材料として注目を集めている。なかでも、Mg-Ca 合金は、生体必須元素である Mg と Ca から構成され、生分解性バイオマテリアルとしての応用が期待されている。Mg は六方最密 (Hexagonal close-packed: hcp) 構造を有し、結晶方位に応じて活動するすべり系や双晶系が異なることから、顕著な力学的異方性が発現する¹⁵⁾。さらに Mg 合金は結晶方位に応じて異なる溶解速度を示す¹⁶⁾。こうした Mg および Mg 合金がもつ化学的・物理的な異方性機能を発現するためには単結晶の作製が必要であり、生体内での要求特性に柔軟に対応するには、Mg 合金の人為的な結晶集合組織制御法を確立することが望まれる。しかしながら、Mg をはじめとする hcp 構造をもつ金属材料は、 $[0001]$ 周りには 6 回の高い回転対称性をもつが、たとえば $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ 軸周りには 2 回対称性しかもたない。すなわち、Ti-42Nb 合金がもつ bcc 構造とは異なり、hcp 構造は方向に応じて顕著に異なる回転対称性を示す。そのため、従来から汎用的に利用されている熱源走査戦略 ($\pm 0^\circ$ -scan や $\pm 90^\circ$ -scan) では、Mg および Mg 合金の結晶集合組織の制御が困難であった。

図 7 には、シングルビード照射時の Mg-0.5Ca 合金にお

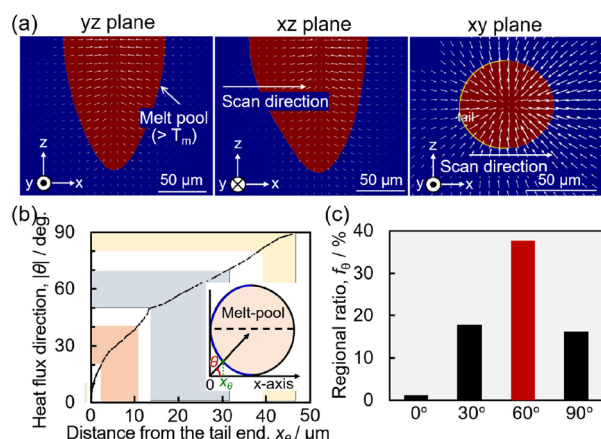


図 7 熱拡散挙動の解析結果。(a) 溶融池形状と熱流方向。(b) 溶融池テールにおける熱流角度分布と(c) 定量解析結果。文献 7 より改変引用 (CC BY 4.0)

ける熱拡散挙動を理解するために実施した、有限要素法による熱伝導解析の結果を示す。なお、図 7 (a) には x 方向に沿ってレーザを照射した際の各面内における溶融池形状と熱流方向の逆方向を矢印で示している。Mg 合金においては、Ti 合金同様に溶融池幅はレーザ径 (約 100 μm) 程度であるのに対し、Ti 合金と比較して Mg-0.5Ca 合金の溶融池テールは顕著に短いことを示した。その結果として、z 方向の熱流束成分はきわめて小さく、熱流束は主として xy 面内に二次元的に分布することを明らかにしている。この際、溶融池テール部における熱流束の角度分布解析 (図 7 (b, c)) より、熱流はレーザ走査方向に対して $\pm$ 約 60° 傾斜した方向に優先的に生じることが予測された。

熱拡散挙動の結果より、レーザ照射方向に対して $\pm 60^\circ$ 傾斜した方向に沿って、本合金の優先成長方位である $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ ¹⁷⁾ が成長するものと予測される。すなわち、xy 面内における溶融池中央部において、溶融池左右から成長してきた結晶同士が会合し、レーザ走査方向に沿って亜粒界が形成されて結晶方位が調整されるものと期待される (図 8 (a))。そこで筆者らは新たな熱源走査戦略として、 $\pm 120^\circ$ -scan (層間で 120° 回転させつつ往復走査) を考案した (図 8 (b))⁷⁾。本手法は、 $\pm 0^\circ$ -scan と同様に、1 層造形ではレーザ走査方向に沿って会合界面を形成するものと予想されるが、層ごとに (3n-2) 層目: 0° (180°), (3n-1) 層目: 120° (300°), (3n) 層目: 240° (60°) の方向へとそれぞれレーザ走査することで、これら 3 方向に沿って会合界面を導入することが可能となる。ここで重要なことに、 $\pm 120^\circ$ -scan では各層の造形により $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ が 0°, 60°, 120°, 180°, 240°, 300°, 360° 軸の 6 方向から成長することが期待され、これは hcp 構造における $[0001]$ 周りの結晶対称性と完全に一致する。したがって、同一層内での往復走査と隣接溶融池の重なりを介して、隣り合う領域の結晶方位を整合せつつ、 $\pm 120^\circ$ -scan により会合界面を 3 方向から導入することで、各会合界面での界面エネルギーが同時低下することを駆動力に、単結晶組織形成を誘導できるものと期待される。この際、1 方向のみに会合界面を導入するだけでは不十分であり、 $\pm 0^\circ$ -scan では z 方向から -y 方向 (ラスター方向) へと約 20° 傾斜した軸に沿って $[0001]$ が配向化

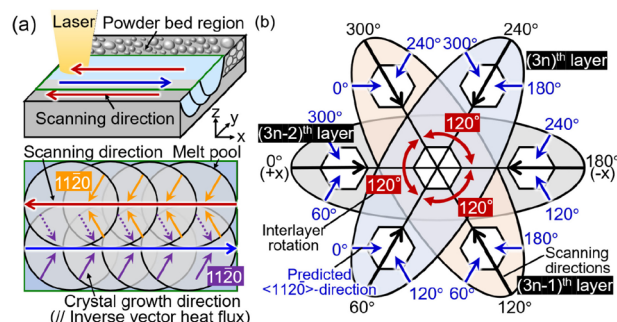


図 8 新たに考案した熱源走査戦略 ($\pm 120^\circ$ -scan) および期待される結晶成長方向を表す模式図。文献 7 より改変引用 (CC BY 4.0)

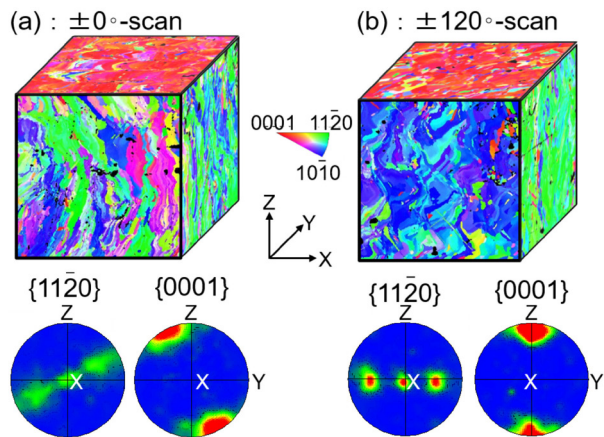


図9 各熱源走査戦略における結晶集合組織. (a) $\pm 0^\circ$ -scan, (b) $\pm 120^\circ$ -scan における IPF マップ (上段), および極点図 (下段). 文献7より改変引用 (CC BY 4.0)

しつつ, それ以外の方向にはランダム配向を示す繊維状組織が形成した (図9 (a)). これに対して, $\pm 120^\circ$ -scan では期待通りに単結晶様組織 ($[0001]//z$, $\langle 11\bar{2}0 \rangle //$ 各レーザ走査方向) を形成した (図9 (b)).

図10には, $\pm 120^\circ$ -scan 材を各荷重方向から圧縮した際の降伏応力と塑性ひずみの定量解析結果を示す⁷⁾. $[0001]$ 方位の降伏応力は, その方向から 45° 傾いた方向 ($\langle 11\bar{2}1.85 \rangle$ と $\langle 10\bar{2}1.07 \rangle$) のそれよりも約 2.7 倍高い値を示した. 一方で, 45° 方向は, $[0001]$ 方位よりも約 2.6 倍高い塑性ひずみ値を示し, 強度と延性の双方において顕著な方位依存性の発現が認められた. この要因を検討するために, 各荷重方向に対するすべり系と双晶系のシュミット因子を解析した (図11 (a))⁷⁾. ここでシュミット因子は, 外部からの応力が各変形系のせん断応力として作用する割合を表す幾何学的な指標である. 解析結果から, 45° 方向圧縮では底面すべりが, $[0001]$ 方向圧縮では底面すべりよりも活動に高い応力を要する錐面すべりが関与するものと考えられる. さらに SEM-EBSD 解析により, 面内方向 ($\langle 11\bar{2}0 \rangle$ と $\langle 10\bar{1}0 \rangle$) からの圧縮時には, 母相と約 86° の方位差をもつ双晶が観察された (図11 (b)). Mg では $[10\bar{1}2]\langle 101\bar{1} \rangle$ 双晶の臨界分解せん断応力 (CRSS) が約 5 MPa¹⁵⁾ と低く, さらに $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ 方向と $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ 方向からの圧縮では同双晶系のシュミット因子がそれぞれ約 0.38 および 0.42 と高い. そのため, これらの方向からの圧縮時には $[10\bar{1}2]\langle 101\bar{1} \rangle$ 双晶が優先的に活動したものと理解される. このように, $\pm 120^\circ$ -scan により単結晶様組織を創製し, 結晶方位に応じて各すべり系・双晶系が活動し, 力学的異方性を発現させることに成功した. 興味深いことに, ほとんどの荷重方向において, L-PBF 材は単結晶よりも高い臨界分解せん断応力を示した. L-PBF 材特有の微細組織が強度上昇に寄与する可能性が示唆され, 今後の機序解明が期待される.

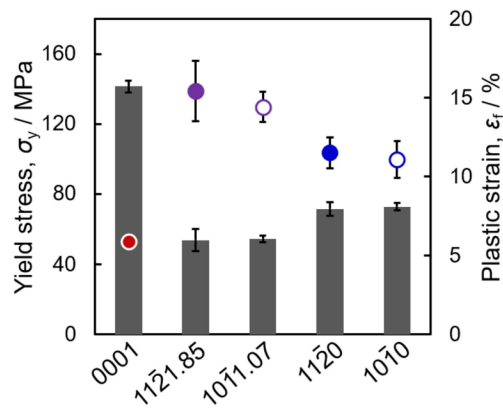


図10 $\pm 120^\circ$ -scan 材の降伏応力と塑性ひずみの定量解析結果. 文献7より改変引用 (CC BY 4.0)

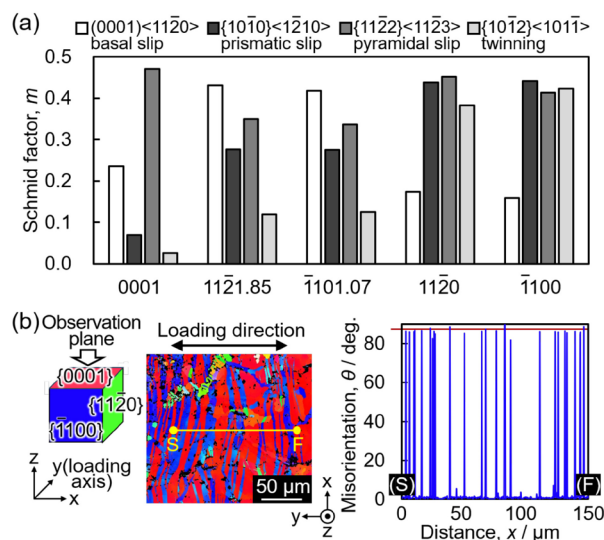


図11 各圧縮方位における変形モードの検討. (a) 各すべり系と双晶系における平均シュミット因子, (b) 2% 塑性ひずみ導入試料に対する SEM-EBSD 観察結果. 文献7より改変引用 (CC BY 4.0)

5. おわりに

本稿では, L-PBF 方式の金属 3DP による金属系バイオマテリアルの結晶集合組織と微細組織を介した力学特性の制御と高機能化について, Ti-42Nb 合金および Mg-0.5Ca 合金に関する研究成果を紹介した. 特に Mg-0.5Ca 合金では, 熱流方向と hcp 構造の結晶対称性に基づいて熱源走査戦略を設計することで, 従来の立方晶系金属を中心に展開されてきた L-PBF による単結晶化を, 六方晶系金属へと新たに拡張することに成功した. すなわち, 材料固有の結晶対称性を考慮した熱源走査戦略の設計が, 種々の結晶構造をもつ金属材料の結晶集合組織を能動的に制御できることを示した. 加えて, 結晶集合組織だけでなく, 急速な溶融・凝固により形成される準安定組織や微細組

織も力学特性を決定する重要な因子となる。Ti 合金にて微細な ω 相を利用した高強度化が実現されたように、Mg 合金においても L-PBF 特有の微細組織を積極的に制御・活用し、結晶集合組織制御と組み合わせることで、さらなる高強度化・高機能化が期待される。こうした材質視点での金属 3DP 活用が、新たな金属系バイオマテリアルの創出につながるものと期待される。

謝辞

本稿で紹介した研究の一部は、JSPS 科研費 25K00051, 26K22588, 26H02200, ならびに JST-CREST JPMJCR2194 の助成を受けたものです。

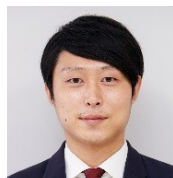
利益相反

本稿について、日本バイオマテリアル学会の投稿規定の基準による利益相反はありません。

文献

- 1) Nakano T, et al., Unique alignment and texture of biological apatite crystallites in typical calcified tissues analyzed by micro-beam X-ray diffractometer system. *Bone*, 2002; 31: 479-487. DOI: 10.1016/s8756-3282(02)00850-5
- 2) Ozasa R, et al., Osteoporosis changes collagen/apatite orientation and Young's modulus in vertebral cortical bone of rat. *Calcif. Tissue Int.*, 2018; 104: 449-460. DOI: 10.1007/s00223-018-0508-z
- 3) Ozasa R, et al., Bone fragility via degradation of bone quality featured by collagen/apatite micro-arrangement in human rheumatic arthritis. *Bone*, 2022; 155: 116261. DOI: 10.1016/j.bone.2021.116261
- 4) Ozasa R, et al., Combination treatment with ibandronate and eldecitol prevents osteoporotic bone loss and deterioration of bone quality characterized by nano-arrangement of the collagen/apatite in an ovariectomized aged rat model. *Bone*, 2022; 157: 116309. DOI: 10.1016/j.bone.2021.116309
- 5) Moriishi T, et al., Osteocalcin is necessary for the alignment of apatite crystallites, but not glucose metabolism, testosterone synthesis, or muscle mass. *PLoS Genet.*, 2020; 16: e1008586. DOI: 10.1371/journal.pgen.1008586
- 6) Miyasawa K, et al., Excellent yield strength-to-Young's modulus ratio in crystallographic texture-controlled β -type Ti-42Nb alloy developed by laser powder bed fusion. *Smart Mater. Manuf.*, 2027; 5: 100148. DOI: 10.1016/j.smmf.2026.100148
- 7) Ozasa R, et al., Design of a novel scanning strategy for formation of extremely strong textures in hexagonal materials through laser powder bed fusion. *Mater. Des.*, 2026; 268: 116307. DOI: 10.1016/j.matdes.2026.116307
- 8) Nakano T, et al., Additive manufacturing of medical devices. Narayan RJ, editor. ASM handbook, vol 23A, Additive manufacturing in biomedical applications, Materials Park: ASM International; 2022. DOI: 10.31399/asm.hb.v23A.a0006905
- 9) Noyama Y, et al., Design and optimization of the oriented groove on the hip implant surface to promote bone microstructure integrity. *Bone*, 2013; 52: 659-667. DOI: 10.1016/j.bone.2012.11.005
- 10) Meng M, et al., 3D printing metal implants in orthopedic surgery: Methods, applications and future prospects. *J. Orthop. Translat.*, 2023; 42: 94-112. DOI: 10.1016/j.jot.2023.08.004
- 11) Ishimoto T, et al., Outstanding in vivo mechanical integrity of additively manufactured spinal cages with a novel "honeycomb tree structure" design via guiding bone matrix orientation. *Spine J.*, 2022; 22: 1742-1757. DOI: 10.1016/j.spinee.2022.05.006
- 12) Tane M, et al., Low Young's modulus achieved by anelastic relaxation arising from reversible atomic shuffling in bcc Ti-Nb alloys. *Acta Mater.*, 2026; 307: 121969. DOI: 10.1016/j.actamat.2026.121969
- 13) Pilz S, et al., Influence of isothermal omega precipitation aging on deformation mechanisms and mechanical properties of a β -type Ti-Nb alloy. *J. Alloys Compd.*, 2023; 930: 167309. DOI: 10.1016/j.jallcom.2022.167309
- 14) Tane M, et al., Effective-mean-field approach for macroscopic elastic constants of composites. *Appl. Phys. Lett.*, 2004; 85: 197-199. DOI: 10.1063/1.1769587
- 15) Hagihara K, et al., Surprising increase in yield stress of Mg single crystal using long-period stacking ordered nanoplates. *Acta Mater.*, 2021; 209: 116797. DOI: 10.1016/j.actamat.2021.116797
- 16) Hagihara K, et al., Crystal-orientation-dependent corrosion behaviour of single crystals of a pure Mg and Mg-Al and Mg-Cu solid solutions. *Corros. Sci.*, 2016; 109: 68-85. DOI: 10.1016/j.corsci.2016.03.019
- 17) Du J, et al., Correlation between crystallographic anisotropy and dendritic orientation selection of binary magnesium alloys. *Sci. Rep.*, 2017; 7: 13600. DOI: 10.1038/s41598-017-12814-5

著者紹介



小笹 良輔 (おざさ りょうすけ)

大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻・講師。2019 年大阪大学大学院工学研究科博士後期課程修了，博士（工学）。同年大阪大学工学研究科助教，2025 年より現職。



中野 貴由 (なかの たかよし)

大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻・教授。1996 年大阪大学大学院工学研究科博士後期課程修了，博士（工学）。1992 年大阪大学工学研究科助手，2008 年より現職。2021～2023 年日本金属学会会長。2023 年より日本学術会議 第三部会員。