

機械技術

Mechanical Engineering



特集 金属3Dプリンタが拓くモノづくり—付加製造の先進技術

特別誌上展—メカトロテックジャパン2019

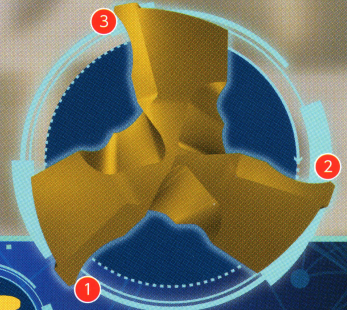
インダストリー 4.0 時代のスマートツール誕生!

LOGIQDRILL
ISCAR CHESS LINES

3枚刃、ヘッド交換式穴あけ工具 **Drilling Master**



加工径: $\Phi 12-25.9\text{mm}$
加工深さ: $3 \times D / 5 \times D$



LOGIQ 3CHAM
THREE FLUTE CHAMDRILL

[ロジック3カム]

3枚刃、最新穴あけ加工用工具、
高生産性を実現



鋼&鋳鉄加工
対応



セルフセンタリング
形状ヘッド



高生産性



高経済性

MACHINING IN INDUSTRY 4.0
INTELLIGENTLY

<インダストリー4.0>賢い機械加工

Member IMC Group
iscar

イカルジャパン株式会社
〒560-0082 大阪府豊中市新千里東町1-5-3 千里朝日阪急ビル20F
Tel.06-6835-5471(代) www.iscar.co.jp



金属3Dプリンタが拓くモノづくり—付加製造の先進技術

解説

金属3Dプリンタによる特異組織形成と機能発現

大阪大学 大学院工学研究科 マテリアル生産科学専攻 中野 貴由 (Takayoshi Nakano)

〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1 TEL 06-6879-7505

1. はじめに

金属3Dプリンタは、一定の自由度をもって三次元の複雑形状を高速で造形可能な手法である。全世界的にも注目を浴びており、実際に高精度な外形状を持つ金属材料製部材の開発が急速に進んでいる^{1),2)}。一方で、金属材料の高機能化には、外形状のみならず結晶粒や結晶集合組織に代表される組織・原子配列制御が重要となる。我々のグループでは、金属3Dプリンタにおける、熱源、出力、走査速度、ピッチ幅やスキャンストラテジー (Scan Strategy) などのプロセスパラメータの制御が、溶融池内での熱分布や固/液界面の移動挙動と既存凝固部からのエピタキシャル成長に影響を与えることで、特異組織・構造形成と高機能化発現へとつながることを種々の合金系で見出している³⁾⁻⁷⁾。

本稿では、工業材料用途から生体材料用途まで広範囲で活用される、チタン (Ti) 合金、ステンレス鋼、ニッケル (Ni) 基超合金、チタンアルミ (TiAl) 系金属間化合物などさまざまな合金種において、金属3Dプリンタにて構築される層状組織をはじめとする特異組織形成に注目し、その形成機構や機能発現について解説する。

2. 金属3Dプリンタで実現される特異組織形成の分類

金属3Dプリンタのうち、粉末床溶融結合法 (PBF: Powder Bed Fusion) や指向性エネルギー堆積法 (DED: Directed Energy Deposition) は、原料の金属粉末や金属ワイヤなどを一旦溶

融させた後に凝固させることから⁸⁾、直接金属溶融法として溶融/凝固の繰り返しによる組織制御を可能とする。そのため、直接金属溶融法での組織制御は、固/液界面の移動速度、移動方向、組成分配、温度勾配、平滑性、さらにはマクロ・ミクロ温度分布や熱流束による溶融池 (Melt Pool) の形状と溶融池そのものの液体流動などの多数の支配因子を考慮しなければならない。

図1には金属3Dプリンタで形成される特異組織形態と主要原理をまとめて示している。大きくは現段階にて(A)から(C)の3つに分類される。(A)は前述の「溶融・凝固」過程と温度場の制御が深く関わっており、結晶粒組織から原子配列のコントロールまでが可能であり、等方性/異方性の制御や造形方向に沿った特異な層状組織形成さえも実現できる。これは溶融池形成の熱源ビーム走査が強く影響を与える特異組織制御といえる。

(A) 溶融・凝固制御

- 単結晶・方向制御結晶・多結晶の構築
⇒等方性/異方性機能の発現
(原理: 固/液界面の平滑性 (組成的過冷など))
- 結晶方位 (集合組織) 制御
⇒等方性/異方性機能の発現
(原理: 凝固時の固/液界面方位制御)
- 積層方向に平行な特異層状組織の構築
⇒界面ひずみの連続性を用いた高強度化
(原理: 溶融池形状制御 (粘性など))

(B) 積層による繰り返し熱処理 (もしくは急冷)

- 積層方向に垂直な層状組織、クラッドなどの繰り返し組織 (構造) の構築
⇒特定方向への高延性化 (原理: 積層による繰り返し熱処理)

(C) 部位に応じた機能性を発揮する特異組織構築

- 部位依存型組織 (結晶方位や多結晶・単結晶) の構築
⇒部位依存的な機能制御 (原理: 部位毎の造形パラメータの制御・スキャンストラテジーの制御)

図1 金属3Dプリンタ (直接金属溶融法) で形成される特異組織構造と機能発現の分類

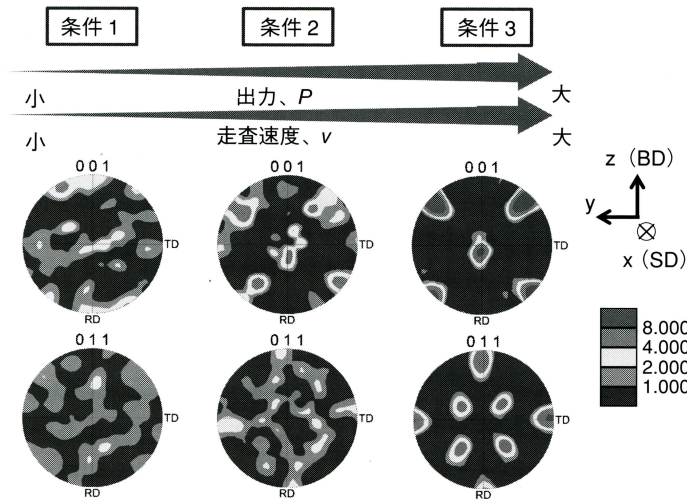


図2 生体用β型Ti合金における集合組織形成の造形パラメータ依存性。エネルギー密度を一定とし、走査速度、出力を変化している

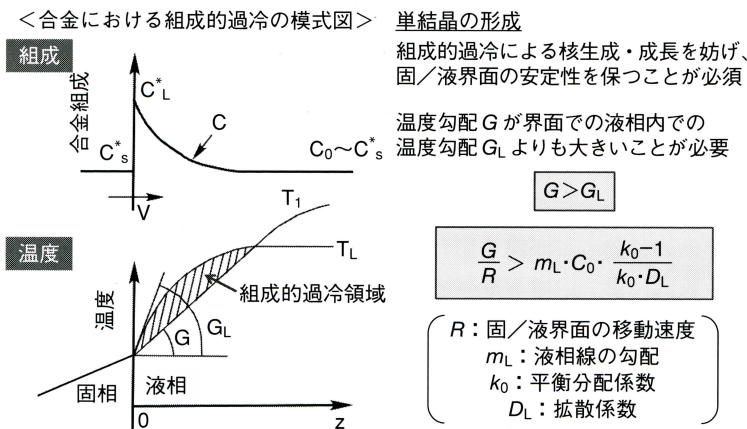


図3 平衡状態での固/液界面での濃度ゆらぎ（組成的過冷による）の模式図。固/液界面の平滑性は温度勾配を固/液界面の移動速度よりも相対的に高くすることで保持可能である

一方で、(B)は造形部の上面から繰り返し積層造形される際に熱履歴を受けることによる特異組織形成であり、積層を反映した層状組織が認められ、とりわけ積層方向に垂直面の積み上げで組織形成することが可能となる。こうした組織は、固相内での相変態があり、熱処理の影響を受けやすい場合に多く認められる。これは積層プロセス特有の形態といえ、造形物の上部から繰り返し熱流束が導入されることによるものである。(C)は(A)において、組織や原子配列がスキャンストラテジーや造形プロセス条件の影響を受けやすいことを利用したものであり、選択的に部位依存的な組織を作り分けられる金属3Dプリンタ特有の極

めて人為的な特異組織構築といえる。

以上の3大分類ごとに、特異組織形成さらには機能発現について順に例をあげて解説する。

3. 溶融・凝固制御による特異組織形成と機能発現

(1) 単結晶・方向制御結晶・多結晶の構築

金属3Dプリンタは、溶融凝固時の温度場/濃度場分布とともに形成される固/液界面の移動により、結晶の析出状態が制御され、多結晶から単結晶に至るまでの原子配列制御を可能とする。図2は、投入エネルギー密度を一定にし、走査速度と出力（この場合、レーザー出力）を変化させた場合の極点図を示す。走査速度と出力が大きくなるほど結晶集合組織が顕在化し、走査方向に〈100〉、造形方向に〈110〉が優先的に配列するようになる³⁾。これは溶融池における固相線・液相線温度に到達した際の溶融池形状と深く関わっている。こうした単結晶様の組織ができる場合には、溶融池内の熱流方向に垂直断面内での固/液界面移動が結晶方位を決定する。一般に、溶融池のテールが長くなる場合に安定な集合組織形成が見込まれる。単

結晶の形成には、必要条件として、固/液界面の平滑性が不可欠となり、そのためには、図3で示す組成的過冷が発生しないように、固/液界面の移動速度に対して相対的に温度勾配を大きくする必要がある。一方、この逆の制御により、多結晶組織の形成を導くことができる。こうした、結晶の安定/不安定成長は、凝固マップを作成することで予測可能となる。

(2) 結晶方位（集合組織）の構築

金属3Dプリンタでは、3項(1)で示した単結晶様の組織制御が可能であるが、スキャンストラテジーを人為的に変更することで、結晶方位そのものを制御することができる^{3)~5)}。このことは溶

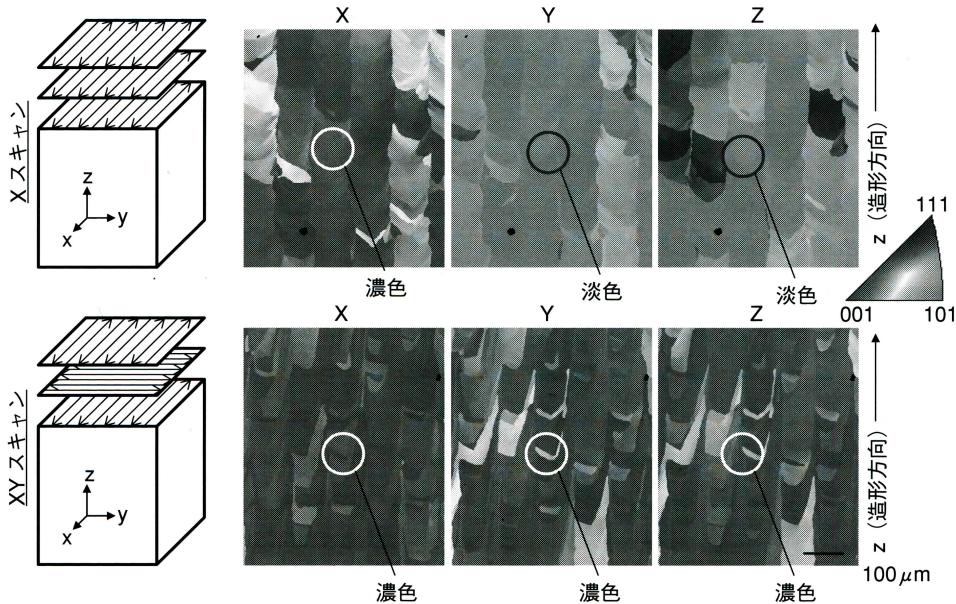


図4 生体用 β 型Ti合金の低弾性化のためのスキャンストラテジーの制御による異方性原子配列制御。Xスキャン(一方向に繰り返し走査)とXYスキャン(積層毎に垂直に走査)。濃色は高弾性率方位、淡色は低弾性率方位で、生体用ボンプレートに適している方向。文献3)から改変引用

融池形成方向への優先結晶方位が走査方向に依存して競合することに起因する。最終的には系全体の結晶間の界面エネルギーが低く、結晶成長速度が速い結晶方位にて律速される。こうした傾向は単相合金などの析出物形成サイトの減少で顕著になり、例えば、図4に示すように、 β 型Ti合金では、スキャンストラテジー(XスキャンとXYスキャン)に依存して、全く異なる優先方位を持つ単結晶様特異組織が形成される³⁾。濃色の方位(XスキャンのX面、XYスキャンのX、Y、Z面)は、弾性率の低い方位であり、生体骨に類似の弾性率を完全単結晶では示す⁹⁾。結果として、部位に依存した高い弾性異方性を示す生体骨組織においては、低弾性率の方向を荷重軸方向に揃えることで、応力遮蔽による骨密度や骨質の劣化を抑制することが可能となる^{10),11)}。さらに、安定な結晶方位基板上で積層を繰り返す場合には、エピタキシャル成長により優先結晶方位が維持されるようになり、本来Xスキャン方位が溶融池形成時に優先方位となるにもかかわらず、XYスキャンにおいても積層直後にはXYスキャンで初めて安定化する方位が造形直後から優先成長するようになる。

スキャンストラテジーの選択は結晶方位を制御可能であるため、5項に示すような部位に応じて

異なる機能を与えることができる。

(3) 積層方向に平行な特異層状組織の構築

方向制御結晶ならびに単結晶様組織での原子配列を決定づける最重要因子は、溶融池断面形状とその固/液界面の動きであることは、ここまでも度々述べてきた。溶融池はマクロな温度場の分布に加え金属材料そのものの融体・固体物性とも深く関わることから、材料毎にその形状は異なる。さらにプロセスパラメータによっても、溶融池先端の曲率は大きく異なることから、造形時の固/液界面の移動方向は1つ溶融池内で制御可能である。

図5には、Ni基超合金における一般的に優先結晶方位として走査方向に形成されるmajor部分と結晶方位のローテーションしたminor部分との組み合わせで形成される特異層状組織(a)と単結晶様の組織(b)(この場合、major部位と同様の結晶方位)を示す。このような図5(a)に見られる特異組織を、結晶学的に異なる方位関係を持つ層状組織という意味から「crystallographic lamellar microstructure (CLM)」と名付けている^{4),6),10)}。この場合の結晶方位関係は、単結晶様母相(major部分)では積層方向に $\langle 110 \rangle$ 、走査方向に $\langle 100 \rangle$ 配向し、minorな層板部分では積層方向に $\langle 100 \rangle$ 、走査方向に $\langle 110 \rangle$ が優先配向す

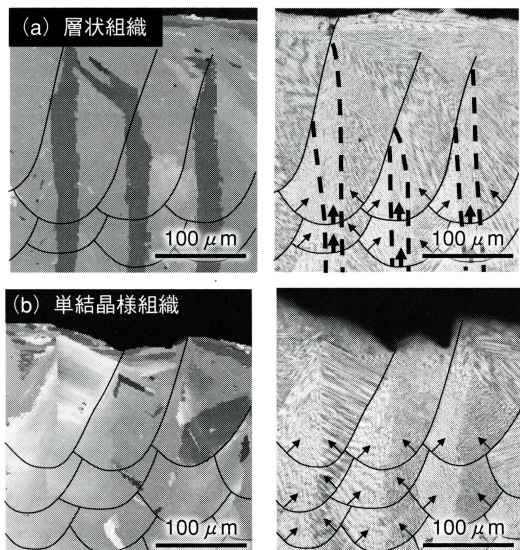


図5 Ni基超合金における造形方向に平行な特異層状組織の形成 (a) と単結晶組織の構築 (b)

る。いずれも界面は幾何学的関係から、造形方向を含む $\{110\}$ 面を選択し、特異層状組織は造形方向に沿って平行に形成される。この際、母相(major 部位)の結晶方位は、立方晶系の結晶系を持つ金属種に特有の集合組織形成と一致する。このことは、溶融池先端部の曲率が大きく、固/液界面の先端部が造形方向に垂直に平坦化することで、低界面エネルギー面である $\{100\}$ が溶融池底

部より優先成長するためである^{4),6),10)}。こうした特異層状組織の形成は、一般にコンダクション型の溶融池に多く見られ、キーホール型の溶融池が形成される場合には、抑制される傾向がある。加えて、こうした特異層状組織は界面を通じてのひずみの伝播にも強く影響を与えることから、図6に示すように高強度化に強く寄与し、界面を通じての応力伝達係数が1から低下するほど、界面の強化に寄与する程度は大きくなる。

図7には、特異層状組織を形成する造形条件での SUS 316 L 造形体の特異組織と NaCl 水溶液環境中での分極曲線を示す。特異層状組織は、高強度、高延性を示すことに加え、多くの層界面を有するにもかかわらず、高耐腐食性を示す⁶⁾。このことは MnS 系を含む微細析出物の形成が、レーザ式金属 3D プリントによる造形では、参照材に比べて抑制されること由来し、その結果として、ピittingが生じ難くなったものと理解される⁶⁾。

4. 積層方向に垂直に配列する特異組織 (構造) の構築

金属 3D プリントの最大の特徴は、造形方向に沿って金属材料の積層と熱源の投入を繰り返し行うことにあり、その都度、積層面に繰り返し熱履歴が生じる。こうしたプロセスを利用することに

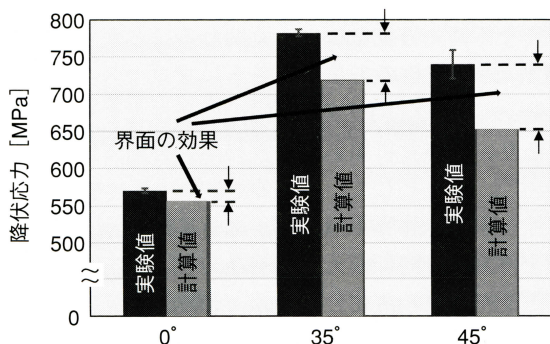
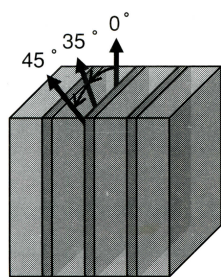


図6 Ni基超合金における荷重軸に依存した降伏応力変化と界面による高強度化

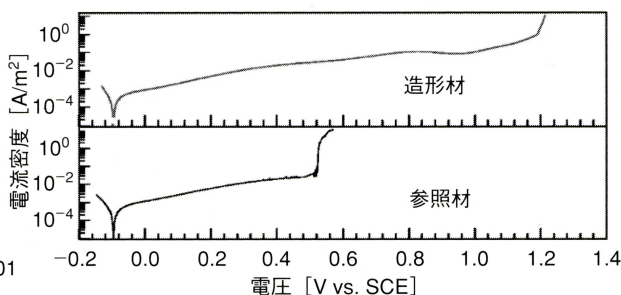
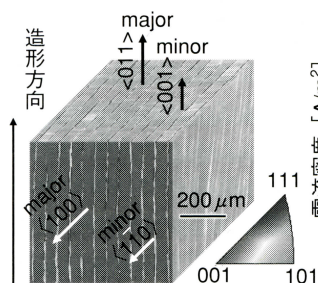


図7 金属 3D プリントにより造形された SUS 316 L ステンレス鋼における極めて良好な耐食性。文献6)より改変引用

より、積層方向に垂直な特異構造や特異組織の形成が可能となる^{7),12),13)}。

図8には、Ti-6Al-4V合金に対して、電子ビーム方式の金属3Dプリンタにて投入エネルギー密度を条件A→B→Cの順で低下させた場合の造形体層断面のSEM像とそれに対応する応力-ひずみ曲線を示す¹²⁾。投入エネルギー量を適切に低下することで、溶融凝固部とネッキング粉末部がクラッド状に交互に積層したヘテロな特異構造が形成されるようになる。条件B、Cでは低応力で降伏現象を示し、その後のプラトー領域が広がることから、衝撃吸収性に優れた特異構造を持つクラッド材料が形成可能であることを示唆している¹²⁾。

こうした積層の繰り返しによる熱履歴の付与は、ヘテロな構造体の造形にとどまることなく、融点以下での極めて複雑な相変態挙動¹⁴⁾を持つTiAl系金属間化合物でも見いだされた^{7),13)}。図9には一定の限定された造形条件下でみられる造形方向に垂直に形成された特異層状組織を示す。この場合、Ti-rich TiAl合金特有の高強度・高延性を兼ね備えるDuplex組織（層状組織粒とTiAl (γ) 単相粒が混在した組織)¹⁴⁾と γ バンドが造形方向に交互に積層された組織レベルでのヘテロな特異層状組織が形成される⁷⁾。こうした2種類の組織の交互積層は、約90 μ mの一定周期で発現するが、これは造形時の粉末の積層厚みと良い一致を示す。TiAl金属間化合物は相変態の影響を受けることで敏感に組織が変化することが知られるが¹⁴⁾、特異層状組織は最終的には繰り返しの熱履歴により、Duplex組織と γ バンドから形成され、その積層方向は造形方向に垂直であり、3項(3)で示した特異層状組織が造形方向に平行に形成されるメカニズムとは本質的に異なる。

こうした特異層状組織を示すTiAl化合物は、図10に示すように、高い降伏応力に加えて、 γ バンドと引張軸が45°の際に2%以上もの高い伸びを示す。このことは γ バンド内のせん断変形が優先的に進行することを示しており、特異層状組織は方位に応じた強度・延性を兼ね備えた優れた材料となる。こうした特異組織の疲労特性やクリープ特性も層状組織に対する強い方位依存性を示

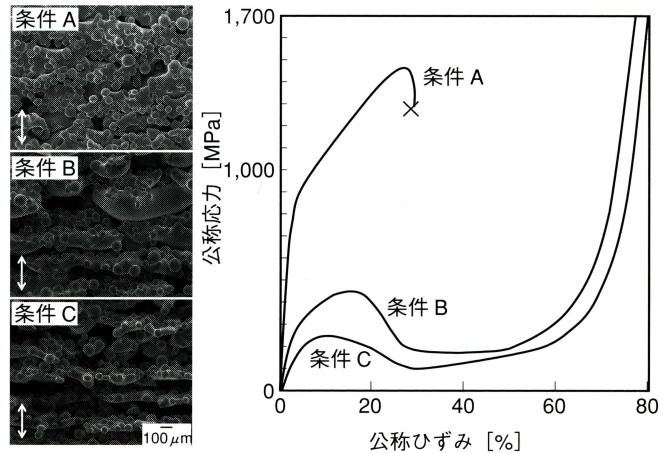


図8 Ti-6Al-4V合金におけるクラッド層状材料の創製。高エネルギー吸収性を示す。条件A、B、Cの順に投入エネルギー密度を小さくしている。白矢印は積層方向を示す。文献12)より改変引用

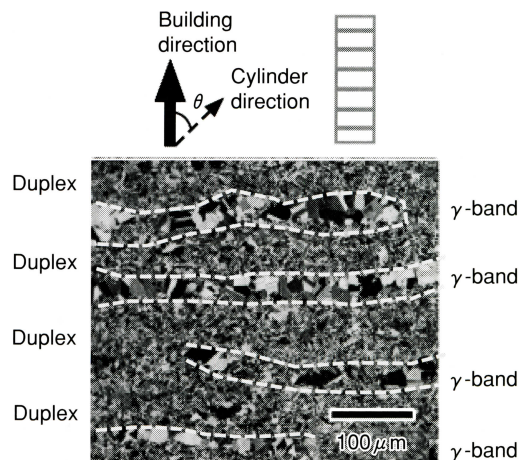


図9 TiAl金属間化合物における γ バンドを含む特異層状組織の形成。層状組織は造形方向に垂直に形成される。文献7)より改変引用

し、金属3Dプリンタでこそ創製可能な組織と機能発現といえる¹³⁾。

5. 部位依存型特異組織の構築

金属3Dプリンタの特徴の1つとして、選択的に部位に応じた内部構造や組織・原子配列を形成することによる特異組織の形成がある¹⁰⁾。図11には骨折固定部材の設計図と実際の造形体、ならびにFE-SEM-EBSD法により解析したIPFマップを示す。図4で示したように、スキャンストラテジーを制御することで、骨軸に沿って低弾性率の<100> (濃色)を造形し、高弾性率の<110> (淡

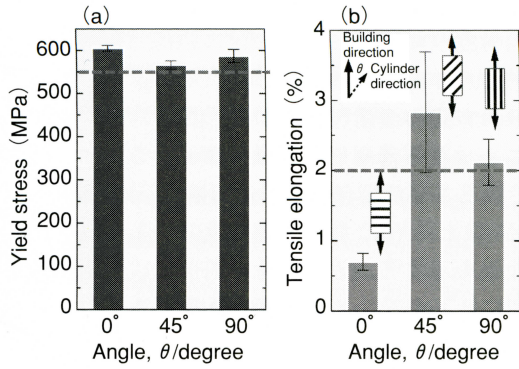
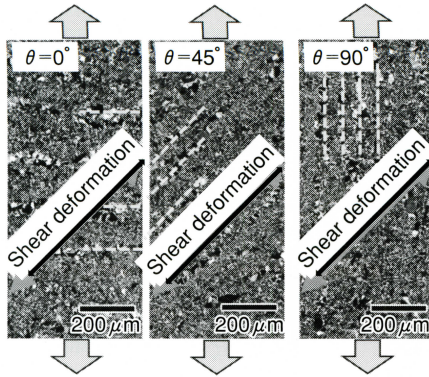


図 10 TiAl 金属間化合物における特異 γ バンド形成による高強度の発揮と 45° 方位での室温延性の改善。
文献 7) より改変引用

色) を形成することができるため、骨折部分では濃色の低弾性率方位を骨軸方向に制御し、スクリュー固定する場所では淡色の高弾性率方位とし、応力集中を分散するための多くの界面を導入している。結果として合金組成を変えることなく、原子配列を制御することにより、場所によって発揮する機能が異なる、「あたかも骨として振舞う」かのような医療デバイスが獲得できる。

加えて、図 12 には、Ni 基超合金製タービンブレードを造形した例を示すが、この場合には、部位に応じて造形パラメータを変えることで溶融池形状を制御し、翼部とつかみ部で異なる組織を同時に造形することができる。具体的には翼部では羽の長手方向に沿って $\langle 100 \rangle$ の柱状組織とし高温クリープ特性を向上すると同時に、つかみ部は冷

却するため、高靱性を発揮する等軸結晶組織としている。

以上のように、金属 3D プリントは選択的な溶融/凝固により部位に応じて異なる機能性を発揮するための組織・原子配列設計を行うことが可能であり、結果としてこれまで不可能であった、部位に依存した機能性を発揮する製品開発を可能とする。これまで部材や製品の設計が形状設計により行われていたのに加えて、金属 3D プリントの活用は、部位に応じた最適機能を発揮するような特異組織の制御を可能とする。

6. おわりに

本稿では、直接溶融凝固タイプの金属 3D プリントを用いることで可能となる特異組織形成と機能

発現について、現状において筆者の持つ知見についてまとめた。こうした特異組織制御は、結晶成長や繰り返し熱処理、部分溶融凝固などにより初めて実現できる。誌面の都合上言及しなかったが、こうした特異組織の形成は、あらかじめシミュレーションや逆問題解析によってプロセスパラメータなどを予測することが可能になりつつあり、試行錯誤に

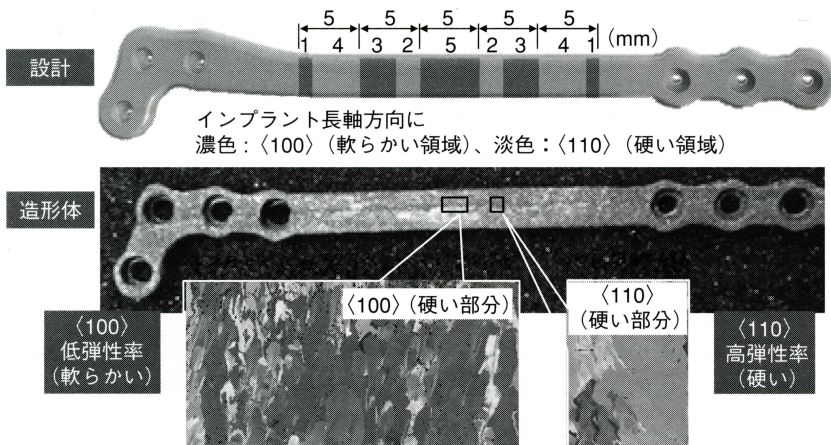


図 11 生体用 β 型 Ti 合金における部位に応じたスキャンストラテジーの人為的制御による異なる弾性率の部依存的付与。低弾性率部分 (濃色) と高弾性率部分 (淡色) の異なる特性を実現

頼らない材料設計が実現されつつある。金属 3D プリントはまさに IoT (Internet of Things) の申し子ともいふべき典型的な最先端システムであり、特異組織制御からその機能発現までをカスタマイズした形で提供できる最先端のモノづくりプロセスの 1 つとして、これまでにない新しい手法、さらには新しいモノづくり分野を開拓する手法として強く期待される¹⁵⁾。

謝 辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究 (S) (JP 25220912, JP 18 H 052540)、基盤研究 (A) (JP 18 H 03844)、ならびに内閣府 SIP (戦略的イノベーション創造プログラム) / 革新的設計生産技術 (佐々木直哉 PD) (管理法人: NEDO)、SIP / 統合型材料開発システムによるマテリアル革命 (三島良直 PD) (管理法人: JST) による研究費支援により実施された。

参 考 文 献

- 1) 中野貴由: 金属 3D プリントを用いた形状・材質制御による医療活用, 機械技術, Vol. 65 [8], (2017), p. 30-p. 35.
- 2) 中野貴由ら: チタンならびにチタン合金の Additive Manufacturing プロセス, まてりあ, Vol. 58 [4], (2019) p. 181-p. 187.
- 3) T Ishimoto, et al.: Crystallographic texture control of beta-type Ti-15Mo-5Zr-3Al alloy by selective laser melting for the development of novel implants with a biocompatible low Young's modulus, Scripta Mater, Vol. 132, (2017), p. 34-p. 38.
- 4) SH Sun, et al.: Effect of scanning strategy on texture formation in Ni-25 at. %Mo alloys fabricated by selective laser melting, Mater Design, Vol. 140, (2018), p. 307-p. 316.
- 5) K Hagihara, et al.: Successful additive manufacturing of MoSi₂ including crystallographic texture and shape control, J Alloys Compd, Vol. 696, (2017), p. 67-p. 72.
- 6) SH Sun, et al.: Excellent mechanical and corrosion properties of austenitic stainless steel with a unique crystallographic lamellar microstructure via selective laser melting, Scripta Mater, Vol. 159, (2019), p. 89-p. 93.
- 7) M Todai, et al.: Effect of building direction on the microstructure and tensile properties of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy additively manufactured by electron beam melting, Addit Manuf, 13 C, (2017), p. 61-p. 70.
- 8) 中野貴由: 連載講座 (チタンの基礎講座 6) チタンの Additive Manufacturing (付加製造), 軽金属, Vol. 67 [9], (2017), p. 470-p. 480.
- 9) SH Lee, et al.: Biocompatible low Young's modulus

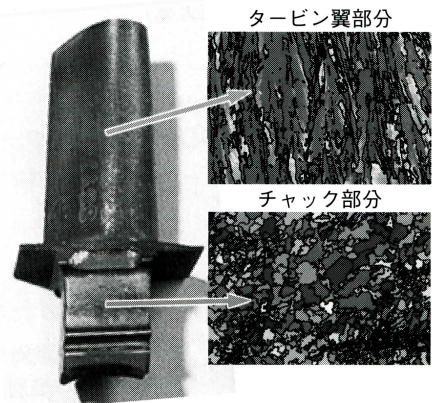


図 12 Ni 基超合金による高機能性組織制御タービンブレードの創製。部位に応じたパラメータ設計の制御。翼部分は<100>に沿った柱状結晶組織 (高温での高クリープ特性)、チャック部分は靱性の高い多結晶組織

achieved by strong crystallographic elastic anisotropy in Ti-15Mo-5Zr-3Al alloy single crystal, J Mech Behav Biomed Mater, Vol. 14, (2012), p. 48-p. 54.

- 10) 中野貴由ら: 材料学的視点からの骨基質配向性構造の解明ならびに骨配向化促進に向けた骨代替材料の開発, 応用物理, Vol. 10, (2018), p. 759-p. 763.
- 11) 中野貴由ら: 金属 3D プリンティングの先端的状況〜骨・骨関節分野への応用へ向けて, 臨床整形外科, Vol. 53 [2], (2018), p. 137-p. 144.
- 12) N Ikee, et al.: Solid/Powder clad Ti-6Al-4V alloy with low Young's modulus and high toughness fabricated by electron beam melting, Mater Trans, Vol. 56 [5], (2015), p. 755-p. 758.
- 13) K Cho, et al.: Influence of unique layered microstructure on fatigue properties of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloys fabricated by electron beam melting, Intermetallics, Vol. 95, (2018), p. 1-p. 10.
- 14) YW Kim: Acta Metall Mater, Micro structural evolution and mechanical properties of a forged gamma Titanium aluminide alloys, Vol. 40, (1992), p. 1121-p. 1134.
- 15) 中野貴由: 3D プリンティング, テクノロジーロードマップ 2019-2028 (全産業編), 日経 BP 社, (2018), p. 386-p. 389.