

金属 AM による異方性機能設計：形状と結晶配向の重畳

Superimpositional Design of Macroscopic Shapes and Crystallographic Textures via Metal Additive Manufacturing for Anisotropy in Mechanical Functions

石本 卓也^{*,**}・中野 貴由^{**}

Takuya ISHIMOTO and Takayoshi NAKANO

(Received 24 March 2025, Accepted 4 April 2025)

We have succeeded in producing a $\langle 111 \rangle // \text{BD}$ (build direction) oriented single-crystal-like microstructure in an alloy with cubic structure (Ti-15Mo-5Zr-3Al) via laser powder bed fusion (LPBF), and have completed a series of three single-crystal-like microstructures with $\langle 001 \rangle$, $\langle 011 \rangle$, and $\langle 111 \rangle // \text{BD}$ orientation in a single material. The $\langle 001 \rangle$ and $\langle 111 \rangle$ orientations exhibit the lowest and highest Young's modulus, respectively, demonstrating that the anisotropy of the mechanical properties of the product can be controlled over a wide range. By superimposing the intrinsic material anisotropy (crystallographic orientation) and shape-based anisotropy, we were able to obtain products exhibiting high Young's modulus anisotropy in a single LPBF process, which cannot be expressed by shape and microstructure alone. This achievement is expected to lead to a new component design guideline that combines conventional shape optimization techniques commonly used in computer-aided design with texture design for each internal part, which can be modified by scanning strategies. This approach allows for tailor-made mechanical performance through optimized design strategies.

Key Words: Laser Powder Bed Fusion, Scanning Strategy, Crystallographic Texture, Anisotropy, $\langle 111 \rangle$ Orientation

1. 緒言

AM は、複雑な 3 次元形状で自由度の高い製品を生み出す技術として発展し、世界中で学術的研究、そして社会実装に向けた取り組みが推進されている。すでに、航空宇宙、自動車、医療、エレクトロニクス、建築など、幅広い業界で採用が進みつつある。AM は、人類の豊かな生活を支えるための最先端モノづくり手段として期待されている¹⁾。

特に、代表的な AM プロセスであるレーザ粉末床溶融結合法 (Laser Powder Bed Fusion: LPBF) は、微細な原料粉末と高集束レーザにより、複雑な形状の製品を高い形状精度で製造することができる。

LPBF では、集束ビームによって形成される微小な溶融池を溶融・凝固単位として造形物が製造される。近年、我々の研究グループにおいて、この溶融池の形状を調整することで、金属造形体内部の結晶集合組織を制御することが可能となっている²⁻⁷⁾。結晶集合組織は、力学機能に異方性を与え、異方性荷重環境における金属部品の力学機能の選択的な強化を可能とする。AM 本来の強みである形状設計 (トポロジー最適化)⁸⁾ に、材質としての集合組織制御を重畳することで、従来よりも柔軟な製品形態の設計と軽量化が実現可能となる。

本稿では、形状と結晶集合組織の組み合わせによる広範な力学機能、特に等方性から高異方性までのヤング率の制御についての最新の研究結果を解説する。とりわけ、これまで未達成であった、造形方向 (Build Direction: BD) に $\langle 111 \rangle$ が優先配向した単結晶様組織形成のためのレーザスキャンストラテジー (Scan Strategy: SS) の設計と配向化メカニズム⁹⁾ に重点を置いて説明する。 $\langle 111 \rangle$ は、多くの立方晶金属においてヤング率が最大を示す結晶方位であり、最小ヤング率を示す $\langle 100 \rangle$ ($\langle 100 \rangle // \text{BD}$ 単結晶様組織は既に実現済) との組み合わせによって大きなヤング率異方性が獲得可能であると期待される。

2. $\langle 111 \rangle // \text{BD}$ 単結晶様組織形成のためのレーザ SS 設計

LPBF では通常、BD (z 方向) は固定されており、レーザ走査は、BD に垂直な xy 面内でのみ可能である。これまでに、 $\pm XY_SS$ および $\pm X_SS$ ($\pm$ はレーザの往復走査を表す) の適用により実現していた $\langle 100 \rangle // \text{BD}$ 、 $\langle 110 \rangle // \text{BD}$ 単結晶様組織の形成挙動¹⁰⁾ に基づき、 $\langle 100 \rangle$ を成長容易軸として持つ立方晶系金属において、BD を回転軸とした際の結晶の回転対称性とレーザ走査方向を一致させることで BD の優先配向方位を制御可能であることを見出した。Fig. 1 (a) - (c) は BD から見た対象とする結晶集合組織の投影と回転

* 富山大学先進アルミニウム国際研究センター (〒 930-8555 富山県富山市五福 3190)

Aluminium Research Center (ARC), University of Toyama (3190 Gofuku, Toyama 930-8555, Japan)

** 大阪大学大学院工学研究科 マテリアル生産科学専攻 (〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

Division of Materials and Manufacturing Science, Graduate School of Engineering, The University of Osaka (2-1 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan)

対称性を示し、Fig. 1 (d)-(f) には対称性を矢印で表示する。BD から見た結晶の回転対称性はそれぞれ、4 回、2 回、3 回である。 $\langle 100 \rangle // BD$ 、 $\langle 110 \rangle // BD$ 単結晶様組織が $\pm XY_SS$ (Fig. 1 (g))、 $\pm X_SS$ (Fig. 1 (h)) で形成されたことをよく説明している。

こうした幾何学的知見に基づけば、 $\langle 111 \rangle // BD$ の単結晶様組織は、Fig. 1 (i) に示す、 120° ごとに回転する片道 3 方向のレーザ走査をともなうスキャンストラテジー (+ 120° Rot_SS と呼ぶ) によって形成されると期待される。ここで、「+」は、レーザ走査が一方向であることを意味し、一般的な往復走査とは区別する。

3. $\langle 111 \rangle // BD$ 単結晶様組織の獲得と単結晶化の支配因子

新たに設計された + 120° Rot_SS により、想定通り $\langle 111 \rangle // BD$ 単結晶様組織が得られた (Fig. 2)。ここでは、材料として、bcc 構造を示す β 型 Ti-15Mo-5Zr-3Al 合金を用いた。x 軸 (1 つのレーザ走査方向に一致) には $\langle 211 \rangle$ が、y 軸 (上記レーザ走査方向の垂直方向) には $\langle 011 \rangle$ が配向している。

$\pm XY_SS$ 、 $\pm X_SS$ では、レーザ走査方向に $\langle 100 \rangle$ が配向するのに対し、+ 120° Rot_SS ではレーザ走査方向と BD とが成す平面内の、レーザ走査方向から -z 方向に 35.3° 傾斜した方向に $\langle 100 \rangle$ が配向した。これは、前者ではレーザの往復走査により結晶方位が自己調整されることで、 $\langle 100 \rangle$ 配向方向のレーザ走査方向からのずれが低減されるのに対し、片道走査の + 120° Rot_SS の適用はその自己調整機構を解除し、反対にこの傾きを利用することによって 35.3° 傾斜した方向で $\langle 100 \rangle$ を安定化させた⁹⁾。実際に、 120° Rot_SS に往復走査を適用した場合 ($\pm 120^\circ$ Rot_SS)、単結晶様組

織は形成されなかった (Fig. 3)。

配向方位は異なるものの、単結晶様組織形成はいずれも、同一の機構で、すなわち、会合界面 (fusion boundary) での

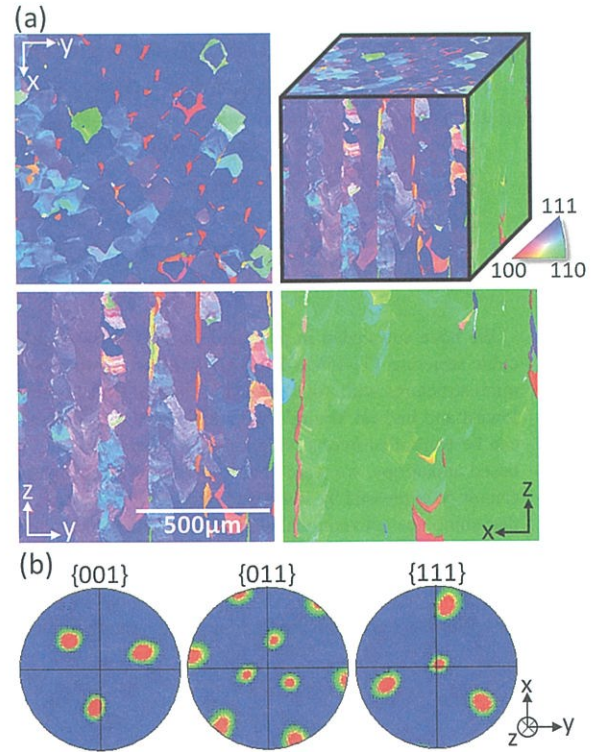


Fig. 2 (a) Inverse pole figure (IPF) maps obtained on three orthogonal planes of the product fabricated with + 120° Rot_SS and (b) the corresponding pole figures for $\{001\}$, $\{011\}$, and $\{111\}$. Quoted from Ref. 9) (published under CC BY 4.0 license).

	$\langle 100 \rangle // BD_SC$	$\langle 110 \rangle // BD_SC$	$\langle 111 \rangle // BD_SC$
Target texture (View from BD)	(a)	(b)	(c)
Crystal symmetry along BD	4-fold rotation	2-fold rotation	3-fold rotation
Laser scanning symmetry	(d)	(e)	(f)
Scan strategy (SS) configuration	(g)	(h)	(i)

Fig. 1 Relationship between crystal orientation-dependent rotational symmetry and scanning strategy. (a)-(c) Projection of the cubic unit cell viewed from BD, (d)-(f) laser path symmetry that matches the crystal symmetry, and (g)-(i) schematic diagram of the combination of laser scanning paths and directions for each layer that represents laser scan strategy. SC: single crystal. Modified from Ref. 9) (published under CC BY 4.0 license).

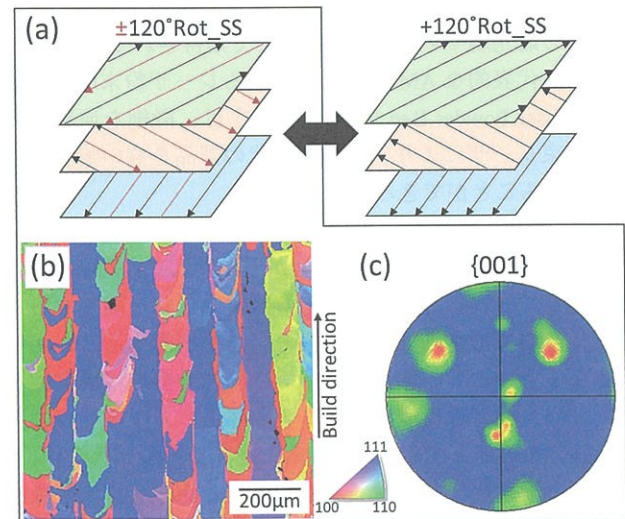


Fig. 3 (a) Cross-sectional image of the xy-plane of the + 120° Rot_SS specimen representing laser scanning paths. The three-way arrows represent the laser scanning direction. (b) Magnified view of the area enclosed by the rectangle in (a) revealing cellular microstructures grown in the controlled directions and encountering interface at the melt pool center. Quoted from Ref. 9) (published under CC BY 4.0 license).

結晶方位差の低減を駆動力として生じていることを明らかにした。会合界面とは、1つの溶融池内に、2つの固液界面が会合する場所を指す。Fig. 4 (a)-(f) に溶融池と会合界面の模式図を示す。例えば、 $\langle 110 \rangle // \text{BD}$ 単結晶においては、溶融池の両側から中央部に向けて固液界面が移動し、溶融池中央部で会合する (Fig. 4 (b), (e))。この時、会合界面での結晶方位差が小さくなるよう、積層にともなって結晶方位が自己調整される。すなわち、溶融池両側での固液界面移動方向 ($\langle 100 \rangle$ 成長方向) が、溶融池横断面内で BD から $\pm 45^\circ$ 傾斜した方向に安定化する。 $\langle 100 \rangle // \text{BD}$ 単結晶の場合は会合界面が2か所形成される (Fig. 4 (a), (d))。 $\langle 111 \rangle // \text{BD}$ 単結晶においては、 $\langle 110 \rangle // \text{BD}$ 単結晶の場合と類似しているが、 $\langle 100 \rangle$ 成長が生じる平面が BD から 35.3° 傾斜している (Fig. 4 (c), (f))。このため、前述の $\langle 100 \rangle$ のレーザ

走査方向からのズレが 35.3° 生じることになる。

実際の造形体での溶融池断面において、会合界面と $\langle 100 \rangle$ 成長方向を示すセルが観察される (Fig. 4 (g)-(i))。BD に投影した IPF マップより、会合界面の両側での結晶方位はほとんど同じであることが分かる。結晶方位が安定すると、エピタキシャル成長によって配向は上層へと引き継がれ、単結晶様組織が形成される。

このような会合界面の配置と、会合界面での結晶方位差の低減は、尾の長い溶融池を形成する (熱伝導率の比較的小さい) 材料における単結晶形成に不可欠な共通のメカニズムであり、Ni 基、Fe 基合金においても同様の単結晶様組織が達成されている。さらには、溶融池形状が大きく異なる材料においても、会合界面の配置は異なるものの、会合界面での結晶方位差の低減を単結晶様組織形成の共通のメ

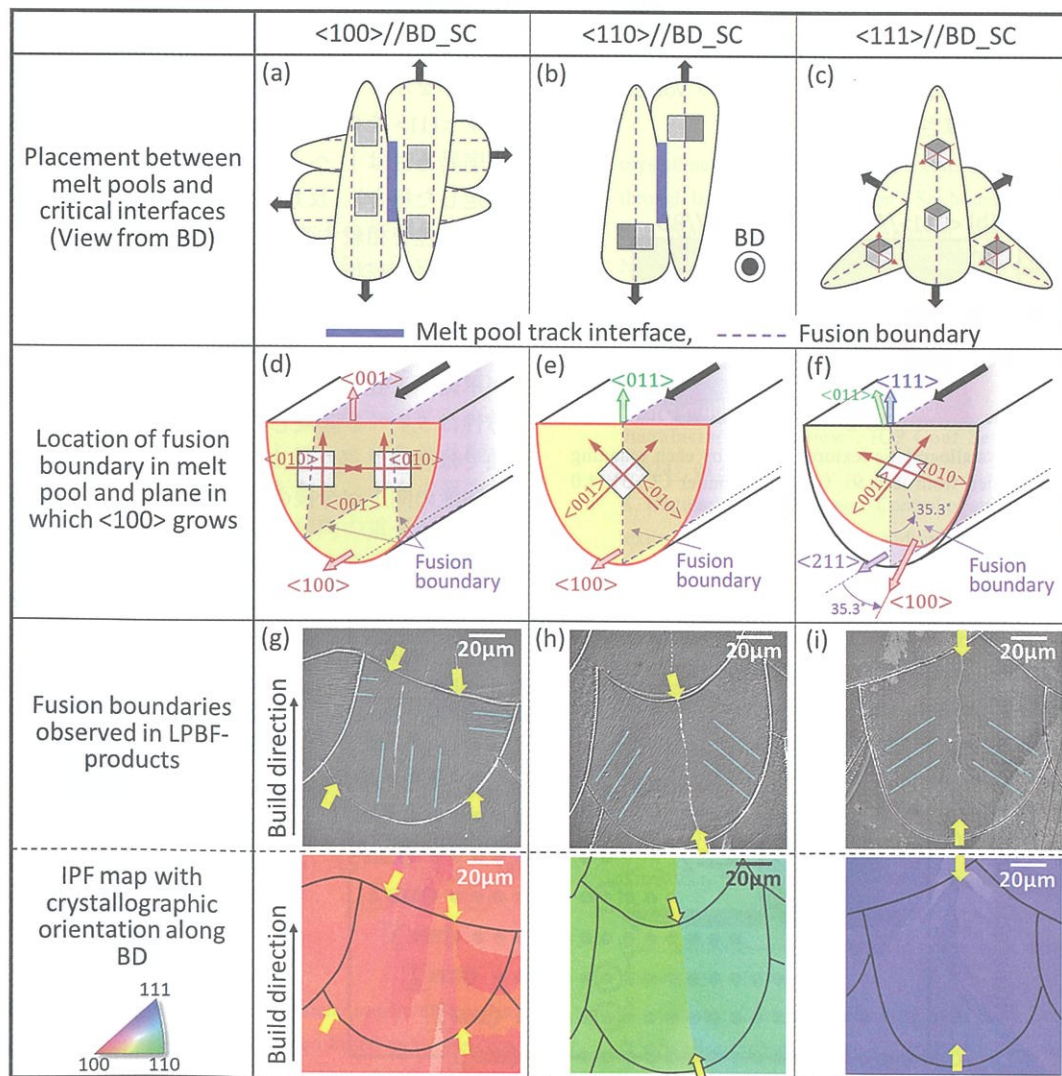


Fig. 4 Representation of fusion boundaries inside a melt pool, which contribute to the stabilization of crystal orientation. (a)-(c) Vertical and horizontal arrangements of melt pools as viewed from the BD. (d)-(f) Schematic of the location of fusion boundaries in a single melt pool. (g)-(i) Photograph of the vertical section of a single melt pool after etching and the corresponding IPF map in which crystal direction along the BD is represented. Sets of facing arrows indicate presence of fusion boundaries. The light blue lines indicate the direction of dendrite elongation. Quoted from Ref. 9) (published under CC BY 4.0 license).

カニズムとすることが明らかになっている⁴⁾。

4. 形状と3種の単結晶様組織の組み合わせによるヤング率の等方性－異方性制御

結果として、Fig. 5 に示す3種の単結晶様組織を得た。ランダム配向した多結晶体のヤング率は約 82 GPa であるのに対し、完全単結晶での各方位のヤング率は、 $E_{001} = 44$ GPa、 $E_{011} = 85$ GPa、 $E_{111} = 112$ GPa であり、単結晶様組織ではそれぞれ、58 GPa、81 GPa、98 GPa であった¹¹⁾。単結晶様組織でのヤング率異方性は完全単結晶と比較して低下してはいるものの、大きな異方性を示した。

等方性または異方性のヤング率発現のため、Fig. 6 (a) に示すように 27 個の立方体小要素 ($3 \times 3 \times 3$ 配置) からなる 3D パズル構造体を設計した¹²⁾。小要素ごとにレーザ照射の有無を設定し、凝固部の配置を可変である。この場合、立方体の各辺に平行な x - y - z 3 軸に関して、ヤング率の制御を行う。構造体のヤング率 E_{total} は、想定した荷重軸に対し、次に示す、応力一定の Reuss 則とひずみ一定の Voigt 則を順に適用することで計算される¹²⁾。

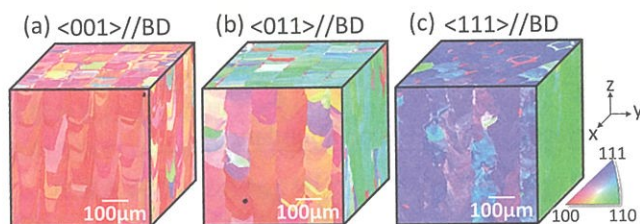


Fig. 5 Summary of crystallographic textures formed by each scanning strategy. Modified from Ref. 9) (published under CC BY 4.0 license).

$$E_{\text{series},j} = \frac{1}{\sum_i (V_i/E_i)}$$

$$E_{\text{total}} = \sum_j E_{\text{series},j} V_{\text{series},j}$$

ここで、 V_i と E_i は立方体要素のヤング率と体積率を、 $E_{\text{series},j}$ 、 $V_{\text{series},j}$ は荷重軸に沿った直列 3 要素の合成ヤング率と体積率を表す。材質等方性を仮定すると、構造体の各方向へのヤング率は凝固部の数と配置によって決まる「柱」構造の数に支配される。すなわち、構造体のヤング率異方性は、その形状によって決定される。Fig. 6 (b) 中に示す 2 つの構造体 (i)、(ii) はそれぞれ、異方性、等方性の形状を示し、 x - y - z 軸でのヤング率も異方性、等方性となる。構造体 (i) のヤング率異方性 (最小値に対する最大値の比と定義) は、柱構造の本数の比として、4 となる。

一方、この形状に前述の結晶配向性に基づくヤング率の異方性を重ね合わせることで、構造体の発現する異方性が拡大する。構造体 (i) において、柱が 1 本の方に最小ヤング率を示す $\langle 100 \rangle$ を、柱が 4 本の方に最大ヤング率を示す $\langle 111 \rangle$ を向けることにより (Fig. 7 の Model F)、ヤング率異方性は 11 へと大きく拡大する (Fig. 6 (c)、単結晶を想定した場合)。反対に、形状による異方性と結晶配向による異方性を相殺することも可能である。

実際に、形状と結晶配向を組み合わせた構造体を作製し、3 軸へのヤング率を解析すると、Fig. 7 のように形状と結晶配向に依存したヤング率異方性が発現した。結晶配向度が単結晶と比較して低いため、例えば Model F において異方性は 5.9 へと低減したが、形状、結晶配向性それぞれ単独では発現し得ない高い異方性が示された。さらなる結晶配向度の向上が今後の課題である。

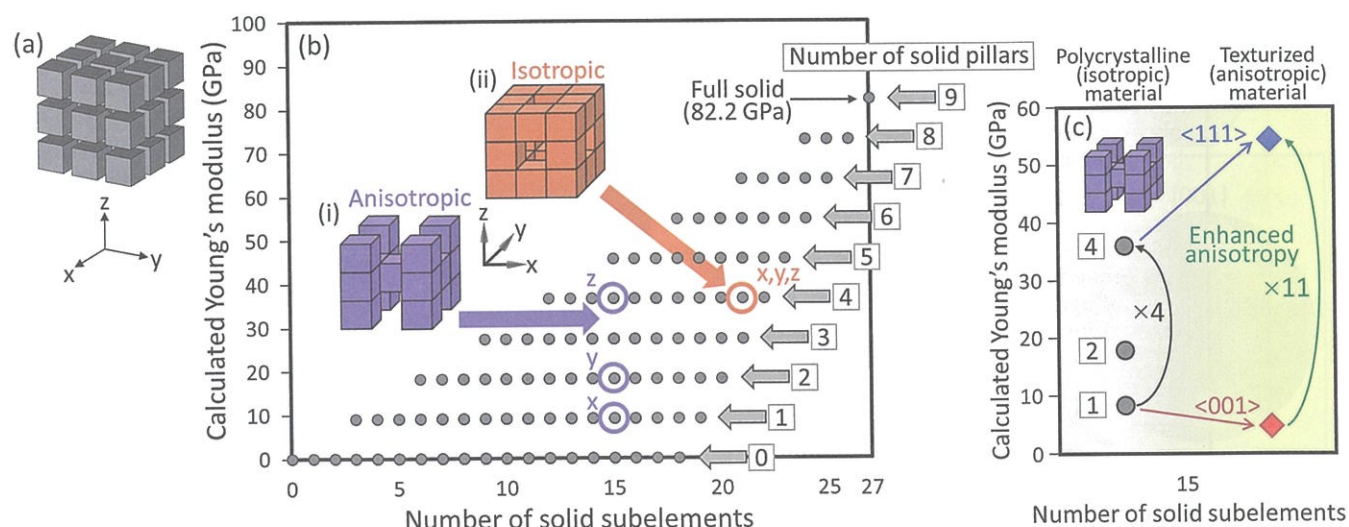


Fig. 6 (a) Framework of the structure consisting of 27 small cubic subelements ($3 \times 3 \times 3$ configuration) for designing isotropic/anisotropic Young's modulus. (b) Possible Young's modulus variations as functions of the number of solid cube subelements when the element is composed of polycrystals. (c) Possible enhancement of Young's modulus anisotropy when crystallographic texture (single crystal) is introduced for the anisotropic structure shown in purple. Quoted from Ref. 9) (published under CC BY 4.0 license).

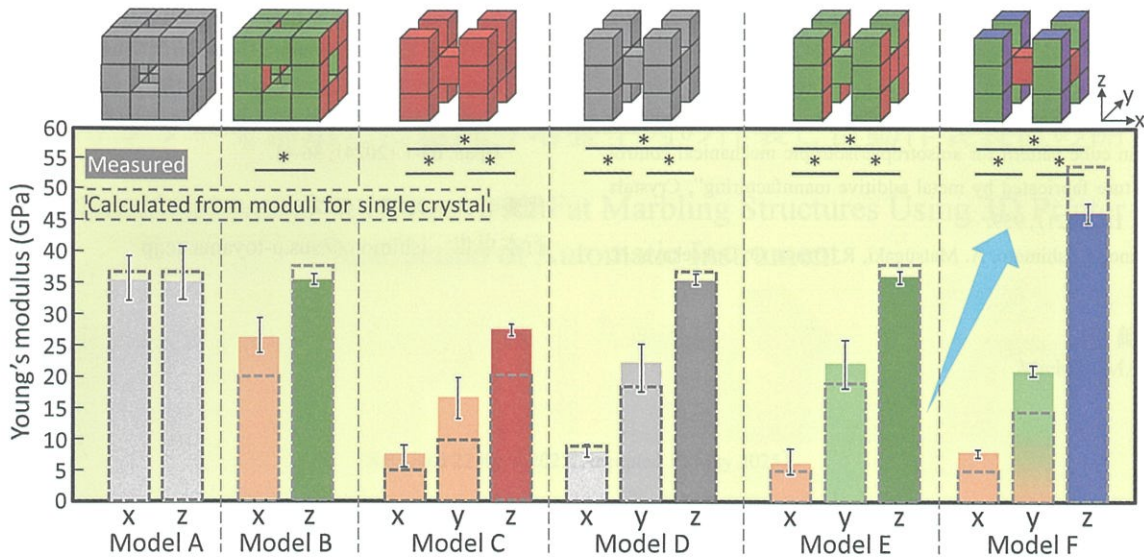


Fig. 7 Variation and anisotropy in the Young's modulus of the 3D puzzle products. Color bars indicate measured values, and dashed lines indicate calculated values using Reuss and Voigt laws and moduli for single crystal. *: $P < 0.05$. Quoted from Ref. 9) (published under CC BY 4.0 license).

5. 結論

結晶対称性に基づき、 120° ごとに回転する片道3方向のレーザ走査をとまうスキャンストラテジー (+ 120° Rot_{SS}) を設計することで、従来達成されていなかった $\langle 111 \rangle //$ BD 単結晶様組織の形成に世界で初めて成功し、 $\langle 100 \rangle$ 、 $\langle 110 \rangle$ 、 $\langle 111 \rangle //$ BD の配向を持つ3種類の単結晶をそろえることができた。 $\langle 100 \rangle$ は最小の、 $\langle 111 \rangle$ は最大のヤング率を示すことから、構造体の形状に対して、これら結晶配向方位を組み合わせることによって大きなヤング率の異方性が達成された。こうした、形状と結晶配向の重畳は、従来のトポロジー（形状）最適化で可能な力学機能設計の範囲を大きく凌駕する新たな製品設計法として期待される。

謝辞

本稿で紹介した研究は、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)¹³⁾ の支援を受けて実施された。

参考文献

- 1) AM Fyucha, 1 (2025).
- 2) T. Ishimoto and T. Nakano: "Control of crystallographic texture via melt pool manipulation in powder bed fusion-based metal additive manufacturing", *Journal of Smart Processing*, **13-4** (2024), 146-152.
- 3) O. Gokcekaya, T. Ishimoto, S. Hibino, J. Yasutomi, T. Narushima and T. Nakano: "Unique crystallographic texture formation in Inconel 718 by laser powder bed fusion and its effect on mechanical anisotropy", *Acta Mater*, **212** (2021), 116876.
- 4) T. Todo, T. Ishimoto, O. Gokcekaya, J. Oh and T. Nakano: "Single crystalline-like crystallographic texture formation of pure tungsten through laser powder bed fusion", *Ser Mater*, **206** (2022), 114252.
- 5) S. H. Sun, K. Hagihara, T. Ishimoto, R. Suganuma, Y. F. Xue and T. Nakano: "Comparison of microstructure, crystallographic texture, and mechanical properties in Ti-15Mo-5Zr-3Al alloys fabricated via electron and laser beam powder bed fusion technologies", *Addit Manuf*, **47** (2021), 102329.
- 6) T. Nakano: "Control of crystallographic textures by metal additive manufacturing-A review", *IOP Conf Ser: Mater Sci Eng*, **1310** (2024), 012013.
- 7) K. Hagihara and T. Nakano: "Control of anisotropic crystallographic texture in powder bed fusion additive manufacturing of metals and ceramics--A review", *JOM*, **74** (2022), 1760-1773.
- 8) O. Ibhaddode, Z. Zhang, J. Sixt, K.M. Nsiempba, J. Orakwe, A. Martinez-Marchese, O. Ero, S. I. Shahabad, A. Bonakdar and E. Toyserkani: "Topology optimization for metal additive manufacturing: current trends, challenges, and future outlook", *Virtual Phys Prototyp*, **18** (2023), e2181192.
- 9) T. Ishimoto, N. Morita, R. Ozasa, A. Matsugaki, O. Gokcekaya, S. Higashino, M. Tane, T. Mayama, K. Cho, H.Y. Yasuda, M. Okugawa, Y. Koizumi, M. Yoshiya, D. Egusa, T. Sasaki, E. Abe, H. Kimizuka, N. Ikeo and T. Nakano: "Superimpositional design of crystallographic textures and macroscopic shapes via metal additive manufacturing—Game-change in component design", *Acta Mater*, **286** (2025), 120709.
- 10) T. Ishimoto, K. Hagihara, K. Hisamoto, S. H. Sun and T. Nakano: "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", *Ser Mater*, **132** (2017), 34-38.
- 11) S. Higashino, D. Miyashita, T. Ishimoto, E. Miyoshi, T. Nakano and M. Tane: "Low Young's modulus in laser powder bed fusion processed Ti-15Mo-5Zr-3Al alloys achieved by the control of

- crystallographic texture combined with the retention of low-stability bcc structure”, *Addit Manuf*, **102** (2025), 104720.
- 12) N. Ikeo, H. Fukuda, A. Matsugaki, T. Inoue, A. Serizawa, T. Matsuzaka, T. Ishimoto, R. Ozasa, O. Gokcekaya and T. Nakano: “3D puzzle in cube pattern for anisotropic/isotropic mechanical control of structure fabricated by metal additive manufacturing”, *Crystals (Basel)* **11** (2021), 959.
- 13) T. Nakano, T. Ishimoto, A. Matsugaki, R. Ozasa, O. Gokcekaya, H.

Y. Yasuda, K. Cho, Y. Koizumi, M. Okugawa, M. Yoshiya, S. Fujii, M. Tane, E. Miyoshi and S. Higashin: “Custom mechano-functional control by formation of specific interfaces via metal 3D printing—Learning from hierarchical anisotropic architecture in bone”, *Materia Japan*, **63-1** (2024), 36-41.

代表者メールアドレス

石本卓也 ishimoto@sus.u-toyama.ac.jp