



MES 2022 エレクトロニクス実装学会 秋季大会

第32回マイクロエレクトロニクス シンポジウム論文集

開催日・講演発表日：2022年9月5日～7日

開催会場：大阪公立大学 中百舌鳥キャンパス

主催：一般社団法人エレクトロニクス実装学会（JIEP）

共催：一般社団法人スマートプロセス学会エレクトロニクス生産科学部会

9月6日（火） 14:20-15:05 D 会場

【6D4】

座長：塚原 法人（パナソニック HD）

6D4-1	プリント配線板技術ロードマップ ～新規事業機会の創生～	1
	宇都宮 久修（インターコネクション・テクノロジーズ(株)）	
6D4-2	おわりに	1
	森 将人（パナソニック HD (株)）	

基調講演

9月6日（火） 15:30-17:30 U- ホール

【基調講演 1】

座長：森 裕幸（日本アイ・ビー・エム）

6U1-1	金属 3D プリンティングによる組織・結晶配向制御と高機能化	7
	中野 貴由（大阪大学）	
6U1-2	SDN (Software Defined Networking) とは何だったか	11
	河野 美也（シスコシステムズ合同会社）	

9月7日（水） 9:30-11:30 U- ホール

【基調講演 2】

座長：森 裕幸（日本アイ・ビー・エム）

7U1-1	エレクトロニクス実装の低温化がもたらす持続的社會への貢献と挑戦	15
	島村 将人（千住金属工業株式会社）	
7U1-2	デザイン・技術・経営の三位一体型事業開発	17
	丸尾 弘志（日経 BP 総合研究所）	

表彰式

9月7日（水） 11:30-11:50 U- ホール

ベストペーパー賞 5名、研究奨励賞 4名

金属 3D プリンティングによる組織・結晶配向制御と高機能化

中野貴由^{*,**}

^{*}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

^{**}大阪大学 異方性カスタム設計・AM 研究開発センター 教授・センター長 (兼任)

〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1

E-mail: nakano@mat.eng.osaka-u.ac.jp

金属 3D プリンティング (AM: Additive Manufacturing) は、最先端のモノづくり技術として世界中で注目されている。本プロセスは、任意の 3 次元形状を造形できることに加え、原子レベルでの材質制御により金属材料の機能性を高度に発揮させることができる。本講演では、金属 3D プリンティング特有の温度場制御や繰り返し積層、さらにはサイバーフィジカルシステムの統合による 3D 造形体の高付加価値化について解説する。とりわけ、金属 3D プリンティング手法の一種である粉末床溶融結合 (PBF: Powder Bed Fusion) 法に注目し、結晶配向を含む組織制御・特異組織形成、超急冷に由来する固溶体形成などの最近のトピックスについて紹介する。

1. 緒言

金属 3D プリンティング (AM) は、任意の 3D-CAD データを金属製の 3 次元構造物として精密に再現可能な技術であり、従来の切削加工などに代表される引き算とは対照的な、足し算により成形プロセスといえる^{1,2)}。当該技術は、ネットシェイプ、もしくはニアネットシェイプでの金属材料成型が可能であることから、医療福祉、航空宇宙、輸送機器、エネルギー・環境など幅広い社会基盤分野での応用が期待されている。

一方で、金属 3D プリンティングは、熱源照射で生じる熱流束の方向性、繰り返し溶融/凝固、熱履歴により、材質制御をも可能とする³⁻¹¹⁾。つまり、金属 3D プリンティングは、形状パラメータのみならず、材料組織や結晶配向などの材質パラメータを

制御可能な手段となる。とりわけ、単結晶化を含む結晶集合組織・結晶配向制御は、金属 3D プリンティングにて注目すべきトピックである。

方向制御化や単結晶化は、ヤング率をはじめとする力学特性の異方化を引き起こし、同一組成であっても、部位・用途に応じた物性値を示す結晶方位を選択的に創製することを可能とする。

粉末床溶融結合法は、原料の金属粉末を床状に敷き詰め、レーザや電子ビームといった熱源として選択的に溶融/凝固を繰り返すことで、複雑形状のバルク体の創製とともに、材質の人為的制御をも可能とする手段である³⁻¹²⁾。

本講演では、電子ビームに加え、レーザによる粉末床溶融結合法 (PBF-LB/M) を中心に、実現される外・内部形状、さらには材質の制御に基づく高

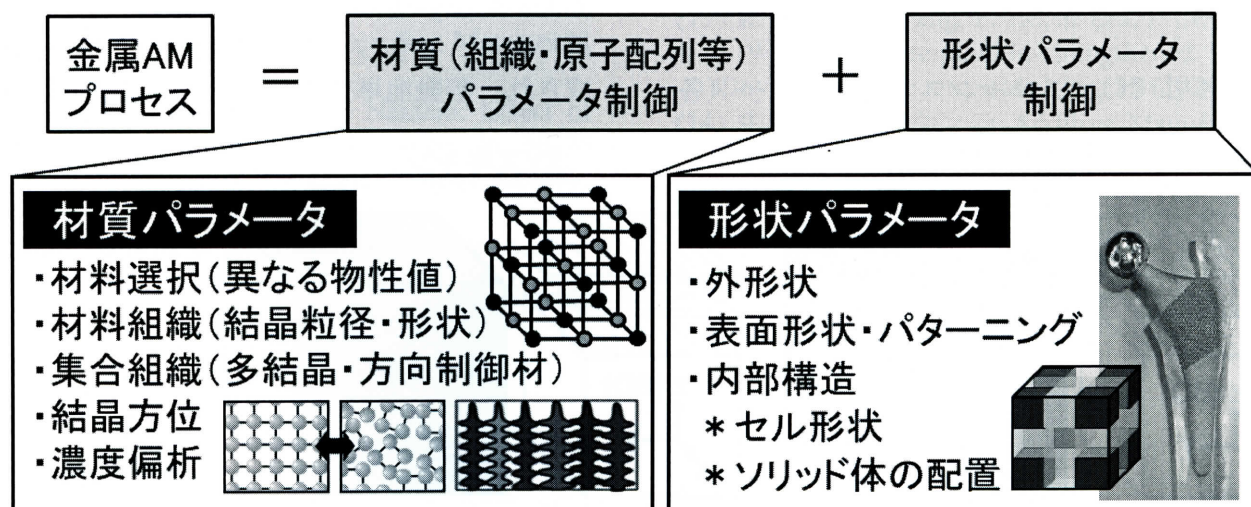


図1 金属 3D プリンティングで実現可能となる材質パラメータと形状パラメータの制御。

機能性材料の創製とその形成機構について、筆者らの研究グループの研究成果を中心に紹介する。

2. 金属 3D プリンティングによる形状・材質パラメータの制御

図 1 は、金属 3D プリンティングプロセスにおいて制御可能な材質パラメータと形状パラメータを示す。形状パラメータは外形状と内部構造に分類され、材質パラメータは、結晶集合組織（多結晶、方向制御材・単結晶）³⁻¹⁰、介在物抑制^{6,9)}、組成分布¹²⁾、析出状態¹³⁾などから構成される。材質パラメータは、造形体の力学特性や機能性に直結するため、材質パラメータをいかに制御するかが金属 3D プリンティングによる材料創製の要となる。

金属造形体の形状・材質パラメータを制御するためのプロセス条件は、一般に単位体積当たりのエネルギー密度 ($E=P/(vtd)$ [J/m^3]) で表現されることが多い。PBF-LB/M 法の場合、 E はレーザ出力、 P [W]、走査速度、 v [m/s]、走査間隔、 d [m]、積層厚さ、 t [m] の関数として記述される。 E は最適な造形体を作製するためのプロセスパラメータ選択の手がかりの一つになる。しかしながら、 E はあくまでも単位体積へ投入されるエネルギー量であり、粉末層への入熱効率や周囲への放熱によるエネルギー損失は考慮されていない。実際の造形体の形状や材質設計は、レーザ吸収率、熱伝導や熱伝達に基づく熱分布の制御が必要となり、特にレーザの走査により形成される溶融池形状、その周囲の温度勾配を含む温度分布の精密制御が重要となる。そのために、温度分布に基づく固/液界面移動の挙動を熱拡散シミュレーションにより予測し、フェーズフィールド法や分子動力学法などのシミュレーション手法を駆使することで材質パラメータの最適設計が可能となる^{14, 15)}。

3. 金属 3D プリンティングによる結晶配向性の制御

PBF-LB/M 法では、スキャンストラテジー（各

層ごとのレーザ走査パターンとその組み合わせ）を人為的に設定することで、結晶方位の制御が可能となる³⁾。このことは、溶融凝固時の結晶の成長方位が、レーザ走査方向に依存して競合することに由来する。優先結晶成長方位は、系全体での結晶間の界面エネルギー低下を維持しつつ、結晶成長速度の速い結晶方位によって律速される。

例えば、 β 型 Ti-15Mo-5Zr-3Al 合金において、X スキャンと XY スキャンを適用することで、スキャンストラテジーに依存して、異なる優先方位をもつ単結晶様組織が形成される（図 2）。つまり、X スキャンでは走査方向に $\langle 100 \rangle$ 方位、 y 、 z 方向には $\langle 011 \rangle$ が優先配向化するが、XY スキャンでは x 、 y 、 z の 3 方向にて $\langle 100 \rangle$ となる。結果として、 $\langle 100 \rangle$ は低弾性率、 $\langle 011 \rangle$ は、 $\langle 100 \rangle$ よりも高い弾性率を示す。さらに最近では本合金において、最大の弾性率を示す $\langle 111 \rangle$ を造形方向に平行に配向することも可能となっている。

4. 金属 3D プリンティングによる特異組織の形成

単結晶様組織や方向制御組織での結晶配向を決定する最も重要な因子は溶融池形状と固/液界面の移動である。溶融池はレーザにより形成される温度場の分布に加え、金属材料そのものの融体・固体物性とも密接に関わることから、材料ごとに溶融池形状は異なる。加えて、プロセスパラメータによっても溶融池底部の曲率は大きく変化することから、溶融凝固による固/液界面の移動方向は単一の溶融池内にて制御可能である。fcc 単相であるにもかかわらず、造形方向に $\langle 110 \rangle$ （主層）と $\langle 100 \rangle$ （副層）がそれぞれ配向した結晶方位の異なる 2 つの層が $100 \mu m$ という微細な周期で配列した特異的なラメラ組織の形成が可能となる¹⁰⁾。こうしたラメラ組織を有する造形体は、同組成の従来材料と比較して、降伏応力を最大で 50 % 上昇させる。このことはラメラ界面が転位の運動・伝達の有効な障壁として働くためである。こうした微細周期構造は自己組織的に形成され、溶融池単位での凝固が結晶集合組織を支配

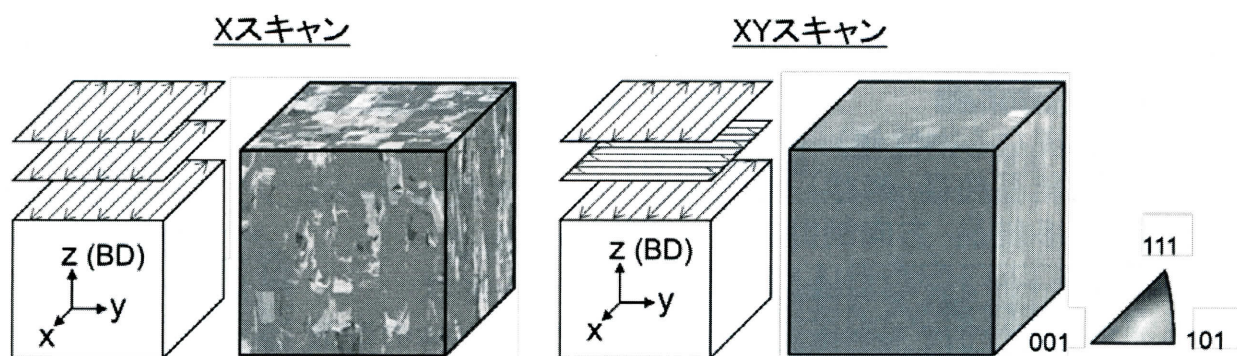


図 2 β 型 Ti-15Mo-5Zr-3Al 合金におけるスキャンストラテジーに依存した結晶配向制御の例。
文献³⁾より改変引用。

する金属 3D プリンティングならではの特異組織であるといえる。

5. おわりに

3D プリンティングは、形状制御の手法として考えられがちであるが、金属 3D プリンティングにおいては、溶融池制御による金属組織・結晶配向制御さらには高機能化が可能となる。金属 3D プリンティングは、サイバー空間でのプロセスパラメータの制御、形状・材質デザインにより、高機能な金属部材を創製するための最先端モノづくり技術としてますます進化するものと期待される。

尚、本研究は、SIP (戦略的イノベーション創造プログラム) / 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)、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究 (S) (JP25220912、JP18H05254)、JST-CREST ナノ力学 (伊藤耕三総括) 「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~」 (Grant Number: JPMJCR2194) の支援を受けて実施された。

参 考 文 献

(1) N. Ikeo, T. Matsumi, T. Ishimoto, R. Ozasa, A. Matsugaki, T. Matsuzaka, O. Gokcekaya, Y. Takigawa and T. Nakano: Fabrication of Ti-alloy powder/solid composite with uniaxial anisotropy by introducing unidirectional honeycomb structure via electron beam powder bed fusion, *Crystals*, **11**-9 (2021), 1074.

(2) 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*, **11**-8 (2021), 959.

(3) 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, *Scr. Mater.*, **132** (2017), 34-38

(4) S.-H. Sun, K. Hagihara and T. Nakano: Effect of scanning strategy on texture formation in Ni-25 at.%Mo alloys fabricated by selective laser melting, *Mater. Des.*, **140**-15 (2017), 307-316.

(5) 石本卓也, 安富淳平, 杉本昌太, 中野貴由: レーザ積層造形法によるβ型 Ti-15Mo-5Zr-3Al 合金の集

合組織形成, *スマートプロセス学会誌*, **7**-6, (2018), 229-232.

(6) S.-H. Sun, T. Ishimoto, K. Hagihara, Y. Tsutsumi, T. Hanawa and T. Nakano: Excellent mechanical and corrosion properties of austenitic stainless steel with a unique crystallographic lamellar microstructure via selective laser melting, **159** (2019), 89-93.

(7) K. Hagihara, T. Ishimoto, M. Suzuki, R. Ozasa, A. Matsugaki, P. Wang and T. Nakano: Factor which governs the feature of texture developed during additive manufacturing; clarified from the study on hexagonal C40-NbSi₂, *Scr. Mater.*, **203** (2021), 114111.

(8) 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.

(9) Y. Tsutsumi, T. Ishimoto, T. Oishi, T. Manaka, P. Chen, M. Ashida, K. Doi, H. Katayama, T. Hanawa and T. Nakano: 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.

(10) 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.

(11) M. Todai, T. Nakano, T. Liu, H. Y. Yasuda, K. Hagihara, K. Cho, M. Ueda and M. Takayama: Effect of building direction on the microstructure and tensile properties of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy additively manufactured by electron beam melting, *Addit. Manuf.*, **13C** (2017), 61-70.

(12) T. Ishimoto, R. Ozasa, K. Nakano, M. Weinmann, C. Schnitter, M. Stenzel, A. Matsugaki, T. Nagase, T. Matsuzaka, M. Todai, H. S. Kim and T. Nakano: Development of TiNbTaZrMo bio-high entropy alloy (BioHEA) super-solid solution by selective laser melting, and its improved mechanical property and biocompatibility, *Scr. Mater.*, **194** (2021), 113658.

(13) K. Zhou, Z. Wang, F. He, S. Liu, J. Li, J.-J. Kai and J. Wang: A precipitation-strengthened high-entropy alloy for additive manufacturing, **35** (2020), 101410.

(14) 中野貴由: チタンの Additive Manufacturing (付加製造), *軽金属*, **67** (2017), 470-480.

(15) 中野貴由, 石本卓也: チタンならびにチタン合金の Additive Manufacturing プロセス, *まてりあ*, **58** (2019), 181-187.