

新製品・新技術紹介

## 機械的性質の異方性／等方性を制御できる 金属 3D パズル構造体の開発

福田 英次\*, 池尾 直子\*\*, 松垣 あいら\*\*\*  
石本 卓也\*\*\*,\*\*\*\*, 中野 貴由\*\*\*

\*弓削商船高等専門学校電子機械工学科 (〒 794-2593 愛媛県越智郡上島町弓削下弓削 1000)

\*\*神戸大学大学院工学研究科 (〒 657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1)

\*\*\*大阪大学大学院工学研究科 (〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

\*\*\*\*富山大学都市デザイン学系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)

Development of a Metal 3D Puzzle Structure Capable of Controlling Anisotropy / Isotropy in Mechanical Properties

FUKUDA Hidetsugu, IKEO Naoko, MATSUGAKI Aira,  
ISHIMOTO Takuya and NAKANO Takayoshi

(Received July 15, 2022)

**Key words** : additive manufacturing, laser powder bed fusion, bone tissue anisotropy, mechanical properties, Co-Cr-Mo

### 1. はじめに

金属積層造形法は、従来の機械加工では作製困難な自由形状を造形可能とし、トポロジー最適化構造やラティス構造といった目的に応じた材料機能を実現することができる<sup>1,2)</sup>。既存製品(人工構造物)のほとんどが、等方的な機能を発揮するように設計されているのに対して、自然界の創成物の多くは、極めて理にかなった異方性階層構造を示し、その構造に基づき異方的な機械的性質を発現する<sup>3,4)</sup>。たとえば、生体骨組織は、コラーゲンと六方晶系の生体アパタイト結晶からなる階層構造を有しており、骨部位に応じた適切な機械的性質とその異方性を兼ね備えている<sup>5,6)</sup>。そのため、機能が低下した生体骨を等方性の材料である人工関節に置換した場合、生体骨との間の機械的性質(弾性率など)の不一致に起因する骨吸収や骨質低下が生じ、人工関節の緩み(ルースニング)を引き起こす可能性がある<sup>7,8)</sup>。したがって、人工関節があたかも生体骨として振る舞うようにするには、生体組織の弾性率やその異方性に一致する骨類似機能材料の設計と開発が不可欠である。

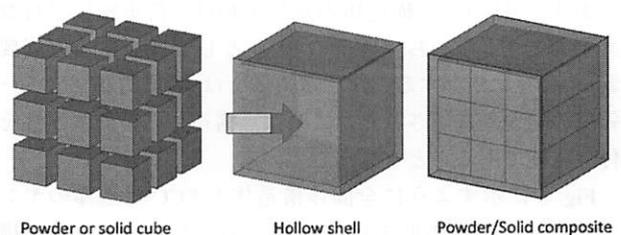
本稿では、金属積層造形法の一つであるレーザー粉末床溶融結合法を駆使して、本来除去すべき金属粉末を造形体の中に封じ込め、未溶融粉末部と溶融凝固部を 3D パズルのように自在に組み合わせることで、異方性／等方性の機械的性質が制御可能な金属 3D パズル構造体の設計・開発に成功したので紹介する。

### 2. 3D パズル構造体の設計および造形

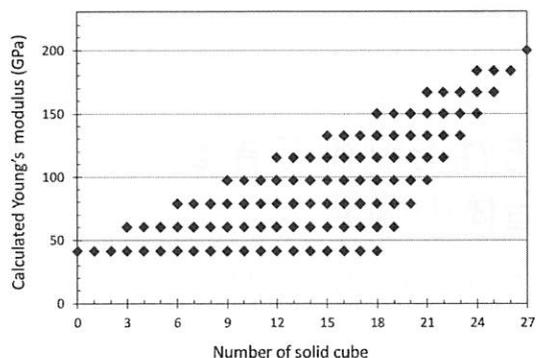
等方性または異方性の機械的性質を付与するために、Fig. 1 に示すように、27 個の立方体要素(3×3×3 配置)を含む内部構造と周囲を覆う外壁構造からなる 3D パズル構

造体を設計した。それぞれの立方体要素を未溶融粉末部あるいは溶融凝固部として配置し、構造体の主軸 3 方向を区別して設計すると、その配置の組み合わせ総数は、1 億通り以上にもなる<sup>9)</sup>。

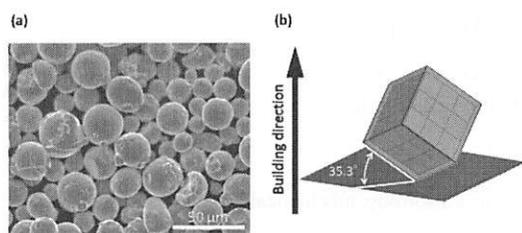
生体用金属材料の一つである Co-Cr-Mo 合金のヤング率に基づいて、未溶融粉末部および溶融凝固部のヤング率をそれぞれ 200 GPa および 0.01 GPa に設定して、構造全体のヤング率を複合則である Reuss モデル<sup>10)</sup> および Voigt モデル<sup>11)</sup> を用いて計算した。こうした構造体にて算出されるヤング率は、10 パターンである (Fig. 2)。ヤング率が最も低く、内部構造に溶融凝固部が全くない構造体(以降、中空シェル構造体と記述する)は、周囲を覆う外壁のみで荷重を支持する。内部構造に溶融凝固部が増えても、中空シェル構造体と同等のヤング率を示す構造体がある。これは、未溶融粉末部のヤング率が、溶融凝固部のそれと比較して大幅に低く、荷重支持機能をほとんど果たしていないためである。したがって、溶融凝固部の要素数が増えても、荷重支持する柱状構造が存在しない場合は、中空シェル構造体同様、周囲を覆う外壁のみで荷重を支持するため、ヤン



**Fig. 1** Schematic of the three-dimensional model of the powder/solid composite structure. Powder or solid cube units were combined with a hollow shell structure, as indicated by the arrow. Adapted with modification from Ref. 9.



**Fig. 2** Relationship between the number of solid cubes and Young's modulus of powder/solid composite structures calculated by the law of mixture. Adapted with modification from Ref. 9.



**Fig. 3** (a) Scanning electron microscopy image showing the morphology of the Co-Cr-Mo powder. (b) Schematic of the building direction. Adapted with modification from Ref. 9.

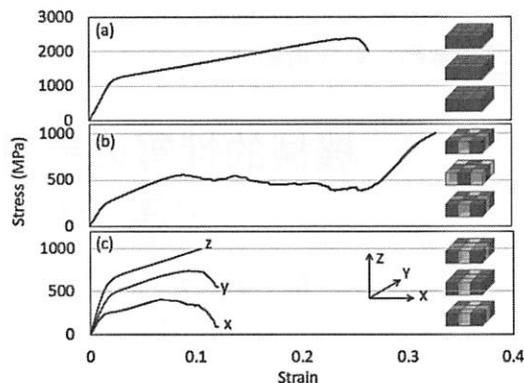
グ率は上昇しない。一方、荷重軸に対して直列に配置された3つの溶融凝固部は、荷重支持する柱の役割を果たすため、ヤング率の変化に大きく寄与する。

3種類の3Dパズル構造体を、ガスアトマイズ法にて作製したCo-Cr-Mo合金粉末(EOSコバルトクロムMP1, EOS) (Fig. 3 (a))とレーザ粉末床溶融結合装置(EOSINT M 290, EOS)を用いて、レーザ出力195 W、積層ピッチ40 μmで造形した。構造体の機械的性質に対する材質パラメータ(たとえば、結晶方位や結晶粒形状)の影響を回避するために、造形方向は、立方体の対角線が鉛直上向きになるように設定した(Fig. 3 (b))。

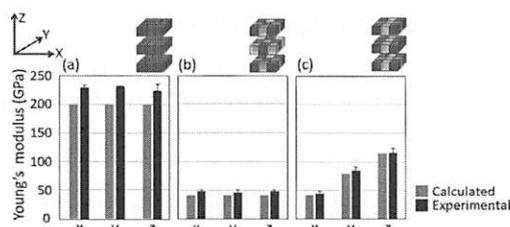
### 3. 3Dパズル構造体の機械的性質

Fig. 4に、主軸3方向に等価性をもつ全固体構造体および面心立方構造を模倣した構造体(以降、FCC構造体と記述する)のx軸方向、主軸3方向それぞれに異方性をもつH型の構造体のx軸、y軸、z軸方向の応力-ひずみ曲線を示す。3Dパズル構造体の変形挙動は、荷重軸に平行な直列要素(すなわち、構造の「柱」として機能する直列要素)の存在に依存する。FCC構造体では、特徴的なプラトー領域の発現が確認された。これは、構造体に衝撃吸収性を付与可能であることを意味している。

Fig. 5に示すように全固体構造体とFCC構造体のヤング率は、主軸3方向ではほぼ同等であった。一方、H型構造体は、3軸異方性を示した。上述のとおり、金属3Dパズル構造体のヤング率は、複合則により未溶融粉末部と溶融凝固部の配置パターンによって予測できる。実験に



**Fig. 4** Stress-strain curves of various models: (a) the all-solid model, (b) the face-centered cubic (FCC) model, and (c) the H model. Adapted with modification from Ref. 9.



**Fig. 5** Young's modulus of (a) the all-solid model, (b) the face-centered cubic (FCC) model, and (c) the H model. Adapted with modification from Ref. 9.

より得られたそれぞれの構造体のヤング率および主軸3方向におけるヤング率の等方性/異方性は、計算値とおおよそ一致していた。これは、必要な方向に目的の等方性または異方性を実現するための構造体設計を可能とすることを意味する。さらに、本手法は、内部構造の立方体要素のサイズや数量を変化させることで、ヤング率をはじめとする機械的性質の異方性/等方性の制御範囲の拡張が期待できる。

### 4. まとめ

未溶融粉末部と溶融凝固部を3Dパズルのように自在に組み合わせることで、構造体の異方性/等方性の機械的性質を制御することに成功した。この革新的な手法は、3Dパズルのように、構造パラメータを制御するだけで、目的の機械的性質を提供できるため、あたかも生体骨として振る舞う骨類似機能材料の開発へつながる。

### 謝辞

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の研究費支援により実施されました。ここに謝意を表します。

### 参考文献

- 1) Garden, N. and Schneider, A.: Topological optimization of internal patterns and support in additive manufacturing, *J. Manuf. Syst.*, **37-1**, (2015), 417.
- 2) Soro, N., Saintier, N., Merzeau, J., Veidt, M. and Dargusch, M.S.:

Quasi-static and fatigue properties of graded Ti-6Al-4V lattices produced by Laser Powder Bed Fusion (LPBF), *Addit. Manuf.*, **37**, (2021), 101653.

- 3) Liu, Z., Zhang, Z. and Ritchie, R.O.: Structural orientation and anisotropy in biological materials: Functional designs and mechanics, *Adv. Funct. Mater.*, **30-10**, (2020), 1908121.
- 4) Nakano, T., Kaibara, K., Tabata, Y., Nagata, N., Enomoto, S., Marukawa, E. and Umakoshi, Y.: Unique alignment and texture of biological apatite crystallites in typical calcified tissues analyzed by micro-beam X-ray diffractometer system, *Bone*, **31-4**, (2002), 479.
- 5) Nakano, T., Kaibara, K., Ishimoto, T., Tabata, Y. and Umakoshi, Y.: Biological apatite (BAP) crystallographic orientation and texture as a new index for assessing the microstructure and function of bone regenerated by tissue engineering, *Bone*, **51-4**, (2012), 741.
- 6) Tanaka, M., Matsugaki, A., Ishimoto, T. and Nakano, T.: Evaluation of crystallographic orientation of biological apatite at vertebral cortical bone in ovariectomized cynomolgus monkey treated with minodronic acid and alendronate, *J. Bone Miner. Metab.*, **34-2**, (2016), 234.
- 7) Cheal, E., Spector, M. and Hayes, W.: Role of loads and prosthesis material properties on the mechanics of the proximal femur after total hip arthroplasty, *J. Orthop. Res.*, **10**, (1992), 405.
- 8) Noyama, Y., Miura, T., Ishimoto, T., Itaya, T., Niinomi, M. and Nakano, T.: Bone loss and reduced bone quality of the human femur after total hip arthroplasty under stress-shielding effects by titanium-based implant, *Mater. Trans.*, **53-3**, (2012), 565.
- 9) Ikeo, N., Fukuda, H., Matsugaki, A., Inoue, T., Serizawa, A., Matsuzaka, T., Ishimoto, T., Ozasa, R., Gokcekaya, O. and Nakano, T.: 3D puzzle in cube pattern for anisotropic/isotropic mechanical control of structure fabricated by metal additive manufacturing, *Crystals*, **11**, (2021), 959.
- 10) Reuss, A.: Berechnung der fließgrenze von mischkristallen auf grund der plastizitätsbedingung für einkristalle, *J. Appl. Math. Mech.*, **9-1**, (1929), 49.
- 11) Voigt, W.: Ueber die beziehung zwischen den beiden elasticitätsconstanten isotroper Körper. *Annalen, Physik.*, **27-12**, (1889), 573.

## 著者紹介



福田英次

FUKUDA Hidetsugu

1981年4月22日生。2004年豊橋技術科学大学生産システム工学科卒業。2006年豊橋技術科学大学大学院生産システム工学専攻修了。同年ナカシマプロペラ株式会社入社。2013年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。同博士(工学)(大阪大学)。2015年弓削商船高等専門学校電子機械工学科助教。2019年同講師。2021年同准教授。現在の専門：生体材料学。所属学協会：日本金属学会、日本臨床バイオメカニクス学会、日本工学教育協会など。

Email : fukuda@mech.yuge.ac.jp

TEL : (0897) 77-4650



池尾直子

IKEO Naoko

1985年12月18日生。2008年大阪大学工学部応用理工学科卒業。2012年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。同博士(工学)(大阪大学)。同神戸大学大学院工学研究科助教。現在の専

門：生体材料学、金属学、受賞歴：日本金属学会第28回奨励賞(2018年)、日本マグネシウム協会第23回奨励賞(2020)など。所属学協会：日本金属学会、軽金属学会、日本バイオマテリアル学会など。

E-mail : ikeo@mech.kobe-u.ac.jp

TEL : (078) 803-6470



松垣あいら

MATSUGAKI Aira

1984年2月15日生。2006年大阪大学理学部化学科卒業。2013年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。同博士(工学)(大阪大学)。同大阪大学大学院工学研究科特任助教。2020年同助教。2021年同准教授。現在の専門：生体材料学・細胞生物学。受賞歴：日本金属学会第18回村上奨励賞(2021年)、日本バイオマテリアル学会科学奨励賞(2020年)など。所属学協会：日本金属学会、日本バイオマテリアル学会など。

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

TEL : (06) 6879-7506



石本卓也

ISHIMOTO Takyuya

1980年7月4日生。2003年大阪大学工学部応用理工学科卒業。2008年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。同博士(工学)(大阪大学)。同大阪大学大学院工学研究科特任助教。2009年同助教。2014年同講師。2016年同准教授。2021年富山大学学術研究部都市デザイン学系先進アルミニウム国際研究センター教授。同大阪大学大学院工学研究科特任教授。現在の専門：金属組織学・生体材料学。受賞歴：日本金属学会第78回功績賞(2020年)・第16回村上奨励賞(2019年)、日本バイオマテリアル学会科学奨励賞(2018年)など。所属学協会：日本金属学会、日本鉄鋼協会、日本バイオマテリアル学会など。

E-mail : ishimoto@sus.u-toyama.ac.jp

TEL : (076) 411-4897



中野貴由

NAKANO Takayoshi

1967年9月22日生。1990年大阪大学工学部卒業。1992年大阪大学大学院工学研究科博士前期課程修了。1992年大阪大学大学院工学研究科助手。1996年博士(工学)(大阪大学)。1999年同講師。2001年同助教。2008年同教授。2020年同附属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)。現在の専門：結晶塑性学、生体材料学、3Dプリンタ金属学。受賞歴：第20回軽金属功績賞(2022年)、第18回本多フロンティア賞(2021年)、日本金属学会増本量賞(2021年)・谷川ハリス賞(2019年)、文部科学大臣表彰科学技術賞(研究部門)(2020年)、日本骨代謝学会学術賞(基礎系)(2019年)、日本バイオマテリアル学会学会賞(科学)(2016年)、第8回日本学術振興会賞(2012年)など。所属学協会：日本金属学会(2021・2022年度会長)、日本バイオマテリアル学会(常任理事・理事)、スマートプロセス学会(理事)、日本骨形態計測学会(理事)、粉体粉末冶金協会(代議員)など。

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

Tel & FAX : (06) 6879-7505