

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 2 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K14167

研究課題名（和文）骨として認知される部分溶融凝固型インプラントの創製

研究課題名（英文）Development of bone function-mimetic metallic implants that is recognized as "bone" itself

研究代表者

中野 貴由（Nakano, Takayoshi）

大阪大学・工学研究科 ・教授

研究者番号：30243182

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、金属粉末積層造形法を駆使し、形状と組織の「異方性」を制御することで、金属材料でありながら生体内で骨として認識される力学機能（低ヤング率、異方性）を有したインプラント材料の創製にチャレンジした。形状制御においては、凝固部の配置の人為的制御により、骨類似の低ヤング率から材料本来のヤング率値まで、等方性から一軸、二軸、三軸異方性までの幅広い制御を達成した。組織制御においては、スキャンストラテジーにより、チタン合金の集合組織制御に成功し、<001>優先配向の形成と同方向での低ヤング率化を実現した。積層造形法による形状・組織制御により、従来ない高機能骨インプラント材料を実現することができた。

研究成果の概要（英文）：We challenged the development of metal implant materials for bone replacement that is recognized as bone itself by controlling the anisotropies of shape and microstructure under a metal additive manufacturing technology. For the shape control, arbitrary configuration of solid part enabled control of wide range of Young's modulus with isotropic and uni-, bi-, and tri-axial anisotropies. For the microstructural control, crystallographic texture was controlled by scan strategy of heat source. <001> preferential orientation was realized, which resulted in low Young's modulus in the <001> oriented direction. We achieved a highly functionalized implant materials under additive manufacturing controlling the shape and microstructural anisotropies.

研究分野：生体材料学

キーワード：金属粉末積層造形法 形状制御 組織制御 異方性 集合組織 多孔体

1. 研究開始当初の背景

「金属粉末積層造形法 (Metal Additive Manufacturing 法)」は、三次元構造体を自由自在に造形可能な手段として、全世界的に脚光を浴びており、種々の産業分野において実用化のための研究開発が盛んに行われている。とりわけ、医療分野での実用化の期待は大きく、多品種少量生産、カスタマイズ化が求められている生体用骨代替金属インプラントへの適用が国内外で模索されている。しかしながら、(A) 金属粉末を用いた際の直接造形の困難さ、(B) 造形体内部からの原料粉末除去の困難さ、(C) 熱源の集光度と投入熱量の適正化の困難さ、(D) 骨の持つ異方性を実現できていない、など解決すべき問題が山積している。特に、(D)は骨の微細構造・力学機能異方性の重要性への理解が十分になされていないことから、その設計指針さえ存在しないのが現状である。

2. 研究の目的

この課題解決のため、本研究では、金属 AM が本来得意とする任意の“形状制御”に加え、“組織制御”による異方性の加算を試みる、「形状・組織同時制御」の方法論を確立することで、あたかも生体骨として振る舞い、生体に骨として認知されるような力学的親和性の高い理想的な異方性材料の設計・開発を試みる。

3. 研究の方法

金属粉末積層造形装置を駆使し、造形条件の制御により、異方性に着目した形状、組織の制御を試みた。造形した試料について、圧縮試験により力学特性、FE-SEM-EBSD により結晶方位解析を行い、異方性を評価した。

4. 研究成果

図1は、造形中の様子を、図2は、本研究にて提案した、ヤング率とその異方性を任意に設計可能な新規構造体デザインの一例を示す。本構造体は構成単位となるそれぞれの立方体を選択的にソリッド化することで、その配置やソリッド数に依存したヤング率とその異方性を発現する。CADによる形状設計に基づくことから、構成要素の形状は直方体、三角錐等を任意に選択可能である。図2の例では、立方体を $3 \times 3 \times 3 = 27$ 個配置した場合の CAD モデルの例と、当該モデルを Ti-6Al-4V 合金を用いて電子ビーム積層造形 (EBM) 法で作製した際の直交3軸方向へのヤング率を示す。この場合、ヤング率は Voigt 則と Reuss 則の組み合わせで算出可能であり、本構造体化により素材の緻密体のヤング率 (Ti-6Al-4V 合金の場合 110 GPa) から生体骨類似の極低ヤング率まで、3軸でのヤング率

が等しい等方性から、1方向のみヤング率が高値を示す1軸異方性、2方向に高値を示す2軸異方性、3軸とも異なるヤング率を示す3軸異方性までの広範囲の制御が可能であった。ヤング率の実測値は、計算値と同等であり、計算の妥当性が示された。さらに、配置の数を増加 (例えば $5 \times 5 \times 5$) させることで、より連続的なヤング率値の設計が可能となる。

この概念を実際のポーンプレートに適用した際の CAD モデルの例を図3に示す。長手方向 (長管骨の骨長軸方向に平行に設置) への曲げモーメントの負荷を想定した計算により、生体骨類似の低ヤング率が達成された。さらに、同じ空隙率であっても、曲げの中立軸からの距離に対して凝固部の配置を変えることで、ヤング率、最大荷重等が可変であった。

図2、図3で示したいずれの構造体の場合



図1 造形中の様子。

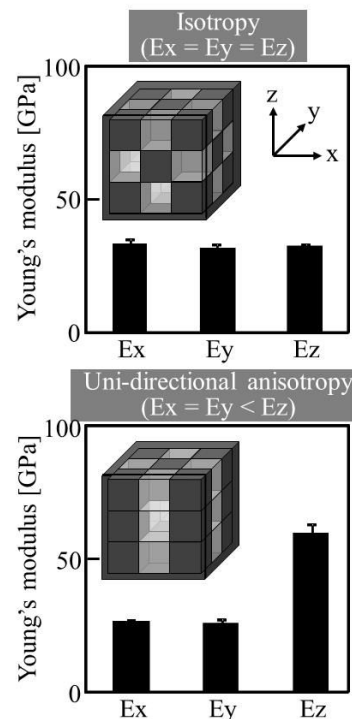


図2 27個の立方体要素からなる形状制御された構造体。凝固部の配置により等方性から一軸、二軸、三軸異方性まで制御可能。

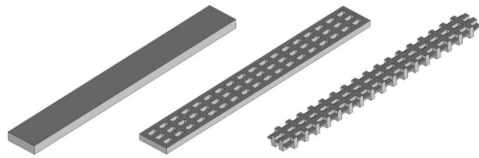


図3 本研究で形状制御したポーンプレーットのCADモデルの例。

でも、発生する主応力ベクトル方向に連結した緻密部貫通要素が主に力学特性を支配することが示された。

一方で、組織制御の観点から、結晶集合組織の制御とそれに基づく力学機能異方性の発現にも成功した。本研究には、結晶集合組織形成（単結晶化を含む）により生体骨類似の低ヤング率化が期待できる、bcc 構造を有する型チタン合金（Ti-15Mo-5Zr-3Al (in wt.%)）に着目した。本合金は、唯一の生体材料としてのISO認可（ISO 5832-14）合金である。本合金は多結晶では約 85 GPa のヤング率を示すが、単結晶化により、 $\langle 001 \rangle$ にて 44.4 GPa という低ヤング率を発現する。一方で、 $\langle 111 \rangle$ にて約 120 GPa を示し、形状異方性を有しない緻密体であっても、異方性の発現による低ヤング率化が達成可能である。すなわち、 $\langle 001 \rangle$ を優先配向化させることが、低ヤング率インプラントの創製のポイントとなる。

本研究で、造形時のスキャンストラテジーが、本合金の集合組織形成のための重要な造形パラメータであることを見出した。例えば、図4に示したスキャンストラテジー-Xでの造形は、図5に示すような走査方向（x方向）に $\langle 001 \rangle$ 、造形方向（z方向）に $\langle 011 \rangle$ が優先配向した集合組織を形成し、一方でスキャンストラテジー-XYでの造形は、図6に示すように2つの走査方向（x、y方向）、造形方向

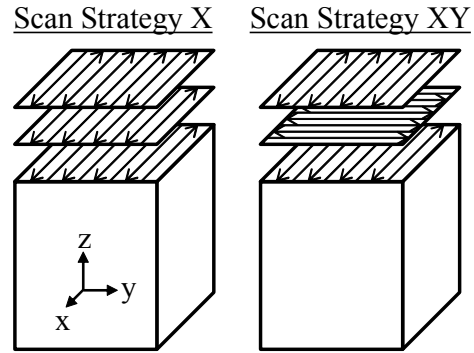


図4 結晶集合組織を制御することが明らかとなった「スキャンストラテジー」。

（z方向）ともに $\langle 001 \rangle$ が優先配向した単結晶様の集合組織を形成した。

こうした結晶集合組織形成の結果、 $\langle 001 \rangle$ が優先配向した方位においては約 69 GPa の低ヤング率を示した。一方、 $\langle 011 \rangle$ 優先配向方向でのヤング率は約 100 GPa を示すことが確認され、金属粉末積層造形法による材質異方性部材の造形に成功した。単結晶の低ヤング率が達成されていない理由の1つは、集合組織の不完全性であると考えられ、結晶配向性のさらなる顕在化により、ヤング率は単結晶での理想値に近づくものと期待できる。さらに、本結果は、集合組織の強度を変化させることでヤング率異方性と低ヤング率値を制御することが可能であることを示している。集合組織の強度は造形時のスキャンパラメータの系統的变化により制御可能であることを本研究にて示しており、無配向の組織制御をも実現している。

さらに、動物骨への埋入により、本手法で作製したインプラントの高い生体親和性を確認している。

以上のような形状と組織の同時制御によ

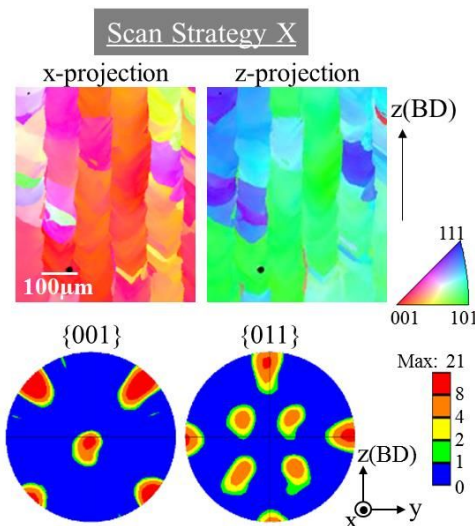


図5 スキャンストラテジー-Xにより造形したTi-15Mo-5Zr-3Al合金緻密体のIPFマップと $\{001\}$ 、 $\{011\}$ 極点図。

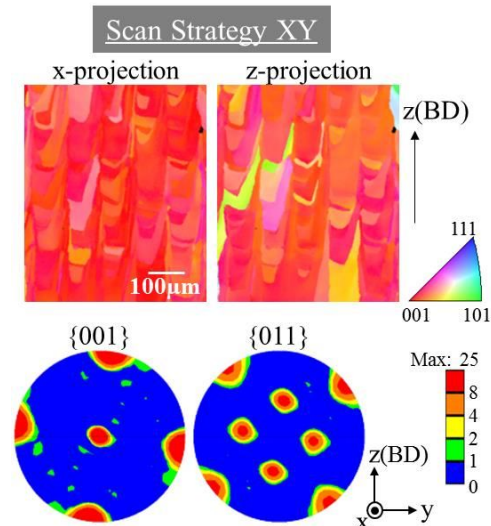


図6 スキャンストラテジー-XYにより造形したTi-15Mo-5Zr-3Al合金緻密体のIPFマップと $\{001\}$ 、 $\{011\}$ 極点図。

り、患者個々の骨形状に適合しつつ、骨の材質のバリエーションに個々に対応可能なインプラントが実現可能となることが、本研究の成果として示された。当初目的として掲げた、生体内で骨として認識される力学機能を示し、周囲骨へのオステオサイトを介した働きかけを可能とする金属製インプラントのための材料の創製に成功したと言える。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計3件)

- [1] 中野貴由, 石本卓也: 3D プリントの医療デバイスへの応用, 機能材料 36[12] (2016) 40-46, 査読有.
- [2] 中野貴由: 3D プリントを活用した機能性構造材料の創製 - 骨・骨関節代替材料 -, 工業材料 2016 年 5 月号 (2016) 57-62, 査読有.
- [3] 中野貴由, 石本卓也, 萩原幸司: 粉末積層造形法による形状と組織制御による異方性付与, 粉体および粉末冶金, in press, 査読有.

[学会発表](計10件)

- [1] T. Nakano, T. Ishimoto, N. Ikeo, T. Inoue: New powder/solid composite exhibiting low Young's modulus and energy absorption for biomedical applications fabricated by additive manufacturing, Ti-2015: The World Conference on Titanium, 2015.8.16-20, Manchester Grand Hyatt, San Diego, USA.
- [2] 井上暢, 平本菜摘, 石本卓也, 芹澤愛, 福田英次, 中本貴之, 木村貴広, 中野貴由: 積層造形法を用いた構造制御によるチタン合金の異方性力学機能設計, 日本金属学会 2015 年秋期 (第 157 回) 大会, 2015.9.16-18, 九州大学伊都キャンパス, 福岡県福岡市.
- [3] 井上暢, 石本卓也, 蘇亜拉図, 孫世海, 中野貴由: 金属積層造形法を用いた構造化制御による異方性骨インプラント材料の創製, 日本金属学会 2015 年秋期 (第 157 回) 大会, 2015.9.16-18, 九州大学伊都キャンパス, 福岡県福岡市.
- [4] T. Nakano, T. Inoue, T. Ishimoto, N. Ikeo: New powder/solid composite of Ti alloys exhibiting low Young's modulus for biomedical applications fabricated by additive manufacturing (招待講演), 日本金属学会 2015 年秋期 (第 157 回) 大会, 2015.9.16-18, 九州大学伊都キャンパス, 福岡県福岡市.
- [5] 久本健太, 石本卓也, 蘇亜拉図, 中野貴由: 積層造形法による生体用 型 Ti 合金部材の作製と組織形成, 日本金属学会 2016 年春期 (第 158 回) 大会, 2016.3.23-25,

東京理科大学葛飾キャンパス, 東京都葛飾区.

- [6] T. Nakano, H. Fukuda, T. Inoue, T. Ishimoto, A. Matsugaki: Development of a new powder/solid composite exhibiting mechanical properties similar to bone anisotropy by metal additive manufacturing, 10th World Biomaterials Congress, 2016.5.17-22, Palais des Congres de Montreal, Quebec, Canada.
- [7] 久本健太, 石本卓也, 蘇亜拉図, 中野貴由: 付加製造法による 型チタン合金緻密体の造形と組織制御, 紛体粉末冶金協会平成 28 年度春季大会, 2016.5.24-26, 京都工芸繊維大学, 京都府京都市.
- [8] 堀敬雄, 當代光陽, 孫世海, 中野貴由: レーザ積層造形法による混合粉末からの Ti 合金造形体作製, 日本金属学会 2016 年秋期 (第 159 回) 大会, 2016.9.21-23, 大阪大学豊中キャンパス, 大阪府豊中市.
- [9] 石本卓也, 久本健太, 中野貴由: 金属粉末積層造形法による生体用 型チタン合金製部材の作製と集合組織形成, 紛体粉末冶金協会平成 28 年度秋季大会, 2016.11.9-11, 東北大学青葉山キャンパス, 宮城県仙台市.
- [10] S.-H. Sun, K. Hagihara, T. Ishimoto, T. Nakano: Comparison of microstructure and mechanical property of Ti-15Mo-5Zr-3Al alloy fabricated by electron and laser beam melting, 日本金属学会 2017 年春期 (第 160 回) 大会, 2017.3.15-17, 首都大学東京南大沢キャンパス, 東京都八王子市.

[その他]

ホームページ

<http://www.mat.eng.osaka-u.ac.jp/msp6/nakano/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

中野 貴由 (Takayoshi NAKANO)・大阪大学・工学研究科・教授

研究者番号: 30243182

(2)研究分担者

石本 卓也 (Takuya ISHIMOTO)・大阪大学・工学研究科・准教授

研究者番号: 50508835

當代 光陽 (Mitsuharu TODAI)・大阪大学・工学研究科・助教

研究者番号: 10610800