

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：15401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K12557

研究課題名(和文)カスタムメイド多孔質金属人工関節最適設計システム

研究課題名(英文)Optimization system of custom made porous metal artificial bone

研究代表者

竹澤 晃弘 (Takezawa, Akihiro)

広島大学・工学研究院・准教授

研究者番号：10452608

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：金属製人工関節置換術においては材料の剛性差に起因する残存骨の劣化に代表される適合性の問題がある。本研究ではこの問題の解決法として、金属人工関節を多孔質化し、見かけ剛性を低下させ残存骨と親和させる、カスタムメイド人工関節について研究を行った。内部多孔質構造は数値計算手法で最適設計し、得られた複雑な内部構造の造形には金属3Dプリンタを用いた。実験検証の結果、誤差10%以内で剛性の設計が可能で、副次的な効果として、通常の多孔質材料に比べ約140%高い強度が得られた。すなわち、金属3Dプリンタで造形された規則的な多孔質金属材料は低剛性高強度であり、人工関節には理想的な物性値となることがわかった。

研究成果の概要(英文)： Metal artificial bones have a problem of stiffness matching with the remaining bone because their stiffness is much higher than human bones. In this research, we studied a custom made artificial bone utilizing porous metal for reducing their stiffness. The internal pore structure was designed by numerical structural optimization method. The obtained complicated internal structures were fabricated by metal additive manufacturing. The experimental results shown the stiffness could be designed within 10% error. As the secondary advantage, the strength of the developed porous metal had about 140% higher stiffness than the conventional porous metal. Finally, we identified the developed structure had low stiffness and high strength which are ideal for artificial bones.

研究分野：構造最適化

キーワード：人工関節 構造最適化 3Dプリンタ ポーラス材料

1. 研究開始当初の背景

大腿骨、股関節等の高強度が要求される部位の重度骨疾患に対して、患部を金属製の人工関節に置換する治療法がある。しかし、通常は量産品の人工関節を用いるため、患者骨格との適合性の問題点がある。さらに、金属人工関節は、残存骨に比べて非常に剛性が高いことから、施術後に残存骨への負荷が低下し残存骨が劣化するという、「応力遮蔽」という根本的問題を有する。

一方、金属人工関節を多孔質化することにより剛性を低下させる試みがあるが、骨は局所的に剛性が異なる複雑な多孔質構造を形成しており、真の剛性の親和を実現するためには、力学理論及び数学的理論に基づく最適設計法が不可欠である。このような複雑な設計問題に対し、数値計算で力学的に最適な形を高い自由度で導出するトポロジー最適化という技術がある。そして、切削等の一般的な加工法では、トポロジー最適化で得られた複雑な最適形状の完全な実現は不可能であったが、金属 3D プリンタを使用すれば作成が可能である。

2. 研究の目的

以上の背景に基づき、本研究では、トポロジー最適化を用いて人工関節の多孔質構造の剛性を最適化する。そして、得られた設計案を金属 3D プリンタで造形し、圧縮強度試験を実施し、得られた設計案の妥当性を検証する。

3. 研究の方法

(1) 均質化法による実効的物性値の評価

本研究では、高剛性材料の開発において実効的剛性を考慮し、負熱膨張材料の開発においてはさらに実効的線膨張係数を考慮する。開発するポーラス材料は単位構造が周期的に配置されたものを考え、このような規則構造の実効的物性値は均質化法で導出することができる。その計算にあたり、まずポーラス内部構造における弾性変形問題において、熱ひずみを含む応力-ひずみ関係が以下のフックの法則で表されると考える。

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (1)$$

ここで、 σ 、 C 、 ε はそれぞれ応力テンソル、弾性テンソル、ひずみテンソルである。さらに、周期配置された単位領域 Y を考慮し、実効的弾性テンソル C^H は以下のように計算できる。

$$C_{ijkl}^H = \frac{1}{|Y|} \int_Y \left(C_{ijkl} - C_{ijpq} \frac{\partial \chi_p^{kl}}{\partial y_q} \right) dY \quad (2)$$

ここで、 χ は特性変位であり、周期的境界条件の下で以下の式を解くことで得られる。

$$\int_Y C_{ijpq} \left(\delta_{pk} \delta_{ql} - \frac{\partial \chi_p^{kl}}{\partial y_q} \right) \frac{\partial v_i}{\partial y_j} dY = 0 \quad (3)$$

(2) トポロジー最適化

トポロジー最適化の基本的な考え方は、固定設計領域と次式に示す特性関数 χ_Ω の導入にある。すなわち、最適構造 Ω_d を含む固定設計領域 D を最初に設け、その固定設計領域と特性関数 χ_Ω を用いて、最適化問題を材料分布問題に置き換えることにある。

$$\chi_\Omega(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1 & \text{if } \mathbf{x} \in \Omega_d \\ 0 & \text{if } \mathbf{x} \in D \setminus \Omega_d \end{cases} \quad (4)$$

上式の χ_Ω を用いれば固定設計領域 D 内の座標 \mathbf{x} における χ_Ω の 0-1 問題として、最適構造を決定することができる。しかし、この式に基づいて最適化を行う場合には、固定設計領域 D 内の全ての座標 \mathbf{x} において、不連続関数 χ_Ω を評価するという、無限個の設計変数について不連続値を扱う問題になり、数学的に最適解が存在しないことが証明されている。この問題は、特性関数に関する最適化問題を、大域的な意味で連続な密度関数の最適化問題に置き換えることで解決され、その緩和法としては SIMP 法が代表的である。これらの方法では、緩和された最適化問題は、空孔を模した非常に弱い材料と母材とで構成される複合材料における、母材の体積含有率の最適化問題と解釈できる。このような最適化問題においては、構造か空孔か判断が困難なグレーの領域がしばしば生じるが、SIMP 法はこの複合材料における体積含有率を示す密度関数と物性値との関係の非線形性をパラメータにより調整でき、明確な構造を得易いという利点があるため、多くの研究で用いられている。そのため、本研究でもトポロジー最適化法として SIMP 法を用いる。

まず、金属積層造形を用いた高剛性ポーラス材料の開発に対して、ヤング率を以下の式で表す。

$$E(\phi) = \phi^3 E_0 \quad (5)$$

ここで、 ϕ は連続関数で近似した特性関数であり、仮想的な材料密度と解釈できる。また、 E^* は最適構造におけるヤング率、 E_0 は原材料のヤング率である。

(3) 最適化問題の設定

本研究では、等方的な剛性を実現するものとする。これは、弾性テンソルにおいて垂直応力に対応する成分と、せん断応力に対応する成分が独立な二つの変数で表される必要がある。そのため、等方性からのずれを表現するペナルティ項を目標関数に加える。そして、等方性の実現されている仮定の下、体積弾性率の最大化を目指す。ポーラス単位構造の総体積を制約条件とし、最適化問題を以下のように表す。

$$\underset{\phi}{\text{minimize}} \quad -\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 C_{ij}^H - \alpha \text{Error} (i=1,2,3) \quad (6)$$

Subject to

$$\frac{\int_{\Omega} \phi dx}{\int_{\Omega} dx} \leq \nu f_{\max} \quad (7)$$

$$0 \leq \phi \leq 1 \quad (8)$$

ただし、

$$\text{Error} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^3 C_{ii}^H - \frac{1}{12} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 (1 - \delta_{ij}) C_{ij}^H - \frac{1}{3} \sum_{i=4}^6 C_{ii}^H \quad (9)$$

また、 νf_{\max} は体積含有率の上限値である。

以上の最適化問題において、設計変数 ϕ を勾配法で更新し、最適構造を得る。図1に最適化のフローチャートを示す。

(4) 3D プリンティング用のモデル作成

積層造形においては、金属粉末や光凝固樹脂を、層ごとに選択的に溶融・凝固させ、積層させて三次元形状を造形する。そのため、造形の形状自由度が極めて高い。ただし、装置や材料に依存して、造形物の最小厚さや許容角度等に制約があり、それに違反するモデルは造形できない。また、内部の金属粉末や、樹脂サポート材を造形後に除去するため、ポーラス材料はそれらの除去に十分な大きさを有する空孔が互いに接続したオープンセル構造である必要がある。積層造形用の汎用三次元データは STL と呼ばれる形式であり、トポロジー最適化で得られた密度分布に対してアイソサーフェスを作成し、その形状を STL ファイルとして出力する。

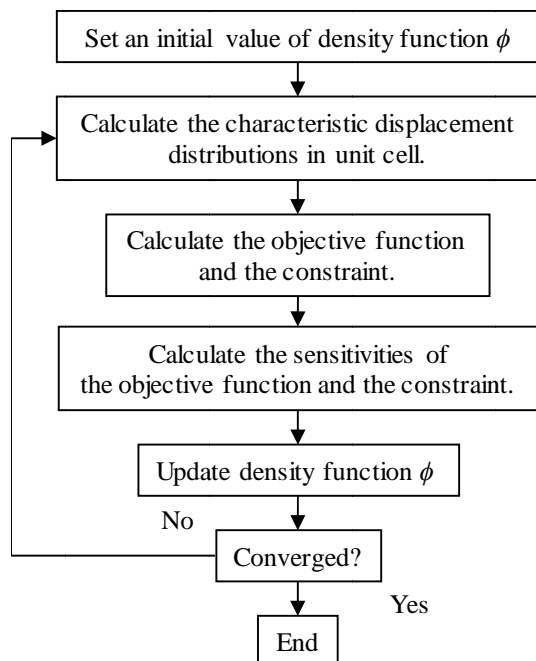


図1 最適化フローチャート

4. 研究成果

金属積層造形を用いて軽量高剛性材料を開発した例を紹介する。図2に示すのは、ユニットセルに等方性を持たせつつ、体積含有率 30%, 50%, 70% (気孔率 70%, 50%, 30%) の条件で最適化した例である。いずれも、最適解は当初クローズドセル構造で得られたため、立方体設計領域の対角方向に強制的に粉抜き穴を空けて最適化を実施した。なお、ある気孔率における、ポーラス材料の実効的物性値の限界値は Hashin-Strinkman の材料物性値境界より求めることができる。今回の最適化では、いずれの体積含有率においても、その限界値に対して体積弾性率で約 85% の値となった。なお、穴を除いて最適化で得られたクローズドセル構造においてはほぼ 100% の値が得られたため、15% の性能低下は強制的に設けた粉抜き穴によるものである。

以上の最適解をもとに、材料にマルエージング鋼を用い、レーザ溶融方式の EOS 社 EOSINT M280 で試験片を造形した。なお、造形後には時効硬化のための熱処理を施した。図3に示すのが圧縮試験のための試験片である。ユニットセルの大きさを 5mm とし、繰り返し配置することで 20x20x30mm のサイズで造形した。まず、全ての体積含有率の試験片において、実効的ヤング率を計測した。n=2 で計測を行い、平均値でそれぞれ 27.65GPa, 46.84GPa, 66.54GPa とバルク材料のヤング率 188GPa に対して 14.7%, 24.9%, 35.4% の値が得られた。なお、シミュレーションと実験との誤差は -10.5%, -7.1%, -3.1 であった。これは、粉末積層造形においては表面近傍では

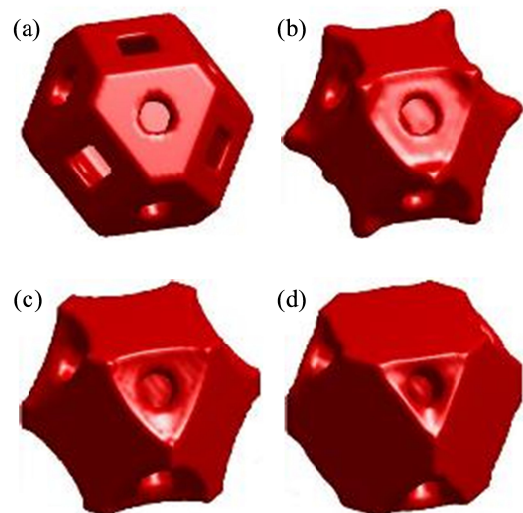


図2 最適多孔質構造。(a) 初期値。(b) 体積含有率 30%。(c) 体積含有率 50%。(d) 体積含有率 70%。

溶融が不十分になり金属の密度が低下してしまうことから、全体の体積に対する表面積の割合が大きいほど剛性が低下することを意味していると考えられる。

続いて、体積含有率 30% の試験片に対して破断に至るまで圧縮試験を実施し、圧縮強度を計測した。図 4 に示すのが得られた実効的応力-ひずみ曲線、図 5 に示すのが破断時の試験片画像である。0.2% 耐力及び圧縮強度はそれぞれ平均値で 200.8MPa 及び 243.7MPa で得られた。通常のポーラス材料のように、局所的な破壊を伴いながら徐々に圧壊していくのではなく、ユニットセルに等しく応力が集中しせん断による破壊が一度に起こった。そのため、実効的応力-ひずみ曲線においてもポーラス材料特有のプラトー領域と呼ばれる応力が一定のままひずみが増加する領域は確認できなかった。ただ、局所的な破壊が起こりにくいことから、強度は通常のポーラス材料に比べて格段に向上しており、オープンセル材料の強度を求める近似式 $\sigma_{ps}^* = \sigma_{ps} f^{3/2}$ (σ_{ps}^* : ポーラス材料の実効的耐力, σ_{ps} : 母材の耐力, f : 体積含有率) と比較した際には、141.1% もの上昇が確認できた。すなわち、構造強度部材としての性能は、従来のポーラス材料と比較して格段に向上したことがわかる。すなわち、金属 3D プリントで造形された、規則的な多孔質金属材料は、低剛性高強度であり、人工関節には理想的な物性値となることがわかった。

この高強度という副次的な利点に対して、定量的解析及び最適設計は現状では難しい。今後更なる厳密な人工関節の設計を行うに

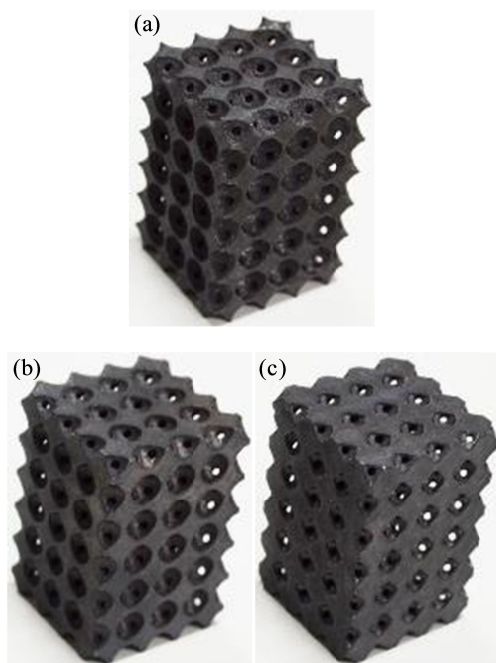


図 3 金属 3D プリントで造形した試験片。(a) 体積含有率 30%。(b) 体積含有率 50%。(c) 体積含有率 70%。

は、これらの課題の解決が必要であると考えられる。

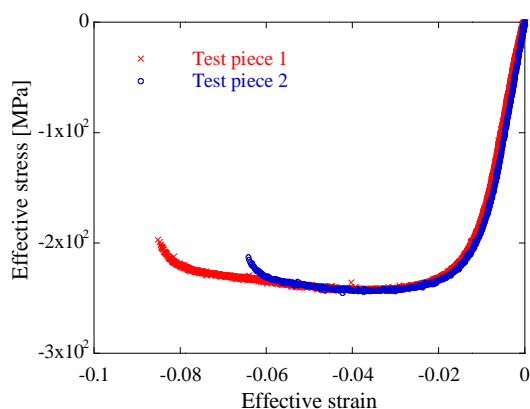


図 4 体積含有率 30% 試験片の実効的応力-ひずみ曲線。

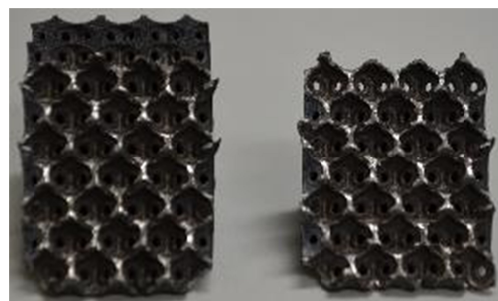


図 5 体積含有率 30% 試験片の破断面。

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. A. Takezawa, M. Kobashi, Y. Koizumi, M. Kitamura, Porous metal produced by selective laser melting with effective isotropic thermal conductivity close to the Hashin-Shtrikman bound, *Int. J. Heat. Mass. Tran.*, 105 (2017) 564-572. (査読有り)
2. Y. Koizumi, A. Okazaki, A. Chiba, T. Kato, A. Takezawa, Cellular Lattices of Biomedical Co-Cr-Mo-Alloy Fabricated by Electron Beam Melting with the Aid of Shape Optimization, *Addit. Manuf.*, 12B (2016) 305-313. (査読有り)
3. A. Takezawa, M. Kobashi, M. Kitamura, Porous composite with negative thermal expansion obtained by photopolymer additive manufacturing, *APL Mater.*, 3 (7), (2015), 076103. (査読有り)

〔学会発表〕(計 5 件)

1. A. Takezawa, T. Nishizu, T. Tanitsugu and M. Kitamura, Experimental and Numerical Study of Non-Linear Behavior of Topology Optimized Porous Metal, *AEPA2016*, Dec. 5, 2016, Hiroshima (Japan).

2. 竹澤晃弘, 谷次智弥, 西津卓史, 米倉一男, 小泉雄一郎, 北村充, トポロジー最適化と電子ビーム積層造形を用いた実効的等方性を有する 64 チタンポーラスの開発, 日本機械学会第 24 回機械材料・材料加工技術講演会 (M&P2016), 2016 年 11 月 25 日, 早稲田大学国際会議場 (東京都).

3. 竹澤晃弘, 谷次智弥, 北村充, 選択的レーザー焼結で造型された最適金属ポーラス材料の力学特性評価, 日本機械学会 2016 年度年次大会, 2016 年 9 月 14 日, 九州大学 伊都キャンパス (福岡県).

4. T. Nishizu, T. Tanitsugu, A. Takezawa, K. Yonekura, O. Watanabe, M. Kitamura, A study of lattice structure with topology optimization and additive manufacturing, ACSMO2016, May 23, 2016, Nagasaki (Japan).

5. A. Takezawa, M. Kobashi, Y. Koizumi and M. Kitamura, Porous metal by topology optimization and additive manufacturing, WCSMO2015, June 9, 2015, Sydney (Australia).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

竹澤 晃弘 (TAKEZAWA AKIHIRO)
広島大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号：10452608