

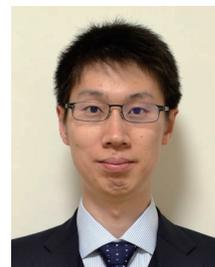
奨励金No.1558

海綿骨模倣による力学的高機能インプラントの開発

山田 悟史
北海道大学 助教

Development of mechanically functional implants designed based on cancellous bone structure

Satoshi Yamada,
Hokkaido University, Assistant Professor



本研究課題では、海綿骨を模倣した新しい多孔質構造体（海綿骨模倣構造）により、生体内での予期しない方向の負荷にも強く、一度破壊が生じても破壊が進展しにくい力学的高機能な多孔質金属インプラントを開発する。多孔質構造の設計・製造方法を開発するため、海綿骨模倣構造の構造特性と力学特性の関係を実験的に明らかにした。また、海綿骨模倣構造に力学的異方性を付与する方法を提案し検証した。

This study aims to develop mechanically functional implants with cancellous bone inspired porous structure for resistance to loadings in unexpected directions in vivo and suppressed fracture progression. For their optimal design and manufacturing, the relationship between structural and mechanical properties of the porous structures was experimentally clarified. It was confirmed that the mechanical properties varied with volume density, strut diameter and length, and bifurcation count. Furthermore, a design method for the porous structures with mechanical anisotropy was proposed by providing beam length distribution while maintaining isotropy of the beam orientation and bifurcation, and its effectiveness was verified.

1. 研究内容

1.1 背景・目的

人工関節置換術等で使用される金属インプラントには応力遮蔽による固定力低下という臨床課題があり、多孔化による剛性の最適化が有用となる。しかし、規則的な構造の繰り返しを有する一般的な多孔質構造体には、内部構造に起因した特定方向の強度低下や一度破壊が生じると容易に破壊が進展するという力学的課題がある。そこで申請者らは、生体内環境に最適化された多孔質材料である海綿骨に着目し、海綿骨の構造－力学特性に基づいた新しい多孔質構造体（海綿骨模倣構造）を考案した。これまでに、力学的に等方で特定方向の強度低下が抑制でき、初期破壊後の破壊進展が抑制可能であることを確認した。そこで本研究課

題では、海綿骨模倣構造を用いた力学的高機能な多孔質インプラントを開発するため、海綿骨模倣構造の設計変数と力学特性の関係を実験的に明らかにすることで、多孔質構造の設計・製造方法を確立することを目的とする。また、海綿骨模倣構造に力学的異方性を付与する構築方法を考案し実証することを目的とする。

1.2 実験方法

海綿骨模倣構造は、節点で3次元等方的に接続させた複数のビームが構成する3次元網目状の構造を骨格とし、各ビームに円柱体積を与えてストラットにした構造である（図1）。起点からビームを3次元等方的に分岐・生成させ、ビーム先端から同様に分岐・生成させ、設計空間を満たすまで

これを繰り返す。このとき、各ビームの長さや各節点における分岐数は確率分布を用いてランダムに与える。ビームが互いに近接する場合はこれを接続し、節点数が高密度になる場合は分岐・生成を終了させることで、荷重伝達が可能な網目状の骨格が構築できる。設計変数は、ストラット直径、ビーム長の確率密度関数の中央値、分岐数の確率質量関数（ポアソン分布）の係数 λ 、ビーム接合の探索範囲、節点数密度の閾値及び検査範囲である。

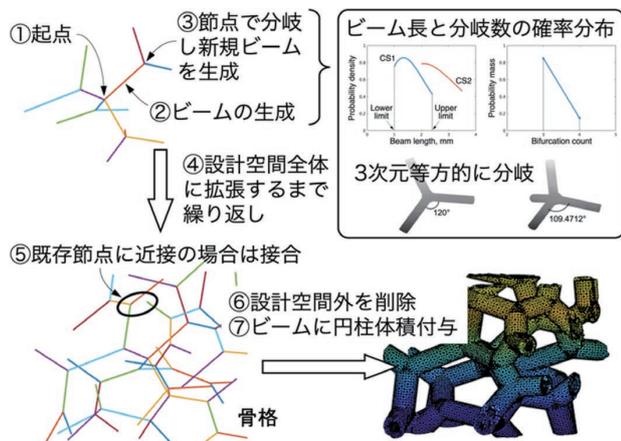


図1 海綿骨模倣構造の構築方法

表1に示す4つの設計変数を組み合わせ、81個の立方体モデル（25×25×25 mm）を生成した。平均ビーム長、平均分岐数、ビームの配向性を解析した。レーザー粉末床溶融結合装置（松浦機械製作所、LUMEX Avance-25）を用いて、SUS316L（松浦機械製作所、マツウラステンレス 316L）により付加製造し（図2）、高速切断機により6面を機械加工して立方体試験片（20×20×20 mm）を作製した。アルキメデス法により各体積を計測した。材料試験機（島津製作所製 AG-250kND）で計測可能な体積密度52.1%以下の試験片（51個）に

表1 生成した等方性海綿骨模倣構造の設計変数

設計変数	使用した変数値		
ストラット直径 (mm)	1.0	1.2	1.4
ビーム長中央値 (mm)	1.6	2.4	3.2
分岐数分布 λ	0.7	2.0	4.0
ビーム接合の探索範囲 (mm)	1.4	1.6	1.8

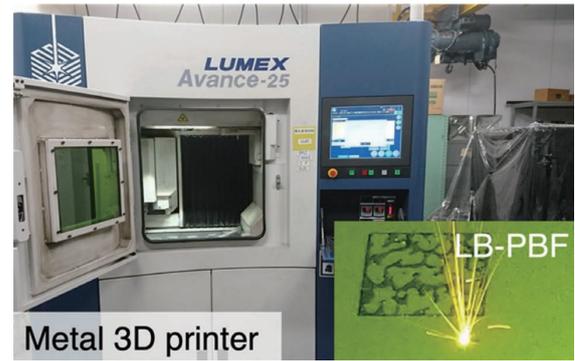


図2 レーザ粉末床溶融結合装置

ついて、造形方向の静的圧縮試験を行い、弾性率、オフセット応力、プラトー応力、45%ひずみまでの吸収エネルギーを計測した。ダイヤモンドラティス構造とTPMS Gyroid構造の試験片と比較した。

また、本構造の動的圧縮特性を調べるため、体積密度の異なる円柱モデル（直径50 mm、高さ25 mm、体積密度21.1%、29.9%、42.1%）を生成し、初期検討として樹脂3Dプリンタ（Raise3D、E2）を用いてTPUフィラメント（Raise3D TPU95A、BASF TPU85A）、TPEフィラメント（HottyPolymer TPE75A、TPE60A）、PPフィラメント（Ultrafuse）により試験片を作製し、衝撃エネルギーを50 Jとして落錘型衝撃圧縮試験を行った（IMATEK、IM10 ITS）。

次に、海綿骨模倣構造の3次元等方的なビーム配向性と分岐性は維持したまま、配向方向に応じたビーム長分布により力学的異方性を与える手法を考案した。骨格の構築中、基準軸とのなす角の余弦値に応じて線形に変化させた重み係数を用意し、確率密度関数より与えられたビーム長に重み係数を乗じて各ビームの長さを決定した。これにより、基準軸方向のビーム長分布が可能となる。表2に示す5種類の重み係数（z軸とx軸の重み）について、他の条件は一定とし異方性海綿骨模倣構造を生成した。同様に、z軸とx軸を造形方向としてSUS316Lにより付加製造し、立方体試験片（20×20×20 mm）を作製して造形方向の圧縮試験を行った。

表2 ビーム長の重み係数

試験片	A	B	C	D	E
z軸方向	1	1.25	1.5	1.75	2
x軸方向	1	1	1	1	1

1.3 結果と考察

4変数の組み合わせによる81個の等方性モデルについて、いずれも高い3次元等方的なビーム配向と付加製造可能であることを確認した。圧縮試験に供した51個の試験片について、弾性率、オフセット応力、プラトー応力、吸収エネルギーと体積密度の関係を得た（図3）。いずれも高い正の相関が認められた。特に、体積密度が大きい領域では、ダイヤモンドラティスやTPMS Gyroidよりもプラトー応力や吸収エネルギーが優位であった。

内部構造の影響を明らかにするため、力学特性を試験片質量で除した結果を図4に示す。ストラット直径が大きくなると、弾性率、オフセット応力、プラトー応力、吸収エネルギーはいずれも高くなる傾向が認められた。同様に、分岐数が大きくなるといずれの力学特性も高くなる傾向が認め

られた。一方、ビーム長が大きくなると、小さい場合に比べて力学特性の可変域が広がる傾向が認められた。これに基づき、質量・体積一定のまま内部構造を変化させることで力学特性を変化させることが可能となる。ただし、材料試験機の容量により計測できなかった試験片を含めた検証が今後必要である。

また、樹脂試験片の衝撃圧縮試験より、高い衝撃吸収性を示した。比較的柔らかいTPE60A、TPE75A、TPU85Aでは体積密度の増加により最大衝撃荷重と最大変形量が抑制され衝撃吸収性が向上した。一方、比較的硬いTPU95AとPPでは体積密度42.1%で最大衝撃荷重が最大であり、本構造の動的圧縮特性の設計には、材料物性の影響を考慮する必要があることが明らかになった。

次に、ビーム長の重み係数を変えた4個の異方性モデルB～Eについて、高い3次元等方的なビーム配向と付加製造可能であることを確認した。図5に、試験片AとEの応力－ひずみ関係を示す。重み係数によりモデルの体積密度が変化するため、応力値を試験片質量で除して表記した。z軸への

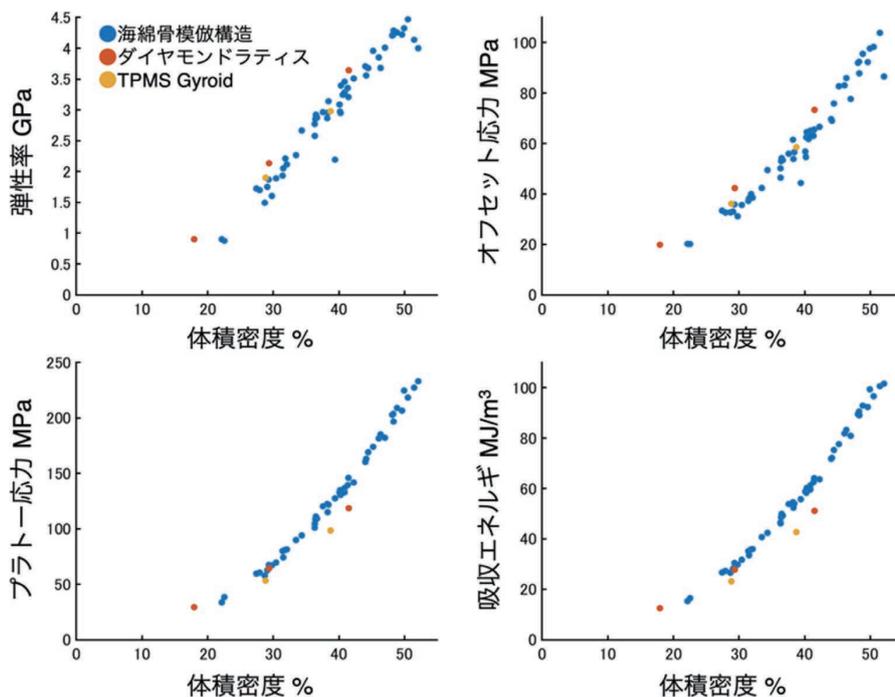


図3 等方性海綿骨模倣構造の力学特性と体積密度の関係

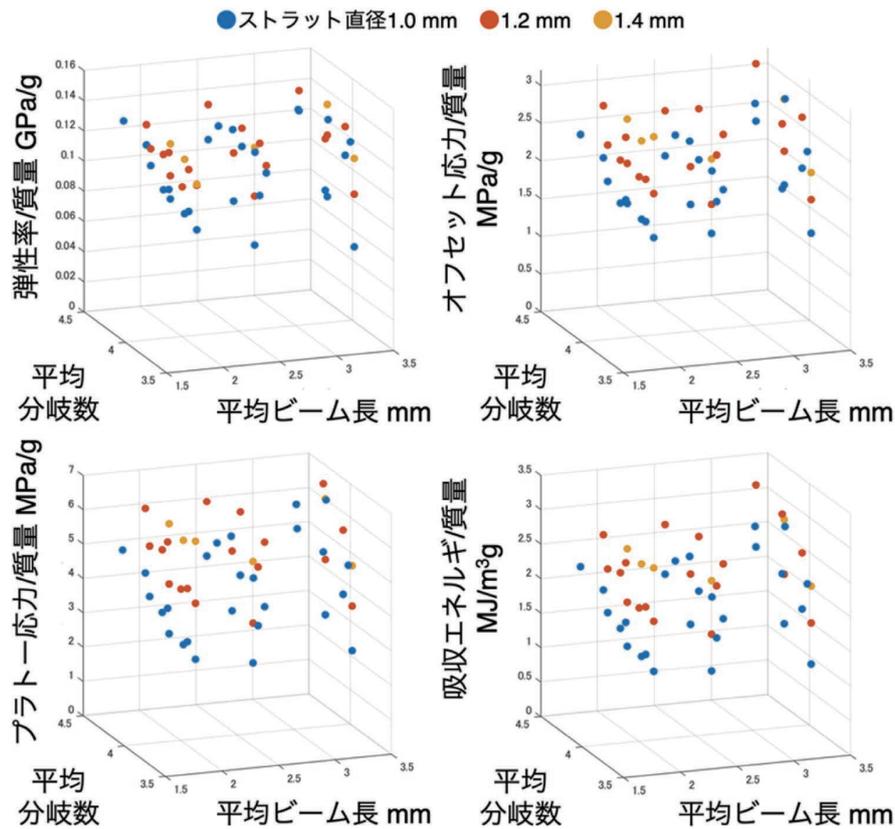


図4 等方性海綿骨模倣構造の力学特性と構造特性の関係

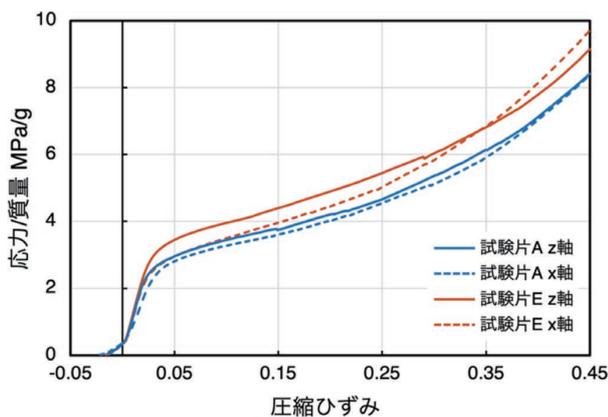


図5 異方性海綿骨模倣構造の応力－ひずみ関係

配向に応じてビーム長が大きくなるような分布を与えると、 z 軸圧縮と x 軸圧縮の応力－ひずみ関係に明らかな差が生じ、低ひずみ領域では z 軸圧縮の場合で応力が高く、中ひずみ領域では x 軸圧縮で高くなる傾向が確認された。いずれの方向も、質量あたりの応力値は等方性試験片Aより低下しなかった。以上から、ビーム長分布により、力学

特性を低下させることなく力学的異方性が付与できることが実証された。本手法は、他のラティス構造にも適用できると考えられる。ただし、試験片空孔が充填されると体積密度の影響が支配的になるため、大きなひずみ領域までの吸収エネルギーには異方性が生じにくく、このため中ひずみ領域では x 軸圧縮の応力値が z 軸圧縮よりも大きくなったと考えられる。

2. 発表（研究成果の発表）

- [1] Satoshi Yamada, Masahiro Todoh, Geometrical features of cancellous bone and biomimetic design for porous implants, The 6th Japan-Switzerland Workshop on Biomechanics (JSB2023)、グランドパーク小樽、2023年8月30日。
- [2] 岡田慎平、山田悟史、鈴木逸人、東藤正浩、海綿骨模倣による確率的ラティスの力学特性

評価、日本機械学会 M&M2023 材料力学カンファレンス、筑波大学、2023年9月29日。

- [3] 西村亮彦、山田悟史、鈴木逸人、東藤正浩、傾斜構造を有する海綿骨模倣確率的ラティス、日本機械学会 M&M2023 材料力学カンファレンス、筑波大学、2023年9月29日。
- [4] 山田悟史、生体骨の構造・力学特性を模倣したエネルギー吸収材の開発、日本機械学会バイオエンジニアリング部門第10回頭部外傷症例解析研究会、上智大学、2024年2月22日。
- [5] 山田悟史、西村亮彦、鈴木逸人、東藤正浩、海綿骨模倣構造を用いた樹脂身体保護材の衝撃圧縮特性、日本機械学会第36回バイオエンジニアリング講演会、名古屋工業大学、2024年5月11日。