

論文の内容の要旨

連続的内部構造変調による機能構造体の光造形 (Data processing of stereolithography for functional materials with continuously modulated internal structure)

氏名 鈴木 博祐

はじめに

本研究の目的は、理想的な機能構造体の実現である。なお本研究の成果である新規 AM データ処理プロセス、新規構造定義については、特許申請済みである。

機能構造体とは、内部構造や表面構造により、中実構造では本来有することのない機能を持つ構造体である。例えば骨や樹木は、高度に最適設計された内部構造を持つ極めて優れた機能構造体であり、近年研究が盛んなメタマテリアルも機能構造体である。

近年注目を浴びている Additive Manufacturing(AM, 3D printing)技術を活用すれば、既存の製造プロセスでは実現困難な、複雑な内部構造を持つ構造体が可能である。これは、旧来、造形不可能とされていた、より微細な領域に対する設計行為によるマクロスコピックな物性制御が可能になったことを意味する。つまり骨のように、環境に対し、剛性や柔軟性が最適化された微細な構造を持つ、機能構造体の設計・実現も可能となり、新たな設計思想でのマクロスコピックな物性の制御が行える可能性を有している。即ち、既存のプロセスでは実現し得なかった革新的な機能構造体を実現できる可能性がある。

しかしながら、AM によって造形の自由度は大きく拡大したが、その自由度を活かす設計手法は確立していない。例えば、ユニットセルを周期配置する構造定義を用いた設計では、ユニットセル毎に物性が離散化され、またユニットセル間の接続面が不連続になるため、骨のように、異なる物性を持つ構造を連続的に接続させた構造を実現することは困難である。つまり、微細な内部構造から、大きな外形まで、全設計領域で任意に設計可能なマルチスケールな構造定義手法の確立が肝要である。加えて、微細な内部構造を有する三次元構造体について AM 造形やシミュレーションを行う場合、構造体の微細化に

伴って、データ量や計算コストが指数関数的に増加する問題が挙げられる。これらは微細な内部構造設計によるマクロスコピックな物性制御を行う上で大きな課題である。

本研究では、理想的な機能構造体の実現のために、新規 AM データ処理プロセスと新規構造定義を提案し、提案手法の有用性を実証した。

骨の構造は階層的な多孔質構造となっており、内部構造が約 $100\ \mu\text{m}$ 、外形スケールが $10\sim 100\ \text{cm}$ 程度である。内部構造スケールと外形スケールの比を微細度と定義すると、骨の微細度は $10^3\sim 10^4$ といえる。また骨の内部構造は、局所的に異なる空孔の空隙率、空孔径、異方性を持っていながら、内部構造全体としては連続的に接続された構造となっている。本研究ではこのような構造を非周期的異方性多孔質構造と呼ぶ。即ち、理想的な機能構造体の実現を目的とし、少なくとも骨を超える機能を有する機能構造体であるためには、微細度 $10^3\sim 10^4$ 以上の非周期的異方性多孔質構造である必要がある。しかしながら、そのような構造体の実現のためには

1. 構造体の高微細度化が従来の AM データ処理プロセスでは困難
2. マルチスケールな非周期的異方性多孔質構造体の構造定義の不在

という 2 つの課題が存在する。本研究では、これらの課題を新規 AM データ処理プロセス、新規構造定義を確立することで解決した。

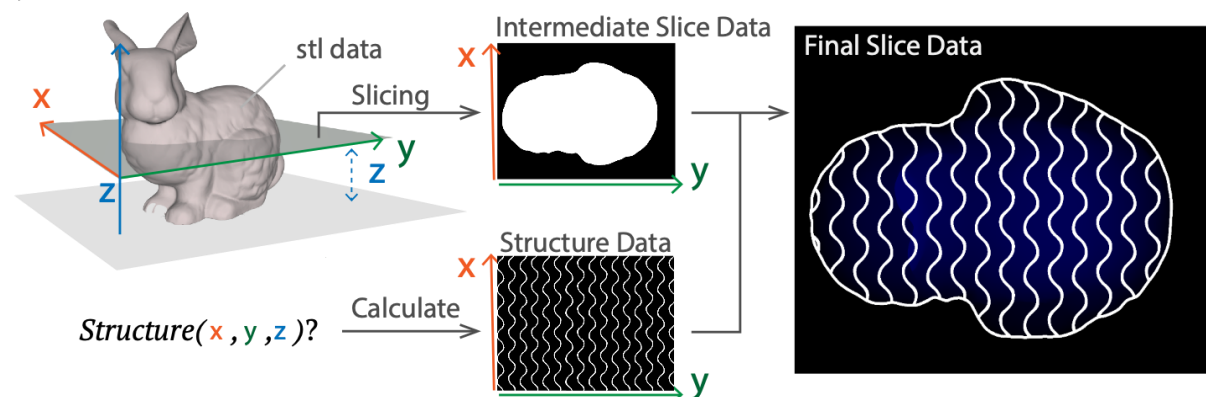
理想的な機能構造体実現のための新規提案手法

一般的な AM プロセスでは「1. Modeling」「2. Slicing」という 2 段階のデータ処理プロセスを経て得られた造形データを用いて造形を行なう。Modeling は目的造形物のモデルデータ (*.stl 形式) を CAD ソフトウェアなどを用いて生成する行程である。Slicing はモデルデータから造形に使用する造形データを得る行程であり、通常、モデルデータを輪切りにスライスした断面データである。複雑な内部構造を持つ構造体の造形データを得る場合、一般的には Modeling 段階において適当なアルゴリズムを利用し、内部構造を自動生成する手法が考えられるが、微細度 10^3 のモデルデータはデータサイズが 1TB 程度と膨大であるため、自動生成するための計算コストのみならず、後の Slicing 行程における計算コストも莫大なものとなる。そのため従来の AM データ処理プロセスでは、微細度 10^3 を超える構造体の実現は困難であった。

本研究で提案する新規 AM データ処理プロセスでは、図 1 のように、微細な内部構造を Modeling 段階で生成せずに、Slicing 段階で構造判定式 $Structure(x, y, z)$ を計算することで生成する。これにより Modeling 段階での計算コスト、モデルデータサイズが劇的に低減され、Slicing においては GPU による並列計算処理が可能のため、高微細度な構造体の実現可能となる。 $Structure(x, y, z)$ を適切に定義すれば、原理的にはどのような内部

図 1. 新規 AM データ処理プロセスの概念図。外形データ(stl data)をスライスし得られた断面データ(Intermediate Slice Data)と構造判定式 $Structure(x, y, z)$ によって得られる内部構造データ(Structure Data)の積を執ることで最終造形データ(Final Slice Data)を得る。

構造でも生成可能である。このような新規 AM データ処理プロセスを本研究室で開発している光造形法 AM 装置「RECILS」に組み込むことで、微細度 10^4 を超える構造体の実現を可能とした。



本研究では新規構造定義として、設計領域をユニットセルに区切り、次のような $Structure(x, y, z)$ によって構造定義を行なうことを提案した。これを連続的内部構造変調された構造体と呼ぶ。

$$Structure(x, y, z): \left| \sum_i a_i(x, y, z) Cell_i(x, y, z) \right|^2 < t(x, y, z)^2$$

ここで i はユニットセル番号である。 $Cell_i(x, y, z)$ はあるユニットセル内の内部構造を決定する陰関数曲面 ($f(x, y, z) = 0$) の左辺である。 t は陰関数曲面に対し、厚みを設定するパラメータであり、空隙率を制御することが可能である。 $a_i(x, y, z)$ は隣接するユニットセルの内部構造を連続的に接続するための重み関数である。 $Cell_i(x, y, z)$ は任意の陰関数曲面を利用可能であるが、本研究ではジャイロイド極小曲面に対し、構造制御パラメータ関数 $B_i(x, y, z), \phi_i(x, y, z), i = x, y, z$ (以下 B_i, ϕ_i) を加えた、次のようなパラメトリックジャイロイド陰関数曲面(以下 parametric gyroid)を利用する。

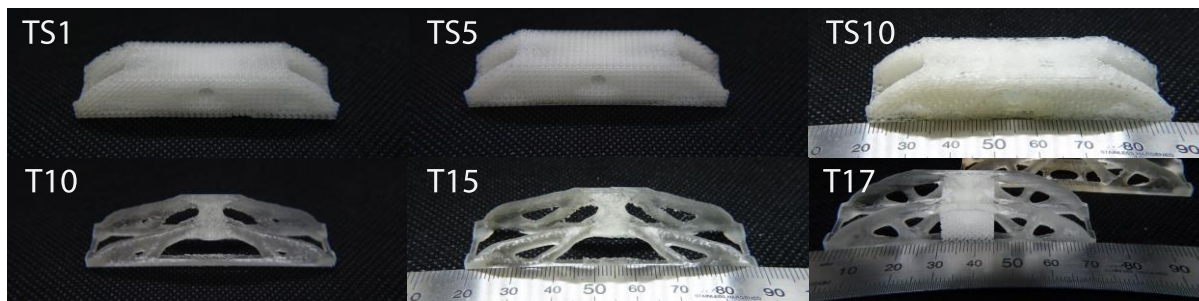
$$B_z \sin(\phi_x) \cos(\phi_y) + B_x \sin(\phi_y) \cos(\phi_z) + B_y \sin(\phi_z) \cos(\phi_x) = 0$$

parametric gyroid は、パラメータ関数 B_i, ϕ_i により、内部構造の空孔径、異方性を制御することが可能である。即ち parametric gyroid の左辺を $Cell_i(x, y, z)$ として採用した $Structure(x, y, z)$ を定義すると、パラメータ関数 B_i, ϕ_i, t により、非周期的異方性多孔質構造の制御が可能となり、局所的な異方的ヤング率制御が可能となる。

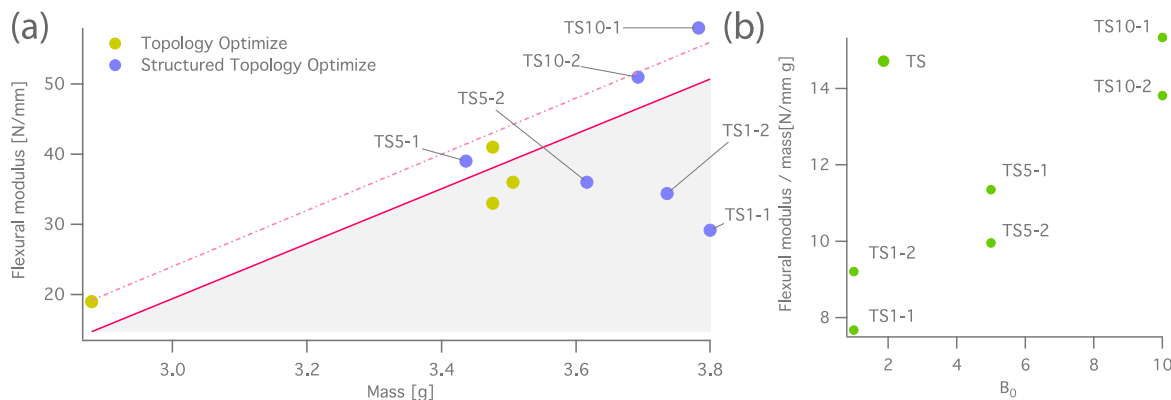
新規提案手法の有用性の検証

新規 AM データ処理プロセス、新規構造定義の有用性を示すために、構造最適化手法の一つであるトポロジー最適化によって外形設計を行い、内部応力に応じて parametric gyroid を制御し、剛性、緩衝性に優れた内部構造を持つ新規機能構造体を設計、造形し、剛性評価を行なった。

parametric gyroid の制御に関して, 内部応力に応じた異方的構造変化の大きさを決定する係数 B_0 を B_i 中に定義し, 変化 ($B_0 = 1, 5, 10$) させ新規機能構造体サンプル TS1, TS5, TS10 の造形を行なった. また中実構造体との比較のために, トポロジー最適化の設計領域に対する設計充填率(空隙率, 質量)を変化させた中実構造体サンプル T10, T15, T17 の造形を行なった. 図 2 は実際に RECILS を用いて造形したサンプル写真である.



は中実構造体よりも単位質量あたりの曲げ弾性率において優れていることを意味する. b) 新規構造体の内部応力に応じた異方的構造変化の大きさ B_0 と曲げ弾性率の関係. 横軸: B_0 , 縦軸: 単位質量あたりの曲げ弾性率.



これらのサンプルについて, 三点曲げ試験によって剛性(曲げ弾性率)を評価したものが図 3 である. 図 3(a)の赤点線よりも上にプロットされた新規機能構造体(紫プロット)TS10-1 は, 中実構造体(黄緑プロット)よりも, 単位質量あたりの曲げ弾性率が大きいことを意味し, 剛性に優れていることがわかる. また, 図 3(b)は内部応力に対する異方的構造変化の大きさと, 単位質量あたりの曲げ弾性率の関係が単調増加であり, 異方的内部構造制御により, 等方的な内部構造をもつ構造体 TS1 よりも, 少なくとも 1.4 倍程度, 曲げ弾性率を向上可能であることを示している. 加えて, 新規機能構造体は多孔質構造であるため, 緩衝性において, 中実構造体よりも優れている. つまり緩衝材としての機能を有しつつも, 設計荷重に対してトポロジー最適化と同等以上に最適化された高機能構造体を実現された. この結果は, 本研究で提案した新規手法の有用性の高さを強く示すもので

図 2. 剛性評価を行なった造形サンプル. トポロジー最適化を用いて, 三点曲げ試験を想定した設計荷重により得られた最適構造を基に作製. 中実構造体サンプル T10, T15, T17 は, T17 写真のように中央部にサポート構造を付加し造形を行なった後, サポート構造を除去し作製した. T10, T17 以外は, 造形誤差評価の為に 2 個ずつ作製し, 剛性評価を行なった.

ある.

結論

本研究で提案した新規 AM データ処理プロセス, 新規構造定義により, 微細度 10^4 以上の非周期的異方性多孔質構造を持つ構造体が実現可能となった. 提案手法は今後さらに進むであろう AM 装置の大型化, 高解像度化に充分対応可能であり, AM 技術の発展とともに, ますますその有用性が高くなると思われる. また本 AM プロセスを用いれば, 新規機能構造体の探求・創造だけでなく, 一般的にはシミュレーションが困難なデータサイズの構造体を, 実際に造形し, 検証することが可能となり, 様々な研究分野での活用が期待される.

提案手法を用いて創造された新規機能構造体の剛性評価により, 多孔質構造であっても, トポロジー最適化を用いた中実構造体と比べて, 同等もしくはそれ以上の剛性を実現可能であることを示し, 提案手法の有用性を実証した. 本研究では剛性向上を目的として構造設計を行なったが, 断熱性, 吸湿性, 吸音性など, 多孔質構造の持つ他の要素を向上することも可能であり, 数種類の要素機能を制御することが可能となり, 各応用に最適化した構造設計が可能である.