

博士論文
Doctoral Dissertation

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)

平成 31 年 2 月 博士 (理学) 申請
A Dissertation Submitted for the Degree of Doctor of Philosophy
February 2019

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻
Department of Physics, Graduate School of Science,
The University of Tokyo

鈴木 博祐
Hirosuke Suzuki

Abstract

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。

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の実現可能である。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指針は確立されていない。例えば、ユニットセルを周期配置する構造定義が存在するが、このような指針ではユニットセル毎に物性が離散化されたり、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設計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、マルチスケール設計可能な新たな構造定義と定義された構造の実現手段を提案する。具体的には、新規 AM データ処理と陰関数曲面を利用した新規構造定義を開発・提案し、本提案の有用性の検証と実証を行う。

本研究の提案は、極めて少ないデータ量、計算コストで、連続的に変形制御した任意の内部構造をもつ構造体の造形が可能とする。これは、骨のように連続的な形状変形をしながら、空隙率、空孔径、構造の異方性などの内部構造が任意制御された機能構造体の造形が可能であり、局所的に弾性率などの物性を任意に制御した構造体の実現可能であることを意味する。

このように局所的な構造設計・物性制御を用いるという構造定義と、軽量なデータ処理を用

いた実現手法により、マクロスコピックに軽量高剛性高緩衝性を有する機能構造体の設計・造形を行い、実現された機能構造体の剛性評価を行うことで、本提案の有用性を実証した。

Functional materials have characteristics based on their internal or surface structure which makes them uniquely different from simple solid materials. Wood and bone are notable examples, both having highly optimized internal structures for various functional properties, such as weight, rigidity, and shock-resistance. Metamaterials, which have attracted a lot of recent attention, are also examples of functional materials.

Additive Manufacturing (AM, or 3D printing) technologies make it possible to realize ultrafine structured complex objects which are difficult to manufacture by traditional manufacturing processes. This enables the design of microscopic structures within materials which allow for even greater control of material properties. More specifically, we are now able to design and realize arbitrary non-periodic porous materials with optimized microstructures, like bones. This suggests the possibility of creating new materials with not only microscopically unique characteristics, but also macroscopically optimized properties.

However, such methods to fully utilize this new paradigm of multi-scaled material design has not been established. For example, it is hard to realize continuous shape modulated structures, like that found inside of bones, by standard design methods, as these methods usually rely on the periodic alignment of unit cells. The discretization into unit cells results in discontinuous material properties, as well as incongruous inter-cell boundaries. Therefore, it is important to develop a new design method which naturally encompasses the whole of the multi-scaled structure, from the microscopic details to the macroscopic form. Additionally, there is the practical problem of rising costs in regards to memory size and computation power when trying to define or simulate the properties of such ultrafine structured objects.

However, much work needs to be done to develop suitable design techniques to fully utilize this new paradigm of multi-scaled material design. For example, it is hard to realize continuous shape modulated structures, like that found inside of bones, by standard design methods, as these methods usually rely on the periodic alignment of unit cells. The discretization into unit cells results in discontinuous material properties, as well as incongruous inter-cell boundaries. Therefore, it is important to develop new design methods which naturally encompass the complete range of the multi-scaled structure, from the microscopic details to the macroscopic form. Additionally, any new design method needs to address the practical problem of rising costs due to memory size and computation power when trying to define or simulate the properties of such ultrafine structured objects.

In this work, we propose a novel design and data production method for AM by using implicit surfaces, and demonstrate the practical usefulness of our technique. This technique enables us to realize macroscopic objects with ultrafine structure modeled to our AM machine's resolution limit, without increasing the size of data sets or calculation costs. We are able to model any internal structure with continuous shape change with

this method. As a result, we can, for example, control the local Young's modulus in a bone-like continuously changing structure by altering porosity, hole size, and structure anisotropy. In the demonstration, we design and model a macroscopically rigid and robust light-weight functional material, by controlling its microscopic structure. We demonstrate the validity of our method by experimental stiffness evaluation for a corresponding test model using our design and modeling method and created by stereolithographic AM in our laboratory.

目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究の背景	1
1.2	研究の目的	4
1.3	本論文の構成	5
第 2 章	Additive Manufacturing (3D printing)	6
2.1	Additive Manufacturing とは	6
2.2	加工方法としての AM の位置づけ	7
2.3	AM 造形物の特徴	7
2.4	一般的な AM プロセス	8
2.5	AM 技術の課題	11
第 3 章	AM 技術を活用した理想的な機能構造体の実現における課題と提案	13
3.1	機能構造体の設計法	13
3.2	AM 技術を活用した機能構造体の構造定義	15
3.3	先行研究の問題点	21
3.4	理想的な機能構造体の実現における具体的な課題	22
3.5	課題解決のための提案	26
3.6	まとめ	29
第 4 章	微細化限界構造体を実現する新規 AM データ処理	30
4.1	本研究で使用した AM 装置	30
4.2	微細化限界構造体の造形データ生成の課題	32
4.3	新規 AM データ処理	32
4.4	新規 AM データ処理を実現するための独自スライサーの開発	34
4.5	造形例とデータ圧縮率	36
4.6	まとめ	36
第 5 章	連続的構造変調による機能構造定義	40

5.1	構造体全体の設計	40
5.2	基本内部構造の設計	43
5.3	パラメトリックジャイロイド陰関数曲面を用いた連続的構造変調による構造体の造形例	50
5.4	本提案手法の意義・解釈	52
5.5	まとめ	53
第 6 章	トポロジー最適化を利用した機能構造体の作製と評価	54
6.1	軽量高剛性な機能構造体の設計	54
6.2	三点曲げ試験による機能構造体の評価	59
6.3	まとめ	61
第 7 章	結論と展望	62
7.1	まとめ	62
7.2	本研究の意義	64
7.3	今後の展望	65
	謝辞	68
	参考文献	71
付録 A	AM 手法の分類	76
付録 B	光造形法	78
B.1	光造形法とは	78
B.2	分類と特徴	78
B.3	光造形法における後処理	82
付録 C	パラメトリックジャイロイド構造の材料特性評価	83
C.1	周期依存性評価	83
C.2	厚み (充填率) 成分評価	89
C.3	構造成分評価	90

第 1 章

序論

本章においては、本論文の背景や目的など全体を概要する内容を記述する。

1.1 研究の背景

機能構造体とは

「機能構造体」とは、中実構造では本来有することのない機能を、内部もしくは表層の構造によって発現させた構造体を指す。

機能構造体は自然界に多く存在し、例えば骨や樹木は、軽量性、剛性、断熱性、緩衝性、保水性などの様々な要素において、高度に最適化された極めて優れた天然の機能構造体である [1]。また、蝶の虹彩は三次元フォトニック結晶構造を持つ鱗粉による効果であり、これも機能構造体の一種である [2]。

骨の構造的特徴:非周期的異方性多孔質構造

骨や樹木の優れた特徴は、それらの内部構造が多孔質構造であることに由来する。ここで、非常に優れた機能構造体の例として、骨の構造的特徴について述べたい。

骨の内部構造は大きく分けると緻密層である皮質骨、多孔質層である海綿骨に分けられ、海綿骨の構造スケールはおおよそ $100 \mu\text{m}$ であり、 $10 \sim 100 \text{ cm}$ 程度の外形形状の内部に皮質骨と海綿骨が混在した階層構造になっている。ここで構造体の外形サイズと内部構造サイズの比を微細度と定義すると、骨の海綿骨までの微細度は $10^3 \sim 10^4$ 程度となる。

海綿骨の構造は、概ね内部主応力の大きさにより充填率 (空隙率) や空孔径が決定され、内部主応力方向によって、構造の異方性が決定され発達することが知られている [3]。それらの局所的に異方性の異なる構造が連続的に接続されることで、過度な応力集中を防ぎ、構造体全体としての強度を確保している。

つまり、骨のような優れた機能を有するためには、微細度 10^3 以上の多孔質構造が

- 空孔制御
 - 異方性
 - 充填率 (空隙率)
 - 空孔径
- 構造の連続的形状変化による接続

といった構造的特徴を満たすことが肝要である。このような構造を本研究では「非周期的異方性多孔質構造」と呼ぶ。

人工的機能構造体

身近な人工機能構造体としては、発泡スチロールに代表される多孔質素材が挙げられる。これらも多孔質構造を持ち、骨や樹木と同様に軽量であり高い断熱性能を持つ。特に、炭素材料や、金属による多孔質素材 [4, 5] や、マイクロラティス [6, 7] は非常に優れた機能構造体であり、海綿骨の持つ軽量性、緩衝性を有に超えている。しかしながら、これらの構造体は発泡製法に代表されるように、実現できる構造に制限が多く、空間内の任意の場所で、空隙率や空孔径、構造の異方性を自由に制御することは原理的に不可能である。即ち、骨のような非周期的異方性多孔質構造を実現することは出来ない。

人工機能構造体の中でも、近年、メタマテリアルと呼ばれる機能構造体の研究が盛んである。メタマテリアルは、主に波動現象の制御を目的とし、波長に比べて充分小さな構造を配置することで、中実構造では得られない物性を人為的に発現させている機能構造体である。既に様々な波動現象に対し実現されており、取り扱う波動現象によって、電磁メタマテリアル、音響メタマテリアルなどと呼び分けられ、機能構造体研究の中でもメタマテリアルは大きな研究分野となっている。

メタマテリアル研究の先駆けは、Smith らの分割リング共振器 [8, 9] であり、銅ワイヤーを規則的に配置することで、マイクロ波領域において負の屈折率を持つ電磁メタマテリアルである。

電磁メタマテリアルは主にリソグラフィ技術によって生成するため、二次元平面的な構造が多く見られるが [10]、三次元的立体構造を持つものも実現されつつある [11]。

Additive Manufacturing の登場

1981年に発明された Additive Manufacturing (AM, 付加製造, 3D printing) は、その技術的成熟・低価格化により、近年脚光を浴びている。AM を活用すれば、従来の製造プロセスでは実現不可能であった三次元的立体構造を実現することが可能であるため、新たな製造プロセスとして大きく注目されている。特に、その技術的発展に伴い、構造全体のスケールに対して非常に微細な内部構造を有する人工構造体を作製可能になりつつあるため、微細な内部構造を適切にデザインすることによって、マクロスコピックな材料物性を制御するというように、材料設計のコンセプトを根本から変える可能性を有している。つまり、先述した三次元的メタマテリ

アルといった立体的複雑形状を有する機能構造体の実現手法としても有力といえる。

実際に既に、AM 技術を活用した THz 帯導波管や、ハイパスフィルターの実現が報告されている [12]。特に Wegener らは二光子吸収を利用した光造形法 [13, 14] に基づく AM 技術を活用し、多くの三次元メタマテリアルを提案・実現している [15, 16, 17]。このように、AM 技術の登場により、メタマテリアルを含む機能構造体の研究は大きく加速しており、今までとは異なるコンセプトでの、マクロスコピックな構造材料の物性の設計・制御が実現されつつある。

つまり、旧来は「作れるものの中から適切な機能を有する材料を選択し、それらを組み合わせることによって所望の機能を実現する」というのが材料設計の基本的なコンセプトであった。一方、AM によって任意の立体構造の造形が可能となった場合、「必要とされる機能を実現するための材料構造自体をデザインし作る」というように、構造材料の特性自体を設計可能とするパラダイムシフトが起こると考えられる。つまり AM を活用することで、骨や樹木、さらに発泡材料よりも遥かに優れた機能を有する機能構造体の実現が可能であり、設計目的に高度に最適化された構造材料の実現が期待できる。

マルチスケール設計可能な構造定義の不在

しかしながら、そもそも、微細な内部構造から大きな外形までのマルチスケール (微細度 10^3 以上) な構造設計によって、マクロスコピックな物性を制御することを考える場合、どのような設計思想に従えばよいかという指針は確立されていない。例えば、力学的特性に対する構造設計法として、設計領域をユニットセル (単位胞) に区切り、ユニットセル内の構造設計を行い、周期配置する構造定義がよく取られているが、このような構造定義を行った場合、大きく構造の異なるユニットセルを接続した接合面が、不連続であるために、内部応力が集中してしまうという点と、設計された物性がユニットセル単位で離散化されるという問題点が挙げられる。解決策として、ユニットセルサイズを連続的に変化させることが考えられるが、その場合、変形の中心に設定するユニットセルに自由度が存在する。この自由度のために、場所によって大きく異方性が生じてしまい、結果的に、設計目標とは大きく異なる異方性を持つ構造を生む事となる。

実際の材料は、骨のように場所によって構造・性質の異なる内部構造が連続的に分布していることが一般的であるため、このような特性を有する人工材料を従来のユニットセル設計で実現することは、上記のような理由により困難である。そのため、人工構造のマクロスコピックな物性を実現するための、より一般化されたマルチスケール設計可能な構造定義の確立が求められている。

加えて上記のような複雑な内部構造を有する三次元構造体の AM 造形を考える場合、利用する AM 装置自体の性能向上も大きな課題である。現状では、造形機の手法や使用する素材、データ量、時間的コストなど様々な課題により、実際に造形可能な造形物は限られている。特に装置のハード的な側面だけでなく、造形データのハンドリングでも大きな課題が存在する。具体的には、構造の微細化に伴った造形モデルデータ量や計算コストの指数関数的な増大は大き

な問題であり、マクロスコピックな構造体全体の内部構造を、装置の限界性能の分解能で細かく設計された構造体の設計・造形を非常に困難なものとしている。

即ち、非常に微細な内部構造制御による、マクロスコピックな物性の制御といった、マルチスケールな構造設計を行うためには、構造の微細化に伴って増大するモデルデータ量や計算コストを減少させる手法の開発は重要な課題であるが、そのような構造定義は確立されていない。

マルチスケール設計可能な構造定義が存在しないという課題は、AM 技術のみではなく、物理分野全体に渡る重要課題である。もし自由にマルチスケール構造の設計、実現できれば、今までシミュレーションが困難であった様々なマルチスケールな物理現象に新たな知見を得られることは明らかである。

そこで、本研究ではマルチスケール設計可能な構造定義と、AM による実現手法を新たに提案し、任意の箇所で任意の物性を持つ内部構造を持つ機能構造体を実現可能な技術を開発・実現した。

1.2 研究の目的

本研究の最終的な目的は、理想的な機能構造体の実現である。

より具体的な目的としては、少なくとも骨を超える機能を有するために「微細度 10^3 以上の非周期的異方性多孔質構造体の実現」を具体的な目的とする。

実現手段と課題

AM 技術の発展に伴い、微細度 10^3 を超える構造体の実現や、様々な材料を利用することが可能となりつつある。つまり原理的には、AM 技術を活用することで、そもそも骨や樹木よりも優れた特性を持つ材料を用いて、高微細度な非周期的異方性多孔質構造体を実現可能であり、人工構造でありながら、骨や樹木のような環境に最適化した特性を凌駕する可能性がある。これは発泡製法を含む既存の加工プロセスでは得難い特徴である。そのため本研究では、AM 技術を理想的な機能構造体の実現手段として採用した。

しかしながら、従来のデータ処理法や構造定義では、

- 高微細度化に伴ったモデルデータサイズ、計算コストの肥大化
- 非周期的異方性多孔質構造体の設計を可能とするマルチスケールな構造定義の不在

といった問題が存在し、目的とする理想的な機能構造体の実現は困難であった。

本研究ではこれらの問題を解決するために、

- 新規 AM データ処理
- 新規構造定義

を提案・開発し、その有用性について検証を行う。

1.3 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。

第2章では、本研究で構造体の実現手法として活用した、AM技術について述べる。

第3章では、AM技術を活用した先行研究を紹介し、それを踏まえて、理想的な機能構造体実現における課題と提案を述べる。具体的な課題としては、

1. 高微細度な構造体の実現
2. 非周期的異方性多孔質構造体の構造定義の確立

の二点が挙げられ、この課題に対する新規提案の詳細を、後の第4, 5章で述べる。

第4章では、課題(1)である「高微細度な構造体の実現」を遂行するための新規提案として、微細度 10^3 以上の構造体の造形データの出力・造形を可能とする新規AMデータ処理と、そのために開発したソフトウェアについて述べる。

第5章では、課題(2)である「非周期的異方性多孔質構造体の構造定義の確立」を解決するための新規提案として、陰関数曲面を利用し、マルチスケールな非周期的異方性多孔質構造体設計を可能とする新規構造定義を述べる。ここで新規構造定義において利用できる陰関数曲面として、ジャイロイド極小曲面を説明し、ジャイロイド極小曲面をパラメトリック制御することで得られる、パラメトリックジャイロイド構造の定義を行い、その有効性について述べる。次章で行う機能構造体設計では、ここで定義したパラメトリックジャイロイド構造を利用する。

第6章では、新規AMデータ処理と新規提案構造定義を用いた機能構造体の設計・実現について述べ、本研究で提案の有用性を示す。具体的には、第5章で提案した構造定義を用いて軽量高剛性高緩衝性を持つ機能構造体を設計し、第4章で提案したデータ処理とAM技術により実現された機能構造体の剛性について、実験結果から議論する。機能構造体の外形設計には、構造最適化手法の中でも最も形状自由度が高いトポロジー最適化を利用する。

第7章ではまとめと今後の展望について議論する。

なお、本研究の第4章、第5章の内容については特許出願済である [18].

第 2 章

Additive Manufacturing (3D printing)

本章においては, Additive Manufacturing (AM, 3D printing) の基礎的な内容を記述する. ここでは主に参考文献 [19, 20] を参照しつつ, 執筆者の AM に対する見解を述べている.

2.1 Additive Manufacturing とは

Additive Manufacturing とは一般的に 3D プリンター, 3D プリンティング技術, 積層造形法, 三次元造形など呼ばれる技術・装置の総称である. 2009 年 1 月 13 日にフィラデルフィアで開催された ASTM (American Society for Testing and Materials) によって, それら技術・装置の正式な統一名称として「Additive Manufacturing (付加製造法)」が採択されている.

本論文でも Additive Manufacturing (AM) を採用し, AM 装置, AM 技術などと呼ぶこととする. ASTM で決定された AM の定義は「3D モデルデータに基づき, 材料を結合させる事で造形物を得る製造プロセスであり, 通常は積層行程によって行われる」である.

AM 技術の起源は 1980 年 4 月に小玉秀男氏が出願した特許「立体図形作成装置」[21] であり, その歴史は比較的浅いといえる. 当時, 小玉氏が提案した技術は紛れもなく光造形法であり AM 技術の原型であったが, AM 装置としての実用化には至らなかった. 実用化は米国の C.Hull 氏が 1984 年に出願した「Stereolithography」[22] と共に設立された 3D Systems 社によって実現され, 以降現在 (2018 年) に至るまで, AM 産業は主に米国が牽引し, 様々な AM 技術が発明・実現されている.

現在 AM 技術は ASTM において, プロセス毎に 7 種類に定義・分類されている (付録 A 参照). 一般的に“3D プリンター”と呼ばれているものは, 最も簡易で安価な材料吐出堆積型の Fused Deposition Modeling (FDM) を指す場合が多い.

AM プロセスによって, 材料選択の幅や造形物の物性的異方性の強弱, 解像度などにおいて長所短所が存在し, AM 装置の性能を限界まで引き出すためには, プロセス毎に造形データのモデリングやパラメータなどを熟考することが必要不可欠である.

本研究で用いた AM 装置は, 本研究室で独自に開発している装置で, 液槽重合型の Stereolithography (SLA, 光造形法) の一種である. 光造形法及び本研究で用いた一次元規制液面型

光造形法についてより詳しくは付録 B を参照されたい。

2.2 加工方法としての AM の位置づけ

ここでは一般的に AM と他の加工プロセスとの違いについて述べたい。

一般に加工方法を大別すると

- 変形加工・・・射出成形, 鋳造, 鍛造など
- 除去加工・・・切削, 旋削, エッチングなど
- 付加加工・・・めっき, 接着, 溶接など

に分類される。この分類では AM は付加加工となる。AM は付加加工の中でも表面処理や端面処理でなく、唯一構造体を造形可能であるという点において革新的な技術といえる。これ以降は、付加加工の中でも AM を取り上げて変形加工技術、除去加工技術についての比較を行う。

AM の最も大きな特徴は、加工対象内部の加工・造形が自由に行える点である。変形加工では、型抜き可能な構造でなければならないため、複雑な内部構造を加工することは困難であり、除去加工では、加工器具の届かない内部を加工することはできない。これらに対し、AM は構造体すべての領域を等しい制約条件で自由に加工・造形できるため、既存の加工方法では実現できなかった構造体の実現可能である。

一方、AM は材料の無駄がないために製造コストが安く思われがちであるが、大量生産する場合を考えると他の加工法に比べ、現状では原料コスト、時間コストの面で大きく劣るのが実情である。そのため AM は今の所プロトタイプ用の加工法として捉えられていることが多く、製品や実用化される際には他の加工法を用いることが多い。

しかしながら AM の本質的に優れた点は、他の加工法では実現不可能な構造体が作製可能であるという点である。本研究においては、その事を常に念頭に置き、AM で作られる構造体の探求を進めた。

2.3 AM 造形物の特徴

AM は積層造形とも称されることもある通り、その殆どの手法において、材料を一層ずつ積み重ねていくことによって造形を行う。つまり造形物には層の重なり方向があり、細かに見れば立方体を作ったとしても、造形物に異方性が生まれる。そのため材料や手法などの条件にもよるが、一般的に積層方向 (z 方向) と造形平面 (xy 方向) において、引張試験における破壊閾値が大きく異なり、等方的な性質をもつ構造体の造形は困難とされる。一方、本研究で用いた光造形法は層間同士が分子結合するため、比較的等方的な性質を持つとされている [23, 24, 25]。

また AM は他の加工法に比べて実現可能な立体構造の自由度が格段に大きいが、実際のところどんな立体構造でも作れるという訳ではない。具体的に言えば積層させるための土台が存在

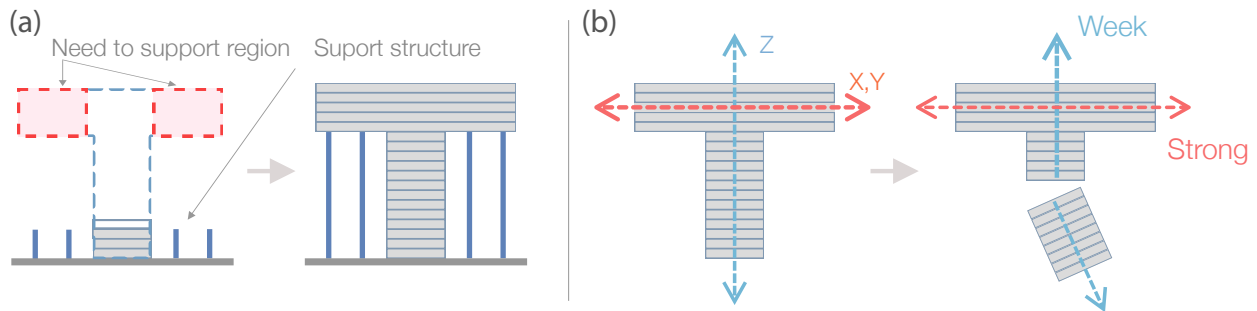


図 2.1 AM 造形物の特徴概略. a) 空中に浮いた立体は造形できないのでサポート構造を付加する. b) 積層方向には引張力に対して弱い特性を持つ.

しない領域には造形することは原理的に出来ない. これを解決するためにはサポートと呼ばれる構造を余分に造形し, 目的造形物のための土台を作るのが一般的である.

本研究で用いた光造形法においても, 立体的に造形不可能な形状を有する構造体はサポート構造を付加して造形を行う必要がある.

2.4 一般的な AM プロセス

AM における一般的な造形プロセスは以下の通りである.

1. Modeling (モデリング)
2. Slicing (層情報へのデータ変換)
3. Printing (造形)
4. Removal of prints (造形物の剥離)
5. Post processing (後処理)

以下順番に本研究で用いた光造形法での例と併せて詳細を述べる. 特に, 本研究では, 「1. Modeling」「2. Slicing」のデータ処理部について新規提案を行なったため, ここで, 既存の AM プロセスを詳しく紹介したい.

1. Modeling (モデリング)

造形物のモデルデータを作るのが最初のステップである.

最も一般的な方法は Fusion360 や AutoCAD, Rhinoceros などの Computer Aided Design (CAD) ソフトウェアを用いる方法である. 3D スキャナーを用いて既に存在する物体からモデルデータを作成することも可能である. CAD を用いれば原理上どんな構造体でも設計可能ではあるが, 実際には AM 装置の解像度などの制約があるため, 意図した造形物を得るためには, 使用する AM 装置の限界を理解して設計することが必要となる.

2. Slicing (層情報へのデータ変換)

作成したモデルデータを輪切りにスライスし、層毎にどのような条件で造形を行うかを記述したデータを作成する。この過程をスライシングと呼ぶ (図 2.2)。

通常、スライシングはモデルデータを*.stl, *.obj というデータ形式に変換した後に行う。いずれの形式も立体構造をポリゴン表面で表現した情報であり、三角形のファセットの位置情報が記述されている (図 2.2 中の立方体モデル)。そのため滑らかな曲面を得るためにはファセットの数を多くしなければならず、CAD 上でベクターで表現されていた曲線をスカラーで表現することになるため、表面積が大きく、滑らかな曲面を持つ構造ほどデータが肥大化する傾向にある。

*.stl, *.obj で与えられたモデルデータから該当ファセットを割り出し、輪切り情報を得るためのソフトウェアをスライサーという。先述したサポート構造はこの段階で付加される場合が多い。

スライサーによって面情報を取得したのち、続けて AM 装置に合わせたデータ加工を行う。最終的に出力されるデータは、画像情報や軌跡情報等、様々である。本研究では画像情報を用いている。

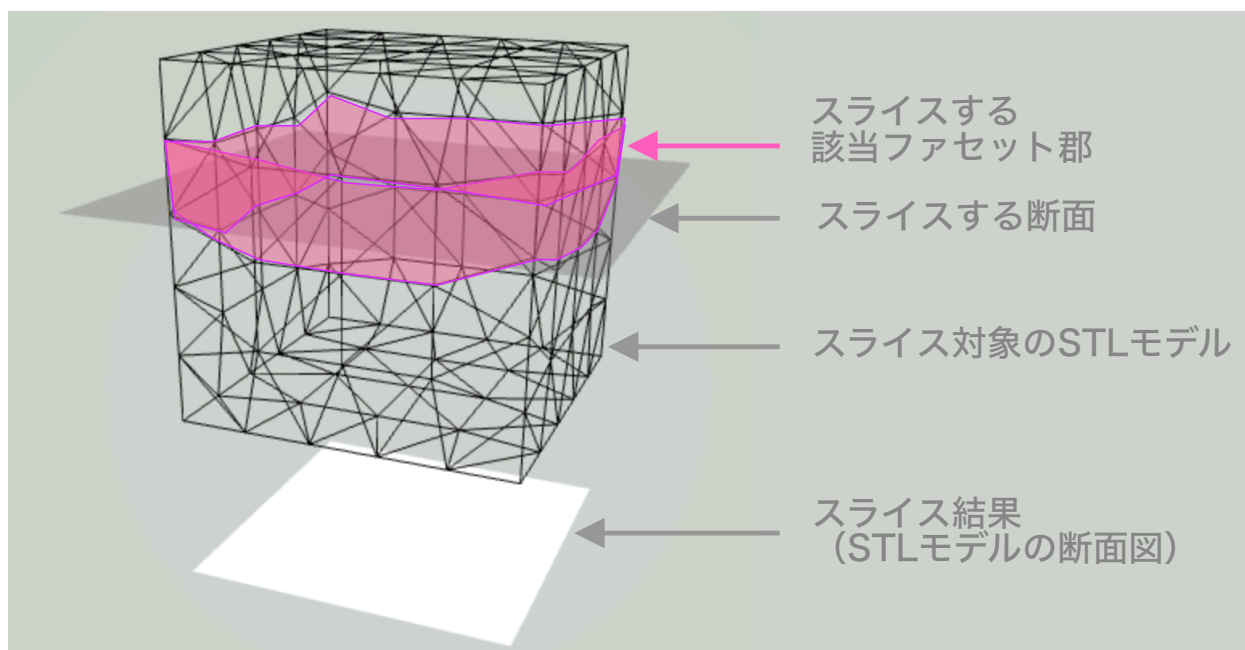


図 2.2 Slicing (層情報へのデータ変換)。画像は本研究で開発したスライサーソフトウェアの動作画面である。立方体 STL モデルデータをスライスすることで、白い正方形断面図を得ている。

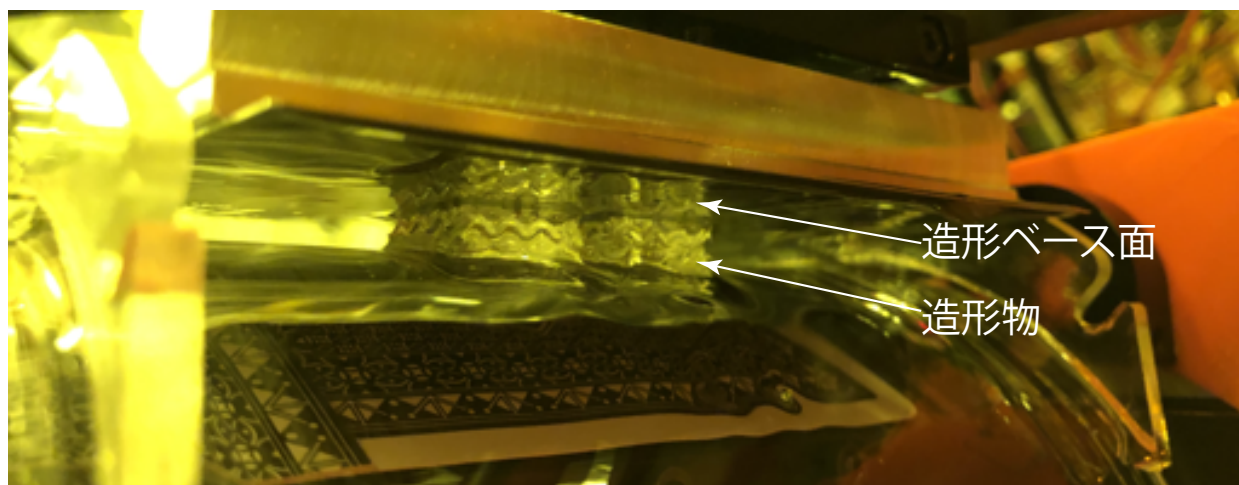


図 2.3 Printing (造形). 本研究で用いた AM 装置「RECILS」のプリンティング行程. 造形ベースが上部についており, 造形物が逆さ吊りの状態で造形が行われる.

3. Printing (造形)

スライサーによって得られたデータを元に AM 装置を動かし, 造形物を作製する. 造形物は, 造形ベース面と呼ばれる面に対して積層を繰り返すことによって造形される.

4. Removal of prints (造形物の剥離)

AM 装置から造形物を剥がし造形物を得る. 本研究で用いた AM 装置は装置本体から造形ベース面を分離できるため, 分離後に薄刃のカッターなどを用いて造形ベース面から造形物の剥離を行う. 造形段階で破損しなかった構造が, この段階で破損する場合も多い.

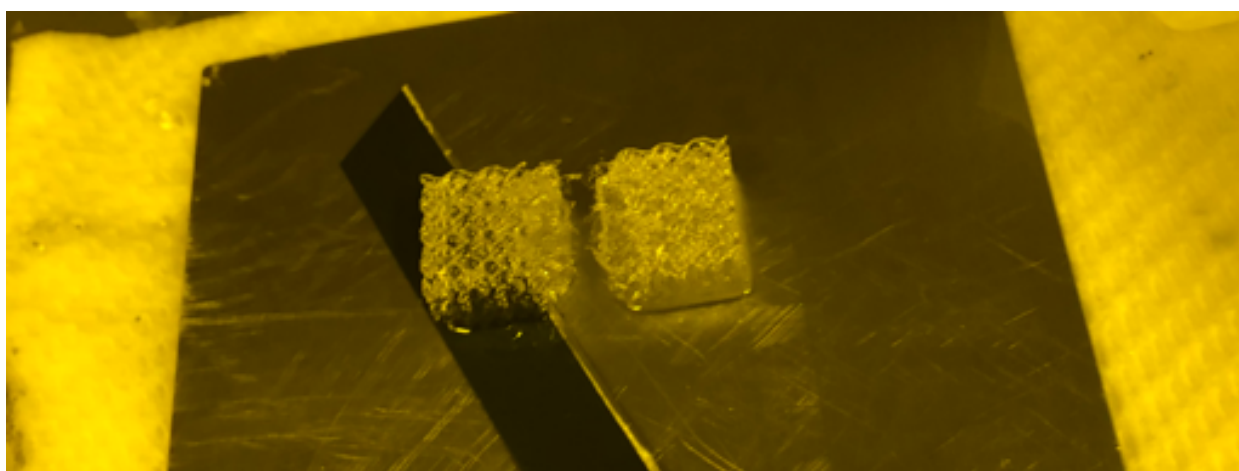


図 2.4 Removal of prints (造形物の剥離). プリントされた造形物を造形ベース面から引き剥がす.

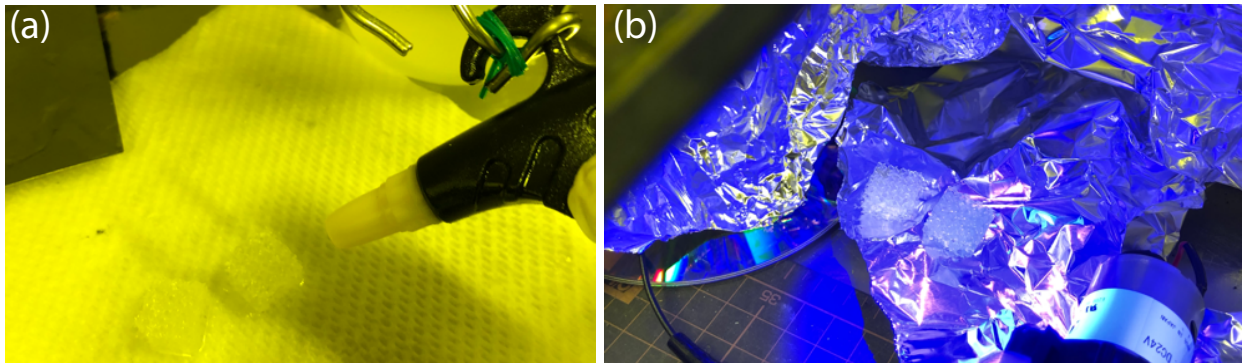


図 2.5 Post processing (後処理). a) エアダスターやエタノールを用いて付着した液体状の光硬化樹脂を取り除く (脱液・洗浄). b) 硬化が不十分な光硬化樹脂を UV ランプを照射し硬化させる (後硬化).

5. Post processing (後処理)

AM 手法によって後処理の方法は大きく違うが、造形後に造形物の物性や手触りを向上させるために行う作業である。本研究では光造形法による AM 装置を用いたため、脱液・洗浄・後硬化といった後処理が必要となる。他の後処理については付録 B を参照されたい。

2.5 AM 技術の課題

AM 技術の一般的な課題は

- 解像度向上
- 材料開発
- サポート構造の構造および生成方法
- モデルデータの生成

などが挙げられる。本研究で研究対象としているのは「モデルデータの生成」である。

AM 技術の発展により、造形可能なサイズ、解像度の向上や異種材料の造形などが可能になっており、その装置性能を最大限に引き出すモデルデータを作ることが難しくなりつつある。

データ形式として最も一般的な *.stl 形式は面情報のみを持つため、基本的には異種材料の出力には対応していない。そのため、ボクセル形式の AM 用の新たなデータ形式である *.fav 形式などが定義されつつある [26]。ボクセル形式とは、設計空間を立方体格子で区切り、単位体積要素 (ボクセル: volume + pixel) 毎に情報を配置するデータ形式である。*.fav 形式では、異種材料の混合率や設計強度など、ありとあらゆる設計情報が記述可能であるため、次世代の AM 技術のデータ形式として優れている。特に、異種材料による傾斜素材などは AM ならではの機能構造体であるといえる。しかしながら、ボクセル形式であるためデータサイズが *.stl 形式と比べて巨大であることから、単一素材のみで細かな内部構造を記述する目的に対しては

*.stl 形式の方が優れているといえる。

一方で、造形物の大型化・高解像度化も進んでいるため、*.stl 形式でさえも AM 装置で表現できる解像度と同程度に滑らかな曲面情報を記述しようとする、データ量が肥大化してしまい、巨大な外形を持つ構造体に対して、微細な構造を作り込むのが困難であるといえる。

本研究では、この課題に対して新規 AM データ処理を提案し、AM 装置性能の限界まで高微細度な内部構造を持つ構造体の実現手法を確立した。

第3章

AM 技術を活用した理想的な機能構造体の実現における課題と提案

本章では、AM 技術を活用した機能構造体の先行研究について述べ、それを踏まえて理想的な機能構造体の実現における課題を述べる。

3.1 機能構造体の設計法

先行研究を紹介する前に、機能構造体の設計法について述べたい。

機能構造体の設計法は、主に物理的知見や自然界に存在する構造の模倣など既知の知見に頼る方法と、何らかの構造最適化手法を用いる方法がある。

特に自然界に存在する機能構造体は往々にして優れた機能を有しているため、その模倣は有用である。一方で極めて高度に環境に最適化されているため、設計として考慮しなくとも良い拘束条件も含まれている。そのため、模倣するとしても、最終的には機能の発現理由を理解し人為的に構造最適化を行ったほうが、より優れた機能構造体を実現できる事が多い。

構造最適化手法には「寸法最適化」「形状最適化」「トポロジー最適化（位相最適化）」が存在するが、寸法最適化 [27] および形状最適化 [28] は、形状自由度が低く、初期条件として与えられた形状を大きく逸脱した最適化構造を得ることが出来ない。つまり、最適構造に近い形状が既知の場合に有用な最適化手法であり、上記のような模倣的構造の最終的な構造最適化に向いている。

一方でトポロジー最適化 [29, 30] は、初期条件として形状を与える必要がなく、設計領域のみを与え、最適構造を得る。つまり、設計領域の中で自由に構造最適化が行われるため、最も形状自由度が高い。そのため、得られる最適形状は複雑な立体構造である場合が多く、AM との親和性が高い最適化手法である。初期条件として設計領域のみを与えればよいため、トポロジー最適化によって得られた外形形状を初期条件とし、更に寸法、形状最適化を行うなどの最適化行程も考えられる。ここでは構造最適化手法の中でも特に AM と共に議論される事の多いトポロジー最適化について詳しく述べたい。

3.1.1 トポロジー最適化とは

トポロジー最適化では設計変数に材料の要/不要を判定できる変数を用いて構造を決定するため、設計領域内において自由に形態を変化させて最適化が行われる。最適解として得られる形状の多くは従来の加工方法では実現不可能な三次元構造であるため、AM 技術の発展と共に注目されている構造最適化手法である。

設計事例としては強度を保ちつつ軽量化する事例が多いが [31]、設計変数や拘束条件、目的関数を変更することで軽量高剛性、コンプライアントメカニズム [32]、高放熱特性、目的の流束を持つ流路など様々な機能構造体の設計が可能である。

トポロジー最適化は既に市販の解析ソフトウェア (COMSOL, OPTISTRUCT, OPTISHAPE-TS, Fusion360 など) に組み込まれ手軽に利用可能な手法であるが、その実装方法としては最も簡便な「密度法」が用いられている場合が多く、主に力学的構造最適化が可能である。

3.1.2 グレースケール問題と AM 技術

トポロジー最適化の中でも、特に均質化法 [29]、密度法 [30] の場合、材料の要/不要を連続変数として最適化を行うため、途中解および最適解として材料の要/不要の中間状態であるグレースケールが発生する問題が知られている (図 3.1)。

グレースケールは通常製造不可能であるため、これを除去するために、最適化途中において中間状態に対してペナルティを設けたり、得られた解に対してスムージングや閾値によるフィルタリングなどを行って、材料密度分布が連続的な最適解を 0, 1 に変換することで最終形状を得る。つまり厳密に言えば、それらの処理によって真の最適形状とは異なる最終形状を得ることになる。

例えば、密度法 (SIMP 法) による中間状態 (密度) は、局所的な弾性率 ε 、密度 ρ 、ペナルティ

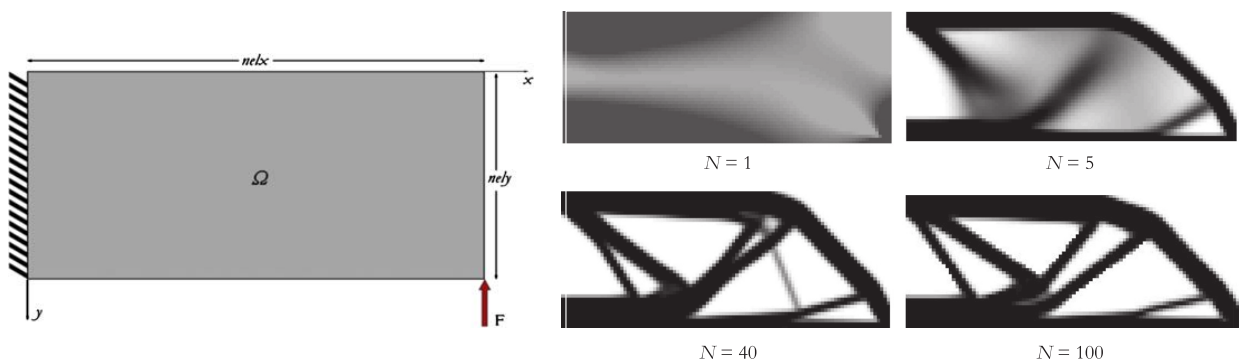


図 3.1 「密度法」によるトポロジー最適化とグレースケール問題 (図は [33] より抜粋). 左図:設計領域に対して荷重などの拘束条件設定する. 右図: 灰色 (グレースケール) で表される中間密度領域がペナルティを設けることで試行回数 N と共に減少していく様子.

係数 φ を用いて,

$$\varepsilon = \rho^\varphi$$

という関係式によって表される。通常ペナルティ係数 φ は、 $\varphi > 3$ とし、中間状態の要素に対し大きく弾性率を低下させるペナルティ係数を採用する。

AM を用いれば、要素内に任意の空隙率の構造を作り込むことができるため、この中間状態の密度と弾性率との関係式を、AM で実現できる充填率と弾性率の関係式と一致させることで、真の最適形状に近い最終形状を実現することが現実的に可能であるはずである。

一方で、旋光性や屈折率などを最適化するといった、光学的特性などについての構造最適化は、中間状態に対する物理的解釈が困難であるために難しいと考えられる。中間密度に対して物理的解釈・実現が困難な構造最適化をトポロジー最適化によって行うためには、最適化途中においても原理的に中間密度が全く発生しない比較的新しいトポロジー最適化手法であるレベルセット法 [34] を用いる事が考えられる。

3.2 AM 技術を活用した機能構造体の構造定義

ここでは AM 技術を活用した機能構造体 (特に力学的機能構造体) を設計に用いた構造定義の方法によって分類して紹介する。尚、ここで紹介する研究は、いずれも 2014 年以降の比較的新しい研究成果であり、AM 技術を活用した機能構造体の研究が新しい研究分野であることを意味する。

分類は次のとおりである。

- 一体構造体 (トポロジー最適化)
- ユニットセル
 - 二次元的ユニットセル
 - 三次元的ユニットセル
 - 変形格子ユニットセル
- その他

上述したトポロジー最適化は、主に一体構造体やユニットセルの構造設計に用いられる。構造体外形サイズと内部構造のサイズの比を微細度として定義し、一体構造体 (トポロジー最適化) やユニットセルによって設計された構造体と、他の手法で作られた発泡材料 [5] やマイクロラティス [6]、そして骨と比較すると、およそ図 3.2 のようになる。

微細度が高い程、細かな内部構造を持つ構造体である。既存の AM 技術を用いた構造体は、後述するモデルデータサイズの肥大化の問題により微細度としては、骨やマイクロラティスに比べると大きく劣ることがわかる。

一体構造体は通常、内部構造を持たない構造体を指し、トポロジー最適化などにより設計が行われる。つまり、微細度で言えば 1 となるが、トポロジー最適化により、内部構造を生成することも可能であるため、図 3.2 のように表記している。一体構造体 (トポロジー最適化) とユ

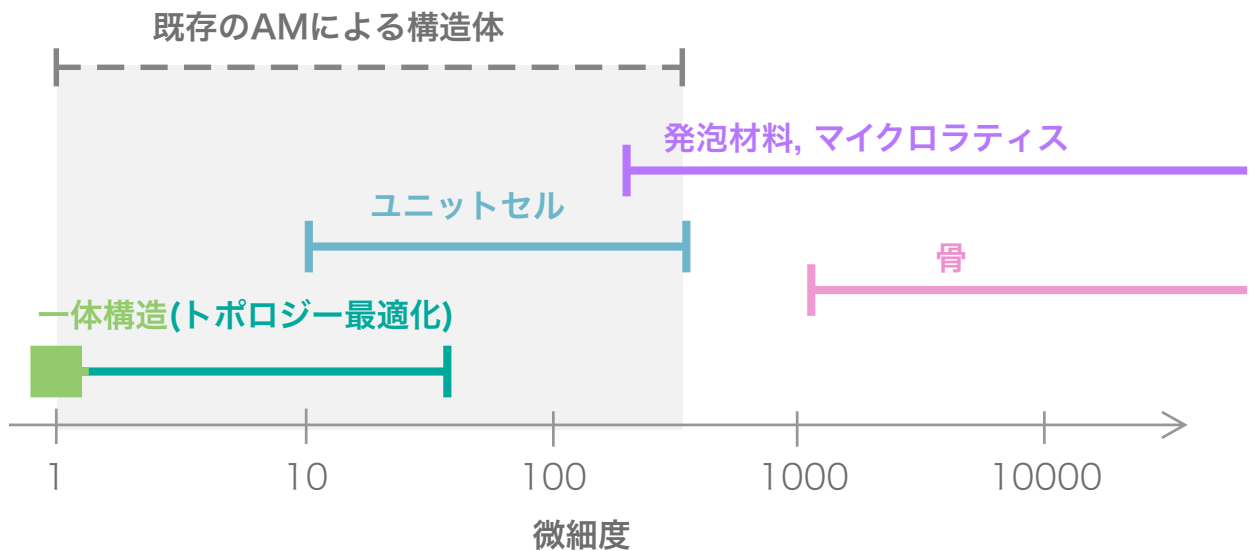


図 3.2 構造体のおおよその微細度.

ユニットセル設計における設計方針の違いとしては、一体構造体として設計を行う場合、構造体全体に対して、最適化などの最適設計行為を行い、内部構造まで細かに設計を行わない。ユニットセルとして設計を行われた構造体は、ユニットセルの構造に対して、最適化などの設計行為を行い、それらを周期配置することで、全体構造を得る。つまり、マルチスケールな設計を行う場合、設計行為の始点を、一体構造体はマクロスコピックな領域を始点とし、ユニットセルはミクロスコピックな領域を始点とする。

3.2.1 一体構造体 (トポロジー最適化)

一体構造体は周期的な内部構造を持たない構造体を指す。従来の加工方法を用いた場合、製造可能なパーツ毎に分けて製造し、組み立てなければ実現不可能であった構造体となっている。また、構造全体に対して構造最適化がなされているのは、一体構造体だけである。特に航空宇宙分野での実用例が多く存在する [31]。

トポロジー最適化は有限要素法による物理シミュレーションを繰り返し行う構造最適化手法であるため、計算コストが非常に高い。そのため現実的に設計領域に対して配置できる有限要素数に制限があるため、後述するユニットセル型のように構造体全体に対して機能的な微細な内部構造を持つような機能構造体を設計することが難しい。

トポロジー最適化を応用した最適化手法を用いて、内部構造定義を行った事例が Wu らの研究 [35] である (図 3.3)。Wu らは、トポロジー最適化時に局所的な充填率を一定とする制約条件を置くことで、Bone-like な緩衝性に優れた構造が得られるという新しい構造最適化手法を提案している。提案された最適化手法による構造体は、既存のトポロジー最適化を行った形状と比較すると、設計荷重に対する剛性は劣るがロバスト性に富んでおり、緩衝性に優れ、局所的な構造欠陥に強い構造体となっている。

Wu らの構造定義は、構造体全体に対し最適化を施し、結果として微細な内部構造が生成さ

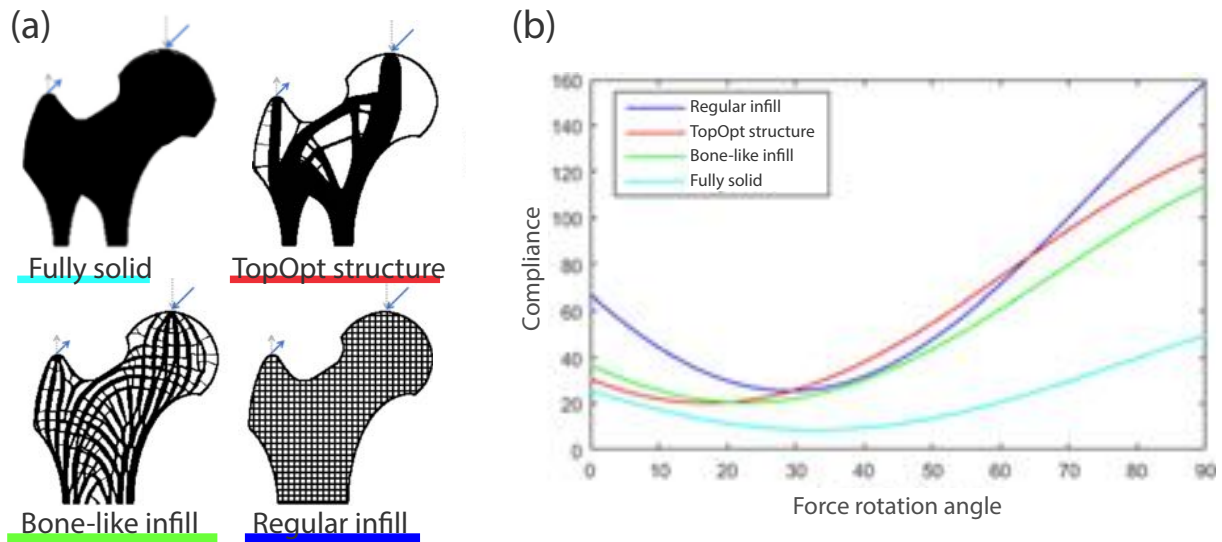


図 3.3 Wu らによって提案されたトポロジー最適化を利用した最適化手法と機能構造体 [35]. a) 内部構造の比較図. 水色:中実構造 (Fully Solid), 赤:通常トポロジー最適化 (TopOpt structure), 緑:提案手法 (Bone-like infill), 青:格子構造 (Regular infill). b) 荷重方向に対する変位の依存性 (シミュレーション). 横軸の Force rotation angle は, (a) 中の設計荷重方向 (灰矢印) とシミュレーション荷重方向 (青矢印) との角度を示す. 提案手法 (Bone-like infill) は設計荷重に対してトポロジー最適化よりも剛性に劣るが, 設計荷重方向とは異なる方向 ($> 20^\circ$) からの荷重に対する剛性が増している.

れており, 内部構造が連続的な形状変形をしつつ, 構造体全体の設計目的を満たすべく最適化されている. これは, ユニットセルを周期配置する構造定義では得られない構造体であり, トポロジー最適化を利用した構造定義として, 優れているといえる.

しかしながら, これ以上の微細構造を持つ最適設計を行うのは, 有限要素数が 10^9 程度以上必要であり, トポロジー最適化は有限要素解析を繰り返す手法であるため, 計算コストを考えると難しい.

3.2.2 ユニットセル

ここでは内部構造の単位胞であるユニットセルの構造を設計し作り込み, 一種類もしくは複数の異なるユニットセルを周期的に配置した機能構造体を紹介する. ユニットセルの設計時にトポロジー最適化などの最適化手法を用いる場合もあるが, 多くの場合, 物理的知見や自然界に存在する構造を模倣し設計している.

ユニットセルを用いた機能構造体には, ユニットセルを二次元平面的に配置, 三次元立体的に配置, そして配置されたユニットセルを変形させるといった構造定義が挙げられる. ここではそれらを分けて紹介する.

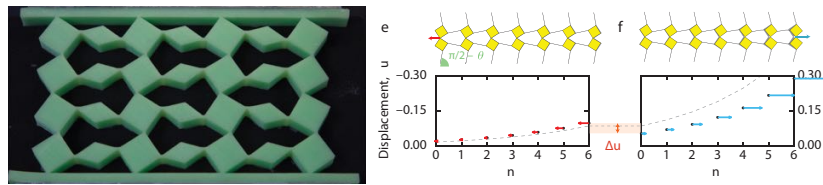


図 3.4 Coulais らによる, 同一軸上荷重に対して異方的な力伝達をする機能構造体 [36].

二次元的ユニットセル

図 3.4 に示す Coulais らの研究 [36] は, 二次元的なユニットセルを組み合わせ, 同一軸上にかかる力の荷重分散を異方的に設計することで, 向きによって力の伝達を変える設計がなされた機能構造体である. 特異な機能ではあるものの, 面的な荷重に対しては通常の構造体と同じであると考えられる.

より複雑な機能を発現させている例としては, Florijn らの研究 [37] や, Ion らの研究 [38] などが挙げられる (図 3.5). これらは, 物性の異なるユニットセルを適切に配置することで, 負のポアソン比や, ドアノブ構造といった複雑な機構を実現した機能構造体である. これらは一種のコンプライアントメカニズムとして捉えることが可能である. コンプライアントメカニズムとは, 構造体の適切な箇所に柔軟性を付加することで, 目的の機能を発現させる機構である.

ただし, これらの機能構造体は二次元的であるため, AM を用いずとも作製することが可能である.

三次元的ユニットセル

ユニットセルに複雑な三次元構造を持たせ, 複雑な機械的機能を付加した設計例としては Wegener らによる研究 [39] が挙げられる. Wegener らは全方向の面的荷重に対して, 回転変形をするユニットセルを設計及び実現した. これは三次元的な空間自由度を活かしきった機能構造体といえる.

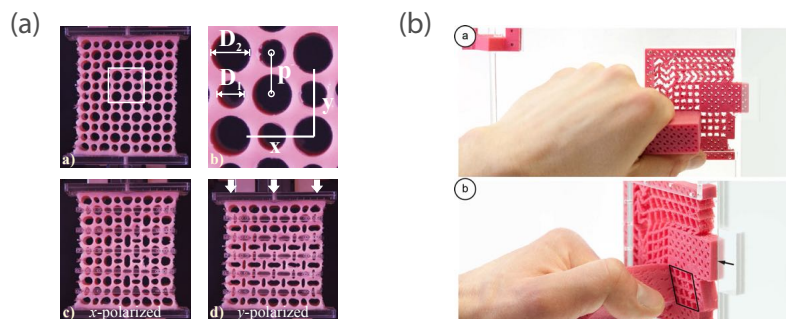


図 3.5 a) Florijn らによる, 負のポアソン比を持つ機能構造体 [37]. b) Ion らによる, 複数種類のユニットセルを組み合わせ, 一体構造でありながらドアノブ機構を実現している機能構造体 [38]. 共に弾力性に富んだ樹脂素材を用いて実現している.

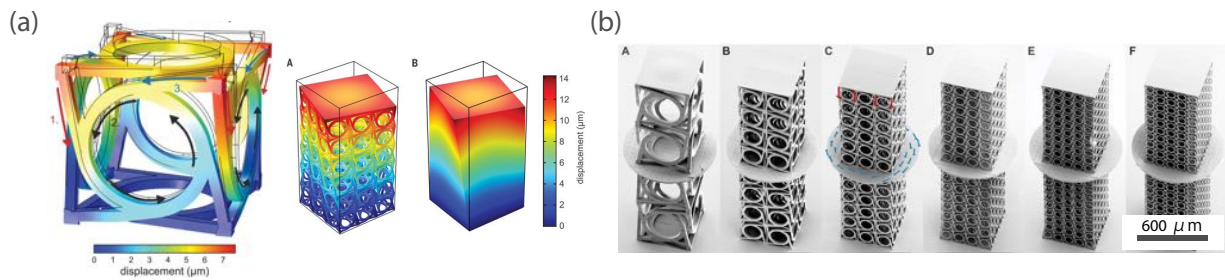


図 3.6 a) Wegener らによる, 全方向の面的荷重に対して回転変形するユニットセルの設計. b) 二光子吸収法 (光造形法) による造形物. [39]

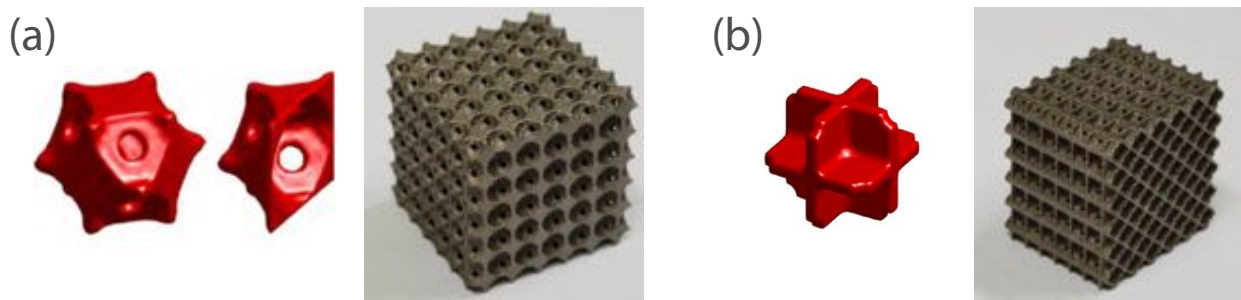


図 3.7 a) 竹澤らによる剛性を最大化したオープンセルなユニットセル構造のトポロジー最適化を用いた最適解と実現 [40]. b) 同氏らによる熱伝導率を最大化したオープンセルなユニットセル構造の最適解と試験片 [41]. 共に粉末床溶融結方式の AM 装置を用いるために, 後処理として残留粉末が取り出せるオープンセル構造であることを設計条件に加えている.

また, ユニットセルに対してトポロジー最適化を行ったのが竹澤らによる研究 [40, 41] である (図 3.7). 竹澤らは, 粉末床溶融結方式の AM 装置を用いて造形を行うため, 造形後に構造体内の残留粉末が全て取り除けるような, 閉じられた空孔が存在しないオープンセル構造をとるという制約条件を付加したトポロジー最適化を行った.

変形格子ユニットセル

ユニットセルの形状及び配置を変形させることで, ユニットセルによる格子構造を変形し, 材料特性に傾斜性を与え機能構造体を設計している事例 [42, 43] が図 3.8 である.

図 3.8 (a) の Wegener らの研究 [42] では, 準二次元的な格子構造のユニットセルを変形および材料密度を変化させることで応力伝搬を制御し, 力学的クロック構造を実現している. 一般的にクロック構造と呼ばれるものは, 光学クロック構造のように, 波動伝搬を制御し湾曲させることで, 構造体内に配置された物体を不可視にする構造であるが, 力学的クロック構造は, 静的圧力に対して, 構造体内に大きな空孔を設けても, 一様な格子構造と近い歪分布を得られる構造のことを指す. つまり, 外部から圧力をかけた際の応答によって, 構造体内に空孔が存在するかどうかを判断することができない構造である.

また力学的機能構造体ではないが, 図 3.8 (b) の Rumpf らの研究 [43] では, ユニットセルを

周期関数とみなし、空間的に波数ベクトルの大きさと向きから位相を導くことで滑らかな変形格子を容易に得られるアルゴリズム提案している。

これらのユニットセルを変形させる構造定義を用いると伝搬現象の設計・制御が比較的容易に行える。

3.2.3 その他

先に述べた構造定義を複合し設計を行っている事例としては、Panesar らの研究 [44] が挙げられる。Panesar らはシミュレーションのみではあるが、密度法 (SIMP 法) トポロジー最適化における中間状態に対して、ペナルティを設けずに最適化を行い、最適結果として得られたグレースケールを含む密度分布を元に、格子構造に対してユニットセルの充填率 (空隙率) を変化させるといった構造設計を行っている (図 3.9 (a))。ユニットセルによる一様な格子構造である場合と、一般的なトポロジー最適化による中実構造の、中間のような特性を持つ構造体が生成されている (図 3.9 (b))

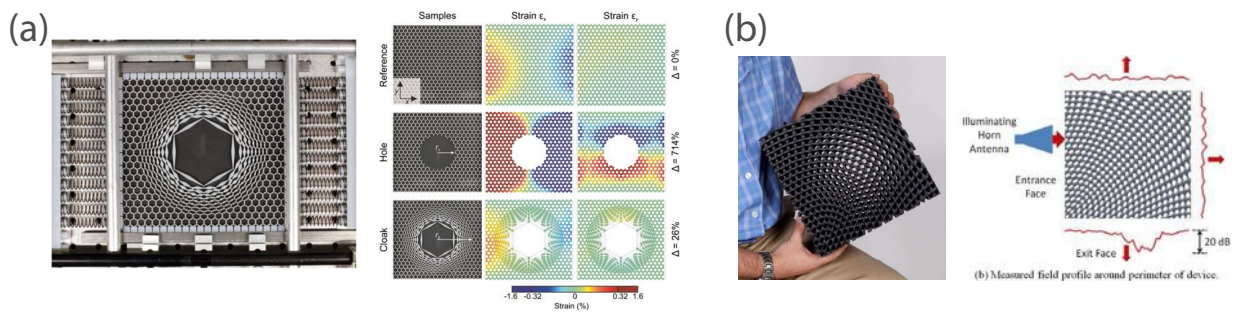


図 3.8 a) Wegener らによる力学的クローカ構造 [42]. 静的圧力に対して、構造体内に大きな空孔を設けても、一様な格子構造と近い歪分布を実現している。 b) Rumpf らによる Spatial Variant Lattice 構 [43]. 入射波 (15 GHz 帯) の伝搬方向を制御している。

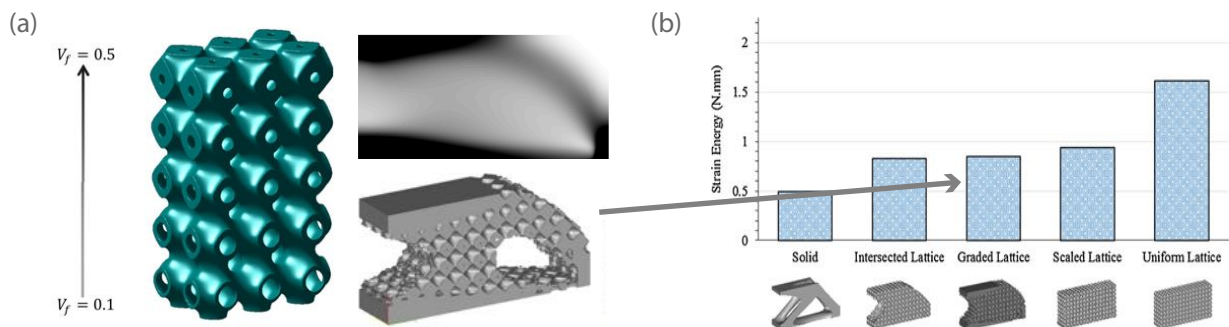


図 3.9 Panesar らによる、トポロジー最適化 (密度法 SIMP) によって得られた密度分布を充填率として、ユニットセル格子構造に適応した事例 [44]. a) 構造定義の概念図。 b) 構造毎の総歪エネルギーの比較。左から一般的なトポロジー最適化による構造体、トポロジー最適化で得られた外形に対して一様な格子構造を適用した構造体、トポロジー最適化による密度分布を充填率とした構造体、密度分布と充填率のスケールリングを変えた構造体、設計領域全体が一様な格子構造の構造体。

密度法において中間状態にペナルティを設けない事は、弾性率と密度が線形関係であると仮定するのと同義であるが、実際のところ、ユニットセルの弾性率は、充填率に対して必ずしも線形ではない(ユニットセルサイズが大きい場合、その傾向は強くなる)。そのため、この事例のように密度法による密度分布を充填率と捉えると、一般的なトポロジー最適化以上に高度な最適化が行われるわけではない。

3.3 先行研究の問題点

ここで挙げた構造定義はどれも優れた点を有するが、理想的な機能構造体の必要条件として述べた、「微細度 10^3 以上の微細な内部構造を持ちつつ、それらの内部構造が最適手法に基づいて設計された非周期的異方性多孔質構造」の実現は不可能であり、どの構造定義も一長一短である。

トポロジー最適化を適用した一体構造設計は、構造体全体として設計目的を満たすべく、内部構造を定義し設計されている。特に Wu らの構造定義は、内部応力に対し最適化された異方性を持った内部構造が、連続的な形状変化により生成されている。これは骨における海綿骨を模した内部構造がよく再現されており、トポロジー最適化を利用した最適内部構造設計の可能性を広げているといえる。しかしながら、トポロジー最適化の計算コストを考えると、高微細度を持つ構造体の設計は困難である。

Coulais らや Wegener らのユニットセルを周期配置する構造定義は、それぞれ特異な機能を発現している。また、ユニットセルの構造を変え、大きく異なる物性を持つ内部構造を任意の箇所に配置することで、複雑な機構を設計することも可能である。構造体全体の最適化という意味では、これらは局所的な最適化もしくは目的に限定した設計に留まっている。

Wegener らや Rumpf らの変形格子ユニットセルによる構造設計では、ユニットセルの連続的な形状変形を持ちた構造定義により、材料物性に傾斜性を与え、構造体を媒質とした伝搬現象の制御を実現している。特に Rumpf らの提案するアルゴリズムを用いれば、格子構造に対して連続的な変形を与えることが可能であり、伝搬現象の制御が可能であるため、応用範囲は非常に大きい。一方で、これは一見、構造体全体に対して、任意の条件の非周期的異方性多孔質構造が設計可能であるように捉えられるが、実のところそうではない。この構造定義は、元々、等方的に周期配置された格子構造を変形し構造体を得るため、ある設計領域が、局所的に周囲の設計領域と異なる空隙率や異方性を有するような設計を行なった場合、周囲の設計領域に配置されたユニットセルをも変形させる必要があり、全ての設計領域で任意の空隙率や異方性を実現可能なわけではない。つまり、骨の内部構造のように、緻密層から、異方性や空隙率が任意に制御された多孔質層への連続的な形状変化が必要な構造体は実現できない。また、ユニットセルに対し変形処理を行うための計算コストを考えると、高微細度化は期待できない。

竹澤らはユニットセルの構造設計では、トポロジー最適化を利用し、粉末床溶融結方式で造形可能な範囲で、熱伝導性や剛性において最適化されたユニットセル構造(内部構造)を得ている。しかしながら、構造定義としては、それらのユニットセルを周期配置しているため、構造

体全体としてそれぞれの内部構造が最適設計されているわけではない。構造体全体として最適設計を行う場合、一体構造設計と同様に、計算コストが課題となる。

Panesar らによるトポロジー最適化とユニットセル格子構造を複合した構造定義を用いた設計は、トポロジー最適化を利用した最適設計の試みとしては比較的新しい。一方で、トポロジー最適化による中間状態の取り扱いが、最適設計としては適切に行われていないため、グレースケール問題を解決した新規最適化手法にはなっていない。また Panesar らはトポロジー最適化の中でも密度法を採用しており、これは異方的な内部構造は考慮できない最適設計法である。異方性を考慮するのならば、均質化法によるトポロジー最適化を行うべきである。

3.4 理想的な機能構造体の実現における具体的な課題

本研究では、微細度 10^3 以上の微細な内部構造を持ちつつ、それらの内部構造が最適手法に基づいて設計された非周期的異方性多孔質構造体を理想的な機能構造体とし、その設計・実現を目指している。先述の通り、先行研究においては、そのような機能構造体は実現されていない。

その実現において重要な事は

- 高微細度な構造体の実現
- 全領域に渡って任意の異方性多孔質構造を実現可能な構造定義の確立

の二点である。全領域で任意の異方性多孔質構造を設計可能な手法が確立されれば、その構造定義とトポロジー最適化などの最適化手法を組み合わせることで、理想的な機能構造体の設計と実現が可能となると考えられる。

3.4.1 高微細度な構造体実現における課題

理想的な機能構造体の実現のためには、まず第一に高微細度な構造体の実現が重要である。具体的な課題としては、微細化に伴ったデータサイズと計算コストの肥大化が挙げられる。

微細度の高い複雑な内部構造を CAD などを用いて人力で作成することは、設計労力としても、生成されるモデルデータのサイズとしても明らかに現実的ではない。

複雑形状をモデリングする際の設計労力を低減する手法としては、Wu らのように、トポロジー最適化などの適切なアルゴリズムを利用して、自動的に構造を生成するのが現実的であり、このような手法は「Generative Design」と呼ばれている。ユニットセルを周期配置し、構造体のモデルデータを生成する手法も、Generative Design の一種といえる。しかしながら、Generative Design は、トポロジー最適化の例を考えれば分かる通り、設計領域の微細度に伴い、計算量は微細度の三乗で大きくなる。トポロジー最適化においては微細度 10^2 程度が現実的である。ユニットセルを周期配置する手法は、計算量は少ないものの、全領域渡って複雑な内部構造を設計することが困難である。ポロノイ分割 [45] を利用したアルゴリズム [46] や、

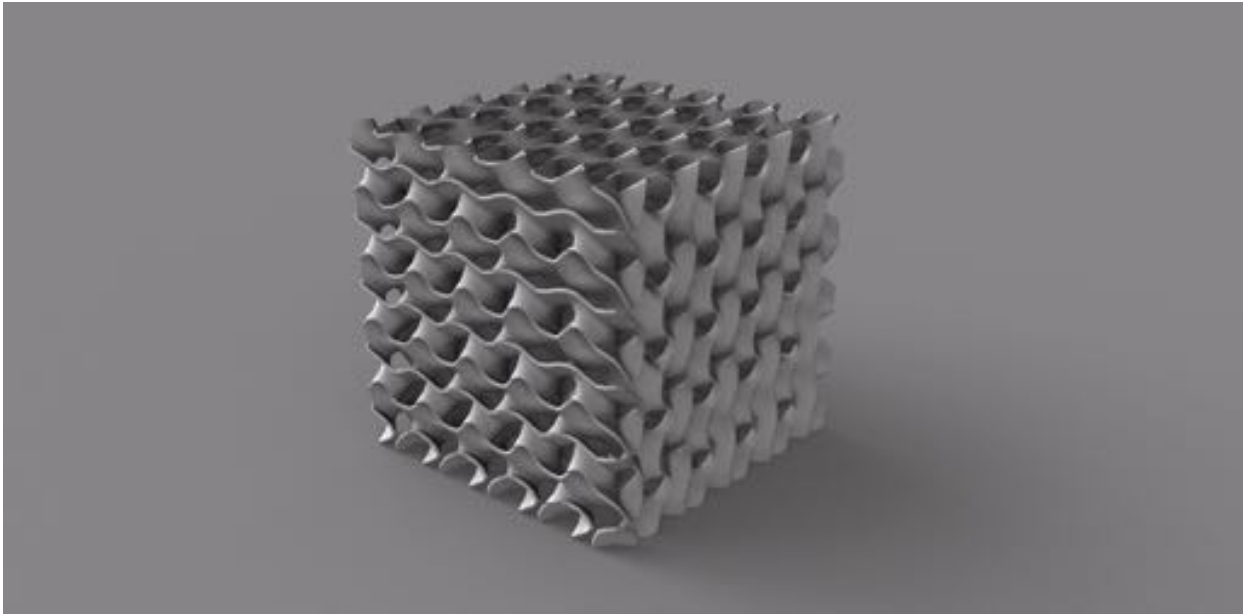


図 3.10 Rhinoceros を用いてモデリングした微細度 10^2 の 1 cm^3 立方体型複雑形状 (ジャイロイド構造) の CG 図. STL モデルデータサイズ 33.4MB. データサイズを抑えるために, 粗い曲面表現にて出力 (三角メッシュ一辺の長さ: $100 \sim 400\ \mu\text{m}$).

Buj-Corral らの研究 [47] で提案されている Generative Design アルゴリズムは, 共に設計した充填率 (空隙率) ・空孔径に応じて点群を配置し, それらの点群から立体形状を再構成するアルゴリズムであるが, 計算量が多く, 高微細度なモデルデータを生成することは難しい.

さらに言えば, 例え計算コストを考慮せずに, 高微細度なモデルデータが生成できたとしても, 生成されるモデルデータサイズは莫大である. 先行研究において高微細度な構造体を実現されていないのは, データサイズの問題が大きいと考えられる. 具体的にどの程度のデータサイズになるかは, 次に述べる通りである.

図 3.10 は, CAD ソフトウェアである Rhinoceros を用いて生成した 1 cm^3 立方体型の複雑形状であり, その内部構造の膜厚は, およそ $100\ \mu\text{m}$ であるため, 微細度としては 10^2 程度である. STL モデルデータとして出力する際の三角メッシュの一辺の長さが $100 \sim 400\ \mu\text{m}$ であるため, 曲面の表現がかなり粗いが, その STL データサイズは 33.4 MB である. 滑らかな曲面を得るために, メッシュサイズを $10 \sim 40\ \mu\text{m}$ 程度にすると, そのデータサイズは 3.34 GB となる. つまり微細度 10^2 で, 良質なモデルデータのサイズはおよそ 1 GB 程度である.

微細度は三次元的なファクターであるので, 微細化度の増加に伴い, データサイズは微細度の三乗で大きくなる. そのため, 微細度 10^3 の STL モデルデータは 1 TB であり, 微細度 10^4 の STL モデルデータは 1 PB となる. 表面メッシュだけでも, このように大きなデータサイズになってしまうため, 微細度の高いモデルデータの生成自体が困難であり, 当然それを用いたシミュレーションも極めて困難である.

3.4.2 非周期的異方性多孔質構造の実現における課題

ここで、非周期的異方性多孔質構造とは、内部構造の局所的な異方性、充填率（空隙率）、空孔径が設計者の意図により制御され、なおかつ、それらが骨の内部構造のように、連続的な形状変化によって接続された構造体である。

即ち、非周期的異方性多孔質構造を得るためには、

- 任意の構造を任意の箇所に配置可能
- 構造の連続的接続が可能
- 低計算コスト

といった特徴を持つ設計が可能であることが求められる。

ここでは、非周期的異方性多孔質構造が実現できるかどうかを判断するために、先に述べた先行研究で採用されている構造定義について、設計者の設計自由度（任意の構造を局所的に配置できるか）、構造の連続性、計算コストという点に着目し、比較を行う。

一体構造体（トポロジー最適化）

トポロジー最適化による構造定義は、得られる構造体が基本的には中実構造であるため、微細な内部構造までは設計が行えない。しかしながら、Wu らのトポロジー最適化を活用した構造定義は、構造体全体に対する設計目的に対し、微細な内部構造の最適設計が実現されている。充填率を一様として最適化を行なっているため、完全な非周期的異方性多孔質構造設計ではないが、充填率の与え方を歪みエネルギーが大きさによって変動させる事や、一般的なトポロジー最適化手法により得られた構造と組み合わせる事などの改良を行えば、骨のような全体として最適化された非周期的異方性多孔質構造体が生成できる可能性がある。一方で、全領域に対し最適設計された構造が得られる事は、他の構造定義にはない優れた点である事に間違いはないが、Wegener らの構造体のように、物理的知見を活かし設計された任意構造を取り入れることは難しい。つまり、トポロジー最適化のみによって、構造体の最終形状を得ることは、設計者にとっては、自由度及び制御性が低く、新たな知見を得るための検証などが行いづらい構造定義である。また、トポロジー最適化による最適構造設計は計算コストが高いため、本研究で目指す理想的な機能構造体の実現のためには、高微細度化が難しく、トポロジー最適化のみによる構造定義は、本研究目的の達成のためには不適である。

ユニットセル周期配置

ユニットセルの周期配置を行う構造定義は、Florijn らや、Ion らのように構造の異なるユニットセルを適切に配置することで、複雑な機構を持つ構造体が設計可能である。つまりユニットセルの構造を目的に応じた構造に変更することで、隣り合うユニットセルの境界接続条件さえ満たせば、空隙率や異方性を任意に制御することが可能である。さらに、Wegener らの先

行研究のように、特異な機能を発現することまでも可能であり、設計自由度が高い設計法である。また、設計領域が小さく、繰り返し配置を行うため、計算コストは比較的低い。一方で、ユニットセル同士が異なる構造を保つ場合でも、その接続面を連続にするような設計を行うため、ユニットセルを最適設計する際には、竹澤らのように余分な制約条件を付加しなければならない。また、ユニットセル毎に物性値を決め、構造を決定し、格子配置することを考えると、結局ユニットセル単位で物性が離散化される事となり、任意の箇所ですべて任意の物性値を獲得することは困難である。つまり、構造の連続性においては問題がある。

変形格子ユニットセル

Wegener らや、Rumpf らによる変形格子ユニットセルによる構造定義は、構造体を媒質とした伝搬現象を制御するのに適した構造定義であり、非常に有用性が高く優れた構造定義である。またユニットセルを連続的に変形させるため、内部構造が連続的に接続されることが担保されており、非周期的異方性多孔質構造に近い構造制御が可能な構造定義である。Rumpf らによって、容易に実装可能なアルゴリズムが提案されているが、その計算コストは、当然、ユニットセルの周期配置よりも高く、高微細化は困難である。また、ユニットセルを周期配置する手法のように、任意の設計領域で任意の物性値を持つ構造体を設計しようとする時、ユニットセルの変形過程となる設計領域において、意図しない歪な構造を経る必要があり、設計自由度としては低く、非周期的異方性多孔質構造を生成することは出来ない。

トポロジー最適化とユニットセルの複合

Panesar らによるトポロジー最適化とユニットセル周期配置構造を複合した構造定義は、ユニットセルによる格子構造をパラメトリックに変更・制御するというアイデアによる構造定義である。これは、連続的な物性値だけでなく、任意の物性値を持つ内部構造を小さな計算コストで設計する手法として極めて有用といえる。一方で、Panesar ら提案している構造体は、単一種類のユニットセル格子構造を基としているため、設計自由度は低く、異なる構造を持つユニットセルを接続した場合でも、構造の連続性は保てない、さらに、トポロジー最適化の中間状態の取り扱いに問題があるため、トポロジー最適化を超えるような構造定義とはなっていない。

ここで挙げた、一体構造体（トポロジー最適化の活用）、ユニットセル周期配置、変形格子ユニットセル、トポロジー最適化とユニットセル周期配置の複合といった各構造定義について、設計自由度（任意物性を局所的に配置できるか）、構造の連続性、計算コストの点において比較を行なったものが、表 3.4.2 である。

本研究で目指す非周期的異方性多孔質構造の設計のためには、高い設計自由度と構造の連続性という条件を満たしつつ、計算コストが低くなければならない。特に、設計自由度と構造の連続性については、必須条件である。

表 3.4.2 を見ればわかる通り、ここに挙げた先行研究で採用されているどの構造定義でも、非周期的異方性多孔質構造体の設計は完全には行えない。

つまり、非周期的異方性多孔質構造を実現するためには、計算コストを可能な限り抑えつつ

も、「ユニットセルの周期配置により得られる構造体のように、大きく異なる物性値を持つ内部構造を設計可能」でありながら、「ユニットセル格子構造の変形によって得られる構造体のように、連続的な形状変化を行う内部構造が設計可能」な新たな構造定義の考案が必要であり、課題である。

3.5 課題解決のための提案

上述の課題をまとめると、「微細度 10^3 以上の微細な内部構造を持ちつつ、非周期的異方性多孔質構造の実現」のための課題は

1. 高微細度化に伴う、モデルデータサイズ (*.stl 形式) の肥大化
2. 全領域に渡って任意の異方性多孔質構造が設計可能な構造定義の不在

の2点である。

これらの課題解決のために、本研究では

1. モデルデータ (*.stl) を必要としない、新規 AM データ処理
2. 陰関数曲面を用いた連続的内部構造変調を用いた内部構造定義

を提案する。

3.5.1 モデルデータ (*.stl) を必要としない、新規 AM データ処理

第1の提案としては、「Modeling」段階で高微細度なモデルデータを生成するのは現実的ではないため、「Slicing」段階で直接内部構造を生成することを提案する。

これを実現するためには、「Slicing」段階で使用するスライサーソフトウェアとして、高機能な独自スライサーの開発が必須である。一般的に AM 技術を活用した研究は、市販の AM 装置を用いるため「Slicing」の前段階である「Modeling」段階のみに研究範囲が限定されるため、高微細度化におけるモデルデータサイズの肥大化は不可避な問題であるが、本研究室では、AM 装置を独自開発しているため「Slicing」段階まで踏み込んだ研究が可能であった。

第4章では、並列化可能なアルゴリズムと共に、開発した独自スライサーについて詳しく述

構造定義	設計自由度	構造の連続性	計算コスト
一体構造体 (トポロジー最適化)	×	○	×
ユニットセル周期配置	○	×	○
変形格子ユニットセル	△	○	×
周期的ユニットセルとトポロジー最適化	△	△	△

表 3.1 先行研究の構造定義のメリット・デメリットまとめ

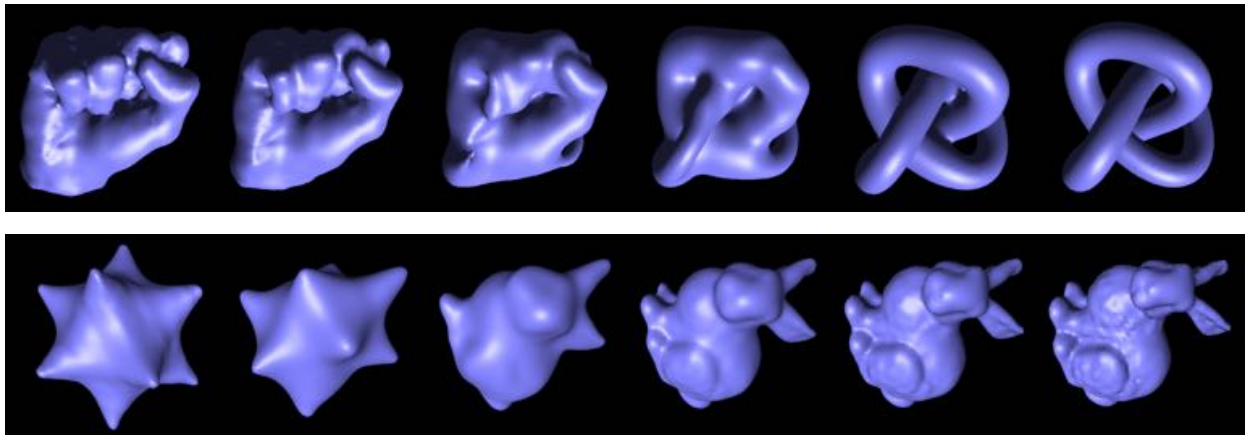


図 3.11 陰関数の補間による連続的形状変化 [56].

べる.

3.5.2 陰関数曲面による連続的内部構造変調を用いた内部構造定義

第2の提案は、内部構造を生成する際、構造を関数として定義可能な陰関数曲面を利用することである。これを、並列化可能なアルゴリズムで実現することにより、極めて微細な構造を小さなデータ容量かつ高速に生成することが可能となる。

陰関数曲面による物体の表現は、コンピュータグラフィック分野でよく使われる表現手法である [53, 54, 55]。この手法は、ポリゴン (三角形平面群による多面体) 表現では困難な、異なるトポロジーを持つ形状の連続変形 (モーフィングアニメーション) を行う際によく用いられている [56]。特に、二つの独立した陰関数曲面 $f_1(x, y, z) = 0$, $f_2(x, y, z) = 0$ がある場合、モーフィングパラメータを a として

$$(1 - a)f_1(x, y, z) + af_2(x, y, z) = 0$$

のように線形補間を行うだけで、その二つの形状を連続して変形させることが可能である (図 3.11)。ここから着想を得て、構造体全体の設計領域をいくつかの設計領域 (設計セル) に分け、各設計セル毎に陰関数曲面 (等値面) を用いて内部構造を定義し、それらを補間し、空間的にモーフィング接続することで、著しい変形を可能とする機能構造体の実現可能であると考えた。

図 3.12 は、異なる構造を持つ陰関数曲面をモーフィング接続した例である。 $x = 1, 2$ を境界面として、設計セル 1 ($x < 1$)、設計セル 2 ($1 < x < 2$)、設計セル 3 ($2 < x$) で、異なる陰関数を定義しているが、陰関数をモーフィング接続することで、連続的に接続されている。モーフィング接続には第 6 章で用いたシグモイド型関数を用いて、接続領域の長さはおおよそ $2/3$ である。設計セルの境界面をこのようにモーフィング接続することで、連続的形状変化による構造の大変形が可能となる。また、内部構造を陰関数曲面で定義するため、設計セル単位での構造制御だけでなく、設計セル内の陰関数曲面自体を、設計セル 3 のように、連続的に構造が変化する傾斜構造にすることも容易である。

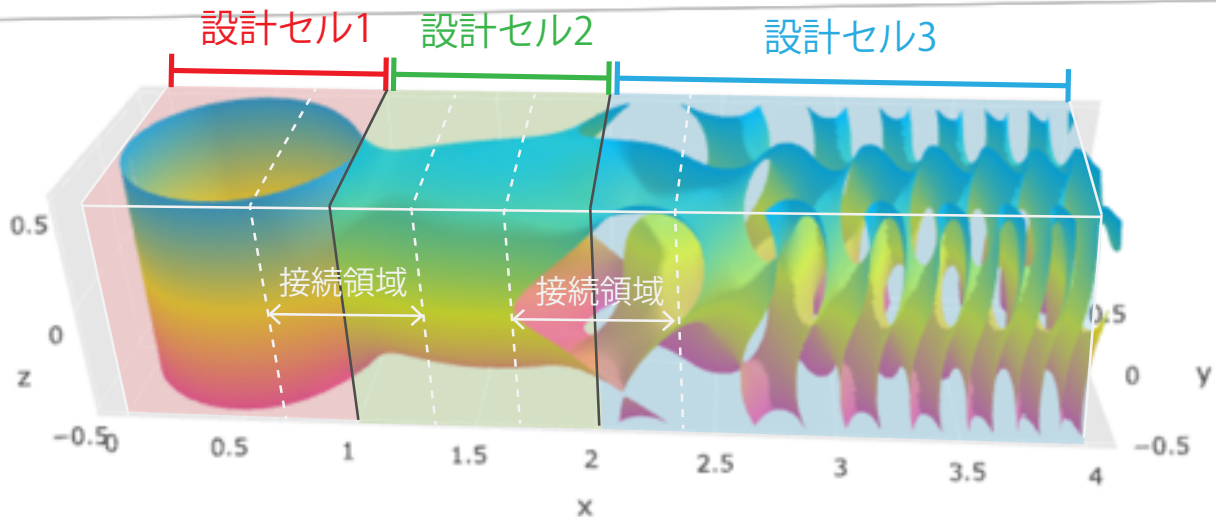


図 3.12 陰関数曲面を利用した、異なる構造を持つ設計セルの空間的モーフィング接続。
 $x = 1, 2$ を境界面として、3つの異なる構造が、連続的形状変化により滑らかに接続されている。

この手法の大きな特徴は

- 異なる内部構造を持つ設計セル間で、トポロジー変化を伴う大変形が連続的形状変化で行われる。
- 設計セル内でも連続変形が可能。
- 設計セルを変形配置するための計算が容易。
- 設計セル内に、変形による意図しない異方性が生まれにくい。
- 各設計セルについて計算を行う際、隣接する設計セルとの接続のみを考えればよいので、GPUによる高速演算が可能。
- 局所的に任意の大きさの設計セルを、任意の箇所に配置可能。
- 微細化限界の薄膜構造の表現が容易。
- 構造を関数によってパラメータ制御するため、データ量が微細度に依らない。

という点である。

Rumpf らのように [43], 構造体の最小周期構造に対し、ユニットセルを定義してしまうと、セル数が非常に大きくなるため、全ユニットセルに対して変形配置を行うのは、計算コストが非常に高くなってしまいが、本手法では変形配置計算を行う必要がないので、AM 装置の限界性能を引き出しつつ、全領域を任意設計可能な、マルチスケールな構造定義として優れている。このような異なる陰関数を空間的にモーフィング接続することを、「連続的構造変調」と呼ぶこととする。また、この手法により内部構造が設計された構造体を「連続的内部構造変調された構造体」などと呼称することとする。

第5章では、このような連続的構造変調による、非周期的異方性多孔質構造体の構造定義について詳しく述べる。

3.6 まとめ

本章では、構造最適化手法の一つであるトポロジー最適化を説明した。トポロジー最適化には、既存の加工プロセスでは製造不可能なグレースケール問題が存在するが、AM 技術により、これが根本的解決ができる可能性がある。

AM を活用した先行研究を、構造定義毎に紹介した。

それを踏まえ「微細度 10^3 以上の微細な内部構造を持ちつつ、非周期的異方性多孔質構造体の実現」のためには

1. 高微細度化に伴う、モデルデータサイズ (*.stl 形式) の肥大化
2. 全領域に渡って任意の異方性多孔質構造を設計可能な構造定義の不在

という2つの解決すべき課題が存在することを述べた。

その解決に向けて

1. モデルデータ (*.stl) を必要としない、新規 AM データ処理
2. 陰関数曲面を用いた連続的構造変調による内部構造の表現

の提案を行った。

これら提案の詳細を続く

- 第4章: 「新規 AM データ処理」
- 第5章: 「連続的構造変調を用いた内部構造定義」

にて述べたい。

第 4 章

微細化限界構造体を実現する新規 AM データ処理

本章では、微細度 10^3 を超える高微細度な内部構造を有する構造体を実現するための、新規 AM データ処理について述べる。提案する手法は、使用 AM 装置で実現できる限界の微細度 $10^3 \sim 10^4$ を有に超えた構造体が可能であり、単に高微細度だけでなく、曲面の滑らかさにおいても、AM 装置性能の限界を引き出すことが可能な手法である。

4.1 本研究で使した AM 装置

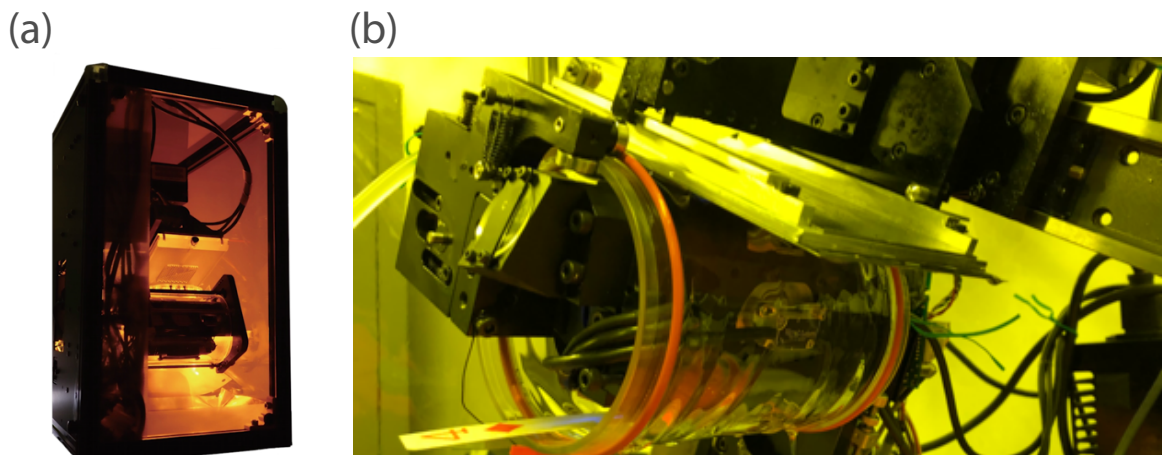


図 4.1 本研究室で研究・開発している「RECILS」。a) 装置概形。b) 造形部分。

本研究では、構造体を生産する AM 装置として、本研究室で研究・開発している「RECILS」(図 4.1) を用いた。

RECILS は、本研究室の元研究員である安河内裕之氏が発明した一次元規制液面型光造形法 [48] に基づき設計された本研究室で独自開発している AM 装置である。本研究中、主にハードウェア部を本研究室の研究員である添田建太郎氏、ソフトウェア部を執筆者が中心となり開発

を行った。

一次元規制液面型光造形法は、解像度と造形体積の拡張性において、他に類を見ない画期的な光造形法であるが、ここでは構造設計の際に留意すべき装置的特徴についてのみ述べるとし、より詳しくは付録 B を参照されたい。

装置性能

AM 装置の持つ物理的限界を最大限に生かした微細化構造体を設計する場合に考慮すべき点は、解像度、造型可能な最大造型サイズ、および得意・苦手とする形状である。RECILS の場合は、次のような性能・特徴を持つ。

- 解像度
 - 造形スポットサイズ... $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$
 - 造形可能最小 Line / Space... $50\ \mu\text{m}/50\ \mu\text{m}$ (一層造形の場合)
 - 造形可能最小壁厚さ... $100\ \mu\text{m}$
 - 積層厚さ... $20 \sim 100\ \mu\text{m}$
- 最大造型サイズ... $9\ \text{cm} \times 15\ \text{cm} \times 15\ \text{cm}$
- 得意形状... 微細管, 薄膜, 大断面積, 中空構造
- 苦手形状... 棘状構造 (格子構造, オクテットトラス形状, 三次元ボロノイ構造など)

使用樹脂

本研究では、デクセリアルズ社の光硬化樹脂 (SK1100 シリーズ [49] の成分調整品) を用いた。詳細な情報は開示されていないが、ラジカル重合反応によって硬化するアクリル系樹脂である。硬化後の比重は約 $1.17\ \text{g}/\text{cm}^3$ である。他の光硬化樹脂と比較すると、透明度が高い製品である。

入力データ形式

入力データ形式は、各層毎の構造体断面の画像データ (*.png, *.jpg) である。断面画像データには、選択的に光硬化樹脂を硬化させるためのレーザー照射強度を制御する情報が記述されており、これを元に、スポット毎に造形領域に存在する光硬化樹脂のみを、適切な照射強度で硬化させ造形を行う。

スポットサイズは約 $10\ \mu\text{m}$ であるため、例えば一辺 $1\ \text{cm}$ の立方体形状であれば、 $1000 \times 1000\ \text{pix}$ の画像データを入力することで、一層造形することが可能である。

入力する構造体断面画像データは、一般的な AM と同様に、CAD ソフトウェアなどでモデリングした *.stl 形式のサーフェスデータをスライサーによってスライスすることで得る。

4.2 微細化限界構造体の造形データ生成の課題

微細化限界構造体とは、AM 装置性能の限界まで微細内部構造を作り込んだ構造体である。RECILS の最大造形サイズがおよそ 10 cm^3 立方体、最小造形サイズ (解像度) が $10 \sim 100 \mu\text{m}$ なので、実現できる構造体の最大微細度は $10^3 \sim 10^4$ 程度となる。

一般的に造形データは第2章で述べたとおり、「Modeling (モデリング)」「Slicing (スライシング)」を行い生成する。RECILS の限界性能を引き出すほどの高微細度 ($10^3 \sim 10^4$) を持つ高解像度な造形データを準備し造形することは、第4章で述べた構造定義・データサイズにおける課題を踏まえると、既存の AM プロセス上では次のような問題のために実現困難である。

- モデリングにおける問題

第一に、CAD によるモデリングにおいて、全体の体積内部をすべてモデリングすることは、現実的に実現可能な作業コストではない。そのため、微細内部構造を持つ構造体は、基本的にユニットセル毎に設計しそれを繰り返し配置、もしくは Generative Design によって実現される。モデリングができたとしても、複雑形状の場合、そのベクター情報を欠損無く *.stl 形式へ変換することは一般的に難しく、計算コストが非常に高い。さらに、微細度 10^3 以上の STL モデルデータを作ることは、データサイズを考えても現実的ではない。

- スライシングにおける問題

第二に、正しい STL モデルデータを用意できたとしても、そのデータサイズが膨大 (微細度 10^3 の場合 1 TB 程度) であるため、造形面を決定する閉空間を求めるためのスライシングに対する計算コストが非常に高い。

- 造形における問題

第三に、正しい造形データが作れたとしても、必ずしも対象の AM 装置で造形可能であるとは限らず、AM 装置の造形可能限界に併せて、モデリング、スライシングを繰り返す必要がある。AM 装置の造形可能限界を決めるパラメータは、アスペクト比、角度、隣り合う造形物までの距離など立体的条件が膨大に存在し、造形可能な制約を完全に把握することは難しい。

4.3 新規 AM データ処理

前述のとおり、そもそも高微細度なモデルデータを出力すること自体が困難であるので、高微細度なモデルデータを必要としない新たな AM データ処理を考案した (図 4.2)。

新規 AM データ処理では、既存の AM プロセスのように、微細内部構造の構築をモデリング段階で行わずに、スライシング段階で行う。そのためモデリング段階では、目的構造体の外形の

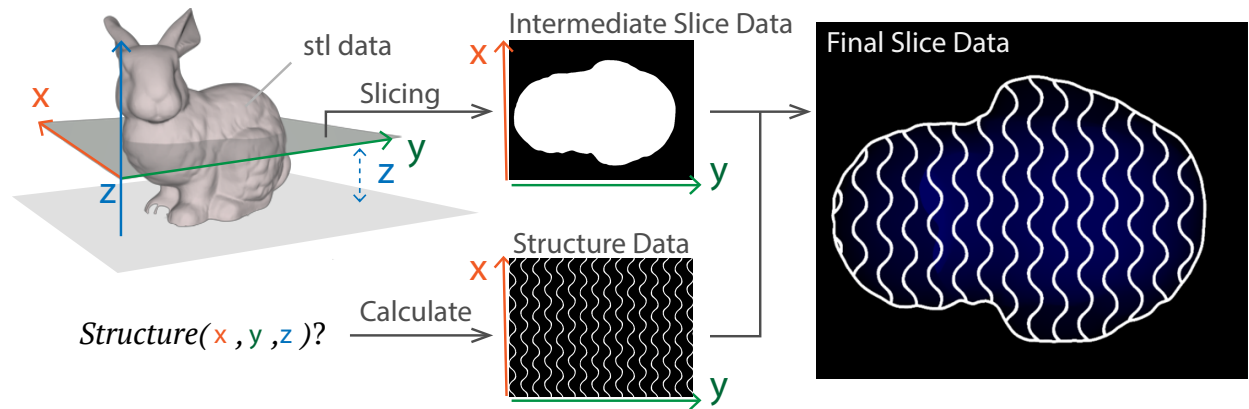


図 4.2 新規 AM プロセスによるスライシング概念図. 通常のスライシングを行った後, 画像面情報 x, y と高さ情報 z から内部構造判定式 $Structure(x, y, z)$ を用いて最終出力データを得る. ここでは概念的な理解のために $Structure(x, y, z)$ による判定を全領域で行なった Structure Data を描画しているが, 実際には, Intermediate Slice Data の造形領域 (白色) のみにて判定を行い, 無駄な計算量を避けている

みを設計すれば良いため, 作業コストが非常に低く, STL モデルデータサイズも非常に小さい. スライシング段階において, 具体的には次のような手順で内部構造を生成する.

1. 高さ z の対象層について, 一般的なスライサーと同様に, STL モデルデータから構造体の外形断面図を得る
2. 外形断面図平面内の対象スポット (ピクセル) について, 座標 (x, y) と z より, 対象スポットの完全な空間位置情報 (x, y, z) を得る
3. 作り込みたい内部構造を決定できる適当な判定式

$$Structure(x, y, z) \rightarrow \text{True/False}$$

を定義し, 対象スポット (x, y, z) について内部構造内外の判定を行う

4. 対象スポットが外形断面内かつ内部構造内であれば, 造形領域として照射強度を設定する
5. 外形断面図平面内の全スポットに対して, 2 ~ 4 を行い対象層の造形データを得る

上記行程は, 並列化が容易であるので GPU によって高速演算可能である.

内部構造を決定する判定式 $Structure(x, y, z)$ を適切に定義することで, 原理的にはどのような内部構造でも実現可能である. $Structure(x, y, z)$ の定義によっては, STL モデルデータを必要とせずに造形データを出力することが可能である. 例えば, 図 4.2 中のウサギ (The “Stanford Bunny” [50]) のモデルデータ (*.stl) は, モデルデータ構造の代わりに, 適当な陰関数曲面 $f_{rabbit}(x, y, z) = 0$ を定義することが可能であるため, これも $Structure(x, y, z)$ の定義に取り込み, 表現することができる. 非周期的多孔質構造体の設計を行なうための $Structure(x, y, z)$ の定義については, 第 5 章で行なう.

提案プロセスでは, 曲面を関数で定義するため, *.stl 形式による曲面表現では困難な, 装置

限界の解像度を持つ造形データが簡単に生成可能となる。

このような AM データ処理は、原理的には、どのような AM 装置に対しても適用可能である。本研究では、データ入力形式を自前で開発可能な独自 AM 装置を研究・開発しているため、実装が容易であった。

この新規 AM プロセスの実現のため独自スライサーを開発した。

4.4 新規 AM データ処理を実現するための独自スライサーの開発

図 4.3 (本章末に掲載) は、本研究のために開発した独自スライサー「Fuwa2Maker (仮)」の動作画面である。

開発言語としては、主に C++、GLSL を用いた。本ソフトウェアは、OpenGL4.1 が使用可能な GPU を搭載した Windows, MacOS, Linux 上ならば動作可能であり、これは多くの PC が該当する。

一般的に GPU 演算を行うためには、NVIDIA 社が提供する CUDA での実装が容易であるが、NVIDIA 社製 GPU の搭載が必須である。そのため本研究では、GPU 環境に依存せず動作させるために、GPU 演算及びグラフィックス処理にオープンソースグラフィックス API である OpenGL[51] および GLSL[52] を採用した。

一般的なスライサーとして使用する上で必要と思われる機能に加えて、図 4.2 のように、判定式 $Structure(x, y, z)$ によって内部構造を作り込んだ造形用画像データを生成する機能を実装している。GUI による直感的な操作が可能であり、一様な内部構造の生成ならば、誰でも簡単に使用することが可能である。

AM 装置で実際にプリンティングを行なう際、生成された造形データが必ずしも造形可能であるとは限らない。プリンティング行程に移った後、造形困難な構造であった事が判明した場合、再度、造形データを生成することとなる。そのため、本スライサーの開発においては、造形試行効率を上げるために、高速スライシングが可能であることと、簡易的に内部構造を調整可能なスライサーの開発を目指した。

すでに実装している機能を述べると、一般的なスライサーとしては

- モデルデータの読み込み (*.stl 形式, *.obj 形式)
- モデルデータ情報 (メッシュ数, 外形, 表面積, 体積) の表示
- モデルデータのスケール変更
- スライス方向の変更 (任意角度)
- スライス後の造形層画像データのリアルタイム表示
- 造形可能であるかの簡易的な判定 (サポート構造付加が必須かどうか)
- 簡易的なサポート構造の生成
- 各スライス層における層厚の設定変更

- 生成された造形用層画像データのネガポジ反転
- スライシングによる画像ファイル (*.png 形式) 生成
- 造形設定ファイル (RECILS で造形するための [層番号, 画像ファイル名, 層厚] などの対応情報: *.csv 形式) の生成

などを実装している。*.obj 形式とは、*.stl 形式に類似した立体情報に加えて、表面の色情報が付加されたデータ形式である。

通常、STL モデルデータをスライスするスライシングアルゴリズムは、CPU 演算で行うが、本ソフトウェアには、それに加えて実測で約 1000 倍程度高速な、超高速 GPU スライシングアルゴリズムを考案し、実装している。C++ による CPU 演算では倍精度浮動小数点演算が可能であるが、GLSL による GPU 演算は単精度浮動小数点演算であるため、要求精度によって、CPU もしくは GPU を用いたアルゴリズムへの変更が可能である。即ち、本スライサーは、単純に STL モデルをスライスするという点においても、既存のスライサーよりも 1000 倍程度高速に造形用層画像データを生成することが可能である。

GPU による高速スライシングが実現できたため、スライス結果である造形層データをリアルタイム表示が可能となり、造形可能であるかの判定 (サポート構造が必須かどうか) も高速に行なうことが可能となった。

そして、本スライサーには、一般的なスライサーとしての機能に加えて、内部構造を生成するために

- ジャイロイド構造 (詳細は第 5 章で述べる) を $Structure(x, y, z)$ とした内部構造の生成
 - 空孔径の変更
 - 充填率の変更
- $Structure(x, y, z)$ 定義用の構造パラメータを記述した外部ファイル (*.csv 形式) の読み込み及び、調整用パラメータの変更

などを実装している。複雑な内部構造を生成する場合は、外部ファイルを用いてパラメータを読み込み、 $Structure(x, y, z)$ を定義する事で行なうが、外部ファイルの仕様を確定させていないため、任意の内部構造を生成するためには、ソースコードレベルで調整が必要であり、開発途中である。

本スライサーを用いて、RECILS の装置限界である微細度 $10^3 \sim 10^4$ 程度の造形データ (10000×10000 pix) 一層を生成するための計算時間は、30 ms 以下である (GPU: Radeon Pro 460 4096 MB による実測)。本測定には、後述する連続的内部構造変調を用いた非周期的異方性多孔質構造体の $Structure(x, y, z)$ の定義を用いた。

本新規 AM データ処理は、多くの計算を並列処理可能であるため、GPU 性能が高ければ、計算時間は微細度に依らず、 $Structure(x, y, z)$ の計算時間によってのみ決定される。そのため、本スライサーは、可能な限り GPU を用いた開発を行っている。本新規 AM データ処理及び本

スライサーを用いれば、さらなる高微細度 (10^5 以上) を持つ造形データの生成にも充分対応可能である。

4.5 造形例とデータ圧縮率

前章で示した図 3.10 の構造体は、微細度およそ 10^2 の構造体であり、装置限界の曲面表現以下であるにもかかわらず、その STL データサイズは 33.4 MB である。装置限界の滑らかな曲面を持つ良質なメッシュデータとすると、その STL データサイズは約 3 GB 程度である。

一方、本新規 AM プロセスでは、同等の構造体を造形するのに必要な STL モデルデータは 2 KB の立方体形状のみであるため、スライス前のデータ圧縮率としては 15000 倍である。滑らかな曲面を持つ STL モデルデータと比較すれば約 10^6 倍となる。造形したい構造体の微細度が上がっても、提案プロセス中の STL モデルデータサイズは不変であるため、微細度 10^3 で約 10^9 倍、微細度 10^4 で約 10^{12} 倍の圧縮率となる。

STL モデルデータサイズが N 倍大きくなると、スライス時間は (実際には更に遥かに遅くなるが) 三角形ファセット (STM モデルデータの最小単位である三点一組の頂点データ) 郡のソート時間のみを考えても、最速でも CPU 演算 (Counting-Sort) で N 倍、GPU 演算 (Bitonic-Sort) を行ったとしても $\log(N)$ 倍大きくなる。この差は造形試行効率に大きく影響を与えるといえる。

本 AM プロセスでなければ実現できない造形例が図 4.4 (本章末に掲載) である。

図 4.4 に示した造形例は、直径 8 cm、高さ 4 cm の円筒状の構造体であり、円筒中心部から円筒端面にかけて、表面積に傾斜性を持たせ、端面に向かうにつれて表面積が増すように設計した構造体である。円筒端面では、膜厚約 $150 \mu\text{m}$ 程度の滑らかな曲面による微細な構造を持つ。これは微細度 $10^2 \sim 10^3$ 程度である。このように高微細度でありながら、全領域が制御された構造体は、既存の AM プロセスでは実現困難である。

本新規 AM データ処理のデメリットとしては、最終的に造形される構造を持つ造形物のモデルデータ (*.stl 形式など) が得られない事が挙げられる。そのため、シミュレーションを行う際には、別途同等のモデルデータを生成する必要があるが、先述の通り、高微細度なモデルデータはデータサイズが莫大であるため、モデルデータを作製したとしても、一般的な PC (RAM 容量: 32 GB 以下程度を想定) ではシミュレーションはおろか、表示することすら困難である。

4.6 まとめ

本章では、モデリング段階で高微細度なモデルデータを生成せず、スライシング段階で内部構造を生成するという、新規 AM データ処理の詳細を述べた。

本新規 AM データ処理及び、開発した独自スライサーにより、装置の限界性能の滑らかさ・微細度を持つ、微細化限界構造体の造形データが、高速かつ容易に生成可能となり、既存の技術では不可能であった微細度 10^3 を超える高微細度な構造体の実現が可能となった。

次章では, 新規構造定義として, 連続的内部構造変調による非周期的異方性多孔質構造体のための具体的な $Structure(x, y, z)$ の定義方法を述べる.

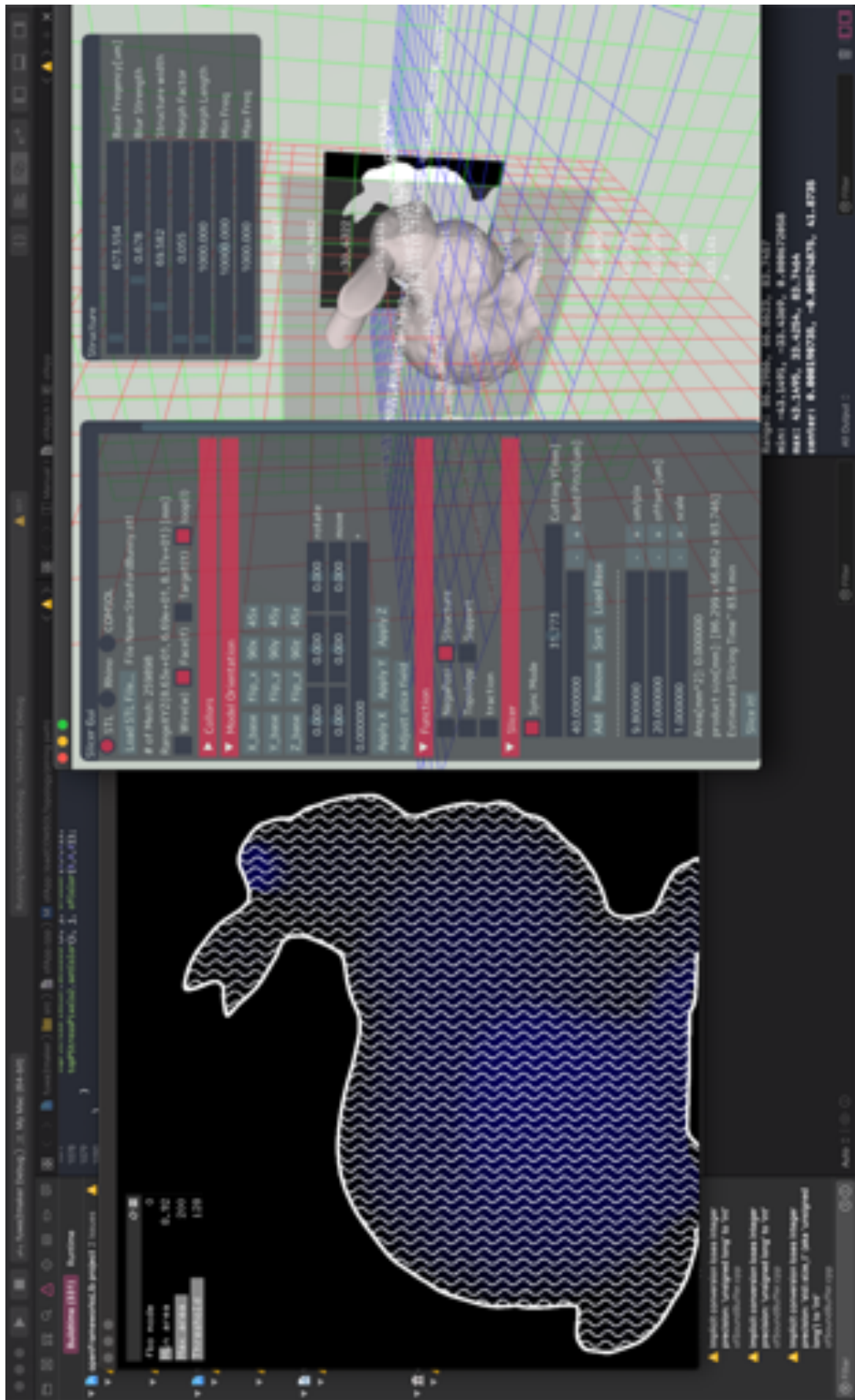


図 4.3 独自スライサー「Fuwa2Maker (仮)」の動作画面. 右ウィンドウで内部構造を持たない STL モデルを内部構造を作りつつスライスし, 左ウィンドウにリアルタイムに表示させている. 右ウィンドウ中のパラメータにより, 内部構造を自由に制御可能であり, パラメータとして外部ソフトウェアによる応力・密度情報などを用いることが可能である.

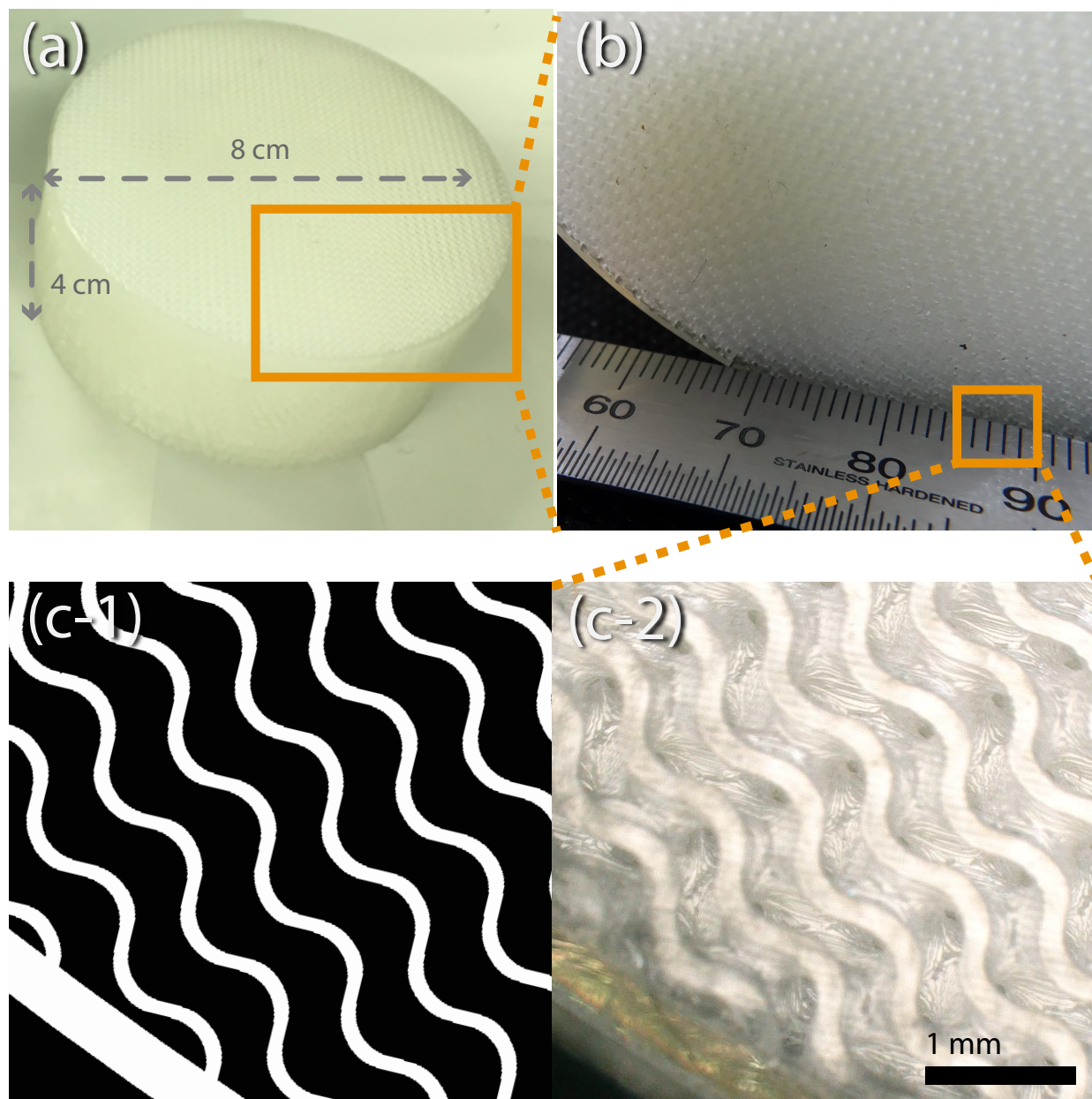


図 4.4 本新規 AM プロセスで造形された、直径 8 cm、高さ 4 cm の円筒外形を持つ、微細化限界な非周期的異方性多孔質構造体の造形例 (空隙率 ~ 80%)。a) 外形写真。b) 拡大写真。c) 造形物と造形層画像データの比較。1: 造形層画像データの一部, 2: 該当箇所の拡大写真。

第 5 章

連続的構造変調による機能構造定義

本章では、非周期的異方性多孔質構造体の設計を可能とする、連続的構造変調による構造定義について述べる。つまり、新規 AM プロセス中の内部構造判定式 $Structure(x, y, z)$ の定義について詳しく述べたい。

5.1 構造体全体の設計

第 4 章で述べた新規 AM データ処理では、内部構造要素の有無を決定できる判定式

$$Structure(x, y, z) \rightarrow \text{True/False}$$

の定義が必須であり、最も重要な点である。

$Structure(x, y, z)$ は設計領域において、構造要素の有無を判断できる関数であれば何でも良いため、原理的には、全領域に渡って任意の内部構造を設計できるが、作業コストが非常に高い。そのため本研究では、設計領域を設計セルに区切り、設計セル毎に陰関数曲面を利用した基本内部構造を決め、パラメトリックに制御した基本内部構造を、各設計セル間が連続的構造変調（モーフィング）によって接続された $Structure(x, y, z)$ を定義することで構造設計を行なう。

具体的には $Structure(x, y, z)$ を陰関数曲面を用いた内部構造判定式として、次のように構造設計を行なう。

$$Structure(x, y, z) : \left| \sum_i^{\text{all cell}} a_i(x, y, z) \text{Cell}_i(x, y, z) \right|^2 < \left| \sum_i^{\text{all cell}} a_i(x, y, z) t_i(x, y, z) \right|^2 \quad (5.1)$$

$\text{Cell}_i(x, y, z)$ は i 番目の設計セル内の構造を決定する陰関数、 $a_i(x, y, z)$ は隣接設計セル間をモーフィング接続するための重み関数、 $t_i(x, y, z)$ は陰関数曲面に対し厚み、もしくは設計セル内の充填率（空隙率）を設定するファクターである。 $t_i(x, y, z)$ によって与えられる厚み（空隙率、充填率）は $\text{Cell}_i(x, y, z)$ の定義によって異なる。

t による構造変化を述べるために、ここで単純な球面を表す陰関数曲面を用いた球殻構造を考えると

$$(r - r_0)^2 < t^2$$

$$\left(r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \right)$$

となるが、この場合は t によって、定量的に厚みを設定することが可能である。一方、後述するジャイロイド陰関数曲面を用いた場合は、 t により充填率を定めることが可能である。いずれの場合も、設計セルの体積から、厚み、充填率を互いに概算することが可能である。

例えば、重み関数 $a_i(x, y, z)$ は各設計セルの中心座標を $\vec{r}_i = (x_i, y_i, z_i)$ 、大きさを $\vec{w}_i = (w_{xi}, w_{yi}, w_{zi})$ 、接続勾配ファクターを k として、次のようなシグモイド型の関数を用いると、内部構造を直方体セル毎に定義することが可能である。

$$F(x; \mu, s) = \frac{1}{1 + e^{(x-\mu)/s}}$$

$$a_i(x, y, z; \vec{r}_i, \vec{w}_i, k) = F\left(x - x_i; \frac{w_{xi}}{2}, k\right) F\left(-\left(x - x_i\right); \frac{w_{xi}}{2}, k\right)$$

$$\times F\left(y - y_i; \frac{w_{yi}}{2}, k\right) F\left(-\left(y - y_i\right); \frac{w_{yi}}{2}, k\right)$$

$$\times F\left(z - z_i; \frac{w_{zi}}{2}, k\right) F\left(-\left(z - z_i\right); \frac{w_{zi}}{2}, k\right)$$
(5.2)

一次元だけで見れば、隣り合う設計セルの重み関数 $a_{1,2}$ は図 5.1 のような形をとり、陰関数曲面のモーフィング接続を行う重み関数として性質が良いと思われる。

このように設計セルを重み関数で接続すると、ある設計セルに属する点 $\vec{r}' = (x', y', z')$ において、 $Structure(x', y', z')$ を計算する際、隣接する設計セル以外の設計セルの寄与を無視できるため、隣接する設計セルの $a_i(x, y, z)Cell_i(x', y', z')$ のみ計算を行えばよい。これにより、設計領域全体としては、任意の $Cell_i(x, y, z)$ を任意の箇所で指定し、複雑な構造を設計可能でありながら、設計セル内では隣接領域のみを考慮した計算を行えばよい。つまり、設計領域全体を

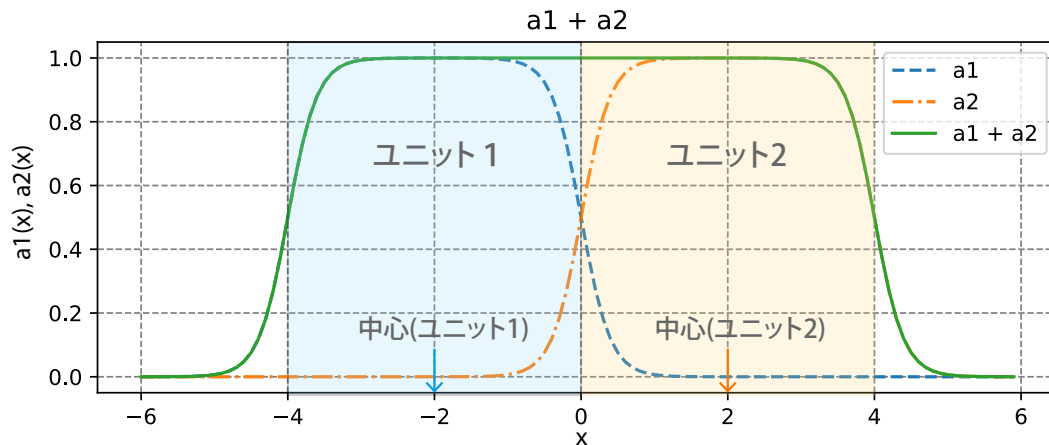


図 5.1 隣り合う重み関数 $a_{1,2}$ の概形図.

直方体セルで区切り, 設計セルを配置したときに, 設計セルの総数を N とし, 各領域で定義された陰関数の計算コストがおよそ一定であるとすれば, $Structure(x, y, z)$ の計算コストは, 設計領域全体の陰関数をすべて計算した場合, $O(N)$ でスケーリングするが, 各設計セルでは隣接した設計セルの陰関数のみを計算すれば良いため, 計算コストは最大でも $27 \sim O(N^0)$ となり, 大きなセル数の場合の計算コストの増加を回避し, GPU による高速計算が可能となる. 第6章の機能構造体の構造設計においては, 判定式 (5.1), 及び, 式 (5.2) を用いた.

基本的には判定式 (5.1) によって大抵の構造を表現可能であるが, 次のように複数の判定式を定義し, 判定式の和や積を用いることでさらに自由に形状を表現できる.

例えば, 陰関数局面に対する厚み付けを, 厚さ t によって制御したい場合

$$\begin{aligned}
S_{x1}(x, y, z) &: \sum_i^{\text{all cell}} a_i(x-t, y, z) \text{Cell}_i(x-t, y, z) < 0 \\
S_{x2}(x, y, z) &: \sum_i^{\text{all cell}} a_i(x+t, y, z) \text{Cell}_i(x+t, y, z) > 0 \\
S_{y1}(x, y, z) &: \sum_i^{\text{all cell}} a_i(x, y-t, z) \text{Cell}_i(x, y-t, z) < 0 \\
&: \\
S_{z2}(x, y, z) &: \sum_i^{\text{all cell}} a_i(x, y, z+t) \text{Cell}_i(x, y, z+t) > 0 \\
S_{x\text{-and}}(x, y, z) &: S_{x1} \wedge S_{x2} \\
S_{y\text{-and}}(x, y, z) &: S_{y1} \wedge S_{y2} \\
S_{z\text{-and}}(x, y, z) &: S_{z1} \wedge S_{z2} \\
Structure(x, y, z) &: S_{x\text{-and}} \vee S_{y\text{-and}} \vee S_{z\text{-and}}
\end{aligned} \tag{5.3}$$

といった定義が考えられる. 陰関数曲面に対する厚みをより厳密に一定にしたい場合は, さらに, xy, yz, zx 方向へ拡張した判定式を増やせばよいが, $Structure(x, y, z)$ の計算コストが大きくなることに留意すべきである.

また, 大きな設計セル (セル番号: 0) にの内部に, 局所的に, お互いの距離が十分に離れた小さな設計セルをいくつか (セル番号: $1, 2, \dots, N$) 配置するといった構造設計を行いたい場合は, 次のような $Structure(x, y, z)$ の定義が便利である.

$Structure(x, y, z)$:

$$\begin{aligned}
& \left| \left(1 - \left(\sum_{i=1}^N a_i(x, y, z) \right) \right) \text{Cell}_0(x, y, z) + \sum_{i=1}^N a_i(x, y, z) \text{Cell}_i(x, y, z) \right|^2 \\
& < \left| \left(1 - \sum_{i=1}^N a_i(x, y, z) \right) t_0(x, y, z) + \sum_i^{\text{all cell}} a_i(x, y, z) t_i(x, y, z) \right|^2
\end{aligned} \tag{5.4}$$

このように, 設計領域全体を設計セルに分け, 陰関数曲面を利用し, モーフィング接続するこ

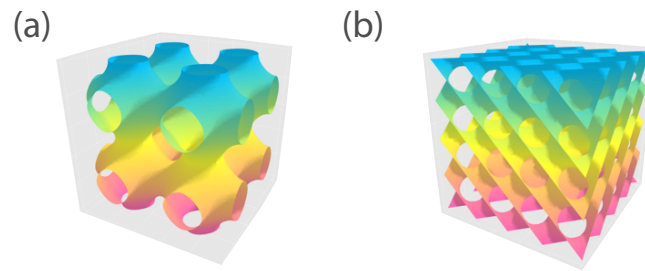


図 5.2 他の極小曲面の概形図. a) Schwarz-P 曲面. b) Schwarz-D 曲面.

とで、極めて自由度の高い構造設計が容易に行える。このような構造定義を「連続的構造変調」と呼ぶこととする。

5.2 基本内部構造の設計

ここでは、陰関数曲面および等値面を用いた基本内部構造について述べる。

本研究で用いた AM 装置「RECILS」の得意形状などを考慮し、基本内部構造として、主にジャイロイド (Gyroid) 極小曲面 [57] を利用した構造を採用した。極小曲面とは、ある境界を持つ曲面の中で、面積の極小値を与えるような曲面である。

他の内部構造候補としては、オクテットトラス構造 [58] や三次元ボロノイ構造, Schwarz 極小曲面構造 (図 5.2) など様々挙げられる。いずれの構造も、本 AM プロセスに適用可能である。

あらゆる荷重方向に対する高剛性化を目的とした場合、オクテットトラス構造が最も適した構造である。しかしながら、RECILS で造形可能な構造制約を考慮すると、オクテットトラス構造は棘状構造であるため、造形困難であった。

RECILS の得意形状を考慮すると、極小曲面による構造のように、面で構成されている構造が好ましい。また極小曲面は、与えられた境界に対し最小面積で構成されているため、軽量化を考えた場合に適した構造といえる。極小曲面による構造の中でも、ジャイロイド構造は、オクテットトラスと同程度の剛性が確認されており、優れた性質を有する [59]。そのため、本研究ではジャイロイド構造を基本構造として採用した。

ジャイロイド構造

ジャイロイド極小曲面は次の近似式 [60] によって得られる図 5.3 のような曲面である。

$$\sin(x) \cos(y) + \sin(y) \cos(z) + \sin(z) \cos(x) = 0$$

ジャイロイド構造は、力学的特性が良いとされるオクテットトラス構造、ハニカム構造などの内部構造に比べても、同じ充填率において、等方性及び強度の面で、優れた力学的特性を持つ構造である (図 5.4)。

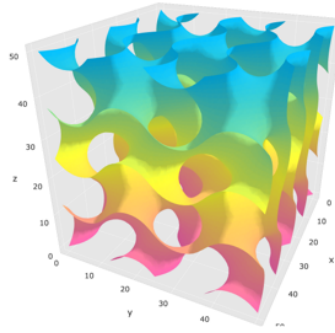


図 5.3 Gyroid 極小曲面の概形図.

さらに特筆すべき特徴は、オープンセル構造であることが挙げられる。オープンセル構造とは、ユニットセル内の空孔が閉じておらず、隣接するユニットセルと空孔が連続している構造である。AM, 特に光造形法においては、造形後の後処理として脱液が必要であるため、造形後に構造体内の未硬化樹脂を排出可能な、オープンセル構造であることが、一つの造形可能条件である。

ジャイロイド構造は、周期関数によって無限空間上で表現されているため、このまま $Cell_i(x, y, z)$ として採用し、設計領域を単一設計セルとした

$$Structure(x, y, z) : [\sin(x) \cos(y) + \sin(y) \cos(z) + \sin(z) \cos(x)]^2 < t(x, y, z)^2$$

を定義できる。これは一様等方的なジャイロイド構造によって構造体内部を充填した構造体であり、軽量高剛性な性質を持つ。

本研究では、上記のジャイロイド極小曲面に、異方的構造制御パラメータを加えたパラメトリックジャイロイド陰関数曲面を新たに定義し、それを基本構造として採用している。

本手法では、任意の構造を陰関数曲面として定義することが可能であるが、ジャイロイド極小曲面は無限空間上で定義された周期構造を陰関数曲面として非常に簡単に利用できるため、本手法との相性が非常に良い。一方、手法としては基本構造としてあらゆる構造を採用することが可能であり、それらの全く異なる基本構造を補間し互いに連続して接続することも可能である。

パラメトリックジャイロイド陰関数曲面の定義

ジャイロイド極小曲面の左辺に対して、いくつか制御パラメータを加えると、構造をパラメトリック制御することが可能である。

単純な例として、二つのパラメータ A, B を与え次のような陰関数曲面

$$B \sin(Ax) \cos(y) + \sin(y) \cos(z) + \sin(z) \cos(Ax) = 0$$

を定義すると、図 5.5 のような構造を表現できるようになる。

図 5.5 を見ると

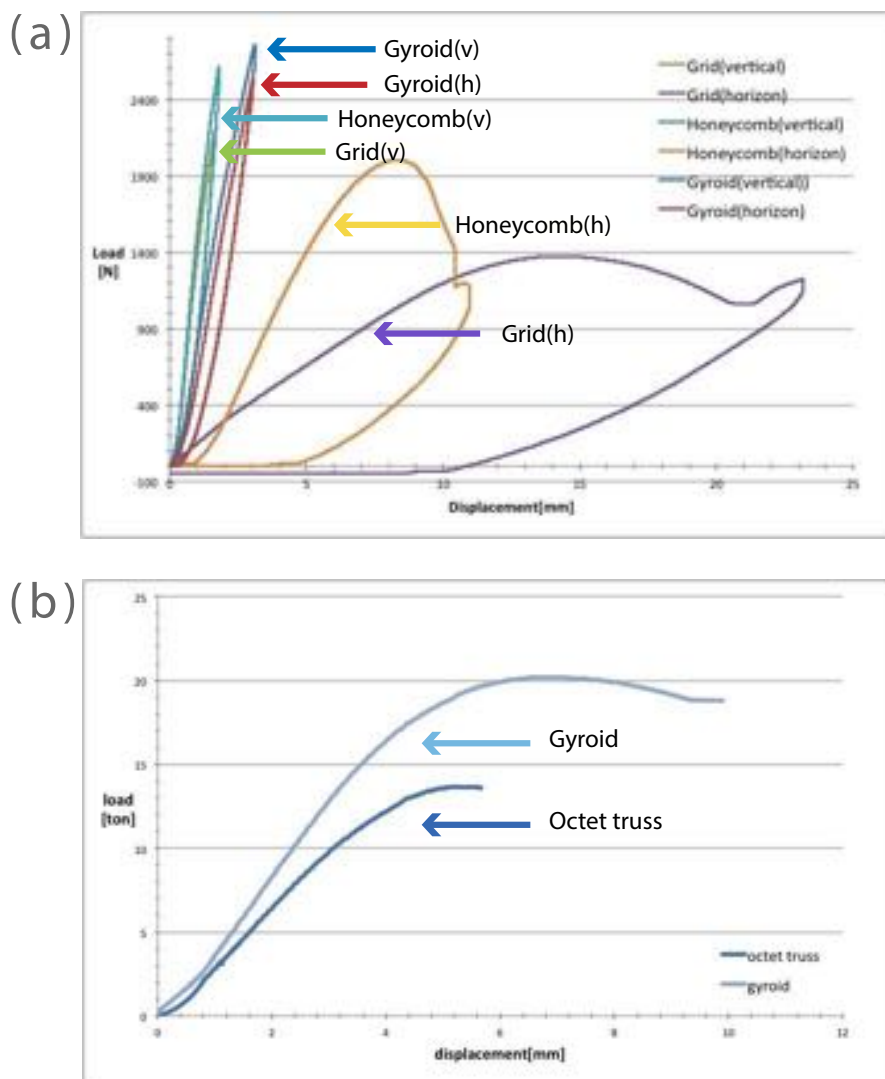


図 5.4 ジャイロイドと他の構造の比較実験 [59]. a) 同質量におけるハニカム形状, 格子形状, ジャイロイド形状の荷重に対する変位の比較検証実験 (縦軸:荷重, 横軸:変位). 青及び赤実線がジャイロイド構造であり, 等方的に強い特性を有していることが確認できる. 理論的には, ジャイロイド構造は異方性を持たないが, 両実験の試験片は FDM によって造形されているため, 僅かに異方性が現れている. b) オクテットトラス構造とジャイロイド構造との比較検証実験 (縦軸:荷重, 横軸:変位).

- A の増加により, x 軸方向の周期構造が細くなり, 構造として異方性が増加.
- B の増加により, z 軸に対し, 矩形的な断面図を持つ柱構造へ漸近.

といった傾向が見られ, A, B の制御により, 異方的な構造制御が可能であることが分かる.

そこで本研究では, 対称性を考慮し, ジャイロイド陰関数曲面に異方性を与えるパラメータ関数 $\vec{B}(x, y, z), \vec{\phi}(x, y, z)$ を加えたパラメトリックジャイロイド陰関数曲面を

$$\begin{aligned}
 \text{Gyro-p}(x, y, z) = & B_z(x, y, z) \sin(\phi_x(x, y, z)) \cos(\phi_y(x, y, z)) \\
 & + B_x(x, y, z) \sin(\phi_y(x, y, z)) \cos(\phi_z(x, y, z)) \\
 & + B_y(x, y, z) \sin(\phi_z(x, y, z)) \cos(\phi_x(x, y, z)) = 0
 \end{aligned} \tag{5.5}$$

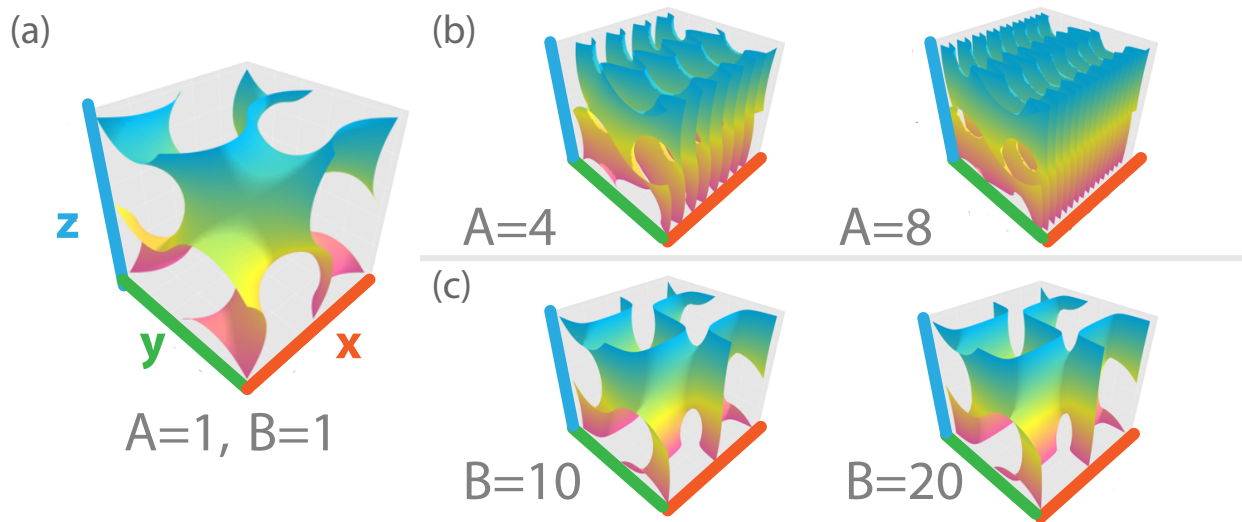


図 5.5 パラメータ A, B の変化による曲面形状変化. (a) $A, B = 1$ の時の概形. x, y, z 方向に対し, 等方的な構造. (b) 左: $B = 1, A = 4$ の時の概形. 右: $B = 1, A = 8$ の時の概形. A の増加と共に, x 軸方向の周期構造が細かくなり, 異方性が増している. (c) 左: $A = 1, B = 10$ の時の概形. 右: $A = 1, B = 20$ の時の概形. B の増加と共に, 構造の曲面性が減少し, z 方向に対して, 断面図が矩形の柱構造に漸近している.

と定義した.

パラメトリックジャイロイド構造による物性制御

Gyro_p を利用した *Structure* 定義を行うと, 空間的に $\vec{B}(x, y, z), \vec{\phi}(x, y, z), t(x, y, z)$ を変化させることで, 構造の空隙率, 空孔径, 異方性を任意に操作できるため, 任意の多孔質構造が設計可能である. つまり

- 軽量性
- 剛性, 緩衝性
- 触媒性能
- 吸着性:空孔における物質の保持性
- 通気性:気体や液体の透過性
- 熱や電気の伝導性
- 吸音性, 遮音性

といった, 多孔質材料の持つ様々な特性 [61] を制御することが可能であることを意味する.

ここでは, パラメトリックジャイロイド構造によって, どのような物性制御が可能であるかといった知見を得るために, $\vec{B}(x, y, z), \vec{\phi}(x, y, z)$ が空間的に変化しない, 一様なパラメトリックジャイロイド構造による物性制御を述べる. より詳細な実験及びシミュレーション内容については, 付録 C を参照されたい.

式 (5.5) 中の $\vec{B}(x, y, z), \vec{\phi}(x, y, z)$ を

$$\begin{aligned}\vec{B}(x, y, z) &= \vec{b} \\ \phi_x(x, y, z) &= 2\pi f_x x \\ \phi_y(x, y, z) &= 2\pi f_y y \\ \phi_z(x, y, z) &= 2\pi f_z z \\ \vec{b}, \vec{f} &: \text{constant parameter}\end{aligned}$$

とすると, \vec{b}, \vec{f} を制御パラメータとした, $\vec{B}(x, y, z), \vec{\phi}(x, y, z)$ が空間的に変化しない, 一様なパラメトリックジャイロイド陰関数曲面 $\text{Uniform_Gyro_p} = 0$ が定義でき, 一様パラメトリックジャイロイド構造を表す *Structure* は

$$\begin{aligned}\text{Structure}(x, y, z): \quad \text{Uniform_Gyro_p}(x, y, z; \vec{b}, \vec{f})^2 &< t^2 \\ \text{Uniform_Gyro_p}(x, y, z; \vec{b}, \vec{f}) &= b_z \sin(2\pi f_x x) \cos(2\pi f_y y) \\ &\quad + b_x \sin(2\pi f_y y) \cos(2\pi f_z z) \\ &\quad + b_y \sin(2\pi f_z z) \cos(2\pi f_x x) \\ \vec{b}, \vec{f}, t &: \text{constant parameter}\end{aligned}\tag{5.6}$$

となる.

このような一様パラメトリックジャイロイド構造を定義し, 周期成分 \vec{f} , 構造成分 \vec{b} による異方的構造制御に伴った物性変化を検証することで, パラメトリックジャイロイド構造の物性制御の見通しが良くなり, 扱いやすい関数となると考えた.

空孔径および表面積制御

Uniform_Gyro_p が等方的な場合, つまり $b_x = b_y = b_z = 1, f_x = f_y = f_z = f$ の時, 1 cm^3 の立方体に 1 周期内包するような構造を考えると ($f = 1 \text{ cm}^{-1}$), その表面積は, 約 6.187 cm^2 であり, f を増加させることで, 比例的に増加する. つまり, \vec{f} の等方的な制御により, 構造体の空孔径および比表面積が制御可能である.

空隙率 (充填率, 質量) および等方的な弾性率制御

式 (5.6) で定義された構造体の空隙率 (充填率, 質量) は, t に対し, ほぼ線形に単調減少し [62, 63], $t = 1.5$ 付近で 0% となり, 空隙が存在しなくなる. つまり, t により質量制御が可能である. また構造材料が増加するため, 等方的な弾性率も同時に制御可能である.

異方的な弾性率制御

\vec{b}, \vec{f} の成分を独立して変更することで, 弾性率に異方性を持たせることが可能である.

図 5.6 は $b_x = b_y = b_z = 1, [f_x : f_y : f_z] = [1 : 1 : 4]$ としたパラメトリックジャイロイド構造を実際に造形し, 圧縮試験によって弾性率の異方性を評価したものである. 図 5.6 (b) は, 圧

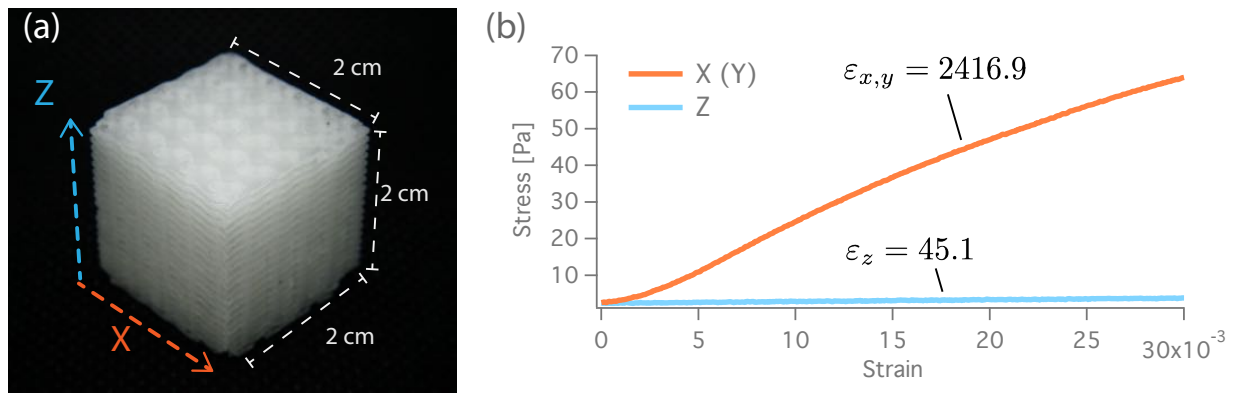


図 5.6 \vec{f} に異方性を持たせた一様パラメトリックジャイロイド構造 ($b_x = b_y = b_z = 1$, $[f_x : f_y : f_z] = [1 : 1 : 4]$) の弾性率評価. a) 試験を行なった造形物. b) 圧縮試験によって得られた歪み曲線. 縦軸: 応力 [Pa], 横軸: 歪み率. 歪み曲線の傾きが弾性率を表す, 表示している弾性率は歪率 $0 \sim 20 \times 10^{-3}$ で線形フィットし得た. $x(y)$ 軸方向の弾性率 $\varepsilon_{x,y}$ と z 軸方向の弾性率の間に, 大きな異方性がみられる.

縮試験によって得られる横軸を歪み率, 縦軸を印加応力とした歪み曲線であり, 歪み曲線の傾きが弾性率を表す.

等方的なパラメトリックジャイロイド構造の場合, 歪み曲線に大きな異方性は見られないが (図 5.4 (a) 参照), f_z のみを増加させ, 構造に異方性を持たパラメトリックジャイロイド構造は, 弾性率に大きな異方性が現れており, z 軸方向荷重には柔らかく, x, y 軸方向荷重には硬い構造となることが見て取れる. つまり, f_z によって, z 軸方向と z 軸に平行, 垂直方向の弾性率を異方的に制御することが可能である. 他の成分についても同様である.

一般的に多孔質構造は, 内包する単位周期構造のアスペクト比 R (今の場合 $f_{x,y}/f_z$) に対して, 異方的弾性率の比 $\varepsilon_{ratio} = \varepsilon_z/\varepsilon_{x,y}$ が単調増加となることが知られており [64], 図 5.7 は, \vec{f} による異方的な弾性率変化を確認するために, COMSOL を用いてシミュレーションした結果である. 縦軸が異方的弾性率の比 $\varepsilon_z/\varepsilon_x$, 横軸が単位周期構造のアスペクト比 R である.

図 5.7 中, 緑線がオープンセルモデル, 紫線がクローズドセルモデルによる理論曲線 [64] である. 図 5.6 と同等のアスペクト比をもつシミュレーション結果は, 図 5.7 中左端のプロットであるが, 実験では, 50 倍程度であった弾性率の異方性が, シミュレーションでは 100 倍程度の異方性となっている. この違いは, 造形による誤差が大いに寄与していると思われるが, 定性的にはこの結果を反映していると思われる.

これは, パラメトリックジャイロイド構造だけでなく, 他の内部構造であっても現れる普遍的な性質である.

図 5.8 は, $B_zRatio = b_z/b_x, b_x = b_y$ とし, $B_zRatio \neq \infty$ の場合は, $b_x = b_y = 1, f_x = f_y = f_z$, 充填率 20% とし, パラメトリックジャイロイド構造の b_z のみを変化させた時の, z 方向の弾性率依存性である. $B_zRatio = \infty$ の場合は, $b_z = 1, b_x = b_y = 0, f_x = f_y = f_z$, 充填率 20% とした結果である. 評価には COMSOL を用いたシミュレーションを用いた. b_z の増加により, 曲面で構成されていた構造が, 平面的になるため, z 軸方向の弾性率が上昇している.

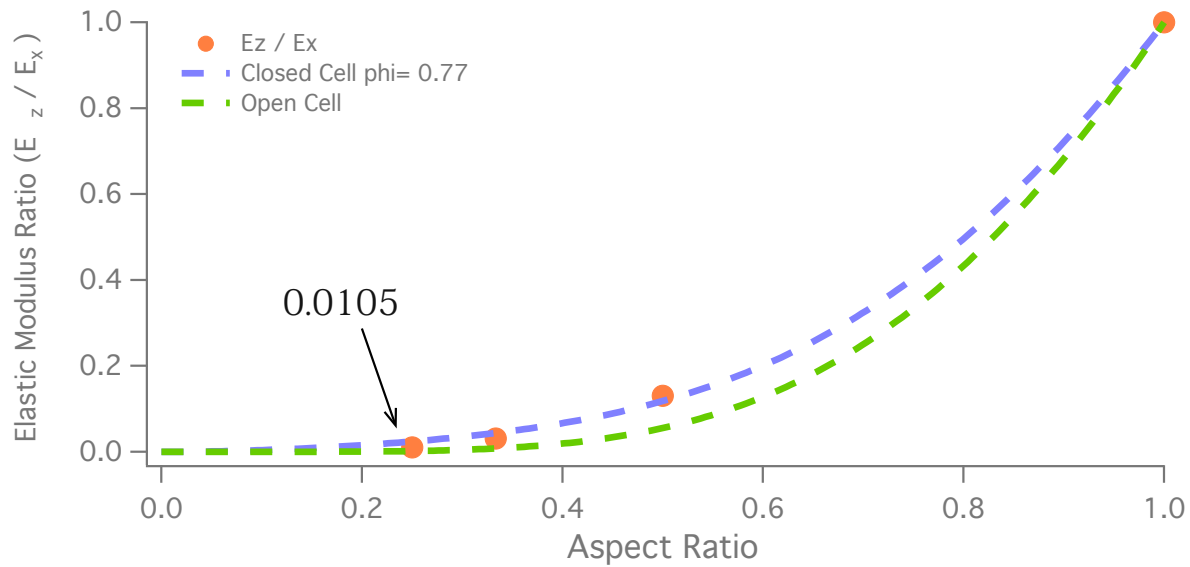


図 5.7 単位周期構造のアスペクト比 $R = f_{x,y}/f_z$ と直交する弾性率 $\varepsilon_z/\varepsilon_x$ の関係. アスペクト比 R としては, 左端のプロットが図 5.6 の実験結果と対応している.

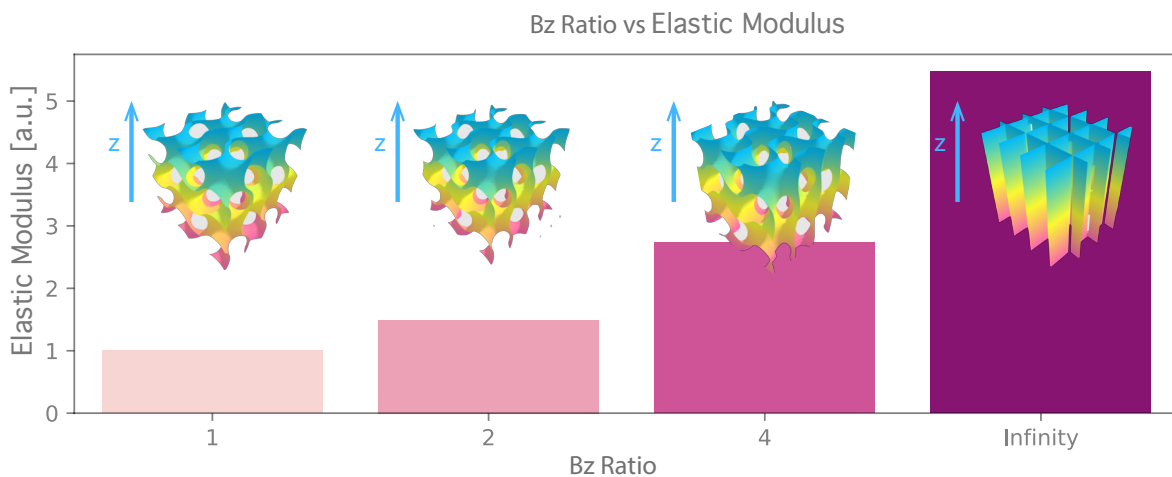


図 5.8 z 軸方向弾性率の $B_z Ratio$ 依存性. $B_z Ratio$ の増加により, 弾性率は単調増加する.

また, $B_z Ratio = \infty$ の時, 平面のみによって構成された構造となるため, 各軸方向の荷重に寄与する平面の枚数から, 異方的弾性率の比 ε_{ratio} が 2 となることが分かる. つまり, x, y 軸方向の弾性率は z 軸方向のおよそ $\frac{1}{2}$ となる. この時, z 軸の弾性率は, 等方的な場合 ($b_z = 1$) と比較して約 5 倍であるため, x, y 軸方向においても, 2 倍程度の弾性率が得られることが分かる. つまり, \vec{b} 成分の独立的な増加により, 増加された成分軸方向の弾性率が最も大きく増加するが, $b_x, b_y, b_z = 1$ の構造体と比較すれば, 多成分方向の弾性率も単調増加させることが可能である.

$B_z Ratio = \infty$ の場合ような矩形格子セル構造は, x, y 軸に対して斜め方向の応力に対して非常に弱いことで知られているが [64], 主応力方向に対して, 適切に各軸方向を定義出来れば剛性に優れた構造となる. \vec{f} による異方的弾性率制御の場合, 全軸方向の弾性率を上昇させる

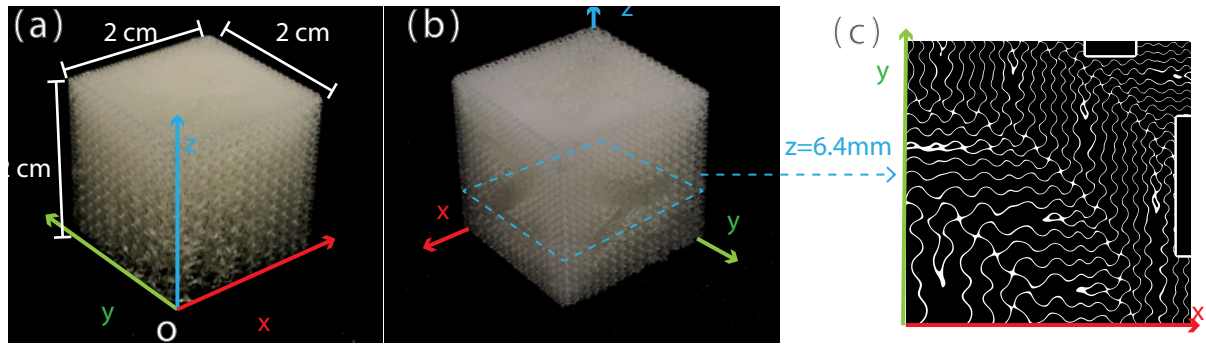


図 5.9 立方体 (1 辺 2 cm) の STL モデルデータを外形とし、内部に、対角線上にパラメトリックジャイロイド構造を複数定義し、対角線上に表面積に傾斜性を与えたパラメトリックジャイロイド構造を複数定義し、陰関数曲面をモーフィング接続した造形例. a) 原点が見える位置から撮した造形物. b) (a) の逆から撮影した造形物. c) $z = 6.4$ mm 時の造形層画像データ.

ことは出来ないため、構造体全体の剛性を上昇させるためには、 \vec{b} による制御が適しているといえる。

5.3 パラメトリックジャイロイド陰関数曲面を用いた連続的構造変調による構造体の造形例

本章で提案した新規構造定義及び、パラメトリックジャイロイド構造を用いて設計し、実現された造形例が、図 5.9 である。

図 5.9 は、面に XYZ の文字が刻印がされた立方体 (1 辺 2 cm) の STL モデルデータを外形とし、内部を 1 辺 5 mm の立法格子上的設計セルにわけ、パラメトリックジャイロイド構造を複数定義し、対角線上に表面積に傾斜性を与えた造形例。

図 5.9 の $Structure(x, y, z)$ は、重み関数として式 (5.2) を用いて次のように定義した。

$$\begin{aligned}
 Structure(x, y, z) : & \left| \sum_i^{\text{all cell}} a_i(x, y, z; \vec{r}_i, \vec{w}_i, k) \text{Gyro_p}_i(x, y, z; \vec{B}(x, y, z), \vec{\phi}(x, y, z)) \right|^2 < (0.1)^2 \\
 \vec{B}(x, y, z) & = {}^t(1, 1, 1) \\
 \vec{\phi}(x, y, z) & = 2\pi \times f(r) \times (\vec{r} - \vec{r}_i) \\
 f(r) & = f_0 \left(1 + \frac{10r}{20 \text{ mm}} \right) \quad [\text{mm}^{-1}] \\
 f_0 & = \frac{1}{16} \quad [\text{mm}^{-1}] \\
 \vec{w}_i & = {}^t(5 \text{ mm}, 5 \text{ mm}, 5 \text{ mm}) \\
 k & = 0.2 \text{ mm} \\
 \vec{r}_i & : \text{設計セルの中心座標}
 \end{aligned}
 \tag{5.7}$$

図 5.9 の (c) は、上記の式で生成された造形面のデータである。滑らかな階層構造が実現されているのがよく分かる。また、周波数が変化しているのにもかかわらず、構造に異方性が発生していない点も特筆すべき点である。このように、本手法を用いれば、連続的に構造が変化する傾斜材料が容易に設計可能である。

図 5.10 は、1 辺 2 cm の立方体内部に局所的に表面積が 5 倍となるパラメトリックジャイロイド構造を配置し、モーフィング接続した造形物の断面を見るために、造形を途中で止めた造形例である。図 5.10 (b) は造形物の造形層画像データである。

図 5.10 の $Structure(x, y, z)$ は次のように定義した。

$$\begin{aligned}
 Structure(x, y, z) : & \left| (1 - a(x, y, z; \vec{r}_1)) \text{Gyro_p2}(x, y, z; \vec{r}_0, f_0) \right. \\
 & \left. + a(x, y, z; \vec{r}_1) \text{Gyro_p2}(x, y, z; \vec{r}_1, (1 + 4a(x, y, z; \vec{r}_1)) f_0) \right|^2 < (0.1)^2 \\
 a(x, y, z; \vec{r}^j) = & \exp\left(-\frac{(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2}{2s^2}\right) \\
 \text{Gyro_p2}(x, y, z; \vec{r}^j, f') = & \sin(2\pi f'(x - x')) \cos(2\pi f'(y - y')) \\
 & + \sin(2\pi f'(y - y')) \cos(2\pi f'(z - z')) \\
 & + \sin(2\pi f'(z - z')) \cos(2\pi f'(x - x')) \\
 \vec{r}_0 = & {}^t(0 \text{ mm}, 0 \text{ mm}, 0 \text{ mm}) \\
 \vec{r}_1 = & {}^t(15 \text{ mm}, 15 \text{ mm}, 15 \text{ mm}) \\
 s = & 5 \text{ mm} \\
 f_0 = & \frac{1}{4} \text{ mm}^{-1}
 \end{aligned} \tag{5.8}$$

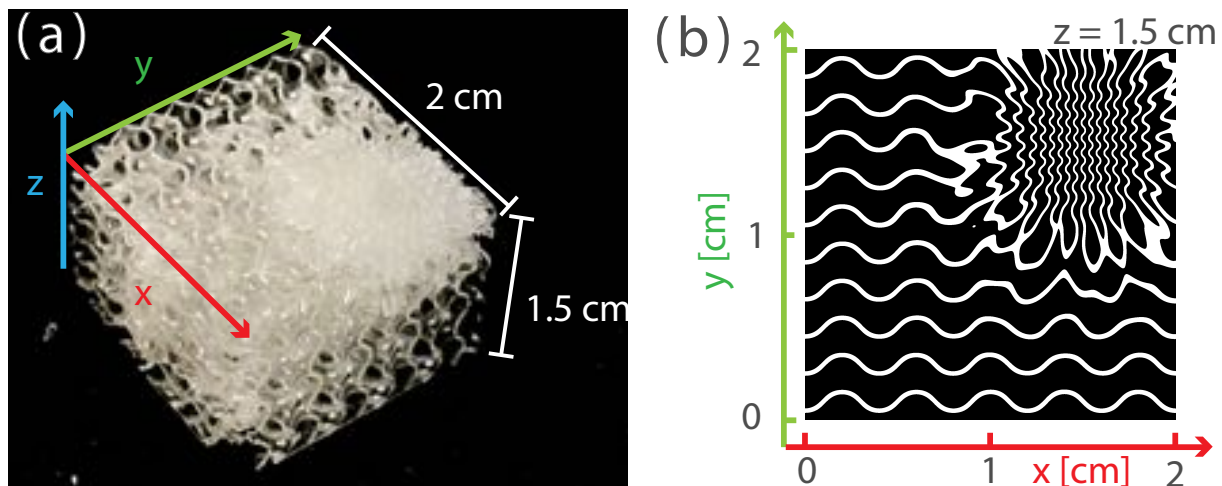


図 5.10 1 辺 2 cm の立方体内部に局所的に表面積が 5 倍となるパラメトリックジャイロイド構造を配置し、陰関数曲面をモーフィング接続した造形例. a) 実際の造形物. 内部構造が判別しやすいよう、 $z = 1.5 \text{ cm}$ で造形を中断した. b) $z = 1.5 \text{ cm}$ の、造形層画像データ.

この造形例では、設計セルが2つだけであるため、式(5.4)のような表現を用いており、重み関数にはガウシアンを利用している。つまり、設計セルは重み関数で区切られた領域ならば何でも良いため、必ずしも直方体でなくともよい。

図5.10を見ると分かる通り、局所的に波数が大きく変化しており、周期関数の位相などを全く考慮せずにいるのにも関わらず、滑らかな形状変化を経て接続されており、他の設計セルと十分離れた箇所では、設計通りの当局的な構造が実現されている。即ち、式(5.4)のような表現を用いると、重み関数の中心座標を変えるだけで、任意の箇所で任意の構造を設計することが容易に可能であり、設計セルが少ない場合は、このような定義のほうが計算コストが低い。

このような構造はユニットセルを周期配置したり、ユニットセル格子を变形する構造定義では得られない構造であり、階層的な構造であっても滑らかに接続された構造体可以实现できることがわかる。

この2つの造形例は、共に連続的な形状変化で構成されており、なおかつ、意図した波数を持つ構造となっている。つまり表面積を局所的に、もしくは連続的に、設計通りに制御可能であり、制御パラメータを変えることで、他の量も自由に制御可能である。これはまさしく非周期的異方性多孔質構造の自由設計であり、このような設計は既存の方法では困難であった。

5.4 本提案手法の意義・解釈

本提案の特徴の1つは、扱うデータを立体表面の点群情報(スカラー形式)ではなく、曲線・曲面情報(ベクター形式)とすることで、高微細な構造体であっても情報量を大きく圧縮している点が挙げられる。スライス行程において断面情報を得るということは、ベクター形式であれば、スライス面における射影を取ることと同義であり、計算速度としても、スカラー形式よりもベクター形式の方が好ましいのは明らかである。しかし、これは市販のCADソフトでもよく用いられる手法であり新規性はない。つまり本提案の本質的な意義、価値は単にベクター形式を採用した点ではない。

本提案で最も重要かつ本質的な点は、単にベクター形式で情報を取り扱うだけでなく、曲面の中でも、陰関数曲面に着目し、パラメトリックジャイロイド陰関数曲面を基底関数とした立体構造の表現を確立し、物性の異なる内部構造を含めた立体構造全体を、この表現により定義可能であることを示した点である。これにより通常のベクター形式による表現よりも、更に複雑微細な構造を、より少ない情報量で表現することが可能となり、またその情報が物性的特徴と直結しているため、保持すべき情報量を極めて小さくすることに成功している。

本提案手法は、フーリエ級数展開を画像データ等に適用したデータ圧縮手法との類似性も挙げられる。周期関数を基底関数とした立体表現を行い、本研究において、基底関数のパラメータと物性制御の関係性を明らかにしたことで、物性的性質を制御可能な立体構造を、極めて少ないデータ量で定義することが可能となったと捉えることも可能である。

本研究では、パラメトリックジャイロイド陰関数曲面という、特殊な関数を基底関数とし目的を遂行したが、基底関数を変更することで更なる圧縮率の向上や、物性的自由度の拡大など

も考えられ、研究・検討の余地が大きく残っていると思われる。

5.5 まとめ

本章では、陰関数曲面を利用した新規構造定義 (式 (5.1)) について述べた。

本研究で用いた AM 装置である「RECILS」と相性の良い陰関数曲面として、ジャイロイド極小曲面を紹介し、新たにパラメトリックジャイロイド陰関数曲面 (式 (5.5)) を定義した。

利用する陰関数曲面として、ジャイロイド極小曲面のように、周期関数によって定義された陰関数曲面を用いると、その位相成分を適切に制御すれば、設計領域がたとえ単一設計セルであっても全領域に渡って非周期的異方性多孔質構造の設計が容易に行える。これは Rumpf らの先行研究と全く等価な構造定義といえる。一方で、Rumpf らのような格子構造を変形させる構造定義は、各パラメータが大変形、特に異方的に変形する場合に空間的歪みが大きくなってしまうという問題点がある。

そこで本研究では、式 (5.1) のように、設計セル毎に陰関数曲面を利用した $\text{Cell}_i(x, y, z)$ を定義し、設計セルをモーフィング接続する新規構造定義として「連続的構造変調」を提案した。これにより各設計セル内でも傾斜材料を実現可能でありながら、設計セル内では材料特性を担保しつつ、設計セル間が連続的に接続された任意の非周期的異方性多孔質構造の設計が可能となった。

また、パラメトリックジャイロイド陰関数曲面を利用した構造として、一様パラメトリックジャイロイド構造 (式 (5.6)) を定義し、パラメータ変数 \vec{b}, \vec{f}, t による構造制御を行うことで、充填率 (空隙率, 質量), 空孔径, 表面積, 弾性率, 異方性の制御が可能であることを述べた。留意しなければならないのは、 \vec{b}, \vec{f}, t によって、弾性率, 質量, 表面積といった材料特性を完全に独立制御することは難しいという点である。また、Uniform_Gyro_p($x, y, z; \vec{b}, \vec{f}$) を用いた構造定義では、異方性を任意方向につけられないが、適当に回転させた座標系を用いることで、任意方向への異方的制御が可能である。特に、剛性の向上を目的とした場合、主応力方向に併せて座標軸を回転させ、 \vec{b} を制御することで、主応力に対して優れた剛性を有する構造体が設計できると考えられる。

パラメトリックジャイロイド陰関数曲面用いた連続的内部構造変調により得られる造形例を示し、容易に、非周期的異方性多孔質構造を設計及び実現が可能であることを示した。

本研究で主に使用した陰関数曲面は、パラメトリックジャイロイド陰関数曲面であるが、ここで提案している新規構造定義は、他の内部構造も採用可能であるため、完全に任意な構造を全領域において設計することが可能である。

次章では、前章および本章において提案した、新規 AM データ処理及び新規構造定義によって、より有用な軽量高剛性高緩衝性を持つ機能構造体設計を行い、実際に造形し破壊試験を行った結果を述べる。

第6章

トポロジー最適化を利用した機能構造体の作製と評価

本章では、新規 AM データ処理と新規構造定義を用いた機能構造体の設計・造形デモンストレーションについて述べる。

ここでは、本 AM プロセスの適用可能範囲の広さと有用性を示すために、簡単に利用できるトポロジー最適化 (密度法) を用いた、機能構造体の設計・実現の一例を示す。特殊な最適化手法を取り入れていないため、軽量高剛性高緩衝性を目的とした構造体設計において、汎用的に利用可能な手法である。

6.1 軽量高剛性な機能構造体の設計

一般的なトポロジー最適化を用いて得られた最適外形構造に対して、更に構造体内の主応力分布に応じた異方性を持つ微細構造を作り込むことで、軽量高剛性高緩衝性を持つ機能構造体を設計・検証を行った。

設計領域は 15 mm × 15 mm × 70 mm の直方体とした。軽量化として、設計領域の最終的な空隙率が 80% 程度となるよう条件を与え、三点曲げに対して最適化された機能構造体の設計を行った。なお構造体内の空隙率は一定とした。

第3章でも述べたとおり、トポロジー最適化の中でも密度法、均質化法は、AM の持つ高い自由形状自由度により、さらに高度な最適化が行える可能性を有している。密度法と均質化法の大きな違いは、密度法では構成要素に対し等方的な弾性率のみを扱い、均質化法では異方的な弾性率が考慮可能な点である。本 AM プロセスを用いた機能構造体設計の最適化手法としては、均質化法が適しているが、ここでは汎用性を重視し、簡便に利用可能な密度法を採用した。

密度法による最適化によって得られる重要な情報は、材料の密度分布、主応力分布である。ここで密度は連続量であり、単一関係式 ($\varepsilon = \rho^\varphi$, ε :弾性率, φ :ペナルティ係数, ρ :密度) によって弾性率として扱う。通常中間密度は実現できないので、中間密度の弾性率が大きく減少する関係式 ($\varphi > 3$ など) を用いて最適計算を行い、結果として出力された密度分布に対し、閾値を設

けることで、設計領域内での材料有無を判定し、最終形状を得る。

既に前章の実験・シミュレーションにより、等方的なパラメトリックジャイロイド構造の空隙率（充填率）と弾性率の関係は判明しているため、グレースケール問題を解決した最適形状も創造可能であると思われるが、本検証実験では空隙率や空孔径制御ではなく、純粋に異方性や構造変化による特性変化を検証するために、一様密度構造を作製した。

そのため本検証実験では一般的な密度法によるトポロジー最適化と同様に閾値を設けて外形最適化を行い、一様充填率の内部構造の変化のみでさらなる高剛性化を図った。これは実質外形が固定された物体の内部応力に対して内部構造のみで最適化を行う行為に等しい。

トポロジー最適化（密度法）による外形最適化

トポロジー最適化実施には、COMSOL の密度法 (SIMP) を利用した。最終的な空隙率は、内部構造によって調整するとして、ここでは空隙率を 50% とし最適化を行った。

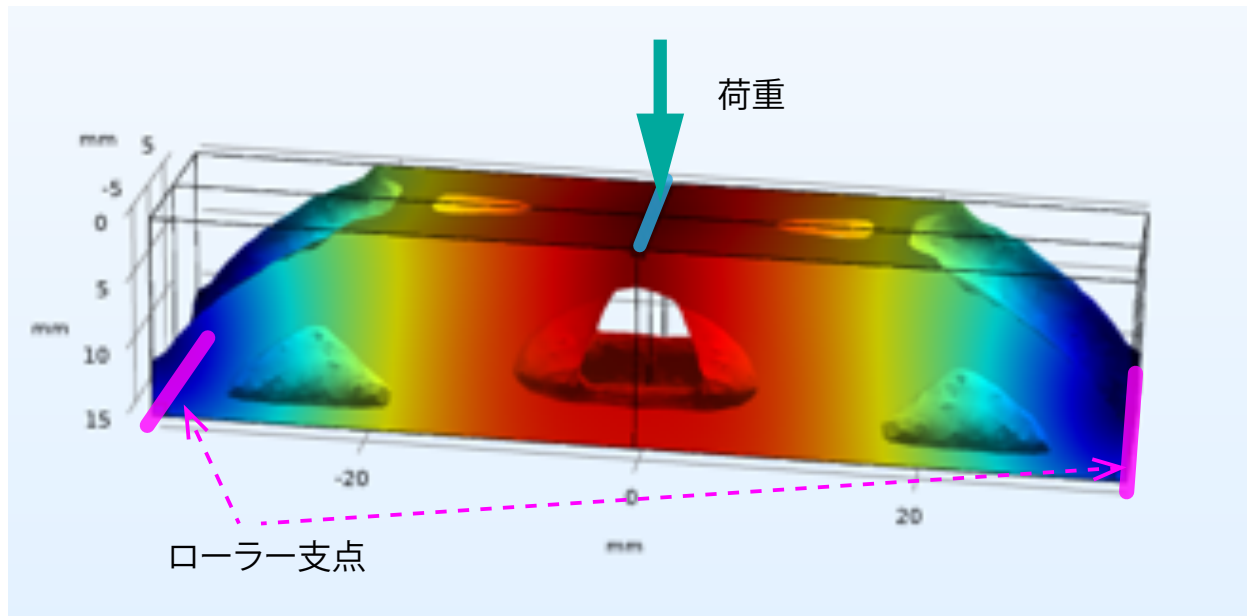


図 6.1 COMSOL によるトポロジー最適化（密度法:SIMP）を用いた外形設計。空隙率 50% とした時の三点曲げ試験に対する最適形状。

主応力分布を考慮した内部構造の設計

内部構造は、構造体内部の主応力に対して変位が少ないことが望ましいと考え、主応力分布に応じて内部構造に変形を与えた。主応力分布は各構成要素毎に

$$\begin{aligned} \text{主応力大きさ} &: \vec{\sigma}_{Cp} = (\sigma_{Cpx}, \sigma_{Cpy}, \sigma_{Cpz}) \\ \text{第一主応力方向} &: \vec{e}_{Cpx} = (Cpx_x, Cpx_y, Cpx_z) \\ \text{第二主応力方向} &: \vec{e}_{Cpy} = (Cpy_x, Cpy_y, Cpy_z) \\ \text{第三主応力方向} &: \vec{e}_{Cpz} = (Cpz_x, Cpz_y, Cpz_z) \\ (\vec{e}_{Cpx} \times \vec{e}_{Cpy} &= \vec{e}_{Cpz}, \vec{e}_{Cpy} \times \vec{e}_{Cpz} = \vec{e}_{Cpx}, \vec{e}_{Cpz} \times \vec{e}_{Cpx} = \vec{e}_{Cpy}) \end{aligned}$$

を定義したものであり、 σ_{Cpx} , σ_{Cpy} , σ_{Cpz} が第一、二、三主応力大きさである。ここで、それぞれの主応力大きさは

$$\sigma_{Cpx} > \sigma_{Cpy} > \sigma_{Cpz}$$

という関係であるため、 σ_{Cpx} , σ_{Cpz} の絶対値の大小関係を考えると

$$|\sigma_{Cpx}| > |\sigma_{Cpz}| \rightarrow \begin{cases} \text{True} & \vec{e}_{Cpx} \text{方向への圧縮応力が支配的} \\ \text{False} & \vec{e}_{Cpz} \text{方向への引張応力支配的} \end{cases}$$

といえる。そこで定性的に支配率を表す σ_{ratio} を次のように定義した。

$$\sigma_{ratio} = |\sigma_{Cpx}| / |\sigma_{Cpz}|$$

前章で述べた通り、剛性を重視し、ある荷重方向への弾性率を向上させるためには、一様パラメトリックジャイロイド構造の場合、 b_i による制御を行えば良い。そこで単位ベクトル $\vec{e}_{x,y,z}$ を $\vec{e}_{Cpx,Cpy,Cpz}$ へ変換する回転行列 R_{Cp} を用意し、 σ_{ratio} を用いてパラメトリックジャイロイド陰関数曲面を

$$\begin{aligned} {}^t(x', y', z') &= R_{Cp} \cdot {}^t(x, y, z) \\ \text{Gyro_cp}(x', y', z', \sigma_{ratio}) &= B_z(\sigma_{ratio}) \sin\left(\frac{2\pi}{T}x'\right) \cos\left(\frac{2\pi}{T}y'\right) \\ &\quad + B_x(\sigma_{ratio}) \sin\left(\frac{2\pi}{T}y'\right) \cos\left(\frac{2\pi}{T}z'\right) \\ &\quad + \sin\left(\frac{2\pi}{T}z'\right) \cos\left(\frac{2\pi}{T}x'\right) \\ B_x(\sigma_{ratio}) &= 1 + \frac{B_0 - 1}{1 + e^{-2(\sigma_{ratio}-3)}} \\ B_z(\sigma_{ratio}) &= 1 + \frac{B_0 - 1}{1 + e^{-2(1/\sigma_{ratio}-3)}} \\ T &= 1800 \mu\text{m} \\ B_0 &: \text{constant parameter} \end{aligned} \tag{6.1}$$

とした。

R_{Cp} による座標変換により, 第一主応力が x' 軸, 第三主応力が z' 軸方向となるため, 支配率 σ_{ratio} に応じて, 第一主応力方向, もしくは第三主応力方向に対する弾性率が増加するような定義を行なった. ここで $B_{x,z}(\sigma_{ratio})$ に強い意味合いはなく, 主応力が大きく一方向に偏っている要素では, その方向へ弾性率を増加させ, 主応力が比較的等方的にかかっている要素では, 等方的なジャイロイド構造となるように設計を行った適当な関数である.

この Gyro_cp を $Cell_i(x, y, z)$ とした一辺 3mm 立方体の設計セルを定義し, 設計セル毎に異なる座標変換をされたパラメトリックジャイロイド構造をモーフィング接続した. 具体的には次のような $Structure(x, y, z)$ となる

$$\begin{aligned}
 & Structure(x, y, z) : \\
 & \left| \sum_i^{\text{all cell}} a_i(x, y, z; \vec{r}_i, \vec{w}_i) \text{Gyro_cp}_i(x', y', z', \sigma_{ratio}) \right|^2 < \left| \sum_i^{\text{all cell}} a_i(x, y, z; \vec{r}_i, \vec{w}_i) t_i(x, y, z) \right|^2 \\
 & \quad \begin{aligned}
 & \quad \quad \quad {}^t(x', y', z') = R_{Cp} \cdot {}^t(x, y, z) \\
 & \quad \quad \quad \vec{w} = {}^t(3 \text{ mm}, 3 \text{ mm}, 3 \text{ mm}) \\
 & \quad \quad \quad k = 0.2 \text{ mm} \\
 & \quad \quad \quad \vec{r}_i : i \text{ 番目セル中心の座標}
 \end{aligned} \\
 & \quad \quad \quad t_i(x, y, z) = B_x(\sigma_{ratio}) * B_z(\sigma_{ratio}) * \frac{\text{Filling_Rate}}{1.6} \\
 & \quad \quad \quad \text{Filling_Rate} = 0.3
 \end{aligned} \tag{6.2}$$

なお, $a_i(x, y, z)$ は式 (5.2), $B_x(x, y, z), B_z(x, y, z)$ は式 (6.1) 中の定義を用いた.

COMSOL から得られた主応力分布は, 一辺 0.5 mm の立方体構成要素毎であったため, R_{Cp} による座標変換は, COMSOL から得られた主応力方向分布を球面補間し, 設計セル中心位置での主応力方向を用いた.

また, $B_{x,z}(\sigma_{ratio})$ は, 主応力大きさを空間的に線形補間することで, RECILS の最小構成要素である $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m} \times 40 \mu\text{m}$ の長方体の中心位置での σ_{ratio} を計算し, 制御した. 即ち, $B_{x,y}(\sigma_{ratio})$ による構造制御は, 設計セル内でも AM 装置の最小構成要素毎に制御し, 完全に傾斜性を持たせている.

このような設計方針で内部構造の生成を行い, 実際に造形された新規構造体が図 6.2 上段の TS1, TS5, TS10 である. それぞれ $B_0 = 1, 5, 10$ とし生成した構造体である.

新規機能構造体 (図 6.2 上段) に加えて内部構造による効果の比較対照サンプルとして, 通常のトポロジー最適化のみを使用して設計領域に対して, 同程度の空隙率にした内部構造を持たない中実構造体も併せて作製したものが図 6.2 下段の T10, T15, T17 である.

なお T10, T15, T17 はそのままでは造型不可能な天井からの張り出しがあるため, 図 6.2 の T17 のように, サポート構造を中央部に配置し造形を行い, 造形後にサポート構造を超音波カッターを用いて除去を行った (T17 も写真撮影後, サポートを除去). サポート構造にはジャイロイド構造を用いた. 新規 AM プロセスを用いればこのようなサポート構造の付加も容易である.

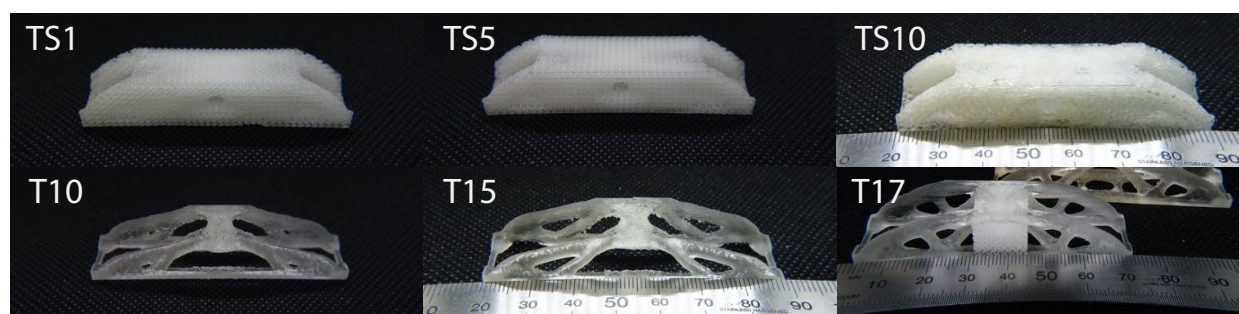


図 6.2 造形された構造体. T10, T15, T17 は, T17 写真のように中央部にサポート構造を付加し造形を行った. (T10, T15 はサポート除去済の写真)

id	設定充填率	内部構造	$T[\mu\text{m}]$	B_0	測定質量 [g]	実測充填率
TS1-1	50%	あり	1800	1	3.79	20.6%
TS1-2	50%	あり	1800	1	3.73	20.2%
TS5-1	50%	あり	1800	5	3.43	18.6%
TS5-2	50%	あり	1800	5	3.61	19.6%
TS10-1	50%	あり	1800	10	3.69	20.0%
TS10-2	50%	あり	1800	10	3.79	20.5%
T10	10%	なし			2.88	15.3%
T15-1	15%	なし			3.47	18.8%
T15-2	15%	なし			3.45	18.7%
T17	17%	なし			3.54	19.02%

表 6.1 曲げ試験を行った構造体リスト. 空隙率は硬化樹脂の実測密度 $\rho = 1.17 \text{ g/cm}^3$ および, 設計領域体積 $15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ より算出. 尚, T10, T15, T17 については, サポートを付加した造形を行なったことから分かる通り, そもそも造形が困難であったため, 現実的な造形試行時間の中 (それぞれ 2 日程度) で, 等条件のサンプルを複数個用意できたのは, T15 のみであった.

上記試験構造体の質量などの条件をまとめたのが表 6.1 である.

6.2 三点曲げ試験による機能構造体の評価

造形した構造体を三点曲げ試験により破壊し、曲げ荷重に対する特性評価を行った。試験は前章と同様に、都立産業技術研究センターにて行った。図 6.3 は TS10-1 の試験実施風景である。

図 6.4 は全試験結果の歪み曲線である。まず、歪曲線の概形から判断すると、おおよそすべての構造体の歪み曲線が降伏後、プラトーな領域が生まれ、その後に破壊されることで歪み曲線が大きく下降している。内部構造を有した構造体 (6.4 中実線描画: TS1, TS5, TS10) は、プラトー領域において下降勾配傾向が強くと見られる。これは降伏後に局部的に破壊閾値を超えた内部構造が次々に破断しているためである。

曲げ弾性率 (歪み曲線の初期勾配) が最も大きいのは、内部構造に強く異方性をもたせた TS10-1, TS10-2 であったが、TS10-1 に注目すると、プラトー領域が発生せず一気に破断している。これは $B_0 = 10$ と強く柱構造を持たせたために、第二主応力による座屈的な破壊や破断が起きやすくなっていると考えられる。

図 6.4 の初期勾配から求まる、曲げ弾性率の評価を行なったのが図 6.5 (a) である。

図 6.5 (a) の実線及び点線は、中実構造体 T10, T15, T17 にのみ注目し、最小二乗法による線形フィッティング結果よりも、かなり勾配が高く (1.5 倍程度) なるように内挿した線 (実線) と、外れ値から同様の傾きで引いた線 (破線) である。

造形条件・品質が同等であると仮定するならば、この線より上に位置する構造体は、単位体積あたりの曲げ弾性率がトポロジー最適化のみ用いた中実構造体よりも高いといえる。

トポロジー最適化は、中実材料を仮定し、最適化を行うため、荷重による主応力分布に対して既に理想的な柱構造に近い構造をとっていると考えられる。一方、TS1-1, TS1-2 は等方的内部構造を持っているため、応力に対し柱構造ではない。そのため中実構造に比べ、曲げ弾性率が低くなっていると考えられる。

一方、中実構造体サンプル中の外れ値を含むような、不利な直線を仮定しても、TS10-1, TS10-2 は中実構造材料と同等か、それ以上の曲げ弾性率を持つことが分かる。つまり最大で $B_0 = 10$ となるような強い異方性を持たせると、トポロジー最適化のみによる中実構造設計よりも、単位質量あたりの曲げ弾性率が高く、強い構造をとる可能性があるといえる。

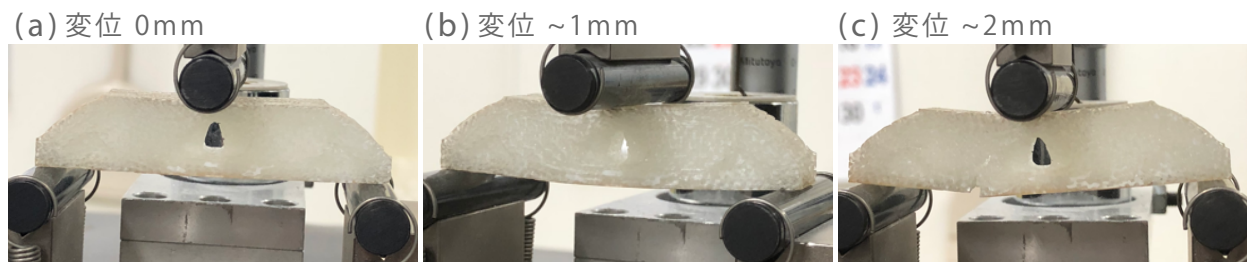


図 6.3 TS10-1 の試験実施風景. 変位 2 mm を過ぎたあたりで破断がみられた。

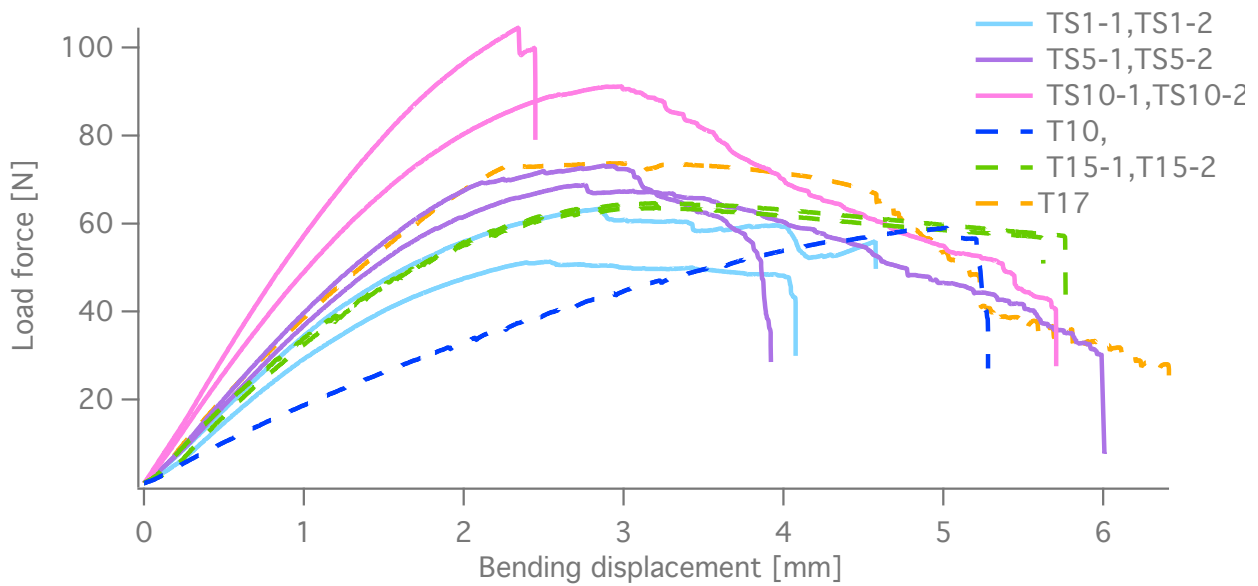


図 6.4 実施した三点曲げ試験によって得られた、全サンプルの歪み曲線。縦軸が印加荷重であり、横軸が初期位置からの変位である。

これらはトポロジー最適化によって既に荷重に対して高度に最適化された形状であっても、内部構造のみの制御によって更に高度な最適化が行えることを示唆している。

図 6.5 (b) は設定値である B_0 を横軸にし、曲げ弾性率を質量で割ったものを縦軸にしプロットしたものである。これを見ると明らかに構造成分 B_0 の寄与によって構造体の剛性が上昇しており、最も少なく見積もっても $B_0 = 10$ とすることで、等方的構造 $B_0 = 1$ に対して 1.4 倍程度の曲げ弾性率の向上がなされる事が確認された (TS1-2, TS10-2 間の比較)。

これは外形形状に関わらず、内部応力に対して内部構造制御を行うことで、曲げ弾性率において、少なくとも 1.4 倍の剛性向上がなされるということを表している。

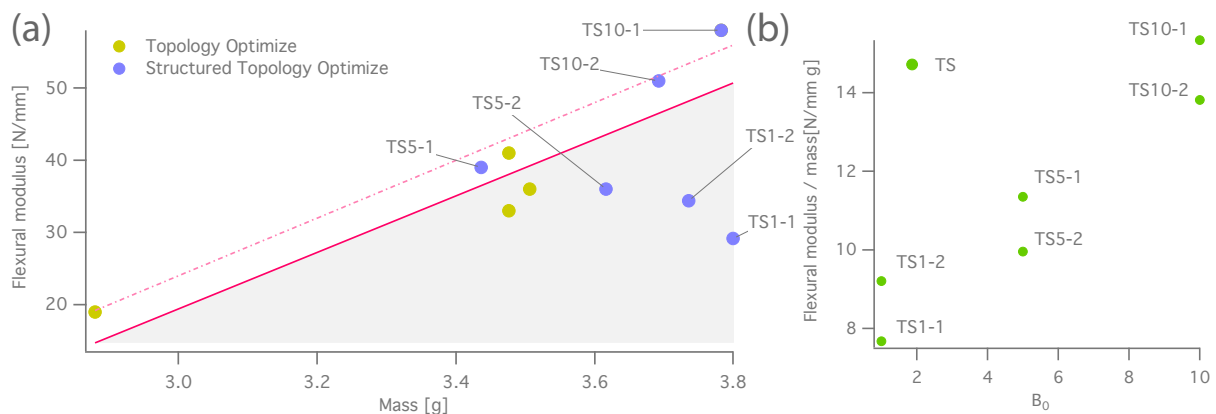


図 6.5 a) 図 6.4 から求まる曲げ弾性率を縦軸、横軸を測定質量としたグラフ。b) T, TS の比較図。横軸 設定値 B_0 、縦軸 単位質量あたりの曲げ弾性率

6.3 まとめ

本章では、新規 AM データ処理と新規構造定義を用いて、軽量高剛性高緩衝性を持つ機能構造体の設計・造形と剛性 (曲げ弾性率) 評価を行なった。

構造設計の新たな手法として、トポロジー最適化によって得られた外形形状に対して、内部主応力分布に応じて設計セル毎に座標変換し、剛性向上という設計目的に適切と思われる構造制御を施したパラメトリックジャイロイド構造を定義し、設計セルをモーフィング接続することで、軽量高剛性高緩衝性を持つ機能構造体の設計を図った。

上記の設計方針に基づいた機能構造体を実際に造形し、三点曲げ試験による剛性評価を行なった。ここでの設計方針は、内部応力に対する構造制御を最適化している訳ではないため、決して最適設計とは言えないが、それでもトポロジー最適化のみによって設計された中実構造と同等、もしくはそれ以上の剛性を有する機能構造体の実現できた。つまり、トポロジー最適化によって既に荷重に対して高度に最適化された形状であっても、内部構造の制御によって、剛性向上の目的に対し、更に高度な最適化が行える可能性を示した。

さらに微細な内部構造を持つ構造体は緩衝性・断熱性に優れており、中実材料に比べて既に機能的であるといえる。

つまり本設計方針により、少なくとも今回の造形条件下では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材料が実現された。それに加え、緩衝性、断熱性など、多孔質構造の持つ他の要素を向上することも可能で、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。

これは、新規 AM データ処理と新規構造定義の有用性を強く示す結果である。

尚、ここでは一様充填率という制約条件で設計を行ったが、トポロジー最適化の出す密度分布に応じて、充填率の制御を行うことで、さらなる剛性向上や軽量化といった機能向上も期待できる。

第7章

結論と展望

7.1 まとめ

本研究では「微細度 10^3 以上の非周期的異方性多孔質構造による機能構造体の実現」を目的とし、その達成のために新規 AM データ処理及び構造定義を考案、開発し、光造形法と連続的内部構造変調により、微細化限界の非周期的異方性多孔質構造体を設計し実現した。これが本研究の成果である。

第1章では、本研究の背景と目的を述べた。機能構造体とは、内部構造や表層構造により、中実構造では実現し得ない機能を有する構造体であり、骨は極めて複雑な内部構造を持ち、高度に環境に最適化された機能構造体であることを述べた。Additive Manufacturing の登場により、実現できる形状自由度が拡大され、「目的の物性をもつ材料を作る」といったコンセプトによる構造設計へのパラダイムシフトが起きつつあることを述べた。構造設計により骨のように優れた機能を有するためには、微細度 10^3 以上の多孔質構造が

- 空孔制御
 - 異方性
 - 充填率 (空隙率)
 - 空孔径
- 構造の連続的形状変化による接続

といった構造的特徴を満たすことが肝要である。そして、このような構造を「非周期的異方性多孔質構造」とし、本研究の目的は「微細度 10^3 以上の非周期的異方性多孔質構造による機能構造体の実現」とした。実現手法としては、実現できる構造物の形状自由度が最も高い加工法の中である、AM を用いることとした。

第2章では、AM の歴史を述べ、既存の加工法と AM を比較しつつ、AM の特徴と一般的な AM プロセスを述べた。また、AM の標準データ形式である *.stl 形式について述べた。

第3章では、AM と共に利用されることの多い構造最適化手法であるトポロジー最適化とグレースケール問題について述べ、AM を用いた機能構造体作製の先行研究を、設計に採用され

ている構造定義毎に分類し紹介した。先行研究を含む、一般的な AM プロセスにおいて利用されているモデルデータである*.stl 形式では、高微細度化に伴ったデータサイズの肥大化により、微細度 10^3 を超える構造体の設計が困難であることを述べた。さらに先行研究の構造定義には、非周期的異方性多孔質構造を実現可能な構造定義が存在しないことを述べ、本研究目的を達成するためには、以下の2つの課題

- (1) 高微細度な構造体の実現
- (2) 非周期的異方性多孔質構造体の構造定義の確立

が肝要であることを述べた。

課題 (1) 「高微細度な構造体の実現」は、骨やマイクロラティスといった微細な構造体を実現する上で必ず達成しなければならない課題である。しかしながら、*.stl 形式を用いた既存の AM プロセスでは、モデルデータの肥大化のために、解決不可能なことである。本研究では、AM 装置を独自開発しているため、AM プロセスを見直すことで解決が可能であった。

課題 (2) 「非周期的異方性多孔質構造体の構造定義の確立」は、骨のような優れた非周期的多孔質構造を持つ構造体を自由に設計する上で重要である。骨のような「非周期的異方性多孔質構造体」の設計は、ユニットセル単位での設計といった既存の構造定義では実現し得ないことであった。トポロジー最適化を利用すれば、非周期的異方性多孔質構造体は生成可能ではあるが、設計者の意図を反映させた構造設計は困難であり、ユニットセル設計による先行研究の知見を反映させることは難しい。そのため、既存の構造定義で可能な構造的特徴を包括しつつも、新たにマルチスケール設計可能な優れた構造定義の確立が必要であった。

この課題に対し、

1. モデルデータ (*.stl) を必要としない、新規 AM データ処理
2. 陰関数曲面を用いた連続的内部構造変調による構造定義

を提案し、この提案の実現によって、上記の課題を解決した。

第4章では、課題 (1) 「高微細度な構造体の実現」を解決する提案として「モデルデータ (*.stl) を必要としない、新規 AM データ処理」について詳しく述べた。具体的には、高微細度な構造体を作製するために、内部構造の生成をスライシング段階で行なうという新規 AM データ処理を提案し、提案を実現するために開発した独自スライサー (ソフトウェア) について述べた。既存の AM プロセスでは、*.stl 形式を用いるため、 10^3 を超える構造体の設計は現実的に不可能であったが、本提案の実現によってこの問題を解決し、容易に高微細度な構造体の造形が可能となった。実際に、独自スライサーを用いれば、微細度 10^3 程度の構造体の実現可能であることを、造形例と共に示した。考案した新規 AM データ処理を用いた場合の微細度 $10^3 \sim 10^4$ における圧縮率は $10^9 \sim 10^{12}$ であった。

第5章では、課題 (2) 「非周期的異方性多孔質構造体の構造定義の確立」を解決する提案としての「陰関数曲面を用いた連続的内部構造変調による構造定義」について詳しく述べた。具体的には、スライシング段階で用いる内部構造判定式 $Structure(x, y, z)$ の定義として、陰関

数曲面をモーフィング接続する構造定義である「連続的内部構造変調」について述べた。こりにより既存のユニットセルを周期配置する構造定義や、格子を変形する手法で実現可能な構造体を包括しつつ、大きく異なる構造をもつ内部構造を連続的形状変化によって実現することが可能となり、非周期的異方性多孔質構造体の構造定義を確立した。また利用する陰関数曲面としてジャイロイド極小曲面を挙げ、これをパラメトリックに制御したパラメトリックジャイロイド構造を利用することで、様々な物性をパラメータ制御可能であることを示し、パラメータにより内部構造が制御された構造体が生成可能であることを、造形例と共に示した。

第4章、第5章で具体的に提案・実現した新規AMプロセスは、計算コストも低いため、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。

本研究で提案した構造定義によって、既存の設計法で採用されている構造定義では現実的に不可能であった、連続的形状変化をする階層的微細内部構造のマルチスケールな構造設計が可能となった。この成果は特許出願済である。

第6章では、新規AMプロセス、パラメトリックジャイロイド構造、そしてトポロジー最適化を利用し、機能構造体の設計・実現のデモンストレーションを行った。トポロジー最適化で設計された外形構造に対して、異方的内部構造を作り込むことによって、トポロジー最適化で得られる最適構造の剛性特性を維持しつつも、緩衝性に優れた機能構造体得られる可能性を示し、内部構造を作り込むことで、より良い構造体を実現可能であることを実証した。

第4、5章によって開拓された新規AMプロセスが、第6章において、機能構造体を設計・実現する手法として有用であることを実証したことで、本研究目的である「微細度 10^3 以上の非周期的異方性多孔質構造による機能構造体の実現」が達成された。

7.2 本研究の意義

本研究の重要な成果は、既存の構造定義で実現可能な構造を包括しつつも、任意の箇所の物性をパラメトリック制御可能なマルチスケール構造体の構造定義の提案と、実際に実現するための新規データ処理の開発である。この成果とAM技術を併せることで、既存の構造設計の知見を活かしつつ、今まで実現不可能であった構造体を設計し、実現することが可能となった。

この成果は、AM技術の発展に大きく貢献する成果であることは間違いないが、制御可能なマルチスケール構造を持つ構造体設計とその実現は、理学・工学研究に対して、新たな材料選択の可能性を切り拓くであろう、明らかに重要な基礎技術である。

本成果を用いれば、シミュレーション困難なマルチスケール問題を実験的に解析することが可能であり、その物理知見は非常に価値が高い。また、任意の箇所で任意の構造を実現できるため、既にユニットセル構造などで得られている知見を活かした新規構造材料は、宇宙空間などの厳しい設計条件下における材料として、より良い材料を提示することが可能である。

さらに、AM技術によって実際に構造体を実現できるということは、産業転用までシームレスに行えることに他ならない。即ち、理学的な基礎研究と工学的な応用研究に対し、横断して貢

献できるのみならず、その成果を社会実装することが容易であり、学術分野を超えて大きなインパクトを持つと考えられる。

また、本研究の本質は、マルチスケールな構造に対して、基底関数を用いた汎関数表現を適用することで、少数パラメータで目的変数を制御し、その最適化を試みたという点にあり、これは物理学における変分法に他ならない。即ち、物理学の学理である変分法を、他分野のマルチスケール問題に導入し、構築した極めて具体的な事例と捉えることが可能であり、このような応用は他分野にも十分に展開可能である。例えば、メゾ気象学と総観気象学、心理学と社会学など、スケールの異なる分野の知見を活かし、ミクロな知見から基底関数を定義し、マクロな知見に基づき汎関数と目的変数を決定することで、様々なマルチスケール問題について系をより深く理解するための知見を提示可能である。一方でマルチスケール問題の解決手法として、近年ビッグデータ解析の有用性が注目を浴びているが、これは系全体を、膨大なパラメータによってモデル化を行うため、系を表現し予測する事は出来るが、系を理解し制御することは容易ではなく、既存の知見を活用した系の理解には結びつきにくい。

7.3 今後の展望

新規 AM プロセスの活用

今後の新規 AM プロセスを活用した機能構造体研究の展望としては、より最適化された機能構造体の設計およびその実現が考えられる。

本研究の手法を用いれば、非常に自由度が高く、基本的にはどのような構造でも比較的容易に実現可能であるが、大きな特徴の一つは、内部構造としてパラメトリックジャイロイド構造などを採用することによって、微細化限界まですべての空孔が接続し、閉じられた空孔領域のない面構造を作り込めることが挙げられる。これにより、単位体積あたりの内部的な表面積(比表面積)を自由に変更することが可能となる。空間的に自由に比表面積が制御可能であると、後処理としてめっきなどのコーティング処理を施した際の改質効果に、大きく変化を与えることが可能である。例えば、金属めっきを施した後で光硬化樹脂を除去すれば、比表面積に比例した密度を持ち、なおかつ、それらが荷重に対して最適化された異方性を持つといった、内部構造が完全制御された金属マイクロラティス(多孔質)材料が作製可能である [6]。

これが本手法を用いて到達できるであろう究極的な力学的機能構造体の一つであると考えている。

実際に無電解めっきをパラメトリックジャイロイド構造に施すことを試みたが(図 7.1)、現状の無電解めっき技術では、このような複雑な配管形状に、十分にめっきすることができず、強度改善などの改質効果は見られなかった。

本研究室と共同研究を行っている東京大学工学部マテリアル工学科霜垣・百瀬研究室では、超臨界成膜技術の研究が行われており [66]、超臨界成膜を用いれば、無電解めっきが施せない複雑形状であっても、等膜に成膜可能と思われる。一方で、超臨界成膜による大型ポリマー材料

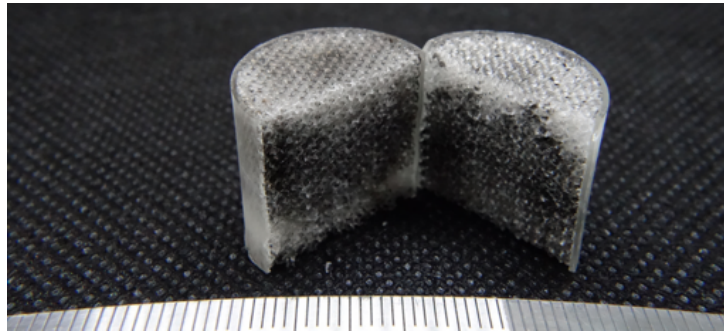


図 7.1 無電解めっきを用いて Ni めっきを施した一様ジャイロイド構造. ほとんど成膜されておらず期待された効果は得られなかった. めっき加工は本研究で使用している光硬化樹脂への無電解めっきに実績のある外部企業 [65] に依頼した. 今まで成膜可能であった構造体よりも内部構造が微細かつ複雑であったため, めっき液がほとんど循環できなかったと思われる.

への成膜技術は, まだ発展段階であり, 今後の発展が期待される.

設計の際の構造最適化手法としては, 異方的な弾性率を考慮できる均質化法を採用し, 本研究で提案した連続的内部構造変調を組み合わせることで, 一般的なトポロジー最適化による最適構造を大きく超えた機能構造体の実現が現実化可能である.

また, モデルデータのデータサイズが指数関数的に増加する問題は, 有限要素法などによる解析など, 多くの状況で起きる事である. 本 AM プロセスを用いれば, 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る. つまり, 本研究の成果は, 新規機能構造体の探求や創造のみならず, 様々な研究分野での活用が期待できる.

例えば, 多孔質材料は, 軽量性や剛性や緩衝性のみならず, 触媒性能や通気性などの様々な特性において優れている. 一方で, それらのマクロスコピックな特性が, 微細な構造制御により, どのように変化するかは自明ではない. 本 AM プロセスを用いれば, 任意の多孔質構造を容易に実現可能であるため, 微細な構造制御が, マクロスコピックな物性にどのような影響を与えるかといった, シミュレーションでは得難い知見を系統的に得ることが可能である. このような知見は, 目的に最適化された機能構造体の, 内部構造の最適設計指針を定める知見となり得ると同時に, 今までに実現されていない優れた機能を有する機能構造体の実現に大いに貢献すると思われる.

ソフトウェアの改良

また本研究で提案した新規 AM データ処理および開発したスライシングソフトウェアは, 超微細な構造体の造形データは容易に生成可能であるが, シミュレーションへ流用可能なモデルデータが得られないというデメリットが挙げられる. 造形誤差が存在することを考えると, シミュレーションを行えるモデルを生成できるようにするべきであるが, 1 TB ~ 1 PB 程度のモデルデータを取り扱うのは, 現実的ではない. そのため, 別途曲面表現の品質を大きく下げたモ

デルデータの生成もしくは、分割したモデルデータの生成及びシミュレーションを行う必要があり、これは今後の課題といえる。

さらなる高微細度化

本研究では、微細度 10^4 程度の構造体の実現手法を確立したが、さらなる高微細度化も可能である。

現在本研究室で開発している AM 装置「RECILS」は、入力データ形式として画像データ形式 (*.png, *.jpg) を指定しているが、本研究で開発したスライシングソフトウェアは、造形面データを 1 層生成するのに 30 ms 程度で済むため、入力データ形式をモデルデータ形式 (*.stl, *.obj) とし、造形面データを造形動作の直前に RAM 内に生成し造形することが可能である。これにより、スライシングによる時間コストが完全になくなるというメリットが挙げられるが、AM 装置の解像度、もしくは最大造形可能サイズが改善し、さらなる高微細度化が可能になった際には、このような手法を取らざるを得ないはずである。具体的に言えば、微細度 10^5 程度の造形データは、一層毎に 1 GB 程度の画像データとなる。全ての造形面データを保存することは現実的ではなく、造形面データを RAM 内に生成し造形後に消去するのが現実的である。もし、全ての造形面データを保存を行いたい場合は、*.mp4 形式のように、前層の造形面データとの差分のみ記録することで、大きくデータサイズを圧縮できるはずである。

また、微細度 10^6 以上の造形データは、一層毎に 100 GB 以上のデータとなるため、一般的な AM 装置ではメモリ不足により、本 AM プロセスを用いても造形不可能である。しかしながら、RECILS は露光を面ではなく、線 (ラスタスキャン) によって行う。そのため原理的にはストリーミング形式でデータを流し込み続けることで、メモリ容量を気にせず半永久的に一層分の造形を行うことが可能である。即ち、微細度 10^6 以上の造形データであっても、造形速度よりも高速に部分的な造形データを生成・出力し続けることが出来れば、造形が可能である。本研究で開発したスライシングソフトウェア及び構造定義の計算速度は充分それに達しているため、さらなる高微細度化にも充分対応可能といえる。

本研究で提案した「高微細度な非周期的異方性多孔質構造体」のための「連続的内部構造変調」による構造定義を用いた構造設計は、マルチスケールに制御された構造体を自由に設計・実現可能な極めて優れた設計法である。

本研究成果が、今後の構造体設計および実現を助け、理学および工学の発展に貢献し、将来的に世の中のありとあらゆる構造体が細部に至るまで最適設計された、夢のような世界が実現することを、ここに願う。

謝辞

本論文は東京大学大学院 理学系研究科 物理学専攻の 2018 年度課程博士論文として書かれたものです。本研究（の一部）は国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）の研究成果展開事業「センター・オブ・イノベーション（COI）プログラム」の支援によって行われました。

また私が今回の研究を行えたのは、多くの方々に御指導・御協力を頂いた事に他ならず、到底ここには書ききれませんが、お世話になった方々にお礼の言葉を述べさせていただきます。

現総長である五神真先生には、私が修士の頃よりご指導を頂き、数々の貴重な体験をさせて頂きました。常に物事の本質や価値を見出してくださり、いつも研究の指針を導いてくださりました。研究や技術的な事だけでなく、私が一時休学する際や、復学する際など、道に迷っている際に暖かくご相談に乗ってくださり、いつも私を良い方向へ導いてくださりました。私が現在明るく前向きに生きているのはすべて先生のおかげです。ありがとうございます。

指導教員である湯本潤司教授には、休学中であった私を本研究テーマにお誘い頂き、未熟な私に再度研究活動を行える機会をくださいました。いつも暖かく見守りながらも、困った際には丁寧にご指導してくださり、ありがとうございます。安心して研究活動を行えたのは湯本教授のおかげあり、感謝の念に尽きません。

本論文の主査である秋山英文教授には、論文のまとめ方から発表に至るまで、親身にご指導を頂きました。また、休学をする際にも個人的に相談にのって頂きました。当時、秋山教授に頂いたお言葉のおかげで、復学後も研究を心から楽しんで行なうことが出来ました。

長谷川修司教授、常次宏一教授、三尾典克教授、江尻晶准教授には、本論文の副査としてご指導を頂きました。未熟な私が、本研究を一つの論文としてまとめ上げる事ができたのは、主査である秋山教授、並びに副査の否様のご尽力あつてのことです。誠にありがとうございました。

田丸博晴特任准教授には、多くの御助言を頂き、その物事の本質を見抜かれたご指摘を頂く度に、深い知識と洞察に驚き、AM 装置開発の指針となってくださいました。本論文の執筆にあたって核心的なアドバイスを多々頂きました。

元研究員である安河内裕之氏、研究員である添田建太郎氏の両氏には、エンジニアリングの難しさ、面白さなど本研究の AM 技術に関わる全てを教わりました。私には到底不可能な速度で開発を行っていく両氏のエンジニアとしての能力の高さ、経験の豊富さ、知識の深さには感動を覚え、両氏の開発行程を間近で体験できたことは貴重な経験でした。安河内氏が発明され

た AM 技術が本研究の核となっているのは言うまでもありませんが、このような素晴らしい技術を実現された安河内氏と短い期間ですが一緒に研究が行えた事は、私にとって大きな財産であり、本研究を推進する原動力となりました。添田氏のアイデアの豊富さや問題解決の速さには常に驚かされ、エンジニアリングの楽しさを教えていただきました。私が造形作業やソフトウェア開発に行き詰まった際にはいつも御助言を頂き、その都度大きく開発を前進させることができました。私の突飛なアイデアに対しても真剣に考えてくださったり、また研究に限らず様々な事に誘ってくださる添田氏の親しみやすいお人柄に常に支えられた事で、いつも楽しく研究生活を過ごすことが出来ました。お二人と共に研究できた事に、深く感謝致します。ありがとうございました。

小西邦昭助教には、AM 技術の光学分野応用への知見やアイデアを教わるだけでなく、他研究室との連携などにおいても、常に架け橋となってくださり、知識を大きく広げる事ができました。小西助教が架け橋となり、霜垣・百瀬研究室の百瀬健講師には超臨界成膜技術を教えて頂き、本研究で使用しているポリマー素材への超臨界成膜を試みるなどの取り組みをして頂きました。百瀬講師氏含む同研究室の関わった方々に感謝致します。またさらに小西助教には研究生活において困った際にも真っ先に相談にのってくださりと、多大なるご配慮を頂きました。本論文の執筆にあたっては様々な御助言を頂きました。小西助教のように、誰からでも信頼される人間になれるよう努力していきたいと思えます。

本研究室の元助教授である吉岡孝高准教授には、私が修士の頃にご指導を頂きました。当時からすると研究内容は大きく変わりましたが、本研究が遂行出来たのは、当時お教え頂いた知識、技術があつてのことです。熱心なご指導を頂いたことに、深く感謝致します。ありがとうございました。

森田悠介助教には、修士の頃よりお世話になり、いつも暖かく見守り、御指導していただきました。修士の頃に森田助教と共に研究を行えた事で学び得た知識、技術、知見、姿勢などは、全て私にとってかけがえのないものです。感謝をしても仕切れない程ではありますが、ここに心より感謝致します。ありがとうございました。

堀越宗一助教には、本研究の要である、任意設計可能な高微細度構造体の将来性について議論させていただきました。堀越氏の専門性の高い深い知識や、分野にとらえられずに何事へも興味を強く持ち深く探求する姿勢は、まさに私の持つ理想的な研究者像を体現しており、強い憧れと共に見習わせていただきました。

井手口拓郎講師には、研究者として視野を広く持つことの重要性を教わりました。井手口講師の言葉や行動に常に影響を受け、未熟ではありますが私も将来的な視野を広げて研究を行うことが出来ました。

研究員である大門正博氏には解析ソフトウェアの導入や、実験室の引っ越しの際に多大なるご尽力を頂き、滞りなく引っ越し作業を進めることが出来ました。いつも優しく接して頂き、来室されると一気に部屋の雰囲気が変わる大門氏のお人柄に幾度も助けられました。

学術支援専門職員である生津英夫氏、元研究員である竹田研爾氏には化学的な知見から AM における樹脂について多くの御助言を頂きました。

研究員である平野大輔氏，博士課程二年である飯田耀氏には，プログラミング技術について多くのことを教えて頂きました。両氏の私にはない深い知識に刺激される事で，プログラミング技術を深めることが出来ました。

特別実験として配属された和久井壺寿氏，相澤宗厳氏，川野将太郎氏，また研究員の横堀秀一氏とは共に同じ実験室で造形を行い，AM 技術の知見を深めてくれました。

同学年である櫻井治之氏には，特に復学後大変お世話になりました。自己管理能力が著しく低い私が博士課程生活を送れたのは，櫻井氏のおかげです。櫻井氏の優しい人柄にいつも助けられ，居室で談笑する時間が私にとっては非常に大切な時間でした。私のくだらない話にもいつも楽しげにに応じてくださり，ありがとうございました。

同期である石井俊太郎氏，池町拓也氏には多くの刺激をもらい，修士時代から研究のみならず，様々な事について議論を交わしました。いつも私の突拍子もない話も真剣に聞き，議論してくださったのは，かけがえのない財産です。両氏と同期であった事に感謝致します。

学術支援専門職員・秘書の白濱昌子氏，大島茜氏，小鷲貴美子氏には，休学・復学における手続きを含む事務手続きのみならず，ときに相談に乗ってくださったりと，研究生生活のあらゆる場面において常に支えて頂きました。未熟な私が研究活動を行えたのは，秘書の皆様のお力添えがあつての事に他なりません。誠にありがとうございました。

また，本研究では AM 装置開発にあたり，様々な方々にご協力，ご指南を頂きました。

デクセリアルズ社の氏には本研究で使用した光硬化樹脂について大変お世話になりました。元 Sony 研究員である平坂久門氏にはレーザドライバ回路でお世話になり，また電子回路全般について多くの事を教えて頂きました。Sony 株式会社の木原信宏氏，葛迫淳一氏には AM 装置及び造形物の社会実装の難しさなど，AM 全般の知識を多く教えて頂きました。工作室技術員の川端光洋氏，大塚茂巳氏には，AM 装置に使用した部材制作にあたり，大変お世話になりました。本研究が行えたのは皆様のご協力にがなければ成し得ませんでした。心よりお礼申し上げます。

私が研究生生活を送れたのは，親族，家族のご支援あつての賜物であり，ここに深く感謝します。

最後に，その他にも，数多くの方々にご支援していただきました。ここに書くことが出来なかった方々も含め，本研究をご支援して下さった多くの方々に改めてお礼申し上げます。

平成 31 年 3 月 27 日

鈴木 博祐

参考文献

- [1] U. G. K. Wegst, H. Bai, E. Saiz, A. P. Tomsia, and R. O. Ritchie: “Bioinspired structural materials” *Nature Materials* **14** (2015).
- [2] P. Vukusic and J. R. Sambles: “Photonic structures in biology” *Nature* **424**, 14 (2003).
- [3] D. Tawara and K. Nagura: “Predicting changes in mechanical properties of trabecular bone by adaptive remodeling” *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering* **20**, 4 (2017).
- [4] H. Sun, Z. Xu, and Chao Gao: “Multifunctional, Ultra-Flyweight, Synergistically Assembled Carbon Aerogels” *Advanced Materials* **25**, 2554-2560 (2013).
- [5] J. Banhart: “Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams” *Progress in Materials Science* **46**, 559–632 (2001).
- [6] T.A. Schaedler, A.J. Jacobsen, A. Torrents, A.E. Sorensen, J. Lian, J.R. Greer, L. Valdevit, and W.B. Carter: “Ultralight Metallic Microlattices” *Science* **334**, 6058 (2011).
- [7] M.G. Rashed, M. Ashraf, R.A.W. Mines, and Paul J. Hazell: “Metallic microlattice materials: A current state of the art on manufacturing, mechanical properties and applications” *Materials and Design* **95**, 518-533 (2016).
- [8] D. R. Smith, Willie J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat-Nasser, and S. Schultz: “Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity” *Physical Review Letters* **84** (2000).
- [9] R. A. Shelby, D. R. Smith and S. Schultz: “Experimental Verification of a Negative Index of Refraction” *Science* **292**, 5514 (2001).
- [10] K. Konishi, T. Higuchi, J. Li, J. Larsson, S. Ishii, and M. Kuwata-Gonokami: “Polarization-Controlled Circular Second-Harmonic Generation from Metal Hole Arrays with Threefold Rotational Symmetry” *Physical Review Letters* **112**, 135502 (2014).
- [11] T. Kan, A. Isozaki, N. Kanda, N. Nemoto, K. Konishi, H. Takahashi, M. Kuwata-Gonokami, K. Matsumoto, and I. Shimoyama: “Enantiomeric switching of chiral

- metamaterial for terahertz polarization modulation employing vertically deformable MEMS spirals” *Nature Communications* **6**, 8422 (2015).
- [12] W.J. Otter, N.M. Ridler, H. Yasukochi, K. Soeda, K. Konishi, J. Yumoto, M. Kuwata-Gonokami, and S. Lucyszyn: “3D printed 1.1 THz waveguides” *Electronics Letters* **53**, 471 (2017).
- [13] J. Fischer and M. Wegener: “Three-dimensional optical laser lithography beyond the diffraction limit” *Laser and Photonics Review* **7**, 22-44 (2014).
- [14] J. Fischer, J. B. Mueller, J. Kaschke, T. J. A. Wolf, A.-N. Unterreiner, and M. Wegener: “Three-dimensional multi-photon direct laser writing with variable repetition rate” *Optical Express* **21**, 26244-26260 (2013).
- [15] M. Deubel, G. von Freymann, M. Wegener, S. Pereira, K. Busch, and C.M. Soukoulis: “Direct Laser Writing of Three-Dimensional Photonic Crystal Templates for Telecommunications” *Nature Materials* **3**, 444-447 (2004).
- [16] T. Ergin, N. Stenger, P. Brenner, J. B. Pendry, and M. Wegener: “Three-Dimensional Invisibility Cloak at Optical Wavelengths” *Science* **328**, 16 (2010).
- [17] J. Qu, M. Kadic, A. Naber, and M. Wegener: “Micro-Structured Two-Component 3D Metamaterials with Negative Thermal-Expansion Coefficient from Positive Constituents” *Scientific Reports* **7**, 40643 (2017).
- [18] H. Yasukochi, K. Soeda, and H. Suzuki: “3D Model Generation Device, 3D Model Generation Method, 3D Model Generation Program, Structure, And Structure Manufacturing Method” PCT/JP2018/021161 (2018).
- [19] B. Redwood, F. Schöffner, and B. Garret: “The 3D Printing Handbook: Technologies, design and applications” 3D HUBS (2018).
- [20] 丸谷洋二, 早野誠治: “3D プリンター — AM 技術の持続的発展のために” オプトロニクス社 (2014).
- [21] 小玉秀男: “立体図形作製装置” 特開昭 56-144478 (1981).
- [22] C. W. Hull: “Apparatus For Production Of Three-Dimensional Objects By Stereolithography” US4575330 (1984).
- [23] H. Ahn, M. Montero, D. Odell, S. Roundy, and P. K. Wright: “Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS.” *Rapid Prototyping Journal* **8**, 4 (2002).
- [24] J. Ryan C. Dizona, A. H. Espera Jr, Q. Chena, and R. C. Advincula: “Mechanical characterization of 3D-printed polymers” *Additive Manufacturing* **20**, 44-67 (2018).
- [25] R. Hague, S. Mansour, and N. Saleh: “Material and design considerations for rapid manufacturing.” *International Journal of Production Research* **42**, 22:4691-708 (2004).
- [26] T. Tomonari, A. Masumori, M. Fujii, and H. Tanaka: “An Internal Structure and Attributes Provided by Voxel-based 3D Data Format FAV (Fab-able Voxel)” *Imaging*

- Conference JAPAN A-16*, 33 (2016).
- [27] W. Prager: “A note on discretized Michell structures” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* **3**, 3 (1974).
- [28] O. C. Zienkiewicz and J. S. Campbell: “Optimum Structural Design” Willy and Sons (1973).
- [29] M. P. Bendsøe and N. Kikuchi: “Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* **71**, 2 (1988).
- [30] M. P. Bendsøe: “Optimal shape design as a material distribution problem” *Structural Optimization* **1**, 4 (1989).
- [31] Airbus Defence and Space Press Release “Airbus Defence and Space optimising components using 3D printing for new Eurostar E3000 satellite platforms” Airbus Defence and Space Ltd. (2015).
- [32] M. Frecker, N. Kikuchi, and S. Kota: “Topology optimization of compliant mechanisms with multiple outputs” *Structural Optimization* **17**, 269-278 (1999).
- [33] M. Leary, L. Merli, F. Torti, M. Mazur, and M. Brandt: “Optimal topology for additive manufacture: A method for enabling additive manufacture of support-free optimal structures” *Materials and Design* **63**, 678–690 (2014).
- [34] J.A.Sethian and A. Wiegmann: “Structural Boundary Design via Level Set and Immersed Interface Methods” *Journal of Computational Physics* **163**, 2 (2000).
- [35] J. Wu, N. Aage, R. Westermann, and O. Sigmund: “Infill Optimization for Additive Manufacturing—Approaching Bone-Like Porous Structures” *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* **24**, 2 (2018).
- [36] C. Coulais, D. Sounas, and A. Alù: “Static non-reciprocity in mechanical metamaterials” *Nature* **542**, 461–464 (2015).
- [37] B. Florijn, C. Coulais, and M. van Hecke: “Programmable Mechanical Metamaterials” *Physical Review Letters* **113**, 175503 (2014).
- [38] A. Ion, J. Frohnhofer, L. Wall, R. Kovacs, M. Alistar, J. Lindsay, P. Lopes, H. Chen, and P. Baudisch: “Metamaterial Mechanisms” *In User Interface Software and Technology* (2016).
- [39] T. Frenzel, M. Kadic, and M. Wegener: “Three-dimensional mechanical metamaterials with a twist” *Science* **358**, 6366 (2018).
- [40] A. Takezawa, Y. Koizumi, and M. Kobashi: “High-stiffness and strength porous maraging steel via topology optimization and selective laser melting” *Additive Manufacturing* **18**, 194–202 (2017).
- [41] A. Takezawa, M. Kobashi, Y. Koizumi, and M. Kitamura: “Porous metal produced by selective laser melting with effective isotropic thermal conductivity close to the

- Hashin–Shtrikman bound” *International Journal of Heat and Mass Transfer* **105**, 564–572 (2017).
- [42] T. Bückmann, M. Kadic, R. Schittny, and M. Wegener: “Mechanical cloak design by direct lattice transformation” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **112**, 4930–4934 (2015).
- [43] R. C. Rumpf, J. Pazos, C. R. Garcia, L. Ochoa, and R. Wicker: “3D printed lattices with spatially variant self-collimatio” *Progress in Electromagnetics Research* **139**, 1–14 (2013).
- [44] A. Panesar, M. Abdia, D. Hickmana, and I. Ashcrofta: “Strategies for functionally graded lattice structures derived using topology optimisation for Additive Manufacturing” *Additive Manufacturing* **19**, 81–94 (2018).
- [45] A. Okabe, B. Boots, K. Sugihara, and S.N. Chiu: “Spatial Tessellations: Concepts and Applications of Voronoi Diagrams” Willy and Sons (2000).
- [46] S. Gomez, M.D. Vlad, J. Lopez, and E. Fernandez: “Design and properties of 3D scaffolds for bone tissue engineering” *Acta Biomaterialia* **42**, 341–350 (2016).
- [47] I. Buj-Corral, A. Bagheri, and O. Petit-Rojo: “3D Printing of Porous Scaffolds with Controlled Porosity and Pore Size Values” *Materials* **11**, 1532 (2018).
- [48] H. Yasukochi: “Three-dimensional modeling apparatus, object, and method of manufacturing an object”, US20120045617A1 (2012).
- [49] デクセリアルズ社 SK1100 シリーズ 製品 ホームページ:
“<http://www.dexerials.jp/products/b2/sk1100.html>”, デクセリアルズ株式会社.
- [50] The Stanford Bunny Model Data: “<http://graphics.stanford.edu/data/3Dscanrep>”, Stanford University.
- [51] : OpenGL (ホームページ) : “<https://www.opengl.org>”, Khronos Group.
- [52] : OpenGL Shading Language (ホームページ) :
“https://www.khronos.org/opengl/wiki/OpenGL_Shading_Language”, Khronos Group.
- [53] W. E. Lorensen and H. E. Cline: “Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm” *SIGGRAPH*, 163–169 (1987).
- [54] A. P. Witkin and P. S. Heckbert: “Using particles to sample and control implicit surfaces” *SIGGRAPH*, 269–277 (1994).
- [55] G. Turk and J. F. O’Brien: “Modelling with implicit surfaces that interpolate” *ACM Transactions on Graphics*, **21**, 4 (2002).
- [56] G. Turk and J. F. O’Brien: “Shape transformation using variational implicit surfaces” *SIGGRAPH*, 335–342 (1999).
- [57] A. H. Schoen: “Infinite periodic minimal surfaces without self-intersections” *NASA Technical Note TN D-5541* (1970).

- [58] F. R. Buckminster: “Synergetic building construction” US2986241A (1956).
- [59] T. Yasui, Y. Matsuoka, T. Ohshima, K. Akiyoshi, and H. Tanaka: “3D Printing Lightweight Structures in Architectural Scale” *International Association for Shell and Spatial Structures* (2015).
- [60] M. Wohlgemuth, N. Yufa, J. Hoffman, and E. L. Thomas: “Triply Periodic Bicontinuous Cubic Microdomain Morphologies by Symmetries” *Macromolecules* **34**, 6083-6089 (2001).
- [61] 竹内雍: “多孔質体の性質とその応用技術” フジ・テクノシステム (1999).
- [62] M. R. J. Scherer: “Double-Gyroid-Structured Functional Materials” Springer (2013).
- [63] S. N. Khaderi, V. S. Deshpande, and N. A. Fleck: “The stiffness and strength of the gyroid lattice” *International Journal of Solids and Structures* **51**, 23-24 (2014).
- [64] L. J. Gibson and M. F. Ashby: “Cellular Solids: Structure and Properties” Cambridge University Press (1999).
- [65] 株式会社ヒキフネ ホームページ: “<http://www.hikifune.com>” 株式会社ヒキフネ.
- [66] Y. Zhao, K. Jung, Y. Shimoyama, Y. Shimogaki, and T. Momose: “Conformal bismuth titanate formation using supercritical fluid deposition” *ECS Journal of Solid State Science and Technology* **6**, 483-488. (2017).

付録 A

AM 手法の分類

AM 分類名	説明	主な素材	他の呼称
材料吐出堆積 Material Extrusion	材料をノズルから押し出し選択的に配置、積層する造形手法	ABS 樹脂, PLA 樹脂	Fused Deposition Modeling (FDM)
液槽光重合 (光造形法) Vat Polymerization	液槽に貯めた光硬化性樹脂にレーザなどの光を照射し選択的に硬化させて積層する造形手法.	アクリル系樹脂, エポキシ系樹脂	Stereolithography (SLA), Direct Light Processing (DLP), Continuous Liquid Interface Production (CLIP), Two-Photon Polymerization (二光子重合法)
粉末床溶融結合 Powder Bed Fusion	熱エネルギーによって粉末を選択的に溶かし固める造形手法	金属, セラミック, ナイロン樹脂	粉末焼結, Selective Laser Sintering (SLS)

AM 分類名	説明	主な素材	他の呼称
材料噴出堆積 Material Jetting	光硬化樹脂やワックスなどの造形材料をインクジェットノズルから吐出配置し積層する造形手法	アクリル系樹脂, エポキシ系樹脂	インクジェット式, Drop On Demand (DOD), PolyJet
結合剤噴射 Binder Jetting	造形材料に対し, バインダー (接着剤) を選択的にノズルから吐出し結合させる造形手法	石膏, デンプン, 塩	インクジェット式, Color Jet Printing (CJP)
指向性エネルギー堆積 Direct Energy Deposition	造形材料を噴射しつつレーザーなどによって溶かしながら積層積層する造形手法	金属粉末	レーザーデポジション
シート積層 Sheet Lamination	シート状の材料をレーザーやドリルなどで加工しながら, 接着や溶接により積層造形を行う手法	樹脂, 金属, 紙	Laminated Object Manufacturing (LOM)

付録 B

光造形法

ここでは、光造形法の基礎知識と本研究で用いた一次元規制液面型光造形法の留意すべき特徴について述べる。

B.1 光造形法とは

光造形法は AM の中で最も歴史のある手法である。一般的には液槽内に溜めた光硬化樹脂に光を照射し、一層ずつ硬化させ積層させることによって造形を行う。各層の層厚は $10 \sim 100\mu\text{m}$ 程度である。

造形材料としては液槽内に充填した光硬化樹脂のみを用いて造形を行うため、通常得られる造形物は単一素材である。また、各層間の結合は光硬化樹脂による分子結合であるため、FDM 方式に代表される材料吐出堆積方式の AM プロセスと比較すると、得られる造形物の材料特性の異方性が小さいのが特徴である。

B.2 分類と特徴

光造形法は、造形物の固定手法によって自由液面方式 (Top-Down) と規制液面方式 (吊り下げ式, Bottom-up) に分類され、さらに光源とその照射手法によって代表的には Stereolithography (SLA), Direct Light Processing (DLP), Continuous Liquid Interface Production

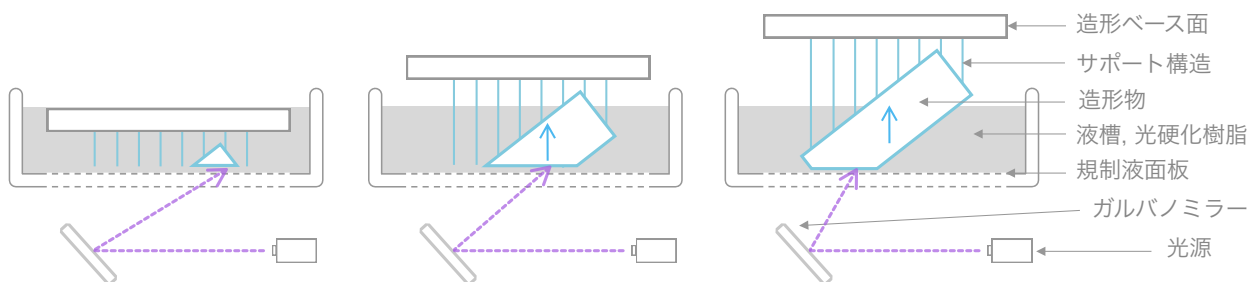


図 B.1 一般的な光造形法の造形プロセス (規制液面方式).

(CLIP) に分類される。

ここではそれらの光造形手法に加えて、本研究で用いた次元規制液面法の特徴について述べる。

自由液面方式 (Top-Down)

自由液面方式は、最初に考案された光造形法である。図 B.2 左図のように、光硬化樹脂で満たされた液槽の液面上部から光を照射して光硬化樹脂を選択的に硬化させる。一層造形が終わると、造形ベース面を下降させて次の層の造形へ移る。

液面の揺れなどにより、解像度が後述の規制液面方式に比べて劣る。また、造形物の体積以上に光硬化樹脂に満たされた液槽が必要である。

規制液面方式 (吊り下げ式, Bottom-up)

規制液面方式は、現在多くの光造形機が採用している方法である。図 B.2 右図のように、液槽底面が光を透過する材質の板、規制液面板 (ガラスや透明プラスチックなど) になっており、光を規制液面板を透過させて照射し、光硬化樹脂を選択的に硬化させる。一層造形が終わると、造形ベース面を上昇させて次の層の造形へ移る。

液槽が造形物よりも小さくても造形可能であり、規制液面板によって造形面に揺らぎが起きないため、自由液面方式よりも解像度が良い。一方で、一層造形した後に規制液面板に少なからず造形物が付着するため、剥離を行う必要がある。そのため微細な構造や、大面積を持つ構造体の造形が難しい。

Stereolithography (SLA)

SLA は光源にレーザー光を用いる方式である。波長は 375 nm, 405 nm を採用するのが一般的であり、単一層内での解像度を一定に保つために 1mm 程度のレイリー長で集光された光が用いられる。スポット径はおおよそ $10\mu\text{m}$ 程度である。各層毎に、露光領域に対して光をガル

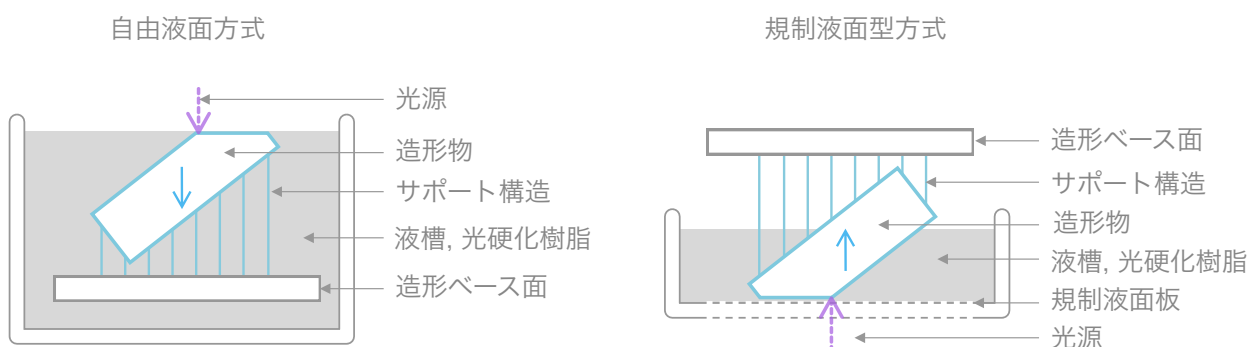


図 B.2 自由液面方式と規制液面方式の違い

バノミラーによって走査し線・点単位で露光, 造形を行う。

Direct Light Processing (DLP)

DLP は光源に LED もしくは UV ランプを用いる方式である。光を Digital Micromirror Device (DMD) に反射させ, 各層毎に造形面に対しスクリーン照射を行うことで面単位で露光し造形を行う。標準的な DMD の解像度は 1024x780 であるため, 造形物の最大サイズを 10cm x 10cm とするとその最小スポットサイズはおよそ 100 μ m 程度となる。

Continuous Liquid Interface Production (CLIP)

CLIP は Carbon 社が 2015 年に発表した比較的新しい方式である。DLP の一種と捉えることも可能であるが, ここでは別方式として紹介したい。

DLP と大きく異なる点は規制液面板に酸素透過膜を用いる点である。光硬化性樹脂は酸素によって硬化が阻害される性質を持つことが知られており, CLIP では酸素透過性の規制液面板を用いて光硬化樹脂と規制液面板の境界面に酸素を供給することで, 規制液面板と光硬化樹脂の接着を抑制している。規制液面板と造形物の引き剥がしを行う必要がないため, 連続的に造形物を引き上げつつ常時露光しながら造形を行う。その結果, 微細な構造を引き剥がす衝撃によって破壊しないだけでなく, 造形速度が従来方式の SLA や DLP よりも飛躍的に速く (25-100 倍程度), さらに得られる造形物には積層痕が存在しないという非常に優れた特徴を持つ。

一方で CLIP にはいくつか課題があると考えられる。第一に, 現状では DMD を用いる必要があるため, 造形面内の解像度は原理的に SLA に劣るという点。第二に, 光硬化樹脂が硬化する際の重合反応による発熱を考えると大断面積の造形物の造形は困難である点。第三に, 造形途中に造形物を液面から浮かせることができないため, 中空の造形物の場合, 内圧が下がりすぎてしまい造形が困難な点である。

一次元規制液面型光造形法

一次元規制液面型光造形法は, 本研究室の元研究員である安河内裕之氏が発明した光造形法である。付録 A の分類に倣えば, 規制液面方式の SLA として捉えることができる。

一般的な規制液面方式の SLA との違いは, 規制液面板の形状とレーザーの照射方法, そして規制液面板と造形物の引き剥がし手法にある。通常, 規制液面方式の SLA では, 平面の規制液面板が底部に配置された箱型の液槽に充填された光硬化樹脂を硬化させることで造形を行うが, 一次元規制液面型光造形法では従来方式の液槽は存在せず, 円筒状の規制液面板と造形面の隙間に光硬化樹脂を流し込み, 規制液面板と造形面の隙間に生じる毛細力によってトラップされた光硬化樹脂を硬化させることで造形を行う。規制液面板が円筒であるので, 規制液面板と造形面は線状 (一次元) に接触する事になる。

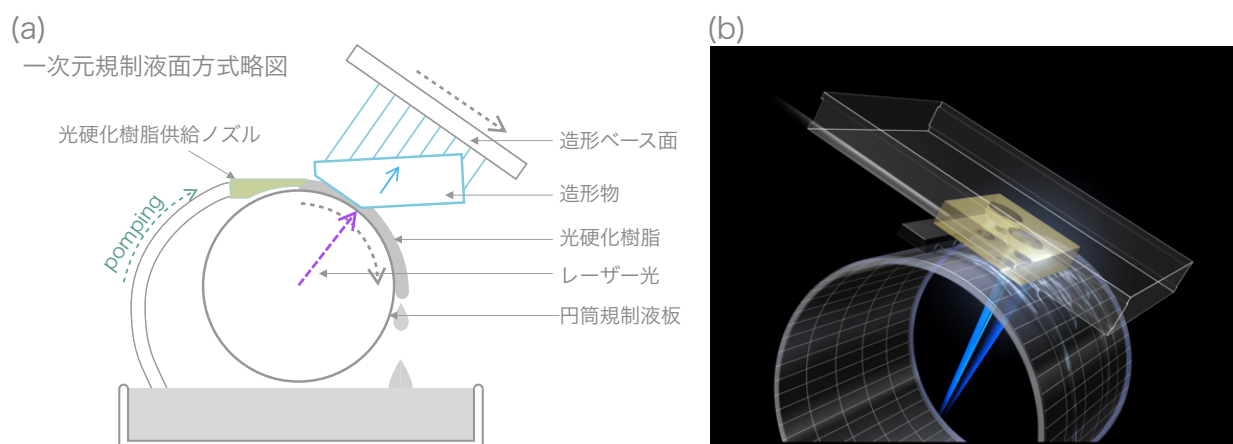


図 B.3 一次元規制液面型光造形法の概略図. a) イラスト概略図. 灰色破線矢印は一層造形のための動作方向を表す. b) CG 概略図.

具体的な造形行程は次のとおりである.

1. 円筒状規制液面板と造形物が接触している一次元上にトラップされた光硬化樹脂をレーザーで走査・露光し線状に硬化させる
2. 造形ステージを接触線と垂直方向へ動作させ, 同期して円筒状規制液面板を回転させて線状に硬化された造形物の剥離を行いつつ, 次の造形線上に接触線を移動させる
3. 行程 [1, 2] を繰り返す, 線状の造形を繰り返す, 面状の造形物 (一層) を得る
4. 造形ステージを一層分上昇させる
5. 造形ステージを 行程 [2] とは逆方向に動作させ次の層の造形開始位置へ戻る
6. 行程 [1~5] を繰り返す積層することで目的の造形物を得る

実際には, 上記行程 [1, 2] (造形行程と規制液面板と造形物の引き剥がし行程) は同時に行われている.

一次元規制液面型光造形法の特筆すべき優れた特徴は次のとおりである.

- 規制液面板と造形物の接触が線上で行われるため, 造形物を規制液面板から引き剥がす際に造形物へかかる負荷が小さく, 微細な構造および大断面積を持つ造形物が造形可能
- 光硬化樹脂を循環させ円筒面上に垂れ流し続けるため, 光硬化樹脂の反応熱による特性変化や硬化収縮による供給不足などに留意すること無く, 大断面積を持つ造形物が造形可能
- 円筒状規制液面板の回転によって光硬化樹脂を規制液面板と造形物の隙間に巻き込みながらトラップするため, 従来の規制液面方式よりも粘度の高い光硬化樹脂が使用可能
- 造形行程と引き剥がし行程が同時であるため, 従来の規制液面方式よりも造形速度が速い
- 造形物が造形と同時に規制液面板から引き剥がされ空中に浮くため, 中空構造の造形が

可能

- 造形可能サイズの制限が造形ベース面の大きさのみであるため、大型化が容易
- 原理的には円筒規制液板と造形面の距離さえ固定されていれば造形可能であるため、造形方向を重力方向と関係なく自由に変更できる。

CLIP と比較すると造形速度や積層痕が残るという点で劣るものの、層平面方向の解像度やスケールアップの容易さ、中空構造や大断面積構造が造形可能という点で優れている。

B.3 光造形法における後処理

光造形法における後処理は次のようなものが挙げられる。それぞれ様々なノウハウが存在するが、ここでは概要説明のみに留める。

サポート除去

造形を行う上で目的の造形物の他に付加したサポート構造を除去を行う。一般的にサポートはプラモデルのランナーのような形状をしており、サポート除去後の目的造形物にはサポート痕が残る。

脱液・洗浄

造形物に付着したり穴に詰まっている未硬化樹脂の除去を行う。エタノールや IPA を用いながらエアダスターや遠心分離機、超音波洗浄機などを利用し未硬化樹脂を取り除く。

後硬化

光造形によって造形物となった光硬化樹脂は、固体ではあるが硬化進度としては浅いため、更に二次的に硬化処理を行う。後硬化が不均一だと硬化収縮によって造形物に内部応力が不均一に発生してしまい、造形物の反りや破損につながる。

サンディング/ウェットサンディング

積層痕やサポート痕を取り除き表面粗さの改善を行う。

コーティング処理

表面改質や強度向上のために着色、ガラスコーティング、めっき処理、超臨界成膜などのコーティング処理を行う。めっき処理の場合、光硬化樹脂は非導電性であるため、最初は無電解めっきを用いる必要がある。(金属皮膜形成後は通常の電気めっきが可能)

付録 C

パラメトリックジャイロイド構造の 材料特性評価

本付録では、パラメトリックジャイロイド構造の物性評価の詳細を述べる。

主に異方性が与える構造体への力学的特性変化を調べるために、シミュレーション及び、実際に造形し破壊試験を行った。

C.1 周期依存性評価

構造体の生成には、次のような *Structure* を用いた。

$$\begin{aligned}
 \text{Structure : } \quad & |\text{Gyro_sample_1}(x, y, z)|^2 < t^2 \\
 & \text{Gyro_sample_1}(x, y, z) = \sin(2\pi f_x x) \cos(2\pi f_y y) \\
 & \quad + \sin(2\pi f_y y) \cos(2\pi f_z z) \\
 & \quad + \sin(2\pi f_z z) \cos(2\pi f_x x) \quad (\text{C.1}) \\
 & f_j = \text{variable}, j = (x, y, z) \\
 & t = \text{const}
 \end{aligned}$$

Gibson-Ashby モデルによれば、パラメトリックジャイロイド構造のような、多孔質構造は、おおよそ単位周期構造のアスペクト比 R によって弾性率が特徴づけられることが知られている [64]。つまり、ここでは、 f_j の比によって、弾性率の制御が行えることが予想される。

C.1.1 造形と実験に用いたサンプル

試験片の形状は $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ の立方体とし、 $T_j = \frac{1}{f_j}$ として $T_j = 1000 \mu\text{m}, 2000 \mu\text{m}, 4000 \mu\text{m}$ の間で値を振り、 $t = 0.1$ (空隙率 85%) に固定し造形を行った。

本実験段階では、前述のスライサーが未開発であったため、画像生成プログラムの開発が容易に行える開発環境である Processing を用いて造形データの生成を行った、

id	T_x [μm]	T_y [μm]	T_z [μm]	荷重方向	測定質量 [g]	充填率 (空隙率)
111Z	1000	1000	1000	Z	3.97	42.4% (57.6%)
222Z	2000	2000	2000	Z	2.65	28.3% (71.7%)
444Z-1	4000	4000	4000	Z	1.53	16.3% (83.7%)
444Z-2	4000	4000	4000	Z	1.52	16.2% (83.8%)
114Z	1000	1000	4000	Z	3.23	20.3% (79.7%)
114X	1000	1000	4000	Z	3.35	21.2% (78.8%)
441Z-1	4000	4000	1000	Z	3.35	35.8% (64.2%)
441Z-2	4000	4000	1000	Z	3.23	34.6% (65.4%)
441X	4000	4000	1000	X	3.12	35.3% (64.7%)

表 C.1 圧縮試験を行った構造体リスト. 空隙率は硬化樹脂の実測密度 $\rho = 1.17 \text{ 1/cm}^3$ より算出.

表 C.1.1 が用意した造形条件, および測定質量のリストである. 表中 id の接頭番号は $T = 1000 \mu\text{m}$ を基準とした T との比 ($T_x : T_y : T_z$) と荷重方向を表す.

RECILS での造形後, 後処理としてエタノールを用いてエアダスターで粗く脱液し, 遠心脱液機を用いて, 毎分 1000 回転で 2 分間の脱液を x, y, z 軸に対し 1 回ずつ施し, 最後に各面から 10 秒ずつ後硬化を行った.

等条件で造形および後処理を行うよう細心の注意を払ったが, 経験上構造内部の表面積が大きい構造体は後処理によって材料条件が大きく変わるため, 後処理後の質量を測定し, 同条件サンプルの内, 特に誤差の少ないものを選んだ. 造形条件として t を固定しているため, 設計上は等充填率になるはずであるが, 差が見られるのは装置の解像度限界に近い微細構造であるためである.

図 C.1 は, 実際に造形された試験用サンプルと条件毎の概形である.

C.1.2 圧縮破壊試験結果

これらのサンプルについて, 都立産業技術研究センターの万能試験機を用いて圧縮破壊測定を行った. 試験速度は 1 mm/min とした.

等方的なサンプル 111Z, 222Z, 444Z の試験結果に着目したものが図 C.2 である. 図 C.2 (a) は圧縮試験によって得られる歪み曲線である. 横軸がサンプルサイズと変位から求まる歪率, 縦軸が単位面積あたりの荷重である.

図 C.2 (a) の歪み曲線は微細化に伴って, 最大応力値が向上している. 初期勾配から求まる各試験片の実効的な弾性率 ε_{eff} は, $840 \sim 900 \text{ Pa}$ と非常に近い値であった. これらのサンプルは, 設計条件としては内部構造は同等であり, 微細度のみが変化している. つまり等充填率であれば, 実効的な弾性率は一定であるはずであり, この結果は妥当である. しかしながら, これらのサンプルの充填率は $16 \sim 46\%$ と大きく異なるため, 全ての材料が等値面の厚みに寄与し

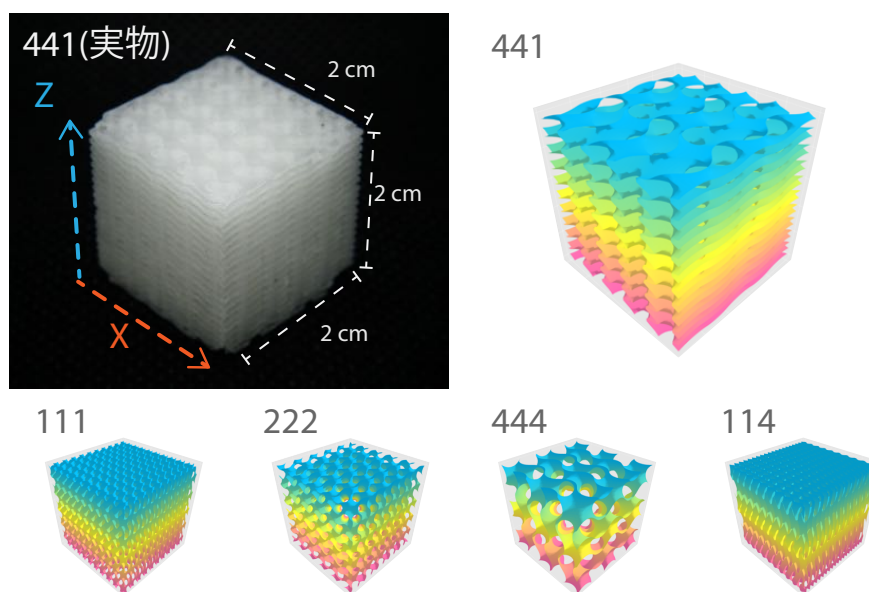


図 C.1 試験サンプル 441 実物写真と条件毎の概形モデル.

ていると考えると奇妙な結果である.

図 C.2 (b) は、横軸に表面積、縦軸を測定質量とし、各サンプルについて 444Z の表面積を基準として、プロットしたグラフである。これを見ると、設計された内部構造の表面積に対し単調増加し、およそ比例関係であることが分かる。

444Z の膜厚はおよそ 200 μm であり、この膜厚が RECILS の解像度限界に近いことを考慮すると、微細度が上がるにつれ、造形誤差が大きくなっていると考えられる。つまり、実効的な弾性率へ寄与しない質量成分が、表面積に比例し増加していると捉えるのが妥当である。これは、本実験で作製したサンプルは、後硬化が不十分であり、微細度 (表面積) の異なる構造体を比較することが難しいことを示している。

実効的な弾性率に寄与している材料質量が、444, 222, 111 で一定だとすると、微細化に伴っ

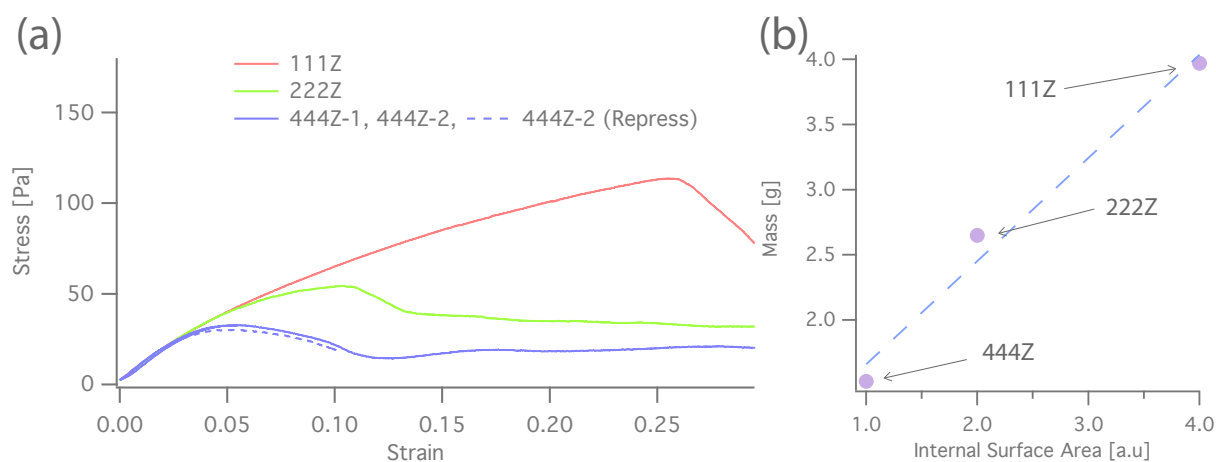


図 C.2 a) 等方性構造サンプルの歪み曲線. b) 表面積による質量変化.

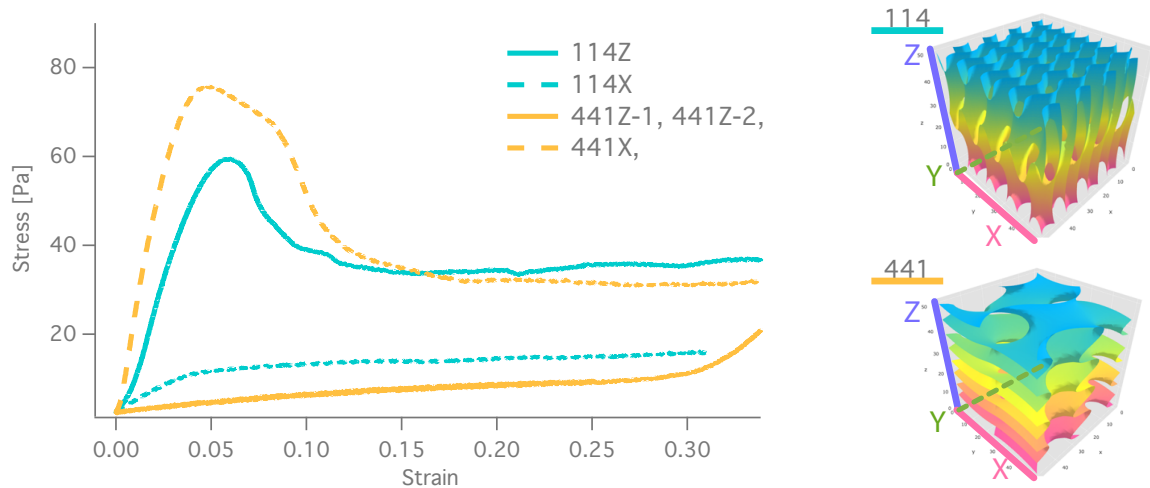


図 C.3 異方性構造サンプル 114, 441 拡大図, 及びジオメトリ概略. 歪率 0.01 ~ 0.02 にて実効的な弾性率を評価. $\varepsilon_{114X} = 232.7 \text{ Pa}$, $\varepsilon_{114Z} = 1536 \text{ Pa}$, $\varepsilon_{441X} = 2416.9 \text{ Pa}$, $\varepsilon_{441Z} = 45.1 \text{ Pa}$

た最大応力値の向上は, 微細化により内部応力が分散されていることに起因していると考えられる。

異方的な変形をしているサンプルである 114, 441 の試験結果に注目したのが図 C.3 である。サンプル 114, 441 は, 共に荷重方向によって, 大きく弾性率が変わっている。それぞれ,

$$\begin{aligned} \varepsilon_{114Z} &= 1536 \pm 6.98 \text{ Pa} & \varepsilon_{114X} &= 232.7 \pm 2.12 \text{ Pa} \\ \varepsilon_{441Z} &= 45.1 \pm 0.21 \text{ Pa} & \varepsilon_{441X} &= 2416.9 \pm 8.59 \text{ Pa} \end{aligned}$$

であった。ここで誤差はフィッティング誤差である。

直交する弾性率の比 $\varepsilon_z/\varepsilon_x$ を考えると,

$$\begin{aligned} 114: & \quad \varepsilon_{114Z}/\varepsilon_{114X} \simeq 6.7 \quad (\text{単位周期構造のアスペクト比: } 4) \\ 441: & \quad \varepsilon_{441Z}/\varepsilon_{441X} \simeq 0.018 \quad (\text{単位周期構造のアスペクト比: } 0.25) \end{aligned}$$

おおよそ単位周期構造のアスペクト比 $R = z \text{ 軸長さ}/xy \text{ 軸長さ}$ によって特徴づいており, $R = 1$ の時, $\varepsilon_z/\varepsilon_x = 1$ であるため, $\varepsilon_z/\varepsilon_x$ は R に対し単調増加である。この傾向は, Gibson-Ashby モデルによる異方性多孔質材料の予測傾向 [64] と矛盾せず, f_j の比によって, 異方的な弾性率の制御が可能であることが, 実験的に確認された。

C.1.3 シミュレーションとの比較による定性的な理解

異方的な弾性率の制御について, より詳細な理解を得るために, COMSOL を用いてシミュレーションを行った。モデルの生成には, CAD ソフトである Rhinoceros を用いた。COMSOL でのモデルの取り込みや, メッシュ作製時にエラーが多発したため, 全く等価なスケールおよび周期構造についてシミュレーション実施が困難であったため, $f_j = 1$ の時, 単位周期構造領域について, 可能であった範囲でシミュレーションを行った。また, シミュレーションにより得られた荷重方向への弾性率 ε は, $f_j = 1$ の結果により規格化している。

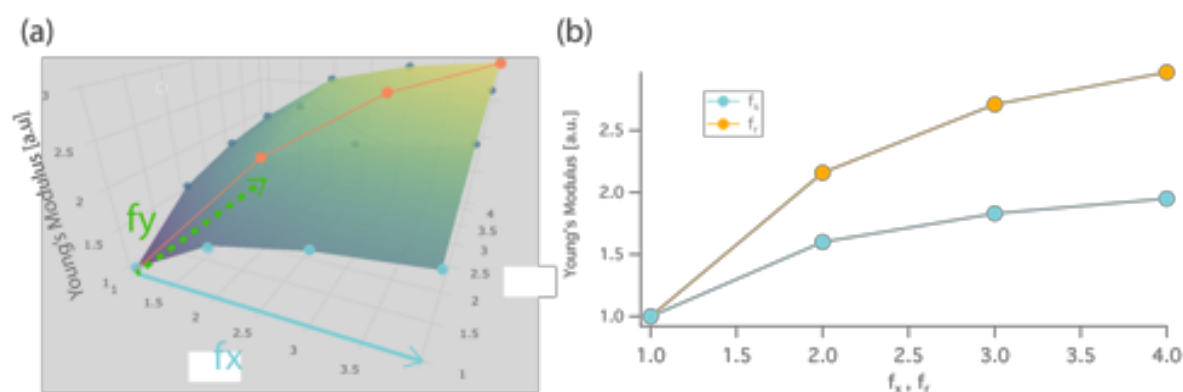


図 C.4 ε_z (荷重方向) の $f_{x,y}$ 依存性評価. a) シミュレーションを行った評価点の 3次元プロット. b) 青プロット: $f_y = 1$ の場合の f_x 依存性. 橙プロット: $f_r = \frac{f_x + f_y}{2}$ とし, 等方的な変形 ($f_x = f_y$) 条件の場合の依存性評価.

また, ここで行なった圧縮シミュレーションでは, 破断などが起きない理想的な材料を仮定しているため, 上で示したような試験結果としての歪み曲線は, 完全に線形である. そのため, ここでは勾配から求まる弾性率の変化のみを議論の対象とする.

図 C.4 は, 荷重方向 z に対し直交する x, y 平面への変形に寄与する $f_{x,y}$ について, $f_z = 1$ とし, $f_{x,y}$ 平面上で 0 ~ 4 までの間で, 圧縮シミュレーションを行い, 弾性率を測定した結果である.

また図 C.4 (b) は, $f_y = 1$ に固定し, f_x のみ動かした場合と, x, y 平面に等方的な変形となっている評価点について, $f_r = \frac{f_x + f_y}{2}$ としてプロットしたものである.

$f_{x,y}$ の増加に対し z 方向の弾性率 ε は単調増加しており, 初期段階では共におよそ線形であった ($\varepsilon \propto f_{x,y}$). 荷重方向に対するジオメトリとしては, $f_x = 4, f_y = 1$ は 441X と等しく, $f_x = 4, f_y = 4$ は 114Z と等しいが, 実験では 441X のほうが大きな弾性率を得られていた. これは, サンプル 441 と 114 との間に, の表面積が異なる事に起因する造形誤差があったといえる.

荷重方向 z への変形に寄与する f_z 依存性を図 C.5 に示す. f_z の増加に伴い, 弾性率が単調減少しており, その関係式はおおよそ $\varepsilon \propto f_z^{-2}$ であった.

Gibson-Ashby モデルによる異方性多孔質材料の解析 [64] では, 単位周期構造のアスペクト比 R と, 荷重方向弾性率と直交する弾性率の比 $\varepsilon_z/\varepsilon_x$ を結ぶ関係式が与えられている. その関係式は, オープンセル, クローズドセル構造の場合それぞれ

$$\text{Open Cell : } \frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_x} = \frac{2R^2}{(1 + (1/R)^3)}$$

$$\text{Closed Cell : } \frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_x} = \phi \frac{2R^2}{(1 + (1/R)^3)} + (1 - \phi) \frac{2R}{1 + 1/R}$$

である.

図 C.4 (b) 中の評価点 $f_x = 1, 2, 3, 4$ は荷重方向が x 軸方向であると捉えれば, 図 C.5 中の評価点 $f_z = 1, 2, 3, 4$ と同ジオメトリの構造に対して, ε_x を評価していることに等しい. これ

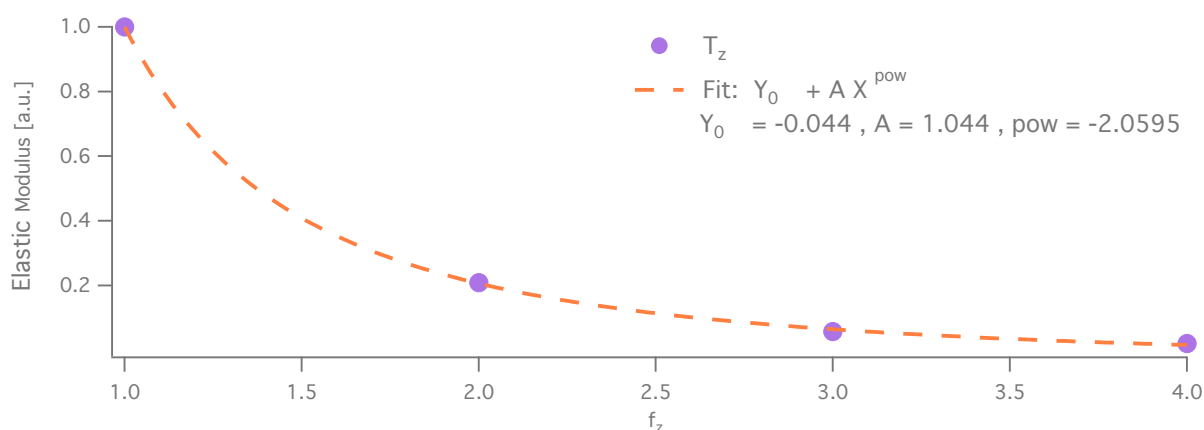


図 C.5 荷重方向弾性率 ε_z の f_z 依存性

らから得た $\varepsilon_z/\varepsilon_x$ を縦軸にし、横軸に単位周期構造のアスペクト比 R をとりプロットしたのが、図 C.6 である。

図 C.6 中、緑線がオープンセルモデル、紫線がクローズドセルモデルによる理論曲線である。

どちらの曲線も、完全に応答を再現しているわけではないが、共に単調増加傾向は一致しており、クローズドセルモデルの理論曲線の方がよくあっているのが分かる。

パラメトリックジャイロイド構造は、オープンセル構造であるが、曲面によって構成されているため、単純な Gibson-Ashby モデルでは再現できないことを示している。特に、異方的なスケリングによる異方的な膜厚変化の影響により、大きく Gibson-Ashby モデルから乖離していると推測できる。一方で、定性的な増加傾向は一致していることから、パラメトリックジャイロイド構造であっても、単位周期構造のアスペクト比 R によって、直交する弾性率が特徴づけられることを示唆している。

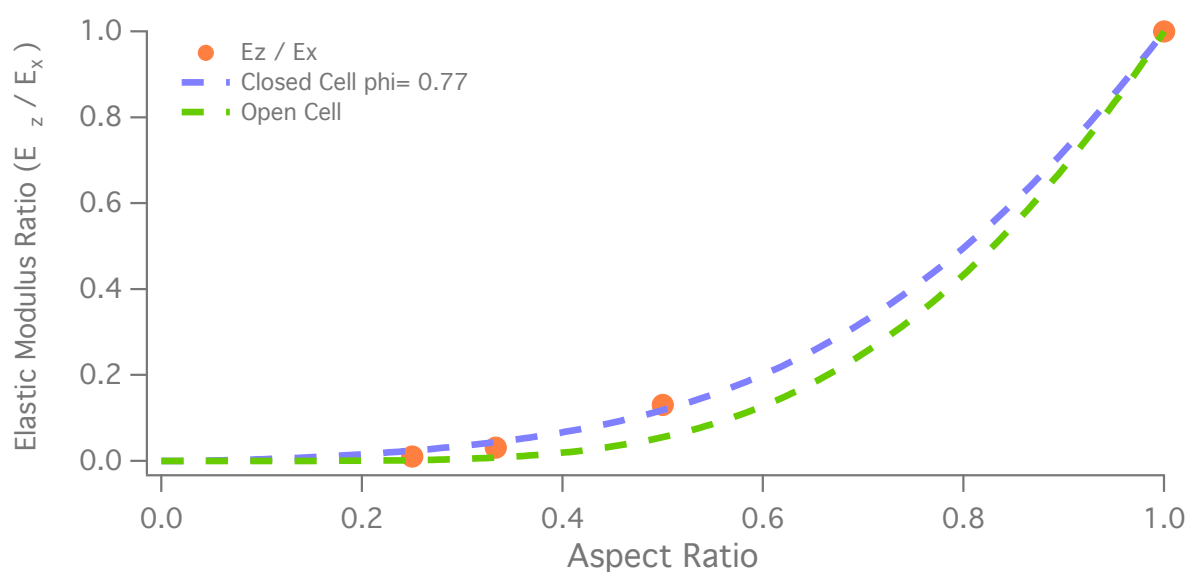


図 C.6 単位周期構造のアスペクト比 R と直交する弾性率 $\varepsilon_z/\varepsilon_x$ の関係。

C.2 厚み (充填率) 成分評価

構造体の生成には、次のような *Structure* を用いた。

$$\begin{aligned}
 \text{Structure : } \quad & |\text{Gyro_sample_2}(x, y, z)|^2 < t^2 \\
 & \text{Gyro_sample_2}(x, y, z) = \sin(2\pi f_x x) \cos(2\pi f_y y) \\
 & \quad + \sin(2\pi f_y y) \cos(2\pi f_z z) \\
 & \quad + \sin(2\pi f_z z) \cos(2\pi f_x x) \\
 & f_j = \text{const}, j = (x, y, z) \\
 & t = \text{variable}
 \end{aligned} \tag{C.2}$$

f_j を固定し t のみを変化させて、充填率を変更した構造体を造形し、上の周期成分評価同様の試験、シミュレーションを行った。

圧縮試験用の構造体は $T_j = \frac{1}{f_j = 2000 \mu\text{m}}$ とした。シミュレーション条件は周期成分評価と同様に単位周期構造について行なった。

図 C.7 が試験結果及び、シミュレーション結果との比較である。

実験結果とシミュレーション結果がよく一致している。構造体の表面積が変化していないため、造形誤差が少なかったと考えられる。

全体としては、充填率に対し 3 乗の曲線がよく合うように見えるが、前述の周期依存性評価に用いた充填率 20 ~ 60% では、線形的な特性が強く見られ、その傾きはおおよそ $0.4 \left[\frac{1}{100\%}\right]$ であった。

最終的な到達弾性率への線形的な遷移 (図 C.7 網掛け領域) は、内部構造を荷重方向に対して理想的な柱構造とした場合の弾性率変化である。つまり充填率 50% 以下の領域であれば、等充填率でもおおよそ 5 倍程度弾性率が向上が期待できることが判明した。

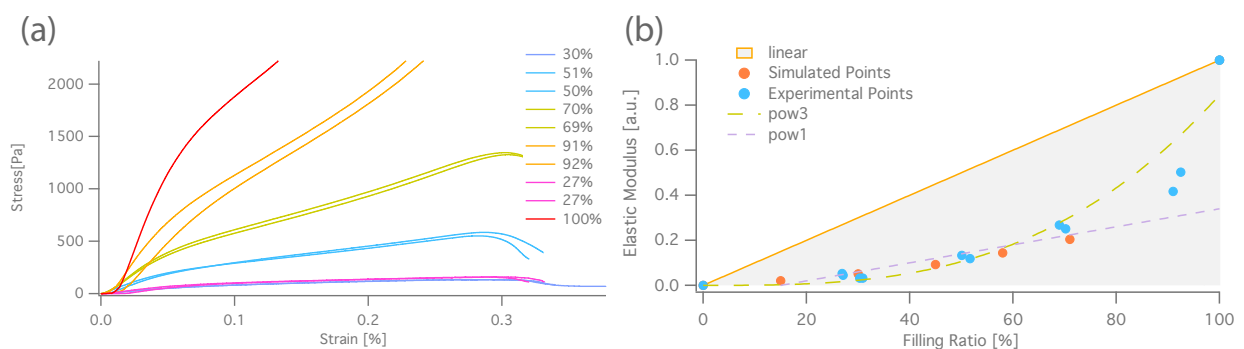


図 C.7 等方性構造の充填率による圧縮試験の歪み曲線および充填率による弾性率の遷移のシミュレーション比較。

C.3 構造成分評価

構造体の生成には、次のような *Structure* を用いた。

$$\begin{aligned}
 \text{Structure : } \quad & |\text{Gyro_sample_3}(x, y, z)|^2 < t^2 \\
 & \text{Gyro_sample_3}(x, y, z) = B_z \sin(2\pi f_x x) \cos(2\pi f_y y) \\
 & \quad + B \sin(2\pi f_y y) \cos(2\pi f_z z) \\
 & \quad + B \sin(2\pi f_z z) \cos(2\pi f_x x) \\
 & B_z = \text{variable} \\
 & B = \text{variable} \\
 & f_j = \text{const}, j = (x, y, z) \\
 & t = \text{const}
 \end{aligned} \tag{C.3}$$

構造成分 B_z に対する荷重方向 z への弾性率 ε_z の依存性を評価した。評価はシミュレーションのみで行った。

$f_j = 1, t$ を充填率 20% となるよう設定し、 $B_z \text{Ratio} = 1, 2, 4, \infty$ の場合の構造体について評価を行った。ここで $B_z \text{Ratio} = B_z/B$ である。 $B_z \text{Ratio} \neq \infty$ の場合は、 $B = 1$ とし、 B_z のみを変化させ、 $B_z \text{Ratio} = \infty$ の場合は、 $B_z = 1, B = 0$ として、構造を生成した。以下 $B_z \text{Ratio}$ を便宜上 B_z と記述する各パラメータ時の構造と弾性率 ε_z を図 C.8 に示した。

構造の形状変化から想像できる通り、 B_z の増加によって弾性率が単調増加している。

$B_z = \infty$ では荷重方向に対し理想的な柱構造をとっており、その値は厚み (充填率) 依存性において期待された、およそ 5 倍となっている。 x, y 方向への弾性率は、最終形状である $B_z = \infty$ の形状から判断できる。主に荷重方向へ寄与する板枚数が、 z 軸方向と比較すると半数であるため、弾性率も z 軸方向と比較すると $1/2$ となる。これは $B_z = 1$ 構造体における x, y 軸方向への弾性率よりも高いため、 B_z を増加することで、 x, y, z 軸方向に強い構造が得られる

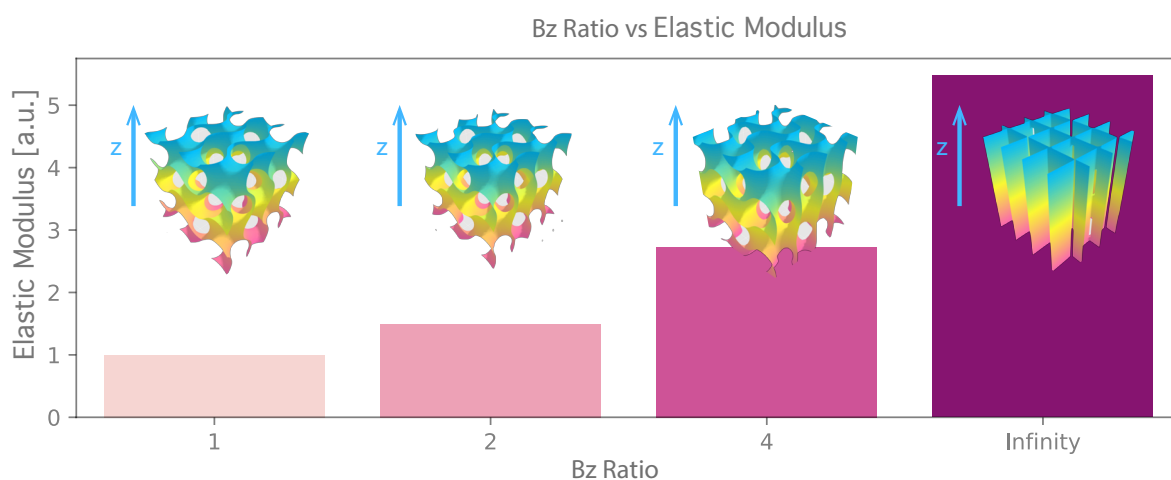


図 C.8 弾性率 (荷重方向) の B_z 依存性

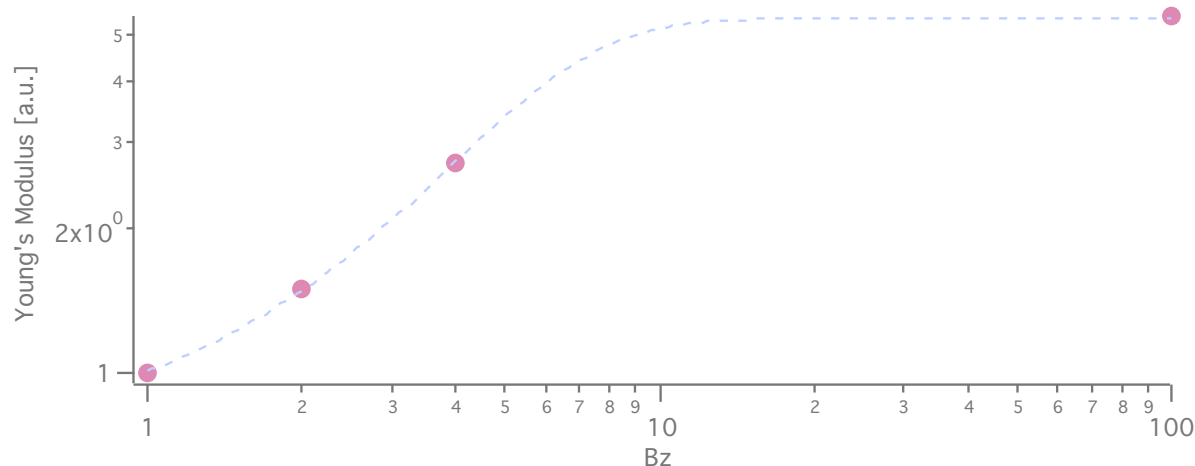


図 C.9 式 C.4 によるフィッティング結果. $a = 3.951 \pm 0.071$, $b = 2.0005 \pm 0.085$

ことが判明した. 一方でこのような矩形格子セル構造は x, y 平面に斜め方向の荷重に対しては非常に弱いことで知られている [64].

$B_z = \infty$ の際, $\varepsilon_z = 5.4$ であることから, ここで仮に ε_z, B_z の関係式を

$$\varepsilon_z(B_z) = \frac{5.4}{1 + e^{(a-B_z)/b}} \quad (\text{C.4})$$

と仮定し, a, b について最小二乗法によるフィッティングを行ったのが図 C.9 である.

$B_z = 4$ 以降の概形はあてにならないが, 陰関数をモーフィング接続した場合, 中間領域ではおおよそこのような状態を取ると予想される.

各パラメータに対する特性変化の概要

以上の評価により, パラメトリックジャイロイド構造について定性的に次のような事が確認された.

- 充填率によって, 等方的なパラメトリックジャイロイドの弾性率が決定する.
- 構造成分 $B_{x,y,z}$ を増加させると, 増加した成分方向に対して最大弾性率を持ち, 直交する他の軸方向の弾性率も向上する.
- 周期成分 $f_{x,y,z}(1/T_{x,y,z})$ を変更すると, 最も大きい f を持つ軸方向の弾性率が減少し, それに直交する面内方向の弾性率は増大する.
- 周期成分の制御によって決まる単位周期構造のアスペクト比 R によって, おおよそ直交する弾性率の比 $\varepsilon_z/\varepsilon_{x,y}$ が定まり, その関係は単調増加である.
- ある荷重方向 \vec{a} に対して柔軟な構造を得るためには, 荷重方向の周期成分 $f_{\vec{a}}$ を増加させれば良い. 弾性率との関係はおおよそ $\varepsilon_{\vec{a}} \propto f_{\vec{a}}^{-2}$ である.