

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：10103

研究種目：若手研究

研究期間：2022～2023

課題番号：22K14153

研究課題名（和文）自由自在な変形を可能とする階層的メカニカル・メタマテリアルの創製

研究課題名（英文）Creation of hierarchical mechanical metamaterials that enable flexible deformation

研究代表者

立山 耕平（Tateyama, Kohei）

室蘭工業大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：70837096

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,600,000円

研究成果の概要（和文）：セル構造体において、「規則構造」および「不規則構造」の両者を「階層的」に配置するといった発想から、2種類の変形機構を共存させた階層的メタマテリアルの創成を目的とした。具体的には、セル構造体に人工的な欠陥を付与することでセル構造体のマクロな変形のコントロールを試みた。検討の結果、不規則なセル構造体に対して人工欠陥を付与することで、任意に変形のコントロールが可能となることを示唆することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

セル構造体を用いて、自由自在な変形を可能とする階層的メカニカルメタマテリアルの創製について検討した。この際、セル構造体に人工的な欠陥を付与することでセル構造体のマクロな変形の制御を試みた。セル構造体に人工欠陥を付与することで、セル壁一つ一つのミクロな変形とセル構造体としてのマクロな変形をそれぞれ個別に制御できることが示唆された。セル構造体は相対密度やセル形状によって変形が支配されるため、構造のみの変化によって大きく特性を制御することは困難とされてきたが、本研究によって、不規則なセル構造体に対して人工欠陥を付与することで、任意に変形の制御が可能となることを示唆することができた。

研究成果の概要（英文）：The aim of this study was to create a hierarchical metamaterial in which two types of deformation mechanisms coexist, based on the idea of arranging both ordered and irregular structures in a cellular structure hierarchically. Specifically, we attempted to control the macroscopic deformation of the cellular structure by adding artificial defects to the cellular structure. As a result of our investigation, we were able to suggest that it would be possible to arbitrarily control the deformation by adding artificial defects to an irregular cellular structure.

研究分野：衝撃工学

キーワード：メカニカルメタマテリアル 衝撃吸収

1. 研究開始当初の背景

材料に幾何構造を付与し、特異な機械的特性を発現させたものを、メカニカルメタマテリアルと呼んでいる。その一種で、内部に多数の空孔(セル)を有するセル構造体は、セルの幾何学的制御のみでその機械的特性を変化可能である。従来のセルの幾何学的制御は、1.「規則的」配置による高強度化、2.「不規則的」配置による変形の安定化の2種類に大別される。「規則」と「不規則」は文字通り二律背反であるため、これらの構造が共存した幾何学的制御は未だ存在していない。

2. 研究の目的

本研究では、「規則構造」および「不規則構造」の両者を「階層的」に配置するといった独創的発想で従来の2種類の変形機構を共存させ、自由自在な変形を可能とする階層的メカニカルメタマテリアルの創製を目指す。

3. 研究の方法

不規則なセル構造体の中に規則性のある人工欠陥を付与することで、規則・不規則配列の両方のメリットを併せ持つ構造の検討を行った。セル構造体の相対密度を一定として人工欠陥の形状やサイズが異なるセル構造体を作製し、作製したセル構造体を準静的から動的までの速度域で圧縮試験を行うことで、セル構造体の変形挙動に及ぼす人工欠陥の影響を明らかにする。

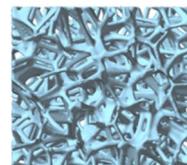


図1 基準モデル

セル構造体のモデル作成では Hierarchical Poisson Disk Sampling (HDPS) 法にて配置した母点を基に、陰関数曲面による表現を用いて構造を作成し、Marching Cube 法によってポリゴン化を行った。本手法では、セルの数、セル壁厚さ、モデル空間の分割数、セルのサイズをパラメータとして、精密に制御可能である。作成したセル構造体モデルはすべて、体積 1014 mm^3 (相対密度 0.1095)、セル数 300 個の各辺 21 mm の立方体とし、これを基準試験片モデル(欠陥なし)とした。図1に作成した基準試験片モデルを示す。

基準試験片モデルに人工欠陥を付与する。欠陥の付与により相対密度が減少するが、セル壁厚さを増加させることで基準試験片と同相対密度のセル構造体モデルを作成した。基準試験片モデルに斜め形状の欠陥を付与し、斜め欠陥試験片モデルを作製した。図2に試験片モデルの詳細を示す。人工欠陥は幅 1 mm、深さ 10.5 mm、長さ 16 mm の直線(スリット)形状とした。欠陥は、x-y 平面から見て対角線 A-D に z 軸方向に深さ 10.5 mm まで配置し、裏面も対角線 B-C に同様の人工欠陥を配置した。相対密度を一定にするために、セル壁厚さを 0.238 mm から 0.245 mm に増加した。

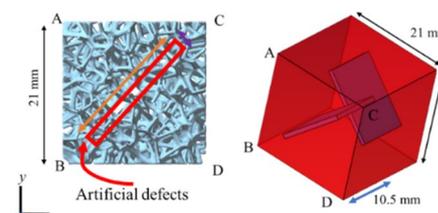


図2 斜め欠陥モデル

図3に横欠陥試験片モデルの形状を示す。横欠陥のサイズは厚さ 3 mm、深さ 10.5 mm、長さ 16 mm とした。図上 x-y 平面から見て水平方向 A-C に対して平行に欠陥を配置した。裏面にも同サイズの欠陥を付与し、欠陥同士が貫通してしまわないように y 軸の位置をずらして配置した。相対密度を一定にするために、セル壁厚さを 0.238 mm から 0.259 mm に増加した。

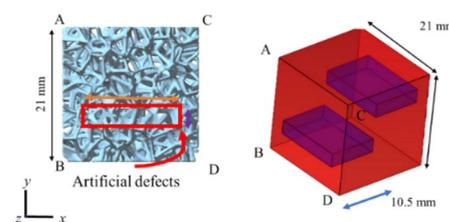


図3 横欠陥モデル

上記手法にて作成した3次元モデルを基に3Dプリンタ(Sinterit sp. zo.o., LISA pro)と高分子材料(Sinterit sp. zo.o., FLEXA Grey)を用いることで、基準、斜め欠陥、横欠陥の3種類の試験片を作製した。

準静的試験は、万能試験機(Instron 5566)を用いてひずみ速度 $1.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ で測定した。試験片の圧縮方向は y 軸方向に一軸圧縮で統一し、同一試験片に対して6回ずつ試験を実施した。動的試験は、反射応力波低減技術を採用した全変形速度対応型落錘式試験装置を開発し測定を実施した。ひずみ速度 $1.0 \times 10^2 \text{ s}^{-1}$ で測定し、試験片の圧縮方向は y 軸方向に、同一試験片に対して3回ずつ試験を実施した。

4. 研究成果

(1) 準静的試験

基準試験片、斜め欠陥試験片、および横欠陥試験片における代表的な応力-ひずみ関係を図4に示す。表1に基準試験片ではひずみ 0~0.13 を、斜め欠陥試験片ではひずみ 0~0.15 を、横欠陥試験片ではひずみ 0~0.3 (0~0.15: 第1領域, 0.15~0.3: 第2領域)を弾性変形領域とし、グラフの傾きを求めた。また、ひずみ 0.5 での各試験片の応力の最大ばらつき、およびひずみ 0

~0.3 までのひずみエネルギーを示す。表 1 より、斜め欠陥試験片で試験片ごとのばらつきを減少させる効果が得られた。これは、欠陥の付与により圧縮時に試験片全体で均一な変形が発生し、3D プリントによる造形誤差が平均化されたためであると考えられる。図 4 より横欠陥試験片では弾性変形がひずみ 0~0.15 と 0.15~0.3 の 2 段階に生じる挙動が確認された。この 2 区間の変曲点のひずみ量は、約 0.15 である。試験片高さが 21 mm であることから、このひずみ量は 3 mm の変位に相当しており、圧縮方向に存在する欠陥のサイズと一致している。このことから、欠陥部分の空間が優先的に圧縮されてからそれ以外のセルが圧縮される 2 段階の変形が発生したと考えられる。表 1 より、欠陥（斜め欠陥・横欠陥）を付与することで弾性変形領域のグラフの傾きの減少が確認された。これは、欠陥が強度の低い初期不正として振る舞ったためであると考えられる。また、欠陥（斜め欠陥・横欠陥）の付与により、低ひずみ（0.3 以下）においてひずみエネルギーの減少が確認された。すべての試験片で相対密度が一定であることから、ひずみエネルギーに対し、セル壁厚さ増加による強度増加よりも欠陥による強度減少の方が、支配的な影響を与えるということが考えられる。

(2) 動的試験

図 5 に動的試験を行って得られた各試験片の代表的な応力 - ひずみ関係を示す。表 2 に基準試験片と斜め欠陥試験片ではひずみ 0~0.1 を、横欠陥試験片ではひずみ 0~0.3 (0~0.13: 第 1 領域, 0.13~0.3: 第 2 領域) を弾性変形領域とし、グラフの傾きを求めた。また、ひずみ 0.3 での各試験片の応力の最大ばらつき、およびひずみ 0~0.3 のひずみエネルギーを示す。図 5 より、横欠陥試験片では、準静的試験と同様に弾性変形が 2 段階に生じる挙動が確認され、その要因も準静的試験と同様であると考えられる。表 2 より、ひずみエネルギーでは準静的試験と比較してすべての試験片で約 10 倍に増加していることが確認された。準静的試験と動的試験の違いはひずみ速度のみであることから、ひずみ速度依存性（ひずみ速度増加に伴う強度増加）の影響であると考えられる。表 2 より、基準試験片と比較して斜め欠陥試験片では、ひずみエネルギーの増加が確認された。表 1 では欠陥付与による強度減少の影響からひずみエネルギーの減少が示されたにもかかわらず、異なる結果となった。準静的試験と動的試験の違いはひずみ速度のみであるため、動的速度域においては、ひずみエネルギーに対し、欠陥による強度減少よりもセル壁厚さ増加による強度増加の方が支配的な影響を与えるということが考えられる。

(3) まとめ

斜め欠陥を基準試験片に付与することで準静的試験では、試験片ごとの圧縮特性のばらつきを抑える効果を確認した。横欠陥を基準試験片に付与することで準静的・動的試験の両方で弾性変形が 2 段階に生じる挙動が確認された。準静的試験では欠陥（斜め欠陥・横欠陥）を基準試験片に付与することで、弾性変形領域のグラフの傾きの減少を確認した。動的試験では、すべての試験片で準静的試験と比較して約 10 倍程度のひずみエネルギー増加が確認された。準静的試験には欠陥による強度減少、動的試験にはセル壁厚さ増加による強度増加がひずみエネルギーに対して、支配的な影響を与えることが示唆された。これまで、規則的なセル構造体はその相対密度や単位セル構造の特性によって変形が支配されるため構造のみによって大きく特性をコントロールすることは困難とされてきたが、本研究によって、不規則なセル構造体に対して人工欠陥を付与することで、任意に変形のコントロールが可能となることを示唆することができた。

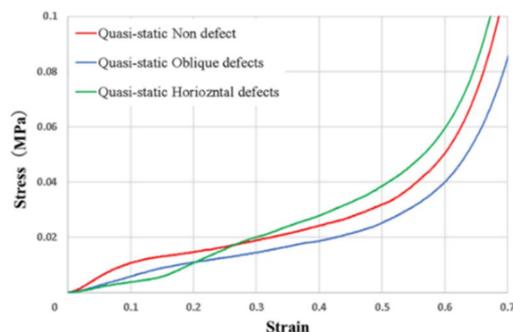


図 4 準静的試験結果

表 1 準静的試験結果

↔	Non↔	Oblique↔	Horizontal↔
Elastic region Slope↔	0.116↔	0.062↔	1st : 0.033↓ 2nd : 0.107↔
Specimen variability↔ (Strain 0.5) ↔	16%↔	5%↔	28%↔
Strain energy↓ (Strain 0.3) ↔	32 mJ↔	22 mJ↔	22 mJ↔

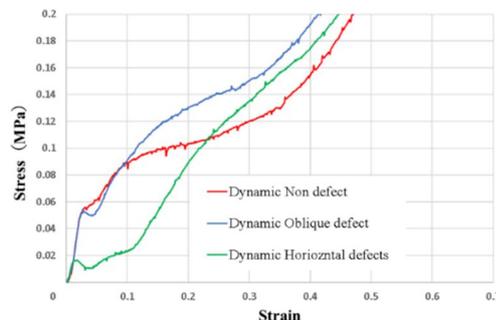


図 5 動的試験結果

表 2 動的試験結果

↔	Non↔	Oblique↔	Horizontal↔
Elastic region Slope↔	0.692↔	0.692↔	1st : 0.293↓ 2nd : 0.592↔
Specimen variability↔ (Strain 0.5) ↔	5.7%↔	2.9%↔	0.7%↔
Strain energy↓ (Strain 0.3) ↔	238 mJ↔	257 mJ↔	181 mJ↔

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Kohei Tateyama, Hiroyuki Fujiki
2. 発表標題 Effect of Internal Air on Compressive Properties of Foamed Polymer
3. 学会等名 International Conference on Materials & Processing 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kohei Tateyama and Hiroyuki Fujiki
2. 発表標題 Effect of Interaction between Microstructure and Internal Fluid on Dynamic Compressive Behavior in Cellular Materials
3. 学会等名 17th Asia-Pacific Conference on Fracture and Strength and the 13th Conference on Structural Integrity and Failure (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 立山 耕平、藤木 裕行
2. 発表標題 セル構造体における内部流体の流出特性
3. 学会等名 第35回計算力学講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------