

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：13301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2022～2023

課題番号：22K18750

研究課題名（和文）Tachi-Miura多面体に基づく軽量金属セル構造体による変革的構造材料設計

研究課題名（英文）Transformative Designing of Structural Materials Based on Lightweight Metallic Cellular-Solids Composed of Tachi-Miura Polyhedron

研究代表者

國峯 崇裕（KUNIMINE, Takahiro）

金沢大学・機械工学系・准教授

研究者番号：90612705

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、Tachi-Miura多面体（TMP）と呼ばれる折紙構造に基づく3Dデザインを金属製セル構造体に応用し、従来の金属製セル構造では達成できなかった軽量化と相反する強度の合理的な制御を試み、積層造形技術で構造制御されたセル構造体の製作を実施した。TMPマルチセル構造体の種々の形状パラメータを変化させることで、ヤング率、圧縮強度、変位、衝撃エネルギー吸収性能、相対密度等を精密に制御でき、またそれらのモデルの中には従来のセル構造体では達成できなかった軽量化と相反する圧縮強度の合理的な制御もある程度は可能であるパラメータ領域があることが見出された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では積層造形技術を駆使し、「紙」を使ったアートの側面が強い折紙構造を金属セル構造体のデザインに導入することで、構造材料の軽量化と強度の合理的な制御の実現に挑む内容であり、アート、構造・材料力学、製造技術を融合させた新規セル構造体設計という既存の学術の体系や方向を大きく変革・転換させる潜在性を大いに有している。また新規軽量構造材料による環境負荷の低い産業製品への実用にも大きな可能性を秘めている。

研究成果の概要（英文）：In this study, a 3D design based on the origami structure called Tachi-Miura polyhedron (TMP) was applied to metallic cellular structures. Fabrication of geometrically controlled cellular structures was carried out using additive manufacturing technology as an attempt to reasonably control weight reduction and conflicting strength, which could not be achieved with conventional metallic cellular structures. Young's modulus, compressive strength, displacement, impact energy absorption performance, relative density, etc. can be precisely controlled by changing various geometrical parameters of the TMP multi-cell structures. In these models, it was found that there was a parameter region in which the compressive strength was able to be reasonably controlled to some extent with weight reduction, which was not possible with conventional cellular structures.

研究分野：材料工学

キーワード：セル構造体 構造材料 軽量化 衝撃吸収 折紙構造 積層造形技術 構造制御 機械的性質

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

空隙を積極的に利用したセル構造体は、構造材料の軽量化に有用であり、優れた衝撃吸収機能も有する。セル構造体の圧縮強度と、空隙の割合を表す相対密度の関係には、以下の課題がある。
【課題 1】 軽量化の追求 (相対密度の低減) は、セル構造体の圧縮強度の急激な低下をもたらす。
【課題 2】 従来の熔融金属の発泡や粉体焼結による材料創製方法では、相対密度の小さなセル構造体の精密な製作に困難を伴う。
 これらの挑戦的な課題を改善するために、本研究課題は実施された。

2. 研究の目的

本研究では、図 1 (a) に示す Tachi-Miura 多面体 (TMP) ¹ と呼ばれる折紙構造に基づく 3D デザインを金属製セル構造体に応用し、従来の金属製セル構造では達成できなかった軽量化と相反する強度の合理的な制御を試み、積層造形技術で構造制御されたセル構造体の製作を実施した。

3. 研究の方法

上記目的を達成するため、まず (I) 折り紙構造に基づくセル構造のデザインの探求および数値解析による機械特性の予測と、(II) 金属積層造形によるセル構造体の精密な構造制御を並行して実施した。数値解析で得られた知見と積層造形による試作を踏まえ、(III) 圧縮強度・衝撃吸収特性等の検証を行い、提案する新規セル構造体の有効性の実証を行った。以下に具体的な実施項目を示す。

(I) Tachi-Miura 多面体 (TMP) によるセル構造体のデザインと数値解析による機械特性の予測

本研究では、空間充填の性質を持った図 1 (a) に示す TMP に着目し、セル構造体のデザインの探求を行った。TMP では種々の辺の長さや折り角を設定することで、材料特性に依存するのではなく、幾何形状の工夫による機械的性質の制御が可能である。我々の先行研究 ² により、幾何形状を適切に選択すれば TMP が高い耐荷重特性を発現可能であることがわかっており、既存のポラス材料やハニカムコア・サンドイッチパネル構造部材等に代わる、新しいセル構造体の創製につながる大きな可能性を秘めている。本研究では、まずこの複雑形状を有する TMP セル構造体の数値解析モデルの構築を行い、機械的性質 (特に弾性係数と圧縮強度) の制御方法の確立に取り組んだ。

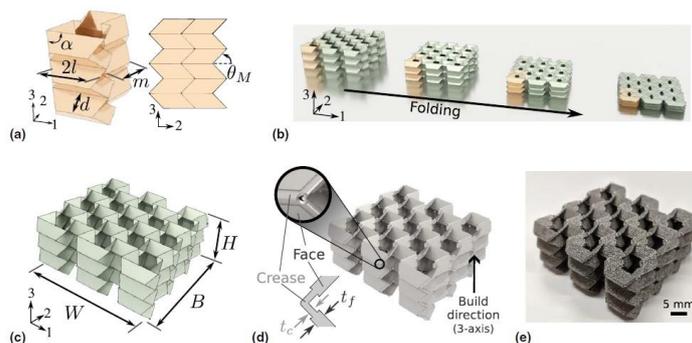


図 1. (a) Tachi-Miura 多面体 (TMP) とその形状パラメータ、
 (b) TMP セル構造体の圧縮変形過程、(c) TMP セル構造体の形状パラメータ、(d) TMP セル構造体の積層方向と折り目部分の拡大図、(e) 試作したアルミニウム製 TMP セル構造体 ³。

(II) 金属積層造形によるセル構造体の精密な構造制御と試作

金属積層造形は粉末床溶融結合法で行い、一般的に使用されているステンレス鋼 (SUS316L) とアルミニウム合金 (AlSi10Mg) の 2 種類を使用し比較することで、折紙構造による圧縮変形挙動の制御の可否を確認した。AlSi10Mg では造形後に熱処理を行い、十分な延性を付与することで圧縮変形を可能にした。図 1 (b, c, d) は実際に作成した CAD モデルと積層造形体の例である。また折紙構造に特化した金属積層造形技術を確立するため、大きな変形が予想される折り目部分に焦点を当て、例えば図 1 (d) に示すような折り目部分を薄く設計した種々の CAD モデルを作成して実験に供した。積層方向と折り目の角度の影響や、折り目の変形挙動、また微細組織観察によるミクロな変形を調べることで、金属積層造形による折紙構造の製作の最適化を実施した。

(III) 圧縮試験・衝撃試験による新規セル構造体の検証

数値解析による知見と金属積層造形技術を用いて、TMP セル構造体の試作を行い、圧縮試験により静的挙動 (剛性と圧縮強度) の評価を実施した。これによって材料密度と強度の関係性を評価した。さらに TMP マルチセル構造体の衝撃エネルギー吸収性能を落錘衝撃試験で評価した。

4. 研究成果

(I) TMP によるセル構造体のデザインと数値解析による機械特性の予測, (II) 金属積層造形による TMP セル構造体の精密な構造制御と試作,

(III) 圧縮試験・衝撃試験による新規セル構造体の機械的性質の検証を実施した。これらの結果を踏まえ, 種々の金属製 TMP マルチセル構造体をステンレス鋼 (SUS316L) とアルミニウム合金 (AlSi10Mg) を用いて試作し, 準静的圧縮試験や衝撃試験を実施した。これらの試験結果の一例を図 2 (準静的圧縮試験), 図 3 (衝撃試験) に示す。TMP マルチセル構造体の種々の形状パラメータを変化させることで, ヤング率, 圧縮強度, 変位, 衝撃エネルギー吸収性能, 相対密度等を精密に制御でき, またそれらのモデルの中には従来のセル構造体では達成できなかった軽量化と相反する圧縮強度の合理的な制御もある程度は可能であるパラメータ領域があることが見出された。また, TMP マルチセル構造体を金属積層造形で精密に試作し, その機械的性質を十分に引き出すためには, TMP の折り角とオーバーハング角の関係性や, 材料の延性改善のための熱処理条件等も重要なパラメータとなり, これらの条件等も含めて TMP マルチセル構造体の種々の条件の最適化を実施し, 上記の構造と機械的性質の関係性について明らかにした。

これらの探索した種々の形状の金属製 TMP マルチセル構造体の一例を図 1, 図 2, 図 3 に示した。AlSi10Mg 製の TMP マルチセル構造体の場合には, 積層造形したままの状態では圧縮試験を実施すると延性が足りずに脆性的に破壊してしまうため, 折紙構造体が本来有する衝撃エネルギー吸収性能を引き出すことができない。このため積層造形後に延性改善のための熱処理が必須であり, 300°C 以上の熱処理により折紙構造体が有する優れた衝撃エネルギー吸収性能を引き出すことができた (図 2)。

本研究では積層造形技術を駆使し, 「紙」を使ったアートの側面が強い折紙構造を金属セル構造体のデザインに導入することで, 構造材料の軽量化と強度の合理的な制御の実現に挑む内容であり, アート, 構造・材料力学, 製造技術を融合させた新規セル構造体設計という既存の学術の体系や方向を大きく変革・転換させる潜在性を大いに有している。また新規軽量構造材料による環境負荷の低い産業製品への実用にも大きな可能性を秘めている。本研究期間終了後も引き続き本研究課題を継続して実施していく予定である。

<引用文献>

- ① T. Tachi and K. Miura: J. Int. Assoc. Shell Spat. Struct., 53 (2012) pp. 217-226.
- ② H. Yasuda, B. Gopalarethinam, T. Kunimine, T. Tachi and J. Yang: Adv. Eng. Mater., 21 (2019) 1900562, pp. 1-8.
- ③ H. Yasuda and T. Kunimine: MRS Communications, in press.

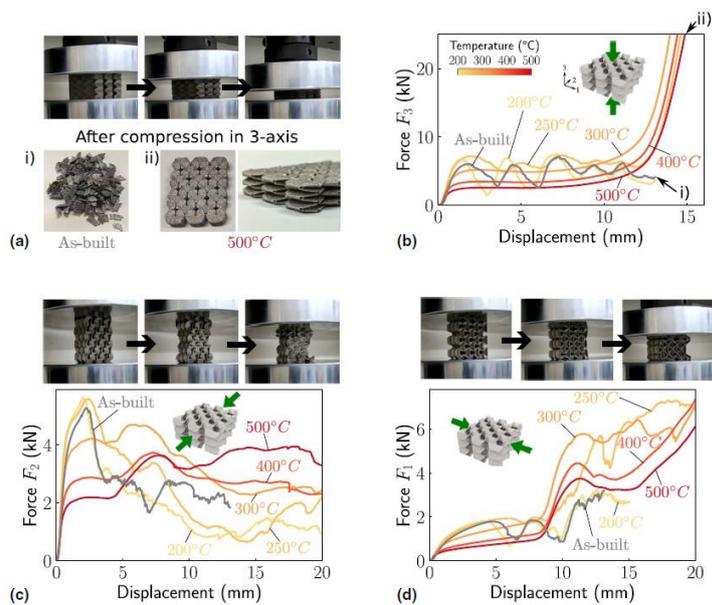


図 2. (a) アルミニウム製 TMP セル構造体の圧縮試験の様子, (b), (c), (d) 異なる荷重方向による圧縮試験での荷重-変位曲線³.

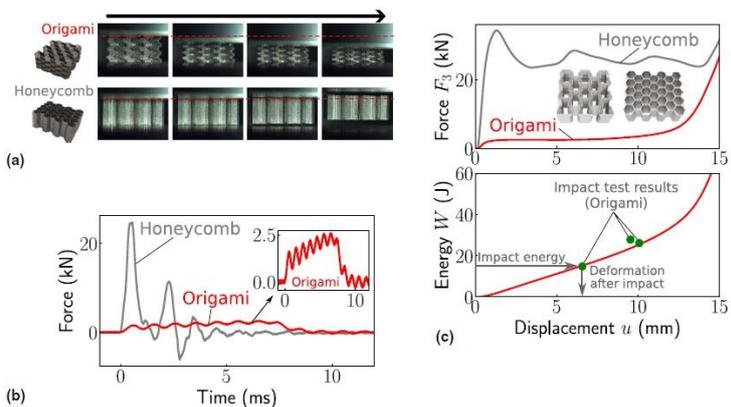


図 3. (a) アルミニウム製 TMP セル構造体の衝撃試験の様子, (b) 衝撃試験時の荷重-時間曲線, (c) 衝撃試験時の荷重-変位曲線と衝撃エネルギー-変位曲線³.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Hiromi Yasuda, Takahiro Kunimine	4. 巻 14
2. 論文標題 Energy absorption of AlSi10Mg origami cellular structures fabricated via laser powder bed fusion	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 MRS Communications	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1557/s43579-024-00518-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔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 Takahiro Kunimine, Hiromi Yasuda, Jinkyu Yang
2. 発表標題 Aluminum Alloy-Based Origami-Architected Materials Fabricated by Additive Manufacturing for Lightweight Structures
3. 学会等名 The 18th International Conference on Aluminium Alloys (ICAA18) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 稲村 岳士, 安田 博実, 國峯 崇裕
2. 発表標題 積層造形で作製したAlSi10Mg製折紙構造材料の圧縮変形挙動に及ぼす熱処理の影響
3. 学会等名 軽金属学会 秋期大会（第143回）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takeshi Inamura, Hiromi Yasuda, Takahiro Kunimine
2. 発表標題 Effects of Heat Treatments on Compressive Deformation Behavior of AlSi10Mg Origami-Architected Materials Fabricated by Additive Manufacturing
3. 学会等名 The 6th International Symposium on Visualization in Joining & Welding Science through Advanced Measurements and Simulation (Visual-JW 2022) (国際学会)
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
研究 分担 者	安田 博実 (YASUDA Hiromi) (10910903)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・ 助教 (82645)	

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		
米国	University of Washington		