

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05690

研究課題名(和文) マイクロラティスパネルの特性評価と形状最適化設計

研究課題名(英文) Evaluation of performance of micro-lattice panel and its optimization design

研究代表者

牛島 邦晴 (USHIJIMA, Kuniharu)

東京理科大学・工学部機械工学科・准教授

研究者番号：00349838

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、マイクロラティス構造の活用性を探るため、様々な機械的特性について、数値シミュレーション解析による検証ならびに実試験による測定を行った。特に、従来の軽量構造との特性の違いを調べ、設計の自由度が高いラティス構造を用いることで、どこまで高い性能を実現できるのかを検討した。また、選択的レーザー溶融法による造形技術を用い、造形したラティス構造の寸法精度とレーザー照射条件との関係を明らかにした。さらに、実際に造形できる条件下でコンプライアンスの最小化を目的関数としたラティス構造の形状最適化設計を行った。それにより、選択的レーザー溶融法によるモノづくりを行うための重要な設計指針が明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：In this study, mechanical properties of micro-lattice structures such as bending toughness, vibration properties, impact crushing capacity, heat management and sound absorption response are investigated by using numerical simulations and experiments. The main purpose of these investigations is to explore the possibility of application for lattice structures. There is a lot of flexibility in the design of lattice structures. Based on this study, it is clarified how much performance can be achieved. Also, the amount of imperfection observed in a lattice block manufactured by selective laser metal melting machine is measured, and the relationship between the accuracy of dimension and laser condition is investigated. In addition, a structural optimization of lattice structure by minimizing the compliance as an object function is conducted under the formable condition. Consequently, an important design guideline of manufacturing based on selective laser metal melting can be clarified.

研究分野：計算力学, 材料力学

キーワード：ポラス構造 積層造形 有限要素法 曲げ崩壊強度 振動特性 衝撃吸収特性 吸音特性 最適化設計

1. 研究開始当初の背景

近年、機械や構造物に対する軽量化、高剛性化への要求が高まり、その構成部材として内部に薄肉のセル壁とポア（小孔）を有する金属製のセル構造体に、関心が高まっている。セル構造体は、ハニカムなど均一のユニットセルが2次的に配列したものや、フォームやラティスといった3次的に配列したものがある。また、近年のレーザ加工技術や選択的レーザ溶融法（いわゆる金属3Dプリンタ）技術の急速な発達により、微細で精巧な金属製のセル構造を造形できるようになった。金属3Dプリンタで造形できるマイクロラティス構造はCADによるSTLデータを基に作製される為に製作が容易であり、構造内部の幾何形状を自由に設計できる。一方、CO₂削減に向けた自動車、航空機に対する軽量化の要求は年々高まり、使用される構造部材に対し、従来品よりもさらに軽量かつ高剛性、耐衝撃性に優れた新材料の開発が強く求められている。しかしながら、こうした金属3Dプリンタで造形できるラティス構造の様々な機械的特性、および造形可能な条件を加味したラティス構造の形状最適化設計については不明な点が多く、ラティス構造を様々な分野に応用するためには、克服すべき課題が多く残されている。

2. 研究の目的

そこで申請者らは、金属3Dプリンタで造形したマイクロラティスで構成されるサンドイッチパネルを研究対象とし、その様々な機械的特性（準静的特性、動特性、伝熱特性、吸音特性）を実験や数値解析で求め、ハニカムサンドイッチパネルなどの従来の構造との性能の違いを明らかにすることを研究の第一目的とする。また、金属3Dプリンタで造形したラティス構造の形状精度とレーザ照射条件との関係を調べ、その結果を反映したラティス構造の形状最適化設計の実施を計画した。

3. 研究の方法

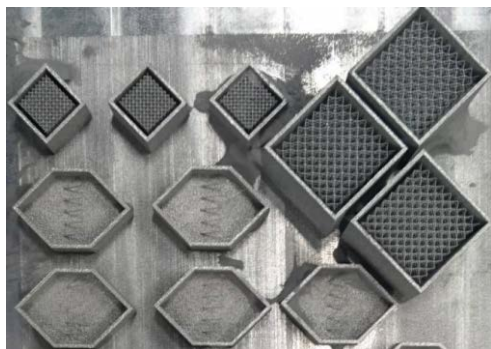


図1 選択的レーザ溶融法で造形したラティス構造の例

本研究では、図1に示すような選択的レーザ溶融法で造形できるラティス構造に対し、準静的特性（三点曲げ変形特性）、動特性（振動および衝撃圧潰特性）、伝熱特性、吸音特性について、数値シミュレーション解析ならびに試験片を造形した性能測定試験を行った。また、実際に造形したラティス試験片の寸法精度や造形可能な形状の条件を反映し、剛性の最大化（コンプライアンスの最小化）を目的関数とした形状最適化設計を行った。

4. 研究成果

4-1. 準静的特性（準静的荷重下での曲げ特性）

図2に示すような3点曲げを受けるラティスサンドイッチパネルの曲げ崩壊について、数値シミュレーション解析を用いて検討した。研究成果の詳細は論文①に記載している。以下にその概要を示す。

- (1) 曲げ変形下での崩壊モードは3種類（面板の降伏、面板の座屈およびラティスコアのせん断降伏）に分類される
 - (2) 各崩壊モードでの崩壊荷重は、変形結果に基づく理論解析により予測できる
- なお、得られた崩壊荷重は実験結果ともよく一致しており、その有効性も確認している。

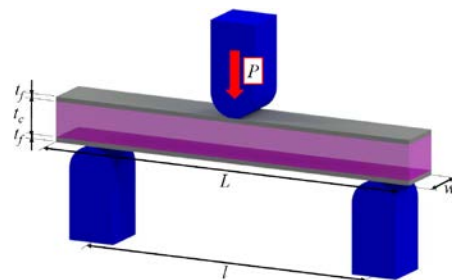


図2 三点曲げを受けるラティスサンドイッチパネルの形状最適化設計

4-2. 動特性（振動特性ならびに衝撃圧潰特性）

● 振動特性

ここではラティスサンドイッチパネルの曲げ振動特性について、数値シミュレーション解析で求め、連続体での結果と比較しながらその予測法について検討した。その結果、以下の結論が得られた。

- (1) サンドイッチパネルの長さで厚さの比が15倍以上になると、連続体における理論解を用いて曲げ振動の固有振動数を予測できる
- (2) 固有振動数は面板の厚さの変化に対し極大値を持つ。言い換えれば、各サンドイッチパネルに対し固有振動数を多感するための最適な面板の厚さがある

● 衝撃圧潰特性

ここではラティスコアの衝撃圧潰特性について、陽解法FEM解析ソフトによる数値シ

ミュレーション解析ならびに衝撃試験を行い、検討した。その結果、以下の結論が得られた。

- (1) 衝突速度の上昇により、圧潰特性（圧縮の応力とひずみの関係）は上昇する。ただし、この衝突速度の影響は主に材料のひずみ速度感受性であり、構造としての速度依存性は小さい
- (2) 実験結果と計算結果はよく一致し、解析手法の確立が達成された

4-3. 伝熱特性

ここではラティスサンドイッチパネルの面板部を熱源で加熱し、冷媒（空気）を流入して伝熱する（図3参照）。サンドイッチコアの形状により熱交換効率や圧力損失への影響を数値シミュレーション解析結果により分析し、最適な形状について検討した。

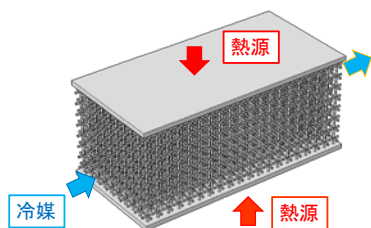


図3 熱交換器としてのラティスサンドイッチパネルの熱流体解析モデル

4-4. 吸音特性

ここではラティスコアの吸音特性を検討するため、汎用ソフトウェアLS-DYNAによる音響解析、ならびに実試験片による音響試験を行った（図4参照）。また、得られた結果に基づき、さらに吸音効率を高めたラティス形状を改良し、その効果を実証した。

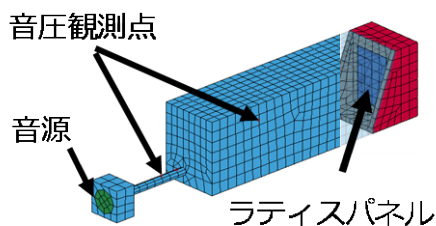


図4 ラティス構造の吸音特性分析用実験装置ならびに数値解析モデル

4-5. 金属3Dプリンタによるラティス構造の造形（造形精度に及ぼすレーザ条件の選定）

ここでは東京理科大学所有の金属3Dプリンタを用いてラティス構造を造形し、レーザ光の出力と走査速度に注目し、それらのパラメータを変えながら造形品質への影響を検

討した。その結果、以下の結論が得られた。
(1) レーザ光の出力が高い、あるいは走査速度が遅い場合、注入されるエネルギー密度が大きいため、ラティスを構成する梁の太さは大きくなる。

- (2) 直径が $200\mu\text{m}$ よりも $300\mu\text{m}$ の梁で構成されたラティスコアの方が、直径のばらつきは小さく、理論解に近い安定した特性を示す。

なお、この結果の一部はすでに論文②に投稿した。

4-6. 最適化設計

ここでは図2に示した三点曲げを受けるラティスサンドイッチパネルに対し、コンプライアンスを最小化する（剛性を最大化する）形状最適化設計を行った。この最適化設計にはグランドストラクチャー法を用いた。また、ラティスの各梁の断面積は、実際に金属3Dプリンタで造形できる範囲内で設計できるようにプログラムを作っている。コア部の形状をいくつか変えながら、得られる最適形状やコンプライアンスの変化を調べた。その結果、安定した最適結果が得られ、その形状が実際の金属3Dプリンタでも造形できることを確認した。

<引用文献>

- ① 大町あゆみ, **牛島邦晴**, 陳ダイコウ, Wesley Cantwell, Prediction of failure modes and peak loads in lattice sandwich panels under three-point loading, Journal of Sandwich Structures and Materials, 査読あり, 2018 (印刷中)
- ② **牛島邦晴**, 長倉祐太, 吉村彰記, スマートプロセス学会誌, AM技術のマイクロラティス構造への活用, 査読あり, 6巻3号, 2017, 125 - 129
5. 主な発表論文等
〔雑誌論文〕(計6件)
① 大町あゆみ, **牛島邦晴**, 陳ダイコウ, Wesley Cantwell, Prediction of failure modes and peak loads in lattice sandwich panels under three-point loading, Journal of Sandwich Structures and Materials, 査読あり, 2018 (印刷中)
② 東山尚平, **牛島邦晴**, 元祐昌廣, Wesley Cantwell, Evaluation of heat dissipation and structural response of a cellular panel as a heat exchanger, Journal of Sandwich Structures and Materials, 査読あり, 2018, DOI: 10.1177/1099636217749274
③ **牛島邦晴**, 長倉祐太, 吉村彰記, スマートプロセス学会誌, AM技術のマイクロラティス構造への活用, 査読あり, 6巻3号, 2017, 125 - 129

- ④ **牛島邦晴**, 機能材料, ラティス構造を利用した材料の機能化, 査読あり, 36 巻 12 号, 2016, 35 - 39
- ⑤ **牛島邦晴**, Dynamics and Control of Advanced Structures and Machines, Estimation of Mechanical Properties of Micro-Lattice Panel with Irregular Cells, 査読あり, 2016, 31-37
- ⑥ **牛島邦晴**, 日本機械学会誌, AM 技術を応用した金属製三次元セル構造の作成方法, 査読なし, 118 巻 1154 号, 2015, 30-31

[学会発表] (計 16 件)

- ① **牛島邦晴**, 選択的レーザ溶融法で造形したマイクロラティス構造の衝撃圧潰特性評価, 日本材料学会衝撃部門委員会講演会, 2018 年 5 月 25 日, 高知工科大学 (高知県)
- ② **牛島邦晴**, Failure behavior of micro-lattice sandwich panel subjected to three-point bending, International Conference on Structural Fatigue and Fracture Theory and Experimental Technology, 2018 年 1 月 11 日~15 日, 海南島 (中国)
- ③ 長倉祐太, **牛島邦晴**, 選択的レーザ溶融法で造形したマイクロラティス構造の衝撃圧潰特性評価, 日本材料学会主催第 12 回材料の衝撃問題シンポジウム, 2017 年 10 月 13 日~14 日, 京都テルサ (京都府)
- ④ 半沢光利, **牛島邦晴**, ラティス構造の衝撃吸収特性評価, 日本機械学会材料力学部門講演会 (M&M2017 材料力学カンファレンス), 2017 年 10 月 7 日~9 日, 北海道大学 (北海道)
- ⑤ 鈴田照平, **牛島邦晴**, 3 領域からなる複合構造体の弾性係数評価, 日本機械学会材料力学部門講演会 (M&M2017 材料力学カンファレンス), 2017 年 10 月 7 日~9 日, 北海道大学 (北海道)
- ⑥ **牛島邦晴**, 選択的レーザ溶融法で作製したマイクロラティス構造の機械的特性とその評価, 日本機械学会年次大会, 2017 年 9 月 3 日~7 日, 埼玉大学 (埼玉県)
- ⑦ 東山尚平, **牛島邦晴**, Evaluation of heat dissipation and structural response of cellular panel as heat exchanger, 3rd International Conference on Mechanics of Composites, 2017 年 7 月 4 日~7 日, ボローニャ (イタリア)
- ⑧ 大町あゆみ, **牛島邦晴**, Prediction of failure modes and peak loads in lattice sandwich panels under three-point loading, 3rdInternational Conference on Mechanics of Composites, 2017 年 7 月 4 日~7 日, ボローニャ (イタリア)
- ⑨ **牛島邦晴**, 軽量構造の創成と数値シミュ

レーション解析の役割, MSC ユーザカンファレンス 2017, 2017 年 6 月 7 日, 東京カンファレンスセンター品川 (東京都)

- ⑩ **牛島邦晴**, 毛利宣裕, lattice をコアとするサンドイッチ梁の振動特性に関する研究, MSC ユーザカンファレンス 2017, 2017 年 6 月 7 日, 東京カンファレンスセンター品川 (東京都)
- ⑪ **牛島邦晴**, 毛利宣裕, lattice をコアとするサンドイッチ梁の振動特性に関する研究, 日本設計工学会 2017 年度春季大会 研究発表講演会, 2017 年 5 月 20 日~21 日, 千葉工業大学 (千葉県)
- ⑫ 大町あゆみ, **牛島邦晴**, 3 点曲げ荷重を受けるマイクロラティスサンドイッチパネルの強度評価, 日本機械学会関東支部第 23 回総会・講演会, 2017 年 3 月 16 日~17 日, 東京理科大学 (東京都)
- ⑬ 長倉祐太, **牛島邦晴**, 選択的レーザ溶融法で作製したマイクロラティス構造の機械的特性, 日本機械学会関東支部第 23 回総会・講演会, 2017 年 3 月 16 日~17 日, 東京理科大学 (東京都)
- ⑭ **牛島邦晴**, Estimation of Effective Elastic Modulus of Structures Composed of Three Parts, Global Congress and Expo on Materials Science and Nanoscience, 2016 年 10 月 24 日~26 日, ドバイ (UAE)
- ⑮ **牛島邦晴**, 陳ダイコウ, Estimation of Mechanical Properties of Micro-Lattice Panel with Irregular Cells, 2nd International Workshop on Advanced Dynamics and Model Based Control of Structures and Machines, 2015 年 9 月 20 日~24 日, ウィーン (オーストリア)
- ⑯ **牛島邦晴**, Wesley Cantwell, 陳ダイコウ, Effect of Missing Cells on the Initial Stiffness and Plastic Yielding Surface of Three-Dimensional Micro-Lattice Structures, 12th International Conference on the Mechanical Behavior of Materials, 2015 年 5 月 10 日~14 日, カールスルーエ (ドイツ)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

牛島邦晴 (USHIJIMA Kuniharu)
東京理科大学・工学部機械工学科・准教授
研究者番号: 00349838

(2) 研究協力者

元祐昌廣 (MOTOSUKE Masahiro)
東京理科大学・工学部機械工学科・准教授
研究者番号: 80434033

陳ダイコウ (CHEN Dai-Heng)
江蘇大学・客員教授

山口昌夫 (YAMAGUCHI Takao)
群馬大学・理工学部機械知能システム理工
学科・教授
研究者番号 : 90323328

朝倉巧 (ASAKURA Takumi)
東京理科大学・理工学部機械工学科・講師
研究者番号 : 60778207

Wesley Cantwell
Khalifa University of Science and
Technology・教授