

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K15216

研究課題名（和文）メカニカルメタマテリアルの微視構造と巨視的構造特性の関係性の解明及び適用性の研究

研究課題名（英文）A Study of the Effects of Microstructure on Mechanical Properties of Mechanical Metamaterials and Its Application

研究代表者

津島 夏輝 (Tsushima, Natsuki)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・航空技術部門・研究開発員

研究者番号：20815948

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、従来材料では実現不可能な超高性能でエキゾチックな特性を持ち、高自由度な多機能材料として、航空宇宙構造の革新的な性能向上が期待されているメカニカルメタマテリアルについて、任意の微視格子構造により構築されるメカニカルメタマテリアルにおける微視構造設計とマクロな構造応答の関連性を明らかとし、その構造特性の特徴及び性能、実用性を評価するための解析手法の構築及び検証に取り組んだ。さらに、そうした特異な設計を製作するための積層造形技術を応用した構造・材料製作法の確立にも成功した。また、翼設計への適用を例に、航空宇宙構造の軽量化や機能性の向上に向けたメカニカルメタマテリアルの設計指針を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、メカニカルメタマテリアルを航空宇宙構造へ適用することで、性能向上が可能であることが明らかとなった。また、航空構造の軽量化や多機能化に向けたメカニカルメタマテリアルの微視構造設計の設計指標となるデータが蓄積され、効果的なメカニカルメタマテリアル設計の指針・知見が得られた。こうしたデータ・知見は先行研究等において報告されていないため、本研究の独自成果であると考えられる。加えて、本研究において構築された解析手法や製造手法は、多様なメカニカルメタマテリアル設計に適用可能であり、これまで概念検討に留まっていたメカニカルメタマテリアル技術における早期の実用化に寄与するものとして期待できる。

研究成果の概要（英文）：This study developed a multi-scale analysis framework to efficiently evaluate the stiffness and strength characteristics of mechanical metamaterials. Equivalent structural characteristics of mechanical metamaterials were effectively captured by accommodating a computational homogenization method to mechanical metamaterials. The obtained equivalent structural properties were used to perform multi-scale structural and aeroelastic simulations of a structure with the mechanical metamaterials by modeling the mechanical metamaterials as equivalent solid substructures. In addition, the manufacturing methodology for an integrated structure with mechanical metamaterials as substructures had also been established. Structural properties and functionalities with various designs of mechanical metamaterials were evaluated based on the numerical framework. This study demonstrated the feasibility and capability of such structures with mechanical metamaterials.

研究分野：構造力学、空力弾性

キーワード：メカニカルメタマテリアル 数値均質化法 空力弾性 マルチスケール解析 ラティス構造 積層造形技術 航空構造

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

メカニカルメタマテリアルとは、微視構造の荷重伝達を制御して理想的な材料・構造特性を付与した自然界にない人工材料である。このような人工材料は、その構成成分だけでなく格子や多孔質構造による $\mu\text{m} \cdot \text{nm}$ から mm 規模の微小・メソスケール形状に起因して、従来の材料の概念を逸脱するような特殊な材料特性や巨視的な変形や挙動を示す事が知られており、海外では盛んに研究されている。例えば 0.01g/cm^3 以下の超低密度型や約 700 kg/m^3 の低密度と 1GPa の圧縮強度を併せ持つ微視構造設計の材料は高性能用途として期待され、展開・収納等の挙動を示す ORIGAMI 構造等も注目されている。研究代表者が先行研究において検討したパンタグラフ型メカニカルメタマテリアルは、構成要素である支柱の回転によって局所的に大きな歪みエネルギーが蓄えられずに巨視的に変形し、微視構造設計によっては降伏歪みが $30\text{-}50\%$ を超える実例も報告されており、大変形を可能とする柔軟性と破壊に対する粘り強さを両立しつつ、密度は $0.1\text{-}1\text{ g/cm}^3$ 程度と軽量である。そのため、過酷な環境下での耐荷性と軽量性が期待できる。これらの新材料の研究の多くは未だ弾性率や密度等の材料特性のみに注目しており、例えば人工材料の有効弾性率 E_{eff} が幾何学的パラメータ F 、比重、特性係数 g 、構成材料の弾性率 E_s からのように表せる事は判明しているが、構造に適用した際に異なる微視（ミクロ）構造が全体（マクロ）構造の応答（構造特性）に与える影響は詳細にわかっていない。また材料特性の研究でも、微視構造を詳細な有限要素法にて、逐一特性を評価する手法が用いられており、無数に存在する微視構造設計における材料特性を評価する一般的手法はない。

2. 研究の目的

本研究では、従来材料では実現不可能な超高性能でエキゾチックな特性を持ち、高自由度な多機能材料として、航空宇宙構造の革新的な性能向上が期待されているメカニカルメタマテリアルについて、任意の微視格子構造により構築されるメカニカルメタマテリアルにおける微視構造設計とマクロな構造応答の関連性を明らかにすることを目的とする。そのために、メカニカルメタマテリアルによる構造体の構造特性の特徴及び性能、実用性を評価するための解析手法の構築を確立し、航空宇宙構造への適用を例に、その妥当性検証と精度・効率も評価する。

本研究においては、メカニカルメタマテリアルによる構造体のマクロな構造応答と空力特性を評価できる非線形マルチスケール空力弾性解析手法を図1に示す流れで確立・検証する。軽量性を重視したメカニカルメタマテリアルによる構造体では、大変形を伴う場合も多いため、幾何学的非線形の考慮が重要だが、申請者が開発した梁要素による Strain-based 有限要素法やシェル要素による共回転有限要素法を用いる事で幾何学的非線形構造解析ができる。更に申請者の先行研究における構造解析手法とコルゲート構造の均質化法によるマルチスケール解析手法と同様に、構造解析手法にメカニカルメタマテリアルの数値均質化法を統合する事で、メカニカルメタマテリアルを統合した構造体の幾何学的非線形解析が可能である。この手法では、Gibson-Ashby モデルや引張・曲げ・せん断剛性など特定の構造特性のみを算出する理論モデルと比べて、多様なメカニカルメタマテリアルの微視構造設計に対する汎用性が高く、非線形構造解析のみならず、空力特性も考慮した空力弾性解析との親和性も高いため、航空宇宙構造へ適用した際の総合的な応答や性能評価ができる。加えて、多様な微視構造における構造特性データを収集・評価する事で、信頼性のある妥当性検証も実施する。構造特性データの収集には、積層造形 (AM) 技術による試験片・供試体による構造特性試験と詳細な有限要素解析を併用する。このように、実験と数値解析評価を駆使した豊富なデータにより、開発する解析技術の妥当性検証のみならず、メカニカルメタマテリアルの異なる微視構造パラメータが巨視的な構造特性に与える影響を解明する。

3. 研究の方法

上記の背景及びこれまでの研究成果をもとに、メカニカルメタマテリアルの微視構造が構造特性に与える影響を解明し、その航空宇宙構造への適用性を明らかにする。研究は均質化法に基づくマルチスケール解析と実験により進める（主要部を図1に示す）。

①複合材料を対象とした周期性を有する非均質構造材料に対する均質化手法を応用し、周期性を有するメカニカルメタマテリアルの等価な材料としての巨視レベルの機械特性を評価可能な数値均質化手法

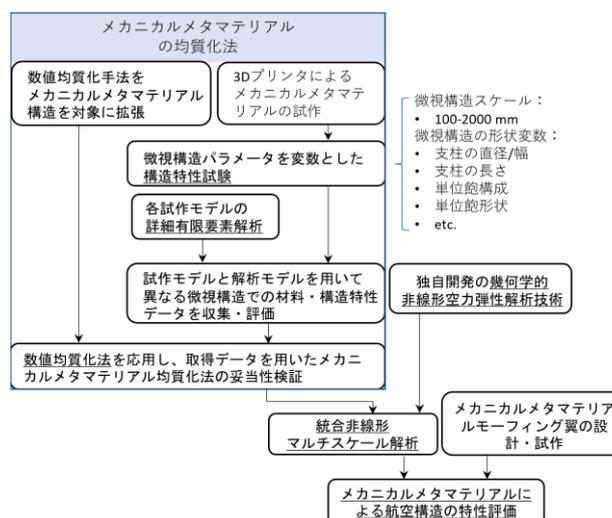


図1 メカニカルメタマテリアルのマルチスケール解析手法による研究プロセス

を構築する。

- ②AM 技術を用いてメカニカルメタマテリアルによる試験片を試作し、構成要素の幾何寸法や配置等の微視構造パラメータを変数として構造特性を試験的に分析する。
- ③各試作モデルの詳細な有限要素モデルを構築する。
- ④実験と詳細有限要素解析にて異なる微視構造におけるメカニカルメタマテリアルの構造特性を評価し、データ収集・分析を行う。
- ⑤実験と詳細有限要素解析、均質化法によるマルチスケール解析の結果を相互比較し妥当性を検証する。
- ⑥申請者が独自開発した非線形空力弾性解析手法とメカニカルメタマテリアルの均質化法を用いて、メカニカルメタマテリアルに基づく構造の巨視的な構造特性におけるマルチスケール統合解析技術を開発する。
- ⑦AM 技術を用いて、メカニカルメタマテリアルを適用した構造体を試作し、試作試験とマルチスケール解析により構造特性・機能評価を行い、構造体の特徴及び性能・機能向上の可能性を明らかにする。
- ⑧マルチスケール空力弾性解析技術を用いた構造・空力特性の予測に基づいて、メカニカルメタマテリアルを適用した航空機翼を試作し、構造特性試験及び風洞試験によって最終的な性能評価を実施する。

4. 研究成果

【メカニカルメタマテリアルの均質化法に基づくマルチスケール解析法の開発及び妥当性検証】

本研究では特に、AM 技術と親和性の高いラティス構造に基づく周期性を有するメカニカルメタマテリアルを主な対象として評価した（一部、パンタグラフ構造に基づくメカニカルメタマテリアルも評価している）。数値均質化手法を応用して、メカニカルメタマテリアルの巨視的な静的・動的構造特性を予測するマルチスケール解析法を構築した（図 2a）。これにより、メカニカルメタマテリアルの微視構造の特徴を捉えつつ、等価な剛性・強度及び密度を算出し、巨視的な応答を現実的なコストで高効率に評価することが可能となった。本手法は、独自開発の空力弾性解析技術と統合することで、メカニカルメタマテリアルを適用した構造体の空力弾性解析までも実現可能となっている。

マルチスケール解析による構造特性評価法は、評価するメカニカルメタマテリアルを有限要素 (FE) 法により詳細にモデル化した構造解析と誤差 1%以下の精度を実現している一方で、計算コストを大幅に低減可能であることを示した。例えば、ラティス構造の詳細なモデル化にて高精度な解析結果を得るには、1.3M 以上の要素数を要するが、マルチスケール解析手法では 3,700 要素程度で同等の解析結果を得ることが可能であるため、1/350 以下の要素数となる。また、AM 技術を用いて製作した試験片による構造試験結果とマルチスケール解析結果を比較することで、提案解析手法の妥当性検証も実施した。引張試験及び三点曲げ試験を実施して、図 2b に示されるように、実験結果と解析値が良く一致し、実験結果のばらつきの範囲内に解析値が収まっていることが確認された。

さらに、メカニカルメタマテリアルの等価な材料物性予測を可能とする数値均質化法を、申請者が独自開発した非線形空力弾性解析技術と組み合わせる事で、メカニカルメタマテリアルを航空宇宙構造へ適用した場合のマクロな構造応答と空力特性を評価できる非線形マルチスケール空力弾性解析手法を開発した。

【積層造形技術によるメカニカルメタマテリアルの造形精度・材料特性評価】

AM 技術により、図 3 に示すような試験片を製作し、その造形精度及び材料特性を評価した。評価対象は図 4a に示されるような単純立方格子型のラティス形態とし、構成要素となる梁柱の幅 b や構成材料（樹脂及び金属）を変数として変化させながら（図 4b）、造形精度及び材料特性への影響を評価した（図 5）。試験片は、Raise3D Pro2 Plus により PLA フィラメントを用いて、ノズル及びプラットフォーム温度を 205°C 及び 60°C として造形した。ピッチ高さは 0.2 mm である。実験は、JIS K7161 と K7171 を参照して引張及び曲げ試験を実施した。ラティス構造における梁柱の幅 b が 1.2, 1.6, 2.0 mm の三つのラティス設計を評価した。ラティスのユニットセルサイズは、一辺が 3.0 mm である。各設計はそれぞれ 5 本の試験片を用いて評価し、平均値及び標準偏差も求めた。本評価により、開発する解析技術の妥当性検証に利用できるデータを取得できたと同時に、適切な AM 造形パラメータにより製作されたメカニカルメタマテリアルの特性や造形精度が、材料用途としての利用に十分な精度を有していることが確認された。また、構成要素である支柱の回転によって局所的に大きな歪みエネルギーが蓄えられずに巨視的に変形し、大変形を可能とする柔軟性と破壊に対する粘り強さ、及び軽量性を両立したパンタグラフ型メタマテリアル（図 6）においても、同様の機械特性評価を実施し、30%を超える破壊歪みを実現できることが明らかとなった。

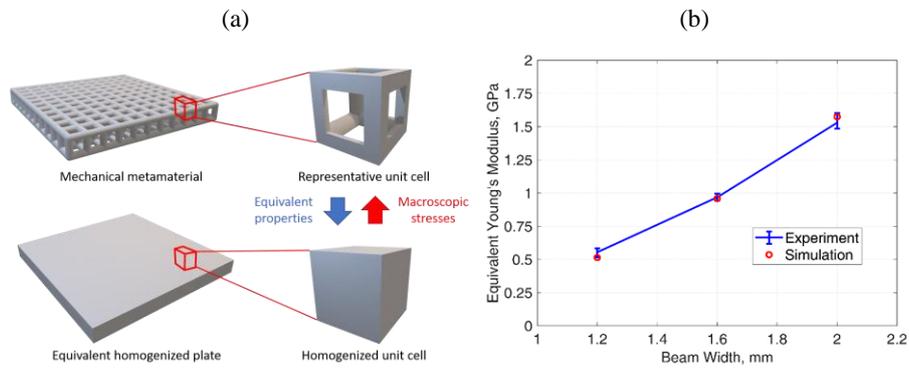


図2 マルチスケール解析による構造特性評価法(a)と引張試験・解析結果比較(b)

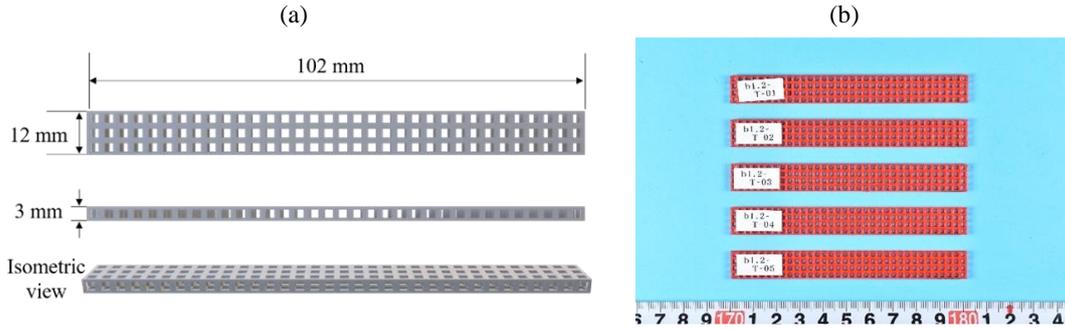


図3 評価試験片設計例(a)と試験片の写真 (b)

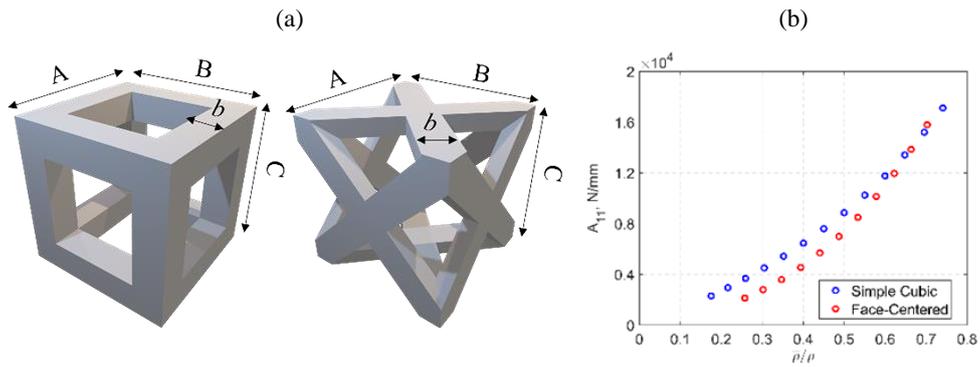


図4 マルチスケール解析による構造特性評価法(a)と引張試験・解析結果比較(b)

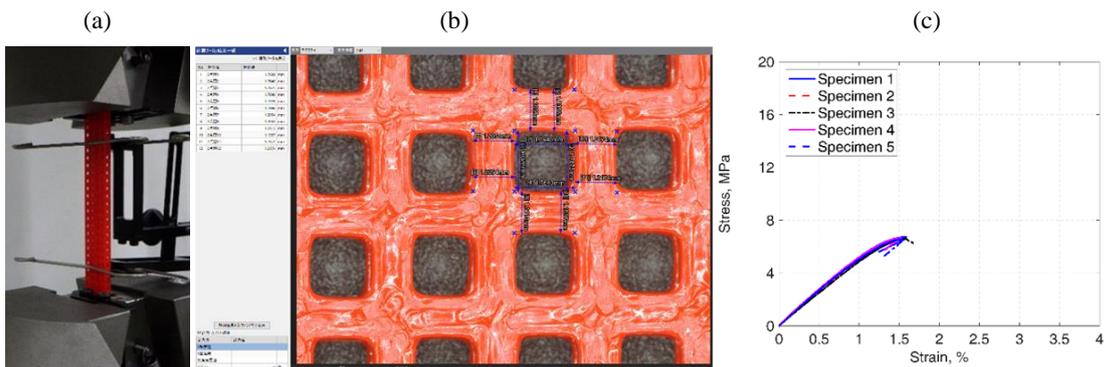


図5 引張試験(a)、造形精度測定例(b)及び試験結果(c)

【メカニカルメタマテリアル構造体の構造・空力弾性解析と性能評価】

航空構造におけるメカニカルメタマテリアルの応用に着目し、ラティス型のメカニカルメタマテリアル設計を統合した翼構造を設計・試作し、空力弾性特性を評価した。また、メカニカルメタマテリアルの形態や幾何形状を設計変数としたパラメトリック解析を実施することで、最適設計を検討するための指標を得た。本検討では、スキン板構造の表面に沿うようにラティス構造を統合したコンフォーマルラティス構造に着目し、その構造を有限要素法によりモデル化している。簡潔化のため、スキン板構造に沿って単純な長方形梁が直交するように統合されたコンフォーマルラティス構造をユニットセルとした平板モデルに着目した。ユニットセルのスキン

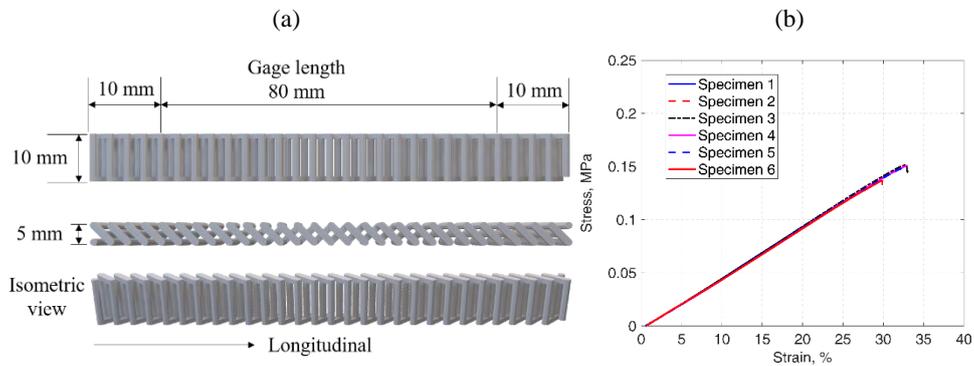


図6 パンタグラフ構造例(a)、パンタグラフ構造における応力-歪み曲線図例(b)

部は、各辺が 20 mm の正方形とし、厚さは 1 mm とした。長方形ラティス部の高さは 1 mm である。コンフォーマルラティス構造は短繊維 CFRP フィラメントによる積層造形にて造形することを想定し、材料の物性値は、ヤング率、ポアソン比、密度が 1.4 GPa, 0.4, 1180 kg/m³ とした。また、本検討に用いた翼モデルを図 7 に示す。コンフォーマルラティス構造を、図 7 に示す矩形翼に統合した設計となっており、NACA0012 翼型を形成する上下面にコンフォーマルラティス構造を用いている。翼モデルは翼根において完全固定であり、翼上下面をそれぞれ三角形シェル要素を用いてコード方向に 25 要素、スパン方向に 50 要素で分割している。解析におけるマッハ数は 0.1、高度は 1,000 m、迎角は 3 度である。数値均質化法に基づくメカニカルメタマテリアルのマルチスケール解析と空力弾性解析技術を統合した解析法のアルゴリズムを図 8a に示す。

本解析により得られた各コンフォーマルラティス翼設計におけるコード中心での翼端垂直変位と翼構造重量の関係性を図 8b に示す。本解析においては、ラティス部の幅は 0.4, 0.8, 1.6, 4.8, 6.8 mm の 5 ケースで評価した。特性比較のため、同じ物性値及び平面寸法で、ラティス部を除いた厚さが 1 mm 又は 2 mm のスキン部だけの翼設計における解析結果も併記した。コンフォーマルラティス構造を適用することで、同じスキン厚さでスキン部だけの場合よりも空力弾性変形を抑制できることがわかる。また、ラティス部の幅を大きくしていくことで、重量増加に対して空力弾性変形の抑制効果は鈍化していくが、最終的に厚さが 2 mm の均質なスキン部の変形へと収束していくことが確認できる。このように、マルチスケール空力弾性解析技術を用いることで、翼構造設計におけるラティス構造の適用による空力弾性特性を評価することができる。

また、飛行条件に応じて形状変形することで、飛行性能向上が期待されるモーフィング翼構造を例に、柔軟性及び軽量性を両立可能なパンタグラフ構造を翼構造に適用したパンタグラフ型モーフィング翼構造に関する解析的評価も実施した。モーフィング機構の有無における空力特性の違いを評価し、パンタグラフ型モーフィング翼設計の空力特性における優位性を示した。

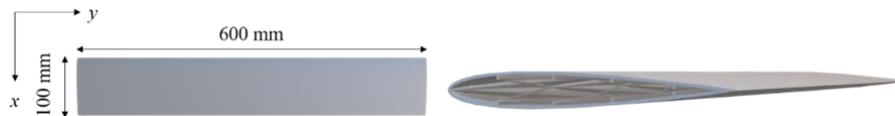


図7 コンフォーマルラティス翼モデル

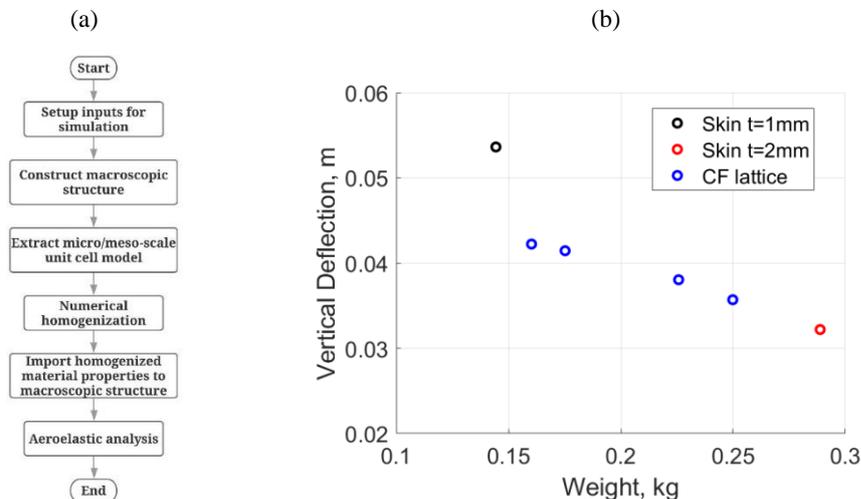


図8 マルチスケール空力弾性解析アルゴリズム(a)及びラティス設計の重量と翼端変位の関係(b)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Tsushima Natsuki, Higuchi Ryo	4. 巻 31
2. 論文標題 Stiffness and strength evaluation of lattice-based mechanical metamaterials by decoupled two-scale analysis	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Materials Today Communications	6. 最初と最後の頁 103598 ~ 103598
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.mtcomm.2022.103598	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Natsuki Tsushima; Masato Tamayama; Takashi Yamazaki	4. 巻 JAXA-RR-21-005E
2. 論文標題 Effects of Process Variables on Mechanical Properties of 3D Printed Materials Fabricated by FDM	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 JAXA Research and Development Report (RR)	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -
1. 著者名 Tsushima Natsuki, Arizono Hitoshi, Tamayama Masato	4. 巻 520
2. 論文標題 Geometrically nonlinear flutter analysis with corotational shell finite element analysis and unsteady vortex-lattice method	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Sound and Vibration	6. 最初と最後の頁 116621 ~ 116621
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jsv.2021.116621	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Tsushima Natsuki, Tamayama Masato, Arizono Hitoshi, Makihara Kanjuro	4. 巻 117
2. 論文標題 Geometrically nonlinear aeroelastic characteristics of highly flexible wing fabricated by additive manufacturing	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Aerospace Science and Technology	6. 最初と最後の頁 106923 ~ 106923
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ast.2021.106923	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tsushima Natsuki、Saitoh Kenichi、Arizono Hitoshi、Nakakita Kazuyuki	4. 巻 8
2. 論文標題 Structural and Aeroelastic Studies of Wing Model with Metal Additive Manufacturing for Transonic Wind Tunnel Test by NACA 0008 Example	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Aerospace	6. 最初と最後の頁 200 ~ 200
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/aerospace8080200	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 TSUSHIMA Natsuki、TAMAYAMA Masato、MAKIHARA Kanjuro、ARIZONO Hitoshi	4. 巻 86
2. 論文標題 Structural and aerodynamic characteristics of additively manufactured flexible wings	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.19-00452	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27件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 13件)

1. 発表者名 津島夏輝、樋口諒
2. 発表標題 マルチマテリアル積層造形によるメカニカルメタマテリアルの機械特性制御
3. 学会等名 第14回日本複合材料会議
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tsushima Natsuki、Yuta Hayashi、Tomohiro Yokozeki
2. 発表標題 Dispersion Characteristics of Wave Propagation in Lattice-Based Mechanical Metamaterial for Vibration Suppression
3. 学会等名 AIAA Scitech 2023 Forum (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 津島夏輝、斎藤健一、中北和之
2. 発表標題 高速風洞試験のための金属積層造形による翼模型製作法とその空力弾性特性
3. 学会等名 第60回飛行機シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 津島夏輝、斎藤健一、中北和之
2. 発表標題 金属積層造形法による翼模型の遷音速フラッタ特性評価
3. 学会等名 第54回流体力学講演会 / 第40回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 津島夏輝
2. 発表標題 メカニカルメタマテリアルによる構造振動抑制効果の予測と評価
3. 学会等名 第64回構造強度に関する講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tsushima Natsuki、Higuchi Ryo、Koji Yamamoto、Tomohiro Yokizeki
2. 発表標題 Structural Evaluation in Lattice-Based Mechanical Metamaterials by AM for Lightweight Tunable Structures
3. 学会等名 15th World Congress on Computational Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tsushima Natsuki、Saitoh Kenichi、Nakakita Kazuyuki
2. 発表標題 Structural and Aeroelastic Studies of Wing Model for Transonic Wind Tunnel Test Fabricated by Additive Manufacturing with AlSi10Mg Alloys
3. 学会等名 AIAA Aviation 2022 Forum (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tsushima Natsuki、Higuchi Ryo、Arizono Hitoshi
2. 発表標題 Finite Element Procedure for Strength Evaluation in Lattice-Based Mechanical Metamaterials
3. 学会等名 AIAA SciTech 2022 Forum (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tsushima Natsuki、Saitoh Kenichi、Nakakita Kazuyuki
2. 発表標題 Transonic Flutter Characteristics of Wind Tunnel Model Fabricated by Additive Manufacturing with AlSi10Mg Alloys
3. 学会等名 2021 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology (APISAT2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 津島夏輝、斎藤健一、中北和之
2. 発表標題 アルミ合金を用いた金属積層造形による翼模型の遷音速フラッタ風洞試験
3. 学会等名 第59回飛行機シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 津島夏輝、樋口諒、有菌仁、玉山雅人
2. 発表標題 金属積層造形法によるラティス構造の機械的強度特性評価
3. 学会等名 第63回構造強度に関する講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Natsuki Tsushima, Kensuke Soneda, Tomohiro Yokozeki, Taro Imamura, Hitoshi Arizono, Weihua Su
2. 発表標題 Structural and Aerodynamic Models for Aeroelastic Analysis of Corrugated Morphing Wings
3. 学会等名 AIAA Scitech 2020 Forum (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Natsuki Tsushima, Masato Tamayama, Hitoshi Arizono
2. 発表標題 Aeroelastic Characteristics of Morphing Wings with Pantographic Substructures
3. 学会等名 AIAA Scitech 2020 Forum (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 津島夏輝、玉山雅人、山崎隆
2. 発表標題 FDM による造形パラメータを考慮した樹脂・複合材積層造形材料の機械特性評価
3. 学会等名 第11回日本複合材料会議
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 津島夏輝、樋口諒、横関智弘、玉山雅人
2. 発表標題 コンフォーマルラティス構造による軽量複合材翼の設計
3. 学会等名 第12回日本複合材料会議
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 津島夏輝、有園仁、玉山雅人
2. 発表標題 共回転有限要素法と非定常渦格子法に基づくフラッタ解析
3. 学会等名 第58回飛行機シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 津島 夏輝、齊藤 健一、玉山 雅人、中北 和之
2. 発表標題 金属積層造形による遷音速フラッタ翼模型の構造・フラッタ 特性
3. 学会等名 第 29 回 交通・物流部門大会 (TRANSLOG2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Natsuki Tsushima, Ryo Higuchi, Hitoshi Arizono, Masato Tamayama
2. 発表標題 Multi Scale Aeroelastic Analysis of Wings with Lattice-Based Mechanical Metamaterials
3. 学会等名 AIAA Scitech 2021 Forum (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Natsuki Tsushima, Masato Tamayama, Kanjuro Makihara, Hitoshi Arizono
2. 発表標題 Aeroelastic Characteristics of Additively Manufactured Wings
3. 学会等名 Second International Symposium on Flutter and its Application, 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Natsuki Tsushima, Kenichi Saitoh, Hitoshi Arizono, Kazuyuki Nakakita
2. 発表標題 Structural and Flutter Characteristics of Wing Model with Metal Additive Manufacturing for Wind Tunnel Test
3. 学会等名 Second International Symposium on Flutter and its Application, 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 津島夏輝、樋口諒、有園仁、玉山雅人
2. 発表標題 均質化法によるラティス構造を有する翼の マルチスケール空力弾性解析
3. 学会等名 第62回構造強度に関する講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Natsuki Tsushima, Ryo Higuchi, Hitoshi Arizono, Masato Tamayama
2. 発表標題 Structural and Aeroelastic Evaluations of Wings with Lattice-Based Mechanical Metamaterials
3. 学会等名 American Society for Composites 35th Annual Technical Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 津島夏輝、玉山雅人、有園仁
2. 発表標題 パンタグラフ型メカニカルメタマテリアルによるモーフィング翼の空力弾性評価
3. 学会等名 第57回飛行機シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 津島夏輝、玉山雅人、楨原幹十朗、有園仁
2. 発表標題 3Dプリンティング翼の空力弾性特性
3. 学会等名 第 28 回 交通・物流部門大会 (TRANSLOG2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Natsuki Tsushima, Kensuke Soneda, Tomohiro Yokozeki, Taro Imamura, Hitoshi Arizono, Weihua Su
2. 発表標題 Structural and Aerodynamic Models for Aeroelastic Analysis of Corrugated Morphing Wings
3. 学会等名 AIAA Scitech 2020 Forum (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Natsuki Tsushima, Masato Tamayama, Hitoshi Arizono
2. 発表標題 Aeroelastic Characteristics of Morphing Wings with Pantographic Substructures
3. 学会等名 AIAA Scitech 2020 Forum (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 津島夏輝、玉山雅人、山崎隆
2. 発表標題 FDM による造形パラメータを考慮した樹脂・複合材積層造形材料の機械特性評価
3. 学会等名 第11回日本複合材料会議
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 執筆者：54名、技術情報協会	4. 発行年 2022年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 508
3. 書名 メタマテリアルの設計、作製と新材料、デバイス開発への応用	

〔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
---------	---------