

令和 4 年 5 月 31 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18H01334

研究課題名(和文)セル状固体の動的変形遷移メカニズムに関する研究

研究課題名(英文)Study on the transition mechanism of dynamic deformation in cellular solids

研究代表者

田中 展 (Tanaka, Hiro)

大阪大学・工学研究科・准教授

研究者番号：70550143

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,700,000円

研究成果の概要(和文)：近年、微視的内部構造を制御して機能・特性を発現させるセル状固体の研究開発が盛んであり、大変形を伴うセル状固体の非線形力学特性を適切に表現できるモデルが必要とされている。本研究課題では、セル状固体の骨格を形成する接合部(節)に着目して、静解析・動解析によってセル状固体の特殊な変形メカニズム(動的変形遷移機構および負のポアソン比)の解明に注力した。結果として、上述の変形メカニズムを表現できる周期構造の数理モデルを構築することに成功し、次世代材料設計に繋がるような荷重負荷速度に依存して剛性を切り替える粘弾性モデルや低周波数の膨張収縮振動特性をもつ稜共有型4面体構造を新しく提唱することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

機械工学の観点において、固体の変形は、材料の機能・特性を向上させる上で最も重要でかつ基本的な要素です。特に、内部構造に空隙が多く存在するセル状固体の場合、材料設計においてその大変形能を上手く利用するためには、数学的に解くことが困難な非線形変形挙動を正確に理解することが必要です。本研究課題では、先行研究で独自に考案した新しい変形メカニズムを数学的に記述するために、最小限の自由度に低減したモデルを開発しました。そして、静的・動的解析を行った結果、圧縮の負荷速度を速くすると自分自身が柔らかくなる構造や、非常にスローな膨張収縮振動が引き起こされる構造を世界で初めて提唱することができました。

研究成果の概要(英文)：Recently, the researches and developments on cellular solids that control their microstructures and yield the new functions and properties have been activated, and the model representing well the nonlinear mechanical properties of cellular solids with large deformability is essential to reach the goal. This study focused on the connections (joints), which constitute the framework of a cellular solid, and tried to reveal the unusual deformation mechanism such as the dynamic deformation transition and negative Poisson ratio by analyzing them in static and dynamic manners. As a result, we succeeded to develop the mathematical models of periodic structure in order to represent the deformation mechanisms mentioned above. We then could promote the new ideas for the viscoelastic model switching its stiffness according to a loading rate and the edge-shared tetrahedral units with low-frequency auxetic vibration, these findings of which open the design of a next-generation material.

研究分野：固体力学

キーワード：セル状固体 変形遷移 動的変形挙動 粘弾性特性 非線形構造力学

1. 研究開始当初の背景

現在、軽量で剛性や強度などの機械特性に優れたセル状固体は、生体材料から機械部品まで様々な分野で活用され、重要な役割を担っている。そのセル状固体の微視的内部構造は幾何学的に多様である。近年、3D プリンタに代表される Additive Manufacturing 技術や自己組織化などの化学合成法の発展によって、ミクロスケールで内部構造を自在に形作ることが可能になりつつあり、新しい内部構造を提案してセル状固体に付加的機能性を与える研究が精力的に行われている——そのような新機能材料を総称して、メカニカルメタマテリアル (mechanical metamaterials) やアーキテクテッドマテリアル (architected materials) という用語が使われている。例えば、非正值の材料定数を示す構造や高比剛性・高比強度を示す階層構造を特長とする新規構造体が提案されており、次世代材料に繋がる周期構造の設計・開発が期待されている。

従来、土木・建築の分野において座屈などの構造不安定挙動は、人身に関わる予防すべき事象として扱われてきた。一方、セル状固体の大変形は、非線形問題としての数学的関心から衝撃吸収材などの工学的応用まで多角的に研究が進められてきた。特に 2010 年以降、構造不安定性を利用した周期構造の力学特性に関する研究が活発になり、例えば、飛び移り座屈挙動から誘起される変形伝播メカニズムなど、斬新なアイデアに基づいた材料・構造システムが具現化されつつある。

以上のように、メカニカルメタマテリアル・アーキテクテッドマテリアルの研究は、新しい周期構造の設計によってセル状固体に非線形変形挙動を実装することが可能となり、線形弾性特性では表現できない未知の力学機能を具備するポテンシャルが注目されている。

2. 研究の目的

前章で説明した研究背景において、本研究課題では「セル状固体の変形挙動を理解し、その拡張・応用によって固体力学に対する新しい価値観を創出する」といった目的を設定する。その目的達成のために、セル状固体の骨格を形成する接合部 (節) に着目して、本研究グループ独自の静・動解析によってセル状固体の特殊な変形機構を解明する。

上記の研究目的に則して、以下に示す 2 つの研究課題を実施する。

課題 1 : 「双剛性を示す平面リンク構造の動的変形遷移メカニズム」

課題 2 : 「負のポアソン比を示す稜共有型 4 面体構造の単軸引張変形と振動特性」

課題 1 では、先行研究で提案した双剛性をもつセル状固体 (Tanaka, 2013) の静的・動的性質を数学的に記述するために、低次元リンク構造でモデル化し、ある臨界値で変形が切替わる変形遷移メカニズムの理論的な解釈を与える。

課題 2 では、著者らが開発した負のポアソン比を示す積層セル構造体の 3 次元変形挙動 (Tanaka et al., 2017) を数学的に表現するために、稜共有型 4 面体構造の次数低減モデルを構築し、その単軸引張変形特性と振動特性の理論解を導出する。

上記 2 つの課題に対して、並行して機構解析シミュレーションと実験を実施し、総合的な解析基盤と応用技術の体系化を目指す。

3. 研究の方法

(1) 課題 1 の研究方法

本研究で提案する周期構造とその 2 種類の形状パターンを図 1(a)–(c) に示す。ここで図中の青

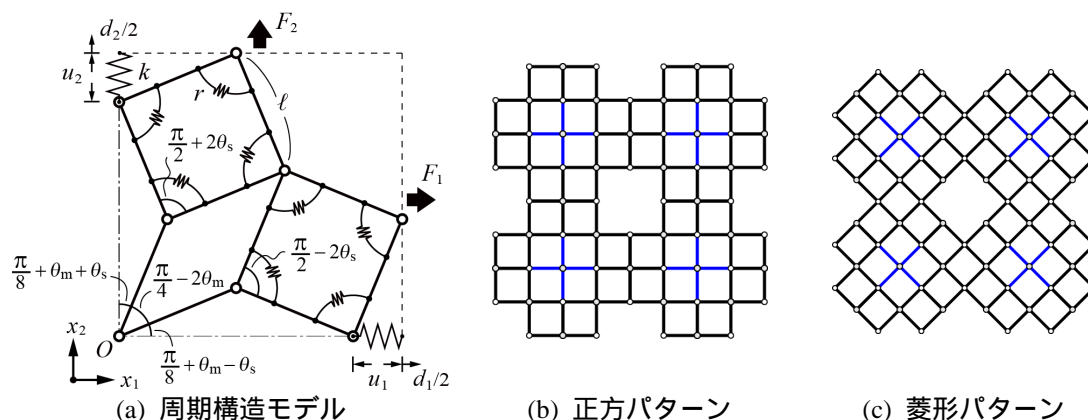


図 1 双剛性を示す周期構造とその形状変化。

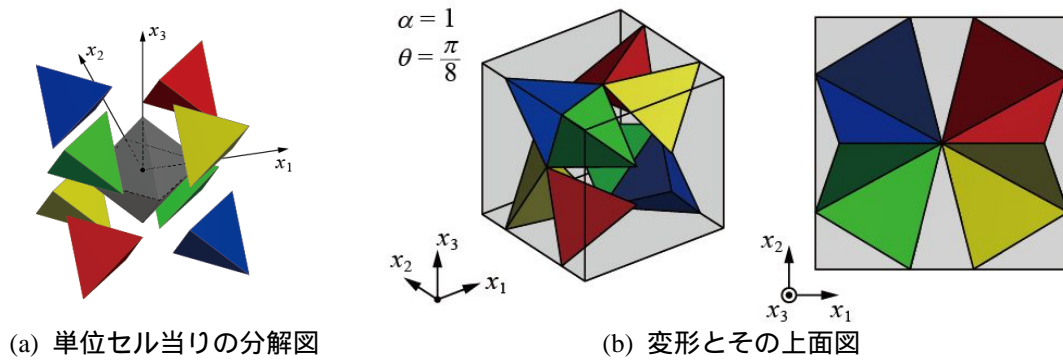
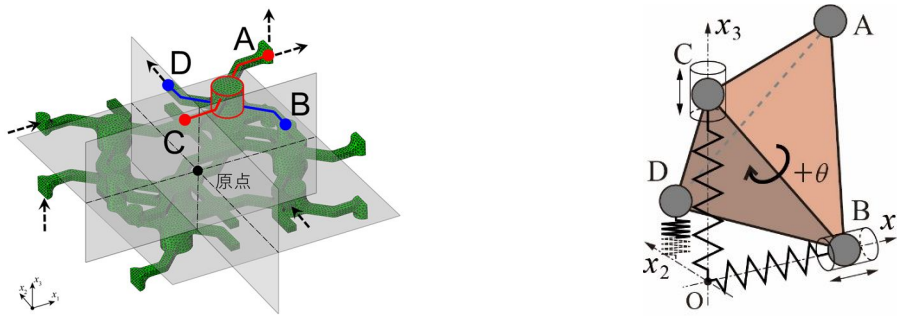


図2 稜共有型4面体構造の単位セルとその変形.



(a) 先行研究の単位セル(Suga et al., 2018) (b) 本研究の単位セルの 1/8 サイズ
図3 次数低減モデル.

色の剛体棒は黒色の剛体棒の2倍の長さを持ち、各節点は2種類の剛体棒を滑節結合していることを示す. 本周期構造は、正方パターン(図1(b))と菱形パターン(図1(c))に形状を変化させることが可能である. 本研究では軸方向の変形に興味があるため、変形形状に関する鏡映対称を課して、せん断変形を除外した2自由度機構の問題を考える.

提案した周期構造内部に、図1(a)に示すような、回転ばね、および線形ばね、またはダッシュポットを内挿し、単軸圧縮による静的・動的変形解析を実施する. 強い非線形性が生じるため、高次の非線形項を無視した近似理論モデルを考えて、その単位セルの特異な変形機構を考察する. また、動的変形解析では、機構解析ソフトウェア Adams を用いたシミュレーション結果と比較し、近似解の妥当性を検証する.

(2) 課題2の研究手法

研究課題2では、負のポアソン比を示す3次元積層セル構造体の次数低減モデルとして、図2に示すような稜共有型4面体構造を提案する. 図2(a)に示すように、本構造の単位セルでは8個の4面体が正8面体を取り囲むように配置しており、正8面体の頂点に配置する4面体を周期的にピン結合する. 本周期構造は多自由度であるが、単軸引張変形を考慮して単位セル当たり2自由度の問題として取り扱う. 単位セルの変形の様子を図2(b)に示すように、本周期構造は4面体の回転運動によって負のポアソン比を示す膨張変形をしていることが分かる. また、その上面図から、4面体は隣接する4面体と一辺を共有して回転していることが分かる.

図3(a), (b)に示すように、本研究で提案する稜共有型4面体構造は、先行研究の負のポアソン比を示す3次元積層セル構造体の特異な変形挙動を、4面体の剛体回転に代表させた次数低減モデルである. 解析対象は、図3(b)に示すように単位セルの1/8サイズとし、図中の3種類の線形ばねを介して相互作用する. 課題2では、この解析モデルを用いて、単軸引張下の大変形問題と振動問題に関わる材料定数を理論的に求める. また、機構解析ソフトウェア Adams を用いたシミュレーション結果と比較し、その理論解の妥当性を評価する.

4. 研究成果

(1) 課題1の研究成果

図1(a)に示した平面リンク構造の静的弾性モデルの単軸圧縮問題を解析したところ、停留原理によって2自由度系の平衡経路に関する双曲放物面型のポテンシャル関数を導くことに成功した(図4). 図中にある双曲放物面と高さ0の水平面との交線が、系の平衡経路を表す. 図4に示すように、系の無次元化ばね定数が変化することで双曲放物面が上昇・下降し、ある臨界値で平衡経路が切替わることを明らかにした. 次に、静的弾性モデルを表す総和ポテンシャルエネルギーにおいて、高次の非線形項を無視して定式化したところ、系の平衡経路の求解は円錐曲線の切断(conic section)の問題に帰着できることを証明した. このとき、臨界状態の平衡曲線は直線になり、その2つの直線の交点から無次元化ばね定数の臨界値の理論解を求めることに成功した.

図1(a)に示した平面リンク構造の線形ばねをダッシュポットに置き換えた動的モデルでは、時

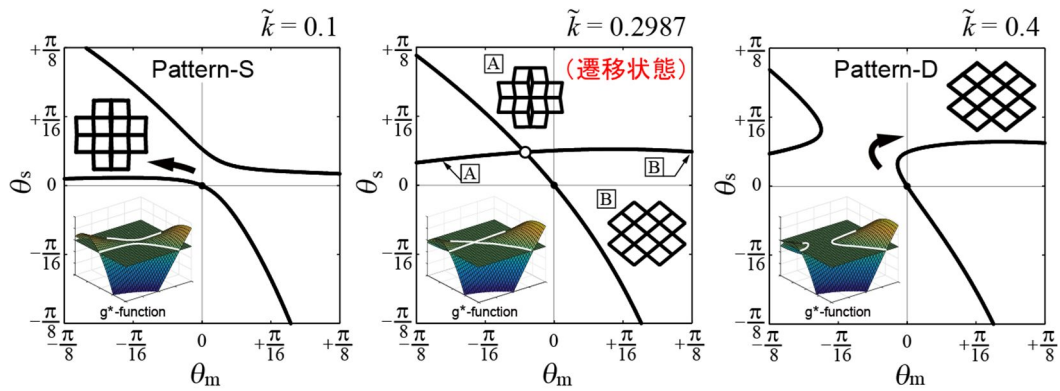


図4 系の双曲放物面型テンシャル関数と平衡経路の変化 .

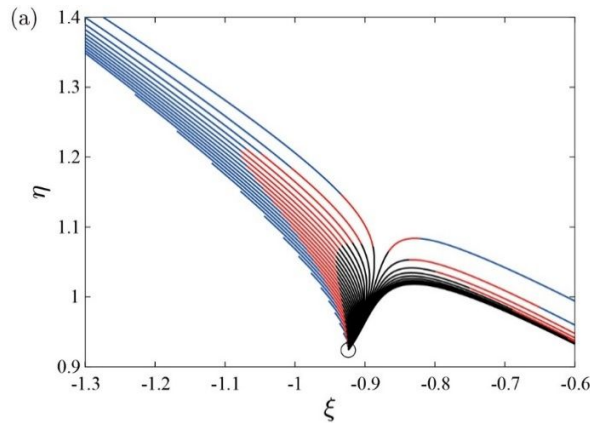
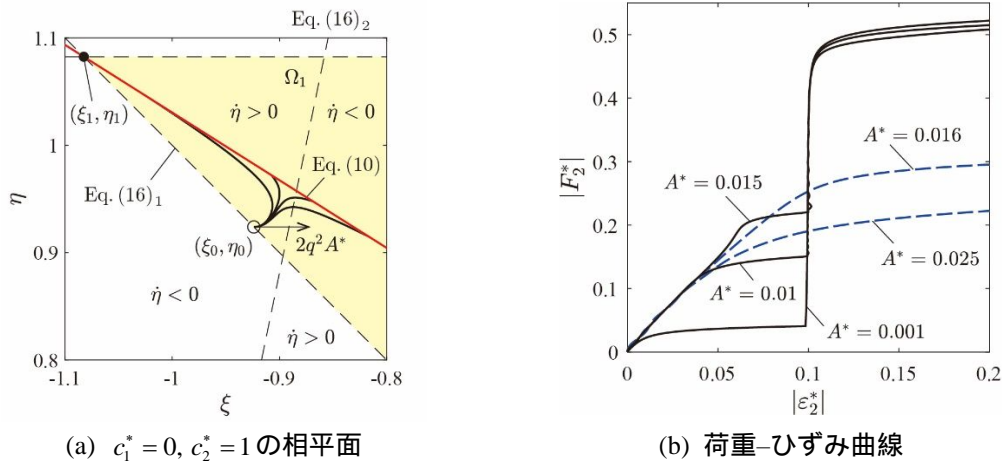


図5 連立常微分方程式の解軌道 .



(a) $c_1^* = 0, c_2^* = 1$ の相平面

(b) 荷重-ひずみ曲線

図6 相平面から解釈する動的変形遷移メカニズム .

間に比例する圧縮負荷を受ける非平衡粘弾性システムの方方程式を記述し、最終的に無次元化3元連立常微分方程式に帰着させることができた。ある初期値で速度系の常微分方程式を時間積分すると、速度パラメータに依存した解軌道が得られて、ある臨界値で解軌道が分岐することを分かった(図5)。そして、この分岐に伴う解軌道の遷移は、図6(a)に示す相平面から説明できることを明らかにした。次に、連立常微分方程式から求めた系の非線形応答と機構解析ソフトウェア Adams を用いたシミュレーションモデルによる計算結果とを比較すると、定性的によく一致する結果を得た。すなわち、簡易な連立常微分方程式でも平面リンク構造の動力学挙動をよく表現できることを実証できた。さらに、機構解析ソフトウェアで平面リンク構造の部材間接触を考慮したところ、図6(b)に示すような荷重-ひずみ曲線が得られた。この結果は、「圧縮負荷速度が遅いときは周期構造の変形形状は正方パターンとなり、剛性が急激に上昇する。一方で、圧縮負荷速度が速いときは周期構造の変形形状は菱形パターンとなり、低剛性を維持する」という現象を意味する。つまり、この粘弾性モデルは遅い応答に剛に振舞い、速い応答で柔に振舞う、一般的な固体とは真逆の新奇な変形挙動を示す。

(2) 課題2の研究成果

図2に示した稜共有型4面体構造の単軸引張変形を解析した。この2自由度系に対して、4面体単体の軸BC回りの回転および x_1, x_3 軸上のスライドを定式化し、単位セルの変形を数学的に記

述することができた。

はじめに4面体の回転だけを考慮した単一自由度系を考える。4面体 ABCD の高さ方向の形状比を変化させると、4面体の回転 θ に対するポアソン比の応答から、単位セルの面内・面外方向のポアソン比はともに負を示し、単軸引張変形に対して構造全体が膨張する auxetic 特性が発現することが分かった。特に、大きく歪んだ4面体の場合、面外のポアソン比は -1 を超えて維持されることを証明した。本解析結果を積層セル構造体の引張試験結果や均質化有限要素解析結果と比較すると、図7に示すように本解析モデルが積層セル構造体のポアソン比に関する非線形変形挙動と定性的によく一致した。すなわち、巨大な負のポアソン比を維持する特異な変形機構は、稜共有された4面体の回転で表現できることを明らかにした。次に、4面体のスライド機構を加えて2自由度系で考えると、総和ポテンシャルエネルギーの停留原理から応力-ひずみ曲線を得て、系の無次元ばね定数 κ が小さいとき、4面体がスリップするような零剛性の領域が応力-ひずみ曲線の初期に現れることを発見し、単一自由度系では見られない興味深い変形メカニズムを見出した。

上述した負のポアソン比を示し、かつ零剛性を示す変形特性を応用するために、2自由度系の振動解析モデルの定式化を行った。2自由度系の静解析モデルで考慮した4面体単体の回転とスリップを微小近似で表したところ、2種類の回転運動で記述できることが判明した。その回転運動に対応する4面体の慣性モーメントを計算し、2自由度系の運動方程式を導出した。得られた運動方程式を角周波数 ω に関する特性方程式に変換し、 κ に依存した2自由度系の固有振動数の理論解を求めた。図8(a)にその関係式を示すように、 κ を小さくすると膨潤・収縮モードを示す低次の固有振動数は減少し続け、低次の振動モードは静解析で得られた零剛性特性を反映する結果を得た。次に、同じ振動解析モデルの運動方程式を用いて周波数応答解析を行ったところ、図8(b)に示すような動的弾性率に関する応答関数が求まった。この応答関数は、低周波数で反共振点が現れており、低周波数の応力振動で膨張・収縮振動が励起されることを証明した。以上で得られた静・動解析の結果はすべて、機構解析ソフトウェア Adams を用いたシミュレーション結果と定量的に一致することを検証している。

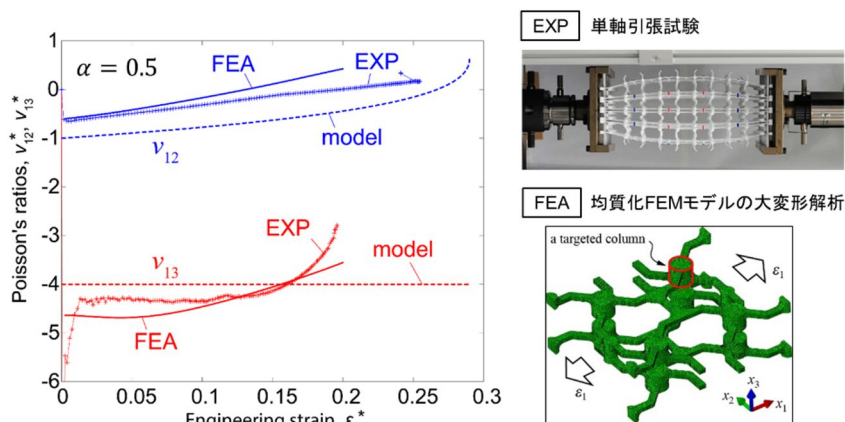
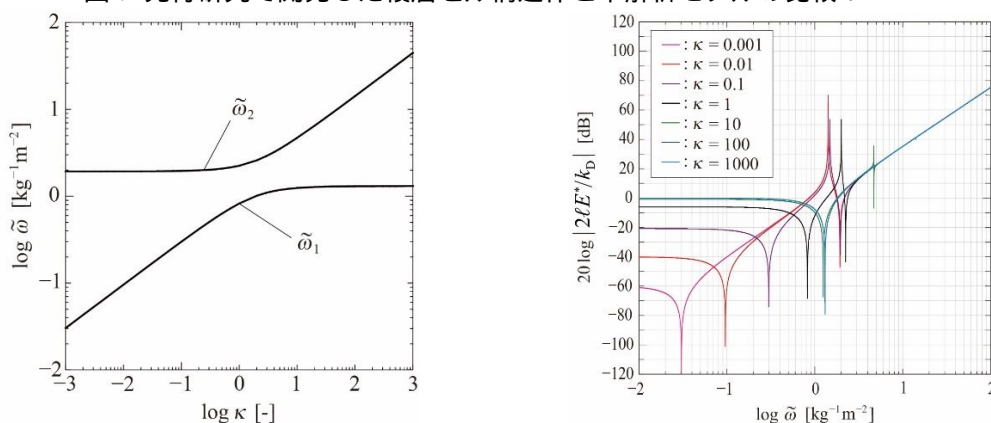


図7 先行研究で開発した積層セル構造体と本解析モデルの比較。



(a) 固有振動特性

(b) 動的弾性率の応答関数

図8 稜共有型4面体構造のモーダル解析と周波数応答解析。

(3) 研究業績

本研究期間中に、上述した研究課題1の成果を整理して2件の英文論文(Tanaka et al. (2018), Tanaka et al. (2021))を発表した。また、研究課題2の成果については3件の英文論文(Suga et al. (2018), Tanaka et al. (2020), Tanaka et al. (2021))を発表した。本研究成果は客観的に評価されて、招待講演を2件発表し、学内外機関で2件受賞した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 H. Tanaka, S. Asao, Y. Shibutani	4. 巻 8
2. 論文標題 Auxetic vibration behaviours of periodic tetrahedral units with a shared edge	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Royal Society Open Science	6. 最初と最後の頁 210768:1-14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1098/rsos.210768	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 H. Tanaka, G. Yamanokuchi, Y. Shibutani	4. 巻 104
2. 論文標題 Creep trajectory transition of a nonstationary viscoelastic model onto a single rate parameter	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 045001:1-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevE.104.045001	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 H. Tanaka, K. Suga, Y. Shibutani	4. 巻 185-186
2. 論文標題 Primitive rotation mechanism of periodic stellated octahedron units with sharing edges	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Solids and Structure	6. 最初と最後の頁 485-499
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ijsoistr.2019.09.013	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 K. Suga, H. Tanaka, D. Okumura, Y. Shibutani	4. 巻 27
2. 論文標題 Macroscopic out-of-plane auxetic features of a laminated open-cell structure with in-plane negative Poisson's ratios induced by bridging beam components	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Smart Materials and Structures	6. 最初と最後の頁 085011:1-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-665X/aacd31	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 H. Tanaka, K. Hamada, Y. Shibutani	4. 巻 5
2. 論文標題 Transition mechanism for a periodic bar-and-joint framework with limited degrees of freedom controlled by uniaxial load and internal stiffness	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Royal Society Open Science	6. 最初と最後の頁 180139:1-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1098/rsos.180139	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18件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 H. Tanaka, S. Asao, Y. Shibutani
2. 発表標題 Slow auxetic vibration of a tetrahedral framework with sharing edges
3. 学会等名 The 11th European Solid Mechanics Conference (ESMC2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 浅生隼希, 田中展, 渋谷陽二
2. 発表標題 稜共有型四面体構造の低周波数振動とポアソン効果に関する研究
3. 学会等名 関西支部第97期定時総会講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 関悠治, 田中展, 渋谷陽二
2. 発表標題 回転摩擦を考慮した多関節線状弾性体の変形立体化シミュレーション
3. 学会等名 関西支部第97期定時総会講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中展
2. 発表標題 周期構造の低自由度モデル(メカニカルメタマテリアル)とその非線形力学解析
3. 学会等名 MIMSオンライン共同研究集会 幾何学・連続体力学・情報科学の交差領域の探索(II)(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Tanaka, S. Asao, Y. Shibutani
2. 発表標題 Mechanical and auxetic properties of polyhedral units with sharing edges
3. 学会等名 SIAM Conference on Mathematical Aspects of Materials Science (SIAM-MS21)(国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山之口岳, 田中展, 渋谷陽二
2. 発表標題 2次元粘弾性構造体の形態変化分岐に関する力学応答解析
3. 学会等名 関西支部第96期定時総会講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 安達亮弥, 田中展, 渋谷陽二
2. 発表標題 弾性波バンドギャップをもつ格子構造の有限セルにおける波動伝搬評価
3. 学会等名 関西学生会2020年度学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiro Tanaka, Gakuto Yamanokuchi, Yoji Shibutani
2. 発表標題 Switching behaviors in a viscoelastic structural model depending on loading rate
3. 学会等名 The 3rd International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems (COMPSAFE2020), (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中 展, 南條 隆正, 関 悠治, 渋谷 陽二
2. 発表標題 周方向圧縮力を受ける環状弾性体の立体構造と非線形線形挙動
3. 学会等名 日本機械学会 M&M2019材料力学カンファレンス
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Tanaka, K. Suga, Y. Shibutani
2. 発表標題 Nonlinear tensile deformation of periodic polyhedral units induced by three-dimensional rotation
3. 学会等名 56th Annual Technical Meeting of the Society of Engineering Science (SES2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中 展, 須賀 海斗, 渋谷 陽二
2. 発表標題 単軸引張負荷における4面体ブロック構造体の膨張効果と特殊変形機構
3. 学会等名 日本機械学会 2019年度年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 須賀海斗, 田中 展, 渋谷陽二
2. 発表標題 負のポアソン比を持つ多面体ブロック構造のモデリングと力学特性評価
3. 学会等名 関西支部第94期定時総会講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山之口岳杜, 田中展, 渋谷陽二
2. 発表標題 負荷速度に依存した周期リンク構造の変形遷移メカニズムに関する力学応答解析
3. 学会等名 関西学生会2018年度学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中 展, 山之口 岳杜, 浜田 一駿, 渋谷 陽二
2. 発表標題 周期構造システムの変形パターンの切り替えと負荷速度依存性
3. 学会等名 日本機械学会 M&M2018材料力学カンファレンス
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田中 展
2. 発表標題 計算力学に基づくセル状固体の非線形力学特性の解明とその応用
3. 学会等名 日本学術会議 第8回計算力学シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田中 展, 須賀 海斗, 奥村 大, 渋谷 陽二
2. 発表標題 単軸引張変形下において負のポアソン比を示す積層セル構造体の面外力学応答のモデル化
3. 学会等名 日本機械学会 第31回計算力学講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Tanaka, K. Hamada, G. Yamanokuchi, Y. Shibutani
2. 発表標題 Elastic and viscoelastic transition responses of specific repetitive structural systems subjected to uniaxial compressive loading
3. 学会等名 International Mechanical Engineering Congress & Exposition (IMECE2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Suga, H. Tanaka, D. Okumura, Y. Shibutani
2. 発表標題 Homogenized linear and nonlinear elastic properties of a type of laminated open-cell structures with negative Poisson's ratios
3. 学会等名 15th International Symposium on Functionally Graded Materials (ISFGMs2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

受賞歴： 大阪大学賞（若手教員部門），2019年11月21日 科学技術分野の文部科学大臣表彰（若手科学者賞受賞），2019年4月17日 ホームページ： <Researchmap> https://researchmap.jp/pmx003 <大阪大学研究者総覧> http://www.dma.jim.osaka-u.ac.jp/view?l=ja&u=6364 <渋谷研究室HP> http://www-comec.mech.eng.osaka-u.ac.jp/index.html
--

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
---------	---------