

令和 6 年 5 月 30 日現在

機関番号：32612

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2023

課題番号：18K13519

研究課題名（和文）不均一な弾性体の力学特性の研究に基づくメカニカルメタマテリアルの設計原理の解明

研究課題名（英文）Designing principles of mechanical metamaterials based on the studies of heterogeneous elastic materials

研究代表者

佐野 友彦（Sano, Tomohiko）

慶應義塾大学・理工学部（矢上）・講師

研究者番号：00791378

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：微細構造を精緻にデザイン可能なシェルとしたシェル構造の集合体の力学応答を実験的に明らかにすることを目的として研究を行なった。シェル構造のなかでも曲がり梁構造の集合体を考えた。一様な自発曲率をもつ円筒形シェルを作成し、2つの円筒形シェルが互いに押し付けられた際の大変形の様子を明らかにし、その集合体の力学特性を明らかにした。シェル同士がはまりあうことで、全体として低荷重のまま圧縮をすることが可能であることがわかった。すなわちシェル集合体は幾何学に立脚した緩衝材として有用であることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

シェル集合体は緩衝材として使用することが可能である。例えば圧縮の最大荷重を決めておき、その荷重に達するのに必要な最大変位を定めればシェルのデザインを決定できる。そして圧縮と展開のサイクル試験におけるエネルギー散逸率は形状にあまり強く依存せずロバストな散逸性能が引き出せる。上記の実験結果はコンピュータグラフィクス計算によるシミュレーションと正確な一致を見せている。実験でその妥当性を検証した上で、実験で変化させることが難しい摩擦係数依存性も明らかにした。コンピュータグラフィクスが材料変形の予測に利用できることを示しており、材料力学の新しい研究の方向性を示したとも言える。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study was to experimentally clarify the mechanical response of an assembly of shell structures, where the microstructure is a precisely designable shell. Among shell structures, an assembly of curved beam structures was considered. Cylindrical shells with uniform spontaneous curvature were created, and the mechanical properties of the aggregates were clarified by observing the large deformation when two cylindrical shells are pressed against each other. It was found that the shells fit into each other and can compress with a low overall load. In other words, shell aggregates are found to be useful as buffer materials based on geometry.

研究分野：ソフトマター，材料力学

キーワード：力学と幾何学 弾性体 ソフトマテリアル ソフトロボティクス

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

くしゃくしゃに丸めた紙のような不均一な弾性体に内在する微細構造とその力学特性を考察することにより、特異な力学応答を示すデザインの最適化を行う。十数枚のプレートで覆われた地球から細胞膜に到るまで、不均一な構造をもつ弾性体は遍く存在するが、それらの構造に普遍的な性質が存在するだろうか？またこれらの一見して乱雑な構造から制御可能なものを抽出し、工業デザインに応用することは可能だろうか？これらの問いの答えに実験と理論の両面から迫る。丸めた紙を変形させ、その際に必要な力と紙の皺のネットワーク構造を測定する実験を行い、不均一な弾性体に内在する普遍的な性質を導き出す。更に皺構造の解析で得られた結果に基づいて、微細な内部構造を持つ弾性体についての有限要素法の数値計算を行う事で、自然にはない人工的な物質の力学的な性質を制御するための一般的な指針を明らかにする。

2. 研究の目的

しなやかな幾何学材料を構成要素とする集合体の力学的機能を明らかにする。具体的には、薄い構造物(幾何学材料)同士がお互いに力を及ぼし合うことにより創発される新奇な力応答を活用した工業デザインを提案する。特に材料のもつ幾何学形状(ガウス曲率)に注目し、その座屈不安定性を介した緩衝材の最適化を行う。さらに幾何学材料の集合体の大変形を再現する高速シミュレーション法を並行して開発し、複雑な内部自由度をもつ集合体の最適化の仕組みを解明する。

3. 研究の方法

単純化のために、鞍型シェル集合体の代わりに、同一幅の曲がった梁の集合体を考える。ヤング率依存性を明らかにするため、曲がった梁を PETG シートの熱変形によって作成する。そして梁集合体に対して材料試験機で圧縮試験を行い、その力学特性を明らかにする。特に梁の厚みと全長の比率、全長と曲率半径の比率によって力学特性がどのように変化するか着目する。並行してコンピュータグラフィクスに基づく数値計算を行い、計算手法を確立する。実験とシミュレーションを組み合わせることで、人工的な構造をもつ構造の力学特性を明らかにする。

4. 研究成果

機械的メタマテリアルと呼ばれる機械的特性を人工的に操作した構造体は、その調整可能な機能性から興味深いものである。光や磁気の相互作用、細長い構造体や中空構造体の構造的不安定性、接触摩擦などを利用するために設計された、さまざまなタイプの機械的メタマテリアルが文献で提案されている。相互作用、細長い構造体や中空構造体の構造的不安定性、接触摩擦などを利用するために設計されたものである。しかし、その設計のほとんどは、プログラム通りに決定論的に動作するように、不完全性なしに理想的に設計されている。プログラム通りに決定論的に動作するように設計されている。ここではランダムに積み重ねられた円筒形シェルの機械的性能を研究する。実験とシミュレーションを組み合わせることで、積み重ねられたシェルが、圧縮時に力学的エネルギーを吸収し、蓄えることができることを実証した。シェルはランダムに配向しているが、システムは、摩擦と形状によって制御される統計的にロバストな機械的性能を示す。我々のこの結果は、柔軟な構成要素を再配置することで、多様で予測可能な機械的応答が得られることを示している。予測可能な機械的応答が得られることを示している [1]。

同一形状の開口円筒殻をランダムに積み重ねて圧縮・減圧する。外部からの荷重がない場合 ($F = 0$)、シェル間には空隙が存在し、摩擦と弾性の両方によって多孔質構造が形成される。圧縮すると、荷重 F はシェルの大きな変形とともに増加し、その後、局所的な断続的なスナップフィットに対応する力の低下が起こる。システムをさらに圧縮すると、圧縮力の増減は試験終了まで続く。

観察された力 F の低下は、一方のシェルが他方のシェルを包み込む、2つのオープンシェルを含む局所的なスナップフィット現象に起源を見出すことができる。この初歩的なプロセスを理解するために、シェル角度 Φ を変化させた2つの同一シェル間の圧縮試験を考える。2つの同じシェルが組み合わせられるとき、摩擦係数 μ とシェル角度 Φ に応じて、それらは滑らかに、あるいは突然にスナップする。前者と後者をそれぞれタイプ I と II スナップフィットと呼び、これは吉田らが剛体円筒にへこませるシェルの場合について提案した分類に従う。

様々な Φ 値 (他のパラメータはすべて固定) で系統的に製作された $N=30$ のシェルのセットを考

え、重力の影響下でコンテナ内にランダムに積み重ねる。全く同じシナリオをシミュレーションで再現し、30 個のリングの位置と向きをランダムに初期化した後、重力をかけて仮想容器に落下させる。リングと容器の間の摩擦係数は、リング-リング摩擦係数と同様に 0.35 に設定されている。しかし、後者の係数（リング-リング）とは異なり、実際には、前者はスタック全体の挙動にほとんど影響を与えないことに注意する。

積み重ねられたタイプ I のシェルを圧縮し始めると、最初の $n=1$ サイクルでは、圧縮荷重は特徴的な減衰挙動を示す。力 F はシェルが曲がるにつれて増加し、システム内でスナップフィット現象が発生すると急激に減少する。圧縮を続けると、系全体がスナップフィットする。重なり合った一対のシェルは、2 倍の厚さ $2h$ のシェルと見なすことができるため、実効的な曲げ剛性が増加し、系全体が硬くなる。その結果、 F は圧縮するにつれて急激に増加する。減圧時には、組み立てられたシェルは 2 つに分離しないことが多いので、 F はスムーズにゼロまで緩和される。このように、圧縮と減圧のプロセスは完全に不可逆的である。2 回目の $n=2$ 以降のサイクルでは、スナップフィットは起こりにくくなる。言い換えれば、スナップ可能なペアのほとんどは、1 回目の圧縮の後にすでにスナップしている。サイクルを $n \gg 1$ まで続けると、力-変位曲線は限界サイクル曲線に収束し、そこではシェルの弾性曲げとシェル間の摩擦すべりが支配的になる。一方、積み重ねたタイプ II シェルを圧縮すると、力-変位曲線はタイプ I シェルとは質的に異なる。興味深いことに、圧縮力がタイプ II のしきい値よりも大きいにもかかわらず、この問題セットではタイプ II のスナップフィットは観察されない。2 つの殻のスナップフィットで観察されるように、タイプ II 殻は圧縮されるとくっつき、転がり、そして展開し、その大きな変形に多くの空間を必要とする。しかし、周囲の殻が殻を開くのを妨げる。言い換えれば、圧縮は弾性的な曲げと滑りのみを引き起こす。その結果、限界力-変位サイクル曲線は基本的に即座に到達する。積み重ねられたシェルの機械的性能におけるこの質的な違いは、それぞれのシェルの弾性と形状だけでなく、接触力学とシェルの再配列に由来する。

これまでの文献で研究されてきた機械的メタマテリアルは、圧縮時に人工的な機械的性能を示すが、これは主にプログラムされた素構造に依存している。欠陥や不完全性は、そのような機械的性能において重要である。我々の場合、シェルの初期ランダム配向がこのような構造欠陥の役割を果たし、圧縮時のシステムの正確な進化は初期条件に依存するが、全体的な機械的性能は非常に頑強であることが判明している。したがって、細長い構造体の大きな変形は、それらがランダムに積み重なった場合でも利用することができる。我々の研究は、細長い構造体が大きく変形し、互いの位置を移動させるという新しい設計原理への道を開くものである。同様の設計アイデアは、食品包装からボウル型分子の変形まで、さまざまな長さスケールの工学的問題に応用できると期待している。

[1] T. G. Sano*, E. Hohnadel*, T. Kawata, T. Metivet and F. Bertails-Descoubes "Randomly stacked open cylindrical shells as functional mechanical energy absorber" *Commun Mater* 4, 59 (2023). (*Contributed equally)

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 3件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Sano Tomohiko G., Johanns Paul, Grandgeorge Paul, Baek Changyeob, Reis Pedro M.	4. 巻 55
2. 論文標題 Exploring the inner workings of the clove hitch knot	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Extreme Mechanics Letters	6. 最初と最後の頁 101788 ~ 101788
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.eml.2022.101788	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 該当する
1. 著者名 Grandgeorge Paul, Sano Tomohiko G., Reis Pedro M.	4. 巻 164
2. 論文標題 An elastic rod in frictional contact with a rigid cylinder	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Mechanics and Physics of Solids	6. 最初と最後の頁 104885 ~ 104885
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jmps.2022.104885	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 該当する
1. 著者名 Sano Tomohiko G., Pezzulla Matteo, Reis Pedro M.	4. 巻 160
2. 論文標題 A Kirchhoff-like theory for hard magnetic rods under geometrically nonlinear deformation in three dimensions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Mechanics and Physics of Solids	6. 最初と最後の頁 104739 ~ 104739
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jmps.2021.104739	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 該当する
1. 著者名 Sano Tomohiko G	4. 巻 55
2. 論文標題 Reduced theory for hard magnetic rods with dipole-dipole interactions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical	6. 最初と最後の頁 104002 ~ 104002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1751-8121/ac4de2	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 Tomohiko G. Sano and Hirofumi Wada	4. 巻 122
2. 論文標題 Twist-Induced Snapping in a Bent Elastic Rod and Ribbon	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 114301(1)-(5)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.122.114301	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 Daichi Matsumoto, Tomohiko G. Sano and Hirofumi Wada	4. 巻 123
2. 論文標題 Pinching an open cylindrical shell: Extended deformation and its persistence	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Europhysics Letters	6. 最初と最後の頁 14001-(p1)-(p7)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1209/0295-5075/123/14001	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 -

[学会発表] 計7件(うち招待講演 2件/うち国際学会 5件)

1. 発表者名 佐野友彦
2. 発表標題 構造物のしなやかにに関する理論的および実験的研究-摩擦、座屈、飛び移り座屈-
3. 学会等名 日本物理学会年次大会(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomohiko Sano and Hirofumi Wada
2. 発表標題 Twist-induced snapping in a bent elastic ribbon
3. 学会等名 APS March meeting(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomohiko Sano
2. 発表標題 Twist-induced snapping in a bent elastic ribbon
3. 学会等名 Advances in Physics of Emergent orders in Fluctuations (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐野友彦
2. 発表標題 板の接触と滑りのメカニズムと関連する話題
3. 学会等名 計算粉体力学研究会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tomohiko G Sano
2. 発表標題 Twist-induced snapping in a bent elastic ribbon
3. 学会等名 Yukawa Institute of Theoretical Physics, Research Seminar (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tomohiko Sano and Hirofumi Wada
2. 発表標題 Slip morphology of strips: Inspiration from plant-soil mechanical interactions
3. 学会等名 Plant Biomechanics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tomohiko G Sano
2. 発表標題 Twist-induced snap-buckling in a bent elastic ribbon
3. 学会等名 Instabilities in Solid Mechanics, GDR MePhy (国際学会)
4. 発表年 2018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
---------	---------