



2023年8月28日

報道関係者各位

慶應義塾大学

ランダムに積み上げた円筒シェルのしなやかな力学応答 -コンピューターグラフィックスとモデル実験による材料デザイン-

微細なパーツを規則的に組み上げ、自然にはない力学特性を実現する人工材料は通称、メカニカルメタマテリアルと呼ばれ、その調整可能な機能性は近年注目を集めています。これまでにさまざまなタイプが提案されてきましたが、その多くは精緻なプログラムで予測通り動作するように設計され、構成要素のランダム性や不完全さが機械的性能に与える影響はあまり明らかにされてきませんでした。

慶應義塾大学理工学部機械工学科の佐野友彦専任講師、川田智之（2022年3月卒業）とフランス国立情報学自動制御研究所の研究グループは、ランダムに積み重ねられた円筒シェルの機械的性能に焦点を当て、これらのシェルが圧縮される際に機械エネルギーを吸収・蓄積できることを、物理実験とコンピューターグラフィックスに基づくシミュレーションを組み合わせ、明らかにしました。これはシェルの大きな変形と再配置、スナップフィット^{*1}、摩擦をうまく活用することで実現されています。ランダムにシェルが配置されているにもかかわらず、このシステムは摩擦と形状によって統計的に堅牢な機械的性能を示すことがわかりました。この結果は、しなやかな構成要素の再配置によって、多様で予測可能な機械的な応答がもたらされる可能性を示しています。

本研究成果は2023年8月25日（ロンドン時間）、国際誌『*Communications Materials*』に掲載されました。

1. 本研究のポイント

- ランダムに積み重ねられた円筒シェルは無秩序なメカニカルメタマテリアルとして振る舞う。
- 圧縮時にシェルの大きな変形と再配置、スナップフィット、摩擦をうまく活用することでエネルギーを吸収・蓄積できる。
- シェルがランダムに配置されているにもかかわらず、このシステムは摩擦と形状によって統計的に堅牢な機械的性能を示すことがわかった。
- 以上の性質を実験とコンピューターグラフィックスに基づいたシミュレーションを併用して明らかにした。

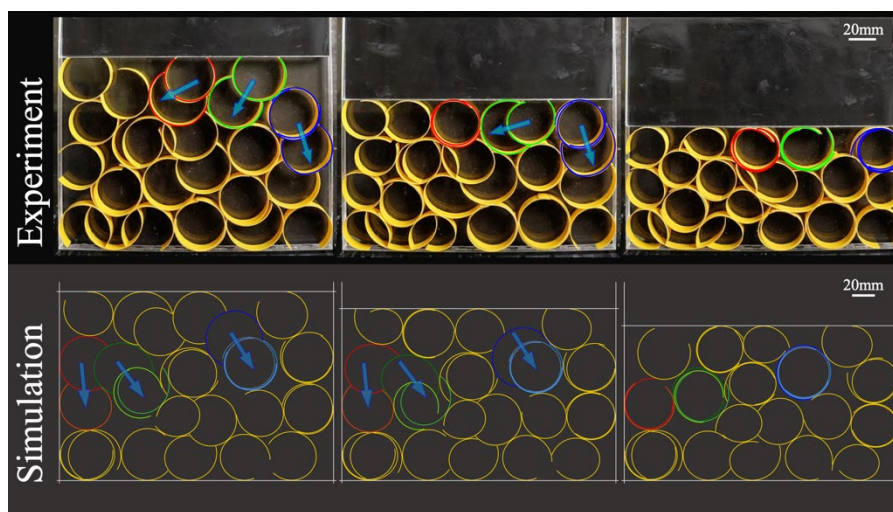
2. 研究背景

柱や梁、アーチといった細長い構造物の大変形を予測することは、材料科学の中心的な課題の一つです。変形予測に基づいて設計された、エネルギー吸収や力の制御を目的とした細長い構造物は自然災害に強く、人や物体を衝撃や振動から守ることができます。細長い構造物は圧縮されると、曲がりねじれることでエネルギーを吸収でき、このような不安性を介した大変形は、機械的なエネルギー変換器と見なすことができます。最近では技術進化により、調整可能な機械的性能を持つ材料や構造が研究されており、こういった人工的な力学特性を示す材料はメカニカルメタマテリアルと呼ばれます。通常、メカニカルメタマテリアルは構成要素や組み合わせの精密なデ

ザインが必要とされているため、構成要素のランダム性や不完全さが機械的性能に与える影響はあまり明らかにされてきませんでした。

3. 研究内容・成果

本研究では、同じ形の円筒シェルをランダムに積み重ね、圧縮と除荷試験を行いました(図)。外部の荷重がない状態でも、シェル間に空間が存在し、摩擦と材料の弾性に起因する多孔質な構造を作り出すことがわかりました。圧縮すると、シェルが大きく曲がり、荷重が増加します。圧縮を続けると、シェル同士がはまりあうスナップフィットと呼ばれる現象が局所的に立て続けに起こります。スナップフィットを伴った荷重の低下が繰り返されつつも、全体としては圧縮力が増加していく振る舞いが観測されました。



また多数積み重ねたシェルの振る舞いの素過程を理解するために、同じ形の円筒シェル二つを圧縮し、シェルの角度と摩擦係数によって発生するスナップフィット現象を調査しました。スナップフィットにはタイプ I とタイプ II の二つのモードがあり、それぞれ円滑にスナップするか、反り変えりながら急にスナップするかが異なります。シェルの角度と摩擦係数によって、タイプ I とタイプ II の遷移が起こることを発見しました。この研究は、シェル間の摩擦だけでなく、シェルの幾何学的な非線形性が積み重ねられたシェルの機械的性能に重要な役割を果たすことを示唆しています。

多数のシェルに対して力学試験を繰り返すと、タイプ I のモードの場合は初回の圧縮でスナップフィットが多く発生するため、低荷重のまま構造を大きく圧縮することができます。2 回目以降の圧縮ではスナップフィットが少なくなります。これは、初回の圧縮で多くのスナップフィットが起こり、2 回目以降はスナップフィットがほとんど残っていないためです。一方、タイプ II のモードの場合、スナップフィットはほとんど起こらず、弾性変形と摩擦によるシェル同士の滑りが支配的となります。その結果、圧縮の作動距離範囲が短くなることがわかりました。どちらのモードでも共通する特徴的なエネルギー吸収率が見られます。

4. 今後の展開

これまでの研究では、メカニカルメタマテリアルは主にプログラムされた要素構造によって人工的な機械的性能を示し、欠陥や不完全性がその性能に重要な役割を果たすことが示されています。本研究グループの研究では、ランダムに積み重ねられたシェルがしなやかな変形を示すことを明らかにしました。これにより、しなやかな構造の再配置がメカニカルメタマテリアルの設計原理の一

つとなりうる可能性を示しています。このアイデアは、食品包装からボウル状の分子の変形まで、さまざまな長さスケールの工業問題に適用できると期待しています。

<原論文情報>

論文タイトル: Randomly stacked open cylindrical shells as functional mechanical energy absorber

著者: Tomohiko G. Sano*¹, Emile Honadel*², Toshiyuki Kawata*¹, Thibaut Métivet*², Florence Bertails-Descoubes*²

*1 慶應義塾大学 *2 フランス国立情報学自動制御研究所

雑誌名: *Communications Materials*

doi: 10.1038/s43246-023-00383-2

<研究費>

本研究は、科研費若手研究「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」(18K13519)及び創発的研究支援事業「高速計算と精密実験がひもとく幾何学材料の相転移機構の解明」(JPMJFR212W)の支援を受けて実施されました。

<用語説明>

※1 スナップフィット: 接着剤などを用いず材料の弾性を用いてはめこむ機械的な接合方法の一種。相互の凹部と凸部を引っ掛けることで固定する。プラモデルなどに見られる。

※ご取材の際には、事前に下記までご一報くださいますようお願い申し上げます。

※本リリースは文部科学記者会、科学記者会、各社科学部等に送信させていただいております。

・ 研究内容についてのお問い合わせ先

慶應義塾大学 理工学部 機械工学科 専任講師 佐野 友彦 (さの ともひこ)

TEL : 045-566-1432 E-mail : sano@mech.keio.ac.jp

・ 本リリースの配信元

慶應義塾広報室 (望月)

TEL : 03-5427-1541 FAX : 03-5441-7640

E-mail : m-pr@adst.keio.ac.jp <https://www.keio.ac.jp/>