

令和 6 年 6 月 27 日現在

機関番号：32641

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14048

研究課題名（和文）水中圧力波動のエネルギー吸収を目的とした機能性ラティス構造の創製

研究課題名（英文）Creation of Functional Lattice Structure for Energy Absorption of Underwater Pressure Waves

研究代表者

小島 朋久 (Kojima, Tomohisa)

中央大学・理工学部・助教

研究者番号：70802734

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：プラントでの配管内爆発事故の被害低減のためには、発生する圧力波動のエネルギー吸収機構が重要である。本研究では3次元格子から成るラティス構造の変形によるエネルギー吸収と、音響メタマテリアルの原理によるエネルギー減衰/散逸の2つの機構を併せ持つ『機能性ラティス構造』の設計学理を構築することを試みた。数値解析と実験により複数のラティス構造の変形および波動伝播特性、エネルギー吸収性能を明らかにした。次に特定の周波数帯の弾性波の伝播を阻止するフォノンニックバンドギャップを有するラティス構造を設計した。ユニットの組み合わせと配置方法により、衝撃負荷入力的主要な周波数帯の振幅を減衰させられる可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

材料力学的観点からのラティス構造に関する既往の研究のほとんどは、ハニカム材に代表されるオープンセル構造体の研究の発展とも捉えることができる。本研究では音響メタマテリアルの設計原理をラティス構造に適用することで、既存のオープンセル構造体の特性を越えた波動エネルギー吸収/減衰機能を発現する材料を創製できる可能性を示した。本研究成果はラティス構造を含むメカニカルメタマテリアルの既往の研究に新たな展開局面を生み出す可能性を開くものであり、プラントにおける爆発事故や津波などの被害低減にも適用可能な、軽量かつ優れた衝撃吸収性能を有する新規材料を創製する可能性を開くものである。

研究成果の概要（英文）：To mitigate the damage caused by in-pipe explosions in industrial plants, it is crucial to incorporate an energy-absorbing mechanism to counteract pressure waves. This study aimed to develop a design theory for a "functional lattice structure" that combines two mechanisms: energy absorption by deformation of a three-dimensional lattice structure and energy attenuation/dissipation based on the principles of acoustic metamaterials. Numerical analysis and experiments were conducted to investigate the deformation and wave propagation characteristics of various lattice structures, focusing on their energy absorption performance. Then, phononic bandgap lattice structures were designed to suppress the propagation of elastic waves within a specific frequency range. It was suggested that combining and arranging the units to form a bandgap structure could attenuate the amplitude of the impact pressure load in its main frequency range.

研究分野：機械材料・材料力学

キーワード：メカニカルメタマテリアル 衝撃吸収 応力波 ラティス構造 圧力波

### 1. 研究開始当初の背景

プラントで配管内爆発事故が発生した最悪の事態における被害を低減するためには、発生する圧力波動のエネルギー吸収機構が極めて重要である。本研究では水中圧力波のエネルギー吸収を目的とした、新しいメカニカルメタマテリアルを提案することを試みる。メカニカルメタマテリアルは幾何構造の集合体であり、素材に幾何構造を付与することで自然界の材料に無い機械的な特性を持たせたものである。関連して、特に材料および構造力学、航空宇宙分野においてはラティス構造を利用した軽量・高剛性な部材の創製と力学的特性評価、また衝撃吸収材料への応用に関する研究が現在までに数多く行われている。

材料力学の分野で行われているラティス構造に関する研究のほとんどが対象としているのは同形状の幾何構造が均一に配置された構造の変形に起因して発現する特性であり、ハニカム材に代表されるセル構造体の研究の発展とも捉えることができる。一方、物理学分野においては音響メタマテリアルに関する研究が盛んに行われている。音響メタマテリアルとは入射波の波長よりも小さい幾何構造の集合体であり、構造の振動や波の干渉を利用した圧力波の調質・減衰機構が提案されている。このような音響メタマテリアルの設計原理をラティス構造に適用することで、既存のオープンセル構造体の特性を越えた波動エネルギー吸収/減衰機能を発現する革新的な『機能性ラティス構造』を創製できる可能性があると考えた。

### 2. 研究の目的

本研究の目的はラティス構造の変形によるエネルギー吸収と音響メタマテリアルの原理を適用したエネルギー減衰/散逸の 2 つの機構を併せ持つ『機能性ラティス構造』の設計学理を構築することである。音響メタマテリアル持つ構造の振動や波の干渉を利用した圧力波の調質・減衰機構の設計原理を抽出し、ラティス構造に適用することで、既存のオープンセル構造体の特性を越えた波動エネルギー吸収/減衰機能を発現する材料を創製することを目指した。

### 3. 研究の方法

数学的組合せやトポロジー最適化手法を用いて直交三軸方向に対称性を持つ多数のラティス構造を導出し、数値解析と実験により、単軸圧縮変形する際の変形とエネルギー吸収特性を調査した。実験する際にラティス構造は光造形方式の 3D プリンタを用いて、高分子材料にて作製した。関連して、3D プリンタにて積層造形した高分子材料に対して万能試験機とスプリット・ホプキンソン圧力棒法を用いて異なるひずみ速度下での引張試験を行った。積層方向とひずみ速度に依存した機械的特性を評価し、その結果を基に数値解析に材料モデルとして実装した。

また、ラティス構造に水中圧力波による衝撃負荷が加わった際の波動伝播応答を調査するための実験装置を設計・作製した(図 1)。この装置は管内に封入した水へ衝撃負荷を加えることにより水中爆発を模した圧力波を生成して、1 次元的に測定対象へ伝播させることができる。これを用いて、典型的なラティス構造の 1 つである体心立方格子型(BCC)構造に水中圧力波による衝撃負荷が加わった際の波動伝播応答を調査した。併せて数値解析により BCC 構造内部における応力波の伝播特性を調査した。

次に、特定の周波数帯の弾性波の透過を阻止するフォノンニックバンドギャップを有する音響メタマテリアルの設計パラメータをラティス構造のパラメータにて置き換え、単純立方格子型(SC)構造、BCC 構造、立方体を組み合わせることにより、ラティス構造を基にしたメカニカルメタマテリアルを設計した(図 2)。理論解析により第 1 バンドギャップの範囲を予測するとともに、数値解析により分散関係や応力波の伝播特性を調査した。

### 4. 研究成果

#### 4. 1 基本的なラティス構造の変形特性および波動伝播応答

数学的組合せにより導出した基本構造の比塑性崩壊応力および比剛性を図 3 に示す。ユニットセルにおける骨格の方向によって変形時の骨格の主な変形形態が異なり、基本構造は 3 種類

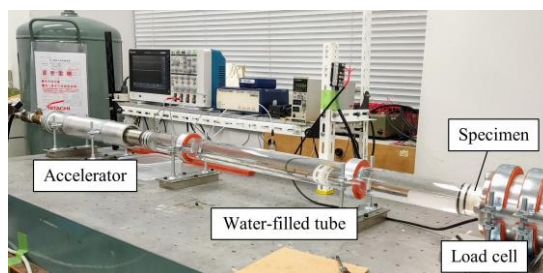


Fig. 1 Experimental apparatus of underwater pressure wave creation and transmission

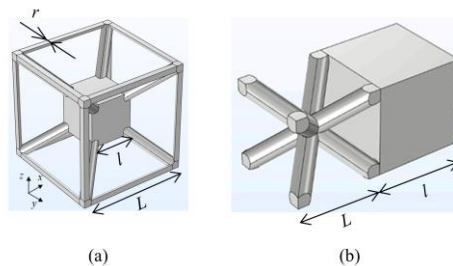


Fig. 2 Unit cell examples; (a) nesting, (b) unidirectional

の応力-ひずみ関係を示した。伸縮変形が骨格の支配的な変形形態である構造は剛性および塑性崩壊応力が比較的大きいものの、塑性崩壊時に骨格が座屈することにより応力が減少し、エネルギー吸収効率は悪いことが示された。一方、曲げ変形が骨格の支配的な変形形態である構造は塑性崩壊後に応力-ひずみ曲線にプラトー領域が現れ、安定した変形を示した。またひずみ速度に依存した圧縮特性の変化量は、比エネルギー吸収量も含めて骨格の変形形態に依存して異なる値になることを明らかにした。以上のように変形特性を把握するとともに、エネルギー吸収量が大きくなる構造の特徴を把握した。

次に、作製した水中圧力波伝播実験装置により BCC 構造に負荷した入射圧力波形と、BCC 構造後方に設置したロードセルによる測定荷重履歴を比較したところ、BCC 構造を介して後方に伝わった荷重履歴は高周波数成分が除去され平滑化されていた。数値解析により、ラティス構造内部の応力波が骨格の交点で反射・干渉を繰り返しながら伝播することにより、透過波の振幅が変化することを確認した。

また、ラティス構造の実験に関連して派生した研究成果として、構成材料となる高分子材料を製造する際の 3D プリントによる造形方式、積層方向、光硬化前後の吸湿の機械的特性への影響を明らかにするとともに、ひずみ速度に依存した機械的特性を得た。

#### 4. 2 フォノンニックバンドギャップを有するラティス構造の分散特性および波動伝播応答

図 2(a)に示すユニットを 3 軸方向に周期的に配置した構造について、 $L = 5 \text{ mm}$  のときに微小共振器の役割を持つ立方体の 1 辺の長さが  $l = 1, 2, 3 \text{ mm}$  のときの分散関係を図 4 に示す。 $l$  が大きくなるにつれてバンドギャップの数が増え、より広い周波数域においてバンドギャップが現れると共に、第 1 バンドギャップの周波数帯が低くなる結果となった。このように、外枠と共振部の質量差が大きければ大きいほど低周波かつ広帯域におけるバンドギャップが発現することが確認できた。設計のために構築した理論と数値解析結果を比較すると、構造の寸法の変化による第 1 バンドギャップの周波数帯の定量的な予測精度に関しては理論の改善が必要であることが示唆されたものの、周波数帯のオーダーおよび変化傾向は数値解析結果と同様であった。ただし、図 2(a)のような多層的な構造では衝撃負荷の主要な周波数域に相当する 1 kHz 以下の周波数帯のバンドギャップを発現させることができなかった。

図 5 に、図 2(b)に示すユニットを 1 方向に連続して配置した 1 方向周期構造による、 $L = 5 \text{ mm}$  のときの第 1 バンドギャップの周波数帯の理論予測値を示す。図 2(a)の構造よりも 1 オーダー低い、10 kHz より小さい周波数帯にバンドギャップが現れることが示されていることがわかる。この構造に、4. 1 の数値解析でも使用した、水中圧力波による負荷を再現した入力を与えたときの入射および透過応力波の周波数成分を図 6 に示す。透過振幅において 4 kHz 以下の低い周波数帯の振幅が全体的に減衰していることが確認でき、また、透過振幅にバンドギャップによる効果だと考えられる極小値が確認され、

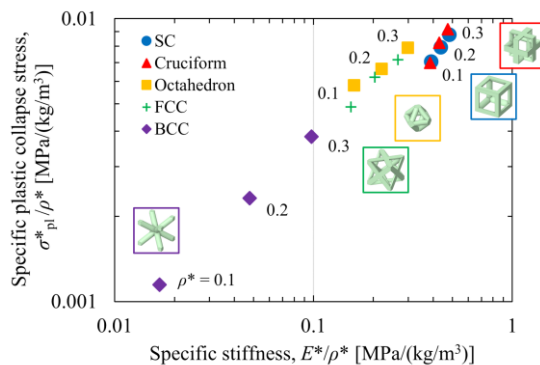


Fig. 3 Specific plastic collapse stress over specific stiffness of the basic lattice structures (Kojima et al, 2023)

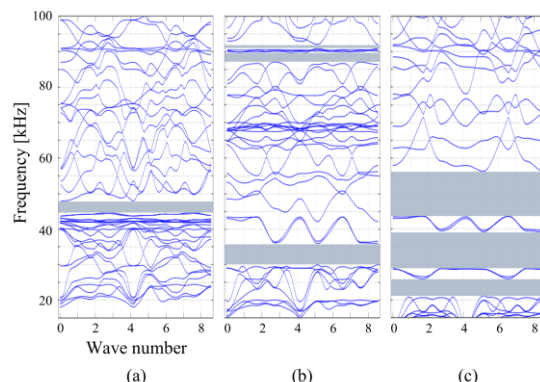


Fig. 4 Dispersion relations of the nesting structures;  $l =$  (a) 1 mm, (b) 2 mm, (c) 3 mm

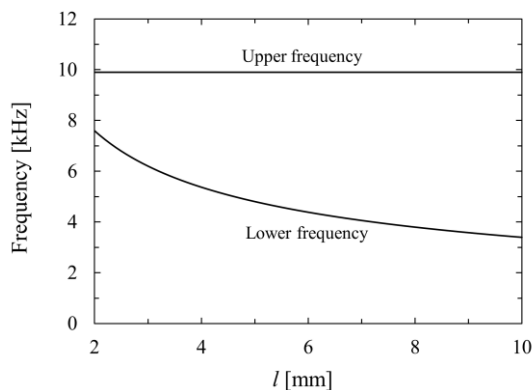


Fig. 5 Predicted first band gap frequencies with the unidirectional periodic structure

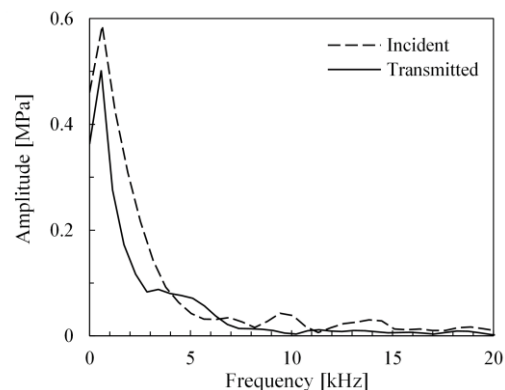


Fig. 6 Fourier spectrum of the incident and transmitted waves with the unidirectional periodic structure

を大きくすることで極小値を示す周波数が低くなることが確認できた。以上のように、ユニットの組み合わせと配置方法、寸法を調整することによって、より減衰性能を向上させられる可能性が示された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 小島 朋久、高瀬 雄太、辻 知章	4. 巻 89
2. 論文標題 直交3軸方向に対称なラティス構造の基本構造の導出と圧縮特性解析	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 23-00213
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/transjsme.23-00213	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 小島 朋久、川野 貴弘、辻 知章	4. 巻 23
2. 論文標題 異なるユニットセル形状を持つ高分子ラティス構造の低ひずみ速度域における圧縮特性	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 実験力学	6. 最初と最後の頁 138 ~ 144
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11395/jjsem.23.138	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 Tomohisa Kojima, Yuta Takase, Tomoaki Tsuji	4. 巻 66
2. 論文標題 Compressive behaviour and energy absorption capacity of a lattice structure generated by topology optimisation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Materials and Product Technology	6. 最初と最後の頁 252-265
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1504/IJMPT.2022.10050727	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12件（うち招待講演 3件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Tomohisa Kojima, Ryoya Kuriyama, Takahiro Kawano, Hiroyuki Yamada, Kohei Tateyama, Tomoaki Tsuji
2. 発表標題 Mechanical Characterization of Polymeric Lattice Structure Subject to Dynamic Loading
3. 学会等名 11th International Symposium on Impact Engineering（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 安江光太, 辻知章, 小島朋久
2. 発表標題 陽解法を用いたマイクロラティス構造の動的圧縮解析
3. 学会等名 日本材料学会関東支部2023学生研究交流会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 栗山諒也, 川野貴弘, 立山耕平, 山田浩之, 辻知章, 小島朋久
2. 発表標題 光造形方式により積層造形した高分子造形体のひずみ速度に依存した機械的特性
3. 学会等名 第9回材料WEEK 材料シンポジウム 若手学生研究発表会(学生・企業研究交流会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小島朋久, 高瀬雄太, 辻知章
2. 発表標題 直交3軸方向に対称性を持つマイクロラティス構造の有限要素解析による圧縮特性評価
3. 学会等名 日本機械学会 M&M2023材料力学カンファレンス
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小島朋久, 栗山諒也, 川野貴弘, 山田浩之, 立山耕平, 辻知章
2. 発表標題 積層造形された高分子ラティス構造のひずみ速度に依存した圧縮特性評価
3. 学会等名 日本機械学会 M&M・CMD若手シンポジウム2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小島朋久
2. 発表標題 衝撃工学分野における研究を始めて(流体構造連成からメタマテリアルまで)
3. 学会等名 日本材料学会 衝撃部門委員会 第168回衝撃部門委員会・講演会(招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小島朋久
2. 発表標題 固液連成界面における波動伝播現象の解明とラティスマタマテリアルによる水中圧力波減衰の試み
3. 学会等名 日本機械学会 材料力学部門 材料力学における異分野融合に関する研究会 第13回研究会(招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ryoya Kuriyama, Takahiro Kawano, Tomohisa Kojima, Hiroyuki Yamada, Kohei Tateyama, Tomoaki Tsuji
2. 発表標題 Dynamic Compressive Behavior of Polymeric Micro lattice Structure Fabricated by Optical 3D Printer
3. 学会等名 JSME International Conference on Materials and Processing 2022(国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 崎山悠悟, 小島朋久, 辻知章
2. 発表標題 動的負荷を受けるマイクロラティス構造における応力波伝播の有限要素解析
3. 学会等名 日本機械学会 第35回計算力学講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 崎山悠悟, 高瀬雄太, 小島朋久, 辻知章
2. 発表標題 マイクロラティス構造の音響特性評価
3. 学会等名 日本材料学会関東支部 学生研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuta Takase, Takahiro Kawano, Tomohisa Kojima, Tomoaki Tsuji
2. 発表標題 Finite Element Analysis on Plastic Collapse Behavior of Topology-Optimized Cellular Structure Subject to Compressive Loading
3. 学会等名 ASME 2021 International Mechanical Engineering Congress and Exposition (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高瀬 雄太, 川野 貴弘, 小島 朋久, 辻 知章
2. 発表標題 トポロジー最適化により設計したセル構造体の圧縮および塑性崩壊挙動の有限要素解析
3. 学会等名 日本機械学会 第34回計算力学講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

講演『3Dプリンタとメカニカル・メタマテリアルが拓く材料の新たな可能性』, 公益財団法人りそな中小企業振興財団 第6回技術懇親会 <a href="https://www.resona-fdn.or.jp/event/index/170#item_id2581">https://www.resona-fdn.or.jp/event/index/170#item_id2581</a>
---



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