

令和 3 年 6 月 28 日現在

機関番号：32682

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K18166

研究課題名(和文)折紙構造を利用した防振機構の形状最適化と性能評価に関する研究

研究課題名(英文) Shape Optimization and Performance Evaluation of Vibration-proof Mechanism Using Origami-inspired Structures

研究代表者

石田 祥子 (Ishida, Sachiko)

明治大学・理工学部・専任准教授

研究者番号：40636502

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：折紙を基に生まれた展開収縮可能な構造(折紙構造)の注目点はその形状変化だけではない。本研究では、双安定な力学的挙動を持つ折紙構造に着目し、本構造に防振機構としての価値を創出できることを示した。具体的には、金属トラスとコイルばねを用いて折紙構造を製作し加振実験を行い、1)防振可能な周波数域は本モデルの振動振幅に依存するがおおむね良好な防振性能を有すること、2)コイルばねを組み合わせる位置を調整すると防振可能な初期荷重を拡張できることを明らかにした。また、3)折紙構造と内部の空気圧によって荷重を支持する新たな防振機構においても、実験モデルと同様の防振性能を得られることを数値解析により明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、折紙構造が持つ力学的・機械的特性を解明すると、折紙構造に形状変化以外の新たな機能が創出され、工学的な付加価値が生まれることを示した。コンパクト性、展開性、携帯性が求められる折りたたみ製品等に折紙構造を用いることはイメージしやすいが、形状変化ではなく力学的変化ととらえることによって、ロボットやアクチュエータ、建築等、折紙構造の適用範囲はさらに広がると期待できる。

研究成果の概要(英文)：As for deployable structures based on science of origami (so-called origami structures), ones often focus on their drastic change of forms, but striking aspects of the origami structures should not be limited to the change in appearance. In this study, we focused on a bi-stable mechanical behavior of an origami structure with torsional buckling pattern, and created a new value to the origami structure as a vibration isolator. In details, we performed excitation tests on the bi-stable origami structures consisting of metallic trusses and coil springs. New findings by the experiments are 1) an effective frequency range in vibration isolation depended on vibration amplitude applied to the isolator, but the isolator worked adequately; and 2) adjustment of the position of a central coil spring improved a payload range of the isolator. Moreover, we numerically revealed 3) a new isolating system consisting of the origami structure with air spring also showed reasonable vibration performance.

研究分野：折紙工学、設計工学

キーワード：防振・免振 非線形振動 形状モデリング 展開構造 振動解析・試験 折紙

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

折紙は本来、日本の伝統的な芸術であり文化であるが、近年では折りたたむことにより平面構造から立体構造を創出でき、また平面構造と立体構造を自在に行き来できるという折紙の幾何学的特性が注目されている。しかし、折紙構造の注目されるべき点は形状変化だけではない。同じ立体形状を折りたたむにしても、どのような折りパターンで折りたたむかによって、その伸縮挙動は大きく異なる。折りパターンの違いで折紙構造の特性がどのように変化するかを明らかにすることは、折紙構造に形状変化以外の新たな機能を創出し、工学的な付加価値を生む。

研究代表者は、折紙構造の力学的挙動に目を向け、振動制御の分野において、双安定な伸縮挙動を持つ折紙構造を防振機構として利用できる可能性を見出した。これまでに、金属トラスとコイルばねを用いた折紙構造において、線形ばねのような共振ピークは現れず、高周波域で振動が大幅に低減されることを数値解析および加振実験により示した。しかし、防振可能な周波数帯および初期荷重に限られるといった課題が挙げられた。

### 2. 研究の目的

本研究では、折紙構造の双安定な伸縮挙動に着目した防振器において、以下の3点を明らかにすることを目的とする。

- (1) 防振器形状と防振可能な周波数域の関係の実験的解明
- (2) 防振可能な領域を拡張するための設計と防振性能の実験的評価
- (3) 本防振器を簡略化した防振器の設計と防振性能の数値解析による評価

### 3. 研究の方法

#### (1) 防振器形状と防振可能な周波数域の関係の実験的解明

本防振器は、剛性が零となるよう設計しているため理論上共振は生じないはずであるが、実際に製作し試験を行うと剛性は厳密には零にならず、共振が生じている可能性がある。設計変数の異なる防振器を作成し、試験条件(振動振幅や負荷荷重)を変えて加振実験を行うことで、どの因子が共振に寄与しているか明らかにする。

#### (2) 防振可能な領域を拡張するための設計と防振性能の実験的評価

本防振器は、剛性が零となる領域においてのみ防振可能となることから、防振器の仕様によって支持できる荷重(初期荷重)が限られてしまう。初期荷重に合わせて防振器を交換することは実用的ではないため、中央に配置したコイルばねの位置を調整することによって、部品の交換を行わずにある程度の荷重域に対応できる防振器へと改良する。改良した防振器が所望のばね特性および防振性能を有するか加振実験によって明らかにする。

#### (3) 本防振器を簡略化した防振器の設計と防振性能の数値解析による評価

本防振器は重荷重を支持できるよう汎用的な金属材料および機械要素によって構成された。しかし一方で、折紙構造を機械要素に置き換えたことにより、部品点数は増し、より複雑な構造となった。ここで元来の折紙構造に立ち戻り、折紙構造と内部の空気ばねからなる防振器としてとらえると、構造を簡略化でき軽量で、空気ばねにより重荷重を支持できる防振器となる。簡略化した新防振器を数値モデル化し、所望のばね特性および防振性能を有するか数値解析によって明らかにする。

### 4. 研究成果

#### (1) 防振器形状と防振可能な周波数域の関係の理論的解明

ばねの組み合わせで構成される本防振器(図1)のばね特性は展開時と収縮時で異なる履歴現象(ヒステリシス)が見られた(図2)。設計上、展開時もしくは収縮時のどちらかのばね特性から剛性を算出しているため、ヒステリシスが見られると振動時のばね剛性は理論上算出した値と異なるため、わずかな共振を生んでいることが明らかとなった。あらかじめヒステリシスの小さいばねを選定し、ヒステリシスの影響が小さい変位領域で防振を行うことができるよう設計変更を行った。

#### (2) 防振可能な領域を拡張するための設計と防振性能の実験的評価

双安定なばね特性を持つ折紙構造に線形のばね特性を持つコイルばねを付加する際、折紙構造の初期長に合わせてコイルばねを付加すると大きな荷重を負荷できる。一方、折紙構造を伸縮させた位置に合わせて同じばね定数のコイルばねを付加すると、小さな荷重を負荷できる。中央に配置したコイルばねの位置を調整することによって同一の防振器において負荷する荷重を3~6 kgに変化させ加振実験を行った結果を図3に示す。ヒステリシスの影響から応答倍率が1以上となる領域がわずかに存在するが、おおむね良好に防振できた。

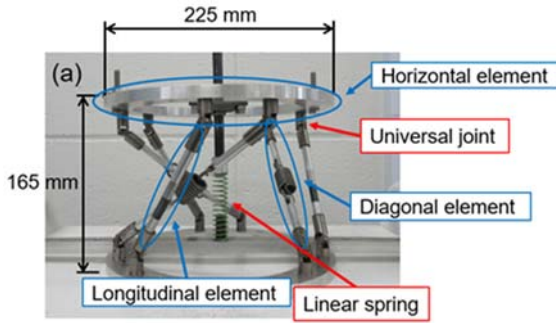


図 1 折紙構造を基にした防振器([1]より抜粋)

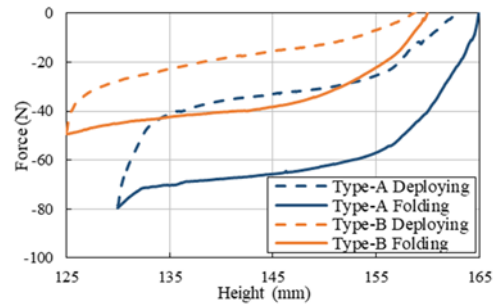


図 2 防振器(Type-A および B)のばね特性([1]より抜粋)

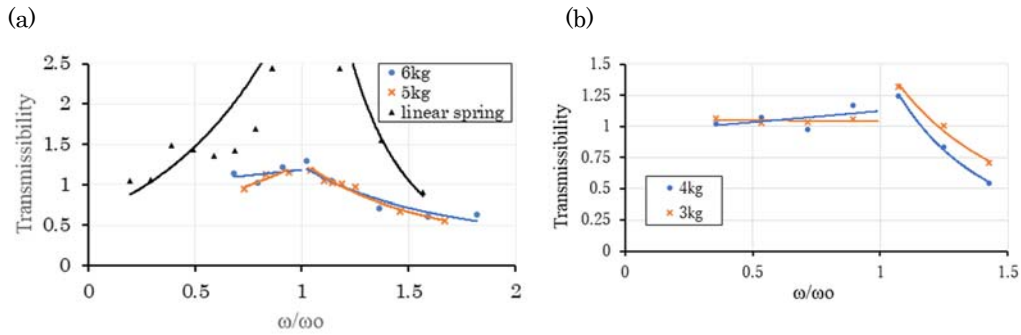


図 3 防振器の応答倍率( $\alpha = 40^\circ$ ,  $|A| = 5 \text{ mm}$ ): (a) gap = 0 mm; (b) gap = 15 mm ([2]より抜粋)

(3) 本防振器を簡略化した防振器の設計と防振性能の数値解析による評価

折紙構造の内部に空気を密閉した防振器(図 4)において過渡応答解析を行った。結果、空気を用いた場合においてもばね剛性が零となる領域を作り出すことができ、振動の振幅が小さい範囲においてはほぼすべての周波数域において応答倍率は 1.0 を下回り、防振できることが確認できた。しかし、振幅が大きくなるとばね定数が零となる領域を超えてしまい、その領域のばね定数に相当する共振周波数において共振が発生した。本解析モデルに見られる振幅依存性は、非線形のばね特性を持つことに由来する。変位が大きくなり、ばね定数が零となる領域を超えて振動すると、その振動域でのばね定数に相当する共振周波数において共振が生じる。この傾向は、非線形振動を表す Duffing 方程式から得られる共振周波数の理論式からも説明づけられる。

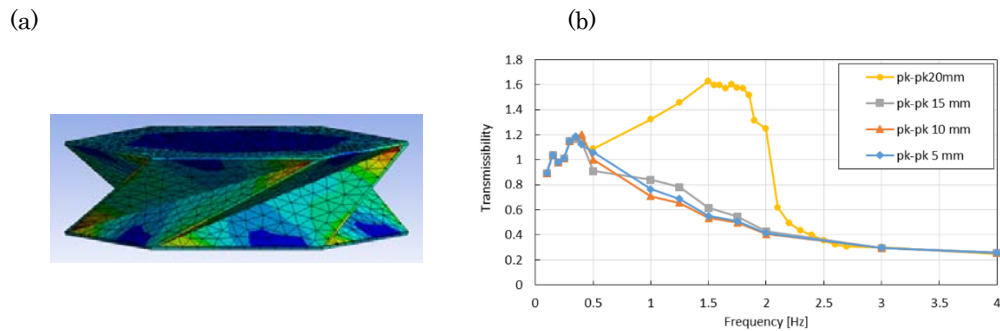


図 4 折紙構造と空気ばねからなる防振器; (a) 数値モデル; (b) 応答倍率 ([3]より抜粋)

<引用文献>

- [1] Kazuya Inamoto, Sachiko Ishida, Improved Feasible Load Range and Its Effect on the Frequency Response of Origami-Inspired Vibration Isolators with Quasi-Zero-Stiffness Characteristics, ASME Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 141, No. 2 (2019), Paper No. 021004
- [2] Kouya Yamaguchi, Sachiko Ishida, Design and Amplitude Dependence of Resonance Frequency of Origami-Inspired Vibration Isolators With Quasi-Zero-Stiffness Characteristic, Proceedings of ASME 2020 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, Paper No. IDETC2020-22171, 17-19 Aug, 2020, Online.
- [3] 稲本知也, 石田祥子, 非線形ばね特性を有する折りたたみ構造の過渡応答解析, 日本機械学会 Dynamics & Design Conference 2020, 講演予稿集電子版 No.523.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 1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 石田 祥子	4. 巻 30
2. 論文標題 折紙工学(1) 折紙は人の役に立つか？	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 応用数理	6. 最初と最後の頁 27～33
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11540/bjsiam.30.1_27	査読の有無 無
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 Inamoto Kazuya, Ishida Sachiko	4. 巻 141
2. 論文標題 Improved Feasible Load Range and Its Effect on the Frequency Response of Origami-Inspired Vibration Isolators With Quasi-Zero-Stiffness Characteristics1	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Vibration and Acoustics	6. 最初と最後の頁 21004
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1115/1.4041368	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 石田 祥子	4. 巻 30
2. 論文標題 折紙工学(3) 展開構造を用いた防振	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 応用数理	6. 最初と最後の頁 29～35
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11540/bjsiam.30.3_29	査読の有無 無
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 3件/うち国際学会 8件）

1. 発表者名 Kazuya Inamoto, Sachiko Ishida
2. 発表標題 Spring Characteristics of Vibration Isolator Using Foldable Structure with Air Suspension Mechanism
3. 学会等名 The 14th International Symposium on Mechanics, Aerospace and Informatics Engineering 2019（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuya Inamoto, Sachiko Ishida
2. 発表標題 Design of Vibration Isolator Using Foldable Structure and Air Spring
3. 学会等名 9th International Congress on Industrial and Applied Mathematics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sachiko Ishida
2. 発表標題 Origami × Mechanical Engineering: Introduction to Origami-based Vibration Isolator
3. 学会等名 OIST workshop on Origami and Deployable Mechanisms (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山口 航矢, 石田 祥子
2. 発表標題 双安定性を持つ折り畳み構造を利用した防振機構の設計と性能評価
3. 学会等名 日本応用数理学会 研究部会連合発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 稲本知也, 石田祥子
2. 発表標題 折り畳み構造と空気ばねを用いた防振機構
3. 学会等名 日本ばね学会2019年度春季ばね及び復元力応用講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuya Inamoto, Sachiko Ishida
2. 発表標題 Improved Feasible Load Range and Its Effect on the Frequency Response of Origami-Inspired Vibration Isolators with Quasi-Zero-Stiffness
3. 学会等名 ASME 2018 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazuya Inamoto, Sachiko Ishida
2. 発表標題 Extension of Load Range and Performance Evaluation of Origami-Inspired Vibration Isolators with Quasi-Zero-Stiffness Characteristics
3. 学会等名 The 13th International Symposium on Mechanics, Aerospace and Informatics Engineering 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 稲本知也, 石田祥子
2. 発表標題 折り畳み構造を利用した防振機構における空気ばねの応用
3. 学会等名 日本応用数理学会 研究部会連合発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石田祥子
2. 発表標題 展開構造の力学的特性に関する考察
3. 学会等名 日本応用数理学会2017年度年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 石田祥子
2. 発表標題 折紙の展開収縮構造を用いた防振機構
3. 学会等名 日本機械学会 耐震問題研究会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 稲本知也, 石田祥子
2. 発表標題 非線形ばね特性を持つ折畳構造を利用した防振機構モデルの開発
3. 学会等名 日本ばね学会2017年度秋季ばね及び復元力応用講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kazuya Inamoto, Sachiko Ishida
2. 発表標題 Performance Evaluation of Vibration Isolators Using Cylindrical Foldable Structures with Bistability
3. 学会等名 The 12th International Symposium on Mechanics, Aerospace and Informatics Engineering 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kouya Yamaguchi, Sachiko Ishida
2. 発表標題 Design and Amplitude Dependence of Resonance Frequency of Origami-Inspired Vibration Isolators With Quasi-Zero-Stiffness Characteristic
3. 学会等名 ASME 2020 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 稲本知也, 石田祥子
2. 発表標題 非線形ばね特性を有する折りたたみ構造の過渡応答解析
3. 学会等名 日本機械学会 Dynamics & Design Conference 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山口航矢, 石田祥子
2. 発表標題 折り畳み構造内のばね機構の設計が防振性能に及ぼす影響
3. 学会等名 日本ばね学会2020年度秋季ばね及び復元力応用講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石田祥子
2. 発表標題 展開構造の多様な工学応用
3. 学会等名 精密工学会 第409回講習会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 白瑩雪, 石田祥子
2. 発表標題 ねじり座屈パターンを持つ2層折り畳み構造の除振台への応用
3. 学会等名 日本機械学会 2021年度年次大会
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 Yingxue Bai, Sachiko Ishida
2. 発表標題 Application to anti-vibration table of two-layered origami structures
3. 学会等名 JSST2021 International Conference on Simulation Technology (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

明治大学情報発信サイトMeiji.net オピニオン  
[https://www.meiji.net/it\\_science/vol199\\_sachiko-ishida](https://www.meiji.net/it_science/vol199_sachiko-ishida)  
 Meiji.net 動画でわかる! 「折紙工学」 折紙の構造を使って防振器を研究  
<https://youtu.be/JAjqtgby2I>  
 文部科学省科学技術・学術政策研究所科学技術予測センター KIDSASHI(きざし)「折紙工学」  
<https://stfc.nistep.go.jp/horizon2030/index.php/ja>  
 経済誌 Forbes (USウェブ版)「現代の生活に見る日本工芸のイノベーション」  
<https://www.forbes.com/sites/japanesevisionarywomen/2020/11/18/innovations-incorporating-traditional-japanese-crafts-into-modernlife/?sh=1ec873fb5c1d>  
 ナショナルジオグラフィック × 明治大学 × JAXA ナショナルジオオープンキャンパス  
<https://youtu.be/WEDVnNx0GK8>

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