

平成 30 年 9 月 3 日現在

機関番号：32682

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K21422

研究課題名(和文) 折り畳み構造の機械的特性の解明と工学応用に関する研究

研究課題名(英文) Investigation of Mechanical Properties of Foldable Structures and their Applications

研究代表者

石田 祥子 (Ishida, Sachiko)

明治大学・理工学部・専任講師

研究者番号：40636502

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、折紙の展開収縮構造を工学へと応用し、日本発の産業イノベーションを創出することである。本研究では工学応用の一例として、ねじり座屈のパターンを基に得られる円筒の展開収縮構造の機械的特性を明らかにし、防振器としての機能を検証した。

数値解析により、円筒の展開収縮構造に線形ばねを付加した構造は、ばね定数がほぼ零となるような変位領域を持つばね特性を持つことが明らかになった。加振シミュレーションおよび加振実験によって、本構造を防振器とすると、広い周波数帯域で効果的に振動が低減でき、さらに鋭い共振ピークは現れないことが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：This study aims to apply foldable structures produced by origami theory to engineering and create new industrial innovation from Japan. As an example of applications, cylindrical foldable structures with torsional buckling patterns are herein treated to clarify their mechanical properties and investigate the functionality as vibration isolators.

As results of numerical computation, it was clarified that the structures had a displacement range in which the spring stiffness of the structures was quasi zero. Further computation and experiments revealed that the structures effectively mitigated vibrations in a wide frequency range and a peaky resonance never occurred.

研究分野：設計工学，折紙工学

キーワード：展開構造 形状モデリング 防振・免震 振動解析・試験 折紙

1. 研究開始当初の背景

折紙は日本の伝統文化であり折り畳めるデザインの多様性は日本が優れているにも関わらず、その工学応用となると海外主導で生み出されつつある。我々の目指すべきは折紙の展開収縮構造の価値を正しく認識し、世界を牽引して折紙構造を工学的に応用、産業イノベーションを創出することである。そのために、展開収縮構造が持つ機械的特性をまとめ、より広い工学分野への応用可能性を明らかにする必要がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、これまでに得られた展開収縮構造を工学へと応用し、日本発の産業イノベーションを創出することである。ここでは工学応用の一例として、ねじり座屈のパターンを基に得られる円筒の展開収縮構造(図1)の機械的特性を明らかにし、防振器としての機能を検証した。

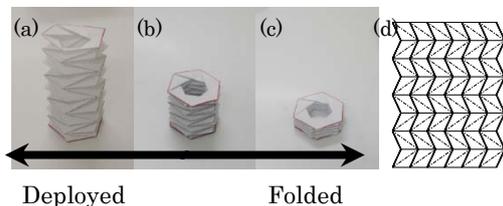


図1 ねじり座屈パターンからなる円筒の展開収縮構造 (a)~(c)展開収縮の様子, (d)構造を形成する展開図. 文献(石田祥子, 内田博志, 萩原一郎, 折り畳み可能な構造の非線形ばね特性を利用した防振機構, 日本機械学会論文集, Vol. 80 (2014), No. 820, p. DR0384)から転載.

3. 研究の方法

次の3ステップからなる。

- (1) 数値解析によって、本構造のばね特性を明らかにする。
- (2) 加振シミュレーションによって、本構造を防振器とした時の振動応答特性を得、防振器の有効性を検証する。
- (3) 本構造のばね特性を持つ防振器を試作し、加振実験によって防振性能を検証する。

4. 研究成果

(1) 本構造のばね特性

円筒のねじり座屈パターン(図1(d))は三角形の要素の組み合わせで構成されるので、折線のみを抽出したトラス構造としてモデル化し数値解析を行った。本トラス構造を折りたたむ際の垂直方向の荷重-変位の関係は図2(a)に示すようにS字状になった。このトラス構造に線形ばねを垂直に付加すると、構造全体のばね定数がほぼ零となるような変位領域 Δx を持ち、それ以外の変位ではばね定数が増加する特性(図2(b))を得ることができた。このような特性を持つ非線形ばねは、変位領域 Δx 内に静的平衡点をとると、微小振動に対し振動を伝達しない防振機構となる。

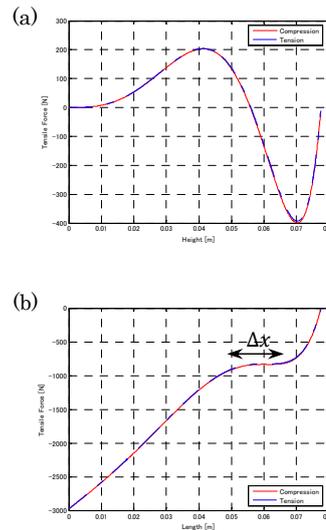


図2 展開収縮時の荷重-変位曲線 (a) トラス構造, (b) トラス構造に垂直な線形ばねを付加した構造(提案する防振器). [雑誌論文] (2)から転載.

(2) 加振シミュレーション

図2(b)のような非線形ばね特性をもつ構造を防振器として提案した。図3(a)に示す振動系において、提案する防振器をばねとして用いた時、入力振動に対する出力振動を数値計算により求め、入出力の振幅比を得た(図3(b))。比較のため、線形ばねを用いた場合の振幅比を併せて示す。提案する防振器では、広い周波数帯域において振幅比が1以下に抑えられており、線形ばねの場合にみられるような鋭い共振ピークは現れなかった。このため、提案する防振器が有効に機能することが示された。ただし、提案する防振器はばね定数が非常に小さいため共振周波数は低周波数域に移動しており、低周波数域においては応答が悪くなることが明らかとなった。

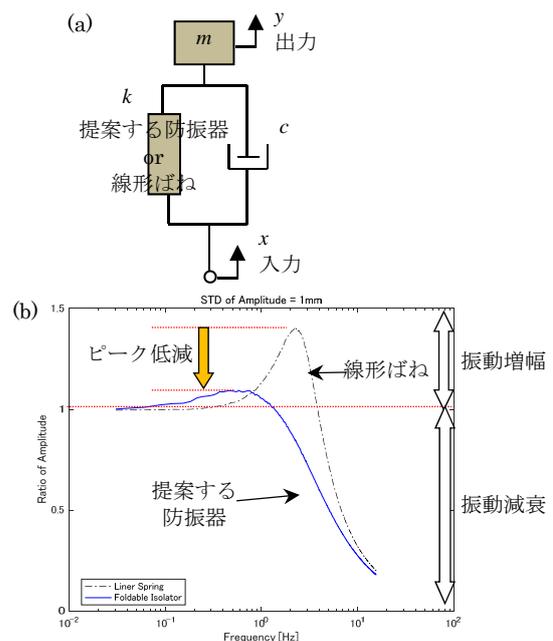


図3 加振シミュレーションによる提案する防振器と線形ばねの振動応答特性の比較. [雑誌論文] (2)から転載.

(3) 防振器の試作と加振実験

提案する防振器の実用性を検証するため、汎用的な金属材料を用いて本構造を試作した(図4)。次に、東日本大震災において茨城県日立市で観測された地震波のうち、高さ方向の成分のみを試作防振器の下端に入力し、その上端にて応答を測定した。入力波と応答波のパワースペクトル密度を図5に示す。試作防振器は6 Hz以上の周波数域において効果的に振動を低減した。これにより、ねじり座屈パターン⁽¹⁾の展開収縮構造(図1)を基にした防振器の有効性が示された。

展開収縮構造は、単に形状変化に注目されることが多いが、本研究では、ねじり座屈パターン⁽¹⁾の展開収縮構造の非線形ばね特性を活かし、防振器としての新たな機能、新たな価値を創出することができた。

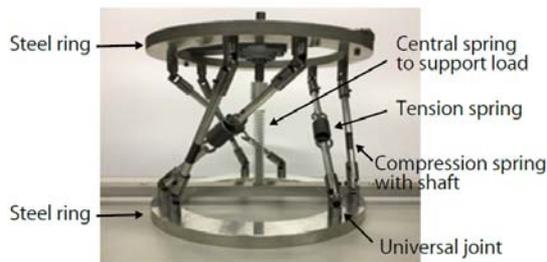


図4 試作した防振器。〔雑誌論文〕(3)から転載。

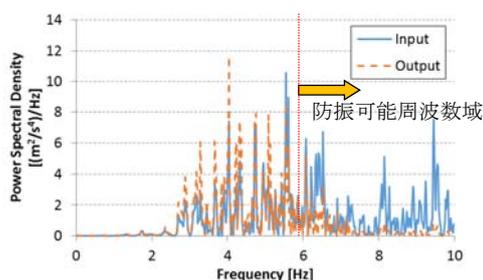


図5 東日本大震災における地震波(高さ方向のみ)に対する試作防振器の振動応答特性。〔雑誌論文〕(3)から転載。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

- (1) 石田祥子, 折り紙の展開収縮構造を用いた防振機構, 日本機械学会誌, 査読無, Vol. 119, No. 1175 (2016-10), pp. 554-555, DOI: 10.1299/jsmemag.119.1175_554
- (2) Sachiko Ishida, Hiroshi Uchida, Haruo Shimosaka, Ichiro Hagiwara, Design and Numerical Analysis of Vibration Isolators with Quasi-zero-stiffness Characteristics Using Bistable Foldable Structures, ASME Journal of Vibration and Acoustics, 査読有, Vol. 139, No. 5 (2017), No. 051004, DOI: 10.1115/1.4036096
- (3) Sachiko Ishida, Kohki Suzuki, Haruo Shimosaka, Design and Experimental Analysis of Origami-inspired

Vibration Isolator with Quasi-zero-stiffness Characteristic, ASME Journal of Vibration and Acoustics, 査読有, Vol. 139, No. 5 (2017), No. 051004, DOI: 10.1115/1.4036465

〔学会発表〕(計 16 件)

- (1) 鈴木昂輝, 下坂陽男, 石田祥子, 折り畳み構造の双安定性を利用した防振機構モデルの製作, 日本設計工学会 2015 年度春季研究発表講演会, 講演 No. A05, 2015 年 5 月 30~31 日, 千葉.
- (2) Sachiko Ishida, Approach to Design of Mechanical Devices Using Foldable Structures, CMMA Monthly Seminar, 13 July, 2015, Tokyo. [Invited talk]
- (3) Sachiko Ishida, Hiroshi Uchida, Haruo Shimosaka, Ichiro Hagiwara, Design Concepts and Prototypes of Vibration Isolators Using Bi-stable Foldable Structures, ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, Paper No. DETC2015-46409, 2-5 Aug, 2015, Boston, USA.
- (4) 石田祥子, 折り畳み可能な構造の機械的特性の計測とその考察, 日本機械学会 Dynamics & Design Conference 2015, 講演予稿集電子版 No. 717, 2015 年 8 月 25 日~28 日, 青森.
- (5) Sachiko Ishida, Folding Origami/Jongie Jupgi: From Mathematics to Engineering, The 10th International Symposium on Mechanics, Aerospace and Informatics Engineering 2015, Sep 18-19, 2015, Gyeongnam, Korea. [Invited talk]
- (6) Kohki Suzuki, Sachiko Ishida, Haruo Shimosaka, Manufacture and Evaluation of the Vibration Proof Structure Using Bistability of Cylindrical Folding Model, The 10th International Symposium on Mechanics, Aerospace and Informatics Engineering 2015, Poster No. DC-11, Sep 18-19, 2015, Gyeongnam, Korea.
- (7) 石田祥子, 部材の弾性変形を活かした折りたたみ式防振機構, 文部科学省 現象数理学共同研究協働拠点研究集会「文理融合を目指した折紙科学研究」, 2015 年 11 月 12-13 日, 東京. [招待講演]
- (8) 石田祥子, 双安定な折り畳み円筒構造を利用した防振器の設計, 日本自動車技術会 振動騒音部門委員会, 2015 年 11 月 18 日, 東京. [招待講演]
- (9) 石田祥子, 折紙の数値と工学への応用, 数理工学シンポジウム 2015, 2015 年 11 月 19-20 日, 東京. [招待講演]

- (10) Sachiko Ishida, Kohki Suzuki, Haruo Shimosaka, Design and Experimental Analysis of Origami-inspired Vibration Isolators with Quasi-zero-stiffness Characteristic, ASME 2016 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, Paper No. IDETC2016-59699, 21-24 Aug, 2016, Charlotte, USA.
- (11) 鈴木昂輝, 石田祥子, 下坂陽男, 双安定な展開収縮構造の除振性能, 日本機械学会 2016 年度年次大会, 講演 No. J1010404, 2016 年 9 月 12 日~14 日, 福岡.
- (12) Sachiko Ishida, Principle and experimental evaluation of origami-inspired vibration isolators, International Conference on Mathematical Modeling and Applications 2016 'Origami-Based Modeling and Analysis', 9 November, Tokyo. [Invited talk]
- (13) 石田祥子, 折紙の数理と構造設計, 数学と現象 in Miyazaki (MPM2016), 2016 年 11 月 18-19 日, 宮崎. [招待講演]
- (14) 石田祥子, 折紙の工学応用—折紙に秘められた可能性—, 生産システム懇談会, 2017 年 1 月 21 日, 東京. [招待講演]
- (15) 稲本知也, 石田祥子, 折り畳み構造を利用した防振機構の荷重範囲の拡張と周波数特性, 日本応用数理学会 研究部会連合発表会, 2018 年 3 月 15~16 日, 大阪.
- (16) 海野真誼, 石田祥子, 環状折り畳み構造の展開図作成法と剛性検証, 日本応用数理学会 研究部会連合発表会, 2018 年 3 月 15~16 日, 大阪.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

○市民講座, 公開講演等

- (1) 石田祥子, 折りたたまの科学~折紙から昆虫の翅まで~, 三鷹ネットワーク大学企画講座, 2015 年 4 月 11 日, 東京.
- (2) 石田祥子, 折紙の展開収縮機能を用いた産業応用, 2016 年度春期 明治大学リベティアカデミー 講座「身近な数学と情報技術について楽しく学ぶ・Part VI ~折紙工学と折紙の手法を取り込んだ折紙式 3 次元プリンターについて学ぶ~, 2016 年 6 月 18 日, 東京.
- (3) 石田祥子, 折りたたまの数学~折紙が広

げるハイテクの世界~, 高校生のための先端数理科学見学会講演, 明治大学先端数理科学研究科, 2016 年 8 月 8 日, 東京.

- (4) 石田祥子, 折りたたまの数理で産業のイノベーションを!, 明治大学科学技術研究所 2016 年度第 2 回公開講演会, 2016 年 11 月 5 日, 東京.

○ホームページ等

- (1) 明治大学ロールモデル集「Color your life」Vol.1, 明治大学男女共同参画推進センター女性研究者研究活動支援推進本部
<http://muged.meiji.jp/report-newsletter/rolemodel/>
- (2) 文部科学省 HP 科研費による研究成果 事例報告書「折紙が拓く未来の可能性」, 2017 年 1 月 6 日公開
http://www.mext.go.jp/a_menu/shinkou/hojyo/1372474.htm
- (3) 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—, 明治大学情報発信サイト Meiji.net 動画でわかる! 「●▲■」, 2017 年 4 月 21 日公開
<https://youtu.be/JAjqtbmy2I>
- (4) 明治大学理工学部機械工学科機能デザイン研究室(石田研究室)
<http://www.isc.meiji.ac.jp/~sishida/home.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石田祥子 (Ishida, Sachiko)
明治大学理工学部機械工学科・専任講師
研究者番号: 40636502

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

下坂陽男 (Shimosaka, Haruo)
明治大学理工学部機械工学科・教授
研究者番号: 10139462

(4) 研究協力者

鈴木昂輝 (Suzuki, Kohki)
稲本知也 (Inamoto, Kazuya)