

令和 6 年 6 月 7 日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究

研究期間：2022～2023

課題番号：22K14154

研究課題名（和文）エネルギートラッピングと非線形弾性波に基づく新しい衝撃吸収構造の創製

研究課題名（英文）Impact mitigation via nonlinear wave propagation based on energy trapping and releasing behaviors

研究代表者

安田 博実（Yasuda, Hiromi）

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教

研究者番号：10910903

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、複数の安定な状態を有するマルチステイブルな構造に注目し、弾性変形による繰り返し利用可能なエネルギー吸収構造の研究を行った。ユニットセルと呼ばれる構成要素の数値解析モデルの構築から、ユニットセルを複数連結させたシステムへの拡張まで行い、エネルギートラッピングによるエネルギー吸収、およびトラップしたエネルギーの逐次的な解放による初期状態への遷移を繰り返し発現できる機構を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでの塑性変形に基づく衝撃吸収材では、一度使用すると元の形状に戻すことはできないため繰り返しの利用は困難であるが、弾性変形のみによるエネルギーの吸収・散逸により、再使用可能な衝撃吸収構造が期待できる。また、本研究で対象とした構造を線形・非線形波動の研究におけるプラットフォームとして用いることで、異なる非線形波動同士の衝突といった様々な波動現象の探求につながると考える。

研究成果の概要（英文）：We designed and analyzed multistable architected structures for developing a reusable energy-absorbing device. We started by introducing a numerical model to examine the multistability of unit cell structures, and we then constructed a chain of such multistable components to explore wave dynamics. In particular, we studied nonlinear wave propagation in our multistable system by applying impact to the system. Our analysis shows that our structure can exhibit impact mitigation behavior arising from the energy-trapping behavior. In addition, due to the stored elastic energy, we observed the formation of transition waves to change the configuration of the structure to its initial state. Also, we fabricated a prototype and demonstrated such energy-trapping/-releasing behaviors in a repeatable manner.

研究分野：構造力学

キーワード：衝撃吸収構造 非線形波動 機械的メタマテリアル マルチステイブル構造

1. 研究開始当初の背景

衝撃吸収構造は自動車や航空宇宙分野から、スポーツ器具や家具といった日常生活まで至るところで人やデバイスを衝撃から守る重要な役割を果たす。そのような衝撃吸収機構の設計において、衝撃等の外力が機械構造に加わったときに、入力されたエネルギーをどのように散逸させるかが課題となる。例えば、自動車や航空機の衝撃緩和に用いられるクラッシュボックスでは、構造を大きく変形させ、材料の塑性域を利用したエネルギー吸収を行うことができる。ただし、このような塑性変形に基づくエネルギー吸収の場合、一度衝撃を加えてエネルギー吸収を行うと、元の形状に戻すことはできないため一度のみの使用に限定され、複数回の衝撃に対応した繰り返しの利用は困難となる。このような課題へのアプローチとして、材料の弾性変形のみによるエネルギー吸収が考えられるが、衝撃を構造に加えられたときのエネルギー吸収をどのように制御するかが重要になってくる。

近年、エネルギーの流れを波動として捉え、その伝播を制御するのに構造全体を構成する要素の特性やその要素の配置を工夫した設計を行う機械的メタマテリアルの研究が盛んに行われている。そのような研究の一つとして、機械的メタマテリアルの構成要素にエネルギー的に複数の安定な状態を有するマルチステイブルな構造に注目した研究が挙げられる(図1にマルチステイブル構造の例を示す)。特に、複数の安定な状態に関して、エネルギーの低い状態から高い状態へと遷移する場合、高い状態でシステムが留まるとその分のエネルギーが蓄えられることになる(つまり、エネルギートラッピング)。また、マルチステイブルな特性を有する要素を複数連結させた構造では、異なるエネルギー的に安定な状態を遷移する挙動が逐次的に誘発されることで発現する transition wave と呼ばれる非線形波動の伝搬が報告されている。このようなエネルギートラッピングおよび transition wave といった非線形波動を同一の構造で発現させる設計や、波動現象の理解及びその制御をすることで、塑性変形や構造の破壊が伴わない新しいエネルギー吸収・散逸機構の創製につながると考えられる。

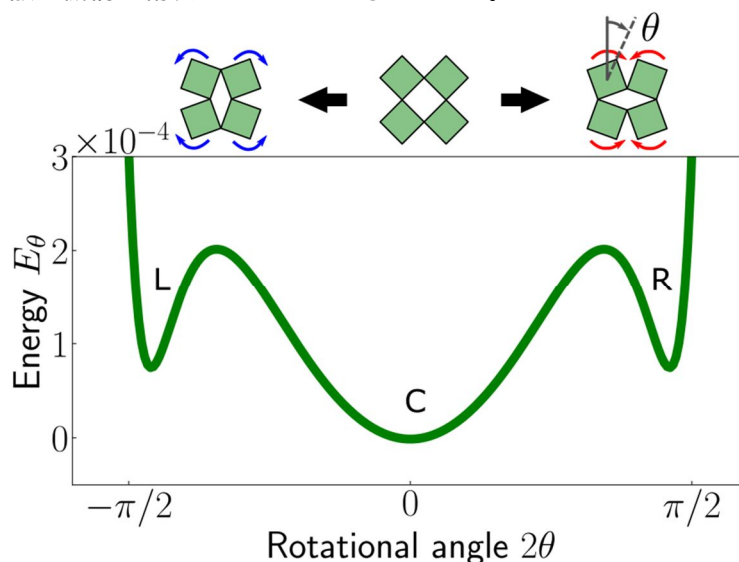


図1：マルチステイブル特性を有するエネルギー曲線。

2. 研究の目的

本研究の目的は、複数の安定な状態を有するマルチステイブルな構造に注目し、弾性変形による繰り返し利用可能なエネルギー吸収構造の創製を目指す。特に、構成要素となるユニットセルを複数連結させた構造中を伝搬する、非線形波動に基づいた衝撃吸収機構の研究を行った。これまでの塑性変形に基づく衝撃吸収材では、一度使用すると元の形状に戻すことはできないため繰り返しの利用は困難であるが、弾性変形のみによるエネルギーの吸収・散逸により再使用可能な衝撃吸収構造が期待できる。

3. 研究の方法

本研究では、エネルギートラッピングの挙動を有するシステムを設計および解析するにあたり、ユニットセルと呼ばれる構造の基本要素のレベルにおけるエネルギーの解析を行い、そのユニットセル要素を複数連結した構造へと発展させた。特に、複数連結したチェーン状の構造に焦

点を当て、衝撃を構造に加えた際に各ユニットセル要素のエネルギーがどのように変化していくか、および衝撃により誘起される波動がどのように構造中を伝搬していくかを調べ、エネルギートラッピングによるエネルギー吸収、およびトラップしたエネルギーに基づく初期状態への復元の有効性について検証を行った。

まず、ユニットセルレベルでの解析では、剛体要素同士がヒンジ要素（または「折り目」）で結合される構造（図1）に注目し、そのような構造のモデル化を行い、構造の変形（ここではヒンジ要素の変形）に伴う、エネルギーの変化を調べる。特に、剛体要素に磁石を挿入することで（図2(a)）、エネルギー遷移する中で、複数の安定な状態を持つマルチステイブルな特性の発現や、エネルギー曲線をチューナブルに変更可能であるかモデルを使って解析を行う。

そして、ユニットセル要素を複数連結させたモデルであるチェーン状の構造を構築し、衝撃を構造に加えた際の動解析を行う。衝撃の入力として、数値解析ではチェーン構造の各剛体要素の初期速度を、片方の端の剛体要素では非ゼロの値を、それ以外の要素はゼロの値を設定することで解析を行う。動解析では、衝撃により構造に加えられたエネルギーが、構造中をどのように伝搬するかを調べ、特にマルチステイブル要素において異なる安定な状態への遷移が誘起されるかなど詳細に解析を行う。また、エネルギーのレベルが低い状態から高い状態への遷移するケースに注目し、エネルギートラッピングによる衝撃吸収・緩和の有効性を、様々な衝撃の大きさに対して解析を行う。

4. 研究成果

ユニットセルレベルのエネルギーの解析では、複数の安定な状態を持つマルチステイブル特性の発現およびそのチューナブルな性質について確認できた。ユニットセル要素の数学モデルを構築し、変形に伴うエネルギー変化の解析を行った結果、剛体要素として導入した四角形要素の回転角度 θ がゼロの時を初期状態（図1中の中央、Phase C）とすると、回転角度が増加・減少しエネルギーの障壁を乗り越えると初期状態とは異なる安定な状態が2つ存在することがわかる（図1中では左および右のPhase LとRがそれぞれの安定な状態に対応する）。ここでは、初期状態のエネルギーの値が他の2つの状態より小さいエネルギー曲線を示すが、幾何形状やヒンジ部のパラメータを変化させることで、その逆の初期状態が他の2つよりエネルギーレベルが高い状態にすることも確認できている[1,2]。

次に、図2(a)に示すようなユニットセル要素をチェーン状に連結された構造における動解析では、2つの異なる非線形波動が発現することがわかった。図1で示されるエネルギー特性を持つ場合、すべてのユニットセルが中央のPhase Cを初期状態とし衝撃を加えると、vector solitonと呼ばれるソリトン波が（図2(b)）、Phase Cよりエネルギーレベルが高いPhase Rを初期状態として衝撃を加えると transition wave（またはトポロジカルソリトン）と呼ばれる非線形波動が伝播することを確認した（図2(c)）。また、vector solitonと transition waveのそれぞれに対して、数学モデルから解析解を導出し、数値計算から得られた波形との比較を行い、良好な一致を得ることもできた[1,2]（例として、図2(c)中のインセット i）では、transition waveの数値計算結果と解析解との比較を示す）。

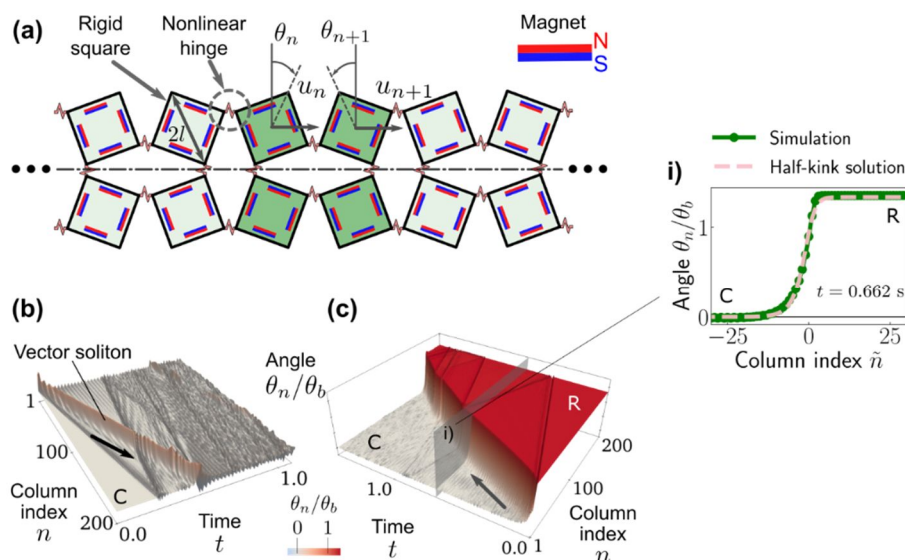


図2：マルチステイブル構造中を伝搬する異なる種類の非線形波動伝播の例。(a) 四角形要素で構成されるチェーン構造。大きさの異なる衝撃を加えた際に発現する(b) vector solitonと(c) transition waveの数値解析結果。インセット i)は(c)のプロットにおける、ある時間の波形を表し、マーカー（緑）は数値解析結果を、破線（ピンク）は解析解を示す。

また、衝撃により構造にエネルギーを入力した際の、構造中におけるエネルギーの伝搬を解析した結果を図3に示す。ここでは、初期状態を Phase C とし、衝撃の大きさを様々に変えたときのエネルギーの変化を数値解析により調べた。先ほどの図2のケースとは異なり、加える衝撃の大きさが小さいと線形波動のみであるが、中程度の衝撃だと vector soliton が、大きい衝撃を加えるとエネルギートラッピングが伴う波動現象が生成されることを発見した[1]。このエネルギートラッピングを伴う波動伝播では、Phase C から Phase R に遷移する境界が生成およびその境界が移動していくが、ある程度伝播していくと、今度は図2(c)に見られるような transition wave に切り替わり、衝撃を加えた端へと逆方向にエネルギーの波動が伝播していくことが確認できる。このため、衝撃により初期状態(Phase C)から変形の状態(Phase R)に遷移した部分が、transition wave により Phase R から Phase C (初期状態)へ再度戻ることが可能となり、再利用可能な衝撃吸収機構としてのポテンシャルを示唆する現象であると考えられる。

さらにこの現象を詳しく調べるため、衝撃を加えた箇所と反対の端におけるエネルギー変化を追跡し、その最大値をプロットすると、ある衝撃の大きさの範囲では vector soliton が生成されるため、衝撃の大きさが増加するのに伴い他端におけるエネルギーのピークも増加していくことが確認できるが、ある衝撃の大きさを超えると、このエネルギーピークの値が急激に減少していくことがわかる。これは、エネルギートラッピングが伴う波動伝播が誘起される場合、vector soliton のようにエネルギーが構造の一方の端から他端へとスムーズに伝播していかないためであると考えられる。このようなエネルギーの伝搬が変化し、他端でのエネルギーのピークを抑えることができる挙動は、衝撃吸収デバイスへの応用におけるポテンシャルを示唆するものと考えられる。

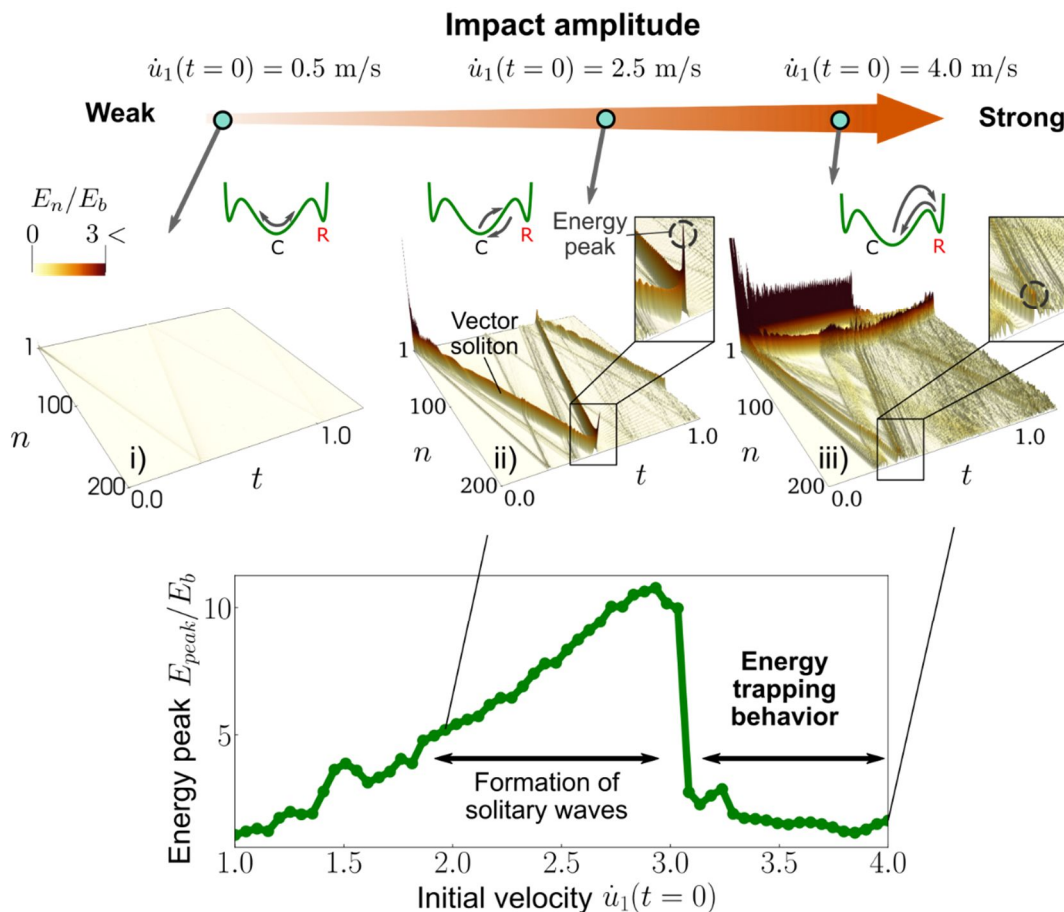


図3：エネルギートラッピングの発見。上段の図では、加える衝撃の大きさを3段階に変化させたときのチェーン構造における各四角形要素のエネルギー変化をプロット。下段のプロットでは、衝撃を一つの端に加えた際の、もう一端におけるエネルギー変化の最大値を衝撃の大きさを様々に変えたときの変化を表す。

また、このような外力からの入力を受けるとエネルギートラッピングによりエネルギーを吸収し、吸収したエネルギーを利用して transition wave を誘起することで、構造を初期状態へと戻すことで繰り返し使用できる衝撃吸収機構のコンセプトを検証するため、積層造形装置を用い

て試作を行った。試作には、マルチステイブル特性を有する円筒状の折り紙構造を導入し、軟性および剛性の高い樹脂材料を用いて造形を実施した。デモンストレーションとして、試作した構造に圧縮の入力を付加し、その後に構造の端に位置するユニットセルについて、トラップされたエネルギーを開放させた結果を図4に示す。試作した構造では、外力により各ユニットセルによるエネルギートラッピング、および transition wave による初期形状への回復を確認することができ、またこのプロセスを繰り返し行えることを確認できた。

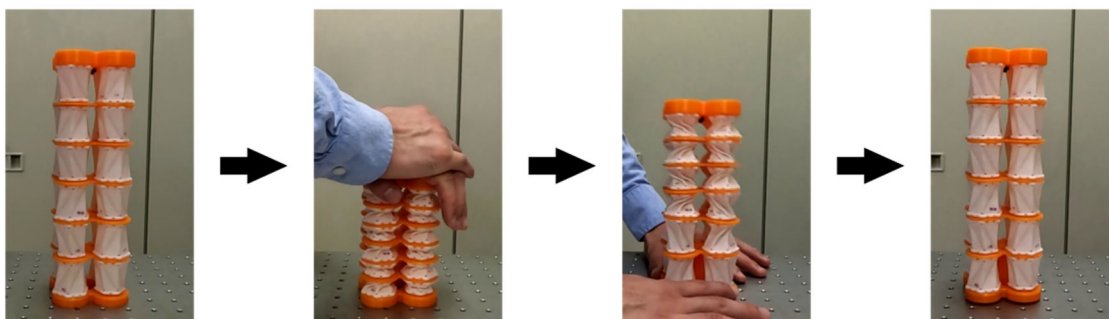


図4：試作したマルチステイブル特性を有する折り紙構造のエネルギートラッピングおよび非線形波動伝播による初期形状への遷移。

さらに本研究を通して、マルチステイブルな特性を有する構造中を vector soliton および transition wave といった異なる2つの非線形波動が伝播することに注目し、2つの vector soliton を同一構造中に発生させ内部で衝突させることで、その二つのソリトンは消滅し、新たに transition wave が生成される波動現象の発見につながった[2]。また、そのようなソリトンの衝突による transition wave の生成はチェーン状の構造だけでなく、2次元状のパターンに拡張した構造中でも発現することを発見した[3]。非線形波動だけでなく、transition wave による各ユニットセル要素のエネルギー状態の遷移は、線形波動の挙動に影響を与えることもわかってきた[4]。このように、当初の研究計画では予想していなかった新しい線形・非線形波動力学の知見の獲得など、機械工学だけでなく分野を横断した研究成果を生み出す結果を得られた。

REFERENCES

- [1] Hiromi Yasuda. マルチステイブル構造中を伝搬する非線形波動解析. In Proceedings of the JSASS/JSME/JAXA Structures Conference (構造強度に関する講演会), 1A-05, 2022 (第15回若手奨励賞)
- [2] Hiromi Yasuda, Hang Shu, Weijian Jiao, Vincent Tournat, and Jordan R. Raney. Nucleation of transition waves via collisions of elastic vector solitons. Applied Physics Letters, 123(5):051701, 2023 (Featured on the cover page and Editor's Pick)
- [3] Weijian Jiao, Hang Shu, Vincent Tournat, Hiromi Yasuda, and Jordan R. Raney. Phase transitions in 2D multistable mechanical metamaterials via collisions of soliton-like pulses. Nature Communications, 15(1):333, 2024
- [4] Hiromi Yasuda. マルチステイブルな機械的メタマテリアルの振動特性解析. In Proceedings of the JSASS/JSME/JAXA Structures Conference (構造強度に関する講演会), 1B-13, 2023

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yasuda H., Shu H., Jiao W., Tournat V., Raney J. R.	4. 巻 123
2. 論文標題 Nucleation of transition waves via collisions of elastic vector solitons	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 51701
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0156023	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 該当する

1. 著者名 Jiao Weijian, Shu Hang, Tournat Vincent, Yasuda Hiromi, Raney Jordan R.	4. 巻 15
2. 論文標題 Phase transitions in 2D multistable mechanical metamaterials via collisions of soliton-like pulses	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 333
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41467-023-44293-w	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

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 1件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Hiromi Yasuda, Hang Shu, Weijian Jiao, Vincent Tournat, Jordan Raney
2. 発表標題 Collisions of nonlinear waves in flexible mechanical metamaterials
3. 学会等名 The 182nd Meeting of the Acoustical Society of America（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 安田博実
2. 発表標題 マルチステイブル構造中を伝搬する非線形波動解析
3. 学会等名 第64回構造強度に関する講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Vincent Tournat, Apostolos Paliouaios, Vassos Achilleos, Georgios Theocharis, Hiromi Yasuda, Hang Shu, Weijian Jiao, Jordan Raney, Katia Bertoldi
2. 発表標題 Triggering of transition waves by the collision of solitons or breathers in bistable mechanical metamaterials
3. 学会等名 APS March Meeting 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 安田博実
2. 発表標題 マルチステイブルな機械的メタマテリアルの振動特性解析
3. 学会等名 第65回構造強度に関する講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiromi Yasuda, Hang Shu, Weijian Jiao, Jordan Raney
2. 発表標題 Nonlinear waves in multistable mechanical metamaterials
3. 学会等名 The 10th International Congress on Industrial and Applied Mathematics (ICIAM 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiromi Yasuda
2. 発表標題 Nonlinear wave propagation in multistable mechanical metamaterials
3. 学会等名 M&M 2023材料力学カンファレンス (招待講演)
4. 発表年 2023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
---------	---------