

令和 3 年 6 月 23 日現在

機関番号：27101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04025

研究課題名(和文)形状記憶合金の新たな座屈後力学特性の解明とそれを用いたパッシブ除振系の高性能化

研究課題名(英文)Clarification of new mechanical properties of post-buckled shape memory alloy and performance improvement of a passive vibration isolator

研究代表者

佐々木 卓実 (Sasaki, Takumi)

北九州市立大学・国際環境工学部・准教授

研究者番号：80343432

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、座屈した形状記憶合金の力学特性を詳細に検証・解明し、それを鉛直方向のパッシブ除振装置に適用して高性能化を図った。具体的には、形状記憶合金の、座屈後静的復元力の負勾配特性について、その発現原理および材料の各種特性との関係を解明し、動的力学特性の検証を行った。また、本特性を除振装置のキー要素に援用し、簡便・小型を維持しつつ、鉛直方向の準ゼロ剛性を実現して除振性能を向上させると共に、履歴特性による高次モードを抑制し、バックラッシュのない構造を従来装置に比べて飛躍的に簡便な構成で実現可能とすることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

形状記憶合金は、その動作安定性や制御性の高さから、産業界でも多くの適用例がある。このような合金に対して新たな特性・機能を持たせることで、新たなシステムの提案や既存システムの高性能化や高付加価値化が期待される。本研究は、座屈後形状記憶合金の特性を詳細に調査し、特殊な力学特性の発現原理や各種材料パラメータとの関連性を解明することで、工学システム(除振系)の性能向上を追求したものである。今後もこの特性を利用し、新たな価値の創生へ繋げることが期待される。

研究成果の概要(英文)：In this study, the mechanical properties of a post-buckled shape memory alloy were clarified, and the performance of a passive vibration isolator for vertical direction was improved by applying these properties. Specifically, the fundamental principle of the appearance of the negative stiffness property and the dynamic property of post-buckled shape memory alloy was clarified. By applying these properties to a vibration isolator, the isolation performance was improved by realizing quasi-zero stiffness for the vertical direction while the size and the construction of the isolator maintained small and simple. And also, it was shown that the resonances of higher-order modes of the isolator were diminished by the hysteretic property.

研究分野：振動工学

キーワード：形状記憶合金 座屈 非線形復元力 非線形除振装置

1. 研究開始当初の背景

形状記憶合金(以降 SMA)は、その動作安定性や制御性の高さから、産業界でも多くの適用例がある。特に Ti-Ni 系 SMA は、熱処理・加工条件により諸特性が大きく変動することが知られており、このような合金に対して新たな特性・機能を持たせることで、新たなシステムの提案や既存システムの高性能化・高付加価値化が期待される。研究代表者らは研究開始前までに、板状 SMA を軸方向に圧縮して座屈させた際の静的復元力特性を実験的に調査し、通常金属材料とは異なる特性として負の剛性を示す特性を見出した。本特性の発現原理は、SMA 自身がもつ材料非線形性と座屈変形に伴う構造非線形性の相互作用によるものと推察したが、それらの依存関係や寄与率の詳細について研究された例は、申請者が調べた限りでは、これまでに無いものであり、また座屈後 SMA の動的力学特性についても未解明であった。これらを詳細に解明することで、新たなシステムの提案、また既存システムの高性能・高機能化に繋げることが望まれる。

2. 研究の目的

本研究では上記に示す既存システムとして、鉛直方向のパッシブ除振装置を取り上げる。近年、例えば光学系による超微弱信号の検出などの精密計測分野、また走行する車内の静粛化に対するさらなる追求などで、従来の性能を大きく上回る、これまでにないレベルの防振・除振技術が求められるようになってきた。この際、動作ノイズやセンサ感度の問題から、アクティブタイプを適用することは困難な場合が多く、パッシブ除振系の高性能化に対する期待は非常に高まっている。ところが、一般に鉛直方向のパッシブ除振装置の高性能化と小型化および軽量化はトレードオフの関係にあり、このことが除振系の設置条件や適用対象に対する大きな制約となることが多い。このような現状に対して、除振装置のキー要素として材料の持つ新たな特性を利用することで、これまでの装置の限界を打破することが期待される。

本研究は、上記のように未解明である形状記憶合金の座屈後力学特性の発現原理や各種材料パラメータとの関連性という問いを如何に解明し、その特性を活かすことで工学システム(除振系)の性能を如何に追求し、また新たな価値を生み出せるか、に挑戦するものである。

3. 研究の方法

本研究は、申請者が新たに見出した座屈した形状記憶合金の力学特性を詳細に検証・解明し、それを応用することで既存システムの高性能化を図る。具体的には、板状 SMA の、座屈後静的復元力の負勾配特性について、その発現原理および材料の各種特性や製作条件との関係を解明し、次に、動的力学特性の検証を行う。これらの特性を解明することで、新たなシステムの開発や既存システムの高度化が期待される。本研究では、本特性を鉛直方向のパッシブ除振装置のキー要素に採用し、装置の小型・高性能・高機能化を追求する。装置に期待される特徴として、簡便・小型を維持しつつ、鉛直方向の準ゼロ剛性を実現して除振性能を向上させると共に、履歴特性による高次モードの抑制、バックラッシュのない構造を、従来装置に比べて飛躍的に簡便な構成で実現可能となることが挙げられる。

4. 研究成果

上記の目的を達成するため、本研究では板状 SMA を長手方向へ圧縮した際の静的・動的力学特性を詳細に調査し、またこれらの特性を利用した除振装置を製作し、その効果を検証した。以下に研究期間中に得られた成果を述べる。

(1) 座屈後力学特性に与える相変態の影響

有限要素解析を用いて、板状の SMA(以下 SMA)を長手方向に圧縮した際の座屈後力学特性に与える相変態の影響を調査した。SMA は外力により負荷が発生するとオーステナイト層からマルテンサイト相へと相変態するが、板状 SMA が座屈する際は板厚方向に沿ってオーステナイト相とマルテンサイト相が混在し応力が非線形な状態となる。この非線形な応力分布と、座屈変形による幾何学非線形性が同時に発生することにより、負剛性特性が発現すると考えられる。そこで、有限要素解析を用いて材料内部の応力状況またはひずみ状況を確認し内部の相の状態を把握することを試みた。図 1 に代表的な結果の一例を示す。図中の □ は、圧縮過程においてオーステナイト相からマルテンサイト相へ相変態した SMA の体積分率、○ は形状回復過程におけるマルテンサイト相の弾性変形領域過程にある SMA の体積分率、● は形状回復過程におけるマル

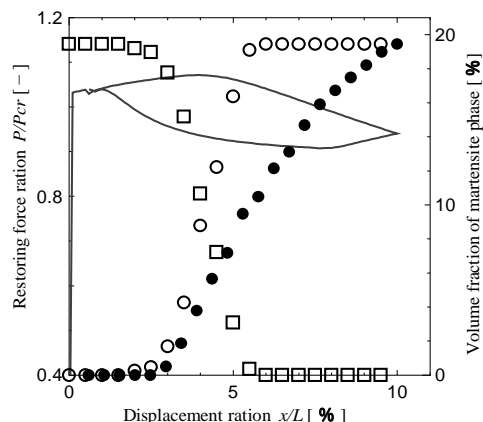


図 1 座屈後復元力と相変態分率

テンサイト相からオーステナイト相へ逆変態する SMA の体積分率を示す．図のように，座屈後 SMA はオーステナイト層からマルテンサイト相への相変態，またその逆変態が生じる際に負剛性特性を発現することを明らかにした．また，SMA が有する材料非線形性としてのヒステリシス特性が，特に形状回復過程における復元力特性に大きな影響を与えることを明らかにした．具体的には，ヒステリシスループが大きい材料の場合は形状回復過程において，マルテンサイト相からオーステナイト相への逆変態が生じず負剛性が発現せず，また，ヒステリシスループの小さい材料の場合は，形状回復過程でマルテンサイト相からオーステナイト相への逆変態が生じやすいため負剛性特性が発現していることを明らかにした．

(2) 座屈後力学特性に与える材料の厚さ・長さの影響

図 2 に厚さを変化させた有限要素モデルにて座屈後復元力の解析を行った際の結果の一例を示す．図より，厚さの増加に伴い座屈変位が 0.5mm 付近までは負剛性特性が増していることが分かる．また，すべての結果において座屈変位が 0.5mm 以上では接線剛性の傾きが緩やかにゼロに近づき，1.5mm 付近からは傾きがほぼゼロになっていることが分かる．この傾向は，厚さの増加に伴い変形中にマルテンサイト相へ相変態する SMA の体積分率が増加することが原因であると考えられる．図 3 に長さを変化させた有限要素モデルにて座屈後復元力の解析を行った際の結果の一例を示す．図より，材料長さの減少にともない，負剛性特性が増すことが分かる．この傾向も，長さの減少に伴い変形中のマルテンサイト相の体積分率が増加することが原因であると考えられる．また，材料長さの増加にともない負剛性が発現する変位は増加する傾向にある．これらの解析結果はいずれも実験値ともよく一致することを確認した．

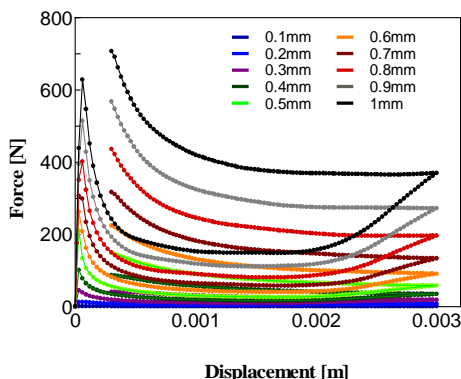


図 2 復元力特性に与える材料厚さの影響

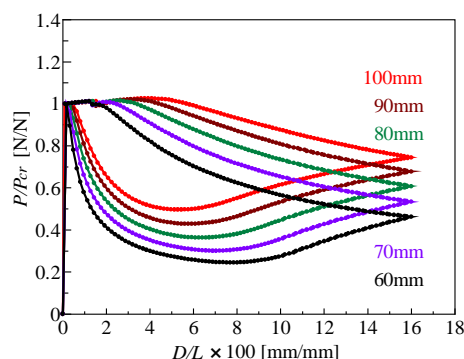


図 3 復元力特性に与える材料長さの影響

(3) 形状記憶合金の変位履歴が復元力に与える影響

変位履歴が復元力に与える影響を実験的に調査した．実験では Ti-Ni 系 SMA を用いた．図 4 および図 5 に代表的な結果の一例を示す．図 4 のように，座屈後 SMA は与える変位履歴により異なる復元力を示すこと，また，往復運動中にヒステリシス特性を示すことを明らかにした．次に SMA の除振要素への適用の準備として，SMA の復元力に対する局所的な往復運動の影響を調査した．図 6 に代表的な計測結果の一例を示す．図中の破線は，比較のための局所往復運動をしない復元力である．図のように，往復運動をおこなうことにより復元力の値がヒステリシスループを描きながら低下していることが確認される．また，往復運動の振幅が小さい場合はヒステリシスループの大きさが小さくなり，一方で振幅が大きくなるとヒステリシスループが大きくなることが確認された．図 7 には，図 6 の実験とは別の変位履歴を与えた場合の復元力を示す．図中の破線は，局所往復運動過程における復元力を一次関数で近似した場合の近似線を示している．図より，圧縮過程と形状回復過程に対する復元力は，すべての条件において同じであり，往復運動における復元力は往復運動の開始点によって異なることが確認された．また，破線の近似直線の勾配は往復運動時の接線剛性であり，図より，往復運動の開始点によって接線剛性も異なり，負の接線剛性ではなく正の接線剛性を示し，負剛性特性が発現していないことがわかる．これらの結果は，数値解析によっても同様の結果を得ている．このように，往復運動の条件により復元力や接線剛性が異なることは，振動条件によって除振性能が異なることを意味するため，除振装置としての使用には注意を必要とする．

上記に挙げた除振装置として最適とは言えない特性は，Ti-Ni 系 SMA のもつ材料特性の応力-ひずみ曲線におけるヒステリシスの大きさに依存していると考えられる．このような特性を解消し，往復運動時に適切な負剛性を得るためには，ヒステリシスの小さい材料の使用が考えられる．そこで，ヒステリシスの小さい SMA を模擬した有限要素モデルを用いて座屈後復元力の調査を行った．具体的には，Cu-Al-Mn 系 SMA を想定している．図 8 に得られた復元力を示す．図のように，圧縮過程において復元力は 4 % 以上の変位領域で負剛性特性を示し，また，形状回復過程においても同様の変位領域で負剛性特性が発現し，微小なヒステリシスを描くことが分かる．この特性は，いずれの領域，変位履歴においても安定した負剛性が得られることを意味しており，除振要素に適した材料であることを示している．

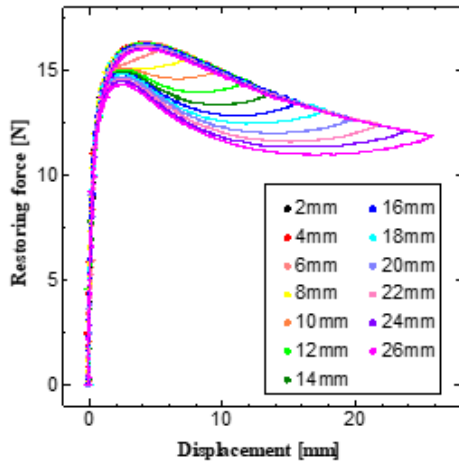


図4 変位履歴による座屈後復元力特性(I)

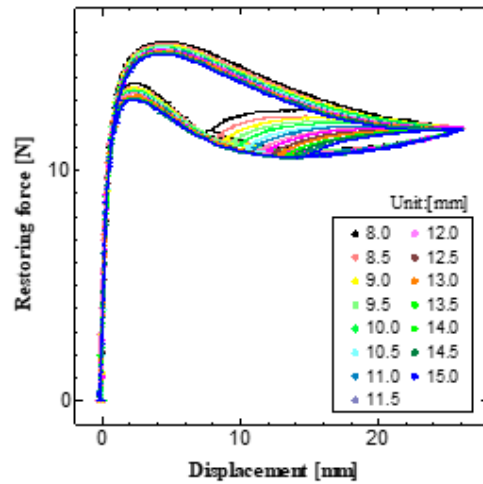


図5 変位履歴による座屈後復元力特性(II)

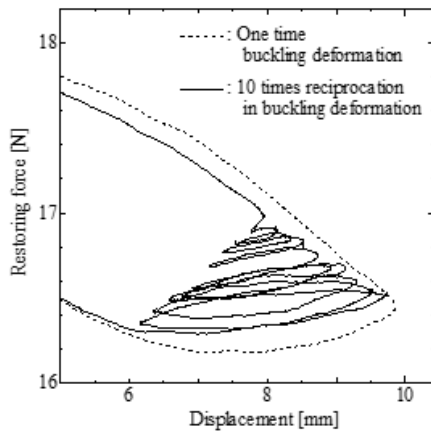


図6 局所往復運動に対する復元力特性(I)

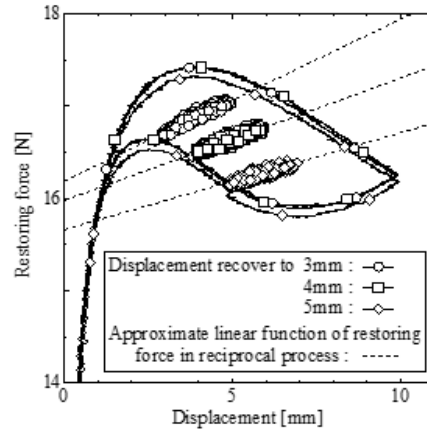


図7 局所往復運動に対する復元力特性(II)

(4) 座屈後形状記憶合金の動的力学特性

上記に示す実験および解析はすべて静的または準静的な解析・測定結果を示している。除振要素に座屈後 SMA を適用する際は、SMA にかかる荷重や変位が常に変動するため、動的な力学特性の把握が必要となる。そこで、座屈速度が復元力に与える影響を実験的に調査した。この実験においても Ti-Ni 系 SMA を用いている。図9に代表的な結果の一例を示す。この実験より、与える速度が増加するほど、往復運動時の復元力のヒステリシスループが大きくなることを明らかにした。即ち、除振要素として適用する際は、高周波領域において大きな構造減衰が見込まれることが分かる。本特性は、座屈後 SMA の高次振動モードの励起を抑える効果として期待される。

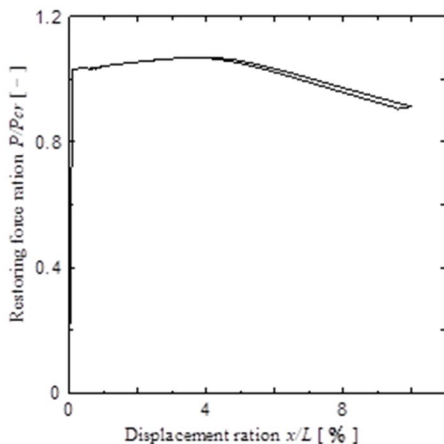


図8 Cu-Al-Mn 系 SMA を想定した有限要素解析

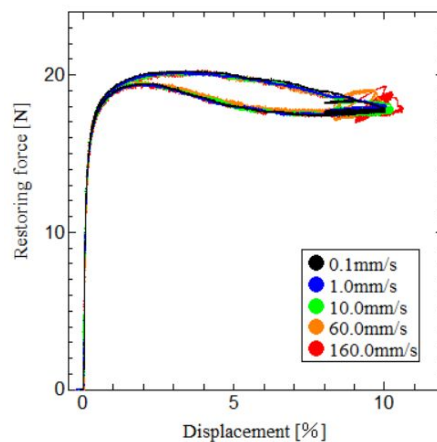


図9 座屈後 SMA の速度依存性

(5) 座屈後形状記憶合金を用いた除振装置の性能評価

以上に示した座屈後 SMA の基本特性を援用した除振装置を試作し、その性能を評価した。試作した除振装置の写真を図 10 に示す。図のように、ダミーの除振対象が 2 本の形状記憶合金およびコイルばねによってフレームに支持されている。フレームは鉛直方向の加振器に固定されており、除振対象はリニアガイドにより鉛直方向以外の方向の変位を拘束されている。この時、除振対象の重量が形状記憶合金の座屈荷重よりも大きければ、形状記憶合金は座屈し、一定の座屈後変位で静的平衡状態となる。コイルばねの初期変位を調整することで静的平衡点の位置を任意に調整することが可能である。この状態で鉛直方向の振動が加えられた場合、座屈後 SMA の力学特性により、除振性能が発揮されることが期待される。以下では性能評価の一部を示す。

図 11 は、研究代表者らが既存研究で提案した座屈後 型はりをを用いた除振装置と本研究で提案した座屈後 SMA を用いた除振装置の振動伝達率の比較を示す。図の黒線は 型はりモデルの周波数応答を示しており、数値解析と実験で得られた結果をそれぞれ、破線と実線で示している。また、座屈後 SMA を用いた除振装置の周波数応答については、SMA の負剛性を相殺するコイルばねを付したモデルの結果を青実線で、また、座屈後 SMA の正剛性領域を用いた場合を赤実線で示している。図のように、座屈後 SMA を用いた場合、座屈後 型はりモデルで問題になった 2 次モードおよび数十 Hz ~ 数百 Hz の範囲に存在する高次モードの励起が抑制されていることが分かる。このことから、SMA はりの特性が除振装置に適用する材料として有効であるということが確認される。また、座屈後 SMA では系の 1 次共振ピークも小さく抑えられていることが分かる。これは SMA の構造減衰が大きく寄与しているものと考えられる。さらに、座屈後 SMA の負剛性を利用した場合は、正剛性を利用した場合に比べて、1 次固有振動数を約 1Hz 低減することを可能とした。

次に、他の材料を用いた除振装置を試作し、それぞれの除振性能を比較することで SMA の性能評価を行った。材料としては SUS 系板ばね材、BeCu、Ti-Ni 系 SMA (負剛性利用+コイルばねあり) の 3 種類とした。図 12 にそれぞれの材料を用いた場合の振動伝達率を示す。図より、高周波領域においては BeCu の方が高い除振性能を示しているが、SMA を用いた場合は 1 次共振ピークが抑えられており、除振領域が広く取れていることが分かる。

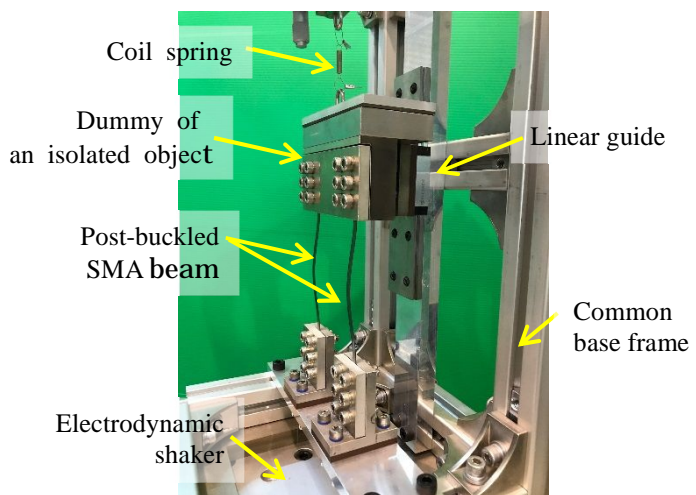


図 10 座屈後形状記憶合金を利用した鉛直方向除振装置の試作機

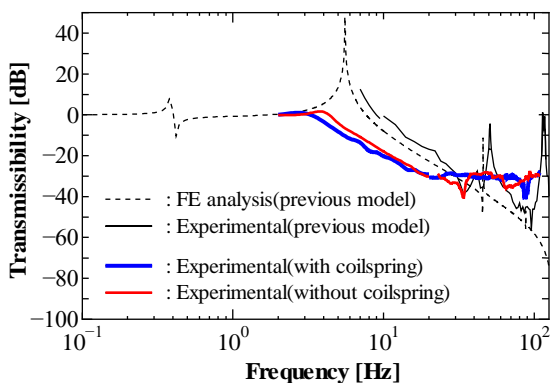


図 11 周波数応答に対する負剛性の影響

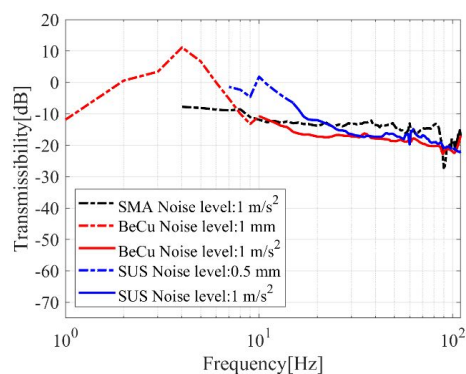


図 12 各種材料による周波数応答の比較

(6) 研究成果のまとめと今後の展望

本研究では、座屈後形状記憶合金の力学特性を詳細に調査し、その特性を鉛直方向のパッシブ除振装置に適用することを検討した。力学特性の調査では、座屈後形状記憶合金の復元力に与える相変態の影響、材料長さ・厚さの影響、変位履歴の影響、また、動的力学特性等を示し、形状記憶合金を応用するための多くの基礎データを示した。この結果得られた力学特性を除振装置に援用することで、従来に比べて簡便・小型な構成で鉛直方向の準ゼロ剛性を実現して除振性能を向上させることを示した。さらに、履歴特性によって高次モードを抑制し、バックラッシュのない構造を、従来装置に比べて簡便な構成可能であることを示した。今後は、このような除振装置の産業界へ応用することが期待される。また、座屈後形状記憶合金の力学特性を用いて、新たなシステムの開発や既存システムを高度化するための提案が期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4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 0件）

1. 著者名 Takumi Sasaki, Yuta Kimura	4. 巻 1
2. 論文標題 Experimental Study on a Passive Vibration Isolator Utilizing Dynamic Characteristics of a Post-Buckled Shape Memory Alloy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. of the 18th Asia Pacific Vibration Conference	6. 最初と最後の頁 349-350
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 H. Cho, T. Ishii, T. Sasaki, H. Hosoda	4. 巻 1
2. 論文標題 Effects of Young's modulus on Post-buckling Characteristics of Tape-Shaped Ti-Ni Shape Memory Alloy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. of the 4th International Symposium on Biomedical Engineering	6. 最初と最後の頁 64-65
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 Takashi AKAMATSU, Takumi SASAKI, Hiroki CHO	4. 巻 なし
2. 論文標題 Study on a Passive Vibration Isolator for Vertical Direction Using Post-buckled Shape Memory Alloy Beam	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proc. of the 14th International Conference on Motion and Vibration Control	6. 最初と最後の頁 1-2
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 H. Cho, T. Sasaki, H. Hosoda	4. 巻 なし
2. 論文標題 Effect of heat-treatment temperature on the post-buckling behavior of tape-shaped Ti-Ni shape memory alloy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. of The 3rd International Symposium on Biomedical Engineering	6. 最初と最後の頁 64-65
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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14件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 浦川敦志、佐々木卓実、長弘基
2. 発表標題 数値解析による座屈後形状記憶合金の力学特性に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会Dynamics and Design Conference 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 水城佑太、薙野真平、佐々木卓実
2. 発表標題 複数の 型はりを用いた除振装置に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会Dynamics and Design Conference 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takumi Sasaki, Yuta Kimura
2. 発表標題 Experimental Study on a Passive Vibration Isolator Utilizing Dynamic Characteristics of a Post-Buckled Shape Memory Alloy
3. 学会等名 The 18th Asia Pacific Vibration Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Cho, T. Ishii, T. Sasaki, H. Hosoda
2. 発表標題 Effects of Young's modulus on Post-buckling Characteristics of Tape-Shaped Ti-Ni Shape Memory Alloy
3. 学会等名 The 4th International Symposium on Biomedical Engineering (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Ishii, H. Cho, T. Sasaki
2. 発表標題 Effects of the Volume Fraction of Martensitic-phase during Buckling Deformation on Post-buckling Behavior of Tape-shaped Ti-Ni Shape Memory Alloy Element
3. 学会等名 第29回日本MRS学術シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi AKAMATSU, Takumi SASAKI, Hiroki CHO
2. 発表標題 Study on a Passive Vibration Isolator for Vertical Direction Using Post-buckled Shape Memory Alloy Beam
3. 学会等名 The 14th International Conference on Motion and Vibration Control (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Cho, T. Sasaki, H. Hosoda
2. 発表標題 Effect of heat-treatment temperature on the post-buckling behavior of
3. 学会等名 The 3rd International Symposium on Biomedical Engineering (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 赤松高志, 佐々木卓実, 長弘基
2. 発表標題 板形状記憶合金の座屈を用いたパッシブ防振装置に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 竹内真優, 佐々木卓実
2. 発表標題 座屈後形状記憶合金を用いた防振装置に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会九州支部 北九州講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長 弘基, 佐々木 卓実, 細田 秀樹
2. 発表標題 板状Ti-Ni形状記憶合金素子の座屈後特性を用いたパッシブ除振要素の開発
3. 学会等名 SMAシンポジウム2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 浦川敦志, 佐々木卓実
2. 発表標題 形状記憶合金の座屈後力学特性の数値解析に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会九州学生会第50回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 木村祐太, 佐々木卓実
2. 発表標題 形状記憶合金の座屈を利用した防振装置に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会九州学生会第50回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石井 拓実, 植田 宗志, 長 弘基, 佐々木 卓実
2. 発表標題 板状Ti-Ni形状記憶合金素子の座屈後特性における負剛性発現メカニズムの研究
3. 学会等名 日本機械学会九州学生会第50回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長 弘基, 佐々木 卓実, 細田 秀樹
2. 発表標題 板状Ti-Ni形状記憶合金素子の座屈後特性に及ぼす熱処理の効果
3. 学会等名 平成30年度生体医歯工学共同研究拠点成果報告会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 除振装置	発明者 佐々木卓実、長弘基	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2019-035019	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
研究分担者	長 弘基 (Cho Hiroki) (00435421)	北九州市立大学・国際環境工学部・准教授 (27101)	

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