

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 5 月 19 日現在

機関番号：27101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04164

研究課題名（和文）板状形状記憶合金素子の座屈後特性を用いたパッシブ防振要素の設計基盤技術の構築

研究課題名（英文）Research and development on core manufacturing technology of passive vibration-free system using post-buckling behavior of tape-shaped shape memory alloy element.

研究代表者

長 弘基（Cho, Hiroki）

北九州市立大学・国際環境工学部・准教授

研究者番号：00435421

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：形状記憶合金(SMA)が座屈後変形時に示す負剛性特性は除振装置等に適用が期待される。本研究ではSMAの材料形状・材料断面が負剛性発現時の接線剛性(負の接線剛性値)に与える影響を調べ、実際に本材料を除振装置に適用する際に必要な、負の接線剛性値の設計計算技術の確立を目指した。結果、材料の物性値(ヤング率および応力誘起マルテンサイト変態時の剛性)と細長比にて、座屈時の負の接線剛性を計算できることを明らかにした。また材料の断面に曲率を付与することで、接線剛性値を変更可能であることも見出した。さらに、新たにCu-Al-Mn合金が除振装置に適することを見出し、その座屈疲労特性や機能劣化特性を調査した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果により、形状記憶合金の座屈後の負剛性の接線剛性値が材料の物性値と材料形状(細長比)により設計計算可能であることを明らかにした。また材料断面に曲率を付与することでも接線剛性値を変化させることが可能であり、この技術により、除振装置として板状SMA素子を使用する場合の形状設計の幅を大きく拡大させることができた。また、除振装置としてCu-Al-Mn形状記憶合金が非常に適していることを見出した。現在、得られた技術を用いて実際にSMAを用いた除振装置を試作、その特性評価を行っている。

研究成果の概要（英文）：The negative stiffness characteristics exhibited by shape memory alloys (SMA) during post-buckling deformation are useful for vibration isolators. In this study, the effects of material shape and cross-sectional shape of SMA on negative tangential stiffness value during post-buckling deformation were investigated to establish a design calculation technique for the vibration isolators. As a result, it was found that the negative tangential stiffness in post-buckling deformation can be calculated using the material's physical properties (Young's modulus and stiffness at plateau stress during stress-induced martensitic transformation) and slenderness ratio. It was also found that the negative tangential stiffness can be varied by adding curvature to the cross-section of the material. Furthermore, we found that Cu-Al-Mn SMA is suitable for vibration isolators, and investigated its buckling fatigue properties and functional degradation characteristics.

研究分野：材料工学

キーワード：形状記憶合金 座屈変形 負剛性 除振装置 Ti-Ni合金 Cu-Al-Mn合金

### 1. 研究開始当初の背景

形状記憶合金(SMA)は通常の金属では塑性変形(永久変形)が導入されるような変形を付与しても形状を回復する特性を有し、かつその変形回復過程において図1に示すようなヒステリシスを示すため、振動エネルギーを吸収することが可能である。この特性を利用した制振機構はすでに高層ビルの制振機構(図1参照)などに実用されている。

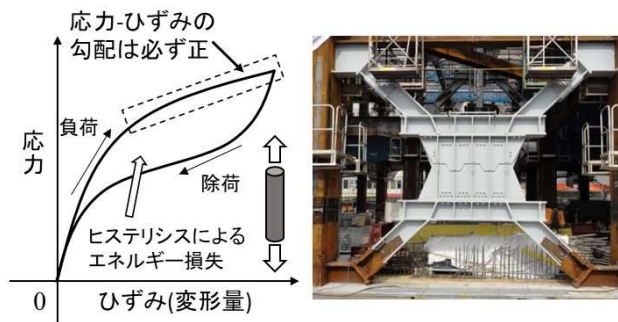


図1 超弾性特性を示すSMAの応力-ひずみ曲線と、鉄系SMAを用いた高層ビル制振機構(JPタワー名古屋)

我々研究グループは上記のようなSMAの応力ヒステリシスを利用した制振機構とは異なり、新たに発見した板状SMA素子が座屈変形時に特定の条件下にて示す負剛性(図2)を利用し、準ゼロ剛性状態を作り出すことで除振する構造減衰系を用いたパッシブ除振要素を考案・試作し振動試験等の実証試験を行っている。本要素は図2に示すようにSMAの薄板とその負剛性を相殺する正ばねのみで成立しており、従来のリンク機構などを必要とする負剛性を用いたパッシブ除振要素と比較し非常に簡素な機構で成立でき、かつリンク機構のバックラッシュの発生を考慮する必要が無い

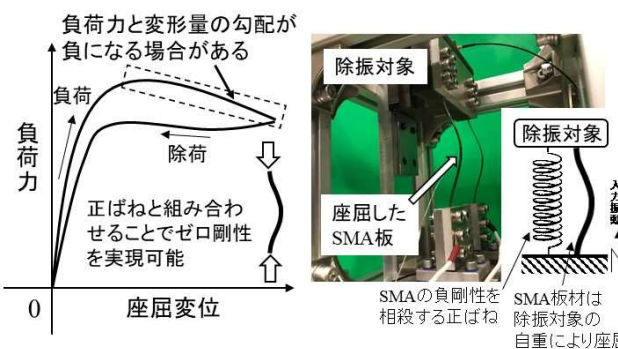


図2 座屈試験中の負荷力-座屈変位曲線と、SMA板材の座屈変形を用いたパッシブ除振装置およびその概念図

する必要があるため、MEMSなどマイクロレベルの微小振幅への対応、および高周波振動への対応が可能である。そのため本要素は、対応できる重量は10kg程度までと低いが、対応する振動振幅・周波数を大幅に拡大することを可能にする新たな除振要素として期待できる。

### 2. 研究の目的

本研究では板状SMAの材料形状が座屈後特性および除振特性に及ぼす影響を調べ、除振用板状SMA素子の形状設計のための計算技術を、材料試験およびFEM解析により構築することを目的とし、さらに構築した計算技術を用いて、実際にパッシブ除振装置を試作、実証試験の実施により開発した除振装置の有用性を確認することを目的とした。板状SMAの座屈後特性を利用した除振要素は、申請者らが新たに見出したSMAの特性を利用した機構であり、他に研究が行われていない独自の研究である。この機構は小型・軽量かつ幅広い振動に対応したパッシブ除振機構としての応用が可能のため、様々な除振対象に対応できる板状SMA素子の設計技術が確立できれば、軽量・高性能化が求められる自動車や宇宙航空分野などの分野へ適用だけでなく、MEMSを活用する民生・産業・通信分野等にも幅広く適用することが可能である。例えば本技術は、ロケットや人工衛星の打ち上げ時の振動による制御機器の破損を防止する除振機構として、革新的な技術となりうる。

### 3. 研究の方法

本研究では主に下記の3つの項目について実施した。

- ① 材料試験(座屈試験・振動試験)およびFEM解析により、板状SMA素子の座屈後特性および除振特性に及ぼす細長比や断面形状など材料形状の影響を明らかにする。

② 上記①により得られた知見より、除振対象の重量および振動条件などに最適な除振用板状 SMA 素子の形状を計算可能な設計基盤技術の構築を行う。

③ 上記②により得られた設計技術より、実際に SMA を用いた除振装置を設計・製作し、除振装置の除振特性について測定、提案する機構の実証試験を実施する。

また、上記の当初計画に追加し、下記の④の項目についても研究を実施した。

④ SMA、特に Cu-Al-Mn 形状記憶合金の座屈疲労特性・機能劣化特性を調査し、除振装置として使用可能な疲労特性・機能劣化特性を有しているかについて調査する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 板状 Ti-Ni および Cu-Al-Mn 形状記憶合金の座屈後特性

はじめに、材料試験により板状 Ti-Ni および Cu-Al-Mn SMA に対して 303 ~343 K 下にて材料試験(引張-除荷試験)を実施した。その結果を図 3(a)および(b)に示す。試験結果を確認すると、Ti-Ni SMA は 303 K および 313 K では形状記憶特性を、323 K 以上の温度域では超弾性特性を示しており、一方 Cu-Al-Mn SMA も同様、試験温度域ではすべて超弾性特性を示している。両試料の特徴を比較すると、Ti-Ni SMA は応力ヒステリシスが大きく、また環境温度の上昇により見かけ上の降伏応力(マルテンサイト誘起応力)が増加し、応力-ひずみ曲線が大きく変化する様子が確認できる。一方、Cu-Al-Mn SMA は応力ヒステリシスが小さく、応力-ひずみ曲線の温度依存性が低いことが確認できる。本研究では各材料の座屈後特性にこれらの特徴が及ぼす影響について調べ、さらに除振特性に与える影響について考察した。

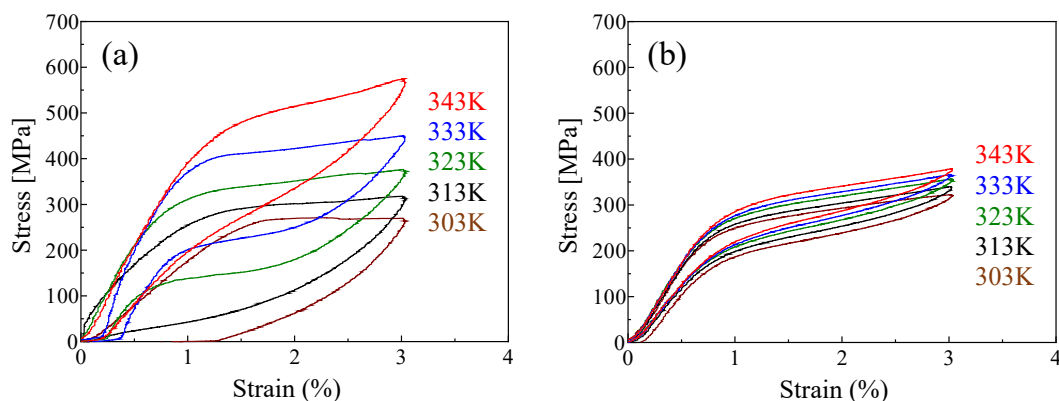


図 3 板状 Ti-Ni および Cu-Al-Mn SMA の応力-ひずみ曲線

図 4(a)および(b)に、環境温度 313~343 K における Ti-Ni SMA および Cu-Al-Mn SMA の座屈試験中における荷重と座屈変位の関係を示す。各材料の試験結果の特徴について比較すると、Ti-Ni SMA は 313 K で座屈後に明瞭な負剛性を示すが、環境温度の上昇にともない負の接線剛性が低下する傾向にある。一方 Cu-Al-Mn SMA は Ti-Ni SMA のような明瞭な負剛性は示さないものの、3%以上の座屈変位領域では負剛性を示し、また試験温度域での座屈特性は、引張試験と同様に温度依存性が少ない傾向にあることがわかる。このことから、Cu-Al-Mn SMA は Ti-Ni SMA と比較し広い環境温度下で良好な除振特性を発揮すると考えられる。

図 5(a)および(b)は、環境温度 313 K にて Ti-Ni SMA および Cu-Al-Mn SMA に対し、座屈変位 0.5 mm から 1.5 mm 区間で繰返し座屈を実施した際の荷重と変位の関係を示している。実験結果を比較すると、Ti-Ni SMA および Cu-Al-Mn SMA とともに繰返し区間で局所的なヒステリシスループ(局所ループ)が発生していることが確認できるが、各材料の局所ループ区間での接線剛性に注目すると、Ti-Ni SMA では、1 回目の負荷行程では負剛性を示すものの、2 回目以降の負荷行程および除荷行程で接線剛性がほぼゼロ、もしくは正となっていることが確認でき、この特徴は除振機構の性能低下を引き起こす。一方、Cu-Al-Mn SMA では繰返し区間で局所ループが発生する事は確認できるが、広い振幅領域にて負荷行程および除荷行程共に負剛性を示していることが分かる。この特性は、負剛性を用いた除振機構への応用時に、広い振幅領域での安定したばね

乗数のつり合いが期待できることを示唆している。

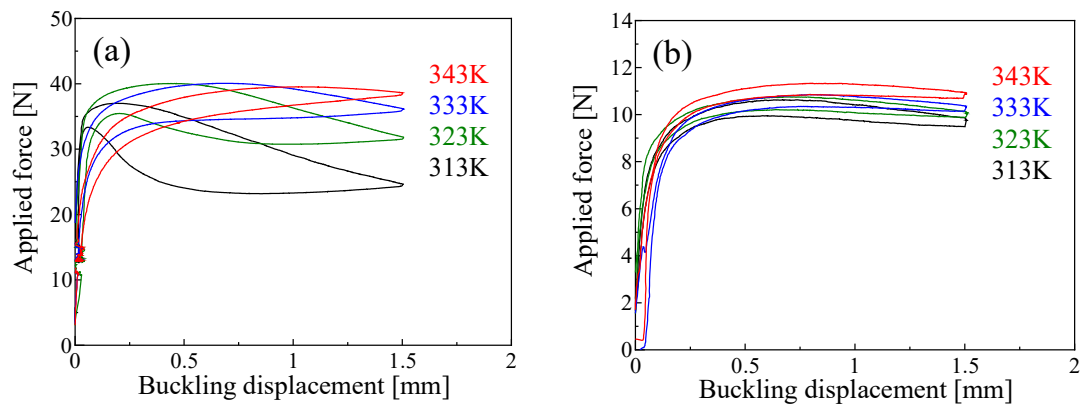


図4 板状 Ti-Ni および Cu-Al-Mn SMA の座屈試験による荷重と座屈変位の関係

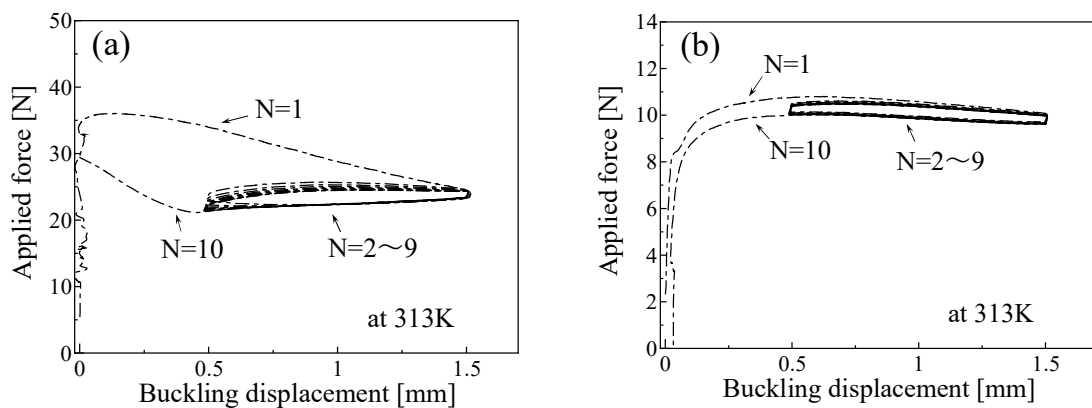


図5 板状 Ti-Ni および Cu-Al-Mn SMA の繰返し座屈試験による荷重と座屈変位の関係

さらに、FEM 解析により両 SMA 試料の座屈と癖のシミュレーション、特に座屈後の負の接線剛性は良好にシミュレーションが可能なことを明らかにした。この結果から、Ti-Ni に限らず Cu-Al-Mn SMA においても、引張試験による材料特性の計測により座屈後の接線剛性の設計計算が容易に行えることが明らかになった。

## (2) 板状 Cu-Al-Mn 形状記憶合金の座屈疲労特性

Cu-Al-Mn SMA が除振素子として非常に良好な座屈特性を有することを明らかにしたが、本材料を実際に除振素子として適用する場合、座屈疲労特性の調査は必要不可欠である。そこで本材料に対し繰返し座屈試験を実施し、座屈疲労特性と機能劣化特性を調査した。図6に繰返し座屈試験により得られた付与ひずみ 5%, 10%におけるサイクル数と  $P_{cr}$  の関係を示す。なお、付与ひずみ 5%, 10%における破断サイクル数の平均はそれぞれ  $N=151,982$ ,  $N=18,472$  であった。また、すべての試料は試料の中央部にて破断していた。付与ひずみに関わらず、 $P_{cr}$  は  $N=1 \times 10^3$  までは比較的安定な状態にあると言える。しかしながら、付与ひずみ 10%では  $N=1 \times 10^4$  を超えると大きく  $P_{cr}$  が減少し、直後に破断に至った。一方、付与ひずみが 5%の場合は  $N=1 \times 10^5$  程度まで安定的な座屈挙動を示すが、 $N=1 \times 10^5$  を超えると大きく  $P_{cr}$  が減少し、これも同様に直後に破断に至った。以上の結果から、ある変形サイクル数を超えた場合の反力の急激な低下は本試料の本質的な挙動であり、またこの反力の急激な低下は試料破断の前駆現象であると考えられたため、破断した材料表面の SEM 観察を行った。

図7に付与ひずみ 10%の繰返し座屈試験により破断した試料の破断部付近の試料表面部の SEM 写真を示す。なお、観察面は座屈変形により凸形状に突き出す方向を上とし、上方向にある面を試料表面、その逆を裏面とし、図8(a)は表面、(b)は裏面の SEM 写真である。表面の SEM 写真を確認すると、試料の軸方向に対して垂直に近い方向への亀裂が複数確認された。また亀裂はいわゆる応力腐食割れ特有の枝分かかれ状に近い形状であった。そのため、これらの亀裂は粒界



破壊による亀裂であると考えられた。また他にも複数の亀裂が確認され、さらにそれらの亀裂が亀裂同士で繋がっている箇所も複数確認された。このことから、本試料の破断のプロセスは、これら亀裂は繰返し変形による粒界破壊によって形成されたものであり、この粒界破壊による亀裂が様々な個所で同時に発生、繋がっていくことで大きな亀裂となり、最終的に破断に至るものと考えられた。一方、裏面の破断部付近表面を観察すると、表面で見られたような多数の亀裂が確認できず、また破断部以外に亀裂を確認できなかった。これらの結果から、試料の破断は試料の表面に発生した粒界破壊による亀裂が原因であり、裏面に亀裂が発生しない理由は、座屈変形により表面には引張変形が生じるが、裏面には圧縮の変形が生じることが原因であると考えられた。これらの結果から、本試料の除振装置への適用のためには座屈疲労特性の向上が望まれるが、座屈疲労特性向上には結晶粒界の強化が効果的であると考えられた。

そこで新たに、粒界付近にベイナイト相を形成させ粒界を強化した Cu-Al-Mn SMA を製作し、同様の実験を試みた。その結果、ベイナイト相無しの試料では座屈回数の増加とともに徐々に荷重が低下する傾向にあるが、1.4万回で大きく荷重が減少、その直後の15,020回の座屈変形中に破断した。一方ベイナイト相有りの試料では、ベイナイト相無しの試料と比較し荷重の減少が大きいが、1万~1.6万回間では座屈荷重はほぼ一定の値で推移し、1.8万回で急激な減少を示した後、19,808回目に破断に至った。これら結果から、ベイナイト相の形成は疲労特性を向上させることがわかった。

一方、機能劣化特性を比較した結果、ベイナイト相無しの試料では減少率がベイナイト相有りの試料に対して大きく、機能劣化特性が悪化していることがわかった。そのため、ベイナイト相の形成は、疲労特性を向上させるものの、機能劣化特性を低下させる傾向にあることがわかった。これら結果から、ベイナイト相の形成による結晶粒界の強化は、本材料の特性向上には適さないことが明らかとなった。そのため今後、ベイナイト相の形成とは異なる方法にて結晶粒界を強化した Cu-Al-Mn 材に対する研究を行う予定である。

### (3) 現在進行中の研究

現在、本課題により得られた結果などから、下記の研究を継続中である。

- (a) 得られた設計計算技術により試作した除振装置の性能試験(2023年度に発表予定)
- (b) 結晶粒界をさらに強化した新たな Cu-Al-Mn SMA の疲労特性・機能劣化特性の研究
- (c) 板状 SMA 素子の断面に曲率を付与したコンパックステーブ状 SMA の座屈特性の研究

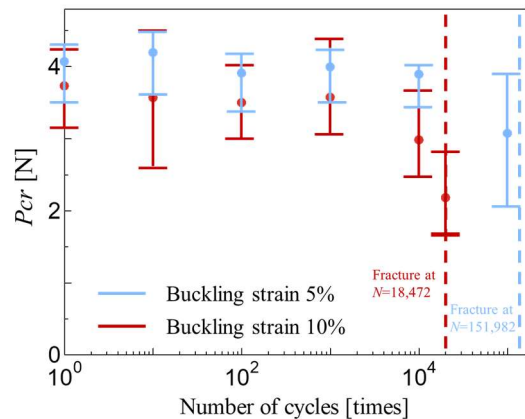


図6 板状 Cu-Al-Mn SMA の繰返し座屈試験回数(N)と座屈荷重(Pcr)の関係

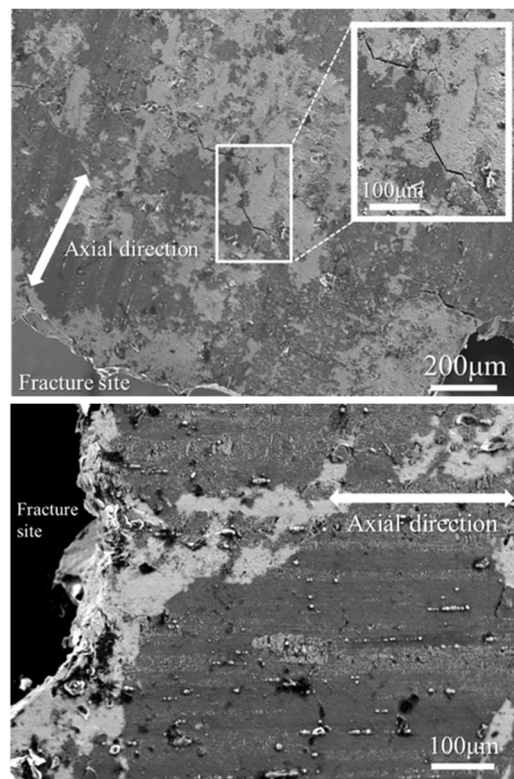


図7 繰返し座屈試験により破断した Cu-Al-Mn SMA の SEM 観察結果

## 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 川原 京也, 土井 祐樹, 長 弘基, 佐々木 卓実	4. 巻 -
2. 論文標題 板状Cu-Al-Mn形状記憶合金素子の座屈特性に及ぼす繰返し座屈変形の影響	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本ばね学会 ばね論文集	6. 最初と最後の頁 -
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hiroki Cho, Sho Nagamatsu, Takumi Sasaki	4. 巻 11
2. 論文標題 Study on Buckling Characteristics of a Convex Tape-Shaped Ti-Ni Shape Memory Alloy Element for Application to Passive Vibration Isolator Devices and Force Limit Devices	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Actuators	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/act11030088	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 Doi Y., Ishii T., Cho H., Sasaki T.	4. 巻 46
2. 論文標題 Effects of the Volume Fraction of Martensitic-phase during Buckling Deformation on Post-buckling Behavior of Tape-shaped Ti-Ni Shape Memory Alloy Element	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Transactions of the Materials Research Society of Japan	6. 最初と最後の頁 3~8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14723/tmrsj.46.3	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13件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 長 弘基; 佐々木 卓実; 松田 鶴夫
2. 発表標題 板形状形状記憶合金素子の座屈特性を用いた応用機器の研究開発
3. 学会等名 日本機械学会M&M2022 材料力学カンファレンス
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 永松 昇;長 弘基;佐々木 卓実
2. 発表標題 コンベックステープ状Ti-Ni形状記憶合金素子の座屈特性および座屈形状に及ぼす断面曲率の影響
3. 学会等名 日本機械学会M&M2022 材料力学カンファレンス
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川原 京也;長 弘基;佐々木 卓実
2. 発表標題 板状 Cu-Al-Mn 形状記憶合金素子の座屈疲労・機能劣化特性に及ぼす内部組織の影響
3. 学会等名 日本機械学会M&M2022 材料力学カンファレンス
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中嶋 柊斗;長 弘基;佐々木 卓実
2. 発表標題 FEMによるコンベックステープ状Cu-Al-Mn形状記憶合金素子の座屈特性解析
3. 学会等名 日本機械学会 九州支部 九州学生会第54回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川原 京也, 長 弘基, 佐々木 卓実
2. 発表標題 板状Cu-Al-Mn 形状記憶合金素子の座屈特性に及ぼす繰返し座屈変形の影響
3. 学会等名 日本ばね学会 2022年度 春季講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 永松 昇, 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特性に及ぼす素子断面の曲率の影響
3. 学会等名 日本ばね学会 2022年度 春季講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川原 京也, 長 弘基
2. 発表標題 板状Cu-Al-Mnの座屈変形における疲労・機能劣化特性
3. 学会等名 形状記憶合金協会 第12期講演会、ポスター発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 土井 祐樹, 長 弘基, 佐々木 卓実
2. 発表標題 板状Cu-Al-Mn 形状記憶合金素子の座屈後特性に及ぼす材料長さの影響
3. 学会等名 日本機械学会M&M2021 材料力学カンファレンス
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 任 啓智, 佐々木 卓実, 長 弘基
2. 発表標題 数値解析による座屈後Cu系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 2021
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 土井 祐樹, 長 弘基, 佐々木 卓実
2. 発表標題 板状Cu-Al-Mn 形状記憶合金素子の座屈特性に及ぼす環境温度の影響
3. 学会等名 第30回日本MRS年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 土井 祐樹, 長 弘基, 佐々木 卓実
2. 発表標題 板状Cu-Al-Mn形状記憶合金素子の座屈後特性に及ぼす環境温度の影響
3. 学会等名 形状記憶合金協会 (ASMA) Webポスター発表
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 戸部 裕史, 水本 将之, 松枝 里奈, 佐藤 英一
2. 発表標題 形状記憶合金薄板における大変形曲げ応力分布の有限要素評価
3. 学会等名 日本金属学会2023年春季(第172回)講演大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 戸部裕史
2. 発表標題 有限要素法による形状記憶合金薄板の大変形曲げ挙動評価
3. 学会等名 第37回宇宙構造・材料シンポジウム
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

北九州市立大学・長研究室ホームページ  
<https://hiroki-cho.jimdofree.com/>

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	戸部 裕史  (Tobe Hirohumi)  (40743886)	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   (82645)	2022年度9月より岩手大学に異動。
研究分担者	佐々木 卓実  (Sasaki Takumi)  (80343432)	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
---------	---------