

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月25日現在

機関番号：27101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K17982

研究課題名(和文)形状記憶合金の機能劣化抑制技術および布状アクチュエータ制御システムの構築

研究課題名(英文) Establishment of the function deterioration inhibition method of shape memory alloy and the control system of cloth-shaped actuator using shape memory alloy.

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) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：形状記憶合金(SMA)細線を編み物の緯糸状に配置し、経糸としてアルマイト線を編み込むことで、通電により動作する布状アクチュエータ素子を開発、この素子を用いた緯糸型SMAアクチュエータを開発し、その動作特性を調査、良好な特性を有するアクチュエータの形状設計を行った。また開発したアクチュエータを三次元的な湾曲形状に動作させることを目的とした屈曲動作緯糸型SMAアクチュエータを試作、この動作特性を調べた。また、SMAの機能劣化抑制技術についても研究を行い、SMAに対し約0.7%の与ひずみを付与した状態で使用することにより、SMA素子の連続使用による機能劣化が抑制される可能性があることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究にて、実用的な出力を有するSMAを用いた布状アクチュエータ素子とその制御方法を確立できた。本技術を用いれば、現在開発が行われている福祉用スマートスーツへ本技術を応用することで、現在主として使用されているモーターやゴムなどとは異なる特性を有する駆動素子として使用でき、スマートスーツのさらなる高性能化が期待できる。またSMA素子の機能劣化を抑制するための新たな使用条件を明らかにした。本技術は新たな用途だけでなく、現在応用・使用されているSMA素子の機能劣化を抑制するための技術としての使用が可能である。

研究成果の概要(英文)：For the purpose of actualizing both an increase of output and maintaining the positioning accuracy of the SMA actuator using resistance feedback control method, a weft yarn-type SMA actuator was devised and produced. Moreover, the bending operation actuator using this weft yarn-type SMA element was devised and produced. In this study, the effects of design conditions of the weft yarn-type SMA element on the bending operating characteristics of the actuator were investigated. As the result, the optimization of installation condition of the SMA element was carried out. Meanwhile, the function deterioration inhibition method of SMA was investigated. As the result, it was found that function deterioration of the SMA might be inhibited by the 0.7% pre-applied strain.

研究分野：金属工学，材料工学

キーワード：形状記憶合金 アクチュエータ 医療・福祉機器

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

Ti-Ni 系形状記憶合金(SMA)は加熱による形状回復時に優れた形状回復ひずみおよび形状回復力を発現するため、通電による抵抗加熱により駆動するアクチュエータ素子として研究されている。しかし現状の SMA アクチュエータは基本、1本の SMA 線材を通電により動作させる機構である。この SMA を編むことで布状(メッシュ)にし、かつ立体的な動作が可能なアクチュエータとして使用できれば、全身の動作をサポート可能なアシストスーツ用の駆動素子としての応用が期待できる。この SMA メッシュは、現在アシストスーツ用の駆動素子として用いられている他の要素であるモーターおよびゴムと比較すると、モーターと比較し低出力だが軽量、ゴムと比較し重量だが高出力かつ駆動制御可能、という特徴を持つと試算される。

SMA メッシュ素子を通電による駆動制御可能なアクチュエータ素子として使用する場合、通電時の金属線同士の短絡を防ぎ、かつ SMA メッシュ素子の立体的動作を制御するシステムを開発する必要がある。

申請者は、SMA を用いた低温排熱エネルギー回収機構である SMA 熱エンジンの製造コストの低減、および耐久性・出力特性の向上を目的に、エンジンの駆動素子として SMA 線と SUS 線を編んだ SMA メッシュ素子(図 1)を製作、研究を行っていた。この SMA メッシュ素子を通電による抵抗値制御アクチュエータに対応させるため、SMA 線と絶縁性を有するアルマイト被覆アルミ線を組み合わせて編むことにより、通電時の金属線同士の接触による短絡を防ぐ SMA メッシュ素子を考案。本研究の着想に至った。

また、SMA 素子は繰り返し使用により機能劣化が起るため、製品寿命がモーターやゴム製品などと比較し短いという欠点を持つ。そのため、SMA 素子の機能劣化特性の向上は上記メッシュ素子の実用化のためには不可欠である。

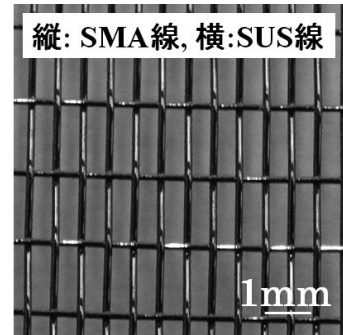


図 1 試作した SMA メッシュ素子.

2. 研究の目的

本研究では、SMA アクチュエータ実用化のための高出力化と利便性向上を目指し、SMA の機能劣化抑制技術の構築と、SMA 細線を編むことにより作製した SMA メッシュ素子を用いた布状のアクチュエータ「SMA メッシュアクチュエータ」を作製、さらにこのアクチュエータを用いた立体的(屈曲)動作可能なアクチュエータを試作、その特性評価を行うことを目的とした。

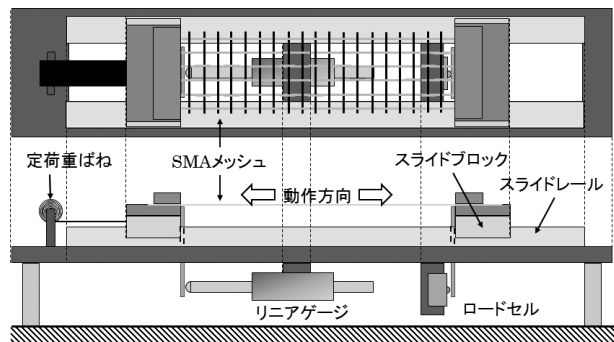


図 2 SMA メッシュアクチュエータの概略図

3. 研究の方法

(1) SMA の機能劣化抑制技術の構築

Ti-Ni 系 SMA は時効熱処理による適切な析出物形成と、ひずみ付与下での熱処理による加工組織の維持により機能劣化が抑制されることが明らかになっている。そこで本研究では、ひずみ付与下での時効熱処理が Ti-Ni 系 SMA の機能劣化特性に及ぼす影響について、形状記憶・機械的特性の変化を金属の組織観察による金属学的見地から調査・考察することで、Ti-Ni 系 SMA の材料強化機構を解明し、新たな機能劣化抑制技術を構築する。

(2) 布状 SMA アクチュエータの駆動制御技術の構築

抵抗値制御法により位置保持制御が可能な布状 SMA アクチュエータ(図 2)を試作、動作特性および耐久性を評価する。また上下に SMA メッシュアクチュエータを配置し、それぞれのアクチュエータを独立的に駆動させることで立体的(湾曲)動作が可能な屈曲動作 SMA メッシュアクチュエータの駆動システムを試作、この SMA アクチュエータの立体的動作制御システムを構築し、その動作特性評価を行う。

4. 研究成果

(1) SMA の機能劣化抑制技術の構築

形状記憶合金の機能劣化特性の向上を目指し、下記の順にて研究を行った。

加熱-冷却サイクルの付与による機能劣化の特性を調べ、機能劣化の進行状態を調べる
与ひずみ付与形状記憶処理を施した SMA 素子の機能劣化特性を調べ、その効果を調べる

では、使用する Ti-Ni-Cu 形状記憶合金の機能劣化の様子について調査するため、アクチュエータとしての動作である、変形付与下での加熱-冷却サイクル試験を行い、サイクル試験後の

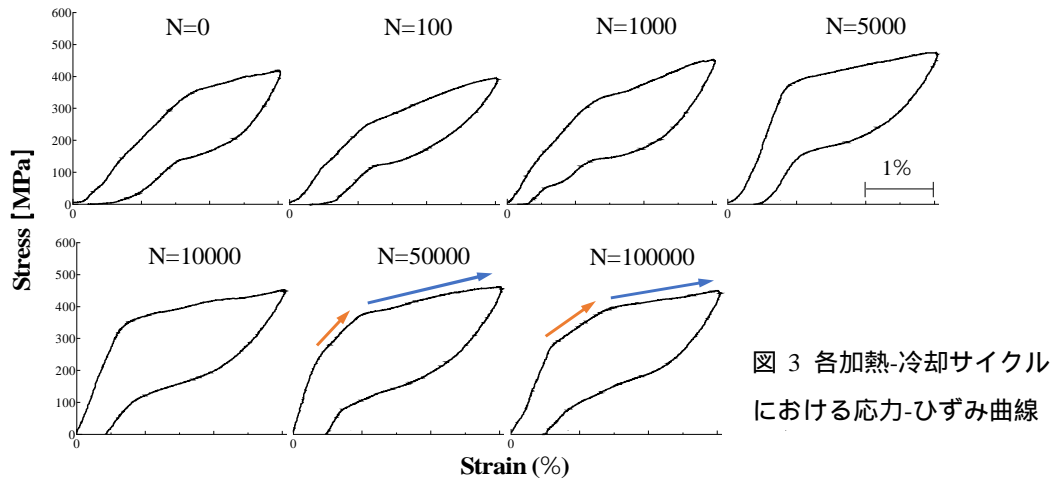


図 3 各加熱-冷却サイクルにおける応力-ひずみ曲線

サンプルの形状記憶・機械的特性を調査した加熱冷却サイクル数を N とし、検証は、 $N=1, 100, 1000, 5000, 10000$ として、熱サイクルが SMA 素子の機械的・形状記憶特性に及ぼす影響を調べた。図 3 に各熱サイクルを施した試料に対し引張試験を実施した際に得られた応力-ひずみ曲線を示す。 $N=1000$ までは形状記憶特性が安定しないが、 $N=5000$ から安定状態となり長期間ほぼ同等の状態にて使用が可能だが、 $N=50000$ 回にて二段階変態が発生し、その後はこの二段階領域が拡大する傾向にあることがわかった。XRD の結果から、この二段階領域の拡大は繰り返し変形に伴う残留マルテンサイト相の増加による内部応力の発生が原因であることが明らかとなった。そのため、これら内部応力の発生をオミットするような内部応力を初期から導入することで機能劣化の抑制が図れる可能性があることがわかった。

の結果を受け、では、付与する変形とは逆方向の変形状態で形状記憶した状態の試料を作製し、熱サイクル中に発生する内部応力とは逆方向の内部応力を発生させるようにした場合の疲労特性の変化について調べた。また、発生させる内部応力の最適化を図るため、付与する逆方向変形量をひずみ換算にて 0.5、0.7、1.0% と変化させた材料(ひずみの増加にともない、内部応力は増加する)を用意し、材料が発生する回復仕事量の減少傾向について調べた。その結果を図 4 に示す。図に示すように、付与ひずみの増加にともない、発生仕事量の減少が増加する様子が見られる。しかしながら、0.5% と 0.7% の試料には大きな差が見られない。この付与ひずみが大きいほど残留マルテンサイト相の増加が抑制できるため、最適な内部応力はひずみ換算にて 0.7% 程度の変形を付与する程度の応力であると結論づけられた。

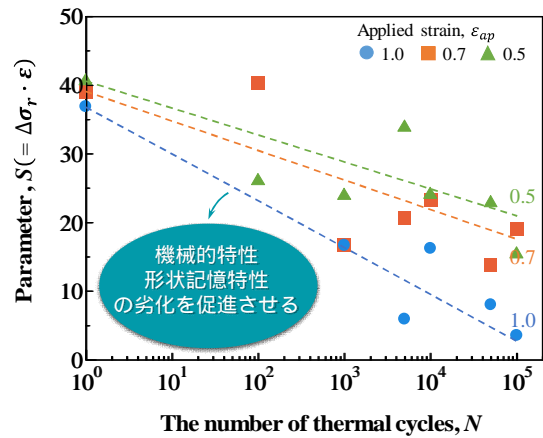


図 4 各付与ひずみ材の熱サイクルと発生仕事量の関係

(2) 布状 SMA アクチュエータの駆動制御技術の構築

布状 SMA アクチュエータの駆動制御技術の構築を目指し、下記の順にて研究を行った。

布状 SMA アクチュエータの配置アルマイト線数が動作特性に及ぼす影響の調査

布状 SMA アクチュエータを用いた屈曲動作アクチュエータの開発とその動作特性

では、当初は図 1 および図 2 に示すような、SMA 線とアルマイト線を編むことにより作製する SMA メッシュ素子の使用したアクチュエータを試作し、7Kgf 以上の出力を有するアクチュエータとして制御できることを明らかにしたが、本アクチュエータは複数の SMA のセンシング制御が必要となり、抵抗値フィードバック制御法でも位置保持制御が困難であることが明らかとなった。

そこで新たに、図 5 に示すように、1 本の SMA 線を織物の緯糸状に配置し、経糸方向にアルマイト線を縫い込むことで、1 本の SMA 線の制御のみで、従来のアクチュエータと比較し数倍の出力を有する布状の SMA アクチュエータ「緯糸型 SMA アクチュエータ」を考案、試作した。試作したアクチュエータの概要を図 6 に示す。本アクチュエータは、図 2 にて示したアクチュエータの機構ほぼそのまま、新しい SMA 素子に対応させたものである。

アクチュエータに編み込まれる経糸アルマイト線は、SMA 素子に一定間隔で編み込むことで設置した。設置するアルマイト線の本数は 0、10、20、30 本であり、それぞれの条件においてアクチュエータ動作特性を測定することで経糸アルマイト線の本数がアクチュエータの動作特性におよぼす影響について調べた。

設置アルマイト線の本数と立上り・立下り位置保持精度の関係を図7および図8に示す。立上り・立下りに関わらず位置保持精度はアルマイト線の設置により大きく低下するが、アルマイト線の本数の増加にともない上昇する傾向にある。この傾向も速度と同様、アルマイト線の設置による冷却効率の増加と駆動抵抗の増加が原因であると考えられる。本研究では SMA 線への電力制御を PWM 制御により行っている。PWM 制御では電圧の ON-OFF 時間が設定されているため、電圧 OFF 時は通電が止まり、SMA 線が冷却される。電圧が ON に復帰してすぐ位置保持制御が行われるが、この冷却期間の存在により SMA 線が位置保持制御中に振動する。この振動の振幅は冷却効率の増加により増大すると考えられ、アルマイト線の設置による冷却効率の増加は位置保持中の振動の増加を引き起こし、結果として位置保持精度の低下を引き起こすと考えられる。しかしながら、アルマイト線の設置による駆動抵抗の増加はこの位置保持制御中の振動振幅を低下させる効果を有すると考えられる。そのためアルマイト設置数の増加にともなう駆動抵抗の増加は位置保持精度を向上させると考えられる。

また、アルマイト線の増加は速度の低下をもたらすことがわかり、本アクチュエータでの最適なアルマイト線の本数は約 20 本(線の間隔は約 15mm)であることがわかった。

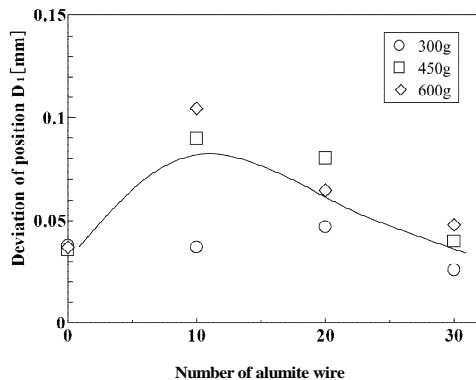


図 10 設置アルマイト線の本数と立上り位置保持精度の関係

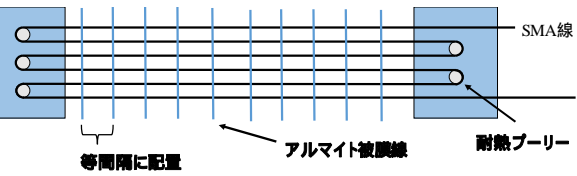


図 5 緯糸型 SMA アクチュエータ素子の概要図

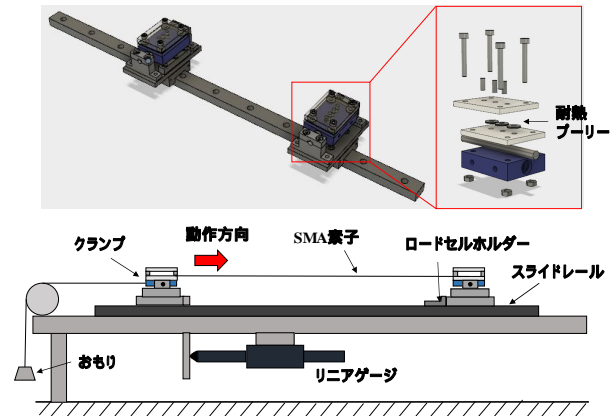


図 6 緯糸型 SMA アクチュエータ装置の概要図

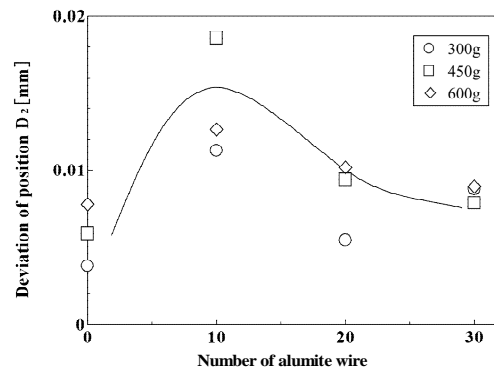


図 11 設置アルマイト線の本数と立下り位置保持精度の関係

では、で試作した緯糸型 SMA アクチュエータを用いた屈曲動作可能な SMA アクチュエータを試作、その動作特性を調べることがを目的に研究を行った。試作したアクチュエータの概要を図 12 に示す。本機構は、基本機構は図 6 で示した緯糸型 SMA アクチュエータと同様の機構で構成されているが、駆動素子である SMA 線の上には直線形状のポリエチレンテレフタレート(PET)板が固定されており、PET 板の弾性力により SMA 素子が水平方向に伸長する構造となっている。さらに PET を用いた固定器具により、SMA 素子と PET の板を上下方向に拘束している。この拘束により、SMA 素子が通電により収縮すると、パイメタル同様の動作原理により、SMA 素子と PET の板が、PET のある方向(図中では鉛直上方向)に凸の形状に湾曲する機構である。しかしながら、本アクチュエータは PET 板と SMA 線を上下方向で拘束する必要があり、またこの拘束は SMA 線の左右方向を高速してはならない。本装置では POM 棒材を使用し、できるだけ SMA 線との接触面積を低減させた拘束具を製作し使用したが、アクチュエータの良好な動作のためには、本拘束具の配置条件の最適化が必要とな

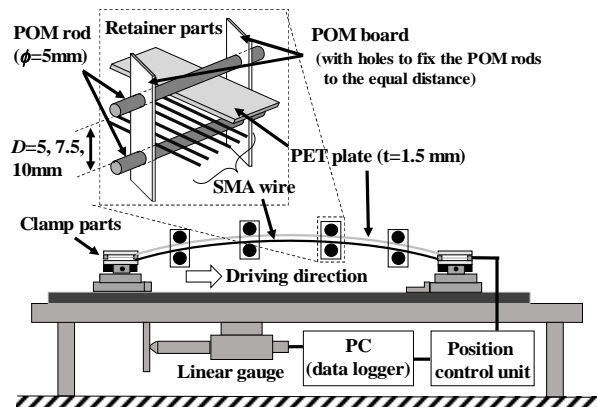


図 12 屈曲動作 SMA アクチュエータの概要図

る。そこで上下方向の拘束条件(SMA 線と PET 板の距離および拘束箇所数)がアクチュエータの動作特性に及ぼす影響について調べた。

図 13 に拘束具の個数(拘束箇所数)とアクチュエータの湾曲高さ(湾曲後頂点部と初期位置の差)の関係を示す。図に示すように、拘束する際の PET 板と SMA 線の距離(D)の減少にともない湾曲高さが増加する傾向にあることがわかる。これは図 21 の説明図に示すように、 D の減少にともないアクチュエータ湾曲部の中立軸からの距離が低下し、少ないひずみでより大きな変形が可能となり、アクチュエータ湾曲部の円弧の半径(曲率半径)が低下、結果としてより高い湾曲高さが得られたと考えられる。一方、固定箇所数(N)の増加にともない湾曲高さは増加し、最大値を取った後飽和、もしくは減少に転ずる傾向にあることがわかる。これは N の増加にともない、SMA 線の湾曲形状が円弧に近くなり、形状変化のための変形抵抗が減少するが、 N の増加により変形のための摩擦力が増加することが原因であると考えられる。

図 14 に、先の実験で得られた、本アクチュエータの最適高速条件である、 $N=6$ の条件にて動作試験を行った際の立ち上がり(直線形状から湾曲形状への変形)時の速度(V_{SH})と立下り(湾曲形状から直線形状への変形)時の速度(V_{SC})と D の関係を示している。図に示すように、 V_{SH} は D の増加にともない上昇するが、 V_{SC} は下降する傾向にあることがわかる。これは湾曲高さの変化の際に説明したように、アクチュエータの曲率半径の増加(D の増加)にともなう変形抵抗の低減が原因であると考えられる。 D の減少により変形抵抗が増加するため、立ち上がり動作は疎外され速度は上昇するが、立下り動作の際はこの変形抵抗の力を利用し形状復帰が行われるため、速度が低下したものと考えられる。

これら結果から、拘束条件は湾曲アクチュエータの動作に大きく影響することを明らかにした。現在、本アクチュエータのさらなる性能向上のため、PET 板を廃し、1 対の緯糸型 SMA アクチュエータを上下方向に配置することで駆動する屈曲動作アクチュエータを試作中である。

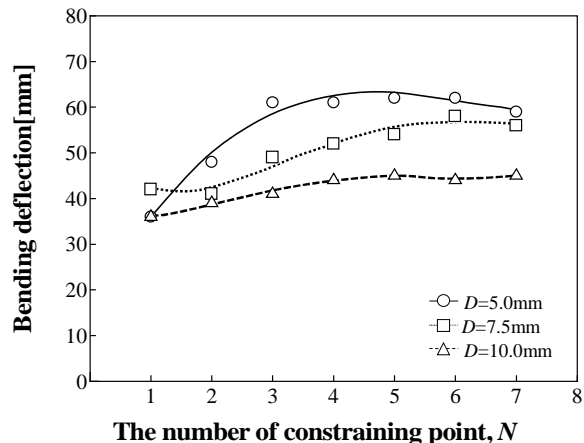


図 13 拘束箇所数とアクチュエータ湾曲高さの関係

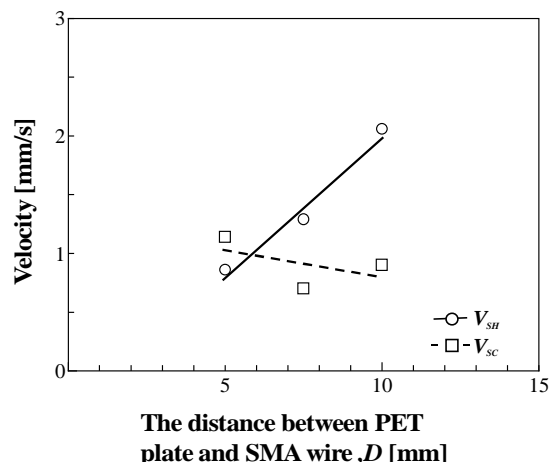


図 14 アクチュエータの立ち上がり速度および立下り速度と拘束箇所数の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件, 全て査読有)

- 1) K. Saka, H. Cho, Y. Takeda “The Effect of Constraint Conditions on the Bending Operating Characteristics of a Weft Yarn-type Shape Memory Alloy Actuator” Transactions of the Materials Research Society of Japan, (In Press).
- 2) C. Nakagawa, H. Cho “Effects of Heating and Cooling Cycle on the Shape Memory and Mechanical Characteristics of Tape-shaped Shape Memory Alloy Element” Transactions of the Materials Research Society of Japan, 43[1] (2018) 19-22.
- 3) H. Cho, K. Yamada, T. Okino “New Analytical Method of Interdiffusion Problems” Journal of Modern Physics, Vol.9 No.2 (2018) 130-144.
- 4) T. Okino, H. Cho, K. Yamada “Fundamental Concept of Interdiffusion Problems” Journal of Modern Physics, Vol.8 No.6 (2017) 904-918.
- 5) C. Nakagawa, H. Fujiki, H. Cho “Effects of Heat-treatment Temperature on Shape Memory Characteristics of a Tape-shaped Ti-Ni Alloy Element Fabricated by a Centrifugal Casting Method” Transactions of the Materials Research Society of Japan, 42 [3] (2017) 69-72.

〔学会発表〕(計 7 件)

- 1) K. Saka, H. Cho, Y. Takeda “The Effect of Constraint Conditions on the Bending Operating Characteristics of a Weft Yarn-type Shape Memory Alloy Actuator” 第 28 回日本 MRS 学術シンポジウム, 2018 年 12 月 20 日, 北九州国際会議場・西日本総合展示場.

- 2) 坂 航平, 長 弘基 “ 緯糸型屈曲動作形状記憶合金アクチュエータの試作と上下方向高速条件がアクチュエータの屈曲動作特性に及ぼす影響 ” SMA シンポジウム 2018, 2018 年 11 月 29 日, アクトシティ浜松. (ポスター)
- 3) 坂 航平, 長 弘基, 竹田 悠二, 松田 鶴夫 “ 緯糸型屈曲動作形状記憶合金アクチュエータの上下方向拘束条件が屈曲動作特性に及ぼす影響 ” 日本機械学会九州支部北九州講演会, 2018 年 9 月 29 日. 北九州市立大学.
- 4) 坂 航平, 長 弘基, 竹田 悠二, 松田 鶴夫 “ 緯糸型形状記憶合金アクチュエータを用いた屈曲動作アクチュエータの試作と動作特性 ” ロボティクス・メカトロニクス講演会 2018(ROBOMECH2018), 2018 年 6 月 5 日, 北九州国際コンベンションゾーン.
- 5) 上野 尚輝 長 弘基, 竹田 悠二 “ 緯糸型形状記憶合金アクチュエータの試作とその動作特性におよぼす経糸アルマイト被膜線の配置数の影響 ” ロボティクス・メカトロニクス講演会 2018(ROBOMECH2018), 2018 年 6 月 5 日, 北九州国際コンベンションゾーン.
- 6) 中川 智加良, 長 弘基 “ 熱エンジン用形状記憶合金素子の形状記憶・機械的特性に及ぼす加熱冷却サイクルの影響 ” 日本機械学会 M&M2017 材料力学カンファレンス 2017 年 10 月 8 日, 北海道大学.
- 7) C. Nakagawa, H. Cho “Effects of Heating and Cooling Cycle on the Shape Memory and Mechanical Characteristics of Tape-shaped Shape Memory Alloy Element” IUMRS-ICAM 2017 (The 15th International Conference on Advanced Materials) Kyoto, Japan (2017) August 28.

〔図書〕(計 1 件)

- 1) H. Cho, Y. Takeda, T. Sakuma Advances in Shape Memory Materials, Springer (2017) “Fabrication and Output Power Characteristics of Heat-Engines Using Tape-Shaped SMA Element” pp.1-15.

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://hiroki-cho.jimdo.com/>

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者 なし

(2)研究協力者

研究協力者氏名：細田 秀樹

ローマ字氏名：HOSODA HIDEKI

研究協力者氏名：竹田 悠二

ローマ字氏名：TAKEDA YUJI

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。