

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 3 日現在

機関番号：82305

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23500668

研究課題名(和文)セル構造形状記憶合金によるリハビリ装具用の高伸縮性人工筋肉の開発

研究課題名(英文)Development of High Extension Artificial Muscle for Rehabilitation Device Employing Cell Structure of Shape Memory Alloy

研究代表者

宋 東烈 (SONG, DongYeul)

群馬県立産業技術センター・その他部局等・研究員

研究者番号：80393479

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：障害者のリハビリ用装具に適した小型、軽量、柔軟といった特性を有する人工筋肉を形状記憶合金(SMA)ワイヤによって実現しようとする目的で、うねり形状のSMAワイヤ単線及びセル構造体を作製しその力学的性能評価実験を行うことで、高い伸縮性と適度な収縮力を有した人工筋肉の設計可能性を示した。また、有限要素法(FEM)解析によるSMAの力学的変形挙動のモデル化を行うことで、SMA人工筋肉の最適形状設計の指針を得ることができた。さらに、指装着リハビリ装具を試作し、その適用可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to develop a compact, lightweight and flexible artificial muscle available for use in such rehabilitation devices for disabled persons employing shape memory alloy (SMA) wires. In detail, the single and cell structures of wave shaped SMA wires were produced and their mechanical performances were investigated experimentally. Consequently, it was suggested that artificial muscles with high extension and proper force can be designed. Also, by conducting the modelling of mechanical deformation behavior of the wave shaped SMA wire using FEM analysis, the indicator of the optimal shape design of SMA artificial muscle could be acquired. Furthermore, the trial rehabilitation device which prevents the contracture of a finger was produced and its applicability was examined.

研究分野：総合工学 複合材料工学

科研費の分科・細目：人間医工学・リハビリテーション科学 福祉工学

キーワード：形状記憶合金 人工筋肉 うねり形状 セル構造 リハビリテーション用装具

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、材料自体が柔軟に変形して力も発生する人工筋肉的なアクチュエータ材料の研究開発が進められている。一般的に電気で駆動する高分子系アクチュエータは柔軟で高い伸縮力を示すが、発生力は小さい。一方、熱で駆動する形状記憶合金(SMA)は発生力が高いことと動作音がないことから人工筋肉アクチュエータとして注目されているが、形状回復可能な歪みは数%であり、高分子系ほどの収縮率を発現できない。

(2) それに対して、申請者らは近年、SMAのワイヤや箔材でコイルやハニカムを作製することで、軽量でありながらも、そのワイヤ太さ、箔厚さやセルサイズを設計することにより、必要に応じた高い伸縮性と十分な発生力を得られることを明らかにした。そこで、人体に装着するリハビリ用装具に適した小型、軽量、柔軟といった特性を有する人工筋肉をうねり状セル構造のSMAで実現しようという着想に至った。

### 2. 研究の目的

(1) 本研究では、障害者のリハビリ用装具に適した、軽量、柔軟かつ無騒音な駆動ができる人工筋肉を、形状記憶合金(SMA)によって実現しようとする。一般にワイヤ状SMAでは数%の歪みまでしか回復できず、また、コイル状にして十分な回復力を発生させる場合には、ワイヤを太くする必要があり、重くてその応答性も遅い。

(2) そこで、直線のSMAワイヤを波状にうねった形状を記憶させたワイヤやうねり形状ワイヤ同士を結合したセル構造にする。そうすることで局所的な曲げ変形を分散させて発生させ、SMAセル構造全体では極めて軽量でありながらも、形状記憶効果によって極めて高い伸縮性と適度な収縮力を有した人工筋肉を設計することが可能になると考えている。

(3) これにより、脳の損傷等によって手足が麻痺した障害者に対し、指足の関節の拘縮を防ぐため、一定の時間間隔で自動的に指足の曲げ伸ばしを行えるSMA人工筋肉によるリハビリ用装具を開発することを目的とする。

### 3. 研究の方法

(1) まず、うねり形状SMAワイヤ単線や単線同士を結合したSMAセル構造体を作製し、その人工筋肉アクチュエータとしての性能評価を行った。具体的には、2種のTi-Ni系SMAワイヤ(0.2mm、0.5mm、マルテンサイト逆変態終了温度 $A_f=80$ 、住友金属工業(株)製)を用い、うねり形状のSMAワイヤ試験片を作製し、その人工筋肉アクチュエータの性能を恒温槽付引張試験機中で実際に計測した。ここでは、SMAワイヤに形状を記憶させ

るための専用の金型ジグ(幅70mm×長さ130mm×高さ40mm)を放電加工により製作し、そのジグにSMAワイヤを固定して、高温で保持することでうねり状(うねり形間ピッチ10mm、うねり形高さ4.85mm)の形状記憶処理を行った。

(2) 図1にうねり形状SMAワイヤ単線及び単線同士をスポット溶接で接合したセル構造体の試験片の形状と寸法を示す。試験片はチャックの締め付き力によるSMAワイヤの保護やすべりを防ぐため、試験片の両端、両面にアルミ製タブ(長さ15mm、幅20mm、厚さ0.8mm)を瞬間接着材で貼り付けた。試験は恒温槽付引張試験機中で行い、常温一定で負荷

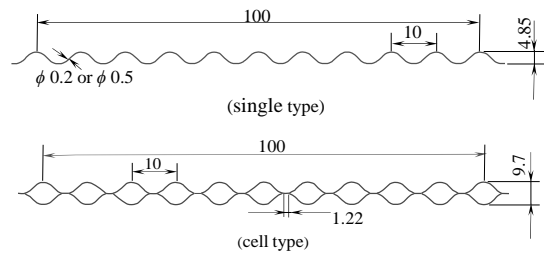


図1 試験片形状と寸法(単位:mm)

除荷、高温一定で負荷除荷、常温下で負荷後、昇温し高温下で除荷の3パターン下での荷重-ひずみ特性を計測し、SMA形状によるこれら特性の相違、変形量と発生力関係を検討した。ここで、ひずみはチャック間の距離を100mm一定とし、クロスヘッドの1mm変位を1%ひずみと定義した。試験速度は負荷・除荷ともに10mm/minとした。発生力は試験片両端を固定したまま加熱しながら試験機のロードセルで計測した。また、FEM解析に用いるSMAワイヤの物性値を決定するためにSMAワイヤの常温、高温下での負荷-除荷試験も行った。

(3) 一方、リハビリ用装具に適した人工筋肉をSMAによって構築する際、その形状(SMAワイヤ直径やうねりのサイズ等)を始めとした様々なパラメータを適切に決定する必要がある。しかし、実験でパラメータの検討を行うには、かなりの労力とコストや時間がかかってしまう。そこで、様々なパラメータの最適評価を簡便に行えるようにするために、SMA人工筋肉のFEM解析モデルを作成し、その性能を数値計算によって評価することが重要である。

(4) 本研究でのSMA人工筋肉の力学的変形挙動シミュレーションには、3次元弾塑性FEM解析ソフトウェア(TP-STRUCT:トライアルパーク製)を使用した。本ソフトウェアは、有限変形に対応するためにUpdated Lagrangianに基づく定式を採用し、材料モデルとしては各種降伏関数を塑性ポテンシャル

ルとした流れ則に基づく速度形弾塑性構成則を使用することができる。また、静的陽解法に不釣り合い力消去過程を加えた時間積分法を採用することにより、加熱による材料特性の急激な変化に対して、力の釣り合いを正確に保ちながら解き進むことができる点が特長であり、本研究で扱う SMA の挙動解析に適していると考えられる。

(5) ここでは、常温(25 )での引張、昇温による復元力(形状回復力)発生過程のそれぞれに対して、以下に示す材料モデルを適用し、解析を実施した。

常温(25 )での引張過程：弾塑性材料を仮定した。Mises の降伏関数とバイリニア型加工硬化関数を用いた。図 2 に応力-ひずみ曲線を示す。この特性は、直線形状 SMA ワイヤによる引張試験の、負荷時の特性に相当するものである。

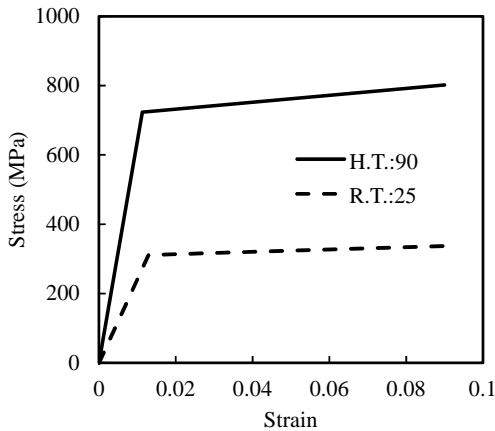


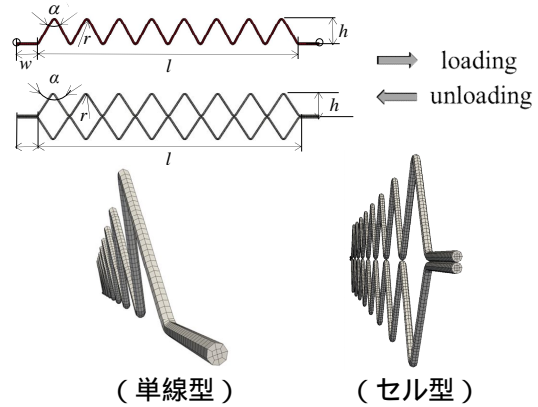
図 2 シミュレーションに使用した応力-ひずみ曲線

昇温による復元力の発生過程：昇温過程についても常温(25 )での引張と同様に弾塑性モデルをあてはめた。ただし、応力-ひずみ曲線は、図 2 に示すように、高温(90 )における負荷時の特性とした。

常温(25 )引張から昇温(90 )過程までの解析は連続的に実施した。すなわち、引張完了時の節点座標、節点変位量、積分点応力値(6 成分)、降伏応力、相当塑性ひずみを引き継いだまま、高温(90 )における応力-ひずみ曲線をあてはめ、それにより生じる不釣り合い力が解消するまで、増分解析を実施した。具体的には、引張過程で得られた相当塑性ひずみ  $\bar{\epsilon}^p$  に対する常温(25 )における相当応力が  $\sigma_y^{RT}(\bar{\epsilon}^p)$ 、高温(90 )における降伏応力が  $\sigma_y^{HT}(\bar{\epsilon}^p)$  で与えられるとき、昇温時の応力成分  $\sigma_{ij}^{HT}$  を、引張完了時の応力成分  $\sigma_{ij}^{RT}$  を用いて次式により求める。

$$\sigma_{ij}^{HT} = \sigma_{ij}^{RT} \frac{\sigma_y^{HT}(\bar{\epsilon}^p)}{\sigma_y^{RT}(\bar{\epsilon}^p)}$$

この応力成分修正により大きな不釣り合い力が発生するが、降伏曲面の半径方向の応力修正であること、及び昇温過程ではワイヤ端部の変位増分をゼロに固定することから、応力成分比に大きな変化が生じないため、陽的



$l$ (length in x direction : mm)	24
$w$ (length of edge : mm)	2.0
$h$ (bending width : mm)	2.6
$r$ (bending radius : mm)	0.2
(bending angle : °)	60
Number of heaps	8
Diameter of wire (mm)	0.2

図 3 SMA ワイヤの解析モデル

な時間積分であっても容易に平衡状態に到達できる。平衡状態に達するまでに得られた引張荷重の増加分を復元力とみなした。解析に用いた有限要素モデルを、図 3 に示す。8 節点六面体 1 次要素(8 積分点)を用いて、6,732 要素、9,554 節点によりモデル化した。塑性変形に対してボリュームロッキングが発生しない選択低減積分法を用いた。の常温(25 )引張過程においては、30%の全体ひずみを与え、その時点からそれぞれの昇温による復元力発生過程を解析した。計算時間はすべて 1 分未満であった。

#### 4. 研究成果

(1) 図 4 に SMA ワイヤの基本特性を調べるために常温下で行った引張試験での応力-ひずみ曲線を示す。応力の増加とともにひずみ 1.4%まではほぼ応力-ひずみの弾性的挙動を示すが、その後はひずみ約 5%までに応力一定のまま変形が生じる。この領域で除荷するとマルテンサイト変態と呼ばれる結晶構造変化に起因する見かけ上の塑性変形が残存するが、加熱することで変形する前のもとの状態に形状が回復できる形状記憶効果を示す。さらにひずみ 5%を越えて変形させると応力は急激に大きくなり、転移によるすべり変形を生じることで加熱しても形状は完全に回復しない。本実験では、ひずみ 7%まで変形し除荷した後、加熱すると約 1.5%のひずみが回復した。一方、ひずみが 0.3%となる付近では、R 相が一部残留しており、R 相の変形

後、マルテンサイト相の変形が生じていることがわかる。この現象はマルテンサイト変態終了温度  $M_f$  (本研究で用いた SMA の  $M_f$  は 29.2 である) 以下で SMA に負荷を掛けると生じる R 相変態に起因するものであり、一般に R 相の変態が先に生じて、その後マルテンサイト相が変形することが知られている。また、全体的に応力-ひずみ挙動は用いた SMA ワイヤの直径(直径 0.2mm、0.5mm)に関係なく同様な挙動を示した。

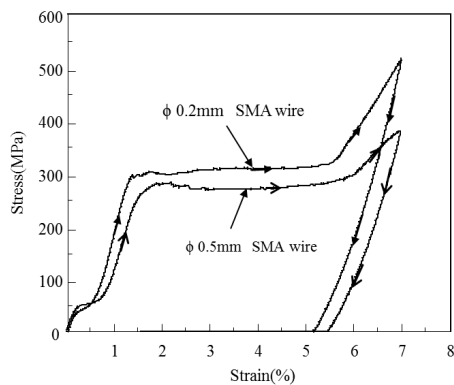


図4 常温下 SMA ワイヤの応力-ひずみ曲線

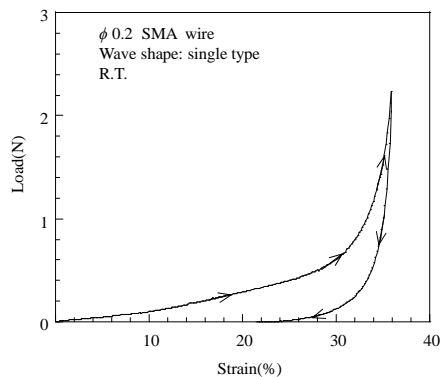


図5 うねり状 SMA ワイヤの常温下負荷-除荷時の荷重-ひずみ曲線

(2) 図5はうねり形状の SMA ワイヤ試験片に対して常温下で行った引張負荷-除荷時の荷重-ひずみ曲線を示す。この図から初期のひずみ 10%まで、またその後のひずみ 10%から 25%までの両領域ではそれぞれ荷重とひずみがほぼ線形的挙動を示していることがわかる。さらに、負荷を掛け、ひずみが 25%を越えると荷重はひずみの増加に伴って急激に上昇し最終的に破断に至るが、本試験片に対してはひずみ 35%まで変形した後も加熱することで完全に元のうねり形状に回復できた。この結果から SMA ワイヤをうねり形状構造にすることで、人間の筋肉伸縮率(30%程度)と同等の極めて高い伸縮性を有した人工筋肉が設計できることがわかった。

(3) 図6はうねり形状の SMA ワイヤ試験片を

常温下で負荷後、昇温し 90 高温下で除荷した試験結果を示す。この図より、常温下で所定のひずみまで引張負荷を与え、試験片の両端を固定したまま SMA の逆変態温度 ( $A_f \approx 80$ ) 以上に加熱するとマルテンサイト相から母相へ逆変態し回復力が発生する。ここでは、ひずみ 15%、20%、30%でそれぞれ約 0.12N、0.3N、0.4N の形状回復力が計測された。また、その後高温状態を保持して除荷すると完全に形状が元の状態に回復する。一方、うねり形状の SMA ワイヤ単線を互いに接合しセル構造にした場合では、その SMA ワイヤ単線と比べて回復力が大きくなっていることがわかる。特に、ひずみ 30%の場合には、ほぼ 2.6 倍まで増加している。この結果は SMA ワイヤをうねり形状やセル構造にすることにより、極めて高い伸縮性と適度な収縮力を有した人工筋肉への適用可能性を示す。

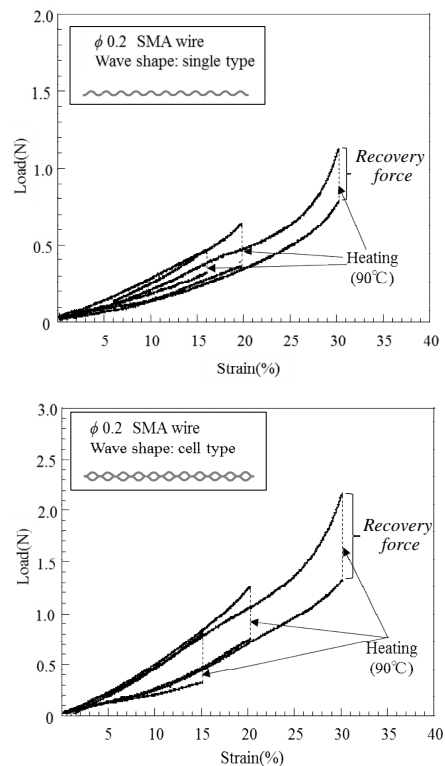


図6 うねり状 SMA ワイヤ単線やセル構造の常温負荷-昇温-高温除荷時の荷重-ひずみ曲線

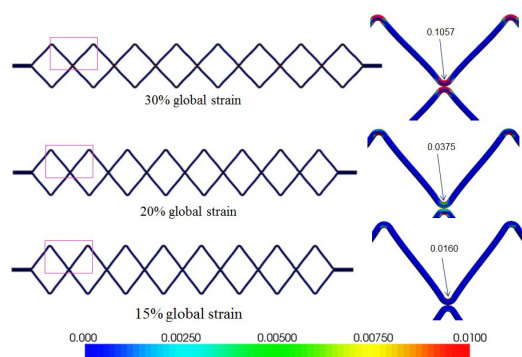


図7 引張負荷時の局所的な塑性ひずみ分布

(4) 図7は15%~30%ひずみまで負荷をかけた際に、SMAワイヤに生じる局所的な塑性ひずみ分布を示す。その最大値は各全体ひずみに対してそれぞれ0.016、0.0375、0.1057であった。

(5) 図8は15%~30%ひずみまで負荷をかけた後昇温(90℃)した際の全体ひずみ、荷重及び復元力の関係を示す。解析で得られた復元力は、実験で得られた復元力に比べて15%ひずみの場合、定量的な差があったものの、30%ひずみでは大きな差がなく、また全体的に常温引張から昇温に至るまでの荷重履歴は実験で得られた傾向を良く表している。従って、今回提案したFEM解析のモデル化の有効性を確認した。

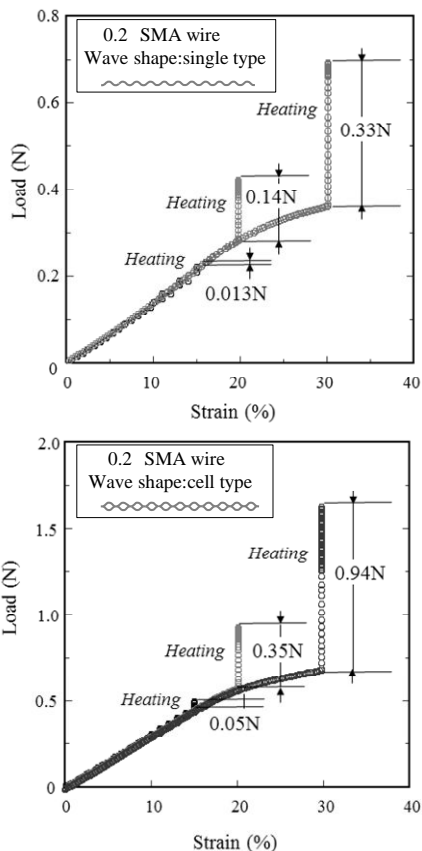


図8 引張負荷と昇温過程における全体ひずみ-荷重-復元力の関係

一方、図7と図8の結果から復元力は全体ひずみの増加に伴って、またセル構造型にすることで増加することがわかった。また、最大局所ひずみは全体ひずみの増加に伴って増加するが、ワイヤの構造(単線やセル型)には殆ど影響されなかった。以上のように、伸縮性と復元力を増大するためには、SMAワイヤをセル構造にすることが有

効であるといえる。

(6) 次に、作製したうねり形状SMAアクチュエータが指関節のリハビリ用装具として十分な性能を有するかを確認するため、図9に示すような指模型に取り付けてその動作性を確認した。ここでは、指の上下に2個対にして取り付けしたSMAアクチュエータを交互に加熱することで、人間の筋肉と同様な屈伸運動を行える。加熱機構は、指にはめる布製保護カバーの上下にねじ式電極部を設置し、直接SMAワイヤに一定な電圧を周期的に加えることにした。このねじは、予めリハビリする指の状態に応じてアクチュエータの張力を調整するのに使用される。印加電圧の範囲は1.5V~4.5Vで、電圧が高くなる程アクチュエータの応答は早くなる。また、試作体は指がまっすぐ状態(角度0°で、変形率ゼロ)から90度に曲がった状態(変形率は約28%)まで十分に屈伸動作ができることで、指装着リハビリ用装具としての適用可能性を確認した。

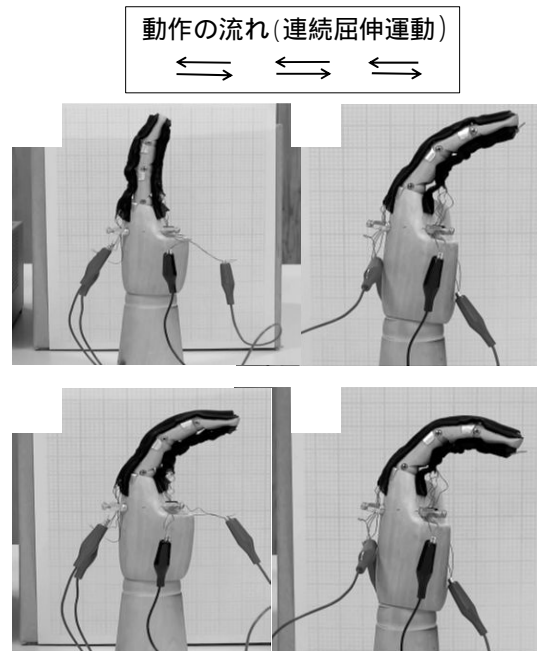


図9 指模型に取り付けたSMAアクチュエータの動作性評価様子

(7) 図10は作製した指関節リハビリ用試作装具の外観とその動作様子を示したものである。SMAアクチュエータと電極は、指にはめる布製の保護カバーの上下に、高伸縮性の薄い革製カバーを介して装着する。ここでは、均一かつ短時間でSMAアクチュエータの加熱を行うために別途にヒーターを使うことなく直接通電方式を選択したが、実用化のためには、繰り返し使用によるアクチュエータの耐久性(応答性の低下)検討も更に必要である。

今後の展望としては、このような高伸縮性や高発生力を兼ね備えた本研究の人工筋肉的なアクチュエータは医療、福祉機器や介護

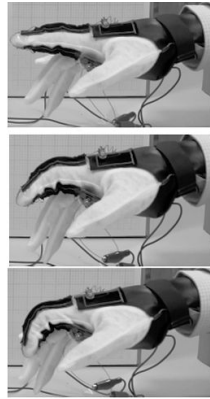
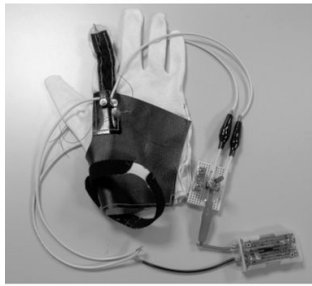


図 10 試作した指装着リハビリ用装具と試作装具の動作様子

用装具への適用が大いに期待できる。その一例として、障害者や高齢者の体型、姿勢や身体変化に合わせて適切な収縮力や伸縮性を与えて上半身を支える座姿勢保持椅子用のアクチュエータの適用がある。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

宋東烈、大槻 洋三、加部 重好、岡部 洋二、“SMA 人工筋肉の力学的性能と最適幾何形状に関する検討”、日本機械学会論文集(A編) 査読有、79巻 804号、2013年、PP.63 - 67

〔学会発表〕(計3件)

宋東烈、高村正人、大槻洋三、“うねり形状 SMA 人工筋肉の力学的性能評価”、日本機械学会 2013 年度年次大会、2013 年 9 月 9 日、岡山大学(岡山県)

宋東烈、大槻洋三、加部重好、岡部洋二、“SMA 人工筋肉の力学的性能と最適幾何形状に関する検討”、日本機械学会 第 20 回機械材料・材料加工技術講演会(M&P2012)、2012 年 12 月 1 日、大阪工業大学大宮キャンパス(大阪)

宋東烈、大槻洋三、加部重好、岡部洋二、“うねり形状 SMA 人工筋肉の性能評価”、日本機械学会 M&M2011 材料力学カンファレンス、2011 年 7 月 15 日、九州工業大学(北九州)

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

宋 東烈 (SONG, DongYeul)

群馬県立産業技術センター・その他部局等・研究員

研究者番号：80393479

##### (3)連携研究者

大槻 洋三 (OTSUKI, Yozo)

群馬県立産業技術センター・その他部局等・研究員

研究者番号：60573954

加部 重好 (KABE, Shigeyoshi)

群馬県立産業技術センター・その他部局等・研究員

研究者番号：30573951