

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 5月28日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23656078

 研究課題名（和文） セル状構造のSMAによる高伸縮性と高発生力を有する  
リハビリ用人工筋肉の開発

 研究課題名（英文） Development of Artificial Muscle for Rehabilitation from SMA Cell  
Structures with High Stretch Properties and High Generative Force

研究代表者

岡部 洋二 (OKABE YOJI)

東京大学・生産技術研究所・准教授

研究者番号：90313006

研究成果の概要（和文）：リハビリ用装具に適した、軽量・柔軟かつ無騒音な人工筋肉を、形状記憶合金（SMA）によって構築することを目的とする。特に、SMA ワイヤをセル状構造に加工することで、軽量でありながらも高い伸縮性と適度な収縮力を温度変化で制御可能にする。有限要素法（FEM）解析と試作実験を行ったところ、SMA ワイヤのうねりの幾何形状やそのパラメータ、および複線セル構造化を図ることで、目的に応じて最適な人工筋肉を実現可能であることが示された。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research is the development of artificial muscles with the lightweight, flexibility, and silence for rehabilitation devices from shape memory alloys (SMA). Especially, by the processing of SMA wires into cell structures, the lightweight artificial muscles are controlled with high stretch property and the high generative force by temperature change. The FEM analysis and experiments for processed SMA wires were conducted. As a result, the feasibility of designing of optimal artificial muscle depending on the usage could be shown by control of the geometrical shapes and parameters of SMA wires and construction of cell structures from multiple wires.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：スマート構造材料

科研費の分科・細目：機械工学、機械材料・材料力学

キーワード：形状記憶合金、セル構造、人工筋肉、リハビリテーション、スマート構造

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 生体に対し用いられる人工筋肉には、高い伸縮性と発生力を持つことや、高い柔軟性を持つことなどが求められる。そのため、材料自体が柔軟に変形して力も発生する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あり、200%以上にも及ぶ高い収縮性を発揮するが、その発生力は小さい。一方で、熱で駆動する形状記憶合金

(SMA) は、極めて高い発生力を示すが形状回復可能なひずみは数%であり、高分子系ほどの収縮率を発現できない。

(2) それに対して著者らは近年、SMA の箔材でハニカムを作製することで、軽量でありながらも、そのセルサイズや箔厚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持たせられることがわかってきた。よって、SMA の幾何形状を工夫することで、

人体に装着するリハビリ用装具に適した、小型・軽量・無騒音といった特性を有する人工筋肉を実現させる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、SMA によって構築することを目指す。例えば、手が麻痺した障害者に対し、指の関節の拘縮を防ぐため、図 1 のように一定の時間間隔で自動的に指の曲げ伸ばしを行えるリハビリ用装具が挙げられる。

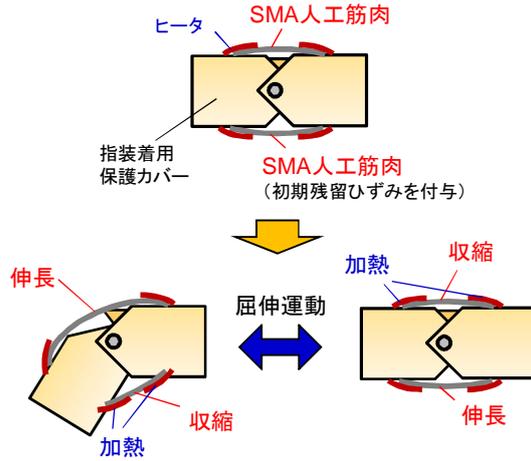


図 1 指関節の自動屈伸運動用リハビリ装具

(2) その際、SMA ワイヤをうねり形状の組み合わせやハニカム形状に加工することで、セル状構造にする。そして、シート状柔軟ヒータで温度制御することで形状記憶効果を発現させる。これにより、局所的な曲げ変形駆動を分散させて発生させ、SMA セル構造全体では十分軽量でありながらも、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られる。

(3) 具体的には、図 2 に示すハニカム形状において長手方向に引っ張った場合、正六角形の頂点付近が曲げ変形を受ける。そして、それが加熱によって形状回復するため、せん断変形に基づいたコイル状等よりもより効率的に収縮変形と収縮力を発生でき、この有効性は、ワイヤが細くなるほど顕著になると思われる。しかも細くなると加熱・冷却効率も向上して、応答速度を実用的な速さに設定可能である。本機構は、セル構造の各ユニットが分散して力を発生するため、より実際の生物の筋肉に似ていると考えられる。そして、使用目的に応じて性能のテーラーメイドが可能な、SMA 人工筋肉を構築することを目的とする。

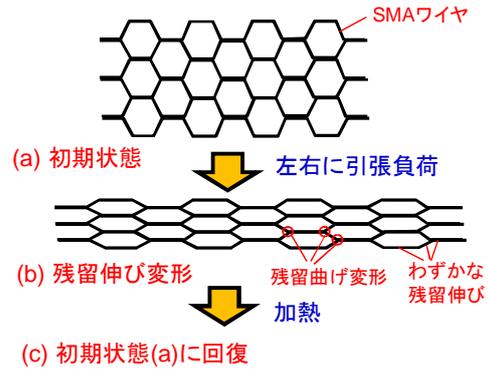


図 2 ハニカム形状の SMA ワイヤセル構造

## 3. 研究の方法

(1) まず始めに、SMA ワイヤの幾何形状やその形状パラメータの違いが、人工筋肉の回復力や収縮性にどのような影響を及ぼすかについて、数値解析により検証を行った。これは、大変形の解析に適した商用ソフトウェアである LS-DYNA (Ver. 971 r5.1.1) を使用し、有限要素解析 (FEA) によって実施した。モデルは全て梁要素を用いて構成し、ワイヤ長さ約 0.1mm が 1 個の梁要素になるように等間隔に分割している。梁要素の断面形状はワイヤを模擬して円形とし、その円柱形状の梁要素における積分点は、断面内の中心から半径の 0.707 倍の距離の位置に、等間隔で 4 点配置した。ワイヤの負荷・除荷は、モデルの右端の節点を一定速度で変位させることにより再現する。一例として、山型形状ワイヤのモデルを図 3 に示す。ここで、左端点については 6 自由度全てを拘束し、右端点については変位方向並進以外の 5 自由度を拘束している。



図 3 SMA ワイヤの FEM モデル

(2) SMA ワイヤの回復力 (加熱した際に発生する形状回復力) については、LS-DYNA では形状記憶効果を再現することができないため、ワイヤに全体ひずみ 30% を与えた状態での、常温時の引張力と高温時の引張力の差を求めることにより、簡易的に計算した。ここで、引張力とは右端点における軸方向荷重で、全体ひずみとはワイヤの  $x$  方向長さ  $l$  に対する右端点の変位の割合で定義している。図 4 に、常温と高温での引張力と全体ひずみの関係から回復力を求めるグラフの一例を示す。また、もう一つ重要なパラメータとして、最大局所ひずみも求める。これは、図 5 に示すように、ワイヤに全体ひずみ 30% を付与した際に、局所的に残留するひずみの中で、最大となる値で定義する。最大局所ひずみが

SMAの回復可能ひずみよりも大きくなると、加熱をしてもワイヤの形状が完全には回復しないことを意味する。

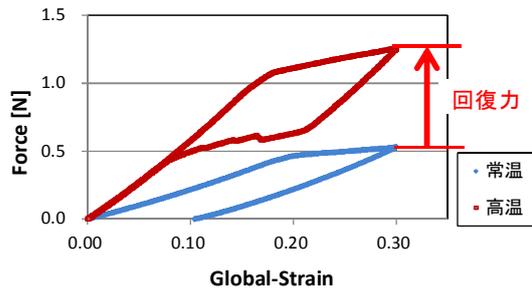


図4 引張力-全体ひずみからの回復力の算出

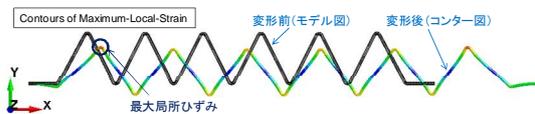


図5 最大局所ひずみの定義

(3) FEM 解析に用いる SMA の物性値は、直線状の SMA ワイヤ (Ti-Ni 合金、直径:0.2mm、マルテンサイト逆変態終了温度  $A_f$  : 80°C、住友金属工業 (株) 製) に対し、常温 (25°C) と高温 (90°C) とで負荷・除荷試験を行って得られた応力-ひずみ線図に、フィッティングを行うことで求めた。ここで、常温でのマルテンサイト相は弾塑性体でモデル化し、高温でのオーステナイト相は超弾性体でモデル化している。得られた物性値と応力-ひずみ曲線モデル図を図 6 に示す。

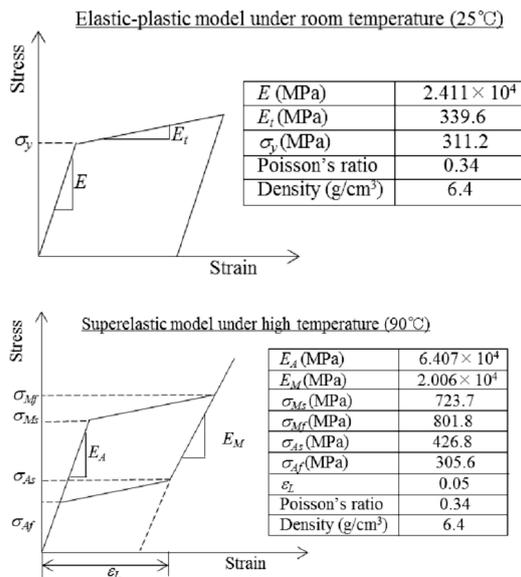
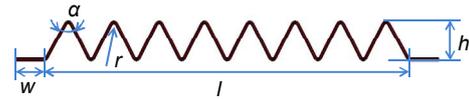


図6 常温と高温での SMA 物性モデル

(4) 単線の SMA ワイヤに与えたいねりの幾

何形状は、図 7 に示す 3 パターン (山型、ハニカム型、波型) である。ここで、全体長さ  $l$  は 24mm、両端直線部長さ  $w$  は 2mm に固定した。そして、山型形状では曲げ部曲率半径  $r$  を 0.2mm に固定し、曲げ角度  $\alpha$ 、曲げ幅  $h$ 、ワイヤ断面直径  $d$  をパラメータとして検討した。ハニカム形状では、曲げ角度  $\beta$  は 60°、曲げ幅  $h$  は 2.6mm であり、曲げ部曲率半径  $r$  をパラメータとして変化させた。そして波型形状は、サインカーブで与え、同じく曲げ幅  $h$  は 2.6mm とした。

(a) 山型形状



(b) ハニカム形状



(c) 波型形状

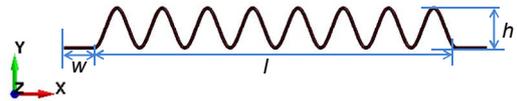


図7 SMA ワイヤに与えたいねり形状

(5) 単線ワイヤの評価を行った後、さらに、各うねりパターンのワイヤについて、図 8 のように 2 線を結合したものと 4 線を結合したものについても評価し、複線セル構造化することのメリットを調べた。ここで、山型と波型は各交点を 1 点ずつ、ハニカム型は各交点を 3 点ずつ、節点同士を剛体結合している。

(a) 単線構造



(b) 複線構造 (2線構造)



(c) 複線構造 (4線構造)



図8 複線セル構造のモデル化

(6) 上述の FEA シミュレーションによる評価を行った後、SMA ワイヤのうねり形状のうち、発生力は低いが高い伸縮性を示す波型形状を対象として、実際に波型形状の金型を作製し、前述の SMA ワイヤに形状記憶処理

を行った。さらに、2本の波型形状 SMA ワイヤをスポット溶接で接合することで、複線セル構造も作製した。そして、これらの単線構造と複線構造に対して引張試験を実施し、その性能を評価した。

#### 4. 研究成果

(1) まず最初に、3パターンのうねり形状における特性の比較を行った。そのため、曲げ幅  $h$  を 2.6mm に統一し、山型とハニカム型の曲げ部曲率半径  $r$  を 0.2mm、曲げ角度  $\alpha$  を  $60^\circ$  と揃えて解析を実施した。得られた回復力と最大局所ひずみを図 9 に示す。この結果より、ハニカム形状と山型形状の最大局所ひずみはほぼ同じだが、ハニカム形状の方がより大きな回復力を発生できていることがわかる。また、波型形状は、回復力は最も小さいが、最大局所ひずみも最も低く抑えることができている。つまり、形状回復可能な全体ひずみが大きく、最も伸縮性に優れているといえる。

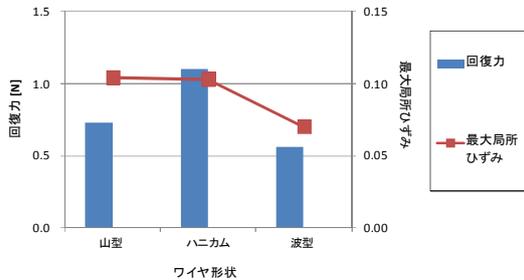


図 9 うねり形状に依存した性能の比較

(2) 次に、詳細なパラメータの検討を行った。本研究においては、山型形状の曲げ角度  $\alpha$ 、曲げ幅  $h$ 、ワイヤ断面直径  $d$ 、およびハニカム形状の曲げ部曲率半径  $r$  をパラメータとして変化させ、検討を行った。その結果を図 10 に示す。曲げ角度  $\alpha$  については、角度が大きいほど回復力を大きくできるが、最大局所ひずみも大きくなり、伸縮性が低下していく。次に曲げ幅  $h$  については、逆に値が小さいほど回復力は大きくなるが、伸縮性も低下していくことがわかる。これらは、全体の剛性が角度増加および曲げ幅減少に伴って高くなるためと推察される。断面直径  $d$  については、直径が大きくなるほど回復力が劇的に多くなるが、やはり伸縮性も低下していく。これは、直径の増加に伴ってワイヤ表面に発生するひずみも大きくなるためと考えられる。また、ハニカム型の曲率半径については、大きくなって回復力はあまり変化せず、最大局所ひずみが小さく、つまり伸縮性が向上するといった興味深い結果が得られた。

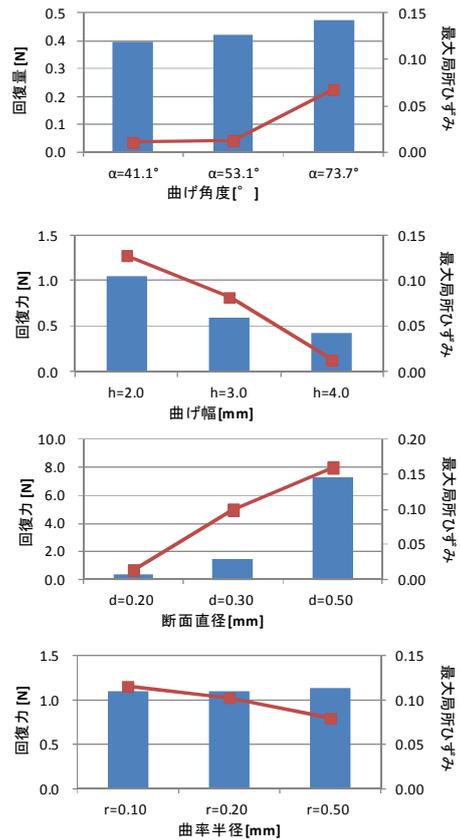


図 10 幾何形状パラメータに依存した性能変化：上から順に曲げ角度  $\alpha$ 、曲げ幅  $h$ 、断面直径  $d$ 、曲率半径  $r$

(3) さらに山型形状の複線構造化による、回復力と最大局所ひずみの変化を図 11 に示す。回復力は、ワイヤ本数に比例して増加している。また、最大局所ひずみについては、ハニカム型では大きくなっているが、山型と波型では小さく抑えることができている。そこで FEA 結果を詳細に見てみると、山型と波型では、単線では引張り方向に対して上下非対称なため、引張り負荷下では全体的にたわんでしまい、両端に近い頂点で大きな局所ひずみが発生していた。しかしながら、複線構造化すると上下対称になるため、ワイヤ全体のたわみが無くなり各頂点における変形が均等となり、最大局所ひずみを抑えることができたと考えられる。よって、複線構造化することで、収縮性が改善されることがわかる。

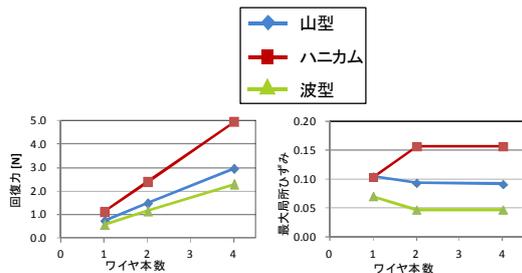


図 11 複線構造化による性能変化

(4) 以上の FEA 解析結果をまとめると、うねり形状のパターンについては、ハニカム型は高発生力、波型は高伸縮性、山型はその中間的な性質を示す。次に幾何形状パラメータについては、山型では、曲げ角度を大きく、曲げ幅を小さく、断面直径を大きくすると、回復力を大きくできるが、伸縮性が低下していく。しかしハニカム型の曲率半径を大きくすると、回復力を低下させずに伸縮性を向上させることが可能となる。また、山型と波型を複線構造にすると、全体のたわみが抑えられ、形状変化が均等になり、回復力を下げずに伸縮性を向上させることができる。

(5) 以上の解析結果の検証および製作可能性を確認するため、実際に試験片の作製を行った。まず、金型ジグを放電加工で作製し、そのジグに前述の直径 0.2mm の SMA ワイヤを固定して高温で保持することで、波型形状（曲げ幅  $h$  : 4.85mm、周期 : 10mm）の形状記憶処理を行った（図 12）。さらに、この単線 2 本をスポット溶接で接合してセル構造にしたものを図 13 に示す。試験は恒温槽付引張試験機中で行い、常温での負荷除荷と、常温での負荷後に加熱して高温で除荷、の 2 パターンで引張力-全体ひずみ特性を計測した。

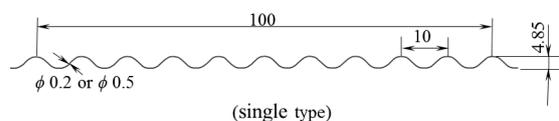


図 12 波型形状の単線 SMA ワイヤ

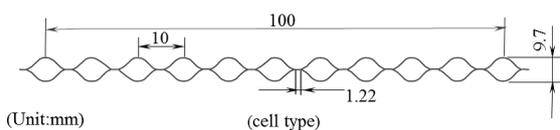


図 13 波型 SMA2 本を接合したセル構造

(6) まず、図 12 の単線の波型形状 SMA ワイヤに常温下で負荷除荷試験を行った結果を図 14 に示す。ひずみ 25%程度までは引張力と全体ひずみがほぼ線形であるが、さらに全体ひずみを加えると引張力が急激に上昇している。しかし、全体ひずみ 35%程度まで変形しても、加熱することで完全に元の波型形状に回復できた。これは、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ていることを示す。

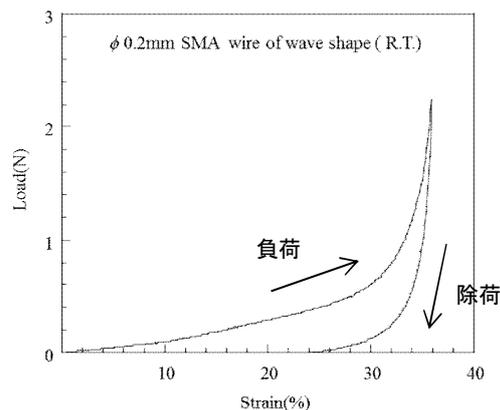


図 14 常温での単線波型 SMA への負荷除荷試験における引張力-全体ひずみ曲線

(7) 次に、単線波型 SMA ワイヤに対し、常温で負荷後、加熱して 90°C にし、高温化で除荷した結果を図 15 に示す。ひずみ 15%、20%、30%でそれぞれ約 0.12N、0.3N、0.4N の回復力が発生している。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している。その後、図 13 の波型 SMA ワイヤセル構造に対して同様の実験を行った結果を図 16 に示す。単線の場合（図 12）と比べると回復力が大きく、特に全体ひずみ 30%の場合には、ほぼ 2.6 倍まで増加している。これは、手作業で試験片を作製したためセル形状のばらつきが大きく、シミュレーション結果（図 11）と異なってしまったと考えられるが、単線よりも複線セル構造にした方が、引張負荷下での変形が安定していることを示しており、シミュレーションでの考察と整合しているといえる。以上より、SMA ワイヤを波型形状や複線セル構造にすることで、極めて高い伸縮性と適度な収縮力を有した人工筋肉の構築が可能であることがわかる。

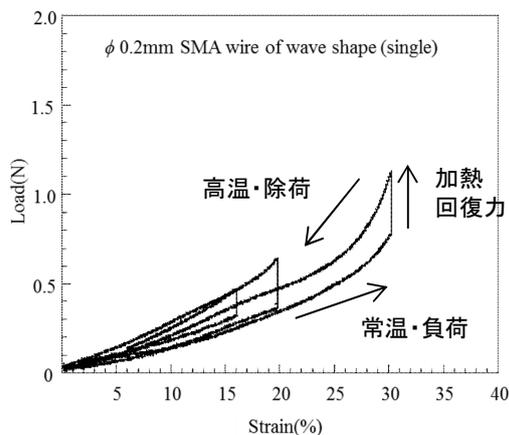


図 15 単線波型 SMA ワイヤ（図 12）の回復力計測実験結果

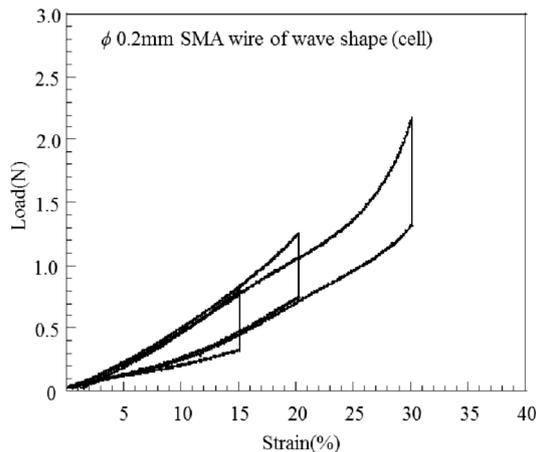


図 16 波型 SMA ワイヤセル構造 (図 13) の回復力計測実験結果

(8) 以上の通り、まず、FEM 解析によって、山型・ハニカム型・波型の 3 パターンの SMA ワイヤうねり構造を対象とし、その性能パラメータとして、加熱時の収縮力と、伸縮性に関する最大局所ひずみを評価した。さらに、各うねり構造の幾何形状パラメータと各性能との関係も調べた。そして、複線を結合させたセル構造を構築するメリットについても確認をした。次に、実際に波型形状の SMA ワイヤ構造を試作し、実験を行うことで、うねり構造による伸縮性の劇的な向上と複線構造による変形の安定性が確認できた。これらの結果により、目的に応じて最適な幾何形状を設定することで、適切な収縮力と伸縮性を持たせられ、テーラーメイドの可能な人工筋肉を、SMA ワイヤの幾何形状を工夫することで構築可能であることがわかった。国内外における人工筋肉の研究では、アクチュエータ材料そのものの特性を向上させることが研究対象となっているが、このように、その幾何形状を工夫することによっても、所望の性能を持たせられることが示され、スマートアクチュエータの分野に与える影響は大きいと考えている。そして、軽量・柔軟かつ無騒音な、リハビリ用装具に適した人工筋肉の構築が期待できる。ただ、本研究では十分な実験的検討を実施できなかったため、今後は様々な条件での実験により解析結果の妥当性を検証していきたい。そして、実際に指関節等のリハビリ用装具を試作し、本人工筋肉の有効性を示すことが望まれる。

## 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)

[学会発表] (計 4 件)

- ① 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

- ② 平川響、岡部洋二、斉藤一哉、宋東烈、荻原慎二、”リハビリ用人工筋肉の構築を目的とした SMA ワイヤの幾何形状の検討”、日本機械学会 2012 年度年次大会、2012 年 9 月 11 日、金沢

- ③ J. He, Y. Toi, and Y. Okabe, ”Finite Element Modeling of Plane Frames with Shape Memory Alloy Members”, Proceedings of 30th JSST Annual Conference (JSST 2011) International Conference on Modeling and Simulation Technology, 2011 年 10 月 22 日, Tokyo

- ④ 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 18 日、北九州市

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

岡部 洋二 (OKABE YOJI)

東京大学・生産技術研究所・准教授

研究者番号：90313006