

形状記憶ポリマーを用いた湾曲型空気圧ゴム人工筋の開発

Development of curved type pneumatic artificial rubber muscle using shape-memory polymer

○正 高嶋 一登 (九工大, 理研) 正 則次 俊郎 (岡山大)
Jonathan Rossiter (University of Bristol, 理研) 正 郭士傑 (東海ゴム) 向井 利春 (理研)

Kazuto TAKASHIMA, Kyushu Institute of Technology, ktakashima@life.kyutech.ac.jp
Toshiro NORITSUGU, Okayama University
Jonathan ROSSITER, University of Bristol
Shijie GUO, Tokai Rubber Industries, Ltd.
Toshiharu MUKAI, RIKEN

A conventional curved type pneumatic rubber artificial muscle is composed of an internal bladder covered with a bellows sleeve extending axially. By inhibiting the extension of one side with a fiber reinforcement, bending motion occurs when an air is supplied into the bladder. In this study, we developed a new actuator by replacing the fiber reinforcement with shape-memory polymers (SMPs). SMPs can be deformed above their glass transition temperature (T_g). They maintain their shape in a rigid form after they have been cooled below T_g . When next heated above T_g , they return to the initial shape. When only part of our actuator is warmed above T_g , only that portion of the SMP is soft and can actuate. Therefore, the direction of the motion can be controlled by heating. Moreover, our actuator can be deformed by an external force above T_g and fixed as its initial shape below T_g .

Key Words: Pneumatic rubber muscle, Shape-memory polymer, Shape fixity, Shape recovery, Glass transition temperature

1. 緒言

空気圧人工筋は、ゴムなどの弾性体に空気等の流体を注入して動力を得るアクチュエータである[1-3]。軽量・柔軟・高出力などの利点を持つため、ウェアラブルなパワーアシスト装置などへの応用が検討されている。伸長型空気圧ゴム人工筋は、ゴムチューブをポリエステル繊維製などの蛇腹やシートで覆うことによって、圧縮空気供給時にチューブ半径方向への膨張が抑制され、軸方向にのみ伸長する[1]。湾曲型空気圧ゴム人工筋は、さらに、繊維強化などにより片側の軸方向の伸長を拘束することで湾曲動作を行う[1-2]。湾曲型空気圧ゴム人工筋は、圧縮空気供給時にそれ自体が湾曲するので、リンクや軸受など運動変換のための外骨格構造を用いることなく、人工筋を直接身体に装着する内骨格構造による屈曲補助が可能である。しかし、一度伸長拘束部材を取り付けてしまうと、その初期形状や湾曲方向は決まり、伸縮動作はできなくなる。また、空気圧人工筋は空気ばねのようなものであるため剛性は低い。さらに、ゴム自体非線形性やヒステリシスといった特性を持ち、正確な位置制御や速度制御が難しい。

このような問題点を解消するために、我々は、湾曲型空気圧ゴム人工筋の伸長拘束部材として、形状記憶ポリマー(SMP) [4-10]を用いた。本研究では、試作品を作製して実験を行い、本アクチュエータのコンセプトの有効性を検証した。

2. SMP の特性

SMP とは、成型加工後に力を加えて変形しても、ガラス転移温度 (T_g) 以上に加熱すると元の形状に回復するポリマーである。さらに、SMP は室温付近に設定された T_g 以上に加熱すると弾性係数が大きく変化し、約 100~1000 分の 1 になる (図 1)。このため、 T_g 以上でゴムのように柔らかく大変形させることができ、その状態で T_g 以下にすると、変形した任意の形状を保持したまま、ガラスのように硬く変形しにくくできる (形状固定性)。その後、 T_g 以上に再加熱すると、材料は柔軟性を取戻し、弾性力によって元の形状に回復する (形状回復

性)。

同種の形状記憶材料である形状記憶合金 (SMA) と SMP の違いとしては、主に以下の点が挙げられる[4]。

- (1) 軽い (SMA の 1/10 程度)。
- (2) 複雑形状に加工しやすい。
- (3) 低温で硬く、加熱すると柔らかい (SMA は逆)。
- (4) 形状回復率が高い (SMA は数%に対し、SMP は数 100%)。

SMP は、以上のような利点および特徴を持つので、我々は、SMP を用いた姿勢維持モジュール[5]および McKibben 型アクチュエータ[6]を提案し、ロボットアームの姿勢維持への応用を検討してきた。

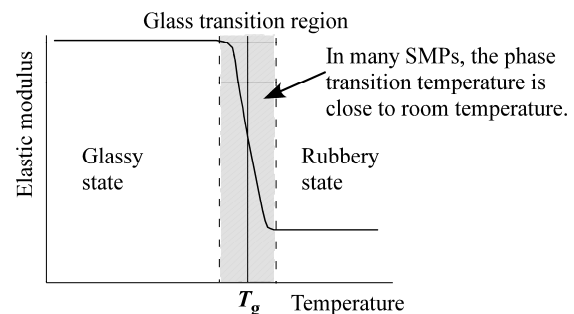


Fig. 1 Relationship between the elastic modulus and temperature of the SMP

3. SMP を用いた湾曲型空気圧ゴム人工筋の基本仕様

本アクチュエータの構造を図 2 に示す。伸長拘束部材を繊維から形状回復性と形状固定性を持つ SMP シートに置き換えることにより、本アクチュエータを構成する。ただし、SMP は加熱によって変形が可能になるので、両側に SMP シートを貼り付けることが可能である。さらに、伸長型空気圧ゴム人工筋の外側に直接 SMP を塗布することによっても本アクチュエータを構成できる。

本アクチュエータの基本的な動作を図 3 に示す。SMP を用いた湾曲型空気圧ゴム人工筋を、湾曲運動させる際は伸長さ

せる側の SMP を T_g 以上まで加熱して SMP 自体を柔らかいゴム状態にして加圧、駆動させる (S1→S2-1, S2-3). その結果、ガラス状態の側のみ伸長が拘束され、ゴム状態の側は伸長可能であるので、屈曲動作をする. ただし、図 3 のように SMP シートを両面に貼り付けた場合は、二方向の屈曲であるが、全面にコーティングした場合、全方向屈曲可能である. 一方、伸縮運動させる際は両側の SMP を T_g 以上まで加熱して SMP 自体を柔らかいゴム状態にして加圧、駆動させる (S1→S2-2). このように従来一方向のみにしか屈曲できなかった湾曲型空気圧人工筋の加熱方向を変えることにより、任意の方向に駆動できる.

その後、目標とする位置で T_g 以下まで温度を下げ、ガラス状態にして硬くし、その状態で保持する (S3). その結果、従来に比べて強い力で姿勢を保持できる. さらに、圧縮空気を供給しなくてもこの長さを保つことができる (S4). その後、 T_g 以上に加熱すると、柔軟性を取戻し、元の形状に回復する (S5). ただし、S5 へは S4 からのみではなく、他の状態からもアクチュエータ全体を加熱することによって移ることができる. 最後に、アクチュエータを冷却すると初期状態に戻る (S5→S1).

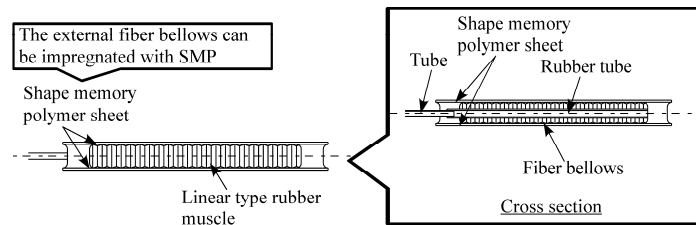


Fig. 2 Structure of curved type artificial rubber muscle that uses SMP

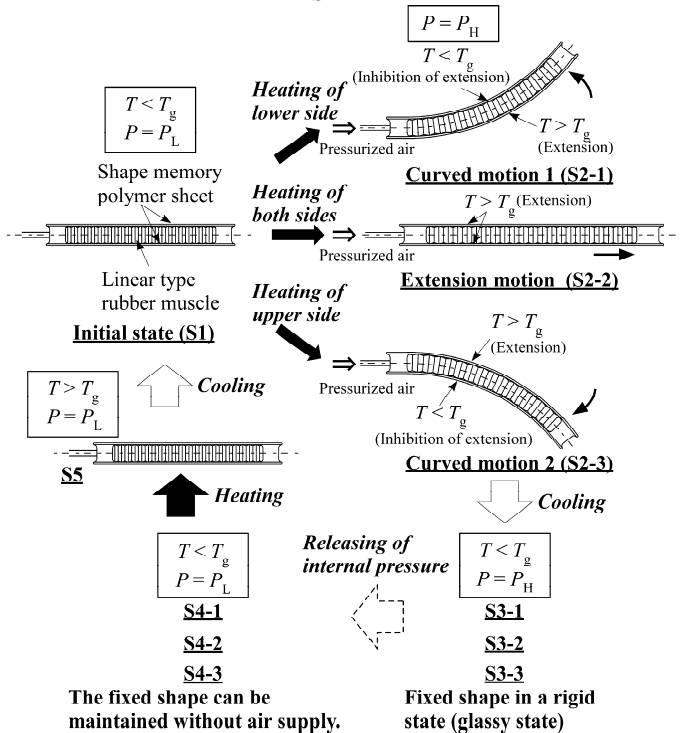
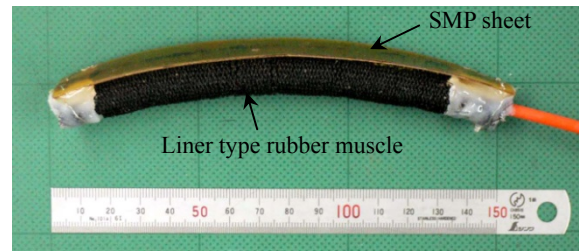


Fig. 3 Schematic of the curved type artificial rubber muscle that uses SMP (P_H : high pressure, P_L : low pressure)

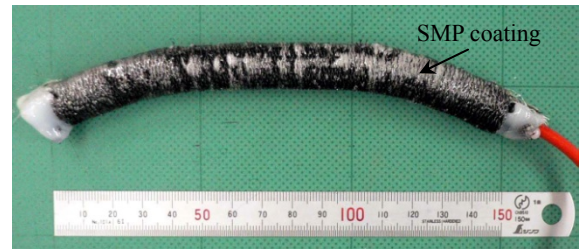
4. 実験

4.1 試作品

本研究では、2種類の試作品を作製した. まず、湾曲型空気圧ゴム人工筋 (外径: 1.4 cm) の伸長拘束部材を SMP シート (ポリノルボルネン, 2 cm × 15 cm, $T_g = 35^\circ\text{C}$) に置き替えた試作品を作製した (試作品 1, 駆動部長さ: 11 cm, 全長: 15 cm, 図 4(a)). SMP シートは、ポリノルボルネン粉末を 150°C , 10 min 程度かけて圧縮成形して作製し、アクチュエータの片側の全長に渡って接着した. さらに、 $T_g = 45^\circ\text{C}$ のポリウレタン系 SMP (ディアプレックス製ダイアリイ, 二液硬化タイプ) を伸長型空気圧ゴム人工筋 (外径: 1.5 cm) の外側に直接塗布し、試作品を作製した (試作品 2, 駆動部長さ: 15 cm, 全長: 17 cm, 図 4(b)). 黒い蛇腹の表面に白く見える部分が塗布した SMP である. 使用した SMP の特性を表 1 に示す [7-8].



(a) Prototype 1 (using polynorbornene sheet)



(b) Prototype 2 (coated with polyurethane)

Fig. 4 Prototype of newly developed actuator with SMP

Table 1 Characteristics of SMP [7-8]

Properties	Prototype 1	Prototype 2
Tensile strength (MPa)	34 <	30
Elastic modulus ($T < T_g$) (MPa)	955 ^a	1350 ^b
Elastic modulus ($T > T_g$) (MPa)	2.8 ^a	4.5 ^c
Elongation (%)	200 <	300

^a Tensile modulus, ^b Bending modulus, ^c 100% tensile MD

4.2 実験方法

まず、試作品 1 について $T < T_g$ で従来の湾曲型空気圧ゴム人工筋と同様の動作が可能か検討した. すなわち、圧縮空気を加えたときの先端の軌跡および発生力を測定した. ただし、発生力はアクチュエータを伸長させた状態で先端にロードセルを押し当てて、屈曲を拘束した状態で測定した. また、比較のために従来の湾曲型空気圧人工筋として、外径: 1.5 cm, 駆動部長さ: 13 cm, 全長: 16 cm のものを用いた.

一方、提案するアクチュエータの利点として、以下の点が挙げられる.

- 伸長拘束部材を付け替えることなく、加熱する部分を変えることによって、屈曲する位置・方向 (伸長も含む)、屈曲数、曲率を変更可能である.
- 高温で任意形状に変形、固定させ、低温で駆動することによって、初期湾曲角度を任意に設定可能である.
- 高温で駆動させたあと、冷却することによって、任意

の位置で姿勢維持力を向上できる。

- 使用する条件によって温度を変えることにより、柔らかいものを持つときは緩衝材として、硬いものを持つときは硬い状態で使用可能である。
- 姿勢維持時の圧縮空気供給が不要である。
- 湾曲角度と発生トルクの変更に可能である。例えば、初期湾曲角度を変更したり、駆動する温度を変えたりすることにより実現可能である。

このうち、本研究では、下線を引いた項目について試作品を用いた検討を行った。これらの実験は室温、相対湿度 25～37%で行った。

5. 結果および考察

5.1 試作品 1

$T < T_g$ で湾曲動作をさせたときの試作品 1 と従来の湾曲型人工筋の先端位置の軌跡および発生力をそれぞれ図 5, 6 に示す。ただし、図 5 において内圧が大気圧に等しいときの位置を原点とした。冷却した状態では、SMP を用いた場合も、従来の湾曲型人工筋と同様の屈曲動作をしている様子が分かる。

また、図 5 より、SMP シートに置き換えることによって、変形量が小さくなった。繊維は強い直交異方性を持ち、糸軸方向の剛性は大きい、わずかの力でせん断変形を起こすという特徴があり[11]、SMP シートに置き換えたことで、この利点が無くなったと考えられる。今後、単純なシートではなく、繊維のような形状を検討する必要があるかもしれない。

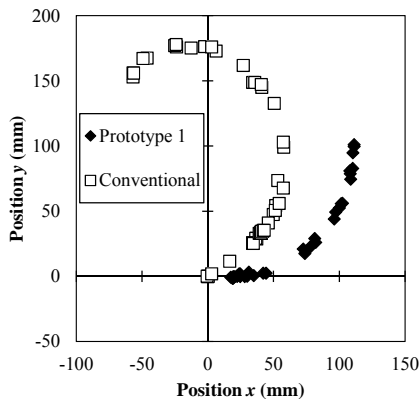


Fig. 5 Trajectory of tip of the prototype 1 actuator when the internal pressure was changed ($T < T_g$, $P = 0 \rightarrow 0.25$ MPa)

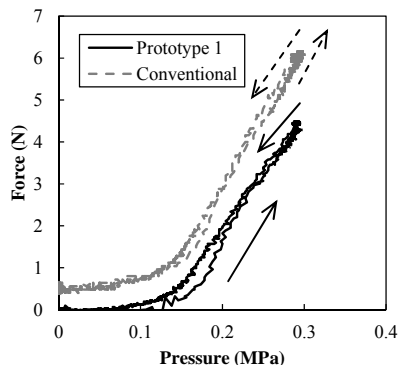


Fig. 6 Generated force of the prototype 1 actuator ($T < T_g$)

SMP シートを用いた試作品 1 に 0.3 MPa のステップ状の圧縮空気を加えた時の動作を図 7 に示す。ただし、図 7(a)は $T < T_g$ 、図 7(b)は $T > T_g$ である。加熱の有無によって屈曲形状を変更可能であることが分かる。加熱することによって、屈曲が

大きくなった原因として、加熱した状態においても、固定に用いた接着材によって伸長が拘束されることが考えられる。すなわち、図 5 で SMP シートに置き換えることによって、変形量が小さくなったが、接着剤のみが伸長拘束部材として働く場合、繊維強化の状態に近くなり、変形が大きくなることが考えられる。今回、SMP シートを片側のみ貼り付けたが、両側に貼り付け、軸対称な構造にすることによって、伸長動作を考えると考えられる。さらに、SMP シートを全長に渡って接着したが、今後、接着材の塗布量や柔軟性についても検討が必要であろう。

また、ガラス転移領域では、弾性率は徐々に変化するので、図 7 の中間の状態を連続的にとることも可能であろう。ただし、SMP はクリープや応力緩和などの影響が大きいので、例えばクリープによってシートにたるみが生じ、同じ温度でも位置の再現性が低下する可能性がある。そのため、応用の第一段階としては、ガラス転移領域以外の領域で剛性が不連続な二つの状態に大きく切り替えられることを用いた応用を検討していきたい。

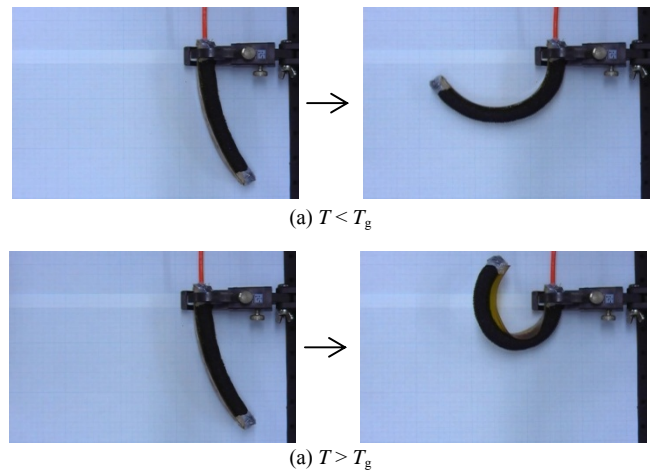


Fig. 7 Motion of the prototype 1 actuator when the internal pressure was changed with or without heating ($P = 0 \rightarrow 0.3$ MPa)

次に SMP の形状固定性を利用することによって、本アクチュエータの初期形状を変更可能か検討した。SMP を加熱して外力によっていろいろな形状に変形させた後、冷却、固定し、初期形状とした。 $T < T_g$ で、その初期形状から、ステップ状 (0.3 MPa) に内圧を上昇させたときの動作を図 8 に示す。図 8(b), (c) のように、異なる初期形状から、異なる屈曲形状に湾曲させることができた。

SMP は、装着者の身体形状にフィットする身障者用スプーン・フォークや医療用固定器具などの応用が検討されている[4, 7, 9-10]。例えば、身障者用スプーンは、高温で各人の手の形状に変形させ、低温で固定させて使用することができる。一方、湾曲型空気圧ゴム人工筋はパワーアシストウェアへの応用が検討されているが[1-3]、図 8 で示した特性を活かすことによって、着用者が使用時に個別にフィットさせられるパワーアシストウェアを作製することが可能かもしれない。本特性を利用する場合、動作時に加熱する必要もないので、アクチュエータに加熱冷却装置を追加する必要もなく、実用しやすいかもしれない。さらに、空気圧アクチュエータ自体の持つ熱の発生が少ない利点を生かすこともできる。

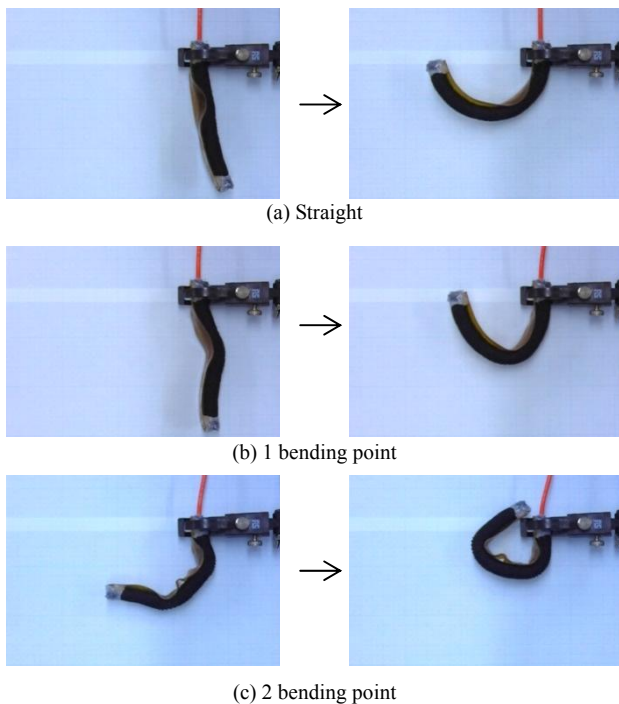


Fig. 8 Motion of the prototype 1 actuator when the internal pressure was changed from a different initial position ($T < T_g$, $P = 0 \rightarrow 0.3$ [MPa])

5.2 試作品 2

SMP を表面に塗布した試作品 2 の加熱部分を変えることによって、湾曲方向を変更可能か検討した。実際の動作を図 9 に示す。ヒーターを用いて、一部を柔軟にした後、0.3 MPa の圧縮空気を注入した。加熱する方向を変えることによって、湾曲方向が変化している様子が分かる。

ただし、SMP を加熱して軟化させても変形抵抗は 0 にはならないので、屈曲方向は変えられるものの、アクチュエータの変形量は小さい。さらに、SMP を McKibben 型アクチュエータに塗布した場合も、SMP が繊維スリーブの網目の中を埋めて変形を阻害したが[6]、同様の問題が考えられる。今後、同様に SMP の塗布方法の検討が必要である。

一方、SMP を塗布することによって、姿勢維持能力は向上すると考えられる。ただし、金属材料と比較した場合、本研究で使用した SMP の比重は鉄の 0.15 倍程度であり[7-8]、ガラス状態のヤング率と鉄のヤング率 (210 GPa) の比率 (0.006 倍) に比べて小さい。すなわち、同じ荷重を負荷しようとする、必ずしも軽量化となりえないので、複合材料としたりなどの検討が必要かもしれない。

6. 結言

本研究では、SMP を伸長拘束部材に用いた湾曲型空気圧ゴム人工筋を開発し、その基本特性について検討した。2 種類の試作品を用いた評価実験により、以下のように本コンセプトの有効性を示した。

- 加熱しない状態では、従来の湾曲型空気圧ゴム人工筋と同様の動作をさせることができた。
- SMP を異なる初期形状に固定して、駆動できた。
- SMP を加熱する方向を変えることによって、いろいろな方向に湾曲させることができた。

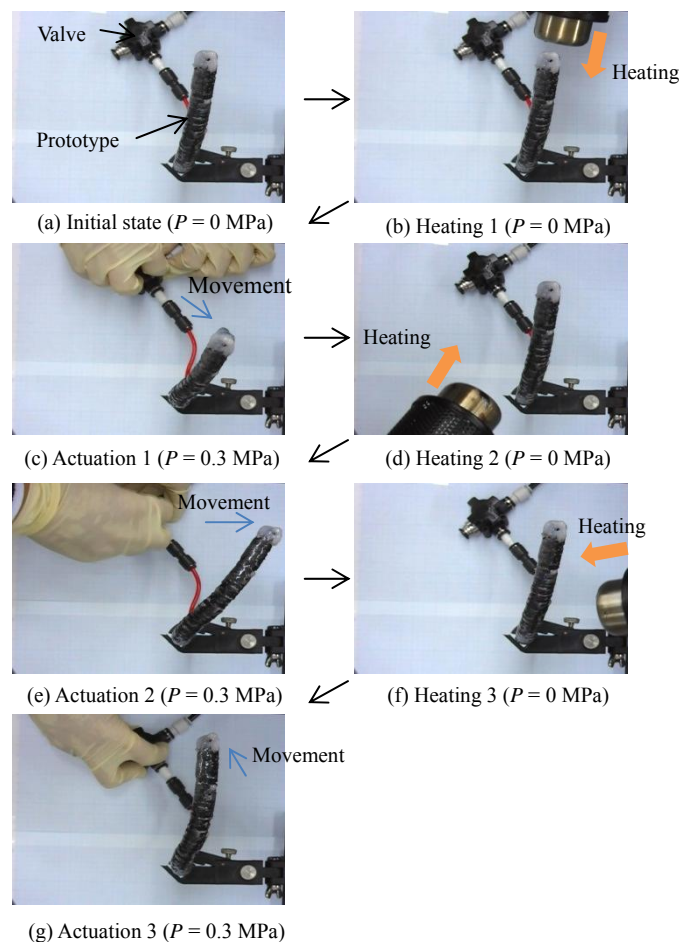


Fig. 9 Motion of the prototype 2 actuator when the internal pressure was changed with heating and cooling

文献

- [1] 佐々木大輔, 則次俊郎, 山本裕司, 高岩昌弘, "空気圧ゴム人工筋を用いたパワーアシストグローブの開発", 日本ロボット学会誌, vol.24, no.5, pp.640-646, 2006.
- [2] 荒金正哉, 則次俊郎, 高岩昌弘, 佐々木大輔, 猶本真司, "シート状湾曲型空気圧ゴム人工筋の開発と肘部パワーアシストウェアへの応用", 日本ロボット学会誌, vol.26, no.6, pp.674-682, 2008.
- [3] Kobayashi, H. and Hiramatsu, K., "Development of Muscle Suit for Upper Limb," *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 3, pp. 2480-2485, 2004.
- [4] 工業所有権情報・研修館:平成17年度 特許流通支援チャート形状記憶ポリマー, <http://www.ryutu.inpit.go.jp/chart/tokumapf.htm>
- [5] 高嶋一登, 張楠, 向井利春, 郭士傑, "形状記憶ポリマーを用いた姿勢維持モジュールの基礎研究", 日本ロボット学会誌, vol.28, no.7, pp.905-912, 2010.
- [6] Takashima, K., Rossiter, J. and Mukai, T., "McKibben Artificial Muscle Using Shape-memory Polymer," *Sensors & Actuators: A. Physical*, vol.164, pp.116-124, 2010.
- [7] 山本英輔, "ソーレックス (形状記憶機能性プラスチックの特性と用途開発)", *プラスチック*, vol.38, no.12, pp.107-111, 1987.
- [8] 桜井謙資, 佐柳明重, 内藤俊樹, 高橋利禎, "形状記憶高分子ポリソルボルネン", 福井大学工学部繊維・機能性材料研究施設報告, vol.26, pp.23-33, 1988.
- [9] 入江正浩, 形状記憶ポリマーの材料開発, シーエムシー出版, 2000.
- [10] 戸伏寿昭, 堀川宏, 松本実, 田中喜久昭, 形状記憶材料とその応用, コロナ社, 2004.
- [11] 井上真理, "繊維集合体としての布の特性について", 繊維学会誌, vol.64, no.8, pp.246-251, 2008.