

形状記憶ポリマーを用いた姿勢維持モジュールの開発

高嶋一登（理研） 張楠（東海ゴム） 向井利春（理研） 郭士傑（東海ゴム）

Development of a shape fixity module using a shape-memory polymer

*Kazuto TAKASHIMA (RIKEN), Nan ZHANG (Tokai Rubber Industries, Ltd.),
Toshiharu MUKAI (RIKEN), Shijie GUO (Tokai Rubber Industries, Ltd.)

Abstract— Shape-memory polymers (SMPs) can be deformed above their glass transition temperature by applying a small load. They maintain their shape after they have been cooled to below the glass transition temperature. They then return to the predefined shape when heated above the glass transition temperature. Exploiting these characteristics, the objective of this study is to develop a shape fixity module using an SMP. The experimental results of a preliminary proof-of-concept investigation conducted on SMP tubes confirm the feasibility of using a SMP to fabricate a reliable, light, low-cost shape fixity module for a robot arm.

Key Words: Shape-memory polymer, Shape fixity, Shape recovery, Glass transition temperature, Arm

1. はじめに

人間は行う動作に応じて、関節の回りの屈筋・伸筋を弛緩・収縮させることにより、関節を柔らかくしたり硬くしたりさせる。一方、ロボットアームでは、駆動した後、荷重を付した状態で姿勢を維持することが必要な場合が多い。これまでそうしたロボットアームやフィンガーの姿勢保持には、例えばブレーキ機構、ラチェット式の爪、ギアなどを用いている。しかし、例えば、電磁モータと大きな比率のギアを組み合わせると、大出力が得られても、ロボットの関節が硬くなり、バックドライバビリティが失われる。一方、ラチェット機構をつけると、維持する位置が不連続である。また、衝突時の衝撃を小さくするために、柔らかい材料で覆うと位置決め精度が悪くなる。

そのため、我々は、ロボットのアームやフィンガーでも人間と同様に「柔軟性」と「大きな力」を両立させた姿勢維持が行えるように、形状記憶ポリマーを用いた姿勢維持モジュールを開発した。ここで、サーボ剛性ではなく、材料自体の剛性変化を利用することがこのモジュールの特徴である。本研究では、姿勢維持モジュールの試作品を作製し、評価実験を行い、ロボットアームの姿勢維持への応用を検討した。

2. 形状記憶樹脂の特性

形状記憶ポリマー（以下、SMP）[1-8]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（Fig.1）。これは、 T_g 以下の温度ではエネルギー弾性であるのに対して、 T_g 以上の温度では非晶相のミクロブラウン運動に基づくエントロピー弾性であることに起因する。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、ガラスのように固く変形しにくくできる。その後、 T_g 以上に加熱すると、材料は柔軟性を取戻し、本来の弾性力によ

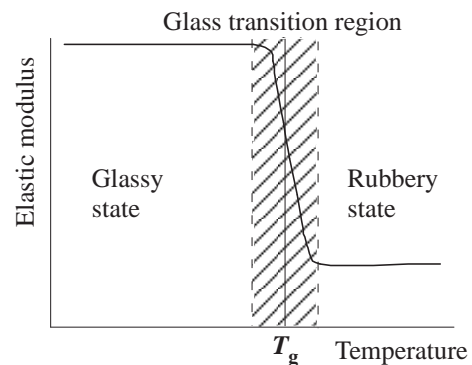


Fig.1 Relationship between elastic modulus and temperature of a polymer

て元の形状に回復する。

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 [3]。

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. 形状変化率が高い（SMAは数%に対し、SMPは数100%）。

さらに、SMPは、 T_g を境として、弾性率だけでなく、エネルギー散逸特性、水蒸気透過性、体積膨張率、屈折率、誘電率なども特徴的な物性変化を示す。SMPは、以上のような利点および特徴を持つので、産業分野 [1, 2]、医療分野 [1-4]、宇宙開発分野 [7]、衣料品 [2] などさまざまな分野への応用が検討されている。

3. 姿勢維持モジュールの基本仕様

本研究では、Fig.2に示すように、このSMPを用いてロボットアームの関節の剛性変化を行い、姿勢維持することを検討する。すなわち、移動時には加熱しゴム状態で低剛性とする。これは、人間が関節周りの屈筋・伸筋を同時に弛緩させ、外部から自由に動かされ

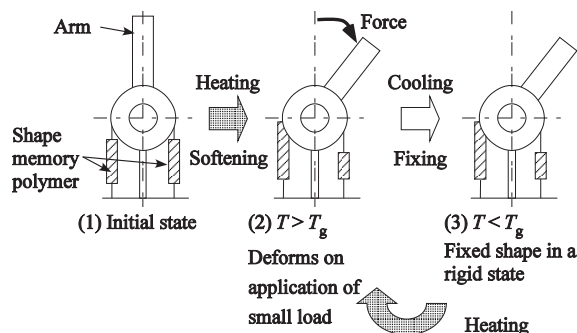


Fig.2 Schematic of a shape fixity module that uses an SMP and motion principle for robotic arm application

るようになった状態に対応する．また、荷重を保持する場合など姿勢維持時は冷却しガラス状態で高剛性を保つ．これは例えば人間が物を把持したとき、対象物の重さによって関節の硬さを設定することに対応する．

SMPを用いた Fig.2のような機構を用いることによって以下のような利点が考えられる．

1. 部品点数が少なく、小型化・軽量化することができる．軽量であるので、高加速の運動に対して、関節を壊してしまう危険も少ない．
2. 移動時関節の剛性を低くすることによって、衝突した際の衝撃が小さくなる．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働く．
3. 連続的に変化する任意の位置で姿勢を維持できる．
4. 変形時に、完全にフリーな状態ではなく、柔らかく拘束されている．
5. 姿勢維持時のエネルギー供給が不要である．
6. 移動時に静音である．
7. 各部が連結されているので、可動範囲以上に変形するには、材料の破壊が必要となり、安全である．

本研究では、ロボットアームへの応用を検討したが、ロボットフィンガーやパワーアシストスーツなどにも応用可能である．

4. 実験

4.1 試料

SMPは、ポリウレタン、ポリノルボルネン、トランスポリイソプレン、スチレン-ブタジエン共重合体など、組成や機械的特性、形状回復温度が異なる複数種が存在する．本研究では、形状回復温度の設定温度範囲が広く、最も多く実用されているディアプレックス製「ダイアリイ」を使用した [2, 3, 5, 6, 7]．「ダイアリイ」はポリオールとイソシアネートを主原料としたポリウレタン系高分子材料であり、その配合、分子構造、分子量を変化させることによって、 $-40 \sim 120$ [] の範囲で T_g を設定することができる．

本研究では、 $T_g = 55$ [] の MP5510 をチューブ状に成型したサンプル（外径：8 [mm]、内径：6 [mm]、長さ：150 [mm]）を使用した．カタログに記載されてい

Table 1 Characteristics of SMP tube specimen

Tensile strength ($T < T_g$) [MPa]	52
Elastic modulus ($T < T_g$) [MPa]	1800
100 % tensile MD ($T > T_g$) [MPa]	4.5
Maximum elongation ($T > T_g$) [%]	> 400

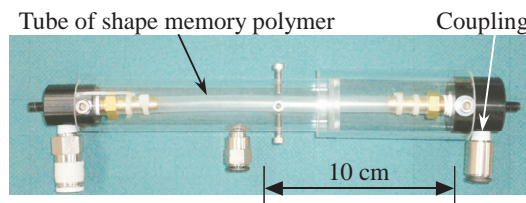


Fig.3 Prototype of shape fixity module with SMP

るいくつかの特性について、Table 1 に示す．Table 1 中の引張り強さはこのチューブの場合、1.1 [kN] に相当する．このチューブ状のサンプルを用いて構成した姿勢維持モジュールの写真を Fig.3 に示す．給気口、排気口より内部を通す温風・冷風によって加熱・冷却を実施した．ただし、樹脂が十分に軟化するためには T_g からさらに加熱する必要があり、本研究では目標加熱温度を 60 [] に設定した．また、SMP チューブの取り付けには、加熱した状態で竹の子継ぎ手を挿入し、冷却後圧着した．これは、内部の流体の漏洩やチューブの離脱を避けるためである．

4.2 実験方法

本研究では、Fig.3 の姿勢維持モジュールの基本特性を調べたあと、Fig.4 のようにロボットアームに取り付けたときの特性を検討した．Fig.2 のコンセプトに従って動作させる場合、各動作においてアームには以下のような特性が求められる．

- 姿勢維持状態 ($T < T_g$)
強い力で対象物を把持するために、形状固定性が求められる．
- 動作状態 ($T > T_g$)
ゴム状態でアームを動かす際に、柔らかく拘束することが必要である（小さい方がよいとは限らない）．
- 冷却状態 ($T > T_g \rightarrow T < T_g$)
ゴム状態で変形させ、その位置で正確に位置決めできることが必要である．
- 形状回復状態 ($T < T_g \rightarrow T > T_g$)
加熱によって柔らかくなり、外部から駆動できる状態になることが求められる．さらに、材料自体の形状回復性を利用して初期位置に戻ることができる．どちらの場合も、できるだけ早く元の位置に戻ることが求められる．

本研究では、Fig.4 に示す実験装置を用いて、これらの特性についてそれぞれ検討した．二つの姿勢維持モジュールをワイヤを経てアームに拮抗に配置させた．ロードセルを自動ステージに載せ、アームに接触させた状態で移動させ、そのときのアームの変位をアーム

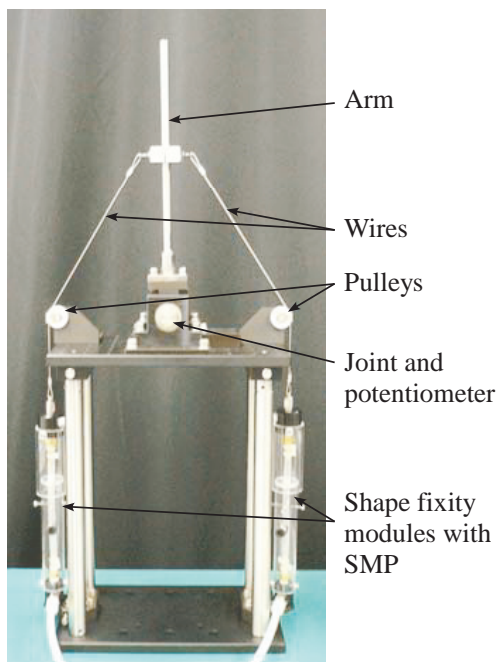


Fig.4 Robotic arm application of shape fixity module with SMP

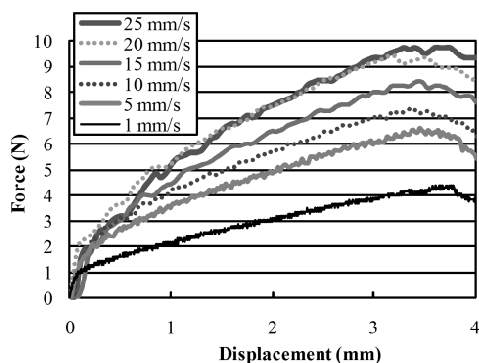


Fig.5 Deformation characteristics of SMP shape fixity module

の根元の関節に取り付けてあるポテンショメータで測定した。アームの関節からワイヤが取り付けられている部分、およびロードセルによって荷重を加えた部分の距離はそれぞれ 106 [mm], 164 [mm] とした。また、デジタル放射温度センサ（キーエンス製 FT-H10, FT-55A）で SMP 表面の温度を測定した。これらの実験は室温、相対湿度 40~43 [%] で行った。

5. 実験結果

姿勢維持モジュールの片端を固定して、もう片端にロードセルを経て軸方向の圧縮力を加えたときの变形特性を調べた。実験結果を Fig.5 に示す。变形させる速度が大きくなると、抵抗が大きくなっている様子が分かる。これは、SMP の粘性によるものと考えられる。

Fig.4 を用いた各状態の機械的特性の測定結果を以下に示す。ただし、アームの角度は初期位置を $0 [^\circ]$ と

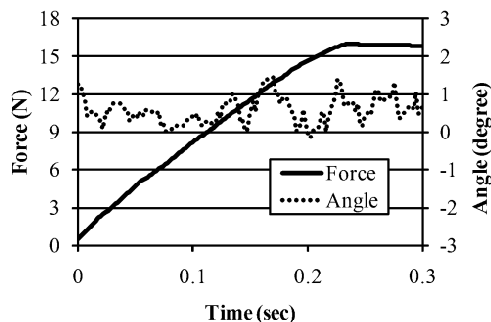


Fig.6 Shape fixity property of robotic arm using SMP shape fixity module

する。

- 姿勢維持状態 ($T < T_g$)

SMP をガラス状態で固定時に力を加えたときのアームの角度の経時変化を Fig.6 に示す。固定状態では、力を加えてもあまり位置が変化していないことが分かる。

- 動作状態 ($T > T_g$)

ゴム状態での变形特性を調べた実験結果を Fig.7 に示す。固定状態に比べて、小さい力でアームが動かせることが分かる。速度の影響が少なかったが、これは今回の実験時の温度がガラス転移領域内であったため、材料特性が安定していなかったためかもしれない。

- 冷却状態 ($T > T_g \rightarrow T < T_g$)

$T > T_g$ のゴム状態でアームを一定速度で動かした後、その状態を一定時間保持し、その後アームを保持したまま冷却した。このときの温度、力、アームの角度の経時変化を Fig.8 に示す。ゴム状態で变形させ保持しているとき、応力緩和を示していることが分かる。さらにその位置で冷却するとロードセルに加わる力が上昇していった。これは SMP が冷却によって熱収縮しているためであると考えられる。この力の上昇は長く続き、実用上問題であると考えられる。

- 形状回復状態 ($T < T_g \rightarrow T > T_g$)

アームの角度を動かした状態で冷却し、その後再加熱したときの経時変化を Fig.9 に示す。再加熱時には外部から力を加えておらず、材料自体の形状回復性を示している。Fig.9 のように加熱による材料自体の形状回復性により、元の位置に回復していることが分かる。ただし、常温から T_g 以上に加熱するのに 1 分近くかかっており、実際はある程度柔らかくなった状態で外部から駆動させることが必要かもしれない。

6. 今後の課題

SMP に加えた応力 σ とひずみ ε の関係を表す粘弾性モデルとして、3 要素モデルに非回復ひずみ ε_S 、熱膨張の影響を加えた以下の式が提案されている [2]。

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{\sigma}{\mu} - \frac{\varepsilon - \varepsilon_S}{\lambda} + \alpha \dot{T} \quad (1)$$

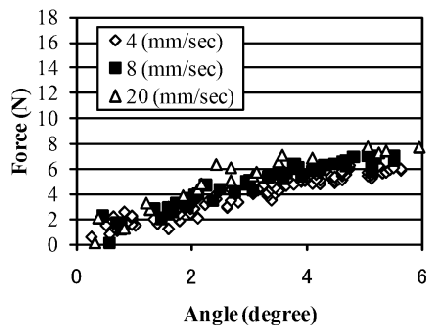


Fig.7 Deformation characteristics of robotic arm using SMP shape fixity module ($T > T_g$)

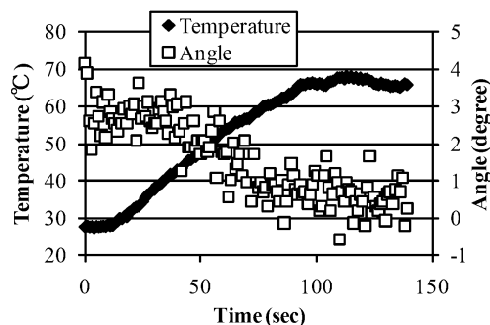


Fig.9 Shape recovery property of robotic arm using SMP shape fixity module

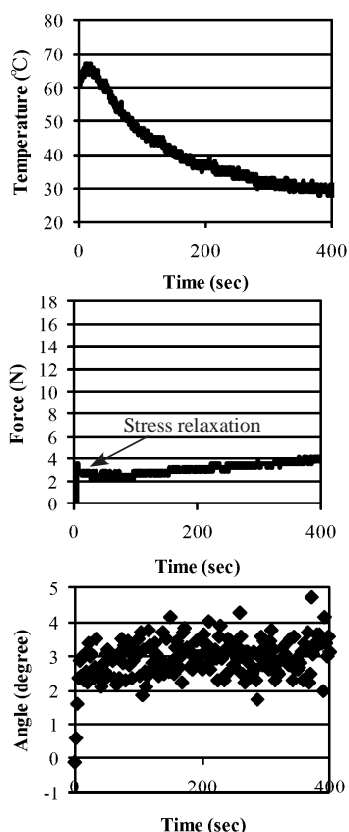


Fig.8 Transition of shape fixity state of robotic arm using SMP shape fixity module

ここで、 E 、 μ 、 λ 、 T 、 α はそれぞれ弾性係数、粘性係数、遅延時間、温度、熱膨張係数である。さらに、式(1)に含まれる諸係数は、ガラス転移温度域で著しく変化し、その他の温度領域では一定とする。ガラス転移温度域でこれらの係数は以下の形で表す。

$$E = E_g \exp\left\{a\left(\frac{T_g}{T} - 1\right)\right\} \quad (2)$$

ここで、 E_g は $T=T_g$ での E の値である。 a は $\log E$ と T_g/T を直線で近似したときの傾きである。

本研究の実験結果や式(1)、(2)に示すように、同様の形状記憶材料である SMA[9] と比べ、SMP はク

リーブや応力緩和などの影響が多い。この影響は、特に、剛性が連続的に変化する特性を利用しようとする場合、SMP の取り扱いを難しくする。このため、本モジュールの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。

また、自立化に向けて熱源などの周辺機器の小型化が必要である。例えば、 T_g は室温付近に設定できるので、排熱を利用することも考えられる。さらに、現在、温度で制御しているが、SMP は温度以外の光、電場、磁場、水などによっても動作可能であり [6, 7]、これらの刺激による駆動も検討中である。

7. おわりに

本研究では、形状記憶ポリマーを用いた姿勢維持モジュールを試作し、その基本特性について検討した。試作品を用いた評価実験により、本コンセプトの有効性を示すことができた。

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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>
- [4] A. Lendlein and R. Langer: " Biodegradable, elastic shape-memory polymers for potential biomedical applications," Science, vol.296, pp.1673-1676, 2002.
- [5] W.M. Sokolowski, A.B. Chmielewski, S. Hayashi and T. Yamada: " Cold hibernated elastic memory (CHEM) self-deployable structures," Proc. SPIE, vol.3669, pp.179-185, 1999.
- [6] W.M. Huang, B. Yang, L. An, C. Li and Y.S. Chan: " Water-driven programmable polyurethane shape memory polymer: Demonstration and mechanism," Appl. Phys. Lett. vol.86, Art. no.114105, 2005.
- [7] 島村宏之, 石澤淳一郎, 林俊一: "形状記憶ポリマー複合材の開発", プラスチックス, vol.57, no.1, pp.124-129, 2006.
- [8] M. Behl and A. Lendlein: " Shape-memory polymers," Materials today, vol.10, pp.20-28, 2007.
- [9] 佐川浩文, 橋本稔, 佐藤公子: "形状記憶合金アクチュエータの鋼性制御に関する研究", 日本ロボット学会誌, vol.6, no.2, pp.21-28, 1988.