

形状記憶ポリマーを用いた空気圧ゴム人工筋の温度制御の検討

○杉谷 和洪 (九州工業大学), 則次 俊郎 (岡山大学),
向井 利春 (理化学研究所), 高嶋 一登 (九州工業大学)

Examination of temperature control of pneumatic artificial rubber muscle using shape-memory polymer

○Kazuhiro SUGITANI (Kyushu Institute of Technology), Toshiro NORITSUGU (Okayama University),
Toshiharu MUKAI (RIKEN), and Kazuto TAKASHIMA (Kyushu Institute of Technology)

Abstract: In order to develop a pneumatic artificial rubber muscle using a shape-memory polymer (SMP), we examined the temperature control of the SMP sheet with embedded electrical heating wires. In this study, we evaluated the prototype of the SMP sheet with the heating wires and applied it to a curved type pneumatic artificial rubber muscle.

1. 緒言

空気圧ゴム人工筋は、ゴムに空気を注入して動力を得るアクチュエータであり、軽量・柔軟・高出力などの利点から、ウェアラブルなパワーアシスト装置への応用が検討されている。例えば、空気圧ゴム人工筋を用いたパワーアシストグローブ^[1]や、肘部パワーアシストウェア^[2]などの研究がある。

また、伸長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) を用いることで、初期形状や湾曲方向に自由度をもたせ、伸縮方向も変位させることが可能になる^[3]。さらに、空気圧ゴム人工筋のゴム自体の非線形性やヒステリシスといった特徴のため、正確な位置制御や速度制御が難しい点を改善することも期待できる。しかし、従来の実験では、人工筋に取り付けられた SMP の加熱はヒートガン等により、外部から温風を送ることで行っていた。外部からの温風による加熱では、温度を上げたり、一定に保ったりすることが難しい。そこで、本研究では電熱線によるジュール熱を用いた加熱を行った。電気的な制御を行うことで、SMP の温度制御や機械特性、人工筋への応用を検討した。

2. SMP の特性

SMP はガラス転移温度 (T_g) を室温程度に設定でき、 T_g を境にして機械的特性が大きく変化する。SMP の温度と弾性率の関係を Fig.1 に示す。Fig.1 に示すように、SMP を T_g 以上の温度にすると、弾性率が約 100~1000 分の 1 になるので、柔らかくなり変形させることができる。そして、変形させた SMP の形状をそのまま保持して T_g 以下の温度に冷却すると、その形状のまま変形

しにくくできる (形状固定性)。その後 SMP を T_g 以上の温度に加熱すると柔軟性を取り戻し、弾性力によって元の形状に回復する特性を示す (形状回復性)。この特性を生かして SMP を人工筋の拘束部材として用いるために必要な性能を検証した。

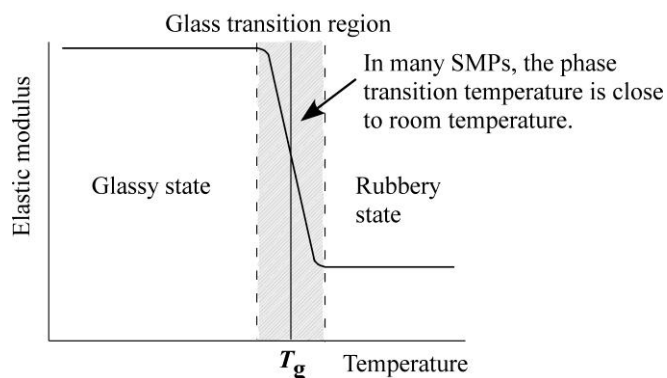


Fig. 1 Relationship between the elastic modulus and temperature of the SMP

3. 電熱線による SMP の加熱

3.1 電熱線埋め込み型 SMP の試作

温度制御を行うため、電熱線を埋め込んだ SMP シート (150 mm × 20 mm × 2~4 mm) を製作した。その SMP シートの外観を Fig.2 に示す。

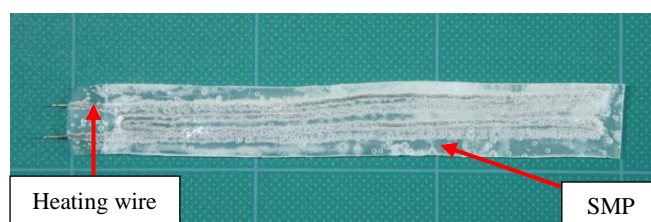


Fig. 2 SMP sheet with embedded electrical heating wires

今回使用した SMP は、ディアプレックス製ダイアリイ (MP4510) で、A 剤 B 剤の二液を混合して、70°C で 2 時間加熱することで硬化し、その形状を記憶する。電熱線 (ニクロム、φ 0.7 mm×550 mm) は W 字型に曲げたものを SMP シートの中に埋め込んだ。

3.2 電熱線埋め込み型 SMP の温度制御

3.2.1 実験方法

SMP シートの温度を一定に保つために、温度制御装置を用いた。この実験の様子を Fig.3 に示す。温度制御装置は、Fig.2 に示した SMP シートの表面に取り付けた熱電対で温度を測定し、電熱線に流れる電流の ON-OFF 制御を行った。電熱線にはスライダックを用いて、3.5 V の交流電圧を加えた。SMP シート表面の温度の時間変化は、赤外線温度計 (キーエンス、FT-H10) で、温度分布の様子を、サーモグラフィカメラ (NEC Avio 赤外線テクノロジー株式会社、F30) で測定した。

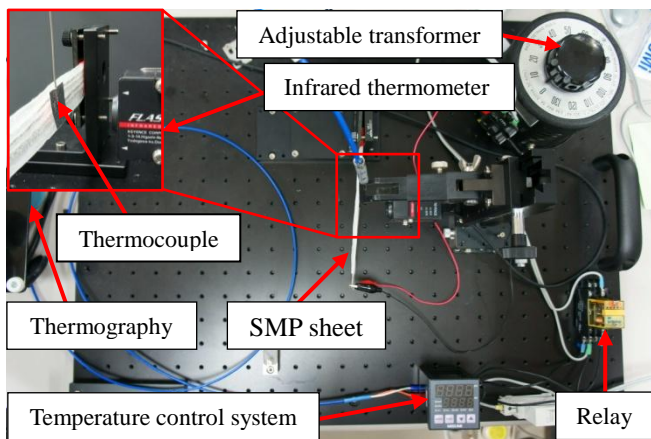


Fig. 3 Experimental apparatus

3.2.2 実験結果および考察

設定温度を 45°C, 50°C, 55°C, 60°C, 65°C としたときの、赤外線温度計で測定した SMP シートの温度の時間変化を Fig.4 に示す。また、それぞれの設定温度で、温度が一定になった時のサーモグラフィを Fig.5 に示す。

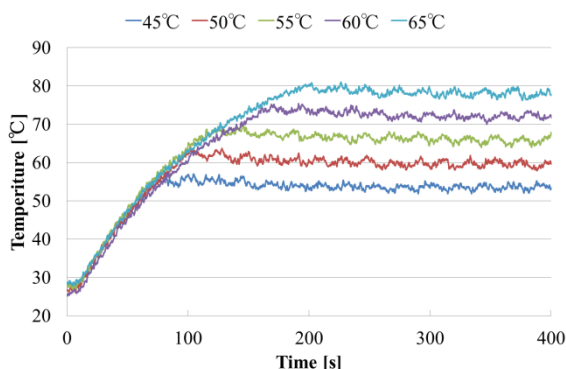


Fig. 4 Transition of temperature of SMP sheet

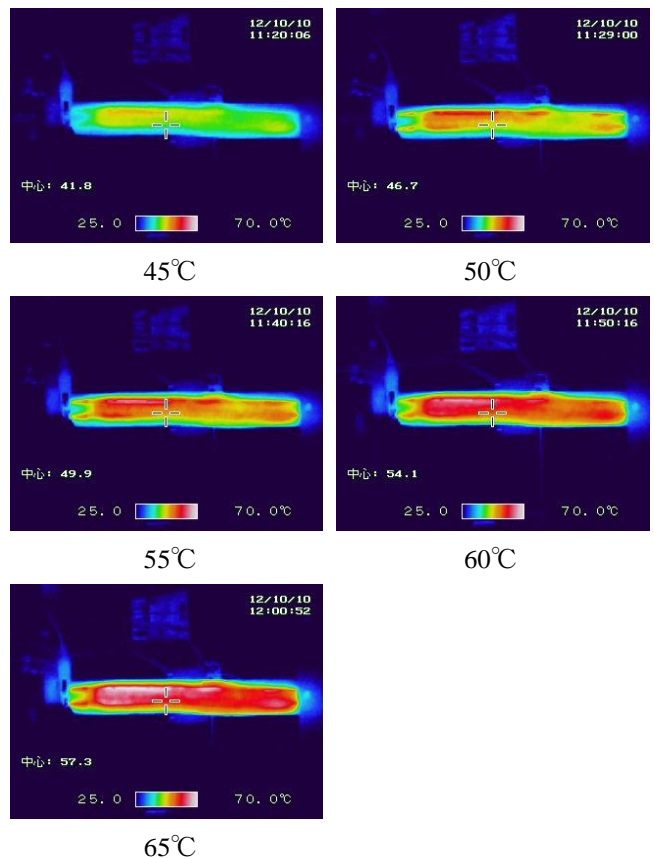


Fig. 5 Thermography at each temperature

Fig.4 より、設定した温度付近で、3~4°C 程度の幅で温度が一定に保てていることが分かった。また、Fig.5 より設定温度が 55°C 以上で SMP シート全体が T_g 付近の温度以上になっていることが分かった。SMP は T_g を境にして特性が変化するため、この実験より SMP をゴム状態と、ガラス状態に保つことができる。

3.3 電熱線埋め込み型 SMP の機械特性

3.3.1 実験方法

電熱線埋め込み型 SMP の機械特性を調べるために、SMP シートの片側を固定し、もう一方をロードセルに取り付けた圧子で押し、SMP を曲げた時の変位量と反力を測定した。測定した値から、片持ち梁の曲げの式より SMP の弾性率を求めた。この時の固定点から圧子で押した点までの長さは、140 mm とした。

3.3.2 実験結果および考察

電熱線を埋め込んだ SMP のガラス状態の場合とゴム状態の場合の変位量に対する反力の関係を Fig.6 に示す。また、それぞれの状態での弾性率と、メーカーが公表している SMP の弾性率から、変位量に対する反力を求めた結果を理論値として Fig.6 に示す。

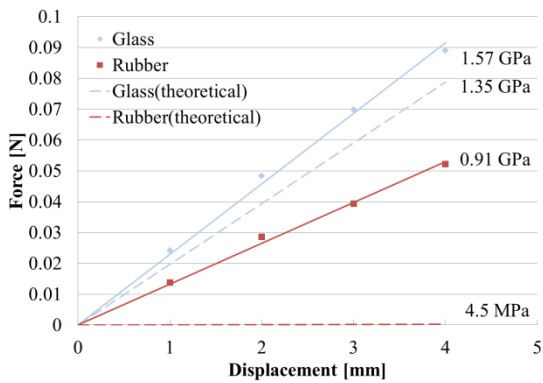


Fig. 6 Mechanical properties of SMP

Fig.6 より、電熱線を埋め込んだ SMP の弾性率は、メーカーが公表している SMP の弾性率よりも大きな値となった。これは電熱線の弾性率^[4]が 214 GPa と SMP に比べて非常に大きく、電熱線の配置が弾性率に大きく影響したためである。そこで電熱線の配置を弾性率に影響しにくい配置 (Fig.7) に変えることで SMP 自体の弾性率に近づけることも可能であると考えられる。

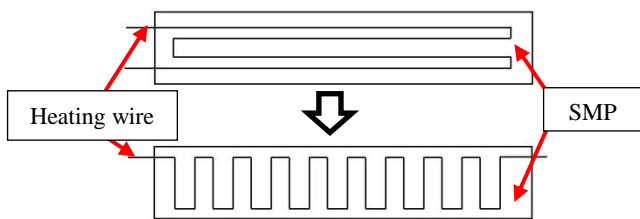


Fig. 7 Layout of heating wire

4. 湾曲型ゴム人工筋試作

Fig.2 の電熱線埋め込み型 SMP を、伸長型空気圧ゴム人工筋 (φ15 mm×160 mm) に取り付け、湾曲動作を行う人工筋を制作した。人工筋の概観図を Fig.8 に示す。人工筋と SMP の両端および中間は、それぞれビニルテープと針金で固定した。

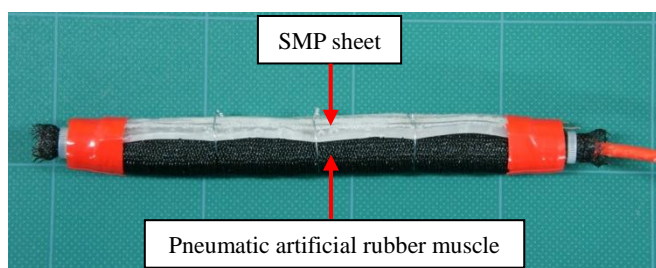


Fig. 8 Prototype of pneumatic artificial rubber muscle using SMP sheet

この空気圧人工筋に 0.2 MPa の一定圧力を加え、SMP の温度を 3.2 の温度制御装置を用いて $T=25^{\circ}\text{C}$ ($< T_g$) から $T=65^{\circ}\text{C}$ ($> T_g$) に変化させた時の、変化前と変化後の状態を重ね合わせた図を Fig.9 に示す。

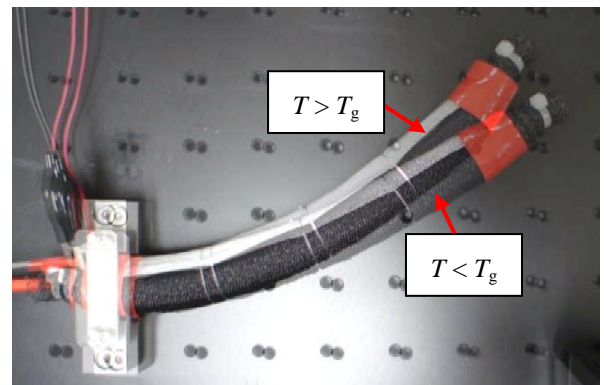


Fig. 9 Motion of pneumatic artificial rubber muscle

Fig.9 のように、SMP の温度を変えることで、人工筋に加える圧力が一定であっても、湾曲動作の変位量を変えることができた。今回は $T = T_g - 20^{\circ}\text{C}$ から $T = T_g + 20^{\circ}\text{C}$ に変化させたが、 T_g 付近では緩やかに SMP の性質が変化するため、 T_g 付近で温度を調整することで、さらに細かく湾曲動作を変化させることも可能であると考えられる。

5. 結言

本研究では、SMP の温度を制御する方法として、電熱線を SMP に埋め込むことで、電氣的に温度を制御する方法について検討を行った。検討の結果、電熱線に流れる電流を制御することで、SMP の温度を一定にすることができた。そのため、 T_g を境にした SMP の機械的特性の違いを保持することができ、実際に空気圧ゴム人工筋に SMP を取り付けた試作品で、湾曲動作に違いがでることが確認できた。

参考文献

- [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] Takashima, K., Noritsugu, T., Rossiter, J., Guo, J. and Mukai, T., "Curved Type Pneumatic Artificial Rubber Muscle Using Shape-Memory Polymer," Journal of Robotics and Mechatronics, vol.24, no.3, pp.472-479, 2012
- [4] 国立天文台編, 理科年表プレミアム, http://www.rikanenpyo.jp/member/?module=Member&action=Contents&page=allPSx11x0270_2012_1.html, 2012.10.9