

J044012

## 電熱線埋め込み型形状記憶ポリマーシートの力学的特性の評価

杉谷 和洪<sup>\*1</sup>, 高嶋 一登<sup>\*2,\*3</sup>, 則次 俊郎<sup>\*4</sup>, 向井 利春<sup>\*3</sup>

### Evaluation of Mechanical Properties of Shape-Memory Polymers Sheets with Embedded Electrical Heating Wires

Kazuhiro SUGITANI<sup>\*1</sup>, Kazuto TAKASHIMA, Toshiro NORITSUGU and Toshiharu MUKAI

<sup>\*1</sup> Graduate School of life Science and Systems Engineering, Kyushu Institute of Technology,  
2-4 Hibikino, Wakamatsu-ku, Kitakyushu, 808-0196, Japan

In order to control the temperature of shape-memory polymer (SMP), we developed an SMP sheet with an embedded electrical heating wire. The SMP can be deformed above its glass transition temperature ( $T_g$ ) and maintains a rigid shape after it is cooled below  $T_g$ . When next heated above  $T_g$ , it returns to its initial shape. In this study, we changed the production method for the SMP sheet and the shape of the embedded electrical heating wire in order to obtain a uniform thickness SMP sheet without air bubbles. We investigated the mechanical properties of the SMP sheet by the bending and tensile tests. The change in the elastic modulus between the glassy and rubbery states of the SMP sheet was 20 times from the bending test. The effects of the embedded wire on the tensile properties were small. Moreover, the SMP sheet with a heating wire can be heated within 1 second from 40°C to 50°C by applying a 50 V voltage to the heating wire.

**Key Words** : Smart Material, Shape-memory Polymer, Actuator, Electrical Heating Wire, Bending Property, Tensile Property, Thermal Property

## 1. 結 言

形状記憶ポリマー (Shape-Memory Polymers, SMP) は、温度により機械特性が変化したり、形状回復したりする。この特性を利用しエンジンのオートチョークや、温めることでねじ山がなくなるビスなどの研究がある。本研究では、伸長型空気圧ゴム人工筋<sup>(1)</sup>とともに用いることで、初期形状や湾曲方向に自由度をもたせ、伸縮方向も変更が可能なアクチュエータの開発をしている<sup>(2)(3)</sup>。その中<sup>(2)</sup>で、SMP中に電熱線を埋め込み、ジュール熱により温度制御する方法を提案し、実際に動作の確認を行った。ただし、以前作製したSMPシートは厚みが不均一であり、SMP中(特に電熱線付近)に多数の気泡が存在する問題があった。本研究では、湾曲型空気圧ゴム人工筋に用いる電熱線埋め込み型SMPシートとして必要な力学的特性を持ったものにするため、作製方法を変更しそのSMPシートの曲げ剛性や引張剛性、温度上昇速度を評価した。

## 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図1に示す。図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なる(形状固定性)。その後SMPを $T_g$ 以上の温度に加熱

<sup>\*1</sup> 九州工業大学大学院生命体工学研究科 (〒808-0196 福岡県北九州市若松区ひびきの2-4)

<sup>\*2</sup> 正員, 九州工業大学大学院生命体工学研究科

<sup>\*3</sup> 正員, 理化学研究所 理研-東海ゴム人間共存ロボット連携センター (〒463-0003 名古屋市守山区下志段味穴ヶ洞 2271-130)

<sup>\*4</sup> 正員, 岡山大学 工学部 (現 津山工業高等専門学校)

E-mail: ktakashima@life.kyutech.ac.jp

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）。

今回、使用した SMP はディアプレックス製ダイアリィ（MP4510）で、 $T_g=45^\circ\text{C}$  である。A 剤 B 剤の二液を混合して、 $70^\circ\text{C}$  で 2 時間加熱することで硬化し、その形状を記憶する。この SMP のカタログ記載の物性を表 1 に示す。ここでは、温度を制御するための電熱線を埋め込むことで、この特性にどのような影響が現れるのか調査を行った。

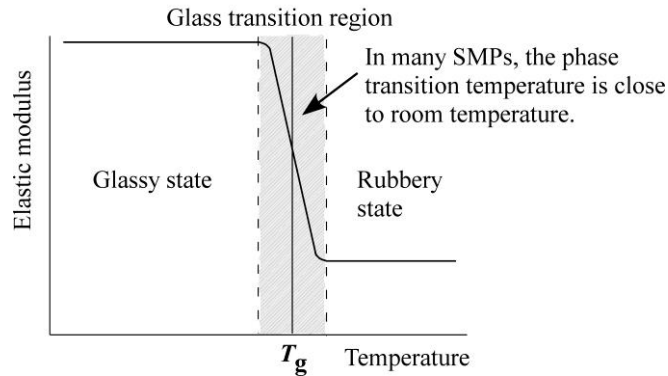


Fig. 1 Relationship between the elastic modulus and temperature of the SMP

Table 1 Mechanical properties of SMP

Glass condition ( $<T_g$ )	Bending elastic modulus (MPa)	1350
	Tensile strength (MPa)	30
	Maximum elongation (%)	10-30
Rubber condition ( $>T_g$ )	Elastic modulus (MPa)	4.5
	Tensile strength (MPa)	20
	Maximum elongation (%)	$>400$

### 3. 電熱線埋め込み型 SMP シートの諸元及び製作方法

湾曲型空気圧ゴム人工筋に用いるための SMP シートに埋め込む電熱線形状を図 2 のようにした。この形状にすることで、前回<sup>(2)</sup>の長手方向に電熱線を埋め込んだ場合に比べて、電熱線による曲げ剛性への影響が小さくなり、伸縮動作にも対応できる形状と考えられる。電熱線は、 $\Phi 0.26\text{mm}$  のニクロム（電気固有抵抗： $108 \pm 6 \times 10^{-6} \Omega\text{cm}$ ，ヤング率：214GPa）を使用し、図 2 に示す電熱線形状の実測抵抗値が約  $20\Omega$  となっている。

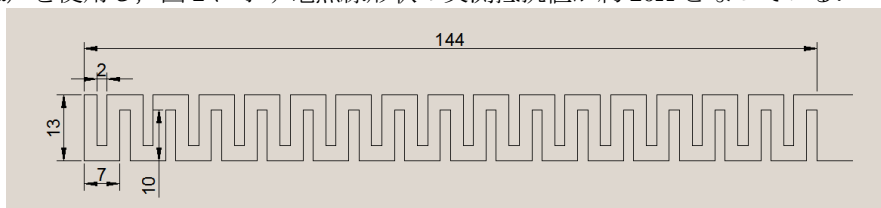


Fig. 2 Shape of electrical heating wire (unit: mm)

電熱線埋め込み型 SMP の製作のために、まず加熱プレス ( $190^\circ\text{C}$ ,  $10\text{MPa}$ , 10 分以上) することで、厚さ  $0.5\text{mm}$  のシート形状を再記憶したものから、目的の形状 ( $150\text{mm} \times 15\text{mm}$ ) に切り出した二枚の SMP シートを用意した。その SMP シートの間に図 2 のように加工した電熱線を挟み込み、加熱プレス ( $150^\circ\text{C}$ , 20 分) した。こうすることで 2 枚の SMP が接着し、SMP 自体がその形状を再記憶する。この方法で作製した電熱線埋め込み型 SMP シートの外観を図 3 に示す。

以前の型を作りそこに SMP を流し込む製作方法<sup>(2)</sup>では、電熱線周りに多量に気泡が発生したり、シートの厚さに大きなむらが生じる問題があった。この方法で電熱線埋め込み型 SMP を制作することで、図 3 のように SMP

に発生する気泡を抑え、SMP シートの厚さを薄く均一化できるようになった。ただし、電熱線を挟み込んだ後さらにプレスするため、シートの幅と長さが目的の形状通りにできないので、プレス後に加工が必要である。



Fig. 3 SMP sheet with embedded electrical heating wire

#### 4. 電熱線埋め込み型 SMP シートの評価試験

##### 4・1 曲げ試験

今回の曲げ試験は SMP シートの片側 25mm を固定し、固定部から 110mm の点をロードセル（共和電業製 LVS-50GA）につけた圧子で押すことで、変位と力を測定した。曲げ試験は、 $T_g$ 以下の温度と  $T_g$ 以上の温度の時それぞれで行った。ここで使用した SMP シートのサイズを表 2 に示す。

以前<sup>(2)</sup>の使用していた SMP シートは、プレスしていないため電熱線が埋まっている部分が厚くなり、シートの厚さが 2~4mm とばらつきがあったが、今回加熱プレスして製作した SMP シートの厚さは 1.0mm と薄く厚い部分と薄い部分の差は 0.1mm 以下となっている。

Table 2 SMP sheet size

Length [mm]	Width [mm]	Thickness [mm]
155	22	1.0

##### 4・2 引張試験

今回の引張試験は、島津製作所製引張試験機 MTS- I 及び AG-100kNX を用いた。試験は、室温（24°C）で行い SMP シートサンプルの両側 20mm をチャックし、ひずみ速度は 10%/min とした。ここでは 3 種類の SMP シートを使用し、それぞれ A, B, C とした。それぞれのサイズを表 3 に示す。

Table 3 SMP sheet size

	Length [mm]	Width [mm]	Thickness [mm]
A	150	20	1.2
B	150	20	1.3
C	150	20	0.9

##### 4・3 温度上昇速度測定試験

電熱線への印加電圧を 20V, 30V, 40V, 50V と変化させた場合の SMP シートの温度上昇の様子を測定した。温度の測定にはキーエンス製の放射温度計 FT-H10 を用いた。温度測定点は SMP シートの中心部分を測定した。また同時にサーモグラフィ（NEC Avio 赤外線テクノロジー株式会社, F30）による温度分布の撮影も行った。ここで使用した SMP シートは曲げ試験で使用したものと同一ものを使用した。

#### 5. 試験結果及び考察

##### 5・1 曲げ試験結果

曲げ試験の変位と反力のグラフを図 4 に示す。図中の数字は結果より算出した曲げ弾性率を示す。この結果より、 $T_g$ 以下の時と  $T_g$ 以上の時の曲げ剛性がおおよそ 1/20 程度になっていた。以前<sup>(2)</sup>使用していた電熱線を長手方向に配置した SMP シートでは、 $T_g$ 以上の時の弾性率が 1.57GPa で  $T_g$ 以下の時の弾性率が 0.91GPa だったので、より大きく弾性率が変化していることが確認できた。これは電熱線の配置を変えたことによって、曲げ方向に対して電熱線の剛性の影響が少なくなったことがわかる。そのため湾曲型空気圧ゴム人工筋に使用した場合、 $T_g$ 以上と以下で湾曲動作の変位差がより大きくなることが予想される。

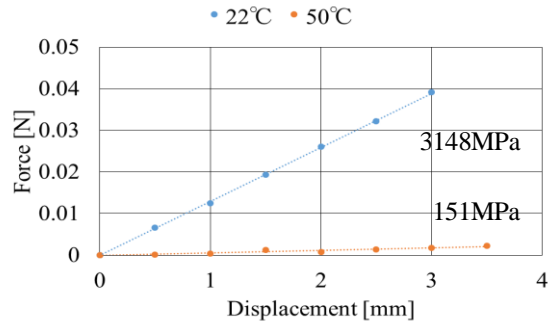


Fig. 4 Relationship between applied bending force and displacement of SMP sheets

### 5・2 引張試験結果

引張試験の応力とひずみの関係を図 5 に示す。また、図中の数値は 2.5 以下のひずみから算出した弾性率を示す。この結果より引張方向には、この SMP 自体の引張強さ及び弾性率（表 1）に大きな乖離は見られなかった。そのため、電熱線が SMP シートに与える影響がほとんどないと考えられる。このことから、ガラス状態では伸び方向への拘束ができるので、湾曲動作が行える。

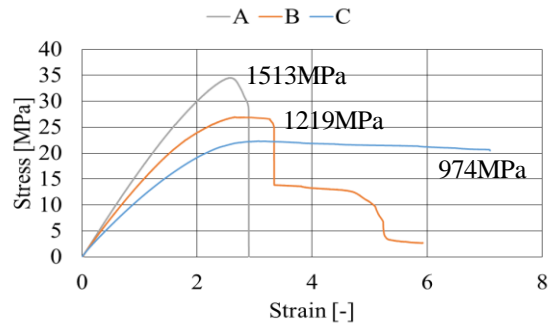


Fig. 5 Stress-strain curves from tensile tests of SMP sheets

### 5・3 温度上昇速度試験結果

温度上昇速度試験の結果を図 6 に、図 6 中の 50°C 近辺でのサーモグラフィー画像を図 7 に示す。サーモグラフィーの温度分布から SMP 全体の温度が、中心部分と同様に素早く上昇していることを確認した。これは SMP シートを薄く製作したことによって熱容量が下がったためだと考えられる。また、ガラス転移温度を挟む 40°C から 50°C までの 10°C 温度が上昇する時間は、40V の時は 1 秒、50V の時は 0.5 秒と応答時間も短く、実用的な応答速度となった。このことから、SMP の厚みによって温度上昇速度を上げられることが確認できた。ただし、図 7 を見ると、電圧を高くした場合 SMP シートの温度分布に大きなむらがあった。これは、電熱線がある部分とない部分で温度の上昇速度に差があり、むらができていたので 50°C で一定にすることで温度のむらを減らせる。

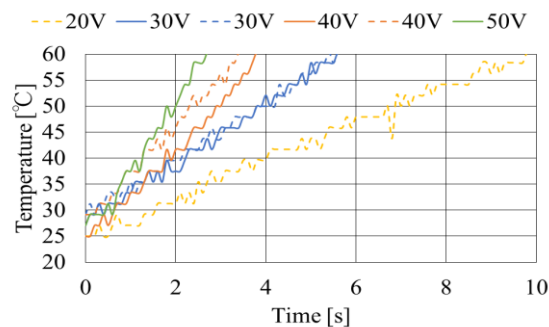


Fig. 6 Transition of temperature of SMP sheet

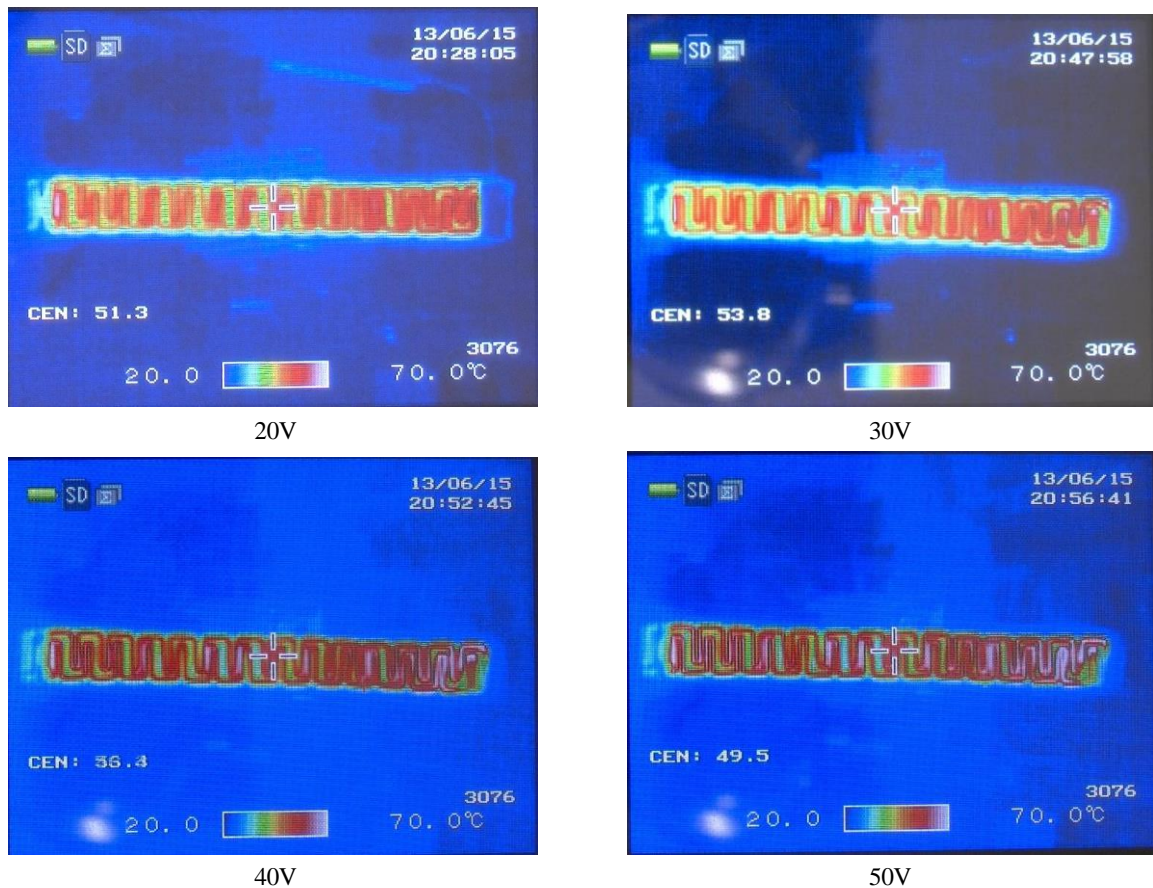


Fig. 7 Thermograms of SMP sheet heated at 50°C

## 6. 結 語

本研究では、まず SMP シートに埋め込む電熱線の形状をシートの曲げや引張に影響が少なくなるようにした。さらに SMP シートをプレス加工で製作することで厚さを薄く均一することができた。また、この製作方法にすることで、SMP シート内部に発生する気泡の量を減らすことができた。また、SMP シートが薄くなり、電熱線に加える電圧によっては、ガラス転移温度 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ の温度変化に要する時間が 1 秒以内になることが確認できた。このことから、湾曲型空気圧ゴム人工筋での使用に適した電熱線埋め込み型 SMP シートの作製ができるようになった。

## 謝 辞

本研究は、公益財団法人マツダ財団からの研究助成を受けたものです。

## 文 献

- (1) 佐々木大輔, 則次俊郎, 山本裕司, 岩本昌弘, “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) 杉谷和洪, 則次俊郎, 向井利春, 高嶋一登, “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”, SI2012, pp.1144-1146.
- (3) Takashima, K., Noritsugu, T., Rossiter, J., Guo, S. 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