

形状記憶ポリマーの温度による剛性変化を利用した 力覚センサに関する研究

○神園 大樹 (九州工業大学), 高嶋 一登 (九州工業大学, 理化学研究所),
向井 利春 (理化学研究所)

Study on Force Sensor Utilizing Stiffness Change of Shape-Memory Polymer According to Temperature

○Hiroki KAMIZONO (Kyusyu Institute of Technology),
Kazuto TAKASHIMA (Kyusyu Institute of Technology, RIKEN), and Toshiharu MUKAI (RIKEN)

Abstract: In this study, we propose a force sensor using shape-memory polymer(SMP) whose stiffness varies according to the temperature. The relationship between the applied force and the deformation of the SMP changes depending on the temperature. Therefore, attaching the strain gauge on the SMP sheet, the force measuring range and the accuracy can be changed according to the temperature. In this study, we evaluated the prototype of the sensor.

1. 緒言

ロボットは近年, 介護・福祉などの分野に適用され, 従来のように工場のみで使用される場合に比べて幅広い環境で使用されるようになり, さまざまな外界情報の測定が必要になってきた. 我々はこれまで形状記憶ポリマー (SMP) の温度による剛性変化を利用した姿勢維持モジュールやアクチュエータをいくつか開発してきた[1-4]. ここで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率が大きく変化し, 約100~1000分の1になる. 本研究ではこれまで開発してきた知見を応用し, 測定レンジや精度を変更できる力覚センサを構築した.

2. SMPを用いた力覚センサの基本仕様

力覚センサは, 機械変形によって検出部分に生じた抵抗, 静電容量, レーザ光の反射量などの変化を電気信号に変換するが, その測定原理やセンサ材料の材質・サイズによって測定レンジや精度は決まる. センサ材料に加わった変形量をひずみゲージなどで読み取り, 力覚センサを構築する場合, 変位量を読み取れるレンジはセンサの材料によって決まっており, センサ作製後に変更することはできない. そこで本研究では, センサ材料を SMP で構成した. Fig.1 に示すように, SMP は温度によって剛性が変化するので, 同じ力を加えても温度に応じて変形量が異なる. また, SMP を用いたセンサは各温度において Fig.2 のような関係が得られると考えられる. センサ材料に加わった変形量を歪ゲージなどで読み取り, 触覚センサを構築する場合, 変位量を読み取れるレンジ (Fig. 2 の横軸に図示した範囲) はセンサの材料によって決まっており, センサ作

製後に変更することはできない. SMP は剛性変化に応じて変位量に対応する荷重の範囲 (Fig. 2 の縦軸に図示した範囲) を変えることができるので, センサを作製後, 荷重の測定レンジを変えることができる. このような特性を示すセンサを構築することを目指し本実験を行った.

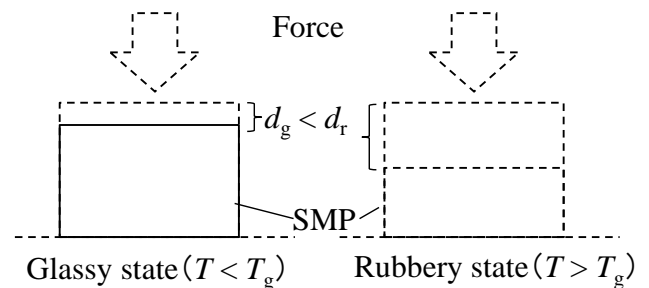


Fig.1 Deformation in glassy state and rubbery state

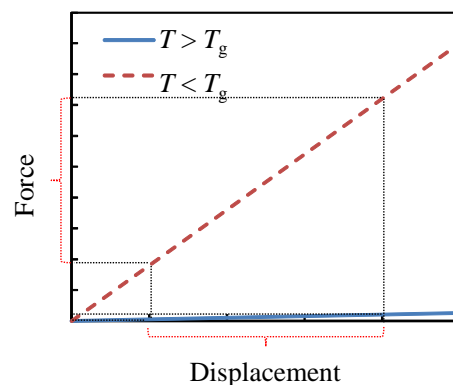


Fig. 2 Relationship between force and displacement of SMP

3. 実験方法

3.1 試作品

Fig.3 が実験に用いた SMP を用いた力覚センサ（長さ：100mm，厚さ：2.2mm，幅：32mm）の試作品である。本研究では，株式会社 SMP テクノロジーの SMP（MP 4510， $T_g=318K$ ，曲げ弾性率:1350Mpa ($T < T_g$)，4.5MPa ($T > T_g$)，線膨張係数: $\alpha=11.6 \times 10^{-5} K^{-1}$) を使用した。A 剤 B 剤の二液を混合して，343K で 2 時間加熱することで硬化し，その形状を記憶させた。その後，厚さ 1.0mm の SMP シートを 2 枚作製するため，加熱プレス (190°C，10MPa，10 分以上) し形状を再記憶させた。さらに，温度を制御するために 2 枚のシートの上に電熱線 ($\Phi 0.26mm$ ，電気固有低抵抗： $108 \pm 6 \times 10^6 \Omega cm$ ，ヤング率:214GPa) を挟んだ。そして加熱プレス (150°C，20 分) し，2 枚の SMP を接着させ，SMP 自体にその形状を再記憶させた。作製したシートの表面にひずみゲージ (共和電業，KFG-5-120-C1-16L3M2R) を貼り，SMP シート表面のひずみを測定できるようにした。

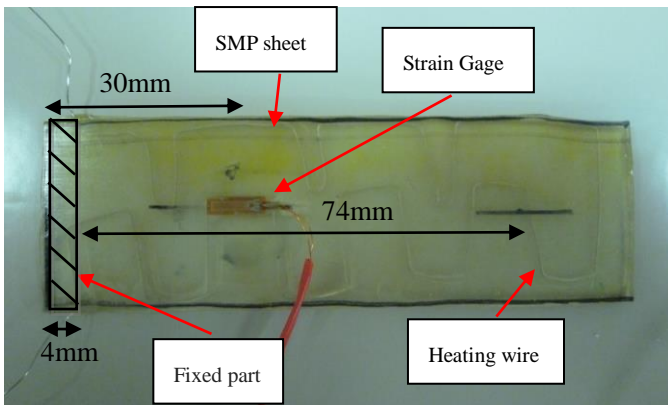


Fig. 3 Prototype of the force sensor using SMP sheet

3.2 実験装置および実験方法

Fig.4 に実験装置を示す。室温 ($< T_g$) と 353K ($> T_g$) に分け SMP シートの片側を固定し，固定部から 74mm の点をロードセル (共和電業，LTS-2KA ($T < T_g$)，LVS-100GA ($T > T_g$)) につけた圧子で押すことで，変位と力を測定した。ロードセルは手動ステージに取り付け，変位量を変化させた。また，試作品表面の温度は放射温度計 (キーエンス，FT-H10) により計測した。また，電熱線をスライダックに接続し，電圧を調整して温度を制御した。

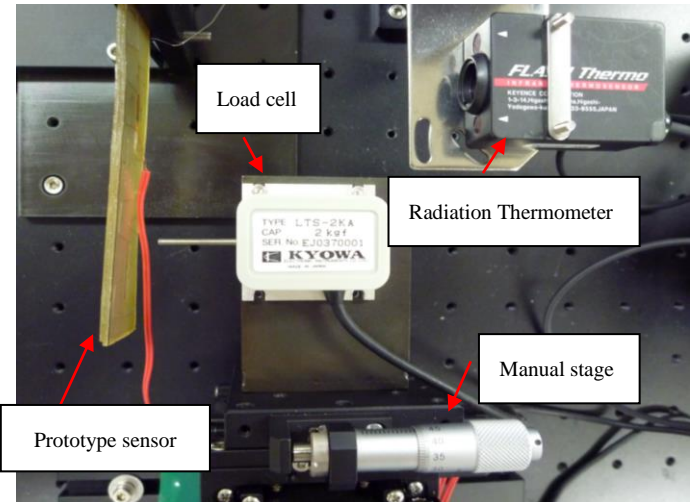


Fig.4 Experimental apparatus to evaluate the force sensor

4. 結果および考察

4.1 ひずみと力の関係

Fig.5 は 0.5mm ずつロードセルを送り，検出された力と送った距離との関係を $T < T_g$ ， $T > T_g$ それぞれにおいて表した図である。Fig.2 と同様に本実験の結果は， $T < T_g$ のときに測定された SMP シートの反力と比べ， $T > T_g$ のときに計測できる反力はかなり狭い範囲で測定されていることが分かる。

また，Fig.6 はそのときのひずみと力の関係を表した図である。Fig.6 の結果からセンサの換算値に当てる値を算出した。Fig.6 の $T > T_g$ のときひずみが 600 $\mu\epsilon$ 付近で始まっているのは SMP が熱膨張したためである。今回作製した力覚センサは温度変化させることにより $T > T_g$ のときには微細な力を検出できることが分かる。従来，測定レンジや精度の異なるものを測定する場合，センサを取り外し，別のものに交換することが必要だが，温度によって使い分ければより広範囲の力をセンサの交換をせずに測定できる。

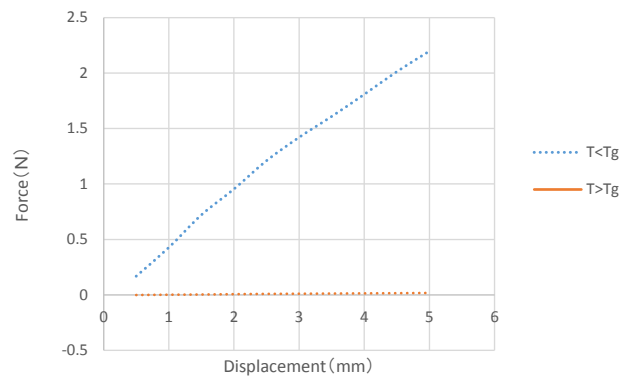


Fig. 5 Relationship between applied force and displacement

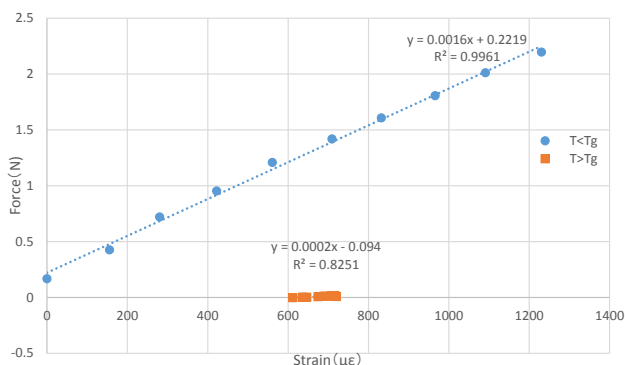


Fig. 6 Relationship between applied force and strain on SMP sheet

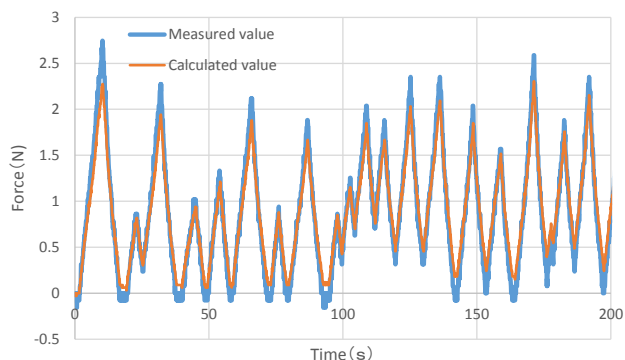


Fig.7 Relationship between calculated value and measured value ($T < T_g$)

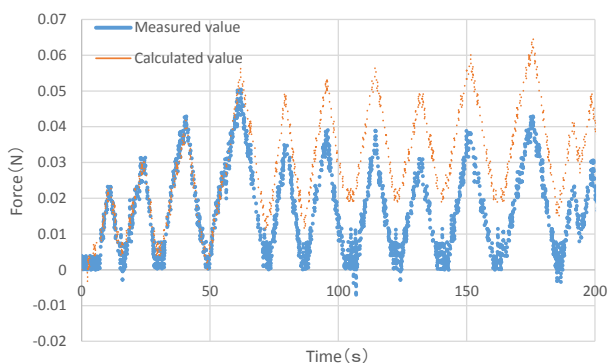


Fig.8 Relationship between calculated value and measured value ($T > T_g$)

4.2 接触反力の算出例

次に、ひずみゲージの出力により試作品に加わった力を Fig.6 の近似曲線から計算し、実際に加えた力と比較した。Fig.7, 8 はそれぞれ $T < T_g$, $T > T_g$ における力の経時変化である。ロードセルを適当な距離送り、計測を行った。

Fig.7, 8 ではロードセルによる実測値と試作センサによる計算値は同様の出力が見られた。また、同様の変形を与えたものの測定する力のレンジは大きく異なる

ことが分かる。さらに、Fig.8 では、50 秒までは常温時と変わらず実測値に近い値を示していたが、50 秒以降は計算値と実際に加えた力が徐々にずれてしまっていることが分かる。要因として SMP のクリープの影響や SMP シートを押し、反力を計測してからまた初期位置に戻るまで時間がかかり、ロードセルが十分に力を検出できなかったからだと考察される。

5. 結論

本研究では、SMP の温度による剛性変化を利用した力覚センサの検証を行った。実験結果から、荷重の測定レンジを、センサを交換することなく変更ことができ、広範囲の力を検出することのできるセンサを構築することができた。

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。

参考文献

- [1] 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 (2010), pp.905-912
- [2] K. Takashima, J. Rossiter, T. Mukai, McKibben artificial muscle using shape-memory polymer, *Sensors & Actuators: A. Physical* vol. 164 (2010) pp. 116-124.
- [3] K. Takashima, T. Noritsugu, J. Rossiter, S. Guo, T. Mukai, Curved type pneumatic artificial rubber muscle using shape-memory polymer, *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol.24 no.3 (2012) pp.472-479.
- [4] 杉谷 和洪, 高嶋 一登, 則次 俊郎, 向井 利春, “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評価”, SI2012, (2012) pp.1144-1146.