

電熱線埋め込み型形状記憶ポリマーシートを用いた力覚センサの改良

○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),
竹中 慎 (香川県産業技術センター, 九州工業大学), 向井 利春 (理化学研究所)

Improvement of Force Sensor Using Shape-memory Polymer Sheet with Embedded Electrical Heating Wire

○Hiroki KAMIZONO (KIT), Kazuto TAKASHIMA (KIT, RIKEN),
Makoto TAKENAKA (KPITC, KIT) 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, using the SMP sheet, the force measuring range and the accuracy can be changed according to the temperature. In this study, we improved the sensors combing the SMP and the stainless steel plate.

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, センサ [1-5] をいくつか開発してきた. 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.

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. 例えば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, ひずみ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. そこで我々は, センサ材料を SMP で構成し, 実験を行ってきた [5].

Fig.1 に示すように, SMP は温度によって剛性が変化する. 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. SMP は剛性変化に応じて変形量に対応する荷重の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. しかし, 実際に SMP をシート状にし, 表面にひずみゲージを貼ったセンサで実験を行ったところ, T_g 以上の状態でひずみが実際よりも小さく検出されるという問題が生じた. 要因としてひずみゲージの金属材料と SMP の弾性率の違いが大きすぎるため, センサを変形させても SMP だけが変形し, ひずみゲージ自体に

変形が十分に伝わらなかったことが考えられた. また, 測定レンジや精度を変更できる量は SMP の材料の特性に依存する. 一方, SMP の温度による弾性率の変化は約 100~1000 倍であるが, センサを使用する場合, 数倍から数十倍の変化で十分な場合も考えられる. そこで改善策として SMP と鉄板を貼り合せ, 鉄板表面にひずみゲージを取り付けたセンサを作製し, 実験を行った.

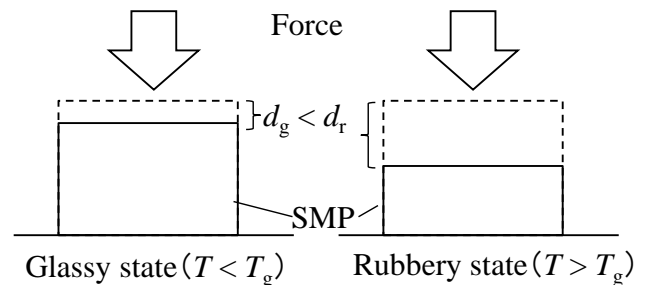


Fig.1 Deformation in glassy state and rubbery state

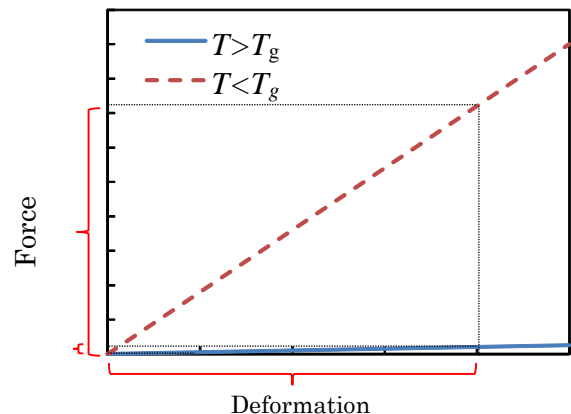


Fig. 2 Relationship between force and deformation of SMP

2. 実験方法

2.1 試作品

Fig.3 が実験に用いた SMP と鉄板を貼り合せた力覚センサである. 本研究では, SMP テクノロジーズの SMP (MP 4510, $T_g=45^\circ\text{C}$, 曲げ弾性率:1350 MPa ($T < T_g$), 4.5MPa ($T > T_g$), 線膨張係数: $\alpha=11.6 \times 10^{-5} \text{C}^{-1}$) を使用した. 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, その形状を記憶させた. そこから SMP をシート状に成型するために, 190°C で 10 分間加熱プレス (10 MPa) し, その形状を記憶させ厚さ 1.0 mm の SMP シートを 2 枚作製した. さらに, 温度を制御するために 2 枚のシートの間に電熱線 ($\Phi 0.26 \text{ mm}$, 電気固有抵抗: $108 \pm 6 \times 10^6 \Omega \text{ cm}$, ヤング率: 214 GPa) 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 (厚さ: 2.1 mm) に鉄板 (SUS304H, 厚さ: 0.3 mm) を貼り合わせ, 鉄板表面にひずみゲージ (共和電業, KFG-5-120-C1-16L3M2R) を貼り, センサ表面のひずみを測定できるようにした.

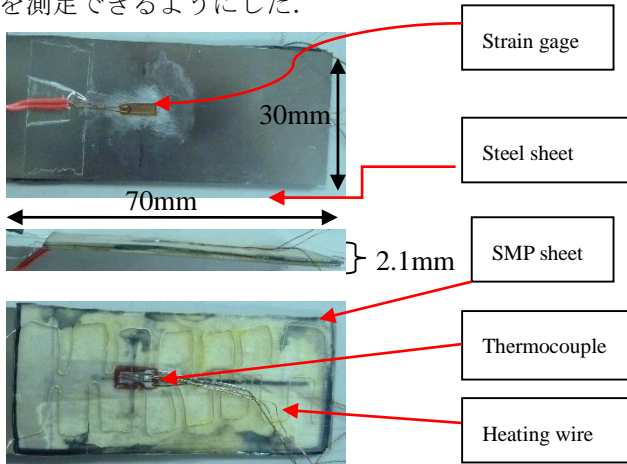


Fig. 3 Prototype of force sensor using SMP sheet

2.2 実験装置および実験方法

Fig.4 に実験装置を示す. T_g 以下と T_g 以上に分け作製したセンサの片側を自動ステージに固定し, 片持ち梁の状態から 70 mm の点をロードセル (共和電業, LVS-500GA) 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, 位

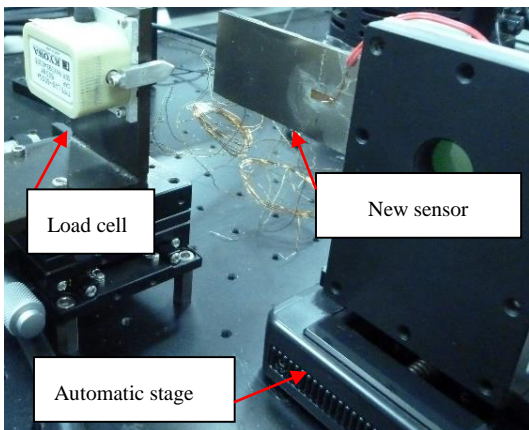


Fig.4 Experimental apparatus to evaluate force sensor

置の調整を行った. また, SMP 表面の温度は熱電対により計測した. 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.

2.3 理論式

Fig.5 に示すように, SMP シートと鉄板を貼り合せた組み合わせの片持ち梁が, 曲げを受ける時, 鉄板表面のひずみ ε は以下の式で表される[6].

$$\varepsilon = \frac{Wx}{E_M I'_M + E_T I'_T} (h_1 + h_2 - h_c) \quad (1)$$

ただし, W は先端の反力, x は先端からひずみゲージまでの距離, E_M , E_T はそれぞれ SMP および鉄板の弾性率, I'_M , I'_T はそれぞれ SMP および鉄板の中立軸に関する断面二次モーメント, h_1 , h_2 はそれぞれ SMP および鉄板の厚さ, h_c は中立軸までの距離である. SMP がガラス状態とゴム状態におけるひずみをそれぞれ ε_g , ε_r とする. Fig.6 に式(1)によって計算した h_2/h_1 と $\varepsilon_r/\varepsilon_g$ の関係を示す. 今回用いた試作品の寸法, 物性を用いて, 鉄板の厚みを変化させた. 図のように厚みを変化させることで温度によるひずみの変化量を調整できる. そのため作製するセンサに出力される反力の範囲を調整することができる.

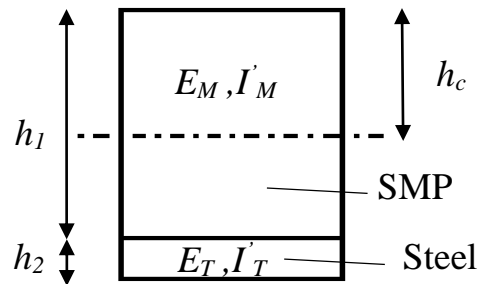


Fig. 5 Cross section of proposed force sensor

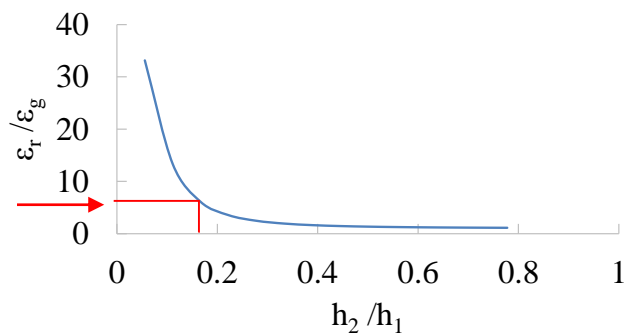


Fig. 6 Relationship between ratios of thickness and strain

3. 結果および考察

3.1 ひずみと力の関係

Fig.7 は自動ステージを用いて作製したセンサを送り, 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 シートの反力に比べ、 $T > T_g$ のときに計測できる反力はかなり狭い範囲であることが分かる。

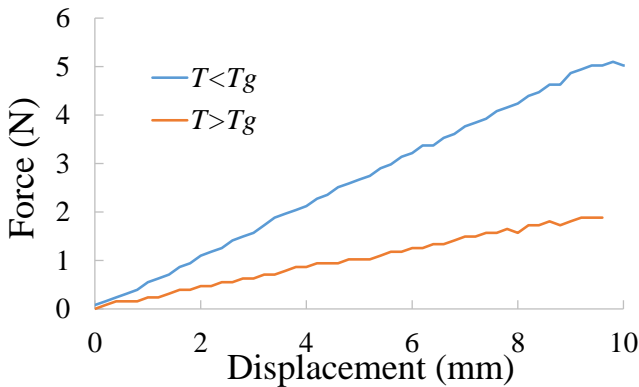


Fig. 7 Relationship between applied force and displacement

また、Fig.8 はそのときのひずみと力の関係を表した図である。この結果からセンサの換算値に当てる値を算出した。実験結果は式(1)によって算出した理論値に近いことが分かる。このように鉄板を貼り合わせることで反力の範囲を調整することができる。

また、Fig.8 の $T > T_g$ のときひずみが $-200\mu\epsilon$ 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。

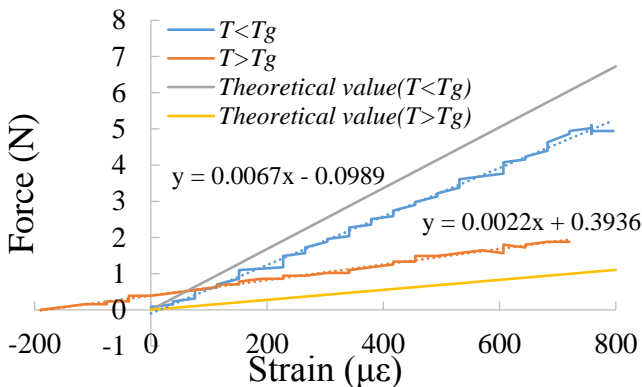


Fig. 8 Relationship between applied force and strain

3.2 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.8 の近似曲線から計算し、実際に加えた力と比較した。Fig.9, 10 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.9, 10 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。

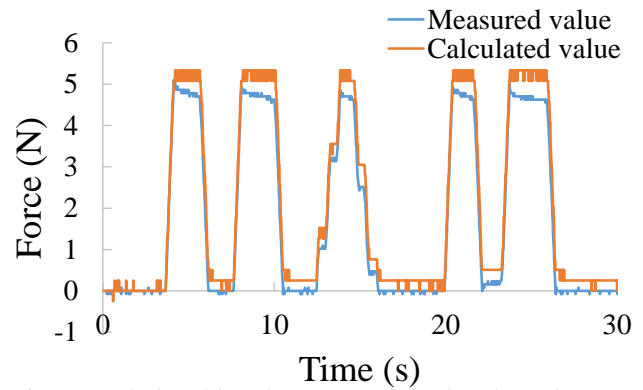


Fig.9 Relationship between calculated value and measured value ($T < T_g$)

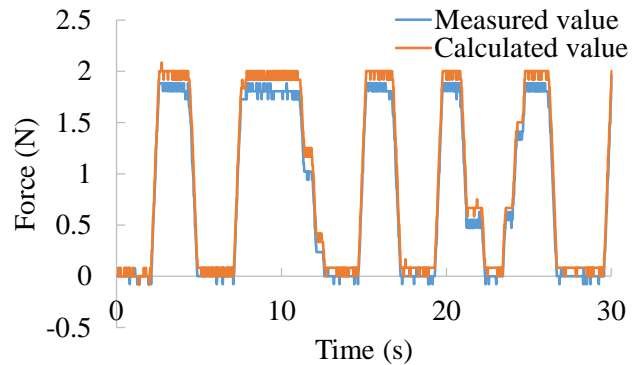


Fig.10 Relationship between calculated value and measured value ($T > T_g$)

4. 結言

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、鉄板と SMP シートの厚みを変化させることで作製するセンサに出力される反力の範囲を調整することができた。また、鉄板と SMP を組み合わせたセンサでも荷重の測定レンジを、センサを交換することなく変えることができ、広範囲の力を検出できるセンサを構築することができた。

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] K. Takashima, K. Sugitani, N. Morimoto, S. Sakaguchi, T. Noritsugu, T. Mukai, Pneumatic artificial rubber muscle using shape-memory polymer sheet with embedded electrical heating wire, Smart Materials and Structures (accepted).
- [5] 神園 大樹, 高嶋 一登, 向井 利春, “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”, SI2013, (2013) 3 pages (314-3).
- [6] 柴田俊忍, 大谷隆一, 駒井謙次郎, 井上達雄: 材料力学の基礎. 培風館, 1991.