

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月10日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560253

研究課題名（和文） 形状記憶ポリマーをMEMSアクチュエータへ応用するための構造と加工法

研究課題名（英文） Structure and fabrication process to apply shape memory polymers to MEMS actuators

研究代表者

今井 郷充 (IMAI SATOMITSU)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号：20369953

研究成果の概要（和文）：形状記憶ポリマーを用いたアクチュエータにおいて、二方向動作を与える方法を提案した。ガラス遷移点温度(Tg)の異なる2種類の形状記憶ポリマーを用い、一方に記憶させたい形状、他方にはこれと逆の形状を与え、加熱した際に低いTgで生じた記憶形状を高いTgで生ずる記憶形状でキャンセルさせるという方法である。試作により提案した動作原理を検証し、さらに加熱を速くかつ均一に行うため、マイクロヒーターを一体化することも提案した。

研究成果の概要（英文）：A method to realize two-way behavior for a shape memory polymer actuator has been proposed. Two kinds of SMPs with different glass transition temperatures are used. The memory shape appears at the lower Tg, and then this memory shape is canceled by the other memory shape generated at the higher Tg. We confirmed the effectiveness of the proposed method experimentally.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2011年度	100,000	30,000	130,000
2012年度	100,000	30,000	130,000
年度			
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，知能機械学・機械システム

キーワード：マイクロ・ナノメカトロニクス，形状記憶ポリマー，アクチュエータ，MEMS，2方向動作，薄膜

1. 研究開始当初の背景

形状記憶ポリマーの歴史はあまり長くない、また安定した性能を出すことに難点があったため産業的にはあまり利用されていなかった。しかし安定した特性のポリウレタン系材料が開発されてから産業的な応用が広まりつつある。ねじ山の消えるねじ、形状記憶スプーン、加湿器の水分子透過膜などが代表的な例である。ここ数年、この形状記憶ポリマーの機械的特性等についての研究発表も行われている。

形状記憶ポリマーがアクチュエータとしてあまり利用されていなかったひとつの理由として、発生力が小さいことが挙げられるが、MEMS で使用するならばあまり問題とはならない。また形状記憶合金よりも軽量でより大きな歪を出せ、出力/質量の比が大きい点で MEMS には有望である。さらに、自由な形状に加工できることや形状回復温度を自由に設定できることも形状記憶合金にはないメリットと考えられる。

2. 研究の目的

まず形状記憶ポリマーの動作原理を概説する。形状記憶ポリマーは融点付近で液体から固体化させることで 1 次形状(記憶形状)を与えることができる。その後ガラス遷移点温度以上で変形させた 2 次形状に対して、これをガラス転移点温度以下にするとそのままの形状を保ったまま硬化し、再びガラス転移点温度以上にすると軟化して 1 次形状(記憶形状)が現れる。

形状記憶ポリマーを用いたアクチュエータにおいて、形状記憶効果のみで繰り返し動作を実現させる場合、形状記憶効果により 1 次(記憶)形状が生じたのち、変形前の形状に戻してから温度を下げる必要がある。もし変形したまま温度を降下させるとその状態のまま硬化してしまうからである。そのため外部から力を与えて変形を復元させることは一つの方法として考えられ、従来のアクチュエータではこのような方法がよく用いられていた。しかし MEMS のように小さい場合は困難となる可能性がある。そこで形状記憶効果のみにより元の形状に戻るメカニズムを持たせることが操作を容易にする点から望ましいと考え(加熱のみでよい)、このための方法を提案し検証を行う。

3. 研究の方法

本研究の主要課題である記憶形状発生後、変形前の状態に戻す方法を以下に述べる。ガラス転移点温度の変更が可能なポリウレタン系形状記憶ポリマーを用い、薄膜での使用を考えスピンコーティングが可能な溶液タイプとした(“ダイアリイ”, 三菱重工)。またアクチュエータの試作は、SMP 膜の構成の

仕方を変えた以下の 2 つに関して行い、それぞれに対して動作原理の検証および動作特性の評価を行った。

アクチュエータの構造として以下の 2 つを選択した。

①基板表裏に 2 種類の SMP 膜を形成するタイプ

基板とする材料上に(例えば薄いプラスチックシートやシリコンウエハなど)に形状記憶ポリマーを成膜し、ガラス遷移点温度(T_g)以上でたわみを与えて 1 次形状とする。これを基板の表/裏において行う。但し、表/裏面に成膜した形状記憶ポリマーはガラス転移点温度が異なるものとし、与える 1 次形状は表と裏の形状記憶ポリマーでは逆形状とする。この方法は後述する片持梁型のアクチュエータに適用した。

② 2 種類の SMP 膜を貼り合わせるタイプ

上記で記述した方法で基板の片面のみ形状記憶ポリマーを成膜し、1 次形状を付与する。同様にもう一つ製作し、これら 2 枚の SMP 膜を貼り合わせる。但し、2 つの形状記憶ポリマーのガラス転移点温度は異なるものとし、また与える 1 次形状はそれぞれ正/逆の形状とする。この方法は後述するダイアフラム型のアクチュエータに適用した。

上記 2 種類の形状記憶ポリマーのガラス転移点温度を T_{g1} , T_{g2} とする(但し, $T_{g1} < T_{g2}$)。 T_{g1} 以下の温度(ガラス状態)から加熱して T_{g1} 以上にすると一方の記憶形状が発生し、さらに温度を上げて T_{g2} 以上にするともう一方の記憶形状が発生し、最初に生じた記憶形状はキャンセルされて元の状態に戻る。これが提案した動作原理であり、この検証を試作により行った。

4. 研究成果

加熱/放熱のみで繰り返し動作を行う形状記憶ポリマーアクチュエータを提案し、2 タイプの試作(片持梁型およびダイアフラム型)を行い、提案した駆動原理を検証した。

また駆動のために必要な加熱源としてマイクロヒーターをアクチュエータに一体化することを試み、試作により動作特性を評価した。熱駆動は一般に応答性が課題とされるが、ヒーターを一体化することで応答性を向上できることがわかった。これらの詳細を以下に示す。

(1) 提案した駆動原理

従来の SMP アクチュエータでは、 T_g 以上の温度に加熱して軟化した状態で外力を作用させて変形させ、その後冷却したのち、再び加熱して T_g 以上の温度で形状回復させるといった方法を用いていた。本方法では外力は使

用せず、形状記憶効果のみで動作させるため、 T_g の異なる 2 種類の SMP を用いた。その原理を図 1 に示す。2 種類の SMP に正/逆の形状を記憶させ、低いガラス転移点温度 T_{g1} で生じた記憶形状を高いガラス転移点温度 T_{g2} で生じる記憶形状でキャンセルさせるという方法である。この後 T_{g1} 以下に冷却し、再び加熱することで一定の動作を繰り返す。

本方法を適用するためには、形状記憶ポリマーが以下の性質即ち、 T_g を変えられること、構造体への付加加工および記憶形状の付与が容易に行えることが必要で、ポリアウレン系 SMP (“Diary”, 液体タイプ) を選択した。使用した SMP は T_g を $-40 \sim 120^\circ\text{C}$ に設定可能で、本研究では T_{g1} を 35°C 、 T_{g2} を 55°C とした。また本 SMP はスピニングが可能である。

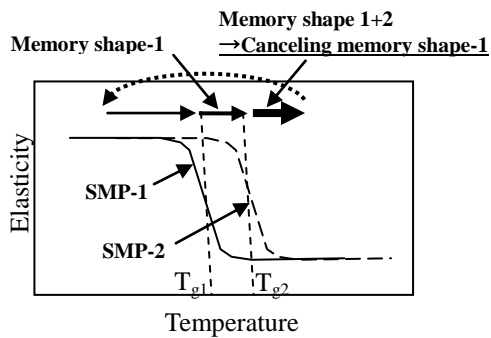


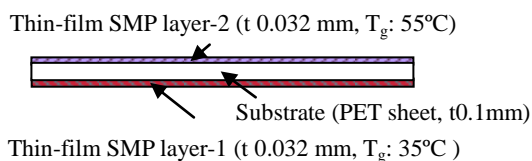
図 1 提案したアクチュエータの動作原理

(2) アクチュエータの構造および加工法

① 片持梁型

図 2 に片持梁型のアクチュエータの形状・寸法を示す。梁の両面に異なる T_g の SMP 膜を設けている。基板は低剛性化のために PET シート ($t0.1\text{mm}$) とした。梁のサイズは幅 $5 \times$ 長さ 28mm である。

加工法であるが、まず融点以上の温度でスピニングにより SMP-1 膜 (厚さ $32 \mu\text{m}$, $T_{g1}: 35^\circ\text{C}$) を形成し、記憶させたい形状に保持した状態で乾燥させる。これにより記憶形状が付与される。その後、 T_{g1} 以上の温度域でフラットな状態に戻す。反対の面に SMP-2 膜 (厚さ $32 \mu\text{m}$, $T_{g2}: 55^\circ\text{C}$) を同様な操作で形成する。付与した記憶形状はいずれも曲率半径約 17mm の湾曲形状で、一方の SMP 膜に正、他方には逆の形状を与えた。



サイズ: $W5 \times L33 \text{ mm}$ (固定部: 5 mm)

図 2 片持ち梁型の形状・サイズ

② ダイアフラム型

ダイアフラム型の構造・寸法を図 3 に示す。シリコン (Si) を基板 ($t0.2\text{mm}$) とし、その上に厚さ $40 \mu\text{m}$ の SMP 膜を設けたユニット 2 つを SMP 面で接着して結合した。ダイアフラムの径は 7mm である。 T_g は、SMP-1 が 35°C (T_{g1})、SMP-2 が 55°C (T_{g2}) である。

プロセスは以下の通りである。まず基板上にポリイミド (PI) 膜 ($t10 \mu\text{m}$) をスピニングで成形する。これは SMP 膜を成形するためのベース膜として用い、後に除去する。次にダイアフラム部のパターンニングを行い、ドライエッチング (ボッシュプロセスを用いた ICP エッチング) により Si 基板のダイアフラム部を除去する。その後、PI 膜上に SMP 膜をスピニングで成形し、PI 膜をエッチング液 (TPE3000, 東レエンジニアリング) により除去する。この後 SMP 膜に後述する記憶形状を与え、その後 2 つのユニットを SMP 面で接着する。

記憶形状は半球面形状とした。鋼球をダイアフラム部に置き、SMP を融点付近まで加熱することで与えた。使用した鋼球の径は 5 および 7.5mm で、この場合のダイアフラム中心のたわみは、約 1.43mm (半径 5) および 0.87mm (半径 7.5) である。

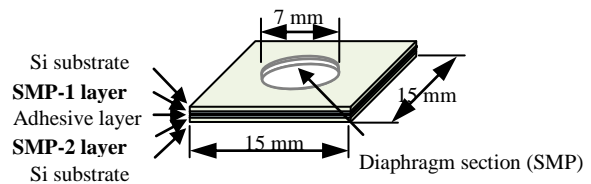


図 3 ダイアフラム型の構造・寸法

(3) 駆動原理の検証実験

アクチュエータに温度サイクルを与えた場合の梁先端およびダイアフラム中心のたわみの時間変化をレーザー変位計により測定した。結果を図 4 (片持梁型) および図 5 (ダイアフラム型) に示す。温度サイクルは、室温 (約 25°C) $\rightarrow T_{g1}$ (35°C) 以上 $\rightarrow T_{g2}$ (55°C) 以上 (ここまで加熱) \rightarrow 室温 (放熱) とした。図中の破線は温度変化を示す。また測定はサーモグラフィを使用した。

各図において、 T_{g1} 以上で記憶形状が生じ、 T_{g2} 以上でこの記憶形状がキャンセルされ、また温度サイクルに対応して動作が繰り返されており、提案した動作が実現されていることがわかる。なお発生変位が記憶形状に比べかなり小さいが、もう一方の SMP 膜や接着層の剛性が原因と考えられる。したがって記憶形状を与える場合に、この点を考慮して形状 (曲率等) を決める必要がある。

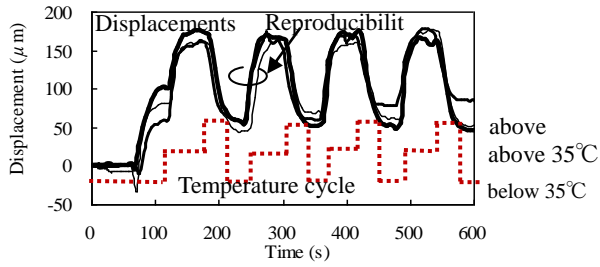


図4 片持梁型アクチュエータの動作特性

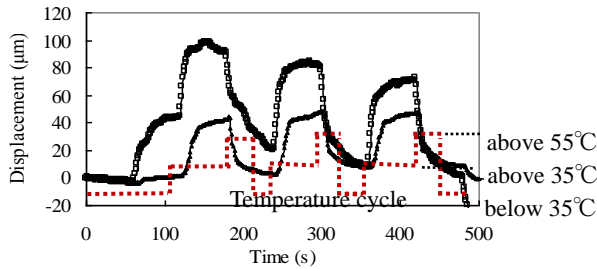


図5 ダイアフラム型アクチュエータの動作特性

(4) 加熱用マイクロヒーターを一体化することによる応答性の向上

試作したアクチュエータを図6に示す. 絶縁性や耐熱性が高いポリイミド (PI) フィルムを基板として, 基板の片面に SMP 層, 反対側に通電加熱用のアルミニウム薄膜配線パターンを設けた片持梁型とした. 記憶形状は図2と同じ湾曲形状 (曲率 17 mm) とした. ここでは温度特性に焦点をおいたため, アクチュエータの構造として, 形状記憶ポリマーを2層にして生じた記憶形状をキャンセルさせる方法ではなく, 単層の形状記憶ポリマーを用い, 生じた記憶形状を形状記憶ポリマーの熱収縮でキャンセルさせる簡易な方法を用いた.

通電加熱により片持梁先端部に生じた変位の測定結果を図7に示す. 通電により温度が T_g 付近になると, 梁が湾曲して変位が立ち上がり, その後通電を OFF にすると形状記憶ポリマーの熱収縮で変位が減少した. 図4に比べて, 加熱により変位がすばやく立ち上がるようになっている. なお, 図中の2本のカーブは2つの片持梁の変位で, 通電回路を直列に接続して2つの梁を同時に動作させ, アクチュエータアレイとした.

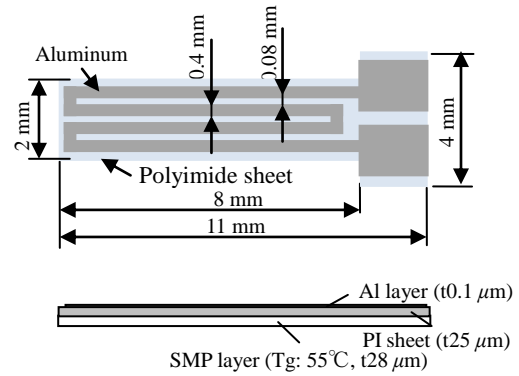


図6 ヒーター一体型アクチュエータの構造 (片持梁型)

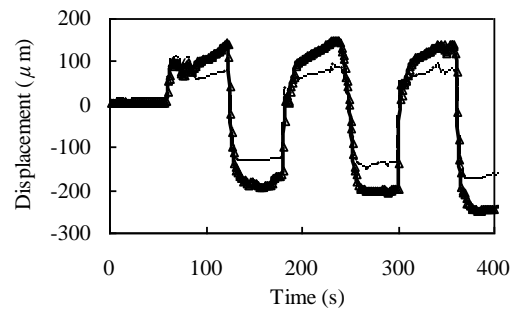
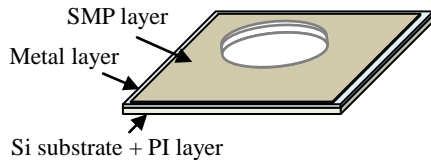


図7 ヒーター一体型アクチュエータの応答 (アレイ化した2つのセンサーの変位)

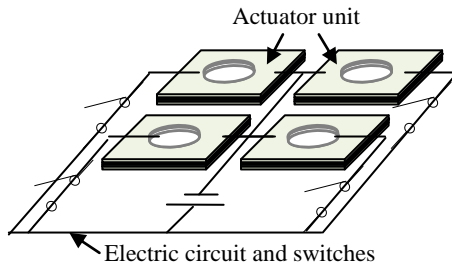
(5) アクチュエータの応用について

以上の結果により, 温度に対する応答性向上のためマイクロヒーターを設置するのが望ましいと考えられる. 図8(a)はその構造例で金属薄膜を設置することで容易に構成できる.

また, 図8(b)のようにアクチュエータをアレイ化し, 通電制御用のスイッチを設けることで各アクチュエータを個々に動作させることが可能となる. このようなシステムはマイクロスイッチやマイクロミラーの姿勢制御, マイクロ位置決め機構などいろいろな面に応用できると考えられる.



(a) 通電加熱用薄膜の設置
(マイクロヒーター)



(b) アレイアクチュエータシステム

図 8 マイクロヒーターの設置とアレイシステム

(6) まとめ

形状記憶ポリマー(SMP)の加熱・冷却のみで一定の動作を繰り返すアクチュエータを提案し、実験により検証した。またマイクロヒーターの設置で応答性の向上もできることを確認した。ガラス転移点温度を変えられる形状記憶ポリマーを使用してガラス転移点温度を使用温度域に合わせることで、さらに応答性の向上が期待できる。

本方法は加熱/放熱による温度制御のみで駆動できるため操作が容易であり、また軽量かつ加工が容易であることから、MEMS等超小型のアクチュエータに適している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

① 今井郷充, 櫻井航生, An actuator of two-way behavior by using two kinds of shape memory polymers with different Tgs, Precision Engineering (Elsevier), 査読有, Vol. 37, 2013, pp.572-579, DOI:10.1016/j.precisioneng.2013.01.002.

② 今井郷充, Operating methods for two-Way behavior shape memory polymer actuators without using external stress, 電気学会共通英文論文誌, 査読有, Vol.9, No.1, 2014 (2014年1月掲載確定).

〔学会発表〕(計5件)

① 今井郷充, ガラス転移点温度の異なる2種類の形状記憶ポリマーを用いて変形・回復を行うアクチュエータ, 精密工学会2012秋季大会, B16.

② 今井郷充, A MEMS actuator using two kinds of shape memory polymers to activate only by heating and cooling, Proc. of IWPMA 2012 (International Workshop on Piezoelectric Materials and applications), No.1aPA024.

③ 今井郷充, 薄膜形状記憶ポリマーを用いた梁型MEMSアクチュエータの動作特性, 日本機械学会2011年次大会, J161031.

④ 今井郷充, 形状記憶ポリマーを用いたMEMSアクチュエータの構造と加工法, 日本機械学会IIP2010情報・知能・精密機器部門講演論文集, B-2.

⑤ 今井郷充, 櫻井航生, 小島健三, 田邊慶典, 形状記憶ポリマーを用いたダイヤフラム型アクチュエータの開発, 電気学会全国大会, 2010.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

今井 郷充 (Imai Satomitsu)
日本大学・理工学部・教授
研究者番号: 20369953

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし