

## TiNi 形状記憶合金薄膜アクチュエータを用いたマイクロシステムの試作

池田 哲\*・秋本恭喜\*・奥根充弘\*\*・藤本公三\*\*・仲田周次\*\*

\*機械電子部・\*\*大阪大学 工学部

## Micro Electro Mechanical System Using TiNi Shape Memory Alloy Thin Film Actuators

Tetsu IKEDA\*・Y. AKIMOTO\*・M. OKUNE\*\*・K. FUJIMOTO\*\*・S. NAKATA\*\*

\*Mechanics &amp; Electronics Division・\*\*Faculty of Engineering, Osaka University

## 要旨

本研究では、TiNi形状記憶合金薄膜アクチュエータを複数組み合わせ、1自由度往復運動機構を有するマイクロシステムを提案し、理論計算により、最大68.3[deg]の理想駆動角度を有する往復動作可能な機構であることを提示することができた。その後、実際にそのマイクロシステムの設計・試作から駆動特性評価までおこない、マイクロシステムの駆動範囲は理論値である47.33[deg]より若干小さく、正方向に45.49[deg]、負方向に-43.37[deg]であり、また20回の繰り返し動作による安定性は、平均駆動角に対する誤差が正方向、負方向ともに±2.5[deg]以内と、高い安定性を示すことを確認した。以上から、著者らは、TiNi形状記憶合金薄膜アクチュエータを複数組み合わせマイクロシステムの実用性を確認できた。

## 1. 緒言

形状記憶合金は動作と発生力が大きく、単純な機構であるので、形状記憶合金をマイクロ化できれば、形状記憶合金をマイクロアクチュエータに応用したマイクロコンピュータ等のマイクロシステムを製作することが可能<sup>1)</sup>となる。アクチュエータとしてのTiNi薄膜アクチュエータは、一定温度で一定形状を記憶し、一定力で駆動する必要があり、筆者らは、既にTiNi形状記憶合金薄膜アクチュエータの発生力、角変位、動作温度の駆動特性の安定性を確認<sup>2)3)</sup>している。本研究では、複数のTiNi形状記憶合金薄膜アクチュエータを組み合わせたマイクロシステムを提案し、その理論的検討をおこない、実際に設計・試作し、その特性を評価する。

## 2. 1自由度往復運動機構を有するマイクロシステムの提案

## 2.1 1自由度往復運動機構の提案

TiNi形状記憶合金薄膜の特徴を生かし、実用化を目指すべく、本研究では複数のTiNi形状記憶合金薄膜アクチュエータを用いたマイクロシステムとして一つの基本ユニットとなる機構を提案する。

形状記憶合金は一般に加熱時の一方向形状記憶効果しか示さないものが多く、繰り返し動作を行うにはバイアスばね等、何らかの外力によって加熱前の状態に戻す必要がある。Fig.1は、TiNi形状記憶合金薄膜アクチュエータを二つ用いて往復動作を可能にし、さらにTiNi薄膜アクチュエータの動作角度を増幅する機構を考案したものである。この機構は、四つの節（一つは固定節）と四つの対偶（まわり対偶）からなる四節拘束連鎖で、一定の運動軌跡を描く。Fig.1においては、節Wが固定節で、対偶O<sub>1</sub>、O<sub>2</sub>がTiNi形状記憶合金薄膜を用いた動力源で、この動力下

で節X、Y、Zが従動する。なお、対偶O<sub>1</sub>は右回り、対偶O<sub>2</sub>は左回りの一方向性の動力源で、想定する駆動角は中性時に対し30[deg]までである。各節の長さの比は、X:Y:Z:W=3:3:1:2である。この機構は、節Zが次のユニットの節Wになるようにいくつかつなぎ合わせることも可能で、そうすることによって多自由度マニピュレータにも応用できるため、往復動作の基本ユニットとして使用可能な機構である。

## 2.2 マイクロシステムの構造

前項で示した動作機構に具体値を与え、構造体としたものを

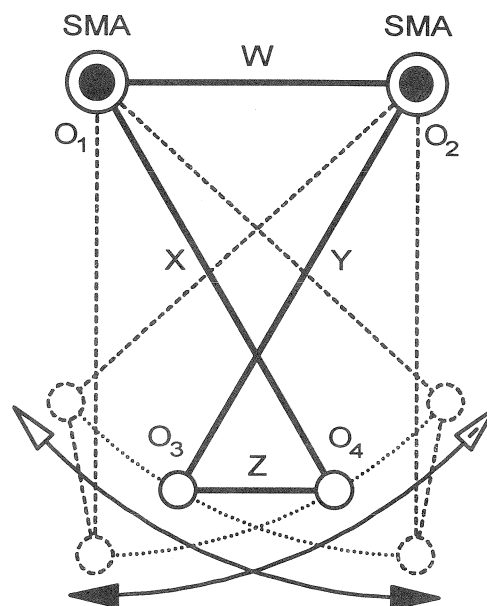


Fig.1 Actuating mechanism of micro electro mechanical system using TiNi thin film actuators.

Fig.2 に示す. この構造体はアルミニウム製の節 X, Y, Z, W を, 対偶  $O_1, O_2$  では TiNi 形状記憶合金薄膜と接合し, 対偶  $O_3, O_4$  ではポリイミド製のフィルムで接合したものである. なお, TiNi 形状記憶合金薄膜の加熱は通電により行うので, 電気絶縁のため対偶  $O_1, O_2$  では TiNi 薄膜と節との間にポリイミド製のフィルムを挟んでいる.

### 3. マイクロシステムの動作特性の理論的検討

#### 3.1 理論的検討における前提条件と計算パラメータ

本章において, TiNi 形状記憶合金薄膜アクチュエータの動作を検討するにあたり, 以下のような仮定を設けた.

- TiNi 形状記憶合金薄膜の中性面は, 厚さ方向に対して中心にある面とする.
- TiNi 形状記憶合金は完全弾塑性材料である.
- マルテンサイト-オーステナイト間の変態は瞬時に完了する.
- 各節 (Al 製) は剛体とする.

また, TiNi 形状記憶合金薄膜アクチュエータの動作を検討する際のパラメータ (媒介変数) は以下のとおりである.

- $h$ : TiNi 薄膜の厚さ [m]
- $b$ : TiNi 薄膜断面の幅 [m]
- $\rho$ : TiNi 薄膜駆動部の曲率半径 [m]
- $X$ : TiNi 薄膜駆動部の中性面長さ [m]
- $\theta$ :  $X, \rho$  に対する中心角 [deg]
- $X_0$ : 中性面から距離  $y$  の面の長さ [m]
- $M$ : TiNi 薄膜断面の中性軸周りのモーメント, 発生トルク [Nm]

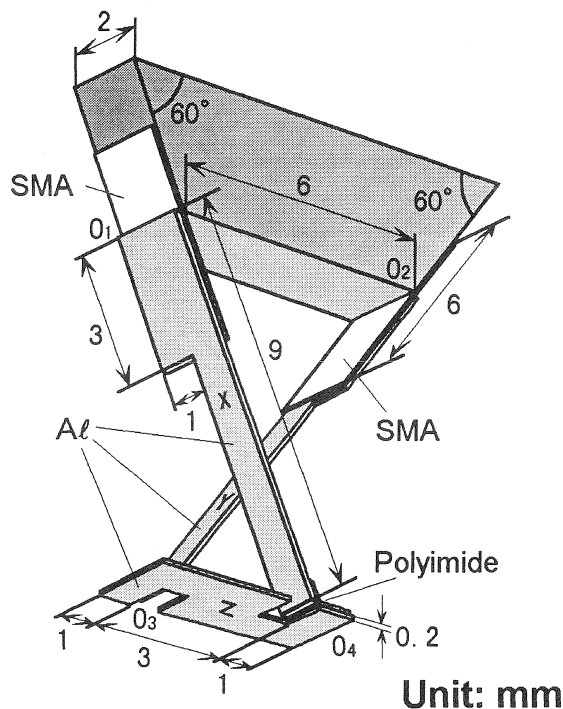


Fig.2 Structure of the micro electro mechanical system.

#### 3.2 節の剛体としての仮定とその妥当性の検討

構造体の各節は剛体であると仮定して, その動作について検討をおこなうため, まずその仮定の妥当性について述べる.

TiNi 形状記憶合金薄膜アクチュエータの発生力を直接受け, かつ一番長くたわみやすい節 X (もしくは節 Y) におけるたわみを考える. Fig.3 に示すように, 節の幅を  $l$ , 厚さを  $b$  ( $2/3 l < x < l$ ),  $b'$  ( $0 < x < 2/3 l$ ), 厚さを  $h$  としたとき, 材料力学に基づくたわみ問題を解くと, 歪は, 以下の通りである.

$$i) \frac{2}{3} l < x < l \text{ のとき } \epsilon = \frac{Pxh}{2EI} \quad (1)$$

$$ii) 0 < x < \frac{2}{3} l \text{ のとき } \epsilon = \frac{Pxh}{2EI'} = \frac{Pxh}{EI} \quad (2)$$

従って, 節における最大歪  $\epsilon_{max}$  は,  $x=2/3 l$  のとき,

$$\epsilon_{max} = \frac{2Plh}{3EI} \quad (3)$$

ここで, この構造体において, 想定最大荷重  $P_{max} = 1.219 \times 10^2$  [N] ( $\theta_{min} = -17.59^\circ$  のとき),  $l = 9 \times 10^3$  [m],  $h = 2 \times 10^4$  [m],  $b = 2 \times 10^3$  [m],  $b' = 1 \times 10^3$  [m], Al (99.5%Al) のヤング率  $E = 6.86 \times 10^{10}$  [Pa] であるので, (3)式より, 節の最大歪  $\epsilon_{max}$  は 0.016% となる. これは耐力とされる 0.2% を大きく下回る. また, 節先端でのたわみ  $y_{max}$  は,  $4.198 \times 10^5$  [m] となる. これは節の長さ  $l$  ( $9 \times 10^3$  [m]) に対して十分小さい.

以上より, 本章では各節を剛体と見なすことを妥当とし, この仮定のもとでマイクロシステムの駆動特性の検討をおこなう.

#### 3.3 マイクロシステムの挙動と駆動範囲

形状記憶合金アクチュエータを用いて往復動作をするマイクロシステム (2方向性アクチュエータ) を構築する場合, 通常では形状記憶合金は1方向性なので, 形状回復した形状記憶合金を再び変形させる何らかの外力が必要であり, その外力は, 形状記憶合金の回復力よりは小さく, 低温 (マルテンサイト) 時の変形に要する力よりは大きな力 (このような力をバイアス

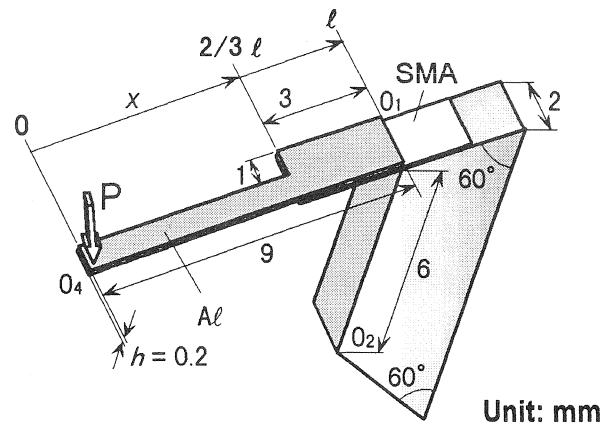


Fig.3 Structure model for calculation of deflection with parameters.

力という) でなければならない。本研究で検討するマイクロシステムは、二つの形状記憶合金を用いて2方向性アクチュエータとし、それぞれが他方をバイアスばねとして利用した構造であり、その駆動範囲は、形状記憶合金の発生力とバイアス力との力の釣り合いによって決まる。また、バイアス力の変化によって駆動範囲を制御することも可能である。

この構造において駆動範囲を考える場合、Fig.4において、対偶  $O_1$  に作用する SMA1 から受ける力  $M$  と、SMA2 から対偶  $O_1$  に作用するバイアス力  $M'$  を用いて釣り合い点を算出し、節Zが節Wに対してなす角度  $i$  で評価をおこなう。Fig.4 に示すように、対偶  $O_1, O_2, O_3, O_4$  のなす角をそれぞれ  $\theta + 60^\circ, \alpha, \gamma, \beta$  とし、 $O_2, O_4$  の距離を  $L$ 、 $O_3$  において駆動方向に作用する荷重を  $P''$ 、 $O_4$  において駆動方向に作用する荷重を  $P'$  とすると、

$$\alpha = 180^\circ - (\theta + 60^\circ) - (A + B) \quad (4)$$

ただし、

$$\begin{cases} A = \cos^{-1}(\cos A) = \cos^{-1}\left(\frac{9^2 + L^2 - 3^2}{2 \cdot 9 \cdot L}\right) \\ B = \cos^{-1}(\cos B) = \cos^{-1}\left(\frac{9^2 + L^2 - 6^2}{2 \cdot 9 \cdot L}\right) \\ L = \sqrt{6^2 + 9^2 - 2 \cdot 6 \cdot 9 \cos(\theta + 60^\circ)} \end{cases} \quad (5)$$

また、

$$\begin{cases} L^2 = 6^2 + 9^2 - 2 \cdot 6 \cdot 9 \cos(\theta + 60^\circ) \\ L^2 = 3^2 + 9^2 - 2 \cdot 3 \cdot 9 \cos \gamma \end{cases} \quad (6)$$

これより、

$$\gamma = \cos^{-1}\left\{2 \cos(\theta + 60^\circ) - \frac{1}{2}\right\} \quad (7)$$

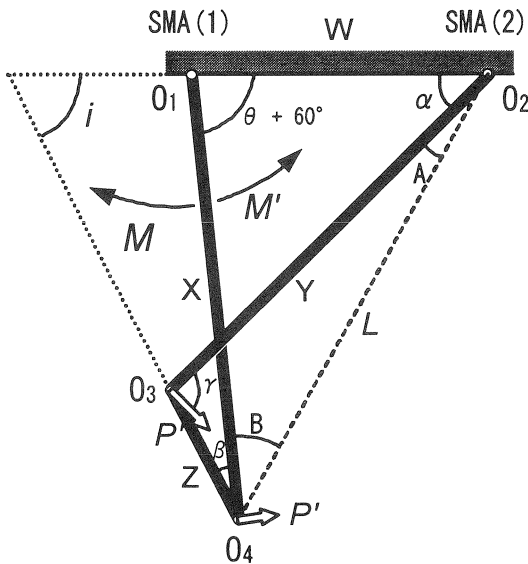


Fig.4 Schematic diagram of force and angle between each links.

また、

$$\beta = (\theta + 60^\circ) + \alpha - \gamma \quad (8)$$

ここで、対偶  $O_2$  における SMA2 の発生トルクを  $M_\alpha$  として、

$$\begin{cases} M_\alpha = P'' l \\ P' = \frac{\sin \beta}{\sin \gamma} \cdot P'' \\ M' = P' l \end{cases} \quad (9)$$

よって、

$$M' = \frac{\sin \beta}{\sin \gamma} \cdot M_\alpha \quad (10)$$

なお、 $M_\alpha$  は  $\theta$  の関数である  $M$  における  $\theta + 60^\circ$  を  $\alpha$  に置換したものである。また、マイクロアクチュエータの駆動角  $i$  は、

$$i = \gamma - \alpha \quad (11)$$

対偶  $O_1$  に作用する SMA1 から受ける力  $M$ 、SMA2 から対偶  $O_1$  に作用するバイアス力  $M'$  と  $\theta$  の関係が Fig.5 である。実線が  $M$ 、破線が  $M'$  であり、1往復の挙動においてこのアクチュエータが釣り合う箇所が A, B, A', B' の四ヶ所ある。この各箇所におけるマイクロシステムの挙動状態が Fig.6 である。まず、SMA1 を加熱してオーステナイトとした場合、 $M$  は  $A_1$  曲線、 $M'$  は  $M_2$  の特性曲線に従い、その交点である点 A で釣り合い、マイクロシステムは静止する。次に SMA1 を冷却すると、 $M$  は  $M_1$  の特性曲線に移行し、 $M'$  は塑性変形後の除荷状態にあるため  $M_2$  曲線に移行して、その交点 B で静止する。その後、逆に SMA2 を加熱、冷却する過程で同様に点 A', 点 B' で静止する。この点 A での駆動角  $i$  が、マイクロシステムの駆動範囲となる。

本研究では、マイクロシステムの駆動範囲は、点 A における駆動角  $i$  で評価することとし、この構造では、Fig.5 の結果と式 (11) より、計算すると、理論上  $i$  は 68.3[deg] を示す。

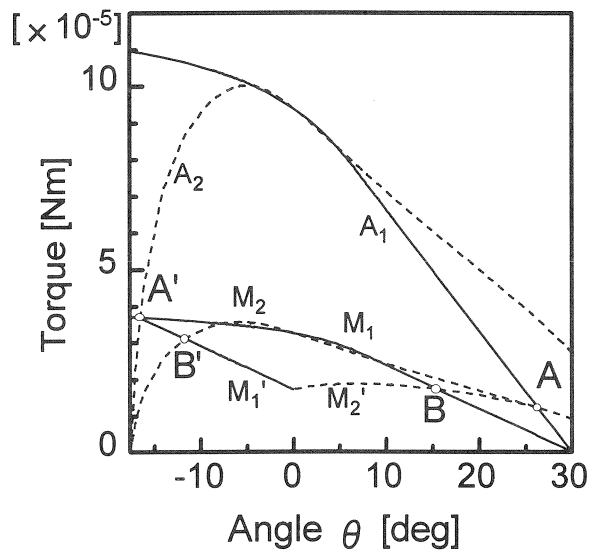


Fig.5 Relation between force and angle of the micro electro mechanical system.

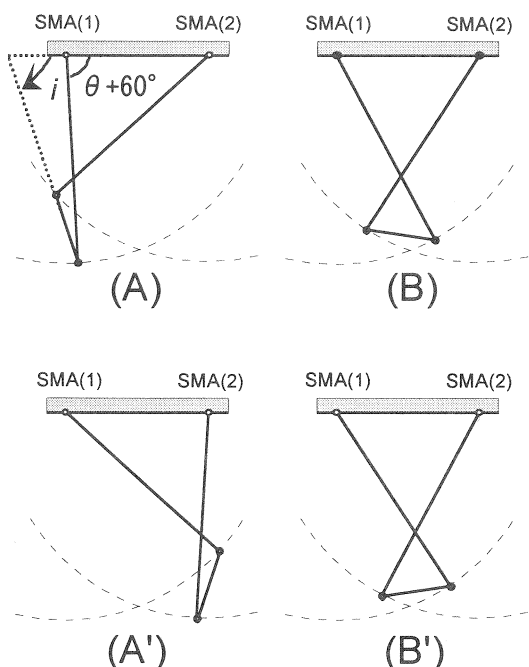


Fig.6 Schematic diagram of balance points of the micro electro mechanical system. ((A) - (B')) correspond to Fig.5)

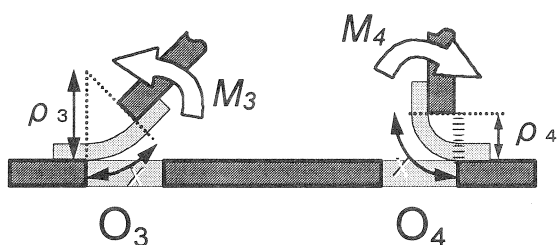


Fig.7 Schematic illustration of pair  $O_3$  and  $O_4$  of the micro electro mechanical system with parameters.

### 3.4 駆動範囲に及ぼす対偶部材質の影響

これまでの計算は、SMA1 に対して、SMA2 から受けるバイアスのみを考慮してきた。しかし、実際は外力として対偶  $O_3$ ,  $O_4$  で生じる対偶部材の変形抵抗が無視できない。以下に、駆動範囲に及ぼす対偶部材の変形抵抗による影響について検討する。

対偶部材は薄いフィルム状のもので、節 X (Y) と節 Z を Fig.7 に示すように対偶部材の変形部の長さが  $x$  になるように接合する。対偶  $O_3$ ,  $O_4$  の変形部の曲率半径をそれぞれ  $\rho_3$ ,  $\rho_4$  とすると、

$$\begin{cases} \rho_3 = \frac{180^\circ \cdot x}{\pi\gamma} \\ \rho_4 = \frac{180^\circ \cdot x}{\pi\beta} \end{cases} \quad (12)$$

変形部材のヤング率を  $E$ 、断面 2 次モーメントを  $I$  とし、式 (11) より、対偶  $O_3$ ,  $O_4$  にそれぞれ作用する曲げモーメント  $M_3$ ,  $M_4$  は、

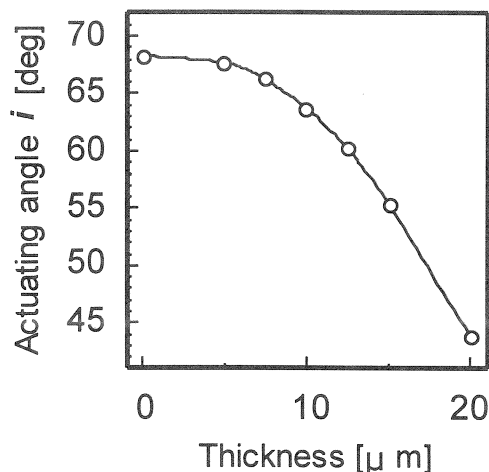


Fig.8 Relation between polyimide film thickness and actuating angle of the micro electro mechanical system. (Calculation)

$$\begin{cases} M_3 = \frac{EI}{\rho_3} = \frac{\pi\gamma EI}{180^\circ \cdot x} \\ M_4 = \frac{EI}{\rho_4} = \frac{\pi\beta EI}{180^\circ \cdot x} \end{cases} \quad (13)$$

そうすると、対偶  $O_3$  と  $O_4$  を結ぶ節 Z に作用するモーメント  $M_z$  は、正面左回りを正として

$$M_z = M_3 - M_4 = \frac{\pi(\gamma - \beta)EI}{180^\circ \cdot x} \quad (14)$$

この  $M_z$  が、 $M$ ,  $M'$  の変化分として作用する。  $M$ ,  $M'$  の増分をそれぞれ  $\Delta M$ ,  $\Delta M'$  とすると、

$$\begin{cases} \Delta M = -3M_z \cos \beta = -\frac{3\pi(\gamma - \beta)EI \cos \beta}{180^\circ \cdot x} \\ \Delta M' = \frac{\sin \beta}{\sin \gamma} \cdot 3M_z \cos \gamma = \frac{\sin \beta}{\sin \gamma} \cdot \frac{3\pi(\gamma - \beta)EI \cos \gamma}{180^\circ \cdot x} \end{cases} \quad (15)$$

ここで、実際に用いる対偶部材としてポリイミド製のフィルムを想定する。ポリイミドは  $E=3 \times 10^9$  [Pa] で、  $x$  を  $2 \times 10^{-6}$  [m] としたときの、マイクロシステムの駆動範囲  $i$  とポリイミドの厚さの関係を示す。変形抵抗は式 (14) より断面 2 次モーメント  $I$  に比例、すなわち、厚さの 3 乗に比例して増加するので、Fig.8 からわかるように、ポリイミドの変形抵抗を無視した場合 (ポリイミドの厚さが 0) から、さらにポリイミドの厚さが、  $5 \times 10^{-6}$  [m] から  $20 \times 10^{-6}$  [m] へと、厚さが増すにつれて、マイクロシステムの駆動範囲は急激に減少する。

一方、ポリイミドの厚さを  $5 \times 10^{-6}$  [m] としたときの、マイクロシステムの駆動範囲  $i$  とポリイミドの変形部長さ  $x$  の関係を Fig.9 に示す。ポリイミドの変形部長さ  $x$  が、  $15 \times 10^{-6}$  [m] から  $200 \times 10^{-6}$  [m] へと変化すると、変形抵抗は式 (14) より  $x$  に反比例するので、長さの減少に伴い駆動範囲は減少するが、厚さの違いによる変化に比べれば、その変化は穏やかである。

以上のことから、対偶部材の変形抵抗が駆動範囲に及ぼす影

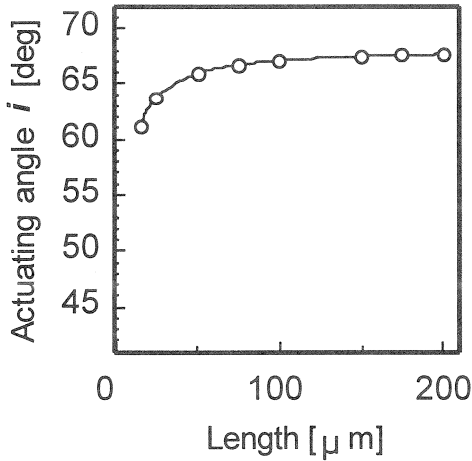


Fig.9 Relation between polyimide film length and actuating angle of the micro electro mechanical system. (Calculation)

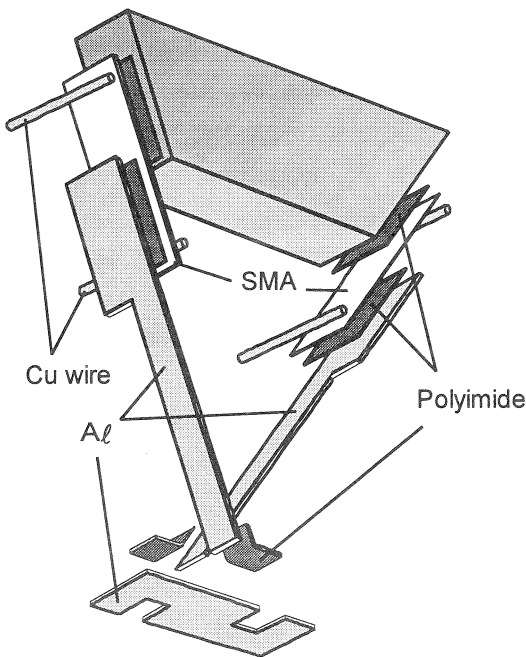


Fig.10 Schematic illustration of components of the micro electro mechanical system.

響について、構造上、対偶部材の厚さが大きく影響することが予測できる。対偶部材はマイクロシステムの強度を考慮した場合には重要な要素であり、要求される強度と駆動範囲の実現には、対偶部材の材質、形状の選定が重要な設計要素となることがいえる。

#### 4. マイクロシステムの試作とその動作特性

##### 4.1 マイクロシステムの試作

これまでに提案し、理論的検討をおこなったマイクロシステムを実際に試作し、その動作特性を確認し、また繰り返し動作

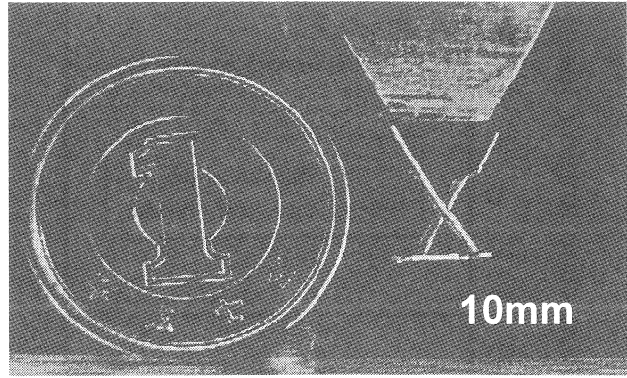


Fig.11 Appearance of the micro electro mechanical system.

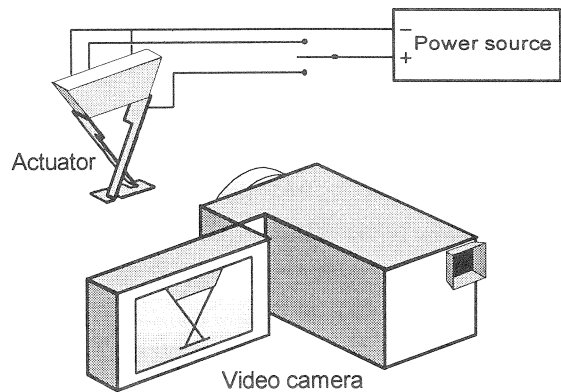


Fig.12 Schematic diagram of measuring method of actuating angle of the micro electro mechanical system

の安定性を評価する。Fig.10は、マイクロシステムの各構成部品とその接合箇所について示すものである。各節や対偶部材の材料及び寸法は前章で想定したものを用い、その接合にはエポキシ系接着剤を用いた。用いたTiNi形状記憶合金薄膜アクチュエータは30[deg]の拘束変位下で時効熱処理して形状を記憶したものであるが、実際の記憶角が24.2[deg]であった。また、通電加熱用の電極として100 $\mu\text{m}$ 系の銅ワイヤを用い、導電性接着剤により接合した。なお、対偶部材として用いるポリイミドの厚さは $7.5 \times 10^{-6}[\text{m}]$ で、作成後の対偶部材曲率部の長さは $8.5 \times 10^{-3}[\text{m}]$ である。従って、前章における理論的検討方法による、試作するマイクロシステムの駆動角 $i$ の理論値は、47.33[deg]となる。Fig.11は、試作したマイクロシステムの外観写真である。

##### 4.2 マイクロシステムの評価方法

マイクロシステムの駆動特性の評価は前章で述べたように、節Zと節Wとがなす角度 $i$ でもっておこなう。マイクロシステムの駆動角は、Fig.12に示すように、マイクロシステムが定電圧電源(岩崎通信機製:SP601R2)から電力を供給され、駆動する際の駆動状態を真横方向からデジタルビデオカメラ(松下電器産業製:NV-DL1)で撮像され、そのビデオ画像上で測定・評

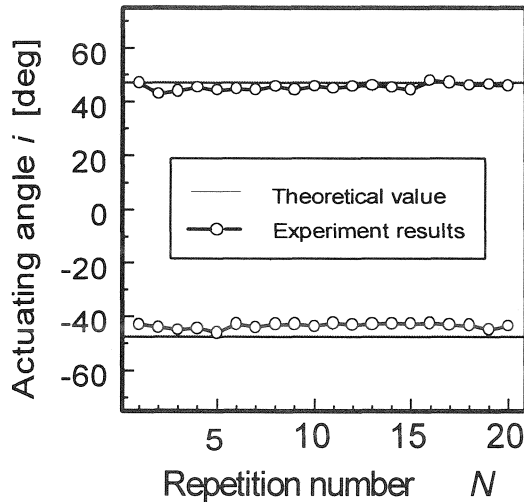


Fig.13 Repeatability of actuating angle of the micro electro mechanical system.

価する。

使用した TiNi 形状記憶合金薄膜は、抵抗率が  $6.44 \times 10^7 [\Omega m]$  で前述の寸法からその抵抗値は  $0.097 [\Omega]$  である。なお、TiNi 形状記憶合金薄膜を含む回路の全抵抗は、接触抵抗等により  $3.8 [\Omega]$  であった。TiNi 薄膜の過熱を抑えるために TiNi 薄膜への供給電力は  $0.2 [W]$  とし、約  $1 [s]$  の通電をおこなった。繰り返し駆動実験は、一方の TiNi 薄膜の通電加熱後に液体窒素により Mf 点以下まで十分冷却し、その後、他方の TiNi 薄膜の通電加熱をおこなう、という操作を繰り返すことによりおこなった。

#### 4.3 マイクロシステムの動作特性

前述の実験条件のもとで、マイクロシステムの駆動角 *i* とその繰り返し動作の安定性について計測をおこなった。計測は 20 回の繰り返し駆動における、SMA1 加熱時の駆動角と、SMA2 加熱時の駆動角についておこない、その結果が Fig.13 である。実際のマイクロシステムの駆動角 *i* と計算理論値との比較をおこなうと、20 回の平均駆動角が、SMA1 駆動時（正方向）に  $45.49 [deg]$ 、SMA2 駆動時（負方向）に  $-43.37 [deg]$  であり、双方とも TiNi 形状記憶合金薄膜アクチュエータの記憶角が  $24.2 [deg]$  の場合の理論値である  $47.33 [deg]$  よりも絶対値で若干小さい値を示している。その原因として、以下のことが考察される。

- 1) 実験環境が約  $295 [K]$  と、本研究で用いた TiNi 形状記憶合金薄膜の As 点 ( $292.7 [K]$ ) を若干上回っており、加熱されていない TiNi 形状記憶合金薄膜アクチュエータが、理論値以上に加熱される他方の TiNi 形状記憶合金薄膜アクチュエータの駆動に影響を及ぼした。
- 2) 作製精度の問題
  - ・ 接合部における TiNi 形状記憶合金薄膜の変形拘束（重なり、接着剤のにじみ）
  - ・ 変形部以外の変形（重なり部分の不足、接着材の剥離）

一方、繰り返し動作によるマイクロシステムの駆動角 *i* の安定性は、20 回の繰り返し駆動実験において、平均駆動角に対する誤差が SMA1 駆動時（正方向）に  $\pm 2.5 [deg]$  以内、SMA2 駆動時（負方向）も  $\pm 2.5 [deg]$  以内と、ともに高い安定性を示しており、このマイクロシステムの実用性を確認できた。

#### 5. 結言

本研究では、複数の TiNi 形状記憶合金薄膜アクチュエータを組み合わせたマイクロシステムを提案し、その理論的検討をおこない、検討結果に基づいた設計・試作をおこない、その駆動特性を評価した。以下に本研究で得られた結論を示す。

1. TiNi 形状記憶合金薄膜アクチュエータを用いたマイクロシステムの設計に当たり、角対偶部発生力の相互の影響を検討し、加熱・冷却サイクルにおける力の釣り合いの移り変わりを理論計算することにより、最大  $68.3 [deg]$  の理想駆動角度を有する、往復動作可能な機構を製作可能であることが示された。
2. 曲げに必要な曲げモーメントが、対偶部材の厚さの 3 乗に比例し、変形部長さの 1 乗に反比例する点から、対偶部材厚さが、マイクロシステムの駆動範囲に大きな影響を与えることが判明し、従って、対偶部材の材質、形状の選定は、マイクロシステムの重要な設計要素であることが示された。
3. 試作したマイクロシステムの駆動範囲は、計算理論値である  $47.33 [deg]$  より若干小さく、正方向に  $45.49 [deg]$ 、負方向に  $-43.37 [deg]$  であり、その原因として実験環境と作製精度が影響するものと考察される。
4. 試作したマイクロシステムの 20 回の繰り返し動作による安定性は、平均駆動角に対する誤差が正方向、負方向ともに  $\pm 2.5 [deg]$  以内と、高い安定性を示した。

#### 参考文献

- 1) 生田幸士, 藤田博之, 池田満昭, 山下慎次: “形状記憶合金マイクロアクチュエータの基礎的研究”, 日本機械学会 第2回バイオエンジニアリング部門学術講演論文集, (1990), p.79
- 2) 池田哲, 松枝弘憲, 太田篤宏, 藤本公三, 仲田周次: “TiNi 薄膜の形状記憶特性に対するスパッタリング条件依存性—TiNi 形状記憶合金薄膜によるマイクロアクチュエータの創成 (第1報)—”, 溶接学会 全国大会講演概要集, No.60, (1997), P160-161
- 3) 池田哲, 小関由知, 桜井大輔, 藤本公三, 仲田周次: “TiNi 薄膜アクチュエータの動特性—TiNi 形状記憶合金薄膜によるマイクロアクチュエータの創成 (第2報)—”, 溶接学会 全国大会講演概要集, No.60, (1997), P162-163