

TiNi 形状記憶合金薄膜アクチュエータの駆動特性

池田 哲・小幡睦憲・秋本恭喜・小関由知*・桜井大輔*・藤本公三*・仲田周次*
機械電子部・大阪大学 工学部*

Dynamic properties of TiNi Shape Memory Alloy Thin Film Actuator

Tetsu IKEDA・M. OBATA・Y. AKIMOTO・Y. OZEKI*・D. SAKURAI*・K. FUJIMOTO*・S. NAKATA*
Mechanics & Electronics Division・Faculty of Engineering, Osaka University*

要旨

本研究では、スパッタリング法と真空熱処理により製作されるTi-51.8at.%Ni形状記憶合金薄膜アクチュエータに、印加電力1.65W、印加時間0.05s、冷却時間0.95sの加熱-冷却サイクルを10000回与えた際の、駆動安定性を発生力、角変位、動作温度の観点から評価し、発生力 0.04 ± 0.006 deg/ms、角変位 29 ± 0.5 度、動作温度 ± 9 Kの非常に安定した結果を得た。さらにTiNi薄膜アクチュエータに負荷を加えたまま、10000回の加熱冷却サイクルを与え、実際に仕事をさせた際の駆動安定性を評価し、最大発生力 6.0×10^{-3} N、発生力 ± 0.11 deg/ms、角変位 ± 2 度、動作温度 ± 10 Kの安定した結果を得た。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マニピュレータ等のマイクロシステムを製作することが可能¹⁾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る。そこで本研究では、TiNi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を、無負荷時および負荷時の2通りの状態で評価する。

2. TiNi薄膜アクチュエータの作製と動作条件

2.1 TiNi薄膜アクチュエータの作製プロセス

TiNi薄膜アクチュエータの作製プロセスは、以下の通りである。Ti-51.8at.%Ni薄膜は、スパッタリング法でCuホイル上に

形成され、硝酸によるCuホイル基板溶解後、取り出される。次にTiNi薄膜は10*6mmサイズのコの字型に切り出され、真ん中から30°に折れ曲がった形のまま、真空熱処理され、形状記憶効果を得て、TiNi形状記憶合金薄膜アクチュエータとなる。²⁾

2.2 TiNi薄膜アクチュエータの動作条件

TiNi薄膜アクチュエータは、コの字型の両端から通電加熱され、下方へ30度折れ曲がることにより動作する。その概略図が、Fig.1である。この通電加熱条件を決定するパラメータは、TiNi薄膜アクチュエータの表面温度と動作速度の関係である。TiNi薄膜アクチュエータの表面温度は、熱画像撮像装置によるアクチュエータ駆動部の $1150 \times 675 \mu\text{m}$ の平均温度測定により評価され、供給電力を0.15~1.63wまで変化させて測定した結果が、Fig.2である。例えば、供給電力が0.39wの時、TiNi薄膜アクチュエー

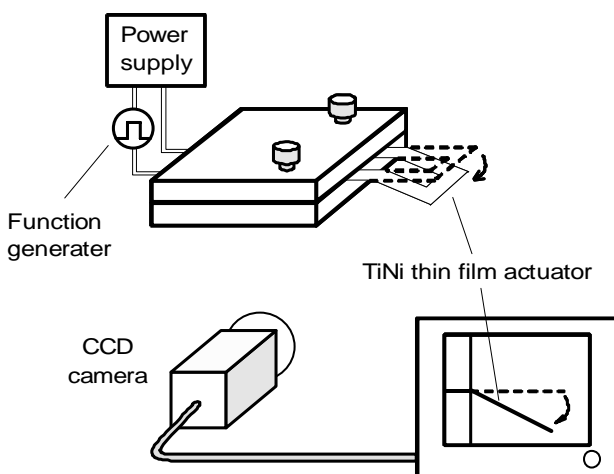


Fig.1 Schematic illustration of measurement method of TiNi thin film actuator movement.

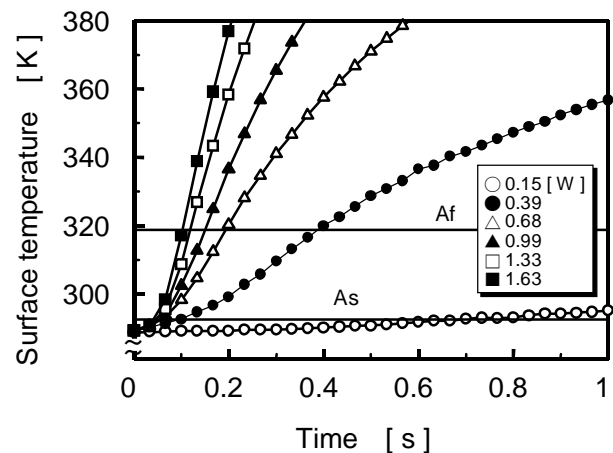


Fig.2 Surface temperature of TiNi thin film actuator at various electric power.

Af: Reverse martensitic transformation finish temperature

As: Reverse martensitic transformation start temperature

タの表面温度は、通電開始から0.1s後に、駆動開始温度である逆マルテンサイト変態開始点(As)を越え、通電開始から0.4s後に、駆動終了温度である逆マルテンサイト変態終了点(Af)を越えることがわかる。この結果から、供給電力が大きくなるに従って、温度上昇速度は大きくなり、TiNi薄膜アクチュエータの駆動時間は、小さくなると判断される。

一方、TiNi薄膜アクチュエータの動作速度の測定方法は、Fig.1であり、その動作速度は、通電加熱によるアクチュエータ動作を側面から高速ビデオにて撮影されるコマ送り（1コマ1/500秒）データにより測定される。供給電力を変化させて、アクチュエータの動作開始から動作終了までの時間を測定した結果が、Fig.3である。この結果から、本研究で用いた試料の限界動作時間は、約0.03sであるといえる。Fig.2とFig.3の比較により、TiNi薄膜アクチュエータの動作速度は、その表面温度上昇と対応していると判断できる。

ここでアクチュエータの応答性目標を約10Hz程度とすると、TiNi薄膜アクチュエータ表面温度がAf点をこえる時間は、約0.05秒以下である必要があり、本研究でのTiNi薄膜アクチュエータに対する供給電力として、1.65W、0.05s程度が適しているといえる。またTiNi薄膜アクチュエータへの冷却方法は、液体窒素を用いておこなわれ、本研究でのTiNi形状記憶合金薄膜アクチュエータへの通電加熱—冷却サイクルは、Fig.4の通りとなり、供給電力1.65 W、通電時間0.05 s、通電サイクル1sとする。

3. 無負荷時のTiNi薄膜アクチュエータの駆動特性

3.1 無負荷時のTiNi薄膜アクチュエータの発生力

TiNi薄膜アクチュエータの発生力は、アクチュエータ質量と動作時の角加速度を乗算することにより求められる。アクチュエータ質量は、真空熱処理後に測定され、7.0mgである。またTiNi薄膜アクチュエータの角加速度は、角速度を微分することにより求められる。そのTiNi薄膜アクチュエータの角速度は、Fig.1の様に、通電サイクルによるアクチュエータ動作を撮影したコ

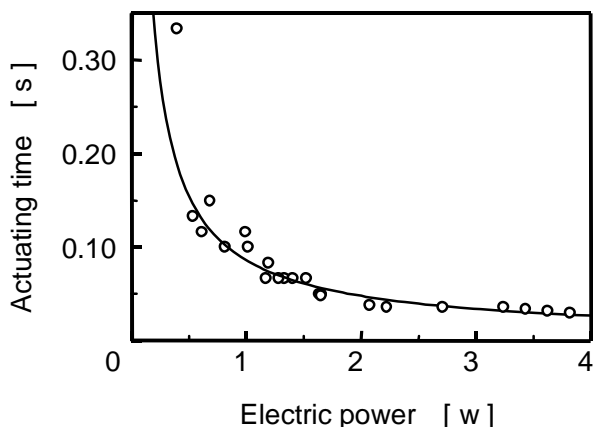


Fig.3 Actuating time of TiNi thin film actuator at various electric power.

マ送りデータにより測定・算出され、その画像1コマの角度測定誤差は約±0.5度であり、そこから動作速度、角加速度は出されるため、大きな誤差が生じることが予想される。そこで本研究では、角速度算出の際に各値の近接3点の平均値を用い、さらに最小二乗法により6次式に近似することにより、角速度のばらつきを減少させている。

以上の方法により、求められる角加速度とアクチュエータ質量から算出されるTiNi薄膜アクチュエータの発生力は、Fig.5である。この結果よりTiNi薄膜アクチュエータの発生力は、動作開始から4ms付近で約 1.5×10^{-3} Nで最大となり、その後減少し、0になる。最大発生力は、温度上昇速度が大きくなるほど最大発生力は大きくなるが、その際の発生力の時間的推移の傾向は変わらず、ピーク点の高さだけが大きくなる³⁾。

TiNi薄膜アクチュエータの発生力の安定性は、動作角度を動作時間で除した通電動作時の平均角速度で評価され、その結果は、Fig.6である。繰り返し回数2000回程度までは、繰り返し回数が大きくなるに従って、平均角速度、つまり発生力は、小さくなっているが、その後発生力は、ばらついている。しかしながら、繰り返し回数10000回を通して、平均角速度は、約 0.04 ± 0.006 deg/msの精度である。実際の動作時間は50ms程度であるので、無負荷時のTiNi薄膜アクチュエータの発生力は、安

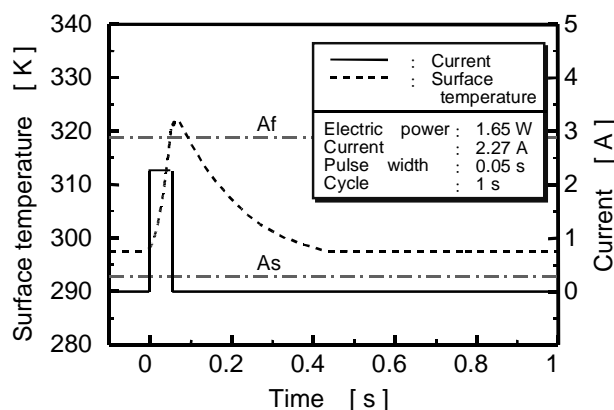


Fig.4 Heat-cool cycle condition of TiNi thin film actuator.

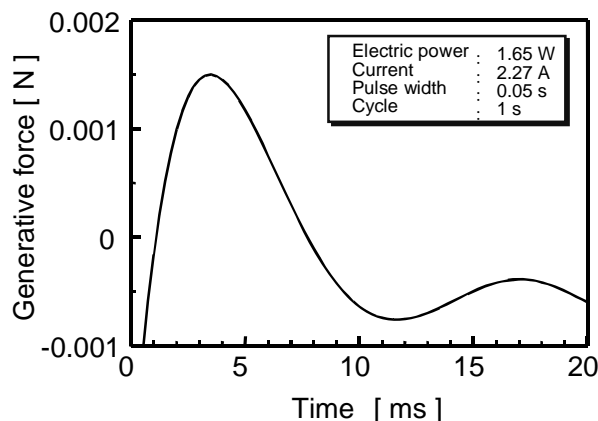


Fig.5 Generative force of TiNi thin film actuator.

定していると判断できる。

3.2 無負荷時のTiNi 薄膜アクチュエータの角変位

無負荷時のTiNi 薄膜アクチュエータの角変位は、通電サイクルによるアクチュエータの繰り返し動作時の半導体レーザーがアクチュエータ先端あたる部分を CCD カメラに取り込み、その位置情報により算出され、その角度変化により評価される。

まず角度の測定方法について述べる。その概略図と座標系の位置関係は、Fig.7(a)である。この図において、 θ_1 はTiNi 薄膜アクチュエータの折れ曲がる角度、また θ_2 は CCD カメラと水平方向のなす角度である。用いたレンズの焦点距離は $f=50\text{ mm}$ 、前側焦点からレンズのエッジ前端までの距離、およびエッジ後端から後側焦点までの距離は、それぞれ $a=90\text{ mm}$ 、 $b=40\text{ mm}$ であり、取り込む画像の解像度は、 $1\text{ pixel} \approx 23.3\text{ }\mu\text{ m}$ である。ステージが Y 軸方向へ 1 mm 移動する際の、画面上のレーザ位置の移動量 Δy はFig.7(b)に示すように、

$$\Delta y = \tan \theta_1 \times \cos \theta_2 \quad (1)$$

で近似され、またステージが Z 軸方向に 1 mm 移動する際の、画面上のレーザ位置の移動量 Δz はFig.7(c)に示すように、

$$\Delta z = \cos \theta_2 \quad (2)$$

で近似される。以上の式(1)、(2)より、TiNi 薄膜アクチュエータの角変位 θ_1 は求められる。なお測定誤差は、薄膜を固定した際の傾き、たわみ、位置のずれ、及びTiNi 薄膜アクチュエータ自体の形状・寸法等が考えられ、約 ± 2 度である。

次に、TiNi 薄膜アクチュエータの角変位の安定性評価方法について述べる。通電サイクルによるアクチュエータの繰り返し動作時の角度は、その度に取り込まれる画像上のレーザ位置と、上記の方法で角度を求めた際の、画面上のレーザ位置のずれから算出される。このずれを Δd とすると、求める角度 θ は、次式より求められる。

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{4 \sin \theta_1 - \Delta d / \cos \theta_2}{4 \cos \theta_1} \right) \quad (3)$$

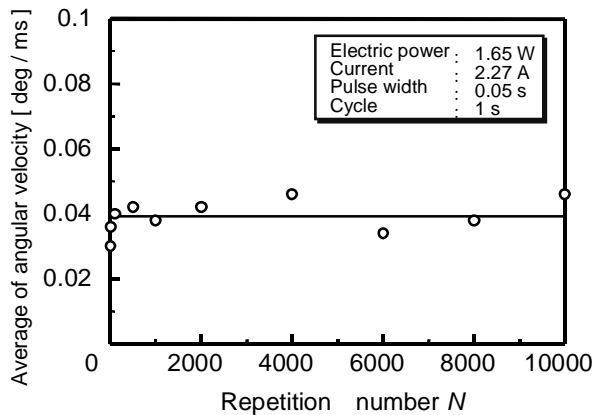


Fig.6 Stability of average angular velocity of TiNi thin film actuator.

取り込んだ画像上のレーザ位置を同定するための誤差が、約 $\pm 1\text{ pixel}$ あり、測定誤差は、角度で ± 0.2 度程度となる。

以上の方法により得られる、30度の角度に折り曲がる状態を記憶しているTiNi 薄膜アクチュエータの角変位の安定性結果は、Fig.8である。この図より、角変位は10000回の繰り返し動作中、 29 ± 0.5 度の範囲内に収まっており、その安定性は30度の角変位に対して約3.3%以内の精度を示している。つまり角変位に対

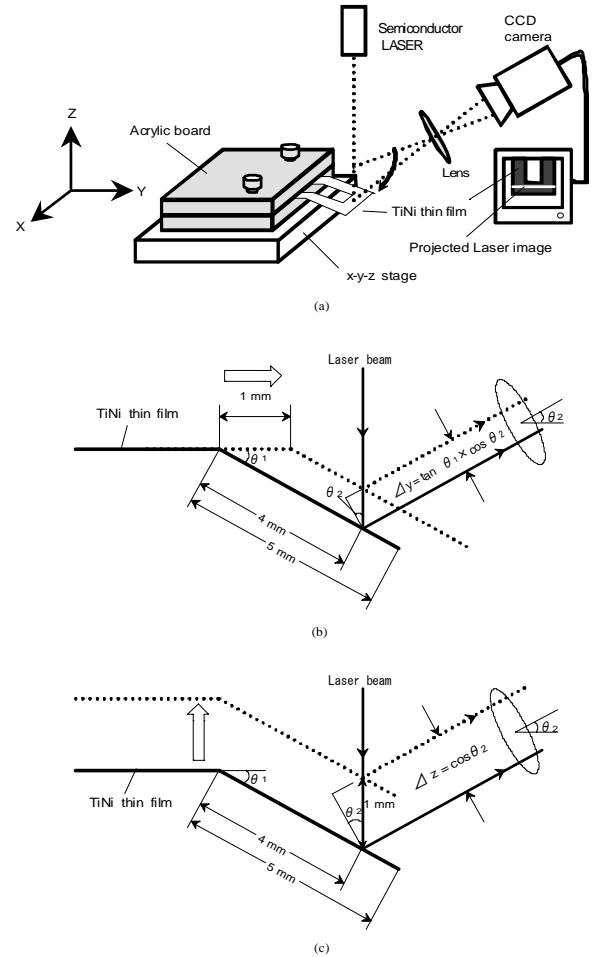


Fig.7 Schematic illustration of measurement method of shape memory angle of TiNi thin film actuator.

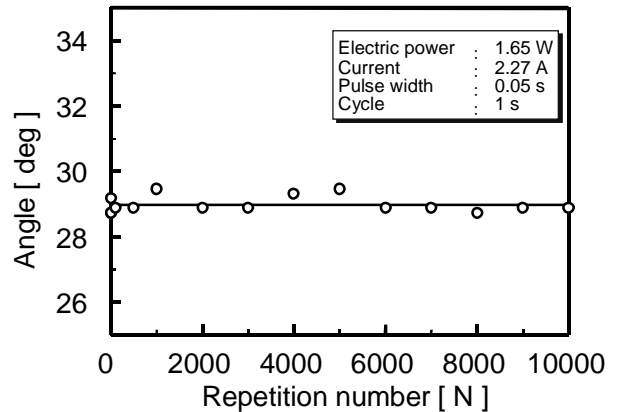


Fig.8 Repeatability of shape memory angle of TiNi thin film actuator.

に対する繰り返し回数による影響は、顕著にはなく、無負荷時の TiNi 薄膜アクチュエータの角変位は、安定していると考えられる。

3.3 無負荷時の TiNi 薄膜アクチュエータの動作温度

TiNi 薄膜アクチュエータの動作温度は、通電サイクルにより、アクチュエータ動作を繰り返しおこなう際の変態温度を DSC (示差走査熱量計) を用いて測定することにより評価される。

その結果は Fig.9 である。10000 回の繰り返し動作中、マルテンサイト変態点 (M1*), R 相変態点 (M2*), 逆マルテンサイト変態点 (A1*) のいずれも、 $\pm 9\text{K}$ の温度範囲内で推移する。TiNi 薄膜アクチュエータは、通電加熱により短時間に動作するので、 $\pm 9\text{K}$ という温度範囲は、アクチュエータ駆動に対してほとんど影響がないといえる。従って、TiNi 薄膜アクチュエータの動作温度は、非常に安定していると判断できる。

しかしながら、最初の 100 回と、最後の 10000 回動作後の変態点が、他の変態点よりやや大きくなっていることがわかる。これは、DSC が破壊測定方法であるため、繰り返し回数毎の測定試料は、完全同一試料でなく、スパッタリング、真空熱処理時の薄膜としての試料誤差が影響していることが考えられる。その後、数回の測定結果において、100 回目付近で TiNi 薄膜アクチュエータの変態点が大きくなることが確認されており、本研究で用いた TiNi 薄膜アクチュエータは、「バルク材の TiNi 合金の変態点は、100 回程度のトレーニング後、安定する傾向がある⁴⁾」ことと、同様の傾向を示していると推察される。

4. 負荷時の TiNi 薄膜アクチュエータの駆動特性

4.1 TiNi 薄膜アクチュエータへの負荷条件

本研究では、実際に TiNi 薄膜アクチュエータの先端部に負荷を与え、TiNi 薄膜アクチュエータが、仕事をおこなう際の駆

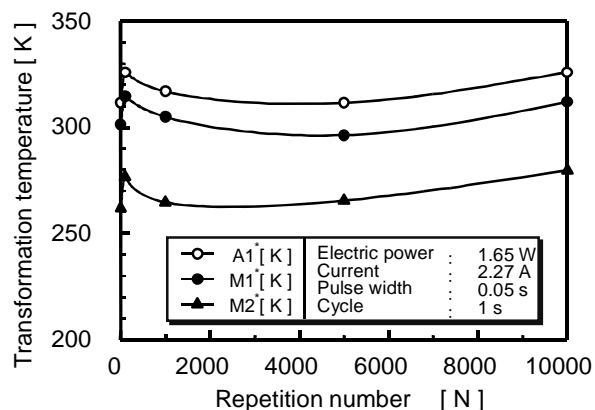


Fig.9 Stability of transformation temperature of TiNi thin film actuator.

M*:Martensitic transformation temperature

A*: Reverse martensitic transformation temperature

動特性を、その発生力、角変位、動作温度の観点から評価する。

TiNi 薄膜アクチュエータへの加負荷方法、TiNi 薄膜アクチュエータの発生力、角変位の測定方法は、Fig.10 である。まず TiNi 薄膜アクチュエータの先端部に取り付けられた $0.3\mu\text{m}$ 径のタングステンワイヤーに負荷が与えられ、通電サイクルにより、TiNi 薄膜アクチュエータが負荷を持ち上げる。その際に高速カメラで側面から撮影されアクチュエータ動作より、TiNi 薄膜アクチュエータの発生力、角変位は測定される。負荷時の TiNi 薄膜アクチュエータの角変位は、Fig.10 に示すように TiNi 薄膜アクチュエータの駆動部位である、折れ曲がる部分における接線と水平面の角度とする。アクチュエータ先端部のたわみにより、アクチュエータ駆動部位の角変位の測定誤差は、約 ± 1 度程度となる。

アクチュエータ先端部の負荷が $0.05\sim 0.50\text{g}$ まで変化する場合、TiNi 薄膜アクチュエータの角変位の時間変化は、Fig.11 である。TiNi 薄膜アクチュエータは、 $0.05\sim 0.50\text{g}$ まで負荷が変化しても、すべて負荷において、形状記憶させた角度である 30 度までほぼ動作している。以上より、負荷時の TiNi 薄膜アクチュエ

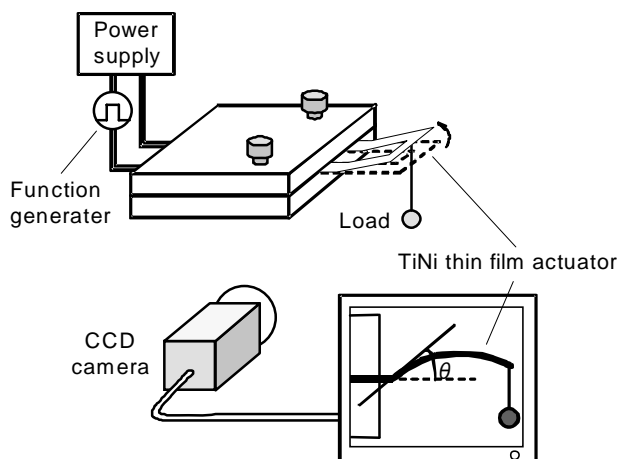


Fig.10 Schematic illustration of measurement method of generative force of TiNi thin film actuator with various load.

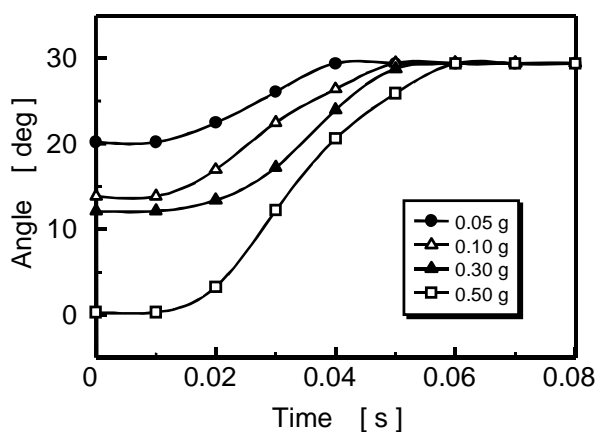


Fig.11 Actuating angle of TiNi thin film actuator with various load.

ータの駆動特性を評価するための負荷条件は、負荷によるたわみが少なく、アクチュエータ先端部でも 30 度付近まで動作する 0.10g 負荷と、アクチュエータ先端部が、負荷により大きくたわむ 0.50g 負荷の 2 種類とする。

4.2 負荷時の TiNi 薄膜アクチュエータの発生力

負荷時での TiNi 薄膜アクチュエータの発生力は、通電サイクルにより、TiNi 薄膜アクチュエータが負荷を持ち上げる際の角加速度とアクチュエータ質量を乗ずることにより、またその発生力の安定性は、平均角速度にて評価される。

0, 0.10, 0.50g の負荷に対して、それぞれ算出される TiNi 薄膜アクチュエータの発生力結果は、Fig.12 である。これより、TiNi 薄膜アクチュエータの発生力は、負荷に関わらず動作開始から 5ms 付近で最大となった後、減少し、やがて 0 となるが、TiNi 薄膜アクチュエータの発生力が最大となる時間は、負荷が大きくなるに従って、遅くなる傾向がみられる。またその最大発生力は、負荷が大きくなるに従って大きくなり、0, 0.10, 0.50g の負荷に対し、 $1.5 \times 10^{-3} \text{N}$, $4.4 \times 10^{-3} \text{N}$, $6.0 \times 10^{-3} \text{N}$ となる。

0, 0.10, 0.50g の負荷に対する TiNi 薄膜アクチュエータの発

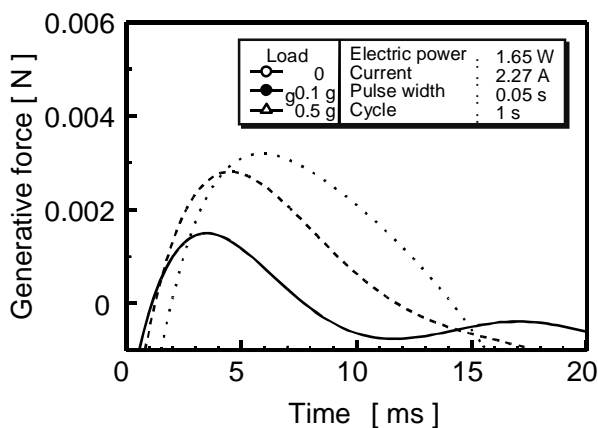


Fig.12 Generative force of TiNi thin film actuator with various load.

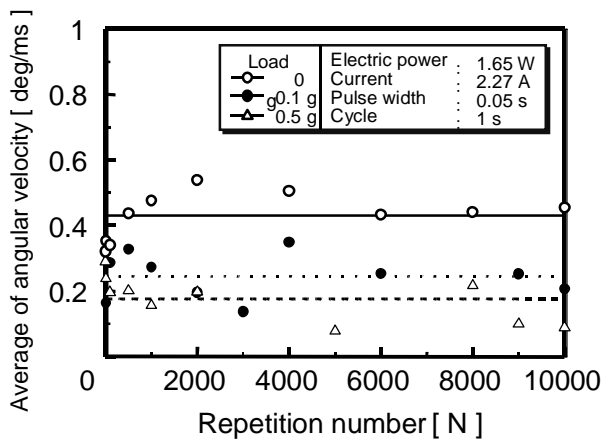


Fig.13 Stability of average angular velocity of TiNi thin film actuator with various load.

生力の安定性結果は、Fig.13 である。これより、負荷が大きくなるに従って、平均動作速度が遅くなっていることがわかる。また、0.10, 0.50g の負荷が与えられた TiNi 薄膜アクチュエータの発生力の安定性は、いずれも無負荷時に比べて、ばらつきが約 $\pm 0.1 \text{deg/ms}$ 程度とやや大きくなっている。しかしながらそのことを考慮しても、負荷時の TiNi 薄膜アクチュエータの発生力は、負荷に関わらず、約 $\pm 0.11 \text{deg/ms}$ の精度で安定している。

4.3 負荷時の TiNi 薄膜アクチュエータの角変位

負荷時の TiNi 薄膜アクチュエータの角変位は、通電サイクルにより、アクチュエータが負荷を持ち上げる際の角度を測定することにより評価される。アクチュエータの角変位は、Fig.10 に示すようにアクチュエータの駆動部位である、折れ曲がる部分における接線と水平面の角度とする。

0, 0.10, 0.50g の負荷に対して、TiNi 薄膜アクチュエータの角変位の安定性結果は、Fig.14 である。負荷時の TiNi 薄膜アクチュエータの角変位は、繰り返し回数 4000 回程度の動作後までは、負荷が 0.10g で 28.8 ± 0.8 度、0.50g で 28.8 ± 0.5 度の範囲内に収まり、非常に安定しているが、それ以降になると無負荷時に比べて、ばらつきが大きくなり、例えば、負荷が 0.10g の場合では、 28.8 ± 2 度程度までばらついている。これは、無負荷時と負荷時では、TiNi 薄膜アクチュエータの角変位測定方法が異なっており、その測定誤差が、無負荷時は約 ± 0.2 度、負荷時は約 ± 1 度程度であることが影響している可能性がある。

4.4 負荷時の TiNi 薄膜アクチュエータの動作温度

負荷時の TiNi 薄膜アクチュエータの動作温度は、通電サイクルにより、アクチュエータが負荷を持ち上げる動作を繰り返しおこなう際の変態温度を DSC (示差走査熱量計) を用いて測定することにより評価される。

0, 0.10, 0.50g の負荷に対して、TiNi 薄膜アクチュエータの動作温度の安定性結果は、Fig.15 である。M1*, M2*, A1* のい

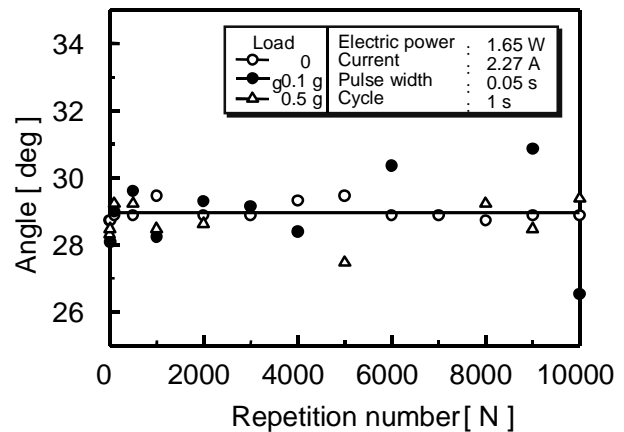


Fig.14 Repeatability of shape memory angle of TiNi thin film actuator with various load.

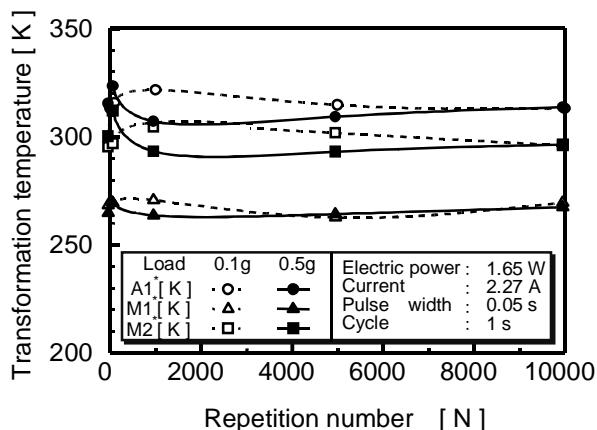


Fig.15 Stability of transformation temperature of TiNi thin film actuator with various load.

M*:Martensitic transformation temperature

A*: Reverse martensitic transformation temperature

ずれの変態点も、0.10g の負荷下では $\pm 5\text{K}$ 、また、0.50g の負荷下では $\pm 10\text{K}$ の温度範囲内に収まっているが、無負荷時での動作温度と同様、100 回と、10000 回動作後の変態点が他の変態点より上がっていることがわかる。また、負荷による TiNi 薄膜アクチュエータの動作温度への影響は、0.10g と負荷の小さい方が、負荷の大きな 0.5g に対して、変態温度のばらつきは小さいが、無負荷時のばらつきが $\pm 9\text{K}$ であり、このばらつきが、負荷の影響であるとは一概には言えず、これも、3.3 項で述べたように、同一の試料を用いていないための試料によるばらつきであるのか、TiNi 薄膜アクチュエータの固有する特性なのか今後検討する必要がある。いずれにせよ、負荷時の TiNi 薄膜アクチュエータの動作温度は、 $\pm 10\text{K}$ の温度範囲で安定しており、通電加熱による短時間通電ということを考慮すれば、アクチュエータ駆動時間は安定していると判断できる。

5. 結言

本研究では、無負荷時と負荷時での TiNi 薄膜アクチュエータの駆動特性として、発生力、角変位、動作温度の安定性について評価した。以下に本研究で得られた結論を示す。

1. TiNi 薄膜アクチュエータの発生力

無負荷時の TiNi 薄膜アクチュエータは、約 $1.5 \times 10^3 \text{ N}$ の最

大発生力を有し、その発生力は、10000 回の繰り返し動作を通して、 $0.04 \pm 0.006 \text{ deg/ms}$ と安定している。

負荷時の TiNi 薄膜アクチュエータは、負荷が重くなるに従い、動作速度は遅くなるが、負荷 0g で $1.5 \times 10^3 \text{ N}$ 、0.10g で $4.4 \times 10^3 \text{ N}$ 、0.50g で $6.0 \times 10^3 \text{ N}$ の最大発生力を有し、その発生力は、10000 回の繰り返し動作を通し、負荷に関わらず、約 $\pm 0.11 \text{ deg/ms}$ と安定している。

2. TiNi 薄膜アクチュエータの角変位

無負荷時における、30 度に折れ曲がった状態を形状記憶した TiNi 薄膜アクチュエータの角変位は、10000 回の繰り返し動作を通して、 29 ± 0.5 度の精度であり、その安定性は 30 度の角変位に対して約 3.3% である。

負荷時における、TiNi 薄膜アクチュエータの角変位の安定性は、4000 回程度の動作後までは、負荷 0.10g で 28.8 ± 0.8 度、0.50g で 28.8 ± 0.5 度の精度であり、非常に安定しているが、それ以降になると、ばらつきが大きくなり、負荷 0.10g では、 28.8 ± 2 度まで精度が低下する。

3. TiNi 薄膜アクチュエータの動作温度

TiNi 薄膜アクチュエータの動作温度は、繰り返し動作の影響、および負荷の影響はみられず、マルテンサイト変態点、R 相変態点、逆マルテンサイト変態点のいずれも、10000 回の繰り返し動作を通して、約 $\pm 10\text{K}$ 以内の温度精度で安定している。

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, 小関由知, 桜井大輔, 藤本公三, 仲田周次: “スパッタリング法による TiNi 形状記憶合金薄膜の作製とその特性”, 3rd Symposium on “Microjoining and Assembly Technology in Electronics”, Mate'97, (1997), p. 131-136
- 3) 田中喜久昭, 戸伏嘉昭, 宮崎修一: “形状記憶合金の機械的性質”, 養賢堂, (1993), p.55
- 4) 宮崎修一, 大塚和弘: エネルギー・資源, vol.4, no.4, (1983), p.367