形状記憶合金による差動型アクチュエータの挙動* (最大変位に及ぼす予ひずみの影響)

山 田 健 一^{*1}, 琵琶 志 朗^{*2}
松 本 英 治^{*3}, 柴 田 俊 忍^{*3}

Dynamic Behavior of Differential-Type Shape Memory Alloy Actuator (Effect of Initial Strain on Maximum Displacement)

Kenichi YAMADA, Shiro BIWA,
Eiji MATSUMOTO and Toshinobu SHIBATA

Dynamic behavior of an actuator utilizing shape memory alloy is considered. The actuator is made of TiNi wire which is subjected to pretension and electrically heated. A one-dimensional thermoplastic model is assumed as a stress-strain curve of TiNi wire to discuss the effect of the prestrain on dynamic response. That is, it is assumed that the stress-strain curve is piecewise linear at each temperature around the phase transition points. The material constants of TiNi wire for modeling are determined by uniaxial loading tests at several temperatures. The relation of the prestrain and the maximum displacement is derived from the theoretical model, and it is compared with experimental results. The following results were obtained both theoretically and experimentally. (1) The displacement of the wire, which is the output of the actuator, depends on the prestrain and the heating temperature. (2) The displacement takes a maximum when the prestrain is in the stress-induced martensitic phase. (3) The maximum displacement increases as the heating temperature becomes higher, but there exists a definite limit.

Key Words: Inelasticity, Nonferrous Material, Titanium-Nickel Alloy, Shape Memory Effect, Actuator, Phase Transformation, Stress-Strain Curve

1. 緒 言

形状記憶合金の研究は、発見当初からその記憶効果の発生機構の解明や形状記憶効果をもつ合金の製造を中心に進められ、現在までに多くの優れた研究がなされてきた⁽¹⁾⁽²⁾。最近では、この形状記憶効果の多岐にわたる応用面に関する開発研究が活発に行われている。しかしながらその応用のほとんどが、記憶させた形状を一方向に加熱復元させて用いる方式か、ばねや重力、あるいは複数個の形状記憶合金を差動的に組合せ、変形と形状回復の二つの形態間を On-Off 的に往復動作させる方式のいずれかであり、形状記憶効果による形状回復の過渡状態を積極的に制御し、変形-回復間の中間的な状態で任意の動作を得るアクチュエータとしての応用例は少ないのが現状である。このような研究は今後形状記憶合金がより精密で実用的なアクチュエータとして応用されるためには必要となるであろう。

アクチュエータの動特性を考慮にいたった設計をするためには、形状記憶合金の動的な挙動の理論的解析が

不可欠になる。アクチュエータの動特性に影響を与えるおもな因子として、形状記憶熱処理温度、加熱・冷却温度、予ひずみ、繰返し数がある。本研究では、特に、アクチュエータの特性の中でも重要な最大変位に与える予ひずみの影響⁽³⁾を明らかにする。

本研究では、TiNi ワイヤを用い、通電加熱により駆動する差動型アクチュエータを試作し、その動特性を調べる。アクチュエータの性能を知る上で特に重要になる最大変位に及ぼす予ひずみの影響を検討する。さらに、形状記憶合金を一次元熱弾塑性体とみなし、アクチュエータの最大変位を理論的に計算し、実験結果と比較考察する。

2 章では、温度によって変化する形状記憶合金ワイヤの一次元熱弾塑性モデルを仮定する。3 章では、このモデルを用いてアクチュエータの最大変位と予ひずみの関係について理論的に解析する。4 章ではアクチュエータの動特性試験の結果を示す。5 章では、2 章で求めた最大変位の理論式に各温度における引張試験の結果から得られる材料定数を用いてアクチュエータの最大変位を定量的に計算し、実験結果と比較する。

* 原稿受付 平成 5 年 3 月 1 日。

^{*1} 学生員, 京都大学大学院 (〒606 京都市左京区吉田本町)。

^{*2} 准員, 京都大学大学院。

^{*3} 正員, 京都大学工学部。

2. 応力-ひずみ曲線の 一次元熱弾塑性モデル

2.1 松本・古田・柴田のモデル⁽⁴⁾ 形状記憶合金ワイヤの熱力学的挙動を記述するために熱弾塑性物質の一次元速度形構成式

$$\dot{\sigma} = E(\sigma, \epsilon, \theta) \dot{\epsilon} + G(\sigma, \epsilon, \theta) \dot{\theta} \quad \dots\dots\dots (1)$$

を考える。ただし、 σ は応力、 ϵ はひずみ、 θ は温度であり、ドットは時間微分である。ここでいう熱弾塑性とは、形状効果をもたらすのが塑性変形によることを表すのではなく、この合金の温度、変形、応力の巨視的な関係が熱弾塑性体の構成式で表現できることを意味している。松本らは、一定温度での応力-ひずみ曲線が、それぞれの応力誘起相変態点の間で区分的に線形であると仮定している。図1(a)に松本らが仮定した温度 θ での形状記憶合金の一軸引張りにおける応力-ひずみ曲線のモデルを示す。実線は温度 θ が逆変態温度 A_f 点よりも低い場合であり、破線は θ が A_f 点よりも高い場合である。図のOAB, BCDOはそれぞれ負荷曲線、除荷曲線である。点A, CおよびDはそれぞれ応力誘起マルテンサイト(Stress-Induced Martensite, 以下SIM)変態開始点、逆変態開始点、逆変態終了点に対応する。B点は除荷開始点である。図1(a)のようにモデル化したとき、各直線は以下のように表せる。

$$\begin{aligned} OA: \sigma &= E_1 \epsilon \\ AB: \sigma &= E_2 \epsilon + (E_1 - E_2) \epsilon_{ms}(\theta) \\ BC: \sigma - \sigma_B &= E_3 (\epsilon - \epsilon_B) \\ CD: \sigma &= E_4 \epsilon + (E_1 - E_4) \epsilon_{af}(\theta) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2)$$

σ_B, ϵ_B は、それぞれ図1の点Bでの応力、ひずみである。ここで、アクチュエータの実験中の最低応力によるひずみと、最高温度における熱膨張によるひずみを比較して、後者を無視した。実際の実験中には、熱膨

(a) 一次元熱弾塑性モデル (b) マルテンサイト硬化域を含む一次元熱弾塑性モデル

図1 熱弾塑性モデル(破線は高温の場合、実線は低温の場合)

張の影響はこれより大きくなることはない。

多くの形状記憶合金は、マルテンサイト変態を誘起する応力(ひずみ)および逆変態を誘起する応力(ひずみ)が温度に線形に依存することが知られている⁽⁵⁾。このことより次の式を仮定する。

$$\begin{aligned} \epsilon_{ms}(\theta) &= \epsilon_{ms0} + C_{ms} \theta \\ \epsilon_{mf}(\theta) &= \epsilon_{mf0} + C_{mf} \theta \\ \epsilon_{as}(\theta) &= \epsilon_{as0} + C_{as} \theta \\ \epsilon_{af}(\theta) &= \epsilon_{af0} + C_{af} \theta \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 $\epsilon_{ms}(\theta)$ は、温度 θ で応力、ひずみがない状態から負荷したときのSIM変態開始点でのひずみである。 ϵ_{ms0} および C_{ms} は材料定数で、各温度における応力-ひずみ曲線より求めることができる。温度 θ におけるSIM変態終了点でのひずみ $\epsilon_{mf}(\theta)$ 、逆変態開始点でのひずみ $\epsilon_{as}(\theta)$ 、逆変態終了点でのひずみ $\epsilon_{af}(\theta)$ についても同様である。

式(2)を時間に関して微分し、その結果に式(3)を代入すると、それぞれの直線に対して構成式(1)の係数を決定することができる。すなわち、

$$\begin{aligned} OA: E(\sigma, \epsilon, \theta) &= E_1, G(\sigma, \epsilon, \theta) = 0 \\ AB: E(\sigma, \epsilon, \theta) &= E_2, G(\sigma, \epsilon, \theta) = C_{ms}(E_1 - E_2) \\ BC: E(\sigma, \epsilon, \theta) &= E_3, G(\sigma, \epsilon, \theta) = 0 \\ CD: E(\sigma, \epsilon, \theta) &= E_4, G(\sigma, \epsilon, \theta) = C_{af}(E_1 - E_4) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (4)$$

以下では、応力-ひずみ曲線を図1(a)のように、負荷・除荷のヒステリシスループを平行四辺形で仮定する。よって、下の等式が成り立つ。

$$E_1 = E_3, E_2 = E_4 \quad \dots\dots\dots (5)$$

図2 SMAアクチュエータの実験装置図(引張試験機を兼ねる)

2.2 差動型アクチュエータ 次に、図2に示すような通電加熱により駆動する差動型アクチュエータを考える。この形式の差動型アクチュエータは駆動力が大きいことおよびシステムが単純であることから、小形化・集積化が可能であり、マイクロマニピュレータとして期待されている。直線の形状に記憶したTiNi合金ワイヤを室温で引張り、予ひずみを与えて、両端を固定する。便宜上、固定したTiNi合金ワイヤの中心から、上半分をワイヤ1、下半分をワイヤ2と呼ぶ。図3に示すようにワイヤ1およびワイヤ2に交互にく形電圧を与える。加熱されたワイヤは空气中に放熱し、冷却される。片方のワイヤが加熱されると、回復応力が発生し、ひずみが回復する。このとき他方のワイヤはバイアスばねの働きをし、前者の回復応力によりひずみが増大する。ワイヤの中心の移動量をアクチュエータの出力として取り出す。

ワイヤ1の応力を σ_1 、ひずみを ε_1 、ワイヤ2の応力を σ_2 、ひずみを ε_2 とすると、応力の釣合いとひずみの適合条件より、以下の式が成り立つ。

$$\begin{aligned}\sigma_1(t) &= \sigma_2(t) \\ \varepsilon_1(t) + \varepsilon_2(t) &= 2\varepsilon_0\end{aligned}\quad \dots\dots\dots (6)$$

ただし、 ε_0 は予ひずみ、 t は時間である。

ワイヤ1とワイヤ2は、それぞれ式(2)で表される応力-ひずみ曲線上の異なる位置にあり、かつ常に条件(6)を満たす。

2.3 マルテンサイト硬化域を含むモデル 松本らは、ひずみがつねにオーステナイト相あるいはSIM変態域にある場合のみを考えた。本論文では、ひずみが上の範囲だけでなくマルテンサイト硬化域まで変化する場合を考慮に入れて、松本らのモデルをマルテンサイト硬化域を含むように拡張する。図1(b)に温度 θ での応力-ひずみ曲線のモデルを示す。図の実線は、温度 θ が逆変態温度 A_f 点よりも低い場合であり、破線は高い場合である。応力-ひずみ曲線はマルテンサイト硬化域でOAに平行で、負荷過程と除荷過程で同じ線の上に乗ると仮定する。通常この領域では塑

図3 加熱サイクル

性変形が生じることが知られているが、本研究の目的がアクチュエータの基本的な動作のシミュレーションであり、他の領域のモデル化と対応させるためにこのように簡単な仮定を採用した。

3. 最大変位と予ひずみの関係

松本らは通電加熱によりワイヤに生じるジュール熱、空気中への放熱、ワイヤの潜熱を考慮に入れ、ワイヤの温度の時間変化を調べ、特定の予ひずみでの定常サイクルにおけるアクチュエータの動特性について解析した。本研究では、アクチュエータの最大変位と予ひずみの関係を検討する。

いま、1サイクルの4分の1の区間に注目し、ワイヤ1が加熱されるとする。ワイヤ1の温度は上昇し、その応力-ひずみ曲線は変化する。ワイヤ2は最低温度(室温) θ_c にあるので、その応力-ひずみ曲線は変化しない。ワイヤ1が最高温度に達したとき変位は最大になる。

予ひずみ ε_0 の大きさを以下のように分類して、最大変位 $D_{\max}$ を求める。

- (A) ε_0 が最低温度 θ_c での応力-ひずみ曲線の弾性域(オーステナイト相)にあるとき
- (B) ε_0 が最低温度 θ_c での応力-ひずみ曲線のSIM変態域前半にあるとき
- (C) ε_0 が最低温度 θ_c での応力-ひずみ曲線のSIM変態域後半にあるとき
- (D) ε_0 が最低温度 θ_c での応力-ひずみ曲線のマルテンサイト硬化域にあるとき

各場合を、ワイヤの最高温度によってさらに分類し、それぞれの場合に最大変位 $D_{\max}$ を求める。図4に、ワイヤ1とワイヤ2の応力-ひずみ曲線上での位置を示す。図中の破線はワイヤ1が最高温度 θ_h に達したときの応力-ひずみ曲線、実線はそのときのワイヤ2の応力-ひずみ曲線である。線上の○印がワイヤ1とワイヤ2の状態を表す。各場合における最大変位 $D_{\max}$ は、式(2)および条件(6)から容易に計算できる。下に計算結果を示す。

- (A) ワイヤの予ひずみが最低温度での応力-ひずみ曲線の弾性域にあるとき

$$0 \leq \varepsilon_0 \leq \varepsilon_{ms}(\theta_c) \quad \dots\dots\dots (7)$$

条件(6)から二つのワイヤの状態は、つねに $\varepsilon = \varepsilon_0$ の線に対して線対称の位置にあることに注意すると、

$$D_{\max} = 0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

となる。

- (B) ワイヤの予ひずみが最低温度での応力-ひずみ曲線のSIM変態域前半にあるとき

$$\varepsilon_{ms}(\theta_c) \leq \varepsilon_0 \leq \frac{\varepsilon_{af}(\theta_h) + \varepsilon_{mf}(\theta_c)}{2} \dots\dots\dots (9)$$

ワイヤ1が最高温度に達したときの二つの応力-ひずみ曲線の関係が、図4のB-Iのようであれば、条件(6)より、二つの点は動けない。つまり、ワイヤ1の温度は上昇するが変位は生じない。二つのワイヤの温度差がさらに大きい場合、二つの応力-ひずみ曲線が、B-I'の状態を超え、ワイヤ1はCD上を、ワイヤ2はAB上を条件(6)を満たしながら移動する。このときの最高温度を θ_{h1} とすると、次式が成立する。

$$\varepsilon_{ms}(\theta_c) = \varepsilon_{af}(\theta_{h1}) \dots\dots\dots (10)$$

したがって、 θ_{h1} は、

$$\theta_{h1} = \frac{\varepsilon_{ms}(\theta_c) - \varepsilon_{af0}}{C_{af}} \dots\dots\dots (11)$$

となる。

さらに最高温度が高くなり、ワイヤ1が応力-ひずみ曲線のOA上にあると、これ以上温度が高くなっても変位は大きくならない。そのときの温度を θ_{h2} とすると、以下の2式が成立する。

$$\varepsilon_{af}(\theta_{h2}) + \varepsilon(\theta_c) = 2\varepsilon_0 \dots\dots\dots (12)$$

$$\sigma(\theta_{h2}) = \sigma(\theta_c) \dots\dots\dots (13)$$

したがって、 θ_{h2} は、

$$\theta_{h2} = \frac{2E_2\varepsilon_0 + (E_1 - E_2)\varepsilon_{ms}(\theta_c)}{C_{af}(E_1 + E_2)} - \frac{\varepsilon_{af0}}{C_{af}} \dots\dots\dots (14)$$

となる。よって、 θ_{h1} と θ_{h2} により、次の三つの場合に分けることができる。

(B)-I $\theta_h \leq \theta_{h1}$

$$D_{\max} = 0 \dots\dots\dots (15)$$

(B)-II $\theta_{h1} \leq \theta_h \leq \theta_{h2}$

最高温度がこの温度範囲にあるとき、ワイヤ1は図1の応力-ひずみ曲線のCD上にあり、ワイヤ2はAB上にある。したがって、式(2)を条件(6)に代入し、 $\varepsilon(\theta_c)$ および $\varepsilon(\theta_h)$ について解けば、

$$D_{\max} = \{\varepsilon(\theta_c) - \varepsilon(\theta_h)\}L \dots\dots\dots (16)$$

であるから、

B. ε_0 が θ_c でSIM変態域前半にあるとき

C. ε_0 が θ_c でSIM変態域後半にあるとき

D. ε_0 が θ_c でマルテンサイト硬化域にあるとき

図4 アクチュエータが最大変位を示すときのワイヤの応力-ひずみ曲線(破線は高温側、実線は低温側のワイヤ)

$$D_{\max} = \frac{(E_1 - E_2)\{\varepsilon_{af}(\theta_h) - \varepsilon_{ms}(\theta_c)\}}{E_2} L \quad \dots\dots (17)$$

となる。ただし、 L は、ワイヤの長さである。

(B)-III $\theta_{h2} \leq \theta_h$

最高温度がこの温度範囲にあるとき、ワイヤ1はOA上にあり、ワイヤ2はAB上にある。したがって、上と同様の計算をすると、

$$D_{\max} = \frac{2(E_1 - E_2)\{\varepsilon_0 - \varepsilon_{ms}(\theta_c)\}}{(E_1 + E_2)} L \quad \dots\dots (18)$$

となる。

予ひずみがSIM変態域後半にあるとき、およびマルテンサイト硬化域にあるときも同様に計算できる。簡単のため以下では結果だけを述べる。

(C) ワイヤの予ひずみが最低温度での応力-ひずみ曲線のSIM変態域にあるとき

$$\frac{\varepsilon_{af}(\theta_h) + \varepsilon_{mf}(\theta_c)}{2} \leq \varepsilon_0 \leq \varepsilon_{mf}(\theta_c) \quad \dots\dots (19)$$

$$\theta_{h3} = \frac{2E_2\{\varepsilon_{mf}(\theta_c) - \varepsilon_0\}}{C_{af}(E_1 - E_2)} + \frac{\varepsilon_{ms}(\theta_c)}{C_{af}} - \frac{\varepsilon_{af0}}{C_{af}} \quad \dots (20)$$

$$\theta_{h4} = \frac{\sigma_{mf}(\theta_c) + 2E_1\varepsilon_0 - E_1\varepsilon_{mf}(\theta_c)}{2C_{af}E_1} - \frac{\varepsilon_{af0}}{C_{af}} \quad \dots (21)$$

とすると、次の四つの場合に分けられる。

(C)-I $\theta_h \leq \theta_{h1}$

$$D_{\max} = 0 \quad \dots\dots (22)$$

(C)-II $\theta_{h1} \leq \theta_h \leq \theta_{h3}$

$$D_{\max} = \frac{(E_1 - E_2)\{\varepsilon_{af}(\theta_h) - \varepsilon_{ms}(\theta_c)\}}{E_2} L \quad \dots\dots (23)$$

(C)-III $\theta_{h3} \leq \theta_h \leq \theta_{h4}$

$$D_{\max} = \frac{2L(E_1 - E_2)}{E_1 + E_2} \{\varepsilon_{af}(\theta_h) - \varepsilon_0\} + \frac{2L}{E_1 + E_2} \{E_1\varepsilon_{mf}(\theta_c) - \sigma_{mf}(\theta_c)\} \quad \dots\dots (24)$$

(C)-IV $\theta_{h4} \leq \theta_h$

$$D_{\max} = \left\{ \varepsilon_{mf}(\theta_c) - \frac{\sigma_{mf}(\theta_c)}{E_1} \right\} L \quad \dots\dots (25)$$

(D) ワイヤの予ひずみが最低温度での応力-ひずみ曲線のマルテンサイト硬化域にあるとき

$$\varepsilon_{mf}(\theta_c) \leq \varepsilon_0 \quad \dots\dots (26)$$

$$\theta_{h5} = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_{as0}}{C_{as}} \quad \dots\dots (27)$$

$$\theta_{h6} = \frac{1}{C_{af}} \left\{ \varepsilon_0 - \varepsilon_{af0} + \frac{\sigma_{mf}(\theta_c)}{2E_1} - \frac{\varepsilon_{mf}(\theta_c)}{2} \right\} \quad \dots\dots (28)$$

とすると、次の三つの場合に分けられる。

(D)-I $\theta_h \leq \theta_{h5}$

$$D_{\max} = 0 \quad \dots\dots (29)$$

(D)-II $\theta_{h5} \leq \theta_h \leq \theta_{h6}$

$$D_{\max} = \frac{2L(E_1 - E_2)}{E_1 + E_2} \{\varepsilon_{af}(\theta_h) - \varepsilon_0\} + \frac{2L}{E_1 + E_2} \{E_1\varepsilon_{mf}(\theta_c) - \sigma_{mf}(\theta_c)\} \quad \dots\dots (30)$$

(D)-III $\theta_{h6} \leq \theta_h$

$$D_{\max} = \left\{ \varepsilon_{mf}(\theta_c) - \frac{\sigma_{mf}(\theta_c)}{E_1} \right\} L \quad \dots\dots (31)$$

ただし、 $\sigma_{mf}(\theta)$ は温度 θ におけるSIM変態終了点での応力である。

4. アクチュエータの動特性試験

3章で得られた形状記憶合金ワイヤの予ひずみあるいは加熱温度と、アクチュエータの最大変位との関係を実験により検証する。まず、理論と実験の比較のため図2の引張試験機を用いて理論に必要な材料定数を決定する。次に、アクチュエータにおけるワイヤの予ひずみや入力電圧を変えて最大変位を測定する。以下の実験において、通電中(加熱中)の細いワイヤの温度を直接測定することが困難なので、ワイヤの最高温度の代わりに入力電圧をパラメータとして議論する。ここでは、ワイヤの最高温度は入力電圧によって一義的に決まるものと仮定をする。

4.1 試験片 試験片は古河電気工業(株)製のTi-50.1at% Ni合金ワイヤ(走間焼なまし、熱処理温度500°C、線速3m/min、加熱時間1分間)である。逆変態終了温度 A_f 点は、324Kである。外径0.3mm、長さ L は100mmである。引張試験機の試験片(形状記憶合金ワイヤ)の部分の一定温度の水の中に入れて負荷・除荷の1サイクルにおける応力-ひずみを測定する。水の温度を295Kから359Kまで10段階変化させて測定した結果から、材料定数を表1のように決定した。

4.2 実験装置および実験方法 3章で考えたTiNi合金ワイヤによる、通電加熱により駆動するアクチュエータを試作した。実験装置は図2に示したように、電気的入力を機械的な出力に変えるアクチュエータ部、差動変圧器を通じて変位を検出する変位計、定電圧電源、電圧制御および測定値記録のためのパー

表1 材料定数

E_1 (MPa)	18500	E_2 (MPa)	400
ε_{ms0} (%)	1.2	C_{ms} (%)	0.03
ε_{mf0} (%)	6.7	C_{mf} (%)	0.03
ε_{as0} (%)	4.8	C_{as} (%)	0.03
ε_{af0} (%)	-0.7	C_{af} (%)	0.03

ソナルコンピュータからなる。1サイクルの時間は、28.4秒であり、一つの実験について10サイクル繰返した。

1回の実験が終わるとワイヤを取り外し、3.0Vの電圧を加えて加熱して元の形状に戻した。与えた予ひずみは、2.9%、4.6%、6.4%、8.6%、9.5%、10.5%、11.7%である。

4・3 実験結果および考察 図5(a)~(c)に、アクチュエータの変位-時間の関係の例を示す。すなわち、電圧2.2Vの場合の、変位の2サイクルめから6サイクルめまでの変化を同じ図に重ねて示す。

図6に、最大変位と予ひずみの関係を示す。この図より、最大変位は予ひずみがある値のときに最大値をとり、その後は予ひずみが大きくなるに従って小さくなっていることがわかる。最大変位が最大値をとる予ひずみの値は電圧つまり最高温度に依存し、電圧とともに大きくなる。予ひずみが2.9%のときは、どの電圧

でも最大変位は変わらない。これは、ワイヤの応力-ひずみ曲線上の位置が図4のB-IIIの状態にあるためと考えられる。

5. 理論との比較

図7に理論的に求められたアクチュエータの最大変位と予ひずみの関係を示す。これは、3章の一次元熱弾塑性モデルから導いた最大変位の式に、引張試験により決定した材料定数を代入したものである。予ひずみは、マルテンサイト相で弾性変形をする範囲にとり、12%までを考える。最大変位と予ひずみの関係は、ワイヤの最高温度によって変化する。

図7から以下の現象が予測される。

- (1) 最高温度が350 Kよりも低い場合は、変位はしない。
- (2) 最大変位が、最大となる予ひずみ、または予ひずみの範囲が存在し、その予ひずみは最高温度に依存する。
- (3) 最高温度を十分に大きくしても、取り出し得る最大変位には限度があり、温度上昇に伴い変位が一定となる区間が長くなる。

(a) 予ひずみ 4.6%

(b) 予ひずみ 8.6%

(c) 予ひずみ 11.7%

図5 アクチュエータの動特性

図6 最大変位と予ひずみの関係

図7 理論から導いた最大変位と予ひずみの関係

引張試験の結果より、ワイヤの温度が 340 K 付近から、変態擬弾性が現れ始めている。したがって、2 章の理論からワイヤの温度がそれ以下では形状回復は望めない。このことは、(1)の予想を裏付けている。取り出し得る最大変位は、ワイヤの応力-ひずみ曲線のヒステリシスループの大きさによって決まる。アクチュエータは 2 章の条件 (6) を満たしながら動くので、回復され得る変位は図 1 の直線 OA と直線 BC の幅で表され、このことは (3) の内容を裏付けている。

図 6 の実験結果より求めた最大変位と予ひずみの関係を比較する。上の (1)~(3) の理論的予見は実験結果と定性的にはほぼ一致していると言うことができる。理論と一致していない点としては、次の項目が挙げられる。

(4) 加熱したときのワイヤの温度が低いと思われる 1.2 V や 1.5 V の電圧でも、予ひずみが 10.5% や 11.7% のときに変位している。

(5) 取り出し得る最大変位は、理論的には約 2.7 mm だが、実験では約 2 mm である。

これらの理論と実験結果の違いは、TiNi 合金の応力-ひずみ関係を図 1 のように単純化したことや、その温度変化に対する仮定に起因すると思われる。ワイヤの温度を測定して定量的に実験と理論結果を比較することは今後の課題として残されている。

6. 結 言

本研究では、TiNi 形状記憶合金によるアクチュエ

ータの動特性に関する基礎的研究として、予ひずみの影響を調べた。松本らの理論を基にマルテンサイト硬化域を含めた、応力-ひずみ曲線の一次元熱弾塑性モデルを仮定し、アクチュエータの最大変位と予ひずみの関係を理論的に求め、実験結果と比較検討した。得られた主要な結果は、次のとおりである。

(1) ワイヤの加熱温度が決まっている場合、アクチュエータの変位量が最もよくなる予ひずみが存在し、その値は、加熱温度が高くなるに従って大きくなる。

(2) ワイヤの回復ひずみには限度があり、加熱温度が十分に高い場合、応力-ひずみ曲線のヒステリシスループの大きさによって決まる。

アクチュエータに及ぼす冷却の影響、く形以外の入力に対する出力およびアクチュエータの最大変位だけでなく動的挙動に対する研究は、今後の課題である。

文 献

- (1) 鈴木, 実用形状記憶合金, (1987), 23, 工業調査会.
- (2) 本間・三輪・井口, 精密機械, 50-2(1984), 377.
- (3) 戸伏・木村・田中・堀・沢田, 材料, 40-457, A(1991), 1276.
- (4) Matsumoto, E., Furuta, T. and Shibata, T., *Mechanical Behaviour of Materials -IV*, 3(1991), 599-604.
- (5) Wollants, P., De Bonte, M. and Roos, J. R., *Z. Metallkunde*, 70(1979), 113.