

繰返し荷重を加えた TiNi 形状記憶合金ワイヤの  
応力-ひずみ-温度関係の計測および数値解析\*内藤 尚<sup>\*1</sup>, 松崎 雄嗣<sup>\*2</sup>  
池田 忠繁<sup>\*2</sup>, 佐々木 敏幸<sup>\*3</sup>Experimental and Analytical Studies on Stress-Strain-Temperature  
Relationship of TiNi Shape Memory Alloy Subjected  
to Cyclic LoadingsHisashi NAITO<sup>\*4</sup>, Yuji MATSUZAKI,  
Tadashige IKEDA and Toshiyuki SASAKI<sup>\*4</sup> Department of Aerospace Engineering, Nagoya University,  
Furocho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 464-8603 Japan

In order to investigate the effect of loading frequency on stress-strain-temperature relationship in pseudoelastic behavior of Shape Memory Alloys (SMA), tensile tests of TiNi-SMA wire at loading frequencies ranging from 0.001 Hz to 1 Hz were performed, and the stress, strain and temperature of wire were measured simultaneously. Using our proposed thermo-mechanical analytical model of SMA, those pseudoelastic behaviors were simulated numerically as well. Results showed that the loading frequency strongly affects temperature change of the wire and the stress-strain hysteresis loop. The analytical model could predict the time history of stress-strain-temperature relationship with accuracy, and thus the validity of the model has been confirmed. Moreover, by examining the variation of each term of the heat balance equation, the thermo-mechanical mechanism of the pseudoelastic behaviors was also clarified.

**Key Words**: Shape Memory Alloys, Pseudoelasticity, Constitutive Model, Phase Transformation, Phase Interaction Energy Function, Smart Materials

## 1. 緒 言

TiNi 合金をはじめとする, 形状記憶合金(Shape Memory Alloys; 以下 SMA) は, 構造部材として十分な強度と剛性を持ち, かつ, 形状記憶効果(Shape Memory Effect; 以下 SME)や擬似弾性(Pseudoelasticity; 以下 PE)を応用することで, アクチュエータやセンサなどとしても使用可能であることから, スマート構造システムを構成する機能性素材として有力な候補である。特に, SME や PE 時に表れる応力-ひずみヒステリシスループは, 他の金属に比べ非常に大きいため, その高い減衰特性を構造物の振動抑制効果の向上に利用することが考えられている<sup>(1)(2)</sup>。

SME と PE は主に SMA 内のマルテンサイト

(Martensite; 以下 M)相の双晶変形や M相とオーステナイト(Austenite; 以下 A)相の間で相変態が起こることにより発現する。相変態の進行は, 応力, ひずみ, 温度, それらの変化速度, M相と A相の比, 繰返し変形回数などの熱・力学的パラメータに影響を受けるため, SME 及び PE 時の変形挙動は非常に複雑である。したがって, SMA を応用したスマート構造システムを最適設計するには, SMA の変形挙動の熱・力学的機構を明らかにするための基礎実験や, 変形挙動を精度良く表すことの出来る解析モデルを定式化することが必要不可欠な課題である。

McCormick ら<sup>(3)</sup>など<sup>(4)~(6)</sup>の実験によれば, PE を示す SMA に周期的な振動荷重を加えると, 変態潜熱や, 材料とその周囲との熱交換などにより, 材料温度が動的に変化し, ひずみ速度が材料温度と応力-ひずみ関係に強い影響を及ぼすことが観測されている。しかし, 種々のひずみ速度における応力, ひずみ, 温度

\* 原稿受付 2002年7月19日。

<sup>\*1</sup> 正員, 名古屋大学大学院 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)。<sup>\*2</sup> 正員, 名古屋大学大学院工学研究科。<sup>\*3</sup> 名古屋大学大学院工学研究科。

E-mail: naito@smart.nuae.nagoya-u.ac.jp

を同時に計測して現象を調べた研究は少なく、それらの関係は十分明らかにされていない。

一方、SMA の解析モデルに関しては、多くの研究者によって等温変態時の応力-ひずみ-温度関係の定式化が行われている<sup>(7)~(9)</sup>が、変形に伴って材料温度が動的に変動するような熱・力学的機構が連成した変形挙動時に、応力-ひずみ-温度関係を十分精度良く記述することの出来るモデルは極めて少ない。そのような中で、筆者らはこれまでに、相変態時の散逸ポテンシャルを表す、相干渉エネルギー関数 (Phase Interaction Energy Function; 以下 PIEF) を導入した SMA の等温変態時の構成モデルを提案し<sup>(10)(11)</sup>、このモデルが SME および PE の変形挙動を定量的に精度良く記述できる事を示している<sup>(12)~(14)</sup>。また、このモデルを拡張し、相変態が進行する時に発生する熱や、材料とその周囲との間の熱の交換などを考慮することで、動的に変化する材料温度を見積もり、応力-ひずみ-温度関係を予測することの出来るモデルを提案している。さらに、そのモデルを用いた数値解析によって、入手可能な種々のひずみ速度における応力-ひずみ-温度関係の実験結果を定量的に表すことが出来ることを示している<sup>(15)~(17)</sup>。しかしながら、上述のようにひずみ速度を変化させて、応力、ひずみ、温度を計測した実験は限られており、それらの限られた実験データでは、明確に示されていない材料パラメータや実験条件などが存在するため、これまでは数値計算を行う上でいくつかのパラメータを推測する必要があった。また、それらの実験では解析モデルを検証するのに十分な周波数範囲における計測が行われておらず、解析モデルの妥当性を実証するには不十分であった。

そこで、本研究では、TiNi-SMA ワイヤを用いて、ほぼ等温的な変形挙動を示す 0.001Hz から、ほぼ断熱的な変形挙動を示す 1Hz までの一定のひずみ振幅の正弦波で引張負荷・除荷試験を行い、PE 時の応力、ひずみおよび、温度を同時に計測した。また、計測結果と提案しているモデルによる数値解析結果を比較し、モデルの妥当性を検討した。さらに、負荷・除荷過程中に発生する熱をその原因毎に分解することで、材料温度の変化に対する熱の影響について数値的な考察を加え、変形挙動の熱・力学的機構を明らかにした。

## 2. 解析モデル

### 2.1 相変態時の応力-ひずみ-温度関係<sup>(10)~(14)</sup>

筆者らの提案している擬弾性変形挙動モデルでは、変態応力  $\sigma$  とひずみ  $\varepsilon$  は、M 相の体積分率  $z$  と材料温度  $T$  の関数として、

$$\sigma(z, T) = \frac{-kE\varepsilon_0 + \sqrt{F(z, T)}}{k-1} \quad (1)$$

$$\varepsilon(z, T) = \frac{1}{E_i(z)} \sigma(z, T) + z\varepsilon_0 + \alpha(T - T_0) \quad (2)$$

で与えられる。ただし、

$$F(z, T) = k^2 E^2 \left\{ \varepsilon_0^2 + \frac{1}{k} \alpha^2 (k-1)^2 (T - T_0)^2 \right\} + 2k(k-1)EG_j(z, T) \quad (3)$$

$$G_j(z, T) = \psi(T) + \frac{\partial \phi_{aj}(z, T)}{\partial z} \quad (4)$$

$$\psi(T) = (S_{10} - S_{20})T - (U_{10} - U_{20}) \quad (5)$$

$$E_i(z) = \frac{kE}{1 + (k-1)z} \quad (6)$$

$$k = E_1/E_2, \quad E = E_2 \quad (7)$$

であり、ここで、 $E_i, \varepsilon_0, \alpha, T_0, U_{i0}, S_{i0}$  はそれぞれ、ヤング率、応力誘起 M 結晶のもつ巨視的ひずみ、線膨張係数、基準温度、基準内部エネルギー、基準エントロピを表し、添字  $i = 1, 2$  はそれぞれ A 相、M 相のパラメータであることを表している。また、式 (4) 中の  $\phi_{aj}(z, T)$  は PIEF であり、添字  $j = 0, 1, 2$  はそれぞれ相変態の進行していない時、M 変態時、逆変態時の量を示し、

$$\phi_{aj}(z, T) = \begin{cases} \phi_{a0} = 0, & (\dot{z} = 0) \\ \phi_{a1}(z, T), & (\dot{z} > 0) \\ \phi_{a2}(z, T), & (\dot{z} < 0) \end{cases} \quad (8)$$

で表される。

### 2.2 温度の変化<sup>(15)~(17)</sup>

相変態が進行しているときには、変態潜熱、散逸エネルギーから発生する熱、SMA とその周囲の物質との間の伝達熱などの影響により合金の温度が変化する。ここで、熱弾性効果による熱はその他に比べ微小な量であるため無視すると、相変態が分率  $dz$  だけ進行したときの合金の熱の釣り合いは、

$$C_v dT = dQ_L + dQ_T + dE_D \quad (9)$$

で表される。ここで、 $C_v$  は定積比熱を表し、 $dQ_L, dQ_T, dE_D$  は変態潜熱、外気から流入する伝達熱、散逸エネルギーによる熱、の微小変化を表す。このとき、

$$dQ_T = \frac{4h}{d}(T_s - T)dt \quad (10)$$

$$dQ_L = \rho H_L dz \quad (11)$$

となる。ここで、 $h, d, T_s, dt, \rho, H_L$  はそれぞれ熱伝達係数、ワイヤ直径、周囲の物質の温度、微小時間、

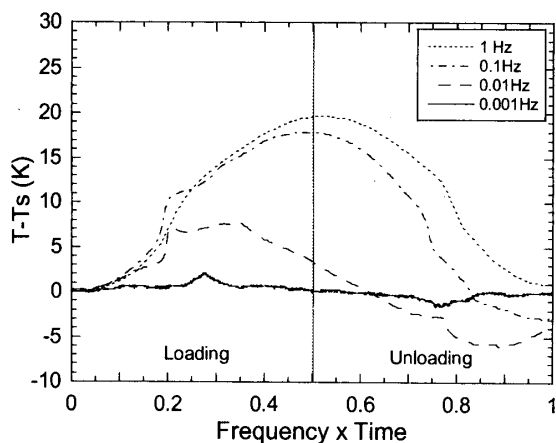


Fig. 1 Frequency dependence of temperature change during the 1st cycle

材料密度, 変態潜熱である. また, 材料温度  $T$  で, 体積分率が  $z$  から  $dz$  だけ相変態が進行した時のひずみ増分を  $d\varepsilon(z, T)$  とすると, そのとき散逸するエネルギーは,

$$dE_D = \frac{1}{2} \{ \sigma(z, T) - \sigma_H(z, T) \} \times \{ d\varepsilon(z, T) + d\varepsilon_H(z, T) \} \quad (12)$$

で表される. ここで,  $\sigma_H, \varepsilon_H$  は散逸がない相変態を想定した時の仮想的な変態応力とひずみを表す.

### 3. 実験方法

#### 3.1 供試材

供試材は Ti-44.9wt% Ni SMA ワイヤ(株関東特殊製鋼製, EF3256)を用いた. ワイヤ直径は 0.75mm, 変態温度は  $M_f=188\text{ K}$ ,  $M_s=202\text{ K}$ ,  $A_s=224\text{ K}$ ,  $A_f=236\text{ K}$  である.

#### 3.2 実験装置

引張試験は材料試験機(株島津製作所製, EHF-FB10KN-10LA)を使用した. 標点距離は 50 mm とし, 荷重, 変位はそれぞれ材料試験機付属のロードセル, 変位計により計測した. また, 材料の温度の計測には, 線径 0.025 mm の T 型熱電対 (OMEGA Engineering, Ltd. 製, COCO-001) と熱電対計測アンプ(株東京測器研究所製, TCA-10A) を用い, 熱電対の温度測定部分をワイヤの標点間中央の表面に固定した. なお, 試験は大気温度  $T_s=296\text{ K}$  の空気中で行った.

#### 3.3 実験手順

まず, 実験環境における, 空気熱伝達係数を求めた. SMA ワイヤを試験治具に固定し, 1 A の一定電流で通電加熱し, 一定時間経過後, 通電を停止し試験片温度が一定になるまで待つ, この間の試験片温度を計測した. このとき, 試験片からつかみ具へと伝導する熱量を評価するため, 評点間中央および中央より 17 mm 離れた点において, 同時に温度を計測した. 通

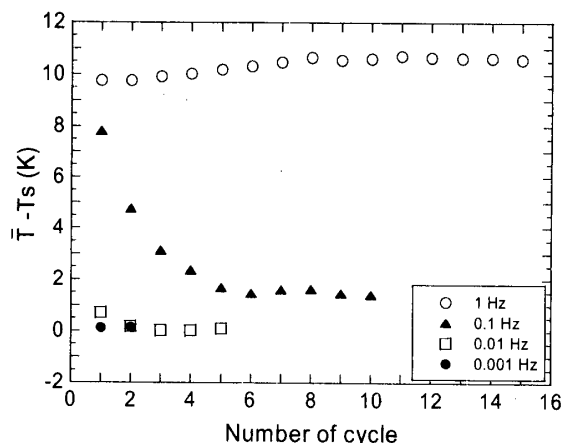


Fig. 2 Variation of average temperature over a cycle with respect to number of cycle

電停止直後の 2 点間の温度差から, 試験片長手方向の温度勾配を推定し, つかみ具へ伝導する単位時間当たりの熱量を計算した. その値の大きさは, 温度の降下曲線から算出した試験片の内部エネルギーの時間変化率の約 1% となるため, 熱の放散は, 主に空気への熱伝達によって行われると考えられる. そこで, 計測した試験片の温度の降下曲線から, 熱伝達係数を算出した. また, 引張荷重・除荷試験の前に, SMA ワイヤの応力-ひずみ挙動を安定させるため, 周波数 0.1 Hz で, ひずみが 0 から 0.06 までの正弦波状に変化するように制御して 100 回の引張荷重・除荷を行った. この前処理条件を採用した根拠に関しては, 付録にて述べる. 前処理終了後, 周波数を 0.001, 0.01, 0.1, 1 Hz とし, 前処理による残留ひずみ分の 0.004 を差し引き, ひずみ  $\varepsilon(t)$  を,

$$\varepsilon(t) = 0.028 \{ 1 + \sin 2\pi (ft - 1/4) \} \quad (13)$$

となるよう制御して引張荷重・除荷試験を行い, それぞれ変化が定常となるまでの 2, 5, 10, 15 サイクルまでの, 荷重, 変位, 材料温度を測定した. ただし,  $f$  は周波数,  $t$  は時間を表す.

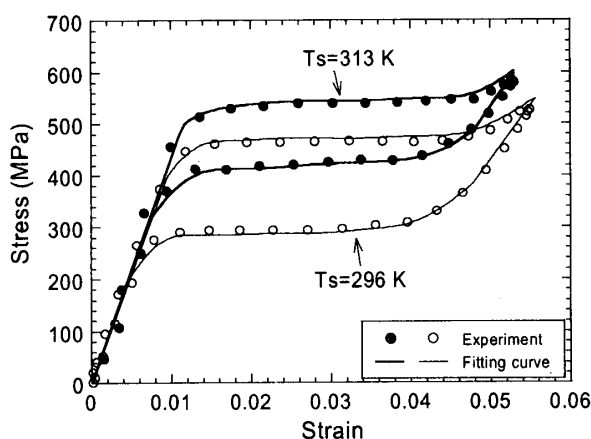
### 4. 結果と考察

#### 4.1 温度変化及び平均温度とサイクル数の関係

図 1 は, それぞれの周波数の第 1 サイクルにおける温度変化の様子である.  $f=0.001\text{ Hz}$  においては最大でも 2 K ほどの温度変化しか起こらず, サイクルの始めと終わりの材料温度はほぼ同じである. その他の周波数では最大で 7 ~ 20 K の温度変化が起こっており, サイクルの始めと終わりでは材料温度が異なっている. 図 2 は, 引張荷重・除荷過程における合金の 1 サイクル中の平均温度  $\bar{T}$  と大気温度  $T_s$  との差とサイクル数の関係であり, 周波数 0.001, 0.01, 0.1, 1 Hz における実験結果をそれぞれプロット

Table 1 Material constants for martensite- and reverse martensite- transformations of the TiNi-SMA specimen

$i$	0	1	2	3	4	5	6	7	8
$e_{1i}$ [J/(m <sup>3</sup> ·K)]	2.81588 × 10 <sup>5</sup>	-3.05047 × 10 <sup>6</sup>	3.23747 × 10 <sup>7</sup>	-1.67406 × 10 <sup>8</sup>	4.86312 × 10 <sup>8</sup>	-8.41647 × 10 <sup>8</sup>	8.75882 × 10 <sup>8</sup>	-5.17406 × 10 <sup>9</sup>	1.36406 × 10 <sup>9</sup>
$f_{1i}$ [J/m <sup>3</sup> ]	-6.98771 × 10 <sup>7</sup>	-9.87312 × 10 <sup>8</sup>	-1.04465 × 10 <sup>10</sup>	5.42434 × 10 <sup>10</sup>	-1.58602 × 10 <sup>11</sup>	2.76199 × 10 <sup>11</sup>	-2.88364 × 10 <sup>11</sup>	1.69920 × 10 <sup>11</sup>	-4.43615 × 10 <sup>10</sup>
$e_{2i}$ [J/(m <sup>3</sup> ·K)]	2.49194 × 10 <sup>5</sup>	-6.70000 × 10 <sup>6</sup>	6.77292 × 10 <sup>7</sup>	-5.78117 × 10 <sup>8</sup>	2.25853 × 10 <sup>8</sup>	-4.79451 × 10 <sup>8</sup>	5.77536 × 10 <sup>8</sup>	-3.77353 × 10 <sup>9</sup>	1.05811 × 10 <sup>9</sup>
$f_{2i}$ [J/m <sup>3</sup> ]	-6.72400 × 10 <sup>7</sup>	9.56770 × 10 <sup>8</sup>	-2.64698 × 10 <sup>9</sup>	1.98826 × 10 <sup>10</sup>	-7.34728 × 10 <sup>10</sup>	1.50758 × 10 <sup>11</sup>	-1.77074 × 10 <sup>11</sup>	1.13346 × 10 <sup>11</sup>	-3.12600 × 10 <sup>10</sup>

Fig. 3 Stress-strain relationships for  $f=0.001\text{Hz}$  at  $T_s=296\text{ K}$  and  $313\text{ K}$ 

した.  $f=0.001, 0.01\text{Hz}$ においては, 平均温度と大気温度との差はほとんど表れないが,  $f=0.1, 1\text{Hz}$ において, 平均温度は, 大気温度よりも  $1\sim 11\text{K}$  程度高くなる. また,  $f=0.1\text{Hz}$ ではサイクル数が増加するに従い, 平均温度は降下するが,  $f=1\text{Hz}$ においては逆に上昇しており, それぞれ, 約  $6, 10$  サイクルで一定値に収束することが分かる.

#### 4.2 数値解析に用いる材料定数

2章で述べたモデルを用いて, 数値解析を行う. 本解析に用いたパラメータを以下に示す.

$$\begin{aligned}
 E_1 &= 4.33 \times 10^4 \text{ GPa}^{(17)}, E_2 = 2.03 \times 10^4 \text{ GPa}^{(17)}, \\
 k &= E_1/E_2 = 2.14, \alpha = 1.04 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}^{(18)}, \\
 C_v &= 2.97 \times 10^6 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})^{(18)}, \rho = 6.49 \times 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3^{(18)}, \\
 S_{01} - S_{02} &= 1.25 \times 10^5 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})^{(17)}, \epsilon_0 = 3.00 \times 10^{-2}^{(17)}, \\
 U_{01} - U_{02} &= 2.38 \times 10^7 \text{ J}/\text{m}^3^{(17)}, H_L = 1.56 \times 10^4 \text{ J}/\text{kg}^{(19)}, \\
 d &= 7.5 \times 10^{-4} \text{ m}, T_s = T_0 = 296 \text{ K}, \\
 h &= 4.34 \times 10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \dots\dots\dots(14)
 \end{aligned}$$

また, PIEFに関して, 式(4)の  $G_j(z, T)$ を  $M$ 相体積分率  $z$  に関して  $n$ 次, 温度  $T$  に関して1次の関数と仮定し,

$$G_j(z, T) = \sum_{i=0}^n (e_{ji}T + f_{ji})z^i \dots\dots\dots(15)$$

とする. ここで,  $e_{ji}, f_{ji}$ は材料定数であり,  $j=1, 2$ のときにそれぞれ  $M$ 相変態, 逆変態に関する値を持つ. この材料定数を簡単に決定するために, 異なる二つの温度における等温変態時の応力-ひずみ関係

を用いる<sup>(16)</sup>. 図1から  $f=0.001\text{Hz}$ では温度の変動が少なく, 等温で変態が進行していると見なすことができるので, ここでは  $f=0.001\text{Hz}$ ,  $T_s=296\text{ K}$  および  $313\text{ K}$ の応力-ひずみ関係を用いて, 式(15)の材料定数を表1の様に定めた. なお, ここでは, フィッティングの精度を高めるため,  $n=8$ とした. 定めたパラメータを用い, 等温変態時の応力-ひずみ関係を計算した結果を, 図3の実線で示す. ここで, 記号は計測値である.

これらのパラメータを用いて, 式(13)に従ってひずみを変動させ, 周波数  $0.001, 0.01, 0.1, 1\text{ Hz}$ における応力-ひずみ-温度関係の数値計算を行った.

#### 4.3 応力-ひずみ-温度関係と温度履歴

$f=0.001, 0.01, 0.1, 1\text{Hz}$ における応力-ひずみ-温度関係の比較をそれぞれ図4(a), (b), (c), (d)に示し, 図2において平均温度のサイクル毎の変化が特徴的であった  $f=0.1, 1\text{Hz}$ における合金温度の時間履歴を, それぞれ図5(a), (b)に示す. ただし, 応力-ひずみ-温度関係に関しては, 第1サイクル目と, 温度変化が収束しているサイクルにおける関係を表し, 材料温度は大気温度との差で表した. ここで, 実験結果は記号で, 数値計算結果を実線又は破線で表している. 図4(a)は,  $f=0.001\text{Hz}$ の第1, 2サイクル目の結果であり, この場合は負荷・除荷過程にほとんど温度変化は表れず, 応力-ひずみ-温度関係もサイクル数によってほとんど変化しない. 図4(b)は,  $f=0.01\text{Hz}$ の第1, 5サイクル目の結果であるが, この場合でも図2によると, 第1サイクル目から第5サイクル目までの間に平均温度が  $1\text{ K}$  未満しか変化していないので, 応力-ひずみ-温度関係にサイクル毎の変化はほとんど表れない. また, このとき, 負荷時の材料温度は大気温度よりも高く, 逆に除荷時には低くなる. そのため, 等温変化の場合と比較して, 負荷時の正変態応力は高くなり, 除荷時の逆変態応力は低くなる. このとき, 応力-ひずみヒステリシスの面積が, 実験した中で最大となった. 図4(c)は  $f=0.1\text{ Hz}$ の第1, 10サイクル目の結果である. このときには, サイクル毎に, 平均温度が降下して行くので, 温度-ひずみ関係, 応力-ひずみ関係の

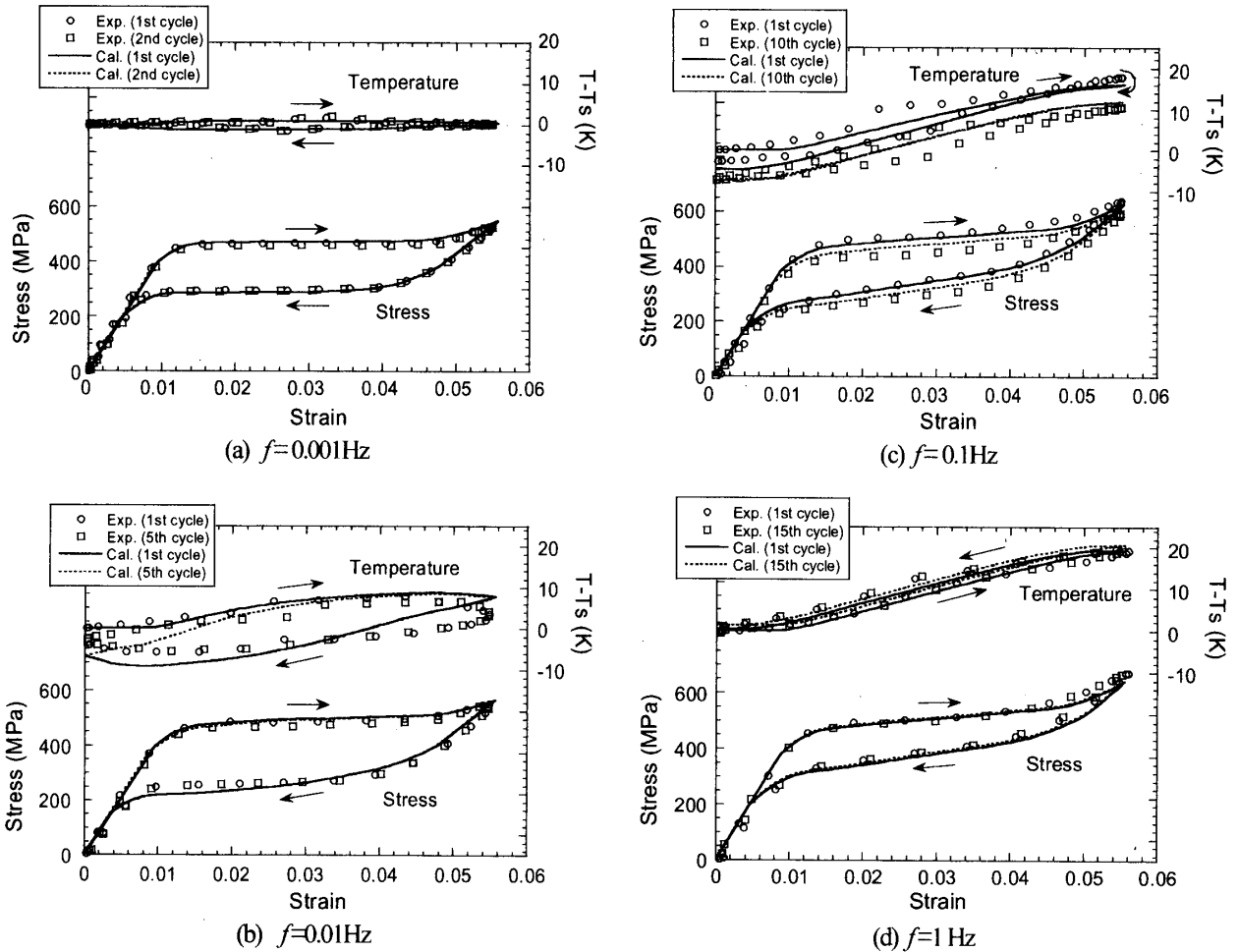


Fig. 4 Stress-strain-temperature relationships for various loading frequencies

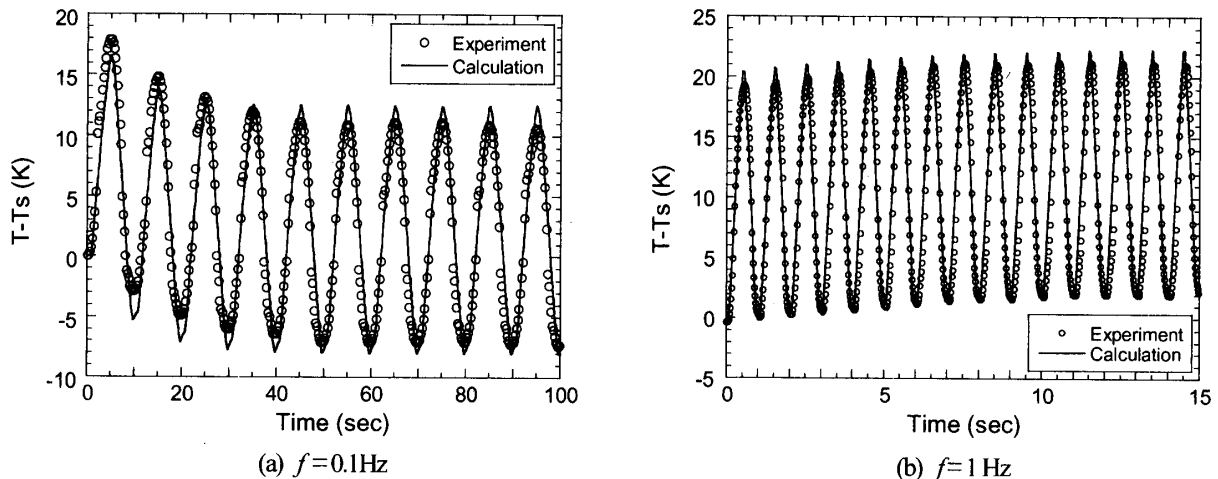


Fig. 5 Time history of temperature change of alloy

グラフで、第 10 サイクル目における温度、変態応力の値が第 1 サイクル目よりも低くなっている。図 4 (d) は  $f=1$  Hz の第 1, 15 サイクル目における結果で、第 15 サイクル目では平均温度が高くなっていることを反映して、変態応力の値も高い方へ移動している。図 5 (a), (b) から、材料温度は 1 サイクルの

間に約 20 K の温度上昇・下降をしながら、その平均温度は変化して行くが、それぞれ第 6, 10 サイクル目で平均温度はほぼ一定の値に収束していることが分かる。

図 4, 5 で計算値と実験結果との比較を行ったが、提案している解析モデルを用いた数値計算結果が、

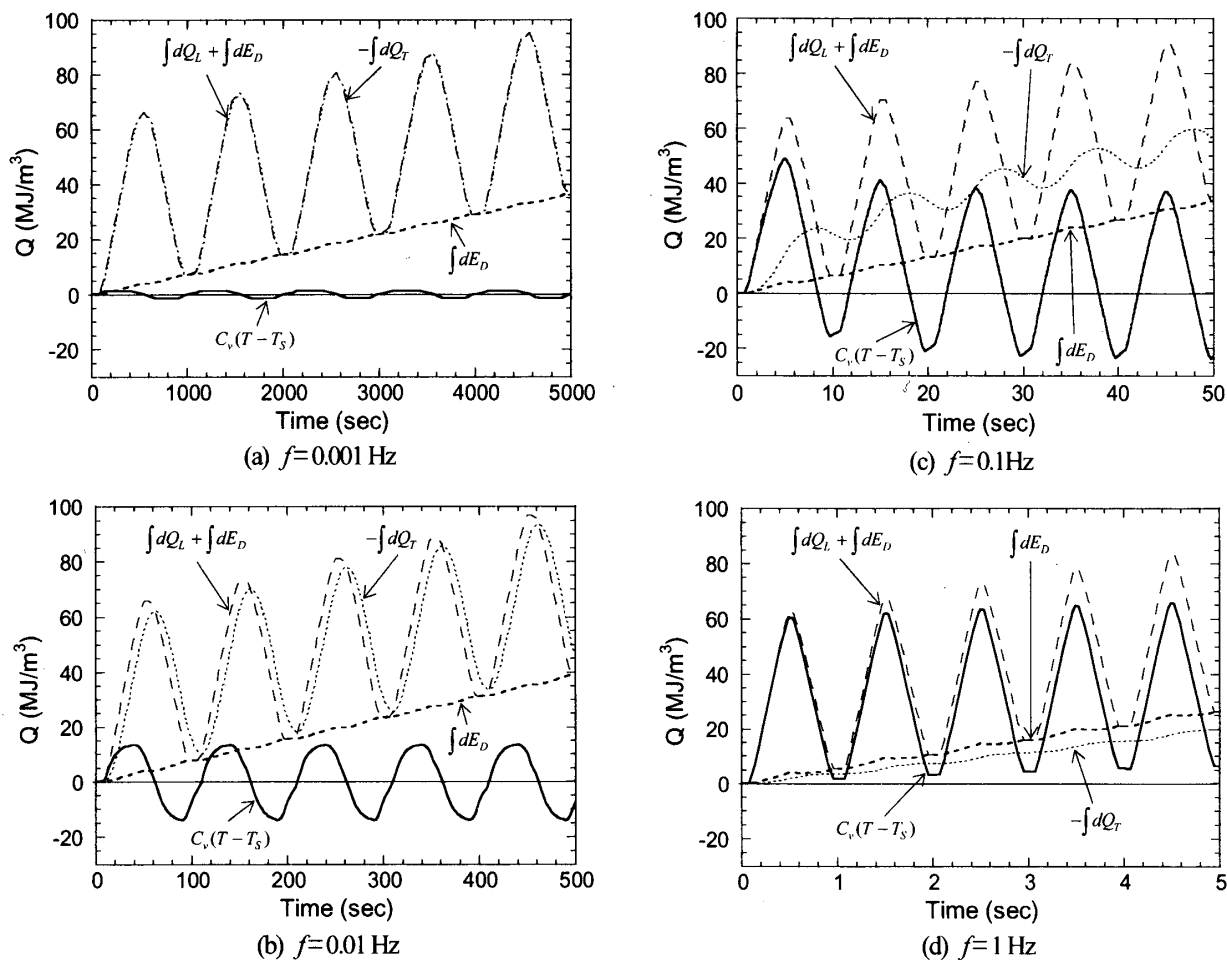


Fig. 6 Time history of heat components for various loading frequencies

応力-ひずみ-温度関係, 温度履歴の特徴を定量的に良くとらえていることが確認できる.

#### 4.4 熱の寄与に関する考察

解析モデルを用いて, 温度変化に関する熱の寄与に関して考察を行う. 変形中に発生する熱について, 式(9)より, 材料の温度変化に消費した熱  $C_v(T-T_s)$ , 変態潜熱  $\int dQ_L$ , 散逸エネルギーによる発熱  $\int dE_D$  および, 大気中へ移動する熱  $-\int dQ_T$  に関して,

$$C_v(T-T_s) = \int dQ_L + \int dE_D - (-\int dQ_T) \quad (16)$$

が成り立つ. 図6 (a), (b), (c), (d)にそれぞれの周波数に対して計算した  $C_v(T-T_s)$ ,  $\int dQ_L + \int dE_D$ ,  $\int dE_D$  および  $-\int dQ_T$  の履歴を示す.  $\int dQ_L$  はマルテンサイト変態時には発熱, 逆変態時には吸熱となるため1サイクルで見ると零となる. また  $\int dE_D$  は変態時の相間の干渉によって散逸されるエネルギーで単調増加する.  $\int dQ_L$  は周波数によって変化せず,  $\int dE_D$  もほとんど変化しない. 周波数を変える事によって,  $-\int dQ_T$  に最も相異が表れる. 式(10)が

$\int dQ_T$  の傾きを表すことから解るように, 材料温度と大気温度の差  $T-T_s$  がその傾きに比例しており,  $C_v(T-T_s)$  が零を横切る時に, 傾きの正・負が切り替わる. 言い換えれば,  $T-T_s$  または  $\int dQ_L + \int dE_D$  と  $-\int dQ_T$  の差が小さくなるように大気と材料の熱交換が行われる.  $f=0.001\text{Hz}$  の場合は,  $-\int dQ_T$  が  $\int dQ_L + \int dE_D$  にほぼ沿って変化し, 材料温度はほとんど変化しない. 周波数を高くすると, 熱交換が間に合わなくなり,  $-\int dQ_T$  が  $\int dQ_L + \int dE_D$  に沿って変化できなくなる. このため,  $f=0.01\text{Hz}$  や  $0.1\text{Hz}$  では, 材料温度が大気温度よりも高くなったり, 低くなったりし, 1サイクルの終了時に材料温度が低くなることも説明出来る.  $f=1\text{Hz}$  とさらに周波数が高くなると,  $-\int dQ_T$  が  $\int dE_D$  にすら追いつかなくなり, 材料温度は常に大気温度よりも高くなる. また,  $\int dE_D$  と  $-\int dQ_T$  の1サイクル当たりの増加量が等しくなったときに, 発生する熱量と発散する熱量が等しくなり, 温度の変化過程が一定の軌跡に収束する. 特に, 等温変化

の場合は、 $\int dQ_L + \int dE_D = -\int dQ_T$  であるので、サイクル毎の変化は表れず、断熱変化の場合は、 $-\int dQ_T = 0$  であり、一定の変化過程に収束しない。

## 5. 結 言

PE 挙動を示す TiNi-SMA ワイヤを用いて、周波数 0.001, 0.01, 0.1, 1Hz における引張負荷・除荷試験を行い、応力-ひずみ-温度関係を測定した。それぞれの周波数において温度変化の様子は異なり、応力-ひずみ関係にも相異が表れた。また、サイクル毎にも応力-ひずみ-温度関係は変化するが、いずれある定常の過程へと収束することが分かった。

筆者らの提案している熱の釣り合いを考慮した構成モデルを用いて、ひずみ速度が非常に遅く、等温変態に近い応力-ひずみ関係から材料定数を決定し、対象とする周波数における数値計算を行った。測定した応力-ひずみ-温度関係の時間的な履歴と数値計算結果との比較を行った結果、それは定量的によく一致しており、提案している構成モデルの妥当性を示すことが出来た。従って、今回実験を行った 1 Hz までの周波数においては、主に材料温度が変化することが、応力-ひずみ関係に影響を与えていることが分かり、解析モデルに考慮されていない純粋にひずみ速度に依存する粘性減衰などの影響はほとんど表れないことが示唆された。また、熱の釣り合いの観点から温度変化に関する考察を行った結果、周波数は外気へ放散する熱量に最も強く影響を及ぼしていることが分かった。

最後にこの研究の一部は経済産業省・NEDO の大学連携型「知的材料・構造システム研究開発プロジェクト（平成 10 年度～14 年度）」として行われたものであることをここに記す。

## 付 録

PE 挙動は変形を繰返すたびに、応力-ひずみ挙動が変化し、次第に一定の挙動に近づく事が確かめられている<sup>(8)(9)</sup>。ここでは、本稿で用いた SMA ワイヤに関して、繰返し引張負荷・除荷した時の応力-ひずみ挙動の特性変化を調べ、3・3 節にて採用した前処理の条件を決定した根拠を述べる。試験片、実験装置、環境に関しては、第三章にて述べた実験と同様である。

### 実験方法

ひずみを 0 から 0.06 までの正弦波状に変化するよう制御し、200 回の引張負荷・除荷を加える。周波数を 0.01, 0.1, 1 Hz に固定した三種類の場合について実験を行った。ただし、第 1, 100 および 200 サイクル

目において、一旦周期荷重を停止し、ひずみ速度を 1%/min にして応力-ひずみ挙動を計測した。

### 実験結果および考察

図 7 は第 100 サイクル目の応力-ひずみ曲線、図 8 は M 相変態および逆変態時の平均応力と繰返し数の関係であり、それぞれ、周波数による比較を示した。図 7, 8 より、応力-ひずみ曲線および変態応力の変化量に、周波数の影響がほとんど表れていないことがわかる。また、図 8 より、100 サイクルを超えて繰返し荷重を加えた場合、その変態応力の低下の割合は 1 サイクル毎に約 0.1 MPa となる。第三章で述べた実験は高々 15 サイクルの繰返し荷重であることを考慮すると、100 サイクルの繰返し荷重で前処理した試験片を用いた場合、変態応力の低下は約 2 MPa 以下と予測でき、変態応力に比べて十分小さくなる。

以上の結果をふまえ、また、① 応力-ひずみ挙動が十分安定し、② 比較的短時間で処理が可能であり、③ 周波数は、処理後の特性に影響を与えないと確認した上限より低い方が望ましい、という観点から 3・3 節に示した前処理条件を選んだ。

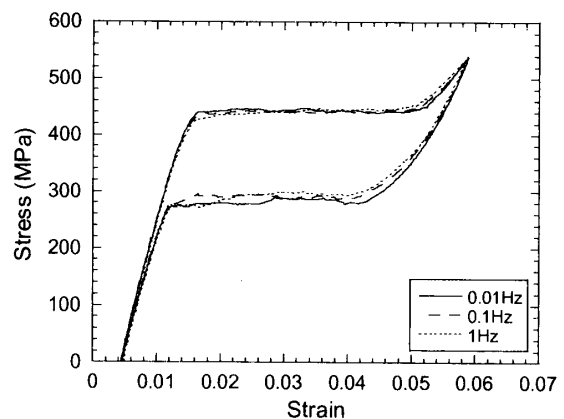


Fig. 7 Stress-strain relationships at 100th cycle for various training frequencies

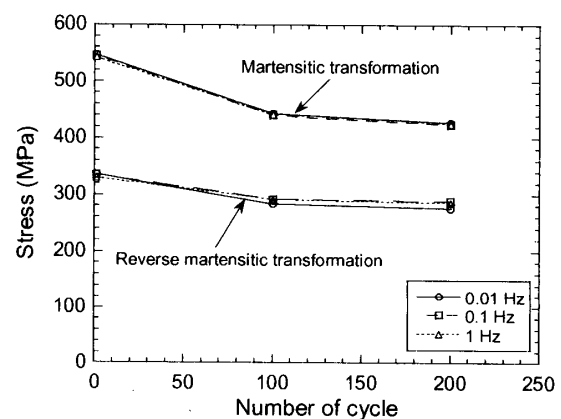


Fig. 8 Effect of cyclic loading on transformation stresses for various training frequencies

## 文 献

- (1) Lin, H.C., Wu, S.K. and Chang Y.C., *Metall. Mater. Trans. A*, **26A** (1995), 851-858.
- (2) Saadat, S., Salichs, J., Noori, M., Hou, Z., Davoodi, H., Baron, I., Suzuki, Y. and Masuda, A., *Smart Mater. Struct.*, **11** (2002), 218-229.
- (3) McCormick, P.G., Liu, T. and Miyazaki, S., *Mater. Sci. Eng.*, **A167** (1993), 51-56.
- (4) Leo, P.H., Shield, T.W. and Bruno, O.P., *Acta Metall. Mater.*, **41-8** (1993), 2477-2485.
- (5) Shaw, J.A. and Kyriakides, S., *J. Mech. Phys. Solids*, **43-8** (1995), 1243-1281.
- (6) 占野栄朗・戸伏壽昭・高田和幸・Gadaj, S.P.・Nowacki, W.K., *機論*, **66-643, A** (2000), 496-501.
- (7) Tanaka, K., Kobayashi, S. and Sato, Y., *Int. J. Plast.*, **2** (1986), 59-72.
- (8) Raniecki, B. and Lexcellent, C., *Eur. J. Mech. A*, **13-1** (1994), 21-50.
- (9) Boyd, J.G. and Lagoudas, D.C., *Int. J. Plast.*, **12-6** (1996), 805-842.
- (10) Kamita, T. and Matsuzaki, Y., *Proc. SPIE's 1996 Symp. on Smart Struct. and Mater.*, **2717** (1996), 509-516.
- (11) Kamita, T. and Matsuzaki, Y., *Smart Mater. Struct.*, **7** (1998), 489-495.
- (12) Matsuzaki, Y., Kamita, T. and Ishida, A., *Proc. SPIE's 1997 Symp. Smart Struct. Mater.*, **3241** (1997), 230-236.
- (13) Naito, H., Matsuzaki, Y. and Ikeda, T., *Proc. SPIE's 2000 Symp. Smart Struct. Mater.*, **3992** (2000), 463-473.
- (14) Naito, H., Matsuzaki, Y. and Ikeda, T., *Proc. SPIE's 2001 Symp. Smart Struct. Mater.*, **4333** (2001), 291-301.
- (15) Matsuzaki, Y., Naito, H. and Ikeda, T., *Proc. 10th Int. Conf. Adapt. Struct. Tech.* (2000), 208-214, Technomic Pub.
- (16) Matsuzaki, Y., Naito, H., Ikeda, T. and Funami, K., *Smart Mater. Struct.*, **10** (2001), 884-892.
- (17) Naito, H., Matsuzaki, Y., Funami, K. and Ikeda, T., *AIAA Paper No. 2001-1355* (2001).
- (18) 田中喜久昭・戸伏壽昭・宮崎修一, 形状記憶合金の機械的性質 (1993), 養賢堂.
- (19) Stachowiak, G.B. and McCormick, P.G., *Acta Metall.*, **36-2** (1988), 291-297.
- (20) Naito, H., Sato, J., Funami, K., Matsuzaki, Y. and Ikeda, T., *J. Intel. Mater. Syst. Struct.*, **12-4** (2001), 295-300.