

TiNi 形状記憶合金のサブループ負荷における応力緩和 Stress relaxation of TiNi shape memory alloy in subloop loading

武田 亘平[†], 松井 良介[†], 戸伏 壽昭[†]
Kohei Takeda, Ryosuke Matsui, Hisaaki Tobushi

Abstract The transformation-induced stress relaxation and stress recovery of TiNi shape memory alloy (SMA) in the stress-controlled subloop loading were investigated based on the local variation in temperature and transformation band on the surface of the SMA tape in the tension test. The results obtained are summarized as bellows. (1) In the loading process, temperature increases due to the exothermic martensitic transformation (MT) till the holding strain under a constant stress rate and thereafter temperature decreases during holding the strain constant, resulting in stress relaxation due to the MT. (2) In the unloading process, temperature decreases due to the endothermic reverse transformation till the holding strain under a constant stress rate and thereafter temperature increases during holding the strain constant, resulting in stress recovery due to the reverse transformation. (3) Stress varies markedly in the initial stage followed by gradual change during holding the strain constant. (4) If stress rate is high till the holding strain in the loading and unloading processes, both stress relaxation and stress recovery are large. (5) It is important to take account of these behaviors in the design of SMA elements since the force of SMA elements can vary under constant strain even if temperature is kept constant around SMA elements.

1. 緒言

形状記憶合金 (shape memory alloy, SMA) は形状記憶効果や超弾性の熱・力学特性を示し、インテリジェント材料として必要な機能特性に優れているためにその応用が世界的に注目されている (Funakubo, 1987; Otsuka and Wayman, 1998; Miyazaki, 2008) . SMA の応用において記憶素子を設計するためには、材料の熱・力学特性が必要である。SMA の機能特性は主にマルテンサイト (martensite, M) 変態に基づいて現れる。SMA の M 変態は温度および応力の変化およびこれらの履歴に依存するために、M 変態に伴う変形特性は複雑である (Tanaka, et al., 1986; Raniecki, et al., 1992; Tobushi, et al., 2013) . 熱・力学特性に関するこれまでの多くの研究は M 変態および逆変態が完了するフルループ (完全ループとも呼ばれる) の条件の下で行われている。実用においてはひずみ、温度および応力は種々に変動する。M 変態が完了しない範囲でひずみ、温度および応力が変動するサブループ (部分ループあるいは

内部ループとも呼ばれる) の負荷を受ける場合、フルループで規定される M 変態の開始と終了の条件は満たされない。このため、M 変態と逆変態の進展はそれまでのひずみ、温度および応力の履歴に依存して変化する (Tanaka, et al., 1994; Tanaka, et al., 1995; Pieczyska, et al., 2007) . 例えば、一定応力下の加熱と冷却で SMA 素子は M 変態と逆変態により 2 方向の変形をする。フルループの場合には、M 変態で生じ得るひずみの大きさに対応する変形量 (ストローク) だけ、SMA 素子は伸び縮みをする。しかし、サブループの場合には、SMA 素子では M 変態ひずみの大きさに対応するだけのストロークは得られない。同様に、ひずみを拘束して SMA 素子を加熱・冷却した場合に現れる回復応力の変化もサブループでは履歴に依存するので、回復力の変化はフルループの場合に比べて小さくなる。したがって、回復力をアクチュエータやロボットなどの駆動力として用いる場合、サブループにおける回復力はフルループの場合と同様には有効に利用できない。また、M 変態は負荷除荷および加熱冷却の速度に依存するので、ひずみおよび応力の変動は複雑である。

[†] 愛知工業大学 工学部 機械学科 (豊田市)

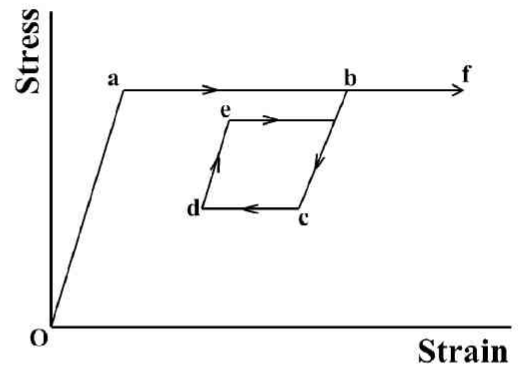
SMA がサブループ負荷を受ける場合, 一定応力下ではひずみの変動する変態誘起クリープ変形が現れ (Takeda, et al., 2012a), 一定ひずみ下では応力の変動する変態誘起応力緩和が生じる (Pieczyska, et al., 2007). この論文では, 応力変化の生じる原因が発熱 (あるいは吸熱) 反応であると推察されているが, 試験片表面の変態帯および温度分布については検討されていない. 一定ひずみ下においては変態の進展量は少なく, 変態進展過程の観察は容易でないため, これらの研究はこれまで行われていない. SMA の実用では, 機械の運動を制御するクラッチやブレーキ, 油圧で駆動力を制御するアクチュエータ, および締結要素を締付ける場合においては, 荷重を制御する必要がある. SMA をこれらに使用する場合, 応力制御における変形挙動を理解する必要がある. また, SMA を用いたこれらの場合, ある位置まで動作させその位置を保持するように制御することが多い. 一定ひずみ下において変態進展条件を満たせば応力緩和および応力回復が生じ, その位置を保持するための荷重が変動する. 同様に, ある位置を保持するために荷重を保持する制御をしても, 上述したように, 一定応力下ではひずみの変動するクリープおよびクリープ回復が生じるためその位置の制御は難しくなる. したがって, SMA を使用したアクチュエータなどの制御を考えるとその応力-ひずみ-温度関係を理解する必要があり, サブループにおける変形挙動を理解することは, サブループ負荷を受ける SMA 素子の機能特性を正しく評価し, SMA 素子を設計するために実用上非常に重要である.

本研究では, SMA の中で最も多く実用されている TiNi SMA について, 単軸引張試験により薄帯材の応力制御サブループ負荷における変態誘起応力緩和および応力回復について検討する. 一定応力速度で負荷し, M 変態領域においてひずみを一定に保持すると応力の減少する応力緩和が生じ, 除荷過程の逆変態領域においてひずみを一定に保持すると応力の増加する応力回復が生じる. 実験では, マイクロスコープおよびサーモグラフィにより観察した試験片表面の変態帯と温度分布の変化に基づき, 応力緩和と応力回復の特性を明らかにする. また, 種々の応力速度に関する応力緩和および応力回復の特性について考察する.

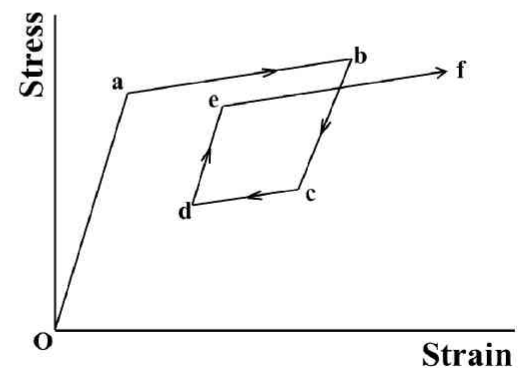
2. サブループ負荷における変形挙動と変態進展条件

2.1 ひずみ制御と応力制御における変形特性

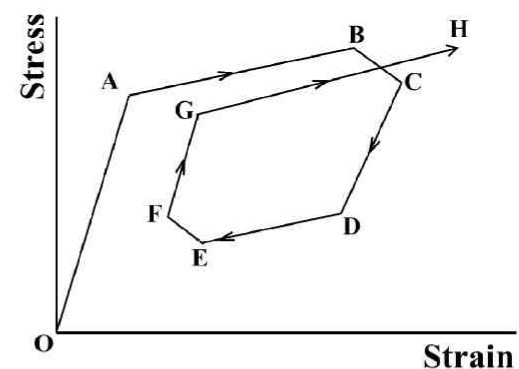
一定の低ひずみ速度と高ひずみ速度で制御した場合および応力速度一定で制御した場合のサブループ負荷における超弾性の応力-ひずみ線図を図 1 (a), (b) および (c)



(a) Constant low strain rate



(b) Constant high strain rate



(c) Constant stress rate

Fig. 1 Stress-strain diagrams in the subloop strain-controlled and stress-controlled loadings under different loading rates

にそれぞれ示す (Pieczyska, et al., 2007 ; Takeda, et al., 2012b) .

図 1 (a) に示すように, 一定の低ひずみ速度のサブループで負荷除荷した場合, 点 b から除荷し点 d から再負荷すると点 e において最初の上部応力水平段の応力より少し低い応力で M 変態による応力水平段が現れ, その後点 b を通り, 回帰点記憶 (return point memory) が現れる (Raniecki, et al., 1992; Pieczyska, et al., 2007; Takeda, et al., 2012b) .

図 1 (b) に示すように、一定の高ひずみ速度のサブループで負荷除荷した場合、点 a から点 b において応力誘起マルテンサイト変態 (stress-induced martensitic transformation, SIMT) による発熱反応により温度が上昇し、応力は高くなる。その後点 b より除荷し点 d より再負荷すると点 e で SIMT が開始し、その後の再負荷曲線は点 b を通らないため回帰点記憶は現れない。

図 1 (c) に示すように、一定応力速度のサブループで負荷除荷した場合、点 A から点 B の負荷過程においては、図 1 (b) と同様に温度が上昇し応力は高くなる。点 B からの除荷においては、周囲空気により冷却されるため上昇した温度は降下する。このため、M 変態の進展条件が満たされ点 B から点 C の間では除荷しているにもかかわらずひずみの増加するオーバーシュートが現れる。点 D から点 E の間では逆変態により温度が降下し、点 E から点 F の再負荷過程においては周囲空気により降下した温度は上昇する。このため、逆変態の進展条件が満たされ点 E から点 F の間では負荷しているにもかかわらずひずみの減少するアンダーシュートが現れる (Pieczyska, et al., 2007) 。その後の再負荷における変態域の曲線は点 G から点 H を通り、除荷開始点 B を通らないため回帰点記憶は現れない。

上述のように、応力制御のサブループにおいては、ひずみ制御では現れないひずみのオーバーシュートおよびアンダーシュートが除荷と再負荷の初期において現れる。このようにひずみ制御と応力制御のサブループ負荷において材料の変形挙動は異なるので、荷重を制御する SMA 素子を設計するためには、応力制御のサブループにおける変形挙動を理解する必要がある。

2.2 変態進展条件

サブループにおける M 変態および逆変態の進展条件を示した応力-温度相図を図 2 に示す。図 2 において z は M 相の体積分率を示す。点 A および点 B は M 変態および逆変態中の状態にあり、それぞれの点における M 相の体積分率を z_A および z_B とする。図中の記号 M_S , M_F , A_S , A_F は M 変態の開始線と終了線および逆変態の開始線と終了線を表し、破線 M_A および A_B はそれぞれ分率が z_A および z_B となる状態を表す。変態進展条件は次式で表わされる (Tanaka, et al., 1986) 。

$$\begin{aligned} d\sigma/dT &\geq C_M: & \text{for } dT > 0 \\ d\sigma/dT &\leq C_M: & \text{for } dT < 0 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} d\sigma/dT &\leq C_A: & \text{for } dT > 0 \\ d\sigma/dT &\geq C_A: & \text{for } dT < 0 \end{aligned} \quad (2)$$

式 (1) は M 変態の進展条件を示し、式 (2) は逆変態の進展条件を示す。式 (1) および式 (2) で規定される変

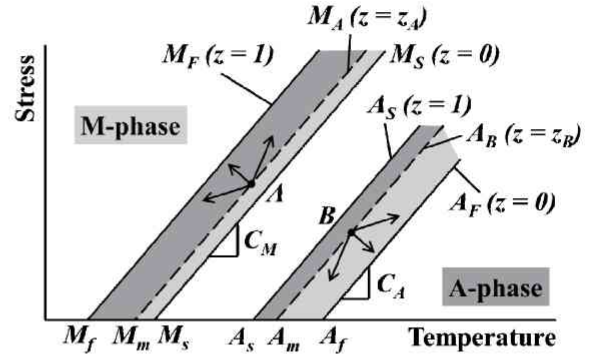


Fig. 2 Conditions for progress of the martensitic transformation and the reverse transformation in the subloop loadings on the stress-temperature phase diagram

態の進展条件は、図中の点 A および点 B からの矢印で示される方向に応力および温度が変化することである。

3. 実験方法

3.1 供試材と試験片

供試材は古河テクノマテリアル (株) 製の室温で超弾性を示す Ti-50.95at%Ni SMA 薄帯材を用いた。材料の厚さは 0.37 mm、幅は 9.95 mm、長さは 170 mm であった。示差走査熱量測定 (differential scanning calorimetry, DSC) で求めた材料の R 相変態開始と終了の温度 R_s , R_f および逆変態開始と終了の温度 A_s , A_f はそれぞれ 279 K, 245 K, 254 K, 281 K であった。試験片は一樣形状の薄帯材であった。標点距離は試験片のつかみ部間の長さで 100 mm であった。変態帯を観察する試験片表面には 2000 番のエメリー紙により鏡面加工を施した。サーモグラフィによる温度分布を観察する試験片表面には蝟燭の煤を一樣に薄く付着させた。この蝟燭の煤は試験片作製工程において付着させており、煤の発生を促すための板を介して試験片に蝟燭の煤を付着させた。したがって、蝟燭の炎が直接試験片に触れることなく、試験片から十分離れた位置より煤を付着させたため、蝟燭の煤を付着させる時の熱の影響は無い。このようにして作製した試験片を試験機に取付け実験を行った。したがって、試験片の初期温度は雰囲気温度と同じである。

3.2 実験装置

引張試験には、形状記憶合金特性試験装置 (株) 島津製作所製 EZ Graph) を用いた。これは、引張試験機と加熱冷却装置とから構成されている。試験片表面の変態帯の観察には、動き解析マイクロスコブ (株) キーエンス

製 VW-6000) を用いた。試験片表面の M 変態による発熱吸熱に基づき生じる温度変化は、赤外線サーモグラフィ (日本アビオニクス (株) 製 Thermo Tracer H2600) により観察した。

3.3 実験手順

サブグループ負荷における応力緩和および応力回復特性について大気中室温で単軸引張試験を行った。実験中、試験片表面の変態帯と温度分布を観察した。負荷過程においては、応力速度 $d\sigma/dt$ 一定でひずみ ε_1 まで負荷し、その後ひずみ ε_1 を保持し、応力緩和特性を観察した。引き続き除荷過程においては、応力速度 $d\sigma/dt$ 一定でひずみ ε_3 まで除荷し、その後ひずみ ε_3 を保持し、応力回復特性を観察した。応力速度 $d\sigma/dt$ は 1 MPa/s, 3 MPa/s, 5 MPa/s とした。負荷時の保持ひずみ ε_1 は 6 % とした。除荷時の保持ひずみ ε_3 は 2 % とした。

4. 実験結果および考察

4.1 応力緩和と応力回復

4.1.1 応力制御サブグループ負荷における応力-ひずみ関係

負荷過程において、応力速度 $d\sigma/dt = 5 \text{ MPa/s}$ でひずみ $\varepsilon_1 = 6\%$ まで負荷し、その後ひずみ ε_1 を保持し、除荷過程において、応力速度 $d\sigma/dt = -5 \text{ MPa/s}$ でひずみ $\varepsilon_3 = 2\%$ まで除荷し、その後ひずみ ε_3 を保持した試験により得られた応力-ひずみ曲線を図 3 に、応力とひずみの時間的変化を図 4 にそれぞれ示す。

図 3 からわかるように、負荷過程において、応力速度 $d\sigma/dt = 5 \text{ MPa/s}$ でひずみ $\varepsilon_1 = 6\%$ まで負荷し、ひずみ ε_1 を保持すると応力が σ_1 から σ_2 に低下し、応力緩和 $\Delta\sigma = \sigma_2 - \sigma_1$ が生じる。除荷過程において、応力速度 $d\sigma/dt = -5 \text{ MPa/s}$ でひずみ $\varepsilon_3 = 2\%$ まで除荷し、ひずみ ε_3 を保持すると応力が σ_3 から σ_4 に増加し、応力回復 $\Delta\sigma = \sigma_4 - \sigma_3$ が生じる。

図 3 および 4 からわかるように、負荷過程において、M 変態開始点 S_M の直後に応力が変動する。点 S_M で SIMT による変態帯が発生し、応力のオーバーシュートが生じる。このため、点 S_M までのひずみ速度 $d\varepsilon/dt = 1.37 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ に対して、点 S_M 以降でひずみ速度は急激に高くなり、 $d\varepsilon/dt = 1.94 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ となる。これは、一定応力速度で制御しており、応力の低下するオーバーシュートが生じるため、引張試験機のクロスヘッドはさらに高い速度で移動することにより現れる。この急激なひずみの変動に追従するために点 S_M 直後に応力変動が現れる。ひずみ保持開始点 H_1 後、応力は初期に急激に減少し、その後は緩やかに減少する。応力

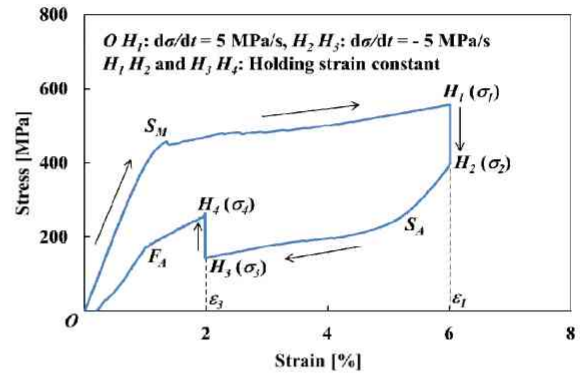


Fig. 3 Stress-strain curve obtained by the test under a stress rate of $d\sigma/dt = 5 \text{ MPa/s}$ till a point H_1 followed by holding strain constant at $\varepsilon_1 = 6\%$ and thereafter unloaded till a point H_3 followed by holding strain constant at $\varepsilon_3 = 2\%$

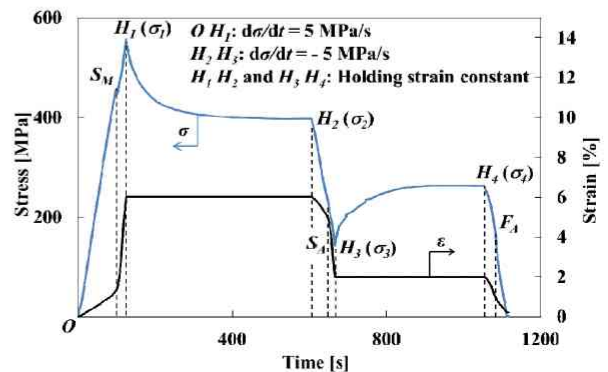


Fig. 4 Variation in stress and strain with time obtained by the test under a stress rate of $d\sigma/dt = 5 \text{ MPa/s}$ till a point H_1 followed by holding strain constant till a point H_2 and thereafter unloaded till a point H_3 followed by holding strain constant till a point H_4

緩和後の応力 σ_2 は 397 MPa であった。除荷過程においても同様に、応力の増加するアンダーシュートが生じるため、逆変態の開始する点 S_A までのひずみ速度 $d\varepsilon/dt = -2.34 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ に対して、点 S_A 以降でひずみ速度は急激に高くなり、 $d\varepsilon/dt = -1.51 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ となる。ひずみ保持開始点 H_3 後、応力は初期に急激に増加し、その後は緩やかに増加する。応力回復後の応力 σ_4 は 263 MPa であった。

4.1.2 変態帯の挙動

図 3 に示した応力-ひずみ曲線の試験における試験片表面をマイクロSCOPEで撮影した写真を各ひずみに関して図 5 に示す。図中右端の写真は M 相を着色する前の負荷時のひずみ 4 % における写真である。このひずみ 4 % における写真からわかるように、変態帯の界面を観察することはできるが、M 相の領域とオーステナイト (austenite, A)

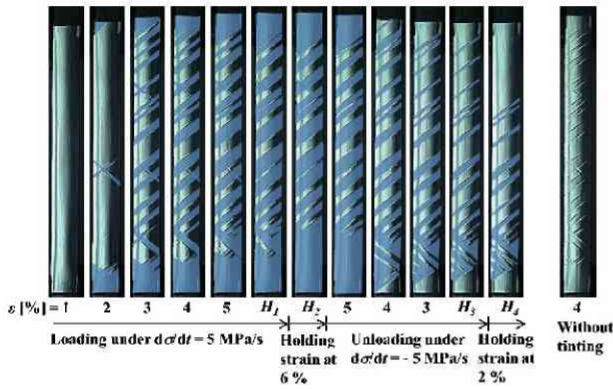


Fig. 5 Photographs of specimen surface at various strains ϵ under a stress rate of 5 MPa/s followed by holding strain constant at a point H_1 ($\epsilon_1 = 6\%$) during loading and at a point H_2 ($\epsilon_2 = 2\%$) during unloading

相の領域が明瞭にはわかりにくい。このため、M相の領域をはっきりと示すために図5においてはM相を紺色で着色している。負荷過程においてひずみ2%から3%の間では、応力速度 $d\sigma/dt = 5\text{MPa/s}$ 一定下でひずみ速度 $d\epsilon/dt$ が高くなり、試験片全体に変態帯が発生する。ひずみ3%以降では、発生した変態帯の界面が進展し、ひずみが増加する。ひずみ $\epsilon_1 = 6\%$ までの負荷後、点 H_1 から H_2 の間でひずみを保持するとM変態が少し進展し、M相の領域が増加する。除荷過程においては、応力緩和後 (H_2) における変態帯の界面を起点に逆変態が進展し、ひずみが減少する。ひずみ $\epsilon_3 = 2\%$ までの除荷後、ひずみを保持すると点 H_3 から H_4 の間で逆変態が少し進展し、A相の領域が増加する。

このように、一定ひずみ下での変態の進展に伴い応力緩和および応力回復の現れることが確認できる。

4.1.3 変態に伴う温度変化

図3で示した応力-ひずみ曲線と同じ条件の試験のサーモグラフィにより得られた試験片表面の温度分布を、負荷過程においては各ひずみについて、ひずみ保持過程においては各応力について、図6に示す。また、応力 σ および試験片表面の平均温度と雰囲気温度との差 ΔT の時間的変化を図7に示す。同様に、除荷過程における試験片表面の温度分布を示すサーモグラムおよび応力 σ と温度変化 ΔT の時間的変化を図8および図9にそれぞれ示す。図6および図8のサーモグラムにおいては、ひずみ保持過程における試験片表面の温度分布の変化を明瞭に示すため、応力間隔 $\Delta\sigma = 20\text{MPa}$ 毎の温度分布を示す。図6および図7からわかるように、一定の応力速度 $d\sigma/dt = 5\text{MPa/s}$ で点 H_1 (ひずみ $\epsilon_1 = 6\%$) まで負荷すると図4で示した様に、M変態開始点 S_M から点 H_1 において、ひずみ速度は高くなり、M変態の発熱反応による熱が周囲に逃げる時間がないため

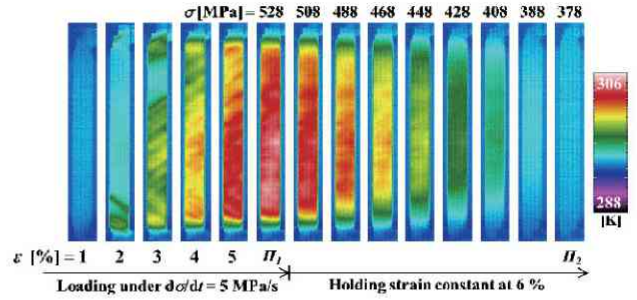


Fig. 6 Thermograms of temperature distribution on specimen surface at various strains ϵ during loading under a stress rate of 5 MPa/s till a point H_1 ($\epsilon_1 = 6\%$) followed by holding strain constant till a point H_2

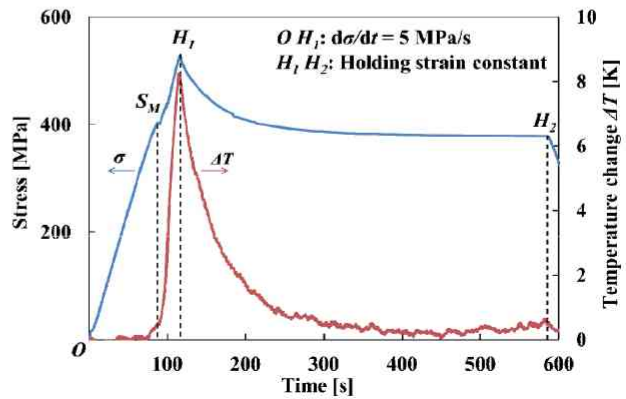


Fig. 7 Variation in stress σ and average temperature change ΔT on specimen surface with time during loading under a stress rate of 5 MPa/s till a point H_1 ($\epsilon_1 = 6\%$) followed by holding strain constant from the point H_1 to a point H_2

試験片の温度は上昇する。その後点 H_1 から点 H_2 の間でひずみを保持すると、周囲空気により温度は降下し、2.2節で示した変態進展条件を満たすためM変態は進展する。その結果、ひずみを保持している間に、応力緩和が生じる。

除荷過程における関係を示す図8および図9からわかるように、一定の応力速度 $d\sigma/dt = -5\text{MPa/s}$ で点 H_3 (ひずみ $\epsilon_3 = 2\%$) まで除荷すると図4で示した様に、逆変態開始点 S_4 から点 H_3 において、ひずみ速度は高くなり、負荷過程と同様に、逆変態の吸熱反応により温度は降下する。その後ひずみを保持すると、周囲空気により温度は上昇し、2.2節で示した変態の進展条件を満たすため逆変態が進展する。この結果、ひずみを保持している点 H_3 から点 H_4 の間において、応力回復が生じる。

図7および図9からわかるように、ひずみ保持過程の初期において温度は著しく変化し、その後変化は少なくなる。この温度変化に対応して、応力はひずみ保持過程の初期に著しく変化し、その後一定値に飽和する。

以上の通り、一定ひずみ保持過程において変態が進展す

るために温度が変化する. この温度変化に基づいて生じる応力緩和および応力回復の挙動が確認できる.

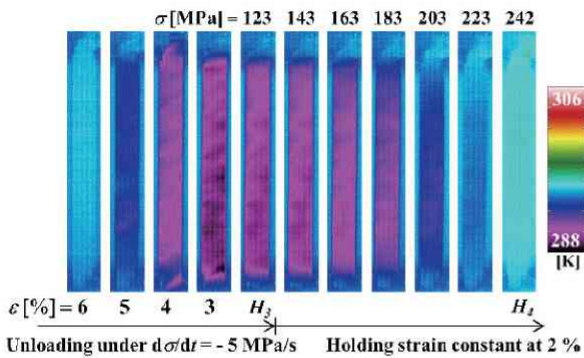


Fig. 8 Thermograms of temperature distribution on specimen surface at various strains ϵ during unloading under a stress rate of -5 MPa/s till a point H_3 ($\epsilon_3 = 2\%$) followed by holding strain constant till a point H_4

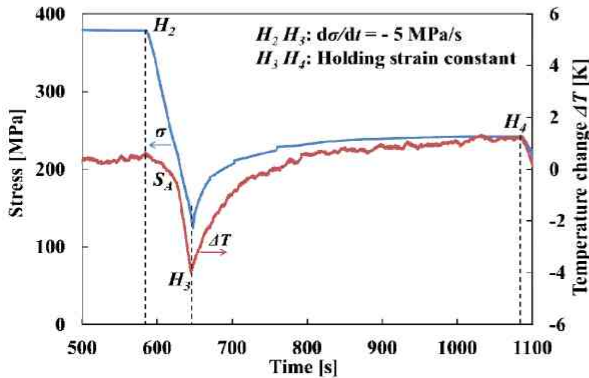


Fig. 9 Variation in stress σ and average temperature change ΔT on specimen surface with time during unloading under a stress rate of -5 MPa/s till a point H_3 ($\epsilon_3 = 2\%$) followed by holding strain constant from the point H_3 to a point H_4

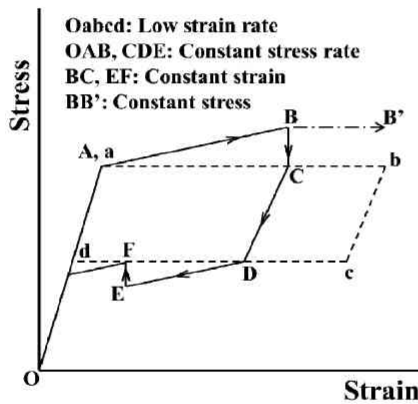


Fig. 10 Stress-strain diagrams under (1) the strain-controlled condition (broken line) and (2) the stress-controlled condition (solid line) in the subloop loading

4.1.4 応力制御サブループ負荷における変態誘起応力緩和および応力回復の進展条件

図 10 に (1) 低ひずみ速度の応力-ひずみ線図を破線で, (2) 一定応力速度で負荷した後あるひずみにおいてひずみを保持し, その後一定応力速度で除荷しあるひずみにおいてひずみを保持した場合に生じる応力緩和および応力回復の応力-ひずみ線図を実線でそれぞれ示す. 図 11 には応力制御のサブループ負荷において応力緩和および応力回復が生じる場合の応力-温度経路を応力-温度相図上に示す. 図 10 と図 11 における記号 A, B, C, D, E, F はそれぞれ対応している.

図 10 において, 低ひずみ速度の場合, M 変態および逆変態は一定の応力下で進展する ($a \rightarrow b, c \rightarrow d$). この場合にはひずみ速度が低く, 変態による熱が周囲に逃げる時間が十分にあるため試験片の温度変化が少なく, 一定応力下で両変態は進展する. 一方, 実験結果よりわかるように, 応力制御で負荷除荷した場合, 図 11 に示すように変態開始点 A (S_M) および点 D (S_A) においてひずみ速度が高くなるため, AB 間および DE 間において試験片の温度が変化し, その後ひずみを保持すると, 結果として変態誘起応力緩和 (点 BC 間) および応力回復 (点 EF 間) が生じる. 応力緩和および応力回復においては, ひずみを保持した場合に応力の変動が生じる. ひずみの変化 $\Delta \epsilon$ を弾性ひずみの変化 $\Delta \epsilon^e$ と変態ひずみの変化 $\Delta \epsilon^t$ からなると考えると, ひずみ保持の場合 $\Delta \epsilon = \Delta \epsilon^e + \Delta \epsilon^t = 0$ となる. 温度変化に基づいて変態ひずみの変化 $\Delta \epsilon^t$ が生じると, 弾性ひずみの変化は $\Delta \epsilon^e = -\Delta \epsilon^t$ となる. 弾性ひずみの変化 $\Delta \epsilon^e$ と応力の変化 $\Delta \sigma$ の間には $\Delta \epsilon^e = \Delta \sigma / E$ の関係式が成立する. ここで, E は弾性係数を表す. したがって, 応力の変化 $\Delta \sigma = -E \Delta \epsilon^t$ となる. このように, 一定ひずみ下で変態が進展することにより応力が変動する.

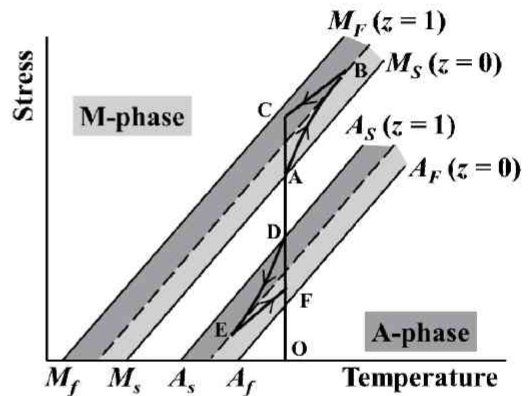


Fig. 11 Stress-temperature paths for stress relaxation and stress recovery in the stress-controlled subloop loading (BC, EF: constant strain) on stress-temperature phase diagram

図 10 の点 B において応力を保持すると変態誘起クリープ変形が生じる (点 B から点 B') . このクリープは M 変態が進展することにより生じる. クリープ変形については, 応力を保持することで温度低下に基づき M 変態が進展するために, ひずみが増加する (Takeda, et al., 2012a ; Takeda, et al., 2012b) .

4.2 応力緩和および応力回復に与える応力速度の影響

図 10 および 11 における可制御パラメータは応力速度, 保持ひずみ, 雰囲気温度およびひずみ保持時間である. 本論文では負荷時の保持ひずみ $\varepsilon_1 = 6\%$, 除荷時の保持ひずみ $\varepsilon_3 = 2\%$ および雰囲気温度は一定とし, ひずみ保持時間は応力が一定に飽和する時間とし, 異なる応力速度 $d\sigma/dt$ における応力緩和および応力回復特性について検討した. 得られた実験結果を図 12 に示す. 図 12 からわかるように, 負荷過程において, 応力速度 $d\sigma/dt$ が高いほど, 上部応力水平段における M 変態の温度上昇が大きく, 点 H_1 における応力は高い. これは, 図 2 で示したように, 変態応力は温度に比例して増加するためである. 一方, 点 H_2 における応力は応力速度に依存せずほぼ同じ値になる. この結果として, 点 H_1 から H_2 への応力緩和量は応力速度が高いほど大きくなる. 除荷過程においては, 応力速度 $d\sigma/dt$ が高いほど, 下部応力水平段における逆変態の温度降下が大きく, 点 H_3 における応力は低くなる. 一方, 点 H_4 における応力は応力速度に依存せずほぼ同じ値になる. この結果として, 点 H_3 から H_4 への応力回復量は応力速度が高いほど大きくなる. 保持ひずみ, 雰囲気温度, ひずみ保持時間および応力が異なる場合の応力緩和および応力回復特性については, 今後の研究課題である.

以上の実験結果から明らかになったように, 負荷除荷過程の温度変化に伴い, 一定ひずみ保持下で変態の進展に伴

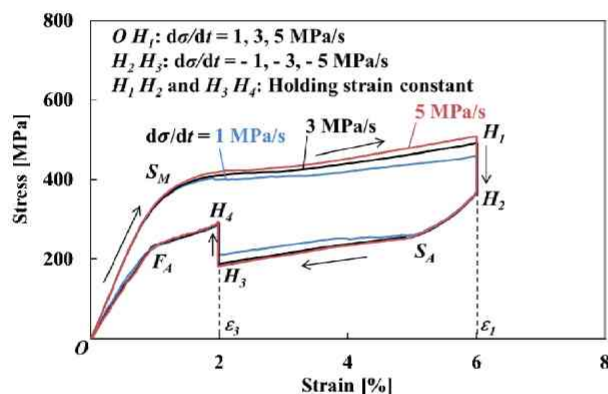


Fig. 12 Stress-strain curves obtained by the test under various stress rates $d\sigma/dt$ till a point H_1 followed by holding strain constant at $\varepsilon_1 = 6\%$ and thereafter unloaded till a point H_3 followed by holding strain constant at $\varepsilon_3 = 2\%$

い応力緩和および応力回復が現れる. したがって, SMA の応用においては, SMA 素子の雰囲気媒体の温度変化に伴う回復力の変化を利用することが多いけれども, 雰囲気媒体の温度が変化しなくてもひずみ速度が高くなる応力制御のサブロープ負荷では SMA の温度変化に伴い回復力は変化することに注意して SMA 素子を設計する必要がある.

5. 結言

TiNi SMA 薄帯材について単軸引張試験により超弾性変形の応力制御サブロープ負荷における変態誘起応力緩和および応力回復の特性を, マイクロスコープおよびサーモグラフィにより観察した試験片表面の変態帯と温度分布の変化に基づき検討した. また, 種々の応力速度に関する応力緩和および応力回復の特性を調べた. 得られた主要な結果は, 次の通りである.

1. 負荷過程において, 応力速度一定で負荷すると M 変態開始点以降においては, ひずみ速度が高くなり, M 変態の発熱反応による熱が周囲に逃げる時間がないため材料の温度は上昇し, その後ひずみを保持すると, 周囲空気により冷却されるため材料の温度は降下して M 変態が進展することにより, 応力緩和が生じる.
2. 除荷過程において, 応力速度一定で除荷すると, 負荷過程と同様に, 逆変態開始点以降において, 逆変態の吸熱反応により材料の温度は降下し, その後ひずみを保持すると, 周囲空気により加熱されるため材料の温度は上昇して逆変態が進展することにより, 応力回復が生じる.
3. 試験片表面の平均温度は, ひずみ保持の過程において, 初期に著しく変化し, その後徐々に初期の平均温度に戻る. この温度変化に対応し, 応力緩和および応力回復はひずみ保持過程の初期に大きく現われ, その後応力は徐々に一定値に飽和する.
4. 応力速度が高いほど負荷過程における応力緩和および除荷過程における応力回復は大きくなる
5. 応力制御のサブロープ負荷においてはひずみ速度が高くなり, SMA の雰囲気媒体の温度が一定であっても負荷除荷過程における変態に伴い SMA では温度変化が生じ, 一定ひずみ保持下で応力緩和および応力回復が現れるので, SMA 素子の設計においてはこれらの点を考慮することが重要である.

謝辞

本研究を行うに当たり実験に協力された愛知工業大学の学生諸君に感謝する。また、日本学術振興会の科学研究費補助金・基盤研究 (C) の補助を受けたことを記し謝意を表す。

References

- Funakubo, H., ed., *Shape Memory Alloys* (1987), pp. 1-60, Gordon and Breach Science Pub.
- Miyazaki, S., ed., *SMST-2007* (2008), pp. 1-520, ASM International.
- Otsuka, K. and Wayman, C.M., eds., *Shape Memory Materials* (1998), pp. 1-49, Cambridge University Press.
- Pieczyska, E.A., Tobushi, H., Nowacki, W.K., Gadaj, S.P. and Sakuragi, T., Subloop Deformation Behavior of NiTi Shape Memory Alloy Subjected to Stress-Controlled Loadings, *Materials Transactions*, Vol. 48, No. 10 (2007), pp. 2679-2686.
- Raniecki, B., LExcellent, C. and Tanaka, K., Thermodynamic Model of Pseudoelastic Behaviour of Shape Memory Alloys, *Archives of Mechanics*, Vol. 44, No. 3 (1992), pp. 261-284.
- Takeda, K., Tobushi, H. and Pieczyska, E.A., Transformation-Induced Creep and Creep Recovery of Shape Memory Alloy, *Materials*, Vol. 5 (2012a), pp. 909-921.
- Takeda, K., Tobushi, H., Miyamoto, K. and E.A. Pieczyska, Superelastic Deformation of TiNi Shape Memory Alloy Subjected to Various Subloop Loadings, *Materials Transactions*, Vol. 53, No. 1 (2012b), pp. 217-223.
- Tanaka, K., Kobayashi, S. and Sato, Y., Thermomechanics of Transformation Pseudoelasticity and Shape Memory Effect in Alloys, *International Journal of Plasticity*, Vol. 2 (1986), pp. 59-72.
- Tanaka, K., Nishimura, F. and Tobushi, H., Phenomenological Analysis on Subloops in Shape Memory Alloys Due to Incomplete Transformation, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 5 (1994), pp. 487-493.
- Tanaka, K., Nishimura, F., Hayashi, T., Tobushi, H. and LExcellent, C., Phenomenological Analysis on Subloop and Cyclic Behavior in Shape Memory Alloys under Mechanical and/or Thermal Loads, *Mechanics of Materials*, Vol. 19 (1995), pp. 281-292.
- Tobushi, H., Matsui, R., Takeda, K. and Pieczyska, E.A., *Mechanical Properties of Shape Memory Materials* (2013), pp. 1-267, Nova Science Pub.