

種々の負荷履歴に関する TiNi 形状記憶合金の超弾性変形 Superelastic Deformation of TiNi Shape Memory Alloy Subjected to Various Loadings

武田亘平[†], 戸伏壽昭^{††}
Kohei TAKEDA[†], Hisaaki TOBUSHI^{††}

Abstract The various subloop behaviors for the superelastic deformation of TiNi shape memory alloy were investigated based on the local temperature variation and the surface observation in the tension test. The results obtained are summarized as bellows. (1) The upper and lower stress plateaus during loading and unloading appear accompanying the progress and reduction of the martensitic transformation (MT) band, respectively. In the case of unloading from the upper stress plateau under low stress rate, strain increases due to the progress of the MT band in the initial stage of unloading. (2) If stress is held constant in the upper stress plateau, creep deformation appears. The creep deformation appears based on the progress of the MT band. The volume fraction of the martensitic phase increases in proportion to an increase in strain. (3) If the transformation strain varies in the stress plateau during loading and unloading, the return point memory appears in the reloading stress-strain curve. The progress and reduction of the MT band start from the boundary of the MT band which has appeared in the preceding process. (4) The angle of boundary of the MT band inclined to the tensile axis is 33° for an aspect ratio of 5 and 42° in the central part of the specimen and 37° in the vicinity of the gripping part for an aspect ratio of 10.

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¹⁻³⁾。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⁴⁾⁵⁾。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) について行われている。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、温度や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、温度と応力の履歴に依存して変化する⁶⁻⁸⁾。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り、アクチュエータやロボットなどの駆動力として規格通りに有効に利用できなくなる可能性がある。また、M 変態は負荷除荷の速度に依存し、ひずみの変動は複雑であり、一定応力下でもひずみが変動するクリープ変形挙動が生じるので、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-ひずみ関係を理解

[†] 愛知工業大学 大学院 (豊田市)

^{††} 愛知工業大学 工学部 機械学科 (豊田市)

する必要がある。したがって、SMA のサブグループについての変形挙動を理解することは、サブグ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。

本研究においては、SMA の中で最も多く実用されている TiNi SMA について、薄板材の単軸引張試験により超弾性変形の種々のサブグループ挙動を検討する。SMA 素子の実用上重要な (1) 負荷・除荷のサブグループ負荷を受ける変形の負荷速度依存性、(2) M 変態域において一定応力下で生じる変態誘起クリープ変形の特性および (3) M 変態域でひずみ変動する場合のサブグループ超弾性変形の特性を調べる。実験ではマイクロスコブおよびサーモグラフィにより変形中の試験片表面の M 変態帯と温度分布の変化を観察し、M 変態に伴う局所変形に基づいてサブグループ変形挙動を考察する。

2. 実験方法

2.1 供試材および試験材

供試材は古河テクノマテリアル (株) 製の Ti-50.95at%Ni SMA で常温で超弾性を示す板材を用いた。材料の厚さは 0.7 mm、幅は 10 mm であった。示差走査熱量測定 (differential scanning calorimetry, DSC) で求めた材料の A_f 点は 281 K であった。試験片は一樣形状の板材であった。標点距離は試験片のつかみ部間の長さで 50 mm および 100 mm の 2 種類であり、標点間のアスペクト比 (縦横比) はそれぞれ 5 と 10 であった。

変態帯を観察する試験片表面にはエメリー紙の 4000 番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蠟燭の煤を一樣に薄く付着させた。

2.2 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、デジタルカメラ (三洋 (株) 製 DMX-HD2) および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 NEO Thermo TVS-700) により観察した。

2.3 実験手順

次の 3 種類のサブグループ負荷に関して単軸引張試験を室

温の大気中で行った。実験中、試験片表面の変態帯と温度分布を観察した。

(1) 応力-ひずみ曲線における上部応力水平段のひずみ 8% までの負荷に関して、ひずみ速度一定および応力速度一定の下で負荷除荷試験を行い、負荷速度が異なる場合のサブグループ変形挙動を調べた。

(2) 応力速度一定で上部応力水平段のひずみ 2% まで負荷し、その後応力を一定に保持する試験を行い、クリープ変形挙動を調べた。

(3) ひずみ速度一定で上部・下部の応力水平段においてひずみが繰返し変動する試験を行い、サブグループ変形挙動を調べた。

3. 実験結果および考察

実験および実験結果の整理において、応力とひずみはそれぞれ公称応力と公称ひずみで定めた。したがって、ひずみ速度と応力速度はそれぞれ変位速度と荷重速度に対応する。

3.1 サブグループ超弾性変形の負荷速度依存性

3.1.1 一定ひずみ速度下での変形

一定のひずみ速度 $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ および $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ の引張試験で得られた応力-ひずみ曲線を図 1 に示す。図 1 からわかるように、負荷除荷で応力-ひずみ曲線はヒステリシスループを描き、除荷過程においてひずみの回復する超弾性特性を示す。低ひずみ速度の場合、負荷および除荷過程においてそれぞれ応力誘起 M 変態と逆変態による上部と下部の応力水平段が現れる。高ひずみ速度の場合、降伏域での曲線の傾きが大きく、M 変態および逆変態の開始と終了の点が明瞭でなくなる。ひずみ速度が高い場合、負荷過程においては M 変態により温度が高くなり、M 変態の進展に必要な上部水平段の応力より高い応力が必要になる⁹⁾。一方、ひずみ速度が高い場合の除荷過程においては、逆変態の進展には下部水平段の一定の応力からの減少が必要である。これらのために、負荷過程においても除荷過程においてもひずみ速度が高い場合には降伏域における曲線の傾きは大きくなる。降伏域における応力-ひずみ曲線の傾きのひずみ速度依存性は、ひずみ速度が $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ より高い場合にも成立する⁹⁻¹²⁾。

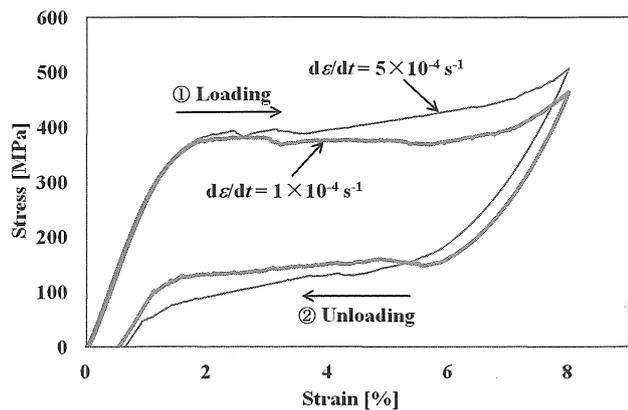


Fig. 1 Stress-strain curves under $d\varepsilon/dt = 1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ and $d\varepsilon/dt = 5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$

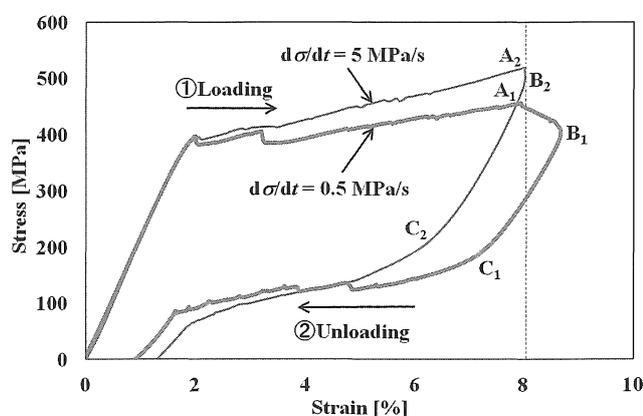


Fig. 2 Stress-strain curves under $d\sigma/dt = 0.5 \text{ MPa/s}$ and $d\sigma/dt = 5 \text{ MPa/s}$

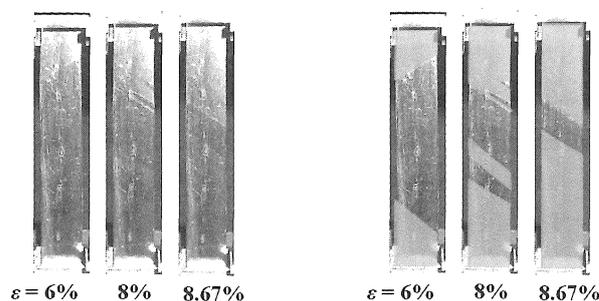
3.1.2 一定応力速度下での変形

一定の応力速度 0.5 MPa/s および 5 MPa/s の引張試験で得られた応力-ひずみ曲線を図 2 に示す。図 2 からわかるように、負荷除荷で応力-ひずみ曲線はヒステリシスループを描き、超弾性特性を示す。降伏域での曲線の傾きは、応力速

度が高い方が大きい。低応力速度でひずみ 8% の点 A₁ から除荷した場合、除荷過程の初期においてひずみは点 B₁ の 8.67% まで増加し、その後点 B₁ から逆変態開始点 C₁ まで弾性変形によりひずみは減少する。除荷過程の初期においてひずみが点 A₁ から点 B₁ まで増加する現象は、点 A₁ までの負荷過程において M 変態により温度が上昇し、除荷において温度が減少するために、M 変態が進展する条件が満たされ、ひずみが増加することにより現れる⁶⁾⁸⁾。応力速度が高い場合、点 A₂ からの除荷において応力の減少速度が高いために、M 変態によるひずみの増加は小さく、M 変態ひずみの増加分と弾性ひずみの減少分とがほぼ等しくなる。この結果、点 B₂ までほぼ一定のひずみで応力が減少し、その後は点 C₂ まで弾性的にひずみが減少する。

3.1.3 変態帯の進展挙動

応力速度 0.5 MPa/s の引張試験で得られたデジタルカメラによる試験片表面の写真を図 3 と図 4 に示す。図 3 (a) は撮影した生の写真であり、図 3 (b) と図 4 では M 変態で生じた帯 (MT band) を緑色で示した。図 3 と図 4 に示す変態領域に関して、変態帯の進展状態は実際に肉眼で直



(a) MT band without tinting (b) MT band with green tinting

Fig. 3 Photographs of surface on the specimen at several strains ε without tinting and with green tinting

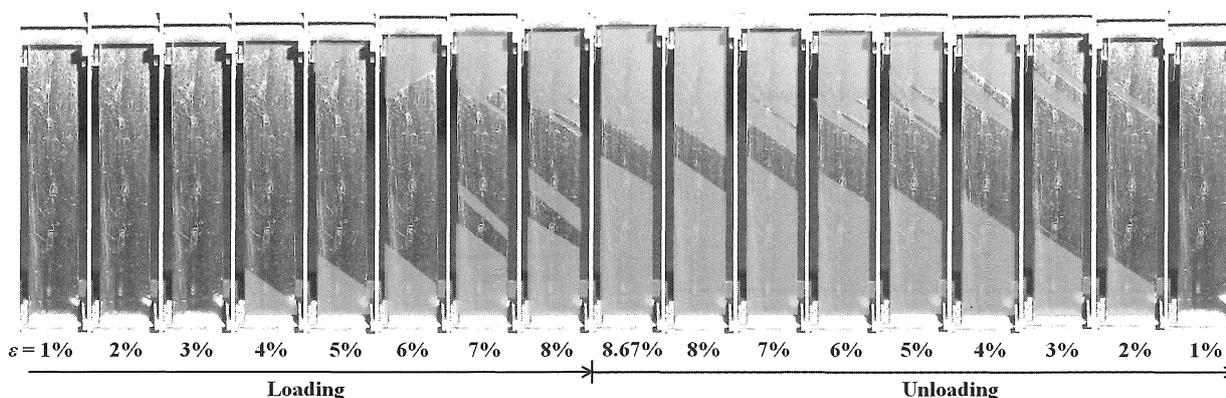


Fig. 4 Photographs of surface on the specimen at various strains ε under stress rate of 0.5 MPa/s

接観察すると試験片の表面全体で明瞭に見えるが, 図3 (a) に示すようにモノクロで印刷した写真では試験片表面全体での変態帯は明瞭には見え難くなる. このため, 図3 (b) に示すように M 相の変態領域を緑色で示した. 図3 (a) と図3 (b) の比較からわかるように, 変態領域を着色することによりモノクロの印刷でも変態領域が明瞭に見えるようになる. 図4からわかるように, リューダース帯と類似な M 変態による変態帯が一定の傾き角で両端から発生し, 中央に向かって進展する. ひずみ 8 % から除荷した場合, 除荷過程の初期においてひずみ 8.67 % まで変態帯は進展する. 除荷過程では中央部の変態帯の境界から両端に向かって変態帯は縮小する. 負荷過程と除荷過程の同じひずみで変態帯の大きさを比較すると, 変態領域は除荷時の方が広い.

3.2 変態誘起クリープ変形

3.2.1 ひずみの挙動

0.5 MPa/s の応力速度で応力水平段のひずみ 2 % まで負荷した後に応力を一定に保持するように制御する単軸引張試験で得られた応力-ひずみ曲線を図5に示す. また, ひずみと時間との関係を図6に示す. 図5からわかるように, 一定応力速度の負荷においてひずみ 1.3 % (点 A) で応力誘起 M 変態が開始する. ひずみ 2 % (点 B) で応力を一定に保つ様に制御すると, 応力は少し変動し, ひずみ 3.5 % (点 C) 以降は 438 MPa で一定になり, ひずみは約 8 % (点 D) まで増加する. 応力一定下でひずみの生じる現象は, 通常のクリープ変形と類似している. この場合, ひずみ 2 % までの負荷において応力誘起 M 変態により温度が上昇し, その後は一定応力下で温度が降下する. このため, M 変態の

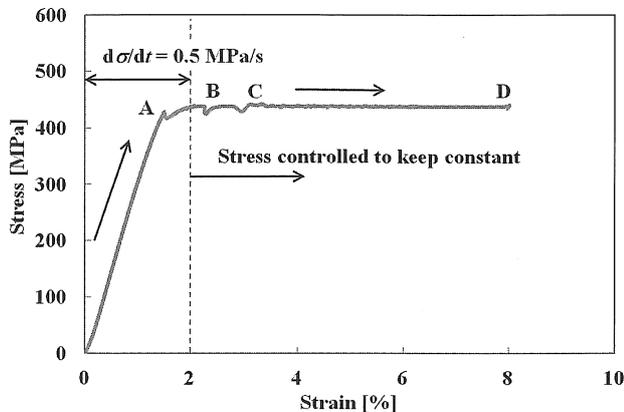


Fig. 5 Stress-strain curve under stress rate of $d\sigma/dt = 0.5$ MPa/s till strain of 2 % followed by constant stress

進展条件が満たされ, ひずみが増加する⁶⁾. 図5と図6からわかるように, ひずみ 1.3 % で M 変態が開始すると, ひずみの増加割合が大きくなる. また, ひずみが 2 % から 3.5 % までの間に応力は少し変動し, ひずみは急速に増加する. ひずみ 3.5 % 以降では応力が一定になり, ひずみはほぼ一定の速度 $6.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ で増加する. ひずみは約 8 % まで増加し, その後は一定になる.

3.2.2 ひずみの進展特性

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図7に, デジタルカメラによる試験片表面の変態帯を示す写真を図8に示す.

図7のサーモグラフィによる温度分布からわかるように, ひずみ 2 % までの負荷により試験片両端から発熱反応の M 変態帯が発生する. その後, ひずみ 2 % からは応力を一定に保つ様に制御すると M 変態帯は中央に向かって進展し, 両端からの M 変態帯がひずみ 7.945 % で合体して M 変態は完了する. 応力保持過程でのひずみ 3 % で M 変態によ

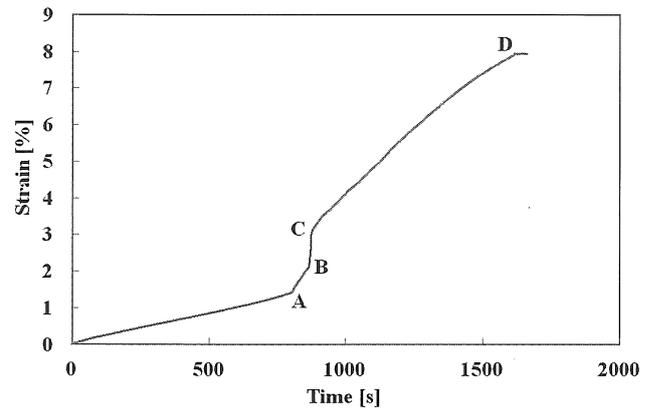


Fig. 6 Change in strain with lapse of time in creep test

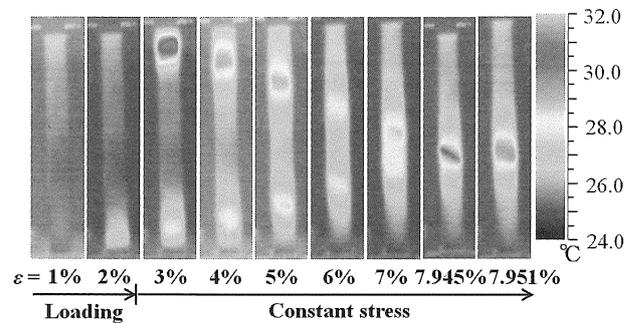


Fig. 7 Thermograms of temperature distribution of surface on the specimen under $d\sigma/dt = 0.5$ MPa/s till strain ϵ of 2 % followed by constant stress

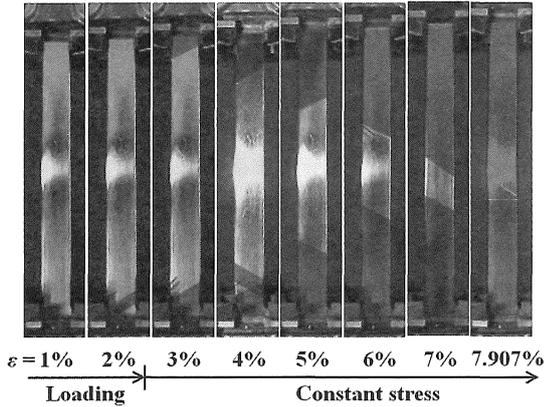


Fig. 8 Photographs of surface of the specimen at various strains ε under stress rate of $d\sigma/dt = 0.5$ MPa/s till strain of 2% followed by constant stress

り発熱している部分はひずみ 4%では周囲空気により温度降下している。この温度降下により M 変態は進展し、新たに M 相に変態した場所からまた変態熱を発生する。ひずみ 4%以降もこの温度降下により連鎖的に M 変態域が伝播するために、クリープ変形が現れる。

図 8 に示す試験片表面の写真においては、図 4 と同様に変態帯の進展状況を分かり易くするために、M 相領域を紺色で示した。図からわかるように、両端で発生した M 変態帯は、一定応力保持下において中央部に向かって進展する。ひずみ約 8%で全面が M 相になり、ひずみの増加は止まる。図 5 からわかるように、両端から進展する M 変態帯が合体し、ひずみの進展が止まる (点 D) と応力は 5 MPa 減少する。図 8 の写真で示した試験片表面のすべての変態帯は、試験片の裏側表面の同じ位置にも現れる。したがって、変態帯は薄い試験片の表面だけでなく、横断面内の全体に生じていると考えられる。このため、変態帯の表面における面積割合は M 相の体積割合に等しくなる。このように、M 相の体積分率を表面の変態帯の面積割合から求めた。M 相の体積分率とひずみとの関係を図 9 に示す。図 9 からわかるように、M 相の体積分率はひずみの増加に比例して増加する。

3.3 ひずみ変動する場合のサブループ超弾性変形

3.3.1 応力-ひずみ関係

一定のひずみ速度 $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ の下で最初にひずみ 5%を与え、その後ひずみを 3.5%まで減少させ、引続きひずみ 6%まで再負荷を行った。これらの負荷・除荷に続き、下部および上部の応力水平段において除荷ひずみおよび再

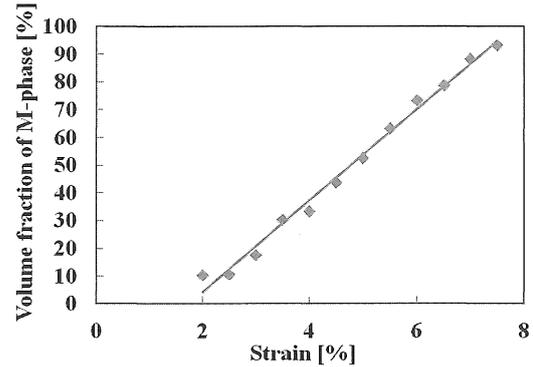


Fig. 9 Relationship between volume fraction of M-phase and strain during creep deformation

負荷ひずみがそれぞれ 1%ずつ変化する繰返し引張試験を行った。この引張試験により得られた応力-ひずみ曲線を図 10 に示す。図 10 からわかるように、全体的には除荷過程における逆変態は約 120 MPa の下部応力水平段で進展し、再負荷過程における M 変態は約 350 MPa の上部応力水平段で進展する。詳細には、再負荷における応力水平段の応力レベルは繰返し回数の増加と共に低下する。また、最初のサイクルを除けば再負荷曲線は除荷開始点 A_2 および A_3 を通り、回帰記憶が現れる。

3.3.2 変態帯の進展挙動

除荷と再負荷を繰返した場合の試験片表面の M 変態帯を動き解析マイクروسコープで撮影した写真を第 1 サイクルと第 3 サイクルに関してそれぞれ図 11 および図 12 に示す。図 11 および図 12 に示す試験片表面の写真においては、図 8 と同様に変態帯の進展状況を分かり易くするために、M 相領域を紺色で示した。図 11 からわかるように、第 1 サイクルでは M 相領域は除荷過程で縮小し、再負荷過程で進展するが、それらの変化は小さい。これは、第 1 サイクルにおけるひずみの変化は 1.5%であり、除荷過程および再負荷過程の初期のひずみの変化 1%は弾性変形によるものであり、M 変態および逆変態による変形の進展が少ないからである。一方、第 1 サイクルに比べてひずみの変化の大きい第 3 サイクルを示した図 12 からわかるように、M 相領域は除荷過程において逆変態の進展により大きく縮小し、再負荷過程で大きく拡大する。また、M 相領域の拡大と縮小は、先行する過程で最終的に生じている M 変態帯の境界が起点となり、この境界から進展する。フルループの超弾性変形の場合、負荷と除荷での応力水平段の開始点 S_M と S_A ではそれぞれオーバーシュートとアンダーシュートが現れる⁸⁾。フルループの

場合には、各変態の開始点ではそれぞれ M 相と母相の核を新たに形成するためにオーバーシュートとアンダーシュートが現れる。これに対し、サブループの場合には、M 相と母相が先行する過程で生じているために、新たに生成相の核を形成する必要がない。この結果、負荷と除荷でそれぞれオーバーシュートとアンダーシュートは現れず、M 変態帯の境界から M 相と母相の領域は進展する。また、M 変態と逆変態の進展の違いに基づき、同じひずみにおける M 変態領域は負荷過程に比べて除荷過程の方が広い。

3.4 変態帯の挙動

図 4, 図 8, 図 11 および図 12 で観察されたように、変態帯の境界は軸方向に対して左右にある一定の傾き角 θ で進展する。この変態帯境界の傾き角 θ を、M 変態域と母相との境界面の法線方向が引張軸方向となす角として表す。こ

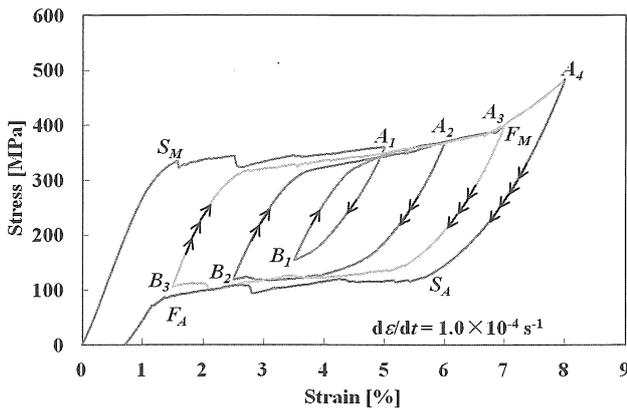


Fig. 10 Stress-strain curves obtained by cyclic loading test with strain variation under $d\varepsilon/dt = 1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$

れまでの研究で報告されている θ は次の通りである。TiNi SMA の平板の引張りにおいて現れる変態帯の左または右に傾く角 θ はアスペクト比が 1.25 の場合には 35° であり¹³⁾、アスペクト比が 13 の場合には 42° である⁹⁾。TiNi SMA 円管の引張りにおいては円管の表面に螺旋形の変態帯が現れ、変態帯の傾き角 θ は 35° である¹⁴⁾。この傾き角 θ を詳細に検討するために、標点間のアスペクト比が 5 と 10 の試験片について上部つかみ部からの位置 x における変態帯境界の傾き角 θ の測定値結果をそれぞれ図 13 (a) と (b) に示す。この傾き角 θ はそれぞれ応力速度 0.5 MPa/s とひずみ速度 $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ の場合について求めた。

図 13 (a) からわかるように、アスペクト比が 5 の場合、傾き角は上部のつかみ部近傍を除けば 33° である。図 13 (b) からわかるように、アスペクト比が 10 の場合には、傾き角 θ は試験片の中央部付近では 42° であり、つかみ部

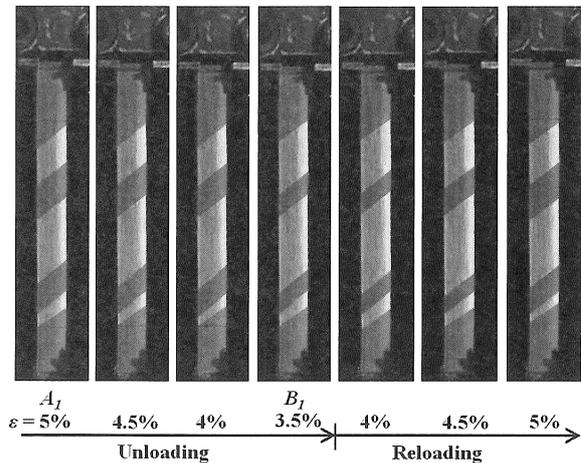


Fig. 11 Photographs of surface on the specimen at various strains ε in 1st cycle of cyclic loading test under $d\varepsilon/dt = 1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$

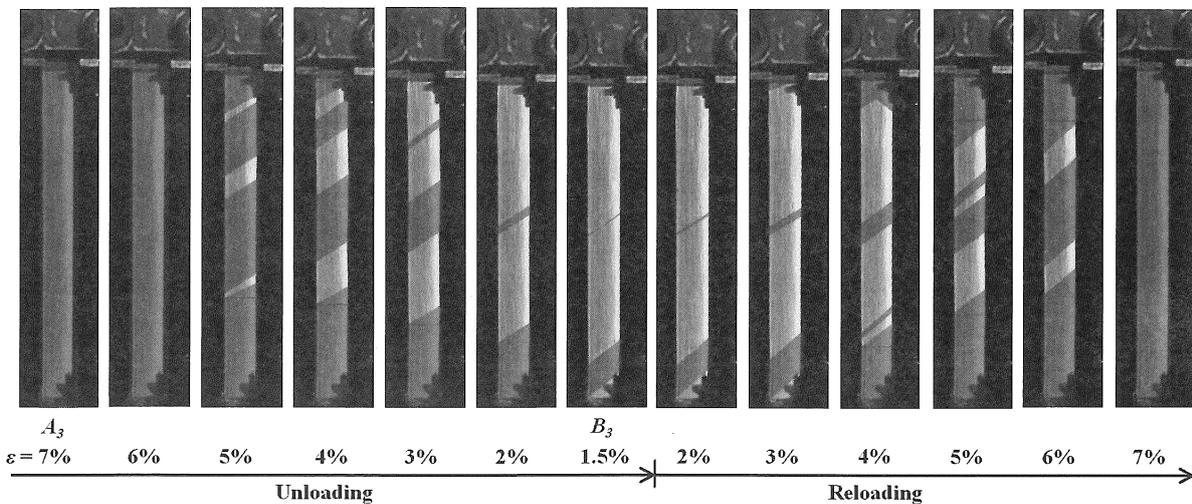


Fig. 12 Photographs of surface on the specimen at various strains ε in 3rd cycle of cyclic loading test under $d\varepsilon/dt = 1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$

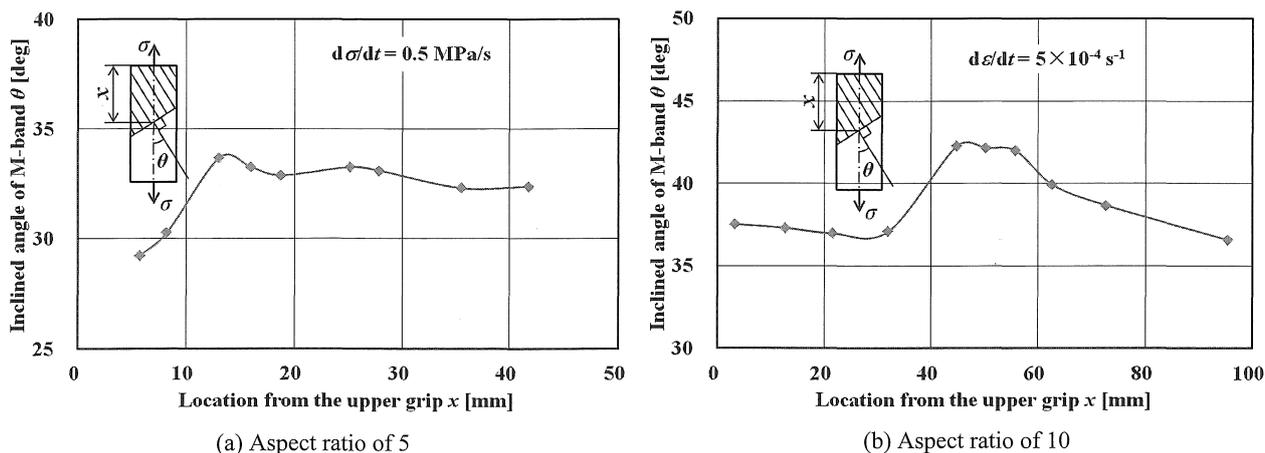


Fig. 13 Angle θ of the boundary of the M-band inclined to tensile axis in the location x from the upper grip

付近では 37° である。アスペクト比が 10 の場合、中央部付近では単軸引張り状態になり、 θ は最大せん断応力の方向 45° に近い値 42° になる。一方、試験片のつかみ部はつかみ具により圧縮されており、つかみ部付近では軸方向の伸びに対して横方向の縮みが拘束されるために、せん断応力が作用する。このために、最大せん断応力の方向は 45° より小さくなる。この結果、アスペクト比が小さい場合およびアスペクト比が大きい場合に両端のつかみ部付近では変態帯の傾き角 θ は $33^\circ - 37^\circ$ になる。変態帯の傾き角のアスペクト比、負荷速度、負荷除荷過程および試験片締付力などへの依存性の詳細については今後の研究課題である。

図 4、図 11 および図 12 で観察されたように、変態帯は上下のつかみ部に続き中央部でも発生し、進展する。進展の初期において変態帯の境界は左または右の両方向に傾いているが、M 変態の終了直前には上下の変態帯の境界は同じ方向に傾き、両方向の変態帯が合体して M 変態は終了する。

4. 結言

TiNi SMA 薄板材の引張試験により超弾性変形の種々のサブグループ特性をサーモグラフィによる局所的な温度変化とマイクロスコブによる M 変態帯の表面観察に基づいて調べた。得られた主要な結果は、次の通りである。

(1) 負荷・除荷における応力-ひずみ曲線の上部・下部の応力水平段は M 変態帯の進展と縮小に伴って現れる。応力速度が低い場合、上部応力水平段からの除荷の初期においては M 変態帯の進展によりひずみが増加する。

(2) 応力速度一定でひずみ 2% まで負荷し、上部応力水平

段においてこの時の応力を一定に保持するとクリープひずみが生じる。このクリープひずみは M 変態帯の進展により現れる。一定応力下で生じるクリープひずみ速度はほぼ一定である。この場合の M 相の体積分率はひずみの増加に比例して増加する。

(3) 応力水平段からの負荷・除荷でひずみ変動する場合、再負荷の応力-ひずみ曲線で回帰記憶が現れる。M 変態帯の拡大と縮小は、先行する過程において現れている変態帯の境界が起点となって進展する。

(4) 変態帯境界の引張軸との傾き角は標点間のアスペクト比が 5 の場合には 33° であり、アスペクト比が 10 の場合には試験片中心部では 42° であり、つかみ部近傍では 37° である。変態の初期において変態帯の境界は左または右の両方向の傾きで進展するが、変態終了直前には同じ方向の傾きとなり、両方の変態帯の合体により M 変態は終了する。

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、本研究は日本学術振興会とポーランド科学アカデミーによる 2 国間共同研究、日本学術振興会の科学研究費補助金・基盤研究 (C) および内藤科学技術振興財団の研究助成金の補助を受けたことを記し謝意を表す。

文献

- 1) Funakubo, H., ed., *Shape Memory Alloys*, Gordon and Breach Science Pub. (1987), pp. 1-60.
- 2) Otsuka, K. and Wayman, C. M., eds., *Shape Memory Materials*, Cambridge University Press (1998), pp. 1-49.
- 3) Miyazaki, S., ed., *SMST-2007*, ASM International (2008), pp. 1-520.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) Pieczyska, E. A., Tobushi, H., Gadaj, S. P. and Nowacki, W. K., "Superelastic Deformation Behavior Based on Phase Transformation Bands in TiNi Shape Memory Alloy", *Materials Transactions*, Vol. 47, No. 3 (2006), pp. 670-676.
- 10) He, Y. J., Yin, H., Zhou, R. H. and Sun, Q. P., "Ambient Effect on Damping Peak of NiTi Shape Memory Alloy", *Materials Letters*, Vol. 64 (2010), pp. 1483-1486.
- 11) Shaw, J. A. and Kyriakides, S., "Thermomechanical Aspects of NiTi", *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 43, No. 8 (1995), pp. 1243-1281.
- 12) He, Y. J. and Sun, Q. P., "Rate-Dependent Domain Spacing in a Stretched NiTi Strip", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 47, Issue 20 (2010), pp. 2775-2783.
- 13) 村澤 剛, 光真坊 誠, 米山 総, 佐久間 俊雄, 隆 雅久, "形状記憶合金に生じる不均一変形挙動の計測", *材料*, Vol. 53, No. 9 (2004), pp. 999-1005.
- 14) He, Y. J. and Sun, Q. P., "Scaling Relationship on Macroscopic Helical Domains in NiTi Tubes", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 46 (2009), pp. 4242-4251.