NiTi 形状記憶合金平板の不均一変形挙動に及ぼす繰返し負荷の影響

村澤 剛¹ 米山 聡² 佐久間俊雄³ 隆 雅久⁴

¹山形大学工学部機械システム工学科

²大阪府立大学大学院工学研究科機械系専攻

³電力中央研究所金属材料部

⁴青山学院大学理工学部機械創造工学科

J. Japan Inst. Metals, Vol. 69, No. 8 (2005), pp. 596-603
Special Issue on Smart Materials
© 2005 The Japan Institute of Metals

Influence of Cyclic Loading on Inhomogeneous Deformation Behavior Arising in NiTi Shape Memory Alloy Plate

Go Murasawa¹, Satoru Yoneyama², Toshio Sakuma³ and Masahisa Takashi⁴

¹Department of Mechanical Engineering, Yamagata University, Yonezawa 992-8510

²Department of Mechanical Engineering, Osaka Prefecture University, Sakai 599-8531

³Materials Science Department, Komae Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry, Komae 201-8511

⁴Department of Mechanical Engineering, Aoyama Gakuin University, Fuchinobe 229-8558

Many problems have existed in usage of shape memory alloy (SMA) such as the appearance of unexpected deformation behavior under complicated thermo-mechanical loadings. Inhomogeneous deformation behavior of SMA is one of the causes in those problems. The aim of the present paper is the investigation of inhomogeneous deformation behavior arising in SMA during cyclic loading. Firstly, a test system measuring inhomogeneous deformation behavior was constructed on the basis of Digital Image Correlation (DIC). Secondary, measurements of inhomogeneous deformation behavior (local strain distribution) arising in 50.5Ni49.5Ti plates were conducted during cyclic tensile loading-unloading at the temperature region of pseudoelasticity. It was seen that inhomogeneous deformation behavior sensitively changed according to state of loading (i.e., number of cycle, history of loading and so on). Also, macroscopic deformation behavior was strongly affected by inhomogeneous deformation behavior. It is very important for application of SMA to investigate the relationship between macroscopic deformation behavior and inhomogeneous deformation behavior.

(Received February 22, 2005; Accepted May 2, 2005)

Keywords: NiTi shape memory alloy, pseudoelasticity, inhomogeneous deformation behavior, local strain, cyclic loading, digital image correlation

1. 緒 言

形状記憶合金 (SMA) は、1963 年に米国の Naval Ordnance Laboratory の Buehler グループによって艦船用構造材料の研究開発中に偶然発見され、以来、数多くの材料創製、評価、応用の研究がなされてきている¹⁻¹⁶⁾。材料創製では、NiTi 合金をはじめ Cu 系、Fe 系等の SMA が冶金学的に開発されてきているが、現時点では NiTi 合金がその使用の大半を占めている。また、その作製法に関しても多くの研究がなされてきている^{1,2)}。材料評価に関しては、SMA の特徴である、1) 形状記憶効果、2) 超弾性、3) 回復応力といった性質に関して、理論的実験的側面から研究が行われている³⁻⁹⁾。また、そのアプローチも巨視的な視点から微視的な視点まで多岐に渡る。応用に関しては、パイプ継ぎ手、眼鏡のフレーム、釣り糸と様々であり、近年では、その応用を、

欧米ではマイクロアクチュエータを中心とした MEMS 関連¹⁰⁾に、日本国内では生体材料をはじめとする医療機器関連に重点を置く傾向にある。

SMA には、鋼のリューダース帯の伝ばや Al 合金の PLC 効果と同様な不均一変形が生じる¹¹⁻¹⁶⁾。Al 合金等の不均一変形はその不均一変形部の変形が微少であり、不均一変形挙動が構造体の巨視的な変形挙動に及ぼす影響は小さいが、SMA の不均一変形部の変形は大きく、不均一変形挙動が巨視的な変形挙動に及ぼす影響も顕著である。したがって、この不均一変形挙動を調査していくことは SMA の応用を考えていく上で非常に重要な課題となるものと思われる。

本研究では、SMA に生じる不均一変形と巨視的な変形との関係を調べることを試みる。そこで、NiTi 平板に繰返し単軸引張負荷・除荷を与え、この時に NiTi 平板に生じる不均一変形と巨視的な変形を計測した。SMA は繰返し負荷によりその巨視的な変形挙動が大きく変化していくことが知られてい

る⁹⁾。したがって、繰返し負荷が SMA に生じる不均一変形挙動にも何らかの影響を与えるものと考えられる。

実験の結果、以下のことがわかった。(1) NiTi 平板の巨視的応力-ひずみ関係は、繰返し数とともにその変形挙動が大きく変化し、20 回程度の繰返し負荷で定常な応力-ひずみ線図となった。(2) 引張負荷中の SMA の不均一変形挙動は以下の 3 過程に分類することができた。(a) 相変態の発生、(b) 発生から伝ば開始までの過程、(c) 相変態の伝ば。また、この相変態は負荷方向に対してある一定の角度を持ち伝ばしていた。(3) 繰返し数とともに伝ば中の局部ひずみの最大値は減少し、局部ひずみ(相変態)の帯領域が広がっていることがわかった。また、引張過程では、繰返し数が増加するとともに相変態伝ば開始点が早まり、若干ではあるが伝ば速度が増加していることがわかった。除荷過程では、20 回目のみが異なる逆変態伝ば開始点、逆変態伝ば速度を示した。また、発生から伝ば開始までの過程は繰返し数とともに小さくなった。

SMA の不均一変形挙動を明らかにすることにより、これまで困難とされてきた複雑な機械的熱的負荷下での変形挙動の解明、その複雑変形挙動を記述できる新しい構成方程式の開発および数値解析手法の確立を行うことが可能となるものと考えられる。

2. 材料と方法

2.1 供試材料

試験材料として、Fig. 1 に示すような平板状の NiTi 合金 (Ni : Ti = 50.5 : 49.5[at. %]) を用いた。引張負荷・除荷試験では Fig. 1(a) の試験片を、繰返し負荷試験では Fig. 1(b) の試験片を用いた。NiTi 平板には加工後、形状記憶処理を 400°C、30 min で施し、平板形状を記憶させた。このとき、オーステナイト変態完了温度は約 50°C であった。また、試験片表面には黒と白のスプレーを用いてランダムパターンを作成した。

2.2 局部ひずみ分布の計測方法

デジタル画像相関法(DIC)を基礎とした不均一変形挙動計測システムを構築した。DIC^{17,18)} は、対象を変形前に撮影した変形前画像(基準画像)と変形後に撮影した変形後画像の 2 枚の画像を用いて画像処理により画像内全域における変位分布を算出することができる変位測定法である。不均一変形挙動計測システムは大別して、(A)画像取得、(B)デジタル画像相関(変位算出)、(C)局部ひずみ算出からなる。本研究では、不均一変形挙動を局部ひずみ分布によって評価する。Fig. 2 に局部ひずみ算出までの一連の流れを示す。図にはそれぞれのシステムで用いた機器も併せて示してある。まず最初に、変形中の材料の画像を等時間間隔で取得していく(A)。次に、得られた画像から区間ごとに 2 枚の画像を選択し、DIC を用いて画像全面における変位分布を算出する(B)。最後に、得られた変位分布から試験片表面全域の局部ひずみ分布が Fig. 3 に示すように以下の手順で算出される(C)。(1)試験片表面のある直線上(例えば、A-A' line)の変位分布(Fig. 3(a))の近似関数を構築する。近似関数は算出したい局部ひ

Fig. 1 Schematic illustrations of NiTi plate and loading direction.

ずみの前後 2 点(合計 5 点)から構築される(Fig. 3(b))。 (2) 構築された近似関数から局部ひずみ(ϵ_0 点)を算出する。また、A-A' 線上の全ての点に対して近似関数をそれぞれ構築し、全点の局部ひずみを算出する(Fig. 3(c))。 (3) 同様の局部ひずみ算出を A-A' 線以外でも行うことによって、試験片表面全域の局部ひずみ分布が得られる(Fig. 3(e))。このシステムは LabVIEW (National Instruments Co.) を用いて構築された。このシステムを用いることによって簡易に材料に生じる不均一変形挙動を計測することができる。

2.3 実験方法

まず最初に、超弾性を示す温度域 (60°C) において、応力誘起マルテンサイト変態完了までの引張負荷・除荷試験を行った。この試験では、安定した変形挙動を得るために、試験片には負荷前に熱的機械的トレーニングをあらかじめ与えた。次に、同様の温度域において繰返し単軸引張・除荷試験を行った。この試験では、引張負荷を応力誘起マルテンサイト変態途中まで行った。また、繰返し数は変形挙動がほぼ安定する 20 回まで行った。このとき、ひずみ速度は 0.5%/min、負荷中の画像を 40 s おきに撮影した。

Fig. 2 Calculation of distribution of displacement and local strain by using DIC.

Fig. 3 Method of calculating distribution of local strain from distribution of displacement.

3. 結 果

3.1 NiTi 平板に生じる巨視的応力-ひずみ関係と不均一変形挙動

Fig. 4(A)は超弾性の温度領域において NiTi 平板に引張負荷・除荷を与えた時の応力-ひずみ関係である。図から、NiTi 平板は引張負荷中にオーステナイト相の弾性変形、応力誘起マルテンサイト変態による変形を示し、除荷中に応力誘起マルテンサイト相の弾性変形、オーステナイト変態による変形、オーステナイト相の弾性変形を示した。

次に、応力誘起マルテンサイト変態とオーステナイト変態中の相変態伝ば挙動を不均一変形挙動計測システムを用いて計測した。Fig. 4(A)の応力-ひずみ線図中の 0-30, 0'-20'の各区間で画像を撮影した。このそれぞれの区間内での局部ひずみ増分分布から NiTi 平板に生じる不均一変形挙動を評価していく。図中の矢印①, ②は相変態伝ば開始点である。また、DIC に用いられる試験片画像と負荷方向を Fig. 1(a)に示す。局部ひずみは Fig. 1 中の白枠内において計測された。

Fig. 4(B) (C)は引張負荷・除荷過程中的の局部ひずみ分布を示したものである。図における縦、横軸はそれぞれ y, x 方向位置をあらわしている。また、局部ひずみ分布結果の右

Fig. 4 Stress-strain curve and distribution of local strain on the surface of NiTi plate during tensile loading-unloading at temperature region of pseudoelasticity. (A) Stress-strain curve. (B) Distribution of local strain on the surface of NiTi plate specimen during tensile loading. (C) Distribution of local strain on the surface of NiTi plate specimen during unloading.

側に局部ひずみレベルを示した。これらの図からわかるように、NiTi 平板は引張負荷過程の弾性域において試験片全面で様な変形を示し (Fig. 4B(a))、応力誘起マルテンサイト変態域において局部ひずみ (相変態) の発生と伝ばを示した。そして、相変態は試験片の両端から中央に向けて伝ばしていた。また、この相変態は負荷方向に対してある一定の角度を持ち伝ばしていた (Fig. 4B(b)(c))。さらに、応力誘起マルテンサイト変態完了後には再度様な変形を示した (Fig. 4B(d))。一方で、除荷過程では、引張負荷過程と同様にオーステナイト変態域で相変態が試験片の両端から発生し、中央に向けて伝ばした。しかし、その負荷方向に対する相変態の帯の角度は、応力誘起マルテンサイト変態中のその角度 (55.4°) に対してほぼ対称な角度 (-55.2°) であった。

Fig. 5(a)(b) は、引張負荷・除荷過程での A-A' 線上の局部ひずみの最大値位置と負荷中の時間の関係をまとめたものである。また、図の右側に相変態伝ばの模式図も示した。図中の $\times$ は応力-ひずみ関係から得られた相変態発生点を示し、 $\bullet$ と $\circ$ は伝ば中の局部ひずみの最大値位置である。Fig. 5(a) と Fig. 4(A) の応力-ひずみ線図から、相変態伝ばは応

力-ひずみ線図の平坦部で開始し、相変態発生から伝ば開始までに変形が定位置で増大する領域があることがわかる。また、伝ば開始点は試験片の両端で異なっていた。一方で、除荷過程では、相変態発生から伝ば開始までの領域が引張負荷過程よりも小さく、相変態伝ば開始が試験片の両端でほぼ同時に生じている。ここで、相変態の伝ば速度は、それぞれ応力誘起マルテンサイト変態時で 0.018 mm/s 、オーステナイト変態時で 0.026 mm/s であった。

3.2 NiTi 平板に生じる不均一変形挙動に及ぼす繰返し負荷の影響

Fig. 6 は超弾性を示す温度域で NiTi 平板に繰返し引張負荷・除荷を行った時の 1, 2, 20 回目の応力-ひずみ線図である。NiTi 平板の応力-ひずみ関係は、繰返し数とともに応力誘起マルテンサイト変態域の応力レベルが低下するなど、その変形挙動が大きく変化し、20 回程度の繰返し負荷で定常な応力-ひずみ線図となった。

繰返し負荷試験で、DIC に用いられる試験片画像と負荷方向を Fig. 1(b) に示す。Fig. 7, 8, 9 は 1, 2, 20 回目の応

Fig. 5 Position of peak local strain as a function of time during tensile loading-unloading on A-A' line.

Fig. 6 Stress-strain curves of NiTi plate during cyclic loading.

力-ひずみ線図と不均一変形挙動(局部ひずみ)の実験結果である。また、画像取得のタイミングを応力-ひずみ線図中に○で示した。計測される局部ひずみは Fig. 1(b)における白枠中の結果であり、Fig. 7, 8, 9 には負荷中で不均一変形挙動に特徴的な結果が得られたものを示してある。これらの図から、引張過程では、相変態が試験片の一端から中央に向けて負荷方向に対してある一定の角度を持って伝ばしている様子が伺えた。また、除荷過程では引張過程で伝ばが終了した相変態の位置から逆変態が発生し、試験片の端へと伝ばしていく様子が伺えた。さらに、繰返し負荷による不均一変形挙動の変化を詳細に調べるために、相変態伝ば中の A-A' 線上の局部ひずみ分布を繰返し数ごとにまとめたものが Fig. 10 である。図から、繰返し数とともに伝ば中の局部ひずみの最大値は減少し、相変態の帯領域が広がっていることがわかる。また、伝ば中の局部ひずみの最大値(A-A'線上)を時間ごとにプロットしたものを Fig. 11 に示す。図には 1, 2, 20 回目の実験結果と右側に相変態伝ばの模式図も示した。Fig. 11(a)から、引張過程では、繰返し数が増加するとともに相変態伝ば開始点が早まり、若干ではあるが伝ば速度が増加していることがわかった。また、Fig. 11(b)から、除荷過程で

Fig. 7 Stress-strain curve and distribution of local strain on the surface of NiTi plate during 1st tensile loading-unloading at temperature region of pseudoelasticity.

Fig. 8 Stress-strain curve and distribution of local strain on the surface of NiTi plate during 2nd tensile loading-unloading at temperature region of pseudoelasticity.

Fig. 9 Stress-strain curve and distribution of local strain on the surface of NiTi plate during 20th tensile loading-unloading at temperature region of pseudoelasticity.

Fig. 10 Local strain along to longitudinal direction during 1st, 2nd and 20th cycle.

Fig. 11 Position of peak local strain as a function of time during 1st, 2nd and 20th cycle on A-A' line.

は、20 回目のみが異なる逆変態伝ば開始点、逆変態伝ば速度を示した。また、相変態の発生から伝ば開始までの変形が定位置で増大する領域が繰返し負荷試験でも存在した。そしてこの領域は繰返し数とともに小さくなっていった。

4. 考 察

NiTi 平板は力学的負荷中に相変態の発生・伝ばといった不均一変形挙動を示した。そして、この不均一変形挙動は繰返し負荷数に応じて変化した。これらのことは以下の考察で述べられているように非常に興味深い現象である。

形状記憶合金の不均一変形挙動は以下の 3 過程に分類することができる。(a)相変態の発生、(b)発生から伝ば開始までの過程、(c)相変態の伝ば。相変態は発生してすぐには伝ばせず、一旦、発生点で変形が増大した後に伝ばしていった。発生から伝ばまでの領域が大きい場合、発生点で大きな局部変形が生じることになる。形状記憶合金の相変態の伝ばは、試験片の一部分で相変態が完了する程度の変形が生じた後、その部分よりも変形しやすい(隣の)部分で相変態が開始することによって生じる。したがって、試験片の一部分で相変態が完了する程度の変形よりも大きな局部変形が生じている(変形が定位置で増大する)ということは、その変形が塑性変形まで達している可能性があることを示している。とりわけ、この変形が定位置で増大する現象は、高変態応力を示す温度域(高温域)において SMA が変態の初期で塑性変形を伴う可能性があることを強く示唆している。以上のことから、形状記憶合金には、使用前に低温域での負荷-加熱の熱的機械的トレーニングを与えることでその機能発現を損なわずかつ安定した特性を引き出すことができることがわかる。

応力誘起マルテンサイト変態中の局部ひずみの最大値は、繰返し数とともに低下した。この結果から、繰返し負荷後の相は負荷前の相と比べると応力誘起マルテンサイト相に変態しやすくなっていると考えられる。言い換えれば、応力誘起マルテンサイト変態はその相を進展させるために繰返し負荷の初期でより多くのエネルギーを費やす。

形状記憶合金の回復ひずみ量が集合組織に依存することが Inoue らによって報告されている¹⁹⁾。不均一変形挙動においてもその伝ば速度、相変態の角度などが集合組織や転位の有無などに依存する可能性がある。今後、このような集合組織と不均一変形挙動の関係を調査していく必要がある。また、今回の実験で確認されたように、負荷履歴によって除荷時のオーステナイト相の伝ば形態に相違がみられた。これについても調査を行っていく必要がある。

上述のような形状記憶合金に生じる不均一変形挙動はその巨視的変形挙動に大きな影響を及ぼす。また、不均一変形挙動は負荷状態に非常に敏感である。巨視的な視点からだけでは複雑な負荷下での SMA の変形挙動を記述することは難しい。SMA の応用を考える時、不均一変形挙動と巨視的変形挙動の関係を調査していくことは非常に重要である。

5. 結 言

超弾性を示す温度域で NiTi 平板の繰返し単軸引張・除荷を行い、巨視的な単軸応力-ひずみ線図と局部的に生じる不均一変形挙動の関係を明らかにすることを試みた。得られた実験結果は以下のようである。

(1) NiTi 平板の巨視的応力-ひずみ関係は、繰返し数とともに応力誘起マルテンサイト変態域の応力レベルが低下するなど、その変形挙動が大きく変化し、20 回程度の繰返し負荷で定常な応力-ひずみ線図となった。

(2) SMA の不均一変形挙動は以下の 3 過程に分類することができる。(a)相変態の発生、(b)発生から伝ば開始までの過程、(c)相変態の伝ば。相変態は発生してすぐには伝ばせず、発生点で変形が増大した後に伝ばしていった。また、この相変態は負荷方向に対してある一定の角度を持ち伝ばしていた。

(3) 繰返し数とともに伝ば中の局部ひずみの最大値は減少し、相変態の帯領域が広がっていることがわかった。また、引張過程では、繰返し数が増加するとともに相変態伝ば開始点が早まり、若干ではあるが伝ば速度が増加していることがわかった。除荷過程では、20 回目のみが異なる逆変態伝ば開始点、逆変態伝ば速度を示した。また、変形が定位置で増大する領域は繰返し数とともに小さくなった。結果として、不均一変形挙動の変化が巨視的変形挙動(応力-ひずみ線図)に大きく反映していることが以上の結果からわかる。

SMA の不均一変形挙動を明らかにすることにより、これまで困難とされてきた複雑な機械的熱的負荷下での変形挙動の解明、その複雑変形挙動を記述できる新しい構成方程式の開発および数値解析手法の確率を行うことが可能となるものと考えられる。

文 献

- 1) Y. Suzuki: Zairyogijutsu **3**(1985) 403.
- 2) T. Takashima and K. Minamoto: Trans. Shindo gijutsu kenkyukai **25**(1986) 11.
- 3) D. S. Ford and S. R. White: Acta mater. **44**(1993) 2295.
- 4) L. C. Binson: J. Intell. Mater. Syst. and Struct. **4**(1993) 229.
- 5) C. Liang and C. A. Rogers: J. Intell. Mater. Syst. and Struct. **1**(1990) 207.
- 6) K. Tanaka: Res Mechanica **18**(1986) 251.
- 7) K. N. Melton and O. Mercier: Acta mater. **29**(1980) 393.
- 8) Y. Liu and S. P. Galvin: Acta mater. **45**(1997) 4431.
- 9) H. Tobushi, K. Tanaka, T. Hori, T. Sawada and T. Hattori: Trans. JSME series A **58**(1992) 1411.
- 10) M. Kohl: *Shape Memory Microactuators*, (Springer, 2004).
- 11) J. A. Shaw and S. Kyriakides: Acta mater. **45**(1997) 683.
- 12) J. Dutkiewicz, H. Kato, S. Miura, U. Messerschmidt and M. Bartsch: Acta mater. **44**(1996) 4597.
- 13) D.-N. Fang, W. Lu and K.-C. Hwang: Metallurgical and Materials transactions A **30A**(1999) 1933.
- 14) H. Tobushi, K. Takata and K. Okumura: Trans. JSME series A **67**(2001) 1318.
- 15) G. Murasawa, M. Koushinbou, S. Yoneyama, T. Sakuma and M. Takashi: Journal of The Society of Materials Science **53**(2004) 999.
- 16) M. Koushinbou, G. Murasawa, S. Yoneyama, T. Sakuma and M. Takashi: Trans. of Materials Research Society of Japan **29**(2004) 2973.
- 17) M. A. Sutton, S. R. Stephen McNeill, J. D. Helm and Y. J. Chao: *Photomechanics*, (Rastogi, P. K., Ed., 2000) 323.
- 18) S. Yoneyama and Y. Morimoto: JSME International Journal Series A **46**(2003) 178.
- 19) H. Inoue, N. Miwa and N. Inakazu: Acta mater. **44**(1996) 4825.