TiNi 形状記憶合金の力学的性質の研究*

(変態擬弾性の繰返し特性の実験)

稲葉 明 俊^{*1}, 木村 君 男^{*2}
岩 永 弘 之^{*2}, 戸 伏 壽 昭^{*2}

A Study on Mechanical Properties of TiNi Shape Memory Alloy (Experiments on Cyclic Characteristics of Pseudoelasticity)

Akitoshi INABA, Kimio KIMURA,
Hiroyuki IWANAGA, and Hisaaki TOBUSHI

Experiments on TiNi shape memory alloy wire under uniaxial tension with cyclic loading and unloading were carried out. The influence of shape memory processing temperature, test temperature and maximum strain upon cyclic characteristics of pseudoelasticity was examined. The results obtained are summarized as follows. (1) Yield stresses of stress-induced martensitic transformation and of inverse transformation and stress corresponding to maximum strain decrease with number of cycle. (2) Strain ranges of martensitic transformation and of inverse transformation roughly coincide. The strain ranges decrease with number of cycle. The amount of decrease is small. (3) Residual strain in each cycle increases with number of cycle. Residual strain is proportional to maximum strain, shape memory processing temperature and test temperature. (4) Recoverable strain energy and dissipated strain energy per unit volume decrease with number of cycle. (5) Every characteristic value (1)-(4) varies significantly in early cycles, but becomes stable after a certain cycles.

Key Words: Stress-Strain Relations, Shape Memory Alloy, Titanium-Nickel Alloy, Pseudoelasticity, Cyclic Characteristics, Martensitic Transformation, Residual Strain, Recoverable Strain Energy

1. 緒 言

形状記憶合金は、マルテンサイト変態と逆変態で生じる形状記憶効果と変態擬弾性の二つの特性⁽¹⁾⁽²⁾を示す。これらの特性を利用した応用例は、家電製品や自動車部品などの工業分野および医療分野など広範囲にわたっており⁽³⁾⁽⁴⁾、著者らは熱エンジンへの応用を検討している⁽⁵⁾⁽⁶⁾。形状記憶合金を応用する場合、熱・力学サイクルの繰返し数の増加に伴う応力、ひずみの挙動が形状記憶合金の機能材料としての信頼性を評価するうえで重要な問題となる⁽⁷⁾。変態擬弾性については、エネルギー貯蔵⁽⁸⁾や防振材料⁽⁹⁾としての有効利用が考えられるが、その繰返し特性に関する研究は少ない⁽¹⁰⁾。

本研究では、最も多く実用化されており、また疲労強度などに優れている TiNi 形状記憶合金について、その繰返し変態擬弾性の検討を行った。このために、形状記憶合金線材に生じる単軸引張りの下での応力とひずみおよび加熱と冷却を独立に制御できる実験装置を試作して、変態擬弾性の繰返し依存性について基礎

的な実験を行った。すなわち、変態擬弾性に影響を与える主な因子としては形状記憶熱処理温度、ひずみ、応力および環境温度があるので、これらの因子の影響を応力・除荷の繰返し数との関係について調べた。

2. 実験条件

2.1 供試材および試験片 供試材は、古河電気工業(株)製の直径 0.75 mm の TiNi 合金線材で、その化学成分を表 1 に示す。この線材を直線形状に熱処理(形状記憶処理)したものを試験片とした。熱処理は 350, 400, 450, 500°C の各温度で 20 min 間保持した後、炉冷した。試料の逆変態終了温度、 A_f 点は約 50°C である。

2.2 実験装置 実験装置は、引張試験機、加熱・冷却装置およびその制御部で構成されており、その概略図を図 1 に示す。本装置では、軸力、変位および温度

表 1 化学成分 (wt.%)

T i	N i	Z n
43.4	56.0	0.59

* 昭和 63 年 11 月 11 日 北陸信越支部北陸地方講演会において講演、原稿受付 昭和 63 年 4 月 11 日。

^{*1} 学生員、アイシン精機(株) (〒448 刈谷市朝日町 2-1)。

^{*2} 正員、愛知工業大学 (〒470-03 豊田市八草町八千草 1247)。

を独立して制御できる。軸力、変位および温度はロードセル、伸び計、熱電対により検出する。線材の加熱と冷却は、圧縮空気を利用してヒータとクーラにより得られる熱風と冷風を吹き付けることにより行う。チャンバは加熱・冷却時の環境温度を保持する。試験片の変位は、ひずみゲージ式の伸び計により検出する。標点距離は 20 mm である。

2・3 実験方法 各熱処理した試験片について、 A_f 点以上の変態擬弾性を示す環境温度において図 2 に示す方法により、単軸引張りの下で、一定ひずみ速度で予ひずみ ε_0 まで負荷しその後除荷する繰返し試験を行い、軸応力と軸ひずみの挙動を調べた。一定に保つ環境温度は 60, 80, 100°C とし、予ひずみ ε_0 は 0.5, 1, 3, 8% とした。ひずみ速度は 2~8%/min とし、繰返し数は 100 回とした。

3. 実験結果および考察

3・1 応力-ひずみ曲線 予ひずみ $\varepsilon_0=0.5\%$ の場合には、オーステナイト相(以下 A 相という)の弾性域にあり、応力-ひずみ曲線は環境温度および熱処理温度により若干異なるがほぼ直線で表され、繰返し数に対しては大きな変化がみられない。また $\varepsilon_0=1\%$ の場合には、応力誘起マルテンサイト変態(以下 M 変態という)による降伏の生じ始める付近であり、条件により弾性域にあるものと降伏域に達しているものがあるが、応力-ひずみ曲線の形の変化は少ない。以下では、応力-ひずみ曲線の形が繰返し数に対して大きく変化する $\varepsilon_0=3\%$ と 8% の場合について、その特性を検討する。

図 1 実験装置概略図

図 3 と図 4 に、予ひずみ $\varepsilon_0=3\%$ と 8% の場合について、環境温度および熱処理温度別に 100 回までの負荷・除荷の繰返しによる応力-ひずみ曲線をまとめて示す。予ひずみの 3% と 8% は、M 変態降伏域とマルテンサイト相(以下 M 相という)にある。応力ひずみ曲線は、諸条件の相違により異なる。

全体的にみて、応力-ひずみ曲線のヒステリシスループの形が繰返し数に対してくずれずに元の形を保つものは、そのヒステリシスループの位置が繰返し数と共に応力軸の負の方向に移動する傾向を示す。

3・2 変態応力 M 変態降伏域の開始と終了の応力 σ_{Ms} と σ_{Mf} および逆変態の開始と終了の応力 σ_{As} と σ_{Af} について、各変態の開始と終了の応力差は各変態の応力レベルに比較して小さい。したがって、ここでは各変態の開始応力について検討する。図 5 に予ひずみ 8% で熱処理温度 350°C の場合の M 変態開始応力 σ_{Ms} および逆変態開始応力 σ_{As} と繰返し数 N の関係を示す。両変態開始応力 σ_{Ms} , σ_{As} 共に繰返しの初期に大きく減少し、その後一定値に近づく。 σ_{As} の減少に比べ、 σ_{Ms} の減少が著しく大きい。

つぎに、各変態開始応力差 ($\sigma_{Ms}-\sigma_{As}$) と繰返し数 N の関係を図 6 に示す。変態開始応力差は、20 サイクル程度までに急激に減少するが、その後は穏やかな変化を示す。変態開始応力差は、熱処理温度と環境温度の高いものほど、繰返し数に伴う減少が大きい。

各変態の降伏応力と温度の直線関係により M 変態と逆変態の開始と終了の変態領域は表される⁽¹¹⁾。したがって、諸条件にかかわらず繰返しにしたがって一定温

図 2 ひずみおよび応力と繰返し数を表す模式図

図 3 応力-ひずみ曲線 ($\epsilon_0 = 3\%$, T_h : 熱処理温度, T_t : 環境温度) 図 4 応力-ひずみ曲線 ($\epsilon_0 = 8\%$, T_h : 熱処理温度, T_t : 環境温度)

度下で各降伏応力は低下するので、一定応力下では変態領域が高温側に移動する。すなわち、繰返し数の増加に伴って各変態温度は上昇する。

3.3 予ひずみに対応する応力 予ひずみが 0.5% および 1% の場合には、予ひずみに対応する応力は繰返しに対してほぼ一定の値を示す。環境温度 80°C で予ひずみ ε_0 が 3% および 8% の場合の ε_0 に対応する応力 σ_m と繰返し数 N の関係を図 7 に示す。図から σ_m は繰返し数とともに減少していく。熱処理温度と環境温度にかかわらず、 σ_m は 20 サイクル程度で安定し、それ以降はほぼ一定の値をとる。繰返しに伴う σ_m の減少は、図 5 に示した M 変態開始応力 σ_{Ms} の減少に比較して小さい。

3.4 変態ひずみ範囲 M 変態の開始と終了ひずみ ε_{Ms} と ε_{Mf} および逆変態の開始と終了ひずみ ε_{As} と

予ひずみ 8% 熱処理温度 350°C

(白: σ_{Mf} 黒: σ_{As})
○: 60°C ●: 60°C
△: 80°C ▲: 80°C
□: 100°C ■: 100°C

図 5 各変態開始応力と繰返し数の関係

予ひずみ 8% 熱処理温度 350°C

○: 60°C △: 80°C □: 100°C

図 6 各変態開始応力差と繰返し数の関係

ε_{Af} で定まる各変態のひずみ範囲 ($\varepsilon_{Mf} - \varepsilon_{Ms}$) および ($\varepsilon_{As} - \varepsilon_{Af}$) と繰返し数 N の関係を図 8 に示す。図 8 は予ひずみ 8% で熱処理温度 350°C の結果であり、100 サイクルに対しても両変態降伏域がはっきりした形を保った場合のものである。図 8 から、逆変態ひずみ範囲のほうが M 変態ひずみ範囲より若干大きい、その差は小さい。また、各変態ひずみ範囲は繰返し数とともに徐々に減少し、一定値を示す傾向にある。繰返しに伴う変態ひずみ範囲の変化の割合は、図 5 に示した M 変態開始応力の変化の割合に比べると非常に小さい。したがって、繰返しにより M 変態に対する抵抗は大きく減少するが、M 変態で生じるひずみ量の変化は

図 7 予ひずみに対応する応力と繰返し数の関係 (環境温度 80°C)

予ひずみ 8% 熱処理温度 350°C

(白: M 変態のひずみ範囲 黒: 逆変態のひずみ範囲)
○: 60°C ●: 60°C
△: 80°C ▲: 80°C
□: 100°C ■: 100°C

図 8 各変態のひずみ範囲と繰返し数の関係

図 9 残留ひずみと繰返し数の関係(熱処理温度 350°C)

小さいことがわかる。

3・5 残留ひずみ 予ひずみ 0.5%と 1%の場合には、各サイクルにおける残留ひずみは繰返しによってもほとんど認められない。予ひずみ 3%と 8%について熱処理温度 350°Cの結果を、残留ひずみ ϵ_p と繰返し数 N の関係で図 9 に示す。 ϵ_p が 3%と 8%の場合には、環境温度および熱処理温度が高くなるほど、繰返し数の増加に伴い残留ひずみが大きくなる。熱処理温度が低く、なおかつ環境温度が A_r 点に近い場合(60°C)には、繰返し数の増加に伴って変態降伏域が低下し、部分擬弾性へと移行し、これによってひずみが残留する。環境温度が高い場合には、繰返しに伴い可逆的な M 変態による変形他にすべりを伴う塑性変形が生じ、その結果ひずみが残留する。

3・6 ひずみエネルギー 各サイクルにおける単位体積あたりの回復ひずみエネルギー E_r および散逸ひずみエネルギー E_d と繰返し数 N の関係を図 10 に示す。回復ひずみエネルギーはエネルギー貯蔵⁽⁸⁾、散逸ひずみエネルギーは防振材料⁽⁹⁾としての利用が考えられる。各ひずみエネルギーは繰返し数とともに減少する。環境温度および熱処理温度が高いほど各ひずみエネルギーの減少は大きい。予ひずみ 8%で熱処理温度が 350°C の場合、異なる環境温度に対して散逸ひずみエネルギーはほぼ同じ値を示す。いずれのひずみエネルギーも 20 サイクル程度まで大きく減少し、それ以降は一定の値になる傾向にある。

また、回復エネルギーの利用としてエネルギー貯蔵効率 $\eta = E_r / (E_r + E_d)$ を考えると、 η は繰返し数とともに増加するが、ある程度の繰返し数でほぼ一定の値を示すようになる⁽¹²⁾。

以上の各項目の検討により、材料をあらかじめトレ

(a) 回復ひずみエネルギーと繰返し数の関係(熱処理温度 350°C)

(b) 散逸ひずみエネルギーと繰返し数の関係(熱処理温度 350°C)

図 10

ーニング⁽⁸⁾しておくことにより安定した変態擬弾性特性を得ることができると考えられる。

4. 結 言

TiNi 形状記憶合金の力学的性質の研究として合金線材の単軸引張りによる負荷・除荷の繰返し試験により、変態擬弾性の繰返し特性に対する形状記憶熱処理温度、環境温度および予ひずみの影響を調べた。得られた主要な結果はつぎのとおりである。

(1) 応力誘起マルテンサイト変態と逆変態の降伏応力および予ひずみに対応する応力は繰返し数とともに減少する。

(2) 応力誘起マルテンサイト変態と逆変態のひずみ範囲はほぼ一致する。変態ひずみ範囲は繰返し数と

ともに減少する。その変化量は小さい。

(3) 各サイクルでの残留ひずみは繰返し数とともに増加する。予ひずみが大きく形状記憶熱処理温度および環境温度が高いほど残留ひずみは大きい。

(4) 単位体積あたりの回復ひずみエネルギーおよび散逸ひずみエネルギーは繰返し数とともに減少する。

(5) 変態擬弾性特性を規定する(1)~(4)の各特性量は繰返しの初期に大きく変化し、一定の繰返し数以降では、ほぼ安定した値を示すようになる。

終わりに、本研究を行うにあたり実験に協力された当時の愛知工業大学の学生諸君、多大のご支援を賜った大橋義夫教授、および補助を受けた日東学術振興財団研究補助金と文部省科学研究費補助金一般研究(C)に深く感謝する。

文 献

- (1) Perkins, J. ed., *Shape Memory Effects in Alloys*, (1975), Plenum.
- (2) 舟久保編, 形状記憶合金, (昭 59), 産業図書.
- (3) 形状記憶合金用途開発委員会編, 形状記憶合金とその使い方, (昭 62), 日刊工業新聞社.
- (4) 鈴木, 実用形状記憶合金, (昭 62), 工業調査会.
- (5) Tobushi, H. and Cahoon, J. R., *Trans. CSME*, 9-3 (1985), 137.
- (6) 岩永・ほか 2 名, 機論, 54-497, A (昭 63), 177.
- (7) 宮崎・坂本, 日本金属学会会報, 24-1 (昭 60), 33.
- (8) 宮崎・大塚, エネルギー・資源, 4-4 (昭 58), 376.
- (9) 井口, 機械の研究, 38-11 (昭 61), 1273.
- (10) Miyazaki, S., Imai, T. and Otsuka, K., *Metall. Trans.*, A, 17 A (1987), 115.
- (11) 田中・ほか 2 名, 材料, 37-414 (昭 63), 267.
- (12) 稲葉・ほか 3 名, 機講論, No 870-12 (昭 62), 34.