NiTi 形状記憶合金の振動特性に関する研究*

高橋 恭彦**, 立石 哲也***
斎藤 正克†, 鈴木 雄一††

Study on Vibration Characteristics of NiTi Shape Memory Alloy

by Yasuhiko TAKAHASHI, Tetsuya TATEISHI
Masakatsu SAITOH, and Yuichi SUZUKI

Vibrational tests provide the most direct means of obtaining the mechanical properties and evaluating the fixation function of mechanical elements involved in the pseudoelastic materials such as NiTi shape memory alloy. The tests are applied to uniaxial deformation and cantilever conditions whereby the appropriate constitutive equation is given by the rate type equation.

Key Words : NiTi Shape Memory Alloy, Stress Induced Martensite, Pseudoelasticity, Vibrational Test, Constitutive Equation

1. 緒 言

Ni-Ti 合金などの形状記憶合金は双晶形の防振合金として注目されている。防振合金は、振動や騒音を構造方式によって緩和するのではなく、金属材料そのものがもつ大きな減衰能を利用して振動や騒音の発生源をなくしてしまうという点で、従来とはまったく異なった発想から生まれたものである。

Ni-Ti 合金などにみられるマルテンサイト変態は熱弾性形マルテンサイト変態である。このタイプは必ず格子不変せん断変形としての一種の変態双晶を伴い、この双晶の境界は非常に動きやすいという特性をもっている。この特性が振動を吸収する大きな原因となるのである。

本報告では、種々の熱処理を施した Ni-50-Ti 合金の動的試験を行い、防振効果の温度および周波数依存性を明らかにした。さらに超音波減衰音速測定法によ

り粘弾性応答特性を測定し、各種の実験結果と比較検討した。また Ni-50-Ti 合金を応用した医用材料である骨接統具についてその動的特性を測定し、力学的挙動について考察した。

2. 実験方法

2.1 Ni-50-Ti 線材の動的試験 本実験に用いた Ni-50-Ti 合金の試料は $\phi 0.6$ mm の線材である。長さ 50 mm, 標点間距離 30 mm とした。熱処理は 700°C, 600°C, 各 30 分の 2 種類である。

試験機には機械技術研究所で開発した Biomechanical Spectrometer を用いた。本装置は駆動方式として電磁サーボ式垂直定振幅強制駆動方式を採用しており、最大荷重振幅は 100 N(p-p), 測定周波数は金属針金等については 10³ Hz, 生体軟組織様の試料については 350 Hz 程度まで応答できる。変位の検出には非接触光電変換素子を用いた。荷重、変位および位相差 $\tan \delta$ の値はコントロールボックス前面の液晶パネルにデジタル表示される。実験方法は熱処理 700°C の試料については最初静的応力 70.8 MPa を負荷し、動的振幅 17.7 MPa で測定を行い、600°C の試料については静的応力 35.4 MPa, 動的振幅 17.7 MPa で行った。なお温度制御には循環式温水槽を用いた。測定周

* 昭和 59 年 11 月 29 日 第 929 回講演会において講演、原稿受付 昭和 59 年 5 月 31 日。

** 学生員、筑波大学大学院 (〒305 茨城県新治郡桜村)。

*** 正員、工業技術院機械技術研究所 (〒305 茨城県新治郡桜村)。

† 正員、筑波大学構造工学系。

†† 正員、古河電気工業(株) (〒142 東京都品川区二葉)。

波数は 35 Hz である。

2.2 超音波音速測定 本実験に用いた Ni-50-Ti 合金の試料は $\phi 8$ mm の丸棒である。長さ 3 mm とした。熱処理は 900°C, 1 時間であり、熱分析による変態温度は 50°C である。超音波減衰音速測定装置は校正信号発生器、測定用受信器本体、パルサー、減衰器、対数圧縮変換器、オシロスコープから成り、音速測定にはタイムインターバル測定用デジタルマルチメータ (HP) を用いた。図 1 に超音波減衰音速測定装置構成図を示す。

温度制御には等速昇降温槽を用いた。温度制御範囲は -35~250°C である。実験は -20~100°C の範囲で行った。

3. 実験結果

3.1 Ni-50-Ti 線材の動的試験 動的試験の測定は、振動荷重

$$F = F_0 + F_1 \sin(\omega t) \quad \dots\dots\dots (1)$$

に対する変位

$$D = D_0 + D_1 \sin(\omega t + \delta) \quad \dots\dots\dots (2)$$

を求め、これより位相差 $\tan \delta$ および弾性率

$$E = \frac{F_1}{D_1} \frac{l}{A} \quad \dots\dots\dots (3)$$

を算出した。ここで A は線材の断面積、 l は線材の標点間距離である。

図 2 は $\tan \delta$ の温度依存性を示す。図 3 は動的弾性率の温度依存性を示す。 $\tan \delta$ に関しては静的応力が高いほど $\tan \delta$ の値が低くなっている。温度変化に対しては若干の変化は見られるが全体として大差がない。

動的弾性率 E に関しては静的応力が高いほど弾性率も高くなっている。温度変化に対してはほとんど変化が見られない。これは、線材に静的荷重を負荷することによって先在しているマルテンサイト相が拘束され、変形が平衡状態になってから微小振幅荷重を重畳するため、Ni-50-Ti 合金の粘弾性効果が弱まること

によるものと思われる。

形状記憶合金においては、変態温度付近では原子構造が不安定になるため弾性率に急激な変化が見られるはずである。しかしながら、測定結果から見る限り、0~80°C の温度範囲ではその変化は見られなかった。そこで、今回実験に用いた試料の変態温度を明らかにするため、試料の電気抵抗の温度依存性を調べた。図 4 は熱処理条件が 600°C, 30 分の試料、図 5 は熱処理条件が 700°C, 30 分の試料の結果である。

この結果から明らかなように、 M_s 点はどちらの試料についても -15°C 前後であることが判明した。この温度は今回の実験の温度範囲外であった。したがって動的試験による弾性率には急激な変化は見られなかったのである。さらに、この結果から A_r 点を調べてみるとどちらの試料についても 10°C 前後であることがわかる。今回の実験では 10°C 前後の測定は行われている。しかしながら A_r 点と思われる 10°C 前後において、弾性率の急激な変化は見られなかった。線材の場合、 A_r 点では弾性率に変化が現れにくいと考えられる。

3.2 超音波音速測定 超音波減衰音速測定の結果について報告する。図 6 は音速の温度依存性を示す。図 7 は弾性率の温度依存性を示す。ここで弾性率は、

図 2 $\tan \delta$ の温度依存性

図 3 弾性率の温度依存性

図 1 超音波減衰音速測定装置構成図

$$E = \rho v^2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

であり、 v は音速、 ρ は試料の密度である。

これらの結果をみると、70~80°Cにおいて音速および弾性率の急激な変化がみられる。これは70~80°Cにおいて原子構造が不規則、不安定になったため、パルスの伝播が困難になったことによると考えられる。さらに、70~80°Cにおいてオシロスコープの波形異常が見られた。この結果から70°C付近で原子構造に異常が生じることは明らかであり、変態温度は70°C付近と考えられる。しかしながら、本実験に用いた Ni-50-Ti 合金の変態温度は熱分析の結果 50°Cであることが確認されている。この結果から、測定方法によって変態温度が若干異なることもあり、また材料の履歴の影響も無視できないものと思われる。

4. 形状記憶合金の振動応答モデル

振動変形に対する形状記憶合金の力学的挙動について考察する。

粘弾塑性体の構成式を

図 4 電気抵抗の温度依存性 (600°C, 30 分)

図 5 電気抵抗の温度依存性 (700°C, 30 分)

$$\left. \begin{aligned} \dot{\epsilon} &= \frac{1}{E} \dot{\sigma} + \frac{1}{\eta} (\sigma - \sigma_y) & (\sigma > \sigma_y) \\ \epsilon &= \frac{1}{E} \sigma & (\sigma \leq \sigma_y) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

とする。ここで ϵ はひずみ、 σ は応力、 E は弾性率、 η は粘性係数、 σ_y は降伏応力である。この構成式は一種の 3 要素モデルに帰着する。ここで単軸の振動入力として過剰応力 $(\sigma - \sigma_y)$ を考え、

$$\sigma - \sigma_y = \sigma_0 e^{i\omega t} \quad \dots\dots\dots (6)$$

とする。見掛け上の複素弾性率として

$$G = G_1 + iG_2 \quad \dots\dots\dots (7)$$

を導入すると、 ϵ は、

$$\epsilon = \frac{1}{G_1 + iG_2} (\sigma - \sigma_y) \quad \dots\dots\dots (8)$$

式(5)に式(6)、(8)を代入すると、

$$G_1 + iG_2 = \frac{i\omega\eta}{1 + i\omega\frac{\eta}{E}} \quad \dots\dots\dots (9)$$

これから、貯蔵弾性率 G_1 、損失弾性率 G_2 は、緩和時間 τ を

$$\tau = \frac{\eta}{E} \quad \dots\dots\dots (10)$$

として、

$$G_1 = \frac{E\omega^2\tau^2}{1 + \omega^2\tau^2}, \quad G_2 = \frac{E\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2} \quad \dots\dots\dots (11)$$

図 6 音速の温度依存性

図 7 弾性率の温度依存性

損失正接 $\tan \delta$ は

$$\tan \delta = \frac{G_2}{G_1} = \frac{1}{\omega \tau} \quad \dots\dots\dots(12)$$

となる。

図 8 に $\tan \delta$ および弾性率の周波数依存性を測定した結果を示す。この図より明らかに、 $\tan \delta$ はある周波数でピーク値をとり、弾性率は対応する周波数で増大している。この結果は式 (11) および式 (12) で与えられる形状記憶合金の振動応答モデルと 50 Hz 以上の周波数域で一致している。したがって Ni-Ti 合金の振動応答は、ある周波数以上の周波数域で式 (11), (12) により評価することができる。以上で述べた振動応答モデルを Ni-50-Ti 骨接統具に適用して次に論ずる。

5. Ni-Ti 骨接統具の動的試験

大たい(腿)骨やけい(脛)骨など大荷重を支持している長管骨の骨折や、擬関節を形成し治癒が困難な骨折に対し各種の髓内てい(釘)が工夫されている。従来の髓内ていには形状が真直なため、複雑な形状の骨髓内の一部分のみで骨を固定せざるを得ず、固定性に問題を残している。円柱状髓内てい挿入後、円柱端が複数に開口し、骨外周のち(緻)密骨に対し大きな接触圧を及ぼす強力固定性髓内ていを Ni-50-Ti 形状記憶合金を用いて製作した。本報告では、ビーグル犬大たい骨内に挿入後、摘出した Ni-Ti 髓内ていの動的試験を行

図 8 $\tan \delta$ および弾性率の周波数依存性

図 9 Ni-Ti 髓内てい形状

い、力学的挙動について考察した。

5.1 実験方法 本実験に用いた Ni-Ti 髓内ていを図 9 に示す。A_r 点は 30°C である。試験機には Biomechanical Spectrometer を用いた。測定方法は、髓内ていの一端に最初静的荷重 9.8 N を負荷し、振動荷重 4.9 N を重畳して弾性率および $\tan \delta$ の温度依存性を測定した。さらに温度一定における弾性率および $\tan \delta$ の周波数依存性を測定した。温度制御には循環式温水槽を用いた。図 10 に Ni-Ti 髓内ていの動的特性測定法を示す。これは片持ばりの曲げ振動である。

5.2 結果および考察 図 11 は弾性率の温度依存性を示す。図 12 は $\tan \delta$ の温度依存性を示す。30°C 付近まで弾性率が急増し、それ以上の温度では大きな変化がみられない。これは A_r 点以下においては温度の上昇とともにオーステナイト相の割合が増加しマルテンサイト相が少なくなるため弾性率が急激に増加し、30°C 以上ではすべてオーステナイト相になるため、弾性率に大きな変化がみられないのである。 $\tan \delta$ は 30°C で極小値をとっている。これは A_r 点に近づくにしたがってマルテンサイト相が少なくなり、非弾性でなくなるため、A_r 点である 30°C において $\tan \delta$ が最も小さくなるのである。30°C 以上では温度の増加とともに $\tan \delta$ も増加している。30°C 以上ではすべてオーステナイト相であるので、オーステナイト相における $\tan \delta$ の温度依存性が明らかになった。

図 13 は弾性率の周波数依存性を示す。図 14 は $\tan \delta$ の周波数依存性を示す。 $\tan \delta$ はある周波数でピーク値をとり、弾性率は対応する周波数で増大している。この結果は、図 8 で示された Ni-Ti 針金の周波数依存性と類似しており、式 (11) および式 (12) で与えられ

図 10 Ni-Ti 髓内てい動的特性測定法

図 11 弾性率の温度依存性

図 13 弾性率の周波数依存性

図 12 $\tan \delta$ の温度依存性 図 14 $\tan \delta$ の周波数依存性

る形状記憶合金の振動応答モデルと明らかに一致している。

また、弾性率は高温の場合ほど大きく、周波数依存性も顕著である。 $\tan \delta$ は温度の増加とともにピーク値が減少し、ピークが高周波側に移動している。この現象は温度の増加とともにマルテンサイト相が減少しオーステナイト相が増加するため非弾性でなくなり、内部減衰が減少することによると考えられる。この傾向は式 (11) および式 (12) で与えられる粘弾塑性の振動応答モデルとよく一致している。

6. 結 言

Ni-Ti 形状記憶合金を試料として動的試験を行い、引張りおよび曲げ変形に対する動的弾性率および位相差 $\tan \delta$ の周波数依存性を明らかにした。また、超音波物性を測定した結果、変態点を決定するにはマルテ

ンサイト相生成に関する温度と応力の干渉を極力小さくするような測定法が必要であることが明らかになった。さらに、形状記憶合金は粘弾塑性を示すことを明らかにし、その挙動を表す構成式の一次元振動応答モデルを導出した。

最後に NiTi 合金の電気抵抗測定をしていただいた筑波大学物質工学系 宮崎 修講師に感謝します。

文 献

- (1) 立石・宮本, 機論, 42-354 (昭 51), 423.
- (2) 立石・ほか 2 名, 機論, 45-389, A (昭 54), 12.
- (3) 清水・大塚, 形状記憶合金の可能性を探る, 工業材料, 31-1 (昭 58), 18.