TiNi 形状記憶合金線材の繰返し変形と回転曲げ疲労*

山田 真也^{*1}, 蜂須賀 孝^{*2}
戸伏 壽昭^{*3}, 林 萍 華^{*4}Cyclic Deformation and Rotating-Bending Fatigue
of a TiNi Shape-Memory Alloy WireShinya YAMADA, Takashi HACHISUKA,
Hisaaki TOBUSHI and Ping-hua LIN

In order to investigate cyclic deformation and fatigue of a TiNi shape-memory alloy wire, rotating-bending fatigue tests were carried out at various strain amplitudes, temperatures and rotational speeds in air and in water. The results were summarized as follows. (1) If strain amplitude was found in the rhombohedral-phase transformation region, the fatigue life was longer than 10^7 cycles. The deformation properties did not change under cyclic deformation. (2) If strain amplitude was found in the martensitic transformation region, the fatigue life was shorter than 10^5 cycles. The higher the temperature, the shorter the fatigue life. (3) The rotational speed did not affect the fatigue life in water. The higher the rotational speed, the shorter the fatigue life in air.

Key Words: Fatigue, Titanium-Nickel Shape Memory Alloy, Wire, Martensitic Transformation, Rhombohedral-Phase Transformation, Cyclic Deformation, Rotating-Bending Fatigue

1. 緒 言

形状記憶合金(shape memory alloy, 以下 SMA)では常用の金属では現れない形状記憶効果(shape memory effect, 以下 SME)および変態擬弾性(pseudoelasticity, 以下 PE)に伴う変形特性が観察される^{(1)~(3)}。これらの特性を利用すれば、従来の材料では難しかった温度感知と作動力の発生が単体で同時に実現できる。さらに、ひずみエネルギーの散逸と貯蔵の密度が大きいので優れた機能素子が作製できる。このように、SMA はインテリジェント材料としての応用が注目されている。

SMA をアクチュエータやロボットなどの駆動素子として利用する場合、SMA 素子は繰返し作動する。したがって、SMA 素子の信頼性を評価する上で材料の繰返し変形特性は特に重要である。多くの SMA では SME や PE はマルテンサイト(martensitic, 以下

M)変態により生じる。TiNi SMA ではその他に菱面体晶(rhombohedral phase, 以下 R 相)変態によって SME や PE が現れる^{(4)~(6)}。M 変態に比べて R 相変態に伴うひずみは小さいが、繰返し変形特性は優れている⁽⁷⁾。高サイクルで作動するロボットや固体熱エンジン⁽⁸⁾では、さらに疲労寿命が重要な課題である^{(9)~(11)}。SMA の熱伝達の点から素子は細い線材で使用されることが多い。シンプルプーリ式 SMA 熱エンジンでは SMA 線材は繰返し曲げを受ける⁽¹²⁾。このように実用上重要な SMA 線材の高サイクルでの繰返し変形や疲労の特性はあまり研究されていないのが現状である。

このために著者らは TiNi SMA 線材の回転曲げ疲労試験機を開発し、空気中⁽¹³⁾ および水中⁽¹⁴⁾での実験結果に基づき疲労寿命は R 相変態では非常に長くなることを確かめた。

本研究においては、前報での研究に続き、回転曲げを受ける TiNi SMA 線材の繰返し変形特性と疲労寿命を調べた。実験では、最初に、繰返し引張試験により SME と PE の繰返し特性を調べた。続いて、回転曲げを受けた場合の変形特性、空気中での回転曲げによる温度変化に対するひずみ振幅と回転速度の影響および空気中と水中での疲労寿命を検討した。

* 1996 年 3 月 9 日 東海支部第 45 期総会講演会において講演、原稿受付 1996 年 9 月 5 日。

^{*1} 准員、佐藤工業(株) (〒103 東京都中央区日本橋本町 4-12-20)。

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

^{*3} 正員、愛知工業大学。

^{*4} 正員、東南大学 (中国南京市 210096)。

2. 実験方法

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Ti-55.3 wt.%Ni SMA線材であった。形状記憶熱処理では673 Kで1時間保持し、炉冷により直線形状を記憶させ、試験片とした。試験片は一樣形状の線材であった。回転曲げ試験においてはチャック間距離は50~240 mm、全長は190~380 mmであった。試験片の長さは、曲げの曲率が大きいほど短くした。試験片の逆変態終了温度 A_f は約323 Kであった。

2・2 実験装置 引張りによる負荷・除荷および加熱・冷却の繰返し試験に用いた実験装置は(株)島津製作所製の形状記憶合金特性試験装置であった⁽¹⁵⁾。この装置は恒温槽を取付けた引張試験機と温度制御装置とから構成されていた。試験片の加熱はヒータで加熱した圧縮空気を、冷却については液化炭酸ガスを吹き付けることによって行った。温度は試験片の表面に貼り付けた直径0.1 mmの熱電対で測定した。試験片の伸びは標点距離20 mmのひずみゲージ式伸び計で測定した。

回転曲げによる力学的トレーニング、温度変化および疲労の試験に用いた実験装置は空気中⁽¹³⁾および水中⁽¹⁴⁾での試験用に開発された装置であった。この装置は回転曲げを与える駆動部と温度を一定に保つ恒温槽から構成されていた。この装置では、ある一定の温度に保持した恒温槽内において、SMA線材をある一定の曲率に曲げ、その曲げた形状(空間内の配置)を保持し、試験片をある一定の速度で回転させた。そして破断繰返し数を測定した。試験片の一端はモータに取付け、他端は自由に回転した。試験片表面の最大曲げひずみは支点間の中央の曲率半径より求めた。破断はすべて支点間の中央部分で生じた。破断した場合には、破断箇所の曲率半径より最大曲げひずみを求めた。空気中での室温の場合には、温度は制御せず、自然放熱状態であった。

2・3 実験条件 TiNi SMA線材の繰返し変形特性、および回転曲げ疲労特性に対するひずみ振幅、温度、回転速度などの影響を調べるために、以下に示す5種類の試験を行った。

(1) 繰返しサーモメカニカル試験

はじめに逆変態開始温度 A_s 点以下の温度293 Kで最大ひずみ ϵ_m まで引張った後、完全除荷した。その後、無負荷のもとで A_f 点以上の353 Kまで加熱し、続いて293 Kまで冷却した。このサーモメカニカル過程を1サイクルとして、これを10回繰返した。負

荷および除荷過程でのひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ は0.4%/min、加熱および冷却の速度は約7 K/minとした。 ϵ_m は1%と8%とした。

(2) 繰返し負荷・除荷試験

A_f 点以上の温度 T を一定に保った状態で最大ひずみ ϵ_m まで引張った後に完全除荷する過程を1サイクルとして、これを10回繰返した。負荷・除荷でのひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ は一定にした。実験では $T=333$ K, $\epsilon_m=1\%$, $\dot{\epsilon}=0.4\%/min$ および $T=353$ K, $\epsilon_m=8\%$, $\dot{\epsilon}=1\%/min$ とした。

(3) 回転曲げトレーニングの影響試験

はじめに一定温度 T_w の水中で回転曲げ試験により、繰返し数 N までの力学的トレーニングを行った。このトレーニングにおいては試験片表面の最大曲げひずみ(以下、ひずみ振幅)を0.6%とし、一定の回転速度を500 rpmとした。このひずみ振幅は全ひずみを表す。 T_w は303 Kと353 Kとした。 N は $1\sim 10^7$ 回とした。 $T_w=353$ Kの場合には、 N が 10^4 回を越えると試験片が破断するので、それ以上の繰返しは行わなかった。力学的トレーニングを施した後、一定温度 T で最大ひずみ1%までの負荷・除荷の単軸引張試験を行った。負荷・除荷でのひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ は0.4%/minとした。 T は303 K, 323 K, 353 Kとした。

(4) 空気中での回転曲げによる温度上昇試験

空気中において室温で自然放熱状態での回転曲げ試験において、一定のひずみ振幅 ϵ_a および回転速度 n を与え、所定の繰返し時間における試験片表面の温度を測定した。試験中、試験片の中央部と自由端側のチャック部近傍にサーミスタ温度計を軽く接触させ、2箇所の温度を測定した。試験片のチャック部近傍はほぼ直線であった。この部分では摩擦抵抗により温度が上昇した。この温度上昇は n に依存し、最大で数Kであった。このチャック部近傍の温度と試験片中央部の温度との差異により、中央部分の繰返し変形に基づく温度上昇を求めた。 ϵ_a は1~2%とし、 n は100~1000 rpmとした。

(5) 回転曲げ疲労試験

空気中および水中において、一定のひずみ振幅 ϵ_a 、温度 T および回転速度 n のもとで回転曲げ疲労試験を行い、破断繰返し数を測定した。種々の ϵ_a 、 T および n の値について試験を行い、これらの因子の疲労寿命に対する影響を調べた。

3. 実験結果および考察

実験データの処理において、応力およびひずみは公称応力および公称ひずみで整理した。

3・1 引張りでの繰返し変形

(1) SME の繰返し特性

繰返しサーモメカニカル試験で得られた応力-ひずみ曲線を図1に示す。図中の N は繰返し数を表す。

最大ひずみ $\epsilon_m=1\%$ の場合の図1(a)からわかるように、負荷過程において約 60 MPa の応力 σ_R で R 相変態(RT)による降伏が生じる。この R 相変態に伴う降伏は約 0.15% のひずみで開始し、約 0.8% のひずみで終了する。除荷後に約 0.65% の残留ひずみが現れるが、加熱による逆変態でひずみはなくなる。この現象が SME である。R 相変態に伴う応力-ひずみ曲線の形は $N=10$ までの繰返しでほとんど変化しない。

これに対して $\epsilon_m=8\%$ の場合の図1(b)からわかるように、 $N=1$ の負荷過程において R 相変態(RT)による降伏が生じた後、約 280 MPa の応力 σ_M で M 変態(MT)による降伏が生じる。M 変態応力 σ_M は繰返しに伴い減少する。 $N=1$ から 2 までの σ_M の減少量は大きく、 $N=5\sim 10$ の間での減少量とほぼ同じである。このように σ_M の減少量は N の増加とともに小さくなる。したがって、M 変態域での SME を繰返し

(a) $\epsilon_m=1\%$

(b) $\epsilon_m=8\%$

Fig. 1 Stress-strain curves on SME

利用する場合に、一定の繰返し特性を得るためには実用前に力学的トレーニングを施すことが有効である。一方、負荷の初期に現れる R 相変態に伴うひずみは N の増加とともに小さくなり、 $N=10$ ではほとんど現れなくなる。

(2) PE の繰返し特性

繰返し負荷・除荷試験で得られた応力-ひずみ曲線を図2に示す。図中の N は繰返し数を表す。

最大ひずみ $\epsilon_m=1\%$ の場合の図2(a)からわかるように、負荷過程において約 200 MPa の応力 σ_R で R 相変態に基づく非線形ひずみが現れ、除荷過程で逆変態により消滅し、応力-ひずみ曲線は小さなヒステリシスループを描く。この現象が PE である。ヒステリシスループの幅は非常に狭く、負荷曲線と除荷曲線の間隔は 20 MPa 以下である。R 相変態に伴う応力-ひずみ曲線の形は $N=10$ までの繰返しでほとんど変化しない。

これに対して、 $\epsilon_m=8\%$ の場合の図2(b)からわかるように、 $N=1$ の負荷過程において M 変態による降伏がオーバーシュートで開始し、約 600 MPa の応力 σ_M で降伏段が現れ、7% のひずみで M 変態は終了する。除荷過程においては逆変態による降伏が約 250 MPa の応力 σ_A で生じ、変態ひずみは消滅する。図1(b)で

(a) $\epsilon_m=1\%$, $T=333\text{ K}$

(b) $\epsilon_m=8\%$, $T=353\text{ K}$

Fig. 2 Stress-strain curves on PE

の SME の場合と同様に, PE の場合にも繰返しで σ_M は減少し, σ_M の減少量は N の増加とともに小さくなる。したがって, 一定の繰返し特性を得るためには, PE の場合にも実用前の力学的トレーニングが有効である。

図 1 と図 2 の降伏応力の比較からわかるように, R 相変態および M 変態に伴う降伏応力 σ_R および σ_M は温度 T の上昇とともに高くなる。これらの関係は次式で表される⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾。

$$\sigma_R = C_R(T - R_s) \dots\dots\dots (1)$$

$$\sigma_M = C_M(T - M_s) \dots\dots\dots (2)$$

ここで, R_s および M_s はそれぞれ無応力下での R 相変態と M 変態の開始温度を表す。係数 C_R と C_M は材料パラメータである。本研究で用いた TiNi SMA については $C_R = 15 \text{ MPa/K}$ および $C_M = 6 \text{ MPa/K}$ である。式(1)と式(2)は, 応力-温度平面上での直線を表し, 変態の開始線を表す。図 1 と図 2 の検討から認められたように, 繰返し変形により σ_M は減少する。このことは, 一定温度での繰返し変形により M 変態開始線が低応力側に移動し, また一定応力下での加熱・冷却の繰返し変形により M 変態開始線は高温側へ移動することを意味する。したがって, SMA 素

子設計する場合にはこの点を考慮することが必要である。すなわち, 繰返し作動する SMA 素子について, 繰返しに伴う M 変態線の移動をあらかじめ見込んで作動力あるいは作動温度を設定するか, あるいはあらかじめ力学的トレーニングを施して作動特性を設定することが重要である。

3.2 回転曲げを受ける場合の変形特性

(1) 曲げによる応力分布と変態領域

3.1 節の図 1 および図 2 で観察されたように, TiNi SMA の応力-ひずみ関係は温度および最大ひずみに依存して著しく異なる。図 1 の応力-ひずみ曲線で見たとおり, A_s 点以下での温度で負荷した場合には最初に R 相変態が応力 σ_R のもとでひずみ ε_{Rs} で開始し, ε_{Rf} で終了し, その後 M 変態が応力 σ_M のもとでひずみ ε_{Ms} で開始し, ε_{Mf} で終了する。したがって, 線材を曲げた場合の横断面内の応力分布と変態領域を模式的に示すと図 3 のようになる。図 3 では引張側の負荷時の応力分布のみを示す。圧縮側の応力分布と応力が反転した場合の応力-ひずみ関係の詳細は前報⁽¹³⁾に示した。図 3 に示すように, 線材の内部は母相の弾性域であり, 曲げひずみの増加に伴い変態領域が表面部分から中心部分に向かって進展する。表面部では, 曲げ

Fig. 3 Stress distribution and transformed region

Fig. 4 Stress-strain curves under simple tension after rotating bending training with N cycles at $T_w = 303 \text{ K}$

の曲率の増加とともに最初に R 相変態が現れ、続いて M 変態が生じる。この曲がった形状を保持したまま 1 回転することにより線材の表面要素は引張りと圧縮の変態を受ける。

(2) 回転曲げトレーニングを施した場合の変形

回転曲げトレーニングを施した後の引張試験で得られた応力-ひずみ曲線を図 4 および図 5 に示す。図中の N は回転曲げトレーニングの繰返し数を表す。トレーニングでのひずみ振幅 ε_a は 0.6% であるので、線材の表面要素は引張りと圧縮の R 相変態を繰返し受ける。トレーニングにおける R 相変態応力 σ_R は $T_w=303\text{ K}$ では 60 MPa であり、 $T_w=353\text{ K}$ では 550 MPa である。

図 4 からわかるように、温度 $T=303\text{ K}$ では除荷後

Fig. 5 Stress-strain curves under simple tension after rotating-bending training with N cycles at $T_w=353\text{ K}$

Fig. 6 Dependence of temperature rise on time during rotating-bending in air

に 0.5% の残留ひずみが現れ、SME が観察される。 $T=323\text{ K}$ では除荷ひずみがほぼ零であり、ちょうど PE が開始する。 $T=353\text{ K}$ では $\sigma_R=550\text{ MPa}$ で変態ひずみの小さい PE が現れ、残留ひずみは生じない。R 相変態で生じる変態ひずみの大きさは温度が高くなるほど小さい⁽¹⁸⁾。図 4 および図 5 に示したいずれの温度の場合にも、繰返し数が増加しても応力-ひずみ曲線はほとんど変化しない。したがって、高サイクルで作動する SMA 素子の場合には、R 相変態を利用すれば繰返しで一定の作動特性が得られることが認められる。特に、SME を利用する場合には $N=10^7$ 回でも特性は変化しない。一方、3・4 節での検討でわかるように、温度が高い範囲での PE を利用する場合には、 σ_R が高いために破断繰返し数は小さくなり、疲労限度は低下することに注意する必要がある。

3・3 空気中での回転曲げによる温度上昇

回転速度 $n=300\text{ rpm}$ でひずみ振幅 ε_a が異なる場合の空気中での回転曲げ試験で得られた、試験片の温度上昇 ΔT と時間 t との関係を図 6 に示す。図 6 からわかるように、時間の短い範囲内で ΔT は急激に増加し、 $t=100\sim 200$ 秒で一定値に飽和する。 ΔT の値および ΔT が飽和するまでの時間は、ともに ε_a および n が大きいほど大きい。図 1 および図 2 の応力-ひずみ曲線で負荷と除荷の囲む面積は単位体積当たりの散逸仕事 E_d を表す。この E_d に基づき ΔT が現れる。 ΔT は初期のサイクルでは増加するが、 E_d が線材の熱伝導および空気中への放熱の熱量と釣り合う状態になると温度は一定値に飽和する。

一定時間経過後に飽和した温度上昇 ΔT_m とひずみ振幅 ε_a との関係を図 7 に示す。図 7 では、各実験点を各種の記号で示し、回転速度 n が同じ実験点を実線

Fig. 7 Dependence of maximum temperature rise ΔT_m on strain amplitude ε_a

で結んでいる。図7からわかるように、いずれの n の場合にも ε_a が大きいほど ΔT_m は大きい。上述のように散逸仕事 E_d はヒステリシスループの囲む面積であり、変態に伴う応力とひずみの積で定まる。したがって、 ε_a が大きいほど E_d は大きい。また、図1でみたように1%以下の ε_a では低い変態応力 σ_R でR相変態が生じるのに対して、 ε_a が1%を越えると高い変態応力 σ_M でM変態が生じる。したがって、 ε_a が大きいほど E_d は著しく大きくなり、対応して ΔT_m が大きくなる。

最大温度上昇 ΔT_m と回転速度 n との関係を図8に示す。図8では、ひずみ振幅 ε_a が同じ実験点を実線で結んである。図8からわかるように、いずれの ε_a の場合にも n が大きいほど ΔT_m は大きい。 ΔT_m の増加割合は n が大きくなると減少する。 ΔT_m の n への依存性は次の理由で生じる。 n に比例してひずみ速度は大きくなる。ひずみ速度が大きくなるとM変態応力 σ_M は高くなり、逆変態応力は低くなり、このために E_d が大きくなる⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾。本実験において $n=500$ rpm で $\varepsilon_a=1.5\%$ の場合、 ε_a を1/4サイクルの所要時間で割ると、線材表面における平均のひずみ速度は3000%/minである。このように、 n が大きい場合には σ_M が高くなり、 E_d は大きく、このために ΔT_m が大きい。また、ひずみ速度が小さい場合には等温的に変形が生じるが、ひずみ速度が大きい場合には断熱的に変形が生じる。 ΔT_m の増加割合は n が大きくなると減少するのは、 n が大きくなると変形は断熱的になり、ひずみ速度の影響が飽和することによると考えられる。

3.4 空気中と水中での疲労特性

(1) 疲労寿命特性

一定回転速度 $n=500$ rpm のもとで各試験温度 T

Fig. 8 Dependence of maximum temperature rise ΔT_m on rotational speed n

について、空気中と水中で行った回転曲げ疲労試験で得られたひずみ振幅 ε_a と破断繰返し数 N_f との関係を図9に示す。図9においては、実験点を各種の記号で示し、それらを実線で結んである。また、 $N_f=10^6$ 回および 10^7 回で矢印を付けた場合には、試験片は破断していない。

図9からわかるように、寿命曲線の傾きは ε_a の大きい領域では大きく、 ε_a の小さい領域では小さい。寿命曲線の折れ曲がり点は $\varepsilon_a=0.5$ から1%あるいは $N_f=10^4$ から 10^5 回の範囲にある。 ε_a が折れ曲がり点以上の大ひずみ振幅の領域では寿命曲線は直線で近似でき、その傾きは大きい。一方、 ε_a が折れ曲がり点以下の小ひずみ振幅の領域では N_f は急激に増加し、曲線は水平に近づく。この長寿命域はR相変態のひずみ範囲にある。したがって、TiNi SMA の応用においては、 ε_a がR相変態域で使用すれば 10^7 回以上の疲労寿命が得られる。

ε_a が寿命曲線の折れ曲がり点以上の大ひずみ振幅

(a) $T=303$ K

(b) $T=333$ K

(c) $T=353$ K

Fig. 9 Strain-life curves in air and in water at $n=500$ rpm

の領域は、R 相変態の終了域あるいは M 変態の開始域にある。この領域での直線の傾きを検討する。直線の傾きは空気中と水中で異なるが、両者ともいずれの温度に関してもほぼ同じ値をとる。この直線関係を金属の低サイクル疲労で成立する Manson-Coffin の法則に対応して

$$\epsilon_a \cdot N_f^\beta = c \quad \dots\dots\dots (3)$$

で近似すると、べき指数 β は空気中では 0.24 であり、水中では 0.5 である。水中における $\beta=0.5$ は常用金属の値とほぼ同じである。 β が小さいということは、 ϵ_a が大きくなると N_f がより小さくなることを表す。空気中と水中とで β の値が異なる理由を以下に考察する。

3・3 節で検討したように、 ϵ_a が大きいほど E_d は大きく、繰返し変形に伴う温度上昇 ΔT は大きい。式 (1) および式 (2) からわかるように、温度が $\Delta T=10$ K 上昇すれば、 σ_R は $\Delta\sigma_R=150$ MPa 大きくなり、 σ_M は $\Delta\sigma_M=60$ MPa 大きくなる。線材表面での応力が高くなれば疲労き裂の発生が早くなり、 N_f は小さくなる。空気中では ϵ_a が大きいほど ΔT は大きく、 N_f は小さくなり、このために β が小さくなる。これに対して、常用金属では室温付近の温度が 10 K 上昇しても塑性変形特性は SMA ほど敏感には変化しない。また、水中では繰返し変形に基づき発生した熱はすぐに水に伝達され、拡散するので試験片の温度は上昇しない。このために水中では N_f は大きく、 β は大きい。このような温度上昇の相違に基づく表面での曲げ応力の差が、高ひずみの低サイクル領域での水中と空気中での疲労寿命の差として現れている。

一方、疲労寿命曲線の折れ曲がり点近傍および ϵ_a がそれ以下の小ひずみ振幅の領域では、 $T=333$ K と 353 K の場合には水中のほうが N_f が小さい。この小

ひずみ振幅の領域の空気中においては、 ΔT は小さく、応力の増加の効果はあまり現れない。水中におけるこの高サイクル疲労の領域では、普通の金属の疲労⁽²¹⁾と同様に、き裂の成長に伴いき裂先端でのくさび効果や水素脆化割れによるき裂の進展が優先的になり、このために N_f が小さくなることが考えられる。この点の詳細については今後の研究課題である。一方、空気中においては、このような腐食疲労は現れないので N_f が大きい。なお、上述のように、空気中において ϵ_a が大きい場合には、腐食疲労の影響が顕著に現れる前に、 ΔT の増加に基づく応力の増加の影響が優先的に支配し、小さい N_f で破断するものと考えられる。空気中と水中における疲労破壊の機構については、破面の観察を現在行っており、次報で検討する。

(2) 回転速度の影響

空気中および水中において、温度が一定で回転速度が異なる場合の回転曲げ疲労試験により得られた低サイクル疲労域でのひずみ振幅 ϵ_a と破断繰返し数 N_f との関係を図 10 に示す。図 10 では各回転速度の試験で得られた結果を各種の記号で示している。また、図 10(a) の空気中の場合には、実験点を実線で結んでいる。図 10 からわかるように、低サイクル疲労の領域ではいずれの回転速度 n に関しても ϵ_a が大きいほど N_f は小さく、 ϵ_a と N_f の関係はほぼ直線で表される。直線の傾き β はいずれの n に関してもほぼ同じであり、空気中では $\beta=0.24$ であり、水中では $\beta=0.5$ である。また、空気中では n が大きいほど N_f は小さいのに対して、水中では n の違いによる特定の傾向は認められない。空気中での n の影響については、次のように考えられる。この空気中での実験では温度が上昇した場合、外部から冷風を送り、一定温度 $T=333$ K を維持した。3・3 節での検討から明かなように、室

(a) In air

(b) In water

Fig. 10 Influence of rotational speed n on fatigue life

温での試験片の温度上昇 ΔT は n が大きいほど大きく、繰返ししの初期のサイクルにおいて上昇する。空気中では、温度はサーミスタ温度計で測定しており、試験片の表面と点接触している。したがって、送風により保持された温度が一定であっても、試験片の内部の温度は上昇していたと推察される。温度上昇 ΔT により変態応力 σ_M および σ_R は高くなる。 n が大きいほど短時間で散逸仕事 E_d を受ける回数が多く、対応して ΔT が大きく、このために N_f は小さくなる。水中においては、 ΔT の影響が現れないので、疲労寿命曲線は n の影響を受けない。

4. 結 言

TiNi SMA 線材の繰返し変形特性と回転曲げ疲労特性を、空気中と水中において種々のひずみ振幅、温度および回転速度について実験的に調べた。得られた結果の要点は以下のとおりである。

(1) 繰返し単軸引張りを受ける場合の SME と PE は、最大ひずみが R 相変態域にある場合には繰返して変化しないが、最大ひずみが M 変態域にある場合には繰返し初期に大きく変化し、その後一定の特性を示す。

(2) ひずみ振幅が R 相変態域にある場合、疲労寿命は 10^7 回以上になり、 10^7 回までの繰返し変形を受けても線材の変形特性は変化しない。したがって、SMA 素子を高サイクルで作動させる場合には、R 相変態のひずみ領域で使用する必要がある。

(3) ひずみ振幅がマルテンサイト変態域にある場合、破断繰返し数は 10^5 回以下になる。また、温度が高いほど疲労寿命は短くなる。

(4) 水中で回転曲げを受ける場合、疲労寿命には回転速度の影響は現れない。しかし、空気中では回転速度が大きいほど疲労寿命は短くなる。したがって、空気中で SMA 素子を高速度で作動させる場合には、疲労寿命が短くなることに注意する必要がある。

終わりに、本研究を行うに当たり実験に協力された当時の愛知工業大学の学生諸君、ご支援をいただいた

木村君男教授ならびに岩永弘之教授、ご討論をいただいた東京都立科学技術大学の田中喜久昭教授ならびに筑波大学の宮崎修一助教授に深く感謝する。また、文部省科学研究費補助金一般研究(C)および池谷科学技術振興財団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) 舟久保熙康編, 形状記憶合金, (1984), 34, 産業図書.
- (2) 鈴木雄一, 実用形状記憶合金, (1987), 33, 工業調査会.
- (3) 田中喜久昭・戸伏壽昭・宮崎修一, 形状記憶合金の機械的性質, (1993), 30, 養賢堂.
- (4) Otsuka, K. (Duerig, T. W., Melton, K. N., Stockel, D. and Wayman, C. M. 編), *Engineering Aspects of Shape Memory Alloys*, (1990), 36-45, Butterworth-Heinemann.
- (5) Miyazaki, S. and Otsuka, K., *Met. Trans., A*, **17**(1986), 53-63.
- (6) Miyazaki, S. and Otsuka, K., *Phil. Mag., A*, **50-3**(1984), 393-408.
- (7) 戸伏壽昭・林萍華・服部丈晴・牧田昌之, 機論, **59-562**, A (1993), 1497-1504.
- (8) Ginell, W. S., McNichols, Jr., J. L. and Cory, J. S., *Mech. Eng.*, **101-5**(1979), 28-33.
- (9) 宮崎修一, 材料, **39-445**(1990), 1329-1339.
- (10) Melton, K. N. and Mercier, O., *Acta Met.*, **27**(1979), 137-144.
- (11) McNichols, Jr., J. L. and Brookes, P. C., *J. Appl. Phys.*, **52-12**(1981), 7442-7444.
- (12) 戸伏壽昭・木村君男・岩永弘之・Cahoon, J. R., 機論, **55-509**, A (1989), 165-169.
- (13) 戸伏壽昭・林萍華・伊貝亮・山田真也, 機論, **61-591**, A (1995), 2355-2361.
- (14) 戸伏壽昭・伊貝亮・山田真也・林萍華, 機論, **62-599**, A (1996), 1543-1548.
- (15) 戸伏壽昭・田中喜久昭・木村君男・堀達哉・沢田隆之, 機論, **57-543**, A (1991), 2753-2759.
- (16) Tanaka, K., Kobayashi, S. and Sato, Y., *Int. J. Plasticity*, **2**(1986), 59-72.
- (17) 林萍華・戸伏壽昭・田中喜久昭・服部丈晴・内野敬一, 機論, **50-569**, A (1994), 126-133.
- (18) 沢田隆之・戸伏壽昭・木村君男・服部丈晴・田中喜久昭, 機論, **58-553**, A (1992), 1696-1702.
- (19) 林萍華・戸伏壽昭・田中喜久昭・服部丈晴, 機論, **50-576**, A (1994), 1837-1842.
- (20) Shaw, J. A. and Kyriakides, S., *J. Mech. Phys. Solids*, **43-8**(1995), 1243-1281.
- (21) 大谷隆一・駒井謙治郎編, 環境・高温強度学, (1984), 82, オーム社.