TiNi 合金の超弾性細管および高弾性細線の曲げ疲労特性*

戸 伏 壽 昭^{*1}, 古 市 裕 司^{*1}
櫻 木 稔 巳^{*2}, 杉 本 義 樹^{*3}Bending Fatigue Properties of a Superelastic Thin Tube and
a Highelastic Thin Wire of TiNi AlloyHisaaki TOBUSHI^{*4}, Yuji FURUICHI,
Toshimi SAKURAGI and Yoshiki SUGIMOTO^{*4} Department of Mechanical Engineering, Aichi Institute of Technology,
1247 Yachigusa, Yakusa-cho, Toyota-shi, Aichi, 470-0392 Japan

Tensile deformation properties and pulsating-plane bending, alternating-plane bending and rotating-bending fatigue properties of a superelastic thin tube (SE-tube) and a highelastic thin wire (HE-wire) of TiNi alloy were investigated experimentally. The main results obtained are summarized as follows. (1) The stress-strain curve of the SE-tube in tension draws a superelastic hysteresis loop and elastic modulus is 35 GPa. Therefore, the SE-tube is superior as a medical catheter tube with flexibility and shape recovery. The stress-strain curve of the HE-wire is close to a straight line up to strain of 4% and stress of 1 500 MPa and elastic modulus is 50 GPa. Therefore, the HE-wire is superior as a medical guide wire with flexibility, high pushability and torque transmission performance. (2) With respect to fatigue properties of the SE-tube and the HE-wire in air, the fatigue life in pulsating-plane bending is longer than that in alternating-plane bending and rotating bending. The difference in the fatigue life between alternating-plane bending and rotating bending is small. The relationship between maximum bending strain and the number of cycles to failure in the region of low-cycle fatigue can be expressed by a power function in every bending fatigue. The fatigue life in the body is longer than that in air. (3) The maximum bending strain at the fatigue limit of the SE-tube is 0.8%-1.0% which is close to a starting strain of the stress-induced martensitic transformation. The maximum bending strain at the fatigue limit of the HE-wire is 0.7%-0.8%.

Key Words: Shape-Memory Alloy, Fatigue, Bending, Superelasticity, Highelasticity, Tube, Plane Bending, Rotating Bending

1. 結 言

形状記憶合金 (shape memory alloy, SMA) は形状記憶効果 (shape memory effect, SME) と超弾性 (superelasticity, SE) の2つの特性を示す⁽¹⁾⁽⁹⁾。SMEでは大きな回復変形と回復応力が利用できる。SEでは大きな回復ひずみおよびひずみエネルギーの貯蔵と散逸仕事を利用することができる。SMAではこれらの機能を有する為にスマート材料あるいはインテリジェント材料としての応用が期待されている。現在まで多くの SMA が開発されているが、疲労強度などの機械的性質の優れた TiNi SMA が最も多く実用化されている。

上記の特性を医療分野で応用するために、カテーテ

ルチューブとして SE 細管およびガイドワイヤーとして高弾性 (highelasticity, HE) 細線が開発されている。ガイドワイヤーとしての HE 細線は応力-ひずみ曲線の直線性と狭いヒステリシスループ幅、および体内への挿入時の高い屈曲抵抗 (high pushability) が要求される。これらの応用において、SE 細管および HE 細線は主に平面曲げを受ける。医療応用においてこれらの素子は繰返し変形を受けるので、それらの安全性と信頼性を評価する上で、材料の疲労特性は非常に重要である⁽⁶⁾⁽⁷⁾。これらの材料の疲労特性については、回転曲げ疲労特性は調べられている⁽⁸⁾が、実際の使用状態に対応する平面曲げに関する疲労特性の研究報告はない。

本研究においては、TiNi 合金の SE 細管および HE 細線の平面曲げ疲労特性を明らかにする。このために、まず材料の基本変形特性として、引張変形特性を示す。次に、平面曲げ疲労特性を調べるために、片振りと同振りの平面曲げ疲労試験を行い、疲労寿命特性を明らかにする。また、破断面の観察により、疲労き裂の進

* 原稿受付 2008 年 6 月 23 日。

^{*1} 正員, 愛知工業大学工学部 (〒470-0392 豊田市八草町八千草 1247)。^{*2} 正員, アイコクアルファ(株) (〒495-8501 稲沢市祖父江町森上本郷 11-4-1)。^{*3} 学生員, 愛知工業大学大学院工学研究科。

E-mail: tobushi@aitech.ac.jp

展過程を調べる。さらに、平面曲げと回転曲げの疲労寿命特性を比較し、両者の関係を明らかにする。なお、TiNi 合金細線の曲げ疲労寿命について、空気中での疲労寿命は液体中での疲労寿命より短く、また繰返し速度が高いほど疲労寿命は短い⁽⁹⁾。したがって、実際に体内で使用する場合の疲労寿命は本研究において空気中での試験で得られる疲労寿命より長くなることを指摘しておく。

2. 実験方法

2・1 供試材および試験片 供試材は古河テクノマテリアル㈱の Ti-50.85at%Ni 合金で超弾性を示す細管 NT-E9 (SE-tube) と高弾性を示す細線 FHP-NT (HE-wire) であった。SE-tube の外径は 0.9mm、内径は 0.7mm であった。HE-wire の外径は 0.5mm であった。SE-tube は 803K で 2~3 分間の熱処理により直線形状を記憶した。HE-wire は高弾性特性を得るために、機械的に直線状に矯正して作製した。示差走査熱量測定 DSC 試験で求めた SE-tube の変態温度は $M_s=311\text{K}$, $M_f=268\text{K}$, $A_s=271\text{K}$, $A_f=321\text{K}$ であった。HE-wire の変態温度については、DSC 試験では明瞭な相変態のピークは確認できなかった。試験片は一樣形状の細管と細線であった。試験片の長さは引張試験では 100mm であった。曲げ疲労試験での試験片の長さは 70~150mm であり、曲げひずみが大きいほど短い試験片を用いた。

2・2 実験装置 引張試験には形状記憶合金特性試験装置⁽¹⁰⁾を用いた。試験片の変位は標点距離 20mm の伸び計により測定した。

疲労試験には片振り平面曲げ疲労試験装置⁽¹¹⁾、両振り平面曲げ疲労試験装置⁽¹²⁾および回転曲げ疲労試験装置⁽⁹⁾を用いた。実験では試験片表面の最大曲げひずみを規定し、一定の繰返し速度で曲げ疲労試験を行い、破断繰返し数を求めた。試験片の破断面の観察には走査電子顕微鏡 (SEM) を用いた。

2・3 実験手順 引張試験は一定のひずみ速度の下で行った。

Fig. 1 Stress-strain curve of SE-tube

片振りと両振り平面曲げおよび回転曲げの疲労試験は、室温の大気中で行った。試験片は支点間の中央部で破断した。試験片表面の最大曲げひずみ $\epsilon_{\max}$ は破断部の曲率半径より求めた。繰返し速度 f は 8.33Hz (500cpm) とした。最大曲げひずみに対する最小曲げひずみの割合で規定されるひずみ比は、片振り平面曲げでは 0 であり、両振り平面曲げおよび回転曲げでは -1 である。

3. 実験結果および考察

3・1 超弾性細管と高弾性細線の引張変形特性

3・1・1 超弾性細管の応力 - ひずみ関係 超弾性細管 SE-tube について温度 $T=303\text{K}$ でひずみ速度 $1.67 \times 10^{-4}\text{s}^{-1}$ 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、応力 - ひずみ曲線の初期の傾きで定まる弾性係数は 35GPa である。この値は体温においても同じであり、ステンレス鋼の弾性係数 190GPa の 18% である。したがって、SE-tube の曲げ剛性はステンレス鋼に比べて低く、柔軟性が必要な医療用カテーテルチューブの性能に優れている。また、ひずみが 1% を超えると応力 - ひずみ曲線の傾きは小さくなり、1.5% を超えると応力水平段が現れる。水平段の応力 σ_M は 350MPa である。この応力水平段は応力誘起マルテンサイト変態 (stress-induced martensitic transformation, SIMT) により現れる。この水平段の応力 σ_M の温度 T への依存性を表す特性値 C_M は $C_M = \Delta\sigma_M / \Delta T = 6 \text{ MPa/K}$ であり、体温では $\sigma_M = 386\text{MPa}$ である。この σ_M はステンレス鋼の降伏応力と同じレベルである。したがって、SE-tube では大きなひずみが一定応力下で生じるので、曲げによる大きなたわみが容易に得られる。さらに、除荷過程では応力 160MPa の水平段が逆変態により現れ、ひずみは回復し、超弾性 (SE) の特性を示す。したがって、SE-tube は医療用カテーテルチューブに必要な柔軟性および形状回復性に優れていることがわかる。一方、負荷・除荷で応力 - ひずみ曲線は大きなヒステリシスループを描く。このヒステリ

Fig. 2 Stress-strain curve of HE-wire

シスループで囲まれた部分の面積と除荷曲線の下面積は、それぞれ単位体積当りの散逸仕事とひずみエネルギーを表す。したがって、SE-tube は防振材料およびエネルギー貯蔵材料としての機能にも優れている。

3・1・2 高弾性細線の応力 - ひずみ関係 温度 $T=303\text{K}$ でひずみ速度 $1.67 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ の引張試験により得られた高弾性細線 HE-wire の応力 - ひずみ曲線を図 2 に示す。HE-wire の応力 - ひずみ曲線は温度およびひずみ速度にほとんど依存しない。図 2 からわかるように、初期の応力 - ひずみ曲線の傾きで定まる弾性係数は 50GPa である。この値はステンレス鋼の弾性係数 190GPa の 26% である。したがって、HE-wire の曲げ剛性はステンレス鋼に比べて低く、柔軟性が必要な医療用ガイドワイヤーの性能に優れている。また、応力 - ひずみ曲線の傾きはひずみが大きくなると徐々に小さくなるが、応力 1500MPa でひずみ 4% まで明瞭な降伏点は現れず、直線からのずれは小さい。また、除荷によりひずみは回復する。負荷・除荷により応力 - ひずみ曲線はヒステリシスループを描くが、そのヒステリシスループの幅は小さい。ガイドワイヤーでは体内への挿入時に高い屈曲抵抗を有し、医師の手元での回転操作に対して患者の体内でガイドワイヤーの先端が同じ角度で回転すること（この特性はトルク伝達性と呼ばれる）が望ましい。実際に体内で使用する場合の曲げひずみは 2% 以下が多い。以上の考察からわかるように、HE-wire はこのような医療用ガイドワイヤーに必要な機能に優れている。

3・2 超弾性細管の曲げ疲労特性

3・2・1 平面曲げ疲労特性

(1) 疲労寿命特性 超弾性細管 SE-tube の片振り平面曲げ疲労試験および両振り平面曲げ疲労試験により得られた最大曲げひずみ $\epsilon_{\max}$ と破断繰返し数 N_f との関係を図 3 に示す。本研究では、 N_f が 1×10^6 回を超え

Fig. 3 Relationship between maximum bending strain and number of cycles to failure of SE-tube in plane-bending fatigue

る最大ひずみを疲労限度として扱う。

図 3 の疲労寿命曲線からわかるように、低サイクル疲労域では片振り平面曲げ疲労および両振り平面曲げ疲労ともに、 $\epsilon_{\max}$ の減少に伴い N_f は増大する。片振り平面曲げ疲労では $N_f=1 \times 10^4$ 付近で、両振り平面曲げ疲労では $N_f=1 \times 10^5$ 付近で疲労寿命曲線に折れ曲がりが見れ、この点以下の $\epsilon_{\max}$ で N_f は急に大きくなる。

低サイクル疲労域の疲労寿命曲線は一定の傾きを持った直線で近似することができる。したがって、この疲労寿命曲線は両対数グラフにおいて直線で表されるので、 $\epsilon_{\max}$ と N_f との関係は次式で表される。

$$\epsilon_{\max} \cdot N_f^{\beta} = \alpha \quad (1)$$

ここで、 β と α はそれぞれ $\log \epsilon_{\max} - \log N_f$ 曲線の傾きと $N_f=1$ での $\epsilon_{\max}$ の値を表す。片振り平面曲げ疲労での β は 0.66 であり、両振り平面曲げ疲労での β は 0.15 である。

片振り平面曲げ疲労と両振り平面曲げ疲労において材料の受ける疲労損傷の特性を考察する。このために、各々の試験において試験片の表面要素が 1 サイクル中

(a) Pulsating-plane bending

(b) Alternating-plane bending

Fig. 4 Stress-strain diagram of surface element of SE-tube in bending (Dissipated work W_d and recoverable strain energy E_r)

に受ける曲げの応力-ひずみ線図を図4に示す。図4では圧縮における応力-ひずみ関係が引張りの場合と対称であることを仮定している⁽¹³⁾。平面曲げでは曲げた細管の凸側の表面要素には引張応力が、凹側の表面要素には圧縮応力が作用する。図4に示すように、応力-ひずみ曲線のヒステリシスループで囲まれた面積は単位体積当りの散逸仕事 W_d を表す。1サイクルで受ける W_d の値は両振り平面曲げの方が片振り平面曲げの2倍になる。繰返し変形を受けると W_d により試験片表面要素の温度は高くなり⁽¹⁴⁾、この為、M変態応力も高くなり、疲労損傷はより大きくなる。この結果、片振り平面曲げに比べて両振り平面曲げの方が疲労寿命が短くなる。この効果は $\epsilon_{\max}$ が大きいほど大きくなるので、 $\epsilon_{\max}$ が大きくなると疲労寿命の差はより大きくなる。 $\epsilon_{\max}$ が1.5%以下になると、片振り平面曲げと両振り平面曲げにおける疲労寿命の差は小さくなり、 N_f はほぼ同じ値を示す。図1で観察された様に、ひずみ1~1.5%は応力水平段の開始前であり、応力-ひずみ曲線は直線に近くなり、片振りと両振りのいずれの場合にも W_d は非常に小さい。このため、疲労損傷に対する W_d の影響は現れず、片振り平面曲げと両振り平面曲げで疲労寿命の差は明瞭に現れない。

高サイクル疲労域では疲労寿命曲線は水平段で表される。疲労限度の $\epsilon_{\max}$ は片振り平面曲げ疲労では1.0%であり、両振り平面曲げ疲労では0.8%である。図1の応力-ひずみ曲線からわかるように、これらのひずみはSIMTの開始点近傍の値であり、このひずみ以上で応力-ひずみ曲線の傾きが小さくなる。したがって、これ以下のひずみでは主に弾性変形であり、SIMTに基づく W_d による疲労損傷は少なく、 N_f が大きくなる。疲労限度の詳細については、さらに多くの実験を行い、検討する必要がある。

本研究の疲労試験は空气中で $f=8.33\text{Hz}$ で行った。TiNi合金細線の曲げ疲労寿命は液体中の方が空气中より長く、また f の低いほうが長い。したがって、実際に体内で使用する場合の疲労寿命は本研究で得られた疲労寿命より長くなる。

(2) 破断面観察

(i) 片振り平面曲げ疲労 SE-tube の片振り平面曲げ疲労試験により得られた破断面のSEM写真を図5に示す。図5(a), (b), (c)はそれぞれ破断面の全体図、疲労き裂起点部の拡大図、最終破断部の拡大図を示す。この写真は $\epsilon_{\max}=1.38\%$ 、 $N_f=53494$ で得られた破断面である。

図5(a)からわかるように、曲げひずみが最大になる外表面から疲労き裂が発生し、内表面まで貫通し、そ

の後最終破断が円周に沿って両側で進展する。図5(a), (b)からわかるように、疲労き裂は外表面の一点から発生し、き裂の起点部から放射線状に進展し、き裂長さ120 μm の位置に疲労き裂進展領域と最終破断領域の扇形の境界がある。SMA細線の平面曲げ疲労の破断面では同様の外表面からの扇形の疲労き裂進展領域が明瞭に観察される⁽¹⁵⁾。図5(c)からわかるように、最終破断

(a) Whole fracture surface

(b) Fracture surface of fatigue-crack initiation part

(c) Fracture surface of unstable fracture

Fig. 5 SEM photographs of fracture surface for SE-tube in pulsating-plane bending fatigue

部では直径 $1\sim 5\mu\text{m}$ のディンプルが確認できる。

(ii) **両振り平面曲げ疲労** SE-tube の両振り平面曲げ疲労試験により得られた破断面のSEM写真を図6に示す。図6(a), (b), (c)はそれぞれ破断面の全体図、疲労き裂起点部の拡大図、最終破断面の拡大図を示す。この写真は $\varepsilon_{\text{max}}=1.05\%$, $N_f=7078$ で得られた破断面である。

図6(a)からわかるように、疲労き裂は内表面から発生し、外表面まで貫通し、その後最終破断が円周に沿って両側で進展する。図6(a), (b)からわかるように、疲

(a) Whole fracture surface

(b) Fracture surface of fatigue-crack initiation part

(c) Fracture surface of unstable fracture

Fig. 6 SEM photographs of fracture surface for SE-tube in alternating-plane bending fatigue

勞き裂は内表面の一点ではなく幅 $200\mu\text{m}$ の範囲で多数発生し、外表面に向かって進展する。両振り平面曲げにおいて疲労き裂が内表面から発生し外表面に向かって進展する過程は、図5で観察された片振り平面曲げにおいて疲労き裂が外表面から発生し内表面に向かって進展する過程と異なる。両振り平面曲げにおける疲労き裂の内表面からの発生と外表面への進展の過程は、回転曲げにおける疲労き裂の発生と進展の過程と同じである⁽⁸⁾。両振り平面曲げでは回転曲げと同様にひずみ比は-1である。疲労き裂が内面で発生するのは、内表面の粗さに起因している。細管の成形において、内側は拘束されていない為に内表面は粗い。細管の軸方向に沿って測った十点平均粗さは外表面では $3.4\mu\text{m}$ 、内表面では $11.2\mu\text{m}$ である。内表面の方が約3倍粗く、内表面の要素では局所的な応力集中がより大きくなる。この為、ひずみ比-1で引張りと圧縮の曲げ応力を交互に繰返し受ける両振り平面曲げと回転曲げの場合、疲労き裂は内表面で発生するものと考えられる。したがって、両振り平面曲げと回転曲げの疲労寿命を長くするためには、細管の内表面の粗さを小さくする成形法を開発する必要がある。

図6(c)からわかるように、最終破断部ではディンプルが確認でき、両側から進展してきた破面が出会った所で段差が現れる。

3・2・2 平面曲げと回転曲げの疲労寿命の比較

図3に示した片振りと両振りの平面曲げ疲労試験で得られた疲労寿命曲線と回転曲げ疲労試験で得られた疲労寿命曲線を同時に図7に示す。図7の疲労寿命曲線は最大曲げひずみ ε_{max} と破断繰返し数 N_f との関係で整理してある。

図7からわかるように、低サイクル疲労域においては片振り平面曲げの疲労寿命に比べて両振り平面曲げと回転曲げにおける疲労寿命は短く、 $\varepsilon_{\text{max}}=2\%$ では片振

Fig. 7 Relationship between maximum bending strain and number of cycles to failure of SE-tube in plane-bending and rotating-bending fatigues

り平面曲げでの疲労寿命は約5倍長い。ひずみ比は片振り平面曲げ疲労では0であり、両振り平面曲げ疲労と回転曲げ疲労では1である。両振り平面曲げ疲労と回転曲げ疲労では細管の表面要素は引張応力と圧縮応力を交互に受け、このために疲労寿命は短くなる。TiNi SMAの超弾性細線では $\epsilon_{\max}$ が大きくなると両振り平面曲げに比べて回転曲げ疲労の寿命の方が若干短くなる傾向にある⁽¹⁵⁾。図7のSE-tubeについては、 $\epsilon_{\max}$ の小さい範囲で回転曲げの疲労寿命が短い。回転曲げ疲労では全円周の表面要素が繰返しSIMTを受けるので、試験片の温度上昇が大きくなり、対応して変態応力も高くなり、疲労損傷が大きく、 N_f は小さくなると考えられる。 $\epsilon_{\max}$ が大きくなると疲労寿命は短くなり、両振り平面曲げと回転曲げの疲労寿命に明瞭な差は現れなくなる。図7において、3種類の疲労寿命のばらつきを比較すると、回転曲げと両振り平面曲げでのばらつきが大きい。回転曲げと両振り平面曲げでは内表面から疲労き裂が発生する。これは内表面の粗さに起因しており、表面粗さは不均質である。このため、疲労き裂の発生は一樣ではなく、疲労寿命のばらつきが大きくなると考えられる。

3・3 高弾性細線の曲げ疲労特性

3・3・1 平面曲げ疲労特性

(1) 疲労寿命特性 高弾性細線HE-wireの片振り平面曲げ疲労試験および両振り平面曲げ疲労試験により得られた最大曲げひずみ $\epsilon_{\max}$ と破断繰返し数 N_f との関係を図8に示す。

図8の疲労寿命曲線からわかるように、低サイクル疲労域では片振り平面曲げの疲労寿命の方が両振り平面曲げの疲労寿命より長い。いずれの場合にも、 $\epsilon_{\max}$ の減少に伴い N_f は増大する。片振り平面曲げ疲労試験では $N_f=4 \times 10^4$ 付近で、両振り平面曲げ疲労では $N_f=2 \times 10^4$ 付近で疲労寿命曲線に折れ曲がりが見られ、この点

Fig. 8 Relationship between maximum bending strain and number of cycles to failure of HE-wire wire in plane-bending fatigue

以下の $\epsilon_{\max}$ で N_f は急に大きくなる。

低サイクル疲労域の疲労寿命曲線は一定の傾きを持った直線で近似することができる。したがって、 $\epsilon_{\max}$ と N_f の関係はSE-tubeの場合と同様に式(1)で表すことができる。直線の傾きを表す β は片振り平面曲げ疲労では0.41であり、両振り平面曲げ疲労では0.30である。

高サイクル疲労域では疲労寿命曲線が水平段で表される。疲労限度の $\epsilon_{\max}$ は片振り平面曲げ疲労では0.8%であり、両振り平面曲げ疲労では0.7%である。図3で示したSE-tubeの疲労限度に比べてHE-wireの疲労限度の $\epsilon_{\max}$ は、片振り平面曲げと両振り平面曲げでそれぞれ0.2%と0.1%小さい。この理由は次のように考えられる。図1と図2の応力-ひずみ曲線で示したように、HE-wireの疲労限度の $\epsilon_{\max}$ は線形弾性の範囲にあり、同じ $\epsilon_{\max}$ では応力が高い。このためにHE-wireでは小さい $\epsilon_{\max}$ でも高い応力による疲労損傷が大きい。したがって、HE-wireの疲労限度の $\epsilon_{\max}$ の方が小さくなる。

図8において疲労寿命曲線を比較すると、片振り平面曲げ疲労の曲線が両振り平面曲げ疲労の曲線の上側(長寿命側)に位置する。図4の応力-ひずみ線図で示した様に、両振り平面曲げでは線材の表面要素には引張応力と圧縮応力が交互に作用する。1サイクルにおける応力-ひずみ曲線から規定されるひずみ変動幅 $\Delta\epsilon = \epsilon_{\max} - \epsilon_{\min}$ は片振り平面曲げ疲労に比べて両振り平面曲げ疲労の方が2倍大きい。したがって、両振り平面曲げ疲労の方が疲労損傷が大きく、短寿命になる。この為、両振り平面曲げ疲労の疲労寿命曲線は下側(短寿命側)に位置する。

HE-wireの応力-ひずみ曲線は温度およびひずみ速度にほとんど依存しない。したがって、本研究で得られた空気中で $f=8.33\text{Hz}$ における疲労寿命特性は実際に体内で使用する場合の疲労寿命特性と同じになる。

(2) 破断面観察 HE-wireの片振り平面曲げ疲労試験により得られた破断面のSEM写真を図9に示す。図9(a), (b), (c)はそれぞれ破断面の全体図、疲労き裂起点部の拡大図、最終破断部の拡大図を示す。この写真は $\epsilon_{\max}=1.5\%$ 、 $N_f=4846$ で得られた破断面を示す。

図9(a)からわかるように、曲げひずみが最大になる表面の一点から疲労き裂が発生し、疲労き裂は扇形に進展し、最終破断する。図9(a), (b)からわかるように、疲労き裂は扇形に進展し、き裂長さ $100\mu\text{m}$ で最終破断する。図9(c)からわかるように、最終破断部では直径 $1\sim 3\mu\text{m}$ のディンプルが確認できる。

両振り平面曲げ疲労および回転曲げ疲労についても、疲労き裂は表面の一点から発生し、扇形に進展し、最終破断する⁽⁸⁾。

3・3・2 平面曲げと回転曲げの疲労寿命の比較

図8に示した片振りと両振りの平面曲げ疲労試験で得られた疲労寿命曲線と回転曲げ疲労試験で得られた疲労寿命曲線を同時に図10に示す。図10の疲労寿命曲線は最大曲げひずみ $\epsilon_{\max}$ と破断繰返し数 N_f との関係で示す。

図10からわかるように、片振り平面曲げ疲労に比べて両振り平面曲げ疲労と回転曲げ疲労の N_f は小さく、

(a) Whole fracture surface

(b) Fracture surface of fatigue-crack initiation part

(c) Fracture surface of unstable fracture

Fig. 9 SEM photographs of fracture surface for HE-wire in pulsating-plane bending fatigue

$\epsilon_{\max}=2\%$ では片振り平面曲げでの疲労寿命は約10倍長い。また、両振り平面曲げと回転曲げ疲労における疲労寿命はほぼ同じになる。両振り平面曲げと回転曲げではひずみ比が共に-1であり、試験片表面要素には引張応力と圧縮応力が交互に作用する。このように表面要素は引張りと圧縮の変形を繰返し受けるため、両者の疲労寿命はほぼ同じになる。 $\epsilon_{\max}$ が大きくなると回転曲げの N_f のほうが若干小さくなる傾向にある。この傾向はTiNi SMAの超弾性細線でも現れる⁽¹⁵⁾。回転曲げ疲労では全円周の表面要素が同じ変形履歴を受け、 $\epsilon_{\max}$ が大きくなると疲労き裂の進展が容易になり、 N_f が小さくなると考えられる。

4. 結 言

TiNi合金の超弾性細管(SE-tube)および高弾性細線(HE-wire)の引張変形特性および片振りと両振りの平面曲げおよび回転曲げの疲労特性を実験的に調べた。得られた主要な結果は次の通りである。

- (1) 引張りにおけるSE-tubeの応力-ひずみ曲線は負荷・除荷でヒステリシスループを描き超弾性を示す。弾性係数は35GPaであり、ステンレス鋼のそれと比べて小さい。したがって、SE-tubeは医療用カテーテルチューブに必要な柔軟性と形状回復性に優れている。HE-wireの応力-ひずみ曲線はひずみ4%、応力1500MPaまで直線に近く、負荷・除荷でのヒステリシスループの幅が狭い。弾性係数は50GPaである。したがって、HE-wireは医療用ガイドワイヤーに必要な柔軟性、挿入時の高屈曲抵抗およびトルク伝達性に優れている。
- (2) SE-tubeの疲労寿命曲線を最大曲げひずみ $\epsilon_{\max}$ と破断繰返し数 N_f の関係で表すと、いずれの曲げ疲労においても、低サイクル疲労域の $\epsilon_{\max}$ と N_f の関係はべき関数で表される。ひずみ比0の片振り平面曲げの疲労寿命は長く、ひずみ比-1の両振り平

Fig. 10 Relationship between maximum bending strain and number of cycles to failure of HE-wire in plane-bending and rotating-bending fatigues

面曲げと回転曲げの疲労寿命は短い。両振り平面曲げと回転曲げの疲労寿命の差異は小さい。疲労限度の最大曲げひずみは SIMT 開始点近傍の 0.8~1.0% である。SE-tube を実際に体内で使用する場合の疲労寿命は、本研究で得られた疲労寿命より長くなる。疲労き裂は片振り平面曲げ疲労では外表面の一点から発生し、内表面に貫通後に最終破断する。回転曲げ疲労および両振り平面曲げ疲労では、疲労き裂は内表面の幅 200 μ m の範囲で多数発生し、外表面に貫通後に最終破断する。

- (3) HE-wire の疲労寿命については、片振り平面曲げの疲労寿命が長く、両振り平面曲げの疲労寿命と回転曲げの疲労寿命は短い。両振り平面曲げと回転曲げの疲労寿命の差異は小さい。いずれの曲げ疲労においても、低サイクル疲労域の $\epsilon_{\max}$ と N_f の関係はべき関数で表され、疲労限度の最大曲げひずみは 0.7~0.8% である。HE-wire を実際に体内で使用する場合の疲労寿命は、本研究で得られた疲労寿命と同じになる。片振り平面曲げ疲労、両振り平面曲げ疲労および回転曲げ疲労のいずれの場合にも、疲労き裂は外表面の一点から発生し、扇形に進展し、最終破断する。

終わりに、本研究を行うに当り、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、本研究の一部は日本学術振興会・科学研究費補助金・基盤研究(C)の補助を受けたことを記し、謝意を表す。

参考文献

- (1) Funakubo, H., ed., Shape Memory Alloys, (1987), Gordon and Breach Science Pub., New York.
- (2) Duerig, T. W., Melton, K. N., Stockel, D. and Wayman, C. M., eds., Engineering Aspects of Shape Memory Alloys, (1990), Butterworth-Heinemann, London.
- (3) Saburi, T., ed., Shape Memory Materials, (2000), Trans Tech Pub., Switzerland.
- (4) Chu, Y. Y. and Zhao, L. C., ed., Shape Memory Materials and Its Applications, (2002), Trans Tech Pub., Switzerland.
- (5) Otsuka, K. and Wayman, C. M., ed., Shape Memory Materials, (1998), Cambridge University Press, Cambridge.
- (6) McKelvey, A. L. and Ritchie, R. O., Fatigue-Crack Growth Behavior in the Superelastic and Shape-Memory Alloy Nitinol, Metall. Mater. Trans. A, Vol. 32A, (2001), pp. 731-743.
- (7) Sawaguchi, T., Kaustrater, G., Yawny, A., Wagner, M. and Eggeler, G., Crack Initiation and Propagation in 50.9 At. pct Ni-Ti Pseudoelastic Shape Memory Wires in Bending-Rotation Fatigue, Metall. Mater. Trans. A, Vol. 34A, (2003), pp. 2847-2860.
- (8) Matsui, R., Tobushi, H., Furuichi, Y. and Horikawa, H., Tensile Deformation and Rotating-Bending Fatigue Properties of a Highelastic Thin Wire, a Superelastic Thin Wire, and a Superelastic Thin Tube of NiTi Alloys, Trans. ASME, J. Eng. Mater. Tech., Vol. 126, (2004), pp. 384-391.
- (9) Tobushi, H., Hachisuka, T., Hashimoto, T. and Yamada, S., Cyclic Deformation and Fatigue of a TiNi Shape-Memory Alloy Wire Subjected to Rotating Bending, Trans. ASME, J. Eng. Mater. Tech., Vol. 120, (1998), pp. 64-70.
- (10) Tobushi, H., Tanaka, K., Kimura, K., Hori, T. and Sawada, T., Stress-Strain-Temperature Relationship Associated with the R-Phase Transformation in TiNi Shape Memory Alloy, JSME Inter. J., Ser. I, Vol. 35, No. 3, (1992), pp. 278-284.
- (11) Tobushi, H., Okumura, K. and Takata, K., Fatigue Properties of TiNi Shape Memory Alloy, Trans. Mater. Res. Soc. Jap., Vol. 26, No. 1, (2001), pp. 347-350.
- (12) Furuichi, Y., Tobushi, H. and Matsui, R., Fatigue Properties of TiNi Shape-Memory Alloy Wire in Bending, Trans. Mater. Res. Soc. Jap., Vol. 28, No. 3, (2003), pp. 615-618.
- (13) Hashimoto, K., Tokuda, M., Inaba, T., Shioda, A., Sittner, P. and Bundara, B., Experimental Research on Deformation of Ti-Ni SMA under Complex Loading Conditions, Key Eng. Mater., Vols. 233-236, (2003), pp. 547-552.
- (14) Mikuriya, S., Nakahara, T., Tobushi, H. and Watanabe, H., The Estimation of Temperature Rise in Low-Cycle Fatigue of TiNi Shape Memory Alloy, JSME Inter. J., Ser. A, Vol. 43, No. 2, (2000), pp. 166-172.
- (15) Matsui, R., Makino, Y., Tobushi, H., Furuichi, Y. and Yoshida, F., Influence of Strain Ratio on Bending Fatigue Life and Fatigue Crack Growth in TiNi Shape-Memory Alloy Thin Wires, Mater. Trans., Vol. 47, No. 3, (2006), pp. 759-765.