

TiNi 形状記憶合金の曲げ疲労特性 Bending Fatigue Properties of TiNi Shape Memory Alloy

戸伏壽昭[†], 古市裕司[†], 杉本義樹^{††}
H. Tobushi[†], Y. Furuichi[†] and Y. Sugimoto^{††}

Abstract 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 (FHP-wire) of TiNi alloy were investigated experimentally. The main results obtained are as follows. (1) The stress-strain curve of SE-tube in tension draws a large hysteresis loop and elastic modulus is 35GPa. Therefore, SE-tube is superior as a medical catheter tube with flexibility and shape recovery. The stress-strain curve of FHP-wire is close to a straight line up to strain of 4% and stress of 1500MPa and elastic modulus is 50GPa. Therefore, FHP-wire is superior as a medical guide wire with flexibility, high pushability and torque transmission performance. (2) With respect to fatigue properties of NT-tube and FHP-wire, the fatigue life in pulsating-plane bending is longer than those 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 low-cycle fatigue can be expressed by a power function in every bending fatigue. (3) The maximum bending strain at the fatigue limit of SE-tube is 0.8%-1.0% which is close to a starting strain of stress-induced martensitic transformation. The maximum bending strain at the fatigue limit of FHP-wire is 0.7%-0.8%.

1. 緒言

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⁾⁻⁽⁶⁾. SME では大きな回復変形と回復応力が発生する. 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, および押込みにおける高い屈曲抵抗 (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, 片振りと両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, 疲労き裂の進展過程を調べる. さらに, 平面曲げ疲労と回転曲げ疲労の寿命特性を比較し, 両者の関係を明らかにする.

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株の 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 (FHP-wire) であった. SE-tube の外径は 0.9mm, 内径は 0.7mm であった. FHP-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. FHP-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 の逆変態終了温度 A_f は 321K であった. FHP-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. 試験片は一様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

[†] 愛知工業大学 工学部 機械学科 (豊田市)

^{††} 愛知工業大学 大学院 (豊田市)

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⁽⁹⁾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⁽¹⁰⁾, 両振り平面曲げ疲労試験装置⁽¹¹⁾および回転曲げ疲労試験装置⁽¹²⁾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。

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 ϵ_{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

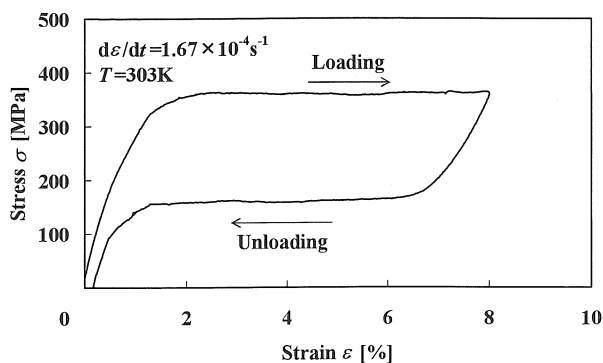


Fig. 1. Stress-strain curve of SE-tube

$\times 10^{-4}\text{s}^{-1}$ の引張試験で得られた応力-ひずみ曲線を Fig. 1 に示す。Fig. 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大きくなり, 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。このヒステリシスループで囲まれた部分の面積と除荷曲線の下の方の面積は, 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 $T=303\text{K}$ におけるひずみ速度 $1.67 \times 10^{-4}\text{s}^{-1}$ の引張試験により得られた高弾性細線 FHP-wire の応力-ひずみ曲線を Fig. 2 に示す。Fig. 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, FHP-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

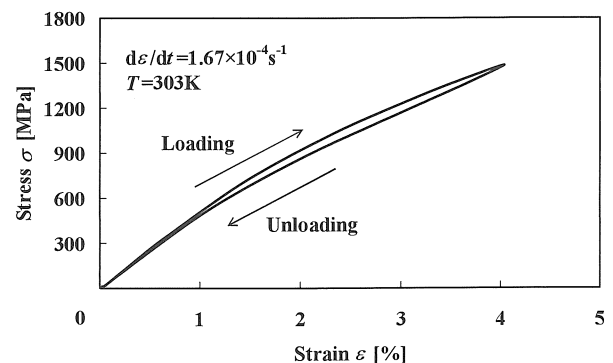


Fig. 2. Stress-strain curve of FHP-wire

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押し込みにおいて高い屈曲抵抗を有し、医者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。上述の考察からわかるように、FHP-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 ϵ_{\max} と破断繰返し数 N_f との関係を Fig. 3 に示す。本研究では、 N_f が 1×10^6 回を超える最大ひずみを疲労限として扱う。

Fig. 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ともに、 ϵ_{\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られ、この点以下の ϵ_{\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、 ϵ_{\max} と N_f との関係は次式で表される。

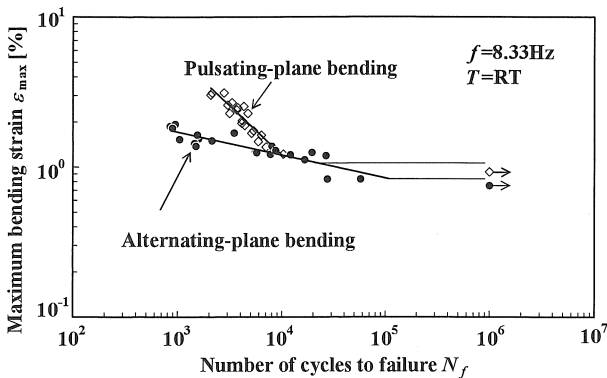
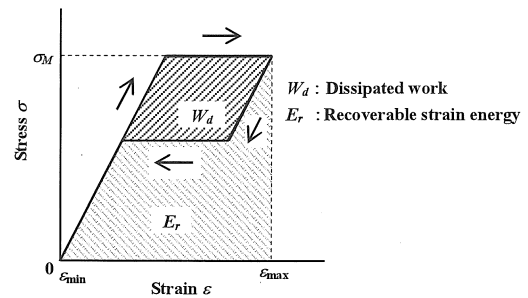


Fig. 3. Relationship between maximum bending strain and number of cycles to failure of SE-tube in plane bending

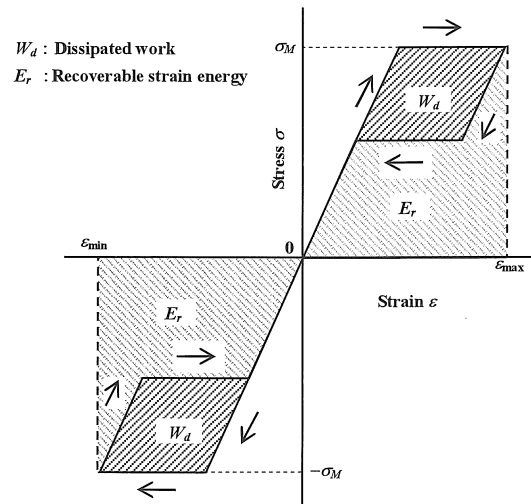
$$\epsilon_{\max} \cdot N_f^{\beta} = \alpha \quad (1)$$

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 ϵ_{\max} の値を表す。片振り平面曲げ疲労での β は0.86であり、両振り平面曲げ疲労での β は0.25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サイクル中に受ける曲げの応力-ひずみ線図を Fig. 4 に示す。Fig. 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⁾。片振り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。Fig. 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



(a) Pulsating-plane bending



(b) Alternating-plane bending

Fig. 4. Stress-strain diagram of surface element in bending showing dissipated work W_d and recoverable strain energy E_r due to SE

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 ϵ_{\max} が大きいほど大きくなるので, ϵ_{\max} が大きくなると疲労寿命の差はより大きくなる。 ϵ_{\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。Fig. 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, W_d は小さく, 片振り平面曲げと両振り平面曲げで疲労寿命の差が明瞭に現れない。

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。疲労限の ϵ_{\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。Fig. 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, この点で応力-ひずみ曲線の傾きが大きくなる。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。

(2) 破断面観察

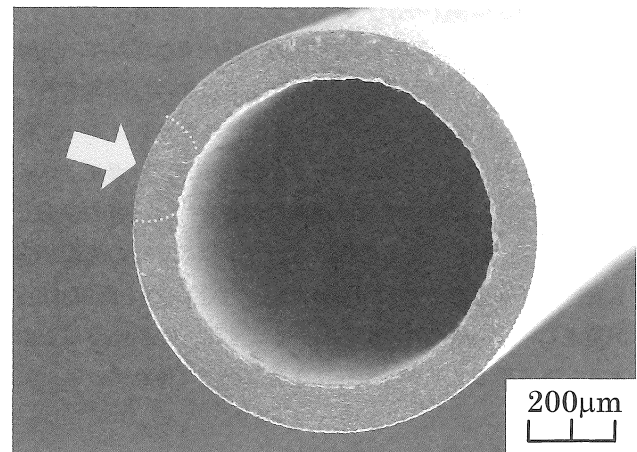
(i) 片振り平面曲げ疲労

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 Fig. 5 に示す。Fig. 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。

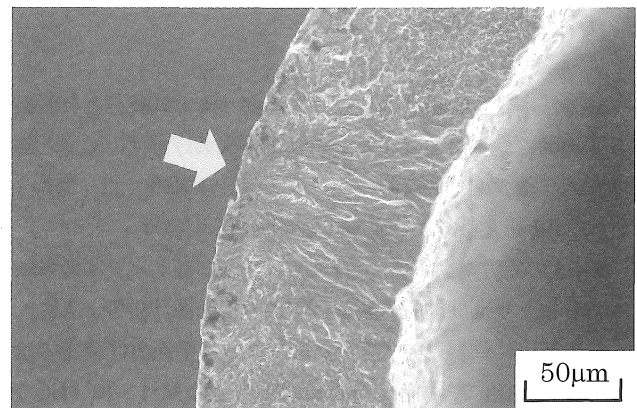
Fig. 5(a) からわかるように, ひずみが最大になる外表面から疲労き裂が発生し, 内表面まで貫通し, その後最終破断が円周に沿って両側で進展する。Fig. 5(a), (b) からわかるように, 疲労き裂は外表面の一点から発生し, き裂の起点部から放射線状に進展し, き裂長さ 120 μm の位置に疲労き裂進展領域と最終破断領域の境界がある。SMA 線材の平面曲げ疲労の破断面では同様の扇形の疲労き裂進展領域が明瞭に観察される⁽¹⁵⁾。Fig. 5(c) からわかるように, 最終破断部では直径 1~5 μm のディンプルが確認できる。

(ii) 平面曲げ疲労

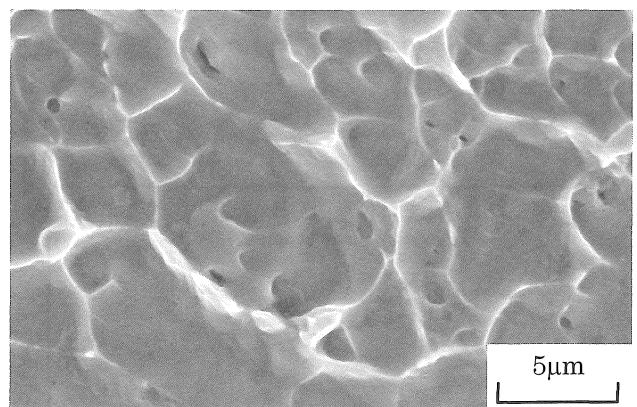
SE-tube の両振り平面曲げ疲労試験により得られた破断面の SEM 写真を Fig. 6 に示す。Fig. 6(a), (b), (c) はそれぞれ破



(a) Whole fracture surface

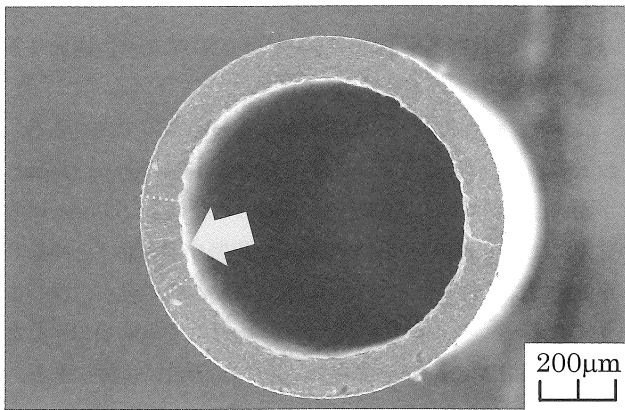


(b) Fracture surface of fatigue-crack initiation part

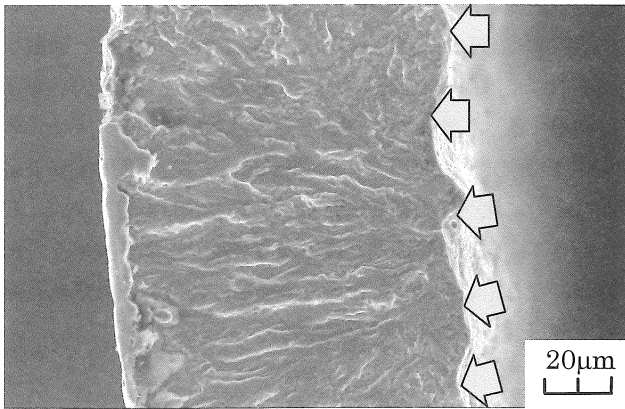


(c) Fracture surface of unstable fracture

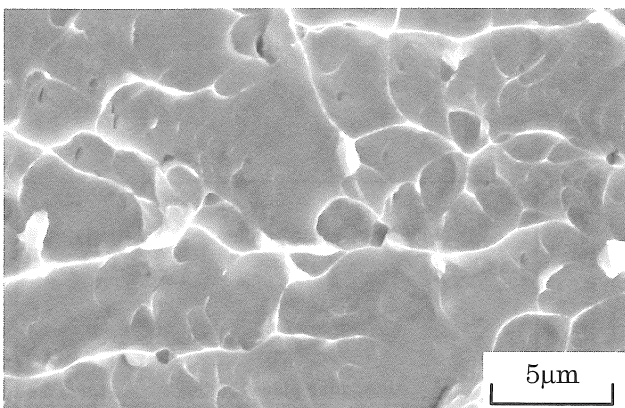
Fig. 5. SEM photographs of fracture surface for SE-tube in pulsating-plane bending fatigue



(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

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 $\epsilon_{\max}=1.05\%$ 、 $N_f=7078$ で得られた破断面である。

Fig. 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。Fig. 6(a), (b)からわかるように、疲労き裂は内表面の一点ではなく幅 $200\mu\text{m}$ の位置で発生し、外表面に向かって進展する。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に向かっての進展の過程は、Fig. 5 で観察された片振り平面曲げにおける疲労き裂の外表面からの発生と内表面に向かっての進展過程と異なる。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⁾。回転曲げでは平面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は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回転曲げと両振り平面曲げの場合、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。

Fig. 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会った所で段差が現れる。

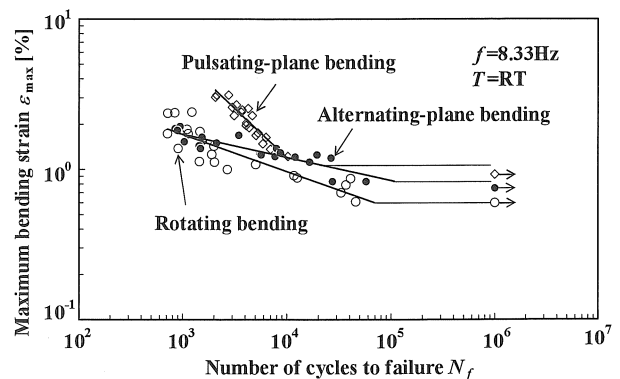


Fig. 7. Relationship between maximum bending strain and number of cycles to failure of SE-tube in plane bending and rotating bending

3. 2. 2 平面曲げと回転曲げの疲労寿命の比較

Fig. 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 Fig. 7 に示す. Fig. 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.

Fig. 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 ϵ_{\max} が大きくなると回転曲げ疲労の N_f のほうが若干短くなる傾向にある⁽¹⁵⁾. Fig. 7 の SE-tube については, ϵ_{\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 は小さくになると考えられる. ϵ_{\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疲労寿命に明瞭な差は現れなくなる. Fig. 7 において, 3 種類の疲労寿命のパラツキを比較すると, 回転曲げと両振り平面曲げでのパラツキが大きい. 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, 疲労寿命のパラツキ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 FHP-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 ϵ_{\max} と破断繰返し数 N_f との関係を図 8 に示す.

Fig. 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, ϵ_{\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れ, この点以下の ϵ_{\max} では 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, ϵ_{\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 0.50 であり, 両振り平面曲げ疲労では 0.32 である.

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. 疲労限の ϵ_{\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. Fig. 3 で示した SE-tube の疲労限に比べて FHP-wire の疲労限は, 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. Fig. 1 と Fig. 2 の応力-ひずみ曲線で示したように, FHP-wire の疲労限の ϵ_{\max} は線形弾性の範囲にあり, 同じ ϵ_{\max} では応力が高い. このために FHP-wire では小さい ϵ_{\max} でも疲労損傷が大きい. したがって, FHP-wire の疲労限の方が小さくなる.

Fig. 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(高ひずみ側)に位置する. Fig. 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 サイクルの応力-ひずみ曲線のヒステリシスループで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. この為に, 両振り平面曲げ疲労の疲労寿命曲線は下側(低ひずみ側)に位置する.

(2) 破断面観察

FHP-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 Fig. 9 に示す. Fig. 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, 最終破断面の拡大図を示す. この写真は $\epsilon_{\max}=1.5\%$, $N_f=4846$ で得られた破断面を示す.

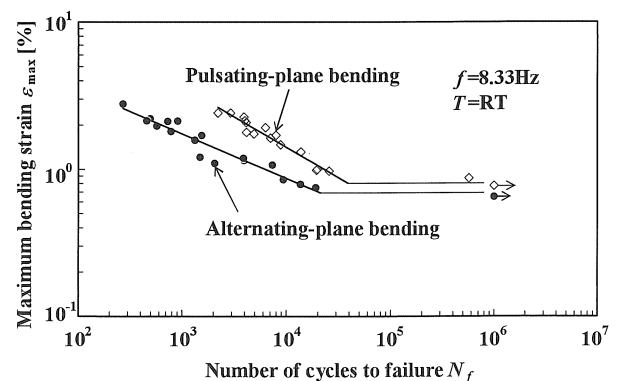
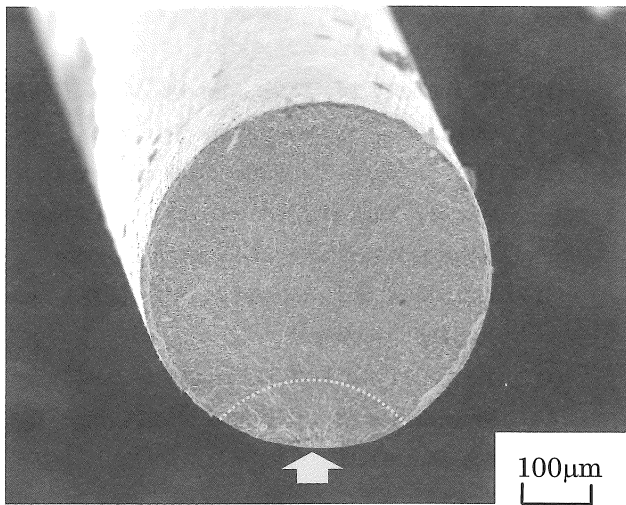
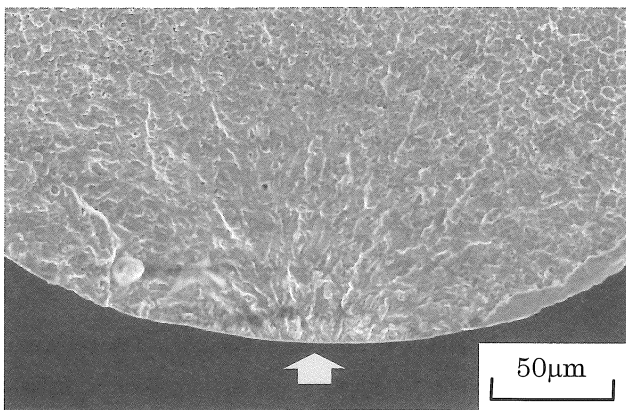


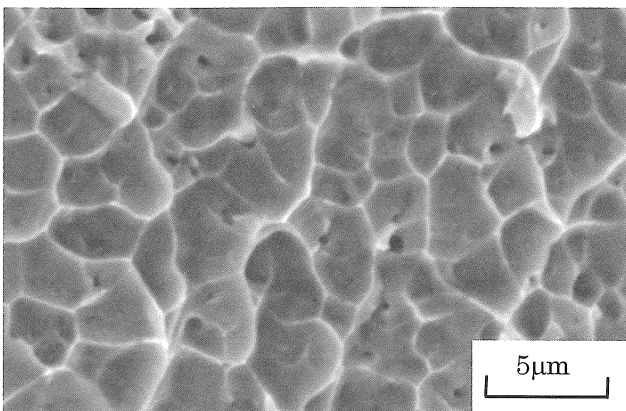
Fig. 8. Relationship between maximum bending strain and number of cycles to failure of FHP-wire wire in plane bending



(a) Whole fracture surface



(b) Fracture surface of fatigue-crack initiation part



(c) Fracture surface of unstable fracture

図 9. SEM photographs of fracture surface for FHP-wire in pulsating-plane bending fatigue

Fig. 9(a)からわかるように、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。Fig. 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。Fig. 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

Fig. 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 Fig. 10 に示す。Fig. 10 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 との関係で示す。

Fig. 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、引張応力と圧縮応力が交互に作用する。試験片表面要素は引張りと同じ変形履歴を繰返し受けるため、両者の疲労寿命はほぼ同じになる。 ϵ_{max} が大きくなると回転曲げの N_f のほうが若干短くなる傾向になる。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、 ϵ_{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。

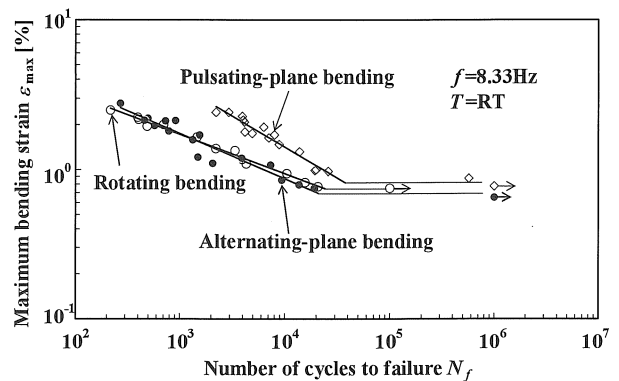


図 10. Relationship between maximum bending strain and number of cycles to failure of FHP-wire in plane bending and rotating bending

4. 結言

TiNi 合金の超弾性細管 (SE-tube) および高弾性細線 (FHP-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。FHP-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, FHP-wire は医療用ガイドワイヤーに必要な柔軟性, 押込み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 ϵ_{\max} と破断繰返し数 N_f の関係で表すと, 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。いずれの曲げ疲労においても, 低サイクル疲労域の ϵ_{\max} と N_f の関係はべき関数で表される。疲労限の最大曲げひずみは SIMT 開始点近傍の 0.8~1.0% である。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 μm の位置から発生し, 外表面に貫通後に最終破断する。
- (3) FHP-wire の疲労寿命についても, 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が短い。両振り平面曲げと回転曲げ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 ϵ_{\max} と N_f の関係はべき関数で表され, 疲労限の最大曲げひずみは 0.7~0.8% である。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, 本研究を行うに当たり, 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) H. Funakubo ed., Shape Memory Alloys, (1987), Gordon and Breach Science Pub., New York.
- (2) T. W. Duerig, K. N. Melton, D. Stockel and C. M. Wayman, Engineering Aspects of Shape Memory Alloys, (1990), Butterworth-Heinemann, London.
- (3) T. Saburi ed., Shape Memory Materials, (2000), Trans Tech Pub., Switzerland.
- (4) Y. Y. Chu and L. C. Zhao ed., Shape Memory Materials and Its Applications, (2002), Trans Tech Pub., Switzerland.
- (5) K. Otuka and C. M. Wagman ed., Shape Memory Materials, (1998), Cambridge University Press, Cambridge.
- (6) A. L. McKelvey and R. O. Ritchie, Fatigue-Crack Growth Behavior in the Superelastic and Shape-Memory Alloy Nitinol, Metall. Mater. Trans. A, Vol. 32A, (2001), pp. 731-743.
- (7) T. Sawaguchi, G. Kustrater, A. Yawny, M. Wagner and G. Eggeler, 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) R. Matsui, H. Tobushi, Y. Furuichi and H. Horikawa, 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) H. Tobushi, K. Tanaka, K. Kimura, T. Hori, and T. Sawada, 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.
- (10) H. Tobushi, K. Okumura, and K. Takata, Fatigue Properties of TiNi Shape Memory Alloy, Trans. Mater. Res. Soc. Jap., Vol. 26, No. 1, (2001), pp. 347-350.
- (11) Y. Furuichi, H. Tobushi and R. Matui, Fatigue Properties of TiNi Shape-Memory Alloy Wire in Bending, Trans. Mater. Res. Soc. Jap., Vol. 28, No. 3, (2003), pp. 615-618.

- (12) H. Tobushi, T. Hachisuka, T. Hashimoto and S. Yamada, 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.
- (13) K. Hashimoto, M. Tokuda, T. Inaba, A. Shioda, P. Sittner and B. Bundara, Experimental Research on Deformation of Ti-Ni SMA under Complex Loading Conditions, *Key Eng. Mater.*, Vols. 233-236, (2003), pp.547-552.
- (14) S. Mikuriya T. Nakahara, H. Tobushi and H. Watanabe, 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) R. Matsui, Y. Makino, H. Tobushi, Y. Furuichi and F. Yoshida, 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.