

TiNi 形状記憶合金線材の表面性状と疲労寿命の関係

[研究代表者] 武田亘平 (工学部機械学科)
[共同研究者] 服部兼久 (東洋精鋼株式会社)

研究成果の概要

インテリジェント材料として実用が期待されている材料に形状記憶合金がある。形状記憶合金は通常の金属にない形状記憶効果および超弾性というユニークな特性を有しており、その特性上繰り返し使用されることが多い。このため形状記憶合金の疲労特性を明らかにすることは重要であり、その疲労寿命を向上させることは大きな課題である。本研究では、超音波ショットピーニング (USP) を利用し、TiNi 形状記憶合金の表面へ残留応力を付与し、その疲労特性について、表面粗さ測定、硬さ試験、破断面観察、引張試験および示差走査熱量測定より明らかにした。得られた結果は次の通りである。(1) 回転曲げ疲労試験結果において、もっとも疲労寿命の向上した USP 条件はカバレッジ 200%と 1000%の低カバレッジであった。(2) 疲労破面の観察より、疲労き裂は試験片表面または内部から発生した。カバレッジが小さい場合は、内部き裂が多く、カバレッジが大きい場合は、試験片表面からき裂が発生した。

研究分野：材料力学，機械設計工学，実験力学

キーワード：形状記憶合金，超音波ショットピーニング，超弾性，回転曲げ疲労寿命

1. 研究開始当初の背景

形状記憶合金 (Shape memory alloy, 以下 SMA) は実用において、繰り返し使用される。したがって、製品設計において、SMA の疲労特性を把握することは重要であった。疲労特性を向上させる表面処理として超音波ショットピーニング (Ultrasonic shot peening, 以下 USP) があった。USP は形状に依存されずに、部材表面に対し、圧縮残留応力の発生や、表面性状を改質することで疲労特性を向上させることができる。このことより、TiNi SMA へ USP を施すことによって疲労寿命の向上が期待されていた。

2. 研究の目的

USP を施した TiNi SMA の疲労特性を明らかにする。また、USP 処理におけるそれぞれの条件 (カバレッジ、投射材粒径) が SMA の疲労特性へ与える影響について明らかにし、最適な USP 条件を求める。

3. 研究の方法

USP を施した TiNi SMA 線材の疲労特性および、USP を施したことによる圧縮残留応力の発生や、疲労き裂の発生

位置の変化といった表面性状について、回転曲げ疲労試験、引張試験、示差走査熱量測定、破断面観察、表面粗さ測定およびビッカース硬さ試験を行い明らかにする。

4. 研究成果

(1) 回転曲げ疲労特性

USP を施した SMA 線材の回転曲げ疲労試験から得られた曲げひずみ振幅 ϵ_a と破断繰返し数 N_f の関係を Fig. 1 に

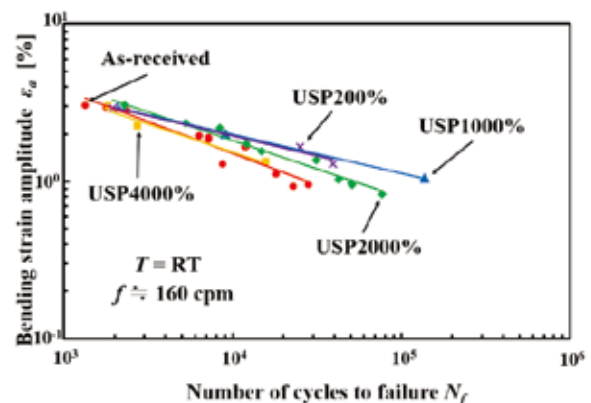


Fig. 1 Relationship between bending strain amplitude ϵ_a and the number of cycle to failure N_f obtained by the rotating-bending fatigue test

示す。Fig. 1 からわかるように、 ϵ_a の減少に伴い N_f は増加する。また、USPによる疲労寿命への効果は、 ϵ_a が小さい場合は大きく、 ϵ_a が大きい場合はほぼない。カバレッジの違いによる影響は、USP1000%がもっとも疲労寿命は向上し、USP4000%ではほぼ効果が見られず、As-receivedと同じ結果となった。したがって、SMA線材では、カバレッジの増加に伴い、疲労寿命は向上するわけではない。

(2) 残留応力の発生

USP処理を施したSMA線材の圧縮残留応力を測定した。測定は残留応力が約0MPaになるまで、表面から20 μ mごとに行った。表面からの深さごとの圧縮残留応力の分布をFig. 2に示す。Fig. 2からわかるように、USPを施した試験片では、圧縮の残留応力が発生し、表面に近づくほど値は大きくなる。また、カバレッジの増加に伴い、圧縮の残留応力は大きく、発生位置は深くなる。しかし、USP2000%では表面、4000%では表面から40 μ mまでの領域において、X線回折のピークが現れず残留応力は測定されなかった。原因としては、USP処理によって表面付近の結晶組織がアモルファス層となったことが考えられる。

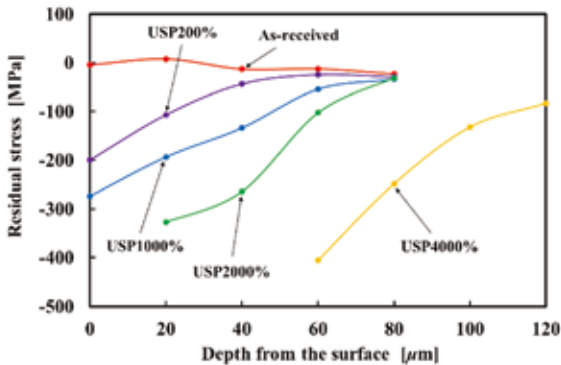
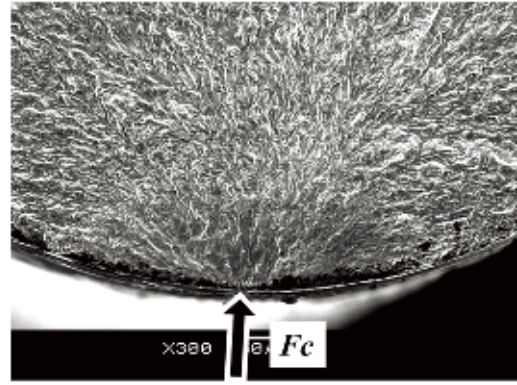


Fig. 2 Distributions of compressive residual stress at the SMA wire surface

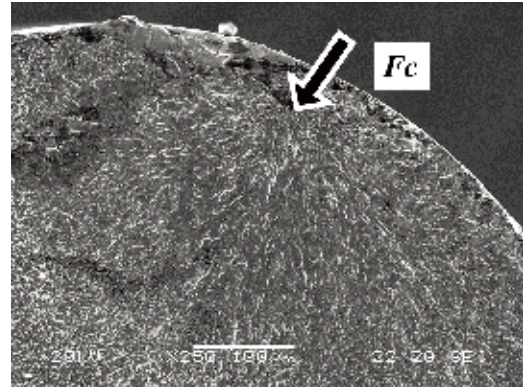
(3) カバレッジと疲労き裂発生位置の関係

回転曲げ疲労試験後の疲労破面を走査型電子顕微鏡を用いて観察した。観察結果をFig. 3に示す。Fig. 3からわかるように疲労き裂が試験片表面から発生する場合と内部から発生する場合があった。また、カバレッジごとの疲労き裂発生位置の割合をまとめた結果をTable 1に示す。

Table 1からわかるように、As-receivedではすべて表面からき裂が発生したが、USPを施した場合、カバレッジが小さいほど、内部でき裂が発生することが多い。



(a) Surface crack of USP 2000%



(b) Internal crack of USP 200%

Fig. 3 Comparison of internal cracks and surface cracks

Table 1 Percentage of cracks by the coverage conditions

Coverage conditions	Surface	Internal
As-received	100%	0%
USP200%	0%	100%
USP1000%	33%	67%
USP2000%	50%	50%
USP4000%	67%	33%

(4) 最適な USP 条件

カバレッジ 1000%の USP 条件がもっとも疲労寿命の向上した原因について考える。低カバレッジの場合、残留応力測定の結果から、試験片表面に圧縮残留応力が付与されたことがわかる。そのため、疲労き裂は表面に付与された圧縮残留応力によって、表面からの発生が抑えられ、内部から発生する割合が多くなった。回転曲げを受ける試験片では、表面で最大ひずみを受ける。最大ひずみを受ける表面からき裂が発生しないことで、疲労寿命は大きく向上したと考えられる。

一方で、高カバレッジの場合、試験片表面では、圧縮残

留応力が測定されていない。一般に鉄鋼材料では、表面処理加工によって生じたアモルファス層は疲労寿命を向上させる働きがある。SMA の変形では、応力誘起マルテンサイト変態 (M 変態) が生じるが、USP によって試験片表面がアモルファス層となったため、M 変態しない領域が試験片表面で発生した。変形時に相変態を示す SMA において、試験片表面でのアモルファス層の発生は繰返し負荷に抵抗となり、疲労寿命は向上しない、もしくは低下する結果になったと考える。

USP 処理によって、アモルファス層が発生したと考えられる要因のひとつが DSC 試験結果でのピークの低下である。Fig. 4 は各 USP 条件における DSC 試験の冷却過程の結果である。DSC 試験の結果、USP 処理によって SMA の変態温度に大きな変化はなかった。ここで As-received, USP200%, USP1000%の結果は、変態ピークの大きさがほぼ一定であることに対して、USP2000%, USP4000%の結果は、変態ピークの大きさが小さくなったことがわかる。高カバレッジでは、相変態での仕事量が低下したと考えられる。USP 処理によって発生したアモルファス層は相変態を示さないため、変態ピークの低下は、アモルファス層の発生によって生じたと考えられる。

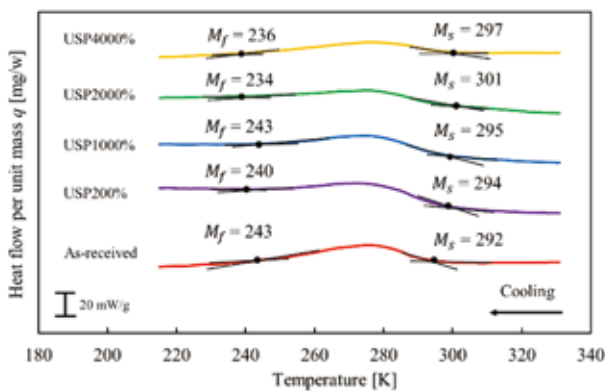


Fig. 4 Results of the DSC test in cooling process under each USP conditions

これらの結果より、SMA に対する USP 条件は、SMA 線材の直径が 0.98 mm の場合、カバレッジ 200%から 1000% が適切であると考えられる。

研究成果発表

1. 武田亘平, 上村大樹, 松井良介, 戸伏壽昭, 超音波ショットピーニングが与える SMA ワイヤの疲労特性への影響, 日本材料学会東海支部 第 11 回学術講

演会, 2017

2. 武田亘平, 上村大樹, 服部兼久, TiNi 形状記憶合金の疲労特性に与える超音波ショットピーニングの影響, 日本ばね学会 ばね及び復元力応用講演会, 2017