

# SNM439の超高サイクル疲労機構に及ぼす ショットピーニングの影響

青学大 ○小川武史 小糸製作所 飯塚辰也

## 1. はじめに

実製品に対する寿命延伸技術への強い要望と、性能の向上から、繰返し数が  $10^7$  cycle を越えるような超高サイクル疲労への感心が高まってきている。本研究では超高サイクル疲労による内部破壊の発生機構の解明を目的として、片持ち回転曲げ疲労試験機を用いて超高サイクル疲労試験を行った。また、ショットピーニング (SP) 材の疲労強度を評価するとともに、納入 (AR) 材との破面の比較や内部破壊のメカニズムについて検討した。

## 2. 試験片および実験方法

**2.1 試験片** 本研究で用いた試験片は、疲労部門委員会組織構造分科会の共通試料である。供試材は低合金鋼 SNM439 で、化学成分 (wt %) は、C:0.42, Si:0.22, Mn:0.78, P:0.02, S:0.013, Cu:1.86, Ni:0.73, Cr:0.83, Mo:0.2 である。焼入れ、 $160^\circ\text{C}$  焼戻しの熱処理後に、直径 10mm, 最小断面直径 3mm の砂時計型に研削加工を施してある。

AR 材に加えて  $\text{ZrO}_2$  ( $\phi=1$  mm) を用いた SP 処理を Air pressure: 0.44 MPa, Blast distance: 50mm, Coverage: 100%, Arc height: 0.78 mm の条件で施した。また、表面粗さの影響を調べるために、SP を施した後に  $15\ \mu\text{m}$  および完全に SP の加工痕が消える  $50\sim 65\ \mu\text{m}$  まで研磨して実験を行った。いずれも研磨はエメリー紙で #1500 および #2000 の順で行った。SP の影響を調べるために、X 線残留応力測定、表面粗さとビッカース硬さの測定も併せて行った。その結果を表 1 に示す。

**2.2 実験方法** 疲労試験は 4 連式片持ち回転曲げ疲労試験機を使用し、繰返し速度 3150 rpm で実験を行った。打ち切り繰返し数を  $N=10^8$  cycle とした。試験後、走査型電子顕微鏡 (SEM) により破面の観察を行い、き裂発生起点の観察を行った。

渦電流センサー (計測範囲  $\sim 1$  mm) を試験片最小断面部に水平方向に可能な限り近づけて固定した状態で実験を行い、内部破壊の検出を試みた。得られる電圧の変化をオシロスコープにより波形として取り出し、それをビデオ撮影して、波形の変化とき裂の発生および疲労寿命との関係を調べた。

Table 1 Effect of shot peening on surface roughness, residual stress and Vickers hardness.

	AR	SP	SP+polish ( $15\ \mu\text{m}$ )	SP+polish ( $50\ \mu\text{m}$ )
$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	0.33	9.38	4.76	0.06
$R_{\text{max}}$ ( $\mu\text{m}$ )	2.26	34.53	23.01	0.40
$\sigma_R$ (MPa)	$-524 \pm 34$	—	—	$-1358 \pm 153$
Hv	617	—	—	647

## 3. 実験結果及び考察

**3.1 S-N 曲線** 得られた S-N 曲線を図 1 に示す。縦軸は応力振幅  $\sigma_a$ 、横軸は破断繰返し数  $N_f$  である。なお、池本<sup>(1)</sup>らも材料、試験片形状、熱処理条件、試験機など全く同一の条件で試験を行ったため、池本らの AR 材のデータを併せてプロットし、AR 材についての傾向線を示した。中空印が表面起点の破壊、中実印が内部起点の破壊であるが、高応力低サイクル側と低応力高サイクル側で完全に分かれた二重 S-N 曲線となっている。 $\sigma_a=1200$  MPa では、SP を施しただけでは疲労寿命を増加させる効果がなく、表面粗さの改善のために  $15\ \mu\text{m}$  研磨した試験片でも同様に効果が得られていない。しかし、SP の加工痕が消える  $50\ \mu\text{m}$  以上十分に研磨した試験片については、かなりの疲労強度の向上が見られる。表面粗さが改善されたことにより表面からの破壊が抑えられ、 $\sigma_a=1300$  MPa まで内部起点の破壊に移行している。

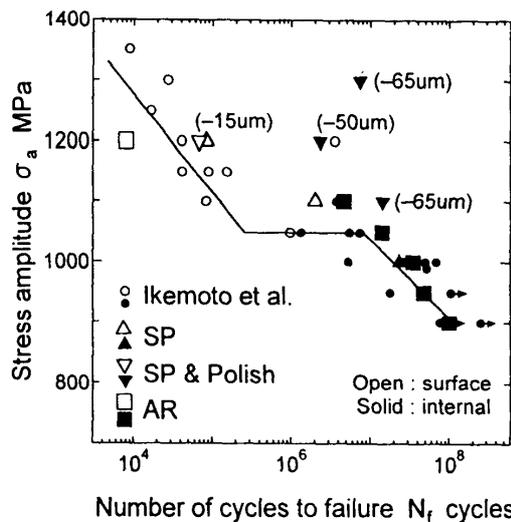


Fig.1 S-N curves

**3.2 破面観察** 図 2 に破面写真を示す。2 段目の S-N 曲線上で破断した AR 材には、図(a)のような明瞭なフィッシュアイが観察された。フィッシュアイの中央には介在物が見られる。拡大写真を図(b)に示す。介在物周辺には粒状のファセットと呼ばれる領域が見られる。図(c)および(d)は SP 材、図(e)および(f)は SP 材に  $65\ \mu\text{m}$  の研磨を施した試験片のフィッシュアイ写真である。これらの場合、起点が表面から  $400\ \mu\text{m}$  前後の深い位置にあり、大きなフィッシュアイとなっている。また、フィッシュアイの全周に渡ってシェアリップが形成されており、内部き裂は表面に達することなく急速破壊している。SP 材の場合、図 2(f)のように介在物のない起点も観察された。介在物が観察される場合でも、明瞭なファセットが見られるものはなかった。

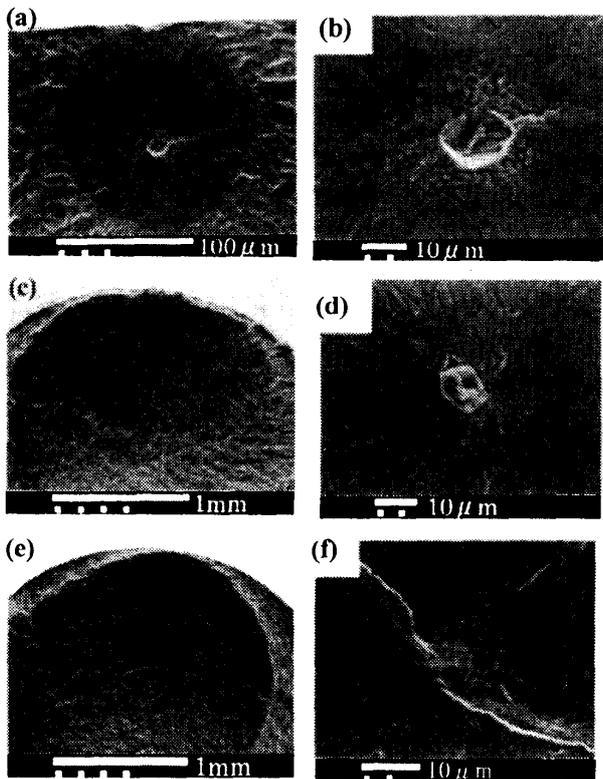


Fig.2 Fracture surface (a)(b):AR, (c)(d):SP, (e)(f):SP(65μm)

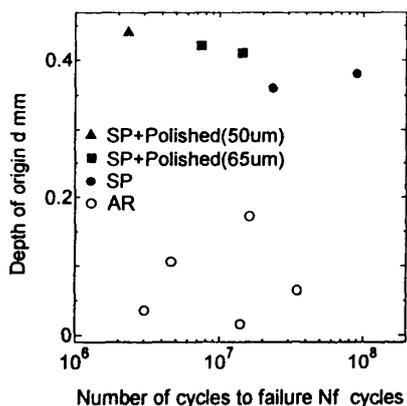
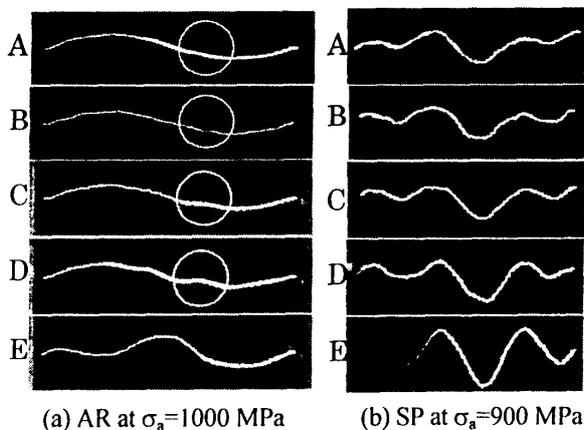


Fig.3 Depth from surface of fracture origin.



(a) AR at  $\sigma_a=1000$  MPa (b) SP at  $\sigma_a=900$  MPa  
Fig.4 Variations of wave forms detected by eddy current displacement sensor. A: initial wave form, B-E: detected about 2500 cycles before final fracture.

破壊起点の深さ  $d$  を図 3 に示す。疲労寿命との相関は認められないが、SP 材のほうが AR 材よりも明らかに破壊起点が深くなっている。これは、表面近傍の圧縮残留応力に基づくものである。

**3.3 応力拡大係数とき裂進展寿命** 実験結果は省略するが、介在物およびファセット破面の面積を村上の式<sup>2)</sup>に代入して応力拡大係数  $K$  を算出した。その結果、ファセット破面に対する  $K$  は  $5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  一定、介在物に対する  $K$  は  $2\sim 3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  であり、いずれも  $N_f$  との相関は認められなかった。なお、前述したとおり、SP 材にはファセット破面が認められなかった。

急速破壊に移行した疲労破面から白鳥の式<sup>3)</sup>を用いて  $K$  を算出すると、 $28.5\sim 37.5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  となり、 $\sigma_a$  の増加に伴って増大した。この結果は、急速破壊が試験片の塑性崩壊によって生じたことを表している。

以上の  $K$  の計算結果と一般的な鋼の疲労き裂進展特性を用いてき裂進展寿命を予測すると、ファセット破面が形成されてから急速破壊に移行するまでの繰返し数は高々数万回である。したがって、超高サイクル疲労現象の解明のためには、介在物からのき裂発生とファセット破面の形成に焦点を絞った研究が必要である。

**3.4 渦電流変位センサーによる計測** AR 材の渦電流変位センサー波形の変化を図 4 に示す。縦軸はセンサーからの出力信号であり、横軸の時間は約 1 回転の時間を表している。A は実験開始直後から破断の直前に変化が現れるまでの波形であり、B~E は破断直前の 2500 回程度の間にはほぼ等間隔で波形の変化を表したものである。

図(a)の AR 材の場合、波形の全体的な形状に変化が見られない B~D において、○を付した位置のみで波形に変化が見られた。この変化は、き裂の発生を検出しているものと考えられる。しかし、波形の変化は破断のおよそ 2500 回前に検出されたものであることから、内部き裂の発生を検出したものではないと考えられる。一方、図(b)の SP 材の場合、波形の一部に変化があるのではなく、全般的に振幅が大きくなっている。図 2 の破面観察で示したとおり、SP 材の場合には直径が 1 mm 程度の内部き裂が成長し、表面に達することなく急速破壊に至っていた。したがって、上記の全般的な波形振幅の増大は、内部き裂の発生による試験片の偏心に基づく振動をとらえているものと考えられる。

本研究では市販の渦電流変位センサーを用いて内部き裂の検出を試みたが、いずれの試験片においても検出感度が不足していた。しかし、渦電流の発生方向を軸方向にとるなどの改良を行えば、回転曲げ荷重下の内部き裂を非接触かつ連続的に観察することのできる可能性がある。(結言:省略)

参考文献:(1)池本, 大久保, 三角, 第 17 回フレッティング損傷に関する研究会抄録, (1999.12.21)  
(2)村上, 微小欠陥と介在物の影響, 養賢堂(1993).  
(3)Murakami, Stress Intensity Factor Vol.3, JSMS(1985)