

# 430°Cと500°Cで焼戻されたばね鋼SUP7の 10<sup>10</sup>サイクル疲労特性

阿部 孝行\*・古谷 佳之\*・松岡 三郎\*

10<sup>10</sup>-cycle Fatigue Properties for SUP7 Spring Steels Tempered at 430 and 500°C

Takayuki ABE, Yoshiyuki FURUYA and Saburo MATSUOKA

**Synopsis** : Giga-cycle fatigue properties were investigated for SUP7 spring steels tempered at 430 and 500°C. Tensile strength levels were 1423 and 1730 MPa. Rotating bending, electromagnetic, high-speed servohydraulic and ultrasonic testing machines were used for 30 or 100 Hz, 120 Hz, 600 Hz and 20 kHz tests, respectively. 10<sup>10</sup>-cycles fatigue properties were obtained in 3 years under 100 Hz rotating bending and in 7 days under 20 kHz uniaxial loading, using 6- and 3-mm-diameter hourglass specimens. 10<sup>8</sup>-cycles fatigue properties were also obtained under 120 and 600 Hz uniaxial loading, using 6- and 3-mm-diameter hourglass specimens. Almost all specimens fish-eye-fractured at internal inclusions of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Optically dark areas (ODAs) were formed around inclusions even at 20 kHz. The data obtained was analyzed according to the predicted fatigue limit and control volume of specimen for fish-eye fracture proposed by Murakami and others. S-N curves for 430°C tempered steel under 100 Hz rotating bending, and 600 Hz and 20 kHz uniaxial loading were coincident each other, because the control volume was almost the same of 34 and 33 mm<sup>3</sup>. S-N curves under 120 Hz uniaxial loading with the large control volume of 227 mm<sup>3</sup> shifted to the lower strength level. The inclusion size was nearly proportional to the control volume. Modified S-N curves, that is  $\sigma_w/\sigma_w'$  versus Nf curves, were independent on the test speed, loading type, specimen configuration and strength level. Here,  $\sigma_w'$  is the fatigue limite for fish-eye fracture predicted by Murakami and others. These results give us two findings. One is that fish-eye fracture is not the simple hydrogen embrittlement process. Another is that 20 kHz ultrasonic machine is effective for accelerated testing method of giga-cycle fatigue.

**Key words**: high-strength steel; 10<sup>10</sup>-cycle fatigue; fish-eye fracture; frequency effect; control volume.

## 1. 緒言

物質・材料研究機構 (NIMS) (旧金属材料技術研究所 (NRIM)) では長年に渡り、国産実用金属材料の疲労強度を始めとする材料強度データを系統的に取得し、機械・構造物の設計や安全に資する目的で疲労データシートとして公表してきた<sup>1)</sup>。

最近、機械・構造物の高性能化、長時間使用の観点から、繰返し数が10<sup>7</sup>回を超えるギガサイクル疲労特性が要求されるようになってきた。特に、引張強度が1200 MPaを超える高強度鋼では、試験片内部の介在物等を起点とした内部破壊 (フィッシュアイ破壊) が起こり、今まで表面破壊に対して10<sup>7</sup>回で決定してきた疲労限が消滅する問題に注目が集まっている<sup>2-7,15)</sup>。そこで、物質・材料研究機構で

は、1997年に10<sup>10</sup>回までのギガサイクル疲労特性を求める計画を立て、試験を開始した。候補材料は炭素量0.4 mass%の炭素鋼、低合金鋼を中心に、炭素量0.6 mass%のばね鋼SUP7を取り上げた (Table 1)。炭素鋼と低合金鋼は車軸<sup>8)</sup>のような高強度部品に使用されることを念頭に、高周波焼入れ・焼戻しのケース (高強度材) と通常の焼入れ・焼戻しのコア (低強度材) のギガサイクル疲労特性を求めることを想定した (Table 2)。ばね鋼はJIS規格とばね工業会規格を参照にして焼入れ・焼戻し条件<sup>9)</sup>を決めた。疲労特性としては、低サイクル疲労特性から10<sup>10</sup>回ギガサイクル疲労特性まで幅広く求めるようにした。10<sup>10</sup>回疲労特性は100 Hzマルチ回転曲げ試験機で求めることにしたが、このためには3年かかる。そこで、研究的に20 kHz超音波試験機と1 kHz油圧サーボ試験機を使用し、加

Table 1. Materials and fatigue test conditions in giga-cycle fatigue data sheets.

Steels	Elements	Fatigue properties and test conditions
S40C	0.40C	Giga-Cycle fatigue
SCM440	0.40C-1Cr-0.2Mo	Rotating bending, 100Hz, 10 <sup>5</sup> -10 <sup>10</sup> cycles
SNCM439	0.4C-1.8Ni-0.8Cr-0.2Mo	Electromagnetic, Axial, 100Hz, 10 <sup>5</sup> -10 <sup>8</sup> cycles
SUP7	0.60C-2.0Si-0.8Mn-0.15Cr	Low-Cycle fatigue
		Servohydraulic, Axial, 0.1Hz ~ 0.6Hz, 10 <sup>2</sup> -10 <sup>5</sup> cycles

平成14年6月3日受付 平成14年8月12日受理 (Received on June 3, 2002; Accepted on Aug. 12, 2002)

\* 物質・材料研究機構 (National Institute for Materials Science, 1-2-1 Sengen Tsukuba 305-0047)

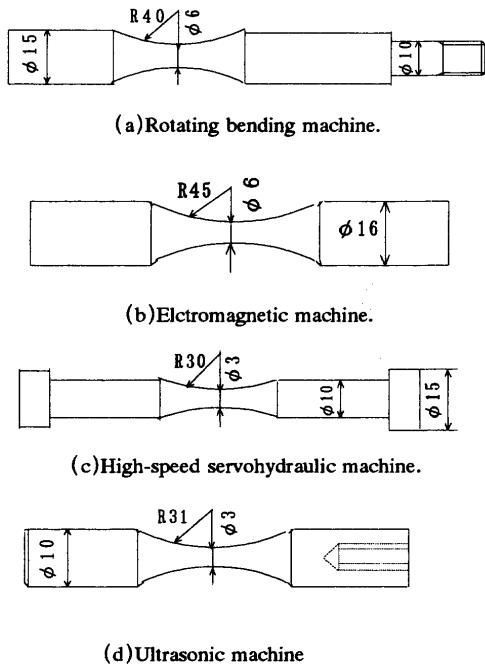


Fig. 1. Profiles of fatigue testing specimens. Dimensions are in mm.

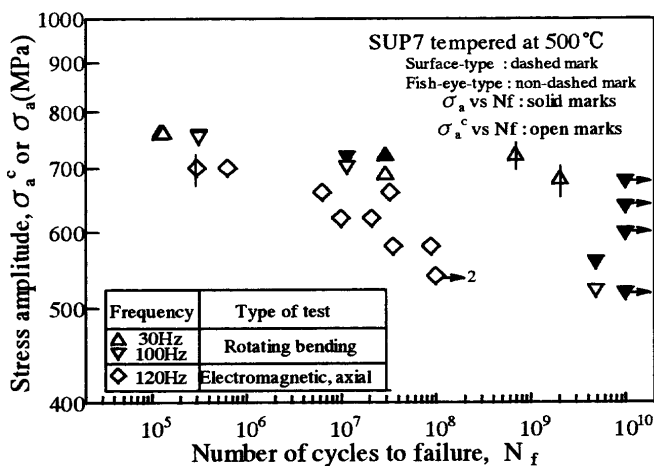


Fig. 2. S-N curves for SUP7 steel tempered at 500°C under 30 Hz or 100 Hz rotating bending and 120 Hz uniaxial loading.

速試験法を検討した。20 kHzでは10<sup>10</sup>回は1週間で達成できる。

2002年3月に、最初のギガサイクル疲労特性データシートとして、物質・材料研究機構疲労データシート No. 87「ばね鋼SUP7 (2.0Si-0.8Mn) のギガサイクル疲労特性データシート」を出版した。本研究では、データシートに記載した100 Hz試験データ、研究的に求めた20 kHzと600 Hz高速試験データ並びに破面情報を使用し、ギガサイクル疲労特性に及ぼす試験速度の影響（すなわち加速試験法の可否）、内部破壊における疲労限の有無等について検討を加える。

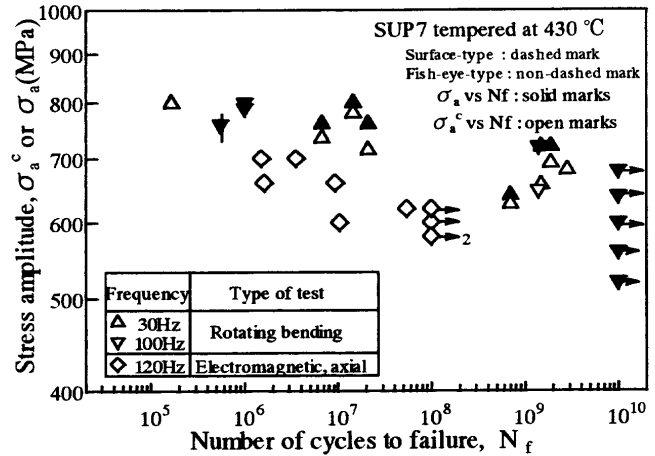


Fig. 3. S-N curves for SUP7 steel tempered at 430°C under 30 Hz or 100 Hz rotating bending and 120 Hz uniaxial loading.

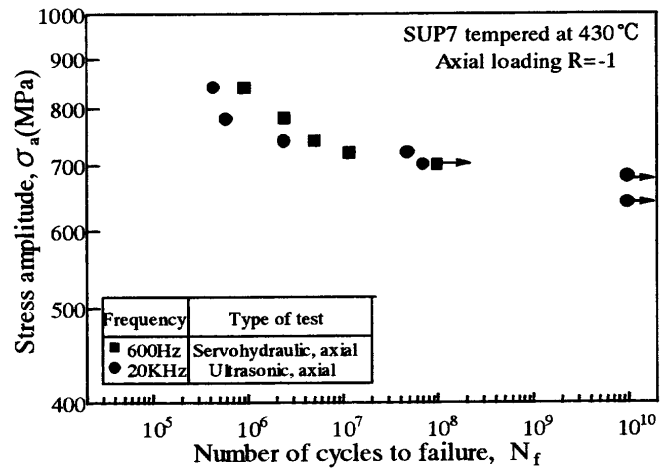


Fig. 4. S-N curves for SUP7 steel tempered at 430°C under 600 Hz and 20 kHz uniaxial loading.

## 2. 実験方法

### 2.1 供試材

供試材はばね鋼SUP7で、1985年に製造された直径20 mmの熱間圧延丸棒である。化学成分をTable 3に示す。熱処理は845°C×30分の焼準の後に、Table 2の条件で焼入れ・焼戻しを行った。焼入れ・焼戻しは素材を試験片形状近くまで下加工（予肉直径0.5 mm）してから行った。430°Cと500°C焼戻し後の機械的性質は、Table 4に示すように、引張強度 $\sigma_B$ で1730 MPaと1423 MPa、ビッカース硬さHVで528と441であった。両温度の焼戻し後の微視組織は焼戻しマルテンサイトであった。

### 2.2 100 Hz 疲労試験

疲労データシートを作成するために回転曲げ疲労試験と軸荷重疲労試験を行った。

回転曲げ疲労試験は10<sup>10</sup>回までのギガサイクル疲労特性を取得するためにマルチ回転曲げ疲労試験機を用いた。同試験機は片持ち形式で安定した試験機であり、腐食疲労特

Table 2. Heat treatment conditions in giga-cycle fatigue data sheets.

(a)S40C, SCM440, SNCM439 steels			
Steels		High strength	Low strength
S40C	Normalizing	Pre-heating	855 °C/30min, AC
SCM440		550 °C/60min, WC	870 °C/30min, AC
SNCM439			870 °C/30min, AC
S40C	Quenching	1040 °C/0.1S, WQ	855 °C/30min, OQ
SCM440		1000 °C/0.1S, WQ	855 °C/30min, OQ
SNCM439		1000 °C/0.1S, WQ	845 °C/30min, OQ
All steels	Tempering	180 °C/60min, AC	550 °C/60min, WC

(b)SUP7 steel		
	High strength	Low strength
Normalizing	845 °C/30min, AC	
Quenching	845 °C/30min, OQ	
Tempering	430 °C/60min, WC	500 °C/60min, WC

Table 3. Chemical composition of SUP7 spring steel.

Material	Element(mass %)												
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Ti	Al	N	O
SUP7	0.59	1.99	0.92	0.027	0.010	0.01	0.15	0.004	0.01	<0.005	0.026	0.0039	0.0008

Table 4. Mechanical properties of SUP7 spring steel.

Tempering Temp.	Tensile properties			Vickers hardness (HV20)
	0.2% Proof stress $\sigma_{0.2}$ (MPa)	Tensile strength $\sigma_b$ (MPa)	Reduction of area(%)	
430 °C	1589	1730	34	528
500 °C	1276	1423	31	441

性を求めるために開発したものである<sup>10)</sup>。縦0.8m, 横2.5m, 高さ1.8mの空間の中に試験軸が48軸あり, 全体としてコンパクトとなっている。当初, 試験速度は12軸ずつで0.03 Hz, 0.3 Hz, 3 Hz, 30 Hzであった。これを24軸ずつで30 Hz, 100 Hzに改良した。100 Hzは回転曲げ試験機で達成できる最高速度の上限近くにある。データシート試験においては, 高応力域では30 Hzを中心に $10^8$ 回まで, 低応力域では100 Hzを中心に $10^{10}$ 回まで行った。軸荷重疲労試験は電磁共振式疲労試験機を用いて, 繰返し速度120 Hzで $10^8$ 回まで行った。

### 2.3 600 Hzと20 kHz疲労試験

加速試験法を検討するため, 1 kHz高速油圧サーボ疲労試験機<sup>11)</sup>と20 kHz超音波疲労試験機<sup>12,13)</sup>を採用した。これらの試験機による高速疲労試験は内部破壊が出現しやすい高強度の430°C焼戻し材で実施した。高速油圧サーボ疲労試験は繰返し速度600 Hzで $10^8$ 回まで, 超音波疲労試験は繰返し速度20 kHzで $10^{10}$ 回までそれぞれ行った。20 kHzで $10^{10}$ 回は1週間で到達できることは先に述べたが, 600 Hzで $10^8$ 回は2日で到達できる。超音波疲労試験における試験片の発熱に対しては, 試験片に約10°Cの冷風を吹きか

けて発熱を防止した。高速油圧サーボ疲労試験においては試験片発熱は問題なかった。

### 2.4 疲労試験片

Fig. 1に試験片形状を示す。回転曲げ疲労試験片と電磁共振式疲労試験片は最小断面直径は6 mm, 高速油圧サーボ疲労試験片と超音波疲労試験片は3 mmである。試験片表面の最終仕上げは1200番研磨紙による軸方向研磨とした。

### 2.5 破面観察

破断後の試験片はSEMと光学顕微鏡で破壊起点部を観察した。光学顕微鏡観察においては, 破壊起点部が凸凹しているのので, 焦点をずらして複数枚の写真を撮り, それらを合成して1枚の写真とした。

## 3. 実験結果

### 3.1 100 Hzによる $10^{10}$ 回疲労特性

Fig. 2とFig. 3に, 500°Cと430°C焼戻し材のマルチ回転曲げ試験機による回転曲げS-N特性および電磁共振式試験機による軸荷重S-N特性を示す。回転曲げの下で, 表面破壊した場合には, 試験片表面で求めた公称応力振幅 $\sigma_a$ を用い, ひげ付きの白抜き記号で表した。内部破壊した場合には, 2種類の応力振幅を用いた。一つは同じ公称応力振幅を用い, ひげ無し黒塗り記号で表す場合, もう一つは応力勾配を考慮して内部破壊起点における修正応力振幅 $\sigma_a^c$ を用い, ひげ無し白抜き記号で表す場合である。回転曲げ試験片の半径3 mm, 表面から内部破壊起点までの最大深さは0.3 mmであるので,  $\sigma_a^c=0.9\sigma_a$ が最大の修正となる。また $10^{10}$ 回で破断しなかったデータは公称応力振幅 $\sigma_a$ で整理してある。

回転曲げ試験においては, 500°Cと430°C焼戻し材ともに大部分が内部破壊した。30 Hzと100 Hzの速度の違いによるS-N特性の差はばらつき範囲内で, 特に両者の差は認められなかった。著者らは今まで $10^8$ 回で試験を打ち切る場合が多かったが, 本実験においてはそれ以上の繰返し数で500°C焼戻し材で表面破壊, 430°C焼戻し材で内部破壊する場合があった。

軸荷重の120 Hz電磁共振式試験は $10^8$ 回で打ち切った。回転曲げ試験と同様にほとんどが内部破壊したが, 疲労強度は500°Cと430°C焼戻し材ともに軸荷重試験のほうが低くなった。このような挙動は今までに内部破壊した高強度鋼においても得られている<sup>9)</sup>。

### 3.2 600 Hzと20 kHzによる $10^{10}$ 回疲労特性

Fig. 4に, 430°C焼戻し材において, 高速油圧サーボ試験機で600 Hz, 超音波試験機で20 kHzの下で求めた軸荷重S-N特性を示す。両方ともにすべて内部破壊をした。両特性は一致し, 速度依存性は示さなかった。100 Hz回転曲げ試験では $10^8$ と $10^{10}$ 回の間で内部破壊したが, 20 kHz超音

波試験では内部破壊は起こらなかった。

Fig. 5に430°C焼戻し材のすべてのS-N特性を示す。30 Hzと100 Hz回転曲げS-N特性に対しては、10<sup>10</sup>回以下の有限寿命域に対しては修正応力振幅 $\sigma_a^c$ 、10<sup>10</sup>回で破断しなかった場合に対しては公称応力振幅 $\sigma_a$ を採用した。600 Hzと20 kHz軸荷重特性は同じ荷重形式の120 Hz軸荷重特性と一致せず、むしろ30 Hzと100 Hz回転曲げ特性と一致した。

### 3.3 疲労限と引張強度の関係

Table 5に、10<sup>8</sup>回と10<sup>10</sup>回で破断しなかった最大応力振

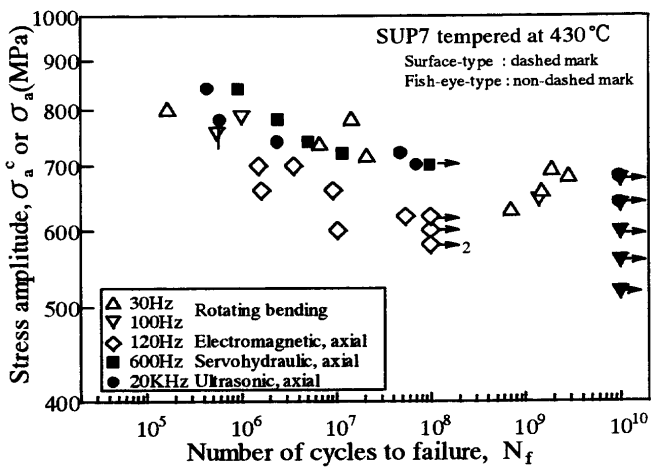


Fig. 5. S-N curves for SUP7 steel tempered at 430°C under 30 Hz or 100 Hz rotating bending, and 120 Hz, 600 Hz and 20 kHz uniaxial loading.

Table 5. Summary of giga-cycle fatigue results.

Type of test	Frequency	Specimen dia.(mm)	Fatigue limit				Average inclusion size at fracture site		Control volume (mm <sup>3</sup> )	
			10 <sup>8</sup> cycles (MPa)		10 <sup>10</sup> cycles (MPa)		$\sqrt{\text{area. av.}} (\mu\text{m})$			
			500 °C	430 °C	500 °C	430 °C	500 °C	430 °C		
Rotating bending	30, 100Hz	6	675	700	640	600	24	23	34	
Uniaxial	Electromagnetic	120Hz	6	540	580	—	—	35	34	227
	Servohydraulic	600Hz	3	—	700	—	—	—	29	33
	Ultrasonic	20KHz	3	—	700	—	680	—	34	33

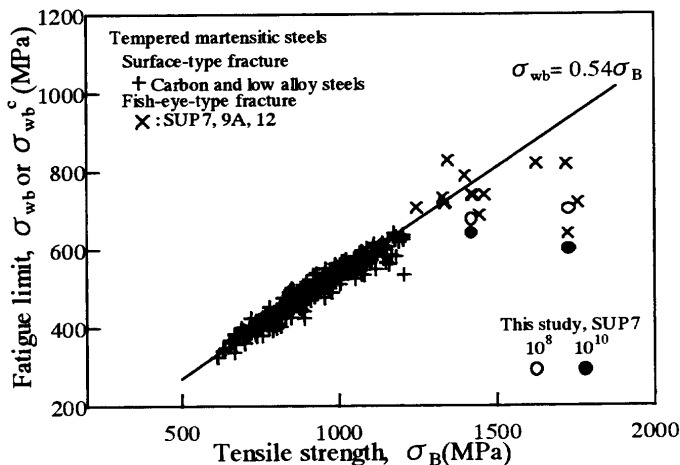


Fig. 6. Fatigue limit against tensile strength for tempered-martensitic steels under rotating bending.

幅として定めた疲労限 $\sigma_{wb}^c$ と $\sigma_w$ を示す。回転曲げの疲労限 $\sigma_{wb}^c$ は修正応力振幅 $\sigma_a^c$ に対応して定めた。Fig. 6とFig. 7に回転曲げと軸荷重の場合に分け、疲労限と引張強度の関係を示す。前回までの結果<sup>9,14)</sup>で、表面破壊(+)と内部破壊(x)の疲労限は50 Hz回転曲げと120 Hz電磁共振式試験機を用いて10<sup>7</sup>回と10<sup>8</sup>回で定めたものである。今回の10<sup>8</sup>回と10<sup>10</sup>回で決めた疲労限は内部破壊しているため、表面破壊に対する外挿線より低応力側にあり、前回までの内部破壊した結果とほぼ同じ傾向を示した。詳細に見ると、Fig. 6で100 Hz回転曲げ試験機による10<sup>10</sup>回疲労限は前回と今回の10<sup>8</sup>回疲労限より低応力側となった。Fig. 7で120 Hz電磁共振式試験機による10<sup>8</sup>回疲労限は今回のほうが低応力側となった。一方、超音波試験機による疲労限は10<sup>10</sup>回においても前回の結果より高応力側となった。

### 3.4 内部破壊起点の破面様相

Fig. 8に、100 Hz回転曲げ、120 Hz、600 Hzと20 kHz軸荷重重下で得られた内部破壊起点部の代表的なSEM写真を、430°C焼戻し材について示す。100 Hz回転曲げ破面は10<sup>9</sup>回付近、他の軸荷重破面は10<sup>6</sup>~10<sup>7</sup>回にかけて得られたものである。Fig. 9には、Fig. 8の中で100 Hzと20 kHz軸荷重重下における内部破壊起点部の光学顕微鏡写真を示す。

Fig. 8のSEM写真に示すように、すべての内部破壊起点には直径30  $\mu\text{m}$ 前後の介在物が存在していた。EDAX分析によると、それらはAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>介在物であった。Table 5にそれぞれの試験に分けて介在物寸法の平均値を示す。村上ら<sup>3)</sup>

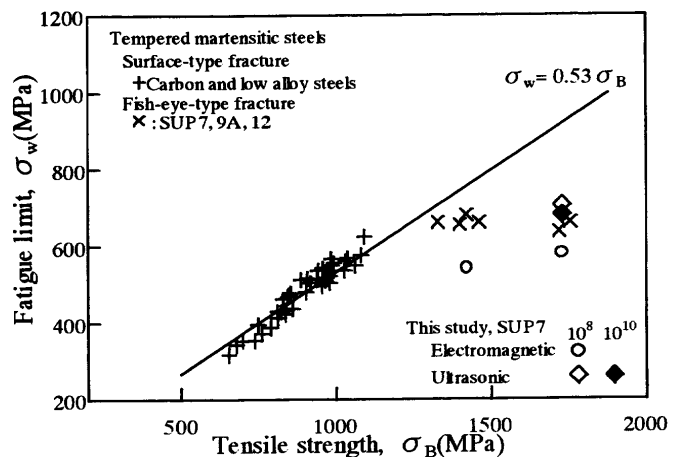


Fig. 7. Fatigue limit against tensile strength for tempered-martensitic steels under uniaxial loading.

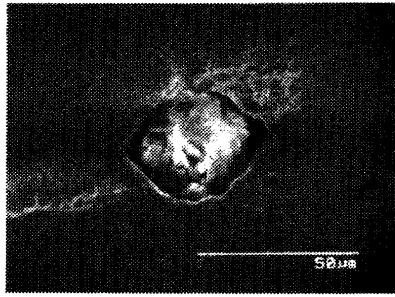
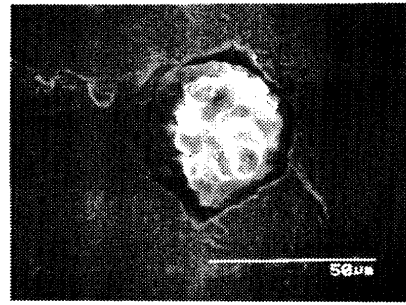
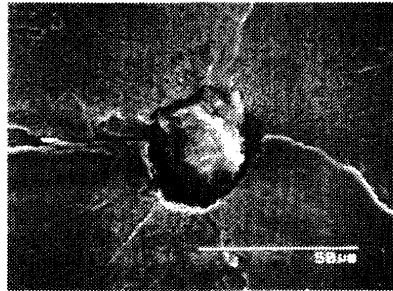
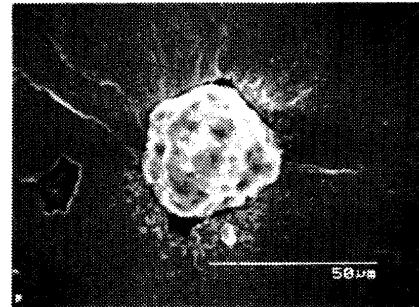
(a) 100Hz rotating bending,  $\sigma_a=720\text{MPa}$ ,  $N_f=1.5 \times 10^9$ (b) 120Hz electromagnetic,  $\sigma_a=700\text{MPa}$ ,  $N_f=3.6 \times 10^6$ (c) 600Hz servohydraulic,  $\sigma_a=740\text{MPa}$ ,  $N_f=5.1 \times 10^6$ (d) 20KHz ultrasonic,  $\sigma_a=700\text{MPa}$ ,  $N_f=7.1 \times 10^7$ 

Fig. 8. SEM micrographs of fish-eye fracture origins.

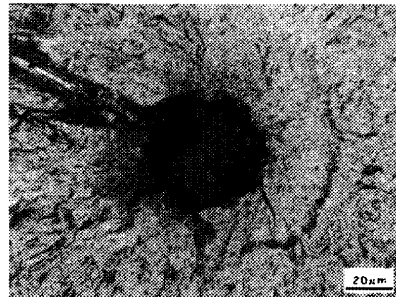
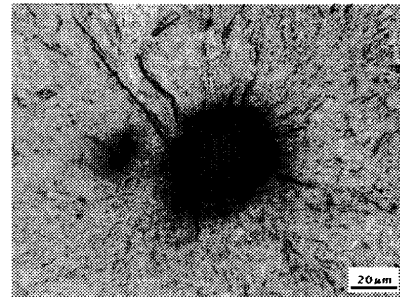
(a) 120Hz electromagnetic,  $\sigma_a=700\text{MPa}$ ,  $N_f=3.6 \times 10^6$ (b) 20KHz ultrasonic,  $\sigma_a=700\text{MPa}$ ,  $N_f=7.1 \times 10^7$ 

Fig. 9. Optical micrographs of fish-eye fracture origins.

は、内部破壊起点の  $\text{Al}_2\text{O}_3$  系介在物の周辺には、光学顕微鏡で黒く見える ODA (Optically Dark Area) が存在し、その領域内を SEM 等で観察すると、粗い破面様相となっていることを明らかにした。さらに、彼らは ODA は水素ぜい化き裂が進展した領域であると推定した。Fig. 8 の SEM 写真では  $\text{Al}_2\text{O}_3$  介在物周辺に粗い凸凹の領域が存在し、Fig. 9 の光学写真ではその領域は黒く見えており、村上らの結果と一致している。

#### 4. 考察

本研究で得た技術的成果として、① 100 Hz 回転曲げ試験機を 3 年間稼働させて  $10^{10}$  回疲労特性を求めることに成功したこと、② 20 kHz 超音波試験機を用いて加速試験すると、 $10^{10}$  回疲労特性が 1 週間で取得できることの 2 点が

上げられる。しかし、この成果を確実にするためには、次の 2 点を明らかにする必要がある。① 高強度鋼の高サイクル疲労において、表面破壊した場合には回転曲げと軸荷重下の S-N 特性は一致するのに対し、内部破壊の場合には 100 Hz と 120 Hz のほぼ同じ試験速度でも回転曲げ S-N 特性の方が高くなった (Fig. 2 と Fig. 3 参照)。② 20 kHz 超音波試験結果と 600 Hz 高速油圧サーボ試験結果は一致したが、同じ軸荷重である 120 Hz 電磁共振式試験結果より高くなり、むしろ 100 Hz 回転曲げ試験結果と一致した (Fig. 4 と Fig. 5 参照)。以下では、これらの点を危険体積の観点から考察する。併せて、焼戻し温度による強度差が内部破壊の S-N 特性に与える影響も考察する。

##### 4.1 危険体積

村上ら<sup>15)</sup>は、内部破壊における回転曲げと軸荷重 S-N 特性の差を危険体積の差から説明している。危険体積は、介

在物の極値統計を基に、部材等に含まれる最大の介在物を推定する際に定義されている。Fig. 1のような砂時計型試験片では、危険体積は公称応力の90%の領域とし、その計算方法は文献<sup>15)</sup>の第A4章(p. 241~244)に示されている。Table 5に村上の式に従って求めた危険体積を示す。同じ直径6mmでも、回転曲げ試験片の危険体積は電磁共振試験片のほぼ1/10と小さく、直径3mmの超音波と高速油圧サーボ試験片と一致している。危険体積が大きいほど、その中に大きな介在物が含まれるため、内部破壊の疲労限は低下すると予測されている<sup>15)</sup>。Table 5並びにFig. 2からFig. 5を見ると、疲労強度と疲労限は危険体積の大小と良く対応しており、危険体積が大きいほど低下している。特に、Fig. 5において、危険体積が等しい30と100Hz回転曲げ(△と▽)、600Hz軸荷重(■)、20kHz軸荷重S-N曲線(●)が一致している点は注目値する。Table 5において平均介在物寸法と危険体積の大小関係もほぼ一致している。詳細を見ると、最大の危険体積227mm<sup>3</sup>を持つ120Hz軸荷重試験では平均介在物寸法は34μm、危険体積34と33mm<sup>3</sup>の30と100Hz回転曲げ試験並びに600Hz軸荷重試験では平均介在物寸法は23と29μmとなった。しかし、危険体積33mm<sup>3</sup>の20kHz軸荷重試験では平均介在物寸法34μmとなり、最大危険体積を持つ120Hz軸荷重試験の平均介在物寸法と一致した。

#### 4.2 修正S-N特性

村上らは内部破壊に対する疲労限を次式で与えている。

$$\sigma_w' = 1.56(HV + 120) / (\sqrt{\text{area}})^{1/6} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、HVはビッカース硬さ、 $\sqrt{\text{area}}$ は応力軸に垂直な面に投影した介在物面積の平方根である。

著者ら<sup>11)</sup>は、式(1)を用いて $\sigma_a / \sigma_w' - N_f$ 特性すなわち修正S-N特性を求めると、内部破壊起点の介在物寸法に関係なく、1本の曲線が得られることを提案した。この考えは、切欠き材の応力集中に対するNeuber則を切欠き材の疲労特性に応用したTopperとMorrowの方法<sup>16)</sup>に従っている。前報<sup>11)</sup>では、120Hz電磁共振式、600Hz高速油圧サーボ、20kHz超音波試験機、危険体積33mm<sup>3</sup>に統一した直径3mmの砂時計型試験片を用い、SNCM439鋼の160°C焼戻し材においてギガサイクル疲労特性を求めた。これらの実験結果によると、試験速度と内部破壊起点のAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>介在物寸法に関係なく、修正S-N特性は1本の曲線になった。また、Fig. 9に示したと同じように、120Hzと20kHzの試験速度の違いに関係なく、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>介在物周辺にはほぼ同じ寸法のODAが観察された。

Fig.10とFig.11に500°Cと430°C焼戻し材の修正S-N特性を示す。Fig. 2からFig. 5と比較するため、縦と横軸の倍率は同じにしてある。また、10<sup>10</sup>回に矢印付きで示した結果に対しては、430°C焼戻し材で5本、500°C焼戻し材で4本が10<sup>10</sup>回で破断しなかったが、それらの試験片を高応力

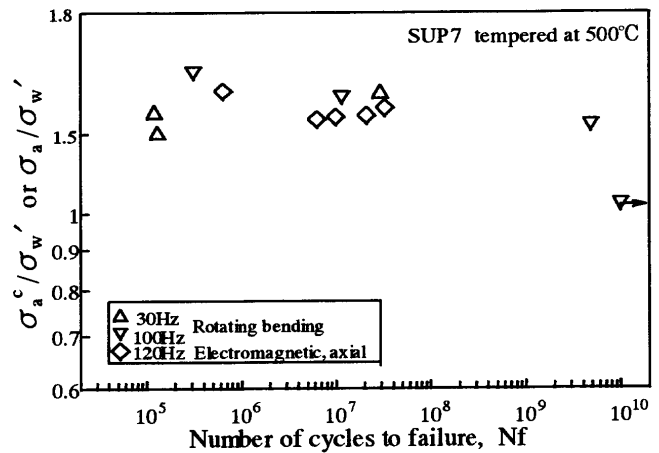


Fig. 10. Modified S-N curves for SUP7 steels tempered at 500°C.

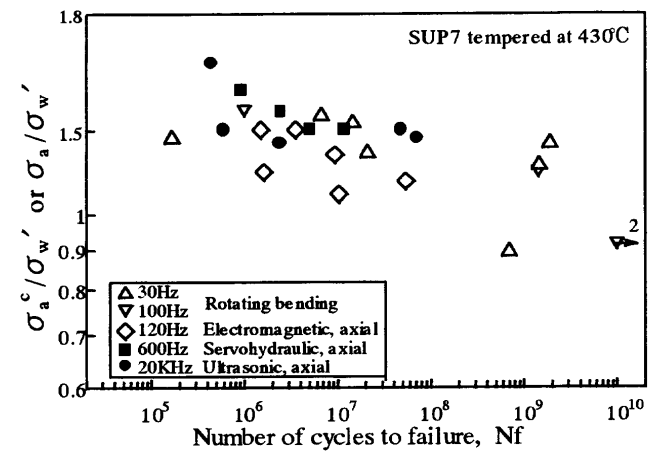


Fig. 11. Modified S-N curves for SUP7 steels tempered at 430°C.

側で疲労破壊させた。その結果、430°Cと500°C焼戻し材でそれぞれ2本と1本が内部破壊し、その内部破壊起点のAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>介在物寸法を測定した。500°C焼戻し材では、期待通り100Hz回転曲げと120Hz軸荷重電磁共振式試験結果はほぼ一致した。これは、危険体積34mm<sup>3</sup>と227mm<sup>3</sup>の差により、100Hz回転曲げ試験のほうが介在物寸法が小さくなり、 $\sigma_w'$ が大きくなったことによる。430°C焼戻し材においても同様な結果が得られたが、電磁共振式試験結果が多少低応力側となった。

式(1)は、介在物寸法の差を $\sqrt{\text{area}}$ で評価できると同時に、焼戻し温度による強度の差をビッカース硬さHVで評価できることを示している。そこで、Fig.12にFig.10とFig.11を重ねて示す。430°C焼戻し材の120Hz軸荷重電磁共振式試験結果が多少低応力側になったが、他の結果はほぼ一致した。

以上の結果から、危険体積を同じにすると、試験速度、荷重負荷形式、強度レベルに関係なく、内部破壊に対する修正S-N特性は1本の曲線で表せる可能性があると言える。特に、20kHz超音波試験機を使用した加速試験法は有効で、10<sup>10</sup>回疲労特性が1週間で取得できることは実用上

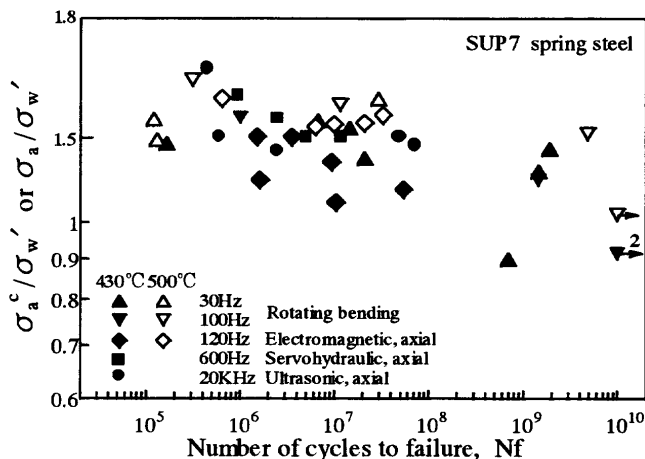


Fig. 12. Modified S-N curves for SUP7 steels tempered at 430 and 500°C.

重要である。また、Fig. 2からFig. 4のS-N曲線、特に超音波試験によるS-N曲線から判断して、 $10^{10}$ 回試験で内部破壊に対する疲労限を定めることができると言える。さらに、修正S-N特性が試験速度に依存しなかったことは内部破壊が単純に水素脆化と関係しないことを示唆しており、今後の課題である。

### 5. 結論

本研究では、疲労データシートの一環として求めたばね鋼SUP7の430°Cと500°C焼戻し材のギガサイクル疲労特性と、研究的に実施した高速試験結果を報告するとともに、得られた結果を試験速度、荷重負荷形式、焼戻し温度による強度の観点から検討し、次の結果を得た。

(1) 430°Cと500°C焼戻し材の $10^{10}$ 回までの回転曲げ疲労特性を直径6mmの砂時計型試験片を用いて100Hz回転曲げ試験機で3年間かけて求めることに成功した。並行して、直径6mmの砂時計試験片を用いて、120Hz電磁共振式試験機で $10^8$ 回までの軸荷重S-N特性を求めた。両試験において、ほとんどの試験片は $Al_2O_3$ 介在物を起点とする内部破壊をしたが、S-N特性は回転曲げ試験のほうが高応

力側となった。

(2) 430°C焼戻し材の $10^{10}$ 回軸荷重疲労特性を直径3mmの砂時計型試験片を用いて20kHz超音波試験機で1週間で求めることに成功した。並行して、直径3mmの砂時計型試験片を用いて600Hz高速油圧サーボ試験で $10^8$ 回軸荷重S-N特性を求めた。両試験において、試験片はほとんど $Al_2O_3$ 介在物から内部破壊し、S-N特性も一致した。これらの高速試験速度下の軸荷重S-N特性は100Hz回転曲げS-N特性と一致し、同じ軸荷重下の120Hz電磁共振式試験結果より高応力側となった。

(3) 村上らが提案した内部破壊に対する疲労限の予測式と危険体積の重要性を基に(1)と(2)のギガサイクル疲労特性を解析した。試験速度、荷重負荷形式、焼戻し温度による強度に差があっても、修正S-N特性はほぼ1本の曲線で表せることが明らかになった。

### 文 献

- 1) Catalogue of NRI Fatigue Data Sheets, No. 84, NRI, Tokyo, (1994).
- 2) Y.Murakami, M.Takada and T.Toriyama: *Int. J. Fatigue*, **16** (1998), 661.
- 3) Y.Murakami, T.Nomoto and T.Ueda: *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, **22** (1999), 581.
- 4) S.Nishijima and K.Kanazawa: *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, **22** (1999), 601.
- 5) C.Masuda, S.Nishijima and Y.Tanaka: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, **A52** (1985), 847.
- 6) H.Emura and K.Asami: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, **A55** (1989), 45.
- 7) T.Abe and K.Kanazawa: *J. Soc. Mater. Sci., Jpn.*, **45** (1996), 9.
- 8) S.Sugawara: *Bull. Iron Steel Inst. Jpn.*, **4** (1999), 685.
- 9) NRI Material Strength Data Sheet Technical Document, No. 9, NRI, Tokyo, (1995).
- 10) T.Abe, E.Takeuchi, S.Matsuoka and S.Nishijima: *Proc. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, **No810** (1981), 159.
- 11) Y.Furuya, S.Matsuoka, T.Abe and K.Yamaguchi: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, **A68** (2002), 99.
- 12) T.Wu and C.Bathias: *ASTM STP*, **1231** (1994), 598.
- 13) H.Ishii, K.Yamanaka and K.Tohgo: *Materials Science Research International, Special technical publication I, JSMS, Kyoto, (2001), 59.*
- 14) NRI Fatigue Data Sheet Technical Document, No. 5, NRI, Tokyo, (1989).
- 15) 村上敬宣: 金属疲労 微小欠陥と介在物の影響, 養賢堂, 東京, (1993).
- 16) T.H.Topper, R.M.Wetzel and Jo.Dean.Morrow: *J. Mater.*, **4** (1969), 200.