

## 【論文】

## SUJ2 鋼の超長疲労寿命挙動

緒方 良<sup>\*1</sup> 吉房 篤<sup>\*2</sup>中橋 克彰<sup>\*2</sup> 田中 哲志<sup>\*3</sup>

## Very Long Fatigue Life Behavior of High Strength Steel

Ryou OGATA Atsushi YOSHIFUSA Katsuaki NAKAHASHI Satoshi TANAKA

Abstract- In order to investigate the very long fatigue life characteristics, the rotating bending fatigue tests were carried out on the high strength steel SUJ2 material. The main results summarized in this study are as follows:

- (1) The test pieces have shown the S-N curve of the typical two-stage folding shape.
- (2) It is found out that the origin of fracture is the slip or grinding flaw type on the surface in the test pieces when they fracture in the range of the low cycles. It is also found out that the origin of fracture is the inclusion (Fish-eye type) inside of the test pieces when they fracture in the range of the high cycles.
- (3) Because the test pieces fracture even after they have exceeded the number of cycles of  $10^7$ , establishment of the design method for very long life is important.

Keyword: Fatigue, High strength steel, Fish-eye, Very long fatigue life, SUJ2

## 1. 緒言

近年、各種機械・構造物の余寿命評価や信頼性確保に対する社会的要請が一段と高まるとともに、経済的理由からこれらの実製品に対する寿命延伸技術の確立が強く望まれている。これは設計時の耐用年数を超えて機械・構造物を長期間使用することにつながるもので、部材の長寿命域における疲労特性が重要な課題となる。一方、金属材料の疲労特性については多くの鉄鋼材料に関し  $N \approx 10^6 \sim 10^7$  付近の応力繰返し数で S-N 曲線が水平に折れ曲がり、明瞭な疲労限度が現れる一般的傾向がある。しかし、高強度鋼や表面処理材等に関し S-N 曲線が  $N=10^5 \sim 10^6$  の付近で一旦水平に折れ曲がって見掛けの疲労限度が現れ

た後、 $N=10^7$  前後から S-N 曲線が再び低下する二段折れ曲がり現象がしばしば報告されている<sup>(1)~(10)</sup>。

しかしながら、超長寿命挙動に関しては、まだ不明な点が多く残されている。特に、前述の二段折れ曲がりに及ぼす種々の因子に関しては、今なお未解明な部分がある。しかし、内部の介在物が起因しているということは明らかである。そこで破面の介在物の周辺を高倍率で観察した結果、介在物の周縁部には細粒状の領域が認められるが<sup>(10)</sup>、そのとらえ方は種々あり、村上らはこの領域を Optically Dark Area (ODA) とよんでいる。酒井らはこの領域を Fine Granular Area (FGA) とよんでおり、塩澤らは Granular Bright Facet (GBF) とよんでいる。また、越智らは Rough Surface Area (RSA) とよんでおり、さらに中島らのように単に Rough Area とよぶ研究者もいる<sup>(11)</sup>。これらが主なものであり、今後詳細な検討をする必要があると考えられる。

\*1 大学院工学研究科機械工学専攻

\*2 機械工学科 4 年

\*3 機械工学科

本報では、高強度鋼として SUJ2 材の焼入れ焼戻し鋼を用いて、回転曲げ疲労における超長疲労寿命挙動を調べるために、まず S-N 曲線の形状を求める。さらに SEM による破面観察を行うとともに、その結果から定量的検討も行う。

## 2. 供試材および実験方法

本研究で用いた材料は SUJ2(高炭素クロム軸受鋼)であり、化学成分及び機械的性質をそれぞれ Table 1 及び 2 に示す。

SUJ2 材の熱処理は、835℃・40min 加熱・油冷→180℃・120min 加熱・空冷である。試験片は #100 の砥石による研削加工によって、最小直径  $d=3\text{mm}$ (応力集中係数  $\alpha=1.06$ ) に仕上げられたものである。Fig. 1 に試験片の形状寸法を示す。

疲労試験には、4 連式片持ち回転曲げ疲労試験機(繰返し速度は 3150rpm)を使用した(日本材料学会・疲労部門委員会・組織構造分科会にて開発されたものである)。試験は室温(20±2℃)、大気中で行った。応力はいずれも最小断面における公称曲げ応力とした。破面観察には SEM(走査型電子顕微鏡)を用いた。

Table 1 Chemical composition

Material	(wt%)								
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
SUJ2	1.01	0.23	0.36	0.01	0.01	0.06	0.04	1.45	0.02

Table 2 Mechanical properties

Material	HV	$\sigma_s$ (MPa)	$\phi$ (%)
SUJ2	740	2300	0.4

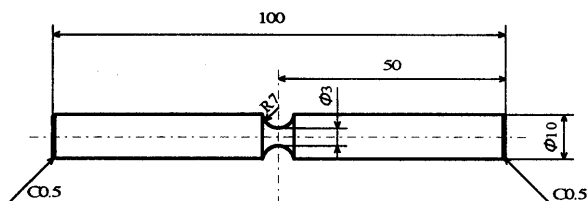


Fig. 1 Shape and dimensions of test piece

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 S-N 曲線

Fig. 2 に、S-N 曲線を示す。図中の○及び●は、それぞれ表面を起点として破断したもの及び内部を起点として破断したものである。

この結果によると S-N 曲線は、 $N=10^7$  回における見掛けの疲労限度以上の応力下(高応力)においては、 $5 \times 10^4$  付近までは表面起点型の破壊を示すが、それ以降  $1 \times 10^6$  付近からは内部を起点とする破断が現れる。このことは、おおむね  $5 \times 10^4 \sim 1 \times 10^6$  の間( $\sigma \approx 1500\text{MPa}$  前後)で表面起点型の破断と内部起点型の破断の S-N 曲線が交わる状態となることを示唆するものである<sup>(12), (13)</sup>。

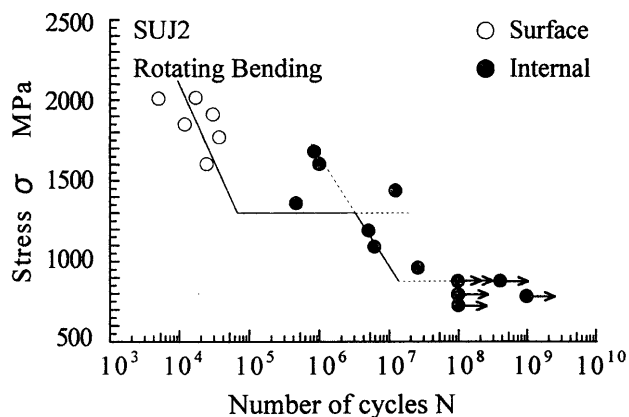


Fig. 2 S-N curve

### 3.2 SEM による破面観察

Fig. 3(a), (b), (c) 及び(d) は SUJ2 鋼の破面写真である。

Fig. 3(a), (b) に低繰返し数で破断した破面の例を示す。図中の矢印は破壊の起点を示す。これらによると、試験片表面における結晶のすべり、または研削傷を起点とする破壊である事がわかる<sup>(8)</sup>。

Fig. 3(c), (d) に高繰返し数で破断した破面の例を示す。これらから明らかなことは、表面より約 0.25mm 以内に存在する  $5 \sim 25 \mu\text{m}$  程度の介在物が起点となり、フィッシュアイを形成した後、破壊を生じることである。このことより、内部破壊の場合はフィッシュアイ型の形態となることがわかる。

このフィッシュアイの形成メカニズムについては現在、意見が分かれるところである<sup>(10), (14)~(16)</sup>。

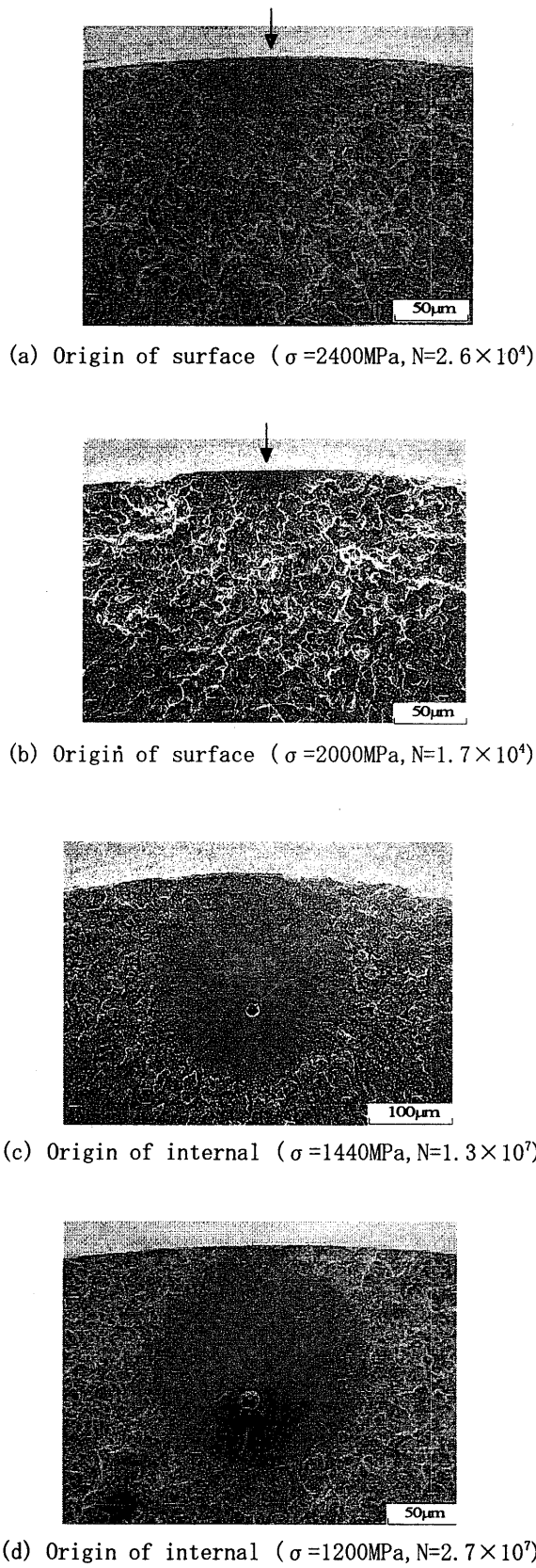


Fig. 3 Photographs of fracture surface

### 3.3 フィッシュアイの定量的検討

Fig. 4 は、内部破壊におけるフィッシュアイの特徴を示す寸法を定義したものである。

Fig. 5 は、内部破壊の起点深さ  $d_{inc}$  の応力依存性を示している。これによると、 $d_{inc}$  と応力の関係は、右肩上がりの傾向がうかがえる。

Fig. 6 は、フィッシュアイの形状を示す  $2a/2b$  と応力の関係を示したものである。 $2a/2b$  の値は、応力の大きさにはほとんど関係なく、ほぼ 1.0 となっている。したがって、フィッシュアイは、ほぼ真円であることを意味する。

Fig. 7 は、 $d_{inc}$  と  $2b$  の関係を示したものである。図によると、破壊の起点が深いほどフィッシュアイの寸法は大きくなる傾向を示している。これは、フ

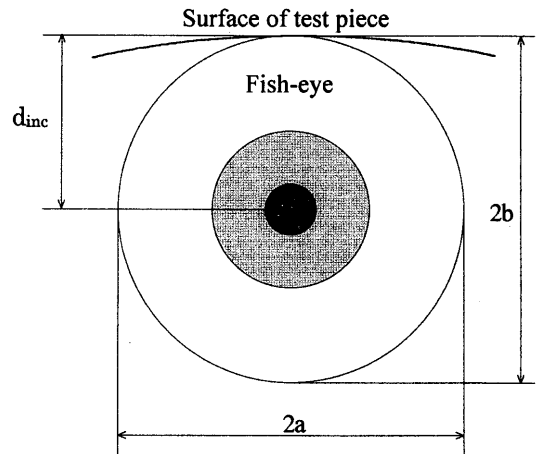


Fig. 4 Definition of notation of Fish-eye

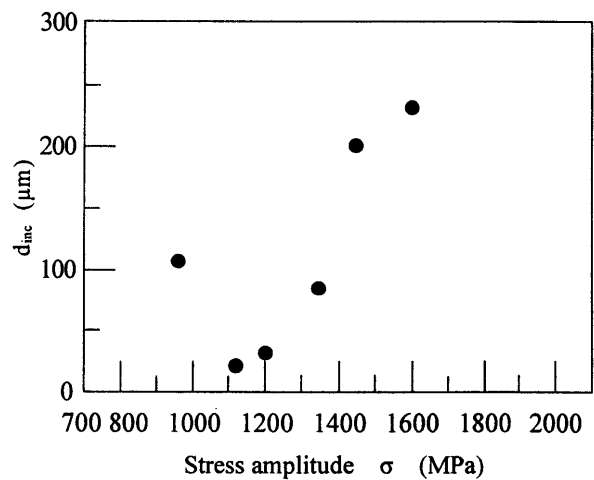


Fig. 5 Relation between  $d_{inc}$  and  $\sigma$

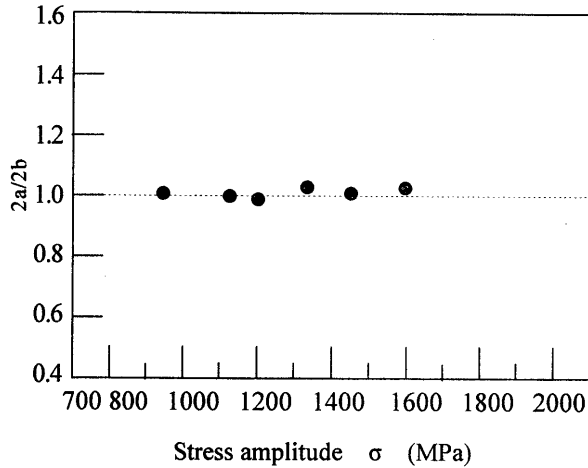


Fig. 6 Relation between  $2a/2b$  and  $\sigma$

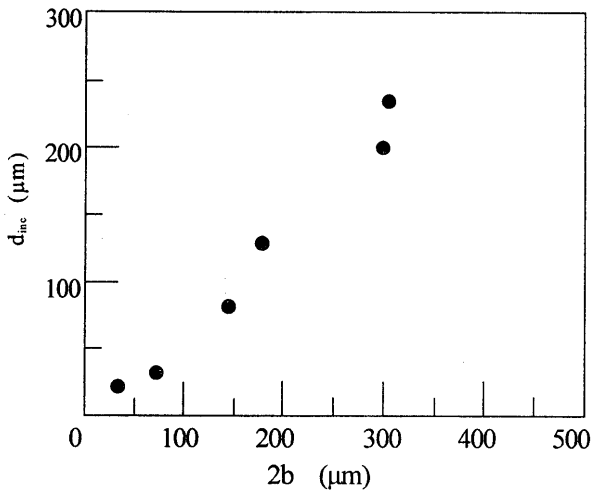


Fig. 7 Relation between  $d_{inc}$  and  $2b$

フィッシュアイが発生した場合、その直径の大小に関わらず試験片の表面まで達した後、き裂伝ばに移行するためである。

#### 4. 結 言

SUJ2 鋼を用いて回転曲げ疲労試験を行い、超長疲労寿命挙動を調べた結果、本実験の範囲内において、得られた主な結果は以下の通りである。

(1) S-N 曲線は、二段折れ曲がり現象を示し、 $N=10^7$  回における見掛けの疲労限度以下の応力においても内部の介在物を起点とする破断が現れる。

(2) 低繰返し数域で起こった破断の起点は試験片表面における結晶のすべり、または研削傷であり、高繰返し数域で起こった破断の起点は内部の介在物(フィッシュアイ型)である。

(3) フィッシュアイの形状に関して、 $2a/2b$  の値は応力の大きさにほとんど関係なくほぼ 1.0 となる。このことは、フィッシュアイは真円に近い形状であるということの意味する。

(4) フィッシュアイ寸法に関して、 $d_{inc}-2b$  に比例関係があることから、 $d_{inc}$  の値が大きくなれば、フィッシュアイは大きくなるのが分かる。

(5) 繰返し数が  $10^7$  回を超えても破断することから、この点に関連する超長寿命の設計手法を早く確立することが重要である。

#### 参考文献

- (1) T. Naito・H. Ueda・M. Kikuchi, Metal Trans, 15A, p. 1431 (1984)
- (2) 浅見, 熱処理, 25, p. 123 (1985)
- (3) 浅見, 杉山, 熱処理, 25, p. 147 (1985)
- (4) 増田・西島・田中, 日本機械学会論文集, 52A, p. 847 (1986)
- (5) 外山・菅田・宮原, 熱処理, 32, p. 315 (1992)
- (6) 浅見・弘永, 材料, 43, p. 12 (1994)
- (7) 金澤・西島, 材料, 46, p. 1396 (1997)
- (8) 松村・吉田・越智・政木, 第 26 回疲労シンポジウム講演論文集, p. 137 (2002)
- (9) 菅田・城野・植松・大瀬戸・岡嶋, 第 26 回疲労シンポジウム講演論文集, p. 169 (2002)
- (10) 緒方・藤崎・田中, 九州産業大学工学部研究報告 第 40 号, p. 48 (2003)
- (11) 酒井, (J. Soc. Mat. Sei., Japan), Vol. 53, No. 5, p. 586 (2004)
- (12) 塩澤・魯・石原, 第 24 回疲労シンポジウム講演論文集, p. 35 (1998)
- (13) 三角・池本・大久保, 第 25 回疲労シンポジウム講演論文集, p. 187 (2000)
- (14) 村上敬宜・野本・植田・村上保夫・大堀, 材料, 48, p. 1112 (1999)
- (15) 塩澤・魯・石原, 材料, 48, p. 1095 (1999)
- (16) K. Tokaji・H. -N. Ko・M. Nakajima・H. Itoga, Mater. Sci. Eng., A, 345, p. 197 (2003)