

平成 21 年 5 月 27 日現在

研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18560089  
 研究課題名（和文） 超長寿命域における変動荷重下の疲労損傷累積に関する研究  
 研究課題名（英文） STUDY ON FATIGUE DAMAGE ACCUMULATION UNDER VARIABLE AMPLITUDE LOADING IN ULTRA-HIGH CYCLE REGIME  
 研究代表者  
 城野 政弘（JONO MASAHIRO）  
 福井工業大学・工学部・教授  
 研究者番号：20029094

研究成果の概要： $10^7$  サイクルを超える超長寿命域にわたる長時間の自動荷重変動疲労試験を可能とするとともに、高硬度材の 2 段変動荷重回転曲げ試験を実施し、高応力が先に負荷される場合や応力が頻繁に変動する場合には、超長寿命域疲労においても荷重変動の影響が現れ、寿命が短くなることを示した。また、軸荷重試験による内部き裂起点型破壊では、変動荷重下の fish-eye 内のき裂進展速度は、線形則により推定できることを明らかにした。

交付額

（金額単位：円）

|         | 直接経費      | 間接経費    | 合計        |
|---------|-----------|---------|-----------|
| 2006 年度 | 1,900,000 | 0       | 1,900,000 |
| 2007 年度 | 800,000   | 240,000 | 1,040,000 |
| 2008 年度 | 800,000   | 240,000 | 1,040,000 |
| 年度      |           |         |           |
| 年度      |           |         |           |
| 総計      | 3,500,000 | 480,000 | 3,980,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械材料・材料力学

キーワード：疲労、変動荷重、超長寿命、高硬度鋼、2重 S - N 曲線、内部疲労き裂、疲労き裂進展

## 1. 研究開始当初の背景

高齢化設備時代の到来と機器の高性能化に起因して、多くの産業分野で様々な高サイクル疲労損傷の発生事例に直面している。例えば、軽水炉機器では、小口径の配管等で振動応力による  $10^6$  サイクルを超える高サイクル疲労損傷が発生しているが、疲労設計を規定したわが国の指針では、 $10^6$  サイクルを超える高サイクル疲労設計法が明記されていない。また、かなり以前から高強度材や表面硬化材においては  $10^6$  サイクル付近で一旦水平になった S - N 曲線が  $10^7$  サイクルを超えて再び低下することが指摘されており、近年そ

の重要さが上述の理由から国内外で再認識され、共同研究を含む多くの研究が実施されている。その結果として、表面からき裂が発生し破壊にいたる通常の疲労に対し、内部からき裂が発生し破壊にいたる場合には、通常の S - N 曲線の結果とは異なった破壊寿命を示し、 $10^7$  サイクルを超える超長寿命域において、疲労限度以下の低応力でも破壊が生じることが明らかにされている。しかしながらその破壊機構については、2、3 の提案があるもののまだ明確にはされていない。一方、実機の受ける長時間荷重は一定振幅であることは少なく、振幅、周期の変動するい

わゆる変動荷重であることが多い。10<sup>7</sup>サイクル以下の領域における変動荷重下の累積疲労損傷については、研究代表者等をはじめとして多くの研究があり、疲労限度の消失を含む荷重履歴効果を取り入れた累積疲労損傷則が提案され、実機の疲労寿命評価に用いられている。しかしながら、前述のような超長寿命域における変動荷重下の疲労についての研究はほとんどなく、その解明が、実機の安全性の保証のためからも重要となっている。

## 2. 研究の目的

高硬度鋼や表面硬化材では10<sup>7</sup>サイクルを超える超長寿命領域において、通常の疲労限度以下の低応力でも内部介在物を起点として疲労破壊が生じることが明らかにされ、機器の安全性評価の重要性からその破壊機構の検討がなされているが、そのほとんどは一定振幅荷重によるものである。しかしながら、実際の機械・構造物では振幅、周期の変動するいわゆる変動荷重を受けることが多いことから、本研究では10<sup>7</sup>サイクルを超える超長寿命域における変動荷重下の疲労試験を実施し、疲労損傷の累積機構を検討する。特に、表面と内部からのき裂発生という異なった破壊機構を有する超長寿命域の疲労において、この2つの機構が互いに影響を及ぼしあって疲労寿命を短くするのか、あるいはそれぞれの機構内での損傷累積を考えれば十分であるのかに重点をおいて疲労損傷の累積則を明らかにする。

## 3. 研究の方法

(1)超長寿命域の疲労試験には長時間を要するため、同時に多数本の試験を実施するか、高速度の疲労試験機を使用する必要がある。本研究では、研究代表者の下に、世界的規模での共同研究に共通に使用されている4連式回転曲げ疲労試験機を購入し、独自に自動負荷変動装置を開発、付設して長時間の変動荷重下の疲労試験を可能とする。

(2)上記試験装置を用い、破壊機構の異なる上下2段の応力からなる2段変動荷重試験を、荷重レベル、高、低荷重の頻度比を系統的に変化させて行い、その影響を明らかにする。

(3)介在物を起点とする内部疲労き裂の進展に対しては、研究分担者の下で既設の高周波油圧サーボ式軸荷重疲労試験機(速度1kHz)を使用して行い、走査型電子顕微鏡(SEM)および原子間力顕微鏡(AFM)観察等により、破壊機構ならびに内部き裂の進展速度に対する荷重変動の影響を検討する。

(4)供試材料としては、日本材料学会の共同研究において一定振幅試験のデータが集積されつつあるニッケルクロムモリブデン鋼

(SNM439)ならびにクロムモリブデン鋼(SCM435)を試験材料とし、他機関の試験結果との比較を容易にするとともに、独自材料として工具鋼(YXR7)を使用し、変動荷重下の寿命評価の基礎となる、超長寿命域を含む疲労寿命の確率特性の評価を行う。

(5)超長寿命域の内部破壊に関し、特徴的な様相である介在物周辺の細粒状領域(FGA)の形成には、水素の影響が示唆されていることから、破壊機構解明のために、水素分析について検討する。

## 4. 研究成果

(1)試験装置および自動負荷変動装置の開発  
疲労試験は、図1-1に示す(株)ホーコス社製の4連式回転曲げ疲労試験機を用いて行った。試験速度は3150rpmである。本研究のように10<sup>7</sup>サイクルを超える超長寿命域における疲労試験を実施するには、長時間の試験が必要であり、通常の試験では困難である。そのため一度に4本の試験が実施できる4連式の回転曲げ疲労試験機を用いて効率的に試験を行った。



図 1-1. 4 連式回転曲げ疲労試験機



図 1-2. 荷重変動部

繰返し変動荷重試験には、ラック・ピニオンシステムのリニアヘッドとタイマー付リミッタを組み合わせた自動負荷変動装置を試作し用いた。荷重変動部を図1-2に示すが、所定の時間毎に上部の重錘を載せた円板を上下させ、2段繰返し変動荷重試験を可能としたものである。なお、変動周期はタイマーにより1秒から999時間の間で任意に設定可能とした。これにより人力では極めて困難な長時間にわたる繰返し変動荷重試験が可能となった。

### (2) SNM439 鋼の試験結果

#### 一定振幅試験結果

SNM439 鋼の一定振幅荷重試験結果を図2-1に示す。負荷応力1200MPa以上の領域では、1500MPa、1200MPaで長寿命側にばらつくものが各一点見られるものの、実験結果はほぼ右

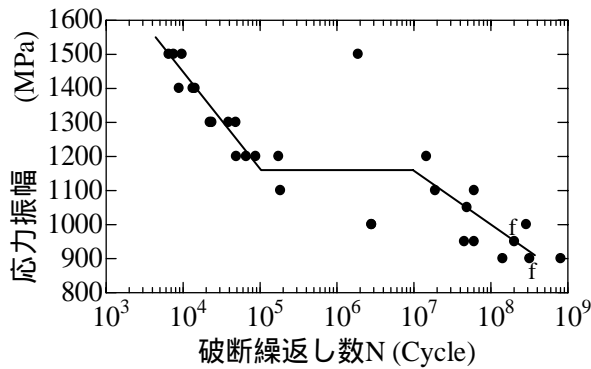


図 2-1. SNCM439 鋼の一定振幅荷重下の疲労試験結果

下がり一本の直線で表すことができる。また、1200MPa、1100MPaの間では短寿命側と長寿命側にそれぞれ点が見られ、この間でS-N曲線は一度平坦に折れ曲がると考えられる。1100MPa以下の領域では、ばらつきが大きいものの、最小自乗法を用いて直線を引くと再び長寿命側に低下する。このように硬さを非常に高くした本材料では、 $10^5$ サイクル付近で一旦水平になったS-N曲線が $10^7$ サイクルを超えて再び低下するいわゆる2重S-N曲線を示すことが確認された。なお、超長寿命域での破壊は介在物を起点とする内部破壊であるとの報告が多いが、本試験では、図中fを付した2点では、内部介在物を起点としてき裂が発生し、fish-eyeを形成して破断したことが認められたが、 $10^7$ サイクルを超えて破断した場合でも、他の試験片では介在物起点の破壊は認められず、むしろ通常の疲労破壊のように表面から破壊が生じているように見受けられた。したがって超長寿命域の破壊が全て内部介在物を起点とするとはいえず、表面すべりにより、あるいは表面に近接した介在物から破壊することが考えられる。

2段変動荷重試験結果

変動荷重試験として最も簡単な2段変動荷重試験を実施することにし、高レベル応力を通常の疲労寿命域である  $\sigma_H = 1300\text{MPa}$  (一定振幅試験時の破断繰返し数  $N_H = 4.0 \times 10^4$ ) と  $1200\text{MPa}$  (同  $9.0 \times 10^4$ ) に選び、低応力レベルとしては、超長寿命域となる  $\sigma_L = 1000\text{MPa}$  ( $N_L = 1.0 \times 10^8$ ) として、低レベル応力を所定回繰返して後高レベル応力に切り替えるLo-Hiの2段2重変動荷重試験、高レベル応力から低応力レベルに切り替えるHi-Loの2段2重変動荷重試験ならびに高、低応力を繰返し負荷する2段繰返し変動荷重試験を行った。

2段変動荷重試験の損傷値をまとめて図2-2に示す。横軸は高レベル応力の損傷値  $D_H$  で、破断までに負荷された高レベル応力の繰返し数を、同応力の一定振幅試験時の寿命で除したものであり、縦軸は同様に計算された低レベル応力の損傷値  $D_L$  である。なお、1 -

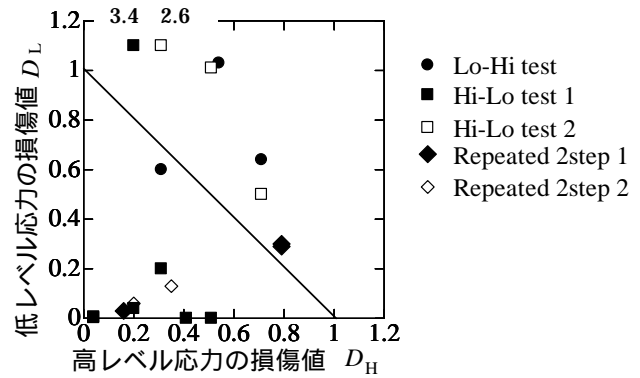


図 2-2. 2段変動荷重下の損傷値

1を結ぶ線が、線形累積損傷則を示している。Lo-Hi試験では、累積損傷値 ( $D_L$  と  $D_H$  の合計) は、ばらつきのあるものの、多くは1-1を結ぶ線の右上にあり、先に負荷した低レベル応力の影響はあまりなく、線形累積損傷則を考えておけば安全側となるようである。それに対し、Hi-Lo試験では、一次応力が1300MPaと高いtest 1では、 $D_H = 0.2$ の1本を除いて、他の試験片では累積損傷値が0.5以下と二次応力での疲労寿命が短くなり、高レベル応力の負荷が低レベル応力での疲労寿命に大きな影響を与えていることがわかる。一方、一次応力が1200MPaとS-N曲線の折れ曲がりレベルに近いtest 2では、累積損傷値は1以上となり、一次応力の繰返し数比が0.7とかかなり大きくなり、二次応力の疲労寿命にはあまり影響しないようである。

2段繰返し変動荷重試験結果は、図とともに詳細を表2-1にもあわせて示すが、試験は高、低レベル応力の1ブロック内の繰返し数を、それぞれ  $n_H$ 、 $n_L$  サイクルとし、それを繰返し負荷するものである。本試験では、高、低レベルの応力は、2段2重試験と同じく、1300MPaと1000MPaとし、高、低応力の負荷時間を1m : 1000m ( $n_H = 3.15 \times 10^3$  :  $n_L = 3.15 \times 10^6$ ) と0.5m : 500m ( $n_H = 1.58 \times 10^3$  :  $n_L = 1.58 \times 10^6$ ) の2条件を選び試験を行った。なお、負荷順序は高レベル応力から負荷した。負荷周期の長い1m : 1000mとしたtest 1では、累積損傷値は、一例として小さいものも見られるが、ほぼ1となり、線形累積損傷則

表2-1. 2段繰返し変動荷重下の試験結果 ( $\sigma_H = 1300\text{MPa}$ ,  $\sigma_L = 1000\text{MPa}$ )

| ブロック長(m)          | 破断繰返し数             | 損傷値   |       | 累積損傷値 |
|-------------------|--------------------|-------|-------|-------|
|                   |                    | $D_H$ | $D_L$ |       |
| Test 1<br>1:1000  | $2.95 \times 10^7$ | 0.79  | 0.29  | 1.08  |
|                   | $3.01 \times 10^7$ | 0.79  | 0.30  | 1.09  |
|                   | $3.11 \times 10^6$ | 0.16  | 0.03  | 0.19  |
| Test 2<br>0.5:500 | $6.31 \times 10^6$ | 0.20  | 0.06  | 0.26  |
|                   | $1.34 \times 10^7$ | 0.35  | 0.13  | 0.48  |

が成り立っているようである。それに対し、負荷周期を半分の0.5m:500mとした test 2では、累積損傷値は0.5以下となり、荷重変動の影響がみられ、寿命を短くするようである。

以上の結果、いわゆる疲労限度以上の高い応力が先に負荷された場合や、それが頻繁に繰り返される場合には、疲労限度以下の応力による疲労損傷が促進され、寿命を短くすることから、実際の機器においても、このような低レベル応力による疲労損傷について十分配慮する必要があることがわかった。

### (3) SCM435 鋼の試験結果と内部き裂進展挙動 一定振幅試験結果

S-N 曲線を図 3-1 に示す。破壊起点は表面と内部の 2 種類に分類できた。さらに表面起点型のき裂発生起点として試験片表面のすべり(印)と試験片表面に接する介在物(印)の 2 つのタイプが存在する。内部起点型では起点となる介在物周辺に FGA が存在するもの(印)と存在しないもの(印)に分けることができた。図の直線は、内部起点型で FGA を有するデータを直線回帰したものである。応力振幅  $\sigma_a = 1000\text{MPa}$  以上の応力レベルでは表面起点型、内部起点型の 2 種類が現れるが、内部起点型破壊のほうが長寿命側に位置している。 $\sigma_a = 1000\text{MPa}$  未満では FGA を有する内部起点型破壊が支配的であった。

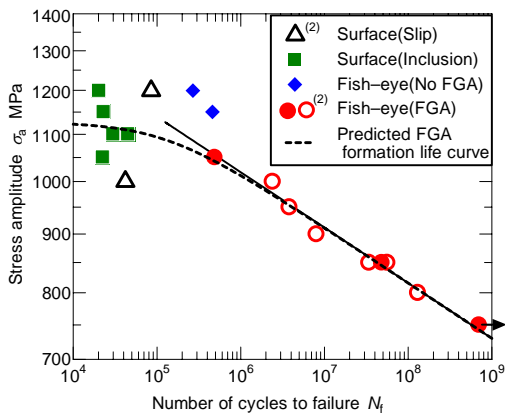


図 3-1. SCM435 鋼の一定振幅荷重下の疲労試験結果

### 2 段繰返し変動荷重試験結果

低応力  $\sigma_L$  として FGA を形成する 800MPa、高応力  $\sigma_H$  として FGA を形成する 1000MPa と FGA を形成しない 1200MPa の条件で 2 段繰返し変動荷重疲労試験を頻度比  $n_H/n_L$  を変えて行った。表 3-1 に試験結果を示す。\*印を付しているのは内部起点型破壊であるが、起点周囲に FGA が確認できなかった試験片であり、+印を付しているのは試験片表面に接する介在物が起点となったものである。高応力  $\sigma_H = 1000\text{MPa}$ 、1200MPa

の双方において FGA を有する内部起点型破壊が確認できた。変動荷重試験を行った fish-eye 領域内では、荷重変動によって形成されたビーチマークが観察された。また、FGA 内においては fish-eye 領域で見られたようなビーチマークを確認することはできず、破面性状には変動荷重の影響は確認することはできなかった。

FGA を有する内部起点型破壊の S-N 曲線を直線回帰して求めた損傷値 D を表 3-1 の右欄に示す。表面起点型破壊では、D は 1 より小さい値となっているが、これは低応力での損傷値を内部起点型の S-N 曲線を使用して求めたためである。表面起点型の S-N 曲線を求め、D を算出する必要がある。

$\sigma_H = 1000\text{MPa}$  で生じた内部起点型破壊では、FGA が観察されなかった試験片以外の D の値は 0.63 ~ 1.68 となっており、マイナー則がほぼ成立している。したがって、FGA 形成に対する高応力と低応力の疲労損傷は独立していたと考えられる。一方、 $\sigma_H = 1200\text{MPa}$  での FGA を有する内部起点型破壊の損傷値 D は 0.5 以下であり、 $\sigma_H = 1000\text{MPa}$  の場合と比較して小さい値となっている。したがって、高レベル応力が疲労損傷に対して危険側に作用していることがわかる。

表 3-1 2 段繰返し変動荷重試験結果

| $\sigma_H$<br>[MPa] | $\sigma_L$<br>[MPa] | $n_H$<br>[cycles] | $n_L$<br>[cycles] | $n_H/n_L$ | $N_f$ [cycles]    | Failure mode | D                 |          |      |
|---------------------|---------------------|-------------------|-------------------|-----------|-------------------|--------------|-------------------|----------|------|
| 1000                | 800                 | $5.0 \times 10^2$ | $1.0 \times 10^4$ | 0.05      | $3.4 \times 10^7$ | Fish-eye     | 1.41              |          |      |
|                     |                     |                   |                   |           | $6.1 \times 10^6$ | Fish-eye*    | 0.25              |          |      |
|                     |                     |                   |                   |           | $2.6 \times 10^7$ | Fish-eye     | 1.05              |          |      |
|                     |                     | $1.0 \times 10^3$ | $1.0 \times 10^5$ | 0.1       | $5.1 \times 10^4$ | Surface      | 0.10              |          |      |
|                     |                     |                   |                   |           | $1.2 \times 10^5$ | Surface      | 0.24              |          |      |
|                     |                     |                   |                   |           | $8.8 \times 10^6$ | Fish-eye     | 0.63              |          |      |
| 1200                | 800                 | $5.0 \times 10^2$ | $1.0 \times 10^4$ | 0.005     | $2.3 \times 10^7$ | Fish-eye     | 1.68              |          |      |
|                     |                     |                   |                   |           | $3.8 \times 10^7$ | Fish-eye     | 1.57              |          |      |
|                     |                     | $1.0 \times 10^2$ | $1.0 \times 10^5$ | 0.001     | $8.5 \times 10^6$ | Surface      | 0.55              |          |      |
|                     |                     |                   |                   |           | $3.2 \times 10^6$ | Surface*     | 0.79              |          |      |
|                     |                     |                   |                   |           |                   |              | $3.3 \times 10^7$ | Fish-eye | 0.33 |
|                     |                     |                   |                   |           |                   |              | $4.1 \times 10^7$ | Fish-eye | 0.42 |

### 内部き裂進展挙動

2 段繰返し変動荷重疲労試験における内部起点型破壊の破面では、fish-eye 領域においてビーチマークが観察された。このビーチマークから fish-eye 内の平均的な内部き裂進展速度を算出した。低応力進展領域の幅を  $a_{Li}$ 、高応力の進展領域の幅を  $a_{Hi}$  とすると、平均き裂進展速度はそれぞれ、 $a_{Li}/n_L$ 、 $a_{Hi}/n_H$  と求めることができる。また、ビーチマーク前縁の応力拡大係数範囲 K はビーチマークの半径を測定し、その進展領域の負荷応力より算出した。内部き裂の  $da/dN - K$  関係を、図 3-2 に示す。また、報告されている貫通き裂の進展速度曲線も同時に示す。これより、表面き裂進展速度よりも内部き裂の進展速度が低下していることが確認できる。これは、試験片内部のき裂は真空環境下にあるためと考えられる。K が約  $7.5\text{MPa}m^{1/2}$  以上の範囲で

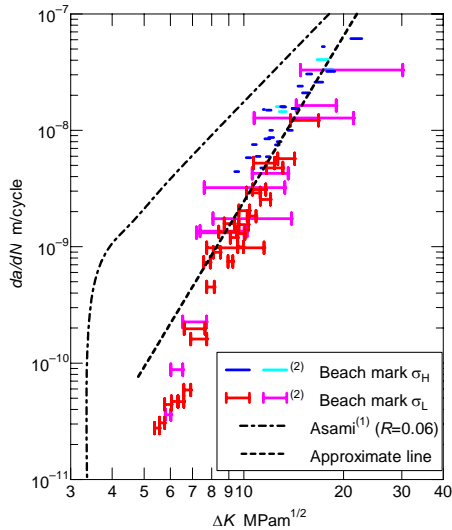


図 3-2. 変動荷重下の内部疲労き裂の進展速度

は直線関係があり、き裂進展における Stage<sub>0</sub> 型き裂に対応すると考えられる。K が約 7.5MPam<sup>1/2</sup> 以下の範囲では、平均き裂進展速度は低下しているように見られ、下限界のような挙動が認められる。da/dN-K 関係の直線部分よりき裂進展速度式を回帰した。高低両レベルのき裂進展速度は、回帰直線とほぼ一致しており、荷重変動は fish-eye 領域のき裂進展に影響を与えず、き裂進展速度にはパリズ則が成立する。なお、本進展速度を用いて計算した、fish-eye 領域のき裂進展寿命は、全疲労寿命のわずかに数%であり、このことより、小型平滑試験片の内部き裂発生型の疲労寿命のほとんどは、FGA 形成に要する寿命であり、前述の変動荷重試験において fish-eye 破壊を呈した場合の損傷値は、FGA 形成に対する疲労損傷値と考えられる。

(4) YXR 7 の試験結果

マトリックスハイス YXR7 材の一定振幅荷重下の疲労試験結果を図 4-1 に示す。図に見られるように S-N 曲線は σ = 900MPa で一旦水平になった後、10<sup>7</sup> サイクルを超えた領域で再び低下する 2 重 S-N 特性を示した。破面観察の結果から、全ての試験片は、一例を図 4-2 に示すように、アルミナを主成分とする球状の内部介在物を起点として破断した。図 4-3 は、き裂発生点となった介在物の大きさと表面からの位置を模式的に示すものであるが、便宜的に b=r/L > 0.8 の場合を表面近傍の介在物、b < 0.8 を内部介在物からのき裂発生と定義し、また、後者では fish-eye 形成の有無を区別し、それぞれ S (△)、F (●)、I (○) の記号で表し、図 4-1 中に示した。き裂発生点の介在物の位置については、寿命が 10<sup>6</sup> サイクルを超える長寿命域に対応する低応力域では、上記 3 タイプのものが混在し

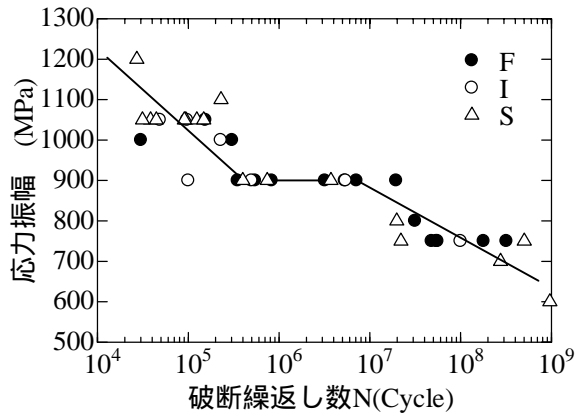


図 4-1. YXR7 鋼の一定振幅荷重下の疲労試験結果

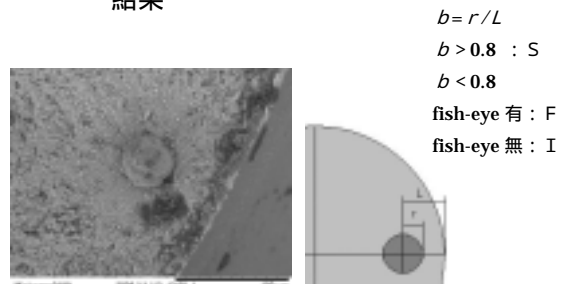


図 4-2. 内部介在物からの破断例 (N = 1.54 × 10<sup>5</sup>)

b = r/L  
 b > 0.8 : S  
 b < 0.8  
 fish-eye 有 : F  
 fish-eye 無 : I

ていたが、寿命が 5 × 10<sup>5</sup> サイクル以下となる高応力域では表面近傍の介在物を起点としてき裂が発生して破断したものが多くなるようであった。

次に、疲労寿命分布の検討を行った。本研究では平均疲労寿命が 10<sup>5</sup> サイクルとなる σ = 1050MPa、10<sup>6</sup> サイクルで S-N 曲線の折れ曲がりとなる σ = 900MPa、10<sup>8</sup> サイクルの超長寿命域である σ = 750MPa で各 10 本以上の多数試験片による疲労試験を行い、疲労寿命分布を求めた。

疲労寿命分布は通常対数正規分布で表されることが多いので、ここでも対数正規確率紙上に試験点をプロットすることにより、分布の適合度を検討した。σ = 900MPa の結果を一例として図 4-4 に示す。寿命分布は、実線で示す理論分布線に対し、ほぼ一致しているようにも見えるが、詳細に検討すると長寿命側と短寿命側の 2 つに分かれ、それぞれ理論値より急な傾きを示している。したがってそれぞれを分離して分布を検討すると、図は省略するが、より理論分布と一致し、変動係数も小さくなるようである。同様のことは σ = 1050MPa でもみられたが、σ = 750MPa では一つの対数正規分布で表せるようであった。これらの結果をまとめて表 4-1 に示す。表には全体の平均値(寿命の対数)、変動係数 ならびに対数正規分布への適合度を示している。適合度が悪い場合には、短寿命側と長寿命側

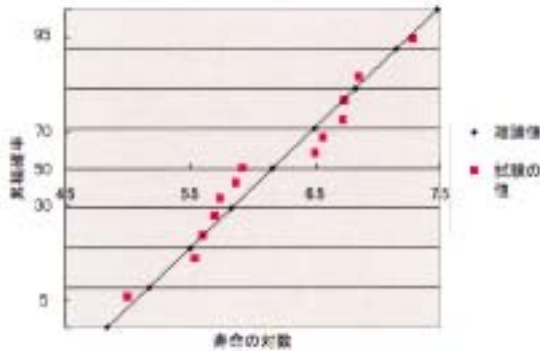


図 4-4. 疲労寿命分布 ( $\sigma = 900\text{MPa}$ )

の 2 つのグループに分け、それぞれについて同様のものを求め示している。 $\sigma = 1050\text{MPa}$  ならびに  $950\text{MPa}$  の場合は、前述のようにばらつき (変動係数) が大きく、一つの分布で表すことは困難であったが、これを 2 つに分けると、それぞれ対数正規分布で表せ、変動係数も 5 % 程度に収まっているが、通常寿命域の疲労寿命分布の変動係数よりは幾分大きいことがわかる。このことから、先に示した結果は材料が異なるので一概には言えないが、超長寿命域の疲労損傷の累積についても、幾分大きなばらつきがあるものと考えておく必要があるものと思われる。

表 4-1. YXR7 材の疲労寿命分布特性のまとめ

| 応力   | 全体  |     |    | 短寿命側 |     |    | 長寿命側 |     |    |
|------|-----|-----|----|------|-----|----|------|-----|----|
|      | 平均  | %   | 適合 | 平均   | %   | 適合 | 平均   | %   | 適合 |
| 1050 | 4.9 | 5.2 | ×  | 4.6  | 1.8 |    | 5.1  | 2.0 |    |
| 900  | 6.2 | 11  | ×  | 5.6  | 5.4 |    | 6.8  | 4.1 |    |
| 750  | 8.0 | 5.9 |    |      |     |    |      |     |    |

#### (5) 金属中の水素分析法の開発

超長寿命域疲労で現れる内部起点型破壊においては、介在物周辺に FGA と呼ばれる細粒状領域が存在し、その形成機構に水素の影響が示唆されていることから、破壊機構解明のために、水素分析について検討した。

水素侵入環境で疲労破壊した鉄鋼材料中の水素は、転位などの格子欠陥の影響を受けた水素 (いわゆるトラップ水素)、クラックなどの空洞型欠陥内部の水素分子 (いわゆる析出水素)、格子欠陥や空洞型欠陥の影響を受けずに鉄格子中に固溶した水素 (いわゆる格子固溶水素) に大別され、先ずこれらの検出法を検討した結果、トラップ水素と析出水素は昇温脱離法と高温溶解水素抽出法の併用で、格子固溶水素は電気化学的透過法でそれぞれ分離検出できる可能性があることを明らかにした。変動荷重下の回転曲げ疲労破壊において、明瞭な FGA 形成があまり認められなかったことから、FGA 形成機構まで立ち入って検討することは出来なかったが、これらの

分析手法が、今後の研究に役立つことが期待される。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

城野政弘、高硬度鋼の超長寿命域における一定および 2 段変動振幅荷重下の疲労寿命、福井工業大学研究紀要、39 号、掲載予定、2009、有

羽木秀樹、柳川聡寛、カソード分極に伴う SUS304 ステンレス鋼への水素侵入と水素脆化、福井工業大学研究紀要、38 号、99/106、2008、有

羽木秀樹、カソード分極したオーステナイト系ステンレス鋼中の水素の分析、福井工業大学研究紀要、37 号、109/116、2007、有

Atsushi Sugeta, Yoshihiko Uematsu, Keitaro Tomita, Kenji Hirose, Masahiro Jono, Development of Fatigue Testing System for in-situ Observation by an Atomic Force Microscope and Small Fatigue Crack Growth Behavior, JSME Int. J. Ser. A, 49, 382/389, 2006, 有

羽木秀樹、水素の拡散速度と固溶状態を考慮した金属材料中の水素分析、溶融塩および高温化学、49、121/129、2006、有

[学会発表] (計 3 件)

城野政弘、実働荷重下の疲労寿命推定法、日本機械学会北陸信越支部総会講演会、2008 年 3 月 8 日、福井工業大学

菅田淳、高強度鋼の二段変動荷重下における超長寿命疲労特性と内部き裂進展挙動、日本機械学会年次大会講演会、2007 年 9 月 10 日、関西大学

羽木秀樹、昇温脱離法による SUS304 ステンレス鋼の水素分析、日本機械学会年次大会講演会、2006 年 9 月 19 日、熊本大学

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

城野 政弘 (JONO MASAHIRO)  
福井工業大学・工学部・教授  
研究者番号：20029094

##### (2) 研究分担者

羽木 秀樹 (HAGI HIDEKI)  
福井工業大学・工学部・教授  
研究者番号：40117213

菅田 淳 (SUGETA ATSUSHI)  
広島大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：60162913

##### (3) 連携研究者