

© 1991 ISIJ

## 論 文

硬さを変えた高強度鋼の疲労強度に及ぼす  
介在物および微小表面ピットの影響大小森義洋\*・北川幾次郎\*・篠塚 啓吾\*<sup>2</sup>  
鳥山 寿之\*<sup>3</sup>・松田 健次\*<sup>4</sup>・村上 敬宜\*<sup>5</sup>Effects of Nonmetallic Inclusions and Small Surface Pits on the Fatigue  
Strength of a High Strength Steel at Two Hardness LevelsYoshihiro OHKOMORI, Ikujiro KITAGAWA, Keigo SHINOZUKA,  
Toshiyuki TORIYAMA, Kenji MATSUDA and Yukitaka MURAKAMI

## Synopsis :

The effects of nonmetallic inclusions and artificial corrosion pits on the fatigue strength of backup roll steel at two hardness levels are investigated. The crucial factors which control the fatigue strength of hard steels are the Vickers hardness (HV) and the square root of the projection area of inclusions or pits ( $\sqrt{\text{area}}$ ). The fatigue strength prediction equation was proposed using HV and  $\sqrt{\text{area}}$ . The lower limit of large scatter in the fatigue strength was predicted by this equation using the maximum inclusion size, which is determined by the statistics of extreme values, and HV. The quantitative perspective to the reduction of maximum inclusion size in the steel making process was suggested on the basis of the prediction equation and the extreme value data. The proposed method was applied to a new backup roll steel with high fatigue resistance.

**Key words :** steel ; backup roll ; nonmetallic inclusion ; corrosion pit ; projection area of inclusion ; Vickers hardness ; fatigue ; strength ; statistics of extreme values.

## 1. 緒 言

鋼の疲労強度  $\sigma_{wu}$  は、ビッカース硬さ HV が 400 程度までは、硬さに比例することが経験的に知られており、その関係は過去の実験結果<sup>1)2)</sup> から近似的に次式で表すことができる。

$$\sigma_{wu} = 1.6 \text{ HV} \pm 0.1 \text{ HV} (\sigma_{wu} : \text{MPa}, \text{HV} : \text{kgf/mm}^2) \quad \dots\dots\dots (1)$$

しかし、HV > 400 となる熱処理した高硬さ鋼や高強度鋼では、式(1)の比例関係から期待されるほどの疲労強度が得られず、疲労強度は飽和するかむしろ低下の傾向があり<sup>1)</sup>、そのばらつきも大きくなる。その原因として、微小欠陥や非金属介在物（以下介在物という）を起点とした疲労破壊が考えられる。近年、機械や構造物の使用

条件の苛酷化から強度特性に対する要求が厳しくなり、金属疲労における微小欠陥や介在物の問題が重要視され注目を浴びてきた。この問題は歴史的には必ずしも新しいものではなく、これまで数多くの研究が行われてきたが、欠陥や介在物の種類、分布、形状があまりにも複雑であるため統一的かつ定量的な評価法は確立されていない。

この問題を統一的に明らかにするためには、(1)欠陥や介在物を微小き裂と等価と考えること<sup>3)</sup>、さらに、(2)鋼の疲労強度は、材料のすべり帯、粒界、介在物、微小欠陥等からき裂が発生する限界の応力ではなく発生したき裂が基地組織中で伝播を停止して破断に至らない限界の応力<sup>4)5)</sup>と考えること、が本質的に重要である。また、問題を複雑にしている介在物の種類や形状の影響につい

平成元年9月本会講演大会にて発表 平成2年5月14日受付 (Received May 14, 1990)

\* 日本鑄鍛鋼(株)技術開発部 (Research and Development Dept., Japan Casting & Forging Corporation, 46-59 Sakinohama Nakahara Tobata-ku Kitakyushu 804)

\*2 日本鑄鍛鋼(株)技術部 (Product Engineering Dept., Japan Casting & Forging Corporation)

\*3 九州大学工学部 (Faculty of Engineering, Kyushu University)

\*4 九州工業大学工学部 工博 (Faculty of Mechanical Engineering, Kyushu Institute of Technology)

\*5 九州大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, Kyushu University)

ては、次のように考えることにより解決される。疲労破壊の起点に介在物が存在することは、最初介在物と基地組織の界面にき裂が形成されるか、介在物そのものが割れてき裂となり<sup>6)~8)</sup>、これが基地組織中に拡大して破断に至る過程を経ることを示唆している。このような界面または介在物中にき裂が生じた状態では、介在物の応力が開放されているから、実質的に最初から欠陥あるいは空洞が存在していた場合と等価と考えることができるのである<sup>5)9)</sup>。村上らは以上の考え方に基づいて、高強度鋼の疲労強度  $\sigma_w$  を微小欠陥や介在物の最大主応力方向への投影面積の平方根  $\sqrt{\text{area}}$  とピッカース硬さ HV なる二つのパラメーターのみで予測するために次式を提案している<sup>10)11)</sup>。

表面欠陥または介在物

$$\sigma_w = 1.43(HV + 120) / (\sqrt{\text{area}})^{1/6} \cdot [(1 - R)/2]^{\alpha} \quad (2)$$

内部欠陥または介在物

$$\sigma_w = 1.56(HV + 120) / (\sqrt{\text{area}})^{1/6} \cdot [(1 - R)/2]^{\alpha} \quad (3)$$

$$R (\text{応力比}) = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} \quad \alpha = 0.226 + HV \times 10^{-4}$$

$$(\sigma_w : \text{MPa}, \sqrt{\text{area}} : \mu\text{m}, HV : \text{kgf/mm}^2)$$

本研究では、硬さを変えた圧延ロール用鋼 (HV = 370, 560) について介在物および人工腐食ピットが疲労強度に及ぼす影響を調べ、式 (2), (3) の考え方の有効性を検討すると共に、硬さが低い場合には疲労の機構が介在物破壊から基地組織へと遷移することも示した。また、介在物の顕微鏡検査と疲労限度の予測式を組み合わせ下限值  $\sigma_{wl}$  を推定し、この方法の妥当性を調べ、製鋼法により介在物寸法を制御すれば疲労強度が大幅に改善されることも合わせて検討した。

## 2. 供試鋼および実験方法

試験片は実機圧延用補強ロールの軸端部から軸方向に 18 mm の丸棒を切り出した後油焼入れを行い、焼もどしにより二水準の硬さ (HV = 370, 560) に調整し、Fig. 1 の形状に機械加工した。Table 1 に供試鋼の化学成分を、Table 2 にはその機械的性質を示す。一部の試

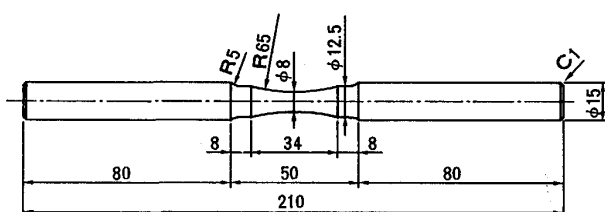


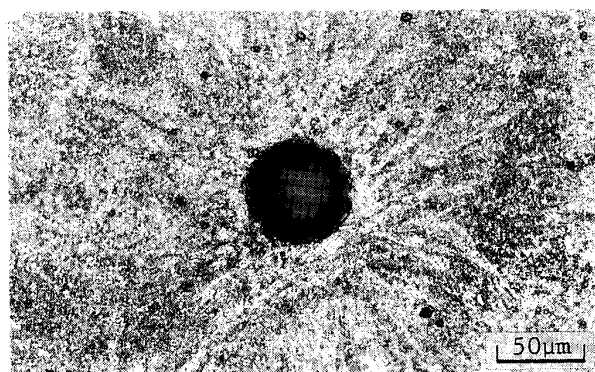
Fig. 1. Shape and dimensions of specimen.

Table 1. Chemical composition (wt%).

| C    | Si   | Mn   | P     | S     | Ni   | Cr   | Mo   |
|------|------|------|-------|-------|------|------|------|
| 0.60 | 0.60 | 0.92 | 0.008 | 0.002 | 0.33 | 5.22 | 0.43 |

Table 2. Mechanical properties.

| Hardness | 0.2% yield strength (MPa) | Tensile strength (MPa) | Elongation (%) | Reduction of area (%) |
|----------|---------------------------|------------------------|----------------|-----------------------|
| HV370    | 948                       | 1 161                  | 19.7           | 56.0                  |
| HV560    | 1 605                     | 1 868                  | 6.6            | 12.3                  |



←→ Axial direction

Diameter : 59 μm Depth : 18 μm

Photo. 1. An example of artificial surface pits.

Table 3. Final surface finish of each specimen.

|   | Hardness | Final surface finish                                            | Remarks                                                   |
|---|----------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| ① | HV370    | Emery paper (#2000)<br>Emery paper and electro polishing        | —<br>—                                                    |
| ② | HV560    | Emery paper<br>Emery paper<br>Emery paper and electro polishing | —<br>Artificial corrosion pit<br>Artificial corrosion pit |

験片は、5% 食塩水中で局所的に電解研磨することによって最小断面部表面に人工腐食ピットを作成し、ピットが疲労強度に及ぼす影響も検討した。Photo. 1 にその一例を示す。X線により試験片表面の残留応力を測定した結果、硬さの高い (HV = 560) 試験片で約 450 MPa、低い (HV = 370) 試験片で約 310 MPa 程度の圧縮残留応力が存在したが、表面層を電解研磨により約 20 μm 程度除去すればほとんど消失することが分かった。そこで本研究では、この範囲の残留応力分布を直線で近似し残留応力は破断直前まで減衰しない、すなわち平均応力と等価と考え、介在物、および人工腐食ピットの中心点の残留応力値を式 (2), (3) に代入して予測疲労限度の計算を行った。また、試験片表面の最終仕上げは Table 3 に示すように、#2000 のエメリー紙による研磨と残

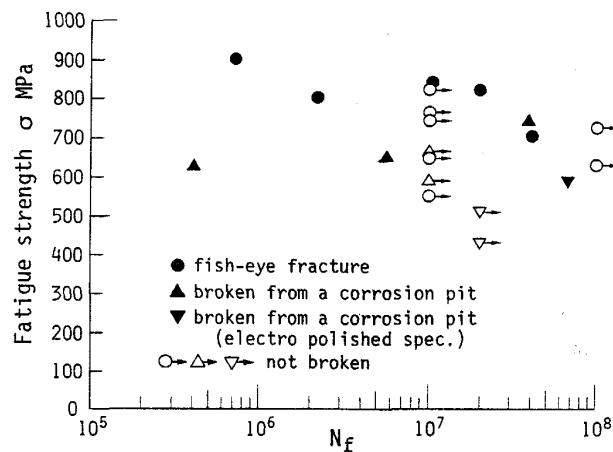
留応力の影響を除去するための電解研磨の二とおりを行った。使用した試験機は、小野式回転曲げ疲労試験機 (容量 98 N・m, 回転数 2 400 rpm) である。

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 疲労試験の結果とその定量的評価

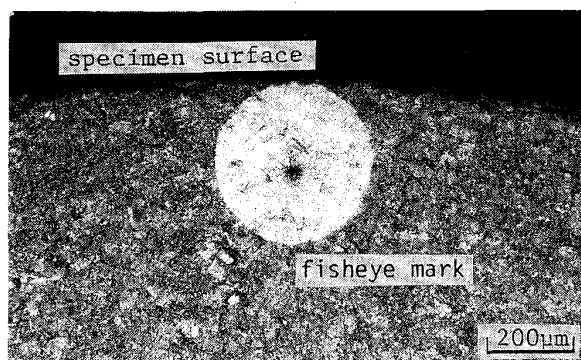
疲労限度の予測式 (2), (3) 式は, ある限界値  $\sqrt{\text{area}_c}$  以上, 1 000  $\mu\text{m}$  未満の値を持つ  $\sqrt{\text{area}}$  に対して有効である。基地組織に固有な疲労強度は硬さによって決まるが,  $\sqrt{\text{area}_c}$  以上の値を持つ介在物が存在する場合には, その疲労強度は硬さから期待される値よりも低くなる。また, 下限値  $\sqrt{\text{area}_c}$  以下の値に対しては, 疲労限度として式 (1) から求められる基地組織に固有な上限値  $\sigma_{wu}$  が存在する。  $\sqrt{\text{area}_c}$  の値は材料の組織や硬さに依存しており, 硬さが増せば  $\sqrt{\text{area}_c}$  は小さくなる傾向を持つ<sup>12)13)</sup>。通常の高強度鋼中の  $\sqrt{\text{area}}$  は特別な介在物制御を行わない限り  $\sqrt{\text{area}_c}$  よりも大きく, これが HV > 400 となる高強度鋼がその静的強度から期待されるほど

の疲労強度を得られない理由である。以下ではこのような観点から疲労試験の結果を考察してゆく。 Fig. 2 に硬さの高い (HV 560) 試験片の S-N 曲線を示す。図中の○は平滑材, △は人工腐食ピット材の結果である。平



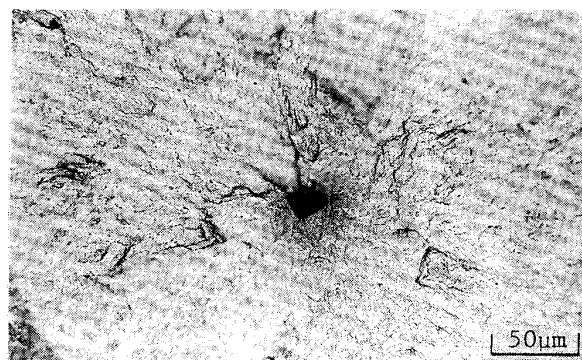
HV ranges from 554 to 567

Fig. 2. S-N curve (Rotating bending fatigue).



Hv=561,  $\sigma=843\text{MPa}$ ,  $N_f=1.030 \times 10^7$

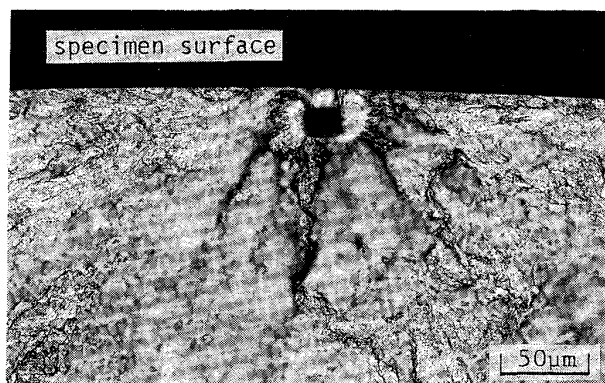
(a) Fisheye mark



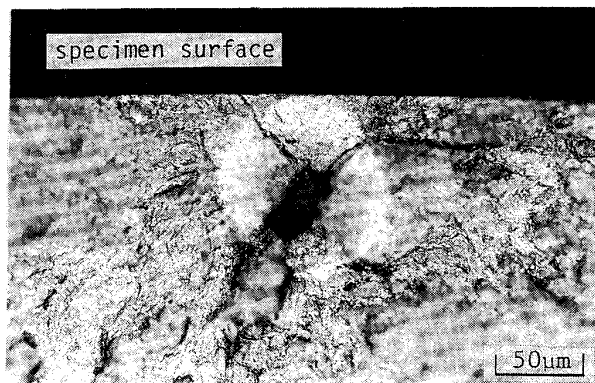
$\sqrt{\text{area}}=16.7\mu\text{m}$ , Distance from surface  $h=212\mu\text{m}$

(b) Magnification of the center of fisheye

Photo. 2. A typical example of fisheye.



(a)  $\sqrt{\text{area}}=17.8\mu\text{m}$  Distance from surface  $h=21\mu\text{m}$

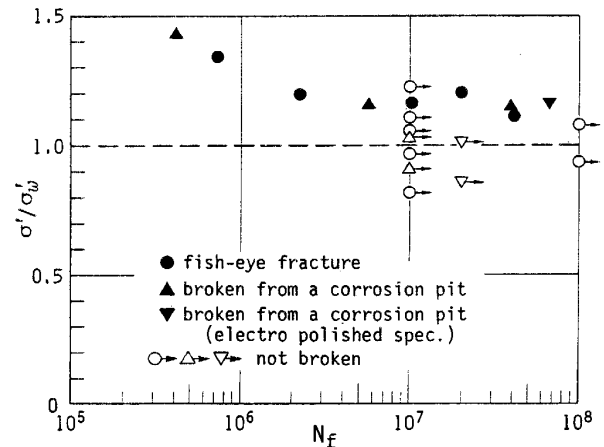


(b)  $\sqrt{\text{area}}=31.5\mu\text{m}$  Distance from surface  $h=68\mu\text{m}$

Photo. 3. Fatigue fracture appearance of plain specimens.

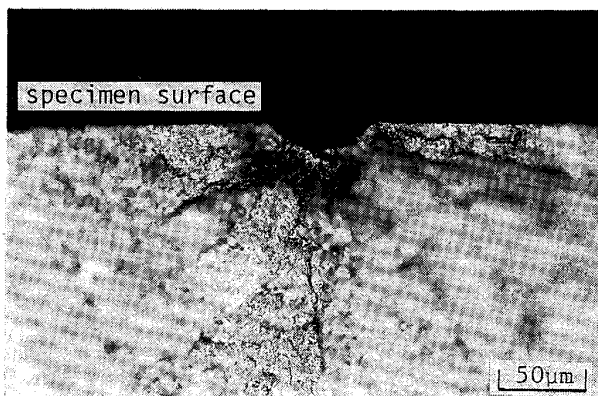
滑材の疲労破壊の起点はすべて試験片内部である。そのことは、疲労破断面にフィッシュ・アイと呼ばれる典型的な模様が観察されることから分かる。Photo. 2 と Photo. 3 にフィッシュ・アイ破壊の例を示す。フィッシュ・アイの中心には、Photo. 2(b)や Photo. 3 に示されるような介在物が観察された。これらの介在物は EPMA の分析結果から、CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等の酸化物系であることが分かった。また、人工腐食ピットから破壊した例を Photo. 4 に示す。Table 4 に介在物中心位置（ピット材は表面）の公称応力  $\sigma'$  と式(2)または式(3)による予測疲労限度  $\sigma_w'$  との比較を示す。 $\sigma_w'$  は破断した各試験片について、試験片の硬さ、破壊の起点となった介在物の位置、および大きさ( $\sqrt{\text{area}}$ )を式(2), (3)に代入して求めた。また、破断しなかった試験片については致命的な介在物の位置と大きさが不明なので、その後負荷応力を上げて破断させて  $\sigma_w'$  を求め、 $\sigma'$  との比較を行った。これらの結果を、縦軸に  $\sigma'/\sigma_w'$  を横軸に破断までの繰返し数  $N_f$  をとってプロットしたもの

を Fig. 3 に示す。Table 4 と Fig. 3 より、疲労破壊した試験片はすべて  $\sigma'/\sigma_w' > 1$  となっており、 $\sigma'/\sigma_w' < 1$  となる試験片は破壊していないこと、および  $\sigma'/\sigma_w'$  が

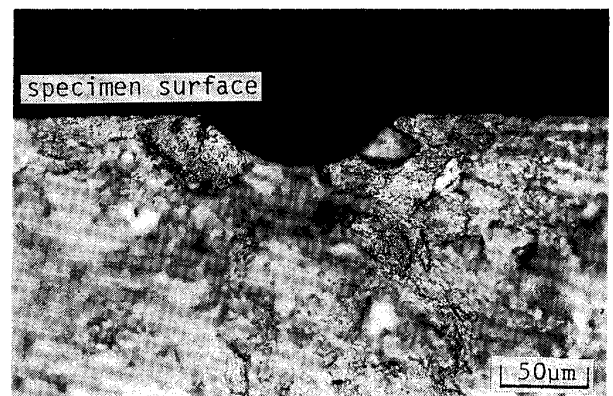


$\sigma'$ : Applied stress at inclusion  
 $\sigma_w'$ : Predicted fatigue limit at inclusion or pit  
 $N_f$ : Cycles to failure

Fig. 3. Modified S-N diagram.

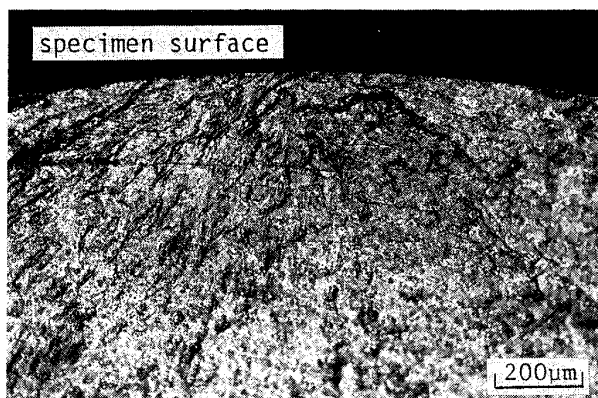


(a) Hv=565,  $\sigma=745\text{MPa}$ ,  $N_f=3.829 \times 10^7$ ,  $\sqrt{\text{area}}=27.2\mu\text{m}$   
 Depth of corrosion pit  $t=18\mu\text{m}$

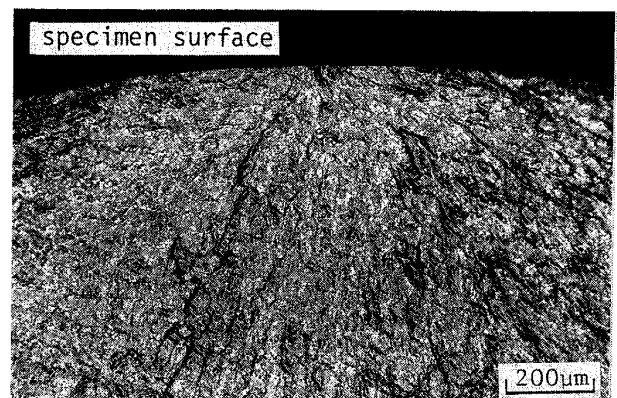


(b) Hv=556,  $\sigma=588\text{MPa}$ ,  $N_f=6.778 \times 10^7$ ,  $\sqrt{\text{area}}=50.1\mu\text{m}$   
 Depth of corrosion pit  $t=31.1\mu\text{m}$

Photo. 4. Fatigue fracture appearance from surface corrosion pit.



(a) Hv=372,  $\sigma=686\text{MPa}$ ,  $N_f=4.830 \times 10^5$



(b) Hv=371,  $\sigma=666\text{MPa}$ ,  $N_f=9.510 \times 10^6$

Photo. 5. Fatigue fracture appearance of plain specimens.

Table 4. Fatigue test results, size and location of inclusions and corrosion pits, and fatigue limit predicted by eqs. (2), (3).

## (a) Plain specimen

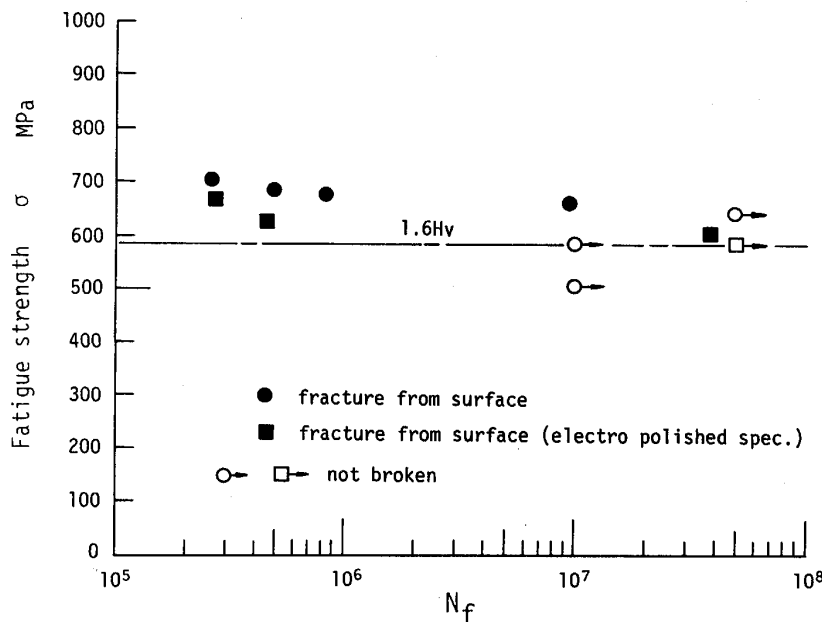
| Specimen | Hv  | $\sigma$                        | $N_f$                                                                                                       | $\sqrt{area}$ | h   | Shape of inclusion | $\sigma'$                       | $\sigma'_w$ (R) | $\sigma'/\sigma'_w$                    |
|----------|-----|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|-----|--------------------|---------------------------------|-----------------|----------------------------------------|
| A J 1    | 561 | 764<br>843                      | $10^7 \rightarrow$<br>$1.030 \times 10^7$                                                                   | 16.7          | 212 |                    | 701<br>772                      | 664(-1.0)       | 1.05<br>1.16                           |
| A J 2    | 564 | 549<br>647<br>745<br>823<br>902 | $10^7 \rightarrow$<br>$10^7 \rightarrow$<br>$10^7 \rightarrow$<br>$10^7 \rightarrow$<br>$7.302 \times 10^5$ | 17.8          | 21  |                    | 539<br>635<br>731<br>808<br>885 | 660(-1.0)       | 0.816<br>0.962<br>1.11<br>1.22<br>1.34 |
| A J 3    | 565 | 823                             | $1.996 \times 10^7$                                                                                         | 27.2          | 44  |                    | 740                             | 616(-1.0)       | 1.20                                   |
| A J 4    | 567 | 706                             | $4.046 \times 10^7$                                                                                         | 31.5          | 68  |                    | 669                             | 603(-1.0)       | 1.11                                   |
| A J 6    | 554 | 627<br>725<br>804               | $10^8 \rightarrow$<br>$10^8 \rightarrow$<br>$2.223 \times 10^6$                                             | 16.3          | 39  |                    | 616<br>712<br>789               | 660(-1.0)       | 0.933<br>1.08<br>1.20                  |

Hv : Vickers hardness number.  $\sigma$  : Nominal stress at surface (MPa). $N_f$  : Cycles to failure. $\sqrt{area}$  : Square root of projection area of inclusion or pit ( $\mu\text{m}$ ).h : Distance from surface ( $\mu\text{m}$ ).  $\sigma'$  : Nominal stress at inclusion (MPa). $\sigma'_w$  : Fatigue limit predicted by Eq. (3) (MPa). R : Stress ratio

## (b) Specimen with corrosion pit

| Specimen                    | Hv  | $\sigma$          | $N_f$                                                                             | $\sqrt{area}$ | t  | Shape of pit | $\sigma_R$ | $\sigma'_w$ (R) | $\sigma'/\sigma'_w$   |
|-----------------------------|-----|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------|----|--------------|------------|-----------------|-----------------------|
| A J 8                       | 566 | 627               | $4.099 \times 10^5$                                                               | 123           | 40 |              | 0          | 460(-1.0)       | 1.43                  |
| A J 9                       | 562 | 647               | $5.702 \times 10^6$                                                               | 44.3          | 28 |              | -129       | 558(-1.60)      | 1.16                  |
| A J 10                      | 565 | 588<br>666<br>745 | $10^7 \rightarrow$<br>$10^7 \rightarrow$<br>$3.829 \times 10^7$                   | 27.2          | 18 |              | -247       | 647(-2.23)      | 0.909<br>1.03<br>1.15 |
| A J 5<br>(Electro-polished) | 556 | 431<br>510<br>588 | $2 \times 10^7 \rightarrow$<br>$2 \times 10^7 \rightarrow$<br>$6.778 \times 10^7$ | 50.2          | 31 |              | 0          | 503(-1.0)       | 0.857<br>1.01<br>1.17 |

t : Depth of corrosion pit ( $\mu\text{m}$ ) $\sigma_R$  : Residual stress at the location of center of corrosion pit (MPa) $\sigma' = \sigma$ .  $\sigma'_w$  : Fatigue limit predicted by Eq. (2)



HV ranges from 362 to 384  
Fig. 4. S-N curve (Rotating bending fatigue).

大きくなると  $N_f$  が小さくなるという傾向があることから、式(2)、(3)による予測が妥当なものであることがいえる。これに対し、Fig. 3の試験結果を、縦軸に試験片表面の公称応力をとって通常のS-N曲線を描くと、極めて大きいばらつきを示すので、データはまとまりがなくなり利用しにくいものとなる。次に、Fig. 4に硬さの低い ( $HV=370$ ) 平滑材のS-N曲線を示す。図中の□は #2000のエメリー紙にて研磨した試験片、○は電解研磨により表層の圧縮残留応力の影響を除去した試験片の結果である。この図から、低硬さ材では、明確な疲労限度が存在し、疲労強度のばらつきもほとんどないことが分かる。また、Photo. 5の破面からも分かるように、疲労破壊の起点はすべて最小断面部表面付近の基地組織であり、硬さの高いものとは疲労破壊の起点が異なることは注目すべきことである。先に述べたように、基地組織から破壊する場合には基地組織に固有な理想的疲労限度が達成される。そこで、試験片の平均硬さを式(1)に代入して理想的な疲労限度の上限値を求めると 595 MPa となる。実験結果と比較するためこの値を Fig. 4 中に一点鎖線で示している。電解研磨により表層の残留応力の影響を除去した試験片の疲労限度は  $N_f$  が大きくなるとこの値(一点鎖線)に近づくが、エメリー紙研磨により最終仕上げした試験片の疲労限度は、電解研磨した試験片と比べて約 10% ほど高くなっている。これは試験片表面に存在する圧縮残留応力の影響と考えられる。

### 3.2 疲労強度のばらつきの下限値の予測とその製鋼法への応用

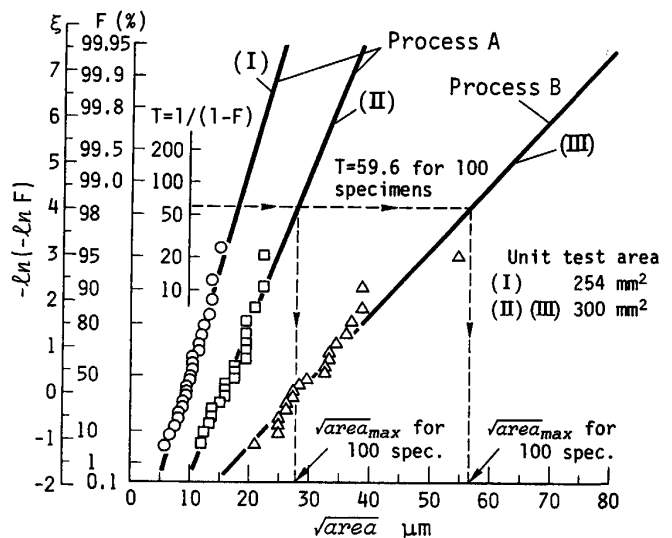


Fig. 5. Cumulative frequency of the extreme values (the maximum size  $\sqrt{area_{max}}$ ) of inclusions.

介在物や腐食ピット等が疲労強度に影響を及ぼす場合、その位置や形状の複雑さが疲労限度の大きなばらつきの原因となる。村上ら<sup>14)15)</sup>は、疲労強度のばらつきの上下限値を予測する方法を提案し、種々の材料についてその妥当性を証明している。それによれば、疲労強度の上限値は、微小欠陥や介在物を起点とした破壊ではなく、基地組織から破壊する場合で、式(1)で与えられる。疲労強度の下限値は、試験片中の最大の介在物が表面に接して存在する場合に得られる。試験片中の最大の介在物の大きさを予測するためには、介在物の  $\sqrt{area}$  の分布に対して極値統計<sup>16)</sup>を適用すればよい。Fig. 5は

ロール軸に垂直な面の基準面積  $S_0$  ( $254 \text{ mm}^2$  または  $300 \text{ mm}^2$ ) における検鏡結果から得られた介在物の  $\sqrt{\text{area}_{\max}}$  (基準面積中の最大の介在物の  $\sqrt{\text{area}}$ ) の累積頻度分布をプロットしたものである。  $\sqrt{\text{area}_{\max}}$  の各値は極値確率紙上で直線を示しており、介在物の  $\sqrt{\text{area}_{\max}}$  は極値分布に従っているとみなすことができる。したがって、図中の破線で示した手順によって分布直線と再帰期間  $T$  との交点から、検査した領域よりはるかに広い領域に存在することが期待される  $\sqrt{\text{area}_{\max}}$  を予測することができる。例えば、 $N$  本の試験片の場合の再帰期間  $T$  は、1 本の試験片の表面で危険にさらされる面積を  $S$  とすると、 $T = NS/S_0$  で与えられる。図中 I) は疲労試験片採取材からサンプリングしたものである。(II) は (I) と同一の製鋼法 (A 法) による材料、(III) は (I), (II) とは異なる製鋼法 (B 法) によるもので、いずれも実機ロールの表層近傍からサンプリングしたものである。(III) は (I), (II) と比較して介在物寸法が大きく、分布が明らかに異なっており、製鋼法の違いが介在物寸法の顕著な違いとなって現れている。そのため、製鋼法を B から A へ改善することにより疲労強度が向上することが期待できる。

ところで、応力比 ( $R$ ) = -1 のときの疲労強度の下限值  $\sigma_{wl}$  は次式により推定できる<sup>17)</sup>。

$$\sigma_{wl} = 1.41(HV + 120)/(\sqrt{\text{area}})^{1/6} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、係数 1.41 は介在物が試験片表面に接して存在すると仮定したときの値である<sup>15)</sup>。本研究での試験片は、製鋼法 A により製造された実機補強ロールの軸端部から採取したもので、硬さ HV と先に述べた手順によ

り求めた  $N$  本 ( $N=10, 100$ ) の試験片に含まれる介在物の中の予想最大寸法  $\sqrt{\text{area}_{\max}}$  を式 (5) に代入すると、疲労強度の下限値を予測することができる。Fig. 6 に、その予測値と実験結果を比較したものを示す。硬さの高い ( $HV=560$ ) 試験片では、疲労破壊の起点はすべて介在物もしくは人工腐食ピットであった。これらの試験片の結果は、Fig. 6 に示すように、破断試験片 (●印) と非破断試験片 (○印) が理想的な疲労強度 (疲労強度の上限值) と式 (5) による疲労強度の下限值との間にばらついて分布しており、硬さの高い試験片についての下限値の予測は、妥当なものであるといえる。このことは、少数の試験片で疲労試験してたまたま高応力で破断したからといってその値をそのまま設計応力や強度計算の資料にしてはならないことを意味している。強度のばらつきは防ぐことのできない現象であるが、大きなばらつきを考慮してあいまいな大きい安全率を採用するより、本研究で示した極値統計手法と疲労限度予測式を合わせてばらつきの下限値を推定するのが合理的である。これに対して、硬さの低い ( $HV=370$ ) 試験片はすべて基地組織が破壊の起点になっており、硬さの高い試験片とは疲労破壊の機構が異なる。これらの試験片の結果は、既に述べたように経験的に期待できる疲労強度の上限值もしくは若干高めの値を示している。したがってこの場合は、圧縮残留応力の影響も若干強度上昇に寄与していると考えられるが、疲労強度が介在物に影響されない理想的な場合の値を達成していると考えてよいであろう。

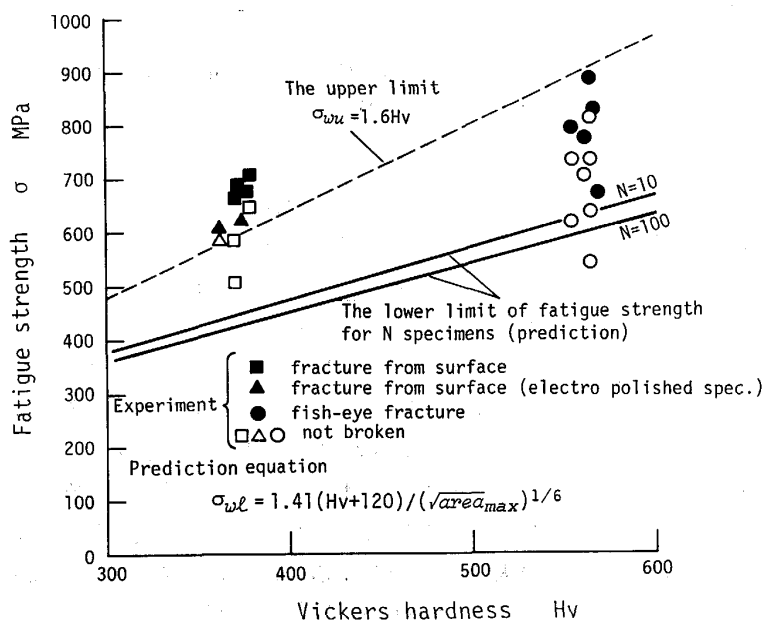


Fig. 6. Comparison of the predicted lower limit of fatigue strength with the experimental results.

## 4. 結 言

硬さを変えた (HV=370, 560) 圧延ロール用鋼を対象として回転曲げ疲労試験を行い次の結論を得た。

1) 硬さの高い (HV=560) 試験片の疲労破壊の起点はすべて介在物もしくは人工腐食ピットであった。Fig. 6 に示されるように、介在物中心位置 (ピット材は表面) の公称応力  $\sigma'$  と式 (2) または式 (3) による予測疲労限度  $\sigma_w'$  との比  $\sigma'/\sigma_w'$  はすべて 1 より大きく、 $\sigma'/\sigma_w' < 1$  となる試験片は破壊していない。また、 $\sigma'/\sigma_w'$  が大きくなると  $N_f$  が小さくなるという傾向があり、疲労限度の予測値は実験結果と良好な一致を示した。したがって、高強度鋼の疲労限度  $\sigma_w$  を支配する決定的因子は、ピッカース硬さ HV と微小欠陥や介在物の最大主応力方向への投影面積の平方根  $\sqrt{area}$  であることがわかる。このことから、疲労強度の上昇には製鋼プロセスと熱処理において HV と  $\sqrt{area}$  を制御することが肝要である。

2) 硬さの低い (HV=370) 試験片の S-N 曲線には明確な疲労限度が存在し、疲労強度のばらつきもほとんどない。また、疲労破壊の起点はすべて最小断面部表面付近の基地組織であり、硬さの高いものとは疲労破壊の機構が異なる。そのためにこれらの試験片の疲労強度は、経験的に期待される上限値 ( $\sigma_{uu}$ ) もしくはそれより若干高めの値を示した。したがってこの場合は、圧縮残留応力の影響も若干強度上昇に寄与していると考えられるが、疲労強度が介在物に影響されない理想的な場合の値を達成しているものと考えられる。

3) 疲労強度のばらつきの上限値は、基地組織から破壊する場合には、式 (1) で与えられ、ばらつきの下限値は試験片中の最大の介在物が表面に接して存在する場合に得られる。介在物寸法の分布に極値統計を適用することにより  $N$  本の試験片中の  $\sqrt{area}$  の最大値  $\sqrt{area_{max}}$  を予測することができる。その  $\sqrt{area_{max}}$  と硬さ HV を提案する予測式に代入して求めた疲労限度のばらつきの下限値は多数の試験片の実験結果のばらつきと良好な対

応を示した。

4) 介在物代表寸法として  $\sqrt{area}$  を採用し、 $\sqrt{area}$  の極値分布直線を介在物評価の基準として用いることにより、介在物からみた材質の品質管理が可能となる。具体的には  $\sqrt{area_{max}}$  の極値分布直線を参考にしながら製鋼法を改善することにより疲労強度の向上が期待できる。本研究で提案する方法は定量的に材質の良否の程度を判定でき、JIS 点算法よりはるかに多くの情報量を与えることができるもので、今後この方向でのデータベースの蓄積が望まれる。

## 文 献

- 1) M. F. GARWOOD, H. H. ZURBERG and M. A. ERICKSON: Interpretation of Tests and Correlation with Service, ASM (1951), p. 1
- 2) 西島 敏: 材料, **29** (1980), p. 24
- 3) 村上敬宜, 遠藤正浩: 日本機械学会論文集 A, **49** (1983), p. 127
- 4) 村上敬宜, 福田四郎, 遠藤達雄: 日本機械学会論文集, **44** (1978), p. 4003
- 5) Y. MURAKAMI and T. ENDO: The Behavior of Short Fatigue Cracks, EGF Pub., ed. by K. J. MILLER and E. R. de los RIOS, **1** (1986), p. 275 [Mech. Eng. Pub.]
- 6) 角田方衛, 内山 郁, 荒木 透: 鉄と鋼, **57** (1971), p. 335
- 7) T. ARAKI: Proc. Int. Symp. on Inclusions and Their Influence on Material Behavior, Chicago, Illinois, ASM (1988), p. 149
- 8) W. L. MORRIE: Metal. Trans. A, **7** (1976), p. 1345
- 9) 村上敬宜, 遠藤正浩: 材料, **35** (1986), p. 911
- 10) 村上敬宜, 上村裕二郎, 夏目喜孝, 宮川 進: 日本機械学会論文集 A, **56** (1990), p. 1074
- 11) 大小森義洋, 北川幾次郎, 篠塚啓吾, 松田健次, 村上敬宜: 材料とプロセス, **2** (1989), p. 1797
- 12) 村上敬宜, 河野博之, 遠藤達雄: 材料, **29** (1980), p. 988
- 13) Y. MURAKAMI and T. ENDO: Proc. Fatigue '81, ed. by F. SHERAT (1981), p. 431 [Westbury House]
- 14) 村上敬宜, 児玉昭太郎, 小沼静代: 日本機械学会論文集 A, **54** (1988), p. 688
- 15) 村上敬宜, 宇宿尚史: 日本機械学会論文集 A, **55** (1989), p. 213
- 16) E. J. GUMBEL 著, 河田竜男, 岩井重久, 加瀬滋男他訳: 極値統計学 (1963), p. 1 [広川書店]
- 17) Y. MURAKAMI: JSME Int. J. Ser. I, **32** (1989), p. 167