

# JIS点算法の問題点と極値統計法による 介在物評価とその応用

村上 敬宜\*・鳥山 寿之\*

Critical Review of the Inclusion Rating by JIS-G-0555 Method and  
New Inclusion Rating Based on Statistics of Extreme and Its Applications

Yukitaka MURAKAMI and Toshiyuki TORIYAMA

**Synopsis :** It is shown that conventional standards for inclusion rating such as ASTM method and Japanese Industrial Standard (JIS method) are no longer useful for the evaluation of inclusions contained in recent clean steels. A new inclusion rating method based on the statistics of extreme is proposed.

Inclusion ratings on two kind of super-clean bearing steels, SUJ2(N) and SUJ2(H) were done by JIS method and the method based on the statistics of extreme and the results were compared. Total oxygen contained in SUJ2(N) was 8ppm and that in SUJ2(H) was 5ppm. No clear difference was obtained by JIS method between the inclusion ratings of SUJ2(N) and SUJ2(H). If we define the size of the maximum inclusion in a standard inspection area by the square root of projection area,  $\sqrt{\text{area}_{\text{max}}}$ , the distribution of  $\sqrt{\text{area}_{\text{max}}}$  obeys the statistics of extreme.

The method based on statistics of extreme can distinctly discriminate even the slight difference in cleanliness between SUJ2(N) and SUJ2(H). Moreover, the method of statistics of extreme enables one to predict the size of the maximum inclusion which is expected to be contained in larger area or volume than inspected area.

The value of  $\sqrt{\text{area}_{\text{max}}}$  can be also used for the prediction of scatter band of fatigue strength of high strength steels. The agreement of the prediction and experiments on the scatter band of fatigue strength of SUJ2(N) and SUJ2(H) is shown.

**Key words :** fatigue strength ; bearing steel ; inclusion ; cleanliness ; inclusion rating ; JIS-G-0555 method ; square root of projection area( $\sqrt{\text{area}}$ ) ; statistics of extreme values.

## 1. 緒言

鋼のビッカース硬さ $H_V$ が400程度より低い場合には、疲労強度は $H_V$ にはほぼ比例して上昇するので高い疲労強度を得るためには硬度を上げればよい。しかし、 $H_V$ が400以上になると、疲労強度は単純に $H_V$ に比例して上昇しない<sup>1)2)</sup>。最近では、この原因は、微小欠陥や非金属介在物であることが明らかになっている。微小欠陥や介在物の存在は高強度鋼の疲労強度の低下だけでなく、ばらつきの原因にもなる。

この問題の一番の解決方法は、鋼を清浄にすることであるといわれてきたので、製鋼技術者は清浄な鋼を製造するために努力してきた。その結果、ここ20年間、我国の鋼の清浄度は著しく改良された。しかし、鋼が清浄になるに従って1つの問題が起って来た。それは、清浄度を測る「ものさし」の問題である。これまで、清浄度を測る「ものさし」として利用されてきたものとしては、アメリカのASTM法<sup>3)4)</sup>、旧ソビエトのGOST法<sup>5)</sup>、ドイツのVDEh法<sup>6)</sup>、フランスのミシュラン法<sup>7)</sup>、スウェーデンのJernkontoret法<sup>8)</sup>、日本のJIS点算法<sup>9)10)</sup>やJSMA法<sup>11)</sup>などがある。

問題は、これらの種々の清浄度評価法による材質評価は必ずしも相互に整合性がないことである<sup>7)</sup>。これは、鋼が清浄になり、従来の多くの大型介在物を対象とした「ものさし」が極めて少数の微小介在物を含む鋼に対して有効でなくなってきたためである。

しかし、これまでの介在物評価法の最大の欠点は何といっても疲労強度との相関がないことである<sup>10)11)</sup>。これは、従来の介在物評価法が疲労現象の詳細な観察結果にもとづいて提案されたものではないからである。最近の<sup>12)~14)</sup>の詳細な実験結果によれば、疲労強度に最も有害なのは大きい介在物であり、介在物の化学組成や数、分布密度は本質的ではない。

このような、最近の研究成果を介在物評価に生かすには、介在物の数や形状ではなく、ある一定領域中の最大の介在物がどの程度の寸法かということを材質評価の有効な「ものさし」にすることを考えるべきである。著者らはこの考えに従って、極値統計法による介在物評価法を提案してきた<sup>15)</sup>。

本論文では、介在物からの疲労破壊現象を正しく把握するための具体例を極めて清浄な2種類の軸受鋼について示

Table 1. Chemical composition of bearing steels, SUJ2 (N) and SUJ2 (H).

| Materials              | wt (%) |      |      |       |       |      |      |      |       |       |         |         |
|------------------------|--------|------|------|-------|-------|------|------|------|-------|-------|---------|---------|
|                        | C      | Si   | Mn   | P     | S     | Cu   | Ni   | Cr   | Ti    | Al    | N (ppm) | O (ppm) |
| Normal grade, SUJ2 (N) | 0.99   | 0.23 | 0.34 | 0.014 | 0.014 | 0.01 | 0.02 | 1.45 | 0.001 | 0.025 | 45      | 8       |
| High grade, SUJ2 (H)   | 0.98   | 0.23 | 0.37 | 0.010 | 0.005 | 0.01 | 0.02 | 1.43 | 0.002 | 0.021 | 55      | 5       |

すとともに、この2種類の軸受鋼をJIS点算法で測定したときの問題点を指摘する。そして、提案する極値統計法を採用すればJIS点算法の問題点が解消されるだけでなく、評価結果が疲労強度推定や材料の品質管理にも応用できることを示す。

## 2. 使用材料および測定方法

清浄度の高い軸受鋼SUJ2を2種類準備した。鋼中酸素量Oが8ppmのものを清浄鋼(Normal grade)と呼び、5ppmのものを超清浄鋼(High grade)と呼ぶことにする。Table 1に化学成分を示す。

試験片は、まず、直径約65mmの圧延丸棒から直径17mm、長さ220mmの丸棒を切り出した。次に、ビッカース硬さHv=750を目標に熱処理(820°C×30min保持後、油焼入れ、180°C×30min保持後、空冷)を行った。その後、最小断面部直径8mm、切欠半径65mm、試験部長さ34mmの砂時計型回転曲げ試験片に機械加工した。試験片の試験部は2000番までのエメリー紙と1/4μm粒径のダイヤモンドペーストを用いて研摩仕上げした。

X線応力測定装置により試験片最小断面部表面の残留応力を測定したところ、約690MPaの圧縮残留応力が存在することがわかった。試験片表面を電解研摩により約40μm除去したところ、これらの圧縮残留応力は消失した。そこで、表面から40μmの深さまでの残留応力分布を直線で近似し、破壊起点になる介在物がこの範囲に存在した場合には、その部分の残留応力を平均応力と等価と考えて<sup>16)</sup>疲労限度の予測を行った。

使用した試験機は、小野式回転曲げ疲労試験機(容量98N・m、回転数約2400rpm)である。

著者らが提案する介在物評価法は極値統計を利用したものである<sup>14)15)</sup>。この方法では、主応力作用方向と垂直な面(圧延方向に垂直な面)について40箇所を無作為に選び、画像処理装置により検査基準面積 $S_0$ 中の最大介在物寸法(投影面積の平方根) $\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}$ を読み取る。なお、検査基準面積は $S_0=0.075\text{mm}^2$ とした。

## 3. 介在物、微小欠陥を含む高強度鋼の疲労限度の予測式

従来は、介在物が疲労強度に及ぼす影響については化学成分や形状などの因子も議論されていたが<sup>17)</sup>、村上らは一連の研究<sup>14)15)</sup>によって、疲労限度を支配するのは化学成分や形

状ではなく介在物の等価寸法、すなわち、投影面積の平方根 $\sqrt{\text{area}}$ と基地組織のビッカース硬さHvであることを明らかにした。そして、人工微小欠陥についての詳細な実験結果から得られた式を拡張し、次の疲労限度( $\sigma_w$ )予測式を提案している<sup>16)</sup>。

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

ただし、介在物が自由表面上に存在する場合： $C=1.43$ 、介在物が自由表面に接して存在する場合： $C=1.41$ 、介在物が内部に存在する場合： $C=1.56$ 。

ここで、諸量の単位と定義は、 $\sigma_w$ (介在物の位置における疲労限度)：MPa、Hv(ビッカース硬さ)：kgf/mm<sup>2</sup>、 $\sqrt{\text{area}}$ (介在物の投影面積の平方根)：μm、 $R$ (応力比) =  $\sigma_{\text{min}}/\sigma_{\text{max}}$ 、 $\alpha=0.226 + Hv \times 10^{-4}$ である。

一方、基地組織の硬さに固有な疲労限度の上限値 $\sigma_{wu}$ は経験的に次式で求められることが知られている<sup>1)2)</sup>。

$$\sigma_{wu} \cong 1.6Hv (\sigma_{wu}:\text{MPa}, Hv:\text{kgf/mm}^2) \quad \dots\dots\dots (2)$$

## 4. 疲労試験結果および考察

Fig. 1に、清浄鋼と超清浄鋼のS-N線図を示す。両鋼ともに、疲労寿命のばらつきが大きく、明確な疲労限度を定めることができない。また、破壊起点のほとんどがフィッシュ・アイを伴う介在物であった。

Fig. 2に超清浄鋼のフィッシュ・アイ破壊とその中心に見られる介在物のSEM写真を示す。EPMA分析によれば、フィッシュ・アイ中心の介在物の化学組成は、清浄鋼ではAl-Mn-S-O系やAl-Mn-Mg-S-O系の酸化物、硫化物であり、超清浄鋼では、Al-O系の酸化物、Ti-N系の窒化物、Ti-C

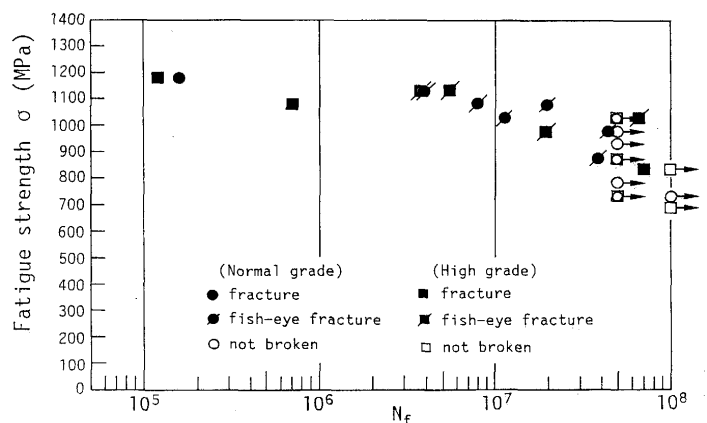


Fig. 1. S-N diagram (Normal grade, SUJ2(N) and high grade, SUJ2(H)).

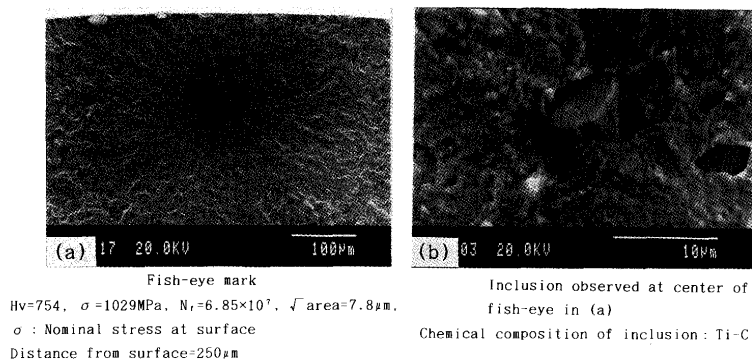


Fig. 2. A typical example of fish-eye fracture and inclusion observed at the center of fish-eye (High grade, SUJ2(H)).

Table 2. Fatigue test results, size, location and chemical composition of inclusions and the fatigue limit estimated by Eq. (1).

| (a) Normal grade specimen |     |                    |                                                                                  |                      |     |                    |                                   |                   |                |                         |
|---------------------------|-----|--------------------|----------------------------------------------------------------------------------|----------------------|-----|--------------------|-----------------------------------|-------------------|----------------|-------------------------|
| Specimen                  | Hv  | $\sigma$           | Nf                                                                               | $\sqrt{\text{area}}$ | h   | Shape of Inclusion | Chemical Composition of Inclusion | $\sigma'$         | $\sigma_w'(R)$ | $\sigma'/\sigma_w'$     |
| NA                        | 753 | 735<br>1029        | $1 \times 10^8 \rightarrow$<br>$1.15 \times 10^7$                                | 9.4                  | 163 |                    | Al-Mn-S-O                         | 702<br>983        | 938(-1.0)      | 0.748<br>1.047          |
| NB                        | 745 | 931<br>1078        | $5 \times 10^7 \rightarrow$<br>$7.94 \times 10^6$                                | 9.8                  | 158 |                    | Al-Mn-S-O                         | 893<br>1034       | 922(-1.0)      | 0.968<br>1.120          |
| NC                        | 741 | 735<br>882         | $5 \times 10^7 \rightarrow$<br>$3.84 \times 10^7$                                | 17.2                 | 275 |                    | Al-Mn-S-O                         | 675<br>810        | 836(-1.0)      | 0.807<br>0.969          |
| ND                        | 743 | 980                | $4.44 \times 10^7$                                                               | 8.3                  | 85  |                    | Al-Mn-S-O                         | 959               | 947(-1.0)      | 1.013                   |
| NE                        | 760 | 784<br>980<br>1078 | $5 \times 10^7 \rightarrow$<br>$5 \times 10^7 \rightarrow$<br>$1.98 \times 10^7$ | 18.0                 | 670 |                    | Al-Mg-Mn-S-O                      | 653<br>816<br>897 | 848(-1.0)      | 0.770<br>0.962<br>1.058 |
| NG                        | 745 | 1127               | $3.91 \times 10^8$                                                               | 8.2                  | 223 |                    | Al-Mn-S-O                         | 1055              | 950(-1.0)      | 1.111                   |

| (b) High grade specimen |     |                   |                                                                                  |                      |     |                    |                                   |                   |                |                         |
|-------------------------|-----|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------|----------------------|-----|--------------------|-----------------------------------|-------------------|----------------|-------------------------|
| Specimen                | Hv  | $\sigma$          | Nf                                                                               | $\sqrt{\text{area}}$ | h   | Shape of Inclusion | Chemical Composition of Inclusion | $\sigma'$         | $\sigma_w'(R)$ | $\sigma'/\sigma_w'$     |
| HB                      | 733 | 686<br>1127       | $1 \times 10^8 \rightarrow$<br>$5.50 \times 10^8$                                | 4.3                  | 140 |                    | Al-O                              | 686<br>1088       | 1042(-1.0)     | 0.658<br>1.044          |
| HC                      | 746 | 1127              | $3.70 \times 10^8$                                                               | 10.9                 | 35  |                    | Ti-N                              | 1107              | 908(-1.11)     | 1.219                   |
| HE                      | 754 | 833<br>1029       | $1 \times 10^8 \rightarrow$<br>$6.85 \times 10^7$                                | 7.8                  | 250 |                    | Ti-C                              | 781<br>965        | 969(-1.0)      | 0.806<br>0.995          |
| HG                      | 749 | 735<br>882<br>980 | $5 \times 10^7 \rightarrow$<br>$5 \times 10^7 \rightarrow$<br>$1.93 \times 10^7$ | 20.1                 | 590 |                    | Al-O                              | 613<br>736<br>818 | 822(-1.0)      | 0.746<br>0.895<br>0.995 |

Hv: Vickers hardness number(kgf/mm<sup>2</sup>),  $\sigma$ : Nominal stress at surface (MPa)  
Nf: Cycles to failure,  
 $\sqrt{\text{area}}$ : Square root of projection area of inclusion ( $\mu\text{m}$ ),  
h: Distance from surface ( $\mu\text{m}$ ),  $\sigma'$ : Nominal stress at inclusion (MPa),  
 $\sigma_w'$ : Fatigue limit at inclusion predicted by Eq.(1) (MPa), R: Stress ratio

系の炭化物であった。  
Table 2 は、疲労破壊起点の介在物中心位置の公称応力  $\sigma'$  と式 (1) による介在物の位置での推定疲労限度  $\sigma_w'$  との比較を示したものである。また、EPMA 分析による介在物の化学組成も示してある。破断した試験片については、破壊起点近傍の試験片表面での硬さ Hv、起点となった介在物の大きさ ( $\sqrt{\text{area}}$ ) と表面からの深さが測定できるので、起点位置での残留応力も考慮すると式 (1) からその試験片の介在物点における推定疲労限度  $\sigma_w'$  を決定できる。ただし、破断しなかった試験片については、起点になる介在物の位置と大きさが不明であるので  $\sigma_w'$  の値を計算できない。そこで、その後、同じ試験片を用いて負荷応力を上げて再試験を行

い、破断させて起点となる介在物を見い出した。  
破断した試験片のほとんどが  $\sigma'/\sigma_w' > 1$  の条件を満足しているが、清浄鋼では 1 本 (NC) だけ、超清浄鋼で 2 本 (HE と HG) だけ、 $\sigma'/\sigma_w' < 1$  で破断した試験片がある。しかしながら、破断時の  $\sigma'/\sigma_w'$  の値が最も低い試験片 (Table 2 (a) 記号 NC) でも 0.969 であることや、試験片 NC, HE, HG の全てが  $1 \times 10^7$  回の繰返しに耐えていることを考慮すれば、予測は妥当であるといえる。  
Fig. 3 は Table 2 のデータを、縦軸に  $\sigma'/\sigma_w'$ 、横軸に破断繰返し数  $N_f$  をとって、破壊起点の介在物の化学組成ごとに整理したものである。この図は疲労限度に相対的にどの程度の応力を負荷したか、そしてそのときの寿命がどうなる

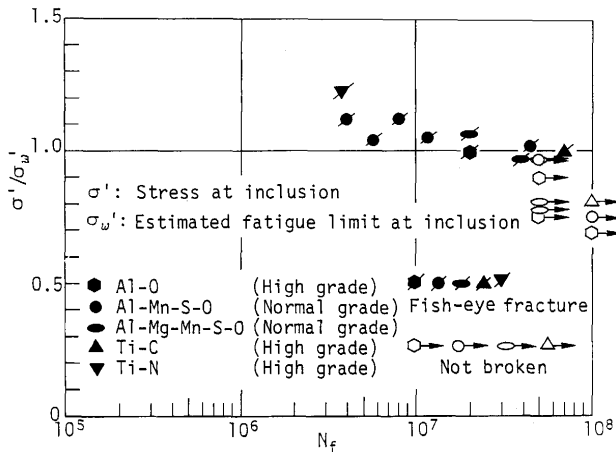


Fig. 3. Modified S-N diagram.

かを示すものである。これを見ると、特定の化学組成の介在物が他のものに比べて疲労強度を著しく下げている傾向はみられない。Ti系介在物は、「角ばった形状 (Fig. 2 (b))」に起因する応力集中の高さから、他の介在物に比べて疲労強度を低下させる。」という Monnot ら<sup>10)</sup>の意見があるが、Fig. 3 (▲印と▼印)においてはそのような傾向はみられない。これと同様な結果はすでに別の論文<sup>18)19)</sup>で詳しく報告している。Monnot ら<sup>10)</sup>の考察が必ずしも実験結果の正当な評価に基づいているものではないことは村上<sup>20)</sup>が指摘している。欠陥や介在物の形状による応力集中の違いの影響についてはこれまで誤った見解があったが、応力集中係数は疲労限度を決定する最重要因子ではない<sup>20)21)</sup>。これらの現象の本質は、疲労限度はき裂が発生し、その後停留した状態で決まっていることに関係している<sup>14)15)</sup>。

## 5. JIS点算法と極値統計<sup>22)</sup>による介在物評価の比較

### 5・1 JIS点算法と極値統計法による測定結果とその考察

清浄鋼、超清浄鋼の両者とも介在物が極めて小さく数も少ないので、顕微鏡で観察した印象では優劣を判断できない。このような試料をJIS点算法で測定するとどうなるだろうか。

Table 3 は両鋼の測定結果 (60視野) をまとめたものである。Table 3 のデータが示すように、このような材料のJIS点算法清浄度は測定たびに異なる値が得られる。また驚くべきことに、検査した60視野のほぼ90%が評価点0となっていることである。これではJIS点算法はもはや信頼性のある評価法とはみなせない。これに対して、このような清浄な鋼の清浄度を極値統計による介在物評価法を用いて測定するとどうなるかを以下に示す。

Fig. 4 は、2 節で説明した手順に従って求めた最大介在物寸法  $\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}$  を極値確率紙にプロットしたものである。検査視野数  $N$  は  $N=40$  である。 $\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}$  の分布は、ほぼ直線

Table 3. Detailed results of cleanliness levels of SUJ2 (N) and SUJ2 (H) evaluated by JIS method.

|   | Normal grade, SUJ2 (N) |       |       | High grade, SUJ2 (H) |       |       |
|---|------------------------|-------|-------|----------------------|-------|-------|
|   | Nth test               |       |       | Nth test             |       |       |
|   | 1                      | 2     | 3     | 1                    | 2     | 3     |
| I | 5                      | 8     | 7     | 5                    | 5     | 4     |
| n | 5                      | 8     | 7     | 5                    | 5     | 4     |
| d | 0.021                  | 0.033 | 0.029 | 0.021                | 0.021 | 0.017 |
| p | 400                    |       |       |                      |       |       |
| f | 60                     |       |       |                      |       |       |

I = Total number of inspection fields in which lattice points occupied by inclusions can be counted.

n = Total number of lattice points occupied by inclusions.

d = Index of cleanliness [ $d = n / (p \times f) \times 100\%$ ].

p = Number of lattice points on the eyeglass in one inspection field.

f = Total number of inspection fields.

The standard value of f is 60.

(Note 1) It should be noted that (f-I) inspection fields have zero lattice point occupied by inclusions. For example, in case of I=5, only 5 of 60 inspection fields have lattice points occupied by inclusions.

(Note 2) Usually  $I \leq n$ . But in case of  $I=n$ , only one lattice point is occupied by an inclusion in one inspection field.

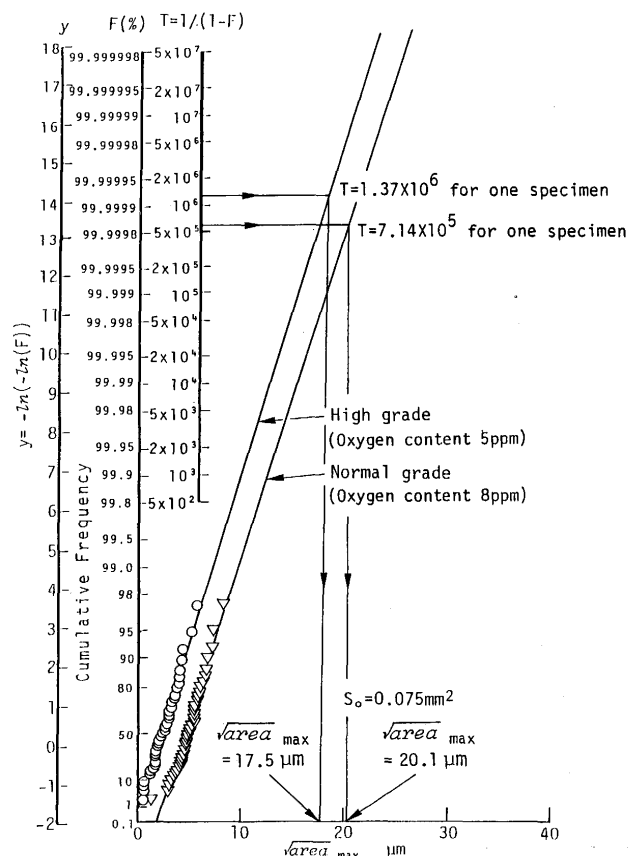


Fig. 4. Cumulative frequency of the extreme values of inclusions (Comparison of normal grade, SUJ2(N) with high grade, SUJ2(H)).

であり極値統計に従っていると考えてよい。鋼中酸素量を8ppm (清浄鋼) から5ppm (超清浄鋼) へ低減したことにより介在物の  $\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}$  が小さくなっていることが明確になって

いる。このような明確な差は、JIS点算法(Table 3)では示せない。

5・2 大きい体積中に存在しうる大きい介在物の推定とその重要性

Fig. 4を見ると、清浄鋼と超清浄鋼の40視野の検査基準面積 $S_0$ 中で観察される介在物の $\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}$ の値は、それぞれ10 $\mu\text{m}$ および6 $\mu\text{m}$ 以下であり、極めて清浄な鋼であることもわかる。このことは、1本の試験片あるいは多数の試験片中の最大介在物寸法 $\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}$ がそれぞれ10 $\mu\text{m}$ 、6 $\mu\text{m}$ 以下であることを意味する訳ではない。Table 2に示すように破壊起点の介在物寸法はFig. 4の介在物寸法よりも大きいものがある<sup>10)11)</sup>。

しかしながら、JIS点算法やASTM法などに代表される従来の介在物評価法は材質の清浄度の相対比較の「ものさし」を与えるだけで検査領域より大きい領域に存在する大寸法の介在物の推定や疲労強度の推定には役立たない。

これに対して、極値統計法による介在物評価法では材質の相対比較だけでなく、問題となる体積あるいは生産部品の数に応じて存在しうる介在物の $\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}$ が推定可能なので、材料や部品の品質管理にも利用できるのである。

このことを具体的に示すために、以下では、極値統計法により推定した試験片の危険体積 $V$ に含まれる介在物の $\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}$ と実際に試験片の破壊の起点に現れた最大の介在物の $\sqrt{\text{area}}$ の比較を行う。

まず、疲労破壊の起点となりうる危険体積 $V$ を見積る。そのため、便宜上、公称応力 $\sigma_0$ の80%が作用する領域を危険体積<sup>20)23)</sup>とみなして $V$ を計算すれば $V \cong 274.5\text{mm}^3$ である。次に、検査基準体積 $V_0$ を検査基準面積 $S_0$ に微小な厚さ $h$ をかけて定義し( $V_0 = S_0 \times h$ )<sup>23)</sup>、この $V$ の値がどれほどの再帰期間 $T$ に相当するかを計算する。ここで、 $h$ は介在物検査で得られた $\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}$ の平均値をとるのが経験的に妥当であり<sup>20)23)</sup>、その値は清浄鋼で $h = 5.13\mu\text{m}$ 、超清浄鋼で $h = 2.66\mu\text{m}$ である。再帰期間 $T$ ( $T = NV/V_0$ )が決まれば、Fig. 4に示した矢印の手順に従って、試験片 $N$ 本当りに含まれることが予想される $\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}$ を求めることができる<sup>14)23)</sup>。

なお、奈良井ら<sup>24)</sup>はEB法によりある体積中の $\text{Al}_2\text{O}_3$ 系介在物の寸法を測定し、上述の極値統計法による推定値とほぼ一致することを検証している。

Table 4. Relationship between number of specimens and the expected maximum size of inclusions ( $\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}$ ).

| Materials              | Test volume V (mm <sup>3</sup> ) | Number of specimens | Return period T    | $\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}$ ( $\mu\text{m}$ ) |
|------------------------|----------------------------------|---------------------|--------------------|-----------------------------------------------------|
| Normal grade, SUJ2 (N) | 274.5                            | 1                   | $7.14 \times 10^5$ | 20.1                                                |
|                        |                                  | 10                  | $7.14 \times 10^6$ | 22.8                                                |
|                        |                                  | 100                 | $7.14 \times 10^7$ | 25.5                                                |
| High grade, SUJ2 (H)   | 274.5                            | 1                   | $1.37 \times 10^6$ | 17.5                                                |
|                        |                                  | 10                  | $1.37 \times 10^7$ | 20.0                                                |
|                        |                                  | 100                 | $1.37 \times 10^8$ | 22.5                                                |

Table 4は、試験片 $N = 1, 10, 100$ 本当りの再帰期間 $T$ から求めた試験片 $N = 1, 10, 100$ 本当りの介在物の $\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}$ を示している。推定した試験片 $N = 1$ ないし10本当りの介在物の $\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}$ は、実際に実験で試験片(7本当り)の破壊起点になった介在物の $\sqrt{\text{area}}$ の最大値(Table 2: 清浄鋼で18.0 $\mu\text{m}$ 、超清浄鋼で20.1 $\mu\text{m}$ )とよく対応している。なお、実験値では $\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}$ の大小関係が逆転しているが、差は2 $\mu\text{m}$ であり、試験片本数を増やすと逆転関係はなくなるものと考えられる。

6. 疲労限度の下限値の予測

極値統計法による介在物評価法のもう1つの利点として、推定した $\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}$ から多数の試験片の疲労限度のばらつき

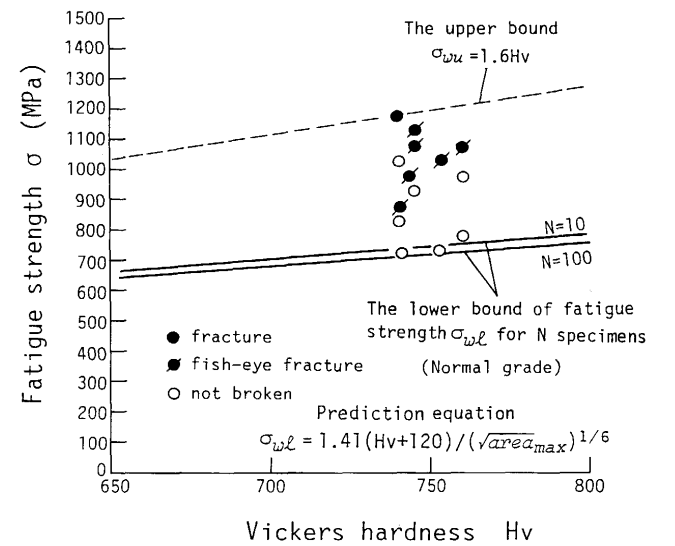


Fig. 5. Comparison of the predicted lower bound of fatigue strength with the experimental results (Normal grade, SUJ2(N)).

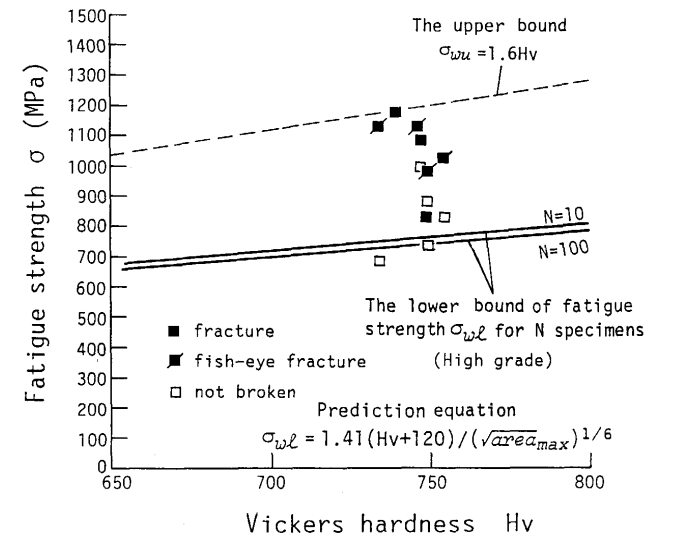


Fig. 6. Comparison of the predicted lower bound of fatigue strength with the experimental results (High grade, SUJ2(H)).

の幅の下限値を推定できることを示す。

ここでは、具体例として、回転曲げ疲労試験結果との比較を示す。疲労限度のばらつきの幅の下限値は、多数の試験片に含まれる介在物の $\sqrt{\text{area}_{\max}}$ で決まる。

平均応力 = 0 のときの多数の試験片の疲労限度のばらつきの幅の下限値は、式(1)で $C=1.41$ ,  $R=-1$ ,  $\sqrt{\text{area}}$ として最大介在物の $\sqrt{\text{area}_{\max}}$ を代入することにより推定できる<sup>14)23)</sup>。

Fig. 5 および Fig. 6 は、清浄鋼と超清浄鋼について、試験片10本および100本当りの介在物の $\sqrt{\text{area}_{\max}}$ から予測した疲労限度の下限値 $\sigma_{w1}$ と回転曲げ疲労試験結果を比較したものである。図中には、式(2)で与えられる理想的な疲労限度 $\sigma_{wu}$ (上限値)も示してある。実験値のばらつきに対し予測した疲労限度の下限値は妥当な値になっている。

Fig. 4 に示されるほど介在物寸法が小さくなれば、回転曲げ疲労強度はかなり改善される。しかし、それでもなお、多くの試験片は理想的な疲労限度 $\sigma_{wu}$ には達していない。Fig. 5 と Fig. 6 には1000MPa程度の疲労強度を達成した試験片もあるが、この値は設計には利用できない。試験片本数を増やせば、より高い疲労強度を示す試験片も得られるが、多くの試験片は上限値よりはるかに低い疲労強度しか示さない。従って、チャンピオンデータは必ずしも材質評価として利用できない。むしろ、下限値 $\sigma_{w1}$ の比較が材質の優劣を決めると考えなければならない。

## 7. 結言

本研究では、これまでの「ものさし」の代表としてJIS点算法をとりあげ、これが酸素含有量8ppmと5ppmの2種類の軸受鋼SUS2について有効な「ものさし」とならないことを示すとともに、JIS点算法に代わるものとして極値統計法による方法を示した。得られた結論は以下のとおりである。

(1) JIS点算法は極めて清浄な鋼の清浄度の差を評価する方法としては適当でない。

(2) JIS点算法やASTM法など従来の介在物評価法は材料の清浄度の相対比較として利用されてきたが、検査領域より広い面積や体積に含まれることが予想される大寸法の介在物を推定する情報を与えない。

(3) 極値統計法による介在物評価法は基準領域における最大介在物寸法の統計的分布を表すので、極めて清浄な鋼の介在物評価にも適用可能である。介在物寸法として介在物の投影面積の平方根 $\sqrt{\text{area}}$ を定義すると最大介在物の値 $\sqrt{\text{area}_{\max}}$ は極値統計に従う。この方法をO量が8ppmと5ppm

の2種類のSUS2に適用した結果、両鋼の明確な差を示すことができた。なお、JIS点算法では差を明確にできなかった。

(4) 酸素含有量が8ppmと5ppmの2種類のSUS2の疲労強度のばらつきの幅を極値統計によって求めた $\sqrt{\text{area}_{\max}}$ と著者らがさきに提案した疲労強度予測式で予測すると、予測結果は実験結果とよく対応した。

(5) 金属材料に含まれる介在物を皆無にしたり寸法を極めて小さくしたりすることは困難で経済的に問題があるが、製鋼プロセスでは何らかの介在物制御の目標値が必要である。 $\sqrt{\text{area}_{\max}}$ の極値統計データはそのような目標値、すなわち、新しい「ものさし」として利用できるであろう。

## 文 献

- 1) M.F.Garwood, H.H.Gensamer, J.T.Zurburg, J.T.Burwell, M.A.Erickson and F.L.La Que: Interpretation of Tests and Correlation with Service, (1951), p. 1 [American Society for Metals, Cleveland, OH, USA]
- 2) 西島 敏: 材料, **29**(1980), p.24
- 3) Annual Book of ASTM Standards, ASTM Standard E45, Standard Practice for Determinating the Inclusion Content of Steel, Vol. 03. 01, (1990), [ASTM]
- 4) G.F.Vander Voort and R.K.Wilson: ASTM Standardization News, (1991) May, p.28
- 5) A.Koyanagi and M.Kinoshi: ASTM STP 575, (1975), p.22
- 6) K.G.H.Barteld: ASTM STP 575, (1975), p.10
- 7) 子安善郎: 新日本製鐵(株)室蘭技術研究部報告書, 1991年2月(私信)
- 8) S.Johansson: Scandinavian Journal of Metallurgy, **19**(1990), p.79
- 9) JIS G0555-1977, 鋼の非金属介在物の顕微鏡試験方法, (1977), [日本工業規格]
- 10) J.Monnot, B.Heritier and J.Y.Cogne: ASTM STP 987, (1988), p.149
- 11) 足立 彰, 莊司英雄, 桑原絢夫, 井上義幸: 電気製鋼, **46**(1975) 3, p.176
- 12) 荒木 透, 石 滋宣, 佐川竜平: 鉄と鋼, **57**(1971), p.2042
- 13) 角田方衛, 内山 郁, 荒木 透: 鉄と鋼, **57**(1971), p.335
- 14) 村上敬宜, 児玉昭太郎, 小沼静代: 日本機械学会論文集A編, **54**(1988), p.688
- 15) 村上敬宜: 鉄と鋼, **75**(1989), p.1267
- 16) 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編, **56**(1990), p.54
- 17) M.J.Atkinson: J.Iron Steel Inst., **195**(1960), p.64
- 18) 村上敬宜, 川上勝巳, W.E.Duckworth: 鉄と鋼, **77**(1991), p.163
- 19) 村上敬宜, 鳥山寿之, 子安善郎, 西田新一: 鉄と鋼, **79**(1993), p.678
- 20) 村上敬宜: 金属疲労: 微小欠陥と介在物の影響, 第7章, (1993), p.133[養賢堂]
- 21) 村上敬宜, 鳥山寿之: 日本材料学会 第21回疲労シンポジウム前刷集, (1992), p.127
- 22) E.J.Gumbel著, 河田, 岩井, 加瀬共訳: 極値統計学, (1963), p. 1, [広川書店]
- 23) 村上敬宜, 鳥山寿之: 極値統計による介在物評価とその利用の手引き(九州大学), (1990), p. 5 (私信)
- 24) 奈良井弘, 阿部 力, 古村恭三郎: 材料とプロセス, **4**(1991), p.1178