

# 高纯净肌焼鋼の回転曲げ疲労特性に 及ぼす酸化物系介在物の影響

林 亮二\*・濱田兼彰\*・小林一博\*<sup>2</sup>，佐藤紀男\*<sup>3</sup>

Effect of Oxide Inclusions on Rotating Bending Fatigue Properties of Purified Carburizing Steels  
Ryoji Hayashi, Kaneaki Hamada, Kazuhiro Kobayashi and Toshio Sato

**Synopsis :** Recently, the oxygen content has been reduced in carburizing steels to improve the fatigue properties, but the effect of oxide inclusions on fatigue properties of purified carburizing steels was not still clear.

In this paper, the relationship between rotating bending fatigue limits and  $\sqrt{\text{area}_{\text{max}}}$ , i. e., the oxide inclusion rating by means of statistics of extreme values, was investigated for purified carburizing steels with less than 10 ppm oxygen content.

As a result, it was confirmed that even for purified carburizing steels, decrease of  $\sqrt{\text{area}_{\text{max}}}$  corresponding to the reduction of inclusion size, was effective for improvement of rotating bending fatigue limits.

The effect of reduction in oxide inclusion size can be estimated by use of the equation for prediction of the fatigue strength at  $10^7$  cycles.

**Key words :** carburizing steel; inclusion; fatigue strength; rotating bending fatigue test; oxygen content; statistics of extreme values;  $\sqrt{\text{area}_{\text{max}}}$ .

## 1. 緒言

近年自動車の高出力化・小型軽量化にともない、その足回り部品である歯車および軸受等の高強度化、長寿命化および高信頼性化へのニーズが高まってきている。これらニーズへの対応策の一つとして、破壊の起点となる非金属介在物の低減が挙げられ、製鋼段階で各種の改善がさかんに試みられてきた。その効果もあって、最近の肌焼鋼では量産工程においても、全酸素量10ppm以下のヒートが大量に生産されつつある。

一方、鋼の疲労特性に及ぼす、酸化物系介在物の影響については古くから研究<sup>1)~4)</sup>されており、最近では香川ら<sup>5)</sup>の研究例等がある。

さらに介在物の大きさと疲労特性の関係については村上<sup>6)</sup>によって詳細に研究され、介在物の大きさに着目する介在物評価方法（極値統計法）を用いての疲労限度の計算式が提唱されている。また西森ら<sup>7)</sup>はJIS SUJ2において、極値統計法を用いて鋼の高纯净度化による疲労特性の向上について報告している。

しかし現在および今後の量産ヒートを中心レベルになりつつある、全酸素量10ppm以下の低酸素の肌焼鋼の疲労特性に及ぼす酸化物系介在物の低減効果についてはまだ必ずしも明らかとなっていない。また多数の量産ヒートを用いて、介在物成績と疲労

特性の関係を調べた例もほとんどない。

本報では全酸素量10ppm以下の低酸素の肌焼鋼における酸化物系介在物と回転曲げ疲労強度との関係について供試材21ヒートを用いて、極値統計法によって求めた介在物成績と疲労限の関係を調査した。さらに村上の疲労限度予測式を基に $10^7$ 時間強度予測式を設定し、回転曲げ疲労特性に及ぼす高纯净度化の影響について考察した。

## 2. 供試材

供試材は、量産工程（150トン電気炉→取鍋精錬→真空脱ガス処理→連続鋳造）で製造されたJIS SCr420；16ヒートおよびSCM420；5ヒートである。供試材の化学成分をTable 1に示す。SCr420およびSCM420の酸素量レベルは、それぞれ5～10ppmおよび6～9ppmであった。

Table 1 Chemical Compositions.

(O: ppm, Others: mass%)

Steel grade	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	O
SCr420 (16heats)	0.19	0.18	0.77		0.006	0.99		5
	0.23	0.26	0.81	0.018	0.022	1.17	-	10
SCM420 (5heats)	0.20	0.23	0.82		0.003	1.05	0.15	6
	0.23	0.27	0.88	0.018	0.011	1.21	0.16	9

\* 技術研究所特殊鋼研究室

\* 2 技術企画部技術開発室特殊鋼技術チーム

\* 3 技術研究所

### 3. 実験方法

#### 3.1 介在物評価

村上の研究<sup>6)</sup>に準拠して、極値統計法により介在物成績を評価した。各ヒート毎に基準面積100mm<sup>2</sup>の試験片を30ヶ作製し、光学顕微鏡を用いて各試験片の最大の酸化物系介在物の直径を測定し、極値統計グラフへプロットすることにより、後述の危険体積中に存在すると予想される最大の酸化物系介在物の大きさ ( $\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}$ ) を算出した。再帰期間の設定に当たって必要となる、平面を立体化するための仮想的な厚さhとして、各ヒートにおける測定した30ヶの $\sqrt{\text{area}}$ の平均値を使用した。また危険体積には、回転曲げ疲労試験片1本の試験部(長さ15mm)の危険体積143.3mm<sup>3</sup>(試験片の表面からの深さ0.05d以内、d:試験部直径=8mm)を採用した。

#### 3.2 回転曲げ疲労試験

疲労試験には、小野式回転曲げ疲労試験機を用いた。試験片はFig. 1に示す外径8mmの平行部を持つ平滑試験片である。直径167mmの丸鋼片を熱間鍛造にて直径20mmの丸棒に鍛伸し、900℃の焼ならしおよび荒加工を行った後、Fig. 2に示す浸炭条件にて浸炭焼入焼戻しを行った。その後仕上げ研磨を行った。

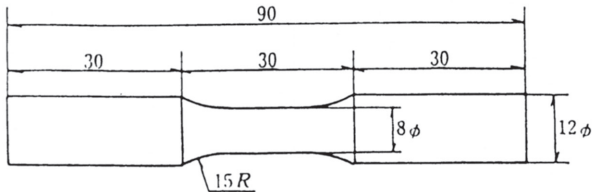


Fig.1 Rotating Bending Fatigue Test Specimen.

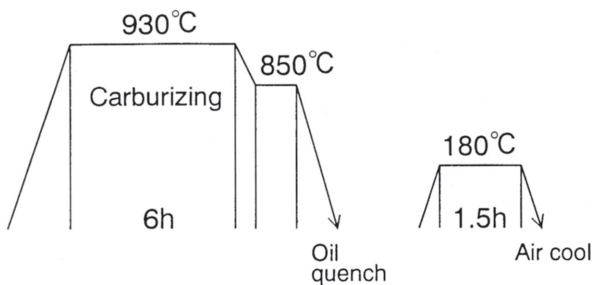


Fig.2 Schema of gas carburizing and quenching process.

まずSCr420; 2ヒートを用いてそれぞれ8本ずつ一定応力(1127MPa)下で疲労試験を行い、破壊起点となった酸化物系介在物の大きさとその試験片の寿命との関係を調査した。併せて全供試材について、通常のS-N曲線により疲労限を求めた。

### 4. 実験結果

#### 4.1 一定応力下での回転曲げ疲労試験結果

Fig. 3に試験結果を示す。横軸に破壊の起点となった酸化物系介在物の直径を、縦軸にその試験片が破断するまでの寿命を示した。これより、破壊の起点となる酸化物系介在物の大きさが小さくなるにつれて、その試験片の寿命が向上することが分かる。すなわち、回転曲げ疲労特性が、酸化物系介在物の大きさに大きく影響されることが確認されたことから、介在物評価には、介在物の大きさに着目する極値統計法を用いることとした。

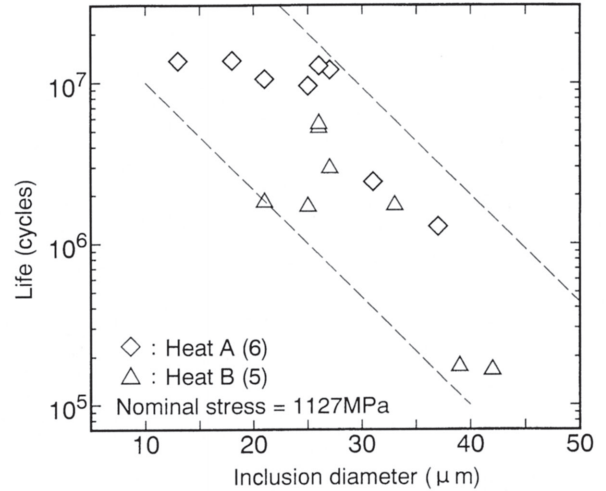


Fig.3 Relationship between diameter of inclusions observed at Fish Eye and rotating bending fatigue life.  
( ): Oxygen Content

#### 4.2 極値統計法による介在物評価結果

極値統計法による介在物評価結果の一例として、今回の供試材中 $\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}$ が最大のヒートCと、最小のヒートDの介在物評価結果をFig. 4~7に示す。

Fig. 4は、ヒートC (SCr420, O: 5ppm) の30ヶの試験片のそれぞれから測定した最大の酸化物系介在物を示したものであり、その極値統計グラフをFig. 5に示す。大型介在物がいくつか存在した結果、 $\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}$ が30.5μmと大きくなっている。

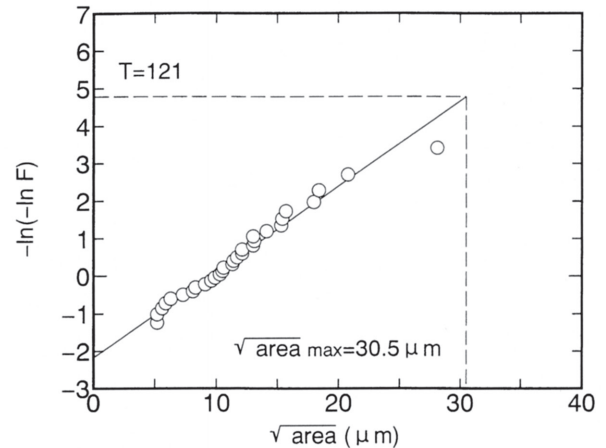


Fig.5 Cumulative frequency of the extreme values of inclusions of Heat C.  
F: Cumulative frequency  
T: Return Period

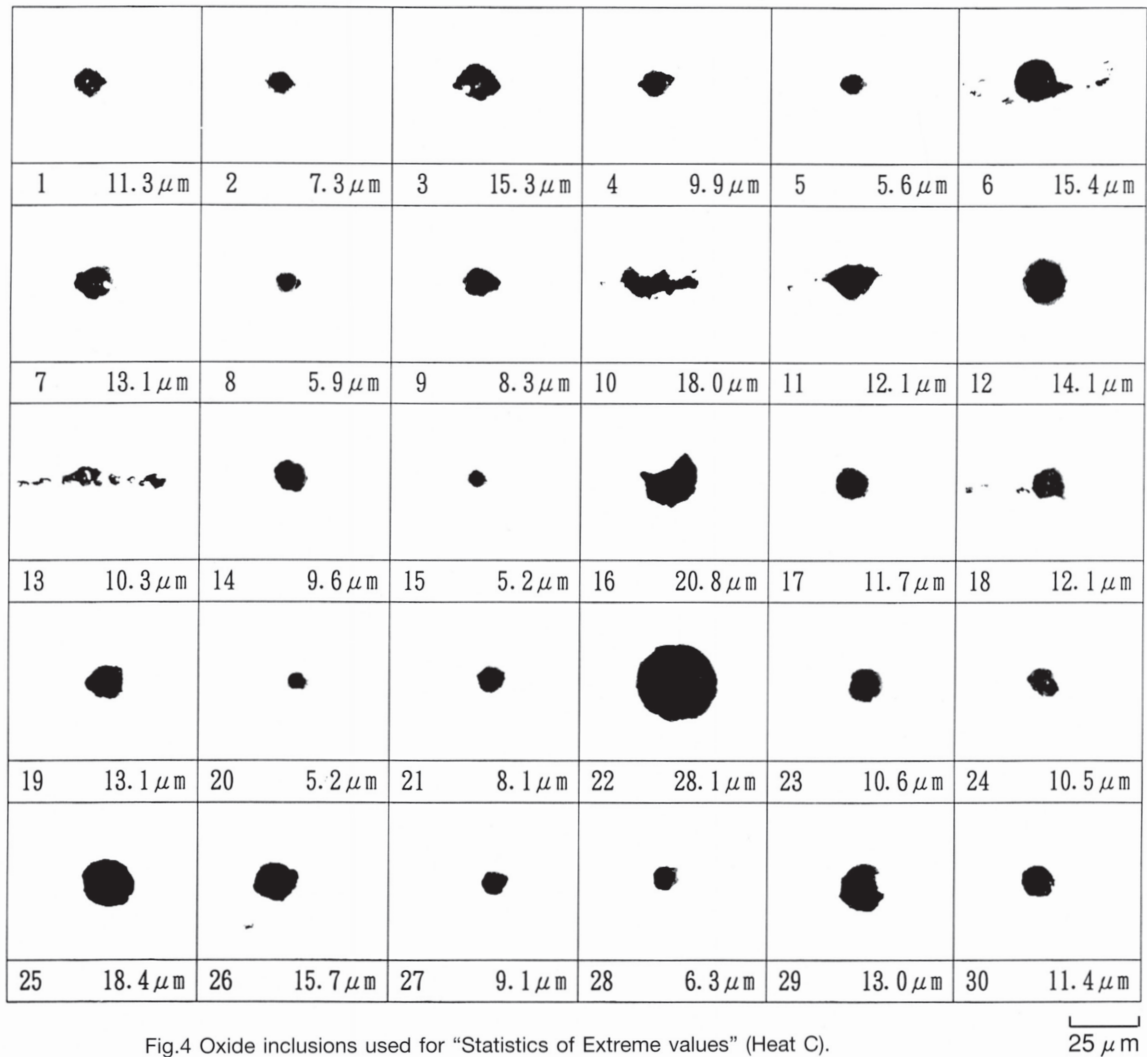


Fig.4 Oxide inclusions used for "Statistics of Extreme values" (Heat C).

Fig.6はヒートD (SCr420, O: 5ppm) において観察された介在物であり, その極値統計グラフをFig.7に示す。大型介在物はほとんど存在しておらず, その結果 $\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}$ が $11.9 \mu\text{m}$ と小さくなっている。

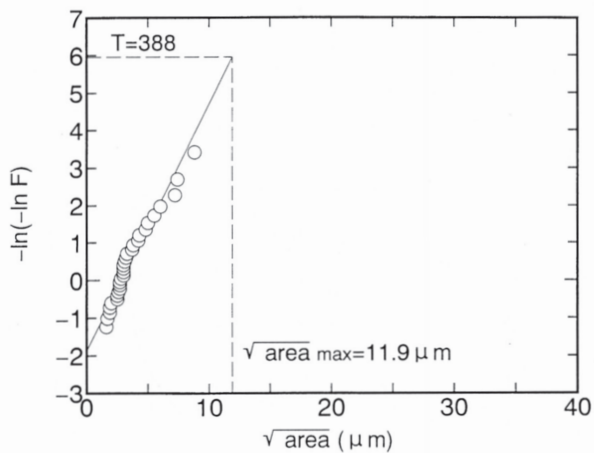


Fig.7 Cumulative frequency of the extreme values of inclusions of Heat D.  
F: Cumulative frequency  
T: Return Period

#### 4・3 S-N曲線による疲労限の測定 ( $\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}$ と疲労限の関係)

S-N曲線を用いて, 全供試材について求めた疲労限 ( $10^7$  時間強度) をFig.8に示す。 $\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}$ の低減に伴い, 疲労限は向上している。なおFig.8には後述する計算による疲

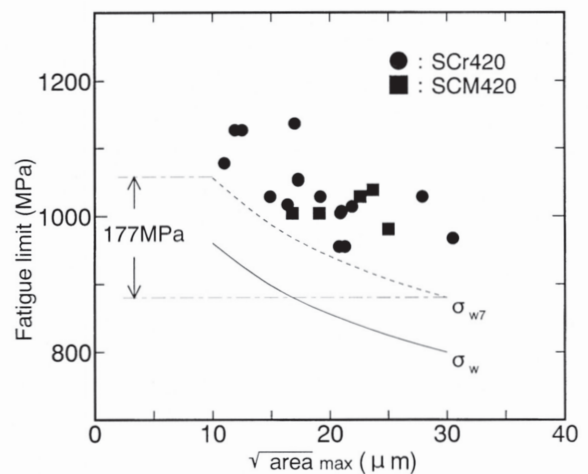


Fig.8 Relationship between  $\sqrt{\text{Area}}_{\text{max}}$  and rotating bending fatigue limit.  
 $\sigma_w$ : Fatigue limit calculated by Eq. ①  
 $\sigma_{w7}$ : Fatigue strength at  $10^7$  cycles calculated by Eq. ②

1 3.1 μm	2 2.8 μm	3 4.3 μm	4 7.4 μm	5 5.5 μm	6 6.0 μm
7 3.2 μm	8 3.0 μm	9 2.7 μm	10 1.9 μm	11 3.0 μm	12 5.0 μm
13 1.7 μm	14 3.0 μm	15 2.0 μm	16 1.6 μm	17 2.7 μm	18 2.6 μm
19 3.3 μm	20 1.9 μm	21 3.7 μm	22 4.8 μm	23 2.5 μm	24 3.0 μm
25 8.8 μm	26 3.8 μm	27 4.2 μm	28 2.7 μm	29 7.2 μm	30 2.5 μm

Fig.6 Oxide inclusions used for "Statistics of Extreme values" (Heat D).

25 μm

劣限も併記してある。

以上より、全酸素量10ppm以下の低酸素の肌焼鋼においても、酸化物系介在物の小径化（すなわち $\sqrt{\text{area}_{\text{max}}}$ の低減）が回転曲げ疲労限の向上に対して有効であることが確認された。

## 5. 計算による疲労限度の算出

4・2項の方法にて求めた $\sqrt{\text{area}_{\text{max}}}$ を用いて、村上が提案している下記の疲労限度の予測式<sup>6)</sup>により、疲労限度の計算を行った。

$$\sigma_w = \frac{C(HV+120)}{(\sqrt{\text{area}_{\text{max}}})^{1/6}} \times \{(1-R)/2\}^\alpha \quad \dots\dots (1)$$

$$\alpha = 0.226 + HV \times 10^{-4}$$

C = 1.43 (表面欠陥, 表面介在物)

1.56 (内部欠陥, 内部介在物)

1.41 (欠陥や介在物が表面に接する場合)

$\sigma_w$  : 疲労限度 (MPa)

HV : ビッカース硬さ (kgf/mm<sup>2</sup>)

$\sqrt{\text{area}_{\text{max}}}$  : 予測最大介在物径 (μm)

R : 応力比;  $R = \sigma_{\text{min}} / \sigma_{\text{max}}$

$$= (\sigma_{\text{m}} - \sigma_w) / (\sigma_{\text{m}} + \sigma_w)$$

$\sigma_{\text{min}}$  : 最小応力 (MPa)

$\sigma_{\text{max}}$  : 最大応力 (MPa)

$\sigma_{\text{m}}$  : 残留応力 (MPa)

$\sigma_w$ は、予測される最大の介在物 ( $\sqrt{\text{area}_{\text{max}}}$ ) が存在した場合の疲労限度の計算値であり、変数Cは、試験片内の介在物の存在する位置によって変わる値である。

予測式(1)を用いて、回転曲げ疲労試験片の表面から深さ1000 μmまで、100 μmおきに予測される最大の介在物 ( $\sqrt{\text{area}_{\text{max}}}$ ) が存在する場合の各位置毎の疲労限度の算出を行った。計算にはFig. 9およびFig.10に示す残留応力分布および断面硬さ分布を使用し、その後の計算についてもこの値で代表させた。残留応力分布は、試験片の表面から電解研磨を行いながら測定したものである。Fig.11に、 $\sqrt{\text{area}_{\text{max}}} = 11.9 \mu\text{m}$ の場合の計算結果を示す。

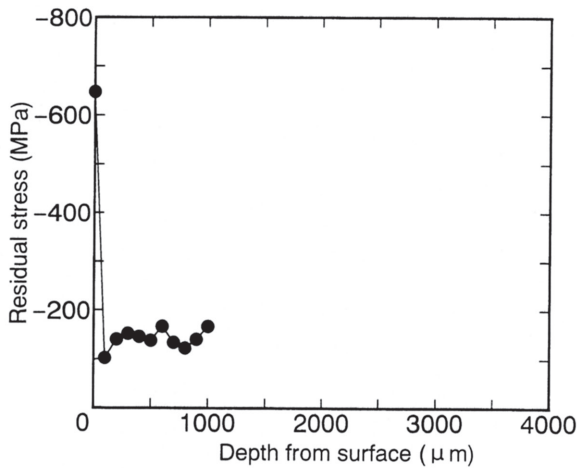


Fig.9 Axial residual stress distribution of rotating bending fatigue specimen of Heat D.

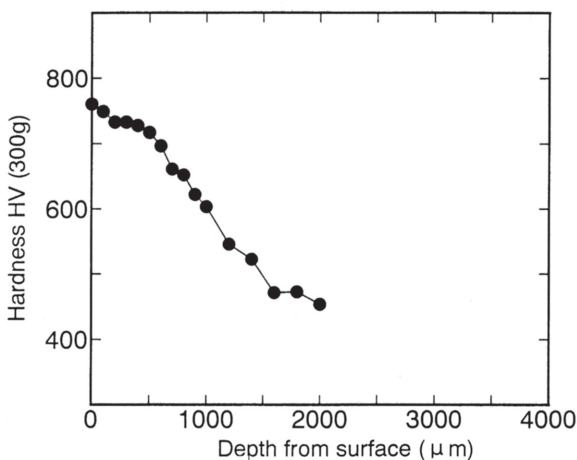


Fig.10 Hardness distribution of rotating bending fatigue specimen of Heat D.

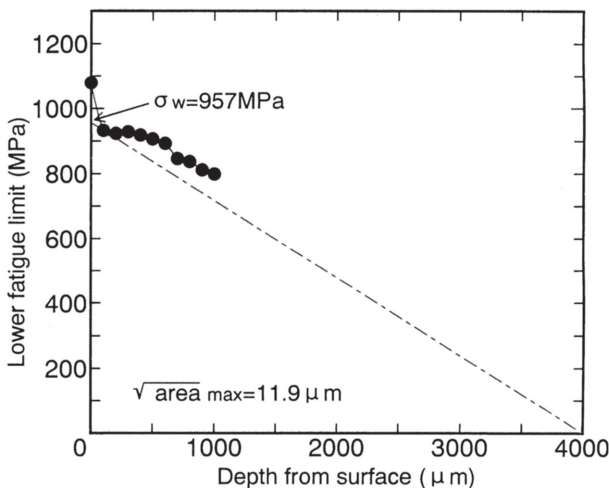


Fig.11 Distribution of fatigue limit of Heat D calculated by Eq. ①.

最表面は、仕上げ研磨加工による残留応力が約-600MPa存在するため、疲労限度は高くなっている。図右端の深さ4000 μmの位置が試験片中心に相当することから、図から明らかなように深さ100 μmの位置が相対的に最も疲労限度が低くなり、そのときの応力勾配を延長した公称応力

957MPaが、この $\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}=11.9 \mu\text{m}$ に対する疲労限度と考えられる。

このようにしてそれぞれの $\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}$ に対する疲労限度を計算した結果をFig.8に $\sigma_w$ として示した。

しかし計算により算出した疲労限度は実験による値よりも100~300MPa程度低い値となっている。

## 6. 考察

回転曲げ疲労試験において、実際の試験により得られた疲労限の値と、計算により算出した疲労限度の間に差の生じた理由について、修正S-N曲線<sup>6)</sup>を用いて以下に考察する。

Fig.12に今回試験を行った21ヒートの内の6ヒートについての修正S-N曲線を示す。修正S-N曲線の横軸は通常のS-N曲線と同様、破損までの応力繰返し数を表わし、縦軸は破損起点の介在物の大きさを用いて計算した疲労限度 $\sigma'_w$ と、その起点に実際にかかった応力 $\sigma'$ の比である。Fig.12に示すプロットは全て破損した試験片であり、縦軸の比 $\sigma'/\sigma'_w$ が1よりも大きいということは疲労限度よりも高い負荷応力がかかり破損したことを示している。

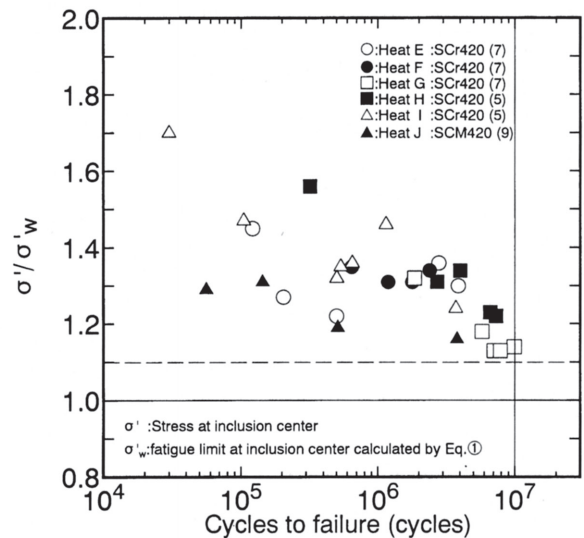


Fig.12 Modified S-N Diagram.  
( ): Oxygen Content

実際に測定した疲労限と予測式(1)から算出した疲労限度が一致すると、この修正S-N曲線が応力繰返し数 $10^7$ cyclesにおける縦軸の比1.0に収束することになる。しかしFig.12では1.0に収束していない。これは回転曲げ疲労試験片が、 $10^7$ cyclesにおいてもまだ疲労限度に達していなかったためによると考えられる。江村ら<sup>8)</sup>は本実験のような浸炭+研磨仕上げの試験片において、 $10^9$ cyclesにおいても明確な疲労限度を示していない例を報告している。

しかし実用上は $10^7$ cyclesの時間強度をもって、その材料の疲労限度として取り扱うことが多い。よって $10^7$ cyclesでの時間強度の予測を行うこととする。

## 文 献

- 1) 角田方衛, 内山 郁, 荒木 透: 鉄と鋼, 57 (1971), p.298
- 2) 角田方衛, 内山 郁, 荒木 透: 鉄と鋼, 57 (1971), p.335
- 3) 成田貴一, 伊藤孝道: 神戸製鋼技報, 17 (1967), 1, P.53
- 4) 齊藤 誠, 森井 廉: 電気製鋼, 51 (1980), p.4
- 5) 香川裕之, 石黒守幸, 松本和明, 久松定興: N K K技報, 144 (1993), p.26
- 6) 村上敬宜: 金属疲労 微小欠陥と介在物の影響, (1993) [養賢堂]
- 7) 西森 博, 増田 孜, 川上 潔, 古村恭三郎, 橋爪一弘: 日本金属学会会報, 32 (1993), p.441
- 8) 江村秀樹, 浅見克敏: 日本機械学会論文集, 55A (1989), 509, p.45

予測式(1)を用いて求めた疲労限度を10%増加させた場合、修正S-N曲線は、 $10^7$  cyclesにおいて縦軸の比がほぼ1.0のところを通ることから、予測値としてより妥当であると考えられる。予測式(1)を改良した $10^7$ 時間強度予測値 $\sigma_{w7}$ の計算式を以下に示す。

$$\sigma_{w7} = \frac{C(HV+120)}{(\sqrt{\text{area}_{\max}})^{1/6}} \times \{(1-R)/2\}^\alpha \times 1.1 \quad \dots(2)$$

Fig. 8中にそれぞれの $\sqrt{\text{area}_{\max}}$ に対する $10^7$ 時間強度予測値 $\sigma_{w7}$ を示す。この $10^7$ 時間強度予測値を用いることにより、実測の疲労限の値と予測値の差が縮小され、予測値としての実用性が向上している。

この $10^7$ 時間強度予測値を用いて、介在物成績の向上、例えば $\sqrt{\text{area}_{\max}}$ の値の $30\mu\text{m}$ から $10\mu\text{m}$ への低下により、疲労限はFig. 8に示しているように177MPa上昇すると予測される。

## 7. 結論

全酸素量10ppm以下の低酸素の肌焼鋼においても、回転曲げ疲労限 ( $10^7$ 時間強度) の向上に対し、酸化物系介在物の小径化 (すなわち $\sqrt{\text{area}_{\max}}$ の低減) が有効であることが確認された。

その酸化物系介在物の小径化の効果は、村上の疲労限度予測式(1)を基にした $10^7$ 時間強度予測式(2)から見積もることができ、例えば $\sqrt{\text{area}_{\max}}$ の値が $30\mu\text{m}$ から $10\mu\text{m}$ へ低下することにより、 $10^7$ 時間強度は177MPa上昇すると予測される。