鋼の疲労破壊の統計的性質に及ぼす結晶粒 大きさの影響 (第2報)*

横 堀 武 夫**

The Influence of the Ferrite Grain Size on the Statistical Behavior of the Fatigue Fracture of Plain Carbon Steel (Part 2)

by
Takeo YOKOBORI
(Tōhoku University)

The specimens tested were taken from a part of the boiler steel plate. That part of the boiler steel plate was divided into five layers from the convex side of the surface up to the concave side, and they were named No. 1, 2, 3, 4, and 5 layer according to the order. The specimens from No. 1, No. 2 and No. 3 layer were taken in the rolling direction and the specimens from No. 4 and No. 5 were taken in the transverse direction. The ferrite grain size of the outer (No. 1 and No. 5), the intermediate (No. 2 and No. 4) and central (No. 3) layers were 7.5, 7.0 and 6.5 in term of ASTM grain size number respectively. From the statistical treatment of the test data on the fatigue life obtained on each layer at several different stress levels, the following conclusions were given:

(1) The frequency distribution curve of the fatigue life is more positively skewed in finer ferrite grained steel than in coarse ferrite grained steel. The distribution curve approaches to the exponential (or logarithmic normal) type distribution in finer grained steel, and appears to become the roughly normal type distribution in coarse grained steel.

(2) The larger the scatter of the fatigue life is, the finer the ferrite grain size becomes.

These two conclusions may be understood from the standpoint of probability theory. The former conclusion may be explained as follows: In fine grained steel the probability (rate) of the fatigue crack initiation per cycle tends to saturate with the increase of repeated cycles after a rapid increasing, and in coarse grained steel the rate increases gradually. The latter conclusion can be understood, since the rate of crack initiation may be assumed as the smaller, the finer the grain size is. Hence it appears that the ferrite path is a prevalent factor in the statistical behavior of the fatigue fracture of steel.

(Received April 14, 1958)

1. 緒 言

¹⁾²⁾ さきに疲労寿命のばらつき¹⁾の大部分は材料に固有なものであることをしめし、かつ、鋼の疲労破壊の統計的性質に対しては炭素含有量でなく、フェライト距離²⁾が大きな影響をもつことを明らかにし、また、その考察を行った。ここでは同一素材から採取した試験片について、そのフェライト結晶粒大きさによって、疲労寿命の分布関数形など統計的特性がちがってくることを述べる。このような統計的特性は第1報¹⁾におけると同様に、確率過程(時間的統計現象)としての考察によって理解される。

2. 実験結果および統計的検定

疲労試験そのものは、日本材料試験協会疲労委員会による「製造過程³⁾において生じた欠陥を有する材料の疲労に関する研究」という研究課題の一部として行われたものである。したがって、疲労試験結果の詳細については同委員会報告³⁾を参照されたい。原材は熱間曲げ(曲げ半径約 700mm, 加工温度 925±25°C, 加工終了温度 600°C)を行ったボイラー用鋼板 SB46B の一部である。その寸法を Fig. 1 にしめす。試験材料を Fig. 1 のように4部分に分けて、それぞれ4人の分担者が疲労試験を行った。試験材料を板厚方向に5層に分け、外側から第1, 第2, 第3, 第4および第5層と名付けた。便宜上、第1, 第2, 第3層からはそれ

* 原稿受付 昭和33年4月14日

** 正員 東北大学工学部

Fig. 1 Sectioning of the parent plate into the specimens

Photo. 1 Microstructure of No. 1 Layer (×160)

Photo. 2 Microstructure of No. 2 Layer (×160)

Photo. 3 Microstructure of No. 3 Layer (×160)

Photo. 4 Microstructure of No. 4 Layer (×160)

Photo. 5 Microstructure of No. 5 Layer (×160)

ぞれ圧延方向に、第4層および第5層からは、それぞれ圧延と直角方向の試験片を採取した。各層の成分および静的機械的性質は別報を参照されたい。各層の顕微鏡組織をPhoto. 1~5 にしめた (いずれも圧延面に直角断面である)。フェライト結晶粒度を測定した結果は Table 1 にしめた。素材の内部ほど大きい。すなわち、第1, 第2, 第3層の順にそれぞれ ASTM No. 7・5, 7・0 および 6・5 と大きくなっており、また、第4, 第5層はそれぞれ ASTM No. 7・0 および No. 7・5 である。各層試験片は4組分(4人の担当者分)を合計すると20~30本ずつ得られた。表面仕上げは0番の

ペーパー研磨とし、試験片寸法も同じ(直径12mm)とした(ただし、一組だけは直径10mm)。各層につき応力振幅35, 33, 31および29 kg/mm²にて4組合計で各4~10本を小野式回転曲げ試験した。各層および各応力振幅について4人の試験分担者が別々の小野式試験機を用いて試験したので、このような実験法および技術上の原因による疲労寿命のばらつきが予想される。そこで、ここでは疲労寿命のばらつきに対するこの影響を調べるために分散分析を行った。すなわち、各試験者の用いた試験片内での標本分散と、各試験者の用いた試験片間の標本分散を求めて、それらの比 F

Table 1 Summary of statistical characteristics and ferrite grain size

Symbol	Average ferrite grain Size No. (ASTM)	Stress level tested (kg/mm ²)	Number of specimens tested	Measure of scatter* $\sqrt{D^2}$	Measure of scatter** σ
Layer No. 1 in rolling direction	7.5	35	4	2.7×10^4	0.159
		33	9	1.6×10^5	0.646
		31	4	5.1×10^5	0.188
		29	4	1.2×10^6	0.186
Layer No. 2 in rolling direction	7.0	35	8	2.0×10^4	0.215
		33	10	6.5×10^4	0.485
		31	6	1.5×10^5	0.130
		29	6	5.8×10^5	0.219
Layer No. 3 in rolling direction	6.5	35	—	—	—
		33	4	4.3×10^4	0.431
		31	7	9.3×10^4	0.115
		29	8	2.4×10^5	0.239
Layer No. 4 in transverse direction	7.0	35	5	8.7×10^3	0.101
		33	6	4.3×10^4	0.203
		31	5	1.1×10^5	0.135
		29	5	2.5×10^5	0.106
Layer No. 5 in transverse direction	7.5	35	4	7.2×10^3	0.063
		33	6	4.5×10^4	0.096
		31	5	2.2×10^5	0.160
		29	6	4.2×10^5	0.145

* Assuming fatigue life after N_c' approximately as exponentially distributed, dispersion D^2 of the life is calculated as $(N_i - N_c')^2$, where N_i =average value of fatigue life, and N_c' =apparent incubation cycle (repeated cycle to the point at which frequency distribution curve begins to have finite value.)

** σ =standard deviation of logarithm of fatigue life N_i .

が chance だけによって期待されるよりも、大きな値だけとなるかどうかを検定した。もしも、この間に有意差がなければ 4 人の試験者の用いた標本は疲労寿命に関する限りは均一であり、同一の母集団に属していると見なしても合理的であるということになる。chance だけによって期待されるよりも有意であるという有意水準を、どのくらいにとるかということは多少任意的であるが、通常 0.1, すなわち、10% またはそれ以上の確率に対しては有意でないと見なされる。また、寿命の分布は第 1 層と第 5 層については次節に述べるように指数分布関数形に近いので、その対数(指数分布関数形は対数正規分布で近似される)を用いて分散分析を行った。他の層の寿命は大体正規分布として(近似的に)取り扱った。検定の結果は Table 2 にしめす。18 組の検定例の中、13 組はすべて 10% の有意水準にて有意差が認められない(2 組が 5%, 2 組が 2.5%, 1 組が 1% で、それぞれ有意差が認められない)。したがって、各試験者が用いた標本は各層ごとにすべて疲労寿命に関する限り同一母集団に属するものと考えてもさしつかえないであろう。第 1 層およ

Table 2 Summary of F -ratios from analysis of variance

Stress amplitude (kg/mm ²)	35	33	31	29
Symbol				
Layer No.1 in rolling direction	—	3.04	2.25	12
		3.62 10%	49.5 10%	49.5 10%
Layer No.2 in rolling direction	5.58 9.12 5%	1.78 5.28 10%	12.1 16.0 2.5%	3.74 5.46 10%
Layer No.3 in rolling direction	—	2.09 8.53 10%	13.3 15.4 2.5%	2.44 5.34 10%
Layer No.4 in transverse direction	52.8 99 1%	1.88 9.16 10%	5.34 9.00 10%	1.01 9.00 10%
Layer No.5 in transverse direction	8.00 49.5 10%	6.00 9.16 10%	5.00 9.00 10%	6.10 9.55 5%

e.g. Stress amplitude 33 kg/mm² 1.78
Layer No.2 in rolling direction 5.28 10% } = F -ratio
from analysis of variance is 1.78, and F -value corresponding to specific degree of freedom is 5.28 and level of significance is 10%

び第5層の寿命の分布関数を正規分布と見なして分散分析を行った場合でも、この検定の結果にはほとんど影響しなかった。したがって、この場合の分散分析に関する限り、疲労寿命分布を指数関数形と仮定しても、正規分布形と仮定しても本結論は同様である。そこで次節の解析には、これら各人の疲労寿命試験結果をすべて各層ごとにプールした。

3. 確率過程としての考察

繰返数 N まで破壊しない確率(非破壊の確率または確率関数)を P とする。ある応力振幅のもとで観測した総数 n 個の試験片の寿命を小さいほうから大きさの順に $N_1, N_2, \dots, N_\nu, \dots, N_n$ のようにならべたとき、 ν 番目の非破壊平均頻度は $1 - \{\nu/(n+1)\}$ で表わされるから、この式で計算した非破壊頻度を N_ν に対してプロットすると、非破壊確率の近似が得られる。各層、各応力振幅について $\log P$ を N に対してプロットした結果を Fig. 2~Fig. 6 にしめす。寿命の確率密度分布関数 $q dN$ は $-(dP/dN)dN$ で与えられる。Fig. 2~Fig. 6 と Table 1 とからわかるように、フェライト結晶粒の小さいもののほど分布関数 $q dN$ は正の側にひずみ、 $\log P$ と N の関係はほぼ直線で近似される。すなわち $q dN$ は指数分布関数(したがって、対数正規分布関数で近似される)に近い。また、フェライト結晶粒の大きいものでは $\log P-N$ 曲線は上に凸になり $q dN$ は大体正規分布に近い。

疲労破壊の統計的性質は確率過程(時間的統計的現象)として説明されるようである^{1,2)}。そこで、ここでも同様な解析を行ってみた。確率過程と考えると、Fig. 2~Fig. 6 において $\log P-N$ 線図の負の勾配 $-d(\log P)/dN$ がサイクル当りの疲労クラック発生(確率) μ を表わすことになる。Fig. 2 および Fig. 6 からわかるように、第1層や第5層のようにフェライト結晶粒の小さい組織(Table 1)のものでは、各応力振幅について μ は N に対して急に増加したのちほぼ一定値に近づき、またばらつきは大きい。一方、Fig. 3 および Fig. 5 における第2層や第4層のように、フェライト結晶粒の大きい組織では各応力振幅に対して μ は漸増していき、かつ、ばらつきは小さい。これらの特性は第1報における結果とまったく同様である⁵⁾。第1層および第5層のように、ばらつきの全範囲にわたって μ がほぼ一定として近似される場合には $P = \exp(-\mu N)$ にて近似されるから、ばらつきの尺度としての分散 D^2 は $D^2 = 1/\mu^2$ で表わされ、したがって、 $D = 1/\mu = \bar{N}_t - N_o'$ にて計算される。ここに $\bar{N}_t$ = 疲労寿命の平均値、 N_o' = 潜在繰返数(N_o' までは破壊の確率 $1-P=0$)。第2層、第3層、第4層のように μ が漸増する場合には、 D^2 は簡単に求められないから正規の方法にしたがって分散ないし標準偏差を計算す

Fig. 2 P vs. N plots

Fig. 3 P vs. N plots

Fig. 4 P vs. N plots

Fig. 5 P vs. N plots

Fig. 6 P vs. N plots

Fig. 7 Dependency of $\bar{\mu}$ on stress amplitude S

Fig. 8 Dependency of $\sqrt{D^2}$ and $\bar{\mu}$ on grain size

ればよいわけであるが、簡単と便宜のため、ばらつきの全範囲に対する $\bar{\mu}$ の平均値として $\bar{\mu}$ を第1近似的に $\bar{\mu} = 1/(\bar{N}_t - N_c')$ を用いて計算し、これから $D^2 = 1/\bar{\mu}^2$ として計算した。このようにして計算した $\bar{\mu}$ および $\sqrt{D^2}$ を Table 1 にしめた。

Table 1 から応力 S と確率 $\bar{\mu}$ の関係をプロットすると Fig. 7 のように、だいたい

$$\bar{\mu} = A \exp(\alpha S) \quad (1)$$

なる関係が成り立つようである。この関係は従来確めた結果と一致する。また、フェライト結晶粒平均直径

に対して $\bar{\mu}$ および $\sqrt{D^2}$ をプロットすると Fig. 8 のようになる。すなわち、各応力振幅に対して結晶粒の小さくなるほど、ばらつきは大きくなっている。この特性は第1報の結果と同じであり、まったく同様な考え方で理解できる。しかもこの場合に $\bar{\mu}$ とフェライト結晶粒大きさとの関係は大体

$$\mu = B \exp(\beta L) \quad (2)$$

なる関係式で表わすことができるようである。一方(1)式の S の係数 α は転位論にもついた考察によれば近似的に

$$\alpha = C_1 q + C_2 L \quad (3)$$

のように表わされる。ここで q は介在物による切欠の応力集中係数、 L は結晶粒大きさ。この(3)式を(1)式に代入すれば、

$$\bar{\mu} = A \exp[(C_1 q + C_2 L) S] \quad (4)$$

となり、 L については(2)式とまったく同形式となる。また、圧延方向と直角方向の試片では同じ L に対して $\bar{\mu}$ は Fig. 8 にしめすような関係で圧延方向のものより大きくなっている。このことは介在物が圧延方向に長くなっているため、圧延と直角方向の試片では(4)式の q が大きくなっているためであると考えれば、この同じ転位論的模型に従って理解することができるであろう。

4. 疲労寿命のばらつきの大きさと結晶粒度

各層に対して、すべて $\sqrt{D^2}$ は応力振幅の低下とともに、いちじるしく減少している。一方、寿命が対数正規分布をすると仮定して、寿命の対数の標準偏差 σ を求めてみると Table 1 のように応力振幅の大きさに対して一定の傾向をしめしていない。これは本実験では試片数が少ないためである。対数の標準偏差が応力振幅に対して一定であるのか、または、どのような変化をするのかを調べるためには、はるかに多数の試片についての試験を要することがわかるであろう。

なお、第1報で調べた0.12%炭素鋼の応力振幅30.6 kg/mm²におけるばらつき(標準偏差) $\sqrt{D^2} = 3.9 \times 10^4$ であり、本報における炭素鋼の31 kg/mm²における $\sqrt{D^2}$ は第1, 2, 3, 4 および5の各層につきそれぞれ 5.1×10^5 , 1.5×10^5 , 9.3×10^4 , 1.1×10^5 および 2.2×10^5 (Table 1) (Fig. 8) となっており、いずれも本報における鋼のほうがばらつきが大きい。前報における0.12%炭素鋼と本報における炭素鋼が同一組織(たとえば、フェライト結晶粒の大きさが同じ)であるとすれば前者のほうが応力振幅が小さい(30.6 kg/mm²)し、試験片数も多いのであるから、ばらつきは当然後者より大きく出ているなければならない筈である。このように逆な結果となっていることは、前報における0.12%炭素鋼のフェライト結晶粒大きさが ASTM No. 6-7 であって、本報における炭素鋼の各5層のどの場合よ

りも粒が大きいということによって説明されるわけである(第3層では粒の大きさは6.5であり、大体ばらつきは等しくなっている)。

以上の特性に対しての考察においては、介在物の影響も考えに入れなければならないであろう。しかし、第1, 2および3層の学振法による清浄度試験結果ではむしろ中心の方がよくなっている。したがって、鋼の疲労寿命のばらつきに対する組織の影響としては、フェライト結晶粒の大きさ(正確に言えばフェライト距離)が大きいと考えられるであろう。一方、各層についての介在物の数量、形状、大きさなどの影響について今後調べるつもりである。

5. 結 論

(1) 同一素材からの試片でも、その組織によって疲労寿命の分布特性(函数形)がちがっている。

(2) フェライト結晶粒の大きくなるほど寿命のばらつきは小さくなる。

(3) フェライト結晶粒の小さいほど寿命の頻度分布関数のひずみ度(skewness)は正(positive)の側に増してゆき、指数分布関数に近づく。大きいものでは正のひずみは少なくなって正規分布に近づく。

(4) 疲労破壊の統計的性質は確率過程(時間的統計現象)として理解される。

(5) フェライト結晶粒の小さいものでは、サイク

ル当り疲労クラック発生(の確)率は急に増してほぼ飽和するが、結晶粒の大きいものでは漸増する。

(6) 疲労寿命のばらつきは単なる試片の準備の不整とか実験技術の不肅によることは少なく、材料に固有なものが大きな部分を占めていると考えられる。

本研究は「製造過程において生じた欠陥を有する材料の疲労に関する研究」の1部として行われたものであり、材料試験協会疲労委員長河本実教授はじめ各委員に負うところが少なくない。ここに厚く感謝の意を表する。なお、本研究にて粒度測定に関してお世話になった今井勇之進教授、実験に援助された是川誠一氏、また、何かと御鞭撻を賜った沼知福三郎教授、松山徳蔵教授に厚く謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 横堀, 材料試験, 6, 45, 378 (1957)
- 2) 横堀, 材料強度学, (1955) 技報堂
- 3) 日本材料試験協会疲労委員会報告, 材料試験, 6, 48 (1957)
- 4) Fig. 1 の A, B, C および D 部はそれぞれ横堀武夫, 川田雄一, 久野五十男, 河本実が分担した。
- 5) 各組の試片数が少なかったため、木実験でもとめた Nc' の精度はあまりよくない。したがって $r = Nc' / \bar{N}_t$ の比較はしなかった。
- 6) 第3層についてはデータが少ないので μ が飽和型であるのか漸増型であるのか判定しにくいので、ここでは一応漸増型として取り扱った。
- 7) T. Yokobori, J. Appl. Mech. 24, 77 (1957)
- 8) E. Epremian and R.F. Mehl, ASTM STP No. 137, p. 25 (1953)

懸濁液の粘度

x_v = 固体分の容積濃度,

η_0 = 懸濁流体の粘度,

η_s = 懸濁液の見かけ粘度,

η_r = 相対粘度 = η_s / η_0 ,

η_{sp} = 比粘度 = $\eta_r - 1$

[A. Einstein 1911]

$$\eta_s = (1 + 2.5 x_v) \eta_0$$

[V. Vand 1948]

$$\eta_s = (1 + 2.5 x_v + 7.17 x_v^2 + 16.2 x_v^3) \eta_0$$

(ただし、懸濁粒子は球)

[M. Mooney 1951]

$$\eta_r = e^{[2.5 x_v / (1 - K x_v)]}$$

(ただし、 K は材料に関する定数)

[R. Roscoe 1950]

$$\eta_r = (1 - 3.5 x_v)^{-2.5}$$

(等粒, 高濃度)

[H. Brinkmann 1952]

$$\eta_r = (1 - x_v)^{-2.5}$$

(不同粒, 高濃度)

[J. Robinson 1949]

$$\eta_r = 1 + K x_v / (1 - S' x_v)$$

(K は物質定数, S' は沈降時の粒子の占める容積)

[明石, 米田 1954]

$$\eta_s = \eta_0 (1 + \alpha x_v' + \beta x_v'^2 + \gamma x_v'^3)$$

$$x_v' = x_v (1 + S \cdot \delta)$$

(S は粉体の比表面積, δ は吸着層の厚さ)

[Zettlemoyer, Lower 1955]

$$\eta_r = 1 + K_1 (1 + K_2 A) x_v$$

(A は固体表面積)

[森, 乙竹 1955]

$$\eta_r = 1 + \frac{\bar{a} \cdot S_r}{2 \phi}$$

$$\phi = \frac{1}{x_v} - \frac{1}{x_{vc}}$$

(粒子の比表面積 $S_r = S_0 / \rho_s$, S_0 は粒子総表面積, W は粒子重)

(S.O.)