

走査型電子顕微鏡による鋼の低サイクル疲労破面の観察*

堀田知道**・村木潤次郎**・石黒隆義**・関口 進**

Observation of Fracture Surface of Low Cycle-Fatigued Steel Specimens by Scanning Type Electron Microscope

Tomomichi HOTTA, Jyunjiro MURAKI,

Takayoshi ISHIGURO and Susumu SEKIGUCHI

Synopsis:

An examination of fracture surface of commercial high tensile strength steel and high carbon steel specimens broken in low cycle, high stress, fatigue has revealed the occurrence of fracture patterns similar in appearance to those resulting from high cycle, low stress, fatigue, these patterns seem to reveal the fundamental nature of fatigue in ferritic material itself, but do not coincide with "striation" usually obtained in Aluminum and its alloys. A tentative explanation for the fatigue fracture pattern is offered on the basis of recently reported investigations.

(Received Mar. 21, 1968)

1. 緒 言

近年原子炉が盛んに建設されるようになってきた。この圧力容器は従来のボイラーなどと比べて大型であり、しかも安全性を十分考慮する必要があることなどから、今までの設計基準よりも入念な検討を行ない、合理的な設計基準の設定が、経済性、安全性の面より必要である。これらの観点から、歪振幅を基準とした低サイクル疲労の問題が注目されるようになり、米国ではすでに ASME SEC III に取入れられているが、わが国では一歩遅れて日本溶接協会、日本機械学会、日本造船学会などで取上げられつつある。筆者らは 1948 年以来 OROWAN¹⁾, COFFIN²⁾³⁾, MANSON⁴⁾ らによつて発表されてきた一連の低サイクル疲労挙動の解析に基づく結果すなわち ϵ_f or $\epsilon_p = MN_f^2$ の関係を実用鋼材で調べたところ MANSON による解析法が、かなり妥当性があることがわかった。これらの材料間の低サイクル疲労破面の相違および高サイクル疲労破面との関連を調べるため本研究を行なった。

従来疲労破面の fractographic な研究としては、光学顕微鏡では拡大倍率を上げると焦点深度が浅いこと、またレプリカの電子顕微鏡観察では、レプリカの作成および破面の各部位の対応の困難さなどの点から疲労の研究の歴史に比べて研究は非常に少ない。そのうち鉄合金の低サイクル疲労についてはさらに少なく、LAIRD⁵⁾ や西岡⁶⁾ らの研究があるのみである。筆者らは破面に直接、

非常に収束した電子ビームを当て試料面上を走査させ、そこから出る二次電子線像を拡大して観察できるようになつてゐる走査型電子顕微鏡を用いて破面観察を行ない従来の結果と比較した。その結果低サイクル疲労破面にも高サイクル疲労破面特有の pattern が見られること。またこの pattern の見られるものは破断までの繰返し数が約 100 回以降のものであること、歪サイクルと 1 : 1 に対応したさらに大きな step があることなどがわかつた。

2. 供試材および実験方法

供試材の化学組成および機械的性質は Table 1 に示したように 60 kg/mm² 級高張力鋼 (FTW-60) および高炭素鋼であり、FTW-60 鋼は焼入れおよび焼なまし処理を行なつたものについても試験した。またその光学顕微鏡組織は Photo. 1 に示したように粗いフェライト + パーライト組織を示すものおよび、ペーナイト + フェライト組織、微細なパーライト組織からなるものである。低サイクル疲労試験は Fig. 1 に示すような砂時計型の試験片を用いて、東京衡機(株)製低サイクル疲労試験機を使用して、2.5cpm で三角波の直径方向歪制御により試験した。なお歪比 ($\epsilon_{\min}/\epsilon_{\max}$) は -1, と 0 で行なつた。その応力と歪のヒステリシスループは Fig. 2 に

* 昭和43年 3 月 21 日受付

** 富士製鉄(株)中央研究所

Table 1. Mechanical properties and chemical composition.

Chemical composition (%)

C	Si	Mn	P	S	V	Cu	Material
0.15	0.28	1.25	0.014	0.005	0.073		FTW-60
0.62	0.12	0.71	0.008	0.018		0.10	High C steel

Mechanical properties (Type 1 Specimen)

Mark	Tensile strength kg/mm ²	Yield point kg/mm ²	Elongation G.L.=100min %	Reduction of area %	Remark
T	66.3	61.8	16.1	71.8	As recieved
A	48.4	39.9	24.3	69.7	920°C×30' Furnace cool
Q	77.3	—	15.4	66.8	920°C×30' Water quench
R	78.5	—	11.7	29.5	High C steel As recieved

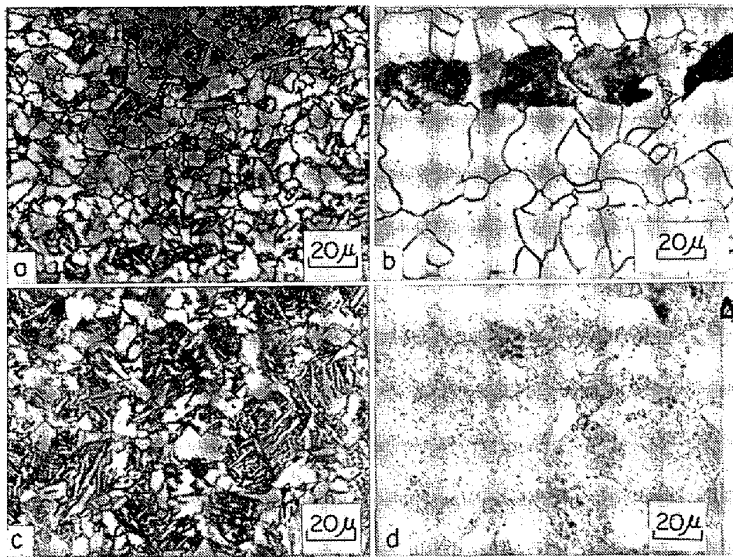
a) FTW-60 (T)
c) FTW-60 (Q)b) FTW-60 (A)
d) High carbon steel

Photo. 1. Micro-structure of test specime

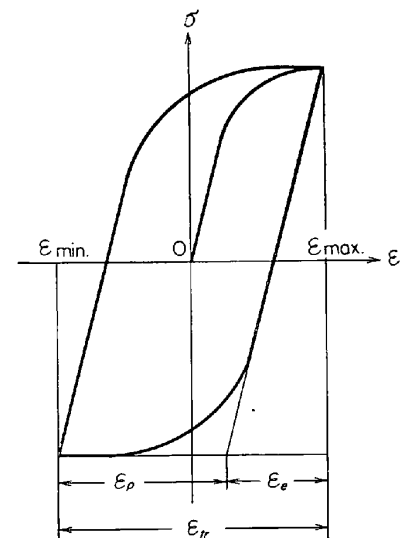
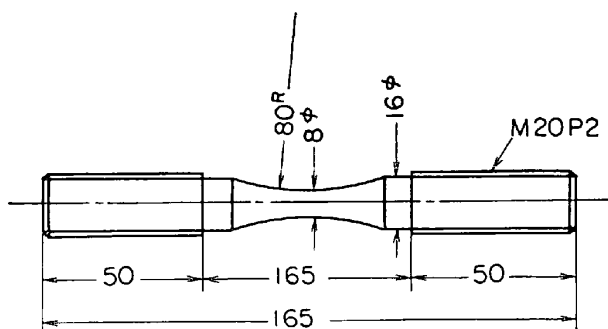


Fig. 2. Hysteresis loop for controlled cyclic strain.

Fig. 1. Low cycle fatigue test specimen. $K_\alpha=1.01$

示した。FTW-60鋼に関する低サイクル疲労試験結果を Fig. 3 と Fig. 4 に、高炭素鋼の結果を Fig. 5 に示した。この Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5 の各歪レベルの試験について各処理ごとに、日本電子(株)製走査型電子顕微鏡

を用いて破面観察を行なった。また高サイクル疲労破面との比較のためにアムスラーパイロフォアおよびローゼンハウゼン型万能疲労試験機で試験を行なった高サイクル疲労破面も観察した。

3. 実験結果

従来から高サイクル疲労破面に特有の pattern と考えられている Striation⁸⁾~¹²⁾ tire or tire track^{13)~15)}, Caterpillar¹³⁾¹⁴⁾, Spine¹³⁾¹⁴⁾, parallel¹³⁾¹⁴⁾, platy¹⁶⁾, lamellar¹⁶⁾, ripple⁵⁾などが現われているところを中心に写真を撮った。

Photo. 2 は FTW-60 鋼の焼入れのままの試片についての歪比: $R=0$ で全真歪範囲: $\epsilon_{tr}=0.02$, 破断までの繰返数: $N_f=364$ 回の場合の低サイクル疲労破面を示

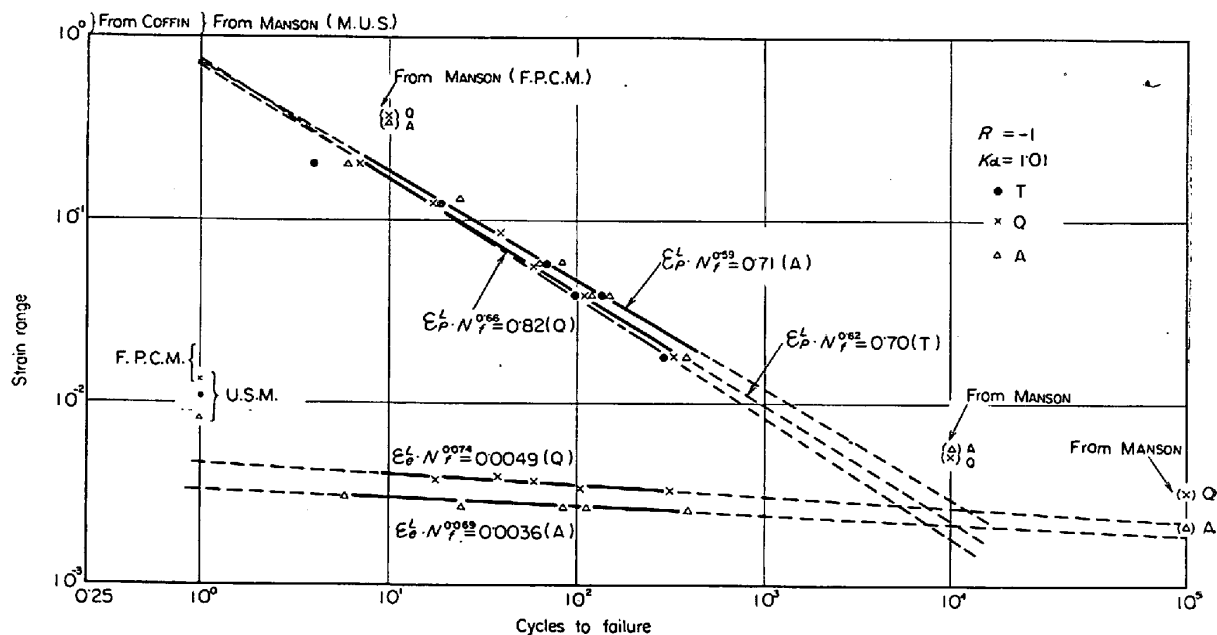


Fig. 3. Fatigue behavior of FTW-60.

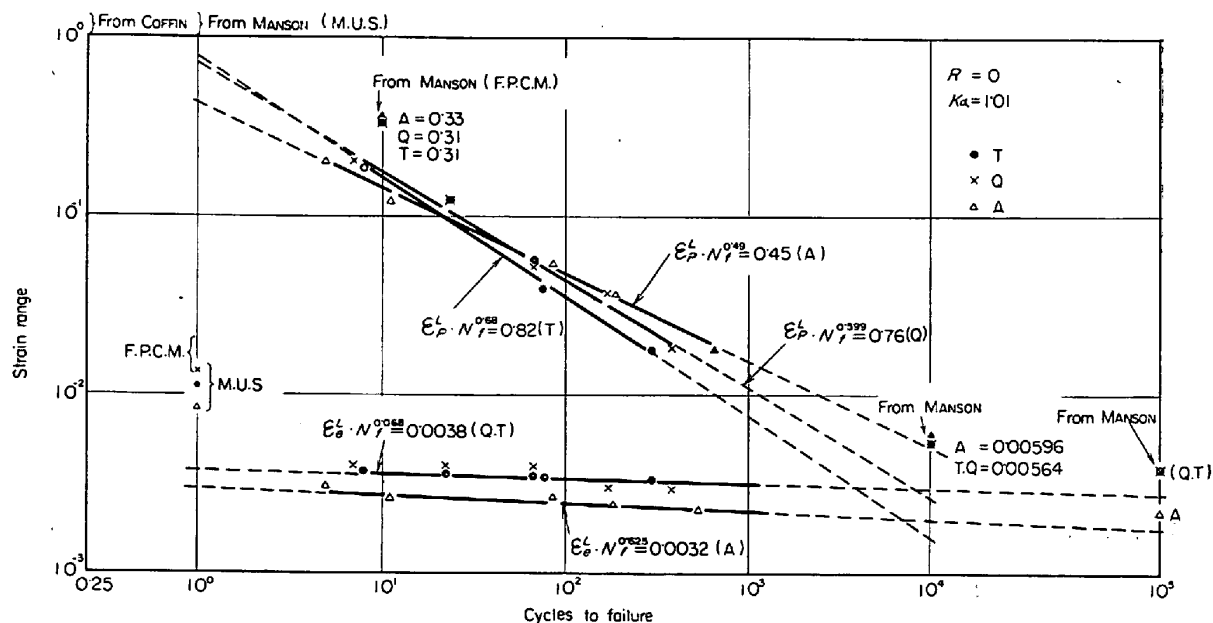


Fig. 4. Fatigue behavior of FTW-60.

す。従来高サイクル疲労破面で見られたと同様な疲労独得の pattern (以降この pattern を tire pattern と呼ぶ) が見られた。さらにこの pattern とは別に写真中 A で示したような平たんな部分が規則的に観察された。この A-A の間隔は、試験片の破面における疲労破面の長さ 5 mm を破断までの繰返し数で除して推定した 1 サイクル当りの平均亀裂長さにほぼ等しいことがわかる。また tire pattern およびこの大きな step は亀裂の進行方向にほぼ平行である。Photo. 3 は Photo. 2 と同じ FTW-60 鋼の焼入れのままの試片で歪範囲のみを $\epsilon_{ir} = 0.06$ と大きくした場合の低サイクル疲労破面であるが、Photo.

2 で見られたような疲労特有の tire pattern は見られなかった。Photo. 4 はさらに歪範囲 $\epsilon_{ir} = 0.20$ と大きくした場合の写真であるが、破断までの繰返し数も 6 回と少なくなり、引張破断面に非常に近い様相を示して、dimple pattern が見られる。この場合も dimple の小さい部分と大きい部分が、亀裂の進行方向と直角に step 状にあらわれているのが見られる。Photo. 5 は焼入れ、焼もどしを行なった FTW-60 鋼の歪比 $R = 0$ で真歪範囲 $\epsilon_{ir} = 0.02$ の場合の低サイクル疲労破面であるが、この場合も Photo. 2 のような破面に一ように典型的な pattern は見られなかったが、同一視野で tire pattern の

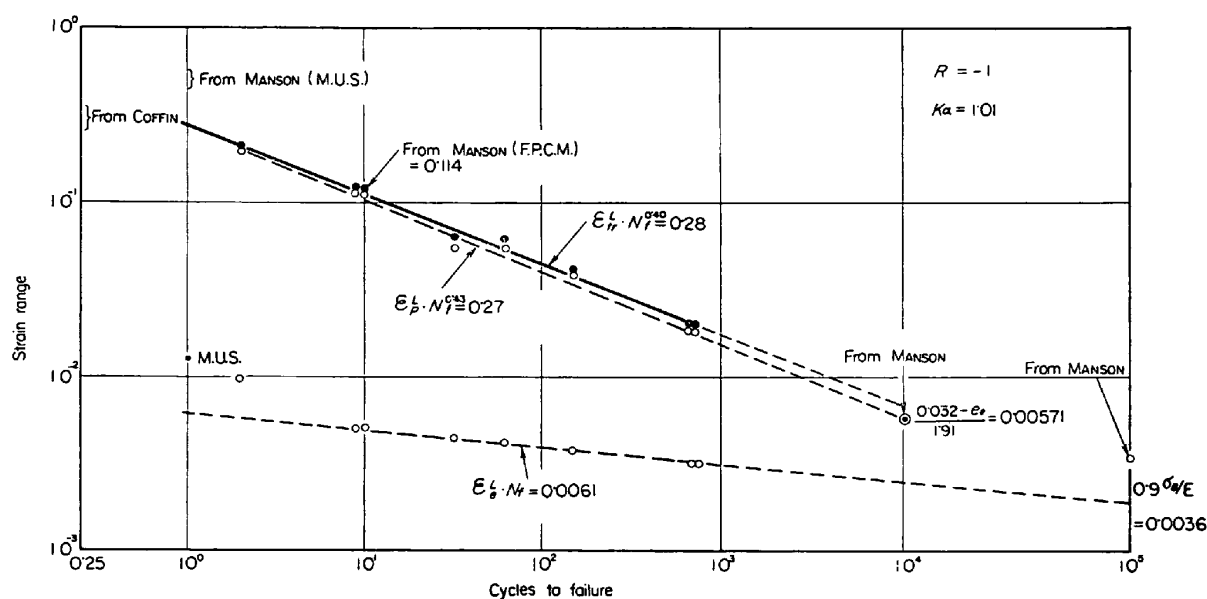
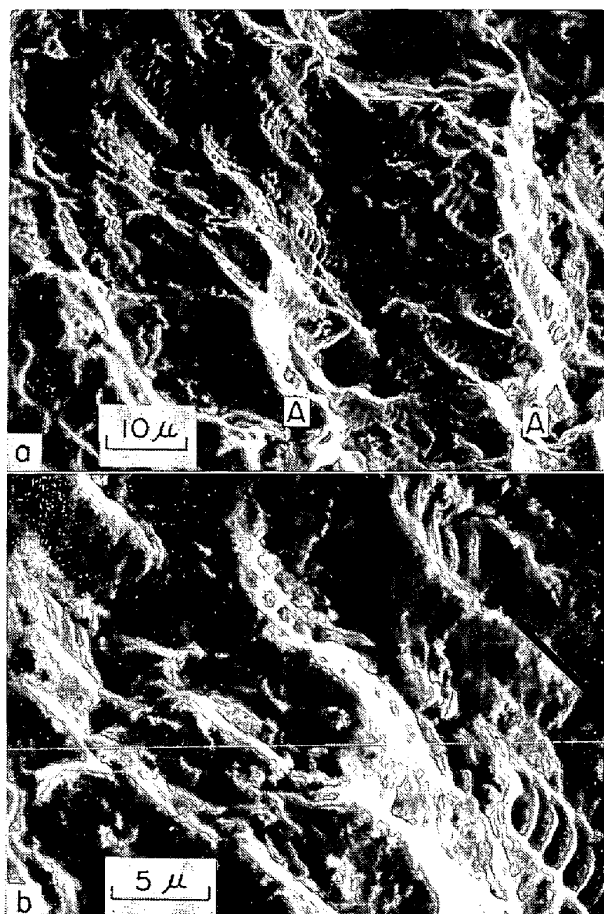
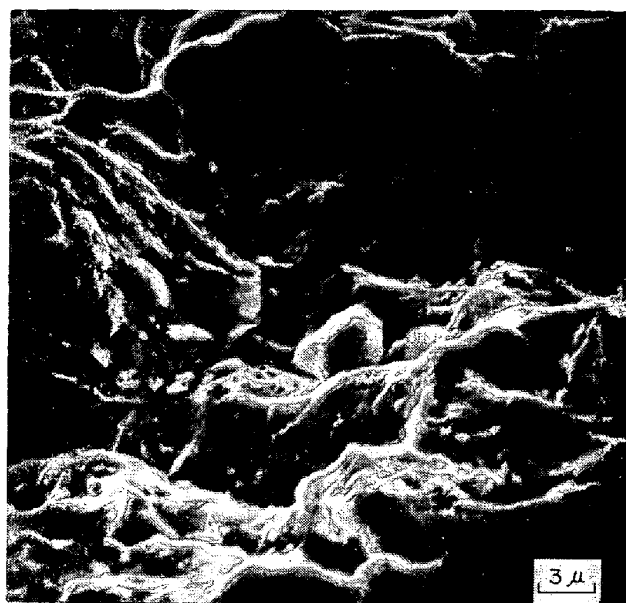


Fig. 5. Fatigue behavior of high carbon steel.



$R=0$, $\epsilon_{tr}=0.02$, $N_f=364$
 R : Strain ratio.
 ϵ_{tr} : Longitudinal total true strain range.
 N_f : Number of cycles to failure.

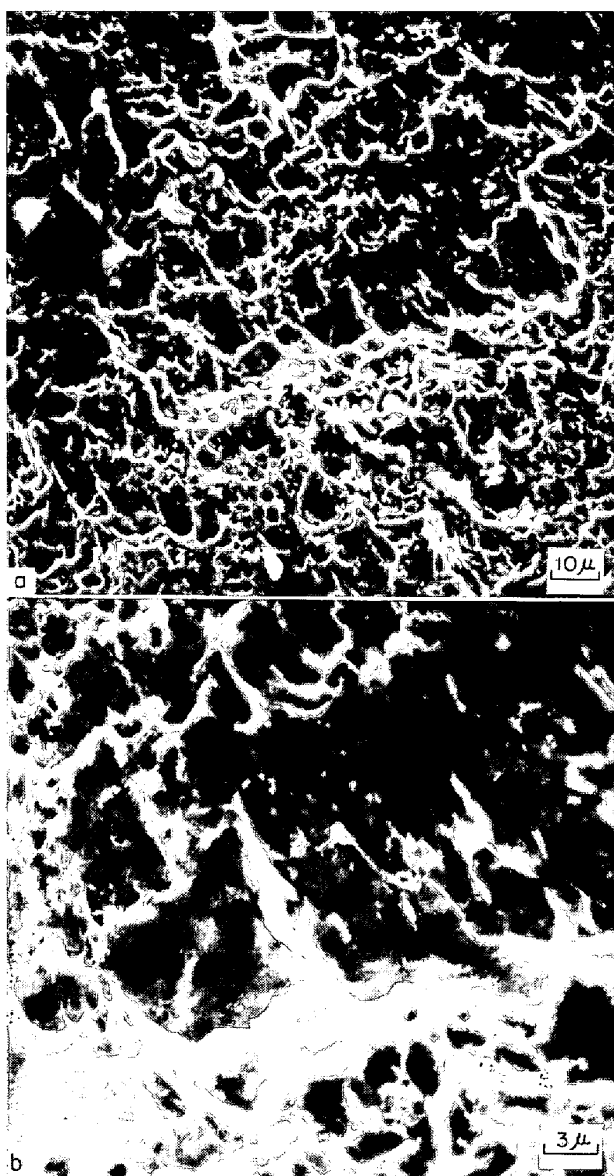
Photo. 2. Micro-fractographs of low cycle fatigue in FTW-60 (Q).



$R=0$, $\epsilon_{tr}=0.06$, $N_f=65$

Photo. 3. Micro-fractograph of low cycle fatigue in FTW-60 (Q).

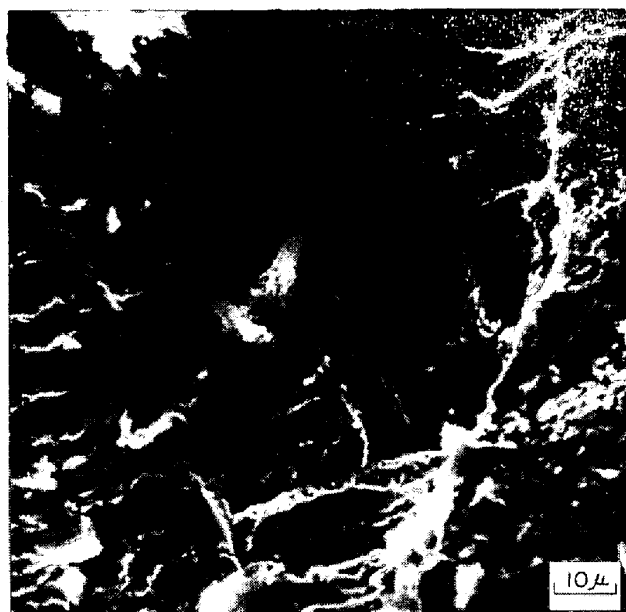
リブの間隔の異なるものが見られた。Photo. 6 は歪比のみが Photo. 5 の試片と異なる $R=1$ の場合の写真であるが、Photo. 6 (a) に示すように亀裂の発生位置から離れたところの外周部近辺の破面の例であり、亀裂の進行方向と tire pattern の方向とはわずかに角度をもっている。写真中 A をつけた白く見える部分が、肉眼で見える貝殻模様の輪に相当している。この場合も tire pattern のリブの間隔は $1\sim 3\mu$ で、今まで述べてきたものと似ている。次に FTW-60 A 材すなわち軟化焼鈍を行なったものでは、Photo. 7 に示したように、T. および Q. 材で見られたような典型的な tire pattern はあまり見られ



$R=-1$, $\epsilon_{lr}=0.20$, $N_f=6$

Photo. 4. Micro-fractographs of low cycle fatigue in FTW-60 (Q).

ず、写真A中で示したようにごく一部に見られる程度であつた。Photo.7(b)は同一破断面上に見られた pattern で、形の上からはAlなどに見られる ductile な striation¹¹⁾といわれているものに近い pattern である。Photo. 8はFTW-60鋼のT材すなわち焼入れ、焼もどしをした試片のアムスラーバイプロフォア型万能疲労試験機による7200cpmで弾性域での高サイクル疲労破面の一例で典型的な tire pattern はあまり見られなかつたが、1~2μ間隔の pattern がところどころに見られた。Photo. 9およびPhoto. 10は同じ熱処理材のローゼン型万能疲労試験機による大型試験片での高サイクル疲労破面の例であるが、この場合も Photo. 8と似た pattern が見られた。Photo. 10のA部には、わずかに典型的な tire pattern が

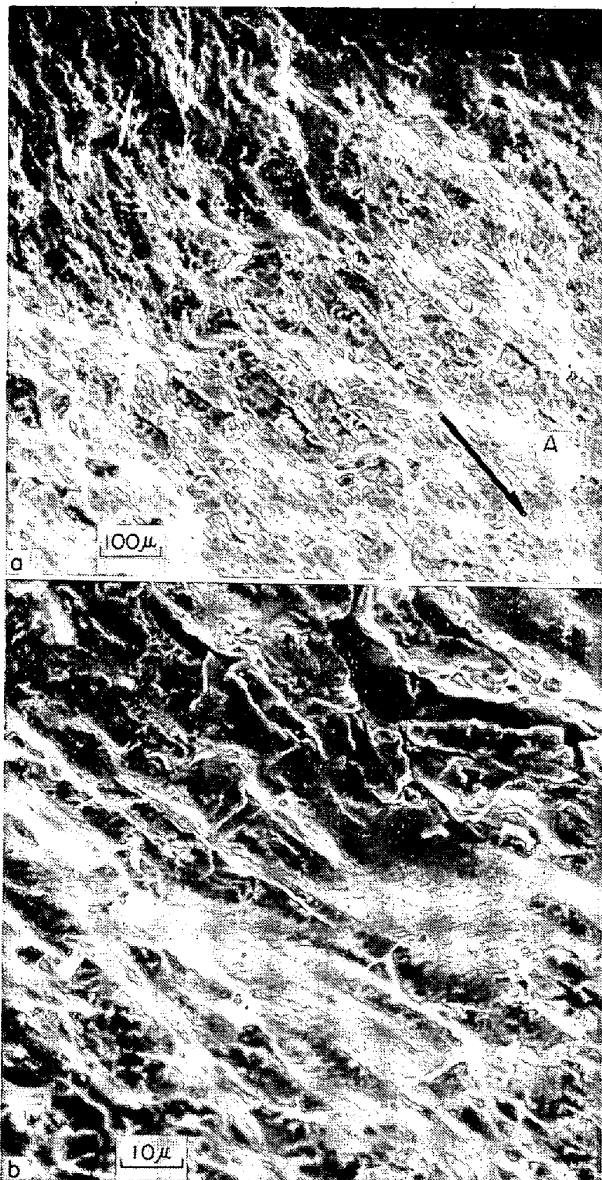


$R=0$, $\epsilon_{lr}=0.02$, $N_f=259$

Photo. 5. Micro-fractograph of low cycle fatigue in FTW-60 (T).

見られた。Photo. 11, 12は高炭素鋼の歪比 $R=-1$ で真歪範囲が0.04および0.06の場合の低サイクル疲労破面であるが、FTW-60鋼の場合と異なつて、Photo. 1の光学顕微鏡組織から推定されるようにセメントタイトの層間隔に相当すると思われる pattern が多く見られる。これはとくに歪範囲の小さいものほど著しかつた。それゆえ従来からの疲労破面特有の pattern は見出せなかつた。

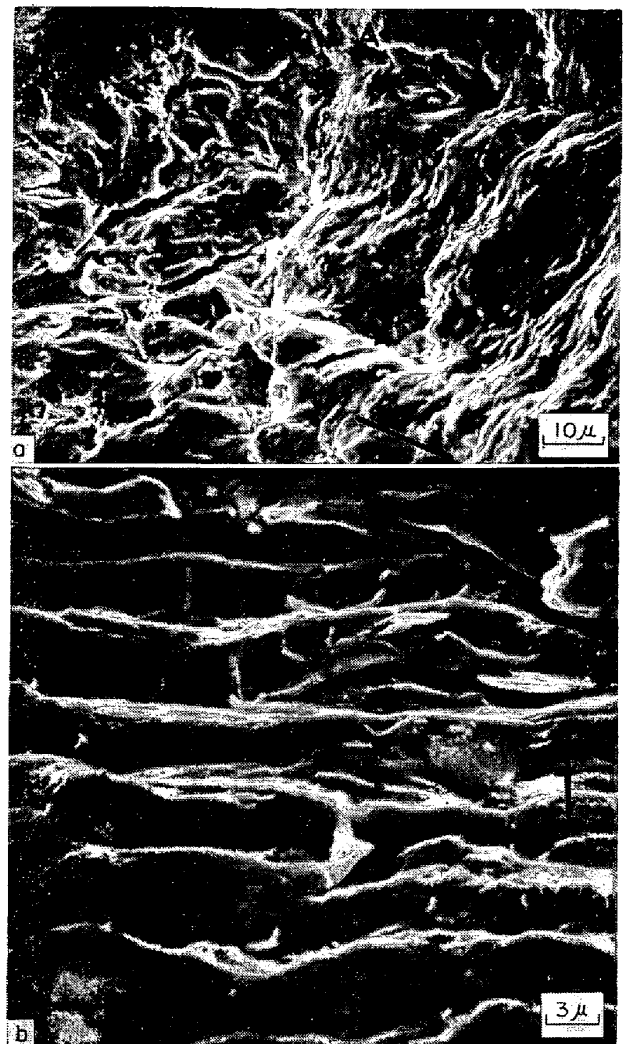
以上のことから実用高張力鋼であるFTW-60鋼の低サイクル疲労破面でも高サイクル疲労破面で特有の pattern と考えられていた pattern が見られることがわかつた。この pattern は亀裂の進行方向とほぼ平行に連なっている。さらにこの tire pattern とは別の大きな step がある。これは歪範囲によつては肉眼でも見られ、従来からAlやCuなどで見られている破断までの繰返し数と1:1の対応を示す striation に相当するものと考えられる。本研究では亀裂の発生位置とその進展状況と写真撮影位置との対応を十分考慮しなかつたのでさらに検討する予定である。このような低サイクル疲労破面で疲労特有の tire pattern が見られるのは真歪範囲 $\epsilon_{lr}=0.04$ 程度以下、すなわち破断寿命が約100回以上の長寿命側のものについてであり、これより歪範囲の大きいものではすなわち短寿命のものでは静的引張破断面に近い pattern になることがわかつた。このように高サイクル領域から低サイクル領域にわたつて類似の tire pattern が見られることはAlやAl合金などF.C.Cの金属で見ら



$R = -1, \quad \epsilon_{tr} = 0.02, \quad N_f = 290$

Photo. 6. Micro-fractographs of low cycle fatigue in FTW-60 (T).

れるような破断繰返し数と 1:1 の対応を示す ductile な striation とは全く異なるものであり、またある繰返し数以上でないと現われないということから、その成因は LAIRD and SMITH⁵⁾などが提案した double-cup plastic separation による機構や西岡らによる面のぶつかりによる平坦化過程によるものでなく、亀裂先端部での材料の損傷も考慮したものを考えねばならない。tire pattern のリブの間隔が $1 \sim 3 \mu$ 程度であることは鉄の疲労によりできる cell の大きさ¹⁹⁾とほぼ一致することと、辛島ら¹⁹⁾による Cu での疲労亀裂の伝ぱん経路が Cell boundary であるということなどからこのリブの間隔が Cell の大きさに関係しているとも考えられる。しかし疲労破面で tire pattern のリブが一定の方向に規則正し



$R = -1, \quad \epsilon_{tr} = 0.04, \quad N_f = 112$

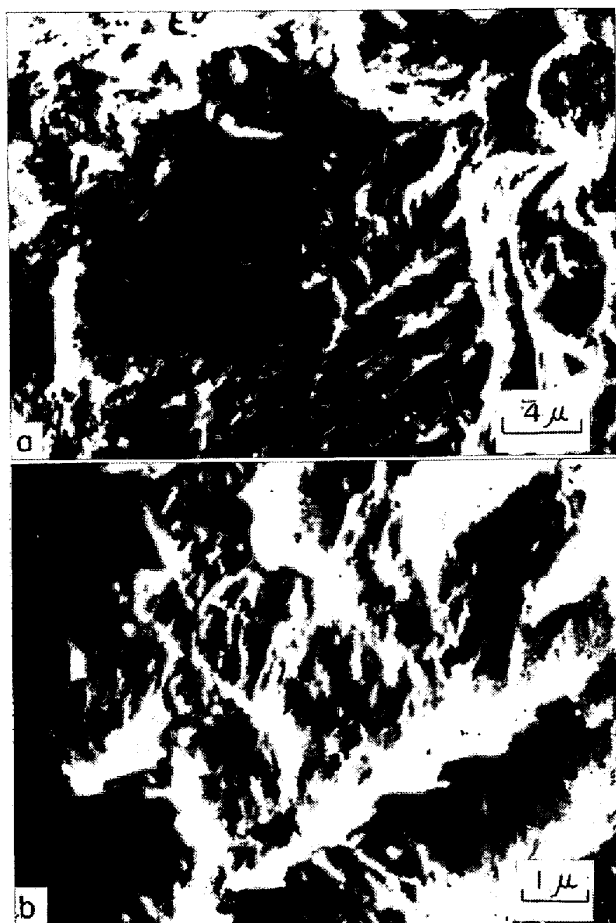
Photo. 7. Micro-fractographs of low cycle fatigue in FTW-60 (A).

く、しかもかなりの面積を占めていることは、Cell の形成が亀裂の先端で順次にかなり急速にできていくというふうに考えないと解釈が困難である。

4. 結 論

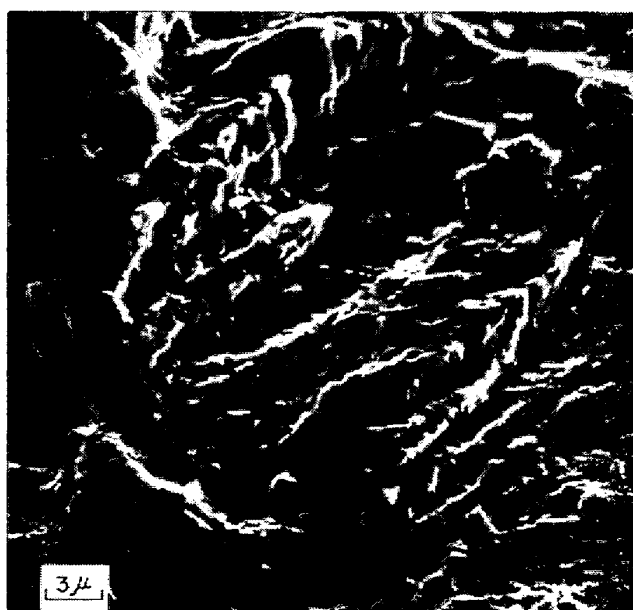
実用鋼材である FTW-60 鋼および高炭素鋼について低サイクル疲労試験を行ない、その破面を走査型電子顕微鏡でしらべたところ、次のようなことが明らかになった。

(1) 低サイクル疲労破面においても、従来から高サイクル疲労独特の pattern と考えられていたと同様な pattern が見られることがわかった。これは破断までの繰返し数が約 100 回以上のものについてであり、また pattern のリブの間隔も低サイクル域から高サイクル域にわたって、ほぼ等しい。したがって、亀裂先端での繰返し応力による損傷・伝ぱんの初期の機構がいずれの疲労



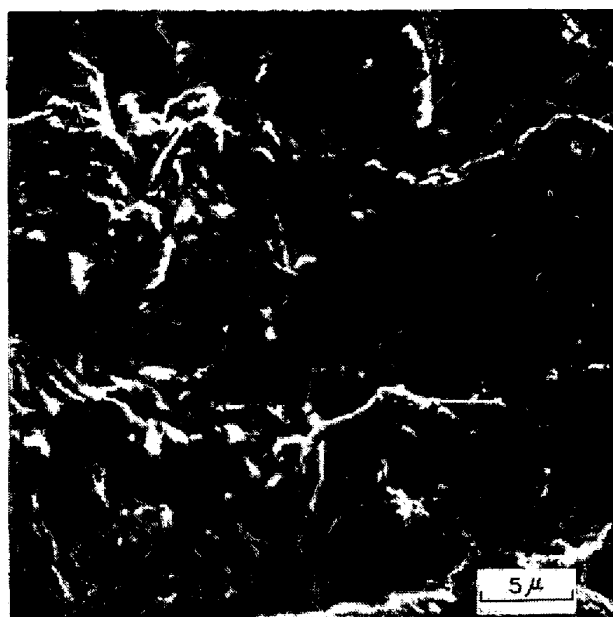
$R=0, N_f=5.12 \times 10^6$

Photo. 8. Micro-fractographs of high cycle fatigue in FTW-60 (T).



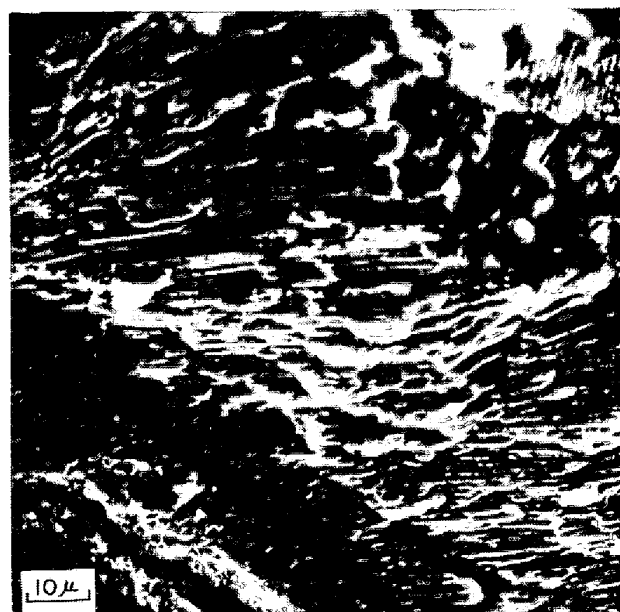
$N_f=5 \times 10^5$

Photo. 9. Micro-fractograph of high cycle fatigue in FTW-60 (T).



$R=0, N_f=5 \times 10^3$

Photo. 10. Micro-fractograph of low cycle fatigue in FTW-60 (T). Direction of crack growth shown by arrow.

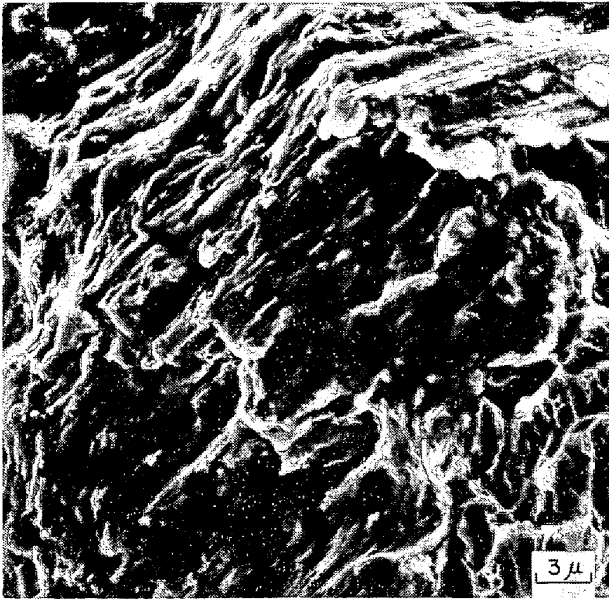


$R=-1, \sigma_{cr}=0.04, N_f=152$

Photo. 11. Micro-fractograph of low cycle fatigue in high carbon steel specimen.

の場合も同様であると考えられるに至つた。また、従来 10^3 ないし 10^4 程度以下で破壊するものを単純に低サイクル疲労による破壊と総称していたが、破面の pattern から見ると低サイクル疲労と高サイクル疲労の区別について別の定義の仕方があるとも考えられる。

(2) Al 合金などでみられている繰返し数と 1:1 の対応を示す striation は、一般に f.c.c. 金属の ductile な材料の場合に出やすいと考えられているが、本実験の場



$R = -1$, $\epsilon_{tr} = 0.66$, $N_f = 52$

Photo. 12. Micro-fractograph of low cycle fatigue in carbon steel specimen.

合でも(1)にのべた tire pattern とは別に繰返し数と対応すると考えられる。やや大きな Step が観察された。

(3) したがって低サイクル疲労による破面は繰返し数に対応する一種の striation ともいうべき step と、その間に高サイクル、低サイクルいずれの疲労破面の場合共通の現象とみられる tire pattern があり、この両者の組合わせから成立っていることが特徴といえよう。

(4) 上記(1)(2)および(3)の破面観察については片振り、両振りなどの試験条件による差はとくに現われず、低サイクル疲労の場合は、ほぼ共通の破面状況を示している。

終りに本実験に御協力いただいた日本電子(株)稲継氏をはじめ諸氏に感謝いたします。

文 献

- 1) E. OROWAN: Welding J., 31 (1952) 6, p. 273S ~282S
- 2) L. F. COFFIN Jr. and J. F. TAVERNELI: Trans. AIME, 215 (1959) 10, p. 794
- 3) L. F. COFFIN Jr. and J. F. TAVERNELI: Trans. Amer. Soc. Metals, 51 (1959), p. 438~453
- 4) S. S. MANSON: Experimental Mech., 5 (1965), 7, p. 193~226
- 5) C. LAIRD and G. C. SMITH: Phil. Mag., 7(1962), p. 847~857
- 6) 西岡, 西川: 日本機械学会論文集(第1部), 33 (1967) 250, p. 849~855
- 7) C. D. BEACHEM and R. M. PELLOUX: Fracture Toughness Testing, p. 210~245
- 8) R. W. JUDY et al. Trans. Amer. Soc. Metals, 59 (1966), p. 195~207
- 9) W. R. WARKE and J. L. MCCALL: S.A.E. J., March 30~April 3 8280 (1964), p. 1~13
- 10) S. S. MANSON: Exp. Mech., (1965) 7, p. 193~236
- 11) P. J. E. FORSYTH: Acta Met., 11 (1963) 8, p. 703~715
- 12) J. C. GROSSKREUTZ: J. Appl. Phys., 33 (1962) 5, p. 1787~1792
- 13) 徳田: 日本金属学会誌, 24 (1960) 3, p. 171~175
- 14) 徳田: ibid. 24 (1960) 10, p. 665~668
- 15) A. PHILLIPS: Electron Fractograph Handbook, AD 612912
- 16) C. A. ZAPFFE and C. D. WORDEN: Trans. Amer. Soc. Met., 43 (1950), p. 958~969
- 17) P. J. E. FORSYTH and D. A. RYDER: Metallurgia, 63 (1961) 3, p. 117~124
J. Inst. Metals, 67 (1952), p. 238~239
- 18) 辛島, 及川, 小倉: 日本金属学会誌, 31 (1967) 5, p. 669~678
- 19) M. KLESNIL and P. LUKAS: J. Iron Steel Inst., (1965) 11, p. 1043~1048