

---

溶接構造用鋼の低サイクル疲労特性

Low Cycle Fatigue Properties of Structural Steels

田中 康浩(Michihiro Tanaka) 松本 重人(Shigeto Matsumoto) 船越 督己(Tokushi Funakoshi) 西山 昇(Noboru Nishiyama)

---

要旨：

造船用鋼から調質高張力鋼にいたる 7 種の鋼材の母材および溶接継手についての低サイクル疲労特性をとりまとめている。各鋼材についてのひずみ制御低サイクル疲労試験で成立する Manson-Coffin の関係  $\epsilon \cdot N^k = C$  の定数および指数を求め、これらと静的引張特性の関係を検討した。また、ひずみ制御試験時のひずみ繰返しにともなう応力変化を測定し、繰返し硬化あるいは軟化挙動と鋼材との対応を明確にした。さらに、亀裂伝播寿命の全疲労寿命に対する割合をもとめた。なお、供試鋼材すべての疲労特性は ASME Code Sec. III ボイラーおよび圧力容器規則に対して十分安全側にあることを確認した。

---

Synopsis：

Low cycle fatigue properties are described on various structural steel plates used for ship hulls, pressure vessels, civil structures, etc. A so-called Manson-Coffin relation,  $\epsilon \cdot N^k = C$ , was established for strain controlled fatigue tests. The correlation between material constants  $k$  and  $C$  and tensile properties are discussed. Cyclic hardening and softening during the strain controlled tests are observed. Also, a ratio of crack-propagation life to fatigue life is obtained. All materials used in this experiment clearly satisfy the ASME section III code for boiler and pressure vessel.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

|                   |
|-------------------|
| 本文は次のページから閲覧できます。 |
|-------------------|

# 溶接構造用鋼の低サイクル疲労特性

## Low Cycle Fatigue Properties of Structural Steels

田 中 康 浩\*

Michihiro Tanaka

松 本 重 人\*\*

Shigeto Matsumoto

船 越 督 已\*\*\*

Tokushi Funakoshi

西 山 昇\*\*\*\*

Noboru Nishiyama

### Synopsis:

Low cycle fatigue properties are described on various structural steel plates used for ship hulls, pressure vessels, civil structures, etc. A so-called Manson-Coffin relation,  $\epsilon \cdot N^k = C$ , was established for strain controlled fatigue tests. The correlation between material constants  $k$  and  $C$  and tensile properties are discussed. Cyclic hardening and softening during the strain controlled tests are observed. Also, a ratio of crack-propagation life to fatigue life is obtained. All materials used in this experiment clearly satisfy the ASME section III code for boiler and pressure vessel.

## 1. 緒 言

圧力容器、船舶などの溶接構造物の構造的な不連続部や溶接欠陥部は、応力集中あるいは残留応力の重畳により、局部的に高い繰返し応力を受ける。このような状態では、高応力繰返しによる破壊、いわゆる低サイクル疲労破壊が生ずることがあきらかになり、低サイクル疲労に関する研究がさかんになっている<sup>1,2)</sup>。本報では、船舶用50kg/mm<sup>2</sup>級鋼および当社の代表的な溶接構造用鋼である調質高張力鋼、原子炉圧力容器用鋼などの母材と溶接部についてのひずみ制御低サイクル疲労特性をとりまとめている。

## 2. 供試材および試験方法

### 2.1 供 試 材

供試材の化学成分を Table 1 に示す。鋼種は7種であり、50kg/mm<sup>2</sup>級造船用鋼の圧延のまま(K5D)および焼ならし材(K5E)、60kg/mm<sup>2</sup>級調質高張力鋼(RIVER ACE 60)、70kg/mm<sup>2</sup>級調質高張力鋼(RIVER ACE 70)、80kg/mm<sup>2</sup>級調質高張力鋼(RIVER ACE K-O)、原子炉圧力容器用鋼(ASME SA 533)および極低温構造用鋼(KLN 9)<sup>3)</sup>である。板厚は RIVER ACE 70 (50mm)、SA 533 (240mm)、KLN 9 (30mm) 以外はすべて 35mm である。

\* 技術研究所厚板研究室主任研究員

\*\*\* 技術研究所厚板研究室室長・工博

\*\* 技術研究所厚板研究室

\*\*\*\* 技術研究所溶接研究室主任研究員

Table 1 Chemical composition of the materials used

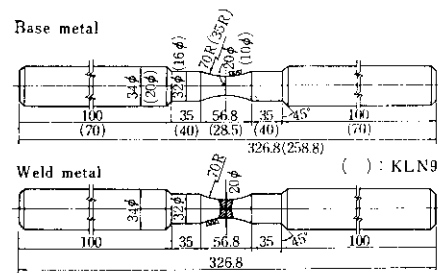
(wt%)

| Steel                 | Plate thickness (mm) | C    | Si   | Mn   | P     | S     | Cu   | Ni   | Cr   | Mo   | V     | B     | Ceq. |
|-----------------------|----------------------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|-------|-------|------|
| K5D                   | 35                   | 0.16 | 0.43 | 1.30 | 0.020 | 0.014 | —    | —    | —    | —    | —     | —     | 0.40 |
| K5E                   | 35                   | 0.15 | 0.35 | 1.36 | 0.019 | 0.009 | —    | —    | —    | —    | —     | —     | 0.39 |
| RIVER ACE 60 (HW 50)  | 35                   | 0.14 | 0.41 | 1.20 | 0.020 | 0.009 | 0.01 | 0.38 | 0.04 | 0.07 | 0.039 | —     | 0.40 |
| RIVER ACE 70 (HW 63)  | 50                   | 0.11 | 0.25 | 0.82 | 0.012 | 0.010 | 0.20 | 1.03 | 0.42 | 0.34 | 0.029 | 0.003 | 0.45 |
| RIVER ACE K-O (HW 70) | 35                   | 0.14 | 0.30 | 0.85 | 0.005 | 0.006 | 0.24 | 1.18 | 0.44 | 0.49 | 0.044 | 0.004 | 0.51 |
| SA533                 | 240                  | 0.18 | 0.26 | 1.37 | 0.011 | 0.006 | 0.01 | 0.67 | 0.11 | 0.54 | —     | —     | 0.59 |
| KLN9 <sup>3)</sup>    | 30                   | 0.05 | 0.21 | 0.50 | 0.007 | 0.007 | —    | 9.02 | —    | —    | —     | —     | 0.37 |

Ceq. =  $C + Mn/6 + Si/24 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14$  (%)

## 2.2 試験片

低サイクル疲労試験片の形状、寸法を Fig. 1 に示す。KLN9については最小断面部径10mmのものをを用いている。試験片は理論応力集中係数 $K_t$ が1.06となる砂時計型であり、応力軸方向が圧延方向と一致するように、SA 533 以外の素材については板厚中央部(1/2 t)から、SA 533については1/2 t部とともに板厚1/4 t部からも採取した。また、溶接継手試験片は溶接金属の中央部が最小断面部になるようにした。これらはいずれも日本溶接規格(WES-162-1970)に準じたものである。また、疲労試験に先立って実施した静的引張試験では、上記疲労試験片のほか JIS 4 号サブサイズ型(7mmφ)も用いた。なお、低サイクル疲労試

Fig. 1 Shape of specimens (Elastic stress concentration factor  $K_t=1.06$ )

験片については砂時計部をエメリーペーパー(#800)で研磨した。溶接継手試験はK5D, RIVER ACE 60, RIVER ACE K-Oについて行い、その溶接条件を Table 2 に示す。

Table 2 Welding conditions for test pieces

| Steel         | Shape of groove and welding method | Welding material                    | Welding position | Welding current (A) | Arc voltage (V) | Welding speed (mm/min) | Pre-heat and interlayer temp. (°C) | Heat input (kJ/cm) |
|---------------|------------------------------------|-------------------------------------|------------------|---------------------|-----------------|------------------------|------------------------------------|--------------------|
| K5D           |                                    | KS-76 (ASTM E 7016) 4mmφ and 5mmφ   | Flat             | 170~230             | 24              | 120                    | 100~120                            | 20~28              |
| RIVER ACE 60  |                                    | KS-86 (ASTM E 8016 G) 4mmφ and 5mmφ | Flat             | 170~230             | 24              | 120                    | 120~140                            | 20~28              |
| RIVER ACE K-O |                                    | KS-116 (ASTM E11016G) 4mmφ and 5mmφ | Vertical         | 150~170             | 30              | 75                     | 130~150                            | 36~41              |

### 2.3 試験方法

静的引張試験は、JIS 4 号サブサイズ型試験片については10 t インストロン試験機を用い、また、砂時計型低サイクル疲労試験片については50 t 万能材料試験機を用いて行った。疲労試験は±50 t 電気油圧式低サイクル疲労試験機(鶯宮製作所製)を用い、試験片の最小断面部にとりつけた径方向ひずみ検出器の出力が一定になるよう制御して実施した。

制御するひずみは、砂時計型試験片の最小断面における直径方向対数ひずみの最大値と最小値であり、ひずみ量は次式で定義される。

$$\ln d_0/d_t = \ln d_e/d_0 = \epsilon_{ia}^{(d)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $d_0$  : 試験片の最小断面部の原直径

$d_t$  : 試験片の最大引張時の直径

$d_e$  : 試験片の最大圧縮時の直径

$\epsilon_{ia}^{(d)}$  : 直径方向対数全ひずみ振幅

なお、ひずみ波形は正弦波であり、最小ひずみと最大ひずみの比すなわちひずみ比は常に -1 (完全両振) とした。繰返し速度はひずみ量の大きい場合には 0.6 cpm, 小さい場合には 5 cpm である。すべての試験は引張側よりひずみサイクルを開始した。疲労試験中の荷重ならびに試験片最小断面の直径変化を X-Y レコーダーに記録し、繰返しにともなう荷重振幅の変化の挙動を調べた。試験は試験片が完全な破断にいたるまで続行し、試験中肉眼あるいは 3 倍率のルーペで試験片表面

の観察を行い、はじめて疲労亀裂(可視亀裂)を検出した繰返し数 ( $N_e$ ) および破断した繰返し数 ( $N_f$ ) を記録した。破断後の試験片の破面と外観を観察し、一部の破面については走査型電子顕微鏡による観察を行った。

### 3. 試験結果

#### 3.1 静的引張試験結果

Table 3 に JIS 4 号サブサイズ型引張試験片、および砂時計型低サイクル疲労試験片の静的引張試験結果を示す。低サイクル疲労強度を支配する因子として降伏比, 加工硬化係数, 絞り, 伸び, 静破壊延性および真破断応力が考えられるが, 引張強さが大きくなるにつれて絞り, 伸び, 加工硬化係数はしだいに低下し, また, 降伏比は増加する。このことは母材, 溶接継手ともに同様の傾向を示している。JIS 4 号サブサイズ引張試験片と砂時計型引張試験片による試験結果を比較すると, 後者は塑性拘束があるため, 母材については引張強さ, 降伏点がやや増加し, 絞り, 静破壊延性は低下している。

#### 3.2 ひずみ制御低サイクル疲労試験結果

一般に真応力と対数ひずみに関し, フックの法則が成立するとすれば, 径方向対数弾性ひずみ振幅  $\epsilon_{ea}^{(d)}$  について次式の関係がある。

Table 3 Results of tension test

| Steel         | Position | JIS 4 type specimen (7mmφ)                         |                                                         |                                 |                                    |                                           |                                                             |                                  |                                         | Hour glass type specimen                           |                                                         |                                    |                                           |                                                             |                                    |
|---------------|----------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------------|
|               |          | Yield point<br>$\sigma_y$<br>(kg/mm <sup>2</sup> ) | Tensile strength<br>$\sigma_u$<br>(kg/mm <sup>2</sup> ) | Elongation<br>$\epsilon$<br>(%) | Reduction of area<br>$\psi$<br>(%) | Yield ratio<br>$\sigma_y/\sigma_u$<br>(%) | True fracture stress<br>$\sigma_f$<br>(kg/mm <sup>2</sup> ) | Work hardening exponent<br>$n^*$ | Fracture ductility<br>$\epsilon_f^{**}$ | Yield point<br>$\sigma_y$<br>(kg/mm <sup>2</sup> ) | Tensile strength<br>$\sigma_u$<br>(kg/mm <sup>2</sup> ) | Reduction of area<br>$\psi$<br>(%) | Yield ratio<br>$\sigma_y/\sigma_u$<br>(%) | True fracture stress<br>$\sigma_f$<br>(kg/mm <sup>2</sup> ) | Fracture ductility<br>$\epsilon_f$ |
| K5D           | 1/2 t    | 34.6                                               | 54.0                                                    | 28                              | 75                                 | 64                                        | 129.6                                                       | 0.208                            | 1.375                                   | 36.4<br>(51.2)                                     | 55.6<br>(64.3)                                          | 72<br>(66)                         | 65<br>(80)                                | 126.0<br>(130.4)                                            | 1.071<br>(1.075)                   |
| K5E           | 1/2 t    | 35.2                                               | 53.7                                                    | 32                              | 76                                 | 66                                        | 135.7                                                       | 0.238                            | 1.430                                   | 39.4                                               | 58.4                                                    | 74                                 | 69                                        | 130.2                                                       | 1.127                              |
| RIVER ACE 60  | 1/2 t    | 54.1                                               | 63.6                                                    | 22                              | 76                                 | 85                                        | 146.3                                                       | 0.121                            | 1.440                                   | 56.3<br>(61.2)                                     | 68.8<br>(72.0)                                          | 66<br>(56)                         | 82<br>(85)                                | 137.8<br>(126.2)                                            | 1.109<br>(0.824)                   |
| RIVER ACE 70  | 1/2 t    | 65.8                                               | 72.6                                                    | 16                              | 71                                 | 91                                        | 142.3                                                       | 0.108                            | 1.221                                   | 66.8                                               | 76.4                                                    | 58                                 | 87                                        | 132.6                                                       | 0.892                              |
| RIVER ACE K-O | 1/2 t    | 79.9                                               | 86.0                                                    | 17                              | 71                                 | 93                                        | 168.3                                                       | 0.087                            | 1.252                                   | 87.7<br>(86.6)                                     | 93.0<br>(94.6)                                          | 64<br>(53)                         | 94<br>(92)                                | 162.5<br>(154.7)                                            | 0.955<br>(0.638)                   |
| SA533         | 1/2 t    | 50.6                                               | 62.9                                                    | 29                              | 71                                 | 80                                        | —                                                           | —                                | —                                       | 55.1                                               | 68.7                                                    | 64                                 | 80                                        | 125.5                                                       | 1.008                              |
|               | 1/2 t    | 49.5                                               | 62.5                                                    | 29                              | 73                                 | 79                                        | —                                                           | —                                | —                                       | —                                                  | —                                                       | —                                  | —                                         | —                                                           | —                                  |
| KLN90         | 1/2 t    | 62.9                                               | 72.3                                                    | 31                              | —                                  | 87                                        | —                                                           | —                                | —                                       | 69.7                                               | 78.7                                                    | 69                                 | 89                                        | 166.6                                                       | 1.178                              |

\* :  $\sigma = \sigma_0 \cdot \epsilon^n$

\*\* :  $\epsilon_f = \ln 100 / (100 - \psi)$

( ) : Weld metal

$$\epsilon_{ea}^{(d)} = \nu \cdot \sigma_R / 2E \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $\epsilon_{ea}^{(d)}$ ：径方向対数弾性ひずみ振幅

$\sigma_R$ ：亀裂発生直前の真応力範囲

$E$ ：縦弾性係数 (21 000kg/mm<sup>2</sup>)

$\nu$ ：ポアソン比 (0.3)

また、径方向対数全ひずみ振幅  $\epsilon_{ta}^{(d)}$  は、 $\epsilon_{ea}^{(d)}$  と径方向対数塑性ひずみ振幅  $\epsilon_{pa}^{(d)}$  の和であるから、次の関係がある。

$$\epsilon_{pa}^{(d)} = \epsilon_{ta}^{(d)} - \nu \cdot \sigma_R / 2E \quad \dots\dots\dots (3)$$

したがって、径方向対数塑性ひずみ振幅から軸方向対数塑性ひずみ振幅  $\epsilon_{pa}$  への換算は、体積一定の仮定のもとに次式から計算できる。

$$\epsilon_{pa} = 2 \epsilon_{ta}^{(d)} - \nu \cdot \sigma_R / E \quad \dots\dots\dots (4)$$

一方、軸方向対数弾性ひずみ振幅  $\epsilon_{ea}$  は次式となり、

$$\epsilon_{ea} = \sigma_R / 2E \quad \dots\dots\dots (5)$$

したがって、軸方向対数ひずみ振幅  $\epsilon_{ta}$  は、

$$\epsilon_{ta} = \epsilon_{pa} + \epsilon_{ea} = 2\epsilon_{ta}^{(d)} + (\frac{1}{2} - \nu) \sigma_R / E \quad \dots\dots\dots (6)$$

で求められる。各鋼の母材および溶接継手に関する軸方向真ひずみ全振幅  $\epsilon$  と亀裂発生回数 ( $N_c$ ) および破断回数 ( $N_f$ ) との関係を Fig. 2~Fig. 8 に示す。図よりわかるように、本試験範囲では全

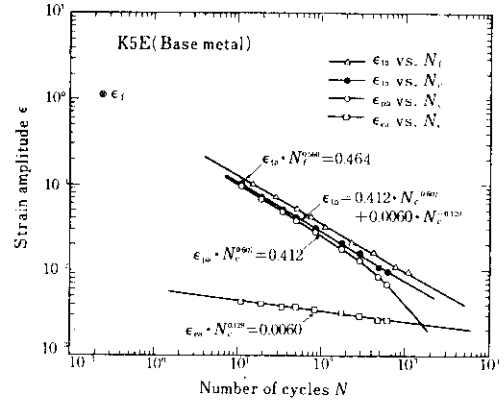


Fig. 3  $\epsilon$ - $N$  curves of K5E

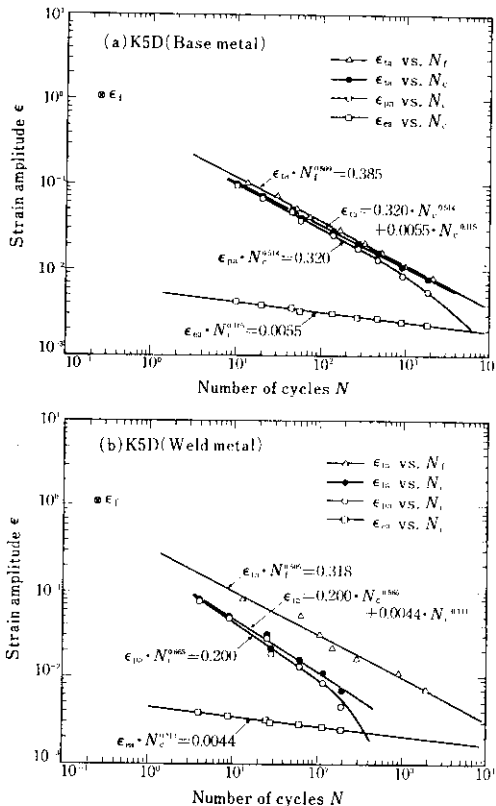


Fig. 2  $\epsilon$ - $N$  curves of K5D

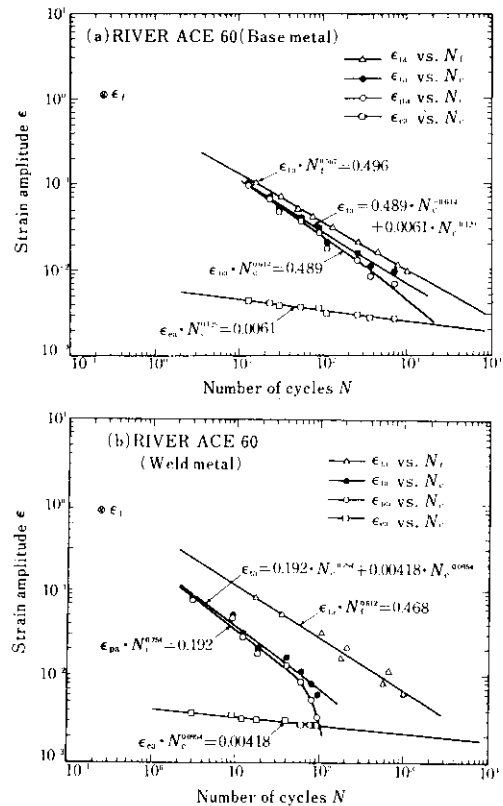


Fig. 4  $\epsilon$ - $N$  curves of RIVER ACE 60

一般的にクラックの発生回数  $N_c$  が母材については約 200 回以上, 溶接継手については約 70 回以上になると  $\epsilon_{pa}$  はしだいに小さくなり, 直線関係が成り立たなくなるが, 直線関係を示している部分については, 次の Manson-Coffin の関係式が成り立つ。

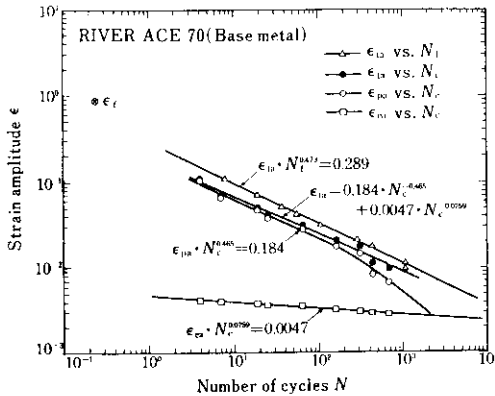


Fig. 5  $\epsilon$ - $N$  curves of RIVER ACE 70

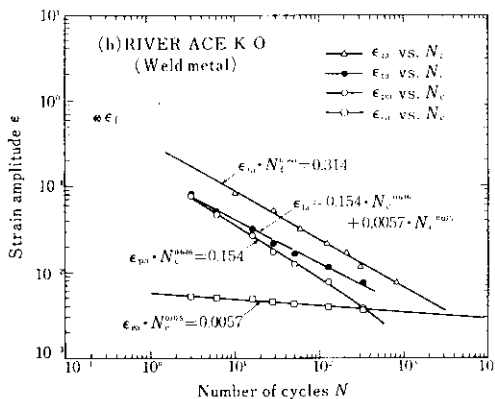
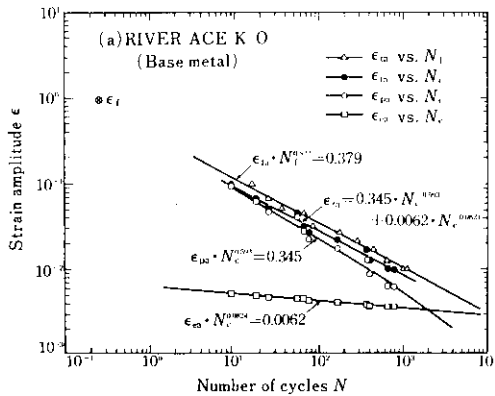


Fig. 6  $\epsilon$ - $N$  curves of RIVER ACE K-O

$$\epsilon_{pa} \cdot N_c^{kp} = C_p \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\epsilon_{ea} \cdot N_c^{ke} = C_e \quad \dots\dots\dots (8)$$

したがって  $\epsilon_{ta}$  は,

$$\epsilon_{ta} = C_p \cdot N_c^{-kp} + C_e \cdot N_c^{-ke} \quad \dots\dots\dots (9)$$

で表わされる。各鋼についての材料定数  $k$  および  $C$  を Table 4 にまとめて示す。 $\epsilon$ - $N$  曲線とくにめだつ特徴は, 溶接継手の亀裂発生までの繰返

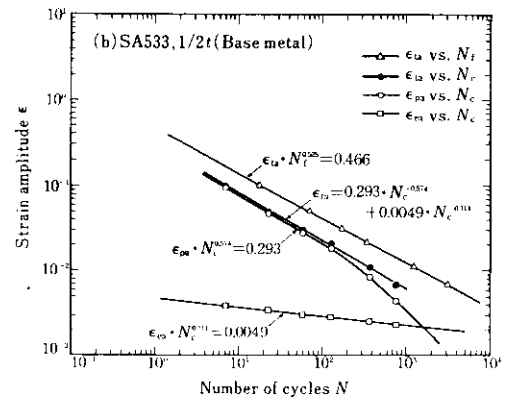
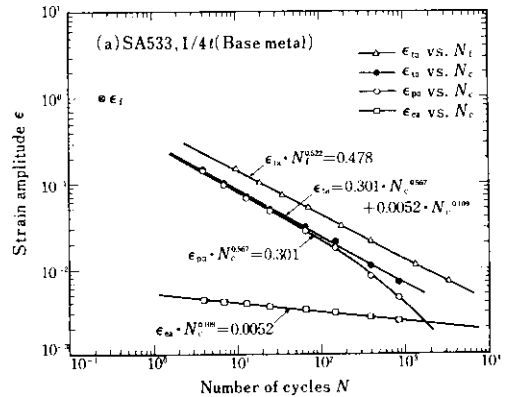


Fig. 7  $\epsilon$ - $N$  curves of SA533

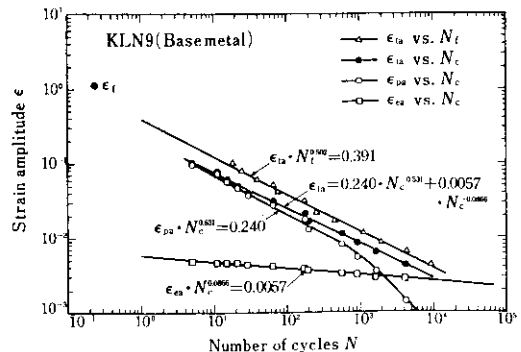


Fig. 8  $\epsilon$ - $N$  curves of KLN 9

**Table 4** Material constants of Manson-Coffin's equation  $\epsilon \cdot N^k = C$  for various steels

| Steel              |       | Exponent $k$ |          |          |          |          |          | Constant $C$ |          |          |          |          |          | $\epsilon_f$ |
|--------------------|-------|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|--------------|
|                    |       | $k_{ft}$     | $k_{ct}$ | $k_{fp}$ | $k_{cp}$ | $k_{fe}$ | $k_{ce}$ | $C_{ft}$     | $C_{ct}$ | $C_{fp}$ | $C_{cp}$ | $C_{fe}$ | $C_{ce}$ |              |
| K5D                | B. M. | 0.509        | 0.489    | 0.537    | 0.514    | 0.120    | 0.115    | 0.385        | 0.316    | 0.398    | 0.320    | 0.0057   | 0.0055   | 1.071        |
|                    | W. M. | 0.505        | 0.621    | 0.580    | 0.665    | 0.090    | 0.111    | 0.318        | 0.198    | 0.391    | 0.200    | 0.0048   | 0.0044   | 1.075        |
| K5E                | B. M. | 0.560        | 0.576    | 0.614    | 0.607    | 0.125    | 0.129    | 0.464        | 0.402    | 0.528    | 0.412    | 0.0062   | 0.0060   | 1.127        |
| RIVER ACE 60       | B. M. | 0.567        | 0.608    | 0.604    | 0.644    | 0.121    | 0.129    | 0.496        | 0.453    | 0.528    | 0.489    | 0.0062   | 0.0061   | 1.109        |
|                    | W. M. | 0.612        | 0.733    | 0.726    | 0.754    | 0.082    | 0.095    | 0.468        | 0.204    | 0.664    | 0.192    | 0.0047   | 0.0042   | 0.824        |
| RIVER ACE 70       | B. M. | 0.473        | 0.446    | 0.507    | 0.465    | 0.080    | 0.076    | 0.289        | 0.190    | 0.299    | 0.184    | 0.0051   | 0.0047   | 0.892        |
| RIVER ACE K-O      | B. M. | 0.522        | 0.515    | 0.566    | 0.593    | 0.083    | 0.082    | 0.379        | 0.296    | 0.403    | 0.345    | 0.0065   | 0.0062   | 0.955        |
|                    | W. M. | 0.560        | 0.566    | 0.692    | 0.646    | 0.082    | 0.075    | 0.310        | 0.149    | 0.438    | 0.154    | 0.0065   | 0.0057   | 0.638        |
| SA533              | B. M. | 0.522        | 0.554    | 0.562    | 0.567    | 0.103    | 0.109    | 0.478        | 0.311    | 0.518    | 0.301    | 0.0056   | 0.0052   | 1.008        |
|                    | B. M. | 0.525        | 0.564    | 0.565    | 0.573    | 0.103    | 0.111    | 0.466        | 0.308    | 0.510    | 0.293    | 0.0053   | 0.0049   | —            |
| KLN9 <sup>3)</sup> | B. M. | 0.502        | 0.478    | 0.635    | 0.531    | 0.091    | 0.087    | 0.391        | 0.226    | 0.618    | 0.240    | 0.0063   | 0.0057   | 1.178        |

B. M. : Base metal

W. M. : Weld metal

し数 ( $N_c$ ) が母材のそれとくらべ著しく小さいことであり、これは溶接部に存在する微小欠陥が亀裂発生源となったためと考えられる。しかし破断までの繰返し数  $N_f$  は母材とはほぼ同等である。

#### 4. 考 察

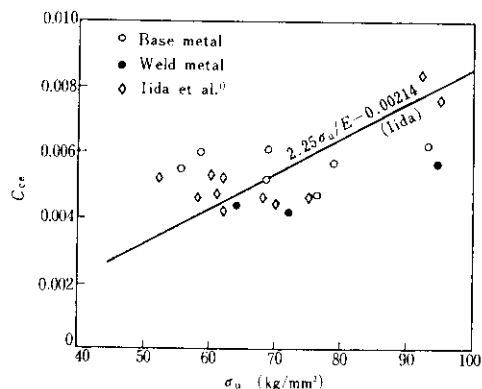
##### 4.1 静的引張特性と低サイクル疲労特性との関係

低サイクル疲労強度と静的引張特性との間には密接な関係が存在し、それらの相関関係については Manson<sup>4)</sup> をはじめとして多くの人の研究報告がある。ここではこれまでに得られた結果より、静的諸特性と低サイクル疲労特性との間にどのような関係があるかを主として母材について調べた。

##### (1) 静的引張特性と Manson-Coffin の式の定数

弾性ひずみ振幅  $\epsilon_{ca}$  と疲労寿命  $N$  との関係において、定数  $C_e$  の値は静的引張強さ  $\sigma_u$  と相関関係があるとされている。Manson は  $N_f$  基準の  $C_{fe}$  を  $1.75\sigma_u/E$  ( $E$ : ヤング率), また飯田<sup>1)</sup> は  $N_c$  基準

の  $C_{ce}$  を  $2.25\sigma_u/E - 0.00214$  で表わされるとしている。本実験結果を Fig. 9, Fig. 10 に示す。母材についてみると  $C_{ce}$  および  $C_{fe}$  はいずれもややばらついているが、飯田, Manson 両者の直線で近似できるといえよう。また塑性ひずみ振幅  $\epsilon_{pa}$  と破断寿命  $N_f$  との関係における定数  $C_{fp}$  については, Manson<sup>5)</sup> および Coffin<sup>6)</sup> は実験式から, また Martin<sup>7)</sup> は理論式から静的引張破壊で得られる静破壊延性  $\epsilon_f$  と密接な関係があることをみい



**Fig. 9** Relation between constant  $C_{ce}$  in  $\epsilon_{ca}-N_c$  curve and tensile strength  $\sigma_u$

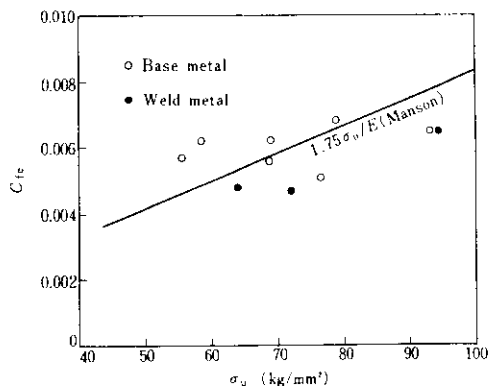


Fig. 10 Relation between constant  $C_{re}$  in  $\epsilon_{ea}-N_f$  curve and tensile strength  $\sigma_u$

だし、それぞれ  $0.5\epsilon_f^{0.6}$ 、 $0.25\epsilon_f$ 、 $1/2\sqrt{2}\epsilon_f$  なる値与えている。本実験の結果をこれらの関係直線とともに Fig. 11 に示す。図よりわかるように、母材については  $C_{fp}$  は  $0.424\epsilon_f$  となり、Manson, Martin の結果の中間に位置している。また塑性ひずみ振幅  $\epsilon_{pa}$  と亀裂発生寿命  $N_c$  との関係における  $C_{cp}$  を静破壊延性  $\epsilon_f$  に対して表示すれば Fig. 12 ようになり、母材についてみると  $C_{cp}$  は  $0.32\epsilon_f$  であり、飯田<sup>8)</sup>の値  $0.4\epsilon_f$  とほぼ一致する。

一方、 $\epsilon_{ea}-N_c$  あるいは  $N_f$  の直線の勾配  $k_{ee}$  あるいは  $k_{fe}$  は、静的引張強さ  $\sigma_u$  または降伏比  $\sigma_{0.2}/\sigma_u$  とよい相関があるとされている<sup>1)</sup>。本実験でえられた  $k_{fe}$  に関する結果を Fig. 13 に示す。

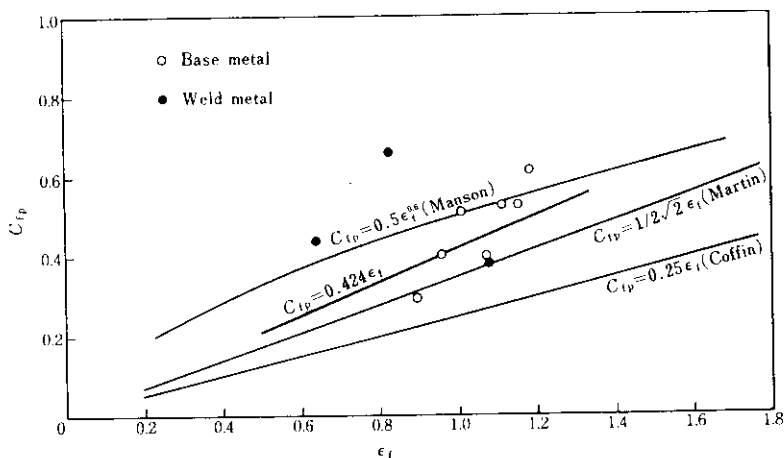


Fig. 11 Relation between constant  $C_{fp}$  in  $\epsilon_{pa}-N_f$  curve and fracture ductility  $\epsilon_f$

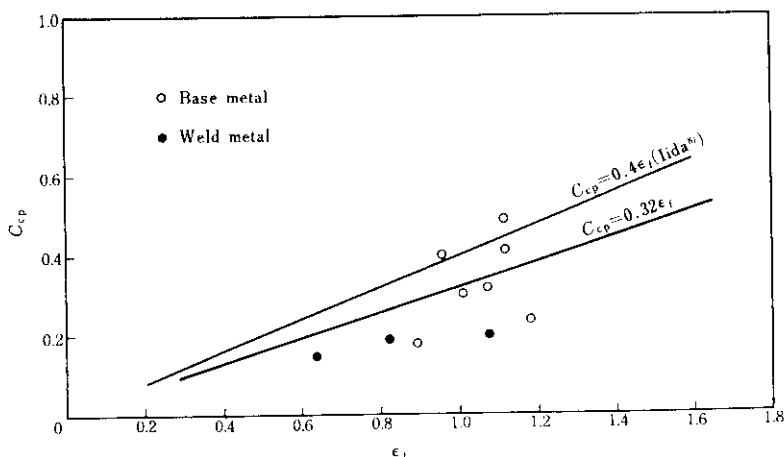


Fig. 12 Relation between constant  $C_{cp}$  in  $\epsilon_{pa}-N_c$  curve and fracture ductility  $\epsilon_f$

強度が大きくなるにつれて指数  $k_{fe}$  は小さくなっている。Manson は鋼種に関係なく  $k_{fe}$  は平均的に 0.12 であることを求めているが、本実験結果では  $k_{fe}$  は 0.08~0.125 であった。また、 $k_{ce}$  も  $k_{fe}$  と同様な変化を示し、 $k_{ce}$  の値は 0.07~0.13 であった。さらに、 $k_{ce}$  と  $k_{fe}$  との間には Fig. 14 に示されるように  $k_{ce} = 0.98k_{fe}$  の相関関係がみられる。次に、 $\epsilon_{pa} - N_0$  直線の勾配  $k_{fp}$  についての本実験の結果を Fig. 15 に示す。図から明らかなように、 $k_{fp}$  の値は 0.507~0.614 に分散しているが、 $\sigma_u$  または  $\sigma_y/\sigma_u$  の増加にともないやや減少する傾向がみられる。Martin はヒステリシスエネルギーの解析より  $k_{fp}$  が 0.5 であることを提唱し、Coffin も実験結果から  $k_{fp}$  が 0.5 となることを求めている。また、Manson<sup>9)</sup> も多くの材料の実験から  $k_{fp}$  として 0.6 を与えている。本実験の結果は 3 者の値とほぼ一致している。また、 $\epsilon_{pa}$

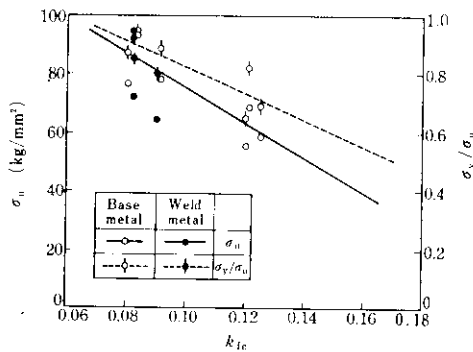


Fig. 13 Relation between exponent  $k_{fe}$  and tensile strength  $\sigma_u$  or yield ratio  $\sigma_y/\sigma_u$

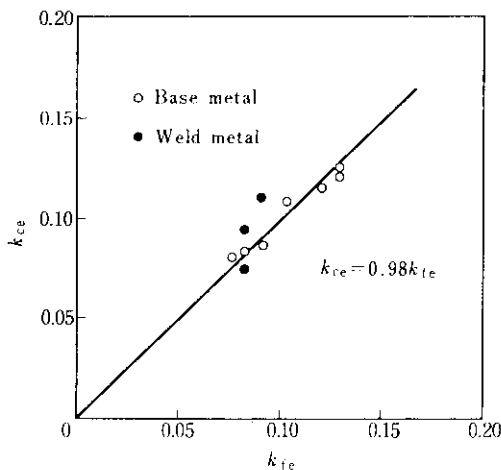


Fig. 14 Relation between exponents  $k_{ce}$  and  $k_{fe}$

と  $N_c$  に関する指数  $k_{cp}$  と  $k_{fp}$  との関係を Fig. 16 に示す。Fig. 14 に示した弾性ひずみ振幅に関する勾配の場合よりバラツキがやや大きい、 $k_{cp} = 1.02k_{fp}$  の関係がみられる。

## (2) 静的引張特性値より $\epsilon - N$ 線図の推定

静的引張特性より疲労特性を推定する方法として、Manson<sup>4,9)</sup> が提唱した共通勾配法および 4 点法がある。彼らは 29 種にわたる金属材料についての広範な実験結果をもとに

$$\epsilon_{ta} = 1.75(\sigma_u/E)N_f^{-0.12} + \frac{1}{2} \cdot \epsilon_f^{0.6} \cdot N_f^{-0.6}$$

なる基本式を導いている。すなわち、 $\epsilon_{pa}$  および  $\epsilon_{ea} - N_f$  線図は、静的引張試験で求められた  $\epsilon_f$  と  $\sigma_u$  を用いて、 $N_f = 1$  の軸上での対数弾性ひずみ振幅  $1.75\sigma_u/E$  と対数塑性ひずみ振幅  $\frac{1}{2} \epsilon_f^{0.6}$  を求め、それぞれ共通勾配  $-0.12$  と  $-0.6$  の直線を引けばよい。4 点法は弾性ひずみ成分について

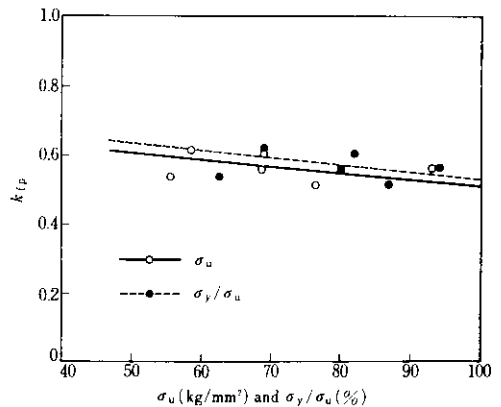


Fig. 15 Relation between exponent  $k_{fp}$  and tensile strength  $\sigma_u$  or yield ratio  $\sigma_y/\sigma_u$

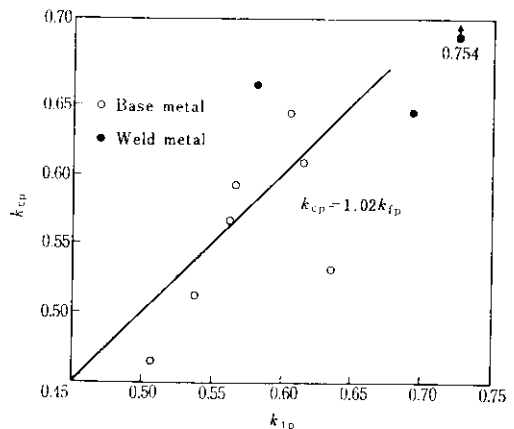


Fig. 16 Relation between exponents  $k_{cp}$  and  $k_{fp}$

$N_f = 1/4$  に対し  $\epsilon_{ea} = 1.25\sigma_f/E$ , また,  $N_f = 10^5$  に対して同じく  $0.45\sigma_u/E$  を通る直線を引き, この直線の  $N_f = 10^4$  における  $\epsilon_{ea}^*$  の値を読みとり,  $0.5 (0.0132 - \epsilon_{ea}^*/1.91)$  を求め, この値をその点での  $\epsilon_{pa}$  とし, さらに  $N_f = 10$  に対する  $\epsilon_{pa}$  を  $1/8 \epsilon_f^{3/4}$  として求め, この二点を通る直線を塑性ひ

ずみ成分に関する推定直線とする手法である。

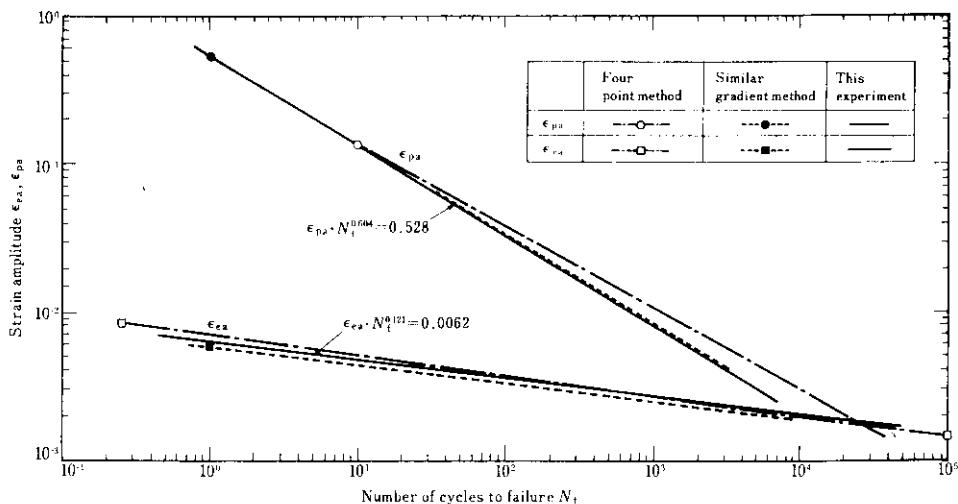
本実験結果についてその妥当性を検討してみた。まず, 共通勾配法または4点法に必要な定数を **Table 5** に示す。このようにして求めた RIVER ACE 60 と RIVER ACE K-O の  $\epsilon-N$  線図の例を **Fig. 17**, **Fig. 18** に示す。母材につ

**Table 5** Material constants of  $\epsilon-N$  curve estimated by similar gradient and 4 points method for various materials

| Steel         |       | Material constant for Manson            |                                                      |                                           |                                            |                                                         |                                                                                             |
|---------------|-------|-----------------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
|               |       | Similar gradient method                 |                                                      | 4 points method                           |                                            |                                                         |                                                                                             |
|               |       | $1.75 \sigma_u/E$<br>$\epsilon_{ea}(1)$ | $\frac{1}{2} \epsilon_f^{0.6}$<br>$\epsilon_{pa}(1)$ | $1.25 \sigma_f/E$<br>$\epsilon_{ea}(1/4)$ | $0.45 \sigma_u/E$<br>$\epsilon_{ea}(10^5)$ | $\frac{1}{8} \epsilon_f^{3/4}$<br>$\epsilon_{pa}(10^1)$ | $\frac{1}{2} \left( \frac{0.0132 - \epsilon_{ea}^*}{1.91} \right)$<br>$\epsilon_{pa}(10^4)$ |
| K5D           | B. M. | 0.00463                                 | 0.521                                                | 0.00750                                   | 0.00119                                    | 0.1317                                                  | 0.00300                                                                                     |
|               | W. M. | 0.00536                                 | 0.522                                                | 0.00776                                   | 0.00138                                    | 0.1291                                                  | 0.00296                                                                                     |
| K5E           | B. M. | 0.00487                                 | 0.537                                                | 0.00775                                   | 0.00125                                    | 0.1367                                                  | 0.00300                                                                                     |
| RIVER ACE 60  | B. M. | 0.00573                                 | 0.532                                                | 0.00820                                   | 0.00147                                    | 0.1351                                                  | 0.00294                                                                                     |
|               | W. M. | 0.00600                                 | 0.445                                                | 0.00751                                   | 0.00154                                    | 0.1081                                                  | 0.00292                                                                                     |
| RIVER ACE 70  | B. M. | 0.00637                                 | 0.467                                                | 0.00789                                   | 0.00164                                    | 0.1146                                                  | 0.00289                                                                                     |
| RIVER ACE K-O | B. M. | 0.00775                                 | 0.486                                                | 0.00967                                   | 0.00199                                    | 0.1208                                                  | 0.00277                                                                                     |
|               | W. M. | 0.00788                                 | 0.382                                                | 0.00967                                   | 0.00203                                    | 0.0892                                                  | 0.00275                                                                                     |
| SA533         | B. M. | 0.00572                                 | 0.502                                                | 0.00746                                   | 0.00147                                    | 0.1257                                                  | 0.00290                                                                                     |
| KLN9          | B. M. | 0.00656                                 | 0.552                                                | 0.00992                                   | 0.00169                                    | 0.1413                                                  | 0.00285                                                                                     |

B. M. : Base metal

W. M. : Weld metal



**Fig. 17** Estimated  $\epsilon-N_f$  curves of RIVER ACE 60 (Base metal)

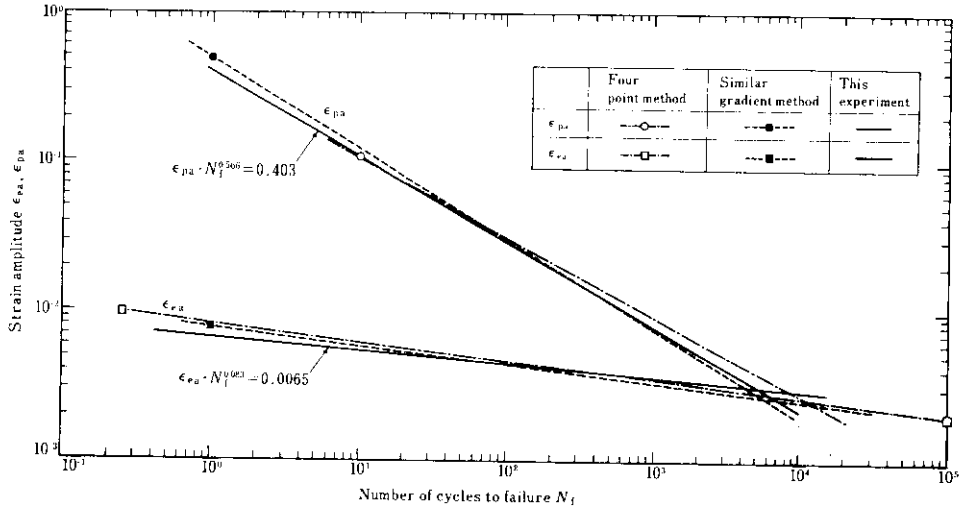


Fig. 18 Estimated  $\epsilon-N_f$  curves of RIVER ACE K-O (Base metal)

いての共通勾配法による  $\epsilon_{pa}-N_f$  推定曲線は実測値による曲線と同等か、いくぶん長寿命側に位置しているが、ほとんど差はみられない。このことは他鋼種についても同様である。同じく  $\epsilon_{sa}-N_f$  推定曲線については、実測値の曲線にくらべていくぶん短寿命側に位置しているが、高張力鋼ほどその差は僅少になっている。

#### 4.2 ひずみ繰返しによる応力の変化

ひずみ制御低サイクル疲労試験では、ひずみ振幅は一定に保持されるため、荷重（真応力）が材

料の特性ならびに加えられたひずみ振幅値によって変化する。本実験でえられた軸方向真応力の繰返し数にともなう変化を Fig. 19, Fig. 20 に示す。図から明らかのように、繰返し初期の段階で応力は漸増したのち安定するいわゆる繰返し硬化挙動を示す材料、あるいはそれとは逆に応力が漸減するいわゆる繰返し軟化挙動を示す材料に区別される。前者の挙動を示すものは 50kg/mm<sup>2</sup> 級造船用鋼（K5D, K5E）であり、調質高張力鋼や原子炉用鋼は後者の現象がみられることがわかる。この繰返し硬化あるいは繰返し軟化挙動は破

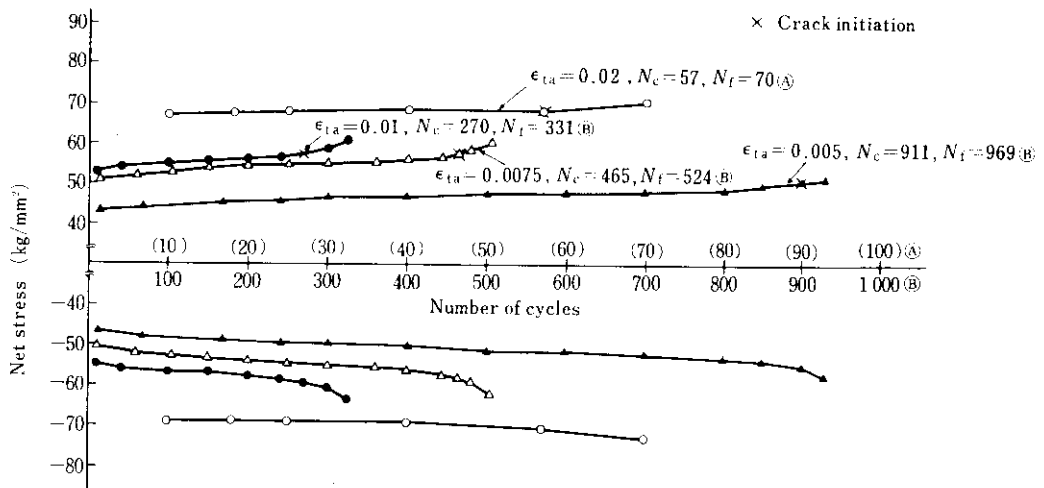


Fig. 19 Change in net stress during strain controlled low cycle fatigue for K5D (Base metal)

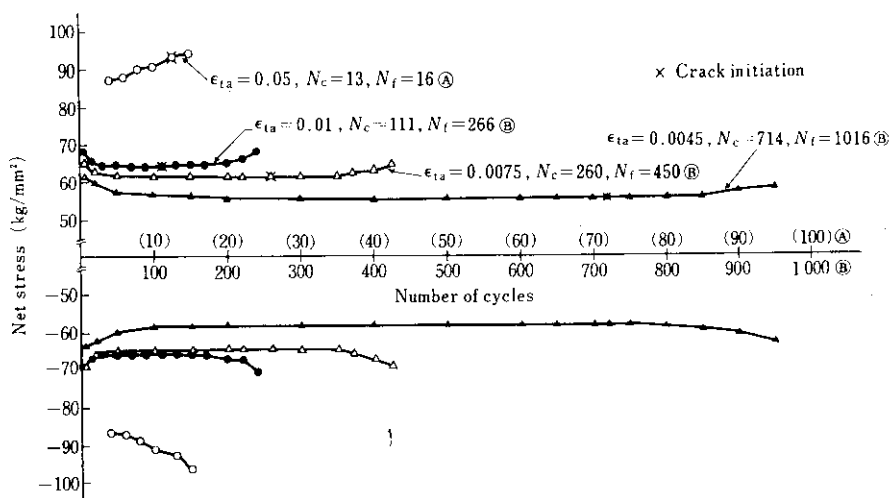


Fig. 20 Change in net stress during strain controlled low cycle fatigue for RIVER ACE 60 (Base metal)

断寿命  $N_f$  の 20~30% で終了し、その後真応力はほとんど一定値を保っている。J. C. Grosskrutz<sup>10)</sup>によれば、この繰返し挙動は加工硬化係数  $n$  と関連があり、 $n$  が 0.1 を境として大きければ繰返し硬化挙動を、小さければ繰返し軟化挙動を示すとされており、Table 3 にある各鋼材の  $n$  の値とつきあわせてみると、本実験の結果とも定性的には一致している。

Fig. 21 は繰返し初期の数サイクルのときに得られた応力  $\sigma_{R1}$  と  $N_c$  時の応力  $\sigma_{RC}$  の差  $\sigma_{R1} - \sigma_{RC}$  を  $\epsilon_{ta}$  について示したものであり、これを用いて、 $\epsilon_{ta}$  が 0.01, 0.05 および 0.1 のときの  $\sigma_{R1} - \sigma_{RC}$  を

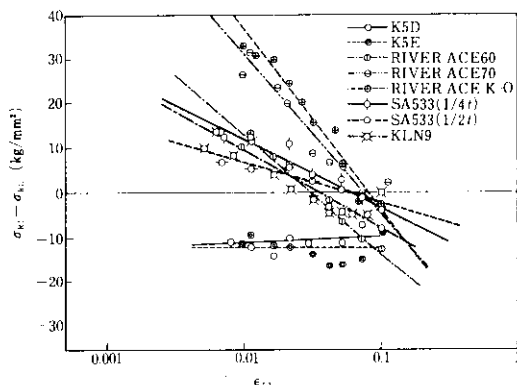


Fig. 21 Cyclic softening or hardening properties of various materials against controlled strain amplitude

各鋼材の引張強さについて図示すると Fig. 22 になる。 $\epsilon_{ta}=0.01$  についてみると、約  $60 \text{ kg/mm}^2$  をさかいにしてそれより低強度材は繰返し硬化しているが、高強度材は軟化している。また、高強度材でも  $\epsilon_{ta}$  が 0.1 程度に大きくなると硬化型へと変化している。応力変化の原因については、バウシinger 効果など繰返し変形時のすべり機構に

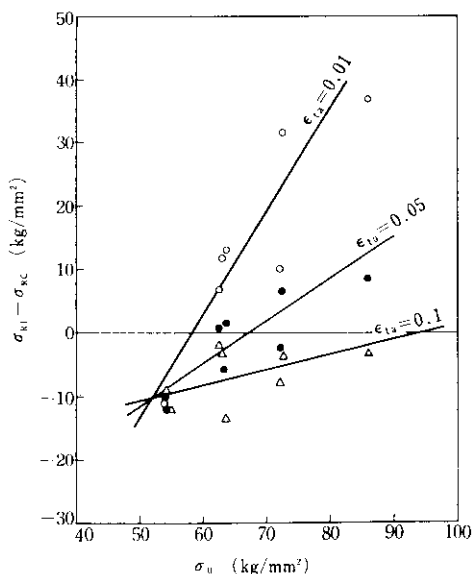


Fig. 22 Relation between cyclic softening or hardening properties and tensile strength  $\sigma_u$  during strain controlled low cycle fatigue

関連するものが考えられるが明確でない。なお、溶接継手については鋼種にかかわらず繰返し軟化挙動を示している。

#### 4.3 亀裂発生寿命と破断寿命との関係

ひずみ制御低サイクル疲労試験において、亀裂発生から破断までの繰返し回数 ( $N_f - N_0$ ) と破断寿命  $N_f$  との関係を RIVER ACE 60 と RIVER ACE K-O について図示すれば、Fig. 23 と Fig. 24 のようになり、 $N_f - N_0$  と  $N_f$  との間には次式が成り立つ。

$$N_f - N_0 = A \cdot (N_f)^B \quad (10)$$

ここで  $A$  および  $B$  は材料定数である。各種鋼材に関する本実験で求められた (10) 式の係数を Table 6 に一括して示す。指数  $B$  は本実験によればほぼ 1 に近く、亀裂伝播寿命と  $N_f$  はほぼ比例関係が成り立つといえる。また、定数  $A$  は亀裂伝

**Table 6** Material constants of equation  $N_f - N_0 = A \cdot (N_f)^B$  for various materials

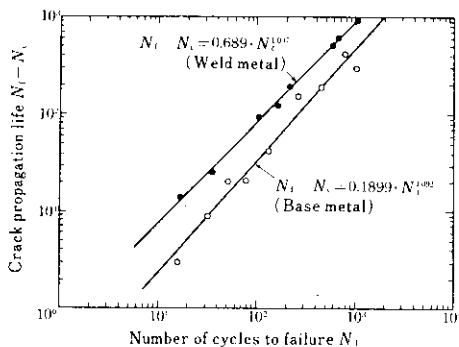
| Steel                    | Base metal |       | Weld metal |       |
|--------------------------|------------|-------|------------|-------|
|                          | $A$        | $B$   | $A$        | $B$   |
| K5D                      | 0.429      | 0.807 | 0.652      | 1.040 |
| K5E                      | 0.250      | 1.055 | —          | —     |
| RIVER ACE 60             | 0.190      | 1.092 | 0.689      | 1.037 |
| RIVER ACE 70             | 0.568      | 0.961 | —          | —     |
| RIVER ACE K-O            | 0.331      | 0.986 | 1.023      | 0.920 |
| SA533 ( $\frac{1}{4}t$ ) | 0.564      | 1.027 | —          | —     |
| SA533 ( $\frac{1}{2}t$ ) | 0.556      | 1.033 | —          | —     |
| KLN9                     | 0.136      | 0.955 | —          | —     |

播寿命率を意味するが、鋼材によってかなりのバラツキを示している。特に溶接継手の亀裂伝播に要する寿命は全寿命の 60~90% に相当しており、亀裂の発生が非常に早いことは注意を要する。

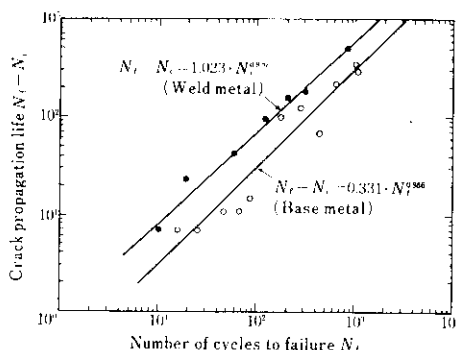
#### 4.4 ASME code Sec. III の疲労設計

##### 線図と供試材の疲労曲線

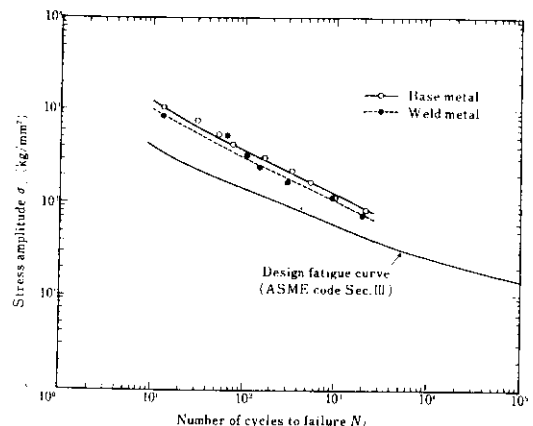
各鋼種について得られた母材および溶接継手の疲労曲線と、ASME code Sec. III ボイラーおよび圧力容器規則、疲労設計線図および低合金鋼に対する最適曲線の関係を Fig. 25~Fig. 31 に示す。図からわかるように、いずれの供試鋼とも ASME の規格に対して十分安全側に位置してお



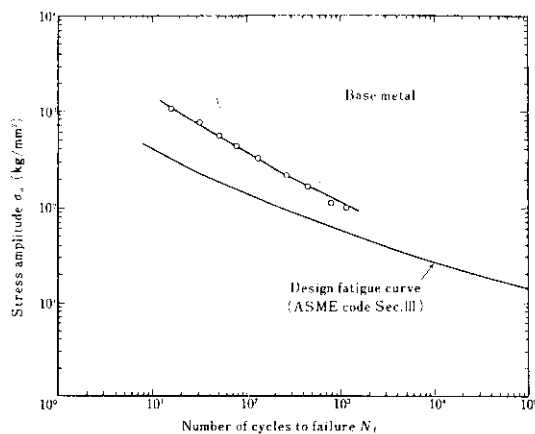
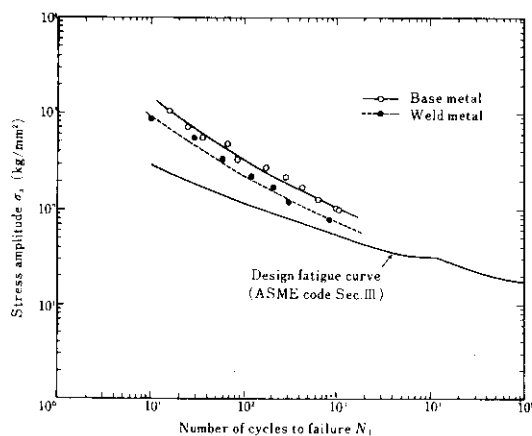
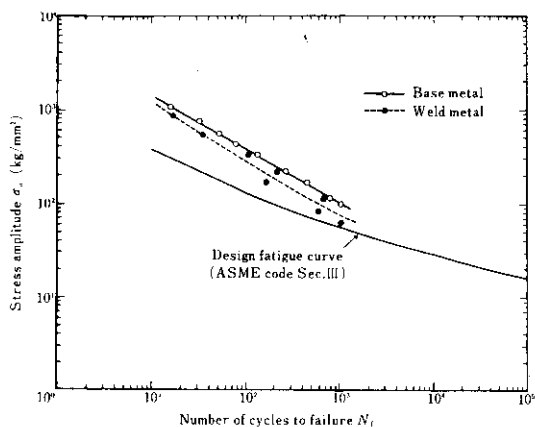
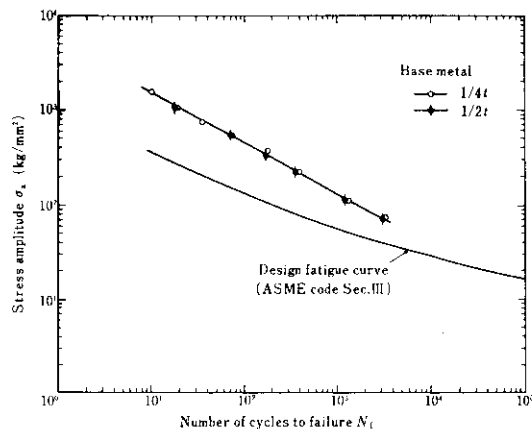
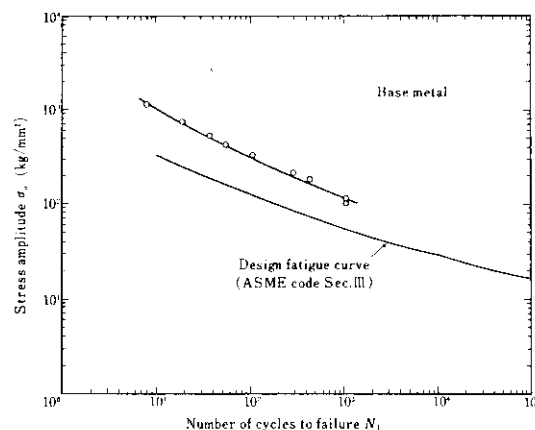
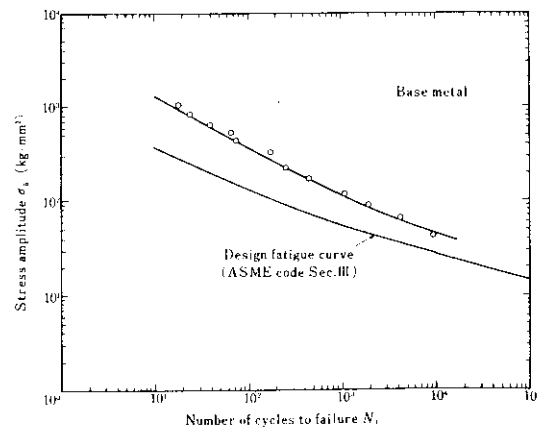
**Fig. 23** Relation between crack propagation life and number of cycles to failure for RIVER ACE 60



**Fig. 24** Relation between crack propagation life and number of cycles to failure for RIVER ACE K-O



**Fig. 25**  $\sigma_a - N_f$  curves of K5D

Fig. 26  $\sigma_a$ - $N_f$  curves of K5EFig. 29  $\sigma_a$ - $N_f$  curves of RIVER ACE K-OFig. 27  $\sigma_a$ - $N_f$  curves of RIVER ACE 60Fig. 30  $\sigma_a$ - $N_f$  curves of ASME SA533Fig. 28  $\sigma_a$ - $N_f$  curves of RIVER ACE 70Fig. 31  $\sigma_a$ - $N_f$  curves of KLN 9

り、 $N < 10^3$  回強度についてみると、母材で規格値の50~70%, 溶接継手で20~60%高いことがわかる。

#### 4.5 破面観察

ひずみ制御低サイクル疲労試験片の破断状況の例を RIVER ACE 60 と RIVER ACE K-O について **Photo. 1** に示す。疲労亀裂の発生個所はほとんど試験片の最小断面部であったが、なかにはそれ以外の個所から発生することもあった。それらの亀裂は円周方向に数個所発生し、互に進展し、合体して破断にいたった。しかし、かならずしも最初に発生した亀裂が進展し、破断するとは限らず停留することも多い。引張強さが高い RIVER ACE K-O 母材では、ひずみ振幅のごく大きいものについては試験片全周に数多く発生した亀裂が少しずつ進展し、円周切欠状になったのち脆性的破断をしたと考えられるものも見られた。溶接継手の亀裂は X 線検査では検知しえないような微小な溶接欠陥から発生しているものもあり、疲労を考慮した構造物の溶接施工は十分に注意する必要がある。

また、走査型電子顕微鏡による破面観察の例を **Photo. 2** に示す。これらは低サイクル疲労破面

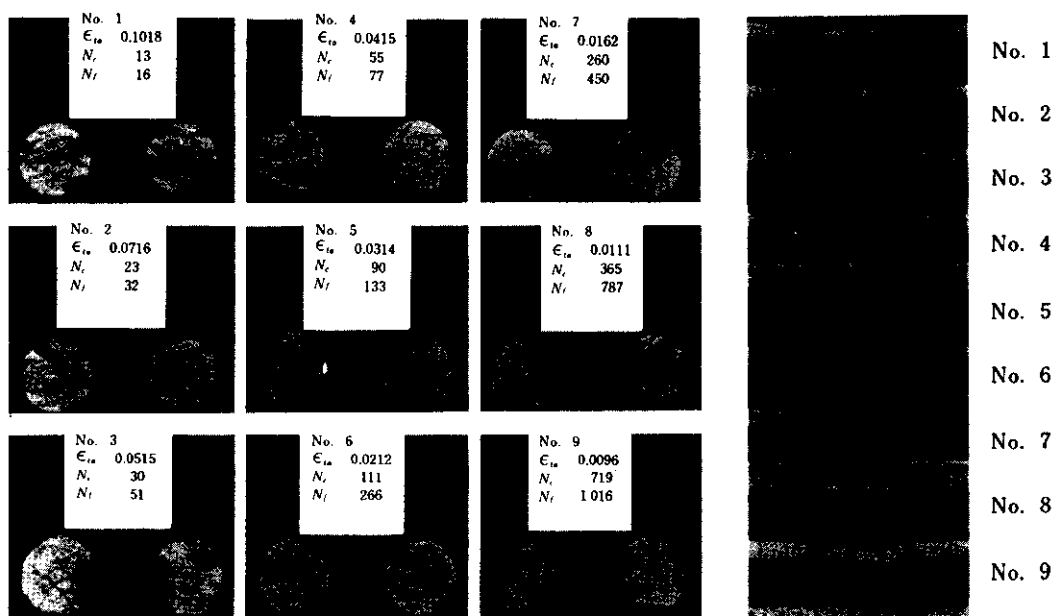
特有のパターンであり、特にタイヤトラック模様はひずみ振幅  $\epsilon_{1a}$  が 0.02 以下の長寿命であった破面についてみられる。また、これよりひずみ振幅の大きく短寿命のものでは静的引張破面に近いディンプル模様がみられている。

#### 5. 総 括

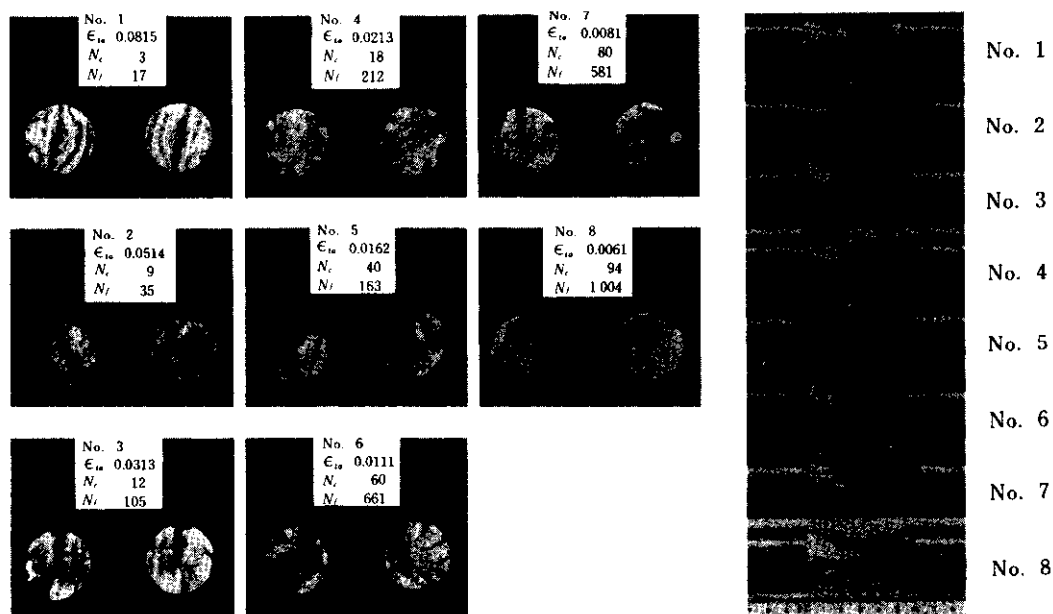
50kg/mm<sup>2</sup> 級造船用鋼から 80kg/mm<sup>2</sup> 調質高張力鋼にいたる 7 種の鋼材の母材および溶接継手について、静的引張試験および径方向ひずみ制御低サイクル疲労試験を行い次の結論をえた。

(1) ひずみ制御低サイクル疲労試験において、真ひずみ振幅  $\epsilon$  と亀裂発生回数  $N_e$  および破断寿命  $N_f$  との間には、Manson-Coffin の関係  $\epsilon \cdot N^{\frac{1}{2}} = C$  が成り立ち、各鋼材について弾性および塑性ひずみ振幅についての指数および係数を求めた。また、溶接継手の低サイクル疲労強度、とくに  $N_e$  基準の場合は非常に微小な溶接欠陥によって大きな影響をうける。

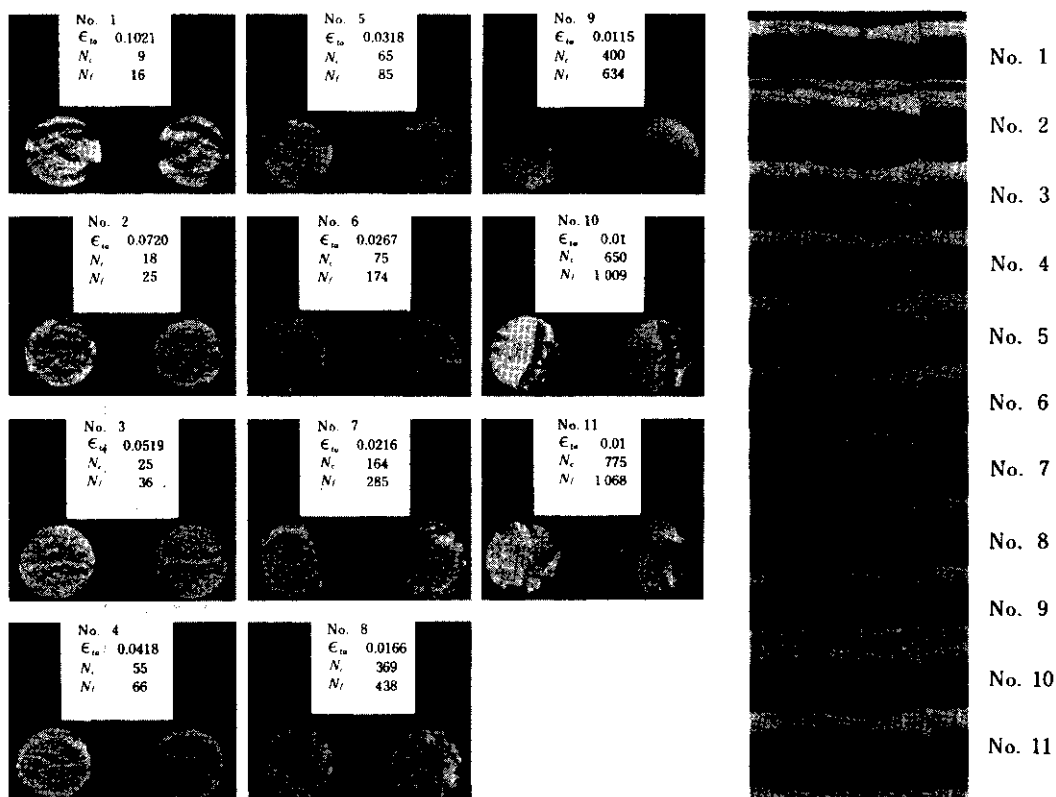
(2) 静的引張諸特性と低サイクル疲労特性との関係を検討し、それらをもとにして、従来から提唱されている各種鋼材の低サイクル疲労曲線の推定法の妥当性を確認した。



(a) RIVER ACE 60 (Base metal)



(b) RIVER ACE 60 (Weld metal)



(c) RIVER ACE K-O (Base metal)

Photo. 1 Low cycle fatigue fractured specimens

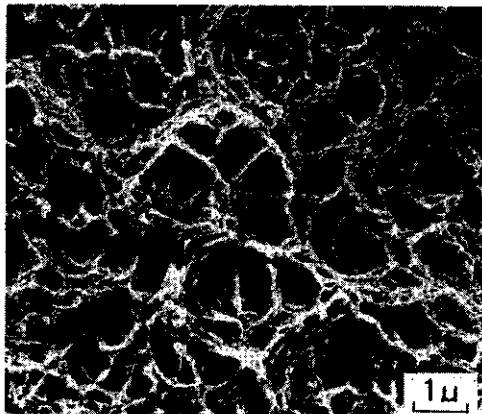
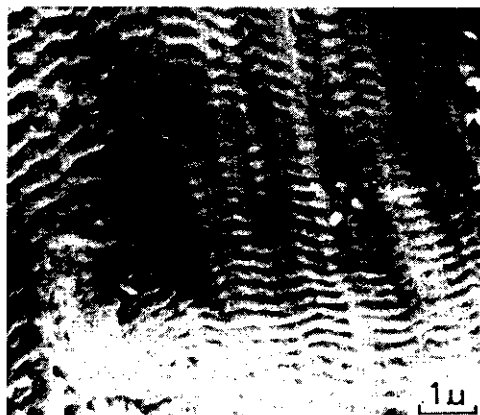
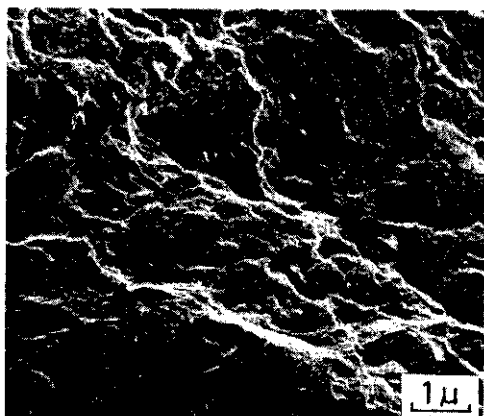
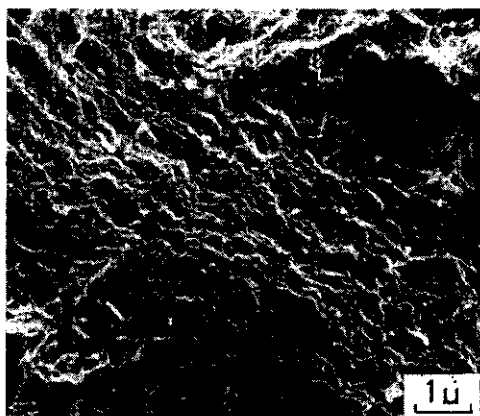
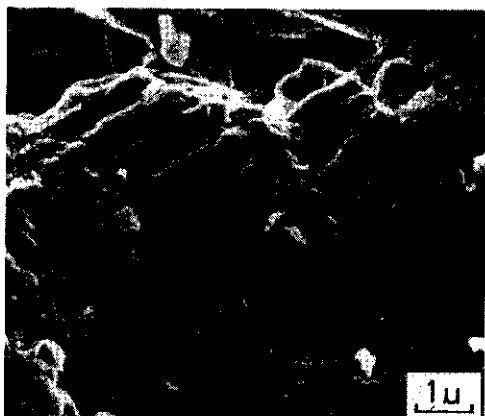
Dimple pattern (RIVER ACE K O,  $\epsilon_{th}=0.032$ )Tire-track pattern (RIVER ACE 70,  $\epsilon_{th}=0.011$ )Rub mark (RIVER ACE 60,  $\epsilon_{th}=0.03$ )Ripple pattern (K5D,  $\epsilon_{th}=0.04$ )Spine pattern (K5D,  $\epsilon_{th}=0.011$ )Flat fracture (K5D,  $\epsilon_{th}=0.011$ )

Photo. 2 Examples of low cycle fatigue fractographs

(3) ひずみ制御低サイクル疲労試験においては、公称引張強さの大きい鋼材は繰返し軟化挙動を、また小さい鋼材は繰返し硬化挙動を示す。

(4) 亀裂伝播寿命 ( $N_f - N_c$ ) と破断寿命 ( $N_f$ ) との間には  $N_f - N_c = A \cdot (N_f)^B$  の関係が成り立

ち、 $B$  はおよそ 1 であるが、 $A$  は鋼材によりきまる定数である。

(5) 供試材 7 種の母材および溶接継手の疲労曲線は、ASME code Sec. III ボイラーおよび圧力容器規則に対していずれも十分安全側にある。

#### 参 考 文 献

- 1) 飯田：溶接学会誌, **37** (1968) 6, 542
- 2) 堀田, 村木, 石黒, 石井, 関口：日本造船学会論文集, (1968) 124, 341
- 3) 日本造船研究協会：RR 811 委員会共同研究資料 RR 811-F-3 (1974)
- 4) S. S. Manson : Thermal Stress and Low Cycle Fatigue, (1966), [McGraw Hill]
- 5) S. S. Manson : NASA TMX-52189, (1966)
- 6) L. F. Coffin and J. F. Tavernell : Trans. ASM, **51** (1959), 438
- 7) D. E. Martin : Trans. ASME, Ser. D., (1921) April, 565
- 8) 安藤, 飯田, 塚田, 福田：日本機械学会講演論文集, (1968) 188, 137
- 9) S. S. Manson : Experimental Mech., (1965), July
- 10) J. C. Grosskreutz : Met. Trans., **3** (1972), 1255