

京大院 ○岩崎克弘, 京大工 星出敏彦  
三菱電機 藤村 哲, 新居浜高专 山田敏郎

## 1 緒言

筆者らは従来平滑材の一定ひずみ振幅試験を実施し、表面微小き裂の発生・伝ば解析を行ってきたが、実用構造物ではひずみ振幅が変動する場合が多く、変動ひずみ振幅条件下での疲労挙動を解明する必要がある。本研究では、変動下でも適用しうる寿命則確立のための第1段階として、2段多重変動ひずみ試験を実施し、別に行った一定ひずみ試験の結果を応用することによりき裂の発生寿命及び伝ば寿命の検討を行った。

## 2 実験方法

供試材はJIS S35C鋼で、直径6mm長さ10mmの平行部を持つ丸棒平滑材に加工し、真空中865℃で30分保持後空冷の熱処理を施した。平均結晶粒径は9.7 $\mu\text{m}$ であった。疲労試験は変位制御による2段多重プログラム試験とした。小頻度の大変位を1次波として、大頻度の小変位を2次波として用いた。1次波は常に完全両振りとしたが、2次波については完全両振りの場合及び1次波と最大ひずみを一致させた場合を実施した。また、1ブロック中の1次波及び2次波の繰返し数をそれぞれ $n_1$ ・ $n_2$ とし、その組み合わせとして20回と140回の場合と、1回と7回の場合を実施した。

## 3 実験結果

### 3.1 塑性ひずみ範囲の変化

ヒステリシスループの形状に関して諸量を定義するために、図1に模式図を示す。1次波及び2次波の塑性ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_1^p$ ・ $\Delta\epsilon_2^p$ の変化については、2次波の場合全寿命範囲に渡ってほとんど変化せず一定ひずみ振幅試験の場合と一致しているのに対し、1次波では $n_1/n_2=20/140$ の場合は2次波と同様に全寿命範囲に渡って変化が小さいが、 $n_1/n_2=1/7$ の場合には寿命初期に高い値を示し、繰返し数と共に減少し破断寿命の40%程度で飽和した後定常状態となる。以下の解析では塑性ひずみ範囲値として、破断寿命の約50%でほぼ一定となった時の値を用いる。

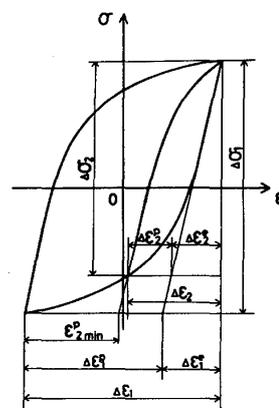


図1 ヒステリシスループの模式図

### 3.2 ひずみ振幅変動の寿命に及ぼす効果

一定ひずみ振幅試験においては、塑性ひずみ範囲 $\Delta\epsilon^p$ と破断寿命 $N_f$ 、き裂全長が約30 $\mu\text{m}$ になった時点で定義したき裂発生寿命 $N_i$ 、及びき裂伝ば寿命 $N_f - N_i$ の間には、次に示すManson-Coffin則が成立する。

$$(\Delta\epsilon^p)^\alpha N_f = C \quad (1)$$

$$(\Delta\epsilon^p)^{\alpha_i} N_i = C_i \quad (2)$$

$$(\Delta\epsilon^p)^{\alpha_f} (N_f - N_i) = C_f \quad (3)$$

ここで  $\alpha = 1.61 \cdot \alpha_i = 1.62 \cdot \alpha_p = 1.59$  である。疲労破壊が線型累積損傷則により規定されると考えると、塑性ひずみ範囲を支配因子とする(1)式は又段変動ひずみ振幅下においては次のように拡張できる。

$$\{n_1(\Delta\epsilon_1^P)^\alpha + n_2(\Delta\epsilon_2^P)^\alpha\} Z_f = C \quad (4)$$

なお、 $Z_f$  は破断アロック数である。ここで(5)式で等価ひずみ範囲  $\Delta\epsilon_{eq}^P$  を定義すると(4)式は(6)式のように書ける。

$$(\Delta\epsilon_{eq}^P)^\alpha = n_1(\Delta\epsilon_1^P)^\alpha + n_2(\Delta\epsilon_2^P)^\alpha \quad (5)$$

$$(\Delta\epsilon_{eq}^P)^\alpha Z_f = C \quad (6)$$

(6)式は変動ひずみ振幅試験下の  $\Delta\epsilon_{eq}^P$  を支配因子とする Manson-Coffin 則に基づいた線型累積損傷則を表わす。(6)式で表わされる寿命則と実験結果との比較を図2に示す。 $n_1/n_2 = 1/7$  の結果は、 $n_1/n_2 = 20/140$  の結果に比べて推定値より大きく低寿命側にはずれている。以下では、その傾向について発生過程と伝ば過程とを分けて検討する。

まずき裂全長が約  $30\mu\text{m}$  になった時点で定義したき裂発生ブロック数  $Z_i$  と、(5)式において  $\alpha$  を(2)式で用いた  $\alpha_i$  で定義し直した  $\Delta\epsilon_{eq}^P$  との関係を図3に示す。 $n_1/n_2 = 20/140$  の結果に関しては線型累積損傷則による予測式  $[(\Delta\epsilon_{eq}^P)^{\alpha_i} Z_i = C_i]$  は比較的实验結果とよく一致しているが、 $n_1/n_2 = 1/7$  の場合は实验結果は推定値より大きく低寿命側にはずれている。

次にき裂伝ばブロック数  $Z_f - Z_i$  と(5)式において  $\alpha$  を(3)式で用いた  $\alpha_p$  で定義し直した  $\Delta\epsilon_{eq}^P$  との関係を図4に示す。この場合も実験結果は伝ば寿命に対する予測式  $[(\Delta\epsilon_{eq}^P)^{\alpha_p} (Z_f - Z_i) = C_p]$  と大体一致しており、線型累積損傷則がほぼ成立する。したがって、 $n_1/n_2 = 1/7$  の場合の破断寿命に対する予測値からの逸脱は、主としてき裂発生過程の短縮に起因すると考えられる。

## 4 考察

### 4.1 き裂発生寿命の評価

$n_1/n_2 = 1/7$  のき裂発生寿命が低寿命側へはずれた原因について検討する。第1に前述のように寿命初期において1次波の  $\Delta\epsilon_1^P$  が定常状態となった時の  $\Delta\epsilon_1^P$  より高い値を示していること、第2に1次波から2次波へ変化する際のひずみ履歴の影響が考えられる。そこでまず第1の点を考慮して、 $\Delta\epsilon_{eq}^P$  を計算する際に  $\Delta\epsilon_1^P$  の代わりに寿命初期における  $(\Delta\epsilon_1^P)_{max}$  と  $\Delta\epsilon_1^P$  との平均値  $\overline{\Delta\epsilon_1^P}$  を用いる。さらに第2の点に関しては、図1に示す、2次波の平均ひずみと対応すると考えられる  $\epsilon_{2min}^P$  を求め、1次波から2次波への切り換え時の塑性ひ

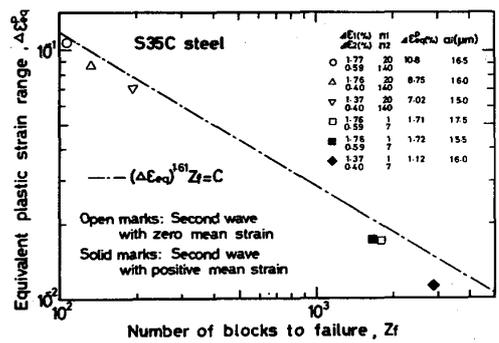


図2  $\Delta\epsilon_{eq}^P$  と  $Z_f$  の関係

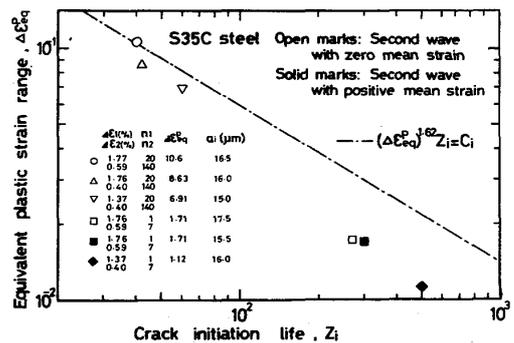


図3  $\Delta\epsilon_{eq}^P$  と  $Z_i$  の関係

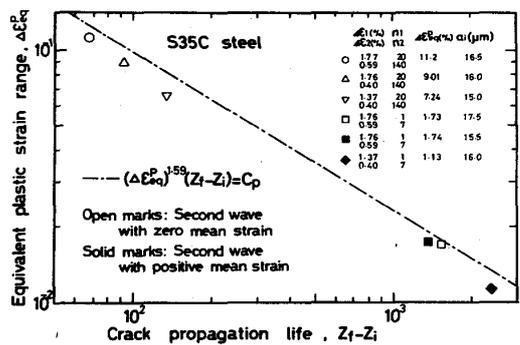


図4  $\Delta\epsilon_{eq}^P$  と  $Z_f - Z_i$  の関係

ずみの変化として  $(\epsilon_{2min}^P + \Delta\epsilon_2^P)$  を採用した。以上の2点を考慮した場合の最終的な  $\Delta\epsilon_{eq}^P$  は次式で与えられる。

$$(\Delta\epsilon_{eq}^P)^{\alpha_i} = n_1(\Delta\epsilon_1^P)^{\alpha_i} + (\epsilon_{2min}^P + \Delta\epsilon_2^P)^{\alpha_i} + (n_2 - 1)(\Delta\epsilon_2^P)^{\alpha_i} \quad (7)$$

(7)式を用いて評価した  $\Delta\epsilon_{eq}^P$  で実験結果を整理し直したものを図5に示す。この場合、 $n_1/n_2 = 1/7$  についても推定値と実験結果はよく一致している。ただし、 $n_1/n_2 = 1/7$  で2次波の平均ひずみが0の場合は推定値とややはずれているが、これはき裂がけがき線より発生したためにき裂発生寿命が短くなったものである。結局又段多重プログラムによる変位制御試験において、寿命初期の塑性ひずみの変化及び1次波から2次波への切り換わりの際に生ずるひずみを考慮すれば、Manson-Coffin則によるき裂発生寿命の推定が可能になるものと思われるが、今後推定値から逸脱している条件下での再実験も含めて、他の負荷パターンによる実験を追加し検討する必要がある。

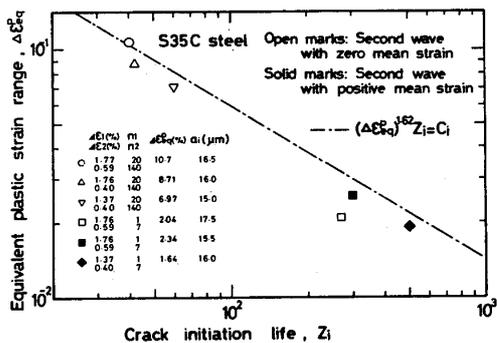


図5  $\Delta\epsilon_{eq}^P$  と  $Z_i$  の関係

#### 4.2 き裂伝ば寿命の評価

き裂伝ば寿命については、 $\Delta\epsilon^P$  を支配因子とする線型累積損傷則による推定値は実験結果とほぼ一致しているが、実験値は若干低寿命側にあり危険側の予測となっている。本節ではき裂伝ばの観点から、一定ひずみ振幅試験でその有用性が明らかとなったエネルギー密度  $\Delta\tilde{W} = \Delta W^e + f(n')\Delta W^p$  ( $f(n') = (n'+1)\{3.85(1-n')/\sqrt{n'} + \pi n'\}$ ) を適用した定量的評価を試みる。まず一定ひずみ振幅下においては、貫通き裂伝ば速度式  $da/dN = C_J(\Delta J)^{m_J}$  が与えられた場合次の伝ば寿命式が成り立つ。

$$(\Delta\tilde{W})^{m_J} (N_f - N_i) = C_w \quad (8)$$

$$C_w = (a_i^{1-m_J} - a_f^{1-m_J}) / C_J (m_J - 1) (2\pi M_J)^{1-m_J}$$

$N_i \cdot N_f$  は、き裂半長がそれぞれ  $a_i \cdot a_f$  となった時の繰り返し数である。なお上式は、き裂形状の変化が少なく  $M_J$  がほぼ一定となることを仮定している。(8)式は又段変動ひずみ振幅下において次のように変形される。

$$\{n_1(\Delta\tilde{W}_1)^{m_J} + n_2(\Delta\tilde{W}_2)^{m_J}\} (Z_f - Z_i) = C_w \quad (9)$$

なお、 $\Delta\tilde{W}_1 \cdot \Delta\tilde{W}_2$  はそれぞれ1次波・2次波におけるエネルギー密度、 $Z_i \cdot Z_f$  はき裂半長が各々  $a_i \cdot a_f$  となった時のブロック数である。ここで(5)式と同様にして、等価エネルギー密度  $\Delta\tilde{W}_{eq}$  を(10)式により定義すると(9)式は(11)式のように書ける。

$$(\Delta\tilde{W}_{eq})^{m_J} = n_1(\Delta\tilde{W}_1)^{m_J} + n_2(\Delta\tilde{W}_2)^{m_J} \quad (10)$$

$$(\Delta\tilde{W}_{eq})^{m_J} (Z_f - Z_i) = C_w \quad (11)$$

これは、 $\Delta\tilde{W}_{eq}$  を支配因子とするき裂伝ば寿命則である。図6に(11)式による予測値と実験結果とを比較する。実験値は予測値とよく一致しており、変動ひずみ振幅条件下においても  $\Delta\tilde{W}$  が有効なパラメータであることが確認された。

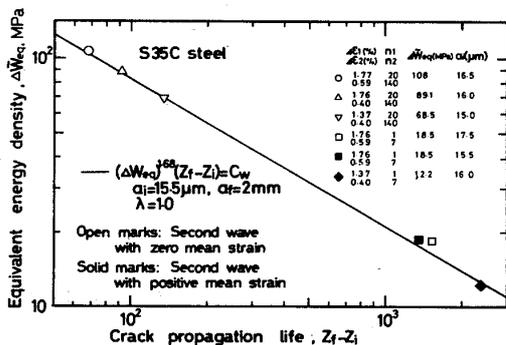


図6  $\Delta\tilde{W}_{eq}$  と  $Z_f - Z_i$  の関係