SUS304 鋼の二段二重ひずみ振幅下低サイクル疲労*

(ひずみ履歴依存形き裂伝ば則の導出と累積損傷評価)

福島良博^{*1}, 原田昭治^{*1}
秋庭義明^{*2}, 澤田弘^{*3}

Low-Cycle Fatigue of SUS304 Stainless Steel under Two-Step Loading

(Derivation of Prefatigue Damage Affected Small Crack Growth Law and Its Application to Understanding Miner's Rule)

Yoshihiro FUKUSHIMA, Shoji HARADA,
Yoshiaki AKINIWA and Hiroshi SAWADA

A small crack growth law oriented approach was applied to explain the cumulative fatigue damage in a SUS 304 stainless steel which shows cyclic hardening behavior and the effect of prior fatigue damage on the subsequent crack growth rate in the case of two step strain amplitude. After switching of strain, the stress amplitude and crack growth rate increased or decreased depending on the combination of the first and second strain amplitudes. These changes were interpreted as being induced by the effect of the prefatigue damage or strain history. A modified small crack growth law, compensating the discrepancy between the crack growth rates for constant and two step strain amplitude, was proposed. Finally the modified crack growth law was found suitable for understanding the Miner rule in the case of materials which exhibit hardening behavior.

Key Words: Low Cycle Fatigue, Two Step Strain Amplitude, Microcrack Growth Law, Prefatigue Damage, the Miner Rule, Cyclic Hardening

1. 緒 言

繰返し応力が降伏点を超える低サイクル疲労において、疲労寿命が寿命のごく初期に試料表面に発生する微小なき裂の伝ば寿命で占められることが知られており、微小き裂伝ば特性を明らかにすることは疲労寿命を予測評価する上で重要である。このような観点からこれまで微小き裂伝ばに関する研究が盛んに行われている^{(1)~(9)}。

著者らはこれまでに低サイクル疲労寿命をき裂伝ばの立場から評価することを目的として一連の研究を行っている^{(6)~(9)}。特に、繰返しに対して安定な材料である S 45 C 鋼について以下の知見を得た⁽⁶⁾⁽⁷⁾。(1)き裂伝ば速度がき裂長さの一次に比例するき裂伝ば則が成立する、(2)き裂伝ば則と Manson Coffin 則は等価である、(3)Miner 則の成立条件としてき裂伝ばに履歴の影響がないことなどを明らかにした。さらに、繰返し軟化および硬化挙動を示す WT 80, SCM 435 および SUS 304 鋼についても検討を行っている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。上

述の S 45 C 鋼の結果から、き裂伝ばにひずみ繰返しの履歴の影響が現れることが予想されたが、いずれの材料の場合にも大略履歴の影響は認められなかった。ただし、全寿命域で硬化挙動を示した SUS 304 鋼を用いた二段二重ひずみ振幅下の場合、き裂伝ば速度がマルテンサイト組織によって加・減速され、疲労被害の累積損傷 $\sum (N_i/N_f)$ も 0.8~1.5 と大きくばらついた。

本研究ではこの累積損傷がばらつく原因について詳しく検討する。そこで、一段めおよび二段めのひずみ振幅の組合せを種々変化させた場合の、ひずみ切換え前後のき裂伝ば速度の変動と応力振幅 $\Delta\sigma$ の変化の関係を注目して詳細な検討を行った。そして、ひずみ履歴の影響が現れない材料に対して導かれた微小き裂伝ば則を、履歴の影響が現れる材料に拡張して適用することを試みた。さらに、それを基に寿命予測を行い、二段二重ひずみ振幅下における Miner 則にばらつきが現れた原因を微小き裂伝ばの立場から検討した。

2. 供試材および実験方法

実験要領は前報⁽⁹⁾と同様であるのでここでは簡潔に述べる。供試材はオーステナイト系ステンレス鋼 SUS 304 圧延鋼材(素材寸法: 860×250, 板厚 40 mm,

* 原稿受付 1995 年 12 月 13 日。

^{*1} 正員, 九州工業大学工学部 (〒804 北九州市戸畑区仙水町 1-1)。

^{*2} 正員, 名古屋大学工学部 (〒464-01 名古屋市千種区不老町)。

^{*3} 日本鋼管(株) (〒721 福山市鋼管町 1)。

1100℃溶体化熱処理、平均オーステナイト粒径は28 μm程度)である。試験片は、まず、素材の圧延方向と試験片の荷重軸を一致させて切り出し、最小断面部直径8 mmの砂時計形の試験片に機械加工した。さらに表面観察のため試験片最小断面部の表面をアルミナを用いて鏡面に仕上げ、疲労試験に供した。

疲労試験は電気油圧式サーボ疲労試験機(容量:49 kN)を用い、全ひずみ制御の一定および二段二重ひずみ振幅下試験を引張圧縮完全両振下、繰返し速度0.1~0.3 Hzで実施した。繰返し塑性ひずみ振幅 $\Delta\epsilon_p$ を2.2, 1.75, 0.8%の高, 中, 低(以下, それぞれH, M, Lと呼ぶ)3レベルに選び、二段二重ひずみ振幅下疲労試験は一段め, 二段めのひずみ振幅の組合せをH→L, M→L, L→M, L→Hの4種類に変えて行った。表面のき裂観察は所定の繰返し数ごとに試験機を停止し、レプリカ法を用いて行った。なお、き裂長さは試験荷重軸直角方向に投影した長さを用いた。

3. 実験結果

3.1 一定ひずみ振幅 図1に一定ひずみ振幅下疲労試験の破断寿命線図を示す。図中の破線は平均結晶粒径(28 μm)程度の長さのき裂の発生寿命を示す。既報のS45C鋼の場合、き裂発生寿命 N_0 はき裂が結晶粒程度の寸法に成長するまでの伝ば寿命を無視して $N_0=0$ として取り扱った。しかし、本報では疲労寿命を微小き裂伝ばの立場からより精度よく評価するため、疲労寿命をき裂の発生および伝ば過程に分けて検討する。すなわち、き裂発生寿命 N_0 を結晶粒程度の寸法($l_0=28\mu\text{m}$)のき裂が観察されるまでの繰返し数とし、き裂伝ば曲線を内挿して求めた。破断寿命 N_f およびき裂発生寿命はそれぞれ次式で示され、Manson Coffin 形の疲労寿命則が成立した。

$$\Delta\epsilon_p^{2.35} \cdot N_f = 0.036 \quad \cdots \cdots (1)$$

Fig.1 The manson coffin plots for microcrack initiation and final failure

$$\Delta\epsilon_p^{1.20} \cdot N_0 = 0.605 \quad \cdots \cdots (2)$$

一方、前報⁽⁶⁾の結果より、き裂伝ば則は次式で表される。

$$dl/dN = 333 \Delta\epsilon_p^{2.51} \cdot l \quad \cdots \cdots (3)$$

また、上式を積分すると式(1)と同形の次式で示されるような寿命予測式が得られる。

$$\Delta\epsilon_p^{2.51} \cdot N_f = 0.017 \quad \cdots \cdots (4)$$

3.2 二段二重ひずみ振幅

3.2.1 応力振幅の変化 前報の二段二重ひずみ振幅下疲労試験では、ひずみの組合せによって累積損傷が異なる傾向が現れ、また大きくばらついた。その原因としてひずみの繰返しによって生じた加工誘起マルテンサイト変態がき裂伝ば速度の加速に関係していることを示した。ここではそのような金属組織因子とともに関連要因の一つと考えられる力学因子に注目して検討する。図2(a), (b)にそれぞれひずみ振幅の組合せL→MおよびH→Lの二段二重ひずみ振幅下疲労試験における応力振幅の変化 $\Delta\sigma$ を累積損傷 $\Sigma(N_i/N_f)$ に対して示す。図中の実線は一定ひずみ振幅下の応力振幅 $\Delta\sigma_c$ の変化を示し、ひずみの切換え時期

(a) L → M

(b) H → L

Fig.2 Change of stress range $\Delta\sigma$ after switching of strain level

は、 $L \rightarrow M$ および $H \rightarrow L$ でそれぞれ $N_1/N_2=0.68$ および $N_1/N_2=0.56$ (N_1 は一段めのひずみ振幅に対する破断寿命)である、図2より明らかなように、ひずみレベルの組合せによってひずみ切換え後の応力振幅の変化の傾向が異なる、すなわち、図2(a)に見られるように $L \rightarrow M$ 切換えでは切換え後 $\Delta\sigma$ は $\Delta\sigma_c$ に比べ小さくなっているのに対し、図2(b)に示すように $H \rightarrow L$ 切換えでは逆に $\Delta\sigma_c$ より大きくなっている、これまでに行った S 45 C, WT 80 および SCM 435 H 鋼では、 $\Delta\sigma$ はひずみ切換え後ただちに一定ひずみ振幅下 $\Delta\sigma_c$ の値に落着き、このような $\Delta\sigma$ の変化挙動は観察されなかった。

次に、ひずみ切換え後の応力振幅の変化をき裂長さ l に注目して調べた、図3(a), (b)はそれぞれ図2(a), (b)に対応するひずみ振幅の組合せに対して、 $\Delta\sigma$ と $\Delta\sigma_c$ の比(応力振幅の増加率)を同じき裂長さ l に対して比較したものを示す、図3(a) ($L \rightarrow M$) のひずみ切換え時のき裂長さは $411 \mu\text{m}$ で、切換え後 $\Delta\sigma < \Delta\sigma_c$ となっており、また $\Delta\sigma/\Delta\sigma_c$ は切換え直後を除くと l によらずほぼ一定で、 $\Delta\sigma/\Delta\sigma_c=0.873$ である、一方、図3(b)に示す $H \rightarrow L$ 切換えでは切換え時のき

裂長さは $102 \mu\text{m}$ で、また切換え後 $\Delta\sigma > \Delta\sigma_c$ と図3(a)と反対傾向で、 $\Delta\sigma/\Delta\sigma_c$ は切換え直後を除き 1.22 である。

さらに、ひずみ切換え後の応力振幅比 $\Delta\sigma/\Delta\sigma_c$ の変化に及ぼすひずみ振幅組合せの影響について調べた、図4に $\Delta\sigma/\Delta\sigma_c$ と一段めのひずみ振幅 $\Delta\epsilon_{p1}$ と二段めのひずみ振幅 $\Delta\epsilon_{p2}$ の比 $K=\Delta\epsilon_{p1}/\Delta\epsilon_{p2}$ の関係を両対数線図上に表示したものを示す、ただし、 $\Delta\sigma/\Delta\sigma_c$ は上述のように切換え直後を除いた切換え後の平均値である、図4より、 K と $\Delta\sigma/\Delta\sigma_c$ の間には両対数線図上で直線関係が認められ、次式が成立する、

$$\Delta\sigma/\Delta\sigma_c = K^x \quad \text{..... (5)}$$

ここで、 x は材料定数で、本研究の場合 $x=0.168$ である、上式から明らかなように、ひずみ振幅の切換えによる応力振幅の変化挙動はひずみ振幅比 K によって表せる。

3・2・2 き裂伝ば速度 次に、ひずみ切換え後のき裂伝ば速度の変動と上述のような力学因子の変化の関係について検討した、図5(a), (b)にそれぞれ $L \rightarrow M$ および $H \rightarrow L$ ひずみ切換え後のき裂伝ば速度 $(dl/dN)_2$ と一定ひずみ振幅下の伝ば速度 $(dl/dN)_{c2}$ の比(き裂伝ば速度の加速率または減速率)を同じき裂長さ l に対して表示したものを示す、図5(a)に示す $L \rightarrow M$ 条件では、加速率は1より小さく、その値は切換え直後を除き 0.41 程度で減速している、一方、図5(b)に示す $H \rightarrow L$ 条件では、加速率の値は約 2.52 程度となっており、き裂伝ばは加速している、さらに、このき裂伝ば速度の加速率と応力振幅の関係について調べた、両者の関係を図4の場合と同様、4種類のひずみの組合せに対して表示したものを図6に示す、図6より、 $(dl/dN)_2/(dl/dN)_{c2}$ と $\Delta\sigma/\Delta\sigma_c$ は両対数線図上

Fig. 3 Change of stress range $\Delta\sigma/\Delta\sigma_c$ plotted against crack length l after switching of strain level

Fig. 4 Relationship between $\Delta\sigma/\Delta\sigma_c$ and $K (= \Delta\epsilon_{p1}/\Delta\epsilon_{p2})$

で直線関係を示し、次式が成立する。

$$(dl/dN)_2/(dl/dN)_{c2} = (\Delta\sigma/\Delta\sigma_c)^y \quad (6)$$

ここで、 $y=5.21$ となる。すなわち、ひずみ振幅切換え後のき裂伝ば速度の加速率は応力振幅の増加率の関数

(a) L → M

(b) H → L

Fig. 5 Relationship between the acceleration ratio of crack growth rate $(dl/dN)_2/(dl/dN)_c$ and crack length l after switching of strain level

Fig. 6 Relationship between the crack growth rate $(dl/dN)_2/(dl/dN)_c$ and stress range $\Delta\sigma_2/\Delta\sigma_c$ after switching of strain level

として表される。さらに上式に式(5)の関係を代入すると、次式が得られる。

$$(dl/dN)_2/(dl/dN)_{c2} = K^s \quad (7)$$

ここで、 s は材料定数を表し、 $s = x \cdot y = 0.875$ である。

以上の議論から明らかなように、ひずみ切換え後のき裂伝ば速度の加速率は一段めと二段めのひずみ振幅比 $K (= \Delta\epsilon_{p1}/\Delta\epsilon_{p2})$ のみの関数として表すことができる。なお、式(7)の誘導に際しては、応力振幅の増加率を考慮して導いたが、き裂伝ば速度の加速率とひずみ振幅比 K の関係を直接求めると、図7に示す結果となる。図7より両対数線図上で直線関係が成立し、式(7)と同じ形の関係式が成立しているのがわかる。そ

Fig. 7 $(dl/dN)_2/(dl/dN)_c$ versus plastic strain ratio $K (= \Delta\epsilon_{p1}/\Delta\epsilon_{p2})$

Fig. 8 The modified crack growth rate $(dl/dN)_2/\Delta\epsilon_{p2}^s \cdot K^s$ versus l derived using eq. (8)

の際、直線の傾きは $s=0.86$ で、式(7)で求めた値 ($x \cdot y=0.875$) とほぼ等しくなっている。そこで、以下のデータ整理にはこの $s=0.86$ を用いる。

さて、式(3)で表される一定ひずみ振幅下のき裂伝ば則と式(7)を用いると、ひずみ切換え後のき裂伝ば則として次式が得られる。

$$(dl/dN)_2 = C \cdot \Delta \varepsilon_{p2}^s \cdot l \cdot K^s \quad \dots\dots\dots (8)$$

すなわち、切換え後の伝ば速度は一定ひずみ振幅下のき裂伝ば速度を基に、ひずみ切換えに伴うひずみ履歴の影響による加・減速を誘起する力学因子を考慮することによって導ける。式(8)を用いてひずみ切換え後のき裂伝ば速度を整理した結果を図8に示す。図中に一定ひずみ振幅下での伝ば速度を実線で示す。各ひずみ組合せの場合、ひずみ切換え後組合せのき裂伝ば速度は一定ひずみ振幅下の伝ば速度を用いて表すことができ、速度のばらつきも小さくなっている。すなわち、S 45 C 材のような繰返しに対して安定な材料について導かれた微小き裂伝ば則は、ひずみ切換後の力学因子の変化を考慮することにより、形式的にひずみ履歴の影響が現れる材料に対しても拡張適用できる。

(a) L → M, L → H

(b) H → L, M → L

Fig. 9 Comparison of the fatigue damage of the second strain step D_2 predicted using eq.(11) and experimentally measured

4. 考 察

図2で見られたように、SUS 304 鋼は繰返し硬化挙動を示し、ひずみ制御下の疲労試験では繰返し数の増加とともに応力振幅 $\Delta\sigma$ が増加する。本研究ではこの $\Delta\sigma$ をひずみ履歴の影響を反映する力学的パラメータの一つと考え、ひずみ切換え後 $\Delta\sigma$ がひずみ履歴の影響によって一定ひずみ振幅下の場合の応力振幅 $\Delta\sigma_c$ と比べていかなる差異を生じるかに注目し、 $\Delta\sigma/\Delta\sigma_c$ を関連する変数として、き裂伝ば速度の加速や減速を表すき裂伝ば則を導いた。以下では本研究で導いたき裂伝ば則を用い、前報で示した二段二重ひずみ振幅下における Miner 則の累積損傷傾向⁽⁹⁾ をき裂伝ばの立場から考察する。まず、一定ひずみ振幅 $\Delta\varepsilon_{p2}$ による破断寿命 N_{r2} は式(3)を積分し、き裂発生寿命を N_{02} とすると、次式が得られる。

$$N_{r2} = \ln(l_f/l_0)/(C \cdot \Delta \varepsilon_{p2}^s) + N_{02} \\ = \ln(l_f/l_0)/(C \cdot \Delta \varepsilon_{p2}^s) + C_0 \cdot \Delta \varepsilon_{p2} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ただし、前報⁽⁹⁾ でき裂発生寿命 N_0 は簡単化のため $N_0=0$ と仮定したが ($\because N_0 \ll N_r$)、ここでは詳細な議論のため結晶粒寸法のき裂発生寿命を考慮した。

一方、ひずみ振幅の切換え時から破断までの繰返し数(余寿命) N_2 は式(8)を積分することにより、次式を用いて求めた。

$$N_2 = \ln(l_f/l_1)/(C \cdot \Delta \varepsilon_{p2}^s \cdot K^s) \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 l_1 : 切換え時のき裂長さ
したがって、き裂伝ばに基づいて求めた破断寿命 ($N_f = N_2 + N_0$) を基に形式的に算出した二段めのひずみ振幅による損傷値 D_2 は式(9)および式(10)より次式のようなになる。

Fig. 10 Change of the summation of damage D_s against strain range ratio K determined using eq.(11) and experimentally measured

$$D_2 = N_2/N_{f2} \\ = \frac{\ln(l_f/l_1)/(C \cdot \Delta \varepsilon_{p2}^s \cdot K^s)}{\ln(l_f/l_0)/(C \cdot \Delta \varepsilon_{p2}^s) + C_0 \cdot \Delta \varepsilon_{p2}} \quad \dots\dots\dots (11)$$

図9(a), (b)にそれぞれひずみ振幅組合せ L → M, L → H および M → L, H → L 振幅に対する二段めのひずみ振幅による損傷 D_2 とひずみ切換え時のき裂長さ l_1 との関係を示す。図中のデータ点は実験値で、また実線は式(11)で求めた D_2 値を表す。図9より、切換え時のき裂長さのばらつきとは無関係に切換え後の疲労損傷は繰返し硬化挙動を考慮したき裂伝ば則、式(11)を用いることによって十分に評価できることを示している。

次に、二段二重ひずみ振幅下における累積損傷 D_s は切換え時の損傷値 $D_1 = N_1/N_{f1}$ を用いると、次式で与えられる。

$$D_s = D_1 + D_2 \\ = D_1 + \frac{\ln(l_f/l_1)/(C \cdot \Delta \varepsilon_{p2}^s \cdot K^s)}{\ln(l_f/l_0)/(C \cdot \Delta \varepsilon_{p2}^s) + C_0 \cdot \Delta \varepsilon_{p2}} \quad \dots\dots\dots (12)$$

図10に式(12)を用いて求めた累積損傷の予測値 D_s とひずみ振幅比 K の関係を示す。図9同様、図中のデータ点は実験値を、また実線は予測値を示す。 K が小さい領域で両者はほぼ一致し、また K が大きい領域では実験値のほうが予測値よりやや大きくなっているが、全体として両者はよく一致している。また、 $D_s \sim K$ 関係の特徴として、ひずみ振幅を H → L, M → L 切換えの場合 ($K > 1$)、 D_s は 1 よりわずかに小さくなり、逆に L → H, L → M 切換えの場合 ($K < 1$)、1 より大きくなっている。これらの結果は以下のように解釈される。すなわち、ひずみ履歴が現れる材料の疲労寿命は、繰返しに対して安定な材料について導かれた微小き裂伝ば則を形式的に拡張適用することにより、ひずみ切換え後の力学因子の変化を考慮した修正き裂伝ば則を用いて予測できる。

5. 結 言

繰返し硬化挙動を示す SUS 304 鋼の一定および二段二重ひずみ振幅下の低サイクル疲労試験を実施し、ひずみ履歴の影響を考慮したき裂伝ば則を導いた。さ

らに、Miner 則の検討を行い、累積損傷のばらつきをき裂伝ばの立場から検討し、以下の結言を得た。

(1) ひずみ振幅切換え後の応力振幅は、切換えの影響によって増加、減少する。応力振幅の増加・減少率はき裂長さに無関係に、ひずみ振幅比 $K (= \Delta \varepsilon_{p1}/\Delta \varepsilon_{p2})$ の関数として、次式で表せる。

$$\Delta \sigma / \Delta \sigma_c = K^x$$

(2) ひずみ振幅切換え後のき裂伝ば速度は、応力振幅変化の影響を受け加速・減速する。また、伝ば速度の加減速の割合は同じき裂長さで比較すると一定となり、速度比とひずみ振幅比の間に次式の関係が成立する。

$$(dl/dN)_2 / (dl/dN)_{c2} = K^s$$

(3) ひずみ切換え後のき裂伝ば則は一定ひずみ振幅下のき裂伝ば則を基に導け、次式で表せる。

$$(dl/dN)_2 = C \cdot \Delta \varepsilon_{p2}^s \cdot l \cdot K^s$$

さらに、このき裂伝ば則を用いて求めた損傷の予測値と実験値はよく一致する。すなわち、き裂伝ばにひずみ履歴の影響が現れる場合にもき裂伝ばを基に疲労寿命評価ができる。

(4) 二段二重ひずみ振幅下において、ひずみ振幅切換えの組合せによる累積損傷のばらつきの傾向は結言(3)で述べた拡張き裂伝ば則を用いて説明しうる。

文 献

- (1) 山田敏郎・星出敏彦・藤村哲・真鍋雅信, 機論, **49** 440, A (1983), 441-451.
- (2) 星出敏彦・岩崎克彦・山田敏郎, 機論, **51** 468, A (1985), 1919-1927.
- (3) 幡中憲治・藤満達郎・渡辺秀明, 機論, **50** 452, A (1984), 737-743.
- (4) 藤満達郎・幡中憲治, 機論, **52** 480, A (1986), 1839-1847.
- (5) 城野政弘・宗智・菅田淳・名和田隆, 機論, **52** 477, A (1986), 1257-1263.
- (6) 村上敬宣・原田昭治・谷石彦文・福島良博・遠藤達雄, 機論, **49** 447, A (1983), 1411-1419.
- (7) 原田昭治・村上敬宣・福島良博・石松豊・遠藤達雄, 機論, **51** 464, A (1985), 1215-1223.
- (8) 原田昭治・遠藤達雄・福島良博・坂田利光, 機論, **53** 485, A (1987), 26-32.
- (9) 原田昭治・福島良博・永富邦昌・遠藤達雄, 機論, **55** 516, A (1989), 1748-1754.