き裂開閉口変位に基づいた微小き裂伝ば則の構築[†]

三宅正浩* 原田昭治**
黒島義人** 高原正雄***

Unified Description of Small Crack Growth Rate Using Δ CTOD in Both HCF and LCF Conditions

by

Masahiro MIYAKE*, Shoji HARADA**, Yoshito KUROSIMA**
and Masao TAKAHARA***

Uniaxial push-pull High Cycle Fatigue (HCF) tests as well as Low Cycle Fatigue (LCF) tests were conducted on a medium carbon steel under constant stress or strain amplitude. To examine the small crack growth behavior, a small drilled hole of 50 μ m in diameter and in depth was introduced on each specimen surface. A fracture mechanics parameter, suitable for characterizing fatigue crack growth rate in both fatigue regions was examined. The results showed that the cyclic crack tip opening displacement range (Δ CTOD), which can well be correlated with overall cyclic plastic strain range $\Delta \epsilon_p$, was a suitable parameter to describe the fatigue crack growth rate in both fatigue regions.

Key words: Fatigue, Small crack growth law, Plastic strain range, Δ CTOD

1 緒言

疲労寿命の予測・評価には、き裂発生過程および伝ば過程の定量的取り扱いが不可欠であるが、両過程を明確に分離して取り扱うのは困難である。低サイクル疲労の場合、微小き裂の伝ばが寿命の大部分を占め、その特性評価の研究が村上ら、幡中らおよび星出らによって行われている。^{1)~10)} 中でも、星出らによる弾塑性破壊力学パラメータ ΔJ を用いた取扱いは、 ΔJ が高サイクル疲労域でも使える汎用パラメータであるため、注目されてきた。しかし、 ΔJ の物理的意味が他の破壊力学パラメータ程明確でないこと、 ΔJ の測定や算出が必ずしも簡単でないこと等の理由により、十分には流布していない。

一方、高サイクル疲労の場合、き裂の発生と伝ばを明確には分離し得ないが、き裂の発生機構やき裂伝ばの力学的評価の研究が数多く行われている。それらの中で、平滑材の寿命評価に結びつく、微小き裂の伝ば特性評価の研究が精力的に行われてきた。微小き裂の検討ではき裂開閉口現象による影響を考慮するため、き裂開閉口挙動に注目した破壊力学パラメータの有効応力拡大形数範囲 ΔK_{eff} による研究報告が数多く見られる。例えば、菊川らは除荷弾性コンプライアンス法を用いて検討を行い、 ΔK_{eff} レンジペアによって広帯域変動荷重下の疲労損傷評価が可能であることを明らかにした。^{11)~14)} 彼らの多大な研究成果によって、現状では、き裂開閉口挙動の取り扱いも含め、微小き裂および巨視き裂ともにき裂開閉口挙動を考慮した力学的評価方法がほぼ完成されていると

云っても過言でない。

しかし、これまでに得られた知見の多くは一定応力振幅またはひずみ振幅試験の結果に基づいており、実用上、より重要な変動荷重条件への適用に対しては幾つかの検討課題が残されている。また、低サイクル疲労から高サイクル疲労に及ぶ広範囲の疲労域で統一的に記述できる破壊パラメータについては、 ΔJ を除き、検討例は少ない。

本研究の究極目的は、変動ひずみ下の疲労被害計算法として広く用いられているレインフロー法¹⁵⁾を最近の疲労研究の成果をフィードバックして再解釈し、より精度の高い変動ひずみ下寿命予測法を構築することである。その第一歩として、上述の諸点を考慮し、一定ひずみ振幅下で、かつ広範囲の疲労域での微小き裂伝ば特性評価に、測定が容易で、かつ破壊機構の解釈と直接結びつけられるパラメータ COD を用いることの可否について検討する。すでに城野らはき裂伝ば速度とき裂先端近傍の塑性変形挙動を結びつける手段として、COD を用いて評価する一連の研究を展開し、^{16)~19)} また、田中らはレーザ干渉微小変位計を用いて繰返し中のき裂開閉口変位を高精度で測定し、 ΔK_{eff} を用いて伝ば特性を評価している。^{20), 21)} しかしながら、き裂開閉口挙動の影響を考慮するため、繰返し中の COD の変化幅 Δ COD に注目した研究例は見あたらない。そこで、本報告では、先ず、先に報告した、低サイクル疲労域で導いた、 $\Delta \epsilon_p$ を用いて微小き裂伝ば速度を評価する手法²⁾の高サイクル疲労域へ

[†] 原稿受理 平成9年1月13日 Received Jan. 13, 1997

* 九州工業大学大学院 〒804 北九州市戸畑区仙水町, Dept. of Mech. Eng., Kyushu Inst. of Tech., Tobata-ku, Kitakyushu, 804

** 正会員 九州工業大学工学部 〒804 北九州市戸畑区仙水町, Dept. of Mech. Eng., Kyushu Inst. of Tech., Tobata-ku, Kitakyushu, 804

*** いすゞ自動車㈱ 〒210 東京都品川区南大井, ISUZU MOTORS LTD., Shinagawa-ku, Tokyo, 140

の拡張を試み, $\Delta \varepsilon_p$ と CTOD 相関から $\Delta \varepsilon_p$ にもとづく微小き裂伝ば則の意味付けを行う. さらに, CTOD の変化挙動とき裂伝ば速度の関係についても検討する.

2 実験材料と方法

供試材は S45C 圧延丸棒 (素材径 22mm) で, 焼なまし (844°C, 1h, 大気中) を施した後に Fig. 1 (a), (b) に示すような, 最小径部 5mm および 8mm の砂時計型試験片に機械加工した. その後, 同材の最小断面部をエメリ紙で仕上げ, さらに, 電解研磨で表面層を直径あたり約 40 μm 除去, 鏡面仕上げとした. 供試材の化学成分を Table I に示す. なお, 全ての試験片の最小断面部にき裂発生起点として, Fig. 2 に示すような直径および深さが 50 μm の微小穴を設けている.

疲労試験機は電気油圧サーボ式疲労試験機 (容量 98KN) を用い, 以下の 2 条件の引張圧縮疲労試験を室温大気中で実施した. ①低サイクル疲労試験: 正弦波塑性ひずみ制御, 繰返し速度 0.1~0.3Hz, ②高サイクル疲労試験: 正弦波荷重制御, 繰返し速度 5Hz. なお, ひずみおよび荷重波形の発生装置にはパーソナルコンピュータ (NEC PC-9801RX) を用い, 塑性ひずみは微小穴と反対側の試験片表面に貼付したひずみゲージの出力 (全ひずみ出力) とロードセル出力から求めた.

疲労き裂の観察は試験片表面をあらかじめ 5% ナイタルで腐食処理した試験片を用意し, ヒステリシスループの最大引張りおよび最大圧縮位置で試験を中断して採取したレプリカで行った. なお, き裂開閉口変位幅 ΔCOD は走査型電子顕微鏡 (以下, SEM) で観察したき裂上下の表面組織の移動量から, き裂伝ば速度は表面き裂長さの変化量から決定した. その際のき裂長さはき裂がジグザグに伝ばする場合も含めて主応力面に投影した長さで表し, 穴径も含めた全き裂長さとしている.

3 結果および考察

3・1 疲労試験結果

Fig. 3 に低サイクル疲労試験結果 (図中, ●) および高サイクル疲労試験結果 (図中, ○) を塑性ひずみ幅 $\Delta \varepsilon_p$ と破断までの繰返し数 N_f で整理した疲労寿命線図を示す. ただし, 寿命呼称の区分は仮定上, $N_f = 10^4$ cycle で分けている. また, 高サイクル疲労試験時の $\Delta \varepsilon_p$ は $n/N_f = 0.5$ における値を採用した. 同図から明らかなように低サイクル域から高サイクル域にわたって $\Delta \varepsilon_p$ と疲労寿命の間に相関性が見られ, M-C 則が成立していることが分かる. 既述したように低サイクル域における M-C 則は微小き裂伝ば則^{1), 2)}から説明される. そこでこの結果が微小き裂伝ば則で整理されるか否かを検討した.

Fig. 4 は低・高サイクル疲労域における各ひずみレベルで求めた各 $\Delta \varepsilon_p$ 毎き裂長さ l とき裂進展速度 dl/dN の関係を示す. 同図より両者の間には各 $\Delta \varepsilon_p$ 毎に疲労域と無関係に両対数線図上で直線関係が成立することが分かる. また, それぞれの直線は $\Delta \varepsilon_p$ が大になるにつれて上方, もしくは左方へ平行移動しており, 傾きがほぼ同様であることから塑性ひずみ幅で規格化すると同一直

Fig. 1. Specimen geometries.

Table I. Chemical Composition of the material tested.

(Wt%)							
C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
0.46	0.27	0.74	0.015	0.02	0.02	0.01	0.10

Fig. 2. Drilled-hole geometries.

線上にプロットされうることが予想される. そこで, この関係を整理し, 微小き裂伝ば則を導いた結果, Fig. 5 に示すように, 従来の低サイクル疲労域だけではなく, 高サイクル疲労域においても微小き裂伝ば則が成立していることが明らかとなった. また同図から, 両者は同一の直線上にプロットされ, その関係式は $(dl/dN)/\Delta \varepsilon_p^{1.69} = 3.45 \times l$ である. そこで, 低サイクル疲労の場合と同様にこの式を初期き裂寸法から破断き裂寸法まで積分し, M-C則型の関係式を導いた. Fig. 6 は初期き裂寸法を微小穴寸法, 破断き裂寸法を 5000 μm と仮定して算出した際の M-C 型の関係式 $\Delta \varepsilon_p \cdot N_f^{0.592} = 1.47$ を, Fig. 3 と同一の疲労試験結果に記入した結果である. 算出した M-C 型の関係式は実験結果と非常によく一致している. このことは微小穴をき裂発生箇所とした本研究のようにき裂発生寿命が無視出来る場合には, 微小き裂伝ば則から疲労寿命が記述できることを意味している.

以上の結果から, 低サイクル疲労の評価パラメータ $\Delta \varepsilon_p$ を用いる微小き裂伝ば則の高サイクル域への延長が可能であることが明らかとなった.

3・2 き裂開閉口形状

前節で $\Delta \varepsilon_p$ が低・高両サイクル疲労域におけるき裂伝ば速度評価に有効であることを示した. しかし, 緒言で

述べたように $\Delta \epsilon_p$ はバルク材に作用するひずみを示し、必ずしも微小き裂伝ばの力学量を反映していない。この点について述べるため、 $\Delta \epsilon_p$ ならびにき裂長さとき裂先端開閉口変位幅 ΔCTOD の関係について検討した。

初めに、同一ひずみレベルにおいて異なるき裂長さの場合に ΔCOD がどのように変化するかを調べた。Fig. 7 (a) に高サイクル疲労試験時 ($\sigma_a = 250\text{MPa}$, $\Delta \epsilon_p = 0.2\%$) のき裂先端からの距離と ΔCOD の関係を、(b) に低サイクル疲労試験時 ($\Delta \epsilon_p = 1.0\%$) のそれをそれぞれ示す。Fig. 5 に示したように、同一 $\Delta \epsilon_p$ ではき裂長さが長いほど $d\ell/dN$ は速いこと、並びに ΔCTOD と $d\ell/dN$ に相関関係があること^{8), 9)}から予想されるようにき裂長さが長いほど ΔCOD が大きい。そこでFig. 7 のように変化する ΔCOD 曲線から以下のようにして ΔCTOD を定義した。

小規模降伏条件を満たす高サイクル域において ΔCTOD を最も簡単に算出するモデルとしてDugdaleモデルが知られている。そこで本研究の高サイクル域におけるき裂中央の ΔCOD と σ_a からDugdaleモデルを用いて $\Delta \text{CTOD}_{\text{cal}}$ を算出した。その結果と実際のき裂開口形状を比較したところ、き裂先端からき裂半長の9%の位置の ΔCOD 、 $\Delta \text{COD}_{9\%}$ と $\Delta \text{CTOD}_{\text{cal}}$ がよく一致した。そこで以降、 $\Delta \text{CTOD}_{\text{cal}}$ と一致した $\Delta \text{COD}_{9\%}$ を ΔCTOD と定義することとした。Fig. 8 に $\Delta \text{COD}_{9\%}$ と $\Delta \text{CTOD}_{\text{cal}}$ の

Fig. 3. Manson-Confin relation.

Fig. 4. Relationship between crack length and $d\ell/dN$.

Fig. 5. Small crack growth law.

Fig. 6. M-C relation (Calculated vs Experimental).

(a) HCF

(b) LCF

Fig. 7. Relationship between distance from crack tip and ΔCOD .

関係を示す. このように定義した $\Delta CTOD$ を用いて, $\Delta CTOD \sim d\ell/dN$ 曲線を作成したところ, Fig. 9 に示すように Dugdale モデルの成立しない低サイクル域まで含め 1 本の直線で表されることが分かった.

以上の結果から明らかなように, き裂伝ば速度 $d\ell/dN$ は $\Delta \varepsilon_p$ と き裂長さおよび $\Delta CTOD$ の双方から評価可能である. すなわち, $\Delta \varepsilon_p$ と $\Delta CTOD$ は一対一に対応するパラメータである可能性が示唆される. ここで $\Delta \varepsilon_p$ と $\Delta CTOD$ は両者とも塑性変形量であり, 前者はバルクな塑性変形量を表し, 後者はき裂先端のひずみ集中によって形成される微視的な塑性変形量に相当する. すなわち, $\Delta CTOD$ は $\Delta \varepsilon_p$ がき裂によって拡大されたものと判断される. そこで $\Delta \varepsilon_p$ 毎の $\Delta CTOD/\Delta \varepsilon_p$ を ℓ に対して整理した. その結果を Fig. 10 に示す. 同図から分かるように, $\Delta \varepsilon_p$ が異なる場合も ℓ と $\Delta CTOD/\Delta \varepsilon_p$ がほぼ 1 本の直線で表され, $\Delta CTOD$ は $\Delta \varepsilon_p$ がき裂によって ℓ の 0.7 乗に拡大されたものであることが分かった. 従って, $\Delta \varepsilon_p$ に基づく微小き裂伝ば則が広範な疲労域で成立する原因は, 微小き裂伝ば則がき裂伝ばを直接支配する $\Delta CTOD$ が $\Delta \varepsilon_p$ と ℓ の関数であるためである.

最後に, $\Delta CTOD$ と ΔK の関係について検討した. Fig. 11 に高サイクル疲労域の異なるひずみレベルに対して得られた同一き裂伝ば速度におけるき裂先端からの距離と ΔCOD の関係を示す. これまでの検討から予想されるように, また, 西谷らの報告²²⁾と同様に同一き裂伝ば速度における ΔCOD は同一となっている. すなわち, Fig. 11 の範囲では $\Delta CTOD \sim d\ell/dN$ 関係は成立していると考えられる. 一方, このき裂先端の応力拡大係数範囲 ΔK を算出すると, $\Delta \varepsilon_p = 0.2\%$, $643 \mu\text{m}$ で $\Delta K = 7.0 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$, $\Delta \varepsilon_p = 0.41\%$, $375 \mu\text{m}$ で $7.9 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$, $\Delta \varepsilon_p = 0.1\%$, $1960 \mu\text{m}$ で $11.6 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ となり, 同一のき裂伝ば速度であるにも関わらず異なる値となった. すなわち, 本研究の場合では $\Delta K \sim d\ell/dN$ 関係の成立範囲を超えていると判断される.

以上のことから $\Delta K \sim d\ell/dN$ 関係の成立範囲外でも, また, 低サイクル疲労域でも $\Delta CTOD$ をパラメータとすることでき裂長さによらないき裂伝ばの評価が可能であることが分かった.

4 結 論

本研究では低サイクル疲労き裂伝ばに対して提案した $\Delta \varepsilon_p$ に基づいた微小き裂伝ば則の高サイクル域までの拡張を試み, また, $\Delta \varepsilon_p$ と き裂先端開口変位幅 $\Delta CTOD$ の相関から $\Delta \varepsilon_p$ に基づいた微小き裂伝ば則の本質を検討した. その結果, 以下の結論を得た.

- (1) $\Delta \varepsilon_p$ に基づいた微小き裂伝ば則は, 低サイクル疲労域だけではなく, 高サイクル疲労域においても成立する.
- (2) $\Delta CTOD$ によってき裂伝ば速度 $d\ell/dN$ は決定され, $\Delta \varepsilon_p$ に基づいた微小き裂伝ば則とはその $\Delta CTOD$ と $\Delta \varepsilon_p$ の関係を表している.
- (3) $\Delta K \sim d\ell/dN$ 関係の成立範囲外でも, また, 低

Fig. 8. Relationship between $\Delta COD_{9\%}$ and $\Delta CTOD_{cal}$.

Fig. 9. $\Delta CTOD \sim d\ell/dN$ curve.

Fig. 10. Relationship between $\Delta CTOD/\Delta \varepsilon_p$ and ℓ .

Fig. 11. Relationship between distance from crack tip and ΔCOD ($d\ell/dN = 4 \times 10^{-8} \text{m/cycle}$).

サイクル疲労域でも $\Delta CTOD$ をパラメータとすることで
き裂長さによらないき裂伝ばの評価が可能である。

(平成8年11月26日 日本材料学会第23回疲労シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 村上敬宜, 原田昭治, 谷石彦文, 福島良博, 遠藤達雄, 日本機械学会論文集, A-49, 1411 (1983).
- 2) 原田昭治, 村上敬宜, 福島良博, 石松 豊, 遠藤達男, 日本機械学会論文集, A-51, 1215 (1985).
- 3) 幡中憲治, 藤満達朗, 日本機械学会論文集, A-50, 291 (1984).
- 4) 原田昭治, 福島良博, 永富邦昌, 遠藤達男, 日本機械学会論文集, A-55, 1748 (1989).
- 5) 山田敏郎, 星出敏彦, 藤村 哲, 真鍋雅信, 日本機械学会論文集, A-49, 441 (1983).
- 6) 星出敏彦, 藤村 哲, 山田敏郎, 日本機械学会論文集, A-50, 320 (1984).
- 7) 幡中憲治, 藤満達朗, 渡辺秀明, 日本機械学会論文集, A-50, 737 (1984).
- 8) 星出敏彦, 田中啓介, 日本機械学会論文集, A-48, 1102 (1982).
- 9) 秋庭義明, 原田昭治, 福島良博, 上原 修, 日本機械学会論文集, A-59, 12 (1993).
- 10) T. Hoshide, T. Yamada, S. Fujimura and T. Hayashi, Engineering Fracture Mechanics, 21-1, 85 (1985).
- 11) 城野政弘, 宋 智浩, 山 義則, 西垣内徳正, 岡部 雅, 菊川 真, 日本機械学会論文集, A-51, 1677 (1985).
- 12) 菊川 真, 城野政弘, 田中健一, 高谷 勝, 材料, 25, 899 (1976).
- 13) 菊川 真, 城野政弘, 近藤良之, 三上省二, 日本機械学会論文集, A-48, 1496 (1982).
- 14) 菊川 真, 城野政弘, 近藤良之, 日本機械学会論文集, A-48, 278 (1983).
- 15) 遠藤達雄, 松石正典, 光永公一, 小林角市, 高橋清文, 九州工業大学研究報告, 28, 33 (1974).
- 16) 城野政弘, 菅田 淳, 吾妻健夫, 日本機械学会論文集, A-57, 1119 (1991).
- 17) 城野政弘, 宋 智浩, 後藤邦夫, 山田真治, 材料, 35, 918 (1986).
- 18) 城野政弘, 菅田 淳, 材料, 39, 1119 (1990).
- 19) 城野政弘, 菅田 淳, 濱崎俊彰, 材料, 40, 1428 (1991).
- 20) 田中啓介, 秋庭義明, 杵渕雅男, 日本機械学会論文集, A-56, 251 (1990).
- 21) 小倉敬二, 西川 出, 木村康樹, 日本機械学会論文集, A-56, 526 (1990).
- 22) 西谷弘信, 尾田安司, 日本材料学会第224回疲労部門委員会研究討論会資料, p.11 (1995).