モードⅡ疲労き裂進展特性とき裂駆動力の実験的評価[†]

西澤 英雄* 小川 武史**

Mode II Fatigue Crack Growth Characteristics and Experimental Evaluation of the Crack Driving Force

by

Hideo NISHIZAWA* and Takeshi OGAWA**

Mode II fatigue crack growth has been investigated for a high strength bearing steel, SUJ2, using a specially prepared fixture developed by Fujii et al. The fixture could apply large T-stress, i.e. compressive stress component parallel to the crack surface, which enabled us to grow the fatigue crack to the pure mode II direction. Detailed experiments for mode II as well as conventional mode I fatigue crack growth were performed, and the characteristics were compared. In order to investigate the net characteristics of mode II fatigue crack growth, deformation fields near the crack tip were measured under mode II loading by ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry) method and used to derive effective stress intensity factor range using nonlinear least-squares based on Newton-Raphson method. The results revealed that the mutual contact of the crack surfaces reduced the crack driving force and the crack growth rate simultaneously. The mode II fatigue crack growth rate exhibited remarkable scatter due to the crack surface contacts at the deflected path of the mode II fatigue cracks.

Key words : Fatigue crack growth, Mode II, Effective stress intensity factor range, ESPI method, Deformation field

1 緒 言

転がり軸受けや鉄道レールなどに生じる転がり疲労損傷は、接触に起因する圧縮応力によりき裂の開口が抑制された状態で、繰返しせん断応力が作用することにより発生する。圧延ロールなどでは表面下になんか大きなき裂が発生・進展した後に剥離の生じることがあり、表面下ではかなりのモードⅡ疲労き裂進展寿命を費やしている。また、発電用機器や化学プラントなどの複雑な溶接構造物では、欠陥が混合モード状態にさらされることが多く、開口型のモードⅠ疲労き裂進展特性に加えてモードⅡ疲労き裂進展特性の破壊力学的評価が重要である。

モードⅠ疲労き裂進展特性の評価方法は確立されており、機器の疲労寿命評価に広く用いられている。一方、モードⅡ疲労き裂進展特性は実験室で実現することが困難なために、実験結果の報告は一部の研究者に限定されている。^{1)~3)} また、き裂面の凹凸はモードⅡ変形時に互いに接触して摩擦力が発生し、有効なき裂駆動力を減少させる。したがって、外力の条件から求めた公称き裂駆動力は、き裂先端の有効き裂駆動力とは大きく異なってお

り、真のモードⅡ疲労き裂進展特性を求めるためには、有効なき裂駆動力をき裂先端近傍の変位場から直接求めることが必要である。

そこで本研究では、藤井らにより提案されたモードⅡ疲労き裂進展試験用の治具を採用し、高炭素クロム軸受鋼 SUJ2 のモードⅡ疲労き裂進展特性を調べた。電子スเปックルパターン干渉 (ESPI) 法によるき裂先端近傍の変位場測定から有効応力拡大係数範囲を求め、真のモードⅡ疲労き裂進展特性の評価を試みた。また、モードⅠ疲労き裂進展特性についても詳細に試験を行い、き裂進展特性に及ぼすき裂面変位様式の影響に検討を加えた。

2 材料および実験方法

供試材は3ロットの高炭素クロム軸受鋼 SUJ2 丸棒である。化学成分 (mass %) と素材の直径を Table I に示す。熱処理条件は、SUJ2 (A) が 845℃・45 分 (油焼入)、180℃・2 時間 (焼もどし)、SUJ2 (B) が 840℃・50 分 (油焼入)、175℃・4 時間 (焼もどし)、SUJ2 (C) が 840℃・50 分 (油焼入)、170℃・160 分および 165℃・540 分 (焼もどし) である。SUJ2 (A) はモードⅠ疲労き

Table I. Chemical compositions (mass %) and diameters of supplied materials.

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	Ti	O ₂	Fe	Diameter
SUJ2(A)	0.99	0.27	0.41	0.011	0.007	0.07	1.41	0.03	0.02	0.018	2 ppm	9 ppm	Bal.	60 mm
SUJ2(B)	0.99	0.31	0.46	0.012	0.009	0.06	1.5	0.02	0.09	0.021	25 ppm	10 ppm	Bal.	220 mm
SUJ2(C)	0.98	0.28	0.43	0.011	0.007	0.07	1.48	0.04	0.12	0.019	17ppm	6ppm	Bal.	220 mm

[†] 原稿受理 平成 17 年 3 月 4 日 Received Mar. 4, 2005

* 青山学院大学大学院 〒229-8558 相模原市淵野辺, Graduate Student, Aoyama Gakuin Univ., Fuchinobe, Sagami-hara, 229-8558

** 正 会 員 青山学院大学機械創造工学科 〒229-8558 相模原市淵野辺, Dept. of Mech. Eng., Aoyama Gakuin Univ., Fuchinobe, Sagami-hara, 229-8558

裂進展試験, SUJ2 (B) および SUJ2 (C) はモード II 疲労き裂進展試験に用いた. これらの材料は軸受けメーカーで素材の購入および熱処理を行ったものである. ロット間の疲労き裂進展特性の相違は小さいと考えた.

モード I のき裂進展試験は, 厚さ 5mm, 幅 25mm のコンパクト (CT) 試験片によって行った. SUJ2 (A) では C-L 方位 (負荷方向が C (周方向), き裂進展方向が L (軸方向)) および L-R (半径方向) 方位の 2 種類の試験片について実験を行った. き裂長さとき裂開閉口の測定に背面ひずみ除荷弾性コンプライアンス法を用い, ASTM 規格 E647-95a に従った応力比 R 一定試験に加え, 最大応力拡大係数 $K_{I\max}$ 一定, 応力拡大係数範囲 ΔK_I 漸減試験を行った.

モード II のき裂進展試験は, 厚さ 3mm (SUJ2 (B)) または 2mm (SUJ2 (C)), 幅 20mm, 長さ 80mm の片側切欠き (SEN) 試験片によって行った. 試験片の長手方向が R 方向, き裂進展方向が C 方向であり, 藤井らと同様に軸受の転がり疲労き裂の進展方向を想定している.¹⁾ 放電加工による長さ 3mm の切欠きから $\Delta K_I = 10 \sim 15 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$, $R = 0.1$ の条件の 3 点曲げ荷重下で, 長さ約 3mm の疲労予き裂を導入して, モード II き裂進展試験に供した. 用いた治具を Fig. 1 に示す. 試験方法および応力拡大係数の計算方法は藤井らと同様である.¹⁾ ここで, き裂面と平行な静的圧縮応力 (T 応力) は, 試験片表面のひずみが約 0.8% となるように与えた. また, き裂面接触を除外するための静的なモード I 応力拡大係数 K_I は, 約 $7 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$ とした. なお, 一部の試験ではこれらの条件を多少変更した.

3 き裂駆動力の解析方法

3・1 ESPI 法による変位分布の計測

変位分布の計測には, Dantec Ettemeyer 社の ESPI システム Q-500 を使用した. これは波長が 532 nm の YAG レーザーのスペックルパターン干渉を用いて変位の計測を行なうものであり, $0.1 \mu\text{m}$ よりも小さい変位分解能を有している. Fig. 1 に示しているように, ESPI 装置の中央に CCD カメラがあり, そのまわりのミラーから照射されたレーザー光によるスペックルパターンを治具の観察窓から撮影している. ESPI 法では, 試験片の剛体

変位を含めた測定が行なわれるので, 試験機の変位と同期して, ESPI 装置が剛体変位を除外するように移動する構造となっている.⁴⁾

3・2 応力拡大係数範囲の決定

有限要素法 (FEM) によって変位分布から応力拡大係数を決定する場合, 変位外挿法が用いられる. この方法を ESPI 法により実験的に測定されたき裂先端近傍の変位分布に適用して, 応力拡大係数を求めることが可能である.⁵⁾ しかし, 数値解析によって求めた変位分布に比べて実験的に測定された変位分布はノイズ成分を多く含んでおり, より広範囲の測定データをもとに応力拡大係数を決定することが望ましい. そこで, 本研究では米山らによって提案されたニュートン・ラプソン法をもとにした非線形最小二乗法^{6), 7)}を用いて応力拡大係数 K の決定を行なった. ここで, ESPI 法により測定する変位分布を繰返し荷重の最大値と最小値における相対変化とすれば, これによって求められた K は, き裂先端に有効に作用するき裂駆動力, すなわち, 有効応力拡大係数範囲となる.

線形破壊力学によると, モード II き裂先端近傍に生じる変位の一般解は次式で表される.

$$u = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_{II n}}{2G} r^{n/2} \left\{ \kappa \sin \frac{n}{2} \theta - \frac{n}{2} \sin \left(\frac{n}{2} - 2 \right) \theta + \left\{ \frac{n}{2} + (-1)^n \right\} \sin \left(\frac{n}{2} \right) \theta \right\}$$

$$v = - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_{II n}}{2G} r^{n/2} \left\{ -\kappa \cos \frac{n}{2} \theta - \frac{n}{2} \cos \left(\frac{n}{2} - 2 \right) \theta + \left\{ \frac{n}{2} + (-1)^n \right\} \cos \left(\frac{n}{2} \right) \theta \right\}$$

(1)

ここで, u は変位の x 方向成分, G はせん断弾性係数, κ は平面応力状態の場合 $(3-\nu)/(1+\nu)$, 平面ひずみ状態の場合 $(3-4\nu)$, ν はポアソン比, r および θ はき裂先端を原点とした極座標である. 未知数である $A_{II n}$ は, 試験片やき裂形状およびその寸法により変化し, かつ外力に比例する係数である. 線形破壊力学から, $n=1$ の場合には, モード II 応力拡大係数 K_{II} との間に次式の関係がある.

$$A_{II n} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi}} \quad (2)$$

本研究では, u のみが測定可能な変位成分であるので, u のみを解析対象とした. 式 (1) のき裂先端近傍変位場を次式で書き換える.

$$u = \sum_{n=1}^{N_t} A_{II n} f_n(r, \theta) + u_r + \theta_r x \quad (3)$$

すなわち, 式 (1) の無限級数を $n=1 \sim N_t$ までの級数で表されるものとする. ここで, u_r は剛体変位量, θ_r は回転変位量であり, いずれも未知数である. き裂先端を原点とする極座標 (r, θ) は次式で表される.

$$r = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2} \quad (4)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{y-y_0}{x-x_0} \right) \quad (5)$$

ここで, x_0 および y_0 はき裂先端座標であり, いずれも未知数である. 実験により測定された変位データ u_k と未知数を含む一般解との関係を次式のように定義する. なお, k は測定されたデータ数であり, 解析に用いる領域内の ESPI 法で測定された変位点数である.

Fig. 1. Fixture and ESPI system for mode II fatigue crack growth tests.

$$u_k = \sum_{n=1}^{N_t} A_{II n} f_n(r_k, \theta_k) + u_r + \theta_r x \quad (6)$$

式 (6) について、ニュートン・ラプソン法に基づき A_{II} の修正量が $1 \text{ Pa} \sqrt{\text{m}}$ 以下になるまで繰返し計算を行なう解析ソフトウェアを作成した。なお、 u_r および θ_r は A_{II} よりも先に収束した。

以上の方法で求めた応力拡大係数は、式 (3) の N_t ごとに複数の K_{II} 値が算出される。米山らはある程度高次の N_t の K_{II} 値を採用している。^{6), 7)} 本研究では客観的に K_{II} 値を求めるために、デジタル画像の類似度と相違度⁸⁾を適用した。得られた未知数 ($A_{II1}, A_{II2}, \dots, A_{II n}, u_r, \theta_r, x_0, y_0$) を用いて変位分布を計算し、この変位分布と実験により測定された変位分布の類似度である正規化相互相関係数 R_{NCC} および相違度である変位差の絶対値和 R_{SAD} を比較した。これらは次式によって定義される。

$$R_{NCC} = \frac{\sum (u_k - \bar{u})(U_k - \bar{U})}{\sqrt{\sum (u_k - \bar{u})^2 \times \sum (U_k - \bar{U})^2}} \quad (7)$$

$$R_{SAD} = \sum |u_k - U_k| \quad (8)$$

ここで、 u_k は変位測定結果、 U_k は近似式から求めた変位である。また、 u および $\bar{u}$ は、それぞれの平均値である。 R_{NCC} は 1 に近いほど、 R_{SAD} は小さいほど変位分布がよく一致していることを示している。

解析結果の妥当性を検証するために、FEM で求めた変位分布を解析ソフトウェアに入力し、藤井らにより求められた $K_{II}^{(1)}$ とよく一致することを確認した。また、以上に示した解析と同様にして、モードⅠ応力拡大係数 K_I を決定することもできる。また、 u および v の 2 次元変位分布を用いれば K_I および K_{II} の混合モード応力拡大係数を求めることができる。⁷⁾ これらについても、解析ソフトウェアを作成し、検討を行なった。

4 実験結果

4.1 モードⅠき裂進展特性

Fig. 2 に SUJ2(A) のモードⅠき裂進展特性を示す。⁹⁾ 実

Fig. 2. Mode I fatigue crack growth characteristics.

施した実験は $R = 0.1$ および 0.6 一定、 ΔK_I 漸減試験であり、採取方位 (C-L および L-R) の異なる試験片について示した。き裂進展特性に及ぼす試験片採取方位の影響は小さい。なお、き裂面の方向が 90° 異なっているが、モードⅡき裂進展試験に用いる試験片は、き裂進展方向が素材の軸方向に垂直で L-R 方位と同様である。一方、き裂進展速度 da/dN - ΔK_I 関係は R に強く依存している。下限界近傍において、 $R = 0.1$ の da/dN と除荷弾性コンプライアンス法に基づき測定されたモードⅠ有効応力拡大係数範囲 ΔK_{Ieff} の関係は、き裂閉口の認められない $R = 0.6$ の da/dN - ΔK_I 関係と一致しており、 R 依存性はき裂開閉口挙動に基づいている。上限界近傍では、 $K_{Imax} = 15 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$ に近づくと静的破壊機構が介在して da/dN が加速される。結果は省略するが、 $R = 0.1$ および 0.6 の上限界近傍の da/dN - K_{Imax} 関係は、ほぼ一致していた。

4.2 モードⅡき裂進展特性

SUJ2 (B) のモードⅡき裂進展特性を Fig. 3 に示す。⁹⁾ 比較のために、Fig. 2 に示したモードⅠの da/dN - ΔK_{Ieff} 関係を示した。また、同様な試験治具を用いている藤井らの実験結果¹⁾を併記した。モードⅡき裂進展試験では、き裂面に潤滑材をしん入させて実験を行った。結果は省略するが、十分大きな K_I を加えてき裂面接触を除外できれば、モードⅡき裂進展特性は潤滑材の影響を受けないことが確認されている。モードⅡき裂進展試験は $R = 0$ および -1 の条件で、き裂進展に伴いモードⅡ応力拡大係数範囲 ΔK_{II} を漸減または漸増させた。モードⅠき裂進展試験においては、 ΔK_I 漸減勾配条件がき裂開閉口挙動を介して実験結果に強く影響を及ぼすが、本研究のモードⅡき裂進展試験の場合には、き裂進展に及ぼす荷重履歴の影響は考慮していない。いずれの材料においても、藤井らの報告と同様に、予き裂先端から前方に沿って、大きくそれることなくモードⅡき裂進展が観察された。しかし、 $\Delta K_{II} > 10 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$ になると、き裂は斜めの方向にそれてモードⅠき裂進展に移行することが観察されている。¹⁾ 本研究の T 応力は、藤井らの実験よりも小さいので、 $\Delta K_{II} >$

Fig. 3. Mode II fatigue crack growth characteristics.

6MPa $\sqrt{\text{m}}$ になるとモード I き裂進展に移行した。

いずれの材料の場合にも、モード II の $da/dN-\Delta K_{II}$ 関係は R に依存しておらず、藤井らおよび村上らの報告と一致している。^{1), 2)} モード I の $da/dN-\Delta K_{I\text{eff}}$ 関係と比較すると、 $da/dN > 10^{-8} \sim 10^{-7} \text{m/cycle}$ において、同一の ΔK_{II} または $\Delta K_{I\text{eff}}$ に対する da/dN は、モード II のほうが高い。一方、モード II 下限界応力拡大係数範囲 $\Delta K_{II\text{th}}$ は、モード I 下限界有効応力拡大係数範囲 $\Delta K_{I\text{eff,th}}$ よりも大きい。

Fig. 4 にモード II 疲労き裂進展破面のマッチング観察結果を示す。破面の凹凸が顕著な部分を高倍率で観察した図 (c) および (d) から、破面接触の痕跡が認められる。この破面は前述したモード I の $da/dN-\Delta K_{I\text{eff}}$ 関係とモード II の $da/dN-\Delta K_{II}$ 関係の大小関係が逆転する領域に対応している。すなわち、モード II の $da/dN-\Delta K_{II}$ 関係の下限界挙動は、破面接触によってもたらされた可能性があり、その寄与を除外した本質的なモード II のき裂進展特性は、モード I の $da/dN-\Delta K_{I\text{eff}}$ 関係よりも加速側にあることも考えられる。

4・3 モード II き裂駆動力

SUJ2 (C) のモード II 疲労き裂進展試験について、ESPI 法による変位分布の測定を行い、き裂駆動力の実験的評価を行った。この試験の場合、ESPI 法の使用のために、Fig. 3 に示した試験のようにき裂面を潤滑することはできない。そこで、き裂面接触を除外するために静的 K_I を 10MPa $\sqrt{\text{m}}$ に増加させた。また、T 応力は圧縮ひずみが約 1% となるように与えた。この試験を行った試験片のき裂進展様相を Fig. 5 に示す。図 (b) に示すように、モード I 疲労予き裂からモード II 疲労き裂が進展を開始した。ところが、繰返し数 $N = 4 \times 10^6$ 回付近において、図 (c) に示すフレッティングき裂が試験片背面の治具接触端部から発生し、き裂進展を開始した。後述するように、こ

Fig. 5. Schematic illustration of crack growth appearance (a) and the micrographs of (b) and (c) indicated in (a).

のき裂の影響を受けて、図 (b) に示したき裂の進展速度が低下した。

モード II 疲労き裂進展試験の初期にあたる $\Delta K_{II} = 3.5 \text{MPa} \sqrt{\text{m}}$ における ESPI 法の測定結果を Fig. 6 に示す。図 (a) は CCD カメラによる観察写真であり、き裂先端の位置とき裂駆動力の解析に用いた変位分布の測定領域を示した。なお、ESPI 法の変位測定では、スペックルパターン生成のために染色探傷用の白い現像液を試験片表面に付着させているので、不鮮明な画像となっている。図 (b) に示した変位分布の解析領域では、ノイズ成分の少ない x 方向の変位 u の分布が測定されている。

Fig. 6 (b) に対してき裂駆動力の解析を行った。ここ

Fig. 4. SEM micrographs of matching fracture surface of Mode II fatigue crack growth in SUJ2 for $\Delta K_{II} = 4.6 \text{MPa} \sqrt{\text{m}}$, $R = -1$, $da/dN = 5.5 \times 10^{-9} \text{m/cycle}$. Figures (c) and (d) are magnified photo indicated in figures (a) and (b), respectively.

Fig. 6. CCD image (a) and the measured x displacement distribution, u , measured by ESPI method (b) under static $K_I = 10 \text{MPa} \sqrt{\text{m}}$ and $\Delta K_{II} = 3.5 \text{MPa} \sqrt{\text{m}}$.

で、変位分布は繰返し荷重の最大値と最小値の間の相対変化であることから、これによって求められた K 値は、モードⅡ有効応力拡大係数範囲 $\Delta K_{II\text{eff}}$ である。式 (6) の N_t に対して、得られた $\Delta K_{II\text{eff}}$ と式 (7) および式 (8) で定義された変位分布の類似度 R_{NCC} と相違度 R_{SAD} を Fig. 7 に示す。前者は $N_t > 3$ においてほぼ一定値を示しているが、 $N_t = 7$ で極大値となっている。また、後者は N_t の増加に伴って減少し、 $N_t = 7$ で極小値となっている。したがって、 $N_t = 7$ で得られた $\Delta K_{II\text{eff}}$ 値を解析結果として採用した。なお、結果は省略するが、き裂先端座標を表す式 (4) および式 (5) の x_0 および y_0 は、 N_t によらずほぼ一定となった。

同様に求めて求めた $\Delta K_{II\text{eff}}$ 、 ΔK_{II} およびき裂長さ a と繰返し数 N の関係を Fig. 8 に示す。図より、 $\Delta K_{II\text{eff}}$ は ΔK_{II} の増減と必ずしも対応しないことがわかる。これは、き裂面接触が発生し、その状況が常に変化していることを表している。また、 ΔK_{II} を増加させても $\Delta K_{II\text{eff}}$ が低下している場合、 da/dN も低下する傾向が認められる。試験片背面からフレッティング疲労き裂が発生した $N > 4 \times 10^6$

回では、 $\Delta K_{II\text{eff}}$ が大きく低下する傾向を示した。なお、フレッティング疲労き裂の進展挙動については詳細な観察を行っていない。

5 考 察

以上に示したモードⅡ疲労き裂進展特性を Fig. 3 の結果および村上らの結果²⁾と比較して Fig. 9 に示す。村上らは、き裂を開口させる静的負荷は行わず、き裂面接触の影響を摩擦係数 = 1 とし補正している。しかし、き裂面の凹凸がかみ合えば、モードⅡき裂面変位のはるかに大きな抵抗となることが考えられる。すなわち、村上らの方法はモードⅡ疲労き裂進展特性の非保守的の評価を与えていると思われる。一方、Fig. 3 の結果は、静的 K_I を負荷し、き裂面の潤滑も行なって得られたものであり、き裂面接触の影響はほぼ除外できていると思われるが、き裂進展特性は顕著なばらつきを示している。4・3 節の結果から、このばらつきもき裂面接触による有効き裂駆動力の低下によるものと考えられる。本研究で得られた da/dN - $\Delta K_{II\text{eff}}$ 関係（フレッティング疲労き裂の影響域を除く）は、Fig. 3 のき裂進展抵抗の下限値とほぼ一致している。

本研究では、き裂面に平行な圧縮応力 (T 応力) によってモードⅡ疲労き裂を進展させた。降伏応力に近い T 応力は、き裂先端の塑性域寸法を増大させるので、き裂進展特性が T 応力に影響を受けることも考えられる。しかし、T 応力を低下させると、き裂は屈曲して混合モード状態で進展し、モードⅡき裂進展特性に及ぼす T 応力の影響を実験的に求めることはできなかった。現段階では、モードⅡ疲労き裂進展特性をモードⅠ疲労き裂進展特性と同様な損傷許容設計に用いることは難しいが、 da/dN - $\Delta K_{II\text{eff}}$ 関係を材料特性と考えた欠陥評価は、今後のデータの蓄積により可能になるとと思われる。

結果は省略するが、ESPI 法によって u および v の 2 方向の変位分布が測定できるように治具を修正し、低い T 応力で発生する混合モード状態のき裂進展特性とき裂駆動力を検討した。しかし、現状の測定システムでは混合モード状態のき裂駆動力を求めることができなかった。

Fig. 7. Analyzed crack driving force and the variations of R_{NCC} and R_{SAD} with N_t .

Fig. 8. Variations of crack length, a , stress intensity factor range, ΔK_{II} and $\Delta K_{II\text{eff}}$, with the number of cycles, N .

Fig. 9. Comparison of Mode II crack growth characteristics.

き裂が屈曲する力学条件や混合モード疲労き裂進展特性と、そのき裂駆動力の評価は今後の課題である。

6 結 言

本研究では、高炭素クロム軸受け鋼 SUJ2 のモードⅡ疲労き裂進展特性を調べた。また、電子スペックルパターン干渉 (ESPI) 法によって、き裂先端近傍の変位場測定からき裂駆動力を求めた。得られた主な結果は以下のとおりである。

(1) 藤井らによって提案された治具を用いて、SUJ2 のモードⅡ疲労き裂進展特性を評価し、モードⅠ疲労き裂進展特性と比較した。

(2) 米山らによって提案された非線形最小二乗法をもとにした応力拡大係数の評価法を ESPI 法によって測定したき裂先端前方の変位分布に適用し、有効なモードⅡき裂駆動力を求めた。

(3) モードⅡ疲労き裂進展特性は、き裂面接触によって顕著な影響を受ける。き裂面接触は、有効なき裂駆動力を減少させ、き裂進展速度のばらつきの原因にもなっている。

本研究に協力された当時青山学院大学学生・木本 毅君、平山大作君、服部恵子君、同大学院生・又木純子君に感謝する。供試材は(株) NTN の松原幸生博士にご提供いただいた。また、名古屋大学・大塚昭夫 名誉教授およ

び大阪府立大学・米山 聡 講師には貴重なご助言を賜った。さらに、本研究は、東北電力(株)、東京電力(株)、中部電力(株)、北陸電力(株)、中国電力(株)、日本原子力発電(株)からの受託研究として(社)日本溶接協会の MF 委員会で行われたものの一部である。ここに記して感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 藤井幸生, 前田喜久男, 大塚昭夫, 材料, **50**, 1108 (2001).
- 2) 村上敬宜, 福原健人, 濱田 茂, 材料, **51**, 918 (2002).
- 3) A. Otsuka, Y. Fujii, K. Maeda and T. Ogawa, Proc. Inter. Conf. on Fatigue Crack Paths (FCP 2003), ESIS, 021 Otsuka paper. pdf, 8 (2003).
- 4) 又木純子, 小川武史, 実験力学, **3**, 159 (2003).
- 5) 西澤英雄, 小川武史, 第 27 回疲労シンポジウム講演論文集, 109 (2004).
- 6) 米山 聡, 隆 雅久, 実験力学, **1**, 202 (2001).
- 7) 米山 聡, 森本吉春, 隆 雅久, 非破壊検査, **51**, 667 (2002).
- 8) 奥富正敏編, “デジタル画像処理”, p.203 (2004) CG-ARTS 協会.
- 9) 小川武史, 平山大作, 又木純子, 第 26 回疲労シンポジウム講演論文集, 41 (2002).