

## デジタル画像相関法を用いた疲労亀裂先端の両振り 塑性域寸法の測定に関する検討

尾島, 直樹  
九州大学大学院工学府 : 修士課程

村上, 幸治  
九州大学工学部技術室

後藤, 浩二  
九州大学大学院工学研究院海洋システム工学部門

<https://hdl.handle.net/2324/6757890>

---

出版情報 : 溶接学会九州支部講演論文集. (18), pp.21-24, 2021. 九州工業大学大学院工学研究院  
バージョン :  
権利関係 :

# デジタル画像相関法を用いた疲労亀裂先端の 両振り塑性域寸法の測定に関する検討

尾島 直樹\*2 村上 幸治\*3 後藤 浩二\*4

**Key Words:** デジタル画像相関法, 疲労, 両振り塑性域,

## 1. 緒 言

疲労亀裂伝播の駆動源は亀裂先端近傍の両振り塑性域内で不可逆的に消費される引張・圧縮の繰返し塑性仕事であるため、この両振り塑性仕事や両振り塑性領域寸法をパラメータとする疲労亀裂伝播則の構築が期待されている。一方、繰返し負荷中にこれらの値を継続的に測定及び推定することは非常に困難であるため、両振り塑性域寸法よりは相対的に測定が簡単な最大塑性域寸法に基づく伝播則<sup>1)</sup>は提案されたが、亀裂開閉口挙動の影響まで考慮して亀裂伝播中の塑性域寸法履歴を精度良く推定することが困難であるため、亀裂先端に形成される塑性域に基づく疲労亀裂伝播則の構築には至っていない。

一方、山下ら<sup>2)</sup>は弾塑性 FE 解析により亀裂開閉口に伴う亀裂面接触の影響も考慮しつつ、疲労亀裂伝播中の両振り塑性仕事履歴を逐次計算した結果を用いて疲労亀裂伝播履歴の推定を試みている。山下らの方法では、両振り塑性仕事をパラメータとする疲労亀裂伝播則を予め設定することが必要不可欠であるため、一定負荷振幅条件下における疲労亀裂伝播試験結果と弾塑性 FE 解析結果を比較することで伝播則を求め、この伝播則と弾塑性 FE 解析により任意負荷履歴下での疲労亀裂伝播履歴を推定している。本来であれば疲労亀裂伝播試験の測定結果のみから両振り塑性仕事と亀裂伝播速度の関係を与えるべきであるが、従来のひずみゲージを使用したひずみ計測では、亀裂先端近傍の両振り塑性仕事や両振り塑性域寸法を計測することは、ほぼ不可能である。

そこで山崎ら<sup>3)</sup>は、デジタル画像相関法を用いて疲労亀裂先端近傍の両振り塑性域寸法の測定を試みたが、測定数が1件に留まるため、同手法の有用性に関する検証は十分ではない。本研究では山崎らの方法を元に、必要に応じた改善も行いつつ、複数の疲労試験に対して繰り返し負荷中の亀裂先端近傍の両振り塑性域寸法の測定を試み、同手法の有用性を検証しつつ、測定精度向上に向けて改善すべき問題の確認を行った。

## 2. デジタル画像相関法による荷重～塑性ひずみ関係取得

二種類の鋼材を用いて製作した中央貫通亀裂入り（CCT）試験片を用いてエラー! 参照元が見つかりません。に示す条件で疲労亀裂伝播試験（以降、試験1、試験2と称する）を行い、デジタル画像相関法により負荷過程中的亀裂先端近傍におけるひずみの変化履歴を計測し、この結果に対して除荷弾性コンプライアンス法を適用して、サイクルごとの荷重～塑性ひずみ関係（ヒステリシスループ）を取得した。初期亀裂を含まない亀裂長さ11 mmにおける亀裂先端からの距離に応じたヒステリシスループの例を順に Fig. 1, Fig. 2 に示す。Fig. 1 に示す試験1では亀裂先端から遠ざかるにつれてループが閉じていく様子が確認できるが、Fig. 2 に示す試験2では負荷荷重が降伏応力に対して小さいためにひずみの出力値が小さくなり、結果的にノイズの影響を強く受けた。

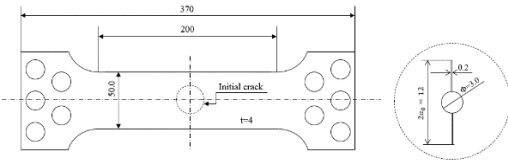
\*1 原稿受付 令和3年8月20日 令和3年度九州支部研究発表会で発表

\*2 九州大学 大学院工学府 修士課程 Master course, Graduate School of Engineering, Kyushu University

\*3 九州大学 工学部技術室 Technical Division, School of Engineering, Kyushu University

\*4 正会員 九州大学 大学院工学研究院 海洋システム工学部門 Member, Department of Marine System Engineering, Kyushu University

Table 1 Test conditions.

	Specimen 1	Specimen 2
Specimen type:	Center cracked tension specimen (CCT)	
Specimen geometries		
Half width (mm):	25	
Half initial crack length (mm):	5.0	
Yield stress of materials (MPa):	427	378
Maximum load (kN):	28.0	17.3
Minimum load (kN):	1.40	1.73
Frequency (Hz):	10	

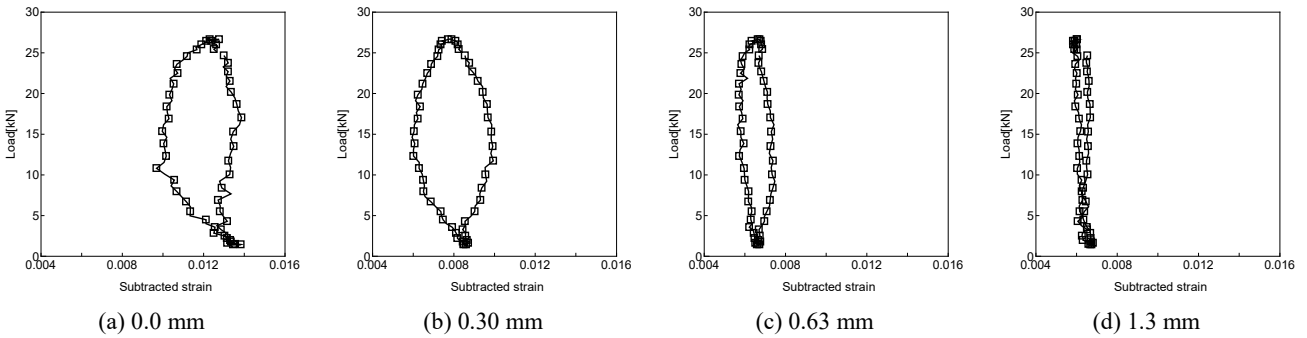


Fig. 1 Transition of hysteresis loops for each distance from crack tip (Experiment 1)

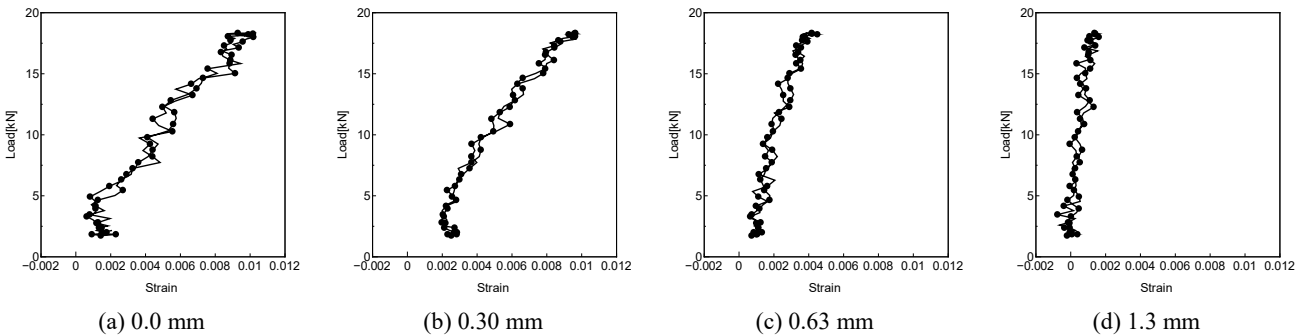


Fig. 2 Transition of measured hysteresis loops for each distance from crack tip (Experiment 2)

### 3. 両振り塑性域寸法の取得

#### 3.1 ループ形状に着目した両振り塑性域寸法の取得

比較的ループ形状が明確であった試験 1 のデータより両振り塑性域を推定する. 両振り塑性域ではループ形状は Fig. 3-(a)のような膨らんだ形状となり, 弾性領域では Fig. 3-(b)のようになる. そのため亀裂線上の複数点においてループ形状を確認し, 亀裂先端から閉じたループを示す範囲までを両振り塑性域寸法とした.

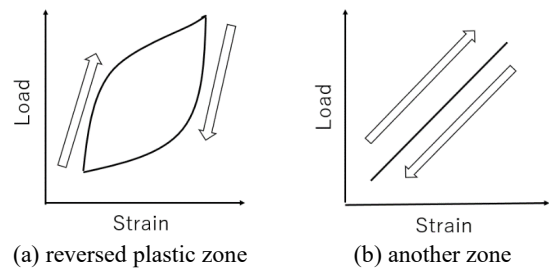


Fig. 3 Transition of hysteresis loop shape

### 3.2 標準偏差

先行研究<sup>3)</sup>と同様にヒステリシスループ形状を標準偏差により評価した。標準偏差は平均からのばらつきを示す評価値なので、両振り塑性域での荷重～ひずみ関係におけるヒステリシスループの膨らみ具合（ループの幅）の標準偏差を計算するとある一定の値を取り、それ以外の領域ではゼロに収束すると考えられる。そこでまず明らかに収束域（弾性域）と考えられる領域の標準偏差の平均を収束値とし、亀裂先端から初めて収束値と等しい値を取るまでを両振り塑性域とした。Fig. 4に亀裂長さ 5.3 mm, 7.0 mm, 11 mm における亀裂先端近傍からの標準偏差の推移と、この結果から確定させた両振り塑性域範囲を示す。

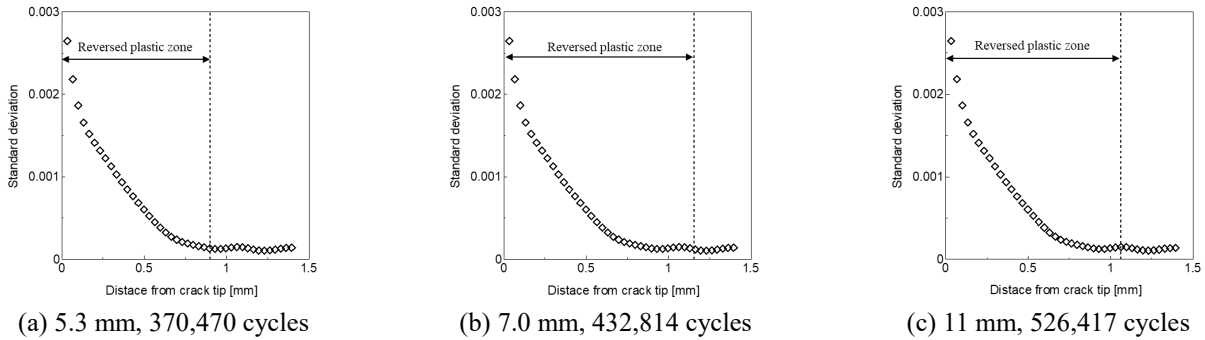


Fig. 4 Transition of standard deviation

### 3.3 重み関数を用いた特殊標準偏差

続いてヒステリシスループの膨らみ具合を評価するため、ノイズの影響を受けにくい評価値として (3.1) 及び (3.2) 式に示す重み付き関数を用いた特殊標準偏差<sup>3)</sup>を採用する。

$$\alpha = \frac{1}{n} \sum w(x, y) \varepsilon_{dsub} \tag{3.1}$$

$$w(x, y) = \sin\left(\frac{\pi}{2} + \frac{2\pi}{W}x\right) \sin\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{d}y\right) \tag{3.2}$$

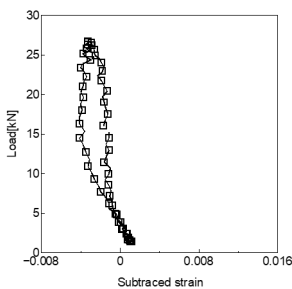


Fig. 5 Example of hysteresis loop

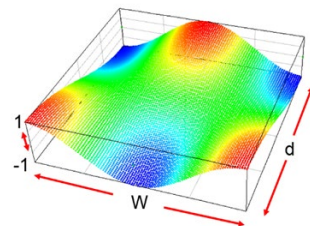


Fig. 6 Weight function

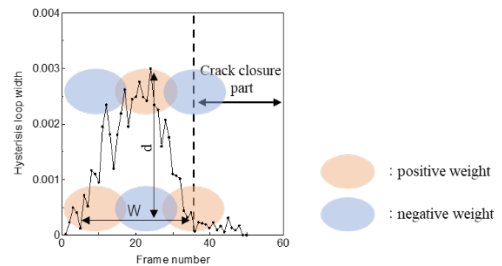


Fig. 7 Example of hysteresis loop width transition and weight function

### 3.4 ロバスト推定法による収束点の決定

塑性域寸法の確定には、重み付き関数を用いた特殊標準偏差の収束点を見つける必要がある。そこで、外れ値の影響を受けにくいロバスト推定法により収束点を決定した。ロバスト推定法により亀裂先端近傍から離れた明らかに収束域（弾性域）とみなせる領域の評価値に対する最小二乗近似曲線と評価値との交点を収束点とし、亀裂先端からその点までの距離を両振り塑性域寸法とした。また、ロバスト推定法において重み関数を用いて誤差の大きな場合に影響が小さくなるように Biweight 法<sup>4)</sup>を導入した。(3.3), (3.5)式のように、各データと近似曲線との誤差  $d$  が許容誤差  $W$  を超えた場合には重みを 0 とし、(3.4)式のように許容誤差内の場合には誤差が 0 に近づくほど重みが増すようになるというものである。今回許容誤差は 20 回収束計算を行ったうち初めの 10 回は最初の近似曲線との誤差の最大値とし、残りの 10 回はその許容値の半分の値とした。Fig. 8に亀裂長さ 5.3 mm, 7.0 mm, 11 mm における亀裂先端近傍からの特殊標準偏差の推移とロバスト推定法による収束域の近似曲線を示す。

・  $d < -W$  のとき

$$w(d) = 0 \tag{3.3}$$

・  $-W \leq d \leq W$  のとき

$$w(d) = \left(1 - \left(\frac{d}{W}\right)^2\right)^2 \tag{3.4}$$

・  $W < d$  のとき

$$w(d) = 0 \tag{3.5}$$

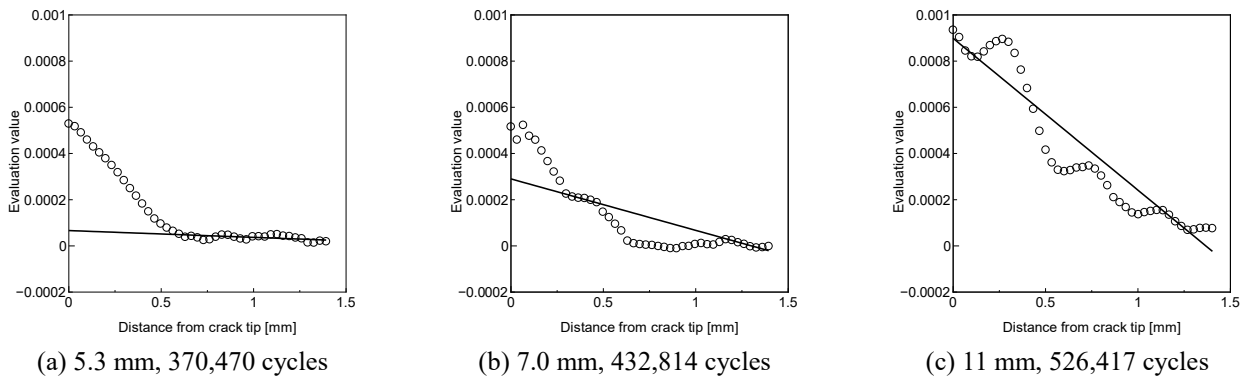


Fig. 8 Transition of weighted deviation value

### 3.5 測定結果の比較

両振り塑性域寸法を測定した結果を Fig. 9 に示す. 比較のため, 豊貞らによる亀裂結合モデルに基づき亀裂開閉口挙動を評価する疲労亀裂成長解析プログラムコード FLARP<sup>5)</sup>による両振り塑性域寸法の推定結果も併せて示す (グラフ上では初期亀裂 5.0 mm を含む). Fig. 9 に示すように, 標準偏差による両振り塑性域寸法の推定は大きめの値を与えた. 一方, 特殊標準偏差に基づく推定では, 測定結果と推定結果の一致の程度は改善すると期待されたが, Fig. 8 に示した評価値の推移グラフ形状が良好であった亀裂長さ 5.3 mm においても推定結果との差は大きいなど, 測定結果が妥当であるとは結論付けられない結果となった.

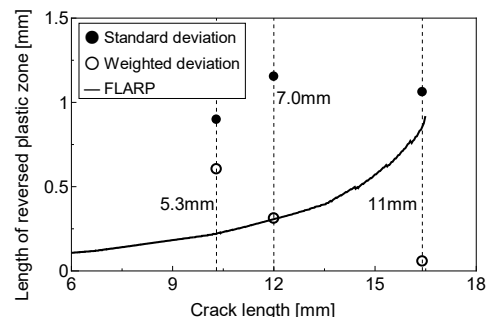


Fig. 9 Comparison of length of reversed plastic zone by DIC and ones by FLARP

## 4. 結 言

デジタル画像相関法により亀裂先端近傍に形成されるひずみ場を測定し, これより抽出したひずみ値の標準偏差を指標とする手法に基づき, 両振り塑性域寸法を決定した. この実験より, ひずみ値が小さい場合はノイズの影響を強く受け, ノイズ影響に強いとされる特殊標準偏差を指標としてもその改善は十分でないことを確認した. そのため, ノイズ影響を極力除去する改善法の導入が不可欠であり, 具体的にはカメラの解像度やシャッタースピード, 試験片へのランダムパターン塗装法の工夫など, 撮影条件の改善が不可欠であることが示唆された.

### 参 考 文 献

- 1) Taira, S and Tanaka, K, Fatigue of Metals, Soc Mat Sci, Japan, 1972;2: 48-58.
- 2) 山下紘平, 後藤浩二, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 2015;21:369-374.
- 3) 山崎正尚, 村上幸治, 後藤浩二, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 2017;25:341-346.
- 4) Beaton, A.E. Tukey, J.W., Technometrics, Vol.16, 1974, pp.147-185.
- 5) Toyosada, M., Gotoh, K. and Niwa, T., Int. J. Fatigue, 2004;26(9): 983-992.