

デジタル画像相関法を用いた両振り塑性域寸法の測定精度向上に向けた検討

アキノ トーレス ルイス
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

松田, 和貴
九州大学大学院工学研究院海洋システム工学部門

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/2324/7325943>

出版情報：溶接学会九州支部講演論文集．21，pp.1-4，2024-11-01．溶接学会九州支部
バージョン：
権利関係：



デジタル画像相関法を用いた両振り塑性域寸法の 測定精度向上に向けた検討

○アキノトーレスルイス*1, 村上幸治*2, 松田和貴*3, 後藤浩二*3

Key Words: 疲労, デジタル画像相関法, 両振り塑性域寸法, ヒステリシスループ

1. 緒 言

機械装置や鋼構造物では繰返し荷重が負荷されると疲労亀裂が発生・成長し、降伏応力よりはるかに小さい応力の下で破壊に至ることがあり、疲労破壊防止のため高精度の疲労亀裂伝播則の確立が課題となっている。

疲労亀裂伝播則としては、破壊力学に基づく ΔK をパラメータとする Paris 則¹⁾ や疲労亀裂の開閉口挙動を考慮した有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff} をパラメータとする Elber 則²⁾ が広く知られている。伝播則の一つに、豊貞ら³⁾ により提案された RPG 応力基準の有効応力拡大係数範囲 ΔK_{RPG} をパラメータとする疲労亀裂伝播則がある。豊貞らは、疲労亀裂伝播の駆動エネルギーは亀裂先端近傍で不可逆的に消費される引張と圧縮の両振り塑性仕事であるとの考えの下、亀裂先端に引張り塑性域が形成される時の荷重である RPG 荷重を基準とした有効応力拡大係数範囲 ΔK_{RPG} と亀裂先端近傍に形成される引張と圧縮の塑性域が重なった領域である両振り塑性域寸法 $\tilde{a}$ との関係を調査し、両者には一意的な関係が成り立つことを亀裂結合カモデルに基づく疲労亀裂伝播シミュレーションの結果より報告した。

亀裂先端近傍の塑性挙動に着目した疲労亀裂伝播則として平ら⁴⁾ は、小規模降伏条件を満たす場合だけでなく大規模降伏条件の場合も含めて、亀裂先端近傍に形成される繰返しすべり帯領域寸法をパラメータとする疲労亀裂伝播則が成り立つことを、光学顕微鏡による直接観察結果より提案した。近年では、勝田ら⁵⁾ から疲労亀裂先端近傍を動画撮影し、PIV 法による画像処理を適用することによる $\tilde{a}$ の測定に関する研究や、米澤ら⁶⁾ からデジタル画像相関法により測定したひずみ場を用いた疲労亀裂発生寿命および伝播速度の推定に関する研究などが報告されており、亀裂先端近傍の塑性挙動に基づくパラメータの実測による取得の機運が高まっている。また、山崎ら⁷⁾ や尾島ら⁸⁾ の先行研究においてもデジタル画像相関法を用いた疲労亀裂先端近傍の両振り塑性域寸法の測定が試みられているが、 ΔK が十分大きい疲労亀裂進展ステージⅡ後半での測定にとどまることや、豊貞らによる亀裂結合カモデルに基づく疲労亀裂伝播シミュレーションの推定結果と十分に一致しないなど、同手法の測定精度向上に関して検討すべき課題が未だ多数残されている。

そこで本研究では、先行研究^{7,8)} を基にした DIC 解析による両振り塑性域寸法の測定技術を用いて、疲労亀裂進展ステージⅡ前半から測定を実施し、疲労亀裂進展ステージⅡでの両振り塑性域寸法 $\tilde{a}$ の測定精度向上に向けて検討した。

2. 供試材及び試験方法

本研究では、溶接構造用圧延鋼材 SM490A (JIS-G3106⁹⁾) を供試材とした。SM490A の化学組成および機械的性質を Table 1 に示す。また、供試材の微細組織はフェライト相とバンド状パーライト組織から構成されている。

疲労試験片は Fig. 1 に示す幅 100 mm、板厚 12.5 mm のコンパクト引張 (CT) 試験片を使用した。CT 試験片の機械切欠き全長は 20 mm であり、機械切欠き先端の 2 mm 分のみワイヤカットにて幅 0.2 mm に加工が施されている。疲労試験は、50 kN 油圧式サーボ試験機を用いて、室温、大気環境下で、周波数 10 Hz、正弦波形で一定振幅の繰返し負荷を実施した。この際、疲労試験中の疲労亀裂周辺のひずみ場は、デジタル画像相関法 (DIC 法) により測定した。試験片表面には白色スプレーで下地を塗装した後、黒色スプレーで上からスペクルパターンを塗布し、DIC 解析用マーカーとした。解析マーカーを施した試験片表面の撮影画像を Fig. 2 に示す。

原稿受付 2024 年 10 月 18 日, 2024 年度九州支部研究発表会で発表

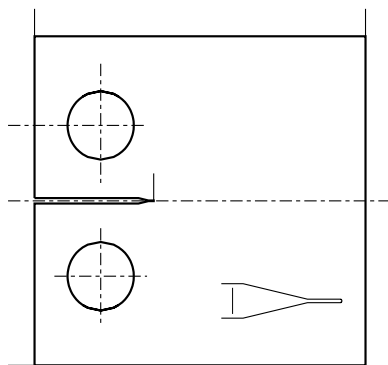
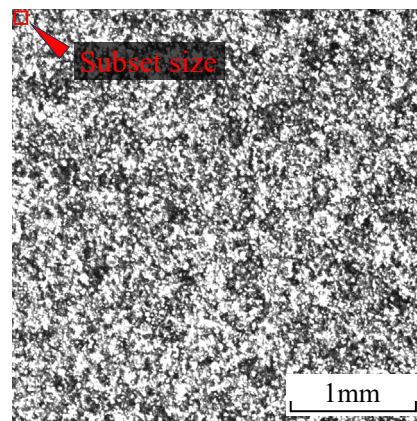
*1 九州大学 大学院工学府 修士課程 Master course, Graduate School of Engineering, Kyushu University

*2 九州大学 工学部技術部 Technical Division, School of Engineering, Kyushu University

*3 正 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. Chemical composition and mechanical properties of SM490A.

Chemical composition [mass %]					Mechanical properties	
C	Si	Mn	P	S	Yield stress [MPa]	Tensile strength [MPa]
0.11	0.26	1.28	0.014	0.003	391	522

**Figure 1. Configuration of CT specimen.****Figure 2. Image of the specimen surface with analytical markers.**

デジタル画像の撮影には、高感度デジタルハイスピードカメラ HAS-DX を、レンズには VS-LTC3.3- 45/FS を使用した。撮影は試験片板厚中心の疲労亀裂長さが 28.0 mm, 34.0 mm, 40.4 mm になった時点で、負荷 1 サイクルあたり 100 枚の画像を取得し、DIC 解析に用いた。解析には商用解析ソフト DaVis StrainMaster を使用し、サブセットサイズを 37 pixel, ステップサイズを 9 pixel のオーバーラップ率約 75%の条件で解析を実施した。なお本研究では、DIC 解析による亀裂先端近傍のひずみ場測定結果の妥当性を検証するため、弾塑性 FE 解析を実施した。弾塑性 FE 解析には、汎用弾塑性 FE 解析コード MSC Marc2024.1 を使用した。また解析は、亀裂長さを DIC 解析時と揃えて、疲労試験と同じ荷重振幅条件で最大荷重から負荷 1 サイクルを与え、亀裂先端近傍のひずみ場を計算した。試験片に荷重を加える際、CT 試験片のピン部と同じ半径の形状要素を剛体としてモデリングし、剛体に加わる荷重を制御して接触解析を行った。応力ひずみ関係には、疲労試験片と同じ材料の丸棒引張試験から取得した引張強さおよび降伏点を真応力真ひずみ関係に変換し、その 2 点を通る直線を降伏後の応力ひずみ線図として使用した。疲労試験条件を Table 2 に、DIC 解析の条件を Table 3 にそれぞれ示す。

Table 2. Fatigue test conditions.

Test ID	SM490-242-1	SM490-242-2	SM490-242-3
Maximum load [kN]	9.7		
Stress ratio	0.1		
Crack length [mm]	28.0	34.0	40.4
Stress intensity factor range [MPa*m ^{0.5}]	11.8	13.8	16.2
Speckle pattern printing	White and black spray paints.		

Table 3. DIC analysis conditions.

Image size [pixel]	1920×1080
Image resolution [μm/pixel]	3
Subset size [pixel]	37
Step size [pixel]	9
Filter size [pixel]	9
Reference image	At minimum load.

3. 測定結果

DIC 法を用いて測定したひずみに、除荷弾性コンプライアンス法を適用し、ヒステリシスループを取得した。取得したヒステリシスループを介して、測定点での塑性変形の有無を評価した。DIC 法を用いて各疲労試験において測定したひずみ値から取得した荷重と引き算ひずみ関係の例として、Table 4 に記す亀裂先端からの距離が

異なる 5 点の荷重と引き算ひずみの関係を整理した．整理した荷重と引き算ひずみ関係の結果を Fig. 3 に示す．なお，Fig. 3 の各図においては，DIC 解析と FE 解析結果のループ形状の比較するために，DIC 解析の代表例 ID1 とほとんど同じ位置での FEM により計算された荷重と引き算ひずみの関係を重ねて描画している．

Table 4. Representative points at relationship between load and subtracted strain.

Representative example ID	ID1	ID2	ID3	ID4	ID5
Distance from crack tip [mm]	0.0553	0.136	0.217	0.297	0.378

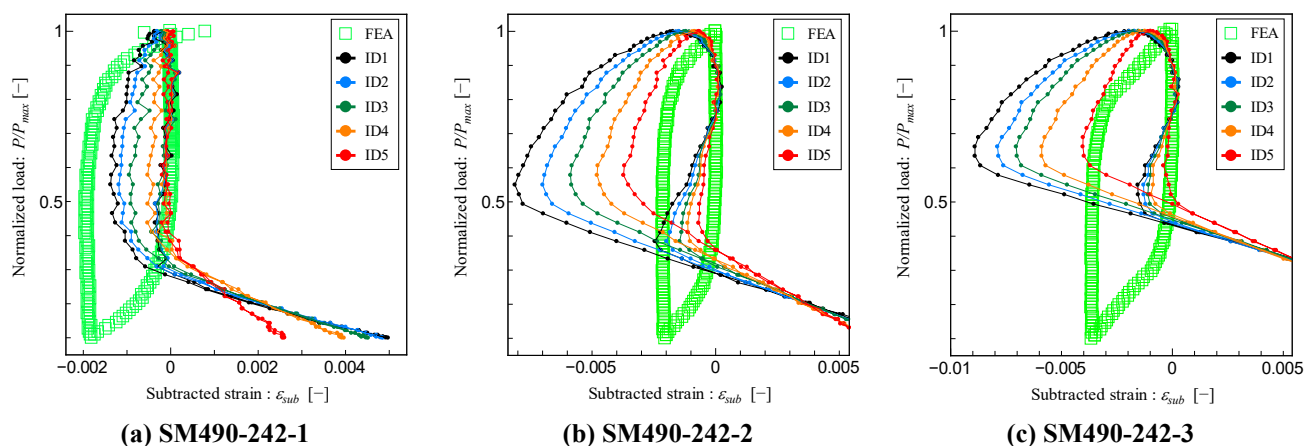


Figure 3. Relationship of load and subtracted strain measured by DIC method.

Fig. 3 に示したように，塑性変形が起こるとヒステリシスループは膨らんだ形状を呈する．いずれの試験においても亀裂先端近傍の測定データである ID1 において，ヒステリシスループは最も膨らんだ形状となっており，亀裂先端から遠ざかるにつれて次第に潰れた形状への遷移が確認できる．ところで，山崎ら⁷⁾は，荷重と引算ひずみの関係における標準偏差を計算し，亀裂先端からこの値が収束し始める点までを両振り塑性域とみなせると提案した．本研究においても同手法により DIC 解析画像から疲労試験における両振り塑性域寸法を評価した．FE 解析および DIC 解析の亀裂線上の荷重と引算ひずみの関係における標準偏差分布を Fig. 4 に示す．

また，Fig. 4 では標準偏差を計算する際，ループの亀裂閉口部である引き算ひずみ値が 0 を超えるデータを除外した結果（DIC ≤ 0）も重ねて描画している．なお，Fig. 4 の各図における黒点線は FE 解析結果に基づく両振り塑性域寸法 $\tilde{\omega}$ を，赤点線は DIC 解析結果に基づく両振り塑性域寸法 $\tilde{\omega}$ を，そして青点線はループの亀裂閉口部を除外した DIC 解析結果に基づく両振り塑性域寸法 $\tilde{\omega}$ をそれぞれ示している．

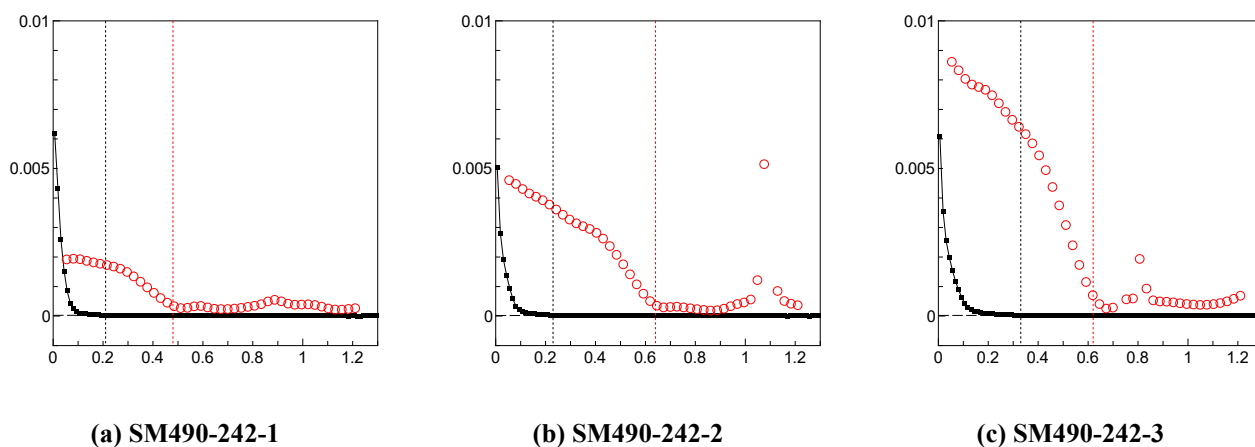


Figure 4. Transition of standard deviation on the crack line for the DIC and FE analyses.

Fig.4 より，DIC 解析の標準偏差が FE 解析の標準偏差に比べて大きいことが確認される．これは，Fig. 3 に示すループの亀裂閉口部が引き算ひずみの分布範囲を正の方向に拡大させ，データの分布範囲拡大が標準偏差の増大に影響した結果であると考えられる．そのため $DIC \leq 0$ の結果では，ループの亀裂閉口部を除外したことで標準偏差は全体的に小さくなり，それに伴って両振り塑性域寸法の推定値は FE 解析結果から取得した両振り塑性域寸法の推定値に近づいたことが確認できる．

本研究で実施した疲労試験条件において測定した両振り塑性域寸法の一覧を Table 5 に示す．Table 5 より，DIC と FEA の両振り塑性域寸法の推定値には 0.3 から 0.4 mm 程度の差が確認できる．Fig. 3 より，DIC 解析によるヒステリシスループは比較的ノイズが小さく良好に取得できており，亀裂面への接触要素の導入や繰返し負荷条件下の応力ひずみ関係の導入など妥当性検証に用いている FE 解析モデル見直しの必要性が考えられる．

Table 5. Estimation results of alternating plastic zone dimensions in DIC and FE analyses.

Test ID	SM490-242-1	SM490-242-2	SM490-242-3
DIC [mm]	0.48	0.64	0.62
$DIC \leq 0$ [mm]	0.35	0.59	0.53
FEA [mm]	0.21	0.23	0.33

4. 結 言

本研究では，DIC 解析による両振り塑性域寸法の測定技術を用いて，疲労亀裂進展ステージⅡ前半から測定を実施し，疲労亀裂進展ステージⅡでの両振り塑性域寸法 a の測定精度向上に向けて検討を行った．以下に本研究で得られた知見ならびに考察を示す．

- 1) 疲労試験において，疲労亀裂進展ステージⅡで比較的ノイズの少ないループを取得することができた．
- 2) DIC 法の測定値と FE 解析から得られた両振り塑性域寸法は約 0.3～0.4 mm 程度の差が確認された．
- 3) 差異の原因は FE 解析モデルの作成において，亀裂の開閉口挙動を考慮したモデル化（亀裂面への接触要素の導入）ができていないこと，および単調負荷の応力ひずみ関係をバイリニアモデルで与えており繰返し負荷条件下の応力ひずみ関係を与えられていないことが考えられ，今後これらを考慮したモデリングが必要であると考えられる．

謝 辞

本研究の一部は，JSPS 科研費 JP23K26319 の助成を受けたものである．

参 考 文 献

- 1) P. C. Paris and F. Erdogan : A Critical Analysis of Crack Propagation Laws, Journal of Basic Engineering, Transactions of the ASME, Series D, Vol.85, No.4, pp.528-534, 1963.
- 2) W. Elber : The Significance of Fatigue Crack Closure, ASTM STP-486, pp.230-242, 1971.
- 3) M. Toyosada, K. Gotoh and T. Niwa : Fatigue crack propagation for a through thickness crack : a crack propagation law considering cyclic plasticity near the crack tip, International Journal of Fatigue, Vol.26, No.9, pp.983-992, 2004.
- 4) 平修二，田中啓介：光学顕微鏡による冷間圧延加工した低炭素鋼材の疲労き裂伝ば過程の観察，材料，Vol.18, No.190, pp.620-626, 1968.
- 5) 石井成政，白石麻理子，勝田順一：PIV 法による CT 型試験片の疲労亀裂伝播中の挙動評価，溶接学会九州支部講演論文集，No.14, pp.35-38, 2017.
- 6) 米澤隆行，羅鵬軍，堤成一郎：局所ひずみに基づく繰返し軟化特性の異なる構造用鋼の疲労亀裂発生・伝播特性評価，鉄と鋼，Vol.110, No.1, pp.15-24, 2024.
- 7) 山崎真尚，村上幸治，後藤浩二：デジタル画像相関法を用いた疲労亀裂先端近傍の両振り塑性域寸法の測定，日本船舶海洋工学会講演会論文集，No.25, 2017A-GS2-14, pp.341-346.
- 8) 尾島直樹，村上幸治，後藤浩二：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，溶接学会九州支部講演論文集，No.18, pp.21-24, 2021.
- 9) JIS G 3106，溶接構造用圧延鋼材，2015.