

二次元局所Hurst数を利用した破面特性化手法と、 ストレッチゾーン幅の定量解析による J_{Ic} 推定への応用

山際 謙太*, 本田 尚*

Method for Characterizing Fracture Surface using Two-Dimensional Local Hurst Exponent, and its Application to the Estimation of J_{Ic} based on the Quantitative Evaluation of Stretched-Zone Width

by Kenta YAMAGIWA* and Takashi HONDA*

Abstract: Fractal analyses have been widely used to characterize the fracture surface. It has been recognized that the local Hurst exponent, which is based on the concept of self-affine fractal, is useful to detect the transition point of fracture surface. For the calculation of the local Hurst exponent, a high resolution profile is needed. To measure the profile, however, much time and effort are needed. Therefore, it is difficult to calculate all profiles of fracture surface and evaluate the feature of fracture surface in detail.

In this study, a new method to calculate the two-dimensional local Hurst exponent is proposed. It is realized to evaluate the feature of fracture surface using the local Hurst exponent. To investigate the validity of the two-dimensional local Hurst exponent, the calculation was applied to the gray-scaled images in which the stretched zone was observed and the width of stretched zone (SZW_c) was measured. Consequently, SZW_c calculated by the two-dimensional local Hurst exponent and detected by the human observation have the good agreement. Therefore, it was found that the two-dimensional local Hurst exponent is useful to detect the transition point of fracture surface.

Keywords; Fractal, Fractography, Fracture Mechanics, Numerical Analysis, Wavelet Transform

1. 緒言

事故の原因究明に、破面解析は重要な役割を担っている。近年は、客観性のある破面評価技術が必要とされており、多くの数値解析手法が提案されてきた¹⁾。また、破面数値解析は解析初心者に対する解析支援の観点からも着目されている。

破面数値解析の中で、フラクタル解析は、観察倍率に依存しないフラクタル次元を用いて破面の複雑さを評価する手法であり、複雑系への注目と共に発展してきた²⁾⁻¹⁰⁾。これまでに提案されたフラクタル解析は、

1 破面画像から1つのフラクタル次元を求め、破壊機構を論ずるものが多い²⁾⁻⁸⁾。しかし、例えば破面率からの作用応力推定¹¹⁾のように、破面の局所的な情報が破断時の状態を示す場合もある。泉⁹⁾らは、フラクタル解析により破面を特性化する際、等方的な自己相似より異方的な相似性を示す自己アフィンフラクタルで特徴付けるほうが有効であることに着目した。そして、プロファイル(縦断面)に対して、自己アフィンの指標である局所Hurst数を定義した。

局所Hurst数の計算には破面の高解像度のデータが必要であるが、複数の高解像度プロファイルの計測は困難であることも指摘されており、泉らは1本の一次元プロファイルを詳細に計測した⁹⁾。しかし、破面全

* 機械システム安全グループ Mechanical and System Safety Research Group

体の性質を特性化するためには複数のプロファイルの解析が必要である。

これらの問題に対して、本論文では、二次元の複雑さを示す二次元局所Hurst数を提案する。二次元化することで、破面の情報を一次元より多く利用することが出来るため、低解像度のデータを用いても特性化が可能になると考えた。また、二次元局所Hurst数の有効性の検証のために、破面の濃淡画像を使用して限界ストレッチゾーン幅 ($SZWC_c$) の評価を行う。

疲労き裂進展の後に過荷重破断した試験片から得られる $SZWC_c$ は、限界き裂先端開口変位 (CTOD) や弾塑性破壊じん性値 J_{Ic} との対応が良いことが指摘されている^{1), 12)}。従って、 $SZWC_c$ から、破壊時の J_{Ic} がわかり、破断荷重の推定も可能になる。しかし、従来の $SZWC_c$ は、目視により定性的に評価されてきたため、客観的な評価を行う必要がある。駒井らは、3次元形状の断面曲線を用いて $SZWC_c$ を計測する研究を行ったが、ストレッチゾーンの高さが十分に無い場合は検出が難しいと報告している¹³⁾。これに対して、濃淡画像は電子顕微鏡で撮影が可能であるため、濃淡画像による評価が可能であれば $SZWC_c$ を従来より簡単に計測することが出来る。本研究では、濃淡画像におけるストレッチゾーンの特徴と二次元局所Hurst数の性質に着目して、 $SZWC_c$ を決定した。

2. 二次元局所Hurst数の数値算出法の提案

等方的に縮尺を変化させた時に相似性を示す図形を、自己相似フラクタル図形という。これに対し、異方的に縮尺を変化させた時に相似性を示す図形を自己アフィンフラクタル図形と呼ぶ⁹⁾。つまり、画像に関する関数 $I(x, y)$ があるときに $x \rightarrow \lambda x$ という変換を行った時、

$$h(x, y) \equiv \lambda^{-H} I(\lambda x, \lambda y) \quad (1)$$

の関係が存在するものを自己アフィンフラクタル図形と呼ぶ。ここで H はHurst数である。 H は $0 \sim 1$ の値であり、小さいほど図形が複雑である。破面の濃淡画像が局所においても自己アフィンフラクタル図形であると仮定し、濃淡画像 $h(x, y)$ の任意の場所 (x_0, y_0) における二次元局所Hurst数を算出する方法について述べる。

濃淡画像 $h(x, y)$ において、

$$h_{x_0, y_0}(x, y) = h(x + x_0, y + y_0) - h(x_0, y_0) \quad (2)$$

と定義するとき、式(1)より (x_0, y_0) 近傍においても、

$$h_{x_0, y_0}(x, y) \equiv \lambda^{-H} h_{x_0, y_0}(\lambda x, \lambda y) \quad (3)$$

が成立するとする。

本研究では、濃淡画像の二次元局所Hurst数を計算するために、信号・画像の局所的な相似構造を調べるのに有効な手法である二次元ウェーブレット変換を使用した^{9), 14)}。

二次元ウェーブレット変換の基礎式を式(4)に示す。

$$W(h(x, y), a, b_x, b_y) = \frac{1}{a} \iint \psi \left(\frac{x - b_x}{a}, \frac{y - b_y}{a} \right) h(x, y) dx dy \quad (4)$$

ψ はマザーウェーブレットであり、局在化した関数である。 $\bar{\quad}$ は複素共役を示す。また、 a はスケール、 b_x, b_y は位置のパラメータである。従って、 a を変化させることで画像の相似構造を調べることができ、 b_x, b_y により画像の局所的な特徴の評価ができる。

ここで、式(3)を式(4)に代入すると、

$$\begin{aligned} W(h_{x_0, y_0}(x, y), a, b_x, b_y) & \\ \equiv \frac{1}{a} \iint \psi \left(\frac{x - b_x}{a}, \frac{y - b_y}{a} \right) \lambda^{-H} h_{x_0, y_0}(\lambda x, \lambda y) dx dy & \\ = \lambda^{-H-1} \frac{1}{\lambda a} \iint \psi \left(\frac{x - \lambda b_x}{\lambda a}, \frac{y - \lambda b_y}{\lambda a} \right) h_{x_0, y_0}(x, y) dx dy & \\ = \lambda^{-H-1} W(h_{x_0, y_0}(x, y), \lambda a, \lambda b_x, \lambda b_y) & \end{aligned} \quad (5)$$

と変形される。さらに式(2)とマザーウェーブレットのアドミッシブル条件¹⁴⁾より、

$$\begin{aligned} W(h_{x_0, y_0}(x, y), \lambda a, \lambda b_x, \lambda b_y) & \\ = W(h(x + x_0, y + y_0) - h(x_0, y_0), \lambda a, \lambda b_x, \lambda b_y) & \\ = W(h(x, y), \lambda a, \lambda b_x + x_0, \lambda b_y + y_0) & \end{aligned} \quad (6)$$

となり、

$$W(h_{x_0, y_0}(x, y), a, b_x, b_y) = \lambda^{-H-1} W(h(x, y), \lambda a, \lambda b_x + x_0, \lambda b_y + y_0) \quad (7)$$

と変形される。

従って (x_0, y_0) の近傍においてスケールのパラメータ a に関して、

$$W(h(x, y), a, x_0, y_0) \propto a^{H+1} \quad (8)$$

のべき乗則が成立する。つまり、スケール a とウェーブレット係数 $W[h(x, y)](a, x_0, y_0)$ を両対数グラフにプロットした際に、傾きから1引いた値が二次元の局所Hurst数である。そして、 (x_0, y_0) に画像内の画素位置を割り当てることで、画像全体の二次元局所Hurst

数の計算が可能になる。

しかし、局所Hurst数は非常にゆらぎが大きく、式(8)を用いて局所Hurst数の分布を求めても、破面を特性化することは困難であることが指摘されている^{9), 15)}。また、べき乗則の収束性も低いと指摘されている¹⁵⁾。そこで、ゆらぎを抑えるために、Simonsen¹⁵⁾らがHurst数の算出に用いたAveraged Wavelet Coefficient法(AWC法)を二次元局所Hurstに拡張して用いた。具体的には、次式のようにウェーブレット係数の絶対値を x, y 方向について平均化して局所Hurst数の計算を行う。

$$\overline{|W(h(x,y), a, x_0, y_0)|} = \frac{1}{w^2} \sum_{y=y_0-\frac{1}{2}w}^{y=y_0+\frac{1}{2}w} \sum_{x=x_0-\frac{1}{2}w}^{x=x_0+\frac{1}{2}w} |W(h(x,y), a, x_0, y_0)| \quad (9)$$

そして、 $\overline{|W(h(x,y), a, x_0, y_0)|}$ と a とのべき乗則から求まる H により破面の特性化を行う。 H は、式(9)から画像内の (x_0, y_0) を中心とする縦(x)、横(y)方向の大きさ w の周辺領域の特徴を含んだ量である。従って、 H は、 $H(x_0, y_0)$ と表記する。泉ら⁹⁾の用いた局所Hurst数はある縦断面曲線の線の複雑さを評価していたのに対し、 $H(x_0, y_0)$ は面の複雑さを示す特徴量であり、これを破面全体にわたり評価できる点が本研究の特徴である。

3. 実破面の解析手法

前章に提案した二次元局所Hurst数を用いて、実破面に観察されるストレッチゾーンの領域を同定する手法について述べる。

3.1 ストレッチゾーン領域の同定手法

本論文では、 SZW_c は、破面内の個々の縦方向のプロファイルにおける幅よりは、むしろ破面全体における平均的な幅を求めることが大切であると考え、Fig. 1にしめす二次元局所Hurst数のプロットには $H(x_0, y_0)$ を x_0 方向に平均化した値($\overline{H(y_0)}$)をプロットして SZW_c の評価を行った。また、解析する画像をSEMで撮影する際に、ストレッチゾーンを予め目視で判断し、 x_0 方向に平行になるように撮影する必要がある。

ストレッチゾーン領域は、延性・疲労破面の領域と比較して、平坦である。従って、Fig. 1に示すように x_0 方向に平均化した二次元局所Hurst数はストレッチゾーンの領域で、最大値になる。一方、延性・疲労破面は、材料や破壊条件により形状が異なるため、 x_0 方

向に平均化した二次元局所Hurst数の、大小の比較が困難である。しかしながら、 x_0 方向に平均化した二次元局所Hurst数が最大であればストレッチゾーンである可能性が高いことから、まず x_0 方向に平均化した二次元局所Hurst数の最大値を含む山の領域をストレッチゾーンに対応した領域であると決定する。そして、 x_0 方向に平均化した二次元局所Hurst数が最大となる位置を L_s とする。次に、最大値を含む山の前後がストレッチゾーン領域であると考え、前後の極小値を取る位置 L_f, L_d を求める。ここで、 L_f は疲労破面からストレッチゾーンへ遷移し始める領域、 L_d はストレッチゾーンから延性破面への遷移が終わった領域と考えられる。つまり、Fig. 1に示す L_f と L_d の差である SZW_H はストレッチゾーンだけでなく、前後の疲労・延性破面領域からストレッチゾーンへの遷移領域も含まれている。遷移領域の幅を削除するために、本論文では SZW_c を SZW_H の半分の値と定義した。

3.2 解析対象の試験片と破面画像

ストレッチゾーン幅の評価に使用した供試材は、圧力配管用炭素鋼配管STPG370である。試験片形状はChevronノッチ付CT試験片とした。弾塑性破壊じん性試験は米国材料試験協会規格(ASTM E1820)¹⁶⁾に準じて、除荷コンプライアンス法により実施した。試験温度は実機使用温度を想定し、200℃とした。試験片は6本破断させ、その内 J_{Ic} の判定条件を満たす4本について、個々の試験片から3箇所の破面画像を作成して解析を行った。

破面観察には、高分解能走査型電子顕微鏡(エリオニクス製ERA-4000)を用いた。き裂進展方向は画像上向きとした(Fig. 2)。観察倍率と画像の解像度は、400倍かつ800×600画素である。観察倍率は顕微鏡1視野において、目視の判断で、疲労破面とストレッチゾーンと延性破面の面積比率がおおよそ2:1:2となり、ストレッチゾーンを挟む両破面の特徴が十分に現れている観察倍率を選定した。画像の濃淡の分解能は256階調である。

二次元局所Hurst数の計算の条件として、AWC法を行うための w に18μmを使用した。 w が大きければ収束性は向上するが、ストレッチゾーンより広くなると SZW_c を検出しにくくなると考え、目視により判断した SZW_c の半分程度を w として選定した。また、ウェーブレット変換は離散ウェーブレット変換を用い、マザーウェーブレットにはDaubechies(N=2)のウェーブレット¹⁷⁾を使用した。計算時間はCPUがIntel Pentium Xeon 2.2GHz、OSはLinuxの計算機にて90

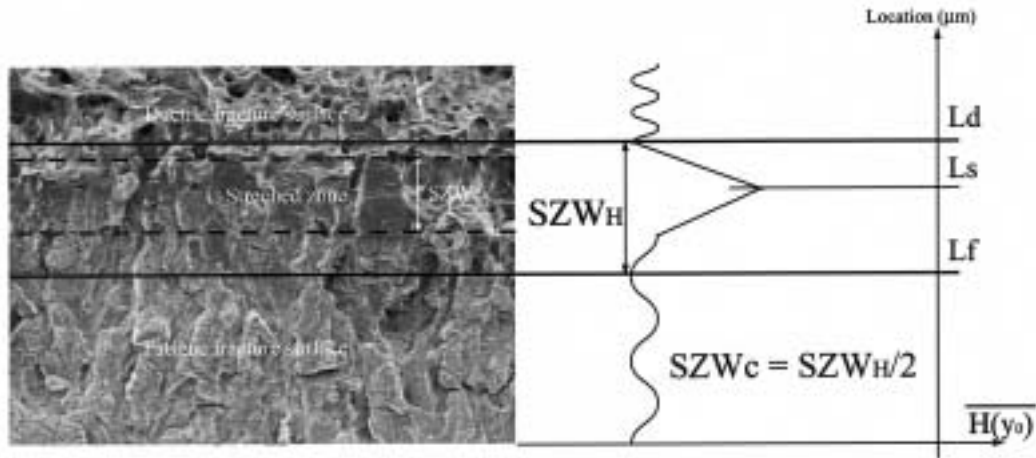


Fig. 1 Illustration of SZW measurement using two-dimensional Hurst exponents averaged over x_0 direction (H). x_0 方向に平均化した二次元局所Hurst数を用いたSZW計測方法の模式図

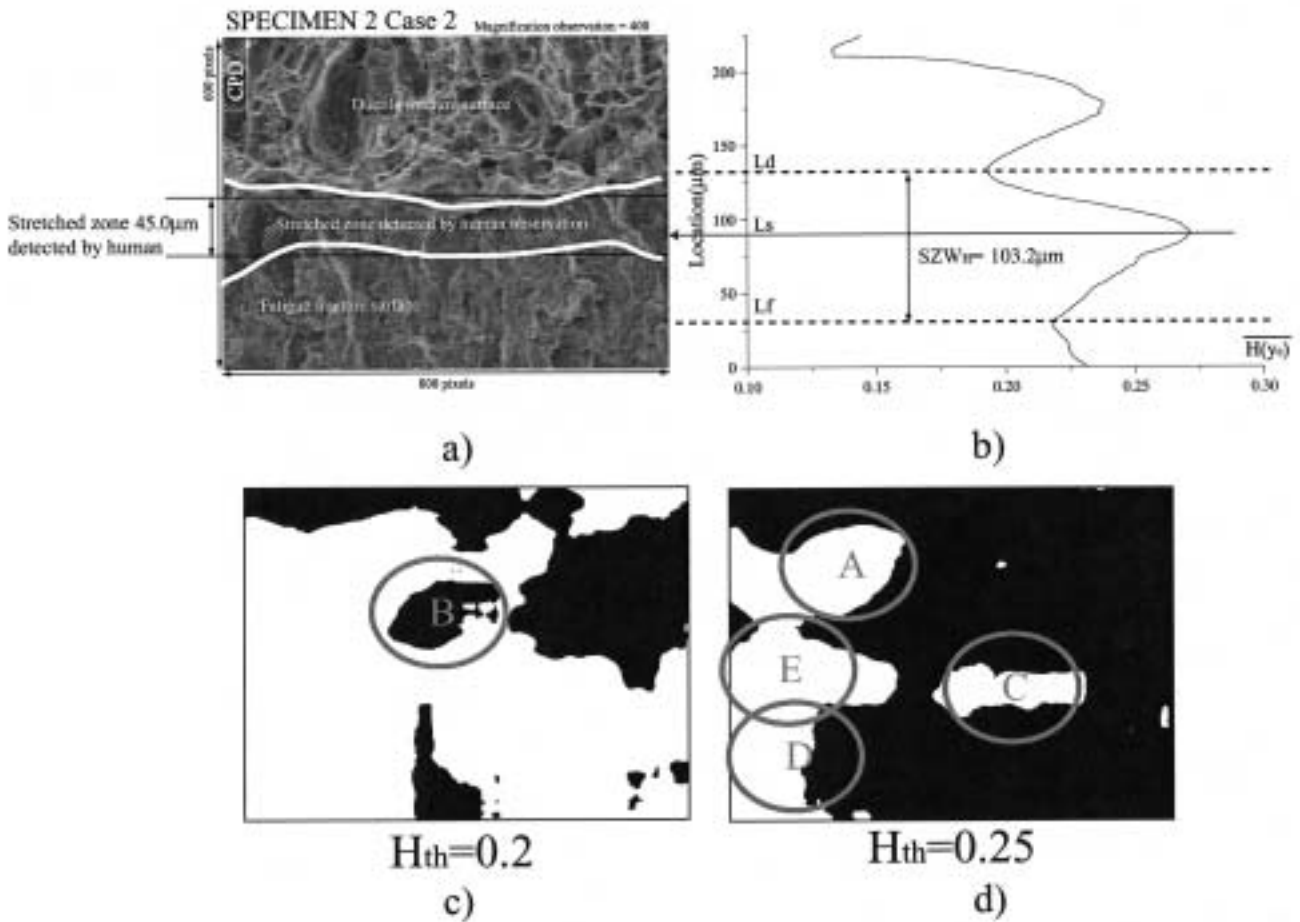


Fig. 2 Distribution of two-dimensional local Hurst exponent and stretched zone detected by our proposed method. a) Gray scaled image of fracture surface. b) Relationship between two-dimensional Hurst exponent averaged over x_0 direction and the location. c) Distribution of two-dimensional local Hurst exponent ($H_{th}=0.2$). d) Distribution of two-dimensional local Hurst exponent ($H_{th}=0.25$)
 提案手法により求めた二次元局所Hurst数の分布と特定されたストレッチゾーン。 a) 破綿の濃淡画像。 b) x_0 方向に平均化された二次元局所Hurst数と位置の関係。 c) しきい値 $H_{th}=0.2$ としたときの二次元局所Hurst数の分布。 d) しきい値 $H_{th}=0.25$ とした場合の二次元局所Hurst数の分布。

分程度である。

4. 解析結果

解析に用いたSEM画像の中から、解析結果の例をFig. 2に示す。

aは解析に用いた破面画像である。破面内に白実線により示す領域は目視によりストレッチゾーンと判定した領域である。目視による評価は、提案手法により評価されたストレッチゾーン領域の妥当性を評価するために行った。bはき裂進展方向の位置と $\overline{H}(y_0)$ の関係である。c, dは、二次元局所Hurst数の分布を示し、しきい値($H_{th}=0.2, 0.25$)より大きい(平坦)部分を白で表した。

Fig. 2のcから、画像の下側の方が上側と比較して白の領域が多いことがわかる。これは一般に疲労破面は延性破面と比較して平坦¹³⁾なためである。

また、延性破面領域で二次元局所Hurst数が大きい領域は、サイズの大きいディンプルの底に対応していると考えられる。例えば、Fig. 2のAは、破面画像に観察される大きいディンプルの平坦な底に対応している。一方、Bは小さいディンプルの集合であるため、二次元局所Hurst数が小さい。

ストレッチゾーンに関しては、Fig. 2のdに示すように、疲労、延性破面より、平坦な領域であることがわかる。また、しきい値を適切に設定することにより、Cのように目視とよく対応したストレッチゾーンの判定が可能であることがわかる。しかしながら、AやDの領域のように、延性破面や疲労破面側でも、ストレッチゾーンと同様に平坦な領域が存在するため、Eのようにストレッチゾーンが明瞭に判定できない領域も存在する。

しかし、延性、疲労破面に関しては、横方向に平均化した場合は、ストレッチゾーンより複雑であることがわかる。従って、横方向に二次元局所Hurst数を平均化することで、ストレッチゾーンを明瞭に判定することができると考えられる。

Fig. 2のbから、提案手法にて判定されたストレッチゾーンの領域は、目視で判定された領域とよく重なっていることがわかる。これは、ストレッチゾーンの二次元局所Hurst数が他の領域と比較して平均的に大きいからであると考えられる。また、延性破面側にある極大値は、破面左上の大きなディンプルが原因である。従って、Fig. 1に示す解析モデルの妥当性を示すことができた。

次に、各試験片において、提案手法を用いて求めた3箇所 SZW_c の平均値と標準偏差をTable 1に示す。

Table 1 Result of quantitative evaluation of SZW_c (μm) by two-dimensional local Hurst exponent averaged over x_0 direction and by human observation.
 x_0 方向に平均化された二次元局所Hurst数により定量評価した SZW_c と目視観察により評価した SZW_c の結果

		SZW_c (μm)	Average (μm)
SPECIMEN 1	Case 1	45.9	43.4±2.00
	Case 2	41.1	
	Case 3	43.1	
SPECIMEN 2	Case 1	35.4	47.3±8.51
	Case 2	51.6	
	Case 3	54.9	
SPECIMEN 3	Case 1	35.3	33.2±3.19
	Case 2	28.7	
	Case 3	35.6	
SPECIMEN 4	Case 1	47.6	42.0±4.05
	Case 2	38.4	
	Case 3	39.8	

5. 考察

5.1 ストレッチゾーン領域の評価

判定されたストレッチゾーンの境界の妥当性について考察する。 L_f , L_d の位置は、目視により決まった領域と一致はしないが、近い範囲で一致している必要がある。

Fig. 2のbより、ストレッチゾーンと延性破面の境界は、目視と計算結果がよく対応していることがわかる。しかしながら、ストレッチゾーンと疲労破面の境界は、よい一致が得られなかった。次に、その原因について述べる。

ディンプルの深さを計測した駒井らの研究¹³⁾によると、ディンプルの深さは数 μm である。また、画像から判別できるようにディンプルの大きさは数十 μm である。これに対し、ストライエーションの高さを計測した古川らの研究¹⁸⁾によると数百nmであり、ストライエーションの間隔は実験段階で疲労予き裂を $\Delta K=10\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ と小さい値で導入していることから数十nmである。つまり、疲労破面は、延性破面と比較して非常に小さい構造で形成されている。従って、疲労破面側の境界のほうが延性破面側の境界と比較して精度良く検出できなかったと考えられる。

Table 2 Result of quantitative evaluation of SZW_c by human observation, one-dimensional local Hurst exponent averaged over x_0 direction and J_{Ic} . A : SZW_c evaluated by human observation. (μm) B : SZW_c evaluated by one-dimensional local Hurst exponent averaged over x_0 direction. (μm)
 目視観察と x_0 方向に平均化された一次元局所Hurst数を用いて定量評価した SZW_c と、 J_{Ic} の結果。
 A : 目視評価による SZW_c (μm). B : x_0 方向に平均化した一次元局所Hurst数を用いて評価した SZW_c (μm)

	A	B	$J_{Ic}(kJ/m^2)$
SPECIMEN 1	38.4 ± 3.0	95.7 ± 1.1	134.5
SPECIMEN 2	43.4 ± 1.8	100.0 ± 5.3	92.0
SPECIMEN 3	39.3 ± 7.7	×	81.2
SPECIMEN 4	40.9 ± 1.9	75.7 ± 20	79.1

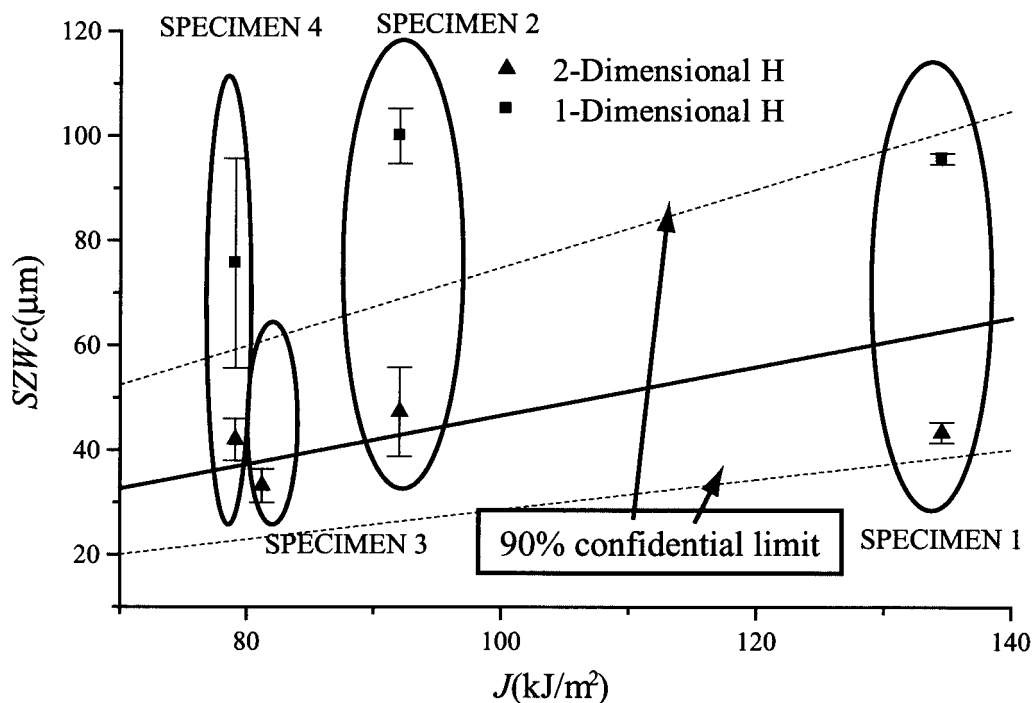


Fig. 3 Relationship between J-integral and stretched zone width. ▲ and ■ indicate SZW evaluated by proposed method and 1-dimensional hurst exponent, respectively.
 J積分とストレッチゾーン幅の関係。▲と■はそれぞれ提案手法により計測した SZW と x_0 方向に平均化した一次元局所Hurst数を用いて計測した SZW を示している。

5.2 SZW_c の評価

提案手法で求めた SZW_c の評価のため、目視と一次元局所Hurst数を用いて SZW_c を求めた。計算方法を次に示す。

- 画像からある x_0 に関して、 y 方向に濃淡と位置の関係を抽出($h(x_0, y)$)
- $h(x_0, y)$ から一次元局所Hurst数を計算($H(x_0, y)$)
- 全ての x_0 について $H(x_0, y)$ を求め、 x_0 に関して平均化
- Fig. 1 に従い、 SZW_c を算出

結果をTable 2に示す。また、実験から得られている各試験片毎の J_{Ic} も合わせて示す。一次元局所Hurst数を用いた場合、試験片3に関しては L_a 、 L_f が判定されず求めることができなかった。

Table 1の二次元局所Hurst数を用いた結果と目視結果を比較すると5 μm 程の誤差で求まっていることがわかる。5 μm は、Fig. 2では、破面画像に示した白線の幅程度であることから、精度良く SZW_c を求めることができた。一方、一次元局所Hurst数を用いた場合は、目視と大きく離れた結果となった。従って、破面濃淡画像を用いて遷移領域を同定する場合には、二次元局所Hurst数を用いた方が、一次元局所Hurst数と比べて精度よく求めることができる。これは一次元局所Hurst数は、ある画素とその前後の画素を用いて評価を行うのに対し、二次元局所Hurst数はある画素とその前後左右の周辺画素を用いて評価する点で、評価領域が広いことが影響していると考えられる。

5.3 SZW_c と J_{Ic} の関係

次に、二次元局所Hurst数を用いて求めた SZW_c と J_{Ic} の関係について述べる。Fig. 3は、横軸に J_{Ic} 、縦軸に SZW_c をプロットしたものである。▲は二次元局所Hurst数を用いて求めた結果である。■は一次元局所Hurst数を用いて求めた結果である。小林ら¹²⁾は、 SZW_c と J_{Ic} に式(10)の関係があることを報告している。

$$SZW_c = \frac{CJ}{E} \quad (10)$$

ここで、 C は定数であり、平均値は89である。また、90%信頼限界に対する偏差は $54.7 \leq C \leq 143$ である。 E はヤング率(GPa)であり、ここでは191.0GPaを用いた。式(10)をFig. 3中に実線と破線で示す。

▲に関しては、90%信頼限界の範囲内に入っている。一方、■は入っていない。従って、二次元局所

Hurst数を用いた場合、一次元局所Hurst数より精度良く J_{Ic} の評価ができることがわかる。また、二次元局所Hurst数を用いることで、十分に J_{Ic} の推定が可能であると考える。

以上のことから、Fig. 1に示す解析モデルがストレッチゾーンの領域決定において有効であることがわかった。特にストレッチゾーンと延性破面の境界により一致が見られる。また、疲労破面とストレッチゾーンの境界に関しては、疲労破面側が平坦である時とストレッチゾーンが明瞭で無い場合において、決定された領域が目視の領域とは異なる場合がある。しかし、目視により判定されたストレッチゾーン領域と提案手法により判定された領域により相関があることから、提案手法により判定された領域を明示することで、解析初心者に対する支援の観点からは十分に有効であると考えられる。

このことから、本手法を用いることにより、ストレッチゾーンが観察される破面においては、 SZW_c を定量的に計測することが可能になり、破断荷重の定量的な推定が可能になったと考えられる。

6. 結言

本研究では、フラクトグラフィの数値解析法として、破面の局所的なフラクタル特性を示す局所Hurst数を二次元に拡張した二次元局所Hurst数の計算方法を提案した。

次に、提案した手法を高温配管用炭素鋼配管STPG370の破壊じん性試験破面に、適用した。その結果、二次元局所Hurst数により破面の複雑さが評価できることを示した。次に、二次元局所Hurst数を横方向に平均化することによってストレッチゾーンの評価を行った。その結果、ストレッチゾーンと判定された位置は目視により判定した位置と良く一致することがわかった。これにより、二次元局所Hurst数を用いることで、 SZW_c の定量評価が可能であることを示した。

7. 謝辞

本研究に使用した破面を作成するための破壊じん性試験は、電力中央研究所の三浦直樹氏によって行われた。この場をお借りして御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 日本材料学会フラクトグラフィ部門委員会編，フラクトグラフィ，丸善，(2000)，pp.55-88.
- 2) Benoit B. Mandelbrot, "Nature", **308**, (1984), 721-722.
- 3) 渋谷陽二，北川浩，“機論”，**61**-591，A (1995)，

- 173-179.
- 4) A. Carpinteri, Springer Wien New York, (1997), 1-55.
 - 5) 池庄司敏孝, 塩谷義, “機論”, **64**-623, A (1998), 1984-1990.
 - 6) L. Dougan, P. Addison, W. McKenzie, “Mechanics Research Communication”, **27**-4, (2000), 383-392.
 - 7) S. Morel, J. Schmittbuhl, J. Lopez, G. Valentin, “Phys. Rev. E”, **58**, (1998), 6999-7005.
 - 8) J. Schmittbuhl, J. Vilotte, S. Roux, “Phys. Rev. E”, **51**, (1995), 131-147.
 - 9) 泉聡志, 橘鷹伴幸, 原祥太郎, 酒井信介, “機論”, **66**-667, A (2002), 456-463.
 - 10) 山際謙太, 酒井信介, 横堀壽光, “日本材料強度学会誌”, **35**-3, (2001), 53-60.
 - 11) 大塚昭夫, 森要, 川村貴保, “機論”, **45**-399, A (1979), 1312-1322.
 - 12) 小林英男, “材料”, **29**-319, (1980), 198-203.
 - 13) 駒井謙治郎, 箕島弘二, 森田宏光, “材料”, **39**-444, (1989), 1311-1316.
 - 14) Charles K. Chui, “An introduction to wavelets”, Academic Press, (1992).
 - 15) I.Simonsen, H.Hansen, O.Nes, “Phys. Rev. B”, **58**, (1998). 2779-2787
 - 16) ASTM International, “Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness”, Designation : E1820-01, (2001).
 - 17) 榊原進, ウェーブレットビギナーズガイド, 東京電機大学出版局, (1995).
 - 18) 古川勝明, 村上敬宜, 西田新一, “材料”, **45**-3, (1996), 340-345.

(平成16年12月24日受理)