

検索 データ投入

フラクログラフィデータベースシステム

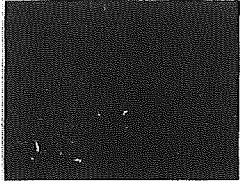
データシートNo. FSDS0012																																																																								
タイトル	オーステナイト系ステンレス鋼SUS316の高サイクル疲労破面(起点から1mm)																																																																							
材料仕様	SUS316																																																																							
実験	破壊様式 高サイクル疲労																																																																							
破壊の発生環境	破面生成の概要 室温大気中で直径10mmの平滑丸棒試験片に対し完全両振り軸荷重制卸疲労試験を実施した。 応力振幅220MPaで、破断寿命は800000サイクルであった。本データは起点から1mmの位置を観察した結果である。																																																																							
外観写真	外観番号 120 (BMP) 																																																																							
破面写真	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">破面番号 120 (BMP)</th> <th colspan="3">破面番号 121 (BMP)</th> <th colspan="3">破面番号 122 (BMP)</th> <th colspan="3">破面番号 123 (BMP)</th> </tr> <tr> <th colspan="2">画像サイズ</th> <th colspan="2">画像サイズ</th> <th colspan="2">画像サイズ</th> <th colspan="2">画像サイズ</th> <th colspan="2">データ間隔</th> <th colspan="2">データ間隔</th> </tr> <tr> <th>水平方向</th> <th>垂直方向</th> <th>水平方向</th> <th>垂直方向</th> <th>水平方向</th> <th>垂直方向</th> <th>水平方向</th> <th>垂直方向</th> <th>水平方向</th> <th>垂直方向</th> <th>(μm)</th> <th>(μm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1200</td> <td>900</td> <td>1200</td> <td>900</td> <td>1200</td> <td>900</td> <td>1200</td> <td>900</td> <td>1200</td> <td>900</td> <td>1</td> <td>0.2</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>0.1</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>0.05</td> </tr> </tbody> </table>	破面番号 120 (BMP)		破面番号 121 (BMP)			破面番号 122 (BMP)			破面番号 123 (BMP)			画像サイズ		画像サイズ		画像サイズ		画像サイズ		データ間隔		データ間隔		水平方向	垂直方向	水平方向	垂直方向	水平方向	垂直方向	水平方向	垂直方向	水平方向	垂直方向	(μm)	(μm)	1200	900	1200	900	1200	900	1200	900	1200	900	1	0.2												0.1												0.05
破面番号 120 (BMP)		破面番号 121 (BMP)			破面番号 122 (BMP)			破面番号 123 (BMP)																																																																
画像サイズ		画像サイズ		画像サイズ		画像サイズ		データ間隔		データ間隔																																																														
水平方向	垂直方向	水平方向	垂直方向	水平方向	垂直方向	水平方向	垂直方向	水平方向	垂直方向	(μm)	(μm)																																																													
1200	900	1200	900	1200	900	1200	900	1200	900	1	0.2																																																													
											0.1																																																													
											0.05																																																													
観察者のコメント備考	荷重が低く、き裂が短いので、明瞭なストライエーションは観察されず、結晶粒内を進展する無特徴な破面となっている。																																																																							

Fig. 3 Example of data display format.

ただし、ここで示したのはあくまでも使用例であり、粗さパラメータなどの形状を示す特徴量だけを頼りに破面を検索できることを意図したものではない。本システムが提供する特徴量やデータは破面解析者を支援するための情報であり、最終的な意思決定は解析者が行なうことになる。

5. 結 言

破面は損傷過程の情報を含んだ有力な状況証拠であるが、破面が示してくれるのは破壊の過程である。損傷の原因は破面調査だけから明らかにす

ることはできなく、設計仕様や製造面、使用条件などから調査されなければならない。これら一連の調査のうち、本論文ではSEM観察から損傷原因推定を支援するために、インターネット上で利用できる破面のデータベースを試作した。本データベースには破面解析を支援するために、表面粗さやフラクタル次元などの破面の特徴量を計算するためのプログラムを搭載した。実機の破面は使用環境、荷重条件などが複雑であり、現段階では破面解析を完全に自動化することはできていない。データベース中の熟練観察者のコメントや、特徴

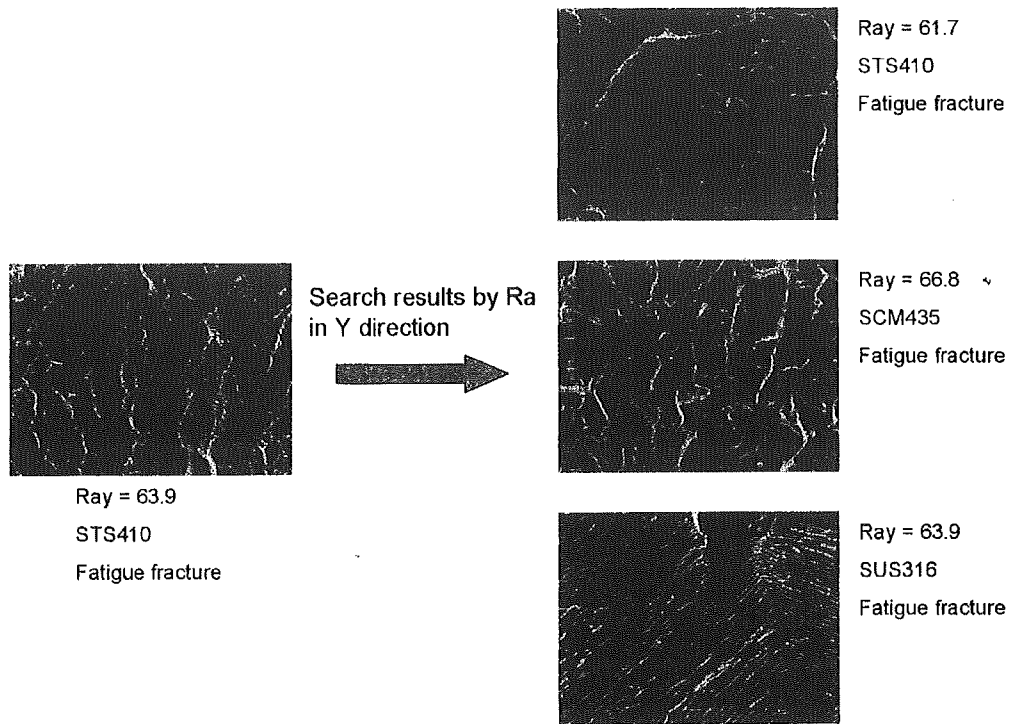


Fig. 4 Example of search results by this system.

量を参考にしながら，解析を支援していくというのが本システムの役割である。

今後は，特徴量に基づいたデータ抽出機能の強化や，熟練者のもつ知識をより多く取り込み，データベースの高度化を図っていく。

参考文献

- 1) 小寺沢良一 編著；“フラクトグラフィとその応用”，日刊工業新聞社，p.1 (1983).
- 2) 村上敬宜；“破壊破面の定量的解析法に関する研究”，平成 11 年度科学研究費補助金研究成果報告書 課題番号 11895004，p.2 (2000).
- 3) 森要，中村春夫；“講座 最近のフラクトグラフィとその応用 1. 疲労破壊”，材料，Vol.47，pp.637-643 (1998).
- 4) 高梨正祐，泉聡志，酒井信介，三浦直樹；“表面粗さの相違を利用したストレッチゾーン幅の定量解析”，材料，Vol. 53，pp.906-912 (2004).
- 5) 日本材料学会フラクトグラフィ部門委員会編集；“フラクトグラフィ 破面と破壊情報解析”，丸善 (2000).
- 6) 西田新一監修著；“フラクトグラフィと破面解析写真集”，総合技術センター (1998).
- 7) 村尾晃平；“画像特徴量の自動抽出と類似画像検索”，人文学と情報処理 28 情報検索，勉誠出版，pp. 54-61 (2000).
- 8) 大橋真；“球状黒鉛鋳鉄の引張破断面の定量的評価”，材料，Vol.47，pp.959-964 (1998).
- 9) 藤原昌晴，近藤良之，服部孝博；“疲労破面粗さに基づく作用応力推定”，材料，Vol. 40，pp. 712-717 (1991).
- 10) 日本工業規格，“表面製品の幾何特性仕様(GPS) -表面性状：輪郭曲線方式-用語，定義及び表面性状”，JIS B0601：2001，(2001).
- 11) B. B. Mandelbrot；“The fractal geometry of nature”，W. H. Freeman and Company (1977).
- 12) 川崎正，元家勝彦；“フラクタルの破面解析への応用”，機械の研究，Vol.42，pp.795-800 (1990).
- 13) 山際謙太，酒井信介，横堀壽光；“フラクタル解析を用いた TiAl 高温域破壊機構の特性化”，日本材料強度学会誌，Vol. 35，pp.53-60 (2001).

【著者紹介】

高梨 正祐

石川島播磨重工業株式会社 基盤技術研究所
〒235-8501 横浜市磯子区新中原町1
TEL:045-759-2864 FAX:045-759-2208
E-Mail:masahiro_takanashi@ihi.co.jp

山際 謙太

産業安全研究所
〒204-0024 清瀬市梅園1-4-6
TEL:0424-91-4512 FAX:0424-91-7846
E-Mail:yamagiwa@anken.go.jp

泉 聡志

東京大学大学院 工学系研究科
〒113-8656 文京区本郷7-3-1
TEL:03-5841-6413 FAX:03-3818-0835
E-Mail:izumi@fml.t.u-tokyo.ac.jp

酒井 信介

東京大学大学院 工学系研究科
〒113-8656 文京区本郷7-3-1
TEL:03-5841-6436 FAX:03-3818-0835
E-Mail:sakai@fml.t.u-tokyo.ac.jp

511 テクスチャ解析による球状黒鉛鑄鉄の破面性状の分離

Separation of fracture surface characters in spheroidal graphite case iron by texture analysis

○ 正 高梨正祐 (IHI) 正 山際謙太 (産安研)
正 泉 聡志 (東大) 正 酒井信介 (東大)

Masahiro TAKANASHI,

Ishikawajima-harima Heavy Industries,
Isogoku, Yokohama, Kanagawa

Kenta YAMAGIWA

National Institute of Industrial Safety

Satoshi IZUMI

The University of Tokyo

Shinsuke SAKAI

The University of Tokyo

Key Words: Fractography, Fracture Surface, Run Length Statistics, Fractal, Spheroidal Graphite Cast Iron

1. 緒 論

機械や構造物の損傷調査にあたっては、フラクトグラフィ手法がよく用いられ、一般の構造用鋼に対しては破壊原因の推定に大きく貢献してきた。しかしながら、片状黒鉛鑄鉄や球状黒鉛鑄鉄のような鑄物については、必ずしも十分に適用されていない。このような背景から、著者らは球状黒鉛鑄鉄を例にとり、破面を自動分離する方法を提案した⁽¹⁾。画像のコントラストの影響を小さくするために、破面の SEM 画像を微分し、エッジのみを抽出した。このエッジ像をテクスチャとみなし、テクスチャ解析で用いられるランレングス統計量を計算し、これを破面の特徴量とした。この特徴量より、疲労破面と一回の過荷重破折によって生じる破面を、人間の主観に依存することなく、分離することが可能となった。しかしながら、抽出した特徴量は倍率に依存することが明らかになった。そこで、本報では倍率の影響について検討する。

2. 特徴量の算出

破面から特徴量を算出する手順は、以下の方法にしたがって実施した。まず、初めに濃度ヒストグラムを平坦化した後、SEM 画像から輪郭を抽出するために、画像を微分した。微分後、画像を明瞭にするために、メディアンフィルタによりノイズ処理を実施した。

次に、このようにして得られた微分画像に対し、Kittler の手法によりしきい値を自動判別し、二値化した。その後、Hilditch の方法により、細線化を実施した。細線化処理により、線幅 1 の画像となり、濃淡画像のエッジだけが抽出されることになる。最後に孤立点を除去している。

このようにして抽出したエッジ像をテクスチャとみなし、特徴量を算出した。ここでは、細線化二値画像を評価対象としているため、テクスチャ画像の輪郭と輪郭の間隔を一つの評価基準と考え、ランレングス統計量を用いることにした。

ランレングスの定義は次の通りである。階調 n の画像内において、ある方向に連続する同濃度の画素をランとよび、その長さをランレングスとよぶ。ある方向 θ に濃度 i の画素が j 個連続する頻度 $P_{\theta}(i, j)$ ($i=0, 1, \dots, n-1, j=1, 2, \dots, l$) を要素とする行列をランレングス行列とよぶ。ランレングス行列を特徴付ける量としては 5 種類あるが、本研究では短いランと長いランの発生頻度を調べる目的から、次式に示す二つの統計量を特徴量として採用した。

Short Runs Emphasis (SRE)

$$\sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=1}^l \frac{P_{\theta}(i, j)}{j^2} \bigg/ \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=1}^l P_{\theta}(i, j) \quad (1)$$

Long Runs emphasis (LRE)

$$\sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=1}^l j^2 P_{\theta}(i, j) \bigg/ \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=1}^l P_{\theta}(i, j) \quad (2)$$

各統計量 SRE, LRE は短いラン、長いランそれぞれの発生頻度が多くなるほど大きな値をとる。

3. 解析用破面の作成と破面観察方法

本研究で提案した手法を実破面に適用するために、室温大気中で破壊じん性試験を実施し、解析用の破面を作成した。供試材は球状黒鉛鑄鉄 FCD450 とした。Y ブロックに鑄造後、1 inch の CT 試験片を採取した。

観察倍率は100倍、500倍、1000倍とした。画像サイズは、き裂進展方向（観察画面縦方向）に900 pixels、これと垂直な方向（画面横方向）へ1200 pixelsとした。

4. 特徴量の計算結果

き裂進展方向と直交する方向に、Short Runs Emphasis (SRE), Long Runs Emphasis (LRE) を計算した結果を Fig. 1 に示す。観察は、試験片板厚中心と、そこから左右に約3.1 mm (板厚の1/8に相当) ずつ離れた合計3ラインを、機械加工切欠きの先端からき裂進展方向に沿って0.5 mm 間隔で計測した。本図の横軸は機械加工切欠き先端からの距離を示しており、約3.5 mm の位置までが疲労予き裂導入の際に形成された破面である。その先は破壊じん性試験により形成された急速破面である。本図からわかるように破壊モードに対応し、ランレングス統計量が変化していることがわかる。観察倍率100倍においては、疲労破面で0.23程度示していたSREは、急速破壊領域では0.18程度まで減少している。逆に、長いランの頻度に敏感なLREは、疲労破面では小さい値を示しており、急速破面に遷移すると増加している。

しかしながら、500倍以上ではこの結果は異なった。SREに関しては、疲労破面で小さな値をとり、急速破面に入ると増加した。また、500倍以上では、疲労破面でのランレングス統計量のばらつきも大きくなっていった。

5. 観察倍率の検討

破面の観察倍率を上げていくと、やがては局所的な単純形状のみが現われるので、破面全体の特徴は失われると考えられる。破面の複雑性を表す指標としてフラクタル次元が報告されている⁹⁾。そこで、本研究でも20倍から5000倍の広範囲に渡る倍率で破面を観察し、抽出したエッジ像に対しフラクタル次元を計測した。計測結果を Fig. 2 に示す。観察倍率20倍から100倍までは、フラクタル次元はほぼ一定の値を示し、そ

の後、一部ばらつきがみられるが倍率の増加とともに低下していった。すなわち、倍率が高くなるとエッジの複雑性も低下している。同図の上側の横軸には、画像の縦幅を基準長さとして示してある。本材料の黒鉛の直径は30~50 μm程度であり、フラクタル次元が一定となっている基準長さは約800 μm以上である。ゆえに、黒鉛径の約20倍以上の基準長さで破面を観察すべきであることを本図は示している。観察倍率が1000倍では、画像の縦幅は黒鉛径の2~3倍程度であり、破面全体の情報を含んでいるとは考えられない。このように局所的情報のみを評価しているため、Fig. 1において計測結果がばらついたものと考えられる。

6. 結 論

本研究で実施した破面解析法の観察倍率としては、材料組織が平均的に破面に現われるような倍率が望ましいと結論できる。一つの目安として考えられる評価倍率は、抽出したエッジ像に対してマルチスケールでのフラクタル性を示すような倍率である。今回の観察倍率では100倍が適切であったと考えられる。

参 考 文 献

- (1) 高梨正祐, 山際謙太, 泉聡志, 酒井信介, 日本材料学会, 第54期学術講演会講演論文集(2005) p. 391.
- (2) 山際謙太, 酒井信介, 横堀壽光, 日本材料強度学会誌, Vol. 35 (2001) p. 53.

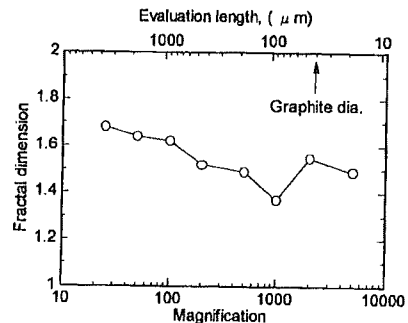


Fig. 2 Dependency of fractal dimension on magnification.

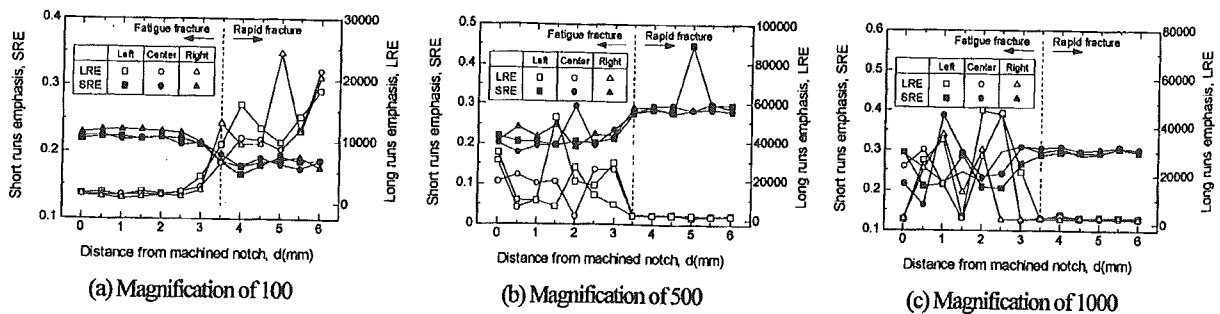


Fig. 1

Relation between short and long runs emphases and distance from machined notch tip.

14 定量フラクトグラフィのための破面解析支援データベースの作成

(独) 産業安全研究所 ○山際謙太 石川島播磨重工業 高梨正祐
 東京大学 泉聡志 東京大学 酒井信介

1 緒言

構造物や機械の破壊事故の際には、その原因究明と再発防止の観点から、必ず破断面の調査（フラクトグラフィ）が実施されているが、問題点も指摘されている。^{1,2)} 例えば、i) 評価が定性的で客観性に欠く、破面の評価には熟練が必要でわずかな模様の見誤りでも再発防止対策に大きく影響を及ぼす、ii) 熟練者の高齢化に伴う技術の伝承といった問題点があげられる。こうした問題点を解決すべく、三次元像構築手法や定量的な破面解析法がいくつか提案されている。^{3,4)}

一方、実際の損傷解析現場においては、観察者の経験に強く依存した定性的解析がいまだに主流である。定性的破面解析では、過去の損傷事例の破面と実験室で得られた破面と、実機破面との比較に基づいた損傷原因の推定が行われる。^{5,6)} インターネットの普及により、材料強度や物性値などは電子データ化され、短時間で目的のデータにたどり着ける。だが、破面となると前例はない。

また別な問題点としてデータの管理方法が挙げられる。破面の解析は、損傷調査や破壊メカニズムの研究の一環として行われることが多い。よって破面のデータは、前者の場合であれば損傷調査報告書に、後者の場合であれば研究論文に掲載されることになる。定性的な破面解析では類似破面との比較が高い重要性を持つにも関わらず、破面データそのものを保存・抽出するようなシステムはない。こうした問題点を解決するには、破面写真とそれに関する情報をリンクさせ、簡便に保存・抽出できるようなデータベースが必要となる。

以上のような背景から、著者らはインターネット上で利用できる破面のデータベースを構築した。⁷⁾ 本システムは、単に各種モードで破壊した破面を羅列するのではなく、破面解析を支援するために、表面粗さやフラクタル次元など、破面の特徴量を計算するためのプログラムを搭載した。こうした特徴量を一つの目安としながら、破面の比較を行なえるのが、本解析支援システムの特徴である。

2. フラクトグラフィデータベースシステムの機能

2.1 フラクトグラフィデータベースシステムの構成

フラクトグラフィデータベースシステムの構成を Fig. 1 に示す。このデータベースは、インターネット (Web) を介して利用することができる。

データベースは、「破面属性テーブル」と「破面特徴量テーブル」で構成される。属性テーブルには、破面に関連する情報（タイトル、材料名、破面生成状況、etc）が格納されている。特徴量テーブルには画像と倍率情報、

破面から抽出された特徴量が保存されている。二つのテーブルを用いることにより、一つの破面を複数の倍率で観察した結果や破面ごとの特徴量を容易にかつ効率的にデータシートという形式で管理できるようになっている。

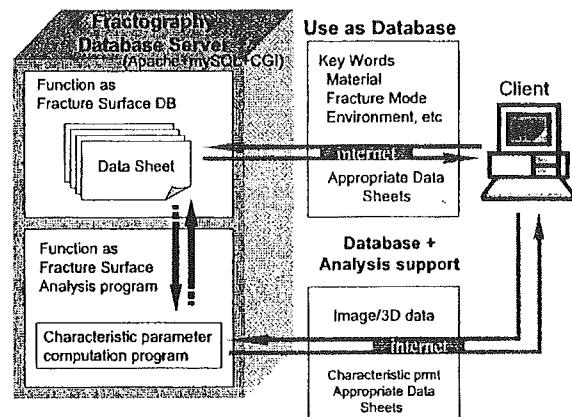


Fig. 1 System configuration of fractography database

2.2 破面属性テーブル

破面属性テーブルは主に以下の項目で構成されている。

1. タイトル (例: S45C ボルトの疲労破面)
2. 材料仕様 (JIS S45C)
3. 実機/実験 (実験)
4. 破壊様式 (疲労破壊)
5. 破壊の発生環境 (室温・大気中)
6. 破壊の発生の概要 (M16 ボルト・平均応力・・・)
7. 観察者コメント (疲労き裂起点から 2mm の位置・・・)
8. 備考

これらの情報をデータベースに収めることで、熟練観察者の破面に対する知見を蓄積する。また、フリーキーワードによる検索 (例えば S45C 疲労等) を行なうことが可能である。

2.3 破面解析プログラム

破面解析を支援するため、本データベースシステムには破面から特徴量を算出する機能を加えた。特徴量は特徴量テーブルに格納される。いずれの解析も、画像データ (256 階調濃淡データ)、テキストデータ (数値化された高さ情報) の両方に対して実施できるシステムとなっている。以下、それぞれのパラメータについて述べる。

・表面性状 (粗さ) パラメータ

表面粗さは、破面形状を数値化する指標であることから、破面の定量解析によく用いられてきた。^{8,9)}

本データベースにおいても、表面の凹凸形状を数値として示す表面粗さを特徴量の一つに選んだ。日本工業規

格 JIS B0601:2001 表面製品の幾何特性仕様 (GPS)¹⁰⁾ にしたがって、表面粗さを求めるプログラムを作成した。JIS B0601 に記載されている 14 種類すべての粗さパラメータを計算し、ユーザが選択した任意のパラメータを表示できるシステムとなっている。なお、表面粗さは 1 次元に対して定義されるから、画面の水平方向および垂直方向に対して、すべての走査線上で粗さを計測して、計測方向別の平均値と分散を示した。平均値と分散値を用いることにより、破面全体の情報を抽出できると考えている。

・フラクタル次元解析

Mandelbrot¹¹⁾によって提唱されたフラクタル次元は複雑さを表す特徴量である。破面の複雑さは表面エネルギーとの関連があるために、とくにフラクタル次元と破壊じん性との相関が指摘されている。フラクタル次元が等しいからといって、破壊のメカニズムが必ずしも同じという訳ではないが、複雑さを表す一つの手法として、フラクタル次元も特徴量としてみなした。^{12,13)}

・二次元周波数分析

画像の周期性とその方向性を明らかにするために、高速フーリエ変換を実施し、パワースペクトルをビットマップで表示するようにした。

なお、本データベースシステムは、東京大学大学院工学系研究科 酒井・泉研究室の Web サーバ (<http://platon.t.u-tokyo.ac.jp/>) 上で試験的に公開中である。

3. 本データベースシステムにより解決される破面解析の問題点

3.1 数値指標の導入による解析支援

第 1 章でも述べた通り、現段階での損傷解析の主流は、損傷した破面と破面集などに記載されている破面との比較を観察者が行なうことにより実施されている。ちょうど野山で摘み取った植物などを図鑑で調べるようにして、破面集から類似破面を探し出し、破壊原因の推定が行われる。よって破面を定量的に評価し、比較のための指標を与えれば、解析作業を支援できると考え、本データベースに破面画像から特徴量を抽出する解析プログラムを実装した。

破面を画像解析の対象と考えた場合に考慮しなければならないことは、全く同じ材料を全く同じ力学的条件で破壊しても、類似した特徴を持つ画像こそ得られるが、全く同じ画像を得ることはできないということである。前述の植物図鑑の例では、観察者は花卉や葉の色、形状といった局所的な情報を頼りに、主観的なパターンマッチングを試みている。類似画像の抽出する際にはこうした局所的な特徴を頼りに画像を検索する例は多い。¹⁴⁾だが、破面のように濃淡変化特性により表現されている似て非なる画像から、類似画像を抽出するのであれば、局所的なパターン情報だけでは不十分である。画像全体の周期性や複雑さ、あるいは統計的性質を積極的に活用す

る必要がある。前者の局所的なパターン情報とは、破面においてはディンプルやリバーパターンといった典型的な模様であり、定性的にも見分けることができる。したがって、従来の破面解析によく用いられてきた。ところが後者のような破面全体の特徵は、数値的な指標でなければ表現することが困難となる。ゆえに前節で述べた解析プログラムを導入した。数値的な指標の導入により、ユーザが破面解析の経験豊富な技術者である場合には、本データベースシステムは破面解析の精度向上と客観性の付与に貢献できる。定性的な破面特徴を十分に読み取ることが出来ない経験の浅い技術者にとっては、類似性の判断を支援することが可能となる。

3.2 データベースシステムを用いた知識伝承

本データベースシステムは、その構成概念図を Fig. 1 に示すように、二通りの使用法をユーザが選択できるようになっている。一つは、破面データベース機能のみの使用である。ユーザが破壊形態、材料名、使用環境などをキーワードとして投入すると、サーバ側のデータベースが該当するデータを返すシステムとなっている。検索機能としては、フリーキーワードによる検索と、項目を指定して検索する機能を備えている。この機能を用いることで、熟練観察者の知見を効率的に経験の浅い技術者が学ぶことができ、技術伝承の問題解決に貢献することができる。

3.3 データベースと数値解析の融合による体系的なデータ管理

もう一つの機能は、データベースと破面解析支援プログラムの連携である。ユーザが、画像データあるいは破面の三次元形状を投入すると、破面に対して画像処理を行い、特徴量を計算する。この計算結果に基づき、類似画像を含む破面属性と特徴量を返してくれるシステムである。この点が従来のデータベースと異なる。また、このようにして解析に使用されたデータは、データベースに蓄積されるシステムとなっている。従来のデータベースにおいては定期的に、データを投入する必要があったが、本システムでは破面数値解析という作業により、自動的にデータを蓄積できる。したがって、破面画像とともにその画像に関する特徴量も保存でき、データの客観的かつ体系的な管理が可能となる。

破面全体を特徴つけるパラメータは、現段階ではいくつか提案されている。だが、どのような破壊モードの破面にどのようなパラメータを適用すべきであるかという命題に対する明確な結論は出ていない。この原因として考えられる理由は、多くの定量的破面解析に関する研究は、評価手法の提案が中心となっているためである。手法の提案に多くの労力が割かれ、肝心な提案手法の適用は数少ない破面に対してのみ行われている。解析対象とする破面のデータ量が不足しているために、汎用的なパラメータを定めることができていない。本システムのように特徴量と破面画像およびそれに付随する情報を体系

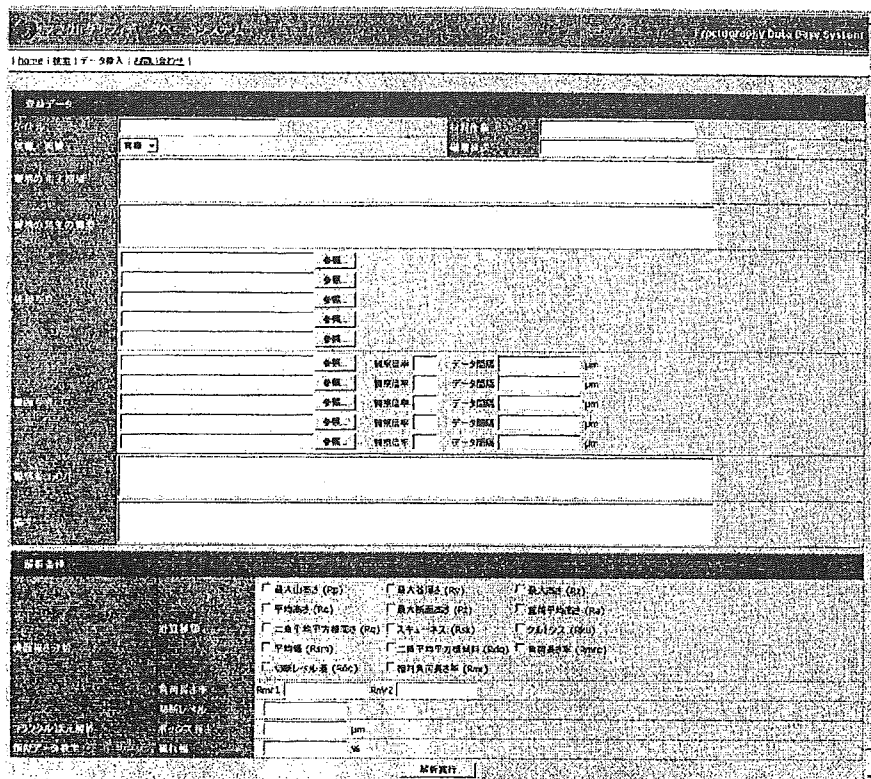


Fig. 2 User interface for fracture surface analysis support system

的に蓄積することができれば、破面を抽出する際のパラメータの選定や、あるいは複数のパラメータを用いた場合にはその重み付けを行い評価するアルゴリズムの開発などへの発展が可能となる。

4. 本データベースシステムの使用例

本データベースの使用例を示す。まず、入口の画面でデータベースとして使用するか、解析支援システムとして使用するか、選択可能となっている。

解析支援システムを選択した場合のユーザインターフェースを Fig. 2 に示す。まず、ユーザは Fig. 2 に示すデータベーステーブルのフィールドを埋めていく。破面情報に関する事実のみを記載していくが、1 か所だけ観察者のコメントというフィールドを設け、観察者が破面のどのような点に注目して観察したのかなどの主観を記入できるフィールドを設けた。このようなデータの蓄積が、知識ベースになると考えている。このように、解析を実施する前に、解析対象画像の情報を集めデータベースのデータとして蓄えられるシステムとなっている。

すべてのデータを入力し終わると、解析を実行する。表示させたい項目をユーザが選択し、データを表示できる。データ表示結果の一例を Fig. 3 に示す。画像データはビットマップ形式で保存されている。

なお、データベースとして使用する場合は、インターネット上でよく利用されている検索エンジンを利用する

場合とほぼ同じで、フリーキーワードあるいは項目を指定して、検索が可能となっている。

Fig. 4 は本システムで計算した特徴量に基づき、類似画像を検索した結果を示している。同図左側の STS410 の疲労破面を入力画像とし、濃淡情報に対して画面垂直方向に計算した算術平均粗さの平均値 Ray を基準とし、±5%の範囲の類似画像を検索した結果である。材料が異なるものも含まれるが、比較的濃淡の変化の少ない、ストライエーションが観察される破面が3データ抽出されている。こうした特徴量と、材料や使用環境さらには観察者のコメントなどのデータを参考にしながら、ユーザが類似画像を検索できるのが本システムの特徴である。

ただし、本システムが提供する特徴量やデータは破面解析者を支援するための情報であり、最終的な意思決定は解析者が行なうことになる。

5. 結言

本研究では SEM 観察から損傷原因推定法を支援するために、インターネット上で利用できる破面のデータベースを試作した。本データベースには破面解析を支援するために、表面粗さやフラクタル次元などの破面の特徴量を計算するためのプログラムを搭載した。データベース中の熟練観察者のコメントや、特徴量を参考にしながら、解析を支援していくというのが本システムの役割である。

今後は、特徴量に基づいたデータ抽出機能の強化や、

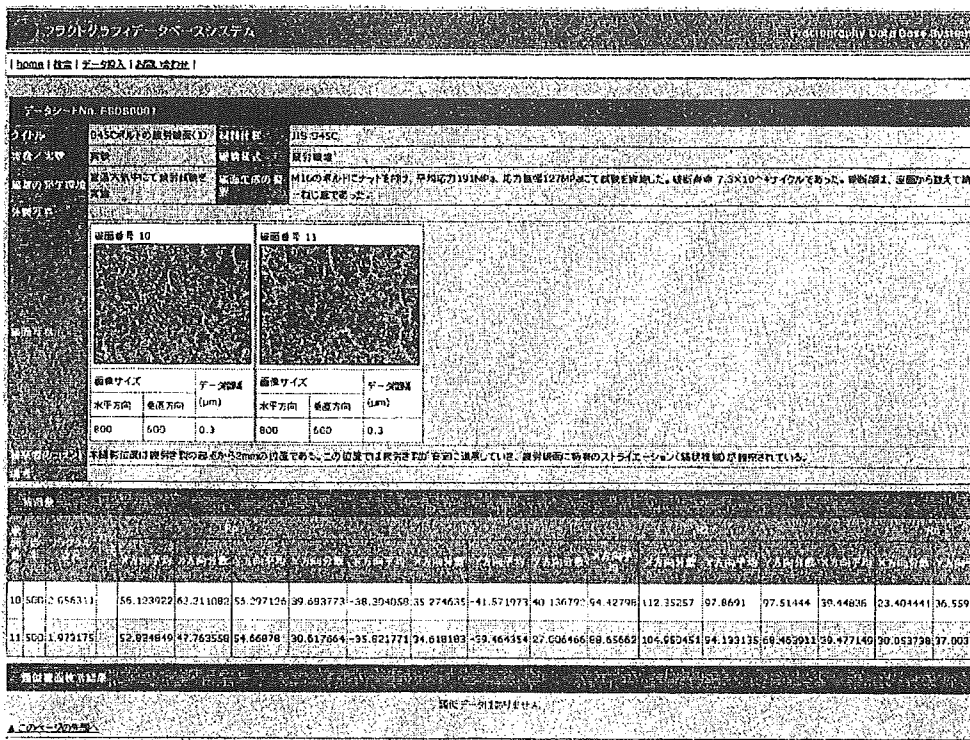


Fig. 3 Example of data display format

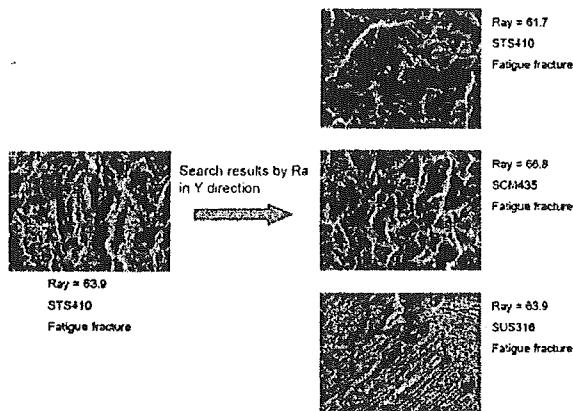


Fig. 4 Search result by this system

熟練者のもつ知識をより多く取り込み、データベースの高度化を図っていく。

6. 謝辞

本研究の一部は厚生労働科学技術研究費補助金（労働安全衛生総合事業）を用いて行われた。ここに謝意を表する。

参考文献

1) 小寺沢良一 編著, フラクトグラフィとその応用, 日刊工業新聞社 p. 1 (1983).

2) 村上敬宜, 破壊破面の定量的解析法に関する研究, 平成 11 年度科学研究費補助金研究成果報告書 課題番号 11895004, p.2 (2000).

3) 森要, 中村春夫, 材料, 47, pp. 637 - 643 (1998).

4) 高梨 他, 材料, 53, pp. 906 - 912, (2004).

5) 日本材料学会フラクトグラフィ部門委員会編集, フラクトグラフィ 破面と破壊情報解析, 丸善(2000).

6) 西田新一監修著, フラクトグラフィと破面解析写真集, 総合技術センター (1998).

7) 高梨 他, 圧力技術, Vol. 44, No. 1, pp.4-12, (2006).

8) 大橋眞, 材料, 47, pp. 959 - 964 (1998).

9) 藤原昌晴, 近藤良之, 服部孝博, 材料, 40, pp. 712 - 717 (1991).

10) 日本工業規格 JIS B0601:2001 表面製品の幾何特性仕様 (GPS) (2001).

11) B. B. Mandelbrot, "The fractal geometry of nature," W. H. Freeman and Company (1977).

12) 川崎正, 元家勝彦, 機械の研究, 42, pp. 795 - 800 (1990).

13) 山際謙太, 酒井信介, 横堀壽光, 日本材料強度学会誌, 35, pp. 53 - 60 (2001).

14) 村尾晃平「画像特徴量の自動抽出と類似画像検索」, 勉誠出版, 人文学と情報処理, 28, pp.54 - 61 (2000)

Publications

About

Search

Browse

Account
Shopping
Cart

Order
History

Activate
Access
Register

Services

Favorites

Alerting

ActiveSearch

Support

Contact Us

Downloads

Linking

Article

[Back To: Main](#) [o Publication](#) [o Issue](#)



Strength, Fracture and Complexity

Issue: Volume 3, Number 2-4 / 2005

Pages: 81 - 87

URL: [Linking Options](#)

Special Issue: 11th International Conference on Fracture (ICF11), Torino, Italy, 20-25 March 2005. Mini-Symposium - "Complexity, Scaling and Non-linearity in the Mechanics of Advanced Materials"

Guest Editor(s): Alberto Carpinteri

Method for quantitative evaluation of stretched zone width using two-dimensional local Hurst exponent

K. Yamagiwa ^{A1}, M. Takanashi ^{A2}, S. Izumi ^{A2}, S. Sakai ^{A2}

^{A1} National Institute of Industrial Safety, 1-4-6 Umezono Kiyoseshi, Tokyo, Japan Tel.: +81 424 91 4512; Fax: +81 424 91 7846; E-mail: yamagiwa@anken.go.jp

^{A2} Department of Mechanical Engineering, University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku Tokyo, Japan

Abstract:

Fractal analysis has been widely used to characterize the fracture surface. It has been recognized that the local Hurst exponent, which is based on the concept of the self-affine fractal, is useful to detect the transition point of the fracture surface. In order to calculate the local Hurst exponent, a high-resolution profile is needed. The measurement of this profile, however, requires considerable time and effort, which thus makes it difficult to calculate all the profiles of the fracture surface and arrive at a detailed evaluation of the features of the fracture surface. In the present study, we propose a new method of calculating the two-dimensional local Hurst exponent, which can be used to evaluate the features of the fracture surface using the local Hurst exponent. To investigate the validity of the two-dimensional local Hurst exponent, our calculations were applied to grayscale images in which the stretched zone was observed and the width of the stretched zone ($SZWC$) was measured. The $SZWC$ calculated by the two-dimensional local Hurst exponent and that detected by human observation were found to be in good agreement. We thus conclude that

Full Text Access

Full Text Secured

The full text of this article is secured to subscribers. To gain access, you may:

- Subscribe to this publication.

[Subscribe](#)

- Add this item to your shopping cart for purchase later.

[Add to Shopping Cart](#)

- Purchase this item now.

[Purchase Item Now](#)

- Log in to verify access.

[Log In](#)

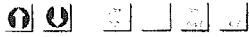
Please note:

By using this site you agree to the terms of our [copyright](#) for pay-per-view access.

the two-dimensional local Hurst exponent is a useful means of detecting the transition point of the fracture surface.

Keywords:

Hurst exponent, fractography, stretched zone, fatigue fracture.



IOS Press

Nieuwe Hemweg 6B, 1013 BG Amsterdam
+31 20 688 3355 phone, +31 20 620 3419 fax
market@iospress.nl e-mail

Remote Address: 202.241.32.3 • Server: MPWEB08
HTTP User Agent: Mozilla/5.0 (Windows; U; Windows NT 5.0; ja; rv:1.8.0.1) Gecko/20060111 Firefox/1.5.0.1

Method for quantitative evaluation of stretched zone width using two-dimensional local Hurst exponent

K. Yamagiwa^a, M. Takanashi^b, S. Izumi^b and S. Sakai^b

^a *National Institute of Industrial Safety, 1-4-6 Umezono Kiyoseshi, Tokyo, Japan*

Tel.: +81 424 91 4512; Fax: +81 424 91 7846; E-mail: yamagiwa@anken.go.jp

^b *Department of Mechanical Engineering, University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku Tokyo, Japan*

Abstract. Fractal analysis has been widely used to characterize the fracture surface. It has been recognized that the local Hurst exponent, which is based on the concept of the self-affine fractal, is useful to detect the transition point of the fracture surface. In order to calculate the local Hurst exponent, a high-resolution profile is needed. The measurement of this profile, however, requires considerable time and effort, which thus makes it difficult to calculate all the profiles of the fracture surface and arrive at a detailed evaluation of the features of the fracture surface. In the present study, we propose a new method of calculating the two-dimensional local Hurst exponent, which can be used to evaluate the features of the fracture surface using the local Hurst exponent. To investigate the validity of the two-dimensional local Hurst exponent, our calculations were applied to grayscale images in which the stretched zone was observed and the width of the stretched zone (SZW_c) was measured. The SZW_c calculated by the two-dimensional local Hurst exponent and that detected by human observation were found to be in good agreement. We thus conclude that the two-dimensional local Hurst exponent is a useful means of detecting the transition point of the fracture surface.

Keywords: Hurst exponent, fractography, stretched zone, fatigue fracture

1. Introduction

Fractography is an important field of study which investigates the causes of fracture accident. In recent years, numerical analysis has become essential in the estimation of stress from the fracture surface, since the results obtained by numerical analysis are objective and thus more reliable than results obtained by the conventional method, which depends on a human observer.

Fractal analysis has been widely used for the numerical analysis of the fracture surface [1–3]. Early studies made use of the fractal dimension (F_d), which was calculated from the image or topological data of the fracture surface. Mandelbrot [2], for example, reported on the relationship between absorbed energy and the F_d .

In this paper, the two-dimensional local Hurst exponent, which is based on the concept of the self-affine fractal, is proposed to analyze the transition region using an image of the fracture surface. To investigate the validity of this parameter, it was applied to the estimation of the width of the stretched zone (SZW_c), which is related to a crack tip opening displacement (CTOD) and a critical J -integral (J_{Ic}).

2. Method for calculating the two-dimensional local Hurst exponent

Unlike isotropic fractal geometry, self-affine fractal geometry includes the feature of self-similarity on condition that the scale is changed anisotropically. Specifically, assuming that $h(x, y)$ is a self-affine fractal, $h(x, y)$ is satisfied by the Eq. (1) below.

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

Here, H is the Hurst exponent, which has a value from 0 to 1. Where $H = 1$, $h(x, y)$ is a flat plate. A fracture surface becomes more complicated, in which case H approaches 0. The method for calculating the two-dimensional local Hurst exponent is indicated in the following steps.

The following equation satisfies $h(x, y)$, which is a gray level image in the present paper.

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

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

In Eq. (2), x_0, y_0 are the coordinates of pixel in the image.

The two-dimensional wavelet transform (WT), which is an effective method of investigating the local features and similarity of signal and image [4], is applied to calculate the local Hurst exponent. The two-dimensional WT is defined by the following equation:

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

where ψ is the mother wavelet, and the overline indicates the complex conjugate. Moreover, (b_x, b_y) and a indicate the transition parameter and the scale parameter, respectively. Therefore, similarity and local features are respectively described by a and (b_x, b_y) .

Next, we substitute Eq. (3) for Eq. (4) and the admissible condition of the mother wavelet:

$$W(h_{x_0, y_0}(x, y), \lambda a, \lambda b_x, \lambda b_y) = W(h(x, y), \lambda a, \lambda b_x + x_0, \lambda b_y + y_0). \quad (5)$$

Finally, we obtain the following:

$$W(h_{x_0, y_0}(x, y), a, b_x, b_y) = \lambda^{-H-1} W(h(x, y), \lambda a, \lambda b_x + x_0, \lambda b_y + y_0). \quad (6)$$

Therefore, the relationship between a and W at the neighborhood of (x_0, y_0) is expressed as the following equation:

$$W(h(x, y), a, x_0, y_0) \propto a^{H+1}. \quad (7)$$

Specifically, the two-dimensional local Hurst exponent is obtained from the slope of the plot of a and W on the legalistic graph. Furthermore, the distribution of the two-dimensional local Hurst exponent is obtained by substituting the coordinate of pixel in the image for (x_0, y_0) .

However, an almost linear relationship between a and W is not obtained. To solve this problem, Simonsen proposes the Averaged Wavelet Coefficient (AWC) method [5]. In the present paper, we expand on this method for two-dimensional WT as the following equation:

$$\overline{|W(h(x, y), a, x_0, y_0)|} = \frac{1}{w^2} \sum_{y=y_0-\frac{1}{2}w}^{y=y_0+\frac{1}{2}w} \sum_{x=x_0-\frac{1}{2}w}^{x=x_0+\frac{1}{2}w} |W(h(x, y), a, x, y)|. \quad (8)$$

Finally, the two-dimensional local Hurst exponent is calculated from a linear relationship between $|W|$ and a . A feature of an area whose width is w and whose center is (x_0, y_0) is contained in H , which is therefore expressed as $H(x_0, y_0)$.

3. Experimental procedure

3.1. Method for detecting the stretched zone

In an elastic-plastic fracture toughness test, a stretched zone is observed on the fracture surface between a fatigue fracture surface and a ductile fracture surface. The stretched zone is a flat region compared to the fatigue and ductile fracture surfaces. Thus, the two-dimensional local Hurst exponent of a stretched zone is larger than that of the other regions (Fig. 1).

In order to detect the stretched zone by the two-dimensional local Hurst exponent, we first plot the relationship between the location, which is parallel to the crack propagation direction, and the two-dimensional local Hurst exponent, that is, the location where the two-dimensional local Hurst exponent is maximum and is set at L_s . Next, L_f and L_d are detected. L_f is set at the previous minima location from L_s and L_d is set at the next minima location from L_s . Here, L_f is considered to be the start location of the transition region from the fatigue fracture surface to the stretched zone, and L_d is considered to be the end location of the transition region from the stretched zone to the ductile fracture surface. Thus, the SZW_H in Fig. 1 is considered to contain not only the stretched zone but also the fatigue and ductile fracture surfaces. For this reason, we define SZW_c as the following equation:

$$SZW_c = \frac{SZW_H}{2}. \quad (9)$$

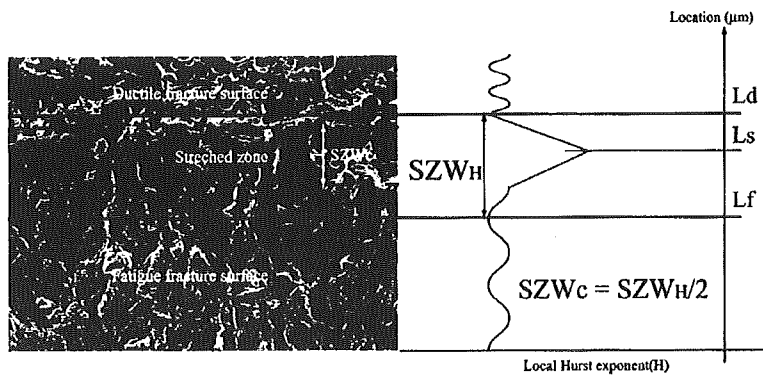


Fig. 1. Illustration of SZW_c measurement using two-dimensional Hurst exponents.

However the SZW_c , which is important in stress estimation, depends on x_0 and is the averaged width in the image of the fracture surface. In the present paper, therefore, the averaged local Hurst exponent shown in Eq. (10) is used.

$$\overline{H}(y_0) = \frac{1}{w_x} \sum H(x_0, y_0). \quad (10)$$

3.2. Test pieces and images of fracture surfaces

The test pieces for evaluating the SZW_c were CT test pieces with a chevron notch made from STPG370 (carbon steel). The elastic–plastic fracture toughness test was based on ASTM E1820 and was performed by the unloading elastic compliance method at 200°C. Four pieces were tested, and 3 images were obtained from each test piece.

Scanning electron microscopy (SEM) was used to examine the fracture surface (ERA-4000; Elionix, Tokyo, Japan). Figure 2-I shows the image of a fracture surface which has 256 gray levels (8 bit/pixel). The magnification and resolution of the image are $\times 400$ and 800×600 pixels, respectively.

W used for the AWC method is $18 \mu\text{m}$ and the Daubechies ($N = 2$) wavelet is used as the mother wavelet. The time for calculation was 90 minutes on Intel Xeon 2.2 GHz.

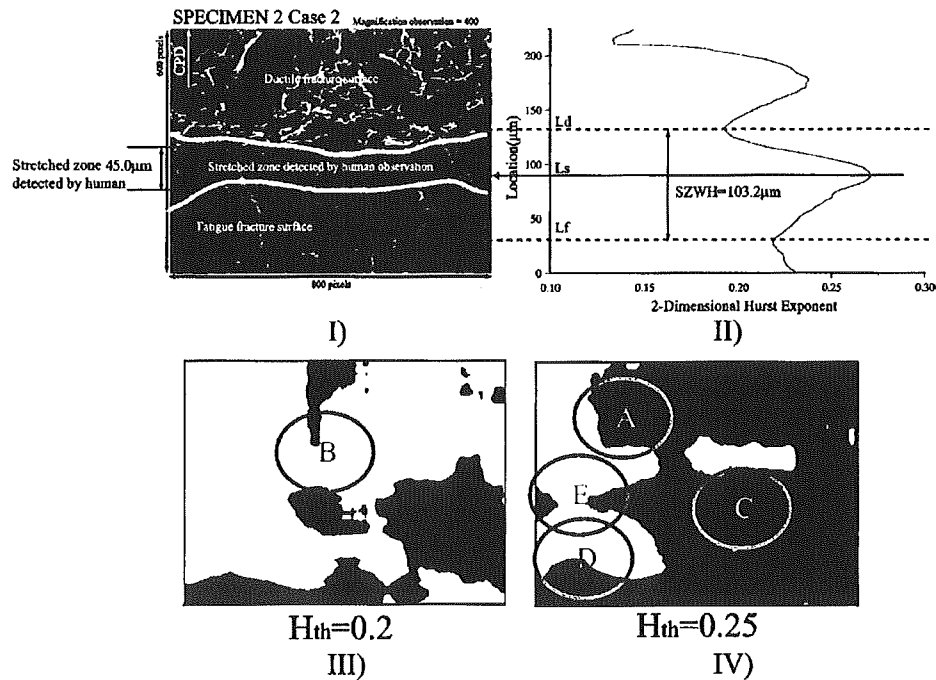


Fig. 2. Distribution of two-dimensional local Hurst exponent and stretched zone detected by our proposed method. (I) Gray scaled image of fracture surface. (II) Relationship between two-dimensional Hurst exponent and the location. (III) Distribution of two-dimensional local Hurst exponent ($H_{th} = 0.2$). (IV) Distribution of two-dimensional local Hurst exponent ($H_{th} = 0.25$).

4. Results

Examples of an analyzed image and the distribution of the two-dimensional local Hurst exponent are shown in Fig. 2. In Fig. 2-I, the white line indicates the stretched zone detected by human observation, Fig. 2-II shows the relationship between $H(y_0)$ and the location, and Fig. 2-III shows the distribution of the two-dimensional local Hurst exponent. Threshold (H_{th}) is 0.2. The white region is flatter than the black region. Fig. 2-IV also shows the distribution ($H_{th} = 0.25$).

Note that in Fig. 2-III, the white region is larger in the lower region than in the upper region, indicating that the fatigue fracture region is flatter than the ductile fracture region.

In addition, the white area in the ductile fracture region is related to the bottom of the dimple, which is large. For example, A in Fig. 2-IV is related to the large dimple observed the upper left of Fig. 2-I, while B in Fig. 2-IV is related to the set of small dimples. The two-dimensional local Hurst exponent is thus small.

Based on the data shown in Fig. 2-IV, the stretched zone is flatter than the fatigue and ductile regions. Furthermore, by setting the threshold appropriately, it is possible to detect the stretched zone shown in C (Fig. 2-IV). However, A, D in Fig. 2-IV indicates that there are regions in the fatigue and ductile regions which are flat, making these difficult regions in which to detect the stretched zone.

If we observe the fatigue and ductile regions, it becomes clear that the stretched zone is always flat in the x-direction while the other regions are not always flat in the same direction. Therefore, the SZW_c is evaluated by calculating the averaged local Hurst exponent shown in Eq. (7).

Based on Fig. 2-II, it is obvious that the region detected by the proposed method is related to the region detected by human observation because the stretched zone is flatter than the other region and the two-dimensional local Hurst exponent is larger than the other area. Moreover, the maxima in the ductile fracture region is considered to be related to the large dimple observed in the upper left area of Fig. 2-I. Above all, the validity of the analytic model shown in Fig. 1 is proved.

In the next, the SZW_c detected by the proposed method and the human observation at the each image from the test pieces are shown in Table 1.

Table 1
Result of quantitative evaluation of SZW_c (μm) by two-dimensional local Hurst exponent (upper part) and by human observation (lower part)

		SZW_c (μm)	Average (μm)
Specimen 1 $J = 134.5$ (kJ/m^2)	Case 1	45.9	43.4 ± 2.00
	Case 2	41.1	(38.4 ± 3.0)
	Case 3	43.1	
Specimen 2 $J = 92.0$ (kJ/m^2)	Case 1	35.4	47.3 ± 8.51
	Case 2	51.6	(43.4 ± 1.8)
	Case 3	54.9	
Specimen 3 $J = 81.2$ (kJ/m^2)	Case 1	35.3	33.2 ± 3.19
	Case 2	28.7	(39.3 ± 7.7)
	Case 3	35.6	
Specimen 4 $J = 79.1$ (kJ/m^2)	Case 1	47.6	42.0 ± 4.05
	Case 2	38.4	(40.9 ± 1.9)
	Case 3	39.8	

5. Discussion

5.1. Evaluation of the stretched zone

In order for the stretched zone detected by the proposed method to be valid, the location of L_f and L_d must roughly agree with the stretched zone detected by human observation. Figure 2-II shows that the boundary between the stretched zone and the ductile fracture region is in good agreement with the boundary detected by human observation. However, the boundary between the fatigue fracture region and the stretched zone does not show this agreement.

Komai [6] conducted research on the depth of dimples, in which he found the depth to be a few μm ; the width of a dimple is approximately $10\ \mu\text{m}$. On the other hand, the height of striation reported by Furukawa is on the order of several hundred nm, and the width of striation is approximately $10\ \text{nm}$, because ΔK when the fatigue crack was propagated was $10\ \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$. Thus, the fatigue fracture surface is composed of smaller components than the ductile fracture surface, and the calculated boundary between the fatigue fracture surface and the stretched zone differs from that detected by human observation.

5.2. Evaluation of SZW_c

The difference between the SZW_c detected by the proposed method and that detected by human observation is almost $5\ \mu\text{m}$ as shown in Table 1, and it is nearly the width of the white line shown in Fig. 2-I. The SZW_c obtained by the proposed method thus shows good agreement with that obtained by human observation, proving that the two-dimensional local Hurst exponent is a useful and accurate method of detecting a stretched zone and measuring the SZW_c .

5.3. Relationship between SZW_c and J_{Ic}

Finally, we explain the relationship between SZW_c and J_{Ic} . It is shown in Fig. 3. Kobayashi et al. [7] reported the following equation (Eq. (11)).

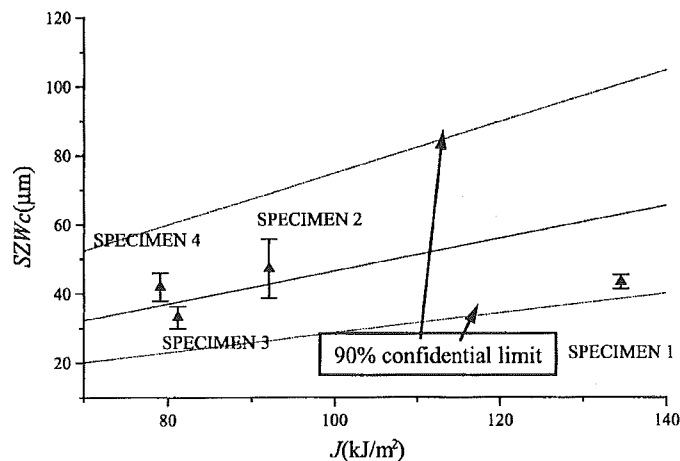


Fig. 3. Relationship between J-integral and stretched zone width.

$$SZW_c = \frac{CJ}{E}, \quad (11)$$

where C is a constant. The mean value of C is 89 with the standard deviation for 90% confidential limit of $54.7 \leq C \leq 143$, and E is the Young's modules. It is 191.0 GPa.

In Fig. 3, Eq. (11) is drawn by the solid line, and the confidential limits are drawn by the broken lines. Each plot with error bar indicates the stretched zone width which is obtained by the two-dimensional local hurst exponent shown in Table 1.

Obviously, the plots with the error bars exist between the confidential limits. Therefore, the relationship between J_{Ic} and SZW_c which is obtained by the two-dimensional local hurst exponent satisfies Eq. (11). Namely, using the two-dimensional local hurst exponent, we can estimate J_{Ic} from the fracture surface in which the stretched zone is observed.

6. Conclusions

In this paper, we propose a two-dimensional local Hurst exponent which can express the complexity of a fracture surface. To verify the applicability of this parameter, we applied it to the measurement of the SZW_c . Our results showed good agreement between the SZW_c detected by the two-dimensional local Hurst exponent and that detected by human observation. We thus conclude that the two-dimensional local Hurst exponent is an efficient method for measuring the SZW_c numerically.

Acknowledgement

This research was supported by Dr. Naoki Miura of the Central Research Institute of the Electric Power Industry of Japan.

References

- [1] H. Takayasu, *Fractal* (in Japanese), Asakura Publishing Co., Ltd., 1986.
- [2] B.B. Mandelbrot, Fractal character of fracture surfaces of metals, *Nature* **308** (1984), 721–722.
- [3] L. Dougan, P. Addison and W. McKenzie, Fractal analysis of fracture: A comparison of dimension estimates, *Mechanics Research Communication* **27**(4) (2000), 383–392.
- [4] C.K. Chui, *An Introduction to Wavelets*, Academic Press, 1992.
- [5] O. Nes, I. Simonsen and H. Hansen, *Phys. Rev. B* **58** (1998), 2779–2787.
- [6] K. Komai, H. Morita and K. Minoshima, Quantitative analysis of three-dimensional images of dimple and stretch zone (in Japanese), *Zairyo* **39**(444) (1989), 1311–1316.
- [7] H. Kobayashi, Fractography and fracture mechanics “fracture toughness”, *Zairyo* (in Japanese) **29** (1980), 198–203.