

200501019A

厚生労働科学研究研究費補助金

労働安全衛生総合研究事業

破断面から破断荷重を推定するための
定量解析システムの開発

平成17年度 総括研究報告書

主任研究者 山際 謙太

平成18(2006)年 4月

目 次

I. 総括研究報告

破断面から破断荷重を推定するための定量解析システムの開発----- 1

山際謙太

II. 分担研究報告

1. 二次元局所 Hurst 数を用いた破面特性化手法と、ストレッチゾーン幅の
定量解析への応用 ----- 5

山際謙太

2. 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開発----- 9

酒井信介

III. 研究成果の刊行に関する一覧表 ----- 12

IV. 研究成果の刊行物・別刷 ----- 13

厚生労働科学技術研究費補助金（労働安全衛生総合研究事業）
総括研究報告書

破断面から破断荷重を推定するための定量解析システムの開発

主任研究者 山際謙太 独立行政法人産業安全研究所研究員

研究要旨 本研究は、破断面に数値解析を適用し、破断面から破壊の際の荷重を推定するための数値定量解析手法の開発と破断面データベースが融合した破断面解析システムを構築することを目的とする。初年度である平成17年度は、まず弾塑性破壊試験破面から破断荷重を推定する手法について開発を行った。二次元局所 Hurst 数というパラメータを提案し、これを用いることでストレッチゾーン幅が定量的に評価できることを示した。ストレッチゾーン幅は破断荷重と関係があることから、従来と比較して客観的な破断荷重の推定を実現した。次に、破断面データベースの設計と構築を行った。破断面データベースは破断面ができる際の条件を格納するデータシート、破断面の外観・電子顕微鏡写真画像と、破断面画像を数値解析することで得られる粗さやフラクタル次元が得られる解析プログラムが実装されている。このデータベースを用いることで、解析者は類似破断面の検索や、破断面画像の数値解析を行うことが可能になった。また、破断面データベースに掲載する破断面画像を収集する目的で、引張り試験・疲労試験・衝撃試験を行った。

分担研究者氏名・所属機関名及び所属機関
における職名

酒井信介・東京大学工学部教授

システムを開発する。これにより、定量的な破断荷重の評価と解析に関する知見の共有が可能になり、正確な事故解析に寄与することが可能となる。

A. 研究目的

破断面は、機械構造物の破壊の履歴を示す唯一の証拠であり、その厳密な解析なくしては、正確な事故原因究明は行うことができない。従って、構造物の安全維持と災害の未然防止を達成するために破断面解析は必要不可欠である。また、一度災害が発生した場合、類似災害防止のためにも、破断面解析には迅速さが求められる。しかしながら現在の破断面解析では、1) 熟練者の個人的ノウハウを基に行っており、定性的な評価しかなされていない、2) 破断面全体の観察・解析には膨大な時間が必要である。その上、熟練者の高齢化が進んでおり、解析に対する知識や経験が急速に失われようとしている。

そこで本研究では、破断面に数値解析手法を導入し、解析初心者でも簡単に、かつ迅速に破断荷重が評価できるデータベースシ

B. 研究方法

本研究は3年計画で独立行政法人産業安全研究所、東京大学工学部で実施する。初年度である平成17年度は、次に示す方法で研究を実施する。

まず産業安全研究所では、弾塑性破壊試験片の破断面に観察されるストレッチゾーンの定量評価に関する手法の検討を行う。ストレッチゾーンの幅は破断時の荷重と関係があることが従来研究でわかっており、本研究では二次元局所 Hurst 数と呼ばれるパラメータを提案し、弾塑性破壊試験破面に適用する。これによりストレッチゾーンが観察された破面に関しては破断荷重の客観的な推定が可能となる。

次に、産安研と東京大学の共同で、破断面データベースの設計と構築を行う。破断面データベースは、破面の画像を検索する

機能や開発された解析手法を適用する機能が導入されている。これにより、解析初心者が類似破面の容易な検索が可能となり、加えて破断面の数値解析が実行できる。

また、破断面データベースに載せるための破断面収集を目的とした破壊試験を行う。試験内容は、1) 疲労試験、2) 衝撃試験、3) 引張試験、4) 弾塑性破壊試験を行う。

(倫理面への配慮)

本研究の実施によって、生体及び環境へ影響を及ぼすことは無いので、倫理面への問題は無いと考える。

C. 研究結果

1：ストレッチゾーンの定量評価に関する手法について

本研究では二次元局所 Hurst 数を提案した。従来の研究で破断面をフラクタル次元で特性化する手法の研究が行われてきたが、フラクタル次元は等方性を持ったフラクタル図形の特性化に有効である。しかし、破断面に関しては異方性であることから、Hurst 数の適用が有効である。二次元局所 Hurst 数はこの Hurst 数の概念を二次元に拡張し、さらに図形内の局所領域におけるフラクタル性(複雑さ)の特性化を可能にする指数である。

ストレッチゾーンは、弾塑性破壊試験破面に観察される平坦な領域である。本研究では、この領域が複雑で無いという点に着目し、二次元局所 Hurst 数で特性化することを試みた。特にストレッチゾーンの幅は破断時の荷重に相関があることがわかっていることから、従来は目視で行っていた幅の計測が画像処理で行えることになり、より客観的な荷重推定が可能になる。

二次元局所 Hurst 数を用いてストレッチゾーンの幅を計測した結果、目視で同定した領域と合致した領域を抽出することができた。つまり、これまで観察者の経験を元に判断していた領域を数値解析により判断できるようになり、より客観的な計測が可能になったと言える。

2：破断面のデータベースの設計と構築について

破断面のデータベースの設計を行った。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。

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)を行うことが可能である。

また、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。特徴量としては、表面性状(粗さ)パラメータ(日本工業規格 JIS B0601:2001 表面製品の幾何特性仕様(GPS)),フラクタル次元・二次元周波数分析を使用した。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。

D. 考察

1：ストレッチゾーンの定量評価に関する手法について

目視で判別したストレッチゾーンと、二次元局所 Hurst 数により同定したストレッチゾーンは、よく一致しているものの、疲労破面側については、若干一致しないところがあった。この原因として考えられることは、疲労破面側はストライエーションが観察され、その高さは高々数百 nm である。これに対して、疲労とは反対側の延性破面側でディンプルの深さは数 μm である。このことから、疲労破面側の凹凸は延性破面側と比べ小さいため、画像に置いてもあまり凹凸が明瞭で無く、ストレッチゾーンとの境界が不明瞭であることがわかる。従って、疲労破面側の判別に一致しない箇所が存在している。

しかしながら、実際に荷重推定をするためには十分な精度を有しており、実用的には問題が無いことがわかった。

2：破断面のデータベースの設計と構築について

本データベースは、二通りの使用方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。

次に、破断面の特徴量について考察する。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。

E. 結論

平成17年度の研究により、以下の結論を得た。

破断面から荷重を推定する手法として、二次元局所 Hurst 数を提案した。弾塑性破壊試験破面のストレッチゾーン領域同定に適用した結果、目視とよく対応した領域を同定することが可能であった。従って、本パラメータを用いてストレッチゾーン幅から荷重推定が可能となった。

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。

F. 健康危険情報

無し

G. 研究発表

1. 論文発表

高梨正祐, 山際謙太, 泉聡志, 酒井信介, “定量フラクトグラフィに基づいた破面解析支援データベースシステムの構築”, 圧力技術, Vol. 44, No. 1, pp. 3-11, 2006.

K. Yamagiwa, M. Takanashi, S. Izumi, S. Sakai, Method for quantitative evaluation of stretched zone width using two-dimensional local Hurst exponent, Strength, Fracture and Complexity, Vol. 3, No. 2-4, pp. 81-87, 2005.

2. 学会発表

高梨正祐, 山際謙太, 泉聡志, 酒井信介, “テクスチャ解析による球状黒鉛鑄鉄の破面性状の分離”, 日本機械学会 M&M2005 材料力学カンファレンス講演論文集, pp. 347-348, 2005 年 11 月福岡.

山際謙太, 高梨正祐, 泉聡志, 酒井信介, “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”, 第 10 回機械・構造物の強度設計, 安全性評価に関するシンポジウム前刷集, pp. 53-56, 2006 年 2 月京都.

H. 知的財産権の出願・登録状況 (予定を含む)

1. 特許取得

無し

2. 実用新案登録

無し

3. その他

無し

二次元局所 Hurst 数を利用した破面特性化手法

主任研究者 山際謙太 独立行政法人産業安全研究所研究員

研究要旨 本研究では、二次元局所 Hurst 数を提案する。二次元局所 Hurst 数は破面の局所的な複雑さを評価するパラメータである。当パラメータをストレッチゾーン幅の定量評価に応用した。ストレッチゾーンの幅が定量的に評価できることで、破断荷重の客観的な推定を実現した。

A. 研究目的

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。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。しかし、例えば破面率から作用応力推定のように、破面の局所的な情報が破断時の状態を示す場合もある。本研究では、フラクタル次元の 1 つである Hurst 数の概念を拡張し、二次元の複雑さを示す二次元局所 Hurst 数を提案する。また、二次元局所 Hurst 数の有効性を検証するために、破面の濃淡画像を使用して限界ストレッチゾーン幅(SZWC)の評価を行う。

B. 研究方法

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。つまり、ある関数 $h(x, y)$ があるときに $x \rightarrow \lambda x$ という変換を行った時、

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

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 0~1 の値であり、小さいほど

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、式(1)より (x_0, y_0) 近傍においても、

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

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

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。

二次元ウェーブレット変換の基礎式を式(3)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。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、

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

と変形される。さらに式(3)とマザーウェーブレットのアドミッシブル条件より、

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

となり、

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

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。また、べき乗則の収束性も低いと指摘されている。ゆらぎを抑えるために、Simonsen 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。

$$\begin{aligned} & \overline{W(h(x, y), a, x_0, y_0)} \\ & = \frac{1}{\omega^2} \sum_{y=y_0-(1/2)\omega}^{y=y_0+(1/2)\omega} \sum_{x=x_0-(1/2)\omega}^{x=x_0+(1/2)\omega} |W(h(x, y), a, x, y)| \end{aligned} \quad (9)$$

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 ω 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。

C. 研究結果

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 は、限界き裂先端開口変位(CTOD)や弾塑性破壊じん性値 JIc との対応が良いことが指摘されている。従って、SZWc から、破壊時の JIc がわかり、破断荷重の推定も可能になる。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 を決定した。

ストレッチゾーンである領域は、延性・疲労破面の領域と比較して、平坦な部分である。従って、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は異なるため、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、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、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。しかし、 L_f と L_d の差はストレッチゾーンだけでなく、前後の疲労・延性破面領域からの遷移領域も含まれている。そのため、本研究では SZWc を L_f - L_d の半分の値と定義した。

SZWc の計測結果を次の表に示す。

		SZWc (μm)	Average (μm)
SPECIMEN 1	Case1	45.9	43.4 \pm 2.00
	Case2	41.1	
	Case3	43.1	
SPECIMEN 2	Case1	35.4	47.3 \pm 8.51
	Case2	51.6	
	Case3	54.9	
SPECIMEN 3	Case1	35.3	33.2 \pm 3.19
	Case2	28.7	
	Case3	35.6	
SPECIMEN 4	Case1	47.6	42.0 \pm 4.05
	Case2	38.4	
	Case3	39.8	

D. 考察

ストレッチゾーンの境界の妥当性について、 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。

ストレッチゾーンと延性破面の境界は、

目視と計算結果は非常によく一致した。

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によると、ディンプルの深さは数 μm である。また、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が良く検出できなかったと考えられる。

提案手法で求めた SZWc の評価のため、目視と一次元局所 Hurst 数を用いて SZWc を求めた。結果を次の表に示す。一次元局所 Hurst 数を用いた場合、試験片 3 に関しては L_d , L_f が判定されず求めることができなかった。

	目視	1次元 Hurst
SPECIMEN 1	38.4 \pm 3.0	95.7 \pm 1.1
SPECIMEN 2	43.4 \pm 1.8	100.0 \pm 5.3
SPECIMEN 3	39.3 \pm 7.7	×
SPECIMEN 4	40.9 \pm 1.9	75.7 \pm 20

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。従って、精度良く SZWc 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。

以上のことから，二次元局所 Hurst 数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示せた．

E. 結論

本研究では，破断面から荷重を推定する手法として，二次元局所 Hurst 数を提案した．二次元局所 Hurst 数は破面の複雑さを示す指標である．二次元局所 Hurst 数を弾塑性破壊試験破面のストレッチゾーン領域同定に適用した結果，目視とよく対応した領域を同定することが可能であった．従って，本パラメータを用いてストレッチゾーン幅から荷重推定が可能となった．

F. 健康危険情報

無し

G. 研究発表

1. 論文発表

K. Yamagiwa, M. Takanashi, S. Izumi, S. Sakai, Method for quantitative evaluation of stretched zone width using two-dimensional local Hurst exponent, Strength, Fracture and Complexity, Vol. 3, No. 2-4, pp. 81-87, 2005.

2. 学会発表

高梨正祐，山際謙太，泉聡志，酒井信介，“テクスチャ解析による球状黒鉛鋳鉄の破面性状の分離”，日本機械学会 M&M2005 材料力学カンファレンス講演論文集，pp. 347-348，2005 年 11 月福岡．

H. 知的財産権の出願・登録状況（予定を含む）

1. 特許取得

無し

2. 実用新案登録

無し

3. その他

無し

厚生労働科学技術研究費補助金（労働安全衛生総合研究事業）
分担研究報告書

破面解析支援データベースの作成

分担研究者 酒井信介 東京大学工学部教授

研究要旨 本研究では、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。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、破面の比較を行えるのが、本解析支援システムの特徴である。

A. 研究目的

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。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。

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。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。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、破面の比較を行えるのが、本解析支援システムの特徴である。

B. 研究方法

フラクトグラフィデータベースシステムは、データシートと呼ぶ破断面に関する情報を格納するデータベースと、破断面画像や3次元情報を解析する数値解析プログラムから構成される。このデータベースは、インターネット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になっている。

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) を行うことが可能である。

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。

計算が可能な特徴量は、表面性状 (粗さ) パラメータ (日本工業規格 JIS B0601:2001 表面製品の幾何特性仕様 (GPS)) フラクタル次元解析、二次元周波数分析とした。

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。

C. 研究結果

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では、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。

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。

本システムで計算した特徴量に基づき、類似画像の検索を行った。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、 $\pm 5\%$ の範囲の類似画像を検索すると、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 データ抽出された。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うことになる。

D. 考察

本データベースシステムは、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。

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。

E. 結論

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。

F. 健康危険情報

無し

G. 研究発表

1. 論文発表

高梨正祐, 山際謙太, 泉聡志, 酒井信介,
“定量フラクトグラフィに基づいた破面解析支援データベースシステムの構築”, 圧力技術, Vol. 44, No. 1, pp. 3-11, 2006.

2. 学会発表

山際謙太, 高梨正祐, 泉聡志, 酒井信介,
“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”, 第10回機械・構造物の強度設計, 安全性評価に関するシンポジウム前刷集, pp. 53-56, 2006年2月京都.

I. 知的財産権の出願・登録状況(予定を含む)

1. 特許取得

無し

2. 実用新案登録

無し

3. その他

無し

研究成果の刊行に関する一覧表

雑誌

発表者氏名	論文タイトル名	発表誌名	巻号	ページ	出版年
高梨正祐, 山際謙太, 泉聡志, 酒井信介	定量フラクトグラフィに基づいた破面解析支援データベースシステムの構築	圧力技術	Vol. 44, No. 1	pp. 3-11	2006
K. Yamagiwa, M. Takanashi, S. Izumi, S. Sakai	Method for quantitative evaluation of stretched zone width using two-dimensional local Hurst exponent	Strength, Fracture and Complexity	Vol. 3, No. 2-4	pp. 81-87	2005

定量的フラクトグラフィに基づいた 破面解析支援データベースシステムの構築

Development of database system to support fracture surface analysis based on quantitative fractography

石川島播磨重工業(株) 基盤技術研究所
高梨 正祐 (Masahiro TAKANASHI)
(独)産業安全研究所
山際 謙太 (Kenta YAMAGIWA)
東京大学大学院 工学系研究科
泉 聡志 (Satoshi IZUMI)
酒井 信介 (Shinsuke SAKAI)

Since evidences of fracture processes are remained on the fracture surfaces, a fractography method is usually applied to failure analysis of actual components. This method, however, contains some problems such as lack in objectivity to the analysis result, requirement for highly skilled technique, and retirement of aging skilled operators without handing down technique to next generation.

In order to solve these problems, it is considered that quantitative parameters should be introduced to fracture surface analysis. In this paper, therefore, we develop a fracture surface database system which can be easily used on the Internet to support unskilled engineers to analyze fracture surfaces. In this database system, users can search the fracture surfaces by key words like fracture modes, materials, and so on. In addition, this database system is designed so as to compute characteristic parameters of fracture surfaces such as roughness parameters and fractal dimension. The users can compare images and make decision on the fracture surface analysis based on the characteristic parameters. This system also helps document management automatically that currently relies on engineers in charge and contributes to improve data reusability.

Key words: Quantitative Fractography, Database System, Fracture Surface, Failure Analysis, Roughness, Fractal Dimension

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、必ずといってよいほど

破断面(破面)の調査が実施されている。経験豊富な観察者が、ルーペ、実体顕微鏡、走査型電子顕微鏡などを用いて、損傷品の破面を丹念に観察することにより、破面に観察された模様を手掛かりに損傷原因の推定が行なわれている。こうした

原稿受付日 17. 7. 14

評価手法はフラクトグラフィとよばれ、損傷問題の解決に大きく貢献してきた¹⁾。

フラクトグラフィ手法は、損傷調査には不可欠な技術であるが、従来の手法は評価が定性的であり、結論を下すには熟練を要する、など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。たとえば、ストライエーションの間隔からき裂の伝ば速度を推定し、破壊荷重を推定する手法などがある³⁾。また、著者らはストレッチゾーンが観察される場合、定量的にストレッチゾーン幅を計測し、弾塑性破壊じん性値 J_{Ic} を推定する手法を提案している⁴⁾。現段階での定量解析は、解析対象破面が限定される場合には有効である。

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。定性的破面解析による損傷調査で頼りになる方法は、過去の損傷事例から得られた破面や実験室などで得られた破面と、実機破面との比較に基づいた損傷原因の推定である。このようなニーズからいくつかの破面集が出版されている^{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く、破面データを積極的に収集して、以降の解析で活用するような状態にはなっていない。

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。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、画像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. 従来破面解析の問題点と破面解析支援のためのシステム概念の提案

2.1 従来破面解析の問題点

前章でも述べた通り、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。このような定性的な破面解析の問題点としては、次の三つが考えられる。

- (a) 解析結果が技術者の主観に依存
- (b) 熟練者の減少と技術の伝承
- (c) 過去の事例・データの管理

第一番目の問題点であるが、定性的な破面解析では、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。ここで要求されるのは、画像の類似性を判断する技術である。破面様相は、熱処理などの材料的因子、温度や雰囲気といった環境的因子、曲げ荷重やねじり荷重など力学的因子により著しく異なるため、破面解析には熟練した技術が要求される。破面集などでは、データの量も限られているため、全く同じ条件で作成された破面が存在する可能性は低い。そこで、同等とみなせるような破面データを探し出し、不足する情報は観察者が類推することにより、破面解析がなされる。この技術については全面的に観察者の主観に依存し、客観性が欠落してしまうという問題点がある。

第二番目の問題点としての熟練者の減少と技術の伝承であるが、フラクトグラフィが学問として成長期にあり、積極的な試行錯誤が行われた1970～80年代には経験豊富な専門家が多数いた。だが、成熟期に入りフラクトグラフィがルーチンワークとなると専門家の育成が困難となった。さらに、成長期に第一線で活躍していた熟練者も高齢化していき、職を退いていった。後継者が育たないまま、職を退いたため、技術の伝承も十分にはなされていない。

第三番目の問題点はデータ管理である。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。破面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のが通常である。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。いずれの場合も、破面を走査型電子顕微鏡で詳細に観察した結果の一部のみが、損傷調査報告書や論文として残されるにとどまっている。残りのデータは個々人のファイルに収容され有効活用されないケースが多い。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。

2.2 破面解析支援のためのシステム概念の提案

以上のような問題点を解決するために、本論文では破面解析を支援するシステム概念を提案する。現状の破面解析が類似破面の検索に依存しているため、破面解析を支援するには画像の類似性を判断する必要があると考えられる。したがって画像解析技術を援用して、破面解析を支援することとした。画像解析の対象を破面とした場合に考慮しなければいけないことは、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だけを頼りに、主観的なパターンマッチングを試みている。類似画像を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⁷⁾。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徴は、現在出版されているような破面集には記載されていない。

したがって、破面全体を特徴付けるパラメータを指標とし類似画像の比較・抽出を実施すれば破面解析の支援が可能となる。本論文で提案するシステム概念を、従来の損傷・失敗事例データベースなどの例と比較して Fig. 1 に示す。通常

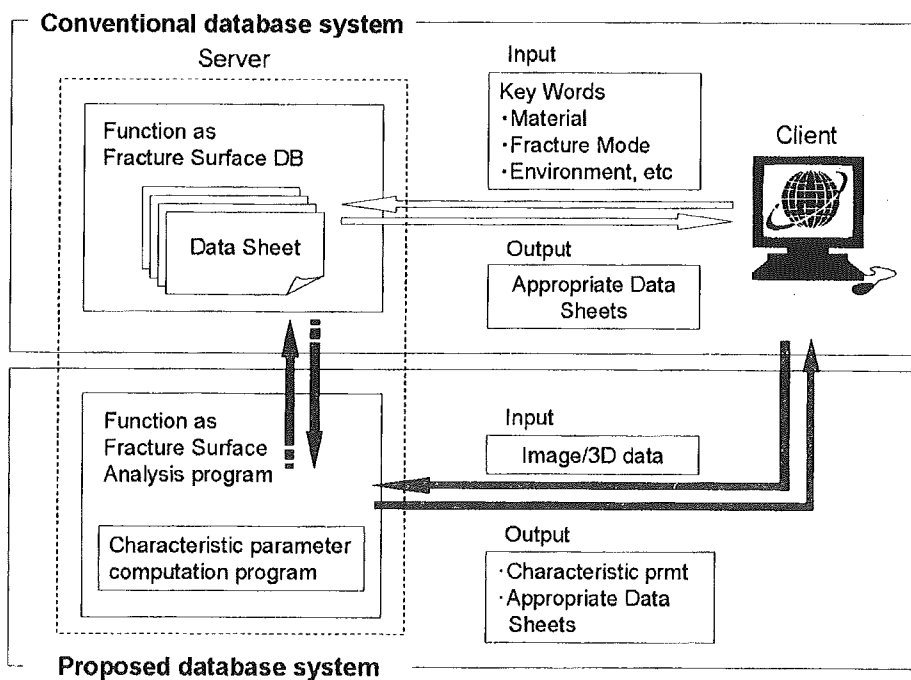


Fig. 1 Proposed database system compared with conventional database system.

のデータベースでは、材料や破壊モードなどをキーワードとして入力すると、該当するデータシートを返す。提案するシステムでは、キーワードではなく画像データを入力し、システム側で破面の特徴量を算出する。その後、計算された特徴量と類似するデータシートを返す仕組みとなっている。入力された画像データはデータベースに蓄積される。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るが、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。すなわち、破面画像とともにその画像に関する特徴量も保存でき、データの体系的な管理が可能となる。

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り、技術の伝承にもなる。

破面全体を特徴付けるパラメータは、現段階ではいくつか提案されている^{8),9),13)}。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、肝心の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って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。

3. データベースシステムの試作

3.1 破面データベース

第2章で提案したシステム概念に基づき、破面解析支援データベースを試作した。本データベースシステムは、クライアントとサーバから構成され、WebサーバソフトにはThe Apache Software Foundationより提供されているApacheを用いた。ユーザインターフェースとなる部分はCGI(Common Gateway Interface)をPerlで構築した。データベース管理ソフトにはSQLを用い、二つのデータテーブルに必要とされるデータが保存されている。一つのテーブルには、破面に関連する情報、すなわちタイトルや材料名、破面生成状況などが格納されている。もう一つの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。この二つのテーブルは自動的に発番される管理番号を主キーとして、相互に関連付けられている。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管理できるようになっている。

本データベースシステムは、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。

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を備えた機能である。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、類似画像を含むデータシートを返してくれるシステムである。

3.2 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。現段階では以下に示す三つのプログラムを実装した。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詳細に述べる。

・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、従来より破面の定量解析によく用いられてきた。たとえば、大橋⁸⁾は、切欠きを導入した鋳鉄試験片に対し引張り試験を実施している。切欠きの影響により破断伸びが異なった試験片の破面の最大山高さを計測し、破断ひずみとの相関を得ている。藤原ら⁹⁾は12Cr鋼の疲労破面に対し粗さ計測を実施し、ストライエーションが観察されないような低応力拡大係数範囲において粗さより作用応力を推定する手法を提案している。

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、表面粗さは一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することにした。画像の特徴量としては、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り、破面の特徴量として認識されつつある。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¹²⁾。また、山際ら¹³⁾は破面はある倍率領域でのみフラクタル性を示すことを指摘し、フラクタル次元により破面から破壊形態の分類を試みている。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、複雑さを表現する一つの手法として、フラクタル次元

も特徴量としてみなした。

本データベースでは、ボックスカウンティング法を用いて、フラクタル次元を求めることとした。解析対象は観察破面全体であり、ビットマップの場合は濃淡情報に対して、テキストファイルの場合は高さ情報に対して解析を実施する。

・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。現時点では、計算したパワースペクトル分布をもとに、データベース内の画像を検索するシステムは搭載していない。ユーザに周期性と方向性の情報を提供するためだけに計算プログラムを実装した。

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/>) 上で公開中である。

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。前述の通り、二通りの使用法が可能であり、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。解析を実施する前に、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。基本的にはテキストボックスに文字を入力していく形式であり、損傷調査報告書などから、コピー・ペーストで作成できるようになっている。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。画像に関しては、ファイルの場所を指定することにより、自動的にリンクが形成され、ファイルが指定のディスクに保存されるシステムとなっている。このように、解析を実施する前に、解析対象

検索 データ投入 フラクトグラフィデータベースシステム

登録データ	
タイトル	材料仕様
実機/実験	破壊様式
破壊の発生環境	
破壊の発生の概要	
外観写真	<input type="button" value="参照"/>
	<input type="button" value="参照"/>
	<input type="button" value="参照"/>
	<input type="button" value="参照"/>
	<input type="button" value="参照"/>
破面写真	<input type="button" value="参照"/> 観察倍率 <input type="text"/> データ間隔 <input type="text"/> μm
	<input type="button" value="参照"/> 観察倍率 <input type="text"/> データ間隔 <input type="text"/> μm
	<input type="button" value="参照"/> 観察倍率 <input type="text"/> データ間隔 <input type="text"/> μm
	<input type="button" value="参照"/> 観察倍率 <input type="text"/> データ間隔 <input type="text"/> μm
	<input type="button" value="参照"/> 観察倍率 <input type="text"/> データ間隔 <input type="text"/> μm
観察者コメント	
備考	
解析条件	
表面粗さ分析	<input type="checkbox"/> 最大山高さ (Rp) <input type="checkbox"/> 最大谷深さ (Rv) <input type="checkbox"/> 最大高さ (Rz) <input type="checkbox"/> 平均高さ (Rc) <input type="checkbox"/> 最大断面高さ (Rv) <input type="checkbox"/> 算術平均高さ (Ra) <input type="checkbox"/> 二乗平均平方根高さ (Rq) <input type="checkbox"/> スキューネス (Rsk) <input type="checkbox"/> クレトシス (Rku) <input type="checkbox"/> 平均幅 (Rsm) <input type="checkbox"/> 二乗平均平方根傾斜 (Rdq) <input type="checkbox"/> 負荷長さ率 (Rmrc) <input type="checkbox"/> 切断レベル差 (R&c) <input type="checkbox"/> 相対負荷長さ率 (Rmr)
	負荷長さ率 Rmr1 <input type="text"/> Rmr2 <input type="text"/> 切断レベル
	フラクタル次元解析 ボックス長さ <input type="text"/> μm 類似データ検索 振幅幅 <input type="text"/> %
<input type="button" value="解析実行"/>	

Fig. 2 User interface for fracture surface analysis support system.

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。このため、従来のデータベースが抱えている定期的なデータ補充の問題についても、自動的に対応できる。また、データの再利用性も向上する。

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おり、インターネット上では表示に時間がかかるため、サムネイル画像を表示させた。サムネイル画像を用いることにより、倍率の異なる複数の画像を並べて表示が可能となっている。

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ある。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 R_{ay} を基準とし、40 枚の画像の中から $\pm 5\%$ 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の観察される破面が 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。