

厚生労働科学研究費補助金

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
定量解析システムに関する研究

平成 17 年度～19 年度 総合研究報告書

研究代表者 山際 謙太

平成 20 (2008) 年 4 月

目 次

I. 総合研究報告		
破断面から破断荷重を推定するための 定量解析システムに関する研究	-----	1
山際謙太		
II. 研究成果の刊行に関する一覧表	-----	9
III. 研究成果の刊行物・別刷	-----	10

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）
総合研究報告書

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 独立行政法人労働安全衛生総合研究所研究員

研究要旨 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、数値解析により客観的な評価を行うことが求められている。本研究では破断面から破断荷重を推定する技術について研究を行った。特に1：ストレッチゾーンの幅、2：ディンプルの大きさ、3：疲労破面の粗さについての研究を行い、破断荷重との関係について調査を行った。また、この解析技術と熟練者の破断面解析に関する知見を保存するためのデータベースを構築し、解析初心者に対して支援するための解析システムを構築した。

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を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。

B. 研究方法

破断面には様々な特徴があり、これらから破断荷重に関する情報を引き

出すことができる。本研究では以下の3種類の破断面様相とそれを特性化するためのパラメータに着目した。

1) 二次元局所 Hurst 数を用いたストレッチゾーン幅の計測

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。

2) ランレングスを用いたディンプルの大きさの計測

高温機器の破壊事故の際に、延性破壊を起こした領域に関してはディンプル（円形・楕円形模様）が観察される。ディンプルの大きさと破壊における構造物の温度には相関があり、温度が高いほどディンプルは大きくなる。ことが寺田らの研究（寺田：わかりやすい構造破壊の防止技術：養賢堂）で報告されている。したがって、ディンプルの大きさを評価すれば、温度が推定され、その結果と稼働履歴などから破壊荷重の推定が可能になる。本研究では画像処理に用いられるパラメータの一つであるランレングスに着目

し、ディンプルの大きさを評価する手法を提案する。

3)粗さを用いた疲労破断面の評価
疲労破壊の特徴であるストライエーションが観察される場合は応力推定を行うことが可能であるが、実機の事故破断面の場合は圧縮の荷重がかかることで破断面が押しつぶされ、ストライエーションが観察されないこともある。このような場合、表面粗さを用いることで応力推定を行う研究が行われている。本研究では、1) 溶接構造用圧延鋼材 SM490A の平滑丸棒試験片を用いて回転曲げ疲労試験を実施し、2) 破断面の粗さと応力の関係について検討を行った。

次に、これらのパラメータの中でも特に一般的に用いられている粗さに着目し、破断面の特性化をおこなうための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、破面の画像を検索する機能や開発された解析手法を画像に適用する機能が導入されており、解析初心者が類似破面の容易な検索が可能となる。また、破断面の数値解析が実行できる。

そして、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) 弾塑性破壊試験を実施した。

(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。

SZWc の計測結果を次の表 1 に示す。

表 1 : SZWc の計測結果

		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	

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:ランレングスを用いたディンプルの大きさの計測

本研究では、延性破面の電子顕微鏡

画像濃淡画像に対し画像処理を行い、ディンプルの大きさを定量的に解析する手法を確立した。特にテクスチャ解析で用いられるランレングスに着目した。ランレングスは、画像をある方向に走査して得られる同じ濃度値を持つ連続した画素列の長さである。輪郭線を抜き出し白黒のみの画像にすると、輪郭の間隔が広ければランレングスは大きくなる。逆に輪郭の間隔が狭ければランレングスは小さくなる。ディンプルの大きさは、輪郭の間隔で評価することができる。したがって、ランレングスの特徴を用いることで、ディンプルの大きさを評価することが可能であると考えた。評価方法を図1に示す。

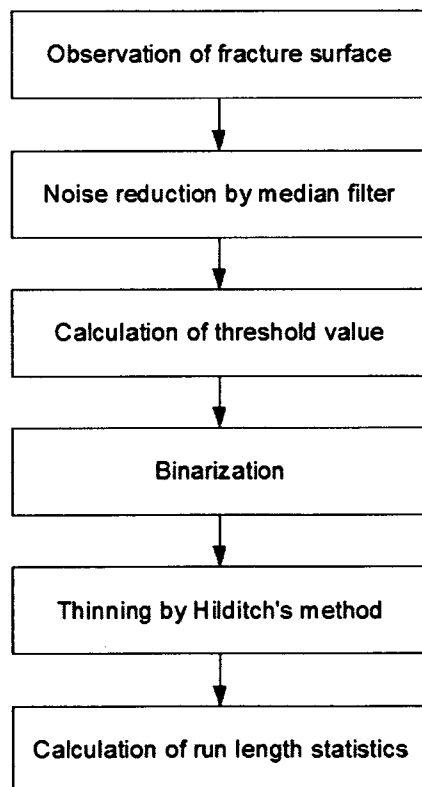


図1：ランレングスを用いた延性破面評価方法

しかし、破面を観察するとディンプルの大きさは均一ではなく、ばらつきを持っていることがわかる。この理由として考えられるのは、以下の2点で

ある。

- 1) 破面は平坦でなく凹凸を含んだ形状をしている。しかし、電子顕微鏡画像は破面全体を上から見たときの画像であるため、斜度が大きい領域に関しては、ディンプルの大きさは小さく観察される
- 2) ディンプルは第2相粒子を核として形成されるが、この第2相粒子の大きさにばらつきがある

したがって、ランレングスのみを用いては、破面全体に広がるディンプルをすべて評価することは困難である。この問題を解決するために、本研究ではランレングスの統計量であるLRE(Long Run Emphasis)を用いてディンプルの大きさを評価した。LREは画像内に長いランが多くなると大きくなる値である。したがって、破壊温度が高くなる、すなわちディンプルが大きくなると、LREが大きくなると考えられる。

そこで、温度が異なる条件下で単軸引張り試験を実施し、LREを計算した。結果を図2に示す、温度に対応してLREが大きくなる傾向が得られた。

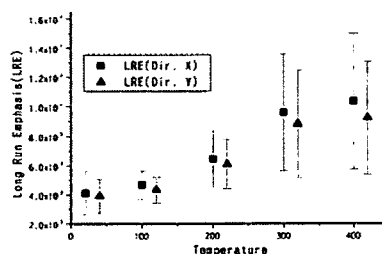


図2：試験温度とLREの関係

3：粗さを用いた疲労破断面の評価
SM490A 回転曲げ疲労試験結果から得られたS-N線図を図3に示す。2本の試験が未破断、1本の試験が3600rpmで実施したため試験片に発熱が生じた。

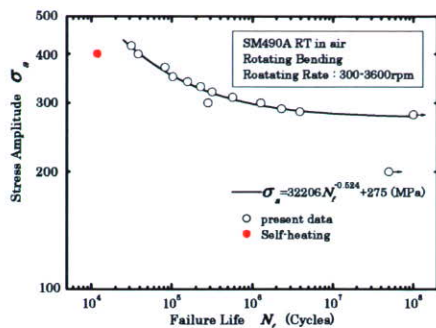


図 3 : SM490A 回転曲げ疲労試験結果

破断面の巨視的観察を行ったところ、応力振幅が低い場合、破断までの繰返し数が大きく、破断面が平坦であった。一方、応力振幅が高い場合は、繰返し数が少なく、破断面の凹凸が大きい。

この破断面の中心部分の観察を行った。観察に使用した対物レンズの倍率は100倍である。観察した破断面の枚数はそれぞれの試験片ごとに3箇所である。

観察した破断面の写真の例を図4に示す。

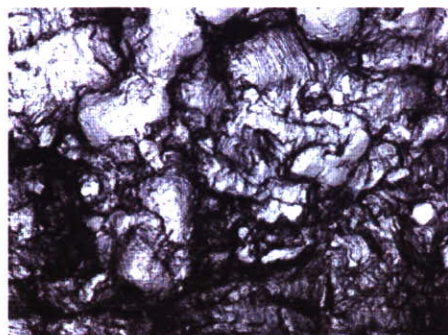


図 4 : SM490A 回転曲げ疲労試験の破断面の例

視野の大きさは140μm×105μmである。また、この破断面の3次元形状から表面粗さの概念を3次元形状の粗さ計測に拡張して、粗さ解析を行った。解析の前処理にはメディアンフィルターを1度使用した。求めた粗さパラメータは算術平均粗さ(Ra: JIS B0601-2001)である。応力振幅とRaの関係を図5に示す。

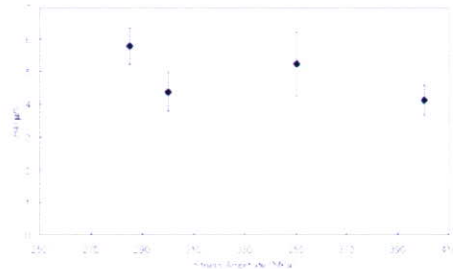


図 5 : 応力振幅と Ra の関係

4 : 破断面データベースの構築について

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。

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。

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

二次元局所 Hurst 数を用いて求めた 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 2 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 Ld, Lf が判定されず求めることができなかった。

表 2：目視と 1 次元 Hurst 数による計算結果

	目視	1次元Hurst
SPECIMEN 1	38.4±3.0	95.7±1.1
SPECIMEN 2	43.4±1.8	100.0±5.3
SPECIMEN 3	39.3±7.7	×
SPECIMEN 4	40.9±1.9	75.7±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 5μm 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 数が、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。

2：ランレングスを用いたディンプルの大きさの計測

破面性状とランレングス統計量の関係について述べる。図 2 において、同一の温度で x, y の両方向の LRE の値にほとんど差が無いのは、ディンプルが等軸であることを反映している。

標準偏差については、高温になるにしたがい大きくなっている。高温では延性が増すためディンプルが成長しやすくなる。また、寸法の異なる第 2 相粒子を核とした二次ディンプルや介在物等の領域もあり、これらの影響でランは短くなる。したがって特に高温の場合は、1 次ディンプルが破面画像内に占める割合（破面率）が高ければ、LRE は大きくなるが、破面率が低ければ LRE は小さくなる傾向がある。したがって、LRE の値がばらつきが大きくなる。すなわち、各視野の 1 次ディンプル破面率の影響があると考えられる。

Galloway はランレングスから得られる統計量として LRE 以外に 3 種類を提案している。これらの統計量と LRE の関係について述べる。

Galloway は、1：短いランを強調するパラメータ（Short Run Length Emphasis：SRE）、2：ラン濃度の一様性（Gray Level Uniformity：GLU）、3：ラン長の一様性（Run Length

Uniformity : RLU) を提案している。ここでは二値化画像のランレングスを求めていることから、GLUについては省略する。SREは短いランが多いほど大きくなる値である。また、RLUは同じ長さのランが多いほど値が大きくなる。図6、図7にそれぞれ温度とSRE、RLUの関係を示す。

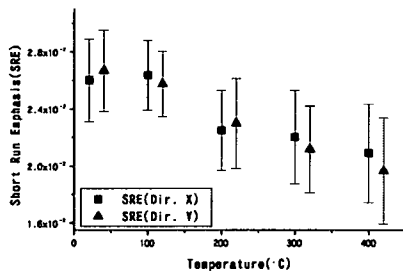


図6：温度とSREの関係

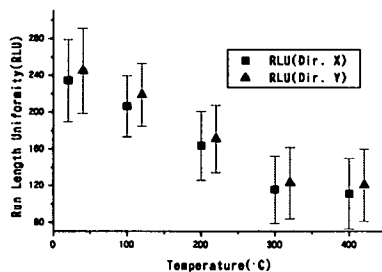


図7：温度とRLUの関係

SREとRLUは温度の上昇とともに減少している。低温の場合、ディンプルの大きさは小さい。そのため2次ディンプルなど大きさとあまり差が無い。つまり、短いランが多く、ランレングスの分布のばらつきは小さいため、SREとRLUは大きくなる。

一方、高温の場合、ディンプルの大きさは大きくなり、視野内に支配的になる。そしてディンプル以外の模様との大きさの差は大きくなる。従って、短いランは減り、ランレングスのばらつきは大きくなる。つまり、高温になるにつれSREとRLUは小さくなる。

以上のことからSREとRLUも延性破面の特徴を現していることがわかる。しかし、これらの値は主なディンプルとそれ以外の領域の関係を示している。従って、定性的な評価と一致するのはLREであり、より詳細な検討としてSREとRLUを併用することができる

3：粗さを用いた疲労破断面の評価
図3中の近似式は未破断と発熱した3本のデータを除き最小自乗法によるStromeyer型に近似した。この曲線は次式で表される。

$$\sigma_a = 32206 N_f^{-0.524} + 275 \quad (\text{MPa})$$

この曲線より求めた疲労限強度は 10^{10} サイクルと仮定した場合275MPaと推定される。

図4から破断面の一部にストライエーションが観察されている。ストライエーションの幅は約 $0.72\mu\text{m}$ であるが、回転曲げ試験のためき裂進展速度との関係は不明である。また、ストライエーションの周辺は試験中に反対側の破断面と接触したため平坦な破断面となっている。これは回転曲げ試験であり応力比が-1であることに起因している。このように試験片の反対側と接触したことにより破断面の特徴が消えてしまうことが実機の破断面では多く、粗さなどの数値からの応力推定が期待される。

巨視的観察では、応力振幅が高い場合、き裂は試験片表面近傍の複数箇所から発生し合体しながら破断に至っている。これに対し、応力振幅が低い場合は、ほぼ一部から発生しき裂進展していることがわかる。従って、巨視的な観察をした場合、応力振幅が高いと破断面の凹凸は大きくなる傾向がある。

しかしながら、図5に示すようにRaと応力振幅の傾向には逆の傾向がみられた。これは応力振幅が高い場合、破断面に圧縮応力が作用したとき破断面が反対側と接触して破損するケ

ースが、応力振幅が低い場合と比較して大きい。そのため、応力振幅が低い破面ではストライエーションがよく観察され、応力振幅の高い破断面ではあまり観察されなかった。そしてストライエーションは破断面上の微細な凹凸であることから、応力振幅が低くストライエーションが観察されやすい場合に、粗さが大きくなる傾向があると考えられる。

4: 破断面データベースの構築について

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

破断面の様相から破断荷重を推定するための技術について研究を実施した。特に1) ストレッチゾーン幅、2) ディンプルの大きさ、3) 疲労破面の粗さについて数値解析を行い破断荷重との関係について述べた。

また、特に一般的なパラメータである粗さに着目したうえで、破断面に関する情報を効率的に収めるデータベースを構築した。このデータベースを利用することで解析熟練者の知見を残し、初心者に対する解析支援に貢献することが可能である。

F. 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.

山際謙太, 高梨正祐, “破断面解析支援データベースの試作”, 検査技術, Vol. 11, No. 12, pp. 1-8, 2006年12月

山際謙太・高梨正祐, 破断面解析支援データベースの試作, ボイラ研究, No. 343, pp.16-24, 2007.

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.

K. Yamagiwa, M. Takanashi, “Development of fractography database system to support fracture surface analysis”, International Conference on Failure analysis II (ICEFAII), TORONTO, 2006 Sep.

山際謙太, 高梨正祐, “ランレンゲスを用いたディンプル破面の定量評価手法”, 日本機械学会2006年度年次大会(熊本), 2006年9月

山際謙太, 高梨正祐, “ランレンゲスを用いた延性破面の定量評価手法とTi高温引張試験破面への応用”, 日本材料学会フラクトグラフィシンポジウム(大阪), 2006年12月

G. 知的所有権の取得状況

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年
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年
山際謙太・高梨正祐	破断面解析支援データベースの試作	検査技術	Vol. 11, No. 12	pp. 1-8	2006年
山際謙太・高梨正祐	破断面解析支援データベースの試作	ボイラ研究	No. 343	pp. 16-24	2007年

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

原稿受付日 17. 7. 14

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

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收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の概念を、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

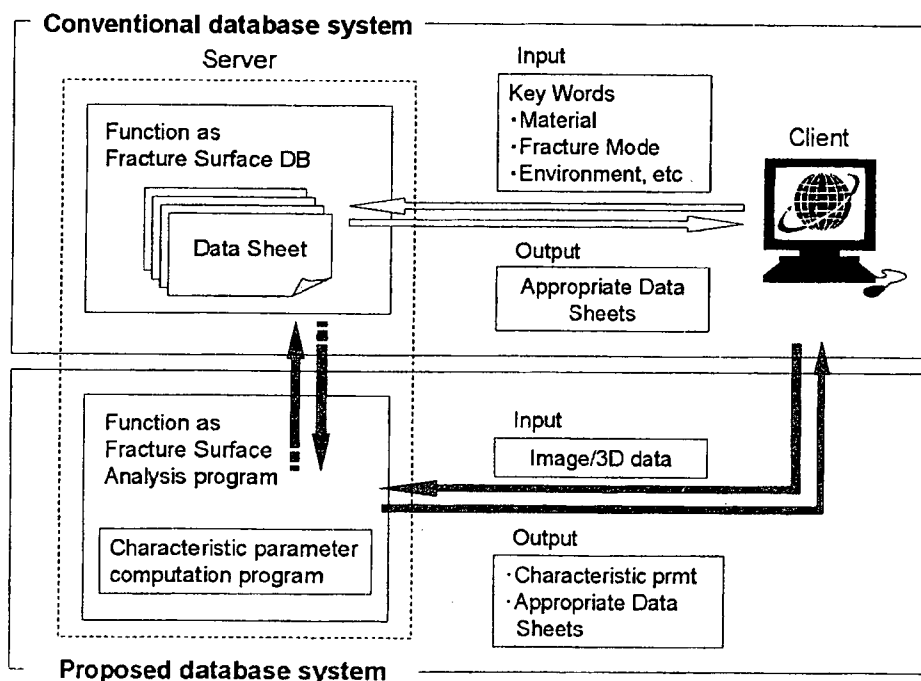


Fig. 1 Proposed database system compared with conventional database system.

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。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	
作業区	材料仕様
実験/実験	破面様式
破面の発生環境	
破面の発生の概要	
外観写真	参照...
	参照...
	参照...
	参照...
破面写真	参照... 観察倍率: データ間隔: <input type="text"/> μm
	参照... 観察倍率: データ間隔: <input type="text"/> μm
	参照... 観察倍率: データ間隔: <input type="text"/> μm
	参照... 観察倍率: 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	計算種類 <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 (Rt) <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"/> クルトシス (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 (Rmr) <input type="checkbox"/> 切断レベル差 (RÊ) <input type="checkbox"/> 相対負荷長さ率 (Rmr)
	負荷長さ率 Rmr1: <input type="text"/> Rmr2: <input type="text"/>
フラクタル次元解析	切断レベル: <input type="text"/> μm
類似データ検索	幅幅: <input type="text"/> %
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はほぼ同じである。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。

検索 データ登録

フラクグラフィデータベースシステム

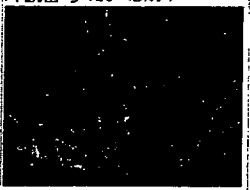
データ登録		データNo. FSDS0012																																																	
材料仕様	SUS316	破面生成の概要	応力振幅220MPaで、破断寿命は800000サイクルであった。本データは起点から1mmの位置を観察した結果である。																																																
実験	高サイクル疲労	破面生成																																																	
破面の発生環境	室温大気中で直径10mmの平滑丸棒試験片に対し完全両振り軸重制御疲労試験を実施した。	破面生成																																																	
外観写真	<p>外観番号 120 (BMP)</p> 																																																		
破面写真	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">破面番号 120 (BMP)</th> <th colspan="2">破面番号 121 (BMP)</th> <th colspan="2">破面番号 122 (BMP)</th> <th colspan="2">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> </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> </tr> <tr> <th colspan="2">データ間隔 (μm)</th> <th colspan="2">データ間隔 (μm)</th> <th colspan="2">データ間隔 (μm)</th> <th colspan="2">データ間隔 (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> </tr> <tr> <td colspan="2">1</td> <td colspan="2">0.2</td> <td colspan="2">0.1</td> <td colspan="2">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		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	データ間隔 (μm)		データ間隔 (μm)		データ間隔 (μm)		データ間隔 (μm)		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																																													
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																																												
データ間隔 (μm)		データ間隔 (μm)		データ間隔 (μm)		データ間隔 (μm)																																													
1200	900	1200	900	1200	900	1200	900																																												
1		0.2		0.1		0.05																																													
観察者のコメント	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

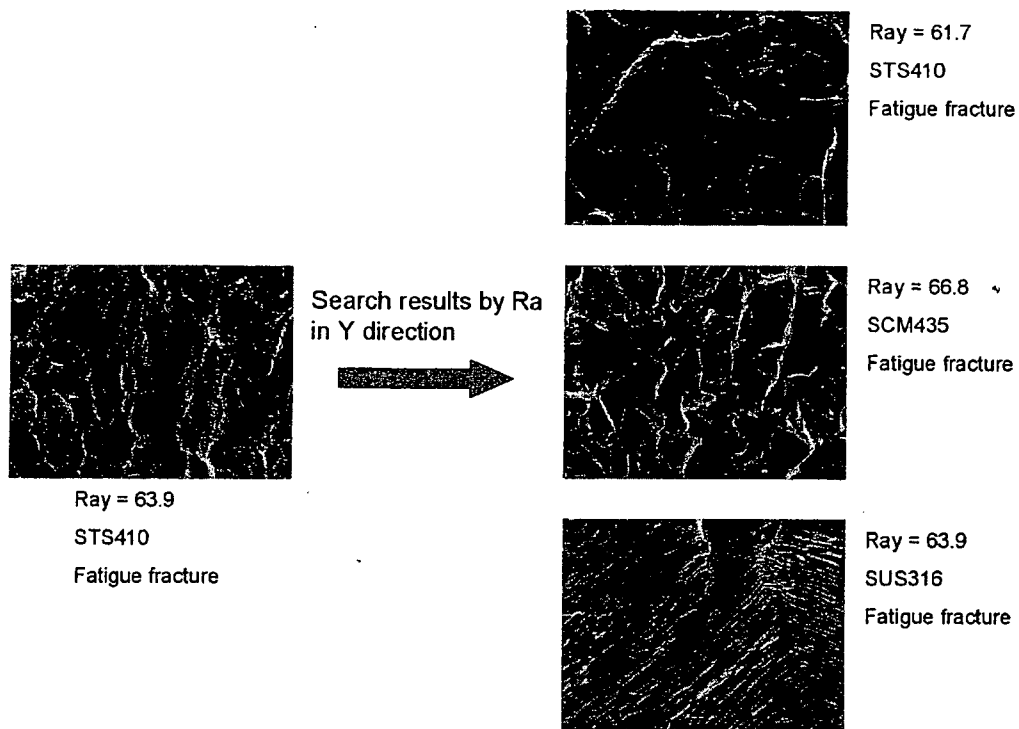


Fig. 4 Example of search results by this system.

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；“フラクトグラフィーと破面解析写真集”，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